

**PENINGKATAN AKURASI LINEAR TRANSDUCER
MENGUNAKAN GENETIC ALGORITHM DAN
GOLDEN RATIO SEGMENTATION**

DISERTASI

Oleh

PURWOWIBOWO

84 02 03 0016



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM PASCASARJANA BIDANG ILMU TEKNIK
UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

**PENINGKATAN AKURASI LINEAR TRANSDUCER
MENGUNAKAN GENETIC ALGORITHM DAN
GOLDEN RATIO SEGMENTATION**

DISERTASI

Oleh

PURWOWIBOWO
84 02 03 0016



**DISERTASI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI
PERSYARATAN PROGRAM DOKTOR BIDANG ILMU TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM PASCASARJANA BIDANG ILMU TEKNIK
UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa disertasi dengan judul:

PENINGKATAN AKURASI LINEAR TRANSDUCER MENGGUNAKAN GENETIC ALGORITHM DAN GOLDEN RATIO SEGMENTATION

yang dibuat untuk melengkapi persyaratan program Doktor Bidang Ilmu Teknik Pascasarjana Universitas Indonesia guna memperoleh gelar Doktor, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari disertasi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, Juli 2008



Purwowibowo
NPM 8402030016

PENGESAHAN

Disertasi dengan judul :

PENINGKATAN AKURASI LINEAR TRANSDUCER MENGGUNAKAN GENETIC ALGORITHM DAN GOLDEN RATIO SEGMENTATION

Disusun untuk melengkapi persyaratan program Doktor Bidang Ilmu Teknik
Pascasarjana Universitas Indonesia guna memperoleh gelar Doktor.

Disertasi ini disetujui untuk diajukan dalam Sidang Promosi.

Depok, Juli 2008
Menyetujui,

Ko-Promotor

Promotor



Dr. Ir. Wahidin Wahab, M.Sc
NIP. 130 702 176



Prof. Dr. Ir. Sardy S. M Eng Sc
NIP. 130 517 309

UCAPAN TERIMAKASIH

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas Berkat dan Anugrah-Nya yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan program Doktor di Program Studi Teknik Elektro. Program Pascasarjana Bidang Ilmu Teknik. Universitas Indonesia.

Selanjutnya penulis menyampaikan rasa hormat dan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Sardy S. M.Eng.Sc atas kesediaannya sebagai Promotor.
2. Dr. Ir. Wahidin Wahab M.Sc atas kesediaannya sebagai Kopromotor.
3. Prof. Dr. der Soz. Gumilar Rusliwa Somantri. Rektor Universitas Indonesia.
4. Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto, M.Eng. Dekan Fakultas Teknik. Universitas Indonesia.
5. Dr. Ir. Muhamad Asvial, M.Eng. Ketua Departemen Elektro. Fakultas Teknik. Universitas Indonesia.
6. Ketua dan Deputi Bidang Sarana Ilmiah. Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang telah memberikan ijin studi.
7. Kepala Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi LIPI atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menempuh studi S3.
8. Rekan-rekan kerja di Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi LIPI atas bantuan dan dukungannya dalam penelitian ini.

Akhir kata penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada karyawan dan karyawan Fakultas Teknik Universitas Indonesia serta seluruh pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan selama menyelesaikan pendidikan program doktor di Universitas Indonesia.

Depok, Juli 2008

Purwowibowo
NPM 8402030016

Purwowibowo
NPM 8402030016
Program Studi Teknik Elektro

Promotor
Prof. Dr. Ir. Sardy S, M.Eng.Sc
Ko-promotor
Dr. Ir. Wahidin Wahab, M.Sc

PENINGKATAN AKURASI LINEAR TRANSDUCER MENGGUNAKAN GENETIC ALGORITHM DAN GOLDEN RATIO SEGMENTATION

ABSTRAK

Akurasi adalah nilai yang menyatakan tingkat kebenaran hasil pengukuran sesuai dengan standard. Untuk mengetahui akurasi sebuah *linear transducer* diperlukan kalibrasi. Namun sering ditemukan, setelah dilakukan kalibrasi, akurasinya sudah keluar dari batas toleransi yang diijinkan, sehingga tidak layak digunakan lagi. Agar dapat digunakan kembali, perlu dilakukan perbaikan, sayangnya perbaikan secara *hardware* sangat mahal. Disini disampaikan rancangan metode perbaikan akurasi menggunakan *software*, dengan memanfaatkan data kalibrasi yang diproses dengan *genetic algorithm*. Keuntungannya adalah, hanya dengan memasukan data kalibrasi ke *software* untuk diolah menjadi parameter koreksi. Kemudian diprogramkan ke *microcontroller* sebagai kompensator maka akan segera diperoleh hasil peningkatan akurasinya.

Dalam metode peningkatan akurasi ini, *linear transducer* didekati hanya dengan monomial dengan membagi sepanjang *linear transducer* menjadi segmen-segmen kecil dengan suatu algoritma khusus, kemudian dibentuk *chromosome* untuk *monomial* pada *genetic algorithm* (GA) dengan parameternya berupa bilangan *integer* untuk memudahkan pemrograman pada *microcontroller*. Kemudian melakukan modifikasi internal GA khususnya pada *selection* dan *crossover operator*. Dalam penelitian ini *selection operator* yang digunakan adalah *stochastic universal sampling*, dan *crossover operator* adalah *multi point*, ternyata kombinasi kedua operator tersebut menghasilkan nilai *sum of squares error* (SSE) terbaik, sekitar 68.6% dari SSE rata rata.

Langkah berikutnya menerapkan metode elitisasi dengan memasukan kembali sebagian *elite chromosome* ke populasi generasi berikutnya. Dari percobaan diperoleh bahwa dengan 10% *elite chromosome* menghasilkan nilai *root mean squared* (RMS) lebih baik yaitu sekitar 38.9 % dari RMS rata rata.

Untuk meningkatkan kinerja GA dilakukan segmentasi sepanjang *linear transducer*. Segmentasi adalah membatasi rentang kerja dengan membagi daerah kerja menjadi beberapa segmen kecil menggunakan nilai *golden ratio* (GR). Hasilnya ternyata, *golden ratio segmentation method* mempunyai kinerja lebih tinggi bila dibandingkan dengan *hierarchical segmentation method*. Nilai RMS menjadi sekitar 49.0% dan jumlah segmen sekitar 85.9%.

Selanjutnya untuk mengetahui kinerja metode peningkatan akurasi yang merupakan gabungan dari *genetic algorithm* dan *golden ratio* (GA-GR) dilakukan simulasi. Tujuannya adalah untuk meyakinkan bahwa algoritma yang dikembangkan telah berjalan sesuai dengan tujuan penelitian. Dalam simulasi, GA-GR digunakan untuk *tracking* kurva karakteristik *linear transducer*. Hasilnya, nilai RMS dari metode GA-GR sekitar 50 - 900 kali lebih baik dari pada menggunakan polinomial.

Kemudian untuk mengetahui hasil nyata metode GA-GR dalam meningkatkan akurasi, maka dilakukan percobaan pada *linear transducer* yang dipasang pada *mechanical positioning system*, lalu dilakukan kalibrasi menggunakan standard *laser interferometer system calibrator* dan prosedur *British Standard BS 4656*. Hasilnya diperoleh bahwa metode GA-GR dapat meningkatkan akurasi sampai dengan 45.1%.

Kata kunci: Accuracy, Linear Transducer, Genetic Algorithm, Golden Ratio.

Purwowibowo
NPM 8402030016
Program Studi Teknik Elektro

Promotor
Prof. Dr. Ir. Sardy S, M.Eng.Sc
Co-Promotor
Dr. Ir. Wahidin Wahab, M.Sc

THE INCREASE OF ACCURACY OF LINEAR TRANSDUCER USING GENETIC ALGORITHM AND GOLDEN RATIO SEGMENTATION

ABSTRACT

Accuracy is the value stating the true level of a measurement result according to the standard. To find out the accuracy of linear transducer, calibration is required. However, it is often found that after calibration is done, the accuracy is out of the permitted tolerance limit. Therefore, it is no longer appropriate to be used. In order to make it useable again, repair is needed to be done but hardware repair is definitely very costly. This dissertation designs a method to increase accuracy by using software, by utilizing calibration data processed by genetic algorithm (GA). The advantage is that it simply needs to enter the calibration data in the software to be processed as correction parameter and the procedure is to be programmed in the microcontroller as the compensator. Then it will soon get the result of the accuracy increment as required.

In this method, the linear transducer is tracked by using only monomial form each small segment of the transducer along its length with a special method of segmenting the linear transducer. Then using the GA to find the parameters of the monomial by putting them into the form of chromosome. To ease the programming in the microcontroller, the parameter values only use integer numbers. The next step the GA internal mechanism is modified, especially in the selection and crossover operators. In this research, the selection operator used is stochastic universal sampling, while the crossover operator is multi point because the combination of those two operators produces the best sum of squares error (SSE), around 68.6% from the average SSE.

The following step is to apply the elitism method by re-entering a subset of elite chromosomes to the next generation population. From the experiments, it can be seen that by re entering 10% of elite chromosomes it will produce better root mean squared (RMS) value, which is around 38.9% from the average RMS.

To increase the GA performance, segmentation a long the length of the linear transducer is done. Segmentation means limiting the work span by dividing the working area into several segments using golden ratio (GR). The result shown that, the golden ratio segmentation method has a higher performance if compared to that with the hierarchical segmentation method. The value of RMS becomes around 49.0% and the number of segments is around 85.9%

Furthermore, to find out the performance of the accuracy increase method which is a combination of genetic algorithm and golden ratio (GA-GR), simulation is conducted. The aim is to make is to make sure that the development algorithm runs in accordance with the objective of the research. In the simulation, GA-GR is used for tracking the curve characteristics of linear transducer. The result is the value of RMS from the GA-GR method is around 50 to 900 times better than using polynomial.

Moreover, to find out the real result of the GA-GR method in increasing accuracy, an experiment on linear transducer on the mechanical positioning system is conducted, using the standard laser interferometer system calibrator and the procedure of British Standard BS 4656. The result obtained is that the GA-GR method can increase accuracy up to 45.1%.

Keywords: Accuracy, Linear Transducer, Genetic Algorithm, Golden Ratio.

DAFTAR ISI

JUDUL	ii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iii
PENGESAHAN	iv
UCAPAN TERIMAKASIH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
DAFTAR SINGKATAN	xii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tinjauan Pustaka	2
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Metode Penelitian	6
1.5 Batasan Penelitian	8
1.6 Kontribusi Penelitian	9
1.7 Sistematika Penulisan	10
BAB II. LINEAR TRANSDUCER	12
2.1 Akurasi	12
2.2 Prinsip Kerja	14
2.3 Konstruksi	15
2.4 Sinyal Interpolation	16
2.5 Geometric Properties	18
2.5.1 Linear Movement	18
2.5.2 Straightness	19
2.5.3 Surface Roughness	20
2.5.4 Parallelism	21
BAB III GENETIC ALGORITHM DAN GOLDEN RATIO	22
3.1 Genetic Algorithm	23
3.1.1 Population and Chromosome	24
3.1.2 Selection	25
3.1.3 Crossover	26
3.1.4 Mutation	27
3.1.5 Fitness Function	27
3.1.6 Termination	28
3.2 Golden Ratio	29
3.2.1 Golden Ratio pada Alam	30
3.2.2 Ekspresi Numerik Golden Ratio	31

BAB IV PERANCANGAN METODE PENINGKATAN AKURASI ...	32
4.1 Perancangan	33
4.2 Algoritma	34
4.3 Segmentasi	35
4.4 Internal Configuration	39
4.5 Elite Chromosome	42
4.6 Simulasi	47
4.7 Microcontroller	55
4.8 Pengujian	57
4.9 Pengolahan Data	60
4.10 Analisa	67
 BAB V KESIMPULAN	 69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Penelitian Lanjut	71
 DAFTAR ACUAN	 72
 LAMPIRAN	 78
1. Daftar Publikasi	78
2. Grafik Hasil Simulasi	79
3. Program Matlab	83
4. Daftar Parameter Kompensasi	105
5. Daftar Riwayat Hidup	108

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Diagram Blok Metode Meningkatkan Akurasi	5
Gambar 1.2	Struktur Kegiatan Penelitian	8
Gambar 1.3	Sistematika Penulisan	11
Gambar 2.1	Akurasi	13
Gambar 2.2	Bagian Linear Transducer	14
Gambar 2.3	Bentuk Linear Transducer	16
Gambar 2.4	Interpolator	17
Gambar 2.5	Linear Transducer Error	18
Gambar 2.6	Straightness	19
Gambar 2.7	Surface Roughness	20
Gambar 2.8	Parallelism	21
Gambar 3.1	Diagram Alir Genetic Algorithm	24
Gambar 3.2	Roulette Wheel	25
Gambar 3.3	Stochastic Universal Sampling	26
Gambar 3.4	Crossover	27
Gambar 4.1	Chromosome	34
Gambar 4.2.	Algoritma Pencarian Parameter Kompensasi	35
Gambar 4.3	Segmentasi	36
Gambar 4.4	Algoritma Proses Segmentasi	37
Gambar 4.5	Kinerja Golden Ratio	39
Gambar 4.6	Grafik Progress Konfigurasi Operator GA	42
Gambar 4.7	Elitisasi	43
Gambar 4.8	GA-Golden Ratio Tanpa Elite Chromosome	44
Gambar 4.9	GA-Golden Ratio Dengan 100% Elite Chromosome	45
Gambar 4.10	GA-Golden Ratio 10%-90% Elite Chromosome	45
Gambar 4.11	Pengaruh Elitisasi terhadap Kinerja GA	47
Gambar 4.12	Simulasi Data 1	50
Gambar 4.13	Simulasi Data 2	50
Gambar 4.14	Simulasi Data 3	51
Gambar 4.15	Simulasi Data 4	51
Gambar 4.16	Perbandingan Nilai RMS GA-GR dan Polinomial	52
Gambar 4.17	Grafik Simulasi Peningkatan Akurasi Data 1	53
Gambar 4.18	Grafik Simulasi Peningkatan Akurasi Data 2	53
Gambar 4.19	Grafik Simulasi Peningkatan Akurasi Data 3	54
Gambar 4.20	Grafik Simulasi Peningkatan Akurasi Data 4	54
Gambar 4.21.	Skema Rangkaian Mikrokontroler	56
Gambar 4.22.	Mikrokontroler	57
Gambar 4.23	Skema Setup Pengujian	58
Gambar 4.24	Sistem Mekanik	59
Gambar 4.25	Eksperimen di Laboratorium	60
Gambar 4.26	Karakteristik Linear Transducer tanpa Kompensasi	63
Gambar 4.27	Karakteristik Linear Transducer dengan Kompensasi ..	65
Gambar 4.28	Grafik Kepresisian dan Simapangan Transducer	66


DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Perbandingan Kinerja Golden Ratio Dengan Hirarki Kuadrat.....	38
Tabel 4.2	Perbandingan Kualitas Konfigurasi	41
Tabel 4.3	Waktu Operasi Dan Maksimum Generasi Jenuh	42
Tabel 4.4	Evaluasi Pengaruh Jumlah Elite Chromosome Pada Genetic Algorithm	46
Tabel 4.5	Data Simulasi	48
Tabel 4.6	Perbandingan Hasil Simulasi	52
Tabel 4.7	Perbandingan Peningkatan Nilai RMS Antara GA-GR Dan Data Kalibrasi	55
Tabel 4.8	Karakteristik Transducer Tanpa Kompensasi	62
Tabel 4.9	Karakteristik Transducer Dengan Kompensasi	64
Tabel 4.10	Hasil Peningkatan Akurasi	68

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Daftar Publikasi	78
Lampiran 2	Grafik Hasil Simulasi	79
Lampiran 3	Program Matlab	83
Lampiran 4	Daftar Parameter Kompensasi	105
Lampiran 5	Daftar Riwayat Hidup	108

DAFTAR SINGKATAN



GA	Genetic Algorithm
GR	Golden Ratio
MP	Multi Point
RMS	Root Mean Square
RW	Roulette Wheel
SF	Shuffle
SSE	Sum of Squares Error
SUS	Stochastic Universal Sampling

BAB I

PENDAHULUAN

Bab pendahuluan ini menguraikan latar belakang dari penelitian ini dan tujuannya yaitu untuk mendapatkan metode peningkatan akurasi pada *linear transducer*. Metodenya melakukan kompensasi dengan menggabungkan *genetic algorithm* dan *golden ratio segmentation*. Dikemukakan pula batasan dalam melakukan penelitian dan kontribusi ilmiah yang diperoleh dalam penelitian ini.

1.1 Latar Belakang

Didalam industri banyak ditemui peralatan dan mesin yang menggunakan *mechanical positioning system* yang dilengkapi dengan *linear transducer* seperti *coordinate measuring machine*, *layout machine*, alat ukur *parameter tool*, *profile projector*, mikroskop, mesin perkakas dan sebagainya. Dalam bidang ini peranan instrumentasi dan kontrol sangat penting. Pada desain peralatan sasaran pokok adalah kepresisiannya yaitu kemampuan sistem untuk menunjukkan nilai posisi yang sama. Pada saat ini perangkat instrumen dan kontrol telah mampu menunjukkan kepresisian tinggi untuk mengukur besaran panjang dan mengendalikannya. Namun belum banyak yang mengkhususkan dalam peningkatan akurasi. Peralatan dan mesin ketika dilakukan kalibrasi, sering ditemui data yang dihasilkan pada peraga tidak akurat, bahkan keluar dari toleransi yang diijinkan. Nilai yang ditampilkan menyimpang dari nilai referensi yang ditunjukkan oleh kalibrator.

Oleh karena itu untuk meningkatkan akurasi, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan metode meningkatkan akurasi *linear transducer* sehingga dapat menjamin nilai yang dihasilkan sesuai standard.

Dari kegiatan penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya pada bidang instrumentasi. Metode yang diperoleh untuk meningkatkan akurasi pada *transducer* dapat dimanfaatkan dalam proses kalibrasi pada instrumen ukur dan sistem kendali untuk memperoleh kinerja sistem yang lebih akurat yang *traceable* ke besaran standard panjang.

1.2 Tinjauan Pustaka

Pada nilai dari sesuatu data pengukuran selalu mengandung ketidakakuratan. Oleh karena itu banyak peneliti melakukan studi tentang metode optimasi untuk mendapatkan kinerja terbaik dan handal untuk meningkatkan keakuratan tersebut. Menurut Jeffrey [1] berkaitan dengan optimasi adalah masalah unik dimana tidak ada satu metode baku yang berlaku umum untuk berbagai persoalan. Optimasi peningkatan akurasi adalah usaha sistematis untuk memperoleh kinerja sistem mendekati nilai yang sesuai dengan standard.

Seiring kemajuan komputer optimasi dengan teknik kompensasi menggunakan piranti lunak semakin populer. Kyoung [2] dan Chen [3] meningkatkan akurasi mesin melalui model *error*, dimana Kyoung menggunakan *volumetric error* model untuk mengatasi pengaruh *backlash* pada *machine tool*. Sedangkan Chen memakai metode *time variant volumetric error* untuk membuat *realtime error compensation*. Beberapa peneliti membangun teknik *adaptive error compensation* berbasis regresi seperti Hooman [4] Soons [5] dan Mou [6]. Fokusnya adalah mengidentifikasi *residual systematic errors* dengan melakukan pengukuran berkala. Data diproses dengan *statistical regression methods* dan *inverse kinematic* serta *recursive tuning algorithm* untuk mengkompensasi *residual error* tersebut sehingga akurasi mesin dapat ditingkatkan.

Dong [7], Mou [8] dan Jeng [9] mengembangkan model kompensasi menggunakan *neural network*. Disisi lain menurut Yang [10] teknik kompensasi regresi dan *neural network* mempunyai kelemahan yaitu memerlukan jumlah data eksperimen yang banyak untuk pemodelan, sehingga membutuhkan waktu kalibrasi yang lebih lama. Cho [11] membuat metode *machining error compensation* menggunakan *radial basis function* pada *artificial neural network* (ANN) yang diajarkan dari *inspection database*. Cho menyatakan dengan metode ini *machine error* dapat dikurangi. Liu [12] mengusulkan sebuah instrumen yang dilengkapi dengan *linear transducer* dan *rotary encoder* yang keduanya digunakan untuk sebagai *error compensation* pada *numerical control*.

Beberapa penelitian telah berhasil mendapatkan kinerja sistem yang optimal. Shao [13] mengembangkan konsep baru dalam pengukuran dimensi ultra

presisi, yaitu dengan menganalisa karakter fenomena fisik berupa sinyal elektrik yang dibandingkan dengan jarak pergeseran potensiometer yang dilihat dari *nano scope*, melalui cara ini pengukuran dimensi presisi tinggi dapat dilakukan. Kemudian Shuichi [14] berhasil membuat sistem kendali dengan *feed-forward* PID yang diaplikasikan pada *precision positioning motion stage*. Paul [15] dengan *fourth-order feedforward* dan Xing [16] dengan *robust adaptive control* untuk mencapai *tracking precision*. Myeong [17] berhasil membuat *machine surface error compensation* menggunakan *inspection database* yang diperoleh dari *measurement system in profile milling*. Selanjutnya digunakan untuk mengendalikan *tool path* melalui *iterative algorithm* sehingga diperoleh peningkatan akurasi benda kerja. Sevaux [18] menggunakan *genetic algorithm* untuk melakukan *curve fitting* pada optimasi desain.

Pada *mechanical positioning system*, menurut Frederick [19] akurasinya terutama dipengaruhi oleh *realtime sensor feedback*. Dimana data umpan balik ini merupakan validasi dari target posisi. Apabila umpan balik memberikan nilai masukan salah maka secara keseluruhan kerja peralatan menjadi keliru. Pada *mechanical positioning system* komponen utama umpan balik adalah *linear transducer* yang digunakan untuk memberikan masukan data posisi *realtime* ke instrumen atau sistem kendali.

Rames [20], Lin.E [21], Huang [22], Lin.S [23] mengatakan kontributor terbesar ketidakakuratan posisi adalah kesalahan geometris pada *linear transducer* yang dipasang pada sistem mekanik. Dimana ketidakakuratan merupakan perbedaan posisi antara keadaan ideal yang mengacu kepada standard panjang dan posisi sebenarnya saat dilakukan kalibrasi. Purwo[24] juga telah melakukan penelitian bahwa akurasi posisi, selain dipengaruhi oleh kesalahan geometris juga dipengaruhi oleh kesalahan termoelastik karena perubahan temperatur. Teknik ini secara umum berdampak positif terutama pada daerah posisi dekat dengan titik referensi. Akan tetapi untuk daerah yang jauh dari titik referensi, kompensasi termolastis belum optimal, hal ini disebabkan karena pengaruh kesalahan lain lebih dominan daripada kesalahan thermoelastis seperti kesalahan geometris, defleksi struktur dan sejenisnya.

Ding [25] dan Hojjat [26] telah dilakukan penelitian kompensasi

menggunakan *genetic algorithm*. Ding mengatakan dengan *genetic algorithm* dapat mengurangi proses konvergensi ke lokal optima artinya *genetic algorithm* akan diperoleh global optima. *Genetic algorithm* juga banyak digunakan pada *machine learning* dan untuk pemodelan *neural network* baik struktur maupun adaptasi parameternya.

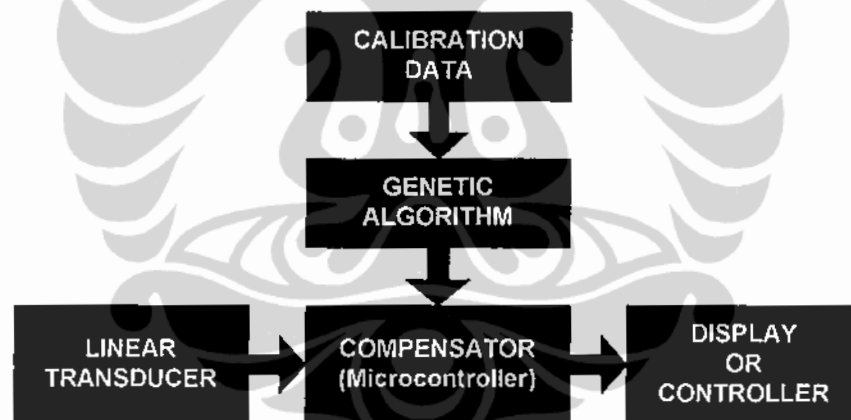
Purwo [27] telah melakukan penelitian peningkatan akurasi pada alat monitor posisi sumbu mesin perkakas dengan menggunakan polinomial. Hasilnya bila dilihat dari persentase kenaikan akurasi cukup signifikan akan tetapi nilai akurasinya masih terlalu rendah sehingga masih perlu penyempurnaan lebih lanjut.

Disisi lain Kun [28] menggunakan model kesalahan parametrik berdasarkan artifak 3D dan fungsi polinomial untuk memodelkan kesalahan dimensional, selanjutnya dibuat piranti lunak kompensasi untuk meningkatkan akurasi *rapid prototyping machine*. Yin [29] mengembangkan *offline software compensation* pada *surface fitting* yang diaplikasikan pada *Coordinate Measuring Machine* (CMM). Menurut Chen [30] *neural network* memberikan metode yang sesuai untuk memodelkan hubungan proses *non linear* dan Suen [31] mengatakan bahwa *neural network* telah digunakan secara luas untuk aplikasi *curve-fitting*, dimana *neural network* dipakai untuk mengatur koefisien regresinya.

Menurut Frederick [19], Donmez [32] dan Yee [33] terdapat tiga pendekatan teknik peningkatan akurasi sistem yaitu: Pertama, dengan menginjeksi langsung ke *servo control* sebagai sinyal analog. Hal ini dimungkinkan bila sistem instrumen berupa piranti keras yang dapat ditambahkan sinyal langsung, apabila berupa algoritma yang disimpan pada piranti lunak maka hal ini tidak dapat dilakukan. Kedua, dengan menggunakan *port digital* untuk berkomunikasi dengan sistem instrumen yaitu dengan menulis ke register tertentu yang akan dibaca oleh kontroler. Teknik ini dapat dilakukan bila kontroler *open system* dan dilengkapi saluran komunikasi serta diketahui format protokol komunikasinya. Ketiga dengan menyisipkan *real time error compensation* antara sensor dan kontroler. Perangkat ini secara independen melakukan koreksi tanpa mengganggu sinyal data dari sensor ke kontroler. Perhitungan kompensasi berdasarkan pada model pengukuran alat dan sensor dari data kalibrasi. Keuntungan cara ini adalah transparan terhadap sistem kendali level atasnya. Tidak perlu penanganan khusus

untuk menjalankan perangkat ini kecuali pengisian parameter koreksinya.

Berdasarkan studi pustaka tersebut dengan menggabungkan beberapa ide dari hasil-hasil penelitian yang telah dihasilkan oleh para peneliti sebelumnya, maka penelitian yang akan dilakukan fokusnya adalah menemukan metode peningkatan akurasi, khususnya untuk *linear transducer* dengan memanfaatkan data kalibrasi dan koreksi dilakukan dengan menyisipkannya *error compensator* antara *transducer* dan *display* posisi. Dalam penelitian ini *genetic algorithm* dipilih untuk mencari parameter kompensasi karena mempunyai kemampuan mendapatkan *global optima* dimana hal ini merupakan keunggulan dari *genetic algorithm*. Selanjutnya setelah sistem terbangun, maka untuk validasinya dilakukan kalibrasi ulang menggunakan standard panjang dan dibandingkan akurasi antara sebelum dan sesudah dilakukan kompensasi. Adapun diagram blok sistem untuk meningkatkan akurasi *linear transducer* yang diteliti terdapat pada gambar 1.1



Gambar 1.1. Diagram Blok Metode Meningkatkan Akurasi

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan metode peningkatan akurasi pada *linear transducer* yang digunakan pada *mechanical positioning system*. Prinsip dari penelitian ini adalah menemukan metode sistematis untuk mendapatkan koreksi yang terbaik dengan memanfaatkan kemampuan *global searching* dari *genetic algorithm*. *Genetic algorithm* digunakan untuk mendapatkan parameter kompensasi bilangan *integer* setiap *monomial* atau segmen. Selanjutnya untuk mendapatkan akurasi tinggi dilakukan segmentasi

dengan menggunakan *golden ratio*. Tujuan menggunakan bilangan *integer* adalah memudahkan implementasi metode meningkatkan akurasi *linear transducer* pada *microcontroller*.

1.4 Metode Penelitian

Pertama membangun *genetic algorithm* yang dapat menghasilkan parameter kompensasi tersebut dan dilakukan pengujian beberapa konfigurasi untuk mendapatkan kinerja terbaik yaitu operator *selection* dan *crossover*. Operator *selection* dipilih *roulette wheel* dan *stochastic universal sampling* sedangkan operator *crossover* adalah *multi point* dan *shuffle* karena operator tersebut secara umum sama sama memberikan kinerja baik tetapi perlu dilakukan pengujian untuk memilih operator yang memberikan kinerja paling tinggi, khususnya dalam menangani pencarian bilangan *integer*. Evaluasi kinerja dilakukan oleh *fitness function* berdasarkan *sum of squares error (SSE)*, dimana semakin kecil nilai SSE berarti semakin baik kinerja operatornya.

Kemudian untuk meningkat kualitas dan konsistensi hasil *searching* dari *genetic algorithm* maka ditambahkan metode elitisasi, dimana sebagian *elite chromosome* dimasukkan kembali ke populasi generasi berikutnya. Dengan cara ini diperoleh kecepatan konvergensi menuju solusi optimum lebih baik dibandingkan tanpa elitisasi.

Selanjutnya untuk menghasilkan peningkatan akurasi yang lebih baik dilakukan segmentasi, karena dengan satu segmen yang digunakan untuk sepanjang *linier transducer* hasilnya kurang akurat. Segmentasi adalah membagi daerah yang akan dioptimasi sepanjang *linear transducer* menjadi beberapa bagian. Pembagian ini menggunakan nilai dari *golden ratio* dan kemudian setiap segmen diproses oleh *genetic algorithm* untuk mendapatkan parameter bilangan *integer*. Jadi fungsi *golden ratio* hanya membagi daerah kerja saja sedangkan untuk mendapatkan parameter bilangan integer tetap dilakukan oleh *genetic algoritihm*. Proses segmentasi dilakukan oleh program komputer yang disatukan dengan program *genetic algorithm*. Sehingga sepanjang *linier transducer* akan diestimasi akurasinya dengan beberapa *monomial* yang membentuk sebuah rantai yang saling terhubung.

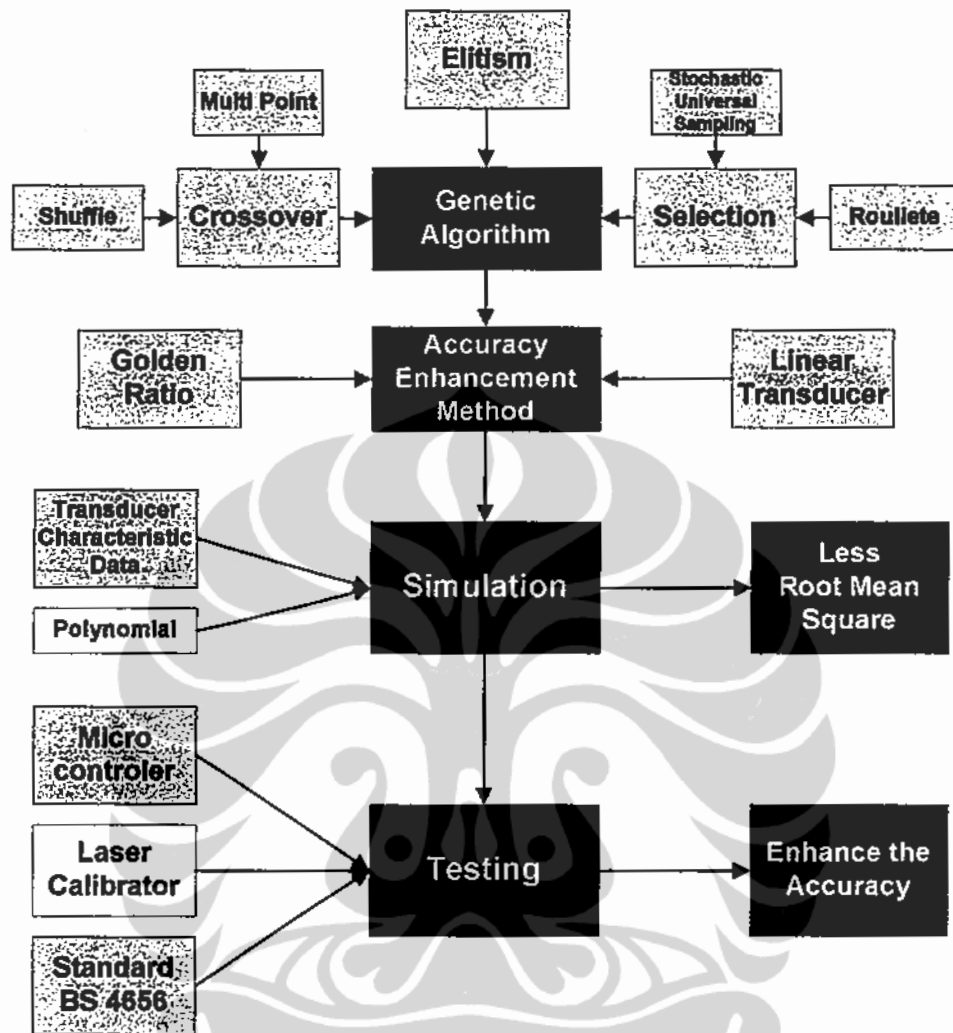
Untuk evaluasi setiap *monomial* digunakan fungsi kelayakan berdasarkan

sum of squares error (SSE). Apabila dalam operasinya satu *monomial* belum memenuhi kriteria kelayakan maka dilakukan segmentasi kembali dengan menggunakan *golden ratio* menjadi beberapa *monomial* baru sampai seluruh rentang kerja dari *linear transducer* memenuhi kriteria fungsi kelayakan.

Dalam penelitian ini kegiatan dibagi menjadi beberapa kegiatan yaitu kegiatan penelitian bersifat analisis dengan melakukan simulasi di komputer dan implementasi dengan pengukuran langsung pada *mechanical positioning system*. Kegiatan analisis adalah untuk analisa proses peningkatan akurasi dengan memanfaatkan data pengukuran. Adapun sasarannya adalah untuk memperoleh metode terbaik guna mendapatkan koefisien bilangan *integer* dari *genetic algorithm* dan titik potong antara masing masing *monomial* dengan menggunakan *golden ratio*. Hasil simulasi juga dibandingkan dengan polinomial untuk mengetahui seberapa baik hasilnya.

Sedang kegiatan yang bersifat implementasi adalah kegiatan yang langsung untuk proses peningkatan akurasi *linear transducer* yaitu dengan melakukan pengujian, kalibrasi dan kompensasi. Sasarannya adalah untuk validasi metode yang dihasilkan pada proses analisa sebelumnya. Langkahnya adalah koefisien bilangan *integer* dari proses simulasi dimasukan ke dalam *microcontroller* untuk melakukan koreksi terhadap kesalahan posisi *linear transducer*. Kemudian dilakukan kalibrasi menurut prosedur *British Standard 4656* dan sebagai referensi posisi digunakan *laser interferometer calibrator*. Melalui kalibrasi ini dapat diketahui hasil peningkatan akurasi dengan membandingkan akurasi sebelum dan sesudah menggunakan metoda yang telah diteliti.

Dalam penelitian ini, perangkat utama yang digunakan adalah komputer yang dilengkapi dengan piranti lunak Matlab dan *genetic algorithm library* dari *Departement of Automatic Control and System Engineering of The University of Sheffield, UK*. <http://www.shef.ac.uk/acse/research/ecrg/gat.html>. Kemudian *linear transducer* yang menggunakan adalah LS303 merk Haidenhain dan *laser interferometer calibrator* merk Renishaw tipe ML 10. Adapun struktur kegiatan penelitian ini dapat dilihat pada gambar 1.2



Gambar 1.2. Struktur Kegiatan Penelitian

1.5 Batasan Penelitian

Pada penelitian ini dikembangkan sebuah metode peningkatan akurasi *linear transducer* menggunakan *genetic algorithm* dan segmentasi dengan *golden ratio*. *Genetic algorithm* digunakan untuk mendapatkan parameter kompensasi dengan masukan data kalibrasi, sedangkan *golden ratio* dipakai oleh *genetic algorithm* secara internal pada fungsi kelayakan untuk memperoleh titik potong terbaik, untuk mendapatkan peningkatan akurasi *linear transducer*.

Dalam simulasi perangkat yang digunakan adalah sebuah *personal computer* Pentium 4 speed 3.2GHz dan RAM 1GB dengan operating system Windows XP. Untuk program *software* yang digunakan adalah Matlab dengan *genetic algorithm library* dari *University of Sheffield, UK*.

Metode yang dikembangkan didasarkan pada teknik kompensasi yang difokuskan pada *geometric error compensation*. Parameter kompensasi dari GA dipakai oleh piranti lunak yang dimasukkan pada *microcontroller*, dimana *microcontroller* tersebut mendapatkan sinyal masukan data digital dari *linear transducer* dan langsung melakukan kompensasi.

Dalam penelitian ini dilakukan pembatasan masalah berkaitan dengan fasilitas peralatan percobaan sebagai berikut:

- *Linear transducer* merk Haidenhain type LS303 yang digunakan jenis optik dengan panjang langkah efektif 700 mm.
- *Linear transducer* dipasang pada *mechanical positioning system*.
- Kalibrasi dilakukan pada temperatur ruang.

1.6 Kontribusi Penelitian

Beberapa kontribusi orisinal dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kontribusi pertama adalah pengembangan metode peningkatan akurasi *linear transducer* menggunakan *genetic algorithm* dengan menentukan konfigurasi *internal genetic algorithm* untuk menjaga proses evolusi selalu konvergen untuk mendapatkan parameter kompensasi yang terbaik. Konfigurasi meliputi penentuan operator *selection* dalam menentukan *chromosome* unggulan. Operator *crossover* dalam reproduksi *offspring* dan operator *mutation* untuk memperluas kemungkinan mendapatkan *chromosome* lain yang lebih baik tanpa kehilangan sifat genetiknya. Konfigurasi juga dilakukan pada elitisasi *chromosome* untuk mempercepat proses konvergensi.
2. Kontribusi kedua adalah penerapan *golden ratio* untuk penentuan batas antara segmen *monomial*. Segmentasi dilakukan untuk mendapatkan akurasi tinggi pada *linear transducer* dengan tetap menggunakan bilangan *integer* sebagai parameter kompensasi. Segmentasi mengacu pada *absolute reference mark* yang terdapat pada *linear transducer*. Segmentasi dengan *golden ratio* memberikan rentang batas segmen yang bervariasi sesuai dengan kontur karakteristik *transducer* dan menjaga akurasinya dalam toleransi yang diinginkan.

3. Kontribusi ketiga adalah dalam penelitian ini diperkenalkan penerapan metode kompensasi menggunakan *microcontroller*. Teknik yang digunakan adalah dengan menyisipkan *microcontroller* diantara *transducer* dan antarmuka tepatnya diantara modul interpolator dan pencacah. Keuntungan cara ini, sistem kompensasi transparan dan independent terhadap *existing system*. *Microcontroller* melakukan kompensasi secara langsung pada sinyal input sebelum dikirim ke antarmuka *digital readout*. Kompensasi atau koreksi menggunakan parameter yang dihasilkan oleh *genetic algorithm* dan *golden ratio*.

1.7 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan penelitian ini terdiri dari 5 bab. Bab pertama pendahuluan yang berisi tentang latar belakang penelitian, tinjauan pustaka dari literatur yang relevan yang mendukung penelitian ini. Dalam bab ini juga disebutkan tujuan, Metode dan batasan penelitian serta kontribusi dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

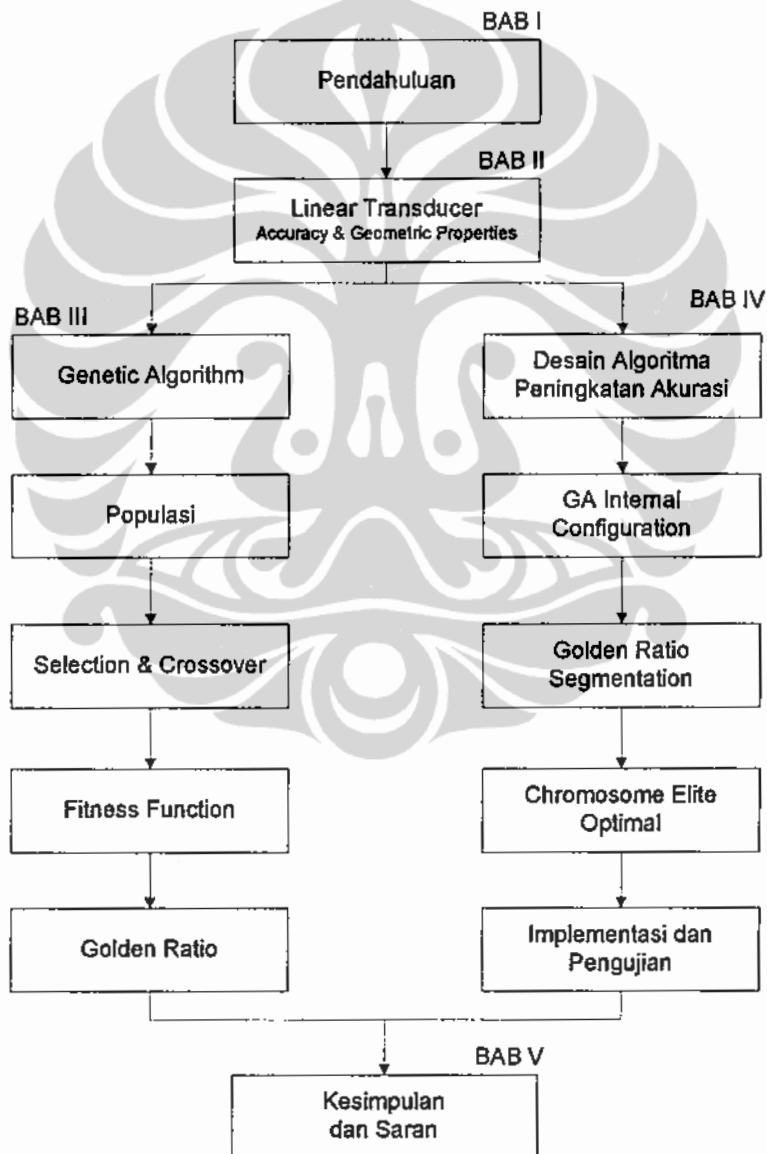
Bab kedua disampaikan uraian tentang *linear transducer*, terutama yang berkaitan dengan prinsip kerja, konstruksi mekaniknya. Tingkat akurasi dan faktor faktor yang mempengaruhinya.

Pada bab ketiga membahas *genetic algorithm* dan *golden ratio*. Pada *genetic algorithm* diuraikan tentang prinsip kerja, populasi, teknik *selection* dan *crossover chromosome* serta *fitness function* dan kriteria terminasi. Sedang untuk subbab *golden ratio* menguraikan tentang asal usul *golden ratio* yang terdapat di alam yang menggambarkan nilai sebuah keseimbangan dan juga dibahas cara penulisan *golden ratio* dalam bentuk numerik.

Untuk bab keempat, membahas tentang algoritma teknik peningkatan akurasi liner *transducer* dengan menggunakan gabungan *genetic algorithm* dan *golden ratio*. Kemudian membahas tentang teknik segmentasi dengan *golden ratio*, konfigurasi internal dari *genetic algorithm* untuk mendapatkan kinerja lebih terbaik termasuk teknik elitisasi. Implementasi dari teknik ini dengan menggunakan *microcontroller* untuk meningkatkan akurasi *linear transducer* secara *realtime*. Selanjutnya pada bab ini juga dibahas tentang validasi dari

metode peningkatan akurasi yang diusulkan dengan uji coba baik dengan melakukan simulasi penjejakan kurva karakteristik *transducer* pada komputer maupun kalibrasi dengan *laser interferometer* di *mechanical positioning system*. Pada bab ini juga disampaikan cara mengolah data dari hasil pengukuran.

Akhirnya pada bab lima, disampaikan kesimpulan dari hasil penelitian dan juga saran yang mungkin berguna untuk penelitian yang akan datang. Adapun sistematika penulisan dari penelitian ini dapat disampaikan dalam bentuk diagram alir seperti pada gambar 1.3 dibawah ini.



Gambar 1.3. Sistematika Penulisan.

BAB II

LINEAR TRANSDUCER

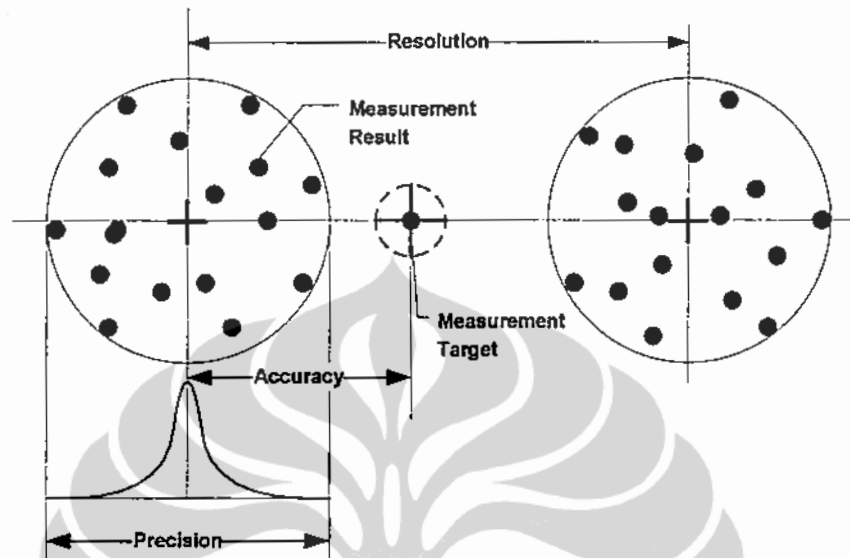
Linear transducer merupakan perangkat yang digunakan untuk mengukur jarak gerak lurus dengan resolusi dalam orde mikrometer yang sering dipakai pada *mechanical positioning system*. Akurasi adalah faktor utama yang menentukan kualitas sebuah *transducer*. Akurasi ini dipengaruhi oleh *geometric properties* ketika *transducer* telah dipasang. Faktor yang mempengaruhi adalah dari karakteristik *internal transducer* dan interaksi dengan *mechanical positioning system*. Karena pengaruh kedua faktor ini menjadi karakteristik *linear transducer* menjadi unik berbeda-beda satu dan lainnya. Untuk mengetahui masing masing karakteristik *linear transducer* dapat menggunakan *laser interferometer calibrator* sebagai acuan.

Linear transducer terdiri dari *glass scale* yang telah diberi *grating* dengan interval 20 mikrometer. *Scanning unit* bergerak pada memanjang pada *glass scale* tersebut dan menghasilkan sinar gelap-terang. Sinar tersebut diubah menjadi sinyal listrik oleh *solar cell* dan kemudian dikuatkan serta diinterpolasi sehingga diperoleh resolusi sinyal sebesar 1 mikrometer. Sinyal output *linear transducer* adalah sinyal digital mengikuti format sinyal *quadrature*.

2.1 Akurasi

Sebuah *linear transducer* yang telah dipasang pada *mechanical positioning system* untuk mengetahui kinerjanya maka perlu diketahui tingkat akurasinya. Akurasi tidak dapat diperoleh dengan hanya menghitung dari data ukur, nilai standard harus tersedia sebagai acuan berpasangan dengan data ukur sebagai nilai pembanding. Besarnya nilai akurasi diperoleh dengan melakukan pengukuran berulang berdasarkan standard dan kalibrator yang tertelusur ke standard lebih tinggi. Untuk mendapatkan akurasi tinggi maka diperlukan kepresisian tinggi pula. Presisi adalah kemampuan menghasilkan nilai ukur yang konsisten. Dalam pengukuran mungkin diperoleh kepresisian tinggi akan tetapi belum tentu akurat hasilnya. Akurasi adalah ukuran kualitas seberapa dekat nilai

yang ditunjukkan instrumen ke nilai sebenarnya sesuai dengan standard, semakin dekat nilainya dengan standard artinya peralatan tersebut semakin akurat seperti terlihat pada gambar 2.1 tentang sebaran hasil hasil ukur.



Gambar 2.1. Akurasi

Slocum [34] mengatakan akurasi adalah kemampuan untuk menyatakan nilai yang sebenarnya. Sedangkan akurasi yang berkaitan dengan benda kerja, menurut Chen [3] adalah derajat kesesuaian dimensional dan geometrik terhadap spesifikasinya. Shyh [35] mengatakan faktor utama yang mempengaruhi akurasi adalah kesalahan geometris dan termal. Menurut Jun Ni [36] dan Dorndorf [37] gabungan antara kesalahan geometris dan termal disebut kesalahan kuasistatik yang didefinisikan sebagai kesalahan posisi yang perubahannya perlahan dan berhubungan langsung dengan struktur sistem mekaniknya. Besarnya kesalahan tersebut sekitar 40% - 70% dari kesalahan total.

Menurut Li.X [38] ada dua cara untuk meningkatkan akurasi. Pertama menghindarkan kesalahan yaitu dengan menghilangkan sumber-sumber kesalahan ketika alat sedang dirancang dan dibuat. Ini dilakukan dengan memakai bahan kualitas tinggi dan proses rekayasa yang ketat untuk mendapatkan toleransi dimensional yang sekecil mungkin. Pada cara pertama, tidak sepenuhnya dapat dilakukan karena adanya keterbatasan sifat fisik bahan dan biaya akan meningkat dratis sesuai tingkat kepresisian alat.

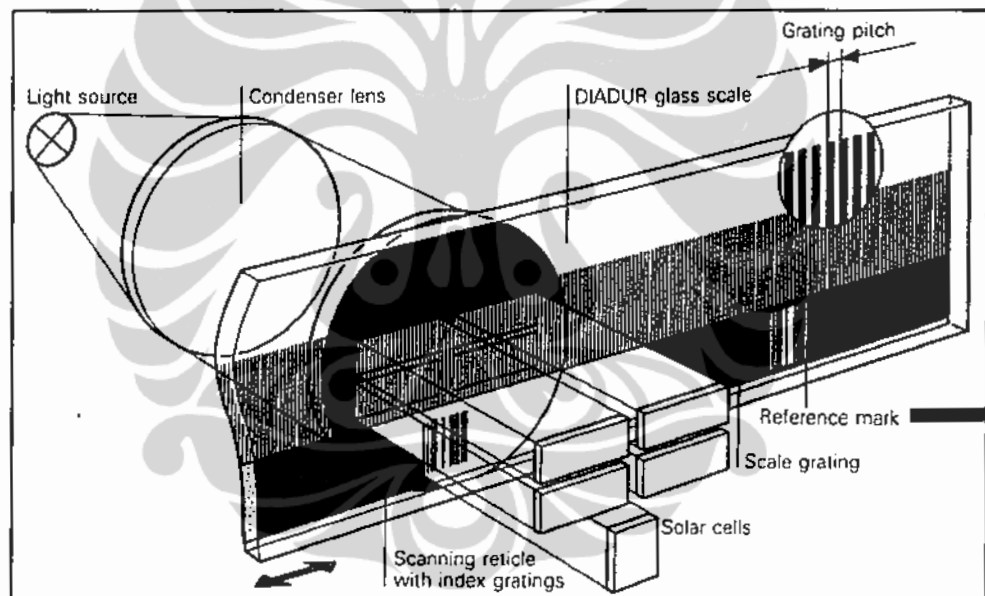
Cara kedua melalui kompensasi guna mengurangi pengaruh sumber-sumber kesalahan setelah alat dirakit. Pada cara kedua adalah dengan

memprediksi kesalahan final berdasarkan model kesalahan sistem, khususnya pada *transducer* dan kemudian melakukan kompensasi, cara ini lebih mudah dan berdampak langsung pada peningkatan akurasi.

Idealnya untuk mendapatkan akurasi tinggi, kedua cara tersebut diatas dapat ditempuh akan tetapi cara terakhir lebih ekonomis.

2.2 Prinsip Kerja

Linear transducer adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk mengetahui posisi gerak lurus dan dipasang pada *mechanical positioning system* diantara dua bagian yang bergerak dan diam. *Transducer* ini mempunyai beberapa bagian seperti ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Bagian Linear Transducer

Bagian utama adalah *glass scale* yang mempunyai *grating* dengan interval 20 mikrometer. *Glass scale* menggunakan *diadur graduation* untuk meminimalkan pengaruh temperatur lingkungan, dimana *glass scale* ini mempunyai koefisien muai kecil yaitu $8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Bagian lain yaitu lampu dan lensa kondenser untuk mensejajarkan sinar sebelum mengenai *glass scale*. Pergeseran gerak antara *scanning unit* dan *glass scale* menghasilkan sinar gelap terang pada *solar cell* dan kemudian diubah menjadi sinyal analog. Output sinyal

terdiri dari sinyal posisi A dan B kemudian satu sinyal referensi. Sinyal posisi mempunyai selisih fasa 90° yang digunakan untuk mendeteksi arah pergerakan, dengan *sinyal comparator* maka dapat diketahui pergerakan *scanning unit* maju atau mundur. Melalui sinyal beda fasa tersebut dapat digunakan oleh *digital read out* untuk melakukan *count up* atau *count down*. Sinyal referensi adalah sinyal yang hanya akan muncul apabila melewati *absolute reference mark* pada *linear transducer*.

Absolute reference mark berupa slot berkas sinar pada *glass scale* yang akan menyinari *solar cell* sehingga membangkitkan sebuah pulsa acuan posisi. *Absolute reference mark* umumnya terdapat di setiap ujung *linear transducer*. Fungsi *reference signal* adalah sebagai acuan posisi setiap data *linear transducer* berkaitan dengan *mechanical positioning system*. Pada setiap awal pengukuran *scanning unit* digeser sampai melewati *absolute reference mark* agar data posisi, data kalibrasi dan *error compensation system* mengacu pada lokasi yang sama.

2.3 Konstruksi

Konstruksi dari *linear transducer* Haidenhain type LS303 terdiri dari rumah aluminium dengan profil C, kemudian pembawa *scanning unit* dan pelindung *seal* karet. *Glass scale* diletakkan di dalam rumah untuk menghindari debu, minyak atau benda asing lainnya. *Scanning unit* dipasangkan pada *mechanical coupling* yang mempunyai roda yang selalu menyentuh *glass scale* ketika bergerak. Tekniknya adalah dengan memasang pegas pada *scanning unit*, tujuannya adalah untuk meredam getaran yang mungkin timbul ketika *scanning unit* berjalan dalam arah memanjang. Pada penelitian ini panjang *linear transducer* adalah 1000 mm sedangkan langkah efektifnya adalah 700mm karena adanya *sledge* pada *mechanical positioning system* yang mengurangi jarak tempuhnya.

Ujung *transducer* mempunyai lubang baur untuk pemasangan pada badan *mechanical positioning system*. *Scanning unit* yang juga dilengkapi lubang baur dan kabel untuk ke antar muka *transducer*. Konstruksi *linear transducer* dibuat agar mudah melakukan *alignment* ketika dipasang. Kesejajaran antara sepanjang rumah *transducer* terhadap *mechanical positioning system* lebih kecil

10 mikrometer. Kesejajaran diukur dengan menggunakan *dial indicator* yang disentuhkan pada kedua ujung rumah *transducer*. Setting dapat dilakukan melalui lubang baut yang berbentuk oval. Proses ini harus dilakukan agar *cosine error* yang timbul dapat ditekan sekecil mungkin. Bentuk fisik dari konstruksi *linear transducer* dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Bentuk Linear Transducer

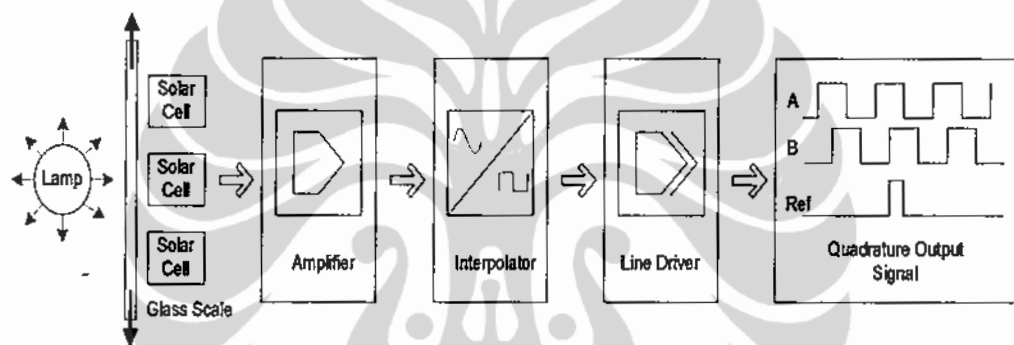
2.4 Sinyal Interpolator

Linear transducer pada *glass scale* yang mempunyai *grating pitch* 20 mikrometer, masih terlalu rendah resolusinya untuk digunakan dalam pengukuran. Apabila *grating pitch* diperkecil hingga dibawah 5 mikrometer maka sensitivitas *solar cell* berkurang karena intensitas cahaya yang diterimanya lebih rendah. Selain itu proses *lithography* pada pembuatan *glass scale* lebih rumit karena semakin banyak garis yang diletakkan pada *glass scale*. Oleh karena itu untuk optimalisasi antara resolusi sinyal dan sensitivitas *solar cell* serta proses pembuatan maka umumnya *grating pitch* dipertahankan pada 20 mikrometer dan untuk mendapatkan resolusi lebih tinggi digunakan *electronic sinyal interpolator*.

Sinyal interpolator berupa rangkaian elektronik yang dipasang antara *scanning unit linear transducer* ke *digital read out* atau kontroler. Diagram blok dari interpolator dapat dilihat pada gambar 2.4. Sinyal input dari *solar cell* kira kira sebesar 10 mA puncak ke puncak dikuatkan menjadi 5 Volt oleh rangkaian amplifier. Pada amplifier juga terdapat *low pass filter* untuk mencegah derau frekuensi tinggi ikut masuk ke interpolator.

Sinyal diinterpolasi menggunakan *resistor network* untuk menghasilkan tegangan referensi yang masukan ke pin input IC *comparator*. Pertama sinyal diinterpolasikan terhadap nilai tengah, puncak atas, nilai tengah dan nilai lembah

sinyal. Dengan interpolasi ini resolusi sinyal telah meningkat 4 kali. Proses selanjutnya dengan memanfaatkan beda fasa 90° antara sinyal A dan B, diinterpolasikan kembali menggunakan *resistor network* menjadi beberapa tegangan referensi untuk masing masing segmen. Sinyal dan tegangan referensi kembali masuk ke IC comparator dan outputnya disambungkan ke gerbang *schmitt trigger* dan gerbang XOR untuk melakukan penjumlahan sinyal. Melalui interpolasi dua tingkat maka diperoleh resolusi sinyal sebesar 1 mikrometer. Lebar pulsa ditentukan oleh frekuensi sinyal *clock* yang dipengaruhi oleh kecepatan gerak dan ukuran *grating pitch*. Menurut buku petunjuk sinyal interpolator modul frekuensi clock yang digunakan adalah sekitar 25 kHz.



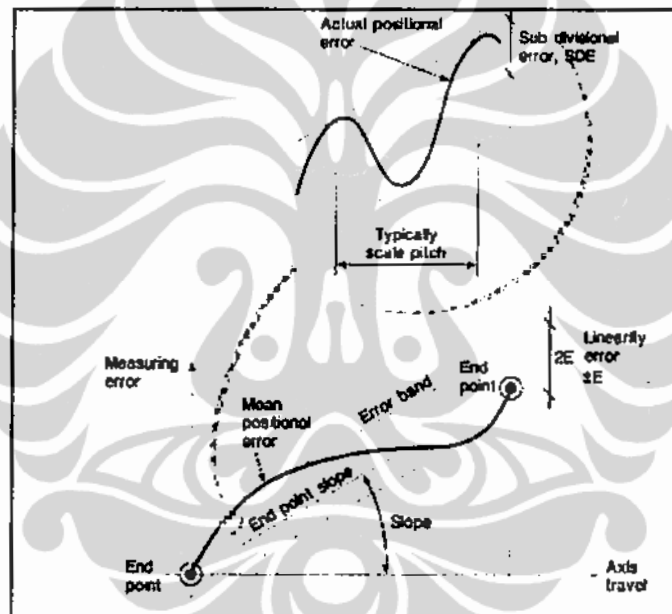
Gambar 2.4. Interpolator

Line driver berfungsi mengubah sinyal dalam level TTL ke sinyal standard RS 422 sehingga dapat ditransmisikan melalui kabel yang lebih panjang sampai dengan sekitar 50 m dan aman dari gangguan derau. Format sinyal output berupa sinyal *quadrature*, dengan bentuk sinyal ini dapat diketahui arah pergerakan *scanning unit* maju atau mundur selain panjang pergerakan setiap 1 mikrometer.

Pada interpolator juga melakukan pemrosesan sinyal *reference point*. Sinyal dari *solar cell* setelah dilewatkan *low pass filter* dan dikuatkan oleh amplifier, diubah menjadi pulsa dan disinkronkan dengan pulsa A dan B. Hasilnya adalah satu pulsa saja yang keluar ketika *scanning unit* melewati *absolute reference mark*. Lebar pulsa sinyal *reference point* diperoleh dengan mensinkronkan dengan pulsa clock di dalam interpolator. Sinyal ini dimanfaatkan oleh *digital readout* atau kontroler sebagai trigger atau *interrupt* yang menandai bahwa posisi tersebut adalah titik acuan.

2.5 Geometric Properties

Pada sebuah *linear transducer* yang mempunyai resolusi sinyal cukup tinggi, dalam penelitian ini adalah 1 mikrometer namun belum menjamin bahwa penunjukkan posisinya akurat. Untuk mengetahui tingkat akurasi dapat dilakukan kalibrasi. Akurasi dipengaruhi oleh *geometric properties* baik *transducer* maupun *mechanical positioning system* itu sendiri. Antara lain, *linear movement error*, *straightness*, *surface roughness*, *parallelism* dan dapat juga dipengaruhi oleh teknik pemasangan *transducer*, *mechanical deformation* dan *material instability*. Adapun ilustrasi tentang *position error* pada *linear transducer* akibat pengaruh *geometric* seperti terlihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Linear Transducer Error

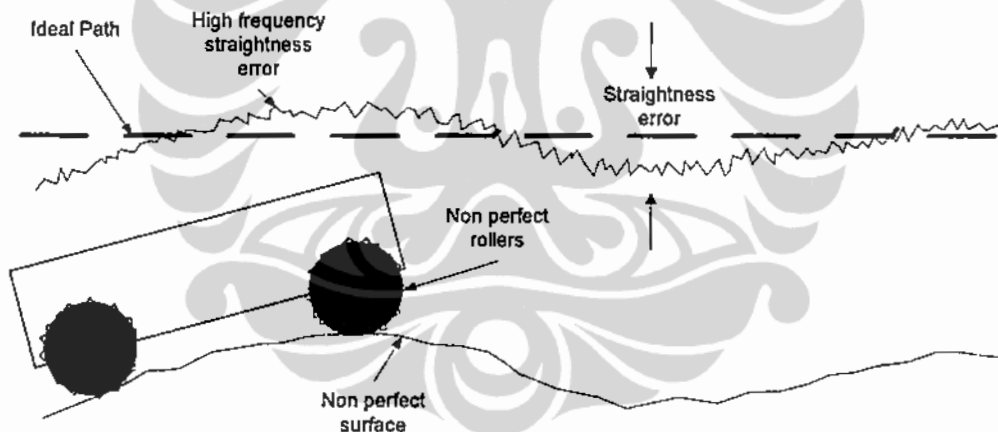
2.5.1 Linear Movement

Linear movement merupakan gerakan translasi sepanjang sumbu *mechanical positioning system*, dimana badan *linear transducer* dipasang tetap sedang *scanning unit* ikut bergerak bersama *sledge*. Dalam gerakan translasi ini terdapat kesalahan posisi yang disebabkan oleh ketidakakuratan geometri sistem penggerak mekanik dan sistem umpan baliknya. Misalkan pada *ballscrew* penggerak *sledge*, kesalahan pada kedudukan *ballscrew*, kesalahan akibat eksentrisitas roda penggerak dan ulir pembawa, kesalahan pada kopling antara *scanning unit linear transducer* dan *sledge*. Ketidaktepatan geometri dan

akurasi setiap komponen antara sistem penggerak sampai ke *linear transducer* ini menyebabkan terjadinya *linear movement error*.

2.5.2 Straightness

Straightness adalah lintasan dari pergerakan *scanning unit* terhadap lintasan ideal. Kondisi ini secara umum dipengaruhi oleh geometri dan beban yang bekerja *mechanical positioning system*. Seperti terlihat pada gambar 2.6. *straightness error* adalah penyimpangan terhadap lintasan garis lurus pergerakan linier sumbu yang dipengaruhi oleh *non perfect surface finish* dari bidang kontak, khususnya pada bantalan dan permukaan *slideway*. Pada *mechanical positioning system* untuk memperkecil *straightness error* dapat dilakukan dengan menggunakan *high precision part* akan tetapi karena keterbatasan sifat bahan dan kemampuan dalam pembuatan maka *straightness error* tidak dapat dihilangkan sepenuhnya.



Gambar 2.6. Straightness

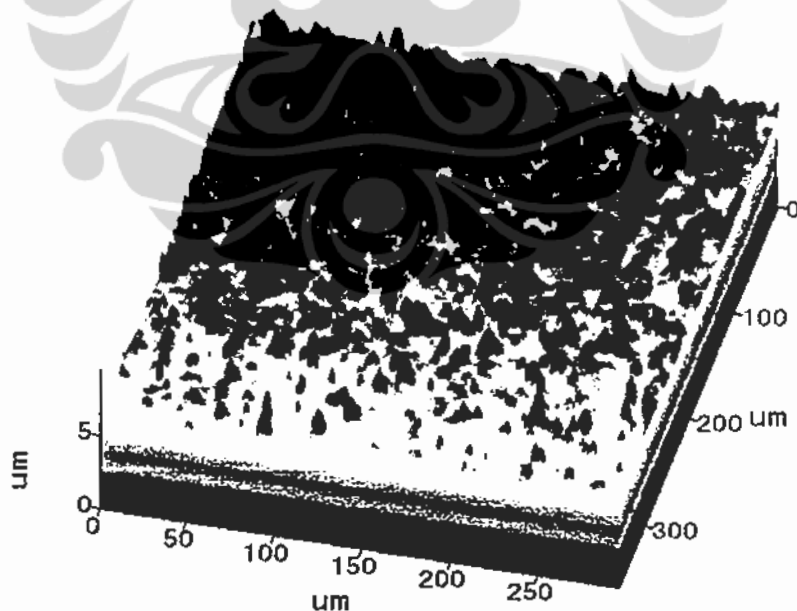
Untuk mengetahui *straightness* digunakan *laser interferometer*, dimana laser dilewatkan pada *beam splitter* dan masing masing berkas laser pada *fix reflector* dan *moving reflector*. Interferensi dua berkas sinar tersebut menggambarkan *straightness* lintasan karena kontur dan kekasaran permukaan akibat interaksi antara *roller* dan *slideway*.

Straightness pada *mechanical positioning system* akan berubah dibandingkan dengan pada saat pertama-kali dipasang. Ini disebabkan karena aus khususnya pada daerah kerja yaitu pada lintasan yang paling sering dipergunakan.

Gesekan antara bantalan dan *slideway* menyebabkan aus dibandingkan lintasan lain. Selain itu *strightness* akan berubah karena adanya deformasi akibat beban dan perubahan *flatness*.

2.5.3 Surface Roughness

Surface roughness merupakan bentuk karakteristik mikro permukaan yang mempengaruhi *smoothness* gerakan. *Surface roughness* dapat dilihat pada gambar 2.7 yang diambil dari <http://www.scn.tv/.../Panel-roughness-NG.jpg>. Pada *linear transducer* yang dipasang pada *mechanical positioning system*, *surface roughness* terbatas pada bidang kontak *slideway* dan bantalannya. *Roughness* pada awalnya hanya dipengaruhi hanya oleh kualitas permukaan akan tetapi karena adanya gesekan dalam pemakaian maka kontur dan bentuknya akan berubah. Sehingga akurasi *linear transducer* ikut berubah, oleh karena itu, *transducer* harus dilakukan kalibrasi secara berkala untuk mengetahui karakteristiknya. Apabila akurasi sudah menyimpang diluar batas toleransi maka *realignment* dan koreksi agar akurasinya dapat masuk kembali dalam batas toleransinya.



Gambar 2.7. Surface Roughness

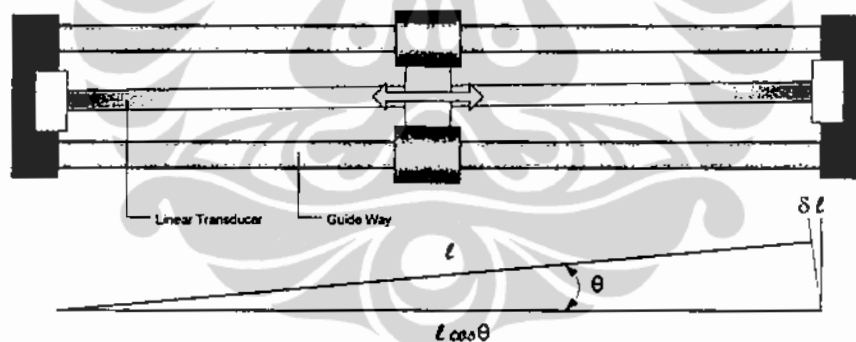
Surface roughness akan menyebabkan *high frequency straightness error*. Tingginya amplitudo *surface roughness* menggambarkan kualitas permukaan

bidang kontak yang disebabkan oleh *finishing process*. Akan tetapi amplitudo juga dipengaruhi oleh sifat elastis bidang kontak termasuk adanya pelumas pada bantalan luncur karena pengaruh *hidrostatic* dan *bearing preload*.

2.5.4 Parallelism

Transducer dipasang memanjang sejajar dengan lintasan gerak pada sistem mekanik. Lokasi posisi pemasangan *linear transducer* pada *mechanical positioning system* harus mempertimbangkan kemudahan melakukan *alignment*. Pemasangan *transducer* sebaiknya dapat bergerak paralel terhadap *linear bearing*.

Dudukan *transducer* memegang perananan penting menjaga agar *transducer* tetap kokoh dan menghindarkan dari frekuensi natural yang menimbulkan resonansi terutama pada *scanning unit*. Kopling mekanik yang menghubungkan antara diperlukan untuk menjaga agar gaya yang bekerja tidak overload ke struktur *transducer* yang memberikan potensi menyebabkan kesalahan tambahan. Letak pemasangan *linear transducer* seperti terlihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Parallelism

Parallelism error dipengaruhi oleh perbedaan jalur lintasan antara gerakan *scanning unit* dengan *guide way*, karena tidak benar benar sejajar diantara keduanya, sehingga menimbulkan *cosine error*. Dalam *alignment transducer* tidak mungkin menghilangkan seluruh *error* yang terjadi, selama *error* yang tersisa masih dapat batas toleransi operasional maka *transducer* dapat digunakan. Teknik kompensasi dapat diaplikasikan setelah sistem berjalan, sehingga secara keseluruhan sistem dapat ditingkatkan akurasinya.

BAB III

GENETIC ALGORITHM DAN GOLDEN RATIO

Genetic algorithm merupakan *stochastic global search method* yang cara kerjanya mengikuti sel biologi berevolusi. Di dalam *genetic algorithm* solusi yang hendak dipecahkan dikodekan pada *chromosome* dan disatukan ke dalam *population*. Setiap generasi populasi dilakukan proses *selection*, yaitu mekanisme memilih *chromosome* untuk reproduksi berdasarkan pada tingkat kelayakan *chromosome* terhadap solusi yang hendak dicapai. *Crossover* adalah menggabungkan dua *chromosome* unggul untuk memperoleh turunan yang lebih baik. Pada *chromosome* dilakukan mutasi yaitu dengan membalikkan bit 0 menjadi 1 dan sebaliknya, hal ini dipakai untuk mencegah keseragaman *chromosome* tanpa kehilangan sifat genetiknya. Dengan mutasi untuk mencegah *genetic algorithm* terjebak dalam *local optima*. Sedangkan untuk uji kelayakan *chromosome* dilakukan oleh *fitness function* yang mengukur dan menentukan ranking *chromosome* terhadap solusi yang sedang dipecahkan.

Keuntungan utama dari *genetic algorithm* adalah fleksibilitas dan *robustness* dalam *global search method*, kemudian dapat digunakan pada *high nonlinear problems* seperti fungsi dengan *multiple local optima*. Namun *genetic algorithm* memerlukan komputasi yang intensif dan kadang konvergensi mengalami kendala.

Golden ratio adalah sebuah nilai perbandingan yang menggambarkan keseimbangan, dalam hal ini yang berkaitan dengan keseimbangan yang sering terjadi di alam. Nilai *golden ratio* ini sering ditemukan, seperti pada perbandingan oval telur, ukuran ruas daun, panjang tulang binatang herbivora. Juga pada perbandingan ukuran fisik manusia. *Golden ratio* terdapat pula pada proposi *minor* dan *major groove* pada rantai DNA. Pada penelitian ini *golden ratio* akan digunakan untuk segmentasi sebuah karakteristik *linear transducer* bersama sama dengan *genetic algorithm* guna meningkatkan akurasi. Dengan mengadopsi fenomena *golden ratio* diharapkan dapat menghasilkan perbandingan segmen yang terbaik dengan jumlah segmen yang lebih sedikit.

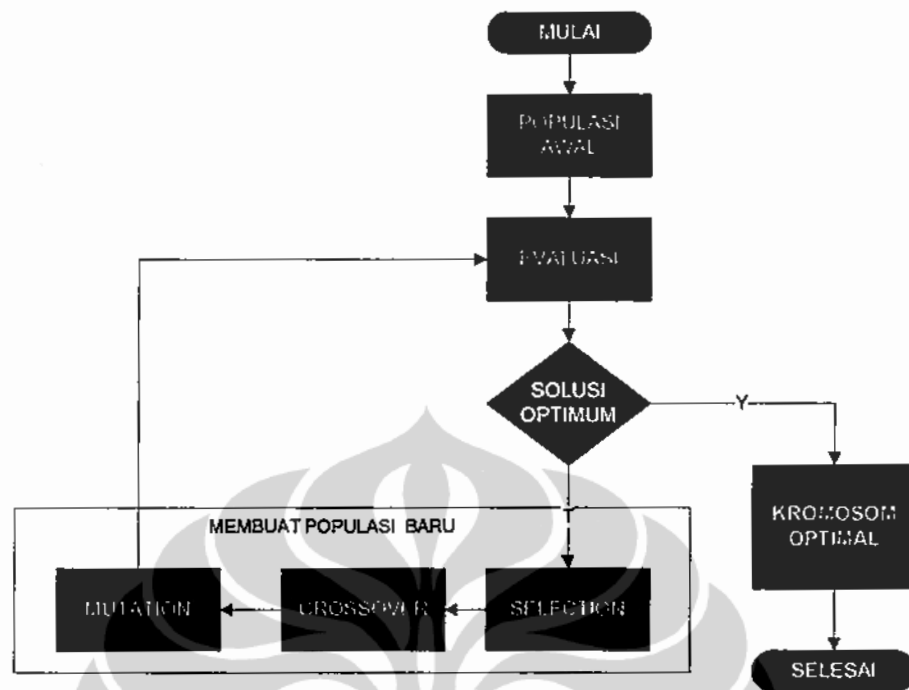
3.1 Genetic Algorithm

Genetic algorithm diperkenalkan oleh John H. Holland dari Universitas Michigan pada tahun 1960 [39] dan *genetic algorithm* adalah *stochastic global search method* yang meniru perilaku evolusi alamiah biologi. *Genetic algorithm* beroperasi pada populasi yang potensial memberikan solusi dengan prinsip *survival of the fittest* untuk menghasilkan baik dan semakin baik lagi sebagai perkiraan solusi. Pada setiap generasi, sebuah perkiraan solusi dihasilkan dengan proses pemilihan individu berdasarkan level kelayakan terhadap domain problem dan memberikan keturunan berdasar mekanisme genetika alamiah berkembang biak.

Genetic algorithm berbeda dengan teknik pencarian konvensional, *genetic algorithm* dimulai dari kumpulan solusi acak disebut populasi. Individu populasi disebut *chromosome* yang mempresentasikan solusi problem, sedangkan *chromosome* adalah *string* dari simbol yang umumnya berupa bilangan biner. *Chromosome* berevolusi melalui iterasi yang disebut generasi. Setiap generasi dievaluasi tingkat kelayakannya. Proses *genetic algorithm* bekerja dapat dilihat pada diagram alir pada gambar 3.1.

Menurut Mitsuo [40] pada *genetic algorithm* terdapat empat perbedaan signifikan dibandingkan dengan teknik pencarian konvensional yaitu :

- Pencarian *genetic algorithm* pada populasi secara paralel bukan pada solusi tunggal.
- *Genetic algorithm* tidak memerlukan informasi turunan atau pengetahuan tambahan, ia hanya memerlukan fungsi kelayakan dan nilai tingkat kesesuaian yang mempengaruhi arah pencarian.
- *Genetic algorithm* menggunakan aturan transisi probabilistik bukan deterministik.
- *Genetic algorithm* bekerja berdasarkan pada encoding parameter set (string simbol) bukan pada parameter set itu sendiri.



Gambar 3.1. Diagram Alir Genetic Algorithm

3.1.1 Population and Chromosome

Pada *genetic algorithm*, population berupa kumpulan *chromosome* yang akan berevolusi dari generasi ke generasi untuk mendapatkan *chromosome* yang semakin baik. Pada awalnya population berisi *chromosome* yang dibangkitkan secara acak agar diperoleh kemungkinan solusi terbaik secara luas. Kemudian setiap generasi *chromosome* di dalam population diurut berdasarkan ranking kesesuaian dengan solusi yang sedang diselesaikan. Setiap generasi, populasi yang berisi *chromosome* baru yang dihasilkan dari proses *selection*, *crossover* dan *mutation*, disisipkan *elite chromosome* dari generasi sebelumnya. Dengan metode ini maka konvergensi GA dalam proses pencarian solusi dapat lebih cepat dan terarah menuju solusi yang semakin baik..

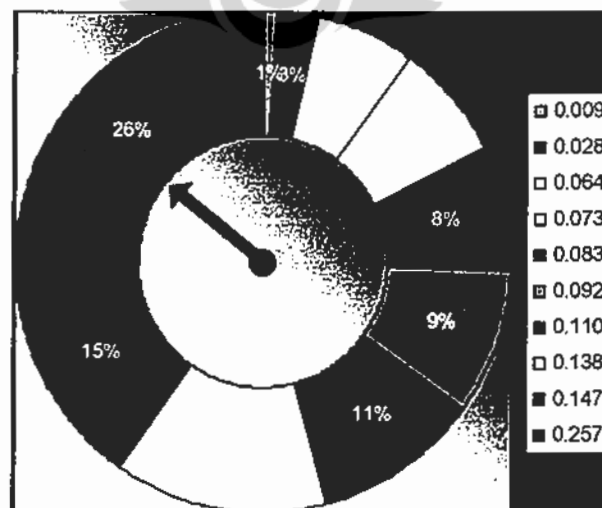
Chromosome merupakan tempat *genetic algorithm* memrepresentasikan parameter kompensasi yang sedang dicari solusinya. Dalam hal ini untuk mendapatkan parameter koreksi dari *linear interpolation*. *Chromosome* berupa bilangan biner 0 dan 1 dengan panjang 2 kali 16 bit. Dengan cara ini akan diperoleh masing masing parameter berupa bilangan *integer* dalam rentang antara

-32768 sampai dengan 32767. Kemudian setiap *chromosome* pada setiap generasi diuji melalui fungsi kelayakan untuk menentukan rangkingnya. *Chromosome* terbaik dari akhir proses iterasi akan berisi parameter kompensasi pada segmen posisi pada *linear transducer* yang sedang dikompensasi.

3.1.2 Selection

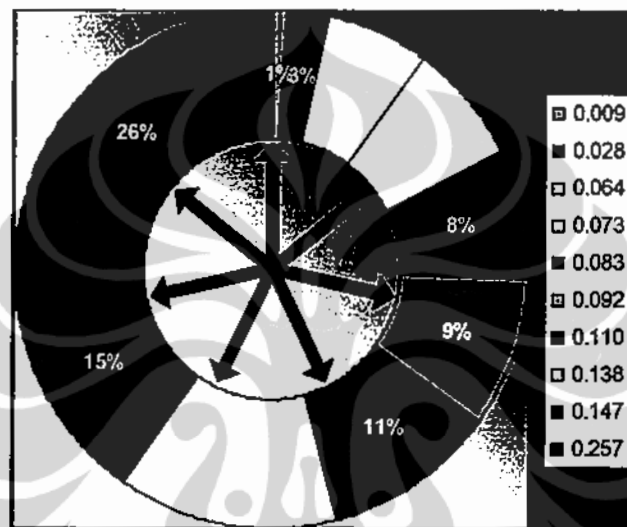
Pada *genetic algorithm* menurut Danny [41] memerlukan proses *selection* yaitu proses yang berulang-ulang untuk menghasilkan populasi baru (*offspring*) dari populasi induknya. Proses seleksi harus mempunyai karakteristik bias, penyebaran dan efisiensi. Bias adalah perbedaan absolut antara individu yang menggambarkan akurasi tingkat seleksi, sedang penyebaran adalah rentang jumlah kemungkinan *trial* setiap individu yang mungkin dapat diterima, kriteria penyebaran berimplikasi pada konsistensi proses seleksi. Sedang efisiensi adalah berkaitan dengan level kesederhanaan dan kecepatan waktu operasi. Terdapat dua cara *selection* yang populer yaitu:

- *Roulette Wheel* (RW) adalah mekanisme probabilitas memilih individu berdasarkan pada tingkat performa individu itu sendiri. Lihat gambar 3.2. Individu diberi peluang berdasarkan tingkat kesesuaian (*fitness*) dengan domain problem yang sedang dipecahkan. Pemilihan individu dilakukan secara acak menggunakan *single pointer*.



Gambar 3.2. Roulette Wheel

- *Stochastic Universal Sampling* (SUS) merupakan proses sampling dengan bias nol dan penyebaran minimum. Lihat gambar 3.3. Setiap individu dipetakan persis seperti dalam *roulette wheel* akan tetapi proses seleksi menggunakan *multi pointer* yang distribusikan merata pada kumpulan individu. Titik awal letak *pointer* dilakukan secara acak, sehingga memungkinkan individu yang mempunyai nilai kesesuaian tinggi mempunyai peluang lebih besar untuk dipilih ke generasi sebelumnya.

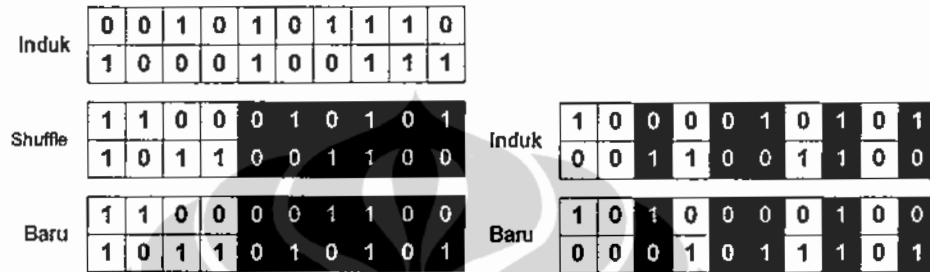


Gambar 3.3. Stochastic Universal Sampling

3.1.3 Crossover

Proses selanjutnya adalah *crossover* dan menurut William [42] *crossover* adalah proses pertukaran individu sehingga diperoleh *chromosome* baru yang masih mengandung sifat genetik induknya, seperti terlihat pada gambar 3.4. Pada *crossover* terdapat parameter laju *crossover* yaitu perbandingan antara jumlah *chromosome* baru yang dihasilkan pada setiap generasi dengan ukuran populasi. Besarnya probabilitas *crossover* umumnya sekitar 0.7-0.8 akan tetapi menurut Nick Johnson [43] sekitar 0.7 merupakan ukuran yang terbaik. *Crossover rate* yang tinggi memungkinkan eksplorasi lebih pada ruang solusi dan akan mengurangi kemungkinan berhenti pada *false optimum*. Akan tetapi Misuo Gen [40] menyatakan bila *crossover rate* terlalu tinggi maka akan membuang waktu komputasi percuma hanya untuk eksplorasi bagian yang tidak menjanjikan ruang solusi. Terdapat dua cara melakukan *crossover* yang sering dijumpai yaitu:

- *Shuffle* (SF) yaitu, silangkan individu dua *chromosome* yang dibatasi oleh satu *pointer*, dimana hasilnya dua *chromosome* baru yang pada sebelah kiri *pointer* adalah tetap seperti aslinya sedang sebelah kanan titik adalah persilangannya.
- *Multi Point* (MP) yaitu cara mendapatkan *chromosome* baru dengan mempertukarkan individu dengan beberapa *pointer*. Dimana penentuan posisi *pointer* dilakukan secara acak.



Gambar 3.4. Crossover

3.1.4 Mutation

Mutation adalah proses membalikkan bit pada *chromosome*. Tujuan adanya *mutation* adalah untuk mencegah terjadinya terlalu miripnya *chromosome* satu dan lainnya pada populasi untuk mencegah kemungkinan terjadi *local optima*. Cara kerja mutasi adalah dengan mengubah bit 0 menjadi 1 atau sebaliknya. Laju mutasi adalah prosentase total dari jumlah *genes* (bit) dalam populasi. Besarnya menurut Sergey [44] adalah antara 0.001 sampai dengan 0.1. Laju mutasi ini mengendalikan jumlah bit yang akan dimasukkan kedalam populasi untuk generasi berikutnya. Jika terlalu rendah maka banyak bit yang berguna tidak pernah dicobakan. Tetapi bila terlalu tinggi maka akan banyak gangguan acak (*random perturbation*), *chromosome* baru akan mulai dengan kehilangan kemiripan dengan *chromosome* induknya. Sehingga algoritma akan kehilangan kemampuan belajar dari *history of search*.

3.1.5 Fitness Function

Fitness function digunakan untuk mengukur seberapa jauh setiap *chromosome* dapat memenuhi kriteria solusi. Kinerja relatif setiap *chromosome* dihitung dan kemudian mentransformasikan menjadi kesesuaian relatif dengan

persamaan dibawah ini. Dengan memberikan penilaian ke masing masing *chromosome* kemudian dibuat ranking, maka dapat ketahui *chromosome* yang layak diikuti ke generasi dan mengabaikan *chromosome* lainnya untuk diganti dengan *chromosome* baru.

$$F(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_{ind}} f(x_i)} \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

Dimana: $F(x_i)$ = nilai *fitness* individu

$f(x)$ = nilai *fitness* relatif.

N_{ind} = ukuran populasi.

x_i = nilai individu tiap *chromosome*

Dalam penelitian ini untuk mendapatkan *chromosome* paling baik maka fungsi kelayakan dibangun dengan menghitung *sum of squares error* (SSE) dari setiap fungsi *monomial*, dimana parameternya diperoleh dari *chromosome* yang dibangkitkan oleh *genetic algorithm*. *Chromosome* dengan SSE terkecil berpeluang untuk dipilih sebagai *elite chromosome* yang akan dimasukkan ke dalam populasi generasi berikutnya.

3.1.6 Termination

Termination kerja *genetic algorithm* dilakukan dengan membatasi jumlah iterasi generasi atau menggunakan batas tingkat kelayakan mencapai nilai tertentu. Karena sifat *genetic algorithm* dengan pencarian *stochastic*, maka tidak mudah untuk menentukan kapan solusi terbaik tersebut tercapai. Umumnya bila *fitness value* konstan dari generasi ke generasi dalam jangka waktu lama maka, sebagai indikasi telah ditemukan individu terbaik pada *chromosome*. Individu ditest terhadap problem yang sedang diselesaikan, apabila telah memenuhi syarat kelayakan maka iterasi dihentikan, bila tidak segmen diperpendek dg GR seperti akan dijelaskan pada subbab segmentasi berikutnya.

Dalam penelitian ini, terminasi atau jumlah generasi bervariasi tergantung pada karakteristik *transducer*. Apabila dalam 100 generasi nilai dari fungsi kelayakan konstan maka iterasi dihentikan dan pindah ke proses segmen

berikutnya dan dianggap telah diperoleh parameter kompensasi terbaik. Dalam penelitian ini, jumlah generasi maksimum diatur sebanyak 1000 generasi untuk setiap segmen.

Pada dasarnya tidak ada aturan baku penentuan jumlah iterasi, bila jumlah sedikit maka proses komputasi menjadi lebih cepat akan tetapi ada kemungkinan *chromosome* potensial yang terlewatkan. Demikian sebaliknya bila jumlah iterasi besar memakan waktu *searching* lebih lama. Pada penelitian ini, dilakukan percobaan awal dari dari sampling data kalibrasi. Pada umumnya 300-600 generasi sudah terjadi konvergensi yang ditandai dengan nilai SSE yang konstan dari generasi ke generasi. Nilai tersebut bervariasi tergantung pada tingkat kerumitan dari setiap segmen *monomial* yang sedang dievaluasi. Bila jumlah lembah dan puncak karakteristik *transducer* banyak dan rumit maka dibutuhkan iterasi lebih banyak. Pada penelitian ini, untuk mengantisipasi kemungkinan tersebut, tanpa kehilangan *chromosome* potensial dan waktu proses yang lebih cepat maka jumlah iterasi maksimum dibuat 1000 untuk setiap segmen. Dan proses *tracking* akan pindah ke segmen berikutnya bila nilai SSE konstan pada 100 generasi. Melalui *setup* seperti tersebut diatas nilai yang aman dan realitis.

Disisi lain menggunakan terminasi dinamis maka akan menghemat waktu komputasi tanpa kehilangan kesempatan mendapatkan *chromosome* terbaik artinya dengan *chromosome* tersebut akan diperoleh tingkat akurasi yang tinggi. Teknik terminasi dinamis ini, juga fleksibel untuk digunakan pada *tracking* pada kurva karakteristik *linear transducer* yang rumit maupun yang sederhana tanpa harus menebak berapa jumlah iterasi generasi optimum yang harus diberikan untuk setiap kurvanya.

3.2 Golden Ratio

Golden ratio adalah sebuah perbandingan yang sering ditemui di alam yang menggambarkan keseimbangan. *Golden ratio* juga terdapat pada perbandingan ukuran fisik manusia ideal. Secara numerik *golden ratio* dapat ditulis dengan bilangan Fibonacci yaitu merupakan deret hasil jumlah dua buah bilangan sebelumnya.

3.2.1 Golden Ratio pada Alam

Menurut Republika Online, 1 April 2005 [45] *golden ratio* bukan hasil imajinasi matematis, akan tetapi merupakan kaidah alam yang terkait dengan hukum keseimbangan. Kemudian menurut Khazanah [46] suplemen harian Pikiran Rakyat, 13 Juni 2003, *golden ratio* suatu nomor yang kerap muncul di dunia yang mempunyai kepemilikan unik. *Golden ratio* adalah sebuah perbandingan ukuran yang banyak ditemui di alam. *Golden ratio* terdapat pada perbandingan lebar dan panjang telur, pertumbuhan rangka cabang pada daun, tulang binatang herbivora yaitu binatang pemakan tumbuhan, aliran air dan bentuk dari galaksi seperti ditulis dalam situs www.mathlove.com [47]. *Golden ratio* juga terdapat pada desain biola, arsitektur bangunan kuno di negara barat dan Mesir. Bahkan *golden ratio* terdapat pula pada tubuh manusia ideal seperti disampaikan oleh beberapa situs internet, misalkan di www.dcs.qmul.ac.uk. [48]. Pada wajah, perbandingan tinggi badan manusia, perbandingan antara panjang lengan dan panjang telapak tangan, panjang rentangan kedua tangan dan tinggi badan dan sebagainya. *Golden ratio* terdapat pula pada proposi *minor and major groove* pada rantai DNA, kemudian pada sinyal perbandingan antara amplitudo dan interval sinyal EKG.

Prinsip *golden ratio* yang diaplikasikan pada bidang matematik, ilmu pengetahuan dan rekayasa, sering juga disebut dengan "*harmony mathematics*" [49]. *Golden ratio* juga digunakan pada bidang *computer science* untuk optimasi sebuah algoritma [50]. Ada beberapa penelitian yang menggunakan fenomena *golden ratio* seperti Nocedal [51] dibandingkan algoritma *step length* berdasarkan prinsip Goldstein-Armijo terbukti secara fakta lebih baik dan tangguh khususnya untuk optimasi trayektori dalam kecepatan kovergensi. Chung-Min Chen menggunakan *golden ratio sequences* untuk mengurangi *disk access time* pada paralel disk [52]. Kemudian Mischa [53] melakukan optimasi yang lebih kompleks ternyata *golden section search* ternyata mempunyai perilaku konvergensi yang baik. *Golden ratio* digunakan juga oleh Juan [54] sebagai pemisah durasi dua sinar sinusoidal pada konstruksi sebuah kurva sinar artifisial untuk analisa kurva sinar bintang δ *Scuti V784 Cassiopeiae*. Menurut John [55] salah satu cara

untuk mencari fungsi minimum dengan metode paling efisien adalah *golden ratio search*. Pada penelitian yang dilakukan oleh Filippo Mignosi diperoleh bahwa *golden ratio* dapat digunakan untuk menghubungkan antara perioda lokal dan global pada kata-kata [56]. *Golden ratio* dapat dipakai untuk menentukan *optimal gain* pada pengendalian produksi dan inventori [57]. Aplikasi *golden ratio* pada *adaptive control system* dilakukan oleh Qi Chunzi [58] dan Cao-Minh Ta [59]. Juga oleh Leonid digunakan untuk menyelesaikan *quadratic assignment problem* [60].

3.2.2 Ekspresi Numerik Golden Ratio

Golden ratio umumnya ditulis dengan simbol Φ dapat dinyatakan dengan bilangan Fibonacci, yaitu sebuah deret bilangan dimana pada nilai bilangannya merupakan penjumlahan dua bilangan sebelumnya yaitu sebagai berikut.

0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987, 1597, 2584, 4181,...

Golden ratio mempunyai nilai relatif konstan pada angka perbandingan angka lebih besar dari 13/8. Berdasarkan bilangan tersebut maka *golden ratio* dapat dinyatakan dalam persamaan deret sebagai berikut:

$$\Phi = \frac{13}{8} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} (2n+1)!}{(n+2)! n! 4^{2n+3}} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\Phi \approx 1.618033\dots\dots$$

Dimana : n = adalah bilangan Fibonacci suku ke n

Berdasarkan fenomena keseimbangan *golden ratio* (GR) ini, maka dalam penelitian ini digunakan sebagai segmentasi sebuah karakteristik *linear transducer* guna melakukan koreksi kesalahannya. Untuk itu digunakan polinomial mengacu pada penelitian yang telah dilakukan Lee [61] [62], dimana setiap segmen intervalnya ditentukan oleh hirarki kuadrat sedangkan dalam penelitian ini digunakan *golden ratio* (GR).

BAB IV

PERANCANGAN METODE PENINGKATAN AKURASI

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menemukan metode untuk meningkatkan akurasi *linier transducer* dengan cara melakukan koreksi posisi sepanjang *linier transducer* sesuai dengan karakteristik masing-masing dari data kalibrasi. Dengan data tersebut dapat diketahui tingkat akurasi *linear transducer* yang telah dipasang pada *mechanical positioning system*. Untuk melakukan perbaikan akurasi maka dilakukan *tracking* terhadap karakteristik *transducer*. Pada awal penelitian, dilakukan percobaan *tracking* menggunakan satu segmen polinomial orde tinggi, ternyata dari hasil simulasi akurasinya belum memuaskan sehingga dicoba dengan metode segmentasi. Segmentasi menggunakan nilai *golden ratio* yang akan membagi daerah optimasi *tracking* menjadi beberapa bagian. *Tracking* setiap segmen dilakukan oleh *genetic algorithm* dengan mencari parameter bilangan *integer*, alasan menggunakan bilangan *integer* adalah untuk menyederhanakan pemrograman dan mempercepat proses kalkulasi bila diimplementasikan pada *microcontroller*.

Sebelumnya pada *genetic algorithm* dilakukan konfigurasi internal untuk menentukan operator yang menghasilkan *sum of squares error* (SSE) paling kecil, kemudian dilakukan juga elitisasi dengan memasukan sebagian *elite chromosome* ke populasi generasi berikutnya sehingga diperoleh *monomial* yang memberikan *root mean square* (RMS) terkecil. Kemudian untuk *tracking* kurva per segmen, menggunakan polinomial orde satu atau *monomial* karena dengan *monomial* maka hanya ada satu kemungkinan garis yang menghubungkan dua titik untuk setiap segmen. Dengan demikian memudahkan *genetic algorithm* konvergen ke satu solusi yang optimal. Selain itu dengan *monomial* hanya diperlukan dua set *genome* atau individu sehingga akan menyederhanakan struktur *chromosome* dan akan mempercepat proses kerja *genetic algorithm*.

Dengan demikian hubungan antara *chromosome* dengan akurasi melalui beberapa tahap yaitu pertama, dengan menggunakan *genetic algorithm* untuk

mendapatkan nilai *genome* pada *chromosome* yang digunakan oleh *monomial* untuk melakukan *tracking* karakteristik *linear transducer*. Dalam *tracking* disusun oleh beberapa segmen berupa *monomial* yang membentuk rantai yang saling berhubungan sepanjang *linier transducer*. Kedua, data parameter pada masing masing *monomial* dan data segmen kemudian digunakan oleh program *error compensation* yang dimasukkan ke dalam *microcontroller*. Dimana *microcontroller* tersebut digunakan untuk melakukan koreksi pada sinyal data sebelum masuk ke *digital readout*. Kedua, dengan membandingkan nilai posisi pada *digital readout* dengan *laser calibrator* maka dapat diketahui akurasi dari *linear transducer*. Kemudian dengan membandingkan akurasi sebelum dan sesudah menggunakan *error compensation* maka dapat diketahui peningkatan akurasinya.

4.1 Perancangan

Pada penelitian ini, peningkatan akurasi dilakukan dengan mendekati kurva karakteristik *linear transducer* melalui beberapa segmen *monomial*. Sedangkan *monomial* adalah *linear interpolation* dimana koefisien merupakan bilangan *integer* yang mempunyai rentang bilangan 16 bit yang bernilai antara -32768 sampai dengan 32767 [63]. Tujuan menggunakan bilangan *integer* 16 bit adalah agar penggunaan koefisien dalam proses perhitungan yang akan dilakukan tidak memerlukan *floating point* dan koefisien dapat dideklarasikan dalam variabel *integer*. *Linear interpolation* atau *monomial* dipilih dengan pertimbangan untuk memastikan hanya satu kemungkinan lintasan garis diantara dua titik masing masing segmen. Menggunakan *linear interpolation* akan menyederhanakan pengkodean *chromosome* dan akan memperkecil ukuran populasi. Dengan cara ini maka kecepatan kerja *genetic algorithm* dapat ditingkatkan. Persamaan *monomial* seperti pada persamaan dibawah ini.

$$Y = bX + a + e \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

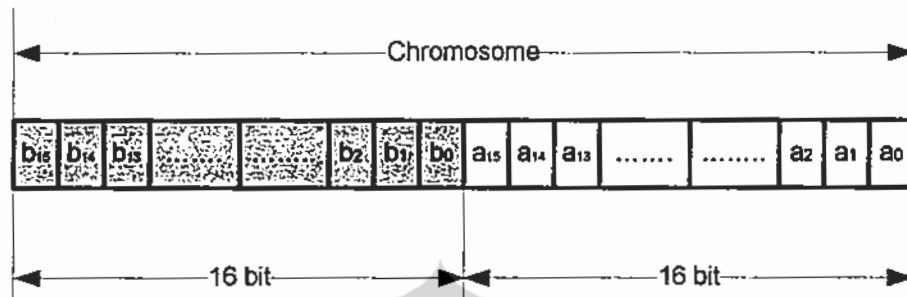
Dimana : Y = Posisi terkompensasi

X = Posisi aktual

a, b = koefisien

e = *error residu*

Sehingga penyusunan individu (*genome*) pada *chromosome* untuk koefisien *monomial* seperti terlihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1. Chromosome

4.2 Algoritma

Hasil dari proses dari *genetic algorithm* adalah koefisien *monomial* dan mengingat semua koefisien adalah bilangan *integer* maka nilai *residu error* menjadi sangat berpengaruh pada hasil akurasi kurva prediksi. Sementara itu *residu error* selalu berupa bilangan pecah sehingga memerlukan proses komputasi tinggi dan akan memperlambat proses kompensasi terutama bila dilakukan pada *microcontroller*. Sedangkan dalam penelitian ini sasarannya adalah dapat melakukan peningkatan akurasi secara *realtime*, salah satu caranya adalah dengan menggunakan bilangan *integer* dalam komputasinya.

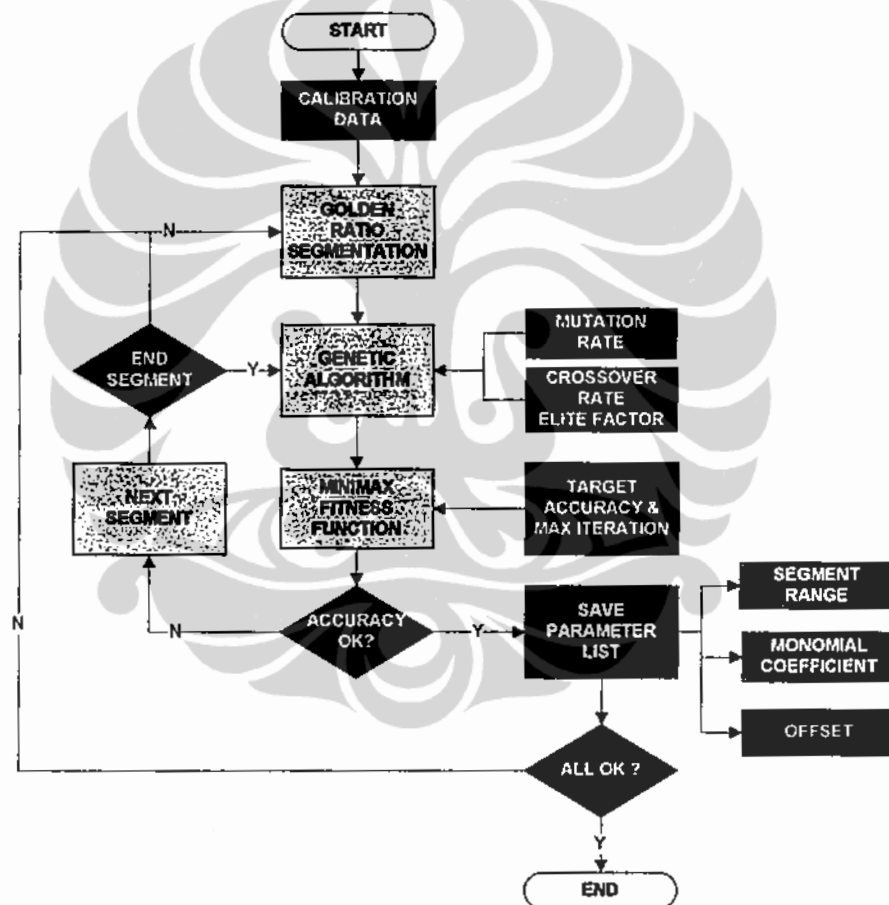
Selanjutnya untuk mengatasi hal tersebut maka persamaan (4.1) tersebut diubah dengan menggabungkan koefisien *a* dengan *e* menjadi nilai *offset* setiap titik awal sebuah *monomial*. Nilai *offset* tersebut yang berupa bilangan *integer*. Sehingga persamaan pada pembentukan *genome* pada *chromosome* menjadi sebagai berikut:

$$Y = bX + 0 + \text{offset} \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

- Dimana :
- Y = Posisi terkompensasi
 - X = Posisi aktual
 - b = Koefisien *monomial*

Dalam proses pencarian koefisien *monomial* sepanjang *linear transducer* dilakukan dengan menggunakan *golden ratio* untuk membuat segmen yang tepat

sesuai dengan kriteria fungsi kelayakan yang terdapat pada *genetic algorithm*. Setiap parameter hasil pencarian divalidasi sesuai dengan target akurasi. Apabila belum memenuhi syarat kelayakan, maka segmen proses pencarian diperkecil dengan menggunakan *golden ratio* kemudian diulangi proses pencarian parameter oleh GA. Sebaliknya bila sudah memenuhi syarat maka data segmen, koefisien *monomial* dan *offset* disimpan. Proses berlanjut ke segmen berikutnya dan proses ini diulang sampai seluruh panjang *linear transducer*. Adapun algoritma proses pencarian nilai parameter kompensasi terdapat pada gambar 4.2.



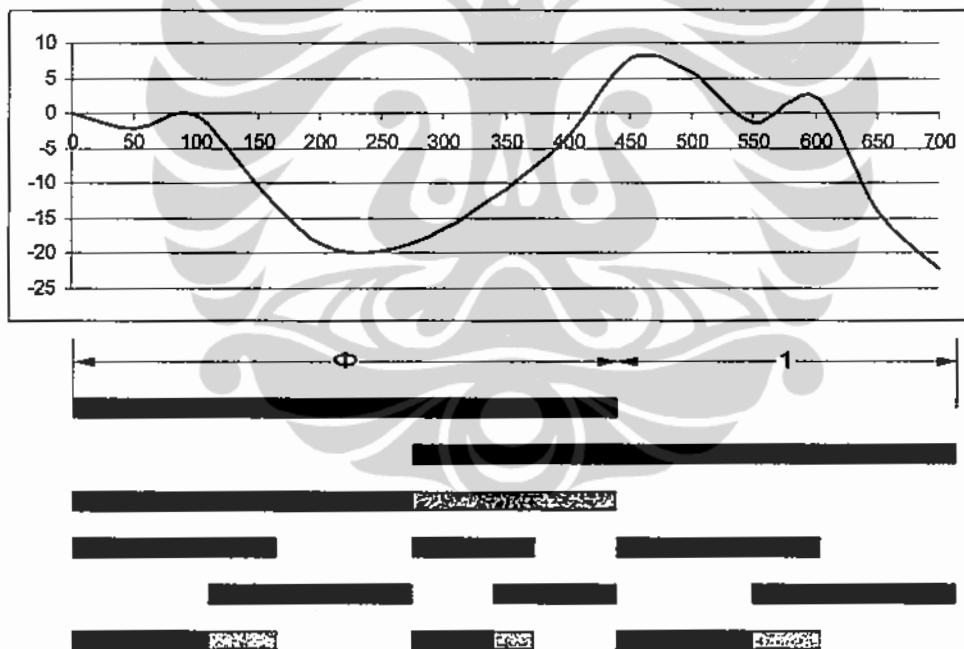
Gambar 4.2. Algoritma Pencarian Parameter Kompensasi

4.3 Segmentasi

Segmentasi merupakan cara untuk membagi daerah kerja optimasi menjadi beberapa bagian. Segmentasi dibutuhkan karena dengan satu segmen untuk sepanjang linear transducer optimasinya belum memuaskan sehingga hasil

akurasinya belum optimal. Sehingga optimasi oleh GA difokuskan hanya pada daerah tertentu per segmen. Metode segmentasi yang sering digunakan selama ini adalah segmentasi linier yaitu dengan membagi seluruh panjang segmen dengan interval sama. Metode segmentasi yang lainnya adalah metode kuadratis dan disebut juga dengan hirarki kuadrat seperti dilakukan oleh Dong Lee [62]. Dalam penelitian ini, metode segmentasi yang digunakan berbeda yaitu dengan nilai *golden ratio*. Sedangkan cara segmentasinya untuk membagi daerah yang dioptimasi oleh GA dapat dilihat pada gambar 4.3.

Setiap konstanta *monomial* dicari dengan menggunakan GA untuk memperoleh konstanta bilangan *integer*. Tujuan memakai bilangan *integer* untuk mempercepat proses kalkulasi bila diimplementasikan pada piranti lunak di *microcontroller*.



Gambar 4.3. Segmentasi

Adapun rentang bilangannya adalah 16 bit yang disesuaikan pada deklarasi pemrograman *signed int* dengan nilai antara -32768 sampai dengan 32767. Orde dari *monomial* diarahkan ke orde rendah untuk menyederhanakan dan mempercepat proses perhitungan. Evaluasi setiap *monomial* berdasarkan *rounding error* dan menurut Jeremie [64] *rounding error* maksimum e adalah sbb:

$$\varepsilon = \max_x |f(x) - p(x)| < 2^{-w} \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

Dimana:

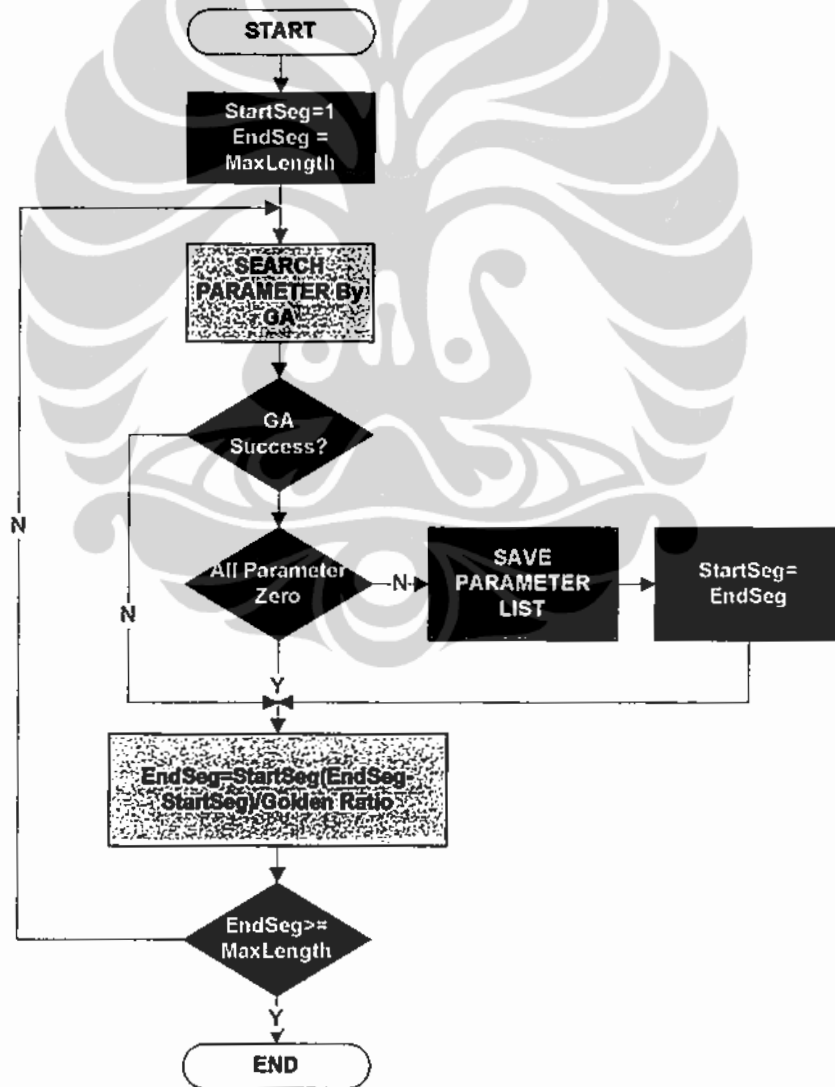
ε = rounding error

$f(x)$ = fungsi segmen dari data kalibrasi.

$p(x)$ = fungsi dari *monomial*

w = lebar data (16 bit)

Pada gambar 4.4 ditunjukkan algoritma proses segmentasi, pada awal proses, rentang maksimum langkah dianggap satu *monomial*, selanjutnya GA akan mencari parameter terbaik.



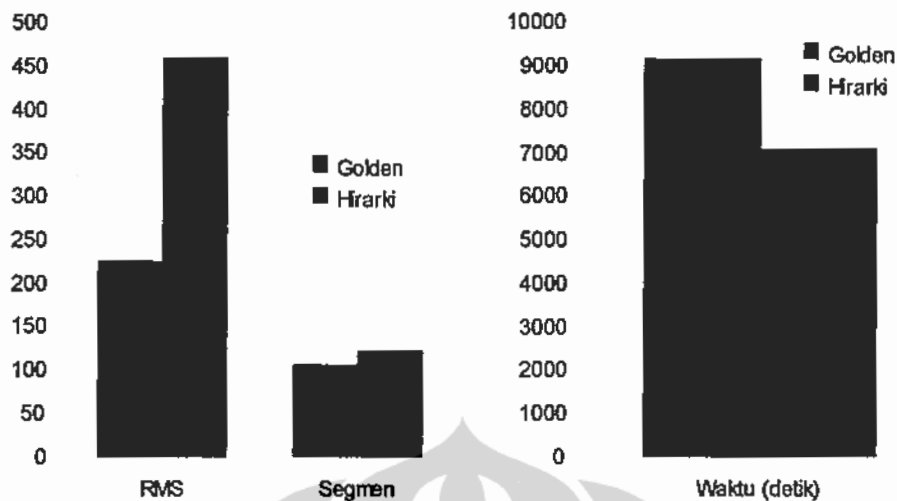
Gambar 4.4. Algoritma Segmentasi

Apabila GA sukses mendapatkannya maka diperiksa kembali parameter tersebut. Jika semua parameter tidak bernilai nol maka parameter tersebut disimpan beserta batas segmennya. Akan tetapi bila GA tidak sukses atau parameter hasil searching bernilai nol maka rentang segmen dikurangi dengan menggunakan *golden ratio* ($\Phi/\Phi+1$). Demikian seterusnya, sampai GA memperoleh nilai parameter yang terbaik. Jika satu segment telah didapatkan paramaternya maka proses searching dilanjutkan pada segmen berikutnya. Dimana awal segmen bergeser ke akhir segmen yang telah sukses pada proses sebelumnya. Iterasi ini terus berlanjut sampai dengan seluruh rentang ukur *linear transducer*.

Untuk mengetahui kinerja teknik segmentasi algoritma yang dikembangkan yang berkaitan dengan proses segmentasi, maka dibandingkan nilai *root mean square* (RMS), kecepatan proses dan jumlah segmen. Dari dua metode yaitu *golden ratio* dan hirarki kuadrat untuk pencocokan kurva karakteristik *linear transducer*. Adapun hasil perbandingannya terlihat pada tabel 4.1. Sedangkan pada gambar 4.5. kinerja segmentasi dengan menggunakan *golden ratio* dibandingkan dengan hirarki kuadrat.

Tabel 4.1
Perbandingan kinerja Golden Ratio dengan Hirarki Kuadrat

No	RMS		Waktu (detik)		Jumlah Segmen	
	Golden	Hirarki	Golden	Hirarki	Golden	Hirarki
1	319	287	13519	12581	119	139
2	68	177	8470	8077	116	140
3	68	840	7666	7821	116	125
4	68	835	11220	7499	116	124
5	305	835	13049	10232	101	124
6	254	778	10314	4666	96	123
7	272	165	7695	2205	97	114
8	286	153	9662	9554	94	116
9	302	164	4891	6203	93	115
10	303	357	4806	1939	93	92
Rata rata	225	459	9129	7077	104	121



Gambar 4.5. Kinerja Golden Ratio

Dari data diatas terlihat bahwa *golden ratio* mempunyai nilai RMS dan jumlah segmen yang lebih sedikit dibandingkan dengan hirarki kuadrat, yaitu $225/459 \times 100 \% = 49.0\%$. Dari hasil segmen maka GR menghasilkan jumlah segmen yang lebih kecil sekitar $104/121 \times 100\% = 85.9\%$ Sehingga dalam pemakaian disini, segmentasi menggunakan *golden ratio* lebih baik dibandingkan dengan hirarki kuadrat. Akan tetapi dari segi waktu proses kerja ternyata hirarki kuadrat lebih cepat dibandingkan dengan *golden ratio*, hal ini disebabkan oleh pada saat melakukan segmentasi dimana pada hirarki kuadrat menggunakan bilangan *floating point* sedangkan pada *golden ratio* menggunakan bilangan *integer*. Waktu yang dibutuhkan oleh GR adalah $9129/7077 \times 100\% = 128.9\%$

4.4 Internal Configuration

Dalam penelitian ini, untuk mendapatkan konfigurasi *genetic algorithm* terbaik maka dilakukan evaluasi terhadap *internal configuration* dari komponen komponen penyusun *genetic algorithm*. Evaluasi *internal configuration* meliputi pemilihan konfigurasi *genetic algorithm* yaitu analisa variasi operator *selection* dan operator *crossover*. Dengan variasi kombinasi operator tersebut dipilih konfigurasi operator yang memberikan nilai SSE terrendah. Dengan demikian diharapkan akan diperoleh konfigurasi *genetic algorithm* yang memberikan kinerja terbaik. Dalam evaluasi ini data yang digunakan adalah data hasil kalibrasi dari sebuah sistem mekanik yang belum dilakukan kompensasi. Kemudian untuk

menggali lebih dalam kemampuan GA dan jumlah generasi yang cukup untuk evaluasi memilih konfigurasi terbaik maka dalam evaluasi ini digunakan untuk mencari parameter bilangan integer polinomial orde tinggi. Karena bila diaplikasikan pada pencarian parameter orde rendah atau *monomial* maka variasi operator pada *internal configuration* memberikan kinerja sama baiknya sehingga seakan akan tidak ada bedanya antara konfigurasi satu dan lainnya. Oleh karena itu, khusus untuk evaluasi internal dari *genetic algorithm* digunakan polinomial sedangkan untuk aplikasinya setelah diperoleh konfigurasi terbaik, maka kembali digunakan untuk mencari parameter *monomial*.

Pada penelitian ini, fungsi kelayakan *genetic algorithm* yang digunakan untuk evaluasi *chromosome* setiap generasi adalah *sum of squares error* (SSE) yaitu fungsi statistik yang mengukur deviasi total nilai hasil GA dengan nilai aktual yang diperoleh dari kalibrator pada sistem mekanik. Adapun persamaan untuk menghitung SSE seperti pada persamaan dibawah ini [65].

$$SSE = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n (f(x_i) - y_i)^2 \quad \dots\dots\dots(4.4)$$

Dimana :

r = residu = f(x) - y

f(x) = karakteristik *transducer*.

y = fungsi estimasi menggunakan GA *golden ratio*

Nilai SSE semakin rendah berarti koefisien hasil *searching* GA semakin baik dan hasilnya mendekati nilai yang diperoleh dari kalibrator. Sehingga fungsi obyektif ini mengarahkan GA untuk mendapatkan nilai SSE sekecil-kecilnya.

Selanjutnya, pengaturan parameter GA untuk simulasi mengacu pada *genetic algorithm library* yang diperoleh dari *University of Sheffield, UK* [66]. Dengan jumlah generasi maksimum 80.000, jumlah individu setiap subpopulasi 40. Sedangkan untuk probabilitas *crossover* = 0.7 dan mutasi 0.001 seperti yang dilakukan oleh Mitsuo [40], Lai [41] dan Johnson [43].

Langkah pertama dalam evaluasi adalah menentukan konfigurasi GA yang sesuai untuk mencari koefisien polinomial terbaik. Percobaan dengan

melakukan kombinasi antara operator seleksi RW, SUS dan operator *crossover* MP dan SF, sehingga diperoleh 4 set data. Selanjutnya untuk mengetahui kualitas hasil masing masing kombinasi seleksi dan persilangan dengan mengetahui nilai SSE. Terlihat pada tabel 4.2. bahwa operator *Stochastic – Multi Point* memberikan nilai SSE 68,6 % lebih rendah dari SSE rata rata. Disini menggambarkan bahwa kombinasi tersebut adalah yang terbaik dari variasi yang lainnya.

Kecepatan operasi menggambarkan efisiensi komputasi GA untuk melakukan *searching*. Disini konfigurasi SUS-SF adalah yang tercepat untuk menyelesaikan generasi 80.000, sedang yang terlama adalah variasi RW-SF. Selain itu juga dilihat maksimum generasi untuk menghasilkan nilai SSE terbaik (rendah). Disini RW-MP dan SUS-MP mempunyai nilai generasi lebih tinggi. Artinya operator *crossover* MP memberikan indikasi mempunyai dimensi pencari yang lebih luas atau tidak cepat terjebak pada *local optimum*. Sehingga MP lebih baik dibandingkan SF karena mempunyai sifat bias atau ketidak-miripan dengan induknya dan jangkauan reproduksi *chromosome* lebih luas. Data kecepatan operasi dan maksimum generasi jenuh sampai dengan 80.000 generasi terdapat pada tabel 4.3.

Tabel 4.2 Perbandingan Kualitas Konfigurasi

Konfigurasi	SSE	SSE vs SSE rata-rata
RW – SF	233028.0560	149.4 %
RW – MP	129559.3285	83.0 %
SUS – SF	154225.0779	98.9 %
SUS – MP	107079.2679	68.6 %
SSE rata-rata	155972.9326	

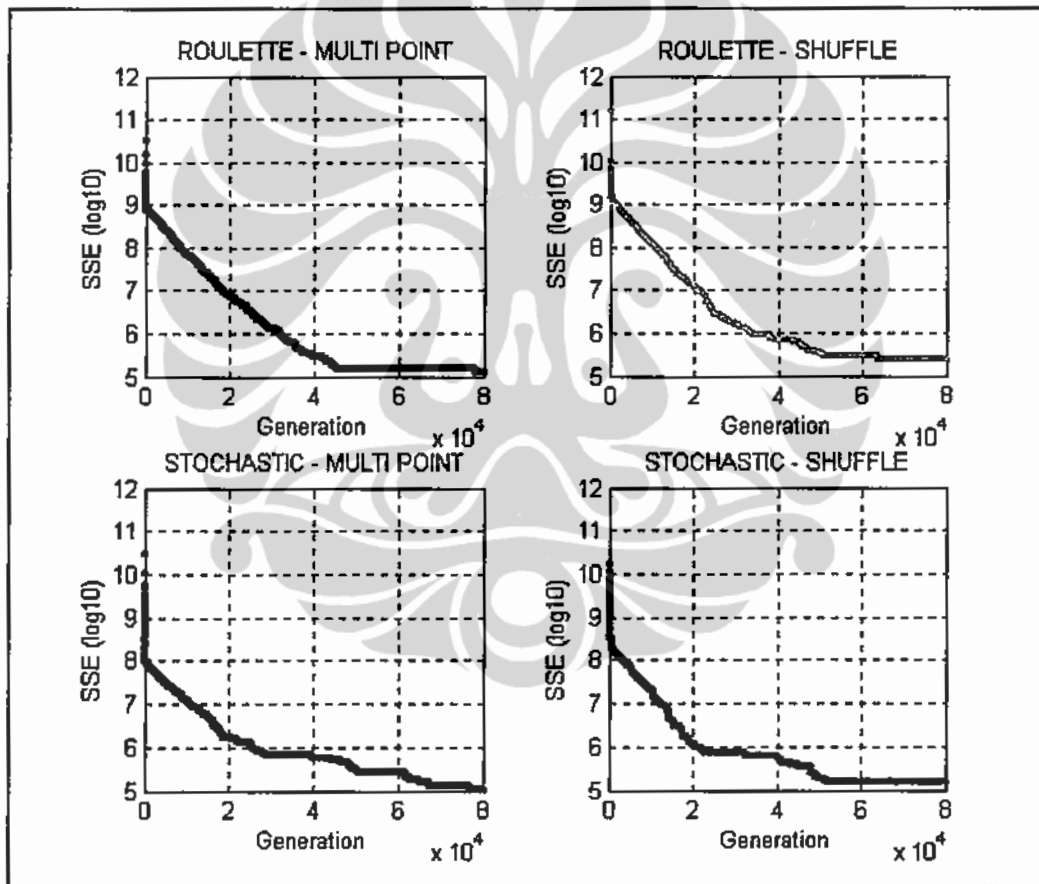
Pada gambar 4.6. diperlihatkan grafik progres kerja masing variasi operator *selection* dan *crossover*. Operator SUS terlihat penurunan nilai SSE lebih cepat dibandingkan dengan RW demikian juga pada hasil akhir generasi SUS memberikan nilai SSE lebih kecil. Pada gambar 4.6. tersebut terlihat pula operator MP menghasilkan solusi lebih baik dibandingkan dengan SF. Sehingga dari percobaan ini diperoleh kombinasi operator SUS–MP adalah yang terbaik sebagai penentu koefisien polinomial bilangan *integer* karena nilai SSE terendah, walaupun operasinya relatif lebih lambat dibandingkan dengan kombinasi operator lain.

Tabel 4.3

Waktu Operasi dan Maksimum Generasi Jenuh

Konfigurasi	SSE terbaik	Waktu (detik)
RW - SF	64017	5480
RW - MP	78106	5163
SUS - SF	54713	4569
SUS - MP	77949	5401

Dari evaluasi ini dapat diketahui bahwa sisi variasi konfigurasi operator *selection* dan *crossover* maka kombinasi SUS-MP memberikan hasil yang terbaik dibandingkan variasi lainnya.

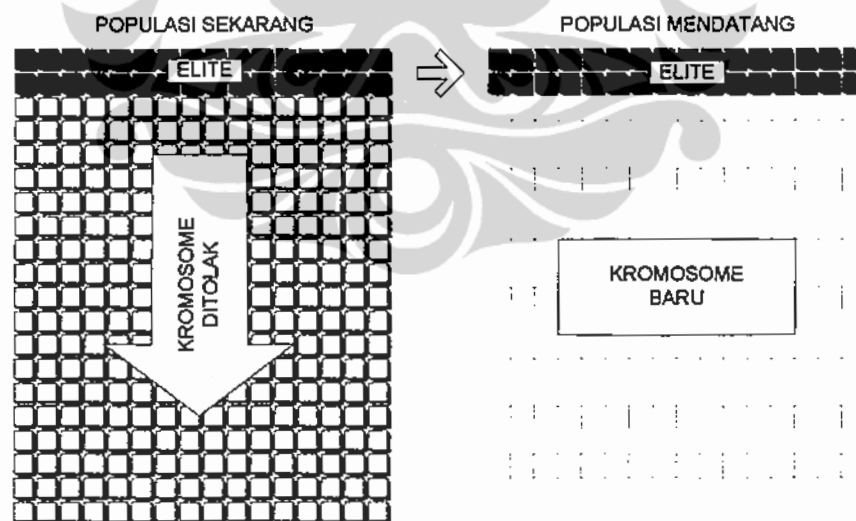


Gambar 4.6. Grafik Progress Konfigurasi Operator GA

4.5 Elite Chromosome

Pada *genetic algorithm* setiap generasi terdapat kumpulan *chromosome* yang dibangkitkan secara acak. Melalui cara ini membuka peluang untuk mendapat *chromosome* yang lebih baik dari sebelumnya. Pada awalnya

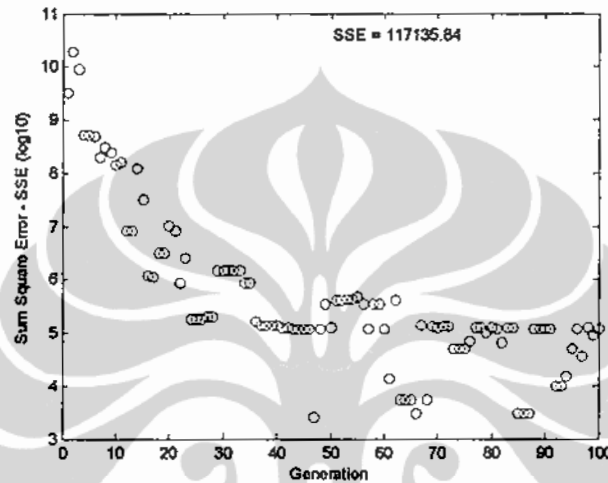
chromosome dirangking berdasarkan fungsi kelayakan yang diberikan. *Chromosome* yang mempunyai nilai kelayakan yang tinggi semakin tinggi rangkingnya. Kumpulan *chromosome* rangking tertinggi disebut *elite chromosome*. Pada generasi awal *elite chromosome* belum tentu memberikan solusi yang terbaik terhadap problem yang sedang diselesaikan. Untuk itu *elite chromosome* dimasukkan kembali pada populasi generasi berikutnya. Cara ini disebut dengan elitisasi yang berfungsi untuk mempercepat mendapatkan *chromosome* dengan nilai kelayakan tinggi. Dari percobaan ternyata persentase *elite chromosome* yang diikutkan ke generasi berikutnya memberikan hasil yang berbeda-beda. Untuk itu maka perlu dilakukan penelitian dan evaluasi pengaruh jumlah *elite chromosome* pada GA. *Elite chromosome* tersebut akan mempengaruhi kerja GA dalam pencarian parameter kompensasi. Evaluasi dilakukan dengan menghitung SSE yang merupakan jumlah deviasi *error* antara kurva asli karakteristik asli *transducer* dengan kurva estimasi hasil GA-*golden ratio*, semakin kecil nilai SSE berarti semakin baik. Pada gambar 4.7. diperlihatkan teknik elitisasi, dimana sebagian *chromosome* terbaik dimasukkan kembali ke dalam populasi pada generasi berikutnya.



Gambar 4.7. Elitisasi

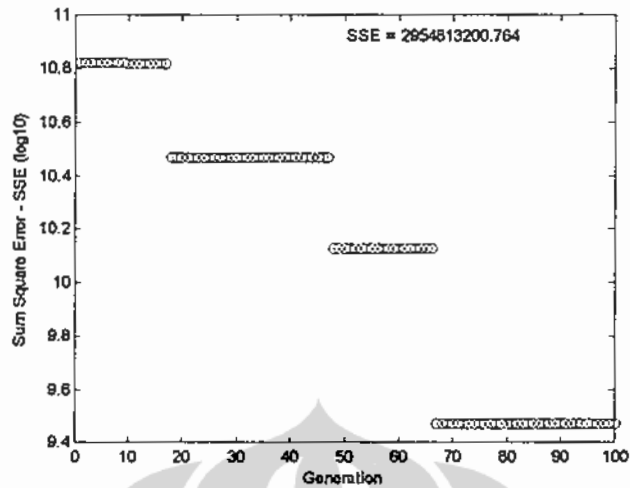
Evaluasi pengaruh jumlah *elite chromosome* terhadap kinerja GA-*golden ratio* dilakukan dengan memasukan jumlah *elite chromosome* berbeda beda. Dalam penelitian ini adalah dari 0 – 100 % yaitu pada 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% dan 100%.

Pada 0% dimana hanya *chromosome* baru yang diikuti dalam proses generasi berikutnya. Hasil pencariannya ternyata tidak konsisten, tidak selalu menghasilkan nilai SSE yang semakin kecil. Hasil tidak menuju konvergensi kearah semakin baik. Hal ini disebabkan oleh *chromosome* terbaik sebelumnya tidak dapat diingat oleh GA sehingga hasil pencarian acak seperti diperlihatkan pada gambar 4.8.



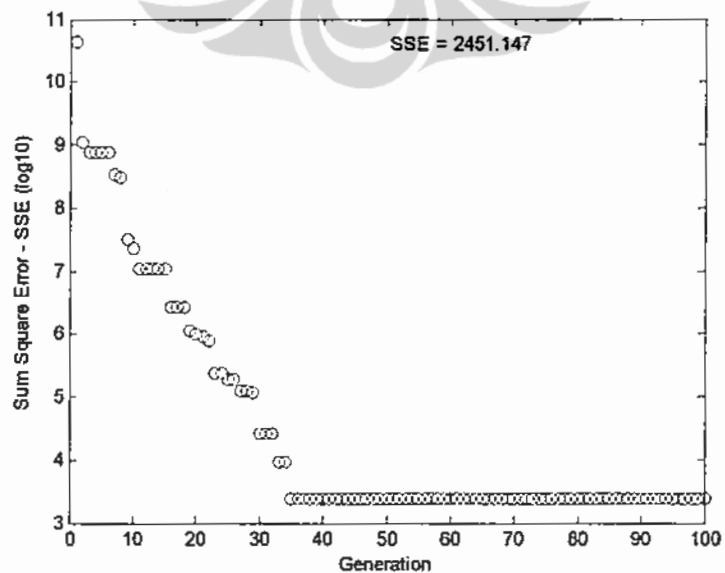
Gambar 4.8. GA-Golden Ratio Tanpa Elite Chromosome.

Kemudian evaluasi dilakukan juga pada 100% *elite chromosome*, seluruh *chromosome* dimasukan kedalam populasi proses generasi berikutnya. Dalam hal ini GA-Golden Ratio hanya bekerja pada satu kumpulan *elite chromosome* tanpa mendapatkan *chromosome* baru. Pada percobaan ini maka hasilnya kurang memuaskan. GA tidak dapat menemukan *chromosome* yang semakin baik untuk setiap generasinya. GA hanya mengeksplorasi kelompok *elite chromosome* dalam jumlah terbatas. Gambar 4.9. memberikan gambaran kerja GA dengan 100% *elite chromosome*. Disini dari generasi ke generasi tidak diperoleh penurunan nilai SSE secara signifikan dan hasil akhir SSE juga relatif besar untuk jumlah generasi yang sama.



Gambar 4.9. GA-Golden Ratio Dengan 100% Elite Chromosome

Pada evaluasi dengan rentang 10% s/d 90% *elite chromosome* memberikan hasil yang memuaskan. GA-GR dapat bekerja menemukan solusi terbaiknya dan arah dari hasil pencarian konvergen menuju perbaikan. GA-GR dapat mengingat *chromosome* terbaik sebelumnya. GA-GR akan segera mengganti *chromosome* sekarang dengan *chromosome* yang baru bila ditemukan *chromosome* dengan nilai SSE lebih rendah. Dengan demikian hasil dari pencarian menjadi selalu lebih baik yang digambarkan nilai SSE yang selalu semakin mengecil. Pada gambar 4.10, diperlihatkan salah satu proses kerja GA dengan *elite chromosome* antara 10-90 %.



Gambar 4.10. GA-Golden Ratio 10%-90% Elite Chromosome

Pada rentang 10% s/d 90% *elite chromosome* yang ikut pada populasi berikutnya mempunyai karakteristik mirip dalam menghasilkan parameter kompensasi. Sama sama mampu konvergen untuk mendapatkan nilai SSE yang terbaik. Oleh karena perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut untuk memilih jumlah *elite chromosome* paling optimal dan konsisten serta memberikan solusi terbaik. Evaluasi kinerja metode GA-*golden ratio* dilakukan berulang ulang untuk mendapatkan gambaran konsistensi hasilnya. Untuk evaluasi ini digunakan *root mean square* (RMS) yang merupakan evaluasi *standard error* masing masing *elite chromosome*. Dimana *root mean square* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut: [55].

$$E(f) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |f(x_k) - y_k|^2} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

Dimana untuk $1 \leq k \leq N$

$E(f)$ = *root mean square* (RMS)

$f(x)$ = karakteristik *transducer*.

y = fungsi estimasi menggunakan GA *golden ratio*

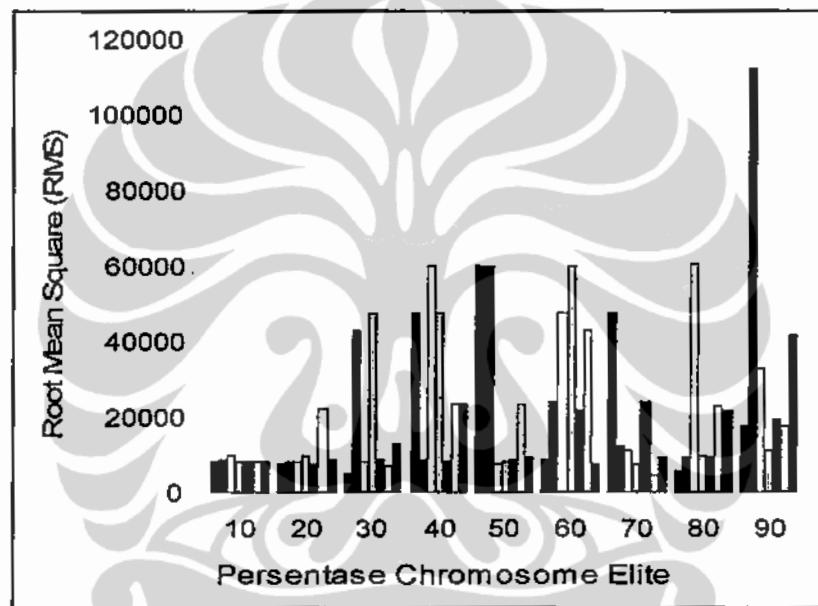
Pada tabel 4.4. memperlihatkan data RMS dan standard deviasi, sedangkan gambar 4.11 memperlihatkan pengaruh jumlah persentase *elite chromosome* terhadap nilai RMS dari GA.

Tabel 4.4

Evaluasi Pengaruh Jumlah Elite Chromosome pada Genetic Algorithm

No	Chromosome Elite (%) – Nilai Root Mean Square (RMS)								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
1	8171	7785	5166	47447	60244	8463	47389	5843	17476
2	8725	8150	42853	8710	60320	24158	12279	9616	112472
3	10072	8171	7960	60323	7638	47450	10860	60326	33034
4	8171	10072	47449	47448	8024	60321	7363	9658	11304
5	8171	7784	8710	8058	8542	21579	24146	9519	19373
6	8171	22016	6699	23254	23458	42853	4830	22982	17314
7	8171	8780	13057	23562	9448	7281	9072	21815	41992
RMS	8522	10394	18842	31257	25382	30301	16563	19966	36138
RMS vs RMS Rata-rata (%)	38.9	47.4	85.9	142.5	115.7	138.2	75.5	91.0	164.8
STDev	714	5186	18184	20571	24472	20304	14928	18989	35287
STDev vs STDev Rata rata (%)	4.1	29.4	103.2	116.7	138.8	115.2	84.7	107.7	200.2

Terlihat bahwa jumlah *elite chromosome* memberikan hasil yang berbeda-beda terhadap nilai RMS. Variasi tersebut disebabkan cara kerja dari GA yang berevolusi secara acak dan bergerak menuju yang hasil yang semakin baik hanya berdasarkan nilai kelayakan setiap generasinya. Kinerja yang dihasilkan maka pada persentase pada 10% *elite chromosome* diperoleh nilai RMS terkecil dan disisi lain nilai RMS relatif konstan dibandingkan dengan jumlah persentase *elite chromosome* yang lain. Dimana standard deviasinya 4.1% dibandingkan standar deviasi rata-rata. Dengan demikian, untuk penelitian lebih lanjut maka dipilih jumlah *elite chromosome* sebesar 10 % dari populasi.



Gambar 4.11. Pengaruh Elitisasi Terhadap Kinerja GA

4.6 Simulasi

Simulasi digunakan untuk mengetahui kinerja dari genetic algorithm – *golden ratio* (GA-GR) dalam peningkatan akurasi *linear transducer* sebelum digunakan secara langsung pada *mechanical positioning system*. Tujuan utamanya adalah untuk validasi algoritma yang sedang dibangun, apakah sudah bekerja sesuai tujuan penelitian. Dalam simulasi ini yang terpenting dapat mengetahui kemampuan GA-GR untuk mengikuti kurva sasaran simulasi. Dengan melihat hasil simulasi maka dapat dilakukan perbaikan, modifikasi atau pengaturan parameter pada algoritma yang sedang kembangkan kalau memang bila belum memuaskan. Melalui simulasi algoritma yang diteliti diharapkan sudah lebih baik ketika hendak digunakan pada *mechanical positioning system*.

Dalam kegiatan simulasi diperlukan kurva karakteristik *linear transducer* sebagai sasaran untuk *tracking* oleh GA-GR. Disini digunakan data karakteristik dari beberapa alat hasil kalibrasi. Dengan data karakteristik *linear transducer* tersebut, diharapkan akan diperoleh hasil simulasi yang mendekati kondisi nyata. Adapun data karakteristik *transducer* untuk keperluan simulasi dapat dilihat pada tabel 4.5. Data tersebut mempunyai rentang 700 milimeter disesuaikan *mechanical positioning system* yang akan digunakan dalam pengujian akurasi nantinya sehingga dalam simulasi dibuat semirip mungkin dengan kondisi nyata.

Tabel. 4.5. Data Simulasi

No	Posisi (mm)	Simpangan Posisi (um)			
		1	2	3	4
1	0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	50	-29.3	-28.3	-2.1	-0.8
3	100	-47.8	-37.0	-0.4	-1.6
4	150	-54.8	-43.1	-9.9	-3.5
5	200	-70.7	-60.2	-18.4	2.4
6	250	-84.4	-81.6	-20.0	-1.4
7	300	-97.7	-85.4	-16.3	-5.5
8	350	-105.5	-75.5	-12.9	-5.8
9	400	-94.6	-79.5	-2.8	-4.3
10	450	-73.8	-52.1	8.0	7.3
11	500	-70.1	-47.8	6.7	6.5
12	550	-34.0	-17.6	-0.4	12.1
13	600	-53.8	-39.0	3.2	11.3
14	650	-34.0	-16.4	-13.7	13.6
15	700	-55.2	-42.9	-22.8	12.0

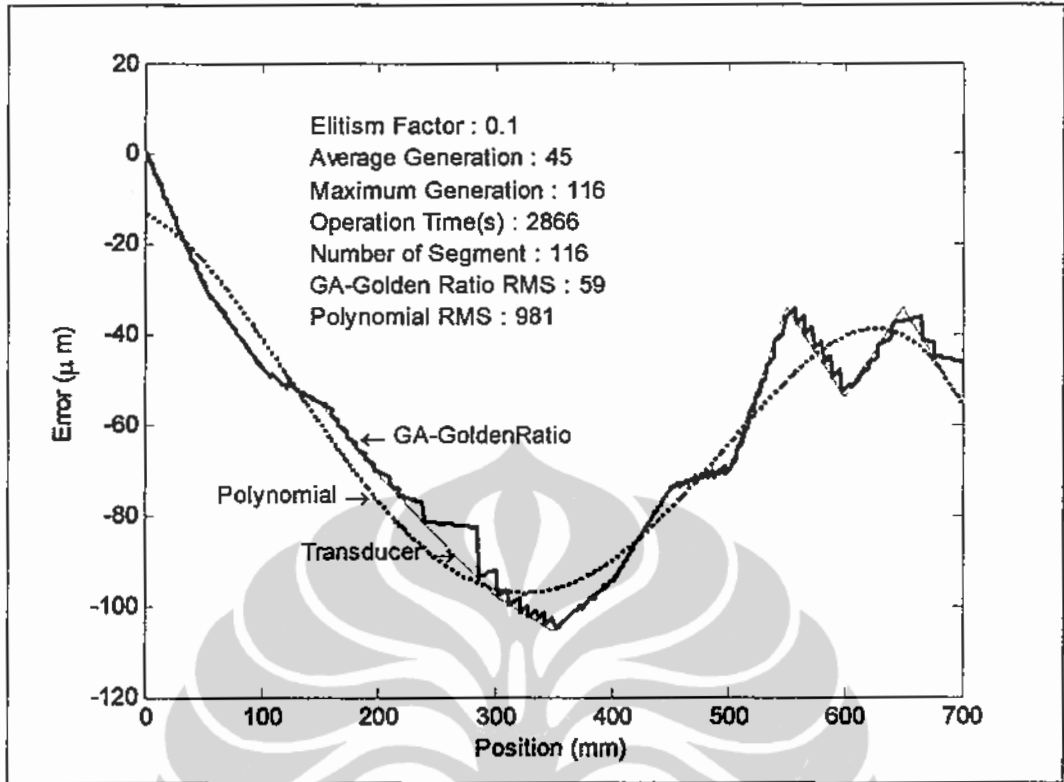
Dalam simulasi perlu dilakukan evaluasi dari hasil GA-GR. Ukurannya adalah seberapa mirip hasil GA-GR dengan kurva karakteristik *transducer*. Untuk digunakan besaran RMS. Semakin kecil nilai RMS maka hasil simulasi semakin mirip dengan kurva karakteristik *transducer*.

Selanjutnya untuk mengetahui kinerja hasil GA-GR maka dibandingkannya nilai RMS dari GA-GR dengan nilai RMS dengan polinomial. Polinomial yang digunakan adalah orde 4 dengan memanfaatkan fungsi *polyfit* dari Matlab. Alasan menggunakan polinomial orde 4 karena untuk orde yang lebih tinggi parameter yang dihasilkan terlalu kecil, sehingga kurang signifikan

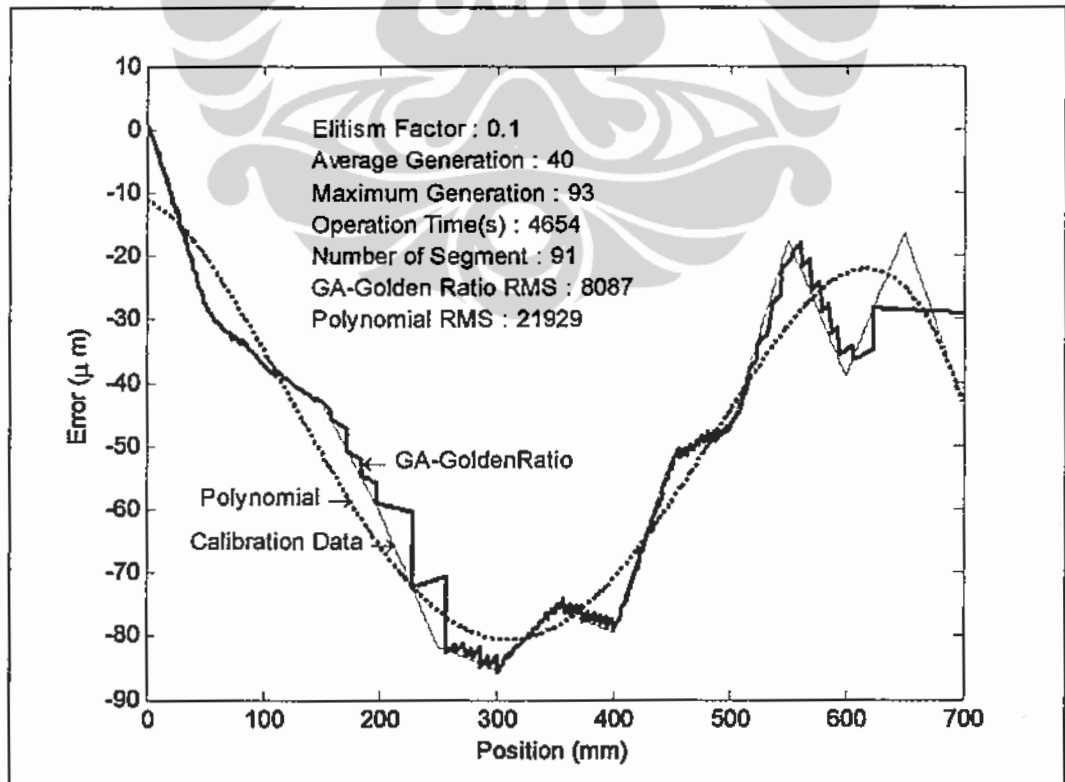
pengaruhnya terhadap nilai RMS dan nilai parameter kecil akan dibulatkan dalam perhitungan sehingga hasilnya kurang tepat atau keliru. Sedangkan bila menggunakan orde rendah dibawah orde 4, maka kurva hasil dari polinomial tersebut masih kurang mendekati kurva karakteristik *transducer* sehingga nilai RMS yang dihasilkan tinggi.

Dalam simulasi diperoleh juga data jumlah generasi rata-rata dan generasi maksimum. Jumlah generasi ini menggambarkan kecepatan konvergensi *genetic algorithm*, semakin kecil nilainya semakin baik. Dari simulasi diperoleh jumlah segmen, satu segmen adalah satu *monomial* dari segmentasi dari *golden ratio*. Semakin sedikit jumlah segmennya semakin baik, namun jumlah segmen ini sangat bervariasi tergantung dari tingkat kerumitan bentuk kurva karakteristik *transducer*. Pada simulasi juga peroleh waktu operasi, semakin cepat semakin baik. Dari sekian banyak data yang diperoleh yang paling penting adalah nilai RMS dari hasil GA-GR, karena nilai ini menggambarkan kualitas dari GA-GR.

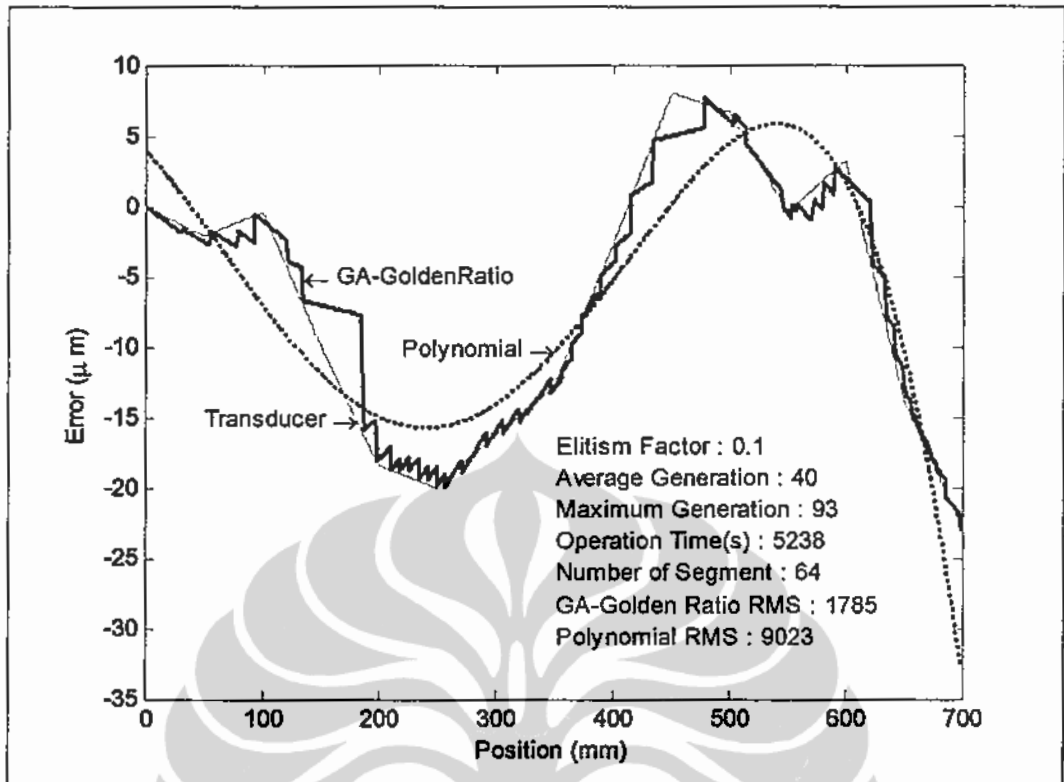
Pada gambar 4.12. sampai dengan 4.15 diperlihatkan grafik hasil simulasi dari masing masing data simulasi. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa GA-GR ternyata dapat mengikuti kurva karakteristik *transducer*. Kurva hasil GA-GR bentuk bergerigi karena setiap *monomial* dibentuk dari persamaan garis linier dan parameternya berupa bilangan *integer*. Pada gambar 4.16 dan tabel 4.6 memperlihatkan perbandingan nilai RMS yang dihasilkan oleh GA-GR dan polinomial. Dari grafik untuk data simulasi yang telah disampaikan tersebut ternyata RMS dari GA-GR lebih baik sekitar lebih dua kali lipatnya dibandingkan dengan hasil kurva polinomial untuk data simulasi yang telah disampaikan.



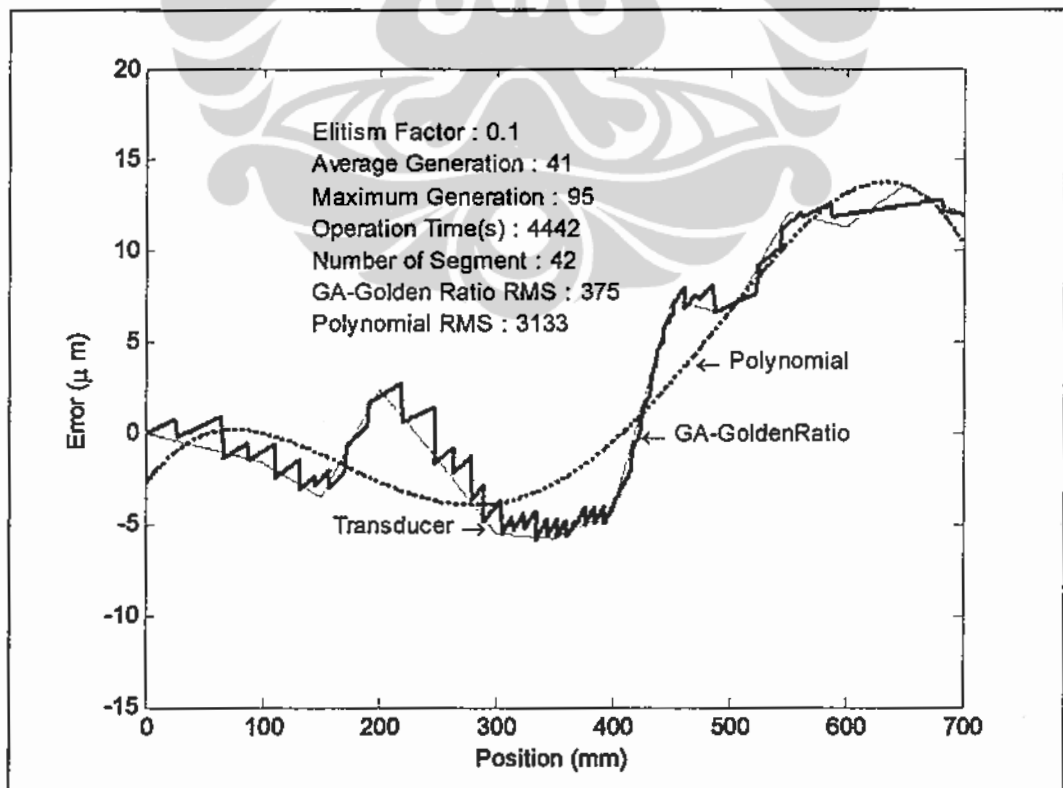
Gambar 4.12. Simulasi Data 1



Gambar 4.13. Simulasi Data 2



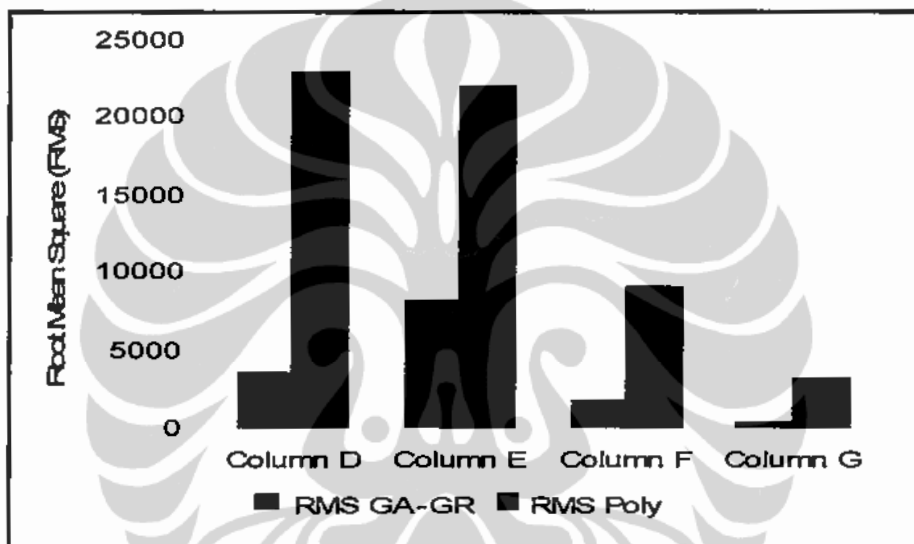
Gambar 4.14. Simulasi Data 3



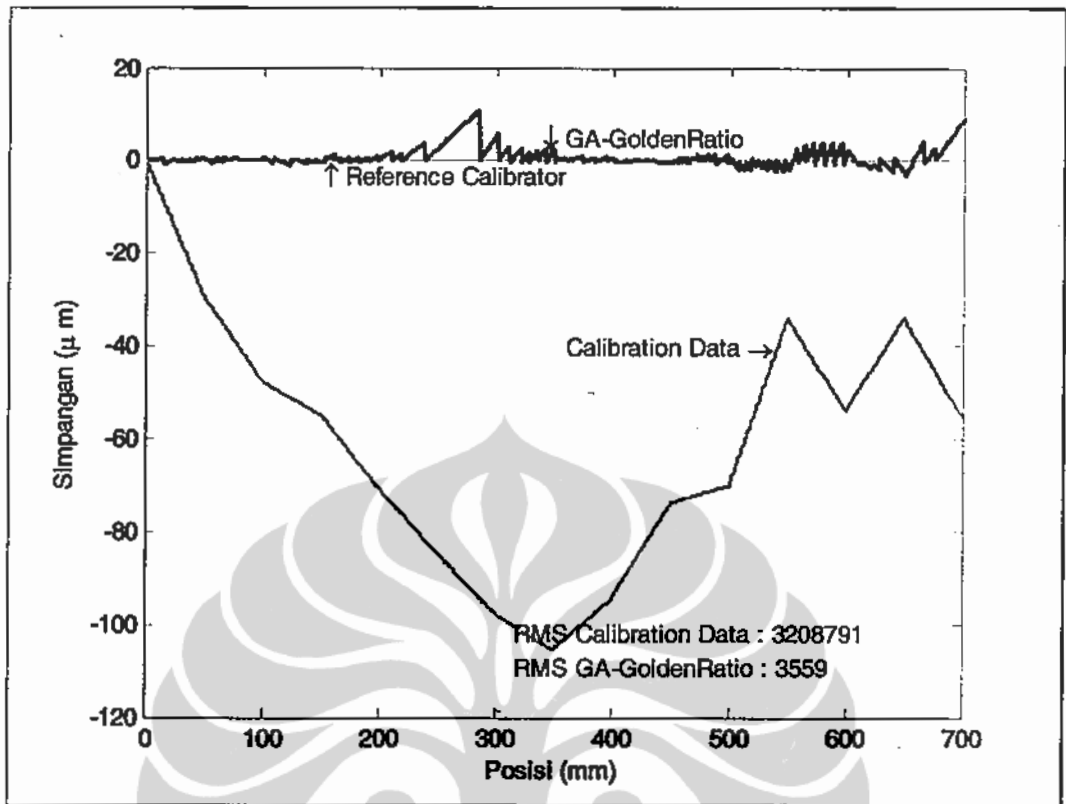
Gambar 4.15. Simulasi Data 4

Tabel 4.6. Perbandingan Hasil Simulasi

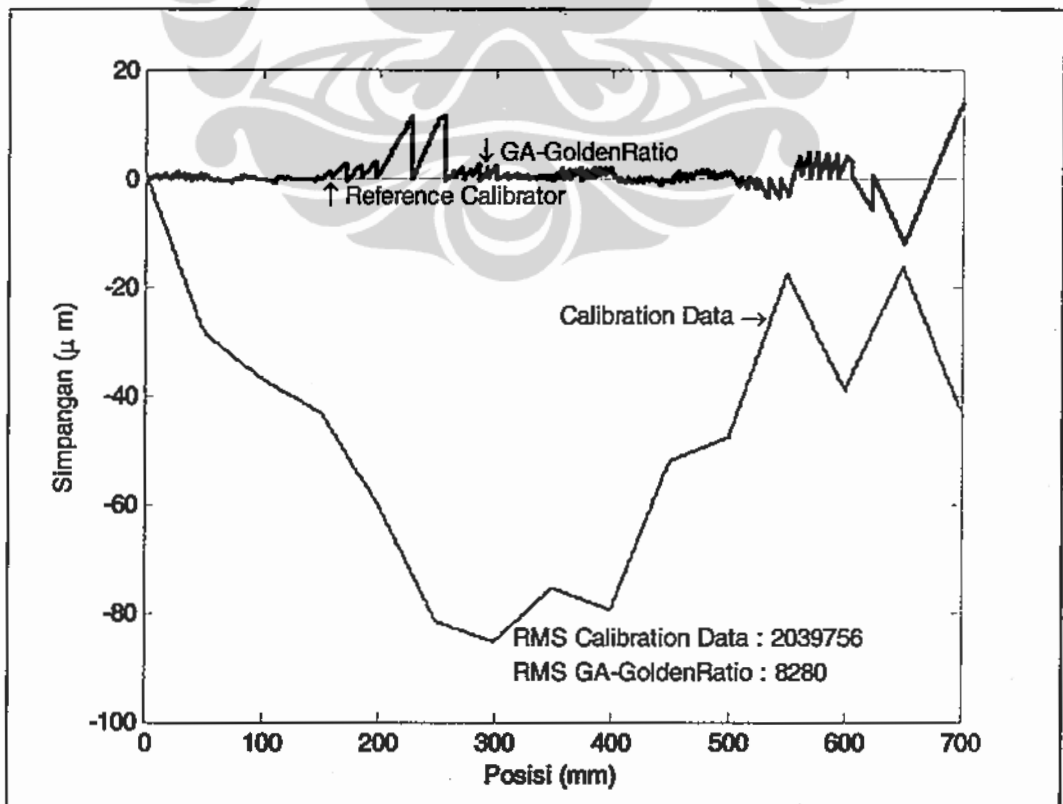
Nama Parameter	Data 1	Data 2	Data 3	Data 4
Jumlah Generasi Rata rata	45	40	40	41
GA. Mak. Generasi	116	93	93	95
Time (s)	2866	4654	5238	4442
Jumlah Segmen	116	91	64	42
RMS GA-GR	3476	8087	1785	375
RMS Polinomial	22929	21929	9023	3133



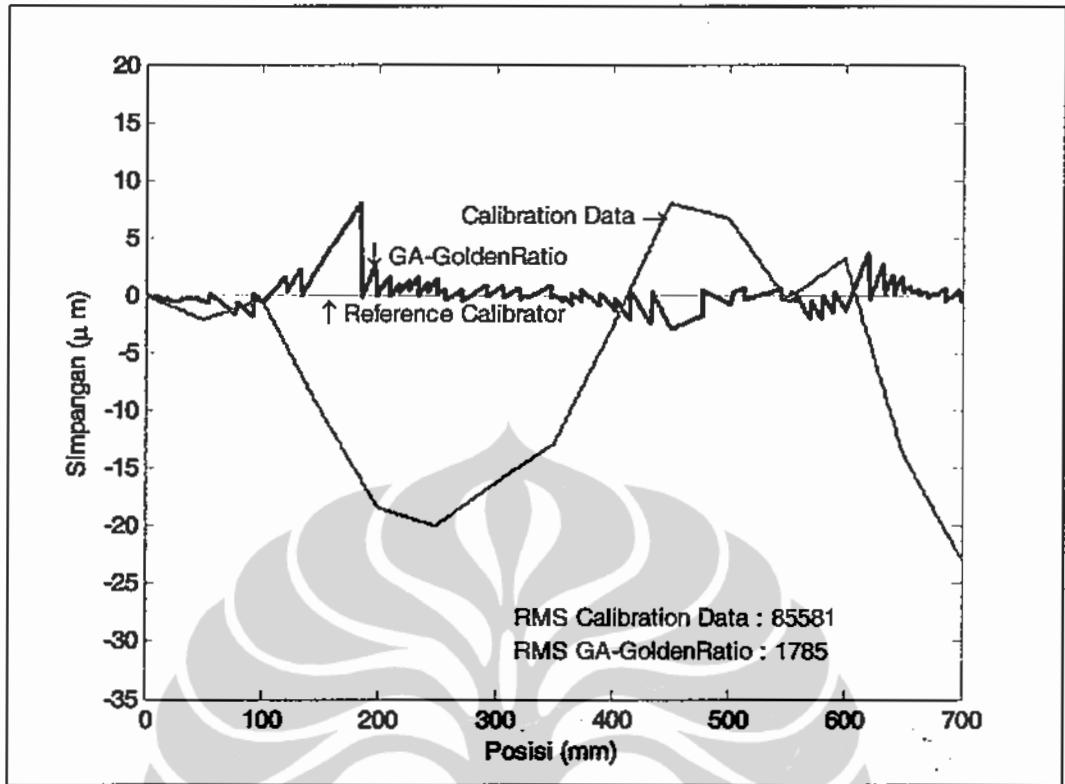
Gambar 4.16. Perbandingan Nilai RMS GA-GR dan Polinomial



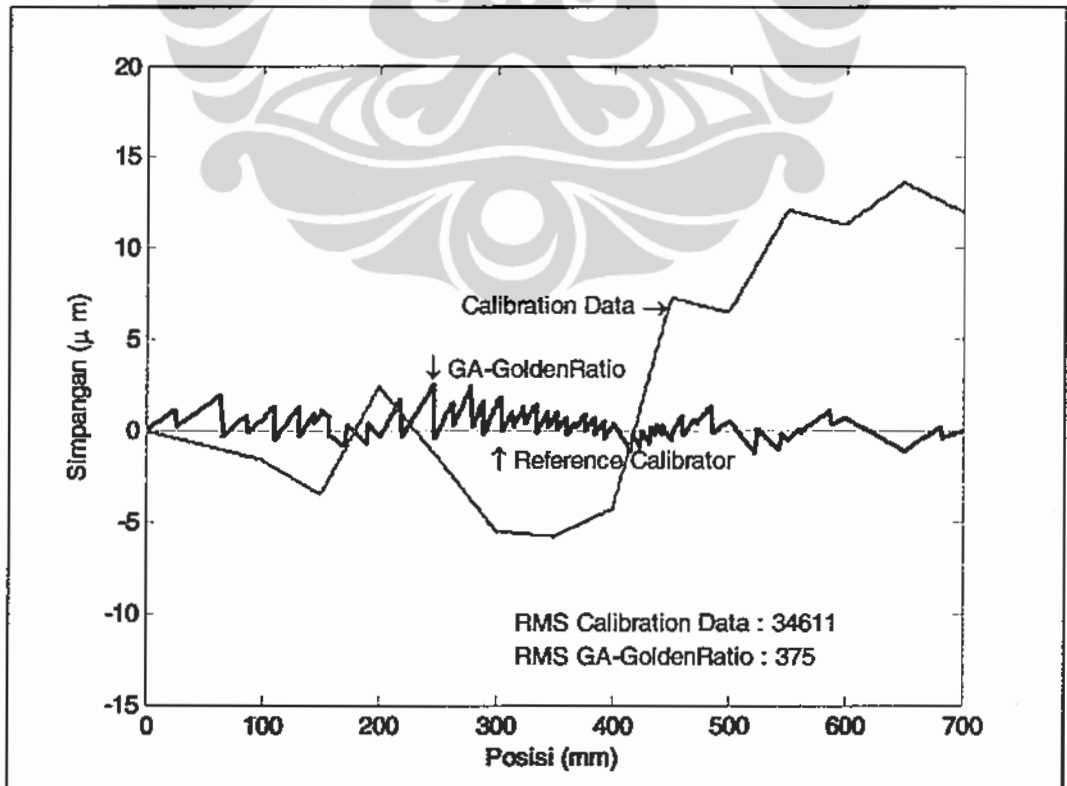
Gambar 4.17. Grafik Simulasi Peningkatan Akurasi Data 1



Gambar 4.18. Grafik Simulasi Peningkatan Akurasi Data 2



Gambar 4.19. Grafik Simulasi Peningkatan Akurasi Data 3



Gambar 4.20. Grafik Simulasi Peningkatan Akurasi Data 4

Tabel 4.7.

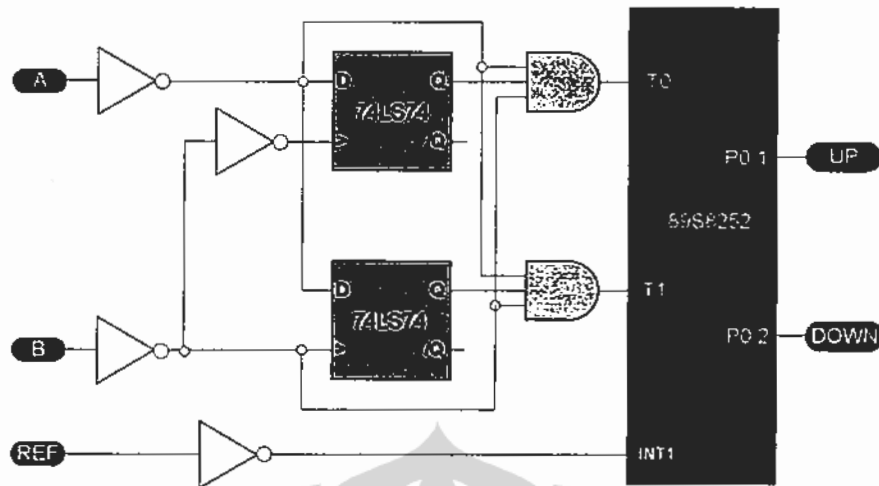
Perbandingan Peningkatan Nilai RMS Antara GA-GR dan Data Kalibrasi

Nama	Data 1	Data 2	Data3	Data 4
<i>Genetic Algortihm – Golden Ratio (GA-GR)</i>	3559	8280	1785	375
Data Kalibrasi	3208791	2039756	85581	34611
Peningkatan Nilai RMS (kali)	901	246	47	92

Pada gambar 4.17, 4.18, 4.19 dan 4.20, memperlihatkan grafik hasil simulasi peningkatan akurasi. Pada grafik tersebut terlihat bahwa akurasi GA-GR dapat mendekati garis referensi. Untuk mengetahui perbedaan tingkat akurasi hasil simulasi maka dihitung nilai RMS dari grafik GA-GR dan data kalibrasi. Pada tabel 4.7, memperlihatkan perbedaan nilai RMS tersebut. Dalam simulasi ini diperoleh peningkatan nilai RMS antara 47 sampai dengan 901 kali. Nilai ini bervariasi tergantung dari data input dan kemampuan GA-GR untuk melakukan *tracking* terhadap kurva data kalibrasi.

4.7 Microcontroller

Untuk melakukan kompensasi diperlukan *microcontroller* yang dipasang antara *linear transducer* dan *digital readout*. Dalam penelitian ini *microcontroller* yang digunakan adalah AT89S8252 dari Atmel. Sinyal *quadrature* dari *linear transducer* diubah dahulu menjadi sinyal *up-down* agar dapat langsung disambungkan pada pin T0 dan T1. Konversi sinyal tersebut menggunakan beberapa gerbang *inverter*, *flop-flop* dan gerbang AND dengan 3 input, sehingga pada saat *scanning unit* pada *transducer* bergerak maju hanya T0 yang mendapat sinyal masukan sedangkan T1 tidak mendapatkan sinyal. Demikian sebaliknya bila *scanning unit* pada *transducer* bergerak mundur hanya T1 yang data masukan. *Signal reference* disambungkan ke pin *interrupt* INT1, untuk menjaga agar sistem kompensasi di dalam *microcontroller* dan *linear transducer* mempunyai titik acuan yang sama. Adapun skema dasar rangkaian *microcontroller* dapat dilihat pada gambar 4.21.

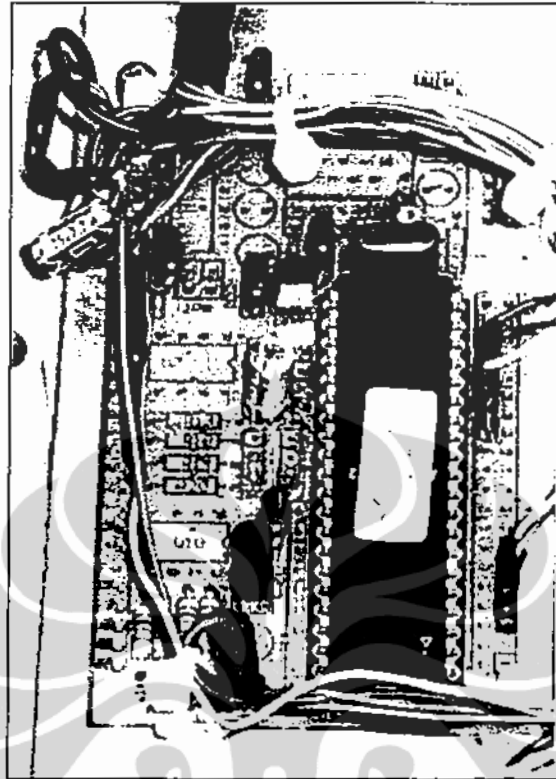


Gambar 4.21. Skema Rangkaian Microcontroller

Pada saat *startup* atau setelah *microcontroller* di *reset* akan menunggu sinyal *interrupt* pada pin INT1, sinyal dari *transducer* ke *digital readout* dihentikan sampai *scanning unit* melewati titik *reference point*. *Microcontroller* akan mendeteksi posisi absolut *linear transducer* dengan membandingkan selisih *register* pada T0 dan T1. Sedangkan untuk posisi relatif dapat dilakukan pada *digital readout* dengan memasukkan data posisi pada peraga.

Melalui posisi absolut tersebut *microcontroller* akan melakukan koreksi posisi dengan mengacu pada data kompensasi yang diberikan dari *genetic algorithm*. *Microcontroller* akan memberikan penambahan pulsa pada melalui saluran P0.1 atau pengurangan pulsa melalui P0.2 dari pulsa yang dihasilkan oleh *transducer*. *Microcontroller* ditempatkan pada PCB dan dilengkapi dengan rangkaian kristal seperti terlihat pada gambar 4.22.

Dengan data koreksi yang telah dimasukkan ke *microcontroller* maka secara otomatis akan melakukan perbaikan posisi sesuai karakteristik *linear transducer* oleh *microcontroller* sehingga akurasi meningkat. Setelah beroperasi tidak diperlukan lagi referensi posisi dari *laser interferometer* karena sudah masuk dalam algoritma kompensasi. *Laser interferometer* diperlukan kembali untuk pemeriksaan berkala atau untuk *update* data koreksi pada *microcontroller* kalau memang diperlukan.



Gambar 4.22. Microcontroller

4.8 Pengujian

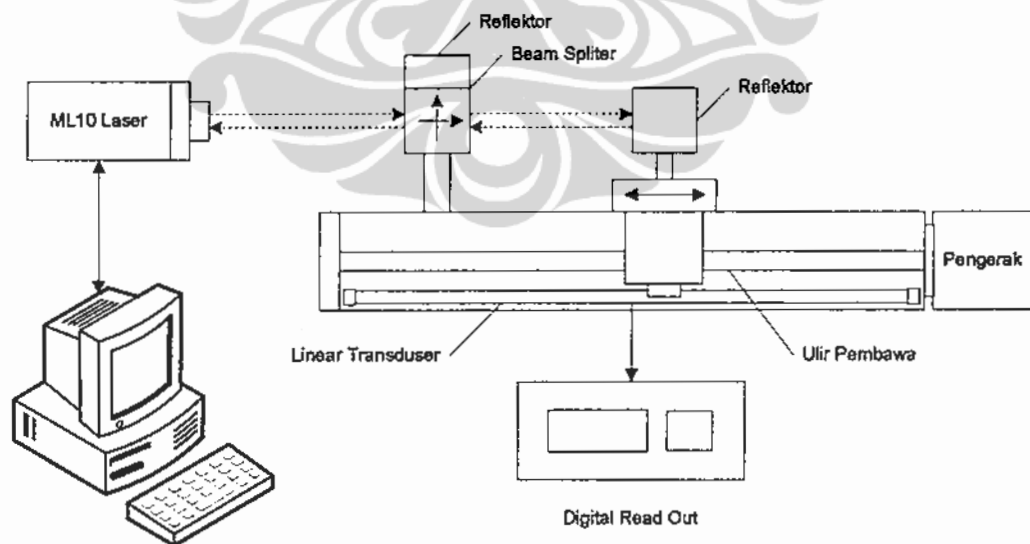
Untuk mengetahui hasil nyata dalam pemakaian dari teknik peningkatan akurasi yang telah disimulasikan sebelumnya maka perlu dilakukan pengujian langsung pada *linear transducer*. Dimana *linear transducer* tersebut dipasang pada sebuah *mechanical positioning system*. Dengan demikian seluruh faktor yang mempengaruhi tingkat akurasi *mechanical positioning system* seperti kesalahan kosinus, pengaruh deformasi pada *transducer*, kekasaran permukaan, pengaruh temperatur lingkungan dapat dilihat dalam satu data pengukuran. Pengujian dilakukan dengan membandingkan posisi yang ditunjukkan oleh DRO dengan *laser interferrometer calibrator*. Dalam penelitian ini, kalibrator yang digunakan adalah merk Renishaw tipe ML 10 yang mempunyai akurasi 0.1% dan resolusi 0.1 mikrometer. Umumnya dalam prosedur mutu kalibrasi disyaratkan bahwa kalibrator harus mempunyai akurasi sepuluh kali lebih baik dari pada alat yang akan dikalibrasi. Dengan spesifikasi tersebut maka kalibrator dapat digunakan

dalam kalibrasi untuk menguji hasil peningkatan akurasi. Dimana dalam penelitian ini orde akurasi dalam kisaran puluhan mikrometer.

Untuk proses pengujian langkah-langkah pokok yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a) Melakukan kalibrasi pada *mechanical positioning system* untuk mendapatkan data karakteristik *linear transducer* yang telah dipasang.
- b) Melakukan proses pencarian parameter *monomial* setiap segmen dengan menggunakan *genetic algorithm – golden ratio* segmentation.
- c) Memasukan data koreksi hasil dari pencarian oleh *genetic algorithm* ke *microcontroller*.
- d) Melakukan recalibrasi pada *mechanical positioning system* untuk mendapatkan data karakteristik *transducer* setelah dilakukan koreksi.
- e) Pengolahan data kalibrasi dengan menggunakan *British Standard, BS4656:Part 16*.

Adapun skema setup pengujian dapat dilihat pada gambar 4.23. Sedangkan gambar 4.24 dan 4.25 memperlihatkan bentuk dari *mechanical positioning system* dan eksperimen di laboratorium.



Gambar 4.23. Skema Setup Pengujian

Kemudian untuk mendapatkan data kalibrasi yang baik dan lebih konsisten serta mengurangi faktor pengaruh lingkungan misalkan temperatur, maka proses

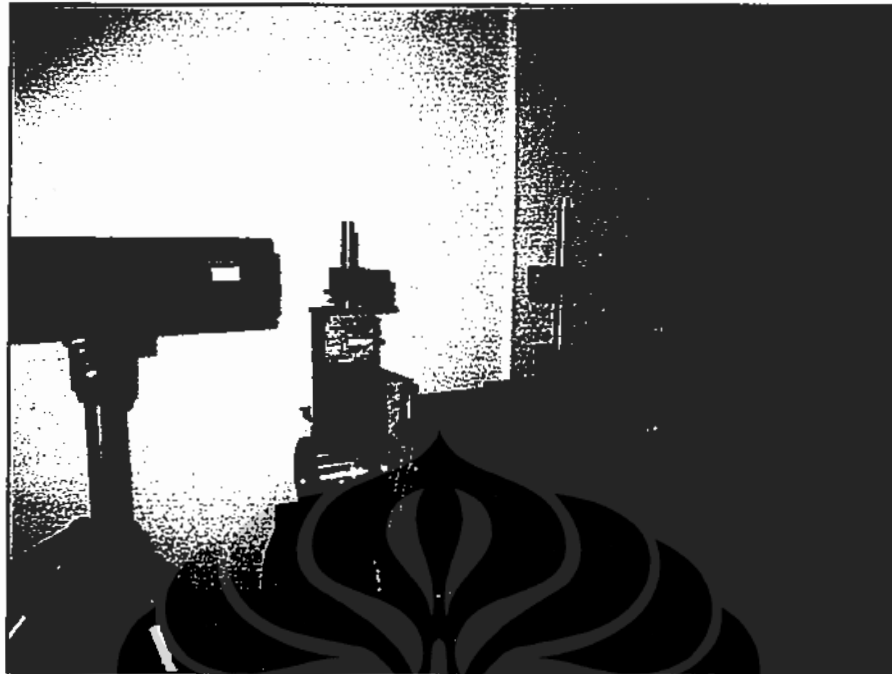
pengambilan data dilakukan menggunakan prosedur pengambilan data untuk meminimalkan kemungkinan variasi yang terlalu jauh dari hasil data pengukuran.

Adapun prosedurnya adalah sebagai

- a) Hidupkan alat pengkondisi ruang uji (*air conditioning*) sehari sebelumnya untuk mendapatkan kestabilan temperatur pada semua peralatan termasuk *mechanical positioning system* dan *linear transducer*.
- b) Sambungkan dan hidupkan *environment compensator* untuk laser ML 10.
- c) Setup *laser interferometer calibrator* dan hidupkan minimal selama 30 menit.
- d) Jalankan sumbu *mechanical positioning system* bolak balik dalam rentang maksimum minimal 5 kali.
- e) Buat posisi target uji pada *software* di laser ML 10 untuk posisi 0, 50, 100, sampai dengan 700mm.
- f) Jalankan sumbu *mechanical positioning system* ke titik referensi dan samakan titik nol antara kalibrator dan *digital read out*.
- g) Jalankan sumbu ke masing masing posisi target uji dan catat simpangan posisinya.



Gambar 4.24. Sistem Mekanik



Gambar 4.25. Eksperimen di Laboratorium

4.9 Pengolahan Data

Pengolahan data mengacu pada British Standard, BS 4656:Part 16. Kemudian untuk mendapatkan nilai keakuratan dan kepresisian maka data uji dilakukan perhitungan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

$$Y_i = X_i - X_i' \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

- a. Hitung simpangan posisi (Y_i) setiap target posisi.
 Y_i = Simpangan posisi pada target posisi ke-i.
 X_i = Data posisi dari DRO pada target posisi ke-i.
 X_i' = Data posisi dari kalibrator pada target posisi ke-i .

- b. Hitung simpangan rata-rata (\bar{Y}_i) setiap target posisi.

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

n = Jumlah pengukuran.

- c. Hitung standar deviasi (s) pada setiap target posisi.

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \dots\dots\dots(4.8)$$

d. Hitung akurasi (A) dengan persamaan sebagai berikut

$$A = (\bar{Y} + 3s)_{\max} - (\bar{Y} - 3s)_{\min} \quad \dots\dots\dots(4.9)$$

e. Hitung kepresisian (R) atau repeatability adalah kemampuan untuk menunjukkan posisi yang sama untuk pengukuran yang berulang-ulang.

$$R = [(\bar{Y} + 3s) - (\bar{Y} - 3s)]_{\max} = (6s)_{\max} \quad \dots\dots\dots(4.10)$$

Melalui kegiatan pengujian diperoleh dua set data masing masing untuk 10 kali pengukuran. Data pertama yaitu data karakteristik asli dari *linear transducer* tanpa kompensasi. Sedang yang kedua adalah data karakteristik *transducer* setelah dilakukan kompensasi. Semua data tersebut kemudian diolah berturut-turut menggunakan persamaan 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 dan 4.10. kemudian ditabelkan sesuai dengan standard BS 4656.

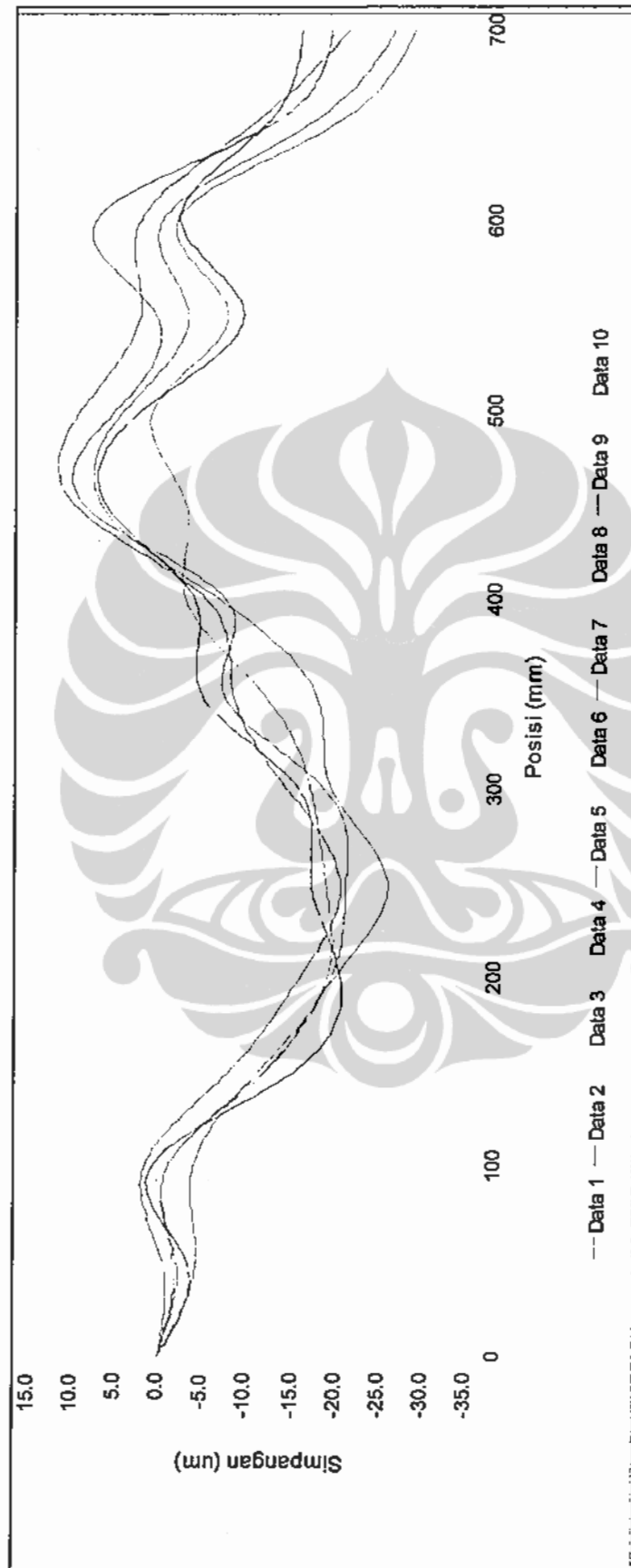
Melalui tabel 4.7 dapat dilihat karakteristik *linear transducer* sebelum dilakukan kompensasi. Dari data tersebut diperoleh bahwa akurasinya adalah 53.88 mikrometer dan kepresisiannya adalah 27.14 mikrometer serta simpangan rata-rata maksimum adalah 22.14 mikrometer. Pada gambar 4.26. memperlihatkan karakteristik *transducer* untuk 10 data pengukuran.

Karakteristik *transducer* setelah dilakukan perbaikan akurasi dengan menggunakan *genetic algorithm- golden ratio segmentation* dapat dilihat pada tabel 4.8. Dari pengolahan data menunjukkan bahwa akurasinya menjadi 29.60 mikrometer dan tingkat kepresisiannya adalah 27.09 mikrometer serta simpangan rata-rata maksimum adalah 10.57 mikrometer. Sedangkan gambar 4.27. memperlihatkan grafik karakteristik *linear transducer* setelah dilakukan kompensasi.

Perbandingan karakteristik *linear transducer* sebelum dan sesudah dilakukan perbaikan akurasi dapat dilihat dari penunjukan simpangan rata-rata dari 10 kali pengukuran. Grafik perbandingannya dapat dilihat pada gambar 4.28.

Tabel 4.8. Karakteristik Transducer Tanpa Kompensasi

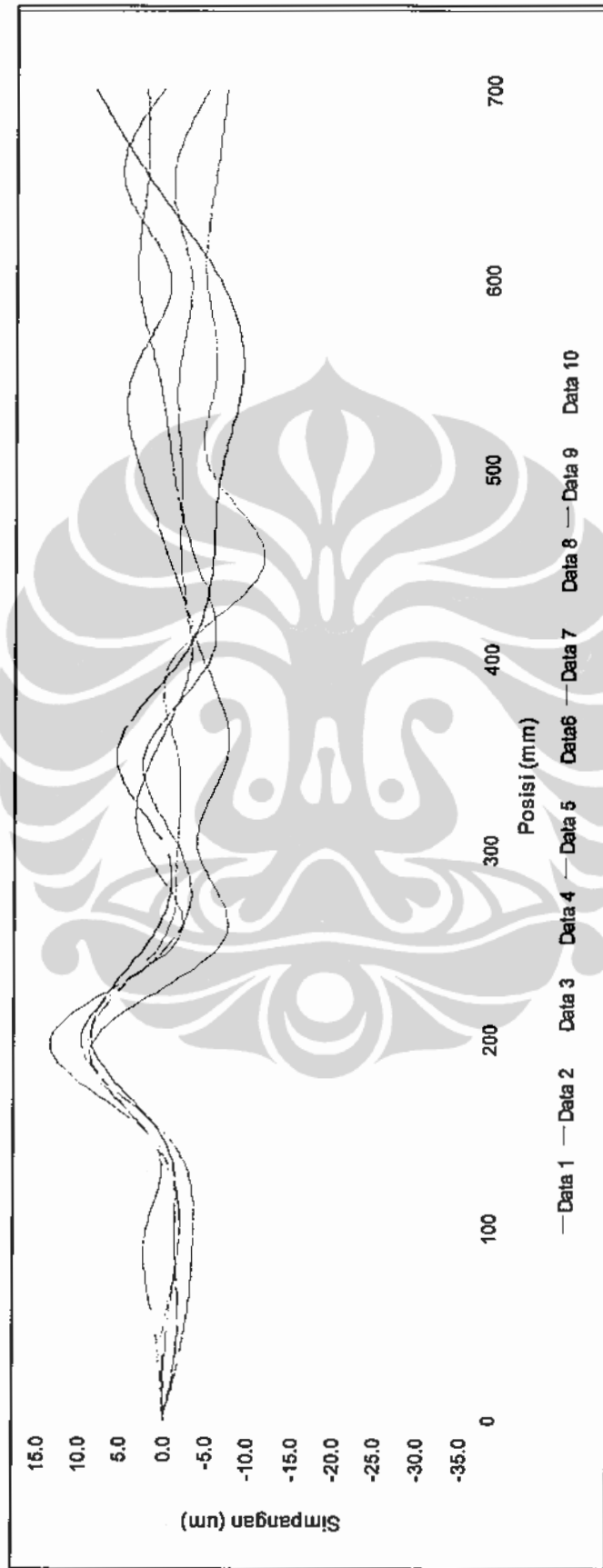
Nama	Posisi Sumbu (mili meter)														
	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
No	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
1	0.0	-2.2	-1.1	-12.1	-20.0	-26.2	-19.7	-17.9	-6.8	6.7	4.0	-3.2	-0.2	-16.8	-26.8
2	0.0	-1.9	-1.1	-11.8	-19.3	-19.1	-17.3	-11.9	-3.0	-3.0	0.8	-7.7	-1.9	-19.7	-29.0
3	0.0	-0.6	3.1	-10.1	-17.5	-12.9	-16.0	-4.4	-2.1	10.0	2.3	-1.2	-2.8	-19.4	-24.5
4	0.0	-3.5	0.0	-10.5	-18.3	-24.3	-17.2	-9.3	-0.8	10.4	8.3	1.0	3.2	-12.6	-22.9
5	0.0	-0.6	1.6	-7.9	-16.1	-20.7	-14.6	-8.4	-5.3	9.8	9.0	2.3	2.3	-10.3	-21.5
6	0.0	-2.4	-2.3	-7.2	-19.9	-17.1	-16.1	-11.3	0.0	11.8	9.1	1.9	6.0	-12.9	-19.8
7	0.0	-4.4	-4.0	-11.3	-19.7	-21.4	-18.9	-7.3	-7.6	8.7	5.0	0.5	7.4	-12.4	-19.5
8	0.0	-0.9	1.3	-8.6	-17.2	-17.8	-14.1	-14.5	-0.1	6.6	9.9	3.0	5.9	-11.9	-20.8
9	0.0	-3.4	0.8	-15.3	-20.8	-17.4	-15.9	-4.8	-4.0	6.2	2.0	-9.5	-2.2	-11.9	-16.1
10	0.0	-1.7	-0.2	-8.7	-17.3	-18.3	-14.9	-15.5	-1.9	10.2	8.1	1.0	5.3	-12.0	-20.5
Simpangan rata-rata (\bar{Y})	0.0	-2.2	-0.2	-10.4	-18.6	-19.5	-16.5	-10.5	-3.2	7.7	5.9	-1.2	2.3	-14.0	-22.1
Standar deviasi (s)	0.0	1.3	2.1	2.4	1.5	3.8	1.8	4.5	2.7	4.2	3.4	4.3	3.8	3.4	3.8
$\bar{Y} + 3s$	0.0	1.7	6.0	-3.1	-14.0	-8.1	-11.0	3.0	5.0	20.4	16.1	11.7	13.8	-3.9	-10.8
$\bar{Y} - 3s$	0.0	-6.1	-6.3	-17.6	-23.2	-31.0	-21.9	-24.1	-11.3	-4.9	-4.4	-14.1	-9.2	-24.1	-33.5
6 (s)	0.0	7.8	12.3	14.5	9.2	22.9	10.9	27.1	16.2	25.3	20.5	25.9	23.0	20.2	22.7
Akurasi $A = (\bar{Y} + 3s)_{\text{mak}} - (\bar{Y} - 3s)_{\text{min}}$	53.88 mikrometer														
Presisi $R = [(6s)_{\text{mak}}]$	27.14 mikrometer														
Simpangan rata-rata maksimum $(\bar{Y})_{\text{mak}}$	22.14 mikrometer														



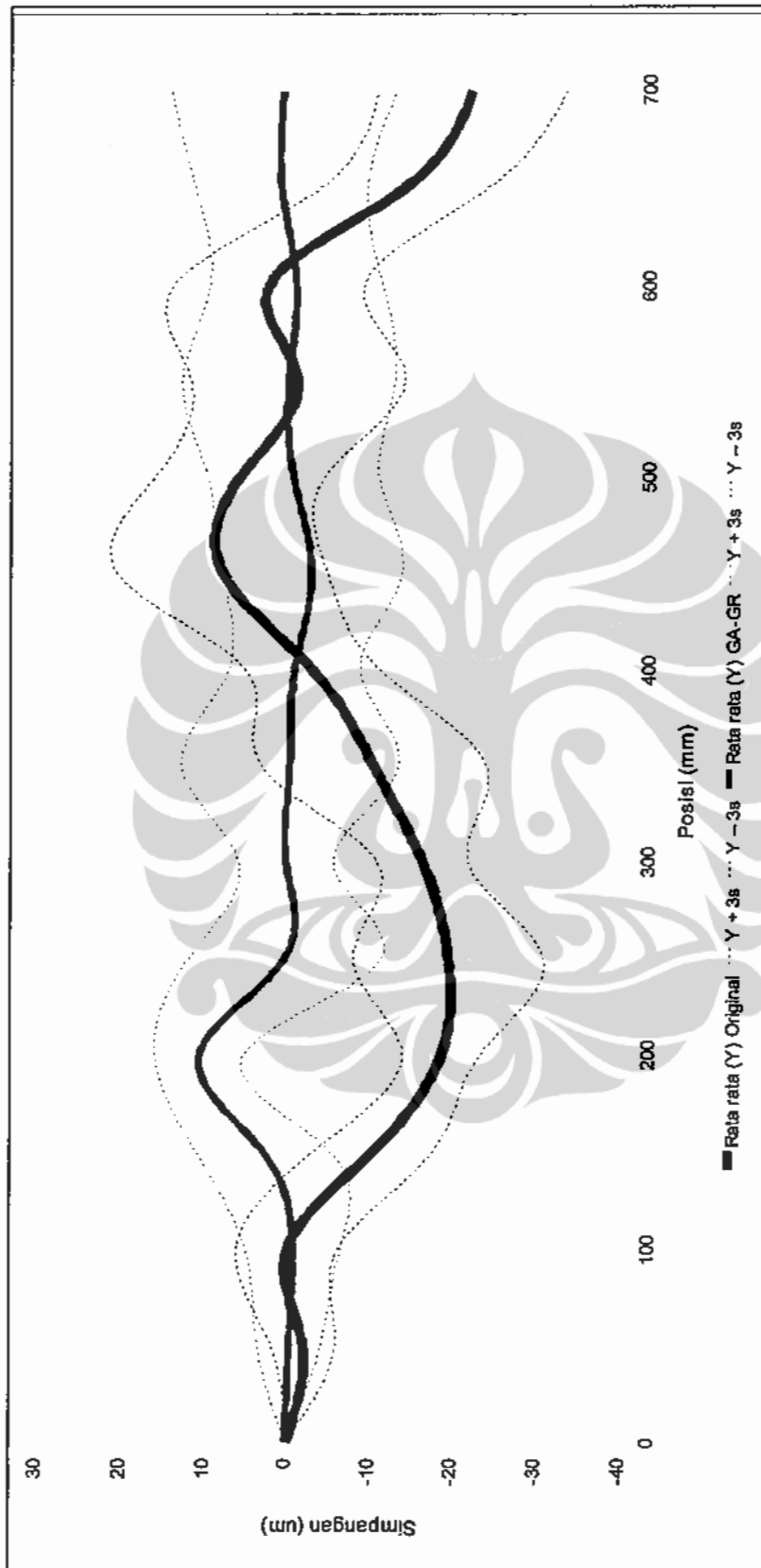
Gambar 4.26. Karakteristik Linear Transducer tanpa Kompensasi

Tabel 4.9. Karakteristik Transducer Dengan Kompensasi.

Nama	Posisi Sumbu (mili meter)															
	No	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Simpangan (\bar{Y}) (mikro meter)	1	0.0	-0.5	-1.9	1.6	8.3	-6.6	-3.8	-7.3	-4.4	-1.7	-1.7	-1.3	-2.8	-0.6	-4.8
	2	0.0	-0.1	-1.9	1.9	9.0	0.6	-1.4	-1.4	-0.7	-11.4	-5.0	-5.8	-4.5	-5.5	-6.9
	3	0.0	1.1	2.3	3.7	10.8	6.7	1.2	5.5	0.2	0.3	-3.5	-0.6	-5.4	-4.6	-2.4
	4	0.0	-1.8	0.5	-0.7	11.3	-4.7	0.0	0.6	1.5	0.1	2.6	3.0	0.6	2.9	-0.8
	5	0.0	1.1	2.1	1.9	13.5	-1.1	2.6	1.5	-2.9	-0.5	3.2	4.2	-0.3	5.2	0.6
	6	0.0	-0.7	-1.8	3.9	9.6	3.8	1.1	-1.4	2.3	-0.5	3.3	2.5	2.1	2.0	2.2
	7	0.0	-2.6	-3.5	-0.2	9.9	-0.5	-1.7	2.6	-5.2	-3.6	-0.7	1.1	3.5	2.5	2.5
	8	0.0	0.8	-0.8	7.1	12.4	1.9	1.8	-4.0	2.2	-5.0	1.6	3.6	2.0	3.6	2.6
	9	0.0	-1.7	-1.3	0.4	8.7	2.2	0.0	5.8	-1.7	-5.4	-6.4	-8.9	-6.1	1.7	8.6
	10	0.0	0.0	-2.3	6.9	12.2	1.4	1.0	-5.0	0.4	-1.4	-0.3	1.6	1.4	1.5	4.2
Simpangan rata-rata (\bar{Y})		0.0	-0.4	-0.9	2.7	10.6	0.4	0.1	-0.3	-0.8	-2.9	-0.7	-0.1	-1.0	0.9	0.6
Standar deviasi (s)		0.0	1.3	1.9	2.7	1.8	3.9	1.9	4.4	2.7	3.6	3.5	4.3	3.5	3.5	4.5
$\bar{Y} + 3s$		0.0	3.4	4.9	10.8	15.8	12.0	5.8	12.7	7.2	7.9	9.7	12.8	9.5	11.3	14.1
$\bar{Y} - 3s$		0.0	-4.3	-6.6	-5.5	5.3	-11.3	-5.7	-13.4	-8.8	-13.8	-11.1	-12.9	-11.4	-9.5	-13.0
6 (s)		0.0	7.7	11.5	16.4	10.5	23.3	11.5	26.1	16.0	21.7	20.7	25.7	20.8	20.8	27.1
Akurasi		$A = (\bar{Y} + 3s)_{\max} - (\bar{Y} - 3s)_{\min}$														
Presiisi		$R = [(6s)_{\max}]$														
Simpangan rata-rata maksimum		$(\bar{Y})_{\max}$														



Gambar 4.27. Karakteristik Linear Transducer dengan Kompensasi



Gambar 4.28. Grafik Kepresisian dan Simpangan Rata-rata Transducer

4.10 Analisa

Dari hasil pengujian karakteristik *linear transducer* yang dibandingkan dengan standard panjang laser ML 10 baik sebelum maupun setelah dilakukan kompensasi dapat dilihat pada tabel 4.7 dan 4.8. Pada mulanya akurasi adalah 53.88 mikrometer dan setelah dilakukan perbaikan akurasi meningkat menjadi 29.60 mikrometer. Dalam pengujian ini diperoleh peningkatan akurasi sebesar 45.1 %. Dari data tersebut terlihat bahwa sistem peningkatan akurasi liner *transducer* telah bekerja. Hanya dengan memanfaatkan data kalibrasi dan diproses dengan memanfaatkan *genetic algorithm* dan *golden ratio segmentation* dapat meningkatkan akurasi *transducer*. Disini tidak dilakukan perbaikan apapun pada *mechanical positioning system*, hanya diperlukan tambahan sistem untuk memasukan koreksi posisi secara *realtime* ke sistem yang sudah ada. Pada penelitian ini digunakan sebuah *microcontroller* untuk keperluan tersebut.

Data lain yang diperoleh adalah kepresisian dari liner *transducer* sebelumnya adalah 27.14 mikrometer menjadi 27.09 mikrometer, terjadi sedikit peningkatan kepresisian. Memang untuk mendapatkan kinerja sistem yang lebih baik lagi diperlukan juga *mechanical positioning* yang mempunyai *repeatability* posisi yang tinggi. Dengan demikian maka sistem kompensasi mendapat data masukan posisi lebih pasti dan tidak bergeser terlalu jauh bila pengukuran bila diulang pada target posisi yang sama. Dengan cara ini diharapkan hasil kompensasi tidak terlalu jauh nilainya dari hasil simulasi. Disini terlihat bahwa nilai presisi ini berkaitan dengan kualitas keseluruhan sistem baik sistem elektronik, mekanik dan kalibrator serta termasuk *mechanical positioning system*. Sehingga untuk membuat peralatan yang mempunyai akurasi tinggi diperlukan sistem yang mempunyai presisi tinggi juga. Teknik kompensasi bekerja untuk mendekati nilai akurasi ke nilai presisi sedangkan presisi diperoleh dari nilai kualitas masing masing bagian dan komponen yang menyusun sistem tersebut.

Dari pengujian diperoleh perbaikan dari simpangan rata rata yang dari 22.14 mikrometer menjadi 10.57 mikrometer. Disini terlihat bahwa hasil kompensasi lebih dekat dengan sumbu nol atau dekat dengan nilai yang ditunjukkan oleh *laser calibrator*. Secara umum terjadi peningkatan perbaikan posisi sebesar 52.3 %. Simpangan rata rata ini merupakan nilai tengah dari

kemungkinan terjadinya simpangan posisi. Di dalam pengukuran terjadinya perbedaan simpangan posisi adalah acak akan tetapi masih dalam batas nilai kepersisian. Batas rentang kepersisian relatif tidak berubah sebelum dan sesudah dilakukan kompensasi hanya sedikit bergeser ke sumbu referensi. Selanjutnya perbandingan hasil peningkatan akurasi dari *linear transducer* yang dipasang pada *mechanical positioning system* sebelum dan sesudah dilakukan kompensasi dapat dilihat pada tabel 4.9.

Tabel 4.10. Hasil Peningkatan Akurasi

Nama	<i>Genetic Algorithm – Golden Ratio</i>		Selisih (μm)	Presentase Perbaikan (%)
	Tanpa	Dengan		
Akurasi (μm)	53.88	29.60	24.28	45.1
Presisi (μm)	27.14	27.09	0.05	0.2
Simpangan rata-rata maksimum (μm)	22.14	10.57	11.57	52.3

Dari tabel 4.9 terlihat bahwa metode peningkatan akurasi yang diteliti telah menunjukkan hasil, dimana akurasi meningkat sekitar 45.1% setelah dilakukan *error compensation* menggunakan metode tersebut.

BAB V

KESIMPULAN

Dalam bab ini disampaikan kesimpulan dari seluruh pembahasan dalam disertasi ini dan beberapa hal yang dapat dilakukan untuk penelitian lebih lanjut. Adapun kesimpulannya adalah sebagai berikut:

5.1 Kesimpulan

1. Konfigurasi internal *generic algorithm* (GA) berkaitan dengan operator *selection* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Roulette Wheel* (RW) dan *Stochastic Universal Sampling* (SUS). Sedangkan operator *crossover* adalah *Shuffle* (SF) dan *Multi Point* (MP). Untuk mendapatkan kinerja terbaik maka telah diuji kombinasi antara operator *selection* dan *crossover*. Parameter evaluasi yang digunakan adalah nilai SSE. Dari percobaan diperoleh kombinasi antara SUS dan MP memberikan nilai *sum of squares error* (SSE) lebih baik dibandingkan dengan kombinasi yang lain seperti RW-SF, RW-MP dan SUS-SF. Adapun nilai SSE untuk kombinasi SUS-MP adalah 68.6% lebih rendah dari SSE rata rata.
2. *Elite chromosome* merupakan kumpulan *chromosome* terbaik dari setiap generasi. Dengan memasukan kembali sebagian *elite chromosome* ke populasi generasi berikutnya, dapat mempengaruhi kualitas hasil pencarian parameter kompensasi. Untuk evaluasi pengaruh *elite chromosome* digunakan *root mean square* (RMS). Evaluasi dilakukan dalam rentang 0-100% dan diperoleh bahwa 10% *elite chromosome* yang diikutkan dalam generasi berikutnya ternyata menghasilkan kinerja lebih baik dimana nilai RMS sekitar 38.9 % dari RMS rata rata, sedang standard deviasinya adalah 4.1% dari standard deviasi rata-rata.
3. *Golden ratio* (GR) adalah sebuah nilai yang sering ditemukan di alam yang berkaitan dengan keseimbangan. Nilai ini digunakan untuk melakukan segmentasi sepanjang karakteristik *transducer* menjadi beberapa *monomial*. Dengan GR ternyata diperoleh kualitas parameter kompensasi lebih baik

dalam meningkatkan akurasi *linear transducer*. Untuk mengukur efektifitasnya maka metode segmentasi GR dibandingkan dengan metode segmentasi hirarki kuadrat. Hasilnya diperoleh bahwa metode segmentasi GR lebih baik dengan nilai RMS sekitar 49.0%. Untuk jumlah segmen juga lebih kecil yaitu sekitar 85.9% dibandingkan dengan metode segmentasi hirarki kuadrat.

4. Metode peningkatan akurasi dengan *genetic algorithm - golden ratio* (GA-GR) sebelum digunakan secara langsung pada *linear transducer* dilakukan simulasi terlebih dahulu, untuk meyakinkan bahwa algoritma yang dikembangkan berjalan sesuai dengan tujuan penelitian. Dalam simulasi dilakukan *tracking* terhadap beberapa kurva data kalibrasi peralatan sebelumnya. Dengan data hasil kalibrasi ini, diharapkan proses simulasi dapat diperoleh gambaran yang mendekati kondisi nyata. Dalam simulasi, dilakukan *tracking* terhadap kurva karakteristik *linear transducer*. Kemudian metode GA-GR yang dibandingkan dengan polinomial. Hasilnya ternyata nilai RMS dari metode GA-GR adalah sekitar 50 kali sampai dengan 900 kali lebih baik dari pada polinomial.
5. Selanjutnya untuk mengetahui secara langsung hasil kinerja metode GA-GR maka parameter kompensasi diprogramkan ke dalam *microcontroller* untuk meningkatkan akurasi *digital readout*. Pengujian *linear transducer* dilakukan pada *mechanical positioning system* dengan acuan standard panjang menggunakan *laser interferometer*. Kemudian data hasil pengukuran diolah menggunakan prosedur *British standard BS 4656 part 16*. Hasilnya metode peningkatan akurasi *genetic algorithm - golden ratio* (GA-GR) dapat meningkatkan akurasi sampai 45.1 %

5.2 Penelitian Lanjut

Adapun kegiatan penelitian lanjutan untuk penyempurnaan dan aplikasinya dari hasil penelitian yang telah diperoleh adalah:

1. Dalam penelitian ini, salah satu kriteria untuk mendapatkan hasil terbaik pada *genetic algorithm* adalah *fitness value*. Besarnya nilai *optimal fitness value* berbeda-beda untuk masing masing karakteristik *transducer*. Untuk mendapatkan nilai *optimal fitness value* dapat digunakan *funnel selection method*. Dengan metode ini diharapkan secara otomatis *fitness value* konvergen ke satu nilai paling optimal.
2. Perkembangan *microcontroller* yang semakin *powerful* dimana kecepatan dan kapasitas memori yang semakin besar, maka terbuka kemungkinan untuk menjalankan metode peningkatan akurasi ini beserta *genetic algorithm* langsung dalam satu *microcontroller*. Dengan demikian dapat diwujudkan sebuah *intelligent instrument* yang mampu melakukan *self configuration* untuk meningkatkan akurasinya dengan cara belajar dari data kalibrasi.
3. Penelitian lanjutan dapat diarahkan untuk memperoleh metode peningkatan akurasi yang universal untuk berbagai sensor, dimana setiap sensor mempunyai rentang ukur dan akurasi yang berbeda-beda. Aplikasinya dapat digunakan untuk meningkatkan akurasi pada *themocouple*, *load cell*, *pressure sensor*, *flowsensor* dan sensor sensor lainnya.

DAFTAR ACUAN

- [1] Jeffrey W. Herrmann, *A Genetic Algorithm for Minimax Optimization Problem*, <http://www.isr.umd.edu/~jwh2/papers/cec.pdf>, 9 June 2005.
- [2] Kyoung Gee Ahn and Dong Woo Cho, *Proposition for a Volumetric Error Model Considering Backlash in Machine Tools*, *International Journal Advance Manufacturing Technology*, 15:554-561, 1999.
- [3] Chen. J.S, *Real-time Compensation for Time-variant Volumetric Error on a Machining Center*, *Transaction of the ASME*, Vol 115, pp472-499, 1993
- [4] Hooman Tajbakhsh, Zainul Abidin, Placid M. Ferreira, *L_{∞} Parameter estimates for volumetric error in models of machine tools*, *Precision Engineering* 20 pp179-187, 1997
- [5] Soons. J.A. *Modeling the Error of Multi-Axis Machine: A General Methodology*, *Journal Precision Engineering*, Vol 14 No1, January 1992.
- [6] Mou J. *An Adaptive Error Correction Method Using Feature-Base Analysis Techniques for Machine Performance Improvement*, Part 1: Theory Derivation, *Journal of Engineering for Industry*, Vol 117, November 1995.
- [7] Dong. C, Zhang. C, Wang.B, *Prediction and Compensation of Dynamic Error for Coordinate Measuring Machines*, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, pp 509-514, August 2002.
- [8] Mou. J, *A System Approach to Enhance Machine Tool Accuracy for Precision Manufacturing*, *International Journal Machine Tools Manufacturing*, Vol. 37. No5 pp 669-685, 1997.
- [9] Jenq-Shyong Chen, *Computer-Aided Accuracy Enhancement for Multi-Axis CNC Machine Tool*, *International Journal Machine Tools Manufacturing* Vol. 35. No4 pp 593-605, 1995.
- [10] Yang. S. Yuan. J and Ni. J, *The Improvement of Thermal Error Modeling and Compensation On Machine Tools by CMAC Neural Network*, *International Journal Machine Tools Manufacturing*, Vol.36 No.4. pp527-537, 1996.
- [11] Cho M.W, Seo T.I, *Machining Error Compensation using Radial Basis*

Function Network Based on CAD/CAM/CAI Integration Concept, International Journal of Production Research, Volume 40, Number 9, 1 June 2002, pp. 2159-2174(16)

- [12] H.L. Liu, H.M. Shi, B.Li, and X.Li, *A new method and instrumentation for measuring circular motion error of NC machine tools*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, Issue 11, 2005, pp 1347-1351.
- [13] Shao Wei Gong, *A conceptual development of novel ultra precision dimensional measurement technology*, Journal Measurement, Vol 33, Issue 4, June 2003, pp 347-357.
- [14] Shuichi Dejima, Wei Gao, Kei Katakura, Satoshi Kiyono and Yoshiyuki Tomata, *Dynamic modeling, controller design and experimental validation of a planar motion stage for precision positioning*, Journal Precision Engineering, Vol 29, Issue 3, July 2005, pp 263-271.
- [15] Paul Lambrechts, Matthijs Boerlage and Maarten Steinbuch, *Trajectory planning and feedforward design for electromechanical motion system*, Journal Control Engineering Practice, Vol 13, Issue 2, February 2005, pp 145-157.
- [16] Xing-Song Wang, Chun-Yi Su and Henry Hong, *Robust adaptive control of a class of nonlinear systems with unknown dead-zone*, Journal Automatica, Vol 40, Issue 3, March 2004, pp 407-413.
- [17] Myeong-Woo Choo, Tae-il Seo and Hyuk-Dong Kwon, *Integrated error compensation method using OMM system for profile milling operation*, Journal of Material Processing Technology, Vol 136, Issues 1-3, May 2003, pp 88-99.
- [18] Sevaux, M and Mineur, Y, *A Curve Fitting Genetic Algorithm for a Styling Application*, European Journal of Operational Research, Volume 179, Issue 3, 2007, pp895-905.
- [19] Frederick Proctor, *Sensor Based Real Time Error Compensation*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, www.isd.mel.nist.gov/document/proctor/319sensorbased.ps, 26 May 2005
- [20] Rames, R; Mannan, M.A and Poo, A.N, *Error Compensation in Machine Tools- A Review, Part I: Geometric, Cutting-Force Induced and Fixture*

Dependent Errors, International Journal of Machine Tools and Manufacture, No. 40, 2000, pp 1235-1256.

- [21] Lin E, and Zhang, H.C, *Theoretical Tolerance Stackup Analysis Based on Tolerance Zone Analysis*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, No 2001, pp 257-262, 2001.
- [22] Huang. S, *A Graph Matrix Approach to Setup Planning in Computer Aided Process Planning (CAPP)*, PhD Dissertation, Texas Tech University, 1995.
- [23] Lin.S, Wang.H.P and Zang.C, *Statistical Tolerance Analysis Based on Beta Distribution*, Jurnal of Manufacturing System, Vol. 16, No.2, pp 150-158, 1997.
- [24] Purwowibowo, Wahidin Wahab, *Kompensator Termoelastik pada Pencacah Digital*, Quality in Research Faculty of Engineering (QIR FT) UI, Depok, 2003.
- [25] Ding H and Madan M. Gupta, *Learning Fuzzy Set Neural Network by Genetic Algorithm*, *Journal of Intelligent Systems*. Vol. 5. 113-127, 1997
- [26] Hojjat Adeli and Shih-Lin Hung, *Machine Learning Neural Networks, Genetic Algorithms, and Fuzzy Systems*, John Willey & Son, 1995, pp127-153.
- [27] Purwowibowo, *Penerapan Polinomial pada Alat Monitor Posisi Sumbu Mesin Perkakas*, Pertemuan dan Presentasi Ilmiah, Kalibrasi Instrumentasi dan Metrologi, PPI-KIM-LIPI, Jakarta, 1997.
- [28] Kun Tong, E. Amine Lehtihet and Sanjay Joshi, *Software compensation of rapid prototyping machines*, Precision Engineering, Volume 28, Issue 3 , July 2004, pp 280-292.
- [29] Yin Zhongwei, Zhang Yuping and Jiang Shouwei, *Methodology of NURBS surface fitting based on off-line software compensation for errors of a CMM*, Precision Engineering, Volume 27, Issue 3 , July 2003, pp 299-303
- [30] Chen. C.H. *Fuzzy Logic and Neural Network Handbook*, McGraw Hill, 1996. pp19.26
- [31] Suen. D.S and Chang.C.N, *Application of Neural Network Interval Regression Method for Minimum Zone Straightness and Flatness*, Precision Engineering 20:196-207,1997.

- [32] Donmez, M.A., Kang Lee, C. Richard Liu, and Moshe M. Barash, *A Real time Error Compensation System for a Computerized Numerical Control Turning Center*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, April 1986.
- [33] Yee, Kenneth W., Herbert T. Bandy, Jack Boudreaux, and Neil Wilkin, *Automated Compensation of Part Error Determined by In Process Gauging*, NIST Internal Report 4854, June 1992.
- [34] Slocum, Alexander H, *Precision Machine Design*, Prentice Hall, 1992, pp 58.
- [35] Shyh-Chour Huang, *Analysis of a Model to Forecast Thermal Deformation of Ball Screw Feed Drive Systems*, International Journal Machine Tools Manufacture. Vol.35 No.8, pp1009-1104, 1995.
- [36] Jun Ni, *CNC Machine Accuracy Enhancement Through Real-time Error Compensation*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Volume 119, November 1997.
- [37] Dorndorf. U, Kiridena. V.S. B, Ferreira. P.M, *Optimal Budgeting of Quasi-static Machine Tool Error*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Volume 116, February 1994, pp 42-53
- [38] Li. X, Venuvinod.P.K, Dzorjevich.A, Liu.Z, *Predicting Machining, Errors in Turning Using Hybrid Learning*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology , Vol. 18, pp 863-872, 2001.
- [39] Holland. J, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1976.
- [40] Mitsuo Gen and Runwei Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Son, 1997
- [41] Danny Lai, *Using Genetic Algorithm as a Controller for Hot Metal Temperature in Blast Furnace Processes*, Advance Undergraduate Project(6.199), 2000.
- [42] William M.Spears, Vic Anand, *A Study of Crossover Operators in Genetic Programming*, Navy Center for Applied Research in AI, Washington DC, 2003.
- [43] Nick Johnson, *Cury Simulating Evolution Using a Computer*, members.aol.com /.../ai/final.doc, 2003

- [44] Sergey L. Loyka, *Applying Genetic Algorithm to Modeling Nonlinear Transfer Functions*, www.site.uottawa.ca/~sloyka/papers/Telsik_99_genetic.pdf, 27 July 2005.
- [45] *Rasio Emas dan Rumus Keindahan Alam*, Republika Online, Jumat, 1 April 2005.
- [46] *Kode da Vinci, Awal Eropa Melek Angka*, Khazanah Suplemen Harian Pikiran Rakyat, Minggu 13 Juni 2004.
- [47] *Golden Ratio Divider*, <http://www.mathlove.com/new3/product/docs/TTA09.pdf>, 22 Juli 2005.
- [48] *Golden Ratio*, <http://www.dcs.qmul.ac.uk/sodarace/SodaCartoon/morenpr.htm#Golden%20Ratio>, 22 Juli 2005.
- [49] Stakhov, A.P., *The Generalized Principle of the Golden Section and Its Applications in Mathematics, Science, and Engineering*, Chaos, Solitons and Fractals 26, Elsevier, 2005, pp 263-289.
- [50] Natalia Lopez, et.al, *Introducing the Golden Section to Computer Science*, Proceedings of the First IEEE International Conference on Cognitive Informatics, 2002.
- [51] J.Nocedal and S.J. Wright. *Numerical Optimization*, Springer Verlag, 1 Edition, 1999.
- [52] Chung-Min Chen, et.al, *Multidimensional Declustering Schemes Using Golden Ratio and Kronecker Sequences*, IEEE Transaction on Knowledge and Data Engineering, Vol.15 No.3, May/June 2003.
- [53] Mischa Kim, *Continuous Low-Thrush Trajectory Optimization: Techniques and Applications*, Dissertation of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blackburg Virginia, April 2005. pp 27.
- [54] Juan Garcia Escudero, *Golden Ratio Sinusoidal Sequences and Multimode Pulsation of the δ Sct Star V784 Cassiopeiae*. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics Vol 4 (2004) No.4. pp 243-348
- [55] John H. Mathews, *Numerical Methods for Mathematics, Science, and Engineering*, Prentice Hall, 1997.
- [56] Filippo Mignosi, et.al, *Periodicity and the Golden Ratio*, Theoretical Computer Science 204, Elsevier, 1998, pp 153-167.

- [57] Disney, S.M, Towill, D.Rm W.van de Velde, *Variance amplification and the golden ratio in production and inventory control*, International Journal of Production Economic, 90, 2004, pp 295-309.
- [58] Qi Chunzi, Wu Hongxin, Lv Zhenduo, *The study on the stability of all coefficient golden section feedback control system*, Proceeding of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation, Hefei P.R China 2000.
- [59] Cao-Minh Ta, Yoichi Hori, *Convergence Improvement of Efficiency Optimization Control of Induction Motor Drives*, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.37, No6, Nov/Dec 2001.
- [60] Leonid F, Hulyanitsky, Turchin. O., *Golden section rule in probabilistic modeling algorithms*, 4th International Conference the Experience of Designing and Application in Microelectronic, 2001.
- [61] D. Lee, W. Luk, J.D. Villasenor and P.Y.K. Cheung, *Hierarchical segmentation schemes for function evaluation*. In Proc. IEEE International Conference on Field Programmable Technology (FTP), Tokyo, Japan, 2003, pp 92-99.
- [62] Dong U Lee and Wayne Luk, *The Effect of Polynomial Degrees on Hierarchical Segmentation Method*, http://www.ee.ucla.edu/~ipl/polynomial_degrees2.pdf. 31 May 2005.
- [63] Keil, Keil Cx51 Compiler, *Optimizing C Compiler and Library Reference for Classic and Extended 8051 Microcontroller*, Keil Software User Guide pp 97, 2001.
- [64] Jeremie Detrey and Florent de Dinechin, *Table-based Polynomial for Fast Hardware Function Evaluation*, Research Report No.RR2004-52, Laboratoire de l'Informatique du Parallelisme, Ecole Normale Supérieure de Lyon, France, 2004
- [65] *Curve Fitting Toolbox*, http://eng.snu.ac.kr/.../ch_fit9.html, 10 Juni 2003.
- [66] Andrew Chipperfield et.al. *Genetic Algorithm Toolbox For Use with Matlab*. <http://www.shef.ac.uk/acse/research/ecrg/gat.html>, 22 April, 2004.

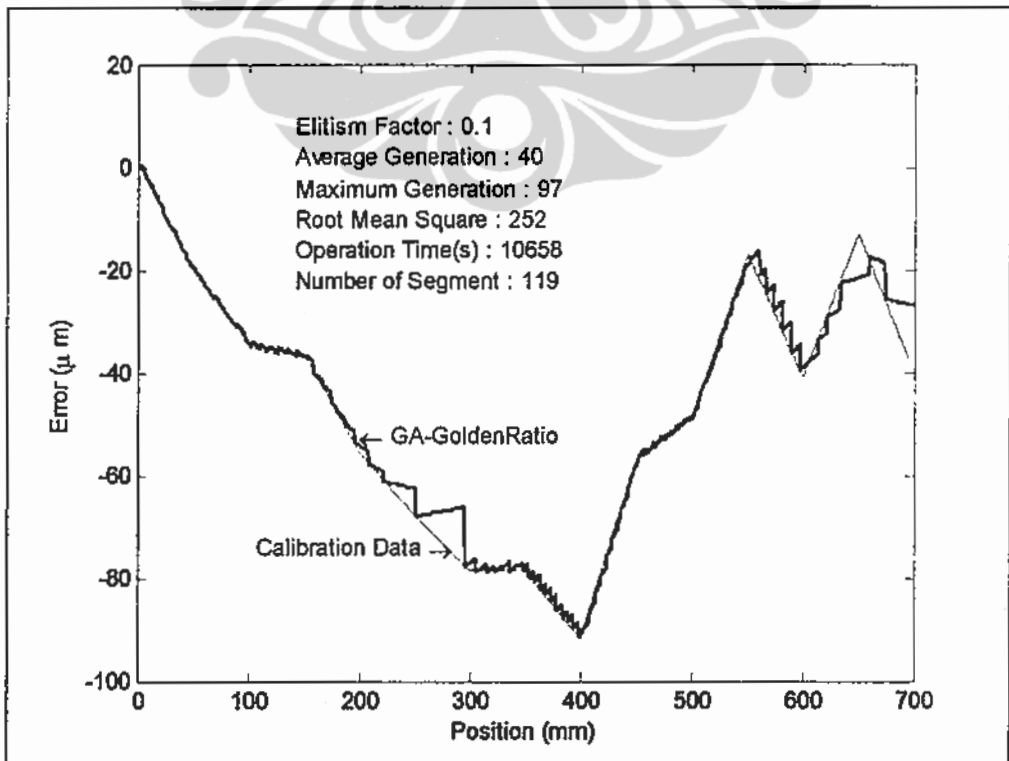
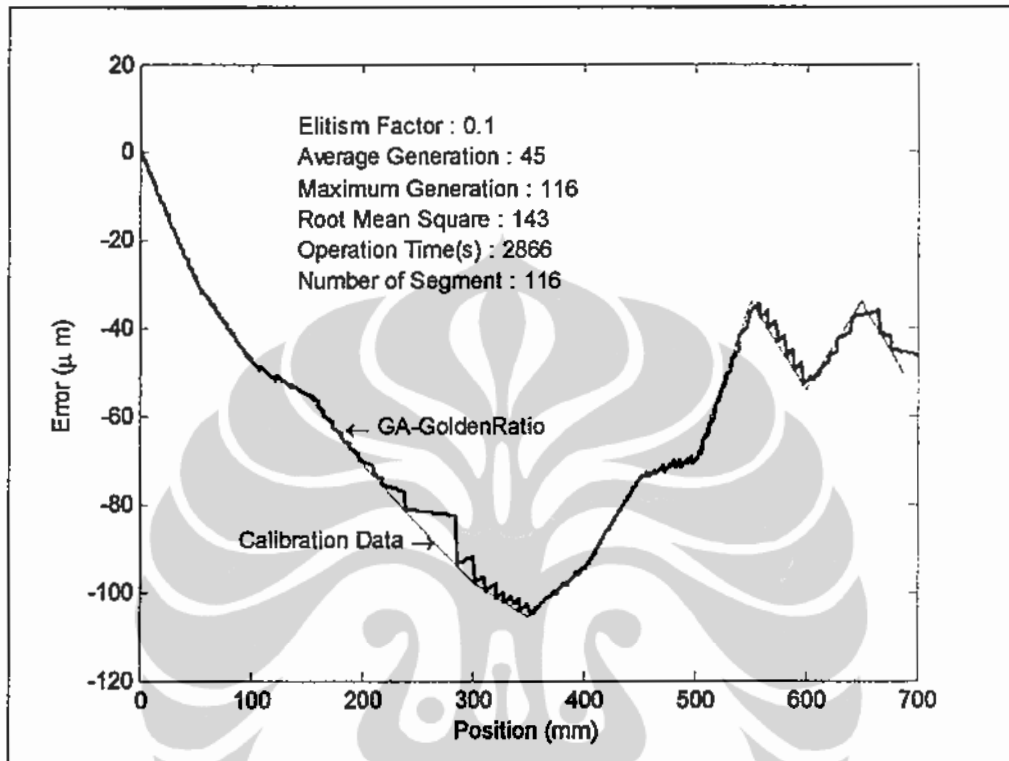
Lampiran 1

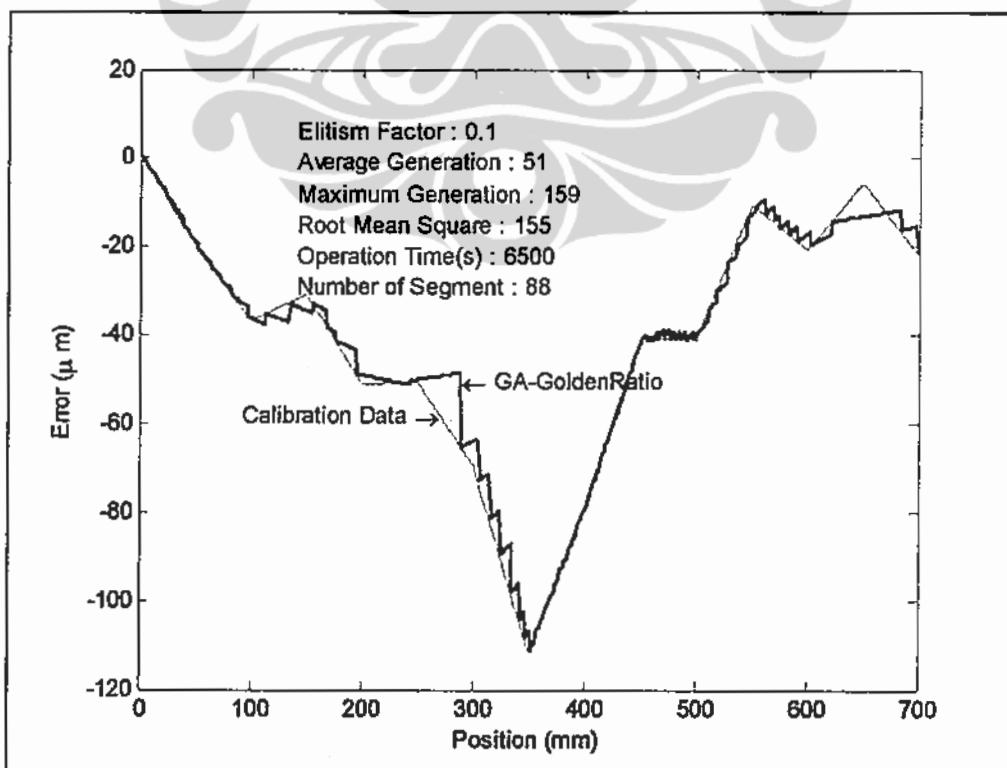
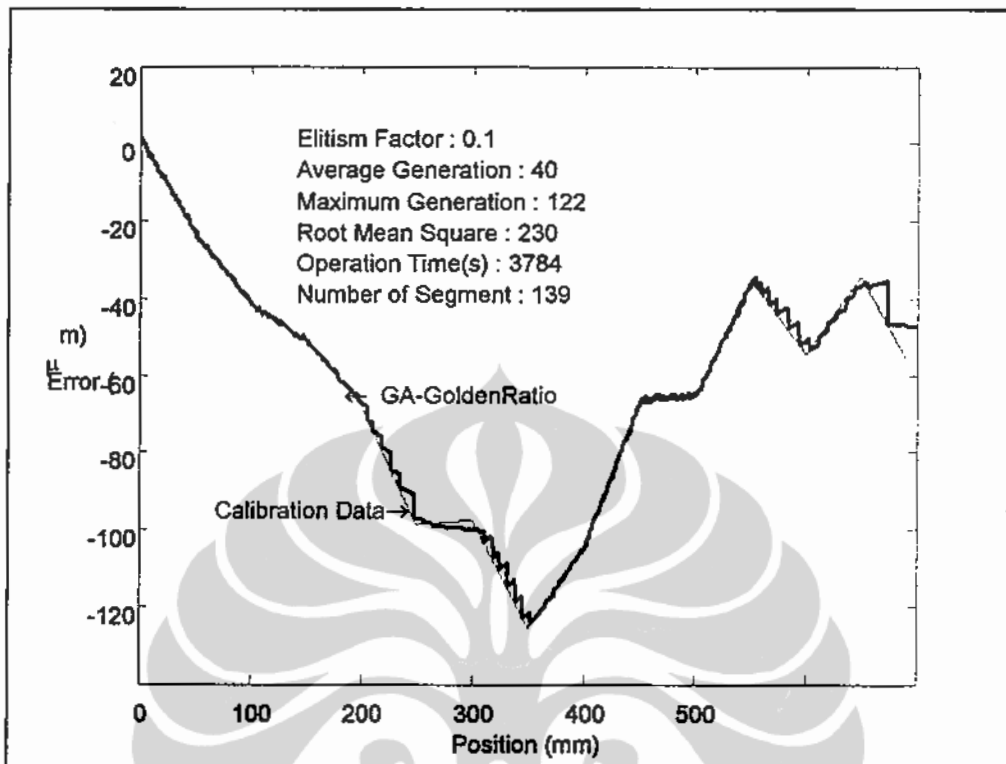
DAFTAR PUBLIKASI

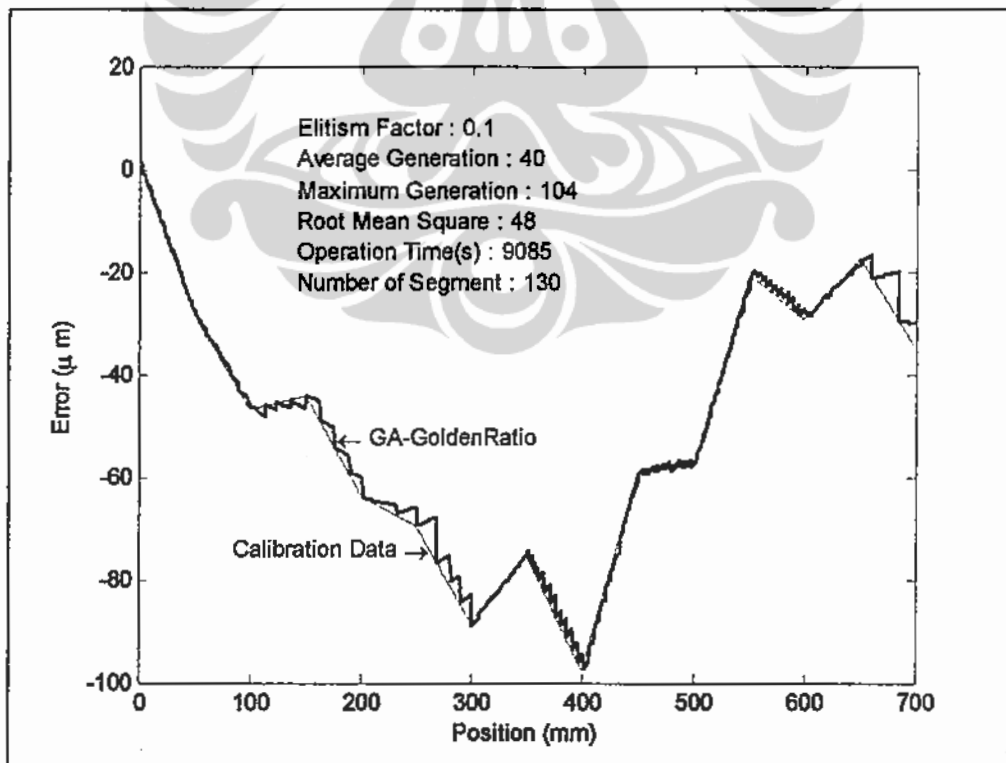
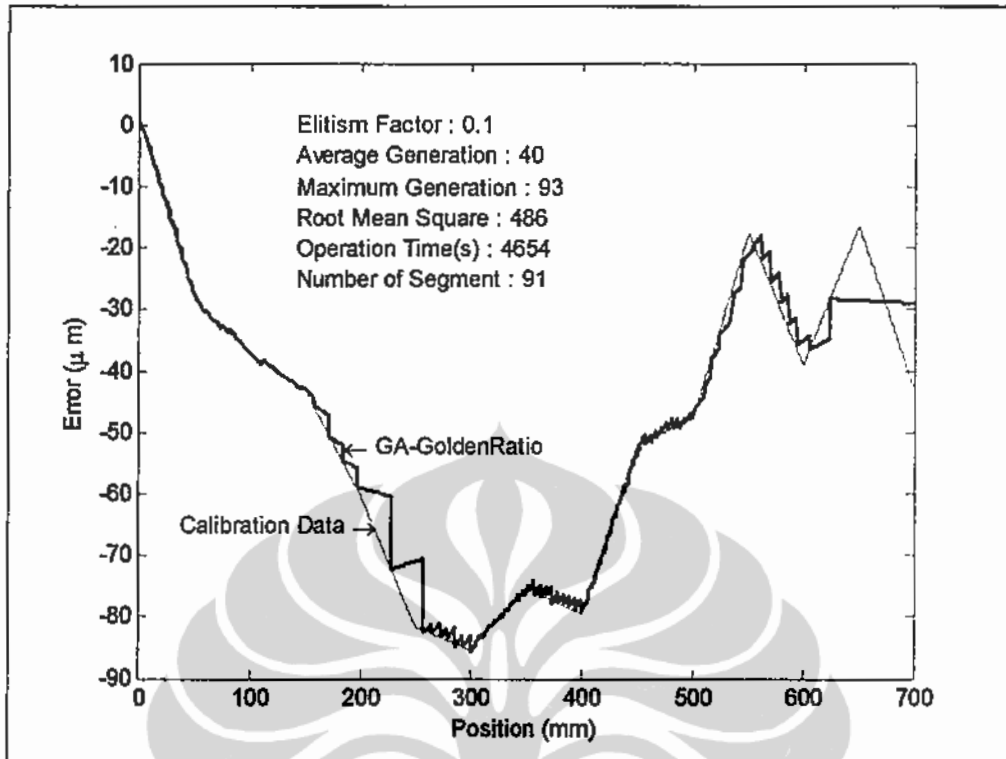
1. Purwowibowo, Sardy S, Wahidin Wahab, *Desain Digital Readout Menggunakan Mikrokontroler untuk Mengukur Gerak Linier*, Instrumentasi Vol. 32 No.2, Juli – Desember 2008.
2. Purwowibowo, Sardy S, Wahidin Wahab, *Analisa Pengaruh Kromosom Elite pada Genetic Algorithm-Golden Ratio untuk Pencocokan Kurva Karakteristik Transduser*, Teknologi Indonesia Volume 31 No 1, Januari – Juni 2008.
3. Purwowibowo, Sardy S, Wahidin Wahab, *Fitting of Linear Transducer Characteristic using Genetic Algorithm and Segmented by Golden Ratio*, Proceeding The 2nd International Conference On Optics and Laser Applications, Yogyakarta, 2007.
4. Purwowibowo, Sardy S, *Searching of Error Compensation Coefficient with Genetic Algorithm by Selection and Crossover Variation*. Proceedings 3rd International Symposium on Metrology & Physics Application and Energy Measurement, Research Center for CIM. Indonesian Institute of Sciences, Jakarta, 2006.
5. Purwowibowo, Wahidin Wahab, *Design of Electronic System for Increasing Linear Transducer Accuracy*, Quality in Research, University of Indonesia, Depok, 2004.
6. Purwowibowo, Wahidin Wahab, *Kompensator Termoelastik Pada Pencacah Digital*, Quality in Research Faculty of Engineering (QIR FT) UI, Depok, 2003.
7. Purwowibowo, *Instrumen Monitor Posisi Pahat Mesin Bubut*, Pertemuan dan Presentasi Ilmiah, Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi (PPI-KIM LIPI), Jakarta, 1997.
8. Purwowibowo, Mauludin Hidayat, Yiyi Komar Kersanajaya, *Penerapan Polinomial Pada Alat Monitor Posisi Sumbu Mesin Perkakas*. Pertemuan dan Presentasi Ilmiah, Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi, PPI-KIM LIPI, Jakarta, 1996.

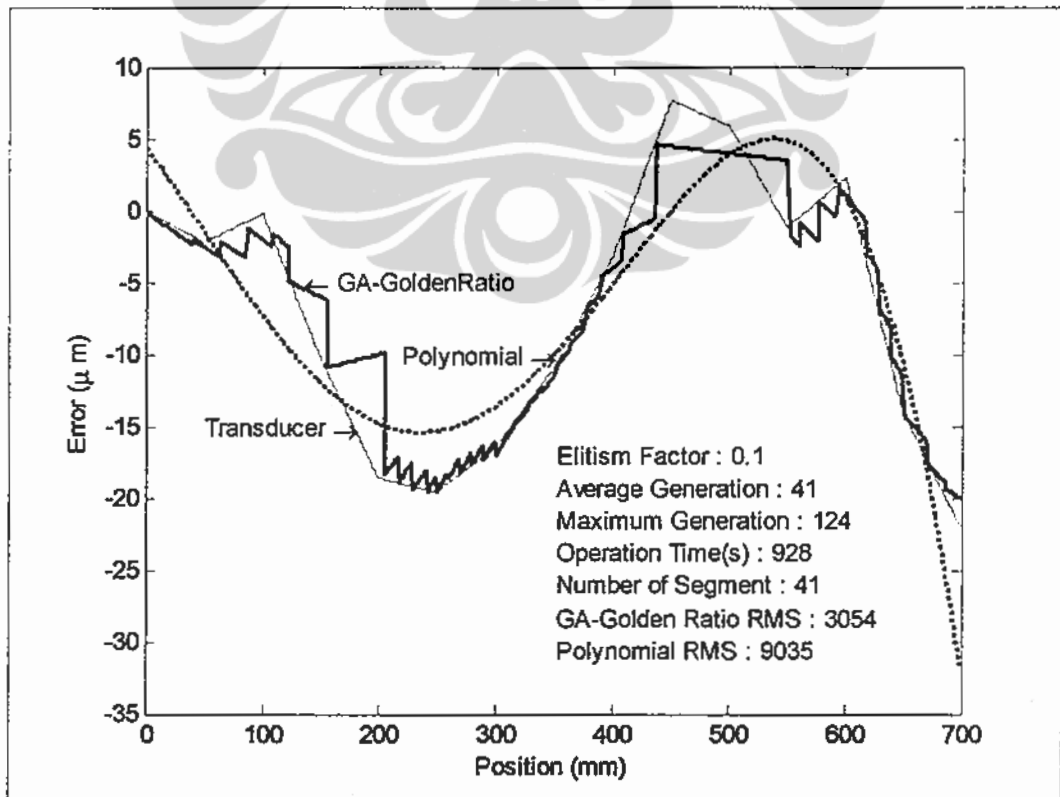
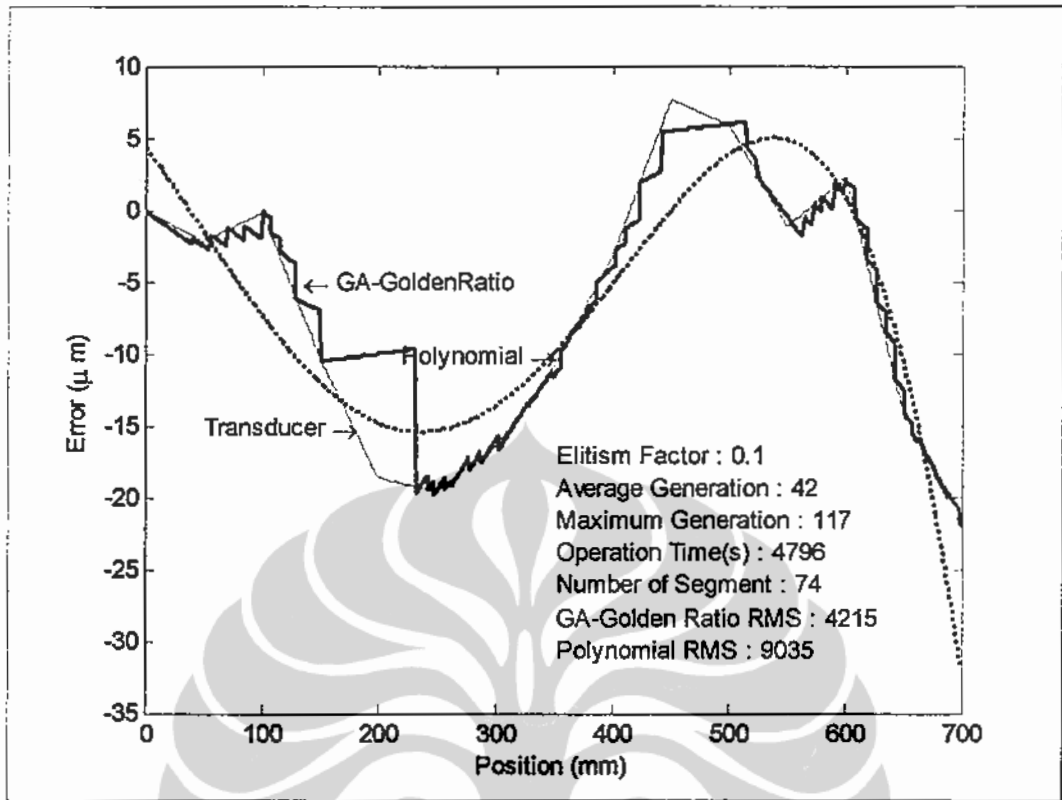
Lampiran 2

GRAFIK HASIL SIMULASI









Lampiran 3

PROGRAM MATLAB

```
function [hasil] = CalibrationMain();

%filename = 'cal';
%error=[0.0 -29.3 -47.8 -54.8 -70.7 -84.4 -97.7 -105.5 -94.6 -73.8
-70.1 -34.0 -53.8 -34.0 -55.2];

axis =[0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700];

%for run = 1 : 3

    run = 1;
    % filename = 'calr';
    % error=[1.0 -23.0 -38.2 -40.8 -60.5 -66.3 -82.3 -88.4
-86.4 -60.7 -53.9 -22.8 -39.1 -20.4 -40.9];
    % hasil= CalibrationAccuracy(run, filename, axis, error);

    % filename = 'call';
    % error=[1 -23.6 -41.4 -50.8 -67.7 -98.9 -97.6 -125.5
-104.2 -66.8 -65.6 -35.2 -54.4 -34.3 -60.7];
    % hasil= CalibrationAccuracy(run, filename, axis, error);

    % filename = 'cal2';
    % error=[1 -22.4 -40.7 -46.8 -63.2 -63.2 -85.3 -85.3
-87.1 -95.4 -72.3 -45.6 -55.1 -39.3 -62];
    % hasil= CalibrationAccuracy(run, filename, axis, error);

    % filename = 'cal3';
    % error=[1 -20.8 -32.9 -41.1 -59.1 -55.4 -81.8 -75.4
-85.4 -57.7 -60.6 -24 -48.3 -29.2 -45.3];
    % hasil= CalibrationAccuracy(run, filename, axis, error);
```

```

% filename = 'cal4'
% error=[1 -28.3 -37 -43.1 -60.2 -81.6 -85.4 -75.5
-79.5 -52.1 -47.8 -17.6 -39 -16.4 -42.9];
% hasil= CalibrationAccuracy(run, filename, axis, error);

% filename = 'cal5'
% error=[1 -19.9 -34 -36.5 -55.5 -67.7 -78.5 -78.6
-91.8 -56.9 -48.8 -17 -41 -13 -39.9];
% hasil= CalibrationAccuracy(run, filename, axis, error);

% filename = 'cal6'
% error=[1 -24.2 -44.7 -31.8 -65.7 -56.5 -81.6 -82.9
-77 -48 -45.8 -15 -29.6 -17.8 -32.7];
% hasil= CalibrationAccuracy(run, filename, axis, error);

filename = 'cal7'
error=[1 -28.4 -46.8 -44.2 -63.6 -69.6 -88.4 -75.2
-97.7 -59.2 -57.7 -20.6 -29.3 -17.4 -35];
hasil= CalibrationAccuracy(run, filename, axis, error);

filename = 'cal8'
error=[1 -18.1 -31.2 -35.2 -55.3 -56.4 -72.6 -95.4
-74.8 -66.9 -39.7 -8.2 -27.5 -12.8 -33.9];
hasil= CalibrationAccuracy(run, filename, axis, error);

filename = 'cal9'
error=[1 -24.7 -36.7 -47.7 -63.6 -63 -81.8 -78.1
-88 -63 -59.8 -34.4 -46 -18 -34.2];
hasil= CalibrationAccuracy(run, filename, axis, error);

filename = 'cal10'
error=[1 -20 -36.8 -30.8 -51.1 -50.4 -69.5 -111.8
-78.8 -40.8 -41 -10.5 -20.6 -5.5 -21.9];
hasil= CalibrationAccuracy(run, filename, axis, error);

%end

```

```

function [hasil] = CalibrationAccuracy(run, filename, axis, error);

%clear;
%close;

ELITE = 0.1;
%run = 1;

t0 = clock;    % Inisialisasi waktu operasi

gr = 1.618033;

min_acc = 120;
max_acc = 320;

%min_acc = 120;
%max_acc = 920;

success = 0;
scale = 100; % skala data yang digunakan pada perhitungan offset pada
file Disertasi27 dan CurveValidation5

% =====
% data simulasi untuk elitisasi
%filename = 'xlogx';
%MAXDATA = 1000;
%X(1) = 0;
%Y(1) = 0;
%for x=1 : MAXDATA
%   X(x+1) = x;
%   Y(x+1) = ((x/MAXDATA) * log(x/MAXDATA) * 100);
%end
% =====

```

```

%axis = [0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95
100];
%error = [0.0 -5.0 -10.0 -14.9 -19.9 -24.7 -29.6 -34.3 -38.9 -43.5 -47.9
-52.3 -56.5 -60.5 -64.4 -68.2 -71.7 -75.1 -78.3 -81.3 -83.6];

%=====
%data kalibrasi axis
%filename = 'hierarchy';
%axis = [0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700];
%error=[0.0 -29.3 -47.8 -54.8 -70.7 -84.4 -97.7 -105.5 -94.6 -73.8
-70.1 -34.0 -53.8 -34.0 -55.2];

[X,Y] = ProsesDataKalibrasi(axis, error); % Baca pasangan data
kalibrasi yang telah diekspansi
%=====

accuracy = round(min_acc + (max_acc - min_acc)*(1/(1+gr))); %
ditentukan hanya pada evaluasi
%fix accuracy saja

while(1)

    [hasil,status,maksimumgen,avggen] = CalibrationSegment(X,Y,
ELITE, accuracy, gr, scale);

    switch status
        case -1
            disp('Target Accuracy is too small')
            min_acc = accuracy

            operationtime = etime(clock,t0) % Hitung waktu operasi
            %rmsGA = RootMeanSquare(X, Y, hasil, scale); % karena fail
            %maka tidak dapat dihitung rmsGA_nya
            rmsGA = 0;
            savefile =
['D:\MyS3\CalibrationY',filename ,num2str(accuracy),'rms',num2str(

```

```

rmsGA), 'el', num2str(ELITE*10), 'r', num2str(run), '.mat']; %nama file

save(savefile, 'X', 'Y', 'hasil', 'max_acc', 'ELITE', 'avggen', 'maksimum
gen', 'operationtime', 'scale');
    success = 0;

    case 1
        disp('Target Accuracy is too big')
        max_acc = accuracy
        operationtime = etime(clock, t0) % Hitung waktu operasi
        rmsGA = RootMeanSquare(X, Y, hasil, scale);
        savefile =
['D:\MyS3YCalibration\Y', filename, num2str(accuracy), 'rms', num2str(
rmsGA), 'el', num2str(ELITE*10), 'r', num2str(run), '.mat']; %nama file

save(savefile, 'X', 'Y', 'hasil', 'max_acc', 'ELITE', 'avggen', 'maksimum
gen', 'operationtime', 'scale');
        success = 1;
    end
    if(abs(max_acc-min_acc) <=1) %if the max and min accuracy <= 1 then
stop
        break;
    end
    accuracy = round(min_acc + (max_acc - min_acc)*(1/(1+gr))) %
% di non aktifkan untuk fix accuracy

end
%if(success == 1)
% CurveValidation5(X, Y, hasil, max_acc, ELITE, avggen, maksimumgen,
operationtime, scale)
%else
% disp('Batas Maksimum Target Akurasi Mohon Diperbesar')
%end


---


function [hasil, run_status, maksimumgen, avggen] = HierarSegment(X,
Y, ELITE, accuracy, gr, scale);
%clear;
%close;

```

```

orde = 2;           % orde target hasil polynomial
hasil = 0;         % inisialisasi hasil

%t0 = clock;      % Inisialisasi waktu operasi
XX = X;           % save data input asli untuk menghitung parameter offset
YY = Y;

start_segmen = 1;   %searching dimulai dari titik reference point
                    (pada Matlab dimulai dengan 1 bukan 0)
end_segmen = X(length(X));
n = 0;
jmlgen = 0;
maksimumgen = 0;
%target_akurasi = accuracy;
run_status = 0;    % untuk mengetahui iterasi berhasil atau tidak 1=OK,
                    -1=NOT OK, 0=notfinishyet

while(1)
    (parameter_integer, realgen) = AlgoritmaGenetika4(ELITE,
start_segmen, end_segmen, X, Y, accuracy, orde);

    % parameter_integer = AlgoritmaGenetika1(start_segmen, pos,
X, Y, accuracy, orde)
    % return dari AlgoritmaGenetika bila semuanya 0 maka
    hasilnya tidak
    % sukses sehingga segmen harus diperkecil dengan menggunakan
    golden
    % ratio yang diharapkan dapat parameter integer sesuai
    dengan
    % target akurasi. apabila tetap gagal maka target akurasi
    % diperlonggar.
    % check_hasil_GA = sum(parameter_integer); %jumlahkan semua
    parameter integer

    %if check_hasil_GA ~= 0 % bila GA sukses maka data segmen dan
    bilangan interger save
    if (CheckZero(parameter_integer)~= 0)

```

```

% Segmen sukses, save segmen dan parameter kalibrasi
if hasil == 0 % pada saat pertama kali
    offset = YY(start_segmen) -((parameter_integer(1) +
parameter_integer(2) * start_segmen)/scale);
    offset = round(offset); % make the offset value is integer
    hasil=[start_segmen, end_segmen, parameter_integer(1),
parameter_integer(2),offset'];
    last_end_segmen = end_segmen;
else
    if(last_end_segmen <= XX(length(XX)))
        offset = YY(last_end_segmen)
-((parameter_integer(1) + parameter_integer(2) *
last_end_segmen)/scale);
        offset = round(offset); % make the offset value is
integer
    else
        offset = 0;
    end
    hasil = [hasil; last_end_segmen, end_segmen +
last_end_segmen,
parameter_integer(1),parameter_integer(2),
offset'];
    last_end_segmen = end_segmen + last_end_segmen;
end
[X,Y] = CrossPoint(X,Y,end_segmen);
start_segmen = 1;
end_segmen = X(length(X));

else % bila GA gagal maka segmen dibagi dengan golden ratio
% Segmen dibagi menggunakan golden ratio
end_segmen = round(start_segmen + ((end_segmen -
start_segmen)/gr)); %OK

%end_segmen = round(start_segmen + 5);

end

if start_segmen >= end_segmen % bila start segmen = end segmen
artinya sudah tidak ada

```

```

disp('Target akurasi diperkecil')
run_status = 1;
break; % data yang akan di proses maka
iterasi dihentikan.
end
if (abs(end_segmen - start_segmen) <= 1)
disp('Target akurasi diperbesar')
run_status = -1;
break; % data yang akan di proses maka
iterasi dihentikan.
end

n = n + 1;
jmlgen = jmlgen + realgen;
if (realgen > maksimumgen)
maksimumgen = realgen;
end
disp(['Start Segment = ', num2str(start_segmen)])
disp(['End Segment = ', num2str(end_segmen)])
disp(['Elititasi = ', num2str(ELITE)])
disp(['Target Akurasi = ', num2str(accuracy)])
hasil
end
avggen = round(jmlgen/n);

```

```

function [hasil, realgen] = AlgoritmaGenetikal(ELITE, start_seg,
end_seg, X, Y, accuracy, orde);
%Genetic Algorithm digunakan untuk mencari parameter polinomial
%clear all % Hapus semua variabel sebelumnya
warning off MATLAB:dispatcher:InexactMatch; % untuk menghilangkan
warning ketika nama file subrutin
% tidak sama persis huruf besar
kecilnya.
%t0 = clock; % Inisialisasi waktu operasi
NIND = 200; % Jumlah individu setiap subpopulasi
MAXGEN = 1000; % Jumlah generasi maksimum
MAXDELAYGEN = 30; % Jumlah generasi untuk menunggu bila SSE konstan,

```

```

bila telah
        % mencapai nilai tersebut maka iterasi distop dianggap
        % searching sudah sampai nilai optimal
%ELITE = 0.2; % Prosentase individu elit terbaik(Elitisasi)untuk
%generasi berikutnya

NVAR = orde;
%NVAR = 2; % Jumlah variabel (sasaran Y = bX + a sehingga jml
variable = 2; a dan b)
        % Nilainya sama dengan variable Dim pada subrutine
        % objgoldenga.
PRECI = 16; % Kepresisian (lebar) bilangan biner

FieldD = [rep([PRECI],[1, NVAR]); rep([-32768;32767],[1, NVAR]);...
rep([1; 0; 1 ;1], [1, NVAR])];

Chrom = crtbp(NIND, NVAR*PRECI);
Best = NaN*ones(MAXGEN,1);
gen = 0;
ResultOld = 0;
gentemp = 0;

%ObjV = objgoldenga(bs2rv(Chrom,FieldD));
%[ObjV Result] = objgoldenga(bs2rv(Chrom,FieldD));
[ObjV Result] = FungsiKelayakan(bs2rv(Chrom,FieldD),X,Y, NVAR);

Best(gen+1) = min(ObjV);
while gen < MAXGEN,
    FitnV = Ranking(ObjV);
    SelCh = SelectElite('sus', Chrom, FitnV, ELITE); % SUS =
Stochastic Universal Selection
    %SelCh = selectelite('rws', Chrom, FitnV, ELITE); % RWS = Roulette
Wheel Selection
    SelCh = ReCombin('xovmp',SelCh,0.7); % Multi Point
    %SelCh = recombina('xovsh',SelCh,0.7); % Shuffle
    SelCh = Mut(SelCh);
    %ObjVSel = objgoldenga(bs2rv(SelCh,FieldD));

```

```

[ObjVSel Result] = FungsiKelayakan7(bs2rv(SelCh,FieldD),X,Y,
accuracy, start_seg, end_seg, orde);
[Chrom ObjV]=ReIns(Chrom,SelCh,1,1,ObjV,ObjVSel);
gen = gen+1;
Best(gen+1) = min(ObjV);
%end

%RUNTIME UNTUK MENAMPILKAN GAMBAR PROGRESS SEARCHING, tapi bila
%diaktifkan akan memperlambat kerja, digunakan evaluasi penentuan
MAXGEN dan MAXDELAYGEN

%operationtime =etime(clock,t0) % Hitung waktu operasi
%plot(log10(Best),'ro'); xlabel('Generasi'); ylabel('Kesalahan
Kuadrat Terkecil'); % gambar perjalanan proses kalkulasi pada GA
%text(0.5,0.95,['SSE = ',
num2str(Best(gen+1))],'Units','normalized'); %tampilkan nilai SSE
terakhir
%drawnow;

if(Best(gen+1) ~= ResultOld)
    ResultOld = Best(gen+1);
    gentemp = 0;
else
    gentemp = gentemp +1;
end
if(gentemp >= MAXDELAYGEN)
    realgen = gen - MAXDELAYGEN;
    gen = MAXGEN+1;
end
end
hasil = Result;

```

```
function [XX,YY] = CrossPoint(X, Y, crosspoint);
```

```

tempX = X(crosspoint);
tempY = Y(crosspoint);
for i = crosspoint : X(length(X))

```



```

XX(i-crosspoint+1) = X(i) - tempX;
YY(i-crosspoint+1) = Y(i) - tempY;
end

```

```

%Untuk menghitung Sum Square Error (SSE) polinomial yang diberikan
function [ObjVal, CoeffOptimal] = FungsiKelayakan(Chrom, xx, yy,
orde);

```

```

% Data axis x
%xx=[0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700];
% Data simpangan pengukuran
%yy=[0.0 -29.3 -47.8 -54.8 -70.7 -84.4 -97.7 -105.5 -94.6 -73.8 -70.1
-34.0 -53.8 -34.0 -55.2];
%npts = 15;

```

```

% Data axis x
%xx=[0 .5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7];
% Data simpangan pengukuran
%yy=[0.0 -2.93 -4.78 -5.48 -7.07 -8.44 -9.77 -10.55 -9.46 -7.38 -7.01
-3.4 -5.38 -3.4 -5.52];
%npts = 15;

```

```

%Data Temperatur
%xx=[21.4 23.0 26.5 27.0 28.7 29.6 30.8 31.6 32.0 32.3];
%yy=[-60.7 -62.0 -45.3 -42.9 -39.9 -32.7 -35.0 -33.9 -34.2 -21.9];
%npts = 10;

```

```

%Data testing polinomial dari matlab
%xx=[0 .1 .2 .3 .4 .5 .6 .7 .8 .9 1];
%yy=[-.447 1.978 3.28 6.16 7.08 7.34 7.66 9.56 9.48 9.30 11.2];
%npts = 11;

```

```

%Data flowmeter
%xx=[.03 .1 .3 .5 .8];
%yy=[7.129 7.1617 7.1833 7.1573 7.0463];
%npts = 5;

```

```

mx = length(xx);          % Hitung jumlah data kalibrasi (interval)
my = length(yy);          % Hitung jumlah data kalibrasi (simpangan)

if mx ~= my                % Bila jumlah data tidak sama tampilkan pesan
    error('Jumlah pasangan data kalibrasi tidak sama')
end
npts = mx;

SseTemp = 1e+99;
CheckZero = 0;

% Dim = 2;                % HARUS SAMA NILAINYA DENGAN VARIABEL NVAR PADA FILE
UTAMA (POLYGA)
Dim = orde;
[Nind,Nvar] = size(Chrom);

%elseif Nvar == Dim
if Nvar == Dim
    ObjVal = zeros(Nind,1);
    Coeff = zeros(Nvar,1);
    CoeffOptimal = zeros(Nvar,1);
    xfit = linspace(min(xx), max(xx), npts);
    for j=1 : Nind
        for i=1 : Nvar
            Coeff(i) = Chrom((i-1)*Nind +j);
            CheckZero = CheckZero + Coeff(i); % Untuk memeriksa semua
coefisien tidak = 0
        end
        Resid= yy - (polyval (Coeff, xfit));
        Sse = sum(Resid.^2);

        if (CheckZero == 0)
            ObjVal(j) = max(ObjVal); %bila semua coefficient = 0 maka
ObjVal diberi nilai max
        else
            %agar chromosome tersebut tidak
lolos seleksi

```

```

        ObjVal(j) = Sse;
    end

    if ((Sse < SseTemp)&(CheckZero ~= 0))
        CoeffOptimal = Coeff; % SUDAH DI BUKTIKAN BAHWA CARA INI
        ADALAH YANG TERBAIK
        SseTemp = Sse; % YAITU DENGAN MENCEGAT PADA PROSES
        PADA FUNGSI OBYEKTIF
    end % BUKAN PADA AKHIR ITERASI KARENA TIDAK
    ADA JAMINAN BAHWA
    end % KROMOSOME TERAKHIR ADALAH YANG
    TERBAIK KARENA PROSES MUTASI
else
    error('Ukuran matrik Chromosome tidak sesuai dengan fungsi
    evaluasi');
end

```

%Untuk menghitung rangking tingkat fitness setiap individu

```

function FitnV = ranking(ObjV, RFun, SUBPOP);
    [Nind,ans] = size(ObjV);

    if nargin < 2, RFun = []; end
    if nargin > 1, if isnan(RFun), RFun = []; end, end
    if prod(size(RFun)) == 2,
        if RFun(2) == 1, NonLin = 1;
        elseif RFun(2) == 0, NonLin = 0;
        else error('Parameter Rangking harus 0 atau 1'); end
        RFun = RFun(1);
        if isnan(RFun), RFun = 2; end
        elseif prod(size(RFun)) > 2,
            if prod(size(RFun)) ~= Nind, error('Nilai Obyektif dan RFun
            tidak cocok'); end
    end

    if nargin < 3, SUBPOP = 1; end
    if nargin > 2,
        if isempty(SUBPOP), SUBPOP = 1;
    end

```

```

elseif isnan(SUBPOP), SUBPOP = 1;
elseif length(SUBPOP) ~= 1, error('SUBPOP harus scalar'); end
end

if (Nind/SUBPOP) ~= fix(Nind/SUBPOP), error('Nilai Obyektif and
SUBPOP tidak cocok'); end
Nind = Nind/SUBPOP;
if isempty(RFun),
    RFun = 2*[0:Nind-1]'/ (Nind-1);
elseif prod(size(RFun)) == 1
    if NonLin == 1,
        if RFun(1) < 1, error('Tekanan selektif harus > 1');
        elseif RFun(1) > Nind-2, error('Tekanan selektif terlalu
besar'); end
        Root1 = roots([RFun(1)-Nind [RFun(1)*ones(1,Nind-1)]]);
        RFun = (abs(Root1(1)) * ones(Nind,1)) .^ [(0:Nind-1)'];
        RFun = RFun / sum(RFun) * Nind;
    else
        if (RFun(1) < 1 | RFun(1) > 2),
            error('Tekanan selektif antara 1 dan 2');
        end
        RFun = 2-RFun + 2*(RFun-1)*[0:Nind-1]'/ (Nind-1);
    end
end;
FitnV = [];
for irun = 1:SUBPOP,
    ObjVSub = ObjV((irun-1)*Nind+1:irun*Nind);
    NaNix = isnan(ObjVSub);
    Validix = find(~NaNix);
    [ans,ix] = sort(-ObjVSub(Validix));
    ix = [find(NaNix) ; Validix(ix)];
    Sorted = ObjVSub(ix);
    i = 1;
    FitnVSub = zeros(Nind,1);
    for j = [find(Sorted(1:Nind-1) ~= Sorted(2:Nind)); Nind]',
        FitnVSub(i:j) = sum(RFun(i:j)) * ones(j-i+1,1) / (j-i+1);
        i = j+1;

```

```

end
[ans,uix] = sort(ix);
FitnVSub = FitnVSub(uix);
FitnV = [FitnV; FitnVSub];
end

```

```

% Untuk proses seleksi
function SelCh = selectga(SEL_F, Chrom, FitnV, ELITE, SUBPOP);
    if nargin < 3, error('Parameter input kurang'); end
    [NindCh,Nvar] = size(Chrom);
    [NindF,VarF] = size(FitnV);
    if NindCh ~= NindF, error('Kromosom dan Fungsi Fitness tidak
cocok'); end
    if VarF ~= 1, error('Fungsi fitness harus berupa vektor kolom');
end

    if nargin < 5, SUBPOP = 1; end
    if nargin > 4,
        if isempty(SUBPOP), SUBPOP = 1;
        elseif isnan(SUBPOP), SUBPOP = 1;
        elseif length(SUBPOP) ~= 1, error('Sub populasi harus skalar ');
end
end

    if (NindCh/SUBPOP) ~= fix(NindCh/SUBPOP), error('Kromosome dan Sub
Populasi tidak cocok'); end
    Nind = NindCh/SUBPOP;

    if nargin < 4, ELITE = 1; end
    if nargin > 3,
        if isempty(ELITE), ELITE = 1;
        elseif isnan(ELITE), ELITE = 1;
        elseif length(ELITE) ~= 1, error('Parameter ELITE harus skalar');
        elseif (ELITE < 0), error('Parameter ELITE harus skalar > 0');
end
end

    end
    NSel=max(floor(Nind*(1-ELITE)+.5),2);
    SelCh = [];

```

```

for irun = 1:SUBPOP,
    FitnVSub = FitnV((irun-1)*Nind+1:irun*Nind);
    ChrIx=feval(SEL_F, FitnVSub, NSel)+(irun-1)*Nind;
    SelCh=[SelCh; Chrom(ChrIx,:)];
end

```

```

%Untuk mengkombinasikan pasangan individu
function NewChrom = recomb(REC_F, Chrom, RecOpt, SUBPOP);
    if nargin < 2, error('Parameter Input kurang'); end
    [Nind,Nvar] = size(Chrom);

    if nargin < 4, SUBPOP = 1; end
    if nargin > 3,
        if isempty(SUBPOP), SUBPOP = 1;
        elseif isnan(SUBPOP), SUBPOP = 1;
        elseif length(SUBPOP) ~= 1, error('Sub Populasi harus skalar');
    end
end
    if (Nind/SUBPOP) ~= fix(Nind/SUBPOP), error('Kromosom dan Sub
Populasi tidak cocok'); end
    Nind = Nind/SUBPOP;
    if nargin < 3, RecOpt = 0.7; end
    if nargin > 2,
        if isempty(RecOpt), RecOpt = 0.7;
        elseif isnan(RecOpt), RecOpt = 0.7;
        elseif length(RecOpt) ~= 1, error('RecOpt harus skalar');
        elseif (RecOpt < 0 | RecOpt > 1), error('RecOpt harus skalar antara
[0, 1]'); end
    end
    NewChrom = [];
    for irun = 1:SUBPOP,
        ChromSub = Chrom((irun-1)*Nind+1:irun*Nind,:);
        NewChromSub = feval(REC_F, ChromSub, RecOpt);
        NewChrom=[NewChrom; NewChromSub];
    end

```

```

%Untuk mutasi populasi
function NewChrom = mut(OldChrom, Pm, BaseV)

```

```

[Nind, Lind] = size(OldChrom) ;

if nargin < 2, Pm = 0.7/Lind ; end
if isnan(Pm), Pm = 0.7/Lind; end

if (nargin < 3), BaseV = crtbase(Lind); end
if (isnan(BaseV)), BaseV = crtbase(Lind); end
if (isempty(BaseV)), BaseV = crtbase(Lind); end

if (nargin == 3) & (Lind ~= length(BaseV))
    error('Kromosom lama dan Nilai Base tidak sesuai'), end
BaseM = BaseV(ones(Nind,1),:) ;
NewChrom = rem(OldChrom+(rand(Nind,Lind)<Pm).*ceil(rand(Nind,Lind).*(BaseM-1)
),BaseM);

```

```

%Untuk memasukkan offspring ke populasi
function [Chrom, ObjVCh] = reins(Chrom, SelCh, SUBPOP, InsOpt, ObjVCh,
ObjVSel);

    if nargin < 2, error('Parameter input kurang'); end
    if (nargout == 2 & nargin < 6), error('Parameter input kurang');
end

[NindP, NvarP] = size(Chrom);
[NindO, NvarO] = size(SelCh);

if nargin == 2, SUBPOP = 1; end
if nargin > 2,
    if isempty(SUBPOP), SUBPOP = 1;
    elseif isnan(SUBPOP), SUBPOP = 1;
    elseif length(SUBPOP) ~= 1, error('Sub Populasi harus skalar');
end
end
if (NindP/SUBPOP) ~= fix(NindP/SUBPOP), error('Kromosom dan sub

```

```

populasi tidak cocok'); end
    if (Nindo/SUBPOP) ~= fix(Nindo/SUBPOP), error('SelCh dan sub
populasi tidak cocok'); end
    NIND = NindP/SUBPOP;
    NSEL = Nindo/SUBPOP;

    IsObjVCh = 0; IsObjVSel = 0;
    if nargin > 4,
        [mO, nO] = size(ObjVCh);
        if nO ~= 1, error('Nilai obyektif harus vektor kolom'); end
        if NindP ~= mO, error('Kromosom dan nilai obyektif tidak cocok');
end
    IsObjVCh = 1;
end
    if nargin > 5,
        [mO, nO] = size(ObjVSel);
        if nO ~= 1, error('Nilai obyektif harus vektor kolom'); end
        if Nindo ~= mO, error('SelCh dan nilai Obyektif tidak cocok');
end
    IsObjVSel = 1;
end

    if nargin < 4, INSR = 1.0; Select = 0; end
    if nargin >= 4,
        if isempty(InsOpt), INSR = 1.0; Select = 0;
        elseif isnan(InsOpt), INSR = 1.0; Select = 0;
        else
            INSR = NaN; Select = NaN;
            if (length(InsOpt) > 2), error('Parameter insert terlalu
panjang'); end
            if (length(InsOpt) >= 1), Select = InsOpt(1); end
            if (length(InsOpt) >= 2), INSR = InsOpt(2); end
            if isnan(Select), Select = 0; end
            if isnan(INSR), INSR = 1.0; end
        end
    end
end
    if (INSR < 0 | INSR > 1), error('Parameter insert harus skalar di

```



```

dalam [0, 1]'); end
    if (INSR < 1 & IsObjVSel ~= 1), error('Untuk seleksi offspring ObjVSel
diperlukan'); end
    if (Select ~= 0 & Select ~= 1), error('Parameter seleksi harus 0
atau 1'); end
    if (Select == 1 & IsObjVCh == 0), error('Diperlukan pertukaran nilai
obyektif'); end

if INSR == 0, return; end
NIns = min(max(floor(INSR*NSEL+.5),1),NIND);
for irun = 1:SUBPOP,
    if Select == 1,
        [Dummy, ChIx] = sort(-ObjVCh((irun-1)*NIND+1:irun*NIND));
    else
        [Dummy, ChIx] = sort(rand(NIND,1));
    end
    PopIx = ChIx((1:NIns)')+ (irun-1)*NIND;
    if (NIns < NSEL),
        [Dummy, OffIx] = sort(ObjVSel((irun-1)*NSEL+1:irun*NSEL));
    else
        OffIx = (1:NIns)';
    end
    SelIx = OffIx((1:NIns)'+(irun-1)*NSEL;
    Chrom(PopIx,:) = SelCh(SelIx,:);
    if (IsObjVCh == 1 & IsObjVSel == 1), ObjVCh(PopIx) =
ObjVSel(SelIx); end
end

```

```

function [ObjVal, CoeffOptimal] = FungsiKelayakan7(Chrom, X, Y,
target_akurasi, start_seg, end_segment, orde);

```

```

mx = length(X);          % Hitung jumlah data kalibrasi (interval)
my = length(Y);          % Hitung jumlah data kalibrasi (simpangan)

if mx ~= my              % Bila jumlah data tidak sama tampilkan pesan
    error('Jumlah pasangan data kalibrasi tidak sama')
end
%npts = mx;

```

```

sse_temp = 1e+99;
check_zero = 0;

%Dim = 2;          % HARUS SAMA NILAINYA DENGAN VARIABEL NVAR PADA FILE
UTAMA (POLYGA)
Dim = orde;

[Nind,Nvar] = size(Chrom);

if Nvar == Dim
    ObjVal = zeros(Nind,1);
    Coeff = zeros(Nvar,1);
    CoeffOptimal = zeros(Nvar,1);
    xfit = linspace(min(X), max(X), length(X));
    for j=1 : Nind
        for i=1 : Nvar
            Coeff(i) = Chrom((i-1)*Nind +j);
        end
        Resid= Y - (polyval (Coeff, xfit));
        sse = sum(Resid.^2);

        if (CheckZero(Coeff) == 0)
            ObjVal(j) = max(ObjVal); %bila semua coefficient = 0 maka
ObjVal diberi nilai max
        else
            %agar chromosome tersebut tidak
lolos seleksi
            ObjVal(j) = sse;          %GA diarahkan oleh nilai SSE disini
                                     % SSE kecil semakin baik
        end
        if ((sse < sse_temp) & (CheckZero(Coeff) ~= 0))

            for pos = start_seg : end_segment % dibuat agar segment
independent!!!!

                genetik = Coeff(1) + Coeff(2) * pos; %Orde 2
                %genetik          =   Coeff(1)      +   Coeff(2)*pos      +

```

```

Coeff(3)*pos*pos; % orde 3

    kalibrasi = SimpanganDataKalibrasil(start_seg, X, Y);

    hasil_akurasi = abs(kalibrasi - genetik);

    if hasil_akurasi <= target_akurasi
        CoeffOptimal = Coeff;
    else
        CoeffOptimal = zeros(Nvar,1);
        break;
    end
end
end
% SUDAH DI BUKTIKAN BAHWA CARA INI
% ADALAH YANG TERBAIK
sse_temp = sse; % YAITU DENGAN MENCEGAT PADA PROSES
PADA FUNGSI OBYEKTIF
end % BUKAN PADA AKHIR ITERASI KARENA TIDAK
ADA JAMINAN BAHWA
end % KROMOSOME TERAKHIR ADALAH YANG
TERBAIK KARENA PROSES MUTASI
else
    error('Ukuran matrik Chromosome tidak sesuai dengan fungsi
evaluasi');
end


---


function [hasil] = SimpanganDataKalibrasil(axis_pos, xx, yy);

% If the input parameter is out of range of calibration data which
mention
% in the xx parameter so the function will give warning error.

mx = length(xx); % Hitung jumlah data kalibrasi (interval)
my = length(yy); % Hitung jumlah data kalibrasi (simpangan)

if mx ~= my % Bila jumlah data tidak sama tampilkan pesan
    error('Jumlah pasangan data kalibrasi tidak sama')

```

```

end

%if ((axis_pos+1) < xx(1))|(axis_pos > xx(mx)-1),...
% if ((axis_pos+1) < xx(1))|(axis_pos > xx(mx)),...
%     error('Parameter masukan posisi diluar rentang data
kalibrasi');
% end

if (axis_pos < xx(1))|(axis_pos > xx(mx)),...
    error('Parameter masukan posisi diluar rentang data
kalibrasi');
end

%hasil = yy(axis_pos + 1);
hasil = yy(axis_pos);

% Bagian ini untuk menghitung simpang posisi
% berdasarkan data kalibrasi dalam rentangnya

%for n=1 : mx-1
%   if (axis_pos>=xx(n)& axis_pos <= xx(n+1));
%       i = n;
%   end
%end

%if axis_pos == 0
%   i=1;
%end

%yyslope = yy(i+1)-yy(i);
%xxslope = xx(i+1)-xx(i);
%hasil = yy(i)+(axis_pos - xx(i))* yyslope/xxslope;

```

Lampiran 4

DAFTAR PARAMETER KOMPENSASI

Data 1

Segmen			Parameter		Segmen			Parameter	
No	Awal	Akhir	b	Offset	No	Awal	Akhir	b	Offset
1	1	3	-63	1	33	116	123	-26	-20
2	3	6	-62	1	34	123	129	-24	-21
3	6	9	-61	1	35	129	137	-23	-22
4	9	12	-60	1	36	137	145	-21	-24
5	12	15	-59	1	37	145	153	-20	-25
6	15	18	-58	0	38	153	161	-19	-26
7	18	21	-57	0	39	161	166	-18	-29
8	21	24	-56	0	40	166	174	-18	-30
9	24	27	-55	0	41	174	182	-17	-33
10	27	30	-54	-1	42	182	190	-16	-36
11	30	33	-53	-1	43	190	198	-16	-37
12	33	36	-52	-2	44	198	211	-14	-42
13	36	39	-51	-2	45	211	219	-11	-50
14	39	42	-50	-3	46	219	239	-8	-58
15	42	45	-49	-3	47	239	286	-3	-74
16	45	48	-48	-4	48	286	302	11	-125
17	48	51	-46	-5	49	302	312	15	-143
18	51	54	-45	-6	50	312	322	18	-156
19	54	57	-44	-7	51	322	329	21	-169
20	57	60	-43	-7	52	329	336	23	-178
21	60	63	-42	-7	53	336	343	25	-187
22	63	66	-41	-8	54	343	350	27	-197
23	66	69	-40	-8	55	350	355	29	-207
24	69	74	-39	-9	56	355	360	30	-211
25	74	79	-37	-10	57	360	365	31	-215
26	79	84	-36	-11	58	365	370	32	-219
27	84	89	-35	-12	59	370	375	33	-223
28	89	94	-33	-14	60	375	380	34	-228
29	94	99	-32	-15	61	380	385	35	-232
30	99	104	-31	-16	62	385	390	36	-237
31	104	109	-29	-18	63	390	395	37	-241
32	109	116	-28	-18	64	395	400	38	-246

Segmen			Parameter	
No	Awal	Akhir	b	Offset
65	400	405	39	-251
66	405	408	40	-255
67	408	411	40	-255
68	411	414	41	-259
69	414	417	41	-259
70	417	420	42	-263
71	420	423	43	-267
72	423	426	42	-263
73	426	429	42	-263
74	429	432	42	-263
75	432	435	42	-263
76	435	438	42	-263
77	438	441	41	-259
78	441	444	41	-259
79	444	447	41	-259
80	447	450	41	-259
81	450	453	41	-259
82	453	456	40	-255
83	456	459	40	-256
84	459	462	40	-257
85	462	465	40	-258
86	465	468	40	-259
87	468	473	39	-255
88	473	478	39	-257
89	478	483	39	-258
90	483	488	38	-255

Segmen			Parameter	
No	Awal	Akhir	b	Offset
91	488	493	38	-257
92	493	498	37	-253
93	498	503	36	-250
94	503	508	35	-245
95	508	513	34	-238
96	513	518	32	-226
97	518	523	31	-218
98	523	528	30	-211
99	528	533	29	-204
100	533	540	28	-196
101	540	547	26	-182
102	547	554	24	-168
103	554	559	22	-157
104	559	566	23	-166
105	566	573	23	-170
106	573	581	23	-175
107	581	589	23	-180
108	589	597	23	-185
109	597	605	23	-190
110	605	613	24	-197
111	613	621	22	-184
112	621	629	18	-158
113	629	641	13	-124
114	641	667	6	-76
115	667	677	-9	19
116	677	701	-6	-4

Data 2

Segmen			Parameter	
No	Awal	Akhir	b	Offset
1	1	16	-6	0
2	16	31	-6	0
3	31	55	-5	0
4	55	78	-5	1
5	78	93	-6	3
6	93	108	-6	5
7	108	121	-7	6
8	121	134	-4	1
9	134	186	-2	-4
10	186	199	7	-29
11	199	211	9	-36
12	211	219	11	-42
13	219	227	12	-45
14	227	235	12	-46
15	235	243	13	-50
16	243	251	13	-51
17	251	258	14	-55
18	258	265	14	-56
19	265	272	14	-56
20	272	279	14	-57
21	279	286	14	-57
22	286	293	14	-57
23	293	300	14	-58
24	300	307	13	-55
25	307	314	13	-56
26	314	321	13	-56
27	321	328	13	-57
28	328	338	12	-54
29	338	348	12	-54
30	348	358	12	-55
31	358	366	11	-51
32	366	374	11	-50

Segmen			Parameter	
No	Awal	Akhir	b	Offset
33	374	382	11	-49
34	382	390	10	-45
35	390	403	9	-40
36	403	416	7	-31
37	416	434	5	-20
38	434	479	2	-4
39	479	494	-8	46
40	494	504	-10	56
41	504	514	-11	62
42	514	522	-11	61
43	522	530	-11	61
44	530	538	-11	61
45	538	546	-11	61
46	546	554	-11	60
47	554	559	-11	61
48	559	571	-10	56
49	571	581	-9	52
50	581	591	-9	54
51	591	606	-8	50
52	606	621	-8	50
53	621	634	-9	52
54	634	642	-11	62
55	642	650	-13	73
56	650	657	-14	78
57	657	664	-15	84
58	664	671	-14	77
59	671	679	-12	63
60	679	687	-11	56
61	687	699	-10	48
62	699	714	-7	26
63	714	734	-4	0
64	734	764	-3	0



Lampiran 5

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama : Purwowibowo, MT
NIP : 320005496
Jabatan : Kepala Laboratorium Fotometri, Bidang Metrologi
Kantor : Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi,
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. (Puslit KIM-LIPI)
Alamat kantor : Komplek Puspiptek Serpong Tangerang 15314
Email : purwowibowo@kim.lipi.go.id

I. Pendidikan:

1. S2 Jurusan Mesin, Fakultas Teknik. Universitas Indonesia. Jakarta. 2001
2. S1 Jurusan Mesin, Institut Sain dan Teknologi Nasional. Jakarta. 1994

II. Penelitian

1. Pulse Wave Velocity Measurement System, Dep. Biomedical. Zhejiang University China 2008-2007.
2. Pengembangan Instrumentasi Diagnostik Electroencephalgram, Riset Kompetitif. LIPI, 2006.
3. Implementasi Kompensasi Quasistatik Error pada Positioning System, In House Research (IHR) Puslit KIM LIPI, 2005.
4. Sinergi Rekayasa dan Teknologi dalam Perbaikan ALUTSISTA, Riset Kompetitif LIPI, 2005-2004.
5. Desain Sistem Fototerapi UV-B, IHR Puslit KIM LIPI, 2002-2003.
6. Kalibrator Meter Air Portabel, IHR Puslit KIM LIPI. 2002.

III. Makalah

1. Purwowibowo, Sardy S, Wahidin Wahab, *Fitting of Linear Transducer Characteristic using Genetic Algorithm and Segmented by Golden Ratio*, Proceeding The 2nd International Conference On Optics and Laser Applications, Yogyakarta, 2007.
2. Purwowibowo, Sardy S, *Searching of Error Compensation Coefficient with Genetic Algorithm by Selection and Crossover Variation*. Proceedings 3rd International Symposium on Metrology & Physics Application and Energy Measurement, Research Center for CIM. Indonesian Institute of Sciences, Jakarta 2006.

3. Purwowibowo, *Meningkatkan Akurasi Turbin Flow Meter Dengan K-Faktor Dinamis*, Pertemuan dan Presentasi Ilmiah, Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi (PPI-KIM LIPI), 2005.
4. Purwowibowo, Wahidin Wahab, *Design of Electronic System for Increasing Linear Transducer Accuracy*, Quality in Research, University of Indonesia, 2004
5. Purwowibowo, *Desain Sistem Kendali Menggunakan Generic Array Logic: Studi Kasus pada Water Vending Machine*, Pertemuan dan Presentasi Ilmiah, Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi (PPI-KIM LIPI), 2004.
6. Purwowibowo, *Akusisi Data Tegangan Analog Menggunakan Excel Melalui Microconverter AduC 802*, Seminar Nasional Iptek Dirgantara VIII LAPAN, 2004.
7. Purwowibowo, *Pengamatan Kerusakan Komponen Mekanis Melalui Identifikasi Jenis dan Jumlah Partikel pada Minyak Hidrolik*, Seminar Nasional Iptek Dirgantara VIII LAPAN, 2004.
8. Purwowibowo, Rahmat Machrom, *Desain Remote Terminal Unit Menggunakan Mikrokontroler SAB 80C517A*, Seminar Nasional Iptek Dirgantara VIII LAPAN, 2004.
9. Purwowibowo, Wahidin Wahab, *Kompensator Termoelastik Pada Pencacah Digital*, QIR FT UI, 2003.
10. Purwowibowo, Rahmat Machrom, *Sistem Pemantauan Air Sungai Secara Kontinyu*, Seminar Nasional Sistem Monitoring Lingkungan Sungai dan Pengolahannya, P2Kimia LIPI, 2003.
11. Purwowibowo, *Sistem Fototerapi Past Sun B*, Pertemuan dan Presentasi Ilmiah, Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi, PPI-KIM LIPI, 2003.
12. Purwowibowo, *Instrumen Monitor Posisi Pahat Mesin Bubut*, Pertemuan dan Presentasi Ilmiah, Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi (PPI-KIM LIPI), 1997.
13. Purwowibowo, Mauludin Hidayat, Yiyi Komar Kersanjaya *Penerapan Polinomial Pada Alat Monitor Posisi Sumbu Mesin Perkakas*. Pertemuan dan Presentasi Ilmiah, Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi, PPI-KIM LIPI, 1996.

IV. Paten

1. No.P00200400540. Kalibrator Meter Air. Tahun 2004.
2. No.P00200200743. Alat Fototerapi Sinar UV-B. Tahun 2002