



**UNIVERSITAS INDONESIA**

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

**RINGKASAN DISERTASI**

Untuk memperoleh gelar Doktor dalam bidang  
Ilmu Teknik yang dipertahankan di hadapan Sidang Terbuka  
Senat Akademi Universitas Indonesia  
dibawah Pimpinan Rektor Universitas Indonesia  
Prof. Dr. der. Soz. Gumilar Rusliwa Somantri  
Pada hari Jumat, tanggal 18 Juli 2008, pukul 09.00 WIB

**PURWOWIBOWO**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
PROGRAM PASCASARJANA BIDANG ILMU TEKNIK  
UNIVERSITAS INDONESIA  
2008**

## Abstrak

Pada penelitian ini dilakukan suatu rancangan metode perbaikan akurasi pada sebuah *linear transducer* menggunakan *software*, memanfaatkan data kalibrasi yang diproses oleh *genetic algorithm* (GA). Untuk peningkatan akurasinya dilakukan pendekatan *monomial* di sepanjang *linear transducer* pada segmen-segmen kecil dengan suatu algoritma khusus dengan GA. *Selection operator* yang digunakan adalah *stochastic universal sampling*, dan *crossover operator* adalah *multi point*, yang ternyata menghasilkan nilai *sum of squares error* (SSE) terbaik, sekitar 68.6% dari SSE rata rata. Pada penerapan elitisasi *chromosome* diperoleh bahwa dengan 10% *elite chromosome* dihasilkan nilai *root mean squared* (RMS) lebih baik yaitu sekitar 38.9 % dari RMS rata rata.

Peningkatan kinerja GA dilakukan dengan segmentasi menggunakan nilai *golden ratio* (GR) yang ternyata mempunyai *performance* lebih tinggi bila dibandingkan dengan *hierarchical segmentation method*. Nilai RMS menjadi sekitar 49.0% dan jumlah segmen sekitar 85.9%. Selanjutnya dilakukan simulasi, tujuannya adalah untuk meyakinkan bahwa algoritma yang dikembangkan telah berjalan sesuai dengan tujuan penelitian. 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%.



**Promotor :**

**Prof. Dr. Ir. Sardy S. M.Eng.Sc**

**Guru Besar Tetap**

**Fakultas Teknik Universitas Indonesia**

**Ko-promotor :**

**Dr. Ir. Wahidin Wahab, M.Sc**

**Staf Pengajar Tetap**

**Fakultas Teknik Universitas Indonesia**

**Panitia Penguji :**

- 1. Prof. Dr. Ir. Sardy S. M.Eng.Sc**
- 2. Prof. Dr. Ir. Bagio Budiardjo M.Sc**
- 3. Prof. Dr. Ir. Dadang Gunawan, M.Eng**
- 4. Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer**
- 5. Dr. Ir. Wahidin Wahab, M.Sc**
- 6. Dr. Ir. Muhamad Asvial, M.Eng**
- 7. Dr. Ir. Ade Djamal**

## DAFTAR ISI

Pendahuluan .....	1
Linear Transducer .....	3
Genetic Algorithm dan Golden Ratio .....	4
Perancangan .....	5
Simulasi, Kalibrasi dan Analisa .....	6
Kesimpulan .....	9
Daftar Acuan .....	11
Ucapan Terimakasih .....	14
Riwayat Hidup .....	16

## Pendahuluan

Akurasi adalah nilai yang menyatakan tingkat kebenaran hasil pengukuran sesuai dengan standard. Pada alat atau mesin untuk mengetahui akurasi posisi diperlukan kalibrasi. Namun sering ditemukan, setelah dilakukan kalibrasi, akurasi nilai posisi sudah keluar dari batas toleransi yang diijinkan, sehingga tidak layak digunakan lagi. Nilai tersebut telah menyimpang dari nilai referensi. Dimana nilai tampilan ini merupakan validasi dari target posisi. Apabila tampilan memberikan nilai salah maka secara keseluruhan kerja menjadi keliru. Untuk itu diperlukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi agar alat atau mesin layak digunakan kembali.

Berdasarkan studi pustaka dan menggabungkan beberapa ide dari hasil penelitian yang telah dihasilkan oleh para peneliti sebelumnya, maka penelitian difokuskan pada menemukan metode peningkatan akurasi, khususnya untuk *linear transducer* dengan memanfaatkan data kalibrasi dan koreksi dilakukan dengan menyisipkannya *error compensator* antara *transducer* dan *display* posisi atau kontroler.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan metode peningkatan akurasi pada *linear transducer* yang dipasang 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*. Selanjutnya untuk mendapatkan akurasi lebih tinggi maka dilakukan segmentasi dengan menggunakan nilai *golden ratio*. Adapun tujuan menggunakan bilangan *integer* adalah untuk memudahkan implementasi metode meningkatkan akurasi *linear transducer* pada *microcontroller* yang bertindak sebagai kompensator.

Langkah penelitian adalah membangun *genetic algorithm* yang dapat menghasilkan parameter kompensasi dan dilakukan modifikasi konfigurasi GA 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.

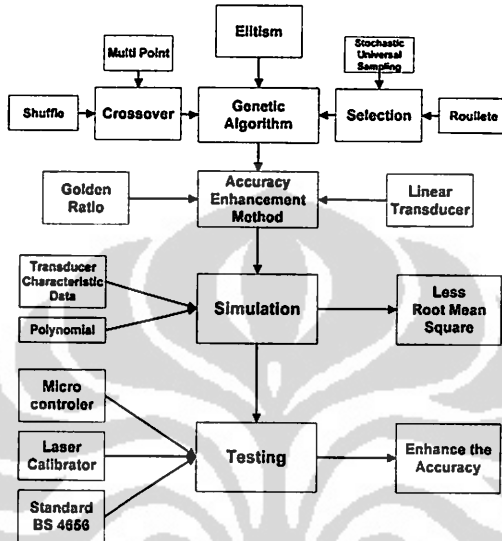
Selanjutnya untuk menghasilkan peningkatan akurasi yang lebih baik dilakukan segmentasi, karena dengan satu segmen yang digunakan untuk sepanjang *linier transducer* hasilnya kurang akurat. Segmentasi adalah membagi daerah yang akan dioptimasi sepanjang *linear transducer* menjadi beberapa bagian. Pembagian 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. Adapun struktur kegiatan penelitian ini dapat dilihat pada gambar 1.

Pada kegiatan ini diperoleh beberapa kontribusi penelelitian antara lain: 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 *offsping* 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.

Kontribusi kedua adalah penerapan *golden ratio* untuk penentuan batas antara segmen *monomial*. Segmentasi dilakukan untuk mendapatkan akurasi lebih tinggi pada *linear transducer* dengan tetap menggunakan bilangan *integer* sebagai parameter kompensasinya. Segmentasi mengacu pada *reference mark* yang

terdapat pada *liner transducer*. Segmentasi dengan *golden ratio* memberikan rentang batas segmen yang bervariasi sesuai dengan kontur karakteristik *transducer* dan menjaga akurasi dalam toleransi yang diinginkan.



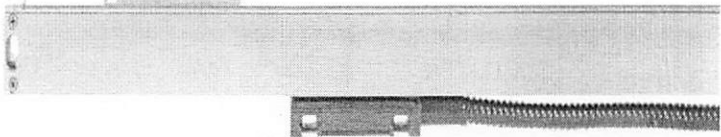
Gambar 1. Struktur Kegiatan Penelitian

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 gabungan *genetic algorithm* dan *golden ratio*.

### Linear Transducer

*Linear transducer* seperti terlihat pada gambar 2 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* berupa kesalahan geometris dan termal. Besarnya kesalahan tersebut sekitar 40% - 70% dari kesalahan total. Karena pengaruh kedua faktor ini menjadi karakteristik *linear transducer* menjadi unik berbeda-beda satu dan lainnya.



Gambar 2. Linear Transducer

Untuk mengetahui karakteristik *linear transducer* dapat dilakukan kalibrasi menggunakan *laser interferometer calibrator* sebagai acuan.

### Genetic Algorithm dan Golden Ratio

*Genetic algorithm* merupakan *stochastic global search method* yang cara kerjanya mengikuti cara 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 rangking *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



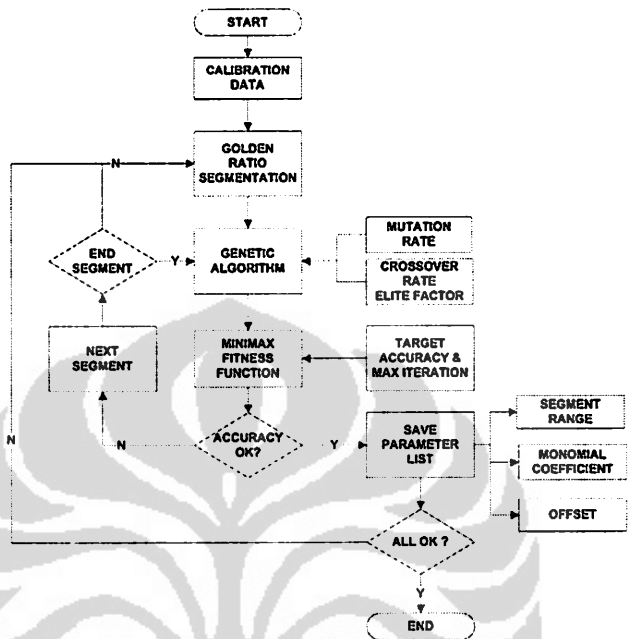
oval telur, ukuran ruas daun, panjang tulang binatang herbivora. Juga pada perbandingan ukuran fisik manusia. *Golden ratio* terdapat pula pada proposi *minor* dan *major groove* pada rantai DNA. Pada penelitian ini *golden ratio* akan digunakan untuk segmentasi sebuah karakteristik *linear transducer* bersama sama dengan *genetic algoritihm* guna meningkatkan akurasi. Dengan mengadopsi fenomena *golden ratio* diharapkan dapat menghasilkan perbandingan segmen yang terbaik dengan jumlah segmen yang lebih sedikit. *Golden ratio* dapat ditulis dalam bilangan Fibonacci dimana setelah 13/8 nilainya relatif konstan seperti diperlihatkan pada persamaan dibawah ini.

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

$$\Phi \approx 1.618033.....$$

### Perancangan

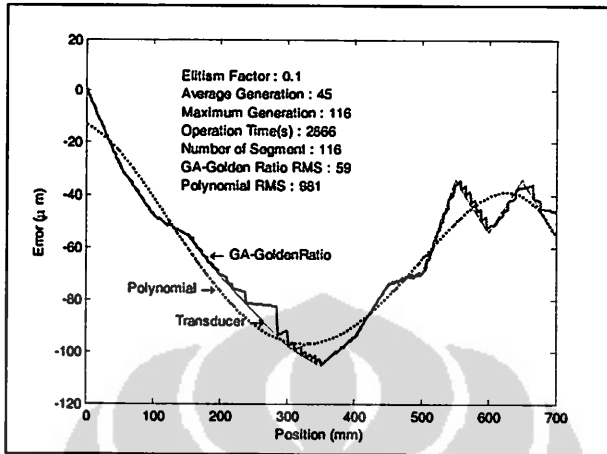
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menemukan metode untuk meningkatkan akurasi *linier transducer* dengan cara melakukan koreksi posisi sepanjang *linier transducer* sesuai dengan karakteristik masing-masing dari data kalibrasi. Dengan data tersebut dapat ketahui tingkat akurasi *linear transducer* yang telah dipasang pada *mechanical positioning system*. Dalam melakukan perbaikan akurasi maka dilakukan *tracking* terhadap karakteristik *transducer*, untuk itu diperlukan parameter kompensasi. Gambar 3 memperlihatkan algoritma mencari parameter tersebut. 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 *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 paling optimal. Selain itu dengan *monomial* hanya diperlukan dua set *genome* atau individu sehingga akan menyederhanakan struktur *chromosome* dan akan mempercepat proses kerja *genetic algorithm* secara keseluruhan.



Gambar 3. Algoritma Pencarian Parameter Kompensasi

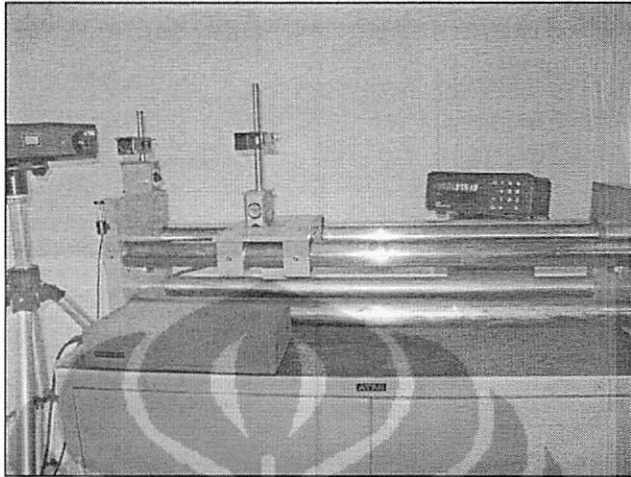
### Simulasi, Kalibrasi dan Analisa

Simulasi digunakan untuk mengetahui kinerja dari genetic algorithm – *golden ratio* (GA-GR) dalam peningkatan akurasi *linear transducer* sebelum digunakan secara langsung pada *mechanical positionng system*. Tujuan utamanya adalah untuk validasi algoritma yang sedang dibangun, apakah sudah bekerja sesuai tujuan penelitian. Dalam kegiatan simulasi diperlukan kurva karakteristik *linear transducer* sebagai sasaran untuk *tracking* oleh GA-GR. Disini digunakan data hasil kalibrasi dari beberapa alat. Dalam simulasi perlu dilakukan penilaian dari hasil GA-GR. Tolak ukurnya adalah seberapa mirip hasil GA-GR dengan kurva karakteristik *transducer* dan dalam hal ini digunakan nilai RMS. Semakin kecil nilai RMS maka hasil simulasi semakin mirip dengan kurva karakteristik *transducer*. Gambar 4 memperlihatkan salah satu hasil simulasi.



**Gambar 4. Simulasi**

Untuk mengetahui hasil nyata dalam pemakaian dari teknik peningkatan akurasi yang telah disimulasikan sebelumnya maka perlu dilakukan kalibrasi langsung pada *linear transducer*. Dimana *linear transducer* tersebut dipasang pada sebuah *mechanical positioning system* seperti terlihat pada gambar 5. 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 interferometer calibrator*. Dalam penelitian ini, kalibrator yang digunakan adalah merk Renishaw tipe ML 10 mempunyai akurasi 0.1% dan resolusi 0.1 mikrometer.



Gambar 5. Proses Kalibrasi

Untuk mengetahui hasil nyata dari metode peningkatan akurasi yang diusulkan maka dilakukan kalibrasi pada *linear transducer*. Dengan membandingkan hasilnya dengan standard sebelum dan sesudah dilakukan kompensasi maka dapat diketahui hasil peningkatan akurasinya. Pada mulanya akurasinya adalah 53.88 mikrometer dan setelah dilakukan perbaikan, akurasinya meningkat menjadi 29.60 mikrometer. Dari kalibrasi ini diperoleh peningkatan akurasi sebesar 45.1 %. Data lain yang diperoleh adalah kepresisian dari liner *transducer* sebelumnya adalah 27.14 mikrometer menjadi 27.09 mikrometer, terjadi sedikit peningkatan kepresisian. Kemudian perbaikan dari simpangan rata rata yang dari 22.14 mikrometer menjadi 10.57 mikrometer atau sebesar 52.3 %. Lihat pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil Peningkatan Akurasi

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

Dari tabel 1 terlihat bahwa metode peningkatan akurasi yang diteliti telah menunjukkan hasil, dimana akurasi meningkat sekitar 45.1%.

## 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:

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 menghasilkan nilai RMS lebih rendah 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 menggunakan nilai tersebut dapat diperoleh kualitas parameter dalam bilangan *integer* yang digunakan pada peningkatan akurasi. Untuk mengukur efektifitasnya maka metode segmentasi GR dibandingkan dengan metode segmentasi hirarki kuadrat. Hasilnya diperoleh bahwa metode segmentasi GR menghasilkan nilai RMS yang lebih rendah yaitu sekitar 49.0% dibandingkan hirarki kuadrat. Selain itu GR menghasilkan jumlah segmen juga lebih sedikit 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 ini diharapkan proses simulasi dapat gambaran yang mendekati kondisi nyata. Dalam simulasi *tracking* kurva ini, metode GA-GR yang dibandingkan dengan metode polinomial. Hasilnya nilai RMS dari metode GA-GR adalah sekitar 50 kali sampai dengan 900 kali lebih baik dari metode polinomial, tergantung dari karakteristik data *transducer* dan kemampuan GA-GR untuk menghasilkan parameter kompensasi terbaik.

5. Selanjutnya untuk mengetahui secara langsung hasil kinerja metode GA-GR maka parameter kompensasi diprogramkan ke dalam *microcontroller* dan digunakan untuk meningkatkan akurasi sebuah *digital readout*. Hasilnya metode peningkatan akurasi *genetic algorithm – golden ratio* (GA-GR) dapat meningkatkan akurasi sampai 45.1 %

#### Penelitian Lanjut

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

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.

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.

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 *thermocouple, 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,  *$L_\infty$  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 I: 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](http://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 Riview, 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*, Journal 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](http://www.site.uottawa.ca/~sloyka/papers/Telsik_99_genetic.pdf), 27 July 2005.
  - [45] *Rasto 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/sodasrace/SodaCartoon/morenp.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.Noedal 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  $\delta$  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](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 Detry and Florent de Dinechin, *Table-based Polynomial for Fast Hardware Function Evaluation*, Research Report No.RR2004-52, Laboratoire de l'Informatique du Parallelisme, EcoleNormale Superieurede Lyon, France, 2004
- [65] *Curve Fitting Toolbox*, [http://eng.snu.ac.kr/~ch\\_fit9.html](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.

## **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. Bapak Prof. Dr. Ir. Sardy S. M.Eng.Sc, selaku Promotor Doktor yang telah memberikan banyak waktunya, petunjuk dan pengarahan serta saran baik selama melakukan penelitian maupun saat penulisan disertasi.
2. Bapak Dr. Ir. Wahidin Wahab M.Sc, selaku Ko Promotor yang telah membimbing, mengkoreksi dan memberikan masukan dalam penelitian dan penulisan disertasi.
3. Bapak Prof. Dr. der Soz. Gumilar Rusliwa Somantri, Rektor Universitas Indonesia.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto, M.Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik. Universitas Indonesia.
5. Bapak Dr. Ir. Muhamad Asvial, M.Eng. selaku Ketua Departemen Elektro. Fakultas Teknik. Universitas Indonesia dan selaku tim penguji yang telah memberi masukan pada disertasi dan bantuan dalam bidang akademik.
6. Bapak Prof. Dr. Ir. Eko Tjipto Raharjo, selaku mantan Ketua Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia yang telah memberikan semangat dan dukungan dalam penyelesaian studi S3 ini.
7. Bapak Prof. Dr. Ir. Bagio Budiardjo M.Sc, selaku tim penguji yang telah memberikan masukan dan saran positif dalam penulisan disertasi.
8. Bapak Prof. Dr. Ir. Dadang Gunawan, M.Eng, selaku tim penguji yang telah memberikan saran kongkrit dan fokus pada isi penulisan disertasi.
9. Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer, selaku tim penguji atas diskusi dan saran untuk langkah selanjutnya setelah penelitian selesai.
10. Bapak. Dr. Ir. Ade Djamal, selaku tim penguji dari Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), yang telah memberikan masukan dan ide selama penelitian dan penulisan disertasi.
11. Bapak Prof. Sunartoto Gunadi M.Eng, selaku mantan Deputi Bidang Sarana Ilmiah. Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang telah memberikan ijin studi.
12. Bapak Dr. Ir. Husien A. Akil, M.Sc, selaku Kepala Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi LIPI atas kesempatan yang diberikan seluas-luasnya kepada saya untuk menyelesaikan studi ini.

13. Bapak Drs A. Harimawan, M.Sc selaku Kepala Bidang Instrumentasi, Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi LIPI atas kesempatan dan pengertiannya yang diberikan kepada saya saat menjalani studi.
14. Bapak Dr. Ir. Ering Purnomo, M.Sc selaku Kepala Bidang Metrologi, Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi LIPI atas kesempatan dan ijinnya kepada saya untuk menuntaskan studi S3.
15. Ibu Dra.Yuliani, MA yang memberikan semangat, support dan usaha financial selama menempuh studi S3. Kepada Bapak Ir. Santoso Sugondo, M.Sc yang memberikan koreksi pada makalah dan juga kepada Bapak Drs. Rachmat Mahcrom. M.Sc, yang telah memberikan kesempatan kuliah S3 selama beliau menjabat sebagai kepala Bidang di KIM LIPI.
16. Ibu Dr.Ir. Suhartati Agoes, MT. rekan kuliah, yang telah memberi dukungan masukan dan bantuan selama saya penelitian dan ketika menulis disertasi.
17. Seluruh rekan-rekan kerja di Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi LIPI atas bantuan dan kerjasamanya selama penelitian dan ketika menjalani studi.
18. Khusus saya sampaikan terimakasih yang tak terhingga kepada Ibu dan Bapak Amino tercinta yang telah membesarkan, mendidik dan mengajarkan saya hingga saya bisa mencapai pendidikan ini. Begitu pula kepada adik-adik tercinta Sri Rahayu, Supriyatno dan Supriyati serta seluruh keluarga yang telah membantu saya menyelesaikan sekolah ini.
19. Ucapan terimakasih dan sayang saya sampaikan kepada istri tercinta, anak-anak saya Ayu, Vina dan Vita yang memberikan inspirasi untuk tetap maju terus dan juga atas pengertiannya selama menempuh sekolah S3 yang sering mengurangi perhatian dan waktu bersama-sama.
20. Ucapan 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.

Akhirnya, saya ingin mengucapkan terimakasih kepada rekan saya pak Freddy, pak Ryan, pak Hendry dan pak Ali atas dukungannya. Kemudian kepada seluruh pihak yang telah membantu dan berjasa selama menjalani program S3 yang tidak mungkin disebutkan satu per satu. Semoga Tuhan memberikan berkah, karunia dan petunjuk terbaik untuk kita semua. Amin.

Depok, 18 Juli 2008

Purwowibowo

## Riwayat Hidup

- Nama** : Purwowibowo
- Tempat & Tanggal Lahir** : Kebumen, 05-02-1961
- Nama Istri** : Yuni Prihantingsih
- Nama Anak** : Asrini Ayu Wibowo  
Lestari Elvina Wibowo  
Happy Novita Wibowo
- 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
- Alamat Rumah** : Komplek Puspiptek Blok I-D/19  
Serpong Tangerang 15314
- Pendidikan**
- 1994 : Sarjana Teknik Mesin  
Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknik, Institut Sains dan Teknologi.
- 2001 : Magister Teknik Mesin  
Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknik, Universitas Indonesia,
- Riwayat Pekerjaan**
- 1985 - sekarang : Pegawai pada Pusat Penelitian Kalibrasi,  
Instrumentasi dan Metrologi.  
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.  
(P2 KIM-LIPI)
- Publikasi**
- Purwowibowo, Sardy S, Wahidin Wahab, *Desain Digital Readout Menggunakan Mikrokontroler untuk Mengukur Gerak Linier*, Instrumentasi Vol. 32 No.2, Juli – Desember 2008.
  - 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.
  - Purwowibowo, Sardy S, Wahidin Wahab, *Fitting of Linear Transducer Characteristic using Genetic Algorithm and Segmented by Golden Ratio*,

Proceeding The 2<sup>nd</sup> International Conference On Optics and Laser Applications, Yogyakarta, 2007.

- Purwowibowo, Sardy S, *Searching of Error Compensation Coefficient with Genetic Algorithm by Selection and Crossover Variation*. Proceedings 3<sup>rd</sup> International Symposium on Metrology & Physics Application and Energy Measurement, Research Center for CIM. Indonesian Institute of Sciences, Jakarta, 2006.
- Purwowibowo, Wahidin Wahab, *Design of Electronic System for Increasing Linear Transducer Accuracy*, Quality in Research, University of Indonesia, Depok, 2004.
- Purwowibowo, Wahidin Wahab, *Kompensator Termoelastik Pada Pencacuh Digital*, Quality in Research Faculty of Engineering (QIR FT) UI, Depok, 2003.

