

ISSN 1410 - 6841



POROS

Jurnal Ilmiah Teknik Mesin

Volume 6 Nomor 4, Oktober 2003

Terakreditasi No. 395/DIKTI/Kep/2000



**Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Tarumanagara**



POROS

Jurnal Ilmiah Teknik Mesin

Volume 6 Nomor 4, Oktober 2003

TERAKREDITASI

No. 395/DIKTI/Kep/2000

DEWAN REDAKSI

- Pelindung** : Dekan Fakultas Teknik
- Ketua** : Ir. Sofyan Djamil, M.Si.
- Penyunting Ahli** : DR. Ir. Erry Y. T. Adesta, C.Eng, MIMech E, IPM
DR. Ir. Eddy S. Siradj, M.Sc. Eng.
DR. Ir. Danardono A.S.
DR. Ir. I Made Kartika D., Dipl. Ing.
Ir. Lamto Widodo, M.T.
- Penyunting Pelaksana** : Agustinus Purna Irawan, S.T., M.T.
Delvis Agusman, S.T., M. Sc.
Harto Tanujaya, S.T., M.T.
I Wayan Sukania, S.T., M.T.
- Sekretariat** : Endro Wahyono
- Penerbit** : Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Tarumanagara
- Alamat Redaksi** : Jalan Let. Jend. S. Parman No. 1, Jakarta 11440
Telp. (021) 5638358 – 5663124 – 5672548, Fax. (021) 5663277
E-mail : ftmesin@cbn.net.id atau mesin@tarumanagara.ac.id

Jurnal Ilmiah Poros terbit sejak bulan Januari 1998 dengan frekuensi 4 (empat) kali dalam setahun (Januari, April, Juli dan Oktober) ini, diharapkan dapat menjadi salah satu sarana para profesional (dari dunia usaha, pendidikan dan peneliti) untuk mengembangkan profesi dan berpartisipasi serta menyebarkan perkembangan tentang iptek mesin melalui penelitian dan kajian teknologi dan science.



POROS

Jurnal Ilmiah Teknik Mesin

Volume 6 Nomor 4, Oktober 2003

TERAKREDITASI

No. 395/DIKTI/Kep/2000

DAFTAR ISI

Hasil Penelitian

- 227 – 234 Pembuatan biodiesel dari minyak jelantah dan pengujian terhadap prestasi kerja mesin diesel
I Gusti Bagus Wijaya Kusuma
- 235 – 248 Menentukan nilai faktor kompresibilitas $Z(\rho, T)$ gas helium dan karbondioksida pada berbagai suhu sampai 100°C dan tekanan sampai 15Mpa berdasarkan data eksperimental : “*Burnett-Apparatus*”
I Made Kartika Dhiputra
- 249 – 259 Analisis ketelitian pemosisian *machining center* dengan sistem pengukuran ketelitian mesin perkakas berbasis laser interferometer
Y. Burhanuddin
- 260 – 276 Perubahan struktur mikro batangan kuningan C37700 hasil perlakuan panas dan pengaruhnya terhadap sifat mampu mesin dari valve hasil tempa panas
Arni Yusnita, Myrna Ariati dan Eddy S. Siradj
- 277 – 291 Studi implikasi metoda interaksi “*Voice of Customer*” pada penyusunan konfigurasi (*layout*) ruang pameran bengkel kecil di Kodya Bandar Lampung
Ahmad Taufik

Kajian Teknologi dan Science

- 292 – 307 Analisis pengaruh parameter dinamik terhadap kestabilan arah kendaraan
Mulyadi Bur dan Lovely Son

ANALISIS KETELITIAN PEMOSISIAN *MACHINING CENTER* DENGAN SISTEM PENGUKURAN KETELITIAN MESIN PERKAKAS BERBASIS LASER INTERFEROMETER

Y. Burhanuddin^{*)}

ABSTRACT

Computer in NC machine tools has taken over human operator in a machining process. This has minimized human intervention in an NC machine tool operation. Hence, product quality depends heavily on quality and performance of those NC machine tools. In order to measure its performance, a precision test needed to be conducted. Precision test on an NC machine tool must refer to available standard such as ISO, DIN, JIS and NTMBA. ISO R230 has issued 2 types of measures, they are geometric accuracy and positioning accuracy. Positioning accuracy was conducted on Low Cost High Quality (LCHQ) machining center made by PT. PINDAD. Positioning accuracy test investigates the relationship between geometric accuracy of such component with positioning accuracy of an NC machine tool.

Keywords : ISO Standard, geometric accuracy, positioning accuracy, laser interferometer

PENDAHULUAN

Pada mesin perkakas CNC peran manusia dalam mengendalikan gerakan pahat dan meja menjadi minimal, sehingga kualitas produk yang dihasilkan bergantung kepada kualitas dan keandalan mesin perkakas NC. Mesin perkakas dikatakan berkualitas apabila memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan atau laik pakai. Untuk mengetahui mesin perkakas memenuhi persyaratan atau masih layak, perlu dilakukan pengujian ketelitian mesin perkakas (*machine tool accuracy test*). Pengujian ketelitian mesin perkakas mengacu kepada standard yang ada saat ini antara lain JIS, DIN, *National Machine Tool Builder Association* (NMTBA) atau ISO. Menurut ISO R-230 ada dua hal yang harus dikerjakan dalam pengujian ketelitian mesin NC yaitu ketelitian geometrik (*geometric accuracy*) dan ketelitian pemosisian (*positioning accuracy*).

Dari pengujian tersebut dapat diketahui mesin perkakas tersebut masih di dalam toleransi atau sudah keluar dari toleransi yang diijinkan. Bagi mesin yang sudah keluar toleransi perlu dilakukan perbaikan. Agar tindakan perbaikan tersebut efektif dan efisien, perlu dianalisis keterkaitan komponen-komponen mesin perkakas terhadap kesalahan mesin perkakas (*machine tool error*). Maka diperlukan teknologi yang mampu mendiagnosis sumber-sumber terjadinya kesalahan tersebut.

Beberapa penelitian telah dilakukan dengan menggunakan *Homogen Transformation Matrix* (HTM) untuk mengidentifikasi dan menganalisis sumber-sumber kesalahan pemosisian mesin NC [8,10]. Disamping itu telah dikembangkan perangkat lunak Sistem Pengukuran Laser Terpadu Berbasis Laser Interferometer^[13,19]. Penelitian yang lain dilakukan dengan metoda HTM pada

^{*)} Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung

prototipe mesin *Low Cost High Quality Machining Center (LCHQ-MC)*. Penelitian dilanjutkan pada mesin LCHQ-MC yang lengkap dengan menerapkan kompensasi *pitch* pada sumbu X dan Y [4].

Penelitian ini bermaksud mengukur dan menganalisis ketelitian pemosisian ketiga sumbu mesin LCHQ-MC (sumbu X, Y dan Z). Hasil analisis ini dapat dipakai untuk mendiagnosis kesalahan pemosisian pada mesin perkakas CNC yang lain.

TINJAUAN PUSTAKA

Kualitas produk

Kualitas produk yang dihasilkan oleh proses pemesinan diketahui dari ketelitian dimensi, ketelitian bentuk dan kehalusan permukaan produk. Menurut Bagiasna^[6] kualitas produk tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor yaitu :

- Ketelitian geometrik mesin perkakas,
- Keadaan proses pemotongan,
- Temperatur lingkungan,
- Keadaan pahat,
- Pemasangan benda kerja pada pencekam,
- Gaya-gaya pemotongan.

Secara umum ketelitian geometrik mesin perkakas dipengaruhi oleh rancangan mesin perkakas, deformasi karena gaya pemotongan, ketelitian geometrik masing-masing komponen dan temperatur. Rancangan mesin perkakas mempengaruhi kefungsihan mesin, sedang kekakuan mempengaruhi defleksi yang terjadi pada mesin maupun benda kerja. Deformasi karena gaya pemotongan dapat menimbulkan getaran paksa dan kesalahan dinamik pada kontruksi mesin. Selain itu juga dapat menimbulkan gejala *stick-slip* pada gerakan pindah komponen^[6].

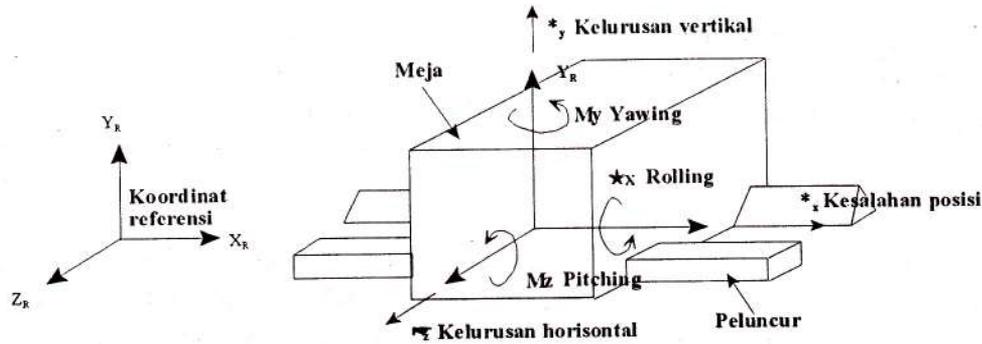
Ketelitian Perpindahan Mesin Perkakas

Mesin perkakas pada umumnya memiliki tiga sumbu gerak yang saling tegak lurus. Tiga sumbu ini membentuk sebuah sistem koordinat kartesian yang memungkinkan pahat diposisikan pada sembarang tempat sepanjang sumbu. Dalam keadaan ideal posisi ruang pahat dapat ditentukan dari posisi meja. Tetapi karena ketidak sempurnaan bentuk geometrik pembimbing maka meja akan menunjukkan kesalahan perpindahan. Sebagai akibatnya posisi pahat terhadap meja mengalami kesalahan.

Sebuah benda memiliki enam derajat kebebasan dari tiga sumbu gerak tersebut. Enam derajat kebebasan ini terdiri dari tiga translasi dan tiga rotasi seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Dengan demikian sebuah benda dapat memiliki enam sumber kesalahan yaitu :

- Satu kesalahan posisi dalam arah pindah.
- Dua kesalahan linier lintasan komponen berpindah (horisontal dan vertikal).
- Tiga kesalahan sudut komponen berpindah (*pitch*, *yaw* dan *roll*).

Ketelitian perpindahan merupakan salah satu aspek dari ketelitian geometrik mesin perkakas. Ketelitian perpindahan merupakan ketelitian perpindahan relatif antara posisi referensi dengan posisi elemen lain. Ketelitian perpindahan dapat diketahui dengan mengukur kelurusan, ketegaklurusan, kesejajaran dan gerak sudut mesin perkakas.



Gambar 1. Skematik tiga kesalahan translasi dan tiga kesalahan rotasi pada sebuah sistem meja-pembimbing^[18]

Hasil pengukuran ketelitian perpindahan dibandingkan dengan harga nominalnya (sesuai standard yang dipakai) akan diperoleh kesalahan perpindahan. Ada tiga bentuk kesalahan perpindahan yang umum^[9]:

- Sistematik : pada posisi dan keadaan tertentu selalu memiliki harga yang sama. Umumnya berbentuk sinusoidal atau periodik.
- Acak (*Random*) : pada posisi dan keadaan tertentu tidak memiliki harga yang sama. Hanya dapat dinyatakan secara statistik.
- Histerisis : bila suatu titik diukur dari dua arah yang berbeda, maka nilainya tidak sama.

Kesalahan sistematik dan histerisis dapat diperbaiki dengan memberikan kompensasi pada pengendali mesin. Contohnya adalah harga kesalahan *pitch* dan *backlash* suatu *ballscrew*, kesalahan sistem *linear-motion*. Sedang kesalahan acak tidak dapat dikompensasi.

Pengukuran Ketelitian Pemosisian Mesin Perkakas

Disamping ketelitian perpindahan, mesin perkakas CNC juga harus diuji ketelitian pemosisian elemen geraknya. Ketelitian pemosisian merupakan salah satu faktor penentu terhadap ketelitian total mesin perkakas NC. Ketelitian pemosisian didefinisikan sebagai besar perbedaan antara posisi yang diinginkan dengan posisi yang sebenarnya. Ketelitian pemosisian tergantung kepada beberapa faktor antara lain^[5]:

- Resolusi dan ketelitian sistem pengukuran linier,
- Deformasi elastis elemen penggerak,
- Gaya-gaya inersia ketika berhenti,
- Efek gesekan dan *stick-slip* pada pembimbing,
- Sistem kontrol pada mesin NC.

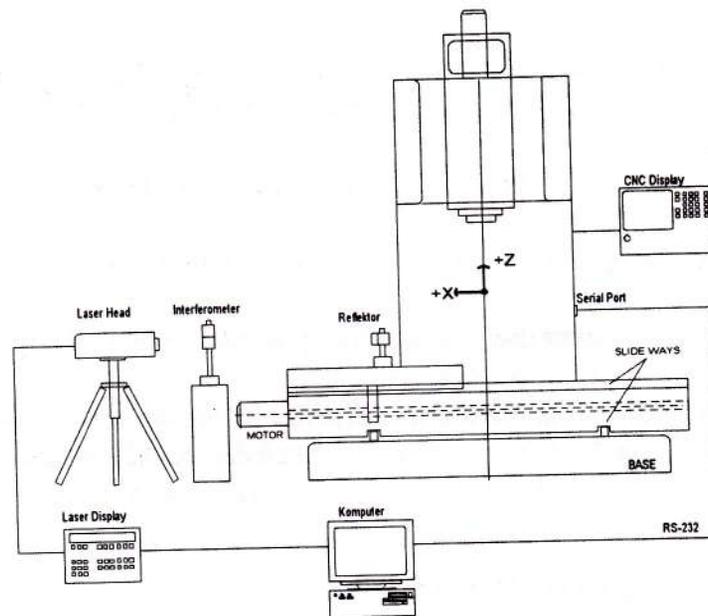
Perangkat Sistem Pengukuran Ketelitian Mesin Perkakas NC Berbasis Laser Interferometer

Gambar 2 menunjukkan ilustrasi skematik perangkat pengukuran ketelitian pemosisian mesin perkakas yang dipakai pada eksperimen ini. Susunan perangkat pengukuran tersebut sebagai

berikut :

1. Pembangkit Laser (Laser Head),
2. Penayang Laser (Laser Display),
3. Perangkat Optik yang terdiri dari *interferometer* dan *reflektor*,
4. Kabel RS-232 untuk transfer data dari mesin perkakas melalui serial port ke komputer.
5. Komputer

Dalam pengukuran ini komputer PC dilengkapi dengan *General Purpose Interface Bus Card* (*GPB card*) untuk mengakuisisi data dari Penayang Laser. Sebagai sarana dialog dengan pengguna dikembangkan perangkat lunak *LaserUV* ^[14] yang menggunakan bahasa Visual C++ v4. Dengan perangkat lunak ini pengguna dapat mengumpulkan, mengolah dan menyimpan data serta menampilkannya dalam bentuk grafik.



Gambar 2. Skematik susunan perangkat sistem pengukuran ketelitian mesin perkakas berbasis laser interferometer.

Metoda Pengukuran

Reflector bergerak (*moving reflector*) diletakkan pada meja atau spindel LCHQ-MC, sedangkan interferometer diletakkan pada kedudukan yang tetap. Meja/spindel bergerak sesuai program yang dimasukkan ke dalam CPU. Meja digerakkan satu arah (*unidirectional*) atau bolak-balik (*bidirectional*) dengan selang tertentu sepanjang sumbu yang diukur dan berhenti beberapa saat agar laser dapat mencatat nilai pada posisi tersebut. Kemudian nilai tersebut dicuplik oleh komputer. Nilai/besaran yang dicuplik pada pengukuran ketelitian pemosisian LCHQ-MC adalah :

- Kesalahan linier sumbu X, Y dan Z.
- Kesalahan sudut (angular) yaw dan pitch sumbu X, Y dan Z.
- Kelurusan gerak sumbu X, Y dan Z dalam arah horisontal dan vertikal
- Ketegaklurusan bidang XY, XZ dan YZ.

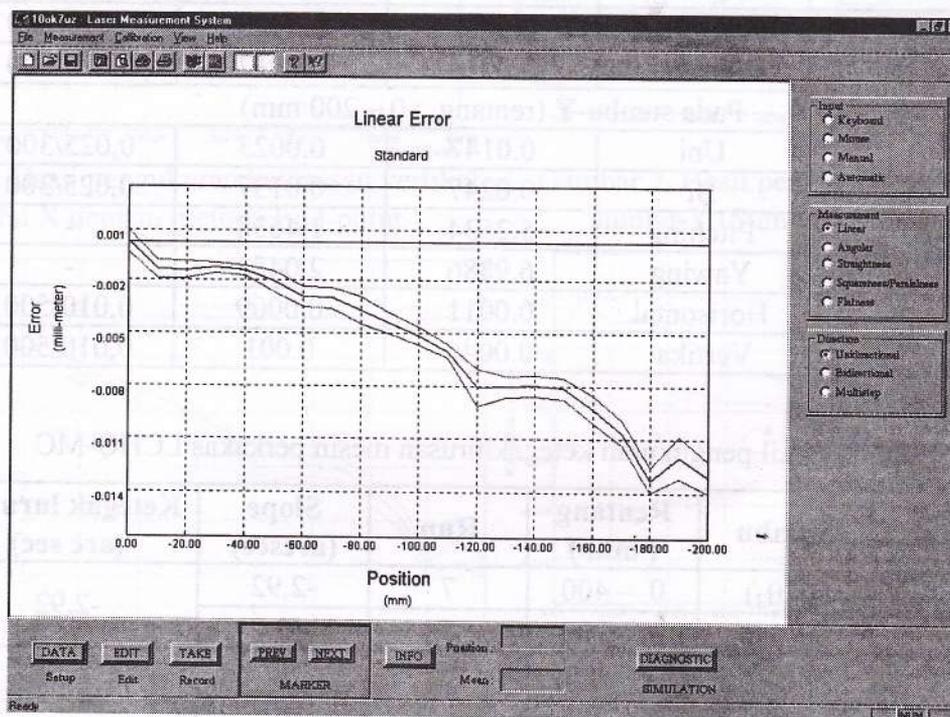
Setelah pengukuran selesai maka dilakukan analisis secara kualitatif faktor-faktor yang mempengaruhi ketelitian pemosisian.

Metode Pengolahan Data

Agar dapat ditampilkan secara grafik pada komputer maka data pengukuran harus diolah dengan menggunakan cara yang umum dipakai dalam statistika seperti harga rata-rata, jangkauan dan simpangan baku. Selanjutnya hasil pengolahan data tersebut ditampilkan secara grafik pada komputer. Pengolahan data dan penampilan hasilnya dilakukan oleh komputer. Dalam penelitian ini metoda representasi data bersumber dari tiga standar yaitu Standard, NMTBA dan VDI 3441.

Pengolahan Data Kelurusan Gerak

Pengolahan data kelurusan gerak bertujuan mencari kelurusan lintasan komponen yang bergerak. Ada dua cara mengolah data kelurusan yaitu cara *End-Point* dan *Least-Square*. Dalam cara *End-Point*, kelurusan lintasan diperoleh dengan cara menghubungkan titik awal dan titik akhir pengukuran. Sedangkan dalam cara *Least-Square*, kelurusan lintasan diperoleh dengan mencari garis yang mempunyai selisih kuadrat terkecil terhadap titik-titik pengukuran.



Gambar 3. Tampilan perangkat lunak pengukuran ketelitian pemosisian mesin perkakas berbasis laser interferometer

HASIL PENGUKURAN

Tabel 1. Hasil pengukuran ketelitian pemosisian

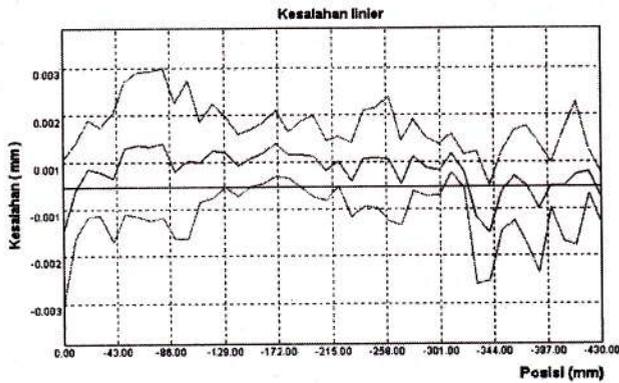
Pengukuran	Arah	Error-band (mm)	Non-repeat (mm)	JIS B6306 (mm/mm)
Pada sumbu-X (rentang : 0 – 430 mm)				
Linier[4]	Uni	0,0064	0,0043	0,025/300
	Bi	0,0213	0,0201	0,025/300
Angular[4]	Pitching	16,118	3,239	-
	Yawing	12,481	3,547	-
Kelurusan	Horisontal	0,0019	0,0005	0,010/500
	Vertikal	0,0028	0,001	0,010/500
Pada sumbu-Y (rentang : 0 – 250 mm)				
Linier[4]	Uni	0.0111	0.0069	0,025/300
	Bi	0.0366	0.0343	0,025/300
Angular[4]	Pitching	12.6258	6.4688	-
	Yawing	11.6964	2.8953	-
Kelurusan	Horisontal	0.0027	0.0005	0,010/500
	Vertikal	0.0016	0.0012	0,010/500
Pada sumbu-Y (rentang : 0 – 200 mm)				
Linier[4]	Uni	0.0147	0.0023	0,025/300
	Bi	0.0247	0.0137	0,025/300
Angular[4]	Pitching	5.2534	1.4638	-
	Yawing	6.9886	2.0452	-
Kelurusan	Horisontal	0.0011	0.0009	0,010/500
	Vertikal	0.0046	0.001	0,010/500

Tabel 2. Hasil pengukuran ketegaklurusan mesin perkakas LCHQ-MC

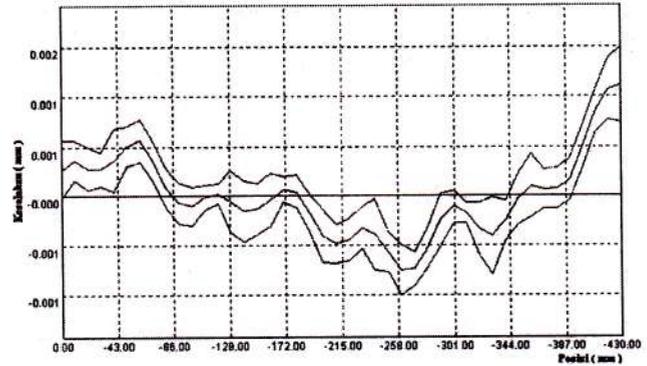
Bidang	Sumbu	Rentang (mm)	Run	Slope (arcsec)	Ketegak lurusan (arc sec)
XY	X(θ_2)	0 – 400	7	-2,92	-2,92
	Y(θ_1)	0 – 200	7	0	
XZ	X(θ_2)	0 – 400	6	0	0
	Z(θ_1)	0 – 200	6	0	
YZ	Y(θ_2)	0 – 200	6	0	0
	Z(θ_1)	0 – 200	6	0	

Keterangan:

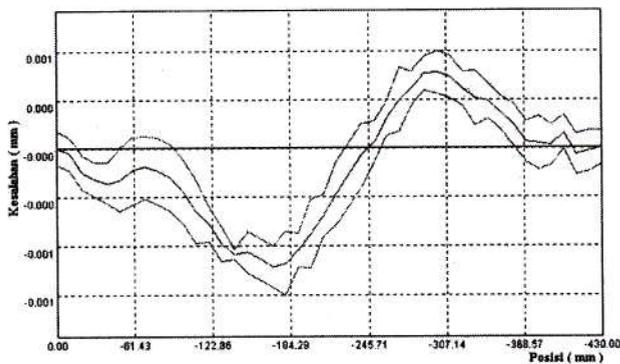
Seluruh hasil setelah diberi kompensasi



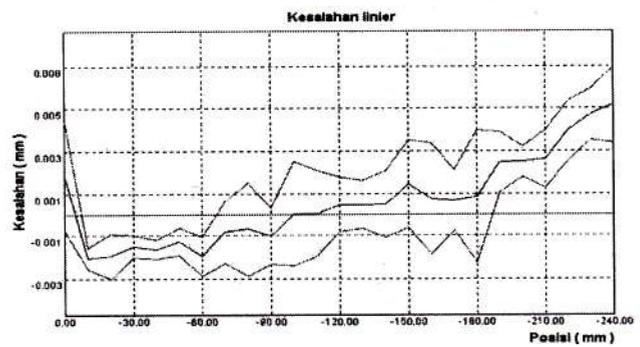
Gambar 4. Hasil pengukuran ketelitian linier sumbu-X (Sumber : Erman Amin, 4)



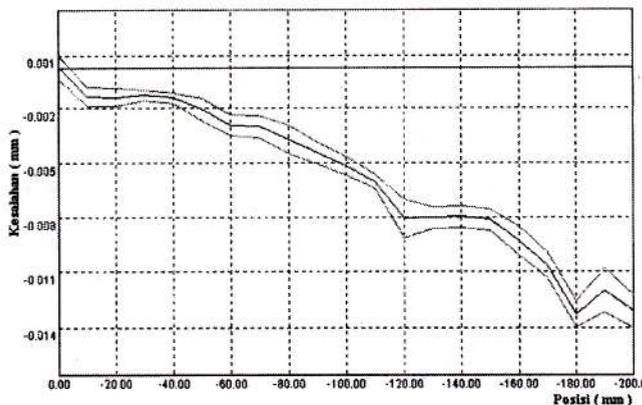
Gambar 5. Hasil pengukuran kelurusan horisontal sumbu-X dengan metoda Least-square



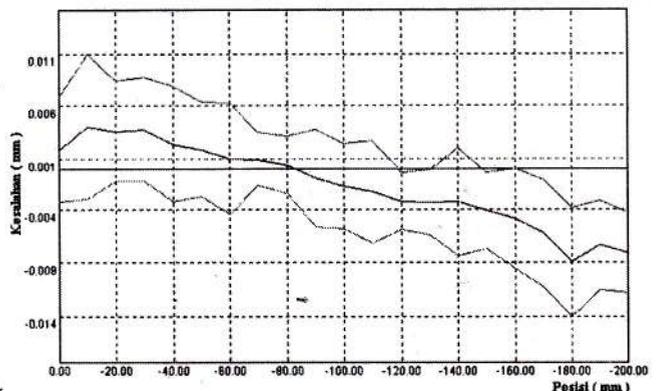
Gambar 6. Hasil pengukuran kelurusan vertikal sumbu X dengan metoda End-point



Gambar 7. Hasil pengukuran kesalahan linier sumbu-Y (Sumber : Erman Amin, 4)



Gambar 8. Hasil pengukuran ketelitian pemosisian linier satu arah sumbu Z.

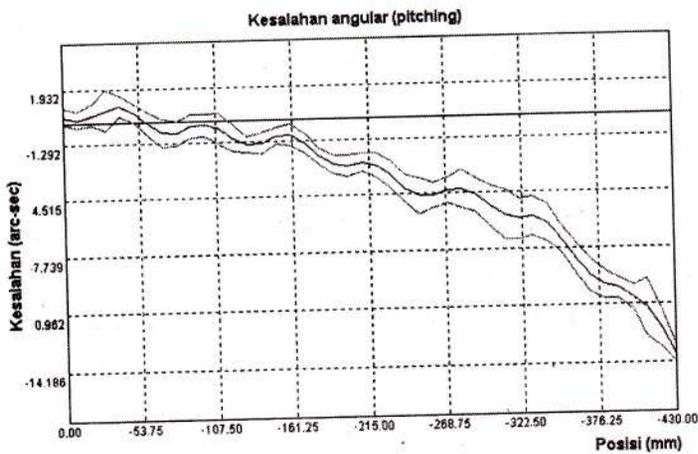


Gambar 9. Hasil pengukuran ketelitian pemosisian linier dua arah Sumbu Z

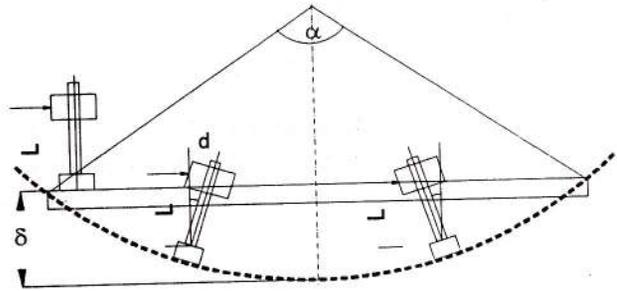
PEMBAHASAN

Penelitian ini akan melihat pengaruh kesalahan angular dan kelurusan gerak terhadap ketelitian pemosisian linier. Hasil ukur kesalahan angular pitching sumbu X menunjukkan kesalahan kumulatif angularnya membesar dan angkanya negatif (Gambar 10). Kalau kesalahan ini diplot secara grafis berarti bahwa lintasan gerak meja cekung (Gambar 11). Kecenderungan ini

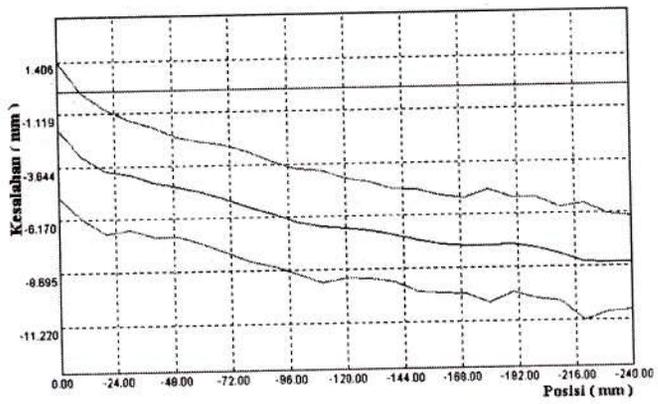
benar bila dihubungkan dengan hasil ukur kelurusan vertikal (Gambar 6). Hasil ukur kesalahan angular *yawing* menunjukkan hasil membesar positif. Berarti bahwa lintasan gerak meja melengkung ke kanan (dilihat dari sebelah atas meja).



Gambar 10. Hasil pengukuran kesalahan angular (*pitching*) sumbu X



Gambar 11. Plot lintasan meja pada sumbu X menurut kesalahan angular pitch.



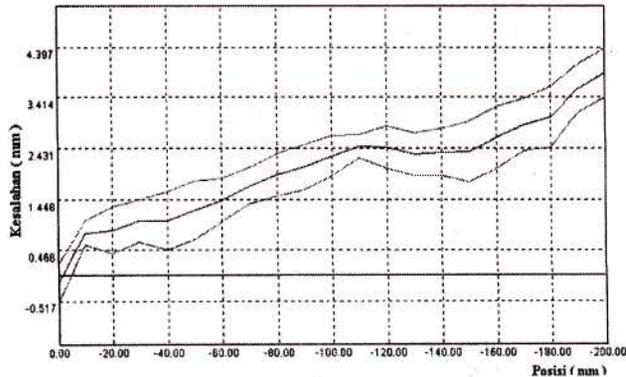
Gambar 12. Hasil pengukuran kesalahan angular *pitching* sumbu Y

Pengaruh kelengkungan terhadap ketelitian pemosisian dapat dilihat pada Gambar 11. Pada kondisi tanpa kesalahan geometrik, reflektor berdiri tegak lurus. Berarti antara titik yang dituju dan hasil ukur tidak ada perbedaan. Dalam kasus ini karena lintasan meja melengkung maka terjadi perbedaan antara titik yang dituju dan hasil ukur (kesalahan sinus). Besarnya perbedaan tergantung posisi reflektor dan tinggi reflektor ke permukaan meja (L).

Hasil ukur ketelitian pemosisian linier sumbu Y memperlihatkan kecenderungan kesalahan positif pada rentang ukur dari posisi -10 mm sampai -240 mm. Dengan asumsi nilai ketelitian angular *pitching* sumbu Y negatif (Gambar 12) berarti lintasan meja cekung, maka kesalahan pemosisian linier cenderung positif pada separuh lintasan meja.

Kebenaran dari asumsi tersebut dapat dilakukan dengan melihat hasil pengukuran kelurusan vertikalnya. Pada gambar menunjukkan lintasan cekung ke bawah sepanjang lintasan gerak. Pada rentang 0 mm hingga 20 mm, tampak ada kesamaan antara pengukuran ketelitian linier dan kelurusan. Pada daerah tersebut terdapat penurunan yang tajam. Kemungkinan fenomena *stick-slip* masih nampak walaupun sudah memakai elemen *linier motion*. Kemudian pada gambar terlihat pergerakan meja tidak lurus, hal ini disebabkan ketidaksejajaran *linier motion* dalam arah horisontal. Untuk mengurangi ketidaksejajaran tersebut perlu dilakukan penyetelan *linier motion* (menggencangkan atau mengendurkan baut di samping *linier motion*).

Kesalahan pemosisian linier sumbu Z cenderung negatif atau membesar negatif. Kesalahan berharga negatif terjadi bila harga pengukuran lebih kecil dari titik yang dituju. Penyebabnya ialah lintasan meja yang cembung (kebalikan dari Gambar 11). Ini dapat dilihat pada hasil ukur kesalahan angular pitching (Gambar 13) yang kesalahannya positif dan membesar.



Gambar 13. Hasil pengukuran kesalahan angular pitching sumbu Z

Pada penelitian ini tidak dapat dilihat hubungan kesalahan pemosisian sumbu Z dengan kelurusan vertikalnya karena hasil ukur kelurusan vertikal jelek. Hal ini disebabkan oleh *beam-strength laser* pada indikator hanya $\pm 30\%$. Pada untuk mendapatkan hasil pengukuran yang baik minimal *beam-strength* $\pm 70\%$ [1]. Namun hal ini tidak terjadi pada pengukuran kelurusan horisontal. Selain keadaan lintasan meja, penyebab yang lainnya adalah mekanisme *counter balance* yang kurang baik. Mesin ini memakai pasangan rantai dan *rachet* sebagai pengubah arah gerak linier. Kelemahan dari sistem ini adalah gerakannya tidak mulus akibat

backlash pasangan rantai-gigi *rachet*.

Faktor Yang Mempengaruhi Pengukuran Ketelitian Pemosisian Mesin Perkakas

Selain ketelitian geometrik mesin perkakas yang mempunyai pengaruh terhadap ketelitian pemosisian, ada beberapa faktor yang juga berpengaruh terhadap hasil pengukuran tersebut antara lain :

- Ketelitian alat ukur yaitu ketelitian laser interferometer. Untuk mengetahui sejauh mana ketelitian laser yang digunakan perlu ada kalibrasi laser. Dalam hal ini penulis tidak melakukan kalibrasi laser karena alat pengkalibrasi tidak ada.
- Keberimpitan atau kesejajaran antara sumbu gerak dan berkas sinar. Jika tidak maka akan terjadi kesalahan cosinus yang mempengaruhi ketelitian pengukuran.
- *Beam-strength* yang rendah mempengaruhi hasil pengukuran ketelitian mesin perkakas. Pada pengukuran kelurusan sumbu-Z yang menggunakan optik yang lebih kompleks daripada optik pengukuran ketelitian pemosisian linier, hasilnya tidak dapat dijadikan pegangan.
- Karena kendala optik. Misalnya pada pengukuran kelurusan seharusnya dipakai pasangan interferometer dan reflektor untuk jarak dekat (*short range*). Namun karena pasangan tersebut tidak dapat dipakai maka pasangan interferometer dan reflektor jarak jauh (*long range*) yang dipakai. Hasilnya tentu berbeda.

KESIMPULAN

1. Hasil pengukuran ketelitian pemosisian mesin LCHQ-MC menunjukkan bahwa mesin memenuhi persyaratan ketelitian yang direncanakan yaitu $9,2 \mu\text{m}/300 \text{ mm}$ untuk sumbu-X, $8,9 \mu\text{m}/300 \text{ mm}$ untuk sumbu-Y dan $14,7 \mu\text{m}/300 \text{ mm}$ untuk sumbu-Z (acuan untuk ketelitian

pemosisian ialah $25 \mu\text{m}/300 \text{ mm}$ menurut JIS B6336).

2. Dari grafik kesalahan angular *pitch* dan kelurusan vertikal sumbu-X ditunjukkan bahwa lintasan berbentuk lengkung ke bawah terutama pada bagian tengah dan ujung lintasan sumbu-X lebih tinggi (*posisi* -430 mm).
3. Kondisi sebagian besar lintasan sumbu-Y (*antara 0 sampai* -168 mm) juga berbentuk lengkung ke bawah. Pada posisi 0 sampai dengan -20 mm terdapat perubahan menyolok, disebabkan ujung *linier motion* tidak rapat pada rentang tersebut.
4. Kesalahan pemosisian linier sumbu-Z terutama disebabkan oleh bentuk lintasan sumbu-Z yang melengkung ke atas (cembung). Selain itu juga mekanisme *counter balance* yang belum baik juga mempengaruhi ketelitian pemosisiannya.
5. Pada bidang XY terdapat penyimpangan sebesar $-2,92 \text{ arcsec}$ antara gerak sumbu-X dan gerak sumbu-Y. Sehingga sudut yang dibentuk dari kedua gerak sumbu tersebut kurang dari 90° (tidak tegak lurus). Kesalahan ini berpengaruh pada pembuatan sejumlah lubang yang mengacu pada satu titik/lubang. Selain itu bila benda kerja yang diminta mempunyai sudut siku maka hasilnya tidak sesuai.
6. *Beam-strength* yang rendah mempengaruhi hasil pengukuran ketelitian mesin perkakas sehingga hasil pengukuran kelurusan vertikal gerak sumbu-Z tidak dapat dijadikan pegangan.

DAFTAR PUSTAKA

1. _____, *Laser Measurement System; User's Guide*, Hewlett-Packard, Santa Clara-California, 1987.
2. _____, *ISO R230-1; Test Code for Machine Tools*, Part 1, ISO, Switzerland, 1996.
3. _____, *ISO R230-2; Test Code for Machine Tools*, Part 2, ISO, Switzerland, 1996.
4. Amin, E., *Pengukuran Ketelitian Pemosisian Machining Center LCHQ Dengan Menggunakan Sistem Pengukuran Terpadu Berbasis Laser Interferometer*, Tesis Magister, ITB, 2000.
5. Bagiasna, K., *Pengantar Pengujian Ketelitian Geometrik Mesin Perkakas*, Laboratoria Teknik Produksi dan Metrologi Industri ITB, tt, Bandung.
6. Bagiasna, K., *Pitch Accuracy of A Thread Cut Using A Single Point Cutting Tool*, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Te Leuven, 1977.
7. Burhanuddin, Y., *Pengukuran dan Analisis Ketelitian Pemosisian Low Cost High Quality Machining Center Dengan Menggunakan Sistem Pengukuran Ketelitian Mesin Perkakas Berbasis Laser Interferometer*, Tesis Magister, ITB, 2001
8. Cahyono, A., *Diagnosis Sumber Kesalahan Pemosisian Meja Machining Center Dengan Metoda Matriks Transformasi Homogen*, Tugas Sarjana, ITB, 1998.
9. CIRP Scientific Committee for Metrology and Interchangeability's, *A Proposal for Defining and Specifying the Dimensional Uncertainty of Multiaxis Measuring Machines*, Annals of CIRP, Vol. 27/2, 1978.

10. Dedy, *Analisis Gerak Meja Machining Center Menggunakan Program Pengetesan Terpadu Mesin Perkakas Berbasis Laser Interferometer*, Tugas Sarjana, ITB, 1994.
11. Ferreira, P.M., Liu, C.R., *A Contribution to the Analysis and Compensation of the Geometric Error of a Machining Center*, Annals of the CIRP Vol. 35/1, 1986
12. Koenigsberger, F., Thusty, J., *Machine Tool Structures*, Vol. 1, Pergamon Press, London, 1970.
13. Kurniawan, M.Y., *Perangkat Lunak Untuk Sistem Pengukuran Terpadu Berbasis Laser Interferometer dan Diagnosis Ketelitian Mesin Perkakas NC*, Tugas Sarjana, ITB, 1999.
14. Kurtoglu, A., *The Accuracy Improvement of Machine Tools*, Annals of the CIRP Vol. 39/1/. 1990.
15. Mehta, N.K., *Machine Tool Design*, Tata McGraw-Hill, 1986
16. Schlesinger, G., *Testing Machine Tools*, 7th ed. The Machinery Publishing Co. Ltd., London, 1970.
17. Silalahi ,M., *Kaji Awal Sumber Kesalahan Pemosisian Meja Machining Center Dengan Metoda Matriks Transformasi Homogen*, Tugas Sarjana, ITB, 1998.
18. Slocum, A.H., *Precision Machine Design*, Prentice-Hall Inc., 1992.
19. Tjahjowidodo, T., *Analisis dan Pengukuran Kelurusan dan Kesejajaran Pada Struktur Dasar Mesin Perkakas Berbasis Laser Interferometer*, Tugas Sarjana, ITB, 1996.
20. Weck M., *Handbook of Machine Tools*, Vol. 4. Wiley-Heyden, 1984.