

ANALISIS KELURUSAN GERAK DAN PEMOSISIAN MEJA MACHINING CENTER MILLAC 4H

Komang Bagiasna⁽¹⁾ dan Darto⁽²⁾

⁽¹⁾ Lab. Dinamika, KPP-Ilmu Rekayasa, ITB
Telp. (022) 2506283, Fax.(022) 2534109
E-mail: kb@dynamic.pauir.itb.ac.id

⁽²⁾ KBK Teknik Produksi Jurusan Teknik Mesin
Universitas Merdeka Malang

Abstrak

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian ketelitian gerak meja machining center arah sumbu – X menggunakan pengukuran berbasis laser interferometer. Ketelitian gerak meja machining center yang diuji meliputi ketelitian pemosisian, ketelitian gerak angular dan ketelitian kelurusan gerak. Merujuk pada hasil pengukuran selanjutnya dilakukan analisis kesalahan gerak meja machining center berdasarkan pemodelan kesalahan gerak meja dengan menggunakan metode matriks transformasi homogen (MTH). Analisis defleksi lintasan lurus dilakukan dengan menerapkan metode lima titik kontak dan analisis lainnya yang memperhitungkan pengaruh ketidaksejajaran antara ballscrew dengan lintasan lurus. Diagnosis dilakukan dengan cara membandingkan kurva ketelitian gerak meja hasil pemodelan terhadap kurva serupa hasil pengukuran dengan laser interferometer sehingga bentuk keausan lintasan lurus dan keausan ballscrew machining center dapat diketahui.

Abstract

Accuracy measurements were carried out on a table movement of four axis machining center using laser interferometer based integrated measuring system. In this case the measurements included table positioning accuracy in x-axis direction and table angular as well as table straightness displacement accuracy. Following the obtained results, analysis of the machining center table displacement was carried out by modeling the table accuracy movement using a homogenous transformation matrix (HTM) method. Guide ways deflection was analysed using five contact point method and other analysis performed by taking into account misalignment between ball screw & slideways. Diagnosis was conducted by comparing the theoretical table accuracy displacement curve and the one obtained from laser interferometer based measurement, for determining the slideways wear contour and the progressive wear of the ball screw.

Keywords: *Machining center, laser interferometer, positioning and straightness accuracy*

1. PENDAHULUAN

Mesin perkakas adalah induk dari mesin lainnya dan salah satu cirinya adalah bahwa mesin perkakas merupakan mesin yang teliti. Ketelitian suatu mesin perkakas diuji secara periodik sesuai dengan standar yang berlaku [1]. Salah satu tujuan pengujian ketelitian ini adalah untuk proses rehabilitasi ketelitian mesin perkakas [2].

Untuk menunjang proses rehabilitasi tersebut perlu dikembangkan suatu metode diagnosis sehingga bisa diketahui kesalahan geometrik maupun kesalahan fungsional komponen utama yang berpengaruh terhadap ketelitian mesin perkakas. Informasi awal tentang kesalahan yang terjadi pada komponen utama mesin perkakas memungkinkan kegiatan rehabilitasi dapat dilakukan dengan lebih efektif.

Sehubungan dengan hal di atas, di Lab. Dinamika KPP-IR ITB maupun di Lab. Teknik Produksi Dept. Teknik Mesin ITB dikembangkan suatu metode untuk diagnosis

sumber kesalahan pemosisian dan kesalahan kelurusan gerak meja pada mesin perkakas kontrol numerik yang menggunakan metode matriks transformasi homogen [3,4,5,6,7,8]. Analisis yang digunakan dalam metode diagnosis ini berbasis matriks transformasi homogen. Analisis ini memungkinkan untuk mentransformasikan posisi meja ke dalam koordinat global sehingga memudahkan evaluasi ketelitian gerak meja machining center. Luaran yang diperoleh adalah data kuantitatif pengaruh berbagai komponen utama terhadap ketelitian gerak meja machining center tersebut.

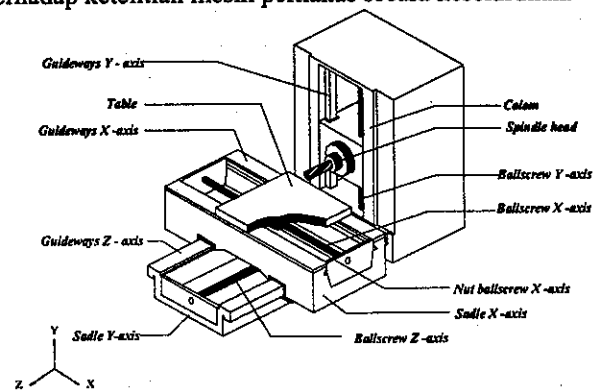
2. MACHINING CENTER MILLAC 4H

Machining center Millac4H adalah mesin perkakas kontrol numerik untuk proses pemrosesan terpadu dalam pembuatan kontur permukaan dan lubang. Dayanya 7,5 kW dan langkah meja arah sumbu X adalah 500 mm, arah sumbu Y adalah 400 mm dan sumbu Z adalah 400 mm. Dalam hal ini putaran spindelnya adalah 45 sampai dengan 4500 rpm. Untuk mendukung fungsi tersebut,

Millac 4H dilengkapi dengan ATC (*Automatic Tools Changer*), AHC (*Automatic Head Changer*) dan APC (*Automatic Pallet Changer*).

Struktur dasar Millac 4H terdiri atas dua bagian, yaitu sadel dan kolom seperti yang diperlihatkan dalam Gambar (1). Pada bagian kolom terpasang spindel untuk menempatkan pahat potong. Baik pada sadel maupun kolom terdapat komponen-komponen pendukung gerakan translasi untuk setiap sumbu gerak.

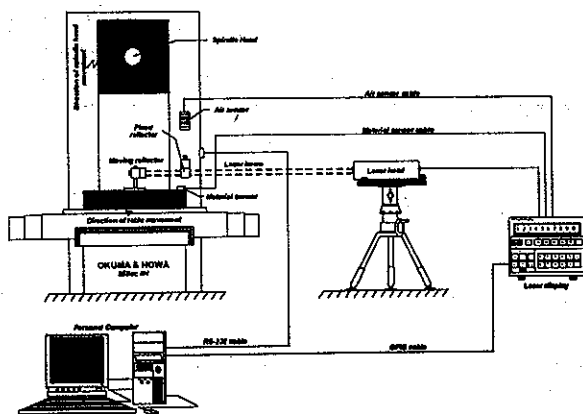
Komponen pendukung gerakan translasi tersebut adalah motor penggerak, *guideways*, *ballscrew*, *nut ballscrew* dan kopling. Setiap elemen pendukung gerakan memiliki karakteristik ketelitian geometrik tersendiri yang secara langsung berpengaruh terhadap ketelitian pemosisian dan kelurusan gerak mejanya. Di samping itu perakitan setiap komponen pendukung gerakan akan berpengaruh terhadap ketelitian mesin perkakas secara keseluruhan.



Gambar 1. Struktur dasar *machining center* Millac 4H

3. SISTEM PENGUKURAN TERPADU BERBASIS LASER INTERFEROMETER

Pengujian ketelitian gerak *machining center* dilakukan dengan menggunakan sistem pengukuran terpadu berbasis laser interferometer seperti terlihat dalam Gambar (2). *Laser head* memancarkan sinar laser yang dipantulkan kembali oleh optik yang terpasang pada meja dan posisinya terlihat pada *laser-display*. Pada posisi tertentu sistem kontrol *machining-center* memicu komputer untuk mengambil data posisi meja dari *laser-display*. Perangkat lunak mengolah data pemosisian meja sehingga diperoleh data ketelitian pemosisian meja. Pengukuran kelurusan gerak meja dilakukan dengan memasang optik kelurusan di meja *machining center*.

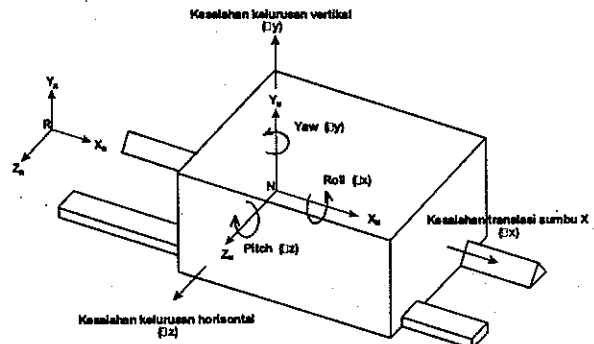


Gambar 2. Konfigurasi pengukuran berbasis *laser interferometer* modus kerja otomatis

4. PEMODELAN KETELITIAN GERAK MEJA MACHINING CENTER

4.1 Kesalahan Gerak Linear

Gerakan suatu benda kaku dalam ruang memiliki kesalahan berikut, yakni tiga kesalahan translasi δ_x , δ_y , δ_z dan tiga kesalahan *angular* ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z pada masing-masing sumbu geraknya seperti terlihat dalam Gambar (3).



Gambar 3. Kesalahan gerak meja dalam ruang

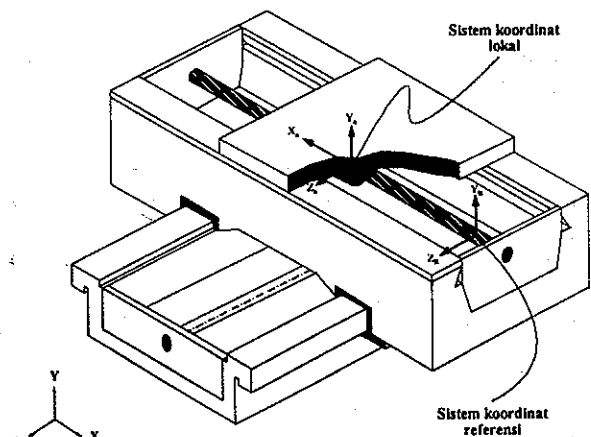
Matriks transformasi homogen (MTH) yang menggambarkan kesalahan gerak meja kerja dapat dituliskan sebagai berikut [9]:

$$E_n = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z & \epsilon_y & \delta_x \\ \epsilon_z & 1 & -\epsilon_x & \delta_y \\ -\epsilon_y & \epsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Pada Persamaan (1) besaran ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z masing-masing adalah kesalahan *roll*, kesalahan *yaw* dan kesalahan *pitch* sedangkan δ_x , δ_y , δ_z masing-masing adalah kesalahan pemosisian, kesalahan kelurusan vertikal dan kesalahan kelurusan horizontal gerak meja *machining center*.

4.2 Penentuan Sistem Koordinat

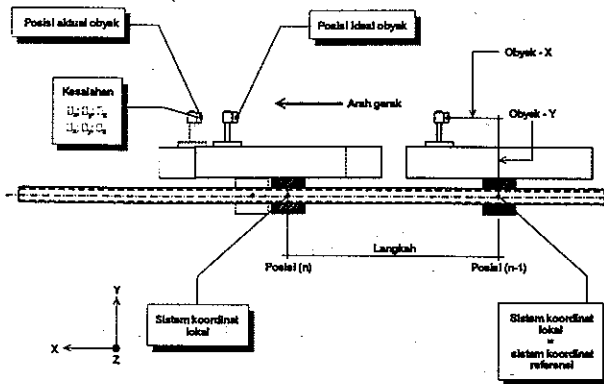
Dalam metode MTH, posisi sistem koordinat referensi dan sistem koordinat lokal pada meja *machining center* diperlihatkan dalam Gambar (4). Sistem koordinat lokal dipilih terletak pada *nut ballscrew* tempat interaksi gerakan meja dan merupakan tempat bekerjanya gaya dorong yang menggerakkan meja *machining center*. Dalam kasus ini, letak sistem koordinat referensi berada pada suatu titik yang tetap di *leadscrew* dan berhimpit dengan sistem koordinat lokal pada saat awal pergerakan meja.



Gambar 4. Sistem koordinat meja *machining center*

4.3 Proses Transformasi Sistem Koordinat

Dalam pemodelan ini dilakukan proses transformasi posisi obyek (*moving reflector*) ke sistem koordinat referensi. Proses transformasi ini dilakukan untuk setiap posisi pengukuran seperti dalam Gambar (5).



Gambar 5. Proses transformasi koordinat meja *machining center*

Secara konseptual proses transformasi koordinat yang dilakukan adalah transformasi sistem koordinat lokal posisi n ke sistem koordinat lokal posisi $n-1$. Selanjutnya hasil transformasi tersebut ditransformasikan lagi ke dalam sistem koordinat lokal sebelumnya dan akhirnya ditransformasikan ke sistem koordinat referensi. Dengan demikian, posisi obyek terhadap sistem koordinat referensi dapat diketahui. Secara umum proses transformasi pada setiap posisi pengukuran dapat dirumuskan menjadi :

$${}^R T_n = \prod_{m=1}^N {}^{n-1} T_n = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 \dots \dots \quad (2)$$

Dalam hal ini T adalah matriks transformasi, 0 adalah kordinat referensi dan $1, 2, 3, \dots, n$ adalah kordinat lokal. Besar kesalahan pemosisian dan kelurusan gerak yang terjadi pada meja *machining center* dapat diperoleh dengan cara mengurangkan posisi aktual dengan posisi ideal atau dengan konsep matriks dapat dirumuskan menjadi persamaan berikut

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{aktual} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{ideal} \quad (3)$$

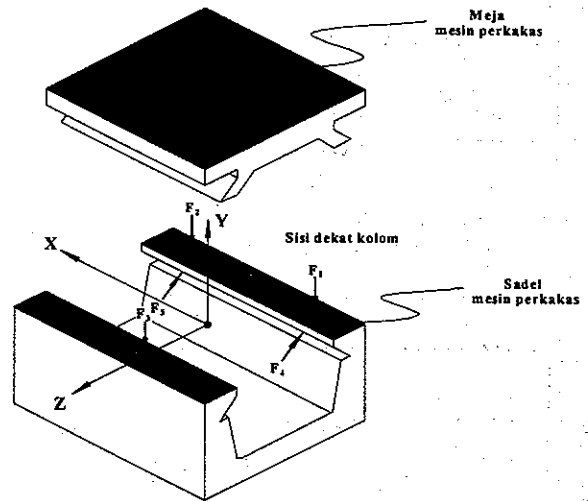
$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^R T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_2 \dots {}^{n-1} T_n \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{ideal} \quad (4)$$

Berdasarkan persamaan (4), dari hasil pemodelan dapat diketahui besar kesalahan pemosisian (δ_x), kelurusan gerak verikal (δ_y) dan kelurusan gerak horizontal (δ_z). Selanjutnya hasil pemodelan tersebut dibandingkan dengan hasil pengukuran.

5. MODEL KESALAHAN KELURUSAN DAN ANGULAR GERAK MEJA

5.1 Defleksi Lima Titik Kontak

Model kesalahan gerak meja *machining center* dengan asumsi meja bertumpu pada lima titik kontak [9] di lintasan luncurnya diperlihatkan dalam Gambar (6).



Gambar 6. Posisi gaya yang bekerja pada lintasan luncur

Secara umum posisi setiap titik kontak dapat dinyatakan dalam suatu sistem koordinat lokal meja sebagai berikut:

$$[P_{bi}] = \begin{bmatrix} X_{bi} \\ Y_{bi} \\ Z_{bi} \end{bmatrix}_{i=1+5} \quad (5)$$

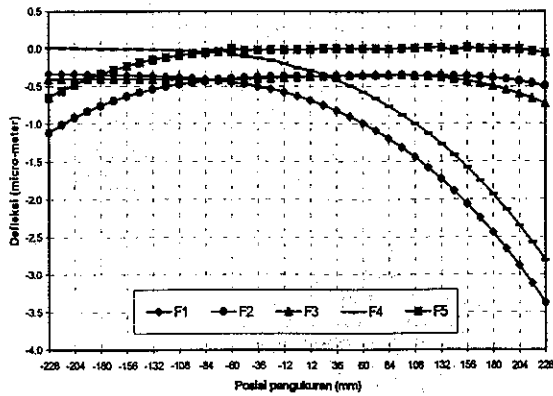
Merujuk pada data geometri meja, posisi awal lima titik kontak pada lintasan luncur adalah sebagai berikut:

$$P_{b1} = \begin{bmatrix} -250 \\ -300 \\ -200 \end{bmatrix} \quad P_{b2} = \begin{bmatrix} 250 \\ -300 \\ -200 \end{bmatrix} \quad P_{b3} = \begin{bmatrix} 0 \\ -300 \\ 200 \end{bmatrix} \quad P_{b4} = \begin{bmatrix} -250 \\ 250 \\ -200 \end{bmatrix} \quad P_{b5} = \begin{bmatrix} 250 \\ 250 \\ 200 \end{bmatrix}$$

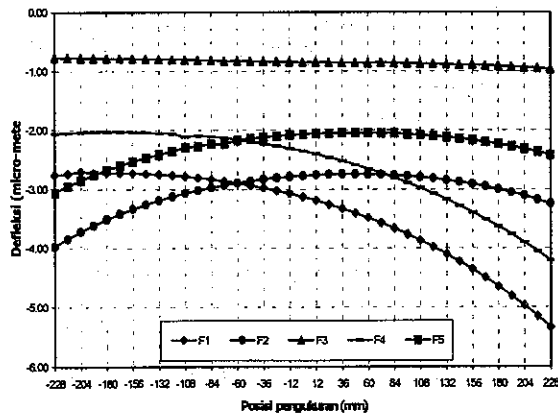
sedangkan cosinus arah masing gaya pada lima titik kontak tersebut adalah:

$$[\theta_{bi}] = \begin{bmatrix} \alpha_{bi} \\ \beta_{bi} \\ \gamma_{bi} \end{bmatrix}_{i=1+5} \quad (6)$$

Dalam analisis ini massa meja adalah 375 kg dan diasumsikan bergerak konstan serta beratnya diasumsikan terdistribusi merata pada lintasan luncurnya. Besar defleksi lintasan luncur searah gaya pada lima titik kontak sepanjang langkah meja dihitung dengan metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak MSC-Nastran. Defleksi pada setiap posisi yang bersesuaian dengan posisi pengukuran laser interferometer diperlihatkan dalam Gambar (7) dan Gambar (8).

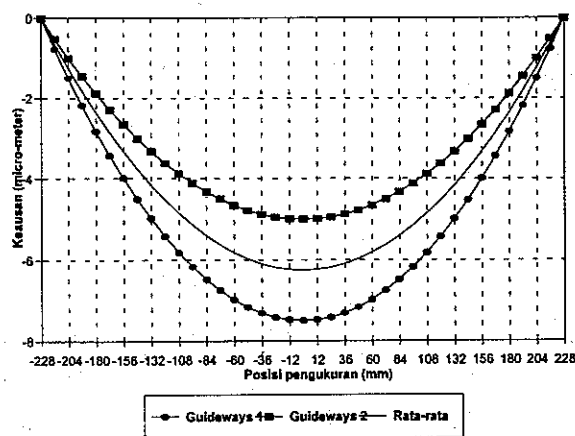


Gambar 7. Defleksi vertikal lintasan lurus akibat berat meja machining center

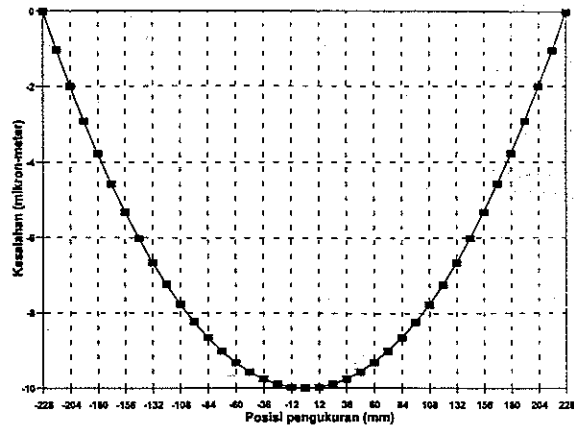


Gambar 8. Defleksi horizontal lintasan lurus akibat berat meja machining center

Dalam gambar tersebut defleksi kelima titik kontak bersesuaian dengan posisi gaya F1, F2, F3, F4 dan F5. Selanjutnya model kurva keausan masing lintasan lurus dalam arah vertikal maupun horizontal diasumsikan seperti dalam Gambar (9) dan Gambar (10).



Gambar 9. Model keausan arah vertikal dari lintasan lurus



Gambar 10. Model keausan arah horizontal dari lintasan lurus

Penjumlahan antara defleksi pada lima titik kontak akibat berat meja dengan perubahan kontur lintasan lurus akibat keausan, merupakan posisi baru lima titik kontak dalam sistem koordinat meja machining center. Persamaan untuk menentukan koordinat lima titik kontak yang baru adalah:

$$\begin{bmatrix} X_{bi} \\ Y_{bi} \\ Z_{bi} \end{bmatrix}_{baru} = \begin{bmatrix} X_{bi} \\ Y_{bi} - \delta_{bi} \cdot \beta_{bi} \\ Z_{bi} - \delta_{bi} \cdot \gamma_{bi} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Posisi koordinat lima titik kontak ($i=1,2,\dots,5$) yang baru dapat ditransformasikan ke koordinat lintasan lurus dengan menggunakan matriks transformasi homogen sehingga diperoleh persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} X_{bearingways-i} \\ Y_{bearingways-i} \\ Z_{bearingways-i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{bi} - Y_{bi} \cdot \epsilon_y + Z_{bi} \cdot \epsilon_z \\ X_{bi} \cdot \epsilon_x + Y_{bi} - Z_{bi} \cdot \epsilon_x + \delta_y \\ -X_{bi} \cdot \epsilon_y + Y_{bi} \cdot \epsilon_x + Z_{bi} + \delta_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Merujuk pada Gambar (6), arah bidang kontak antara meja dan guide ways adalah sebagai berikut:

(1). Arah bidang kontak miring 45° terhadap bidang horizontal sehingga diperoleh hubungan berikut:

$$\begin{aligned} (Y_{bw-i} - Y_{bi}) \cdot \beta_{bi} &= -(Z_{bw-i} - Z_{bi}) \cdot \gamma_{bi} \\ \beta_{bi} &= -\gamma_{bi} \end{aligned} \quad (9)$$

(2). Arah bidang kontak horizontal sehingga diperoleh hubungan berikut:

$$\begin{aligned} (Y_{bw-i} - Y_{bi}) \cdot \beta_{bi} &= 0 \\ \beta_{bi} &= 1 ; \gamma_{bi} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Besar defleksi lima titik kontak dengan memperhatikan pengaruh cosinus arah dilakukan dengan mensubstitusikan Persamaan (9) dan (10) ke dalam Persamaan (8) sehingga diperoleh hubungan berikut:

$$(Y_{bw-i} - Y_{bi}) \cdot \beta_{bi} = (-Z_{bw-i} \cdot \epsilon_x - X_{bi} \cdot \epsilon_z + \delta_y) \cdot \beta_{bi} \quad (11)$$

$$(Z_{bw-i} - Z_{bi}) \cdot \gamma_{bi} = (-Y_{bw-i} \cdot \epsilon_x - X_{bi} \cdot \epsilon_y + \delta_z) \cdot \gamma_{bi} \quad (12)$$

Dalam hal ini indeks bw adalah singkatan bearing-way. Bila kedua persamaan di atas dijumlahkan maka diperoleh persamaan berikut:

$$(-Z_{bw-i} \cdot \epsilon_x - X_{bi} \cdot \epsilon_z + \delta_y) \cdot \beta_{bi} + (-Y_{bw-i} \cdot \epsilon_x - X_{bi} \cdot \epsilon_y + \delta_z) \cdot \gamma_{bi} = (Y_{bw-i} - Y_{bi}) \cdot \beta_{bi} + (Z_{bw-i} - Z_{bi}) \cdot \epsilon_{bi} \quad (13)$$

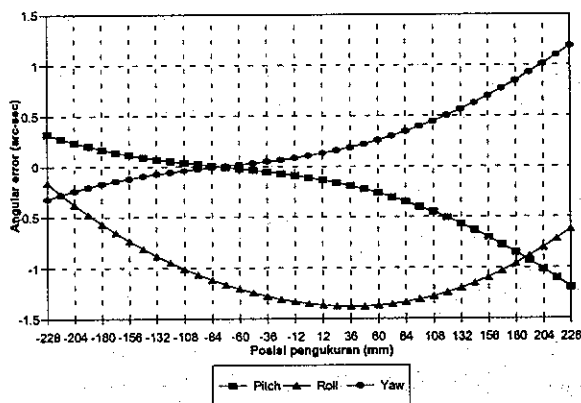
Merujuk pada Gambar (6) maka cosinus arah gaya pada lima titik kontak yang bekerja pada lintasan lurus adalah :

$$\theta_{b1} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \theta_{b2} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \theta_{b3} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \theta_{b4} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad \theta_{b5} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

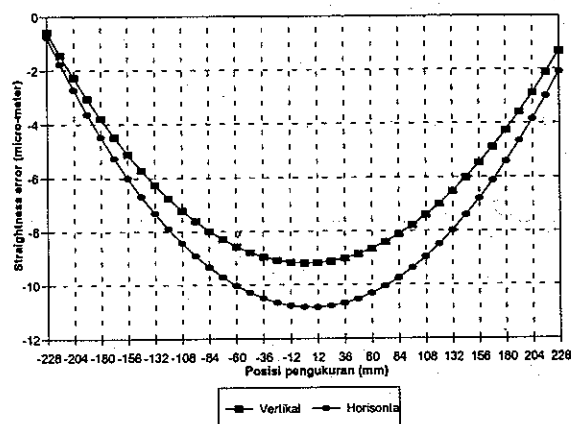
Jika masing cosinus arah di atas dimasukkan ke dalam Persamaan (13) maka dari lima titik kontak diperoleh lima persamaan yang mengandung kesalahan angular dan kesalahan kelurusan gerakan meja. Persamaan tersebut dalam bentuk matriks adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} Z_{b1} & 0 & -X_{b1} & -1 & 0 \\ Z_{b2} & 0 & -X_{b2} & -1 & 0 \\ Z_{b3} & 0 & -X_{b3} & -1 & 0 \\ -Z_{b4} - Y_{b4} & X_{b4} & X_{b4} & 1 & -1 \\ -Z_{b5} - Y_{b5} & X_{b5} & X_{b5} & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{b1} - Y_{bw-1} \\ Y_{b2} - Y_{bw-2} \\ Y_{b3} - Y_{bw-3} \\ Y_{bw-4} - Y_{b4} - Z_{b4} - Z_{b4} \\ Y_{bw-5} - Y_{b5} - Z_{bw-5} - Z_{b5} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Berdasarkan Persamaan (14), kesalahan gerak angular (*pitch*, *yaw*, *roll*) dan kesalahan kelurusan (vertikal dan horizontal) gerak meja *machining center* pada setiap posisi (X_{bi} , Y_{bi} , Z_{bi} dan Y_{bwi}) lima titik kontak yang bersesuaian dengan posisi pengukuran menggunakan laser interferometer dapat diketahui. Hasil analisis model kesalahan gerak angular dan kesalahan kelurusan meja tersebut diperlihatkan dalam Gambar (11) dan Gambar (12).



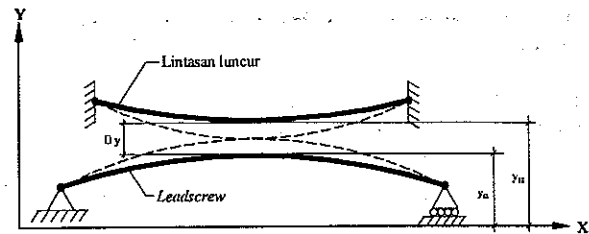
Gambar 11. Kurva teoretik kesalahan angular meja akibat defleksi lima titik kontak



Gambar 12. Kurva teoretik kesalahan kelurusan gerak meja akibat defleksi lima titik kontak

5.2 Pengaruh Ketidaksejajaran Antara Lintasan Lurus Dengan Ballscrew

rosdaKesalahan dalam proses perakitan antara meja *machining center* dengan *ballscrew* dapat mengakibatkan ketidaksejajaran antara lintasan lurus dengan *ballscrew* seperti yang diperlihatkan secara skematik pada Gambar (13). Besar y_{11} adalah defleksi



Gambar 13. Model ketidaksejajaran lintasan lurus dengan ballscrew (*leadscrew*) [9]

awal lintasan lurus sedang y_{12} adalah defleksi awal *ballscrew*. Untuk model dua dimensi dalam bidang vertikal terjadi kesalahan gerak lurus vertikal (*up-down*) dan kesalahan gerak angular *pitching*. Dalam bidang horizontal terjadi kesalahan gerak lurus lateral (*side to side*) dan kesalahan gerak angular *yawing*.

Merujuk pada Gambar (13), dalam keadaan seimbang, interaksi antara *ballscrew* dengan lintasan lurus meja menimbulkan keseimbangan gaya dan keseimbangan momen. Dalam kasus ini besar gaya dan momen pada *ballscrew* adalah sebagai berikut [9] :

$$M_2 = \frac{\Delta y \cdot C_{af} - \Delta \alpha \cdot C_{\delta f}}{C_{af} \cdot C_{\delta f} - C_{\delta M} \cdot C_{af}} \quad (16)$$

$$F_2 = \frac{\Delta y \cdot C_{am} - \Delta \alpha \cdot C_{\delta M}}{C_{af} \cdot C_{\delta M} - C_{\delta f} \cdot C_{am}} \quad (17)$$

Dalam hal ini:

$$\Delta y = y_{11} - y_{12}$$

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_{11} - \Delta \alpha_{12}$$

$\Delta \alpha_{11}$ adalah defleksi angular awal lintasan lurus.

$\Delta \alpha_{12}$ adalah defleksi angular awal *ballscrew*

$$C_{\delta f} = C_{\delta f1} + C_{\delta f2}$$

$C_{\delta f1}$, $C_{\delta f2}$ masing masing kelenturan (*compliance*) lateral lintasan lurus dan *ballscrew* sehubungan dengan adanya gaya.

$$C_{af} = C_{af1} + C_{af2}$$

C_{af1} , C_{af2} masing masing kelenturan angular lintasan lurus dan *ballscrew* sehubungan dengan adanya gaya.

$$C_{\delta M} = C_{\delta M1} + C_{\delta M2}$$

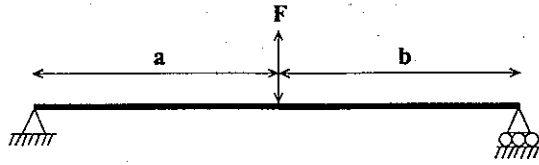
$C_{\delta M1}$, $C_{\delta M2}$ masing masing kelenturan lateral lintasan lurus dan *ballscrew* sehubungan dengan adanya momen.

$$C_{am} = C_{am1} + C_{am2}$$

C_{am1} , C_{am2} masing masing kelenturan angular lintasan lurus dan *ballscrew* sehubungan dengan adanya momen.

Merujuk pada Gambar (4) kekakuan lintasan lurus sadel meja *machining center* terpasang secara seri dengan kekakuan *ballscrew*. Dalam analisis ini diasumsikan kekakuan lintasan lurus jauh lebih besar dari pada kekakuan *ballscrew* sehingga defleksi lateral dan angular meja dipengaruhi terutama oleh kekakuan *ballscrew*.

Konfigurasi pemasangan *ballscrew* dimodelkan sebagai batang tumpuan sederhana seperti pada Gambar 14 sehingga kelenturan lateral dan angularnya adalah sebagai berikut [9] :



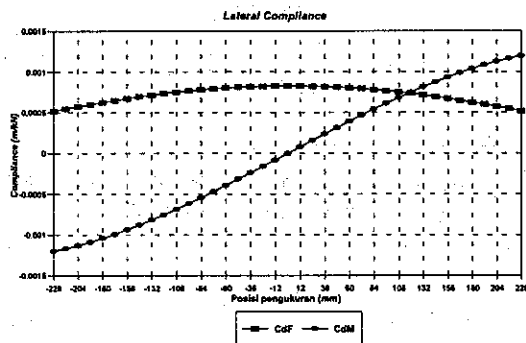
Gambar 14. *Ballscrew* sebagai batang tumpuan sederhana

$$C_{\alpha F2} = \frac{b \cdot a \cdot (b - a)}{3 \cdot E \cdot I \cdot (a + b)} \quad C_{\delta F2} = \frac{b^2 \cdot a^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot (a + b)} \quad (18)$$

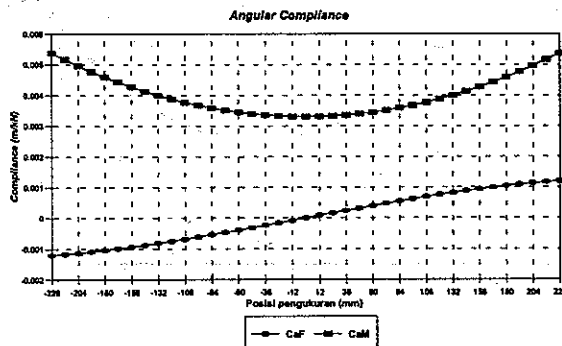
$$C_{\alpha M2} = \frac{a^2 + b^2 - a \cdot b}{3 \cdot E \cdot I \cdot (a + b)} \quad C_{\delta M2} = \frac{b \cdot a \cdot (b - a)}{3 \cdot E \cdot I \cdot (a + b)} \quad (19)$$

Dalam hal ini E adalah modulus elastisitas dan I adalah momen inersia penampang.

Dalam kasus ini data *ballscrew* adalah sebagai berikut: panjang efektif adalah 700 mm, diameternya 50 mm, momen inersia penampang adalah $1,27 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$, dan modulus elastisitasnya 200 GPa. Data sadel lintasan lurus adalah sebagai berikut: momen inersia penampang $6,75 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$ dan E adalah 90 GPa. Merujuk pada Pers. (18) dan (19), besar kelenturan vertikal untuk langkah total 456 mm diperlihatkan dalam Gambar (15) dan Gambar (16).

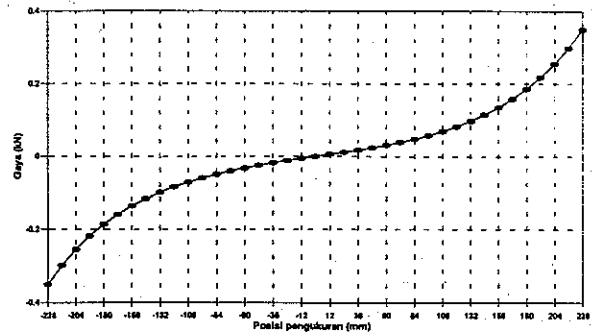


Gambar 15. Kelenturan lateral arah vertikal

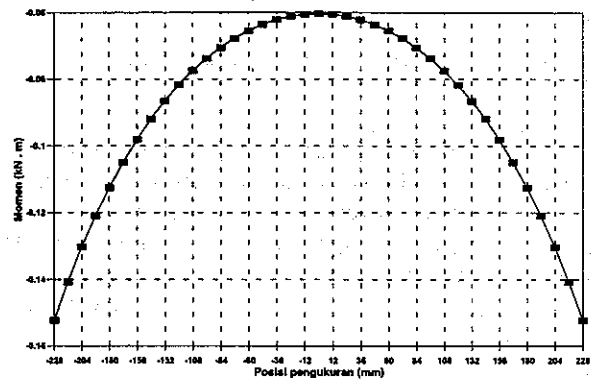


Gambar 16. Kelenturan angular arah vertikal

Besar gaya dan momen yang bekerja pada *ballscrew* ditentukan menggunakan Pers. (16) dan (17). Hasil perhitungan yang memperlihatkan perubahan besar gaya dan momen sepanjang *ballscrew* untuk langkah total 456 mm diperlihatkan dalam Gambar (17) dan Gambar (18).



Gambar 17. Gaya pada *ballscrew* arah vertikal.



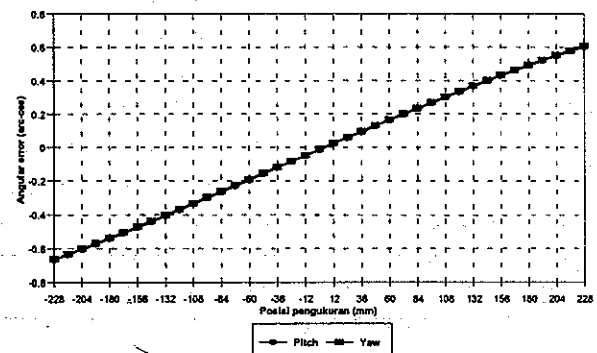
Gambar 18. Momen pada *ballscrew* arah horizontal

Perhitungan defleksi lateral dan angular pada *ballscrew* dilakukan dengan menggunakan rumus berikut [9]:

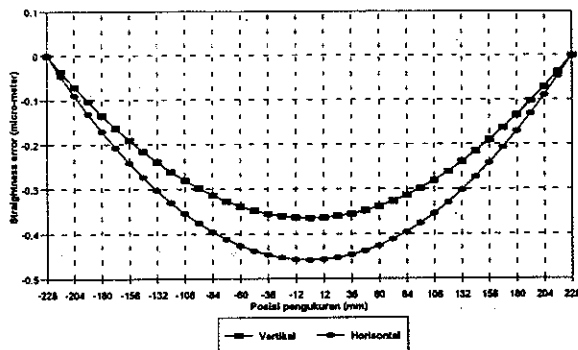
$$y_2 = y_{12} + F_2 \cdot C_{\delta F2} + M_2 \cdot C_{\delta M2} \quad (20)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{12} + F_2 \cdot C_{\alpha F2} + M_2 \cdot C_{\alpha M2} \quad (21)$$

Dalam hal ini y_2 dan α_2 masing-masing adalah defleksi lateral dan defleksi angular. Dalam keadaan seimbang defleksi *ballscrew* sama dengan defleksi pada lintasan lurus meja *machining center*. Kedua defleksi di atas merupakan kesalahan kelurusan gerak dan kesalahan angular gerakan meja akibat adanya ketidaksejajaran antara lintasan lurus dengan *ballscrew*. Hasil analisis kesalahan tersebut diperlihatkan dalam Gambar (19) dan (20).



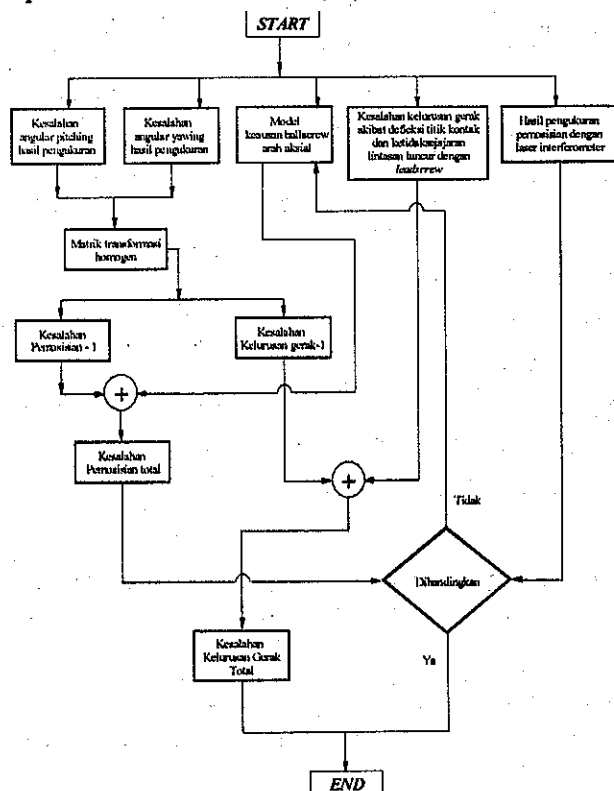
Gambar 19. Kesalahan angular gerak meja akibat ketidaksejajaran *ballscrew* dengan lintasan lurus



Gambar 20. Kesalahan kelurusan gerak meja akibat ketidaksejajaran *ballscrew* dengan lintasan lurus

5.3 Pemodelan Kesalahan Gerak Meja *Machining Center Millac 4H*

Secara konseptual model analitik kesalahan gerak meja ini disusun dengan memanfaatkan hasil pengukuran kesalahan angular gerakan meja berupa *pitching* dan *yawing* yang diukur menggunakan *laser interferometer*. Strategi penyusunan model kesalahan gerak meja ini diperlihatkan dalam Gambar (21).



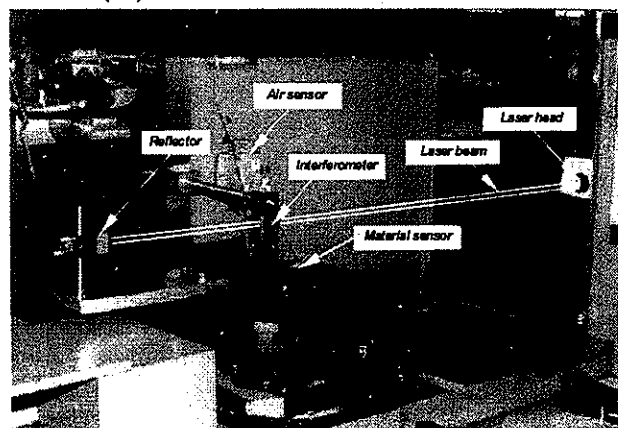
Gambar 21. Diagram alir analisis kesalahan gerak meja

Dalam gambar tersebut terlihat kesalahan *pitching* dan *yawing* hasil pengukuran dikonversikan dengan bantuan matriks transformasi homogen menjadi kesalahan pemosisian dan kesalahan kelurusan gerak. Selanjutnya kesalahan pemosisian ini digabung dengan model keausan *ballscrew* arah aksial sehingga diperoleh model teoretik kesalahan pemosisian meja yang kemudian dibandingkan dengan kesalahan pemosisian hasil pengukuran. Jika hasilnya belum baik maka dilakukan proses iterasi dengan memperbaiki model keausan *ballscrew* sedemikian rupa sehingga hasil kesalahan

pemosisian teoretik sedekat mungkin dengan kesalahan pemosisian meja *machining center* hasil pengukuran *laser interferometer*. Hal lainnya adalah penggabungan kesalahan kelurusan gerak hasil konversi metode matriks transformasi homogen dengan hasil kesalahan teoretik model kelurusan gerak akibat defleksi titik kontak dan ketidaksejajaran lintasan lurus dengan *ballscrew*. Hasil penggabungan ini adalah berupa kesalahan gerak total meja *machining center* yang selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengukuran kelurusan gerak meja menggunakan *laser interferometer*. Bila hasilnya belum baik maka dilakukan proses iterasi dengan memperbaiki model keausan lintasan lurus sedemikian rupa sehingga kurva kesalahan teoretik sedekat mungkin dengan hasil pengukuran kelurusan gerak meja *machining center*.

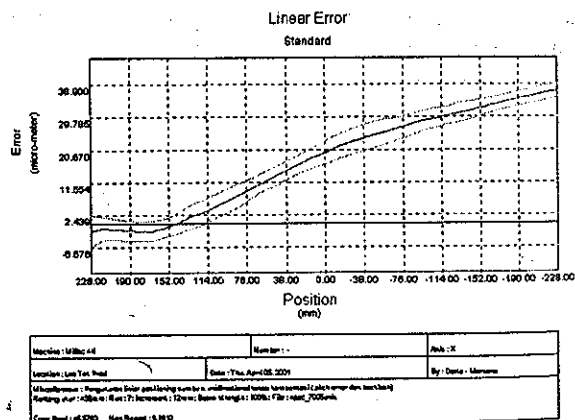
5.4 Hasil Pengukuran Ketelitian Gerak Meja

Foto *set up* pengujian ketelitian pemosisian meja *machining center* Millac 4H diperlihatkan dalam Gambar (22).



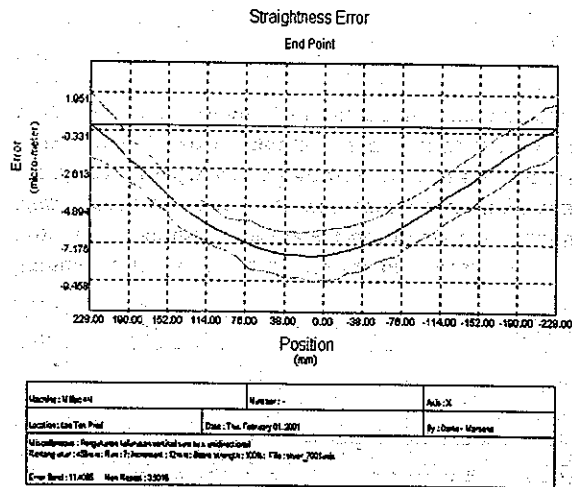
Gambar 22. *Set up* ketelitian pemosisian menggunakan *laser interferometer*

Optik terpasang pada meja yang bergerak searah sumbu x dari posisi +228 mm ke posisi -228 mm. Kurva hasil pengukuran ketelitian pemosisian diperlihatkan dalam Gambar (23).

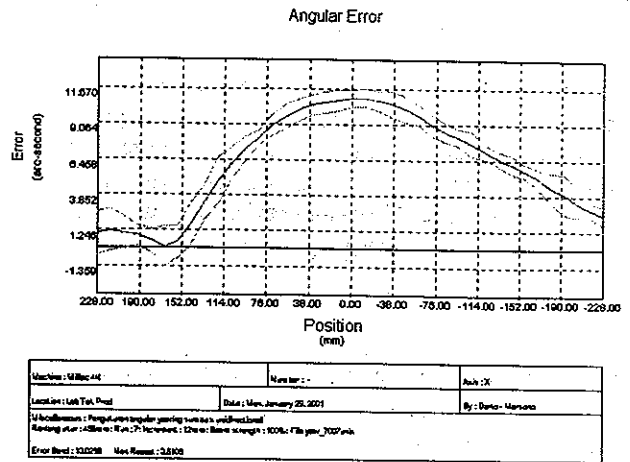


Gambar 23. Ketelitian pemosisian meja arah sumbu-x. Unidirectional tanpa kompensasi.

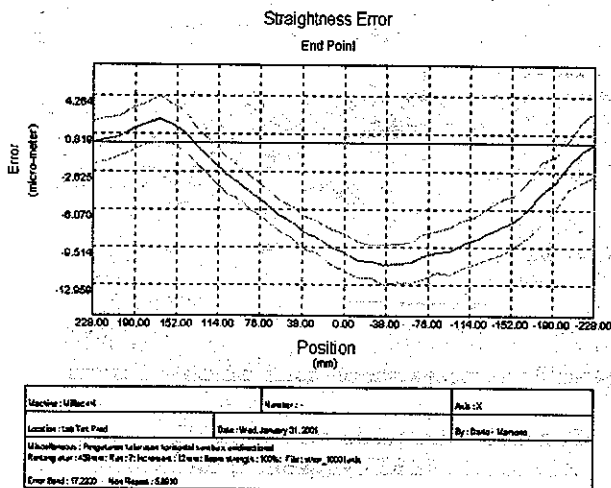
Kurva hasil pengukuran ketelitian kelurusan gerak meja diperlihatkan dalam Gambar (24) dan (25).



Gambar 24. Ketelitian kelurusan gerak meja. Arah sumbu-x. Bidang vertikal (x-y).



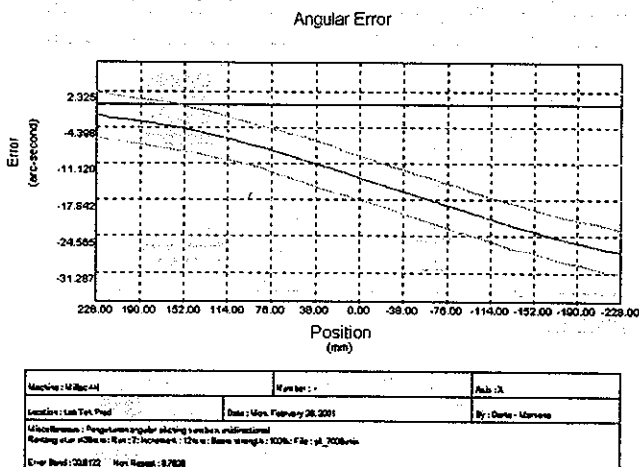
Gambar 27. Ketelitian gerak angular yawing arah sumbu-x. Bidang horizontal (x-z).



Gambar 25. Ketelitian kelurusan gerak meja. Arah sumbu-x. Bidang horizontal (x-z).

Data kelurusan gerak meja *machining center* ini diolah dengan menggunakan metode *end-point* yang besar kesalahan di titik awal maupun titik akhir pengukuran disamakan dengan nol.

Sesuai dengan strategi penyusunan model kesalahan gerak meja, dilakukan pula pengukuran ketelitian angular gerak meja yang hasilnya diperlihatkan dalam Gambar (26) dan (27).



Gambar 26. Ketelitian gerak angular pitching arah sumbu-x. Bidang vertikal (x-y).

Rangkuman hasil pengukuran ketelitian gerak meja *machining center* dicantumkan dalam tabel 1. Data ini diacukan kepada standar JIS B6336.

Tabel 1. Hasil pengukuran ketelitian gerak meja *machining center* Millac 4H arah sumbu-x

Ukur	Jenis	Error-band (μm)	Non-repeat (μm)	JIS B 6336 ($\mu\text{m/mm}$)
Linier (*)	Uni-dir	10.82	5.03	25/300
	Bi-dir	13.70	9.04	25/300
Linier (+)	Uni-dir	45.57	9.18	25/300
	Bi-dir	50.72	29.78	25/300
Angular	Pitch	33.61 (arc-sec)	8.76 (arc-sec)	-
	Yaw	13.02 (arc-sec)	3.51 (arc-sec)	-
Kelurusan	Vertikal	11.40	3.90	10/500
	Horizontal	17.22	5.89	10/500

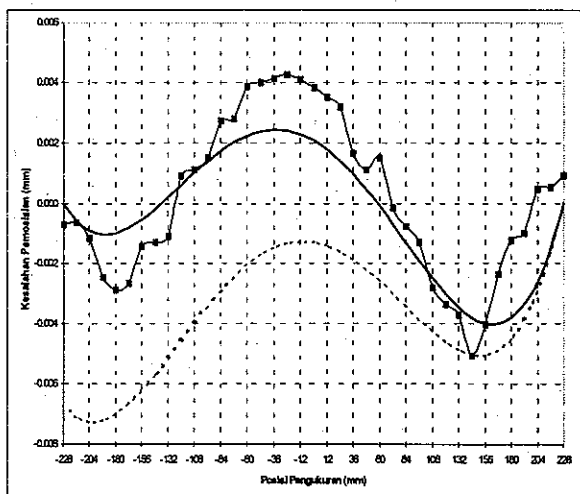
Catatan: Uni-dir: Unidirectional. Bi-dir: Bidirectional.

(*) Pengukuran dengan kompensasi *pitch ballscrew* dan *backlash* yang baru.

(+) Pengukuran tanpa kompensasi *pitch ballscrew* dan *backlash*.

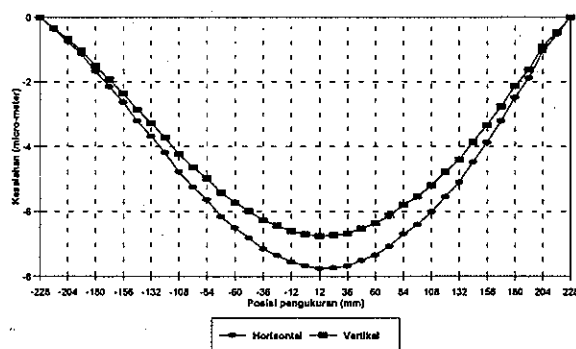
6. PERBANDINGAN HASIL PEMODELAN DENGAN HASIL PENGUKURAN

Metode yang praktis untuk menentukan model keausan aksial *ballscrew* adalah dengan melakukan pengukuran ketelitian pemosisian meja tanpa kompensasi yang hasilnya dikurangi oleh hasil pengukuran yang sama dengan kompensasi (*pitch error* dan *backlash compensation*). Kurva model keausan *ballscrew* yang diperoleh dengan metode di atas diperlihatkan dalam Gambar (28) berupa garis tebal kontinu.



Gambar 28. Model keausan *ballscrew* arah sumbu-x

Kurva yang berisi titik adalah kurva beda data ketelitian pemosisian dengan dan tanpa kompensasi. Kurva garis putus adalah kurva model keausan *ballscrew* yang mengandung kesalahan sistematis. Hasil teoretik model kesalahan gerak akibat defleksi titik kontak dan ketidaksejajaran lintasan lurus dengan *ballscrew* diperlihatkan dalam Gambar (29) yang kesalahan maksimumnya 8 μm .

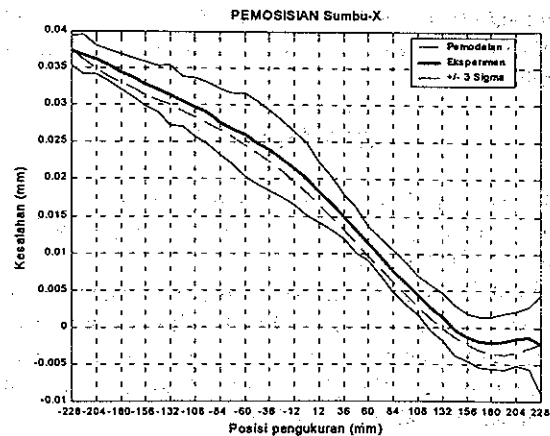


Gambar 29. Kesalahan gerak teoretik akibat defleksi lima titik kontak dan ketidaksejajaran *ballscrew*

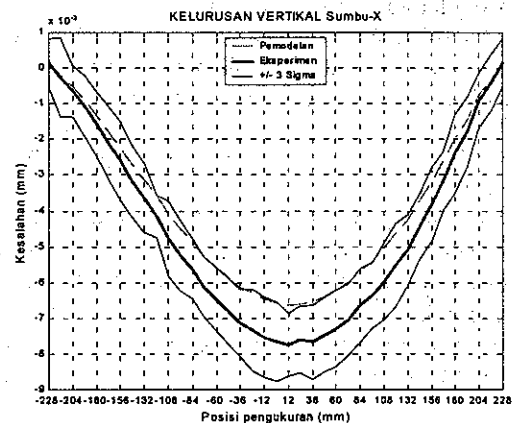
Berdasarkan data pengukuran dan model kesalahan berikut yaitu:

- kesalahan angular *pitching* dan *yawing* gerak meja *machining center* dalam arah sumbu-x
- model keausan aksial *ballscrew*
- kesalahan teoretik model kelurusan gerak meja *machining center* akibat defleksi lima titik kontak dan ketidaksejajaran lintasan lurus terhadap *ballscrew*

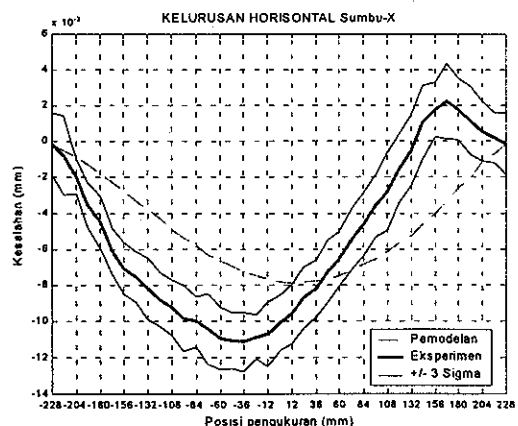
maka dilakukan analisis terhadap ketelitian pemosisian dan kelurusan gerak meja *machining center* mengikuti diagram alir dalam Gambar (21). Perbandingan kurva ketelitian teoretik dan hasil pengukuran diperlihatkan dalam gambar berikut.



Gambar 30. Ketelitian pemosisian teoretik dan hasil pengukuran pemosisian gerak meja Millac 4H



Gambar 31. Ketelitian kelurusan teoretik dan hasil pengukuran kelurusan gerak meja. Bidang vertikal (x-y).



Gambar 32. Ketelitian kelurusan teoretik dan hasil pengukuran kelurusan gerak meja. Bidang horizontal (x-z).

Dalam Gambar (30), hasil model teoretik ketelitian pemosisian meja cukup bersesuaian dengan hasil pengukuran dan berada dalam daerah sebaran data pengukuran ($\pm 3\sigma$). Dalam Gambar (31) bentuk kurva ketelitian teoretik kelurusan gerak meja dalam bidang

vertikal mendekati bentuk kurva ketelitian hasil pengukuran namun secara numerik berada di sekitar sebaran $+3\sigma$. Bentuk kurva ketelitian kelurusan teoretik pada bidang horizontal berbeda dengan hasil pengukuran dan data numeriknya berada di luar sebaran data hasil pengukuran ($\pm 3\sigma$).

7. KESIMPULAN

Berdasarkan kaji teoretik dan hasil pengukuran yang diperoleh dalam penelitian ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- (1). Model keausan *ballscrew* yang digunakan dalam penelitian ini menghasilkan ketelitian pemosisian teoretik meja *machining center* yang dekat dengan ketelitian pemosisian hasil pengukuran menggunakan *laser interferometer*.
- (2). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa keausan *ballscrew* merupakan faktor dominan terhadap ketelitian pemosisian meja *machining center* bila dibandingkan dengan faktor *pitching* dan *yawing* yang terjadi pada gerak meja.
- (3). Model keausan lintasan lurus meja pada bidang vertikal (x-y) menghasilkan ketelitian kelurusan gerak meja pada bidang vertikal yang lebih baik bila dibandingkan dengan kasus serupa untuk model keausan lintasan lurus pada bidang horizontal.
- (4). Pada kasus ketelitian kelurusan gerak meja pada bidang horizontal di samping faktor *yawing*, *pitching* dan keausan lintasan lurus, maka masih ada faktor lain yang belum teridentifikasi yang berpengaruh terhadap mekanisme kelurusan gerak meja *machining center*.

8. DAFTAR PUSTAKA

1. International Standard, ISO 230-1 *Test Code for Machine Tools*, International Organization for Standardization, Switzerland, 1996.
2. G. Schlesinger, *Testing Machine Tools*, 8th edition, 1978.
3. Dedy, *Analisis Gerak Machining Center Menggunakan Program Pengetesan Terpadu Mesin Perkakas Berbasis Laser Interferometer*, Tugas Sarjana S1, Jur.Teknik Mesin, ITB, Bandung, 1994.
4. T.Tjahjowidodo, *Analisis dan Pengukuran Kelurusan dan Kesejajaran Pada Struktur Dasar Mesin Perkakas Menggunakan Laser Interferometer*, Tugas Sarjana S1, Jur.Teknik Mesin, ITB, 1996.
5. I.N.W.Naya, *Perancangan dan Pembuatan Kolom Machining Center Serta Penyetelan Kelurusan Bantalan Linearnya*, Tugas Sarjana S1, Jur.Teknik Mesin, ITB, Bandung, 1996.
6. E.Manurung, *Pembuatan dan Perakitan Saddle Machining Center Serta Pengujian Ketelitian Geometriknya Dengan Laser Interferometer*, Tugas Sarjana S1, Jur.Teknik Mesin, ITB, Bandung, 1997.
7. S.P.Suroso, *Pembuatan Struktur Dasar Mesin Bubut NC dan Pengaruh Ketidaksejajaran Ballscrew Terhadap Ketelitian Pemosisiannya*, Tugas Sarjana S1, Jur.Teknik Mesin, ITB, Bandung, 1997.
8. M.Silalahi, *Kaji Awal Kesalahan Pemosisian Meja Machining Center Dengan Metode Matriks Transformasi Homogen*, Tugas Sarjana S1, Jur.Teknik Mesin, ITB, Bandung, 1998.
9. A.H.Slocum, *Precision Machine Design*, Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1992.
10. Darto, *Diagnosis dan Analisis Ketelitian Gerak Meja Macining Center Okuma & Howa Millac 4H*, Tugas Magister S2, Dept. Teknik Mesin, 2001.