

Memperkirakan kesalahan geometrik linear guideway di mesin CNC  
miling vertikal tiga-sumbu

Widiyanti Kwintarini<sup>1,2</sup>, Agung Wibowo<sup>1</sup>, Yatna Yuwana Martawirya<sup>1</sup>,  
Bagus M. Arthaya<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, Jl. Setiabudhi No.193. Bandung .

<sup>2</sup>Teknik mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Jl.  
Ganesha No.10,Bandung.

<sup>3</sup>Teknik Mekatronika, Fakultas Teknik Industri, Universitas Parahiyangan, Jl. Ciumbuleut No.  
94 Bandung

Email: [widyantikwintarini@unpas.ac.id](mailto:widyantikwintarini@unpas.ac.id)

### Abstrak

*Tujuan penelitian ini adalah memperkirakan kesalahan geometrik pada linear guideway di mesin CNC miling vertikal tiga-sumbu pada arah sumbu-x dengan menggunakan metode pendekatan matematik. Kesalahan geometrik pada lintasan luncur (linear guideway) akan mengakibatkan perubahan geometrik yang signifikan dan akan mempengaruhi ketelitian mesin CNC miling vertikal tiga-sumbu. Perpindahan dan gerak meja mesin perkakas pada lintasan luncur akan mengikuti bentuk lintasan luncur yang menyimpang dari bentuk lintasan ideal. Penyimpangan dan perpindahan gerak disebut dengan kesalahan kelurusan dan kesalahan posisi. Kesalahan kelurusan dan kesalahan posisi di lintasan luncur (linear guideway) dengan arah sumbu xyz dapat sebagai penyebab kesalahan volumetrik di ruang kerja mesin perkakas. Kesalahan geometrik di linear guideway dapat dilakukan estimasi dengan pendekatan secara matematis, metode yang diusulkan dengan metode aljabar linear. Pengembangan pemodelan matematik dengan persamaan umum di sistem lintasan luncur (guideway) berdasarkan geometrik pada meja mesin perkakas CNC. Pendekatan secara matematis untuk membantu memahami dan menafsirkan kesalahan geometrik yang disebabkan kesalahan posisi, kesalahan kelurusan vertikal dan horisontal serta kesalahan sudut (pitch,yaw,roll) pada arah sumbu-x. Hasil pemodelan secara matematis, kesalahan geometrik pada lintasan luncur (guideways) menghasilkan tiga komponen kesalahan yaitu kesalahan posisi, kesalahan vertical straightness dan kesalahan pitching. Hasil kesalahan geometrik dengan pendekatan secara matematis dapat membantu dan memverifikasi hipotesis bahwa ketidaktelitian meja mesin perkakas dapat menjadi sumber kesalahan geometri yang signifikan.*

**Kata kunci** : mesin CNC miling vertikal, kesalahan geometri, linear guideway, kesalahan posisi, kesalahan kelurusan, kesalahan vertical straightness, kesalahan pitching.

### Pendahuluan

Pada mesin perkakas CNC dengan unjuk kerja baik yaitu memiliki ketelitian dan ketepatan yang tinggi. Unjuk kerja mesin CNC menurun dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti kesalahan termal, kesalahan fixture dan kesalahan geometrik. Salah satu faktor utama yang

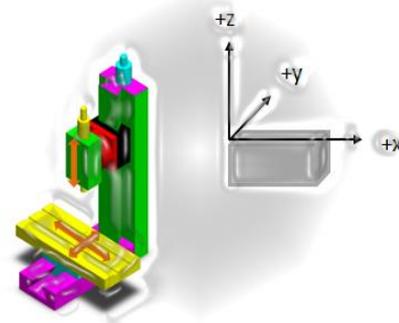
mempengaruhi ketelitian dan ketepatan mesin perkakas adalah kesalahan geometrik pada meja mesin perkakas.[1] Kesalahan geometrik dapat didefinisikan kesalahan bentuk komponen individu, seperti kesalahan geometrik di lintasan luncur akan menyebabkan kesalahan kelurusan gerak dari lintasan luncur. Kesalahan geometrik

di meja mesin perkakas akan mempengaruhi kesalahan dimensi benda kerja atau dengan kata lain benda kerja tidak dapat mencapai toleransi dimensi yang diinginkan. Penyebab kesalahan dimensi pada benda kerja adalah kesalahan geometrik pada lintasan lurus (*linear guideway*) dan kesalahan pada *ballscrew*. Kedua kesalahan baik kesalahan geometrik di lintasan lurus (*guideway*) dan kesalahan pada *ballscrew* akan mengakibatkan perbedaan posisi antara ujung pahat dengan koordinat posisi benda kerja yang diinginkan.[2] Analisis kesalahan di mesin perkakas ada hubungannya antara kesalahan volumetrik dengan kesalahan gerak komponen mesin di setiap sumbu di ruang kerja mesin perkakas.[3] Kesalahan dimensi di benda kerja sangat dipengaruhi oleh kedataran permukaan dari meja mesin perkakas. Walaupun struktur mesin perkakas CNC dirancang dengan baik, tetapi faktor utama yang tidak bisa diabaikan adalah kedataran permukaan meja mesin perkakas. Ketidakteraturan meja mesin dapat disebabkan karena ketidakteraturan lintasan lurus (*guideways*). Pada mesin perkakas CNC dengan ukuran meja mesin yang panjang, kemungkinan untuk merakitnya dengan struktur mesin yang kaku dengan kedataran meja mesin perkakas sangat sulit. Kelurusan lintasan lurus (*guideway*) sebagian besar tergantung pada saat ketelitian perakitan lintasan lurus. Penelitian ini difokuskan pada kesalahan geometrik di lintasan lurus (*linear guideway*) dan pemodelan secara matematis dilakukan pada satu lintasan lurus dalam dua dimensi. Tujuan penelitian pertama adalah pengembangan pemodelan secara matematis kesalahan geometrik di *linear guideway* pada sumbu-x dengan arah x-positif agar meningkatkan ketelitian. Kedua adalah pemodelan kesalahan posisi, *vertical straightness error*, *horizontal straightness error*,

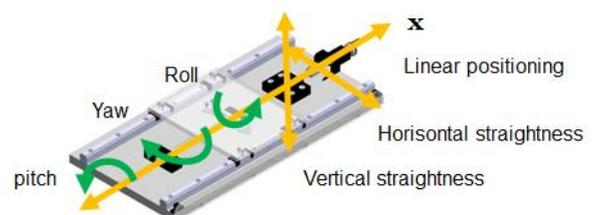
kesalahan angular (roll, pitch, yaw) meja mesin perkakas dengan arah x-positif.

### Dasar Teori Penelitian

**Error of linear axis.** Menurut ISO 230-1, kesalahan di setiap sumbu pada meja mesin perkakas memungkinkan menghasilkan enam derajat kebebasan (6 DOF). Kesalahan yang terjadi pertama kesalahan posisi yaitu *linear positioning*, *horizontal straightness*, *vertical straightness*, dan kesalahan angular yaitu roll (sumbu-x), pitch (sumbu-y), yaw (sumbu-z). Pada penelitian ini menggunakan mesin milling vertikal tiga-sumbu, tampak pada gambar 1. Kesalahan geometrik di meja mesin CNC mesin milling vertikal tiga-sumbu dapat terjadi enam derajat kebebasan (6 DOF) dan tiga kesalahan ketegaklurusan. Tampak pada gambar 2, enam derajat kesalahan geometrik di meja mesin CNC milling tiga-sumbu.



Gambar 1, mesin CNC milling vertikal tiga-sumbu.



Gambar 2, enam kesalahan geometrik di meja mesin NC milling vertikal tiga-sumbu.

**Jumlah kesalahan geometrik.**

Kesalahan geometrik di komponen yang mungkin terjadi pada tiga-sumbu atau ruang kerja di meja mesin perkakas akan berjumlah dua puluh satu komponen kesalahan, tampak pada tabel 1. [4]

Tabel 1. Komponen kesalahan pada tiga-sumbu.

| Komponen kesalahan | Kesalahan posisi linear                 | Kesalahan angular (roll, pitch,yaw)           |
|--------------------|---|---|
| Sumbu-x            | $\delta_x(x), \delta_y(x), \delta_z(x)$ | $\epsilon_x(x), \epsilon_y(x), \epsilon_z(x)$ |
| Sumbu-y            | $\delta_x(y), \delta_y(y), \delta_z(y)$ | $\epsilon_x(y), \epsilon_y(y), \epsilon_z(y)$ |
| Sumbu-z            | $\delta_x(z), \delta_y(z), \delta_z(z)$ | $\epsilon_x(z), \epsilon_y(z), \epsilon_z(z)$ |

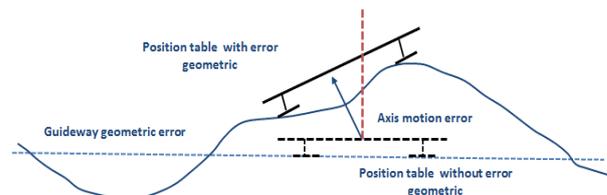
**Kesalahan geometrik lintasan lurus (*linear guideway*).** Komponen mesin CNC yang dapat dikontrol gerakannya (*strat, asselarasi, deselerasi, stop*) dinamakan sebagai sumbu mesin (*machine axis*). [4] Di mesin perkakas CNC, dua sumbu atau lebih dapat bekerja bersamaan (*simultan*). Gerakan sumbu-sumbu untuk mencapai titik akhir/tujuan (*end/target point*) dinamakan sumbu titik-ke-titik (*point to point axes*). Ketidaktepatan gerakan sumbu-sumbu dapat menyebabkan pahat potong tidak akan mencapai tujuan koordinat benda kerja (*target point*), maka dibutuhkan ketelitian pemosisian pahat ke titik koordinat benda kerja. Sumbu mesin CNC memegang peranan penting karena menentukan gerakan pahat relatif terhadap benda kerja.

Kesalahan geometrik di mesin perkakas disebabkan oleh kesalahan gerak (*motion error*) dan kesalahan kinematik (*kinematic error*). Kesalahan gerak (*motion error*) disebabkan kesalahan posisi (*position error*) dan kesalahan gerak makan (*feed rate error*). [5] Ketidaktepatan gerakan elemen mesin seperti *carriage, guideway* dan meja-kerja, disebabkan kesalahan posisi dan kesalahan gerak makan. Kesalahan posisi yang terjadi antara mata potong pahat dengan benda kerja yang

disebabkan oleh deformasi struktur mesin disebut sebagai *Quasi static error*. [6]

**Pemodelan matematik.**

Pemodelan matematik ini bertujuan untuk membantu memahami dan mengestimasi kesalahan geometrik di meja mesin perkakas CNC vertikal miling tiga-sumbu. Pengembangan pemodelan secara matematis ini difokuskan antara kesalahan geometrik *linear guideways* dengan kesalahan gerak setiap sumbu. Analisis kelurusan gerak sumbu di lintasan lurus (*linear guideways*) dilakukan saat meja mesin perkakas tanpa ada beban. Hasil pengembangan pemodelan kesalahan geometrik meja mesin perkakas CNC untuk memverifikasi hipotesis bahwa deformasi meja mesin dapat sebagai sumber kesalahan yang signifikan dari kesalahan volumetrik. Objek penelitian untuk pemodelan secara matematis adalah satu lintasan lurus (*linear guideway*), tampak pada gambar 4. Analisis kesalahan geometrik di lintasan lurus (*linear guideway*) dilakukan pada dua-dimensi dan bentuk lintasan lurus yang ideal berupa garis lurus pada bidang sumbu XY, tampak pada gambar 3.



Gambar 3, kesalahan geometrik di lintasan lurus (*linear guideway*) pada sumbu X-Y.

Perkiraan kesalahan geometrik yang terjadi di meja mesin perkakas CNC disebabkan oleh lintasan lurus (*linear guideway*) dan *ballscrew*. Pertama untuk mengestimasi kesalahan geometrik di lintasan lurus (*linear guideway*) dilakukan dengan menggunakan pendekatan pemodelan secara matematis.

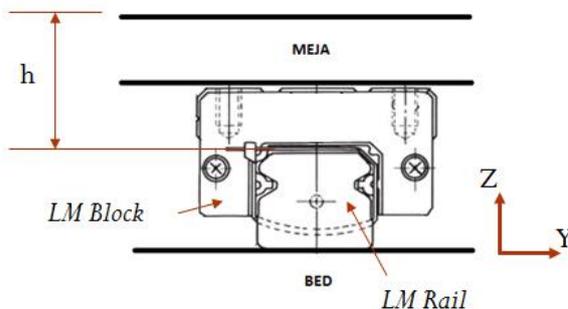
Pada pemodelan secara matematis, asumsi yang digunakan adalah *rigid body machine*, *static errors*, antara *linear bearing* dan *linear guideway (LM rail)* tidak terjadi gesekan.

Pemodelan secara matematis dilakukan di satu lintasan luncur (*linear guideway*), tampak pada gambar 4, satu lintasan luncur (*linear guideway*).



Gambar 4, lintasan luncur (*linear guideway*).

Gesekan antara *linear bearing (LM block)* dan *linear guideway (LM rail)* diabaikan, pada gambar 5, tampak depan lintasan luncur.

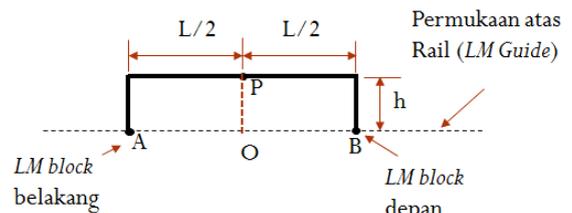


Gambar 5. Tampak depan lintasan luncur (*linear guideway*).

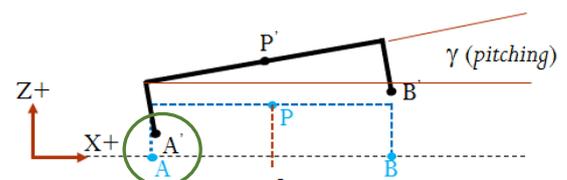
**Asumsi.** Pada pemodelan secara matematis dilakukan untuk sistem gerak per sumbu yaitu ke x-sumbu di meja mesin perkakas CNC. Pertama di asumsikan tinggi  $h$  adalah jarak vertikal antara permukaan *LM guide (LM rail)* dengan permukaan meja, tampak pada gambar 5. Ke dua di asumsikan bahwa *error* pada dua buah *LM block* bagian depan adalah sama, begitu pula *error* pada dua buah *LM block* bagian belakang adalah sama, sehingga

model kesalahan (*error*) dapat dianggap dua-dimensi (bidang XZ).

Pada kondisi awal, untuk sementara tidak ada *error (no clearance)* pada *LM block* relatif terhadap *LM rail*. Ke tiga diasumsi bahwa panjang meja mesin perkakas adalah  $L$ , titik  $P$  pada posisi  $L/2$  dan  $h$  adalah jarak vertikal antara permukaan *LM guide (LM rail)* dengan permukaan meja. Tampak pada gambar 6, kondisi awal lintasan luncur tanpa ada *error* (kesalahan geometrik). Ke empat diasumsikan bahwa *LM block* dan meja dianggap sebagai benda kaku, sehingga tidak terjadi kesalahan rotasi pada masing-masing *LM block* secara kesatuan, dalam hal ini terjadi pada bidang XZ (*pitching*). tampak pada gambar 7 kondisi *LM block* dan *LM guide* terjadi kesalahan geometrik.



Gambar 6. Kondisi tanpa *error*



Gambar 7. Kondisi dengan *error*

### Memperkirakan kesalahan geometrik.

Pada gambar 6, kondisi *LM guide (LM rail)* tanpa ada kesalahan geometrik sehingga posisi titik  $P$  memiliki koordinat  $(L/2, h)$ . Pada gambar 7, kondisi *LM guide (LM rail)* dengan kesalahan geometrik sehingga posisi titik  $P$  menjadi  $P'$ . Mencari

koordinat titik P' dengan memperhitungkan  $\Delta X_A, \Delta Z_A, \Delta X_B, \Delta Z_B$ .

Bila koordinat A:  $(X_A, Z_A)$  maka koordinat A'  $(X'_A, Z'_A)$ .

Bila koordinat B:  $(X_B, Z_B)$  maka koordinat B'  $(X'_B, Z'_B)$ .

Bila koordinat P:  $(X_P, Z_P)$  maka koordinat P'  $(X'_P, Z'_P)$ .

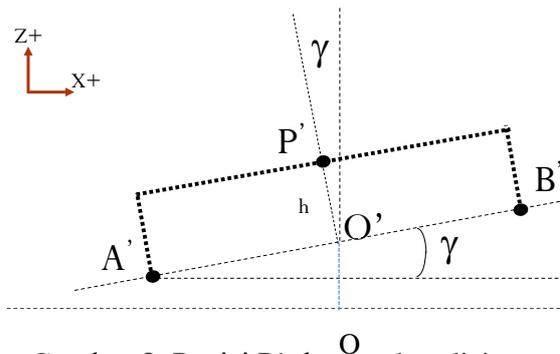
$$\text{maka : } X'_A = X_A + \Delta X_A$$

$$Z'_A = Z_A + \Delta Z_A$$

$$\text{dan : } X'_B = X_B + \Delta X_B$$

$$Z'_B = Z_B + \Delta Z_B$$

Kondisi perpindahan titik P dengan kesalahan geometrik sesuai dengan gambar 8.



Gambar 8, Posisi P' dengan kondisi kesalahan geometrik.

Penentuan perpindahan titik P menjadi P' dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$X_{O'} = \frac{X'_B - X'_A}{2} \quad (1) \quad Z_{O'} = \frac{Z'_B - Z'_A}{2} \quad (2)$$

$$X_P = \frac{(X_B + \Delta X_B) - (X_A + \Delta X_A)}{2} \quad (3)$$

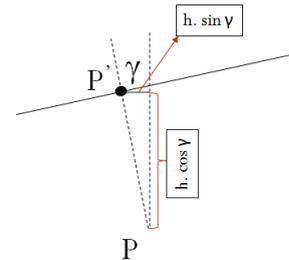
$$Z_P = \frac{Z'_B - Z'_A}{2} \quad (4)$$

$$Z_P = \frac{(Z_B + \Delta Z_B) - (Z_A + \Delta Z_A)}{2} \quad (5)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{Z'_B - Z'_A}{X'_B - X'_A} \right) \quad (6)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{(Z_B + \Delta Z_B) - (Z_A + \Delta Z_A)}{(X_B + \Delta X_B) - (X_A + \Delta X_A)} \right) \quad (7)$$

Koordinat titik P' yaitu  $(X'_P, Z'_P)$  dapat dihitung dengan mencari posisi titik X'P tampak pada gambar 9, dengan persamaan berikut:



Gambar 9, koordinat titik X'P dan Z'P  
 $X'_P = X_P - h \cdot \sin \gamma$

maka koordinat X'P adalah :

$$X'_P = \frac{(X_B + \Delta X_B) - (X_A + \Delta X_A)}{2} - h \cdot \sin \gamma \quad (8)$$

Demikian pula koordinat titik Z'P dapat dihitung dengan mencari posisi titik Z'P dengan persamaan berikut:

$$Z'_P = Z_P + h \cdot \cos \gamma$$

maka koordinat Z'P adalah :

$$Z'_P = \frac{(Z_B + \Delta Z_B) - (Z_A + \Delta Z_A)}{2} + h \cdot \cos \gamma \quad (9)$$

Hasil persamaan dapat dilihat hasilnya bahwa kesalahan kelurusan pada bidang horisontal, *error linear positioning* ( $\delta_{hor}$ ) adalah:

$$\delta_{hor} = X'_P - X_P$$

Sedangkan untuk kesalahan kelurusan pada bidang vertikal, *error vertical straightness* ( $\delta_{ver}$ ) adalah :

$$\delta_{ver} = Z'_P - Z_P$$

dan kesalahan rotasi *pitching* ( $\phi_{xz}$ ) :

$$\phi_{xz} = \gamma$$

### Validasi pemodelan

Pengujian validitas pemodelan secara matematis pada *linear guideway* dilakukan untuk mengetahui kebenaran pemodelan, konsistensi secara logis dan kedekatan model dengan keadaan nyata. Secara nyata atau langsung pengukuran yang dilakukan pada *linear guideway* menggunakan alat ukur laser interferometer. Grafik hasil pengukuran akan dibandingkan antara grafik pengukuran dengan alat ukur laser interferometer dan grafik hasil validasi model matematis.

Verifikasi pemodelan untuk pemeriksaan dari seluruh ekspresi matematis dalam model bahwa variabel-variabel dapat mempresentasikan hubungan yang ada dengan benar. Verifikasi pemodelan matematis menggunakan program excel untuk mendapatkan hasil grafik kesalahan angular (*pitching*). Tampak pada tabel 2, hasil verifikasi pemodelan secara matematis.

Pengukuran pada satu *linear guideway* menggunakan alat ukur interferometer dan dilakukan lima pengambilan data ke arah sumbu-x atau arah gerak meja mesin perkakas. Tampak pada gambar 11, grafik hasil pengukuran dengan laser interferometer.

Tabel 2, hasil verifikasi pemodelan matematis.

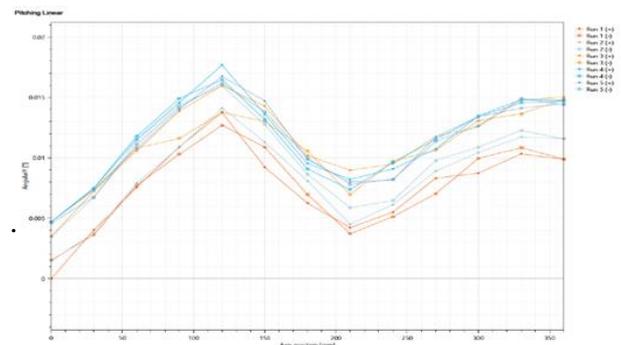
| Za(mm) | Zb(mm) | Xa(mm) | Xb(mm) | delta Za | delta Zb | delta Xa | delta Xb | y(radian) | y(derajat) | Zp  |
|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|-----------|------------|-----|
| 0,001  | 0,007  | 0      | 60     | 0,003    | 0,0007   | 0,0006   | 0,0018   | 0,00006   | 0,0035     | 0   |
| 0,0015 | 0,0155 | 20     | 80     | 0,002    | 0,0182   | 0,0022   | 0,0065   | 0,00050   | 0,0289     | 30  |
| 0,0012 | 0,006  | 40     | 100    | 0,002    | 0,0350   | 0,0059   | 0,0078   | 0,00063   | 0,0361     | 60  |
| 0,0001 | 0,008  | 60     | 120    | 0,002    | 0,0450   | 0,0045   | 0,0004   | 0,00085   | 0,0486     | 90  |
| 0,0002 | 0,005  | 80     | 140    | 0,002    | 0,0650   | 0,0033   | 0,0150   | 0,00113   | 0,0648     | 120 |
| 0,0001 | 0,005  | 100    | 160    | 0,005    | 0,0500   | 0,0033   | 0,0150   | 0,00083   | 0,0477     | 150 |
| 0,0001 | 0,005  | 120    | 180    | 0,003    | 0,0300   | 0,0056   | 0,0550   | 0,00053   | 0,0305     | 180 |
| 0,0001 | 0,0001 | 140    | 200    | 0,002    | 0,0300   | 0,0068   | 0,0550   | 0,00047   | 0,0267     | 210 |
| 0,0001 | 0,0009 | 160    | 220    | 0,001    | 0,0500   | 0,0059   | 0,0055   | 0,00083   | 0,0476     | 240 |
| 0,0001 | 0,0009 | 180    | 240    | 0,001    | 0,0520   | 0,0059   | 0,0055   | 0,00086   | 0,0495     | 270 |
| 0,0001 | 0,0009 | 200    | 260    | 0,002    | 0,0580   | 0,0059   | 0,0055   | 0,00095   | 0,0543     | 300 |
| 0,0001 | 0,0009 | 220    | 280    | 0,001    | 0,0500   | 0,0059   | 0,0055   | 0,00083   | 0,0476     | 330 |
| 0,0001 | 0,0009 | 240    | 300    | 0,001    | 0,0500   | 0,0059   | 0,0055   | 0,00083   | 0,0476     | 360 |

Kemudian dari hasil verifikasi pemodelan matematis, dibuat grafik kesalahan angular (*pitching*). Seperti tampak pada gambar 10, hasil validasi

dengan pemodelan matematik, ke arah sumbu-x, grafik kesalahan angular (*pitching*).



Gambar 10, grafik kesalahan angular (*pitching*) ke arah sumbu-x, hasil validasi pemodelan matematik.



Gambar 11, grafik kesalahan angular (*pitching*) ke arah sumbu-x, hasil pengukuran interferometer.

Hasil pengamatan, grafik hasil pemodelan matematik untuk satu *linear guideway* mendekati grafik hasil pengukuran dengan alat ukur.

### Kesimpulan

- Persamaan kesalahan geometrik meja mesin NC vertikal miling tiga-sumbu untuk dua-dimensi (XZ) dengan arah gerak sumbu-x dipengaruhi oleh variabel *error straightness horizontal* ( $\delta_{hor}$ ) dan variabel *error straightness vertical* ( $\delta_{ver}$ ).

- Kesalahan rotasi *pitch* ( $\phi_{xz}$ ) dipengaruhi oleh *error straightness vertical* ( $\delta_{ver}$ ) dan *error linear positioning* ( $\delta_{hor}$ ).
- Pemodelan matematik untuk kesalahan posisi sumbu-x, kesalahan vertikal sumbu-z dan kesalahan angular (*pitching*), belum diperhitungkan kesalahan dari *ballscrew*.
- Hasil validasi model matematis *linear guideway* mendekati hasil pengukuran laser interferometer.

kesalahan geometrik pada *Guideway* di mesin perkakas NC miling vertikal tiga-sumbu, Proceeding Seminar Nasional Mesin dan Industri (SNMI) 2016, Universitas Tarumanagara, Jakarta.

[7]H.Schwenke, W.Knapp, (2008), Geometric error measurement and compensation of machines – An update, CIRP Annals-Manufacturing Technology 57, 660-675.

## Referensi

- [1] Y.Kakino, Y.Ihara, A.Shinohara, Accuracy Inspection of NC Machine Tools by Double Ball Bar Method, first ed, Hanser Publishers, 1993
- [2] Majda, Pawel, Review: Modeling of geometric errors of linear guideway and their influence on joint kinematic error in machine tools, Precision Engineering. 36 (2012) 369-378.
- [3] T.Onat Ekinci, J.R.R.Mayer, Guy M. Cloutier, Investigation of accuracy of aerostatic guideways, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009) 478- 487.
- [4]A.C.Okafor, Yalcin M.Ertekin. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40,(2000),, 1199-1213.
- [5] Rochim, Taufiq, Sistem Informasi, first ed, Penerbit ITB, (2002).
- [6] Kwintarini, Widiyanti. Wibowo, Agung. Yuwana, Yatna, Pemodelan matematik