

ANALISIS KESALAHAN GERAK MEJA MESIN *MILLING* CNC TU-3A DENGAN METODE MATRIKS TRANSFORMASI HOMOGEN

Beni K. Elyoza Rimporokok¹, I Made Sunada², Darto³

Abstraksi

Dengan semakin meluasnya penggunaan mesin perkakas CNC pada industri permesinan di Indonesia. Maka perlu diketahui faktor- faktor yang berpengaruh terhadap kualitas produk yang dihasilkan. Faktor tersebut terutama menyangkut komponen mesin perkakas CNC. Dengan melakukan analisa kesalahan gerak mesin *milling* CNC TU-3A dengan metode tranparansi homogen yang dibandingkan dengan metode pengukuran. Dari penelitian yang dilakukan diharapkan dapat memberikan informasi kualitas dari mesin perkakas CNC yang di analisa. Apakah mesin perkakas yang bersangkutan masih dapat memenuhi kualitas produknya sesuai dengan standart pabrik pembuatnya.

Kata Kunci : CNC, Matriks Transformasi Homogen

PENDAHULUAN

Mesin perkakas merupakan mesin yang digunakan untuk menghasilkan produk berupa komponen bagi mesin yang lain , sehingga mesin perkakas sebagai induk dari semua mesin produksi mempunyai persyaratan tinggi, khususnya dalam ketelitian dan kehandalan kinerja, sehingga mesin perkakas harus dites/diuji ketelitiannya secara menyeluruh dan periodik. Sehingga dengan demikian benda kerja yang dihasilkan oleh suatu mesin perkakas dapat memenuhi spesikasi geometri yang di inginkan. Apabila benda kerja yang dihasilkan telah keluar dari toleransi yang di inginkan maka mesin perkakas tersebut harus dikaji kembali. Terjadinya kesalahan yang terjadi di luar kesalahan yang dihasilkan oleh mesin perkakas, kesalahan geometri produk juga dapat dipengaruhi oleh faktor pemilihan parameter proses pemotongan, temperatur lingkungan, keadaan pahat dan pencekaman benda kerja serta gaya-gaya pemotongan. Khususnya untuk mesin perkakas NC

(*Numerical Control*), pemosisian meja kerja harus teliti agar benda kerja yang dihasilkan memenuhi syarat spesifikasi geometri yang di inginkan.

Untuk memenuhi kebutuhan yang dapat membantu industri manufaktur dalam melakukan perbaikan dan perawatan mesin perkakas NC, maka dikembangkan suatu metode indentifikasi untuk memperbaiki kesalahan pemosisian pada meja mesin perkakas NC. Dengan demikian penentuan pekerjaan perbaikan dan perawatan yang diperlukan dapat lebih mudah dilakukan dengan efektif dan efisien.

Permasalahan yang ada yaitu : bagaimana menganalisis kesalahan gerak kerja meja mesin *milling* dengan menggunakan metode matriks tranformasi homogen pada arah sumbu x pada meja mesin *milling* CNC EMCO TU-3A yang ada di laboratorium CNC Universitas Merdeka Malang.

Dalam penelitian ini, permasalahan dibatasi sebagai berikut :

¹ Alumni Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang

² Dosen Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang

³ Dosen Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang

- a. Jenis dan mesin yang digunakan adalah mesin meja *milling* CNC EMCO TU-3A.
- b. Hanya menganalisis kesalahan meja gerak mesin *milling* CNC EMCO TU-3A dengan metode matriks transformasi homogen pada arah sumbu x.
- c. Tidak membahas gaya gaya yang bekerja dan kondisi tempratur yang sesuai lingkungan.
- d. Pemrograman hanya pembuatan lubang (pegeboran)
- e. Tidak membahas pemrograman NC untuk pembuatan lubang
- f. Tidak membahas produk dan waktu pengerjaan.
- g. Asumsi alat ukur : jangka sorong digital telah dikalibrasi

Tujuan dari penelitian adalah untuk mengetahui kesalahan gerak meja mesin *milling* terhadap kesalahan pemosisian dengan menggunakan transformasi homogen pada meja mesin *milling* CNC EMCO TU-3A yang ada di laboratorium CNC Universitas Merdeka Malang.

Dalam penelitian ini dilakukan dua langkah pendekatan teori guna mendapatkan data hasil perbandingan, dua langkah pendekatan teori tersebut adalah :

A. Teori dasar pengukuran

1. Pemosisian

$$\delta_{X1} = \text{Posisi Aktual } (X_{1i}) - \text{posisi target } (X_0) ; mm$$

2. Kelurusan vertikal (δ_Y)

$$\delta_{Y_a} = \text{Kedalam Aktual 1 } (Y_{a1}) - \text{Kedalam Aktual 2 } (Y_{a2})$$

3. Angular sudut Pitch (ϵ_Y)

$$\epsilon_{Y_a} = \tan^{-1} \frac{\text{kelurusan vertikal } (\delta_Y)}{\text{jarak antar lubang } (X_a)} \cdot 3600; \text{ arc sec}$$

4. Angular Sudut Yaw (ϵ_Z)

$$\epsilon_{Z_a} = \tan^{-1} \frac{\text{Selisih Kedalaman Horizontal } (\delta_{Z1})}{\text{jarak antar lubang } (X_a)} \cdot 3600; \text{ arc sec}$$

5. Keseluruhan Horizontal (δ_Z)

$$\delta_{Z_a} = \text{Kelurusan Horizontal 1 } (Z_{a1}) - \text{Posisi Target 1 } (Z_0) ; mm$$

B. Teori dasar perhitungan dengan Matriks Transformasi Homogen (MTH)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_x \text{ Aktual} = {}^sT_o \cdot {}^oT_1 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_1$$

Dimana :

$${}^sT_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^oT_1 = \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_{Z1}\epsilon_{Y1}\epsilon_{X1} \\ \epsilon_{Z1} & 1 & \epsilon_{X1}\epsilon_{Y1} \\ \epsilon_{Y1}\epsilon_{X1} & 1 & \epsilon_{Z1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Untuk posisi idealnya adalah :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_R \text{ Ideal} = \begin{bmatrix} \text{Step 1} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_1$$

Kesalahan gerak meja yang terjadi pada perhitungan ini merupakan selisish antara posisi aktual dengan posisi ideal, sehingga :

$$\begin{bmatrix} \delta_X \\ \delta_Y \\ \delta_Z \\ 1 \end{bmatrix}_R = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_R \text{ Aktual} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_R \text{ Ideal}$$

Dimana :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_R \text{ Aktual} = \begin{bmatrix} \cos \epsilon_Y \cdot \cos \epsilon_Z & \cos \epsilon_Y \cdot \sin \epsilon_Z & \sin \epsilon_Y & \delta_X \\ \sin \epsilon_Z & \sin \epsilon_Z & 0 & \delta_Y \\ -\sin \epsilon_Y \cdot \cos \epsilon_Z & 0 & \cos \epsilon_Y & \epsilon_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Step 1} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_R$$

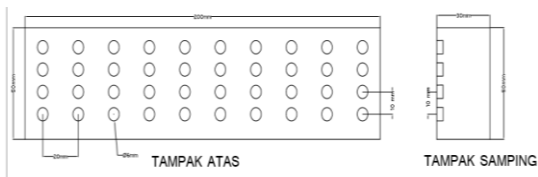
METODOLOGI

Variabel Penelitian

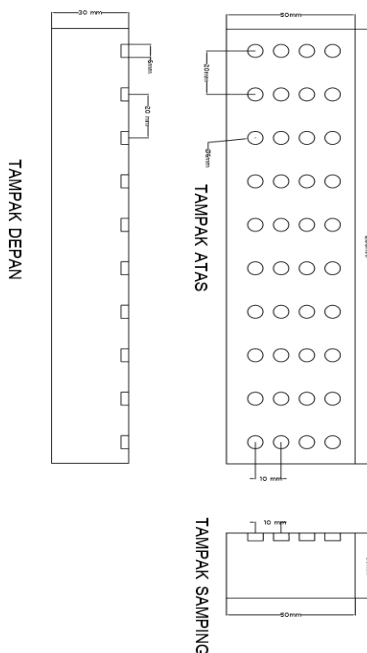
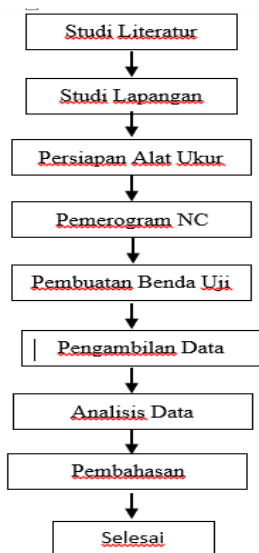
Adapun variabel atau parameter yang akan di uji dalam penelitian ini adalah jarak antara lubang dengan menggunakan metode pengeboran *Uni-Derectorial*.

Rancangan Penelitian

Gambar perancangan pengeboran benda kerja.



Gambar 1. Pengeboran Plat Aluminium



Gambar 2. Rancangan Benda Kerja

Prosedur Penelitian

Langkah-langkah penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Membuat tabel percobaan sesuai dengan perlakuan yang di tentukan

2. Mempersiapkan alat ukur yang akan digunakan
3. Pemrograman NC dengan metode *Unidirectorial* untuk pengeboran benda kerja
4. Memasang benda kerja pada mesin *milling* CNC dengan parameter yang di tentukan serta mulai pengeboran
5. Mengukur jarak anntara lubang satu dengan yang lainnya dari hasil pengeboran
6. Mencatat hasil pengukuran pada tabelrancangan penelitian yang sesuai pada posisi pengukuran

Tabel 1. Posisi Pemosisian (δ_x)

Benda	Hasil Perhitungan Rata-rata						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0,124	0,06	0,09	0,102	0,045	0,131	0,158
2	0,101	0,095	0,069	0,094	0,023	0,111	0,071
3	-0,191	0,043	0,043	0,064	-0,229	0,121	-0,18

Tabel 2. Posisi Pemosisian (δ_y)

Benda	Hasil Perhitungan Rata-rata						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0,015	-0,015	-0,025	-0,023	-0,023	-0,023	-0,048
2	0,045	-0,035	0	-0,033	-0,033	-0,04	-0,023
3	0,075	0,11	0,04	0,03	0,03	0,07	0,04

Tabel 3. Posisi Horizontal (δ_z)

Benda	Hasil Perhitungan Rata - rata Benda Kerja		
	1	2	3
1	0,015	-0,014	-0,003
2	-0,028	0,015	0,368
3	-0,018	0,033	0,003

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan Data

1. Pemosisian

$$\delta_z = \text{Posisi Aktual } (X_{ij}) - \text{Posisi Target } (X_0)$$

$$= 20,124 - 20 = 0,124 \text{ mm}$$

$$\delta_z \text{ rata rata} = 0.124 \text{ mm}$$

Perhitungan berikutnya sama dengan diatas.

2. Kelurusan Vertikal (δ_Y)

$$\begin{aligned} \delta_Y &= \text{kedalam aktual 1 } (Y_{a1}) - \text{kedalam aktual} \\ &\quad 2 (Y_{a2}) \\ &= 4,670 - 4,730 = -0,06 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\delta_Y \text{ rata-rata} = 0.015 \text{ mm}$$

Perhitungan selanjutnya sama dengan di atas.

3. Angular Sudut Pitch (ε_Y)

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Ya} &= \tan \frac{\text{keseluruhan vertikan } (\delta_Y)}{\text{jarak antar lubang } (X_2)} \cdot 3600 \\ &= \tan - \frac{0.06}{20.145} \cdot 3600 \\ &= -0,187 \text{ arc sec} \end{aligned}$$

$$\delta_Y \text{ rata-rata} = 0.047 \text{ arc sec}$$

4. Angular Sudut Yaw (ε_Z)

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Z0} &= \tan - \frac{0.540}{10.070} \cdot 3600 \\ &= -3,36 \text{ arc sec} \end{aligned}$$

$$\delta_Y \text{ rata-rata} = 3.36 \text{ arc sec}$$

5. Kelurusan Horizontal (δ_Z)

$$\begin{aligned} \delta_{Za} &= \text{keseluruhan horizontal aktual 1 } (Z_{a1}) - \\ &\quad \text{posisi target 1 } (Z_0) \\ &= 10,070 - 10 = 0.070 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\delta_Z \text{ rata-rata} = 0.015 \text{ mm}$$

Perhitungan matrik Transformasi Homogen untuk step 1 adalah :

Maka besar kesalahan gerak meja step 1 yang terjadi adalah :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0,047 & \cos(-0,211) & \cos 0,047 & \sin(0,047) & \sin 0,047 & 0,124 \\ \sin(-0,0211) & \cos(-0,0211) & 0 & 0 & 0,015 & 0 \\ -\sin 0,047 & \cos(-0,211) & 0 & \cos 0,047 & 0,015 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 20 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0,999 & 0,004 & 0,0005 & 0,124 \\ 0,004 & 0,999 & 0 & 0,015 \\ -0,0005 & 0 & 0,999 & 0,015 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 20 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 19,999 + & 0,124 \\ 0,073 + & 0,015 \\ -0,01 + & 0,015 \\ 1 & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20,123 \\ 0,088 \\ 0,005 \\ 1 \end{bmatrix}$$

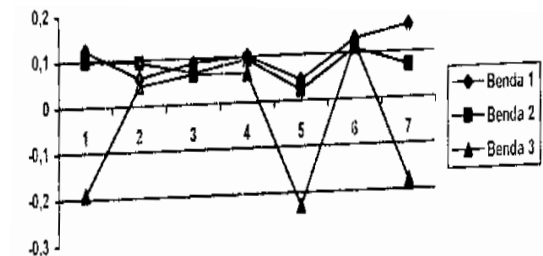
Maka besar kesalahan gerak meja step 1 yang terjadi adalah :

$$\begin{bmatrix} \delta_X \\ \delta_Y \\ \delta_Z \end{bmatrix}_T = \begin{bmatrix} 20,123 \\ 0,088 \\ 0,005 \\ 1 \end{bmatrix}_T - \begin{bmatrix} 20 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_T$$

Pembahasan Data Hasil Pengujian

Dari hasil pengukuran *uni-derectorial* benda 1,2 dan 3 di peroleh grafik rata-rata selisih pemosisian (δ_X), keseluruhan vertikal (δ_Y) dan selisih kelurusan Horizontal (δ_Z) sebagai berikut :

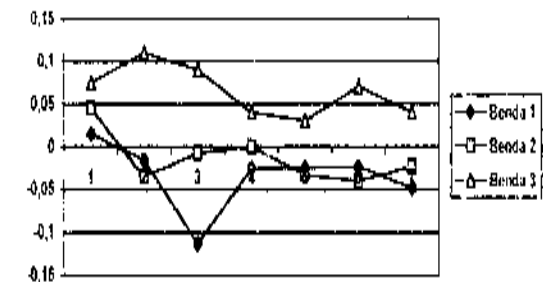
1. Pemosisian



Gambar 3. Grafik Selisih Pemosisian (δ_X)

Dari gambar 3 diperoleh hasil maksimum dan minimum masing-masing benda. Pada kurva benda 1 adalah 0,158 mm pada posisi 7 dan 0,06 mm pada posisi 2, pada kurva benda 2 adalah 0,111 mm pada posisi 6 dan 0,023 mm pada posisi 5 dan pada kurva benda 3 adalah 0,121 mm pada posisi 6 dan -0,229 mm pada posisi 5.

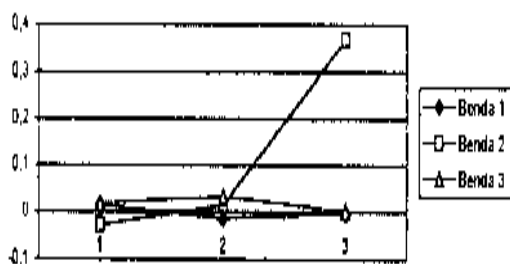
2. Kelurusan Vertical (δ_Y)



Gambar 4. Grafik Kelurusan Vertical (δ_Y)

Dari gambar 4 diperoleh nilai maksimum dan minimum masing-masing benda. Pada kurva benda 1 adalah 0,015 mm pada posisi 1 dan -0,040 mm pada posisi 6 dan pada kurva benda 3 adalah 0,110 mm pada posisi 2 dan 0,030 pada posisi 5

3. Grafik Selisih Kelurusan Horizontal (δ_z)



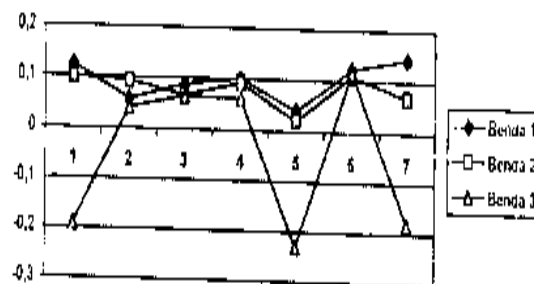
Gambar 5. Grafik Kelurusan Horizontal (δ_z)

Dari gambar 5 diperoleh nilai maksimum dan minimum masing-masing benda. Pada kurva benda 1 adalah 0,015 mm pada posisi 1 dan -0,014 mm pada posisi 2, pada kurva benda 2, adalah 0,368 mm dan pada posisi 3 dan -0,028 mm pada posisi 1 dan pada kurva benda 3 adalah 0,033 pada posisi 2 dan -0,018 mm pada posisi 1.

Berdasarkan gambar 3, 4, dan 5, didapatkan penyimpangan yang tidak sama dari posisi setiap target, karena pada setiap posisi aktual penempatan rata-rata lebih besar dari posisi setiap target sehingga dari harga rata-rata dan sebaran yang di tampilkan dalam grafik selalu terjadi kenaikan dan penurunan setiap posisi.

Data Hasil Perhitungan

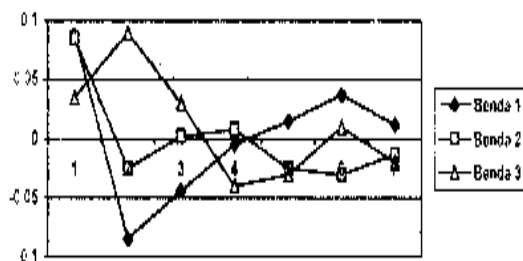
1. Selisih Pemosisian (δ_x)



Gambar 6. Grafik Selisih Pemosisian (δ_x)

Dari gambar 6 di peroleh nilai maksimum dan minimum masing-masing benda. Pada kurva benda 1 adalah 0,144 mm pada posisi 7 dan 0,059 mm pada posisi 2, pada kurva benda 2 adalah 0,110 pada posisi 6 dan 0,022 mm pada posisi 5 dan pada kurva benda 3 adalah 0,120 mm pada posisi 6 dan -0,230 mm pada posisi 5.

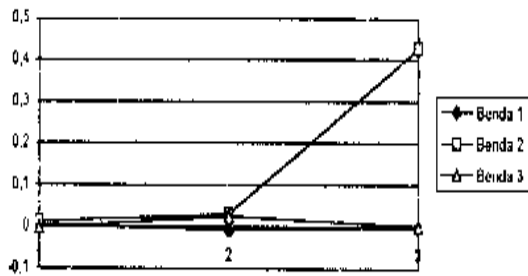
2. Data Hasil Pengukuran



Gambar 7. Grafik Kelurusan Vertikal (δ_y)

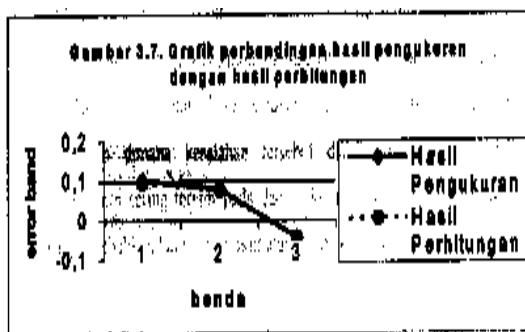
Dari gambar 7 diperoleh nilai maksimum dan minimum masing-masing benda. Pada kurva benda 1 adalah 0,088 mm pada posisi 1 dan -0,084 mm pada posisi 2, pada kurva benda 2, adalah 0,085 mm pada posisi 1 dan -0,030 mm pada posisi 6 kurva benda 3 adalah 0,090 mm pada posisi 2 dan -0,040 mm pada posisi 4.

3. Selisih Kelurusan Horizontal (δ_z)



Gambar 8. Grafik Selisih Kelurusan Horizontal (δ_z)

Dari gambar 8 diperoleh nilai maksimum dan minimum masing-masing benda. Pada kurva benda 1 adalah 0,005 mm pada posisi 1 dan -0,008 mm pada posisi 2, pada kurva benda 2 adalah 0,428 mm pada posisi 3 dan 0,012 mm pada posisi 1 dan kurva benda 3 adalah 0,025 mm pada posisi 2 dan -0,002 mm pada posisi 1.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Hasil Pengukuran Horizontal

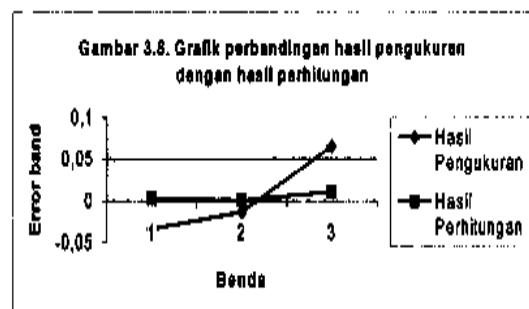
Data Perbandingan Hasil Pengukuran dengan Perhitungan

1. Selisih Pemosisian

Dari gambar 9 terlihat bahwa data kesalahan pemosisian hasil perhitungan antara benda 1,2, dan 3 cukup sesuai dengan data hasil pengukuran benda 1,2 dan 3. Sebagian besar data hasil perhitungan berada dalam daerah sebaran data pengukuran ($\pm 0,05$ mm) sehingga dapat dikatakan bahwa data hasil

perhitungan melebihi tingkat kesalahan yang di iijinkan ($\pm 0,05$ mm). adapun sumber kesalahannya antara lain kesalahan *angular* (*pitch* dan *yaw*) arah sumbu x yang diperoleh dari hasil pengukuran, model kesalahan *pitch ballscrew* sumbu x , model keausan *ballscrew* sumbu x dan kesalahan kotak akibat titik kontak dan ketidaksejajaran antara lintasan luncur dengan *lead screw*.

2. Kelurusan Vertical



Gambar 10 Grafik Perbandingan Hasil Pengukuran Vertikal

Gambar 10 menunjukkan adanya perbandingan kelurusan vertikal antara hasil pengukuran dan hasil perhitungan, baik pada benda 1 maupun benda 2 dan benda 3. Penyebab terjadinya perbedaan nilai ini disebabkan oleh kesalahan *angular roll* yang tidak terukur dan model keausan dari lintasan luncur yang belum maksimal serata sumber kesalahan lain yang belum teridentifikasi, model kesalahan gerak akibat titik kontak dan ketidaksejajaran antara lintasan luncur dengan *leadscrew*. Serta adanya kesalahan dimana kesalahan tersebut dapat terjadi karena proses permesinan sering terjadi pada daerah kerja atau dari hasil pengukuran yang disebabkan karena alat ukur atau benda kerjanya.

3. Selisih Kelurusan Horizontal

Hasil perhitungan kelurusan gerak meja mesin milling ditunjukkan pada gambar 3.9 dimana hasil perhitungan kelurusan gerak horizontal masih berada di luar garis sebaran data pengukuran ($\pm 0,05$ mm). Hal ini di akibatkan oleh kesalahan *angular roll* yang tidak terukur dan model keausan dari lintasan lurus yang belum maksimal serta sumber kesalahan lain yang belum teridentifikasi serta model kesalahan gerak akibat titik kontak dan ketidaksejajaran antara lintasan lurus dengan *leadscrew*.

Berdasarkan gambar 7, 8, dan 9, didapatkan penempatan penyimpangan yang tidak sama dari posisi setiap target, karena pada setiap posisi aktual dan global penempatan rata-rata lebih besar dari posisi target sehingga dari harga rata-rata dan sebaran yang ditampilkan dalam grafik yang ditampilkan dalam grafik selalu terjadi kenaikan dan penurunan setiap posisi.

Dari pengujian kesalah gerak meja pada sumbu-x dengan sistem *unidirectional* dan dengan metode matriks transformasi homogen yang telah disajikan dalam bentuk grafik. Di peroleh besar pemosisian benda uji melebihi standartd pemosisian yang telah diijinkan ($\pm 0,05$ mm). oleh karena itu pemosisian pada mesin perkakas NC terjadi kesalahan antara lain :

a. Kesalahan karena keausan komponen mesin utama pada gerakan bantalan yang menghambat kelancaran gerak meja mesin.

b. Kesalahan karena terjadi kesalahan *backlash* akibat kelonggaran pada *leadscrew* (poros ulir) saat pengujian yang kemungkinan disebabkan karena beban awal tinggi dan keausan.

c. Kesalahan karena gerak *angular* yang terjadi karena selama perpindahan meja di sepanjang *slide way* yang terdiri dari *pitch, yaw, dan roll*.

d. Kesalahan karena kelurusan permukaan lintasan lurus pada mesin perkakas NC yaitu kesalahan yang dianggap sebagai penyimpangan gerakan pada sumbu lurus sehingga berpengaruh pada ketelitian pada meja terutama kelurusan gerakannya.

e. Kesalahan karena kekasaran permukaan, biasanya mempengaruhi kekasaran gerakan bantalan pada lintasan lurus terutama pada gesekan yang terjadi pada saat meja bergerak.

f. Kesalah kinematik yaitu kesalahan yang terjadi pada gerak suatu sumbu yang disebabkan oleh ketidaklurusan atau ukuran komponen yang tidak teliti, sehingga dimensi komponen-komponen pada suatu sumbu gerak yang tidak teliti dapat menyebabkan pahat atau benda kerja bergeser dari posisi yang seharusnya.

Kesalahan akibat ekspansi panas yang terjadinya perbedaan perubahan temperatur pada suatu komponen mesin perkakas sehingga terjadi penyebaran panas yang tidak merata pada mesin, komponen yang lain dan pahat, dengan demikian mengakibatkan berubahnya ketelitian mesin.

SIMPULAN

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengujian ketelitian pemosisian gerak meja pada arah sumbu x dengan sistem *uni-directorial* dan perhitungan dengan menggunakan metode Matriks Transformasi Homogen diperoleh hasil yang tidak jauh berbeda dimana kedua metode ini diperoleh nilai yang keluar dari batas yang diijinkan yaitu $\pm 0,05$ mm.
2. Ketelitian gerak meja membentuk kesalahan komulatif yang disebabkan oleh :
 - a. Kesalahan karena keausan komponen mesin terutama pada gerakan bantalan.
 - b. Kesalahan karena terjadinya *back-lash* pada *lead screw* (poros ulir).
 - c. Kesalahan karena gerak *angular* selama perpindahan meja.
 - d. Kesalahan karena gerak permukaan lintasan lurus baik vertikal maupun horizontal.
 - e. Kesalahan karena kerusakan permukaan.
 - f. Kesalahan karena gerak suatu sumbu yang disebabkan karena ketidaklurusan dan ukuran komponen.
3. Penentuan sistem koordinat lokal sangat berpengaruh terhadap ketelitian hasil pemodelan kesalahan pemosisian.
4. Kesalahan gerak *angular* (*pitch* dan *yawing*) berpengaruh langsung pada

kesalahan pemosisian sedangkan pada kesalahan gerak (vertikal dan horizontal) dapat diabaikan.

5. Hasil perhitungan kesalahan kelurusan gerak akibat ketidaksejajaran antara lintasan lurus dengan *leadscrew* relatif kecil bila dibandingkan dengan hasil pengukuran kelurusan gerak.

DAFTAR PUSTAKA

- Alat Ukur Linier**, Laboratorium Metrologi Industri, Jurusan Teknik Mesin, ITB, Bandung
- Bagiasna Komang, **Pengantar Pengujian Geometri Mesin Perkakas**, Laboratorium Metrologi dan Industri Jurusan Teknik Mesin, ITB, Bandung
- Fridmen, Mair, Strabe9 A, 5400 Hiller, 1998, **Petunjuk Pemrograman Pelayanan EMCO TU-3A**, Austria
- Rochim, Taufik, 1992, **Spesifikasi Geometri Metrologi Industri dan Kontrol Kualitas**, ITB, Bandung
- Silalahi, Morlan, 1998, **Kaji Awal Sumber Kesalahan Pemosisian Meja Machining Center Dengan Metode Matriks Transformasi Homogen**, ITB, Bandung.