

## PENINGKATAN KEAKURASIAN GERAKAN PADA *PROTOYPE* MESIN CNC *MILLING 3-AXIS*

Eri Yulius Elvys<sup>1,a\*</sup>  
Sirama<sup>2,b</sup>

<sup>1,2</sup> Akademi Teknik Soroako

Program Studi Perawatan dan Perbaikan Mesin Jurusan Teknik Mesin  
Jalan Sumantri Brojonegoro No 1 Sorowako, Sulawesi Selatan, Indonesia. 92984

<sup>a</sup>eyels@ats-sorowako.ac.id

<sup>b</sup>sirama@ats-sorowako.ac.id

### Abstrak

Untuk memenuhi kebutuhan mesin perkakas *CNC* bagi *workshop* industri kecil dan atau sebagai media pembelajaran pada institusi pendidikan, maka dikembangkan *prototype* mesin *CNC milling 3-axis* yang berukuran kecil (mini) dengan menggunakan sistem kontrol terbuka (*open loop control sistem*). Sistem kontrol seperti ini mudah dipengaruhi oleh gangguan dari luar seperti *backlash*, gaya potong, defleksi getaran dll), sehingga dapat mempengaruhi ketelitian gerakan meja mesin. Penelitian ini bertujuan mengembangkan metode kompensasi (*compensation*) perintah terhadap *motor stepper* sebagai motor penggerak, untuk meningkatkan ketelitian gerakan mesin. Ketidaktelitian gerakan mesin *CNC Milling* dalam proses pemotongan disebabkan oleh kombinasi beberapa sumber kesalahan (*error*) yang dimensinya hanya dapat diketahui setelah proses pemesinan dilakukan. Dalam penelitian ini pengujian proses pemesinan pada benda kerja aluminium dilakukan dengan beberapa variasi kondisi pemotongan yaitu kedalaman potong, lebar pemotongan dan kecepatan pemakanan, untuk mengidentifikasi dan memodelkan pola penyimpangan dimensi hasil penggeraan. Data pemodelan tersebut digunakan sebagai acuan untuk memberikan kompensasi perintah bagi proses pemesinan berikutnya, sehingga penyimpangan dimensi menjadi lebih kecil dan sebaliknya ketelitian gerakan mesin menjadi meningkat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata penyimpangan dimensi akibat proses pemesinan pada arah sumbu X sebesar +0,028 mm dan arah sumbu Y sebesar +0,021 mm. kompensasi perintah yang diberikan melalui modifikasi program *CNC* (*G-code*) dan melalui pengaturan jumlah step per unit *motor stepper*, dapat memperkecil penyimpangan gerakan sumbu X dan sumbu Y hingga dibawah 0,005 mm.

**Kata kunci :** *error, open loop control system, compensation, CNC*

## **ABSTRACT**

In order to meet the needs of CNC machine tools for small industrial workshops or for media learning in educational institutions, a prototype of small 3-axis CNC milling machine using an open loop control system was developed. Because it is an opened loop, the control system is easily affected by outside interference originating from the controller, the disadvantage of the mechanical construction of the machine as well as the effects of the cutting process, so the accuracy of the movement was also affected. The compensation method was developed in this study, to improve the accuracy of the movement system. Inaccuracy of CNC machining processes caused by a combination of various sources of error and the magnitude can only be known after the machining process done. The experiment is conducted by testing the machining process on the aluminum workpiece with some variation of machining conditions (cutting depth, cutting width and feeding), to identify and modeling the dimensional deviations. Modeling data is used as a reference to compensate the next machining processes, so the error can be reduced, or in other word, the accuracy of system is increased. The results showed that the major source of the error from the disadvantage of the mechanical construction of the machine due to inaccuracy in the design and manufacturing process. The largest error on the machining process proceeds is +0.028 mm for X-axis and +0.021 mm for Y-axis. Compensation method given by modification CNC part program (G-code) and by setting the number of steps per unit stepper motor, can minimize error in X-axis and Y-axis to less than 0.005 mm.

**Key Words :** *error, open loop control system, compensation, CNC*

## **PENDAHULUAN**

Perkembangan teknologi proses pemesianan saat ini menuntut penggunaan sistem kendali *numeric* dengan komputer pada mesin-mesin perkakas *CNC* (*computer numerical control*). Mesin perkakas *CNC* yang ada saat ini umumnya berukuran besar, sehingga untuk membuat komponen yang berukuran kecil tidak efisien dan biaya produksinya menjadi lebih tinggi. Selain itu pengadaan mesin perkakas *CNC Milling* memerlukan biaya investasi yang sangat besar, sehingga kadang tidak terjangkau oleh workshop atau laboratorium pemesianan pada institusi pendidikan untuk sarana praktik.

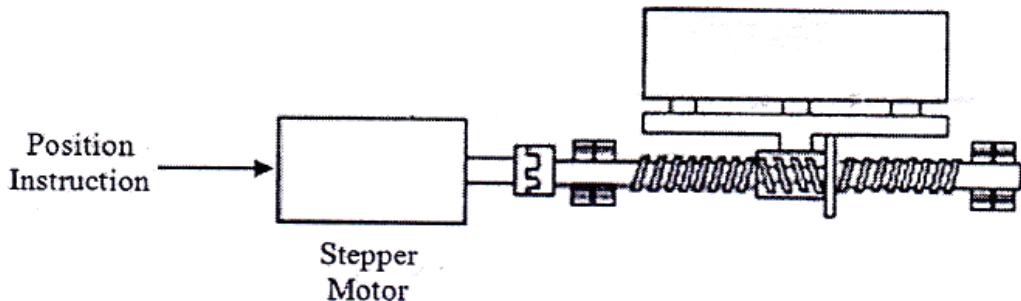
[1] Ditinjau berdasarkan teknik pengontrolannya, terdapat beberapa jenis sistem kendali mesin perkakas *CNC*, diantaranya sistem kontrol *loop* terbuka (*open loop control system*) dan sistem kontrol *loop* tertutup (*closed loop control system*). Sistem kontrol terbuka menggunakan penggerak berupa *motor stepper* yang merupakan sistem kendali murah dan mudah, dibanding sistem kontrol tertutup. Pada sistem kontrol terbuka tidak digunakan alat ukur posisi yang mampu memberikan umpan balik (*feed back*) seperti pada sistem kontrol tertutup. Karena merupakan *loop* kontrol yang terbuka, sehingga sistem ini mudah dipengaruhi oleh gangguan dari luar, dan ketelitian gerakan (kesalahan jarak /pengaturan posisi) juga terpengaruh.

Di laboratorium *CNC* Akademi Teknik Soroako, terdapat mesin perkakas *CNC Milling retrofit* yang menggunakan sistem kontrol *loop* terbuka. Untuk mengoperasikan mesin tersebut dilakukan riset peningkatan ketelitian gerakan. Riset yang dilakukan adalah mengkalibrasi gerakan jumlah *step motor stepper* dan pengaturan *backlash* pada setiap *axis*. Riset yang dilakukan sudah berhasil, namun ketelitian gerakannya masih terbatas.

Berdasarkan permasalahan dan kebutuhan tersebut, dalam penelitian ini dikembangkan *prototype* mesin *milling mini CNC 3-axis* yang berukuran kecil dengan kontroller yang berbasis *Personal Computer* atau *PC*.*Prototype* yang dirancang dan dibuat di laboratorium *CNC* Akademi Teknik Soroako dengan menggunakan sistem kontrol *loop* terbuka, dan untuk meningkatkan ketelitian gerakannya, dikembangkan metode kompensasi perintah terhadap motor penggerak untuk meminimalisir pengaruh gangguan dari luar yang dapat menyebabkan ketidaktelitian gerakan.

Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi dan memodelkan ketidaktelitian gerakan serta mengembangkan metode kompensasi untuk meningkatkan ketelitian gerakan mesin *milling CNC* yang menggunakan sistem kontrol *loop* terbuka.

Pengembangan *prototype* mesin *milling CNC* ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pertumbuhan dan penguasaan teknologi manufaktur mesin perkakas *CNC* dalam negeri, khusunya untuk dipakai pada *workshop industry* kecil dan menengah atau untuk media pembelajaran pada institusi pendidikan dengan harga terjangkau.

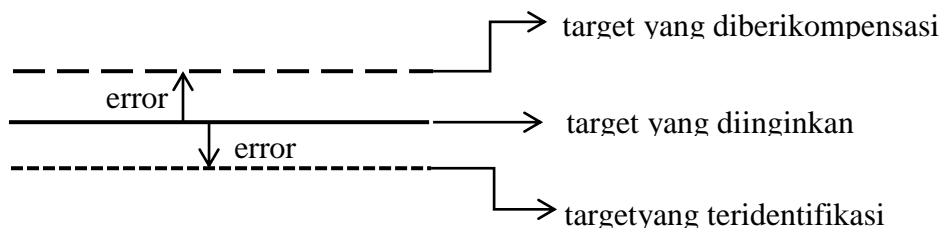


Gambar 1. Diagram *Open Loop Control Sistem* (Suh, et.al., 2008)

Motor akan mulai berputar bila pulsa perintah (*command pulse*) diberikan dan berhenti bila pulsa yang diberikan tidak ada lagi. Jarak pergeseran yang ditentukan oleh jumlah pulsa perintah yang diberikan, sedangkan kecepatan gerakan ditentukan oleh frekuensi pulsa perintahnya.

Salah satu tujuan penggunaan sistem kontrol *CNC* pada proses permesinan adalah agar diperoleh ketelitian yang tinggi pada gerakan relatif antara pahat dan benda kerja. Tetapi dalam prakteknya masih sering dijumpai adanya kesalahan (*error*) yang menyebabkan perbedaan bentuk dan dimensi antara profil yang diprogramkan dengan profil yang dihasilkan. [2-5] Sumber kesalahan tersebut dikelompokkan menjadi tiga kategori, yaitu (1) berasal dari *controller* dan *driver*-nya, (2) kelemahan dari sisi mekanis kontruksi mesinya, misalnya ada keterlambatan gerak balik (*backlash*), ketidak lurusan ulir penggerak dan sebagainya, serta (3) efek dari proses pemotongan, misalnya defleksi pahat akibat gaya potong, keausan pahat, dan sebagainya. [6-11] Pada dasarnya ketidak telitian gerakan dalam proses permesinan di mesin *CNC* disebabkan oleh kombinasi ketiga sumber kesalahan tersebut, dan besarnya kesalahan hanya dapat diketahui setelah proses permesinan dilakukan.

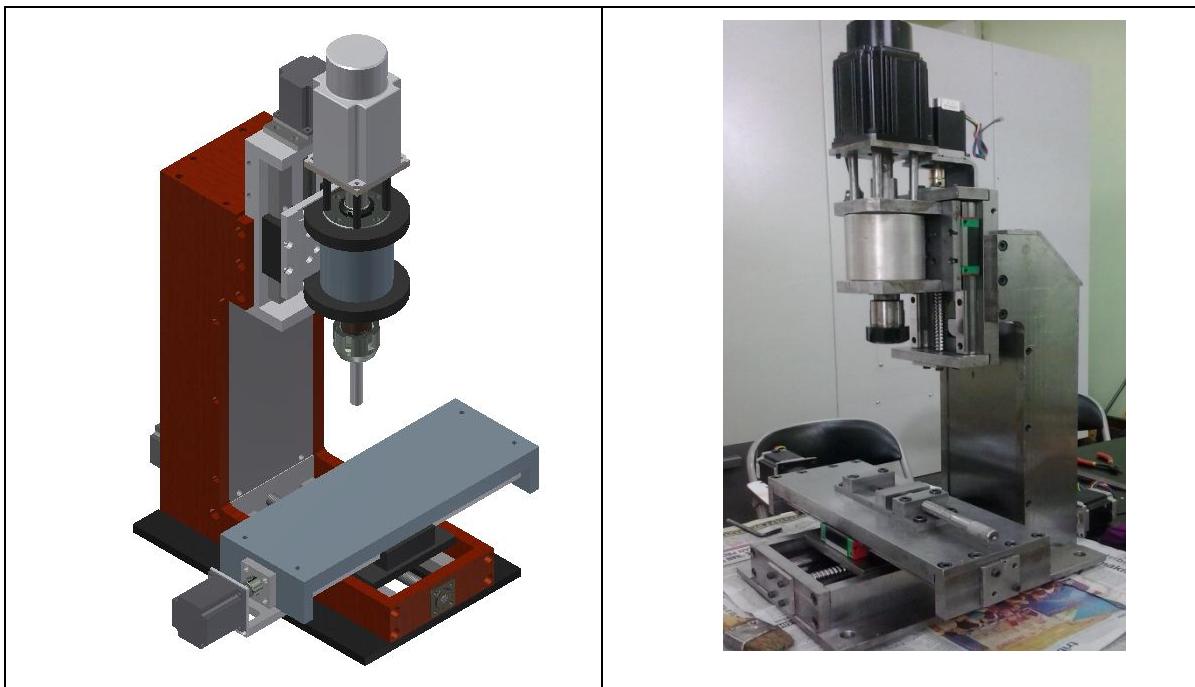
Dalam penelitian ini dikembangkan penggunaan metode kompensasi perintah untuk memperkecil penyimpangan (*error*). Melalui pengujian permesinan dapat diidentifikasi besarnya penyimpangan dimensi aktual terhadap dimensi yang diinginkan (diprogramkan). Maka untuk proses-proses permesinan selanjutnya diberikan kompensasi sesuai dengan besarnya *error* tersebut tetapi dengan arah yang berlawanan (Lihat gambar 2).



Gambar 2. Metode penerapan kompensasi

## METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah metode experiment. Penelitian dilakukan pada mesin *milling CNC 3-axis* yang dirancang dan dibuat di laboratorium CNC Produksi Akademi Teknik Soroako. Hasil gerakan pemotongan diukur dan dimodelkan untuk mendapatkan nilai kompensasi yang dibutuhkan.



Gambar 3 .Mesin *milling CNC* mini

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Prototype Milling CNC Mini

1	Dimensi <i>overall</i>	515×425×685 mm
2	<i>Travel X,Y,Z</i>	200,150,120 mm
3	Dimensi meja	380×135 mm
4	<i>Feed rates</i>	1-1500 mm/menit
5	Putaran spindle	100-2500 rpm
6	<i>Collet</i>	ER 20 diameter 4-13 mm
7	<i>Controller</i>	PC/notebook dengan <i>software Artsoft Mach3</i> .
8	<i>Motor Spindle</i>	Motor Stepper

9	<i>Motor Axis</i>	<i>Motor Stepper</i>
---	-------------------	----------------------

Alat ukur yang digunakan dalam penelitian adalah *Dial indicator* yang mempunyai tingkat ketelitian 0,001 mm dan *dial stand, Micrometer Outside* dengan tingkat ketelitian 0,001 mm range 0-25 mm, *Precision square* dan *Spirit level*.

Prosedur penelitian :

1. Melakukan *Levelling* terhadap meja mesin dengan menggunakan *spirit level*.
2. Pengukuran dan penyetelan ulang ketelitian geometrik mesin secara manual dengan menggunakan *dial indicator* dan *precision square* untuk mengurangi penyimpangan kelurusan dan ketegak lurusan antara sumbu yang disebabkan oleh ketidak telitian proses perakitan.
3. Pengukuran ketelitian gerakan tanpa beban pemotongan dengan menggunakan *dial indikator*.
4. Pengukuran ketelitian gerakan dengan beban pemotongan, melalui pengukuran produk hasil proses permesinan. Melalui pengujian ini dapat diketahui pola penyimpangan (*error*) untuk dipakai sebagai acuan pemberian kompensasi perintah.
5. Pengukuran ketelitian gerakan dengan beban pemotongan serta dengan menggunakan kompensasi perintah.

## **HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**

*Levelling* mesin dilakukan untuk memastikan bahwa meja mesin dalam posisi horizontal. Hasil *levelling* mesin hanya dapat dilihat secara visual pada *spirit level*.

Tabel 2. Hasil pengukuran ketelitian geometrik kontruksi mesin.

No.	Item Pengukuran	Hasil
1.	Penyimpangan kelurusan gerak spindle arah vertikal (bidang pengukuran XZ)	0,01 mm/50 mm
2.	Penyimpangan kelurusan gerak spindle arah vertikal (bidang pengukuran YZ)	0,01 mm/50 mm
3.	Penyimpangan kelurusan gerak spindle arah horisontal (bidang pengukuran XY)	0,02 mm/90 mm
4.	Penyimpangan kesejajaran meja terhadap gerak spindle arah sumbu X	0,06 mm/180 mm
5.	Penyimpangan kesejajaran meja terhadap gerak spindle arah sumbu X	0,03 mm/100 mm

Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran ketelitian geometrik kontruksi mesin setelah dilakukan penyetelan. Ketidak telitian terjadi akibat kesalahan pada proses manufaktur komponen-komponen mesin serta proses perakitanya. Kesalahan yang menonjol terdapat pada kesejajaran meja terhadap gerak spindle dalam arah horisontal (arah sumbu X dan Y), disebabkan kesalahan desain, plat meja mesin mengalami defleksi.

Data mekanisme penggerak sumbu mesin :Motor *stepper* 200 step /putaran ( $1,8^\circ/\text{step}$ ), Pengaturan *micro step driver* motor *stepper* 1/10 sehingga jumlah step per putaran motor menjadi 2000 step/putaran ( $1,8^\circ/\text{step}$ ). Ulin penggerak yang digunakan adalah *ball screw* dengan *lead* 10 mm (*double start*). Transmisi *belt* menggunakan *timing belt* dengan rasio 2:1. Jumlah step per unit motor *stepper* 400 step/mm.2

Data pada Tabel 3 (sebelum kalibrasi) menunjukkan adanya penyimpangan gerakan ketika mesin digerakkan tanpa beban pemotongan, sehingga perlu dilakukan kalibrasi dengan mengatur jumlah step per unit motor *stepper*.

- Sumbu X : Step per unit = 398,8035892 step/mm
- Sumbu Y : Step per unit = 401,0031092 step/mm

Hasil pengukuran gerakan tanpa beban setelah dilakukan kalibrasi ditunjukkan pada Tabel 2 dengan jarak pengukuran 10 mm (setelah kalibrasi).

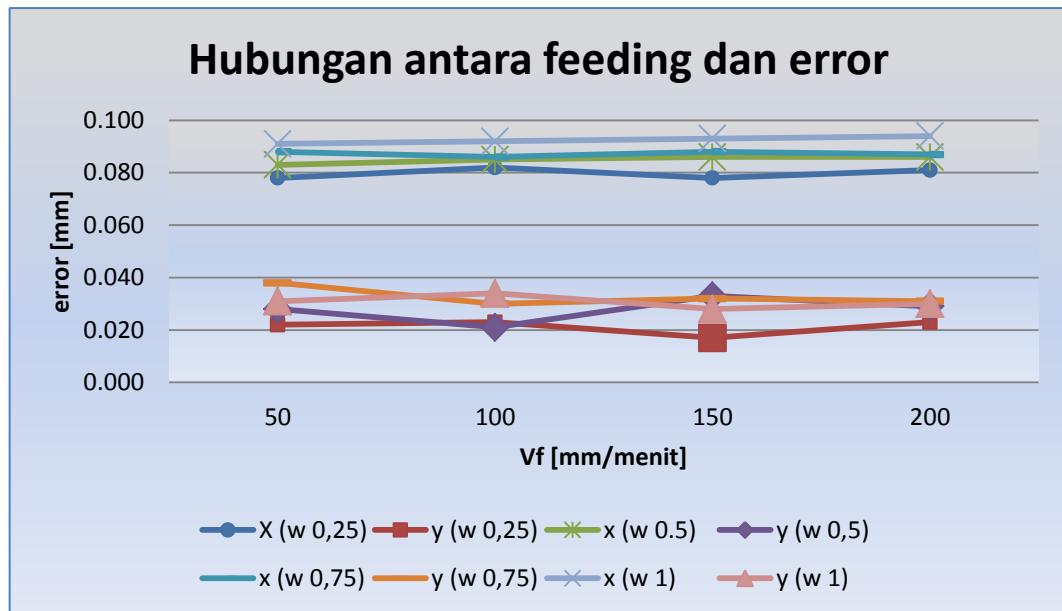
Tabel 3. Hasil pengukuran ketelitian gerakan tanpa beban.

No	Pengukuran	Kalibrasi	
		Sebelum	Sesudah
1	Penyimpangan gerakan arah sumbu X	0,03 mm	0,00 mm
2	Penyimpangan gerakan arah sumbu Y	- 0,03 mm	0,00 mm
3	Penyimpangan gerakan arah sumbu Z	0,00 mm	0,00 mm

Pengujian pemesinan dilakukan pada material aluminium dengan beberapa variasi kondisi pemesinan, untuk mengetahui ketelitian gerakan mesin ketika terkena beban pemotongan.

Data pemesinan : Tools: end mill cutter HSS diameter 10 mm, Cutting Speed : 60 mm/menit, Putaran spindel : 1910 rpm, Kedalaman pemotongan (a) : 2 mm, Lebar pemotongan (w) : 0,25 ; 0,5 ; 0,75 ; 1 mm, Kecepatan makan ( $v_f$ ) : 50 ; 100 ; 150 ; 200 mm/menit, Gerakan pemakanan : *side milling* dengan arah pemakanan *up cut milling* (*conventional milling*).

Bentuk profil yang dibuat pada pengujian adalah profil bujur sangkar dengan panjang sisi 50 mm dan dengan kedalaman 2 mm. dimensi profil diukur menggunakan *micrometer* dengan kecermatan 0.001 mm sehingga diketahui penyimpangan (*error*) yang terjadi. Hasil pengujian disajikan dalam grafik pada Gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Grafik hasil pengujian ketelitian gerakan pemotongan

Data hasil pengujian diperoleh rata-rata penyimpangan (*error*) dan arah sumbu X sebesar 0,086 mm sedangkan dalam arah sumbu Y sebesar 0,028 mm. penyimpangan arah sumbu X relatif lebih besar dibanding arah sumbu Y karena jangkauan pergeseran meja lebih panjang sehingga defleksi yang terjadi juga lebih besar. Dari hasil pengujian dapat dilihat pula bahwa variasi lebar pemotongan dan kecepatan pemakanan tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap besarnya penyimpangan dimensi, perbedaan penyimpangan tebesar hanya 0,017 mm.

Data penyimpangan (*error*) yang diperoleh dari pengujian tahap 4 digunakan sebagai acuan pemberian kompensasi perintah. Pengujian penggunaan kompensasi dilakukan pada salah satu parameter proses pemesinan, yaitu kedalaman pemotongan (*a*) 2 mm dan lebar pemotongan (*w*) 0,25 mm. Dalam penelitian ini dilakukan percobaan penggunaan kompensasi yang diberikan dengan 2 metode yang berbeda, yaitu:

A. Modifikasi program *CNC (G-Code)*.

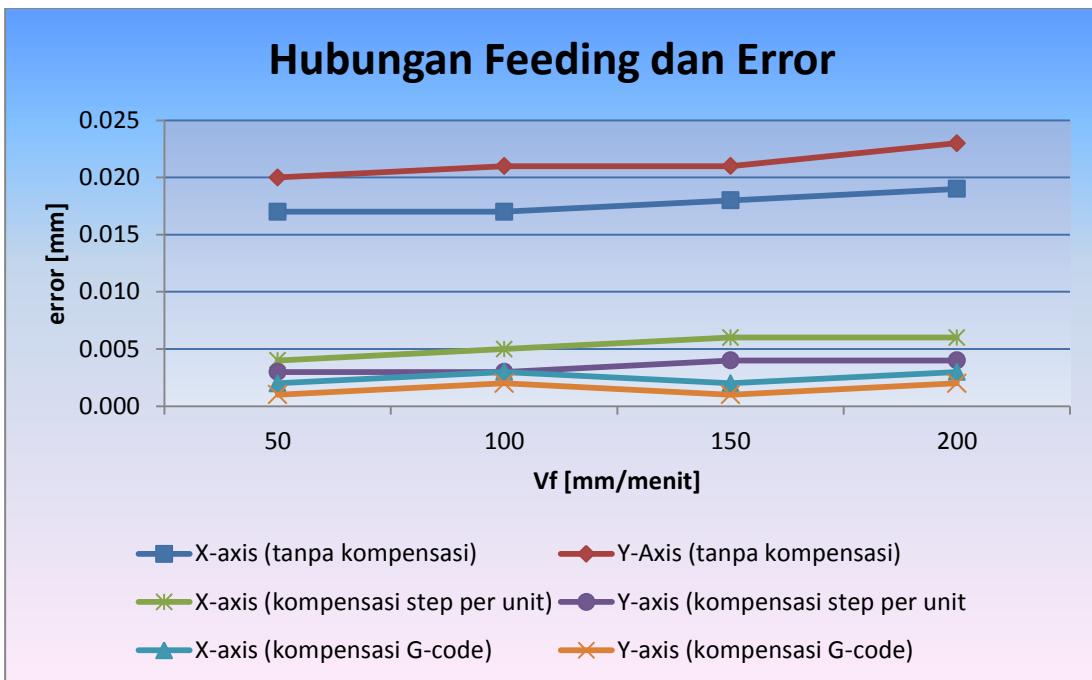
Metode ini digunakan dengan cara mengedit program *CNC* yang digunakan pada pemesinan sebelumnya, yaitu dengan menambahkan atau mengurangi koordinat titik tujuan gerakan pahat dengan besarnya *error* yang sudah teridentifikasi sebelumnya.

B. Pengaturan jumlah step per unit motor *stepper*.

Metode ini dilakukan dengan mengatur kembali jumlah step per unit motor *stepper* berdasarkan penyimpangan yang sudah teridentifikasi sebelumnya.

- Sumbu X: Step per unit = 401,0212113 step/mm
- Sumbu Y: Step per unit = 401,0423531 step/mm

Hasil pengujian ketelitian gerakan pemesinan (dengan beban pemotongan) menggunakan kompensasi perintah ditunjukkan Gambar 5 di bawah.



Gambar 5. Grafik perbandingan ketelitian gerakan pemotongan

Dari Gambar 5 grafik perbandingan ketelitian gerakan pemotongan tanpa dan dengan kompensasi dapat dilihat bahwa penggunaan kedua metode kompensasi, dapat memperkecil penyimpangan (*error*). Dengan metode modifikasi *G-Code*, rata-rata besarnya penyimpangan arah sumbu X 0,003 mm, dan arah sumbu Y 0,002 mm, sedangkan dengan metode pengaturan step per unit, rata-rata penyimpangan pada arah sumbu X 0,005 mm, dan arah sumbu Y 0,004 mm.

## KESIMPULAN

Dalam penelitian ini dikembangkan metode kompensasi perintah untuk meningkatkan ketelitian gerakan *open loop control sistem* pada mesin milling CNC mini yang dibuat di laboratorium CNC Akademi Teknik Soroako. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata penyimpangan dimensi hasil proses pemesinan untuk arah sumbu X sebesar +0,028 mm dan arah sumbu Y sebesar +0,021 mm. Kompensasi perintah yang diberikan melalui modifikasi program CNC (*G-Code*) dan melalui pengaturan jumlah step per unit motor *stepper*, dapat memperkecil penyimpangan gerakan sumbu X dan sumbu Y hingga dibawah 0,005 mm (5 $\mu$ m).

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zhu, S., Ding, G., Qin, S., Lei, J., Zhung, L. and Yan, K., 2011, Integrated Geometric Error Modeling, Identification and Compensation of CNC Machine Tools, International Journal of Machine Tools & Manufacture 52 (2012) 24-29

- [2] Ignatius Aris Hendaryanto., 2013, Identifikasi, Pemodelan dan Kompensasi Ketidaktelitian *Open Loop Control System* Pada Mesin Milling CNC Mini, Thesis, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [3] Cui, G., Lu, Y., Li, J., Gao, D. and Yao, Y., 2011, Geometric error Compensation Software Sistim for CNC Machine Tools Based on NC Program Reconstructing, *International Journal of Advance Manufacturing Technology* DOI 10.1007/s00170-011-3895-0.
- [4] Groover, M.P., 2007, *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and sistims*, Third Edition, Jhon Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- [5] Karnadhi, G., 2012, *Integrasi Sistem CAD/CAM pada PC-Based CNC dengan Pengembangan Post Processor Mastercam V9 untuk Artsoft Mach3 CNC Controller*, Skripsi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [6] Lo, C. and Hsiao, C., 1997, A Methode Of Tool Path Compensation for Repeated Machining process, *International Journal of Machine Tools & manufacture* Vol.38 N0.3 pp.205-213, 1998.
- [7] Prakosa, T., Wibowo, A., Yuwana, Y., dan Nurhadi, I., 2010, Pengujian Ketelitian Geometrik Mesin Perkakas CNC Milling Vertikal Buatan Dalam Negeri, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9*, Palembang.
- [8] Rochim, T., 1983, *Teori dan Teknologi Proses Pemesinan*, Higher Education Development Support Project, FTI-ITB, Bandung.
- [9] Sivarao, Dimin F., Anand, T.J.S., Kamely, A. and Kamil, 2010, Investigation of Tangential Force, Horsepower and Material Removal Rate Associating HAAS CNC Milling, A16061-T6511 Work Material & TiA1N Coated End Mill Tool, *International Journal of Basic & Applied sciences IJBAS-IJENS* Vol.10 No.04.
- [10] Suh, S.H., Kang, S.K., Chung, D.H. and Stroud, I., 2008, *Theory and Design of CNC sistim (Springer Series in Advanced manufacturing)*, Springer-Verlag, London.
- [11] Taniguchi, Norio, 1983, Current Status in, and Future Trends of Ultraprecision Machining and Ultrafine materials Processing, *Annals of the CIRP*, Volume 32.