Agustinus Winarno

Tenaga Pengajar (Dosen)
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi
Universitas Gadjah Mada
winarno_agustinus@ugm.ac.id

Sus Lasiyah

Mahasiswa D3
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi
Universitas Gadjah Mada
sus.lasiyah@mail.ugm.ac.id

Ignatius Aris Hendaryanto

Tenaga Pengajar (Dosen)
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi
Universitas Gadjah Mada
aris.hendaryanto@ugm.ac.id

**Fransiskus Xaverius
Sukidjo**

Tenaga Pengajar (Dosen)
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi
Universitas Gadjah Mada
fxsukidjo@ugm.ac.id

Benidiktus Tulung Prayoga

Tenaga Pengajar (Dosen)
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi
Universitas Gadjah Mada

DEVELOPMENT OF ACCURACY EVALUATION METHOD FOR OPEN LOOP EDUCATIONAL CNC MILLING MACHINE

The open-loop educational computer numerical control (CNC) milling machine requires accuracy verification in order to ensure its accuracy and functionality. In this paper, the new verification method is proposed based on the length measurement using the fringe counting of He-Ne laser interferometry. The ideal translation length is defined by the number of electric pulses generated by the micro-stepping driver, while the actual length is measured using He-Ne laser interferometry. In the experimental process, the data of the fringe pattern of the He-Ne laser and the number of electric pulses which drive the stepper motors were simultaneously acquired using an oscilloscope. Hence, the data has been analyzed to obtain the ideal and actual lengths by using an in-house program developed in Python. By comparing the actual translation and ideal length, the accuracy of the educational CNC milling machine has been evaluated to be 50 μm for the length up to 200 mm.

Keywords: Educational, CNC Milling Machine, Accuracy Verification, Fringe Counting, He-Ne Laser, Interferometry.

1. PENDAHULUAN

Tenaga ahli yang terlatih sangat diperlukan di masa mendatang sebagai akibat dari meningkatnya digitalisasi dan otomatisasi industri. Teaching Factory (TF), sebagai lingkungan pembelajaran dan penelitian, telah menjadi fokus universitas dan industri untuk mengurangi kesenjangan di antara mereka, menciptakan metode pendidikan yang inovatif, dan memainkan peran penting dalam mengembangkan lingkungan solusi baru [1]. Menyerupai TF, Fabrication Laboratory (Fab Lab) yang diperkenalkan pada awal tahun 2000-an telah menjadi model pendidikan belakangan ini [2 – 4]. TF maupun Fab Lab biasanya mempunyai fasilitas permesinan digital seperti mesin computer numerical control (CNC), laser cutter, 3D printer, dan lain-lain. Secara khusus, mesin CNC telah banyak digunakan dalam industri manufaktur karena kelebihanannya terutama dari segi kepresisian, akurasi, produktivitas pemotongan, dan kompleksitas pekerjaan yang dapat ditangani. Namun demikian mesin CNC skala industri masih dianggap mahal untuk digunakan di lembaga pendidikan. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan mesin CNC untuk pendidikan, maka telah dikembangkan mesin milling CNC berbiaya rendah yang dikendalikan dengan sistem terbuka (open loop system). Untuk mengetahui keakuratan dan fungsi terbaik yang dapat dipunyai, keakuratan mesin milling CNC open loop harus diverifikasi. Parameter terpenting yang akan dievaluasi adalah akurasi geometrik yang bergantung pada akurasi pergerakan sumbu dan pemotongan [5-6].

Ketelitian geometrik mesin perkakas dapat dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu ketelitian geometrik sumbu tunggal dan ketelitian geometrik antar sumbu. Akurasi geometri sumbu tunggal dapat diketahui dengan cara mengukur kesalahan linear sumbunya. Kesalahan linear mesin *milling* CNC diketahui dengan cara mengukur besarnya pergeseran sumbu mesin CNC terhadap sumbu acuan dengan menggunakan alat ukur seperti laser interferometer, *dial indicator*, *ball-bar*, dan alat ukur lainnya. Dengan melakukan kompensasi sebesar kesalahan tersebut, maka potensi kesalahan permesinan dapat dikurangi atau dihilangkan. Standar internasional yang menjadi acuan dalam mengevaluasi keakuratan mesin perkakas dalam kondisi tanpa beban adalah ISO 230 [7 – 8]. Selain ISO 230, ISO 10791 menetapkan beberapa kelompok pengujian untuk permesinan dengan poros horizontal, sistem tunggal atau terintegrasi dengan sistem manufaktur fleksibel [9 – 12]. Seperti tampak pada Gambar 1, kesalahan gerak linear terdiri dari kesalahan pemosisian (E_{xx}), kesalahan kelurusan vertikal (E_{zx}), dan

kesalahan kelurusan horizontal (E_{yx}). Kesalahan gerak rotasi pada mesin perkakas terdiri dari kesalahan *pitch* (*pitch angular error*), E_{BX} , kesalahan *yaw* (*yaw angular error*), E_{CX} , dan kesalahan *roll* (*roll angular error*), E_{AX} [7].

Gambar 1: Kesalahan linear dan rotasi pada pergerakan mesin *milling* [7]

Sumber kesalahan utama gerakan linear dan rotasi adalah gerakan *ball screw* yang tidak sempurna. Oleh karena itu, penyimpangan pergerakan tersebut harus diukur untuk mengetahui pergerakan yang ideal. Metode verifikasi yang tepat untuk mengevaluasi ketelitian mesin *milling CNC* edukasi sangat diperlukan untuk mengurangi potensi terjadinya kesalahan hasil permesinan atau sebagai dasar dalam melakukan koreksi.

2. METODE EVALUASI AKURASI SUMBU LINEAR

Sketsa dari sistem kontrol *milling CNC* edukasi tampak pada Gambar 2. Mesin *milling CNC* edukasi menggunakan sistem kontrol terbuka (*open loop*) sehingga tidak memiliki sistem umpan balik (*feedback*) maupun sensor di dalamnya. Sumber kesalahan pergerakan bisa berasal dari beberapa parameter seperti motor, rangkaian elektronik pengontrol motor, perangkat lunak, maupun motor penggerak.

Gambar 2: Skema sistem kontrol mesin *milling CNC* edukasi

Dengan banyaknya komponen tersebut, korelasi antar parameter pun menjadi susah untuk dipetakan. Namun demikian ada beberapa parameter yang dapat diuji korelasinya antara lain adalah pengaruh akurasi sistem penggerak motor yang menghasilkan pulsa listrik pada pergerakan CNC. Dalam makalah ini diusulkan prosedur

evaluasi yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kesalahan akibat sistem kontrol dengan cara membandingkan antara pergerakan aktual yang dikur dengan *fringe counting method* dari He-Ne interferometer dan jumlah pulsa yang menggerakkan motor. Seperti yang dijelaskan pada Gambar 2, mesin *milling* CNC edukasi terdiri dari 3 motor stepper yang dikendalikan oleh *micro-stepping driver* (M542, Leadshine Technology Co., Ltd.). G-code diinterpretasikan oleh perangkat lunak Mach3 CNC untuk mengontrol motor stepper menggunakan pulsa listrik yang dihasilkan oleh *micro-stepping driver*. *Micro-stepping driver* membagi satu step motor stepper ($1,8^\circ$ atau $1/200$ revolusi) menjadi 25 bagian. Oleh karena itu, total pulsa yang dikirim ke motor stepper adalah 5000 pulsa / putaran. Karena meja *milling* digerakkan oleh *ball-screw* dengan jarak puncak efektif 5 mm, maka jarak antar pulsa penggerak motor adalah $1\text{ }\mu\text{m}$.

2.1 Laser Interferometer.

Laser interferometer adalah metode pengukuran yang memanfaatkan fenomena interferensi cahaya koheren, dimana dua cahaya koheren tersebut saling berinteraksi atau saling mempengaruhi. Untuk menjadikan kedua cahaya koheren dapat berinteraksi, maka diperlukan konfigurasi semisal Michelson interferometer seperti tampak pada Gambar 3. Cahaya koheren dari sumber yang sama dibagi menjadi dua jalur oleh *beam splitter* (R), dipantulkan cermin konstan (B) dan bergerak (C), kemudian keduanya akan dideteksi oleh sistem pengamat berupa sensor cahaya atau kamera di titik pengamatan (O). Ketika dua cahaya koheren berada dalam satu fase, keduanya saling menguatkan (*constructive*) sehingga menghasilkan pola terang, sedangkan ketika kedua cahaya tidak berada dalam satu fase, keduanya saling merusak (*destruktif*) sehingga menghasilkan pola gelap seperti tampak pada Gambar 4.

Gambar 3: Konfigurasi dasar Michelson interferometer untuk pengukuran panjang metode perhitungan *fringe*.

Fenomena interferensi tersebut diterapkan untuk sistem pengukuran menggunakan laser. Ketika sinar laser ditembakkan dari arah S menuju *beam splitter* (R), sinar tersebut terbagi menjadi dua oleh R dimana sebagian menuju ke arah cermin konstan (B) sebagai titik referensi, dan sebagian yang lain ke cermin bergerak (C) yang terletak pada mesin *milling* CNC edukasi sebagai titik target. Kedua sinar tersebut kemudian dipantulkan kembali melewati *beam splitter* R dan berkumpul di titik pengamat (O) yang berupa *photodetector*. Sinyal yang berasal dari *photodetector* tersebut kemudian direkam secara digital menggunakan osiloskop. Percobaan pada penelitian ini menggunakan sumber cahaya laser He-Ne yang tidak distabilkan. Untuk menghitung pergerakan yang terukur oleh He-Ne laser, digunakan metode *fringe counting* yang telah digunakan dalam pengukuran presisi [14 – 15]. Metode ini mengukur perubahan Panjang (d) dengan menghitung jumlah pola gelap terang yang terjadi menggunakan rumus berikut,

$$d = \frac{\lambda \times i}{2n} \quad (1)$$

dimana λ adalah panjang gelombang He-Ne laser di ruang hampa yaitu 632.9908 nm, i adalah jumlah *fringe* (pola gelap terang) yang terekam, dan n adalah *refractive index* udara.

Gambar 4: Interferensi konstruktif dan destruktif dan pola interferensinya

2.2 Metode Pengujian

Susunan perangkat yang digunakan dalam penelitian ini tampak pada Gambar 5. Mesin CNC dan He-Ne interferometer diletakkan terpisah untuk memastikan getaran dari mesin tidak mempengaruhi interferometer. Komponen - komponen yang digunakan dalam sistem percobaan diantaranya adalah He-Ne laser (Neoark, Neo-1M), *software ArtSoft Mach3* sebagai perangkat kontrol untuk menggerakkan mesin menggunakan, mesin *milling CNC* edukasi, dan osiloskop 10 GHz (Lecroy, 64 Xi-A).

Peta kesalahan/error yang mungkin timbul dalam mesin *milling CNC* edukasi tampak seperti Gambar 6. Kesalahan antarmuka (*interface error*) muncul dikarenakan tidak sempurnanya komunikasi dari komputer ke penggerak motor. Kesalahan kedua adalah kesalahan mekanik (*mechanical error*) yang disebabkan oleh tidak sempurnanya komponen penggerak. Kesalahan ketiga adalah kesalahan transmisi yang disebabkan tidak sempurnanya sistem transmisi. Pada penelitian kali ini diuji kesalahan mekanik yang berkontribusi terhadap kesalahan kumulatif (*total error*).

Untuk mengetahui penyimpangan pergerakan mesin *milling CNC* mini, data pergerakan mesin dan data panjang oleh He-Ne laser direkam secara bersamaan dengan menggunakan osiloskop. Pada pengujian ini, terdapat 2 data yang harus diambil, yaitu data sinyal He-Ne yang berupa pola gelap terang dan data sinyal pergerakan mesin *milling CNC* mini berupa pulsa listrik yang diambil dari penggerak motor. Dengan menggerakkan meja *milling* ke satu arah, maka dapat dideteksi *interference fringe* seperti pada Gambar 7. Gerakan mesin CNC dikontrol dengan mengatur pergerakan motor oleh pulsa, dimana jarak antar pulsa menggerakkan meja sebesar $1 \mu\text{m}$. Data pergerakan mesin dan sinyal gelap-terang dari He-Ne interferometer direkam secara bersamaan dengan menggunakan osiloskop. Data pergerakan meja mesin *milling CNC* mini yang direkam oleh osiloskop tampak seperti di Gambar 7. Jarak ideal antar pulsa adalah $1 \mu\text{m}$ dan jarak puncak-ke-puncak (*peak-to-peak*) satu gelombang dari terang-ke-terang adalah setengah panjang gelombang He-Ne laser (316 nm).

Gambar 5: Susunan perangkat pengujian mesin *milling* CNC edukasi

Gambar 6: Peta kemungkinan sumber kesalahan pada mesin *milling* CNC edukasi

Gambar 7: *Interference fringe* dan pulsa listrik dari motor driver yang dideteksi osiloskop

3. HASIL PERCOBAAN DAN PEMBAHASAN

Pergerakan meja mesin *milling* CNC edukasi dievaluasi dengan menggunakan metode *fringe counting method* dan hasilnya dibandingkan dengan menggunakan sistem komersial yaitu Renishaw XL-80 laser interferometer. Keduanya mempunyai persamaan yaitu mampu mengukur kesalahan pergerakan. Namun demikian, *fringe*

counting method mempunyai keandalan dibandingkan dengan Renishaw XL-80 yaitu kemampuan untuk dapat mengukur jarak antar pulsa listrik penggerak motor.

3.1 Percobaan dengan Metode *Fringe Counting*

Seperti tampak pada Gambar 7, mesin diprogram untuk menuju ke suatu titik dengan memberikan sejumlah pulsa oleh Mach3. Jarak ideal (L) yang ditempuh oleh meja mesin CNC edukasi adalah,

$$L = i_p \times L_p \quad (2)$$

dimana i_p dan L_p masing-masing adalah jumlah pulsa dan jarak ideal antar pulsa. Jarak yang terukur (d) oleh interferometer dihitung dengan menggunakan persamaan (1). Kesalahan pergerakan (E) merupakan selisih jarak ideal (L) dan jarak terukur (d) yang dihitung dengan persamaan (3) berikut,

$$E = L - d = (i_p \times L_p) - \left(\frac{\lambda \times i}{2n} \right) \quad (3)$$

Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan (1), (2), dan (3), didapatkan hasil pengukuran seperti pada Gambar 8.

Gambar 8: Hasil evaluasi pergerakan mesin dengan menggunakan *fringe counting method*.

Perhitungan jumlah pulsa dan He-Ne *interference fringe* dilakukan oleh program yang dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman *Python*. Panjang pergerakan mesin merupakan panjang relatif dari titik referensi yang ditentukan. Seperti tampak pada Gambar 8, evaluasi pergerakan mesin sampai dengan 0.2 mm telah dilakukan. Dikarenakan keterbatasan memori osiloskop, pergerakan lebih panjang dari 0.2 mm belum dapat dilakukan. Namun demikian, pengembangan perangkat lunak dan metode akuisisi data dengan *data acquisition card* masih terus dilakukan sebagai kelanjutan penelitian ini. Dari hasil percobaan, ada kecenderungan kesalahan sampai dengan 0.9 μm untuk pergerakan sampai dengan 0.2 mm. Ketika mesin CNC diberikan perintah untuk bergerak 0.001 mm, pergerakan terukur menunjukkan 0.000819 mm. Kesalahan mesin tersebut adalah 0.000181 mm (181 nm) untuk pergerakan setiap 0.001 mm. Kecenderungan kesalahan tersebut tidak bisa digunakan untuk menentukan kesalahan pada pergerakan yang lebih panjang karena pendeknya jarak yang terukur. Oleh karena itu, Renishaw XL-80 laser interferometer telah digunakan untuk mengevaluasi pergerakan yang lebih panjang.

Hasil percobaan juga digunakan untuk mengevaluasi akurasi micro-stepping dirver. Hasil percobaan seperti tampak pada Gambar 7 menunjukkan adanya fluktuasi jumlah *interference fringe* pada setiap jendela antara dua buah pulsa. Hal tersebut mengindikasikan bahwa jarak antar pulsa bisa berfluktuasi. Dari 50 data perhitungan jarak antara dua pulsa, didapatkan rata-rata kesalahan adalah 70 nm dengan standar deviasi sebesar 170 nm. Perhitungan ini mengindikasikan adanya fluktuasi kesalahan, namun demikian pengaruhnya pada akurasi pergerakan mesin tidak melebihi 1 μm .

3.2 Percobaan dengan Renishaw XL-80 Interferometer

Pergerakan mesin CNC edukasi sampai dengan 200 mm telah dievaluasi dengan menggunakan Renishaw XL-80 laser interferometer. Pergerakan ideal yang dikontrol oleh *software* Mach3 seperti pada Gambar 9(a) dibandingkan dengan hasil pengukuran oleh Renishaw XL-80 laser pada Gambar 9(b). Kesalahan pergerakan, yaitu perbedaan antara pergerakan ideal dan pergerakan terukur, ditampilkan pada Gambar 10. Sebagai contoh, kesalahan pergerakan

pada pergerakan 10 mm adalah $+3.8 \mu\text{m}$. Kesalahan ke arah positif terjadi pada pergerakan mesin dari 0 sampai 40 mm, namun demikian kesalahan tersebut menuju ke arah negatif sampai pada 200 mm. Kesalahan terbesar di kisaran $-50 \mu\text{m}$ untuk pergerakan sampai dengan 200 mm.

(a)

(b)

Gambar 9: Verifikasi mesin *milling CNC* mini dengan Renishaw XL-80

Kesalahan pergerakan dapat disebabkan oleh berbagai kemungkinan seperti yang telah dipetakan pada Gambar 6. Pertimbangan pertama sumber kesalahan transmisi yang disebabkan oleh tidak lurus nya poros *ball screw*. Pertimbangan kedua adalah ketidaksempurnaan pengaturan sumbu ukur laser (*cosine error* dan *abbe's error*), namun hal tersebut dirasakan sangat kecil yaitu di bawah $1 \mu\text{m}$. Pertimbangan ketiga adalah keakuratan *micro-stepping driver*. Hal tersebut didukung oleh data pada Gambar 7 yang menunjukkan fluktuasi jumlah He-Ne *interference fringe* pada setiap jendela antara dua buah pulsa, namun demikian pengaruhnya dipertimbangkan tidak terlalu besar yaitu sebesar 170 nm. Dari beberapa sumber kesalahan tersebut, kesalahan dari sistem transmisi gerak utamanya *ball screw* dipertimbangkan memiliki bobot tertinggi. Kesalahan acak seperti tampak pada Gambar 10 dimungkinkan karena adanya *electrical noise* karena ketidaksempurnaan penyambungan kabel maupun *grounding* pada sensor cahaya. Kesalahan pergerakan yang lebih panjang bisa dievaluasi dengan menggunakan Renishaw XL-80, namun demikian metode ini sulit untuk digunakan dalam mengevaluasi fluktuasi jarak antara dua pulsa. Hal tersebut dikarenakan Renishaw XL-80 hanya memperbolehkan pengambilan data dengan kecepatan 10 data/detik.

Gambar 10: Hasil evaluasi pergerakan mesin dengan menggunakan Renishaw XL-80 interferometer

4. KESIMPULAN

Makalah ini menjelaskan metode verifikasi keakuratan mesin *milling CNC* edukasi dengan metode *fringe counting*. Metode verifikasinya adalah dengan mengukur perbedaan antara pergerakan ideal dan hasil pengukuran dengan He-Ne laser interferometri. Pengolahan dan perhitungan data pengujian dikembangkan menggunakan *software Python* untuk menghitung jumlah He-Ne *fringe* dan jumlah pulsa yang menggerakkan motor. Hasil percobaan dengan mengukur pergerakan sampai 0.2 mm memberikan detail mengenai keakuratan *micro-stepping driver*. Berdasarkan hasil percobaan, *micro-stepping driver* mampu mengontrol pergerakan sebesar 1 μm dengan standar deviasi 170 nm. Namun demikian, metode *fringe counting* masih mempunyai keterbatasan yang bersumber dari terbatasnya kapasitas penyimpanan osiloskop. Pergerakan yang lebih panjang sampai dengan 200 mm dilakukan dengan Renishaw XL-80 interferometer. Berdasarkan hasil percobaan, akurasi mesin *milling CNC* edukasi di evaluasi sebesar 50 μm untuk pergerakan sampai dengan 200 mm. Untuk mencapai kemampuan pengukuran yang lebih panjang, metode *fringe counting* akan dikembangkan dengan menambahkan sistem akuisisi data.

5. PERNYATAAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Perwakilan Renishaw Indonesia atas dukungannya dalam melaksanakan penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] WAGNER, U., ALGEDDAWYB, T., ELMARAGHYB, H., MÜLLER, E., “The State-of-the-Art and Prospects of Learning Factories”, Dalam: *Procedia CIRP*, Vol.3, pp. 109 – 114, Athens, Mei 2012.
- [2] ANDERSEN, H. V., PITKÄNEN, K., “Empowering educators by developing professional practice in digital fabrication and design thinking”, *International Journal of Child-Computer Interaction*, Vol. 21, pp. 1–16, Mei 2019.
- [3] ROPIN, H., PFLEGER-LANDTHALER, A., IRSA, W., “A FabLab as integrative part of a Learning Factory”, Dalam: *Procedia Manufacturing*, Vol. 45, pp. 355–360, April 2020.
- [4] DREESSEN, K., SCHEPERS, S., “Foregrounding backstage activities for engaging children in a FabLab for STEM education”, *International Journal of Child-Computer Interaction*, Vol. 20, pp. 35–42, June. 2019.
- [5] SIDI, P., THORIQ WAHYUDI, M., “Aplikasi Metoda Taguchi Untuk Mengetahui Optimasi Kebulatan Pada Proses Bubut CNC”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, Vol.4, No.2, pp. 101-108, 2013
- [6] STANOJKOVIĆ, J., RADOVANOVIĆ, M., “Influence of the Cutting Parameters on Force, Moment and Surface Roughness in the End Milling of Aluminum 6082-T6”, *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, DOI No. 10.22190/FUME180220002S, 2018.
- [7] ISO 230-1:2012, Test code for machine tools — Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions, 2012.
- [8] ISO 230-1:2012, Test code for machine tools — Part 2: Test code for machine tools — Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes, 2014.

- [9] ISO 10791-1, Test conditions for machining centres — Part 1: Geometric tests for machines with horizontal spindle (horizontal Z-axis), 2015.
- [10] ISO 10791-2, Test conditions for machining centres — Part 2: Geometric tests for machines with vertical spindle or universal heads with vertical primary rotary axis (vertical Z-axis), 2001.
- [11] ISO 10791-4, Test conditions for machining centres — Part 4: Accuracy and repeatability of positioning of linear and rotary axes, 1998.
- [12] ISO 10791-6:2014, Test conditions for machining centres — Part 6: Accuracy of speeds and interpolations, 2014.
- [13] OTSUKI, T., SASAHARA, H., SATO, R., “A Method for Evaluating the Speed and Accuracy of CNC Machine Tools”, Dalam: *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century: LEM21*, Vol. 2017.9, pp 34-40, Jan. 2017.
- [14] WINARNO, A., et al, “Absolute measurement of gauge block without wringing using tandem low-coherence interferometry”, *Measurement Science and Technology*, Vol.23, 125001, Okt. 2012.
- [15] WINARNO, A., TAKAHASHI, S., MATSUMOTO, H., TAKAMASU, K., “A new measurement method to simultaneously determine group refractive index and thickness of a sample using low-coherence tandem interferometry”, *Precision Engineering*, Vol. 55, pp 254-259, Jan. 2019.