

Penilaian Simpangan Pergerakan Interpolasi Angular pada Mesin Frais CNC Menggunakan *Double Ballbar*

Gagan Ganjar Tabah¹ dan Brilliant Dwinata¹

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani, Bandung, Indonesia

gagan.ganjar@lecture.unjani.ac.id, briliant.dwinata@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Mesin *Computer Numerical Control* mampu membuat lintasan berbentuk lingkaran dengan menggerakkan dua sumbu secara simultan pada salah satu bidang XY, XZ, atau YZ. Apabila koordinasi kedua sumbu tersebut kurang baik, maka akan menyebabkan terjadinya kesalahan interpolasi lingkaran yang berpengaruh terhadap kesalahan kebulatan pada benda kerja hasil pemesinan. Kesalahan pergerakan kedua sumbu dapat diukur menggunakan *double ballbar*, untuk mengetahui kesalahan pergerakan tersebut maka divariasikan dengan tiga kecepatan makan. Metode penelitian yang digunakan adalah metode analisa perbandingan hasil pengukuran *double ballbar*. beberapa informasi dari hasil pengukuran adalah nilai kesalahan *Circularity*, *Backlash*, *Squareness*, *Straightness*, dan *Centre offset*. Kecepatan makan sangat berpengaruh terhadap kesalahan *geometric*, semakin besar nilai kecepatan makan maka semakin besar pula nilai kesalahannya. Selain kecepatan makan banyak sekali faktor yang mempengaruhi hasil pengukuran *double ballbar* antaralain *ballscrew*, *clearance*, *servo mismatch*, pengulangan pengujian, dsb.

Kata kunci: *double ballbar*, kebulatan, kecepatan makan, mesin *computer numerical control*, simpangan interpolasi angular.

Abstract

The Computer Numerical Control machine is capable of making circular paths by moving two axes simultaneously in one of the XY, XZ, or YZ planes. If the coordination of the two axes is not good, it will cause circle interpolation errors that affect the roundness error in the machining workpiece. The error of the movement of the two axes can be measured using a double ballbar, to find out the error of the movement, it is varied with three feeding speeds. The research method used is the method of comparative analysis of double ballbar measurement results. some information from the measurement results is the error value of *Circularity*, *Backlash*, *Squareness*, *Straightness*, and *Center offset*. Feeding speed is very influential on geometric errors, the greater the value of feeding speed, the greater the error value. In addition to feeding speed, there are many factors that affect the results of double ballbar measurements, including *ballscrew*, *clearance*, *servo mismatch*, test repetition, etc.

Keywords: *double ballbar*, circularity, velocity feeds, computer numerical control machine, angular interpolation deviation

1. Pendahuluan

Pengoperasian mesin perkakas CNC (*Computer Numerical Control*) dilakukan dengan sedikit intervensi dari operator, oleh karena itu mesin perkakas CNC harus memiliki ketelitian yang lebih tinggi dibanding dengan mesin perkakas manual. Pemeriksaan kesalahan pergerakan interpolasi angur pada mesin perkakas direkomendasikan secara berkala yang salah satunya adalah pemantauan ketelitian interpolasi (Prakosa et al., 2010).

Mesin *Computer Numerical Control* (CNC) memiliki tiga sumbu yaitu X, Y, dan Z yang dapat bergerak secara mandiri maupun simultan. Semua sumbu harus diukur ketelitian geometri (Rochim, 2016). Berdasarkan standar ISO 230-4 ada beberapa kesalahan *circular* dan kesalahan *radial* antara lain adalah *bi-directional circular deviation*, *circular deviation*, *radial deviation* dan *mean bi-directional radial deviation*. Salah satu ketelitian yang diukur adalah kesalahan interpolasi lingkaran pada suatu bidang XY, XZ, dan YZ (Esmaeili & Mayer, 2020), interpolasi adalah gerakan yang dihasilkan oleh kombinasi lebih dari satu sumbu secara simultan.

Beberapa metoda yang dapat digunakan untuk pemeriksaan kesalahan koordinasi antara dua sumbu saat melakukan pergerakan interpolasi antara lain adalah melalui uji pemesinan dan pengujian menggunakan *Double BallBar* (DBB) (Prakosa et al., 2010).

Pemeriksaan menggunakan DBB merupakan pendekatan yang baik untuk mendapatkan kesalahan geometrik pada sumbu putar, sehingga dapat diterapkan untuk penggunaan praktis dalam proses perakitan, perawatan dan pemeriksaan rutin peralatan mesin CNC multi-sumbu (Jiang & Cripps, 2015). Pengukuran ini dapat melihat hingga enam jalur pengukuran *volumetric* dengan semua sumbu umpan bergerak, dan dapat membandingkan jalur pengukuran satu dengan yang lainnya (Kauschinger et al., 2020).

Info Makalah:

Dikirim : 03-14-22;
Revisi 1 : 06-10-22;
Revisi 2 : 06-21-22;
Diterima : 06-21-22.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-8122-0677-412
e-mail : gagan.ganjar@lecture.unjani.ac.id

Double BallBar dapat mengidentifikasi *Position Independent Geometric Errors* (PIGEs) esalahan residual setelah kompensasi PIGE memberi kontribusi kesalahan 8,76% dari total kesalahan, yang mungkin disebabkan oleh kesalahan termal dan kesalahan kinematik. Karena pengukuran melibatkan kedua sumbu yang bergerak secara bersamaan, pengukuran ini tidak hanya dapat mencerminkan PIGE dari setiap sumbu putar, tetapi juga menilai koordinasi geometrik dan kinematik antara dua sumbu putar, yang secara komprehensif dapat mencerminkan akurasi geometrik alat mesin lima sumbu.(Jiang et al., 2019).

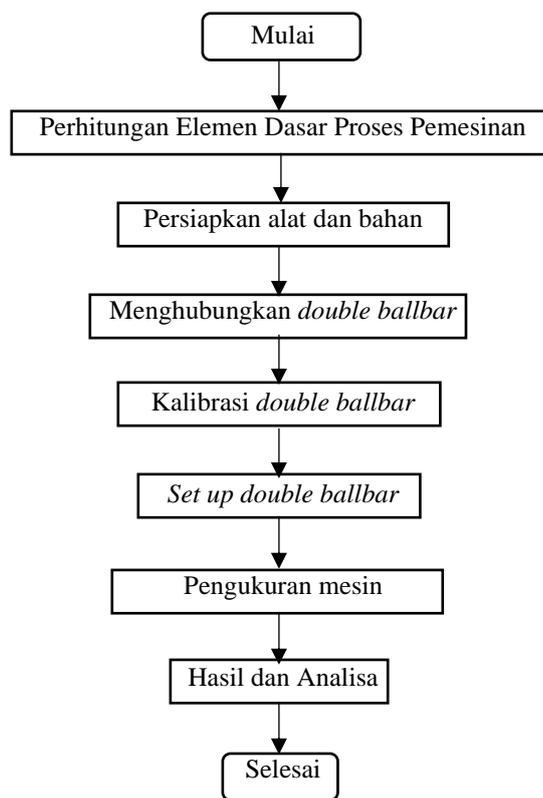
Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi kecepatan makan terhadap simpangan interpolasi lingkaran menggunakan *Double BallBar* (DBB).

2. Metode

Objek mesin uji pada penelitian ini adalah mesin CNC frais tiga sumbu merk Hartford Pro 800 dan pengukuran difokuskan pada bidang XY. Pengukuran kesalahan pergerakan interpolasi dapat dilakukan melalui dua cara yaitu pengukuran menggunakan laser interferometer atau *double ballbar* dan pengukuran terhadap hasil uji *cutting* menggunakan *Coordinate Measuring Machine* (CMM).(Prakosa et al., 2010). Metode pengukuran menggunakan *double ball bar* dapat mengidentifikasi delapan *Position Independent Geometric Errors* (PIGEs) pada mesin lima sumbu memberikan nilai kepresisian yang tinggi (Xiang et al., 2014)

Metode penelitian menggunakan metode analisis secara deskriptif pada data hasil pengukuran *double ballbar*. penentuan nilai untuk *feeding* pada DBB dihitung berdasarkan nilai *feeding* yang diperoleh dari perhitungan *feeding* uji pemesinan, lalu dilakukan proses Analisis. Hasil pengukuran pada mesin dengan menggunakan *double ballbar* dapat dilihat secara langsung.

Pada Gambar 1. ditunjukkan diagram alir tahapan pengukuran kesalahan pergerakan interpolasi menggunakan *double ballbar*.



Gambar 1. Diagram Alir Pengujian *Double Ballbar*.

Penjelasan diagram alir pengujian *double ballbar*;

- Perhitungan Elemen Dasar Proses Pemesinan akan digunakan sebagai masukan pada mesin frais CNC.
- mempersiapkan alat dan bahan yang digunakan diantaranya adalah *double ballbar*, Mesin CNC *milling* Hartford tiga sumbu, komputer khusus *double ballbar*, dan membuat *G-Code* untuk masukan pada mesin CNC.
- Menghubungkan *double ballbar* dengan komputer yang telah terpasang *software* QC20-W melalui *bluetooth*.
- Kalibrasi *double ballbar* ini dilakukan setelah *ballbar* terhubung dengan komputer, pengkalibrasian dilakukan *zerodur calibrator* sesuai panjang *bar* yang digunakan.

- e. Setup *double ballbar* pada mesin CNC yang telah terhubung dengan computer, lalu masukan *G-code* dari hasil *software double ballbar*.
- f. Pengukuran mesin menggunakan *double ballbar*.
- g. setelah pengukuran mesin, didapatkan hasil yang terlihat pada perangkat lunak

2.1 Perhitungan Elemen Dasar Pemesinan

Penentuan nilai parameter pemesinan untuk kecepatan putar poros *spindle* (n) dan kecepatan makan (V_f) dihitung berdasarkan formula No.1 dan No. 4.(Rochim, 2007).

$$n = \frac{1000 \cdot vc}{\pi \cdot D} \quad (1)$$

Kecepatan putar poros *spindle* ini dipengaruhi oleh kecepatan potong dari material benda kerja, Setiap material memiliki nilai kecepatan potong yang berbeda. Pada tabel 1 didapatkan nilai kecepatan potong sebesar 165 *feet/minute* untuk material *wrought aluminum 6061-T6*.

Tabel 1. Kecepatan potong (LittleMachineShop.com, n.d.)

Material	AISI/SAE/ASTM Designation	Feet/Minute
<i>Free machining plain carbon steels</i>	1212. 1213. 1215	130-140
<i>Plain carbon steels</i>	1006. 1008. 1009. 1010	65-110
<i>Cold work, air hardening tool steel</i>	A2. A3. A4. A6	40-50
<i>Stainless steels (Austenitic)</i>	201. 202. 301. 302. 304	70-75
<i>Bronze</i>	C22600. C65100. C65500. C67500	30-80
<i>Wrought aluminum</i>	6061-T6. 5000. 6000. and 7000 series	165
<i>Cast aluminum</i>	<i>Sand and permanent mold casting alloys</i>	165

Berikut ini adalah perhitungan kecepatan putar poros *spindle* untuk material *aluminum 6061-T6*.

$$vc \text{ Al6061 - T6} = \frac{165 \frac{ft}{m}}{3,28 \frac{ft}{m}} \quad (2)$$

$$vc \text{ Al6061 - T6} = 50,3 \text{ m/min} = 50 \text{ m/min}$$

Setelah mendapatkan nilai kecepatan potong, nilai tersebut dapat digunakan untuk menghitung kecepatan putar poros *spindle* dan pahat potong yang digunakan adalah *flat end mill* berdiameter 20 mm.

$$n = \frac{1000 \cdot 50 \text{ m/min}}{\pi \cdot 20 \text{ mm}} \quad (3)$$

$$n = 796,17 \text{ rpm} = 796 \text{ rpm}$$

Kecepatan putar poros *spindle* tersebut dimasukkan untuk pembuatan program *G-code* pada mesin frais CNC tiga sumbu. Nilai kecepatan putar poros *spindle* dapat digunakan untuk menghitung kecepatan makan pada formula No. 4.

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n = (\text{mm/min}) \quad (4)$$

Nilai f_z pada formula No. 4 dapat diperoleh dari tabel 2 yang disediakan oleh standar alat potong. Berikut ini tabel nilai f_z untuk alat potong dari standar sandvik:

Tabel 2. Nilai f_z untuk Alat Potong *flat end mil* (Sandvik, n.d.)

ISO/ANSI	CMC	Dc (mm)	Feed/tooth (fz) (mm)
P	02.1	1	0,001-0,01
		2-3	0,01-0,02
M	05.21	4	0,02-0,04
		5	0,03-0,06
K	08.2	6	0,03-0,07
		7	0,04-0,08
S	23.22	8	0,05-0,09
		9	0,07-0,10
H	04.1	10	0,07-0,12
		12	0,08-0,13
H	04.1	14	0,08-0,14
		16	0,09-0,15
H	04.1	20	0,10-0,16

Berdasarkan tabel 2 nilai F_z untuk diameter alat potong *flat end mill* sebesar 20 mm adalah 0,15 mm/gigi. Jika *flute* alat potong yang digunakan berjumlah empat, nilai V_f dapat dihitung dengan merefer ke formula no 4.

$$v_f = 0,15 \text{ mm} \cdot 4 \cdot 796 \text{ rpm} \quad (5)$$

$$v_f = \frac{477,6 \text{ mm}}{\text{min}} = 477 \text{ mm/min} \quad (6)$$

Berdasarkan formula No. 6 didapatkan nilai Kecepatan makan sebesar 477 mm/min, nilai tersebut digunakan untuk masukan dalam pembuatan program *G-code* mesin frais CNC tiga sumbu.

2.2 Data Umum Mesin dan Alat Ukur

Penelitian ini menggunakan mesin CNC *milling* Hartford Pro 800 3-sumbu, data umum mesin dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Data Umum Mesin CNC *milling* Hartford Pro 800 3-Sumbu (Hartford, 2018)

Machine Model	Pro-800		
Table	Working surface	900x470 (35.4x18.5) mm (inch)	
	Max. table load	500 (1 102.3 I) Kg (ibs.)	
Travel	Longitudinal travel (X-axis)	800 (31.5) mm (inch)	
	Cross travel (Y-axis)	510 (20.08) mm (inch)	
	Vertical travel (Z-axis)	630 (24.8) mm (inch)	
Spindle	Spindle nose taper	E40	
	Spindle speed (pulley)	8000 OP1. 10000/12000 rpm	
	Spindle speed (Gear)	Opt. 6000 rpm	
Feed	Rapid traverse rate (X/Y/Z)	24/24/20 m/min(ipm)	
		(944.88/944.88/787.4)	

Mesin CNC *milling* Hartford Pro 800 yang digunakan dapat dilihat pada gambar 2.

Gambar 2. Mesin CNC *milling* Hartford Pro 800 3-Sumbu (Hartford, 2018)



Alat ukur yang digunakan adalah *double ballbar* Renishaw dengan tipe QC20-W, alat ukur ini digunakan untuk mengukur mesin CNC Hartford pro 800 pada penelitian ini dengan data umum mesin sebagai berikut.

Tabel 4. Data Umum *Double Ballbar* (Renishaw plc, 2009)

Sensor resolution	0.1 μm	4 μin
Ballbar measurement accuracy*	$\pm (0.7 + 0.3\%L) \mu\text{m}$	$\pm (27.6 + 0.3\% L) \mu\text{in}$
Ballbar measuring range	$\pm 1.0 \text{ mm}$	$\pm 0.04 \text{ in}$
Sensor stroke	-1.25 mm to +1.75 mm	-0.05 in to +0.07 in
Maximum sample rate	1000 Hz	1000 Hz
Data transmission Bluetooth. Class 2	10 m Typical	33 ft typical
Operating range	0 $^{\circ}\text{C}$ - 40 $^{\circ}\text{C}$	32 $^{\circ}\text{F}$ - 104 $^{\circ}\text{F}$
System case dimensions	395 x 300 x 105 mm	15.5 x 11.8 x 4.1 in
System case weight incl. kit contents	3.75 kg (approx)	8 lb 4 oz (approx)

Alat ukur *double ballbar* dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Renishaw QC20-W *Wireless Ballbar System* (Renishaw plc, 2009)

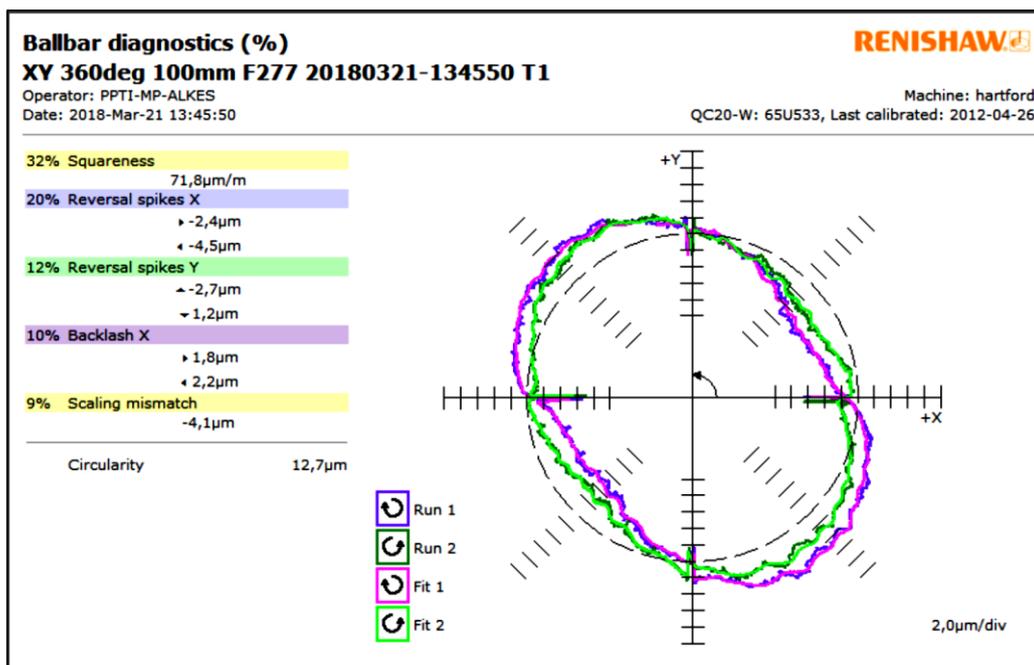
2.2 Pengukuran *Double ballbar*

Penelitian ini menggunakan alat ukur *double ballbar* Renishaw QC20-W *wireless ballbar system*. Renishaw QC20-W ini digunakan untuk mengukur kesalahan interpolasi yang terjadi pada mesin frais CNC Hartford, dari pengukuran menggunakan *double ballbar* akan didapat nilai kebulatan. Pengukuran ini akan dilakukan dengan tiga variasi kecepatan makan, kecepatan makan yang telah diperhitungkan diatas adalah 477 mm/min, maka variasi kecepatan makan yang digunakan adalah 277 mm/min, 477 mm/min, dan 677 mm/min.

Pengukuran *double ballbar* ini divariasikan dengan tiga kecepatan makan dan sembilan kali pengukuran pada seluruh kecepatan makan. Tahapan pengujian pada penelitian ini mengacu pada modul Pengujian Ketelitian Geometrik Mesin CNC *milling (Vertical Machining Centre)* 3 sumbu berdasarkan pengaturan *volumetric test software ballbar* Renishaw QC20-W (Setiawan et al., 2015).

3. Hasil dan Pembahasan

Setelah seluruh tahapan proses pengujian *Double Ball Bar (DBB)* dengan menggunakan mesin RENISHAW QC20-W pada mesin CNC *milling* HARTFORD tiga sumbu, dan didapatkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Pengukuran *Double Ballbar*

Pada pengujian ini dibuat tiga variasi kecepatan makan dengan sembilan kali pengukuran yang dilakukan, maka didapatkan nilai *circularity*, *backlash*, *squareness*, *straightness*, dan *centre offset* dari mesin, data dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai Rata-Rata Hasil Pengukuran Menggunakan *Double Ballbar*

Nilai			Feed (mm/min)		
			277	477	677
<i>Circularity error</i> (μm)			15,52	18,48	19,79
<i>Backlash</i> (μm)	Sb. X	(+)	-0,06	-0,02	-0,68
		(-)	-0,13	-0,28	-1,19
	Sb. Y	(+)	-0,31	-0,5	-0,3
		(-)	-1,79	-1,5	-0,18
<i>Squareness</i> ($\mu\text{m}/\text{m}$)			73	71,6	-67,03
<i>straightness</i> (μm)	Sb. X		1,24	2,52	1,8
	Sb. Y		0,46	-0,87	3,28
<i>centre offset</i> (μm)	Sb. X		-43,92	-66,8	31,63
	Sb. Y		18,91	32,76	62,09

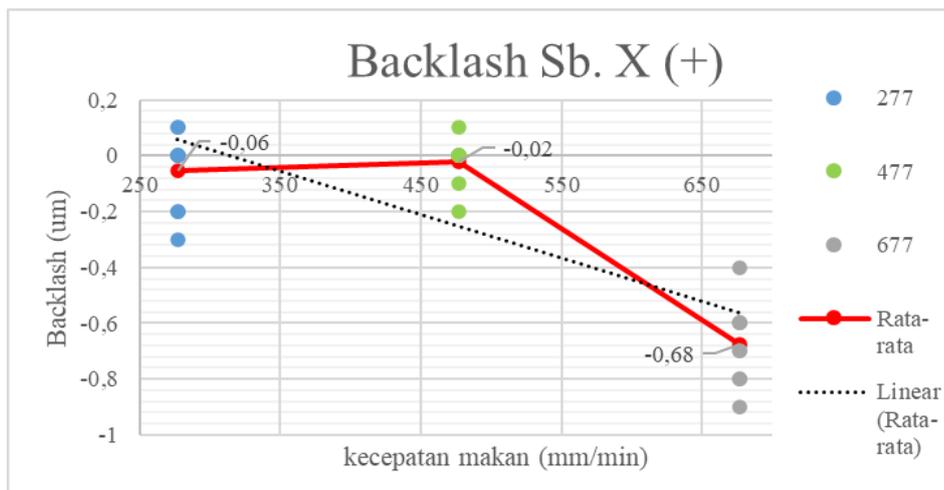
Dari tabel diatas dapat dilihat nilai *circularity error* untuk kecepatan makan 277 mm/min adalah 15, 52 μm , sedangkan nilai *circularity error* untuk kecepatan makan 477 mm/min adalah 18,48 μm , dan nilai *circularity error* untuk kecepatan makan 677 mm/min adalah 19,79 μm . Perbandingan untuk ketiga variasi kecepatan makan dapat dilihat pada gambar 5. Grafik *circularity error*.



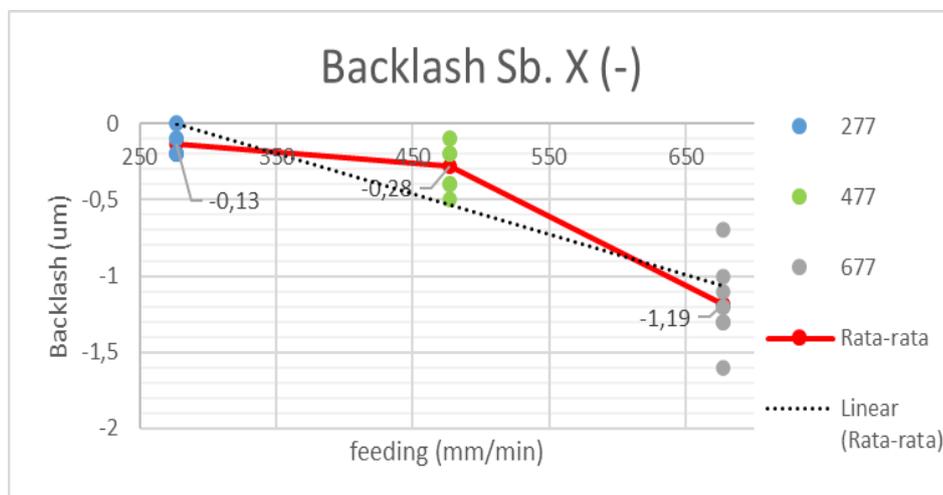
Gambar 5. Grafik *Circularity Error*.

Pada gambar 5 ditunjukkan nilai rata-rata *circularity error* untuk kecepatan makan 277 mm/min adalah 15,52 μm dan nilai rata-rata *circularity error* untuk kecepatan makan 477 mm/min adalah 18,48 μm , maka terjadi kenaikan nilai *circularity error* antara kecepatan makan 277 mm/min dengan kecepatan makan 477 mm/min adalah 2,96 μm . Nilai rata-rata *circularity error* untuk kecepatan makan 677 mm/min adalah 19,79 μm , jika dibandingkan dengan nilai rata-rata *circularity error* untuk kecepatan makan 477 mm/min terjadi kenaikan nilai sebesar 1,31 μm . Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa kecepatan makan berbanding lurus dengan nilai *circularity error*.

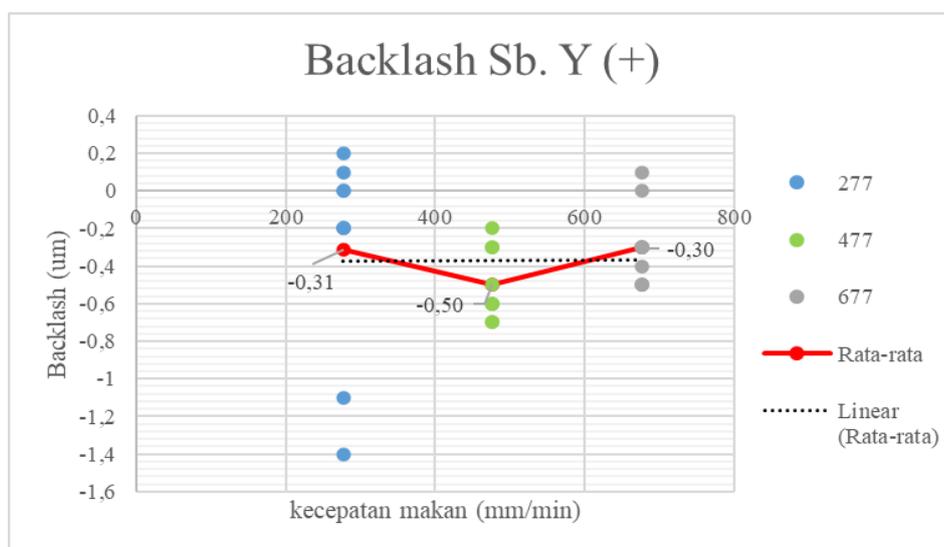
Backlash terjadi akibat adanya *clearance* pada *ballscrew*. *Backlash* akan muncul disebabkan oleh keausan pada *ballscrew*. *Backlash* muncul dalam dua arah pergerakan sumbu, yaitu pergerakan arah positif dan arah negatif. (Renishaw plc, 2009). Ketika bergerak menuju letak kesalahan yang ditentukan *backlash* positif akan terlihat sebagai langkah keluar yang dimulai dari sumbu. Sedangkan *backlash* negatif akan terlihat sebagai langkah masuk yang dimulai dari sumbu pada masing-masing sumbu X positif (+), X negatif (-), Y positif (+), dan Y negatif (-) akan ditunjukkan pada masing-masing grafik, nilai rata-rata sumbu X positif (+) ditunjukkan pada gambar 6.



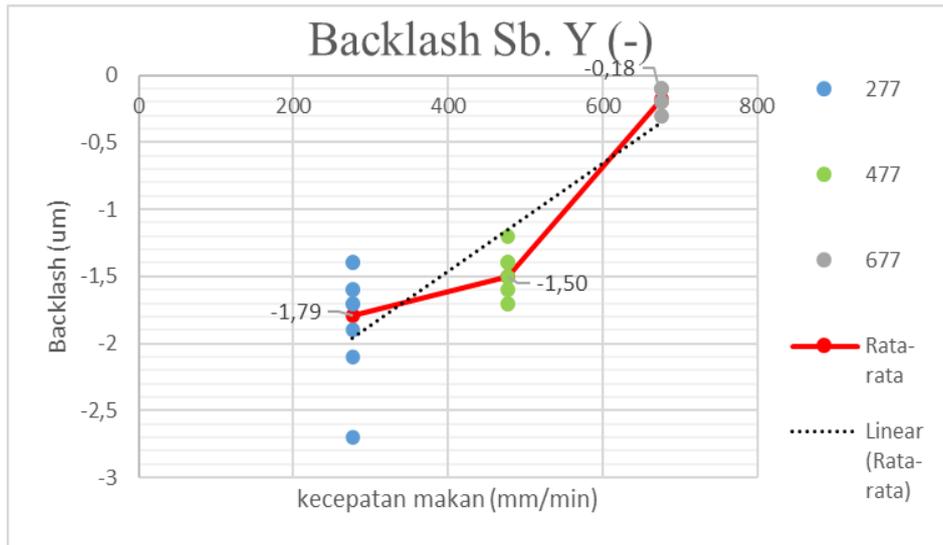
Gambar 6. Grafik *Backlash* Sb. X(+)



Gambar 7. Grafik *Backlash* Sb. X(-)



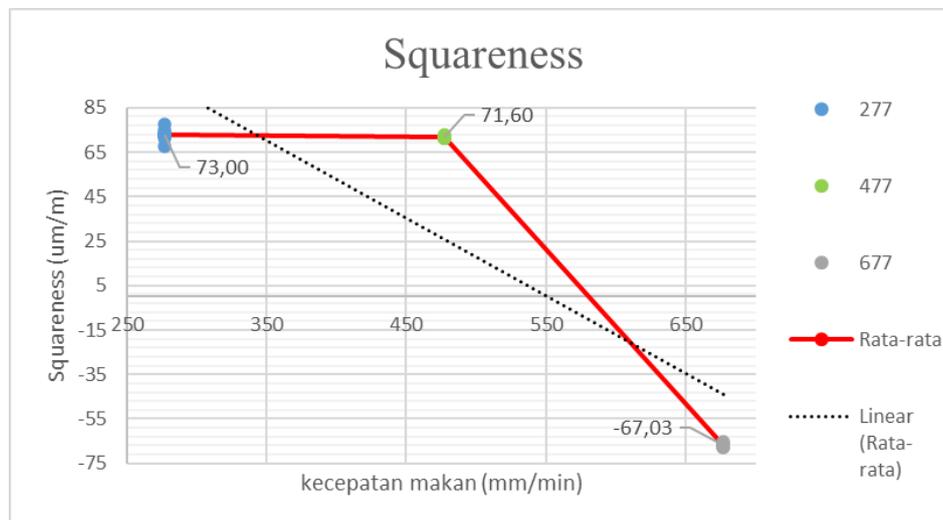
Gambar 8. Grafik *Backlash* Sb. Y(+)



Gambar 9. Grafik Backlash Sb. Y(-)

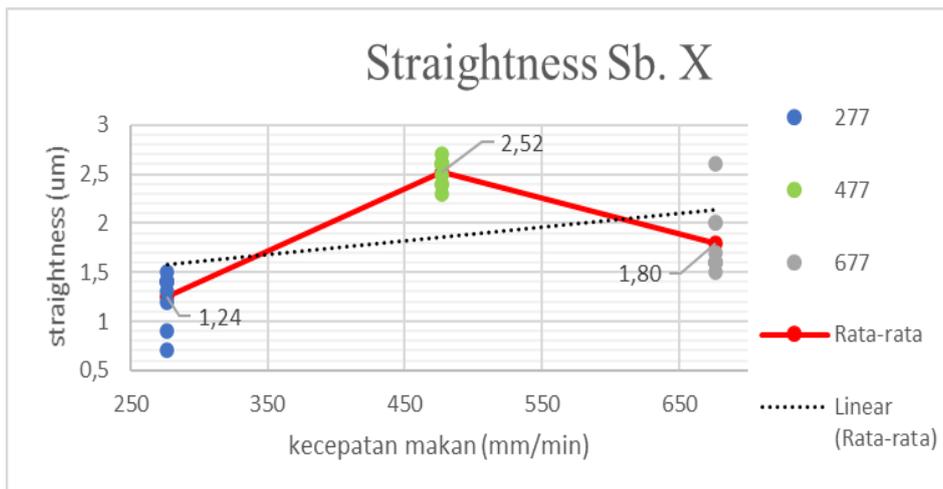
Dapat dilihat dari gambar 6 dan gambar 7 menunjukkan *trendline* nilai *backlash* menurun untuk sumbu X (+) serta sumbu X (-), Nilai *backlash* terukur yang terbaik untuk sumbu X positif (+) adalah kecepatan makan 477 mm/min dan nilai *backlash* terukur yang terbaik untuk sumbu X negatif (-) adalah kecepatan makan 277 mm/min, karena nilai *clearancenya* lebih mendekati nol. Untuk *trendline* nilai *backlash* sumbu Y bergerak naik atau dapat dikatakan berbanding lurus dengan kecepatan makan, nilai terbaik pada sumbu Y(+) dimiliki oleh kecepatan makan 677 mm/min begitu juga dengan nilai terbaik untuk sumbu Y(-).

Squareness adalah nilai ketegaklurusan sumbu x dan y dalam satuan $\mu\text{m/m}$. Nilai yang didapat adalah simpangan dari ketegaklurusan sumbu x dan y, jika nilainya positif artinya sudut antara sumbu x dan y lebih dari 90° dan sebaliknya, nilai *squareness* dalam satuan $\mu\text{m/m}$ yang artinya perubahan sudut bertambah besar setiap 1 μm per 1m (Renishaw plc, 2009).

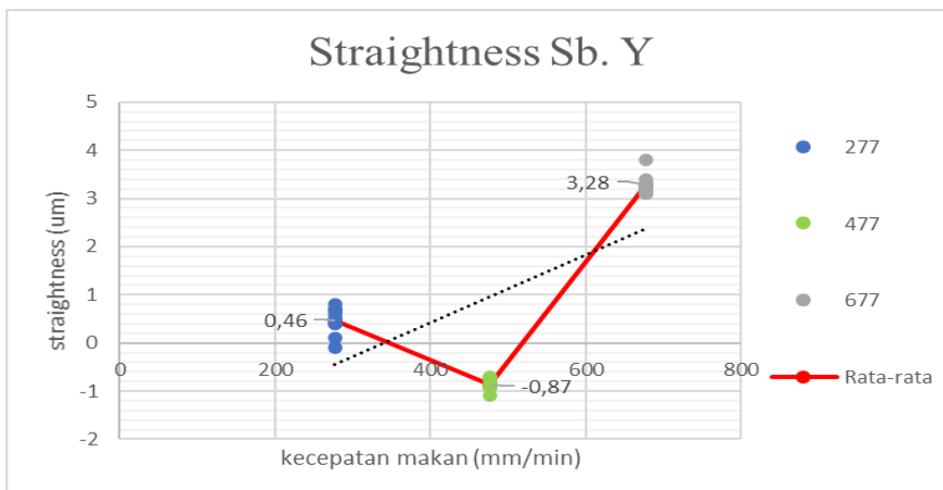


Gambar 10. Grafik Squareness

Pada Gambar 10. ditunjukkan nilai rata-rata *squareness* dari setiap kecepatan makan. Nilai rata-rata untuk kecepatan makan 277 mm/min adalah $73,00 \mu\text{m/m}$ atau sama dengan $4,18 \times 10^{-3}^\circ$, nilai rata-rata untuk kecepatan makan 477 mm/min $71,60 \mu\text{m/m}$ sama dengan $4,10 \times 10^{-3}^\circ$, dan nilai rata-rata untuk kecepatan makan 677 mm/min adalah $-67,03 \mu\text{m/m}$ atau sama dengan $-3,84 \times 10^{-3}^\circ$. Dari ketiga kecepatan makan tersebut, terjadi perubahan nilai ketegaklurusan sumbu pada kecepatan makan 677/min sedangkan pada kecepatan makan lainnya bernilai positif, tetapi dilihat dari *trendline* bergerak turun, maka dapat disimpulkan nilai *squareness* berbanding terbalik dengan kecepatan makan atau kesalahan kelurusan dapat disebabkan oleh kesalahan bentuk (*profile errors*) dari *bed*, *coulumn*, *saddle*, dan *guide ways* mesin perkakas yang dihasilkan pada saat proses pembuatan setiap komponen dan perakitannya. (Renishaw plc, 2009). Nilai rata-rata kesalahan kelurusan untuk ketiga kecepatan makan ditunjukkan pada Gambar 11 dan 12.

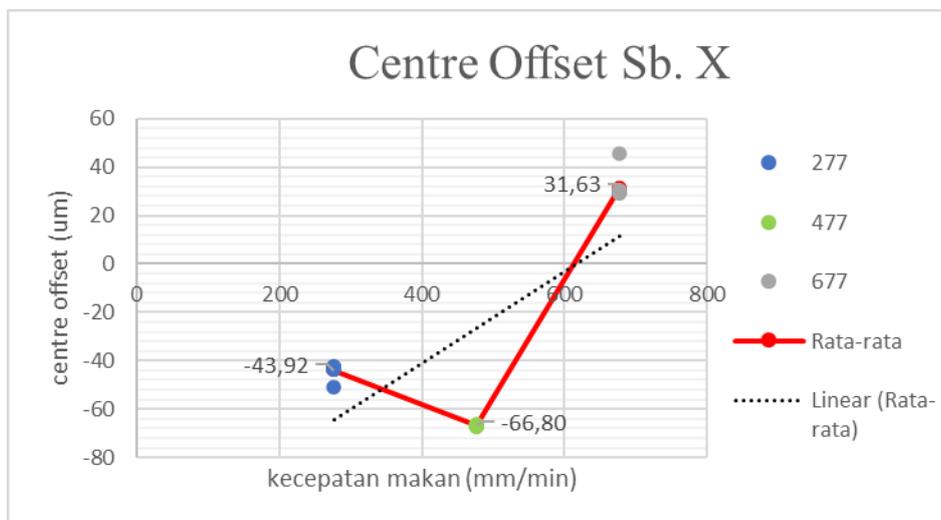


Gambar 11. Grafik *Straightness* Sb. X

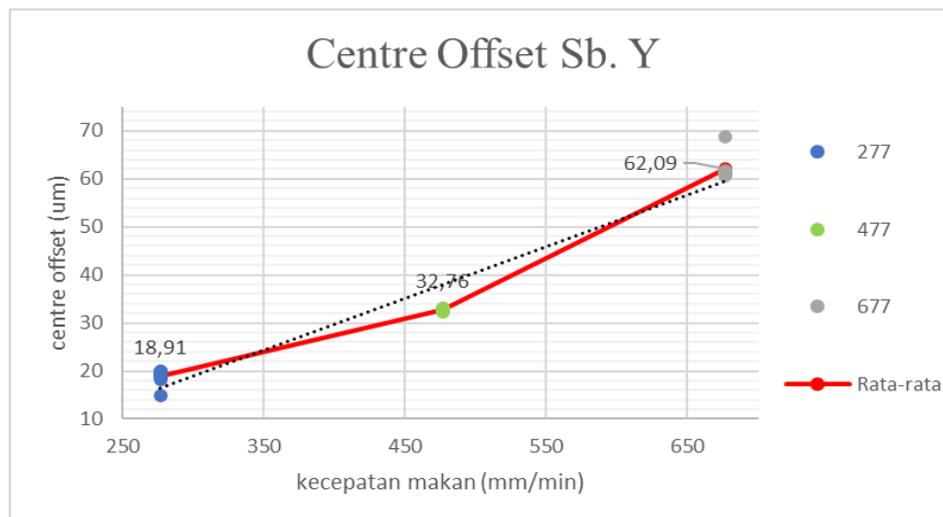


Gambar 12. Grafik *Straightness* Sb. Y

Pada Gambar 11 dan 12 ditampilkan bahwa kecenderungan kesalahan kelurusan pada sumbu X dan sumbu Y adalah bergerak naik, nilai yang lebih mendekati nol adalah nilai rata-rata dari kecepatan makan 677 mm/min dengan nilai 0,46 μm dan untuk sumbu X adalah 1,24 μm dengan kecepatan makan sebesar 277 mm/min.



Gambar 13. Grafik *Centre Offset* Sb. X



Gambar 14. Grafik *Centre Offset* Sb. Y

Centre offset (X, Y) menunjukkan nilai kesalahan posisi center yang terukur terhadap center yang seharusnya. Nilai *centre offset* sumbu X untuk ketiga kecepatan makan dapat dilihat pada Gambar 13. nilai rata-rata untuk ketiga kecepatan makan adalah berbeda, untuk nilai rata-rata kecepatan makan 277 mm/min adalah $-43,92 \mu\text{m}$, sedangkan nilai rata-rata untuk kecepatan makan 477 mm/min adalah $-66,80 \mu\text{m}$, dan nilai rata-rata untuk kecepatan makan 677 mm/min adalah $31,63 \mu\text{m}$. Dari ketiga hasil tersebut untuk nilai rata-rata yang lebih mendekati nol adalah kecepatan makan 677 mm/min.

Nilai rata-rata dari ketiga kecepatan makan untuk *center offset* pada sumbu Y semakin meningkat, nilai rata-rata untuk kecepatan makan 277 mm/min adalah $18,91 \mu\text{m}$, nilai rata-rata untuk kecepatan makan 477 mm/min adalah $32,76$, dan nilai rata-rata untuk kecepatan makan 677 mm/min adalah $62,09$, dapat dilihat dari ketiga nilai tersebut bahwa nilai rata-rata yang lebih mendekati nol adalah nilai dari kecepatan makan 277 mm/min. Untuk *trendline* pada grafik *centre offset* sumbu Y bergerak naik. Maka dapat disimpulkan *centre offset* pada sumbu Y berbanding lurus dengan kecepatan makan begitu pula untuk sumbu X.

Dari data yang didapat melalui pengukuran *Double BallBar* (DBB) dengan tiga variasi kecepatan makan, hasil yang diperoleh yaitu, *Circularity*, *Backlash*, *Squareness*, *Straightness*, dan *Centre offset* dari mesin CNC milling Hartford tersebut. Pengaruh kecepatan makan dengan tiga variasi yang berbeda dan sembilan kali pengukuran, banyak sekali faktor yang mempengaruhi hasil pengukuran *double ballbar* yaitu *ballscrew*, *clearance*, *servo mismatch*, pengulangan pengujian, dsb.

Kesimpulan

Dapat disimpulkan untuk setiap hasil pengukuran terdapat perbedaan nilai antara ketiga kecepatan makan, sebagai berikut:

1. *Circularity*, kecepatan makan sangat berpengaruh pada nilai *circularity*-nya, semakin besar kecepatan makan maka semakin besar pula nilai *circularity*-nya.
2. *Backlash*, didapat hasil pengukuran sumbu X(+), X(-), hasilnya menurun seiring dengan perubahan kecepatan makan. Y(+), dilihat dari *trendline* tidak terjadi perubahan naik atau pun turun, dan Y(-) nilainya berbanding lurus dengan kenaikan kecepatan makan.
3. *Squareness*, hasil dari tiga variasi kecepatan makan terjadi perubahan ketegaklurusan/derajat antara sumbu x dan y pada kecepatan 677 mm/min, nilainya berubah dari positif menjadi negatif sehingga kecepatan makan sangat berpengaruh pada ketegaklurusan sumbu x dan y.
4. *Straightness*, nilai *straightness* terbagi dalam dua sumbu yaitu sumbu x dan sumbu y, dari grafik terlihat perbedaan bentuk kurva antara sumbu x dan y, untuk sumbu x bentuk kurvanya V terbalik tetapi untuk sumbu y kurvanya berbentuk V.
5. *Centre offset*, terbagi dalam dua sumbu x dan y. untuk sumbu x sendiri kecepatan makan sangat mempengaruhi pergeseran center terlihat pada kecepatan makan 277 mm/min ke kecepatan makan 477 mm/min terjadi pembesaran nilai negatif, tetapi dari kecepatan makan 477 mm/min ke kecepatan makan 677 mm/min nilainya berubah menjadi positif. Pada sumbu y terlihat jelas semakin besar kecepatan makan maka semakin besar nilai simpangan center-nya.

Saran

Penelitian selanjutnya dapat dilanjutkan secara komprehensif sehingga dapat menghasilkan rekomendasi algoritma penentuan nilai kecepatan makan yang tepat untuk program (*G-code*) lintasan pengukuran kesalahan interpolasi *double Ballbar*.

Daftar Notasi

V_c	= Kecepatan potong (mm/min)
D	= Diameter alat potong (mm)
V_f	= Kecepatan makan (mm/min)
f_z	= Pemakanan per gigi (mm/gigi)
z	= Jumlah <i>flute</i>
n	= Putaran Poros (rpm)

Daftar Pustaka

- Esmaeili, S., & Mayer, J. R. R. (2020). An integrated geometric and hysteretic error model of a three axis machine tool and its identification with a 3D telescoping ball-bar. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/jmmp4010024>
- Hartford. (2018). *Power Center/PRO series*. <http://www.hartford.com.tw/en/Product/Vertical-Machining-Center/PRO>
- Jiang, X., & Cripps, R. J. (2015). A method of testing position independent geometric errors in rotary axes of a five-axis machine tool using a double ball bar. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 89, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.10.010>
- Jiang, X., Wang, L., & Liu, C. (2019). Geometric accuracy evaluation during coordinated motion of rotary axes of a five-axis machine tool. *Measurement*, 146, 403–410. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2019.03.060>
- Kauschinger, B., Friedrich, C., Zhou, R., & Ihlenfeldt, S. (2020). FAST EVALUATION OF THE VOLUMETRIC MOTION ACCURACY OF MULTI-AXIS MACHINE TOOLS USING A DOUBLE-BALLBAR. *Journal of Machine Engineering*, 20(3), 44–62.
- LittleMachineShop.com. (n.d.). *Cutting Speeds*. Diambil 19 Mei 2020, dari <https://littlemachineshop.com/reference/cuttingspeeds.php#Milling>
- Prakosa, T., Wibowo, A., Yuwana, Y., & Nurhadi, I. (2010). PENGUJIAN KETELITIAN GEOMETRIK MESIN PERKAKAS CNC MILLING VERTIKAL BUATAN DALAM NEGERI. *Pengujian Ketelitian Geometrik Mesin Perkakas CNC Milling Vertikal Buatan Dalam Negeri*, 141–146.
- Renishaw plc. (2009). *The Renishaw QC20-W wireless ballbar for machine tool performance diagnosis QA compliance Production pressures !* (No. L8014158904A; Nomor 0413).
- Rochim, T. (2007). *Klasifikasi Proses, Gaya & Daya Pemesinan*. (1 ed., Vol. 1). ITB Press.
- Rochim, T. (2016). *Spesifikasi, Metrology, & Control Kualitas Geometrik* (1 ed.). ITB Press.
- Sandvik. (n.d.). *Milling Formulas and Definitions*. Diambil 19 Maret 2020, dari <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- Setiawan, N. A., Prakosa, T., & Wibowo, A. (2015). *Pembuatan Modul Pengujian Ketelitian Geometrik Mesin Cnc Milling Vertikal Dengan Metode Double Ball Bar*. *Snttm Xiv*, 7–8.
- Xiang, S., Yang, J., & Zhang, Y. (2014). Using a double ball bar to identify position-independent geometric errors on the rotary axes of five-axis machine tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(9–12), 2071–2082. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5432-9>