

EVALUASI DISTORSI TERMAL SPINDEL PADA UJI KEANDALAN MESIN BUBUT CNC

SPINDLE THERMAL EVALUATION THERMAL ON RELIABILITY TEST OF NUMERICAL CONTROLLED LATHE

Albertus Rianto Suryaningrat, Nasril, Marsetiayu Ningsih, Yanyan Nurhidayat

Balai Teknologi Mesin Perkakas, Produksi dan Otomasi
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
Gd Teknologi 2/ 251 Lt.2 PUSPIPTEK, Tangerang Selatan, Banten
e-mail: albertus.rianto@bppt.go.id, nasril65@gmail.com

Abstrak

Pada proses perancangan dan pembuatan, mesin perkakas cnc perlu dilakukan uji keandalan untuk mengetahui keandalan rancangan komponen dan sub assembly utama. Ketelitian mesin perkakas sangat dipengaruhi oleh temperatur yang ditimbulkan saat mesin perkakas tersebut beroperasi, baik yang muncul dari gesekan maupun beban lebih. Evaluasi kesalahan sumbu spindel yang disebabkan distorsi termal pada bantalan spindel didasarkan pada ISO 230-3:2007, ISO 10791-10:2001 dan ISO 13041-8:2004. Pengukuran temperatur pada beberapa titik ukur spindel head bertujuan untuk mengetahui peningkatan temperatur pada bantalan utama spindel saat mendapatkan beban lebih atau proses pemotongan. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa tanpa pembebanan dan dengan kenaikan temperatur sebesar 16,3 °C, kesalahan kesesumbuan spindel adalah sebesar 13 µm. Sedangkan dengan pembebanan serta kenaikan temperatur sebesar 18,0 °C, didapatkan kesalahan kesesumbuan sebesar 71,9 µm, sedangkan dengan pembebanan 71,9 µm dan kenaikan temperatur 18,0 °C.

Kata Kunci : mesin perkakas CNC, mesin bubut CNC, uji keandalan, termal distorsi, spindel head, bantalan spindel.

Abstract

In the process of designing and manufacturing of CNC machine tools, a reliability test is needed to determine the reliability of the main component design and sub assembly. The accuracy of machine tools is strongly influenced by the temperature when the machine is operating, whether it arises from friction or overload. Evaluation of spindle axis errors caused by thermal distortion in spindle bearings is performed based on ISO 230-3: 2007, ISO 10791-10: 2001 and ISO 13041-8: 2004. Temperature measurement at several measuring points of the spindle head aims to determine the increase in temperature on the main spindle bearing when getting more load or cutting process. The evaluation results showed that without loading and with a temperature increase of 16.3 °C, the error of spindle misplacement was 13 µm. Whereas with loading and temperature increment of 18.0 °C, an error of 71.9 µm was obtained.

Keywords : CNC machine tools, CNC lathes, reliability tests, thermal distortions, spindle heads, spindle bearings.

Diterima (received) : 31 Oktober 2018 , Direvisi (revised) : 26 Maret 2019 ,
Disetujui (accepted) : 18 April 2019

PENDAHULUAN

Uji keandalan atau evaluasi keandalan adalah dasar dalam desain keandalan mesin mesin perkakas CNC. Metode evaluasi keandalan tradisional tidak mempertimbangkan efek kondisi kerja, oleh sebab itu berbagai metode dikembangkan untuk pengujian keandalan¹⁾ dan distorsi termal pada spindel *head* mesin perkakas CNC^{2,3)}.



Gambar 1.

Sumber-Sumber Kesalahan Mesin Perkakas¹⁾

Telah dikembangkan juga beberapa metoda lainnya untuk pengujian *deformasi* termal spindel diantaranya metoda optimasi *deformasi* termal spindel^{5,6)}, metoda baru model kesalahan termal spindel dengan sistem *Neurofuzzy*^{7,8)}, pemodelan spindel dengan variabel lainnya *multiple variable* dan "*linear virtual temperature*"⁹⁻¹¹⁾, dan teknik kompensasi kesalahan termal¹²⁻¹⁴⁾.

Metode pengujian distorsi termal pada sumbu spindel mesin perkakas CNC yang dilakukan pada kegiatan ini berdasarkan ISO 230-3:2007, ISO 10791-10:2007 dan ISO 13041-8:2004¹⁵⁻¹⁷⁾ dengan memodelkan kesalahan posisi sumbu spindel.

Pengujian performa mesin bubut CNC ini digunakan untuk menguji keandalan pada lingkungan sebenarnya atau TRL7 dengan melakukan pengujian beban maksimum pada sistem spindel atau proses pemotongan.

ALAT DAN METODE

Pengujian dilakukan dengan 2 (dua) tahapan, yaitu pengujian tanpa beban (*non cutting*) dan pengujian dengan beban melalui proses pemotongan atau biasa disebut uji keandalan (*performa test*). Peralatan dan metode yang digunakan disesuaikan dengan standar ISO 230-3:2007, ISO 10791-10:2007 dan ISO 13041-8:2004.

Uji keandalan digunakan untuk mengetahui tingkat keandalan (*Reliability*)

dan fungsi komponen utama dan komponen pendukung yang membangun mesin.

Mesin dan Alat Ukur

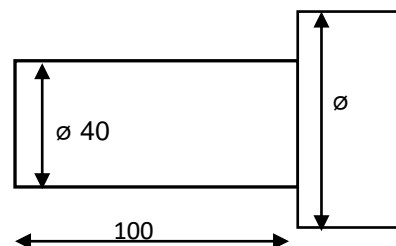


Gambar 2.
Prototipe Mesin Bubut CNC

Mesin yang digunakan dalam pengujian menggunakan mesin bubut CNC Kirana 5,5 kW seperti pada Gambar 2 dengan spesifikasi sebagai berikut :

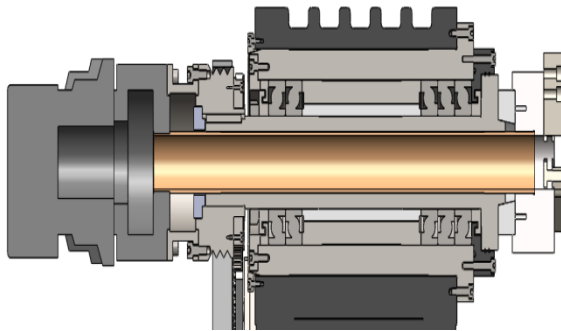
| | |
|--------------------|-----------------------|
| Jenis | : Horizontal spindel |
| Jumlah sumbu gerak | : 2 (sb-x dan sb-z) |
| Power | : 5,5 kW |
| Max Speed | : 4500 rpm |
| Max. Torque | : 95 N.m |
| Max. Feedrate | : 5000 mm/min |
| Max. Outer Diam | : 210 mm |
| Max. Z Travel | : 310 mm |
| Chuck Diam | : 170 mm |
| Resolusi | : 0,001 mm |
| Controller | : Siemens 828 D |

Proses pengujian dilakukan dalam rentang waktu 3 hari operasional mesin, dengan komposisinya adalah 4 jam mesin bekerja dan 1 jam mesin dalam keadaan berhenti bekerja. Benda kerja yang digunakan adalah material silinder F45C berdiamater $\varnothing 50\text{mm}$ dengan panjang 160mm sebanyak 45 buah seperti pada Gambar 3.



Gambar 3.
Dimensi Spesimen Uji Keandalan

Pahat potong menggunakan jenis *Mitsubishi HSS –Cobalt Triangle* dengan *tools holder* kiri jenis *grooving* berdimensi 20 x 20 mm. Pada Gambar 4 dapat dilihat komposisi bantalan spindel. Pemegang benda kerja menggunakan jenis *jig soft jaw* 6 Inch dengan arah putaran searah jarum jam.



Gambar 4.
Desain Spindel Mesin Bubut CNC 5,5 kW

Berdasarkan rangkaian waktu pada proses pengukuran, maka pengukuran dibagi menjadi 2 (dua) proses yaitu pengukuran defleksi termal, dan pengukuran uji performa. Untuk menguji defleksi termal digunakan alat ukur perubahan jarak tak sentuh jenis *Laser Displacement Sensor* dengan dikombinasi pada alat ukur *mandrel* yang diletakan di pemegang benda kerja. Alat pengukur putaran jenis *tachometer* tak sentuh dan alat ukur untuk melihat perubahan suhu jenis *infrared thermometer* juga digunakan. Sedangkan untuk mengukur dimensi hasil proses pengujian performa digunakan alat ukur dimensi jenis *coordinate measuring machine* (CMM).

Laser displacement sensor yang digunakan adalah keluaran *Keyence LKG-82* jenis CCD dengan kecepatan tinggi pada range pengukuran *diffused reflection*: ±15 mm ±0,59" *specular reflection*: ±14 mm ±0,55" (± 0,05 %) dengan *repetibility* 0,2 µm.

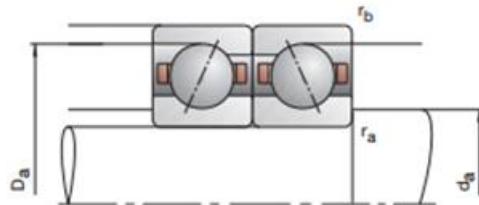
Mandrel uji yang digunakan sebagai bidang referensi pengukuran perubahan jarak *Laser displacement sensor* adalah *Diabold* berdiameter Ø40 mm dengan panjang 300 mm dan akurasi 0,001 mm.

Infrared Tachometer yang digunakan adalah *Digital Infrared Lutron DT-2234B* tak sentuh dengan range pengukuran 1 rpm s/d 99,999 rpm. *Infrared thermometer* yang digunakan adalah *ScanTemp 440 type K* pada range pengukuran 0 °C s/d +50 °C dengan resolusi 0,1 °C dan akurasi ± 2 °C pada perbandingan jarak terhadap titik sensor 11:1.

CMM yang digunakan adalah *Brown & Shape 500 x 700 x 500 mm* dengan menggunakan *probe Renishaw SP25M* yang memiliki spesifikasi lebar probe 4mm dengan akurasi 0,001 mm dan *software PCDMIS*.

Dasar Teori

Sumber panas berasal dari gesekan bola-bola pada bantalan yang ada dalam spindel dapat dilihat pada Gambar 5 :

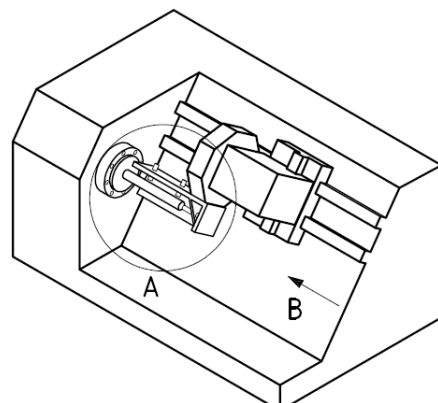


Gambar 5.
Susunan Bantalan Spindel
Mesin Bubut CNC¹³⁾

Batas ambang kenaikan temperatur berdasarkan ISO 230-3: 2007 *Test code for machine tools — Part 3: Determination of thermal effects*, kisaran suhu dari 20 °C hingga T menggunakan persamaan berikut :

$$\alpha(20, T) = \frac{(L_T - L_{20})}{(L_{20}(T - 20))} \quad (1)$$

Dimana : L = panjang objek ukur.



Gambar 6.
Metoda Pengujian Defleksi
Termal Mesin Bubut CNC¹⁴⁾

Pendekatan evaluasi kesalahan geometrik digunakan untuk mendapatkan penyimpangan yang disebabkan distorsi termal. Dalam penelitian ini dilakukan pembatasan evaluasi kesalahan sumbu spindel yang disebabkan oleh peningkatan temperatur pada spindel *head* yang

memberikan kontribusi maksimum pada penyimpangan sumbu spindel.

Model evaluasi keandalan pada persamaan 1 berbasiskan hubungan defleksi atau pemuaiian struktur mesin perkakas yang disebabkan pengaruh termal digunakan untuk menggambarkan hubungan matematis antara kondisi kerja dan tingkat keandalan alat mesin perkakas CNC. Koefisien kondisi kerja dalam evaluasi keandalan ini diperkirakan dengan metode estimasi, kondisi kerja yang tidak berpengaruh pada keandalan alat mesin perkakas CNC dihilangkan. Dengan demikian, model evaluasi keandalan mesin perkakas CNC diperoleh di bawah kondisi kerja yang berbeda.

Sumber kesalahan karena beban lelah pada bantalan dapat dilihat pada fenomena panas yang terjadi pada bantalan saat melakukan pemotongan berkelanjutan. Pada Gambar 6. Dapat dilihat metode dalam pengambilan distorsi termal.

Pengujian Distorsi Termal

Pengujian distorsi termal dilakukan dengan melihat efek distorsi pada sumbu berputar spindel. Kecepatan putaran spindel dilakukan pada 70% dari kemampuan kecepatan maksimal mesin. Pengujian dilakukan tanpa beban potong. Parameter permesinan dan pemasangan sensor *displacement* adalah sebagai berikut :

Kecepatan Spindel : 1500 rpm
 Arah putaran : CW
Sampling Rate Sensor : 20 μ sec
 Jarak sensor : 100 mm

Data pengambilan temperatur dilakukan secara simultan dengan pengujian *displacement*. Pengujian dilakukan untuk melihat efek perubahan panas karena putaran tanpa beban yang menyebabkan spindel terdefleksi.

Pengujian Performa

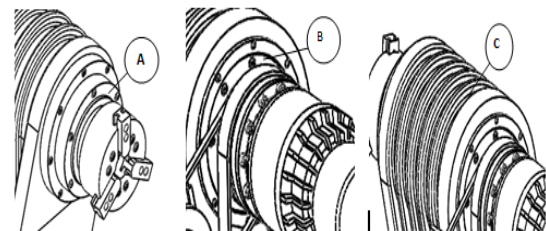
Pengujian performa dilakukan dengan melihat kekonsistenan hasil proses permesinan pada saat kenaikan suhu bantalan. Potensi kesalahan permesinan dapat diketahui karena terjadi defleksi antara sumbu poros spindel yang berputar dengan bantalan. Berbeda dengan uji distorsi termal, panas yang dihasilkan karena efek gesekan saat proses permesinan sangat dominan menjadi sumber kesalahan. Ketidak-konsistenan diameter poros hasil permesinan akan

berbentuk konus dengan nilai ketidakkonsistenan diameter dilakukan pada CMM. Metode yang digunakan disesuaikan dengan ISO 230-3:2001 *Test code for machine tools — Part 3: Determination of thermal effects* dimana proses permesinan dilakukan selama 4 jam kemudian 1 jam untuk berhenti beroperasi.

Parameter permesinan yang digunakan dalam proses pemotongan adalah :

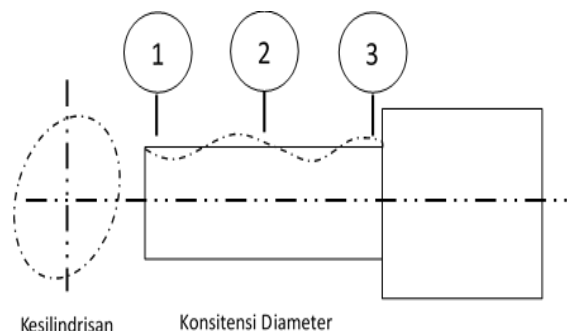
Kecepatan Spindel : 550 rpm
Feed Rate : 226,8 mm/min
 Arah Putaran : CW
Deep of cut : 0,25 mm
 Kondisi : w/ proses *finishing* tanpa pendinginan

Pengambilan data temperatur dilakukan setelah proses permesinan selesai dilakukan. Lokasi pengambilan data dilakukan pada 3 titik seperti pada Gambar 7. Pengambilan titik didasarkan pada komponen yang bersentuhan langsung dengan perubahan temperatur pada bantalan.



Gambar 7.
 Lokasi Pengukuran Sumber Kesalahan Termal.

Pengujian dimensi dengan menggunakan CMM dilakukan untuk melihat kekonsistenan diameter, ketirusan benda uji, efek kebulatan dan efek lonjong dari hasil permesinan.



Gambar 8.
 Lokasi Pengukuran Benda Uji Pemotongan oleh CMM

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran dilakukan pada titik dimana komponen yang diukur dikenai panas secara langsung yang mengakibatkan perpindahan panas secara konduksi. Nilai panas pada bantalan diestimasi dengan metode manual pada komponen yang terukur.

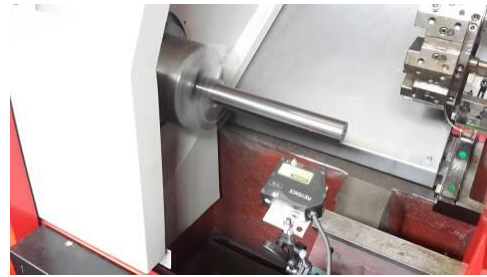
Pengukuran temperatur dilakukan dengan *thermometer infrared* pada beberapa titik pada spindel *head* yang dikenai panas secara langsung pada bantalan yang mengakibatkan perpindahan panas secara konduksi. Titik pengukuran temperatur dilakukan pada 7 titik secara berurutan dari posisi penggerak belakang menuju komponen pemegang benda kerja. Nilai panas pada bantalan diestimasi dengan metode manual pada komponen yang terukur. Pada Tabel 1 dapat dilihat hasil pengukuran temperatur pada spindel *head* dengan 7 posisi titik ukur yang telah ditentukan.

Tabel 1.
Perubahan Temperatur Tanpa Pematangan

| Durasi | Temperatur °C | | | | | | |
|--------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 0m | 21,4 | 21,5 | 21,4 | 21,5 | 21,5 | 21,6 | 21,6 |
| 10m | 22,3 | 22,3 | 22,1 | 21,9 | 21,8 | 21,9 | 26,9 |
| 20m | 24,4 | 24,8 | 24,4 | 24,1 | 23,9 | 24,2 | 30,8 |
| 30m | 24,1 | 24,3 | 23,9 | 23,4 | 23,1 | 23,3 | 31,1 |
| 40m | 26,4 | 26,6 | 26,1 | 25,7 | 25,5 | 25,5 | 33,4 |
| 50m | 26,6 | 27,1 | 26,4 | 25,9 | 25,7 | 25,8 | 33,7 |
| 1h 0m | 27,1 | 27,4 | 26,9 | 26,4 | 26,0 | 26,0 | 34,0 |
| 1h 10m | 27,7 | 28,1 | 27,5 | 27,1 | 26,8 | 26,9 | 34,8 |
| 1h 20m | 28,8 | 29,0 | 28,4 | 27,9 | 27,7 | 27,7 | 35,7 |
| 1h 30m | 29,3 | 29,8 | 29,0 | 28,6 | 28,6 | 28,6 | 36,5 |
| 1h 50m | 29,3 | 29,8 | 29,3 | 28,7 | 28,3 | 28,4 | 36,1 |
| 2h 0m | 29,8 | 30,3 | 29,9 | 29,3 | 28,9 | 29,0 | 36,8 |
| 2h 20m | 29,8 | 30,4 | 30,1 | 29,8 | 29,5 | 29,3 | 37,4 |
| 2h 30m | 29,9 | 30,9 | 30,4 | 29,8 | 29,5 | 29,5 | 37,4 |
| 2h 40m | 30,3 | 31,3 | 30,8 | 30,3 | 29,9 | 29,9 | 37,6 |
| 2h 50m | 30,2 | 31,7 | 31,0 | 30,3 | 30,3 | 30,1 | 37,8 |
| 3h 0m | 30,5 | 31,7 | 31,3 | 30,7 | 30,6 | 30,3 | 37,6 |
| 3h 10m | 27,5 | 30,3 | 29,8 | 29,3 | 29,0 | 28,8 | 36,5 |
| 3h 20m | 30,8 | 32,3 | 31,8 | 31,3 | 30,9 | 30,7 | 37,6 |
| 3h 30m | 29,5 | 32,1 | 31,6 | 31,3 | 31,1 | 30,2 | 37,9 |
| Kenaikan (max-min) | | | | | | | 16,3 |

Pengukuran perpindahan jarak digunakan untuk melihat efek dari defleksi termal, Metode pengukuran dilakukan dengan memasang *laser sensor* perpindahan jarak untuk membaca *mandrel*

uji saat berputar, *Mandrel* tersebut akan mengalami defleksi yang akan bertambah jika bantalan spindel mengalami efek termal,

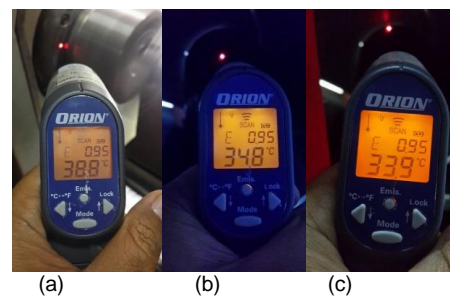


Gambar 9.
Skema Pengujian Perpindahan Jarak

Pada Tabel 2 dapat dilihat hasil pengukuran sensor perpindahan jarak yang pada saat bersamaan diukur dengan pengukuran perubahan temperatur (Tabel 1).

Tabel 2.
Hasil Pengukuran Perpindahan Jarak pada *Mandrel* Uji (X = 300mm)

| Durasi (min) | Sensor Perubahan Jarak Sb X (mm) | Durasi (min) | Sensor Perubahan Jarak Sb X (mm) |
|--------------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|
| 0m | -0,053 | 1h 50m | -0,042 |
| 10m | -0,051 | 2h 0m | -0,042 |
| 20m | -0,051 | 2h 20m | -0,041 |
| 30m | -0,051 | 2h 30m | -0,041 |
| 40m | -0,050 | 2h 40m | -0,040 |
| 50m | -0,050 | 2h 50m | -0,045 |
| 1h 0m | -0,048 | 3h 0m | -0,045 |
| 1h 10m | -0,045 | 3h 10m | -0,043 |
| 1h 20m | -0,045 | 3h 20m | -0,043 |
| 1h 30m | -0,043 | 3h 30m | -0,040 |



(a) Posisi pada bagian *chuck*
(b) Posisi pada bagian belakang
(c) Posisi pada bagian atas *headstock*

Gambar 10.
Pengambilan Data Temperatur dengan *Infrared*

Pada Tabel 3 dapat dilihat hasil pengukuran temperatur pada spindel *head* pada 3 posisi titik ukur A, B, dan C yang berbeda dengan 8 pengujian,

Tabel 3.
Perubahan Temperatur Selama Operasi dengan Pemotongan

| NO | Lama Proses (min) | RPM | Feed Rate (mm/min) | Temperatur Spindel (°C) | | |
|---------------------|-------------------|-----|--------------------|-------------------------|------|------|
| | | | | A | B | C |
| 1 | 19,43 | 550 | 226,8 | 34,0 | 30,0 | 30,0 |
| 2 | 21,03 | 550 | 226,8 | 35,5 | 31,0 | 31,0 |
| 3 | 20,5 | 550 | 226,8 | 35,5 | 32,0 | 31,0 |
| 4 | 19,51 | 550 | 226,8 | 37,0 | 33,0 | 32,0 |
| 5 | 19,5 | 550 | 226,8 | 38,3 | 34,3 | 33,0 |
| 6 | 19,13 | 550 | 226,8 | 38,6 | 33,8 | 34,0 |
| 7 | 23,05 | 550 | 226,8 | 39,3 | 34,3 | 34,0 |
| 8 | 19,12 | 550 | 226,8 | 32,0 | 30,0 | 30,0 |
| 9 | 22,4 | 550 | 226,8 | 32,0 | 30,0 | 30,0 |
| 10 | 18,4 | 550 | 226,8 | 35,0 | 31,0 | 30,0 |
| 11 | 18,2 | 550 | 226,8 | 35,5 | 31,0 | 30,3 |
| 12 | 22,1 | 550 | 226,8 | 37,0 | 33,0 | 31,0 |
| 13 | 19,06 | 550 | 226,8 | 35,5 | 31,0 | 30,0 |
| 14 | 15 | 550 | 226,8 | 50,0 | 33,0 | 30,4 |
| Deviasi (max – min) | | | | 18,0 | | |

Pengujian dimensi dilakukan untuk melihat efek termal terhadap hasil pemotongan. Pada Gambar 11 dapat dilihat proses pemotongan benda kerja dan pengukuran geometri dengan CMM.



Gambar 11.
Benda Hasil Pemotongan



Gambar 12.

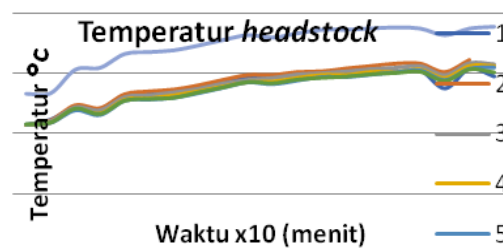
Pengujian Geometri dengan CMM

Tabel 4.
Hasil Pengukuran CMM

| NO | Temperatur Spindel (°C) | | | Penyimpangan Dimensi Hasil Pemotongan Benda Kerja (mm) | | | |
|---------------------|-------------------------|------|------|--|--------|--------|--------|
| | A | B | C | 1 | 2 | 3 | 1 - 3 |
| 1 | 34,0 | 30,0 | 30,0 | 0,9294 | 0,9541 | 0,9646 | 0,0352 |
| 2 | 35,5 | 31,0 | 31,0 | 0,7274 | 0,7849 | 0,8056 | 0,0782 |
| 3 | 35,5 | 32,0 | 31,0 | 0,8706 | 0,8968 | 0,8922 | 0,0215 |
| 4 | 37,0 | 33,0 | 32,0 | 0,8787 | 0,8930 | 0,9050 | 0,0263 |
| 5 | 38,3 | 34,3 | 33,0 | 0,7185 | 0,7564 | 0,7248 | 0,0063 |
| 6 | 38,6 | 33,8 | 34,0 | 0,6699 | 0,6998 | 0,6936 | 0,0237 |
| 7 | 39,3 | 34,3 | 34,0 | 0,6124 | 0,6512 | 0,6585 | 0,0460 |
| 8 | 32,0 | 30,0 | 30,0 | 0,8760 | 0,9194 | 0,9311 | 0,0551 |
| 9 | 32,0 | 30,0 | 30,0 | 0,8834 | 0,9227 | 0,9348 | 0,0514 |
| 10 | 35,0 | 31,0 | 30,0 | 0,9062 | 0,9276 | 0,9377 | 0,0316 |
| 11 | 35,5 | 31,0 | 30,3 | 0,9061 | 0,9328 | 0,9561 | 0,0500 |
| 12 | 37,0 | 33,0 | 31,0 | 0,9186 | 0,9233 | 0,9404 | 0,0217 |
| 13 | 35,5 | 31,0 | 30,0 | 0,9064 | 0,9340 | 0,9480 | 0,0416 |
| 14 | 50,0 | 33,0 | 30,4 | 0,8775 | 0,9128 | 0,9548 | 0,0773 |
| Deviasi (max – min) | | | | | | | 0,0719 |

Pembahasan

Data dari Tabel 1 dapat disajikan dalam bentuk grafik fungsi temperatur terhadap waktu seperti pada Gambar 13 berikut,



Gambar 13.
Grafik Perubahan Temperatur Spindel Head Tanpa Pemotongan

Dari Tabel 1 yang merupakan data hasil pengujian distorsi termal sumbu spindel dengan tanpa pembebanan dan Tabel 2 yaitu data hasil pengukuran perpindahan jarak *mandrel* uji, dapat dilihat bahwa distorsi termal pada sumbu spindel dengan kenaikan temperatur sebesar 16,3 °C, mengalami pemuaian sebesar 13 µm,

Tabel 3 yang merupakan data hasil pengujian distorsi termal sumbu spindel dengan pembebanan atau gaya pemotongan dan Tabel 4 yang merupakan

data hasil pengukuran penyimpangan dimensi hasil pemotongan dengan CMM, Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa distorsi termal pada sumbu spindel dengan kenaikan temperatur sebesar 18,0 °C, mengalami pemuaihan sebesar 71,9 µm,

SIMPULAN

Pada penelitian ini telah dilakukan evaluasi distorsi termal pada sumbu spindel mesin bubut sesuai ISO 230-3, Data hasil pengujian diperoleh nilai kesalahan kesesumbuan spindel dengan kenaikan temperatur pada spindel head sebesar 16,3 °C sebesar 13 µm dengan tanpa pembebanan, sedangkan dengan pembebanan 71,9 µm dengan kenaikan temperatur 18,0 °C,

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Balai Teknologi MEPPPO – BPPT dan Pusat Teknologi Industri Permesinan - BPPT atas penggunaan alat ukur termal dan mesin perkakas CNC untuk keperluan pengambilan data pada tulisan ini,

DAFTAR PUSTAKA

1. Li H, Yang Z, Xu B, Chen C, Kan Y, Liu G, *Reliability Evaluation of NC Machine Tools Considering Working Conditions*, Mathematical Problems in Engineering, 2016.
2. Mayr J, Jedzejewski J, Uhlmann E, Donmez M,A, Knapp W, Hartig F, Wendt K, Moriwaki T, Shore P, Schmitt R, Brecher C, Wurz T, Wegener K, *Thermal Issues in Machine Tools*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2012.
3. Kim B,S, Bac G,T, Kim G,N, Moon H,M, Noh J,P, Huh S,C, *A Study on the Thermal Characteristics of the Grinding Machine Applied Hydrostatic Bearing*, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2015.
4. Tlustý J, *Manufacturing Process and Equipment*, Prentice Hall, New Jersey, 2000.
5. Mori M, Mizuguchi H, Fujishima M, Mingkai N, Konishi K, *Design Optimization and Development of CNC Lathe Headstock to Minimize Thermal Deformation*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2009.
6. Qianjian G, huo F, Refeng X, Xiang C, Guoyong Z, Jianguo Y, *Spindle Thermal Error Optimization of a Five-Axis Machine Tools*, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017.
7. Wang H, Wang L, Li T, Han J, *Thermal Sensor Selection for the Thermal Error Modeling of Machine Tools Based on the Fuzzy Clustering Method*, Journal Advanced Manufacturing Technology, 2013.
8. Feng J, Tang X, Li Y, Song B, *Thermal Error Modeling of the Spindle Using Neurofuzzy System*, Mathematical Problems in Engineering, 2016.
9. Zhang C, Gao F, Meng Z, Zhao B, Li Y, *A Novel Linear Virtual Temperature Constructing Method for Thermal Error Modeling of Machine Tools*, International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2015.
10. Li Y, Zhao W, Wu W, Lu B, Chen Y, *Thermal Error Modeling of the Spindle Based on Multiple Variable for the Precision Machine Tool*, Journal Advanced Manufacturing Technology, 2014.
11. Dong Y, Zhou Z, Liu M, *A General Thermal model of Machine tools Spindle*, Advances in Mechanical Engineering, 2017.
12. Wu C,W, Tang C,H, Chang C,F, Shiao Y,S, *Thermal Error Compensation Method for Machine Center*, Journal Advanced Manufacturing Technology, 2012.
13. Miao E,M, Gong Y,Y, Niu P,C, Ji C,Z, Chen H,D, *Robustness of Thermal Error Compensation Modeling Models of CNC Machine Tools*, Journal Advanced Manufacturing Technology, 2013.
14. Chen T,C, Chang C,J, Hung J,P, Lee R,M, Wang C,C, *Real-Time Compensation for Thermal Errors of the Milling Machine*, Applied Sciences, 2016.
15. ISO/TC 39-SC2, *ISO-230 Test code for machine tools — Part 3: Determination of thermal effects*, Switzerland, 2007.
16. ISO/TC 39-SC2, *ISO 10791 Test conditions for Machining Centres – Part 10: Evaluation of Thermal Distortions*, Switzerland, 2001.
17. ISO/TC 39-SC2, *ISO 13041 Test conditions for numerically controlled turning machines and turning centres — Part 8: Evaluation of Thermal Distortion*, Switzerland, 2004.

(halaman ini sengaja dikosongkan)