

***PERFORMANCE ASSESMENT MESIN CNC VERTIKAL MILLING***  
**3 AXIS IKX DELTA BERDASARKAN PENYIMPANGAN**  
**GEOMETRI MESIN DAN DEFLEKSI SPINDEL**

**Tugas Akhir**

Disusun sebagai salah satu syarat untuk  
menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan Diploma IV

Oleh

Rizal S. Ramadhan

219411024



**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA MANUFAKTUR**  
**JURUSAN TEKNIK MANUFAKTUR**  
**POLITEKNIK MANUFAKTUR BANDUNG**  
**2023**

## LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir yang berjudul:

**PERFORMANCE ASSESMENT MESIN CNC VERTIKAL MILLING 3 AXIS  
IKX DELTA BERDASARKAN PENYIMPANGAN GEOMETRI MESIN  
DAN DEFLEKSI SPINDEL**

Oleh

Rizal S. Ramadhan

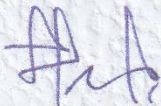
NIM 219411024

Telah direvisi, disetujui, dan disahkan sebagai Tugas Akhir penutup program  
pendidikan Sarjana Terapan (Diploma IV)  
Politeknik Manufaktur Bandung

Bandung, 28 Agustus 2023

Disetujui,

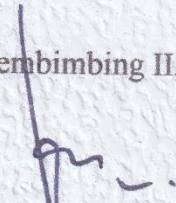
Pembimbing I,



Dr. Herman Budi Harja, S.T., M.T., IPM.

NIP.197902022008101001

Pembimbing II,

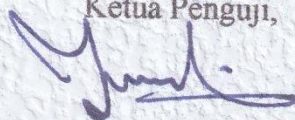


Haris Setiawan, SST., M.T.

NIP. 197512042001121001

Disahkan,

Ketua Penguji,



Ir. Darman, M.T.

NIP. 196005091988031004

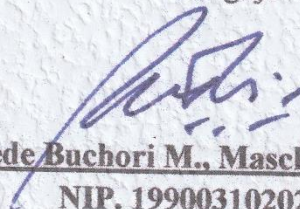
Penguji I,



Novi Saksono B. M., ST., MT.

NIP. 196711251992031002

Penguji II,



Dede Buchori M., Masch.Ing.HTL., MT

NIP. 199003102022031002

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Sebagai Civitas Akademika Politeknik Manufaktur Bandung, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Rizal S. Ramadhan  
NIM : 219411024  
Jurusan : Teknik Manufaktur  
Program Studi : Teknologi Rekayasa Manufaktur  
Jenjang Studi : Diploma 4  
Jenis Karya : Tugas Akhir  
Judul Karya : *Peformance Assesment* Mesin CNC Vertikal  
*Milling 3 Axis IKX Delta* Berdasarkan  
Penyimpangan Geometri Mesin dan Defleksi  
Spindel

Menyatakan bahwa:

1. Tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri (orisinal) atas bimbingan para Pembimbing.
2. Dalam tugas akhir ini tidak terdapat keseluruhan atau sebagian tulisan orang lain yang saya ambil dengan cara menyalin atau meniru dalam bentuk rangkaian kalimat atau simbol yang menunjukkan gagasan atau pendapat atau pemikiran dari penulis lain, yang saya akui seolah-olah sebagai tulisan saya sendiri, dan/atau tidak terdapat bagian atau keseluruhan tulisan yang saya salin, tiru, atau yang saya ambil dari tulisan orang lain tanpa memberikan pengakuan penulis aslinya (referensi).
3. Bila kemudian terbukti bahwa saya melakukan tindakan yang bertentangan dengan hal tersebut di atas, baik disengaja atau tidak, saya bersedia menerima akibatnya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandung  
Pada tanggal : 08 – 08 – 2023  
Yang Menyatakan,

(Rizal S. Ramadhan)  
NIM 219411024

## PERNYATAAN HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL (HKI)

Sebagai Civitas Akademika Politeknik Manufaktur Bandung, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Rizal S. Ramadhan  
NIM : 219411024  
Jurusan : Teknik Manufaktur  
Program Studi : Teknologi Rekayasa Manufaktur  
Jenjang Studi : Diploma 4  
Jenis Karya : Tugas Akhir  
Judul Karya : *Peformance Assesment* Mesin CNC Vertikal  
*Milling 3 Axis IKX Delta* Berdasarkan  
Penyimpangan Geometri Mesin dan Defleksi  
Spindel

Menyatakan/menyetujui bahwa:

1. Segala bentuk Hak Kekayaan Intelektual terkait dengan tugas akhir tersebut menjadi milik Institusi Politeknik Manufaktur Bandung, yang selanjutnya pengelolaanya berada dibawah Jurusan dan Program Studi, dan diatur sesuai dengan ketentuan yang berlaku.
2. Memberikan kepada Politeknik Manufaktur Bandung Hak Bebas Royalti *Noneklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)* atas hasil tugas akhir saya tersebut. beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini, maka Politeknik Manufaktur Bandung berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama-nama Dosen Pembimbing dan nama saya sebagai anggota penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandung  
Pada tanggal : 08 – 08 – 2023  
Yang Menyatakan,

(Rizal S. Ramadhan)  
NIM 219411024

## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah yang hanya kepada-Nya kami memuji, memohon pertolongan, dan mohon keampunan. Kami berlindung kepada-Nya dari kekejian diri dan kejahatan amalan kami. Barang siapa yang diberi petunjuk oleh Allah maka tidak ada yang dapat menyesatkan, dan barang siapa yang tersesat dari jalan-Nya maka tidak ada yang dapat memberinya petunjuk. Dan aku bersaksi bahwa tiada sembah yang berhak disembah melainkan Allah saja, yang tiada sekutu bagiNya. Dan aku bersaksi bahwa Muhammad adalah hambaNya dan RasulNya.

Atas petunjuk dan pertolongan-Nya, Alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul: “*Performance Assesment* Mesin CNC Vertikal *Milling 3 Axis IKX Delta* Berdasarkan Penyimpangan Geometri Mesin dan Defleksi Spindel”.

Tugas akhir dibuat dalam rangka memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan (Diploma-IV) pada Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur di Politeknik Manufaktur Bandung.

Terselesaikannya tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materil baik langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan tugas akhir ini hingga selesai, terutama kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat serta karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua yang selalu memberikan motivasi dan doa restu supaya tugas akhir ini dapat terselesaikan.
3. Bapak Dr. Herman Budi Harja, ST., MT., IPM. selaku dosen pembimbing 1 dan Bapak Haris Setiawan, S.ST., MT., selaku dosen pembimbing 2, yang telah memberikan banyak bimbingan, masukan, dan petunjuk kepada penulis.
4. Seluruh staff dosen serta instruktur Jurusan Teknik Manufaktur Politeknik Manufaktur Bandung atas segala ilmu dan bimbingan yang telah diberikan selama penulis menempuh Pendidikan di Jurusan Teknik Manufaktur.
5. Saudara Hendi Xaverius dan Rusdi Fadila yang telah bersama-sama dalam mengerjakan *project assesment* mesin CNC IKX Delta.

6. Rekan-rekan mahasiswa kelas MED 2019 dan Jurusan Teknik Manufaktur yang telah memberikan dukungan dan kerjasama dalam menyelesaikan pendidikan di Politeknik Manufaktur Bandung.
7. Dan pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Akhir kata penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Karena itu, penulis memohon saran dan kritik yang sifatnya membangun demi kesempurnaannya dan semoga bermanfaat bagi kita semua. Aamiin Ya Robbal Alamin.

Bandung, Agustus 2023

Penulis

## ABSTRAK

Mesin CNC *Milling 3 Axis IKX Delta* buatan POLMAN Bandung perlu dilakukan *assesment* untuk menguji performanya. Salah satu bentuk *assesment* mesin perkakas CNC yaitu pengukuran penyimpangan geometri mesin dan kajian defleksi spindel & alat potong, karena kedua faktor tersebut sangat berpengaruh terhadap kualitas produk yang dihasilkan. Pengukuran penyimpangan geometri mesin dilakukan melalui dua metode yaitu, (i) pengukuran tanpa beban menggunakan Laser Interferometer dan (ii) pengukuran dengan beban melalui uji *cutting* benda standar. Pengujian defleksi spindel dan alat potong dilakukan melalui dua metode yaitu, (i) perhitungan matematis dengan berdasar pada persamaan yang memodelkan spindel sebagai batang kantilever yang ditumpu oleh bearing yang dimodelkan sebagai pegas dan (ii) simulasi *Finite Element Method* (FEM) menggunakan *software* Ansys melalui analisis statis. Hasil pengukuran geometri mesin dibandingkan dengan standar pada ISO 10791, didapat hasil akurasi dan keterulangan pemosisian sumbu X  $27\mu\text{m}$  (*Failed*) dan  $15,5\mu\text{m}$  (*Failed*), sumbu Y  $75,8\mu\text{m}$  (*Failed*) dan  $16,7\mu\text{m}$  (*Failed*) dan sumbu Z  $69,9\mu\text{m}$  (*Failed*) dan  $48,2\mu\text{m}$  (*Failed*). Hasil pengukuran tersebut kemudian dianalisis dan dilakukan perbaikan melalui *input* parameter kompensasi *error* pertitik pada *controller* mesin. Setelah dilakukan kompensasi, penyimpangan geometri mesin diukur kembali, didapat hasil akurasi dan keterulangan pemosisian sumbu X  $4,5\mu\text{m}$  (OK) dan  $3,4\mu\text{m}$  (OK), sumbu Y  $2,6\mu\text{m}$  (OK) dan  $2,1\mu\text{m}$  (OK) dan sumbu Z  $7,7\mu\text{m}$  (OK) dan  $6,4\mu\text{m}$  (OK), hasil tersebut menunjukkan bahwa perbaikan geometri mesin sudah berhasil dilakukan. Kajian defleksi spindel dan alat potong dilakukan dengan gaya potong ( $F_c$ ) 115 N sesuai dengan parameter pemotongan uji *cutting* didapat hasil; (i) pada kondisi spindel tidak dipasang *tool holder* dan *endmill* defleksi yang terjadi  $1,9\mu\text{m}$  dan (ii) pada kondisi spindel dipasang *tool holder* BT30 dan *endmill*  $\varnothing 10\text{mm}$  *overhang* 35mm defleksi alat potong yang terjadi  $40,08\mu\text{m}$ . Berdasarkan data uji *non-cutting* dan uji *cutting*, didapat data kontribusi penyebab penyimpangan pemosisian pada produk yang dihasilkan mesin; akibat geometri *error* mesin (3,72%), akibat defleksi pada alat potong (16,47%), kuasi *error* mesin CMM (6,27%) dan akibat termal + dan lainnya (73,54%).

**Kata kunci:** penyimpangan geometri mesin, laser interferometer, kompensasi penyimpangan geometri, defleksi spindel, defleksi alat potong

## **ABSTRAK**

*The IKX Delta 3 Axis CNC Milling Machine made by POLMAN Bandung needs to be assessed to test its performance. One form of CNC machine tool assessment is the measurement of machine geometry error and spindle & cutting tools deflection study, because these two factors greatly affect the quality of the products produced. Measurement of machine geometry error is carried out through two methods, namely, (i) measurement without load using a Laser Interferometer and (ii) measurement with load through standard object cutting tests. Spindle or cutting tool deflection testing is done through two methods, namely, (i) mathematical calculations based on equations that model the spindle as a cantilever rod supported by bearings modeled as springs and (ii) Finite Element Method (FEM) simulations using Ansys software through static analysis. The results of the machine geometry measurements were compared with the standards in ISO 10791, obtained the results of the accuracy and repeatability of the positioning of the X axis 27 $\mu$ m (Failed) and 15.5 $\mu$ m (Failed), Y axis 75.8 $\mu$ m (Failed) and 16.7 $\mu$ m (Failed) and Z axis 69.9 $\mu$ m (Failed) and 48.2 $\mu$ m (Failed). The measurement results were then analyzed and improved through the input of point error compensation parameters on the machine controller. After compensation, the deviation of the machine geometry was measured again, obtained the results of the accuracy and repeatability of the positioning of the X axis 4.5 $\mu$ m (OK) and 3.4 $\mu$ m (OK), Y axis 2.6 $\mu$ m (OK) and 2.1 $\mu$ m (OK) and Z axis 7.7 $\mu$ m (OK) and 6.4 $\mu$ m (OK), these results indicate that the improvement of machine geometry has been successfully carried out. The study of spindle deflection was carried out with a cutting force ( $F_c$ ) of 115 N in accordance with the cutting parameters of the cutting test, the results obtained; (i) in the condition that the spindle was not installed with a tool holder and endmill deflection occurred 1.9 $\mu$ m and (ii) in the condition that the spindle was installed with a BT30 tool holder and endmill  $\varnothing$ 10mm overhang 35mm cutting tool deflection occurred 40.08 $\mu$ m. Based on the non-cutting test data and cutting test data, the contribution data of the causes of deviation in the products produced by the machine were obtained; due to machine geometry error (3.72%), due to cutting tool deflection (16.47%), quasi CMM machine error (6.27%) and due to thermal + and other effects (73.54%).*

**keyword** : machine geometry error, laser interferometer, geometry error compensation, spindle deflection, cutting tool deflection

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>i</b>
<b>PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	<b>ii</b>
<b>PERNYATAAN HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL (HKI)</b> .....	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xx</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>xxix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>I-1</b>
I.1 Latar Belakang .....	I-1
I.2 Rumusan Masalah .....	I-3
I.3 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah.....	I-3
I.4 Tujuan .....	I-4
I.5 Metode Penelitian.....	I-4
I.6 Sistematika Penulisan.....	I-6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>II-1</b>
II.1 Tinjauan Teori.....	II-1
II.1.1 Mesin Perkakas .....	II-1
II.1.2 Mesin Perkakas CNC .....	II-2
II.1.3 Mesin Perkakas CNC <i>Milling</i> .....	II-2
II.1.4 Penyimpangan Pada Produk Hasil Mesin Perkakas.....	II-4
II.1.5 Penyimpangan Geometri Mesin Perkakas .....	II-5
II.1.6 <i>Setting Back</i> Kompensasi Penyimpangan Geometri Mesin .....	II-9
II.1.7 Uji <i>Cutting</i> Benda <i>Circle Diamond Square Test</i> .....	II-10
II.1.8 Persamaan Dasar Keseimbangan .....	II-11
II.1.9 Defleksi Spindel.....	II-11
II.1.10 Daya dan Gaya Potong dalam Proses Permesinan <i>Milling</i> .....	II-15
II.1.11 Metode Elemen Hingga ( <i>Finite Element Method</i> ).....	II-17
II.2 Tinjauan Alat .....	II-18

II.2.1 Laser Interferometer.....	II-18
II.2.2 <i>Tool Holder &amp; Endmill</i> .....	II-25
II.2.3 Mesin CMM ( <i>Coordinate Measuring Machine</i> ).....	II-26
II.3 Ruang Lingkup Standarisasi .....	II-26
II.3.1 ISO 230-2:2006.....	II-27
II.3.2 ISO 10791-2:2001 .....	II-32
II.3.3 ISO 10791-4:1998.....	II-34
II.3.4 ISO 10791-7:2014.....	II-35
II.4 Studi penelitian terdahulu .....	II-37
<b>BAB III Metodologi Penelitian .....</b>	<b>III-1</b>
III.1 Diagram Alir Penelitian.....	III-1
III.2 Alat Penelitian .....	III-3
III.2.1 Objek Mesin Uji.....	III-3
III.2.2 Laser Interferometer .....	III-4
III.2.3 <i>Software</i> Pendukung Laser Ineterferometer .....	III-9
III.2.4 <i>Software</i> ANSYS 2022 R1 .....	III-9
III.2.5 <i>Microsoft excel</i> .....	III-9
III.3 Pengukuran Dengan Beban Spesimen Uji <i>Cutting</i> Benda Standar ISO 10791-7:2014 <i>Circle Diamond Square Test</i> .....	III-9
III.3.1 Parameter Pemotongan Spesimen Uji <i>Circle Diamond Square Test</i> .....	III-12
III.4 Pengukuran Tanpa Beban Menggunakan Laser Interferometer .....	III-13
III.4.1 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu <i>Linear X</i> .....	III-15
III.4.2 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu <i>Linear Y</i> .....	III-17
III.4.3 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan dan Keterulangan Sumbu <i>Linear Z</i> .....	III-19
III.4.4 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu X.....	III-21
III.4.5 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Vertikal Sumbu X.....	III-24

III.4.6	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu Y .....	III-27
III.4.7	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Vertikal Sumbu Y .....	III-30
III.4.8	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu Z.....	III-33
III.4.9	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada PenyimpanganKelurusan Vertikal Sumbu Z.....	III-36
III.4.10	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Pitch</i> Sumbu X.....	III-39
III.4.11	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Pitch</i> Sumbu Y .....	III-41
III.4.12	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Pitch</i> Sumbu Z.....	III-43
III.4.13	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Yaw</i> Sumbu X.....	III-45
III.4.14	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Yaw</i> Sumbu Y.....	III-47
III.4.15	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Yaw</i> Sumbu Z .....	III-49
III.4.16	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Ketegaklurusan Antar Sumbu XY.....	III-51
III.5	Parameter Pengukuran <i>Software Carto Capture</i> Laser Interferometer	III-54
III.5.1	Parameter Pengukuran Pemosisian Sumbu <i>Linear</i> .....	III-57
III.5.2	Parameter Pengukuran Kelurusan.....	III-65
III.5.3	Parameter Pengukuran <i>Angular</i> .....	III-76
III.5.4	Parameter Pengukuran Ketegaklurusan Antar Sumbu.....	III-87
III.6	Pemasangan Peralatan Pendukung Laser Interferometer Untuk <i>Capture Data</i> .....	III-93
III.7	Standar Toleransi Penyimpangan Geometri Mesin Perkakas .....	III-95
III.7.1	Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu <i>Linear</i> .....	III-95
III.7.2	Penyimpangan Kelurusan pada Sumbu Mesin .....	III-96

III.7.3 Penyimpangan <i>Angular</i> pada Sumbu Mesin.....	III-97
III.7.4 Penyimpangan Ketegaklurusan Antar Sumbu Mesin .....	III-98
III.8 Parameter Nilai Kompensasi Penyimpangan Geometri Mesin .....	III-99
III.8.1 Penentuan Nilai Kompensasi Secara <i>Absolute</i> .....	III-99
III.8.2 Penentuan Nilai Kompensasi Secara <i>Incerement</i> .....	III-100
III.9 Perhitungan Defleksi Spindel Secara Matematis pada Kondisi Spindel Tidak Dipasang <i>Tool holder</i> dan <i>Endmill</i> .....	III-101
III.9.1 Menghitung Momen Inersia Badan Spindel dan Kepala Spindel	III-103
III.9.2 Menghitung Gaya Reaksi <i>Bearing</i> Depan dan <i>Bearing</i> Belakang.	III-105
III.9.3 Menghitung Kekakuan <i>Bearing</i> Belakang.....	III-107
III.9.4 Menghitung Kekakuan <i>Bearing</i> Depan .....	III-110
III.9.5 Menghitung Defleksi Spindel .....	III-112
III.10 Perhitungan Defleksi Alat Potong Secara Matematis pada Kondisi Spindel Dipasang <i>Tool holder</i> BT30 Objek dan <i>Endmill</i> Ø10 mm ( <i>Overhang</i> 35 mm) Dengan Gaya Potong 115N.....	III-114
III.10.1 Menghitung Momen Inersia Badan Spindel & Kepala Spindel.	III-115
III.10.2 Menghitung Gaya Reaksi <i>Bearing</i> Depan & <i>Bearing</i> Belakang.	III-119
III.10.3 Menghitung Kekakuan <i>Bearing</i> Belakang.....	III-121
III.10.4 Menghitung Kekakuan <i>Bearing</i> Depan .....	III-121
III.10.5 Menghitung Defleksi Alat potong .....	III-122
III.11 Parameter Kajian Defleksi spindel dan Alat Potong Menggunakan Metode Elemen Hingga dengan <i>software Ansys</i> .....	III-123
<b>BAB IV PENGOLAHAN DAN ANALISIS DATA.....</b>	<b>IV-1</b>
IV.1 Hasil Pengukuran Dengan Beban Spesimen Uji <i>Cutting</i> Benda Standar ISO 10791-7:2014 <i>Circle Diamond Square Test</i> .....	IV-1
IV.2 Hasil Pengukuran Tanpa Beban Menggunakan Laser Interferometer ...	IV-7
IV.2.1 Hasil Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu <i>Linear</i> Serta Statusnya Terhadap Standar ISO 10791-4:1998 .....	IV-7
IV.2.2 Hasil Penyimpangan Kelurusan Serta Statusnya Terhadap Standar ISO 10791-2:2001 Dibawah ini merupakan hasil pengukuran kelurusan horizontal sumbu X dengan menggunakan laser interferometer...	IV-25

IV.2.3 Hasil Penyimpangan <i>Angular</i> Serta Statusnya Terhadap Standar ISO 10791-2:2001 .....	IV-48
IV.2.4 Hasil Penyimpangan Ketegaklurusan Antar Sumbu Mesin Serta Statusnya Terhadap Standar ISO 10791-2 .....	IV-69
IV.2.5 Status Penyimpangan Geometri Mesin Keseluruhan .....	IV-74
IV.3 Spesifikasi <i>Ball Screw</i> dan <i>Linear Guideway</i> yang digunakan.....	IV-75
IV.4 Parameter Kompensasi GE Mesin Yang Berstatus <i>Out Of Tolerance</i> .IV-75	
IV.4.1 Kompensasi berdasarkan Nilai Penyimpangan Keseluruhan .....	IV-76
IV.4.2 Kompensasi Berdasarkan Nilai Penyimpangan Per Titik.....	IV-79
IV.5 Proses <i>Input</i> Parameter Kompensasi <i>Geometry Error</i> Pada <i>Controller</i> Mesin CNC IKX Delta ( <i>Controller Delta</i> ) .....	IV-89
IV.6 Hasil Pengukuran Ulang Penyimpangan Geometri Setelah Dikompensasi Secara Keseluruhan .....	IV-94
IV.6.1 Penyimpangan Pemosisian Sumbu X .....	IV-94
IV.6.2 Penyimpangan Pemosisian Sumbu Y .....	IV-95
IV.6.3 Penyimpangan Pemosisian Sumbu Z .....	IV-95
IV.7 Hasil Pengukuran Ulang Penyimpangan Geometri Setelah Dikompensasi Per Titik.....	IV-96
IV.7.1 Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu <i>Linear X</i> ...IV-97	
IV.7.2 Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu <i>Linear Y</i> .IV-100	
IV.7.3 Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu <i>Linear Z</i> .IV-103	
IV.7.4 Kondisi Penyimpangan Kelurusan Setelah Kompensasi Pemosisian Secara Per Titik .....	IV-105
IV.7.5 Status Penyimpangan Pemosisian Dan Kelurusan Setelah Kompensasi Per Titik.....	IV-109
IV.8 Hasil Defleksi Spindel dan Alat Potong Secara Perhitungan ManualIV-110	
IV.9 Hasil Simulasi Defleksi Spindel dan Alat Potong Melalui <i>Software ANSYS</i> .....	IV-112
IV.10 Persentase Penyebab Berbagai Jenis Penyimpangan Pada Produk ..IV-115	
IV.11 Persentase Penyebab Penyimpangan Dimensi Pada Produk Secara Keseluruhan.....	IV-119
<b>BAB V Kesimpulan .....</b>	<b>V-1</b>

V.1 Kesimpulan.....	V-1
V.2 Saran.....	V-3

## DAFTAR TABEL

Tabel II. 1 Jenis kesalahan geometri mesin perkakas .....	II-5
Tabel II. 2 Nilai kebutuhan spesifik energi untuk proses permesinan beberapa material [21] .....	II-16
Tabel II. 3 Persyaratan Ketelitian Geometri Berdasarkan ISO 10791-2:2001..	II-33
Tabel II. 4 Persyaratan Ketelitian Geometri Berdasarkan ISO 10791-4:1998..	II-34
Tabel II. 5 Toleransi <i>circle diamond square test</i> untuk tipe M1_80 <i>test piece</i> ..	II-35
Tabel II. 6 Studi Penelitian Terdahulu .....	II-37
Tabel III. 1 Spesifikasi Mesin CNC <i>Milling IKX Delta 3 Axis</i> .....	III-3
Tabel III. 2 Komponen Laser Interferometer yang Digunakan.....	III-4
Tabel III. 3 Peralatan dan bahan uji <i>cutting</i> .....	III-10
Tabel III. 4 Penempatan WCS dan MCS Benda uji <i>cutting</i> .....	III-11
Tabel III. 5 <i>Material thermal expansion coefficients</i> .....	III-56
Tabel III. 6 Parameter Program Pengukuran Pemosisian Sumbu <i>Linear</i> .....	III-57
Tabel III. 7 Data Pengukuran Pemosisian Sumbu <i>Linear X</i> .....	III-62
Tabel III. 8 Data Pengukuran Pemosisian Sumbu <i>Linear Y</i> .....	III-63
Tabel III. 9 Data Pengukuran Pemosisian Sumbu <i>Linear Z</i> .....	III-64
Tabel III. 10 Parameter Program Pengukuran Kelurusan .....	III-65
Tabel III. 11 Data Pengukuran Kelurusan Horizontal Sumbu X.....	III-70
Tabel III. 12 Data Pengukuran Kelurusan Vertikal Sumbu X .....	III-71
Tabel III. 13 Data Pengukuran Kelurusan Horizontal Sumbu Y .....	III-72
Tabel III. 14 Data Pengukuran Kelurusan Vertikal Sumbu Y .....	III-73
Tabel III. 15 Data Pengukuran Kelurusan Horizontal Sumbu Z.....	III-74
Tabel III. 16 Data Pengukuran Kelurusan Vertikal Sumbu Z.....	III-75
Tabel III. 17 Parameter Program Pengukuran <i>Angular</i> .....	III-76
Tabel III. 18 Data Pengukuran <i>Angular Pitch</i> sumbu X.....	III-81
Tabel III. 19 Data Pengukuran <i>Angular Pitch</i> sumbu Y .....	III-82
Tabel III. 20 Data Pengukuran <i>Angular Pitch</i> sumbu Z .....	III-83
Tabel III. 21 Data Pengukuran <i>Angular Yaw</i> sumbu X .....	III-84
Tabel III. 22 Data Pengukuran <i>Angular Yaw</i> sumbu Y .....	III-85
Tabel III. 23 Data Pengukuran <i>Angular Yaw</i> sumbu Z.....	III-86
Tabel III. 24 Parameter Program Pengukuran Ketegaklurusan .....	III-87

Tabel III. 25 Data Pengukuran Ketegaklurusan XY <i>First Axis Movement</i> .....	III-92
Tabel III. 26 Data Pengukuran Ketegaklurusan XY <i>Second Axis Movement</i> ..	III-92
Tabel III. 27 Proses pemasangan peralatan pendukung laser interferometer...	III-93
Tabel III. 28 Standar Toleransi Penyimpangan Geometri Pemosisian .....	III-96
Tabel III. 29 Standar Toleransi Penyimpangan Geometri Kelurusan Horizontal dan Kelurusan Vertikal Sumbu X.....	III-96
Tabel III. 30 Standar Toleransi Penyimpangan Geometri Kelurusan Horizontal dan Kelurusan Vertikal Sumbu Y.....	III-97
Tabel III. 31 Standar Toleransi Penyimpangan Geometri Kelurusan Horizontal dan Kelurusan Vertikal Sumbu Z.....	III-97
Tabel III. 32 Standar Toleransi Penyimpangan Geometri <i>Angular Pitch</i> dan <i>Angular Yaw</i> Sumbu X .....	III-97
Tabel III. 33 Standar Toleransi Penyimpangan Geometri <i>Angular Pitch</i> dan <i>Angular Yaw</i> Sumbu Y .....	III-98
Tabel III. 34 Standar Toleransi Penyimpangan Geometri <i>Angular Pitch</i> dan <i>Angular Yaw</i> Sumbu Z.....	III-98
Tabel III. 35 Standar Toleransi Penyimpangan Geometri Ketegaklurusan XY.	III-98
Tabel III. 36 Daftar pembagian segmen, diameter poros (D) dan lubang (d) (kondisi spindel tidak dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> ).....	III-103
Tabel III. 37 Parameter hitungan yang digunakan untuk menghitung momen inersia badan spindel ( $I_L$ ) dan momen inersia kepala spindel ( $I_A$ ) pada kondisi spindel tidak dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> .....	III-104
Tabel III. 38 Nilai kekakuan aksial <i>deep groove ball bearing</i> dengan kode 7006C pabrikan Nachi.....	III-108
Tabel III. 39 Kodefikasi sudut kontak.....	III-108
Tabel III. 40 Parameter hitungan untuk menghitung kekakuan radial <i>bearing</i> untuk satu buah <i>bearing</i> ( $K_{r\ single}$ ) dan sepasang <i>bearing</i> ( $K_{r\ paired}$ ).....	III-109
Tabel III. 41 Nilai kekakuan radial <i>deep groove ball bearing</i> dengan kode 7006C pabrikan Nachi.....	III-109
Tabel III. 42 Nilai kekakuan aksial <i>angular contact bearing</i> dengan kode 7008C pabrikan Nachi.....	III-110
Tabel III. 43 Kodefikasi sudut kontak.....	III-111

Tabel III. 44 Parameter hitungan kekakuan radial <i>bearing</i> untuk satu buah <i>bearing</i> ( $K_{r \text{ single}}$ ), sepasang <i>bearing</i> ( $K_{r \text{ paired}}$ ) dan tiga buah <i>bearing</i> ( $K_{r \text{ triple}}$ ) (kondisi spindle tanpa dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> ).....	III-111
Tabel III. 45 Nilai kekakuan radial <i>angular contact ball bearing</i> dengan kode 7008C pabrikan Nachi.....	III-112
Tabel III. 46 Parameter hitungan untuk menghitung defleksi spindle objek mesin pada kondisi tidak dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> .....	III-113
Tabel III. 47 Daftar pembagian segmen, diameter poros (D) dan lubang (d) (kondisi spindle dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> ) .....	III-115
Tabel III. 48 Parameter hitungan yang digunakan untuk menghitung momen inersia badan spindle ( $I_L$ ) dan momen inersia kepala spindle ( $I_A$ ) pada kondisi spindle dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> .....	III-116
Tabel III. 49 Parameter hitungan untuk menghitung defleksi spindle objek mesin pada kondisi tidak dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> .....	III-122
Tabel III. 50 Parameter material yang digunakan pada analisis metode elemen hingga.....	III-123
Tabel III. 51 Parameter kekakuan <i>bearing</i> depan ( <i>triple angular contact ball bearing</i> ) 7008C pabrikan Nachi. ....	III-127
Tabel III. 52 Parameter kekakuan <i>bearing</i> belakang ( <i>paired deep groove ball bearing</i> ) 7006C pabrikan Nachi. ....	III-128
Tabel III. 53 Parameter pemotongan saat uji <i>cutting</i> .....	III-128
Tabel IV. 1 Pengukuran 6 Spesimen Benda Uji <i>Cutting</i> Pada Mesin CMM ....	IV-3
Tabel IV. 2 Status Penyimpangan Geometri Pada Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-5
Tabel IV. 3 Hasil Pengukuran Pemosisian Sumbu <i>Linear X</i> .....	IV-7
Tabel IV. 4 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran Pemosisian Sumbu <i>Linear X</i> Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-9
Tabel IV. 5 Kontribusi Penyimpangan Pemosisian Sumbu X.....	IV-12
Tabel IV. 6 Hasil Pengukuran Pemosisian Sumbu <i>Linear Y</i> .....	IV-12
Tabel IV. 7 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran Pemosisian Sumbu <i>Linear Y</i> Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-14
Tabel IV. 8 Kontribusi Penyimpangan Pemosisian Sumbu Y.....	IV-17
Tabel IV. 9 Hasil Pengukuran Pemosisian Sumbu <i>Linear Z</i> .....	IV-17

Tabel IV. 10 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran Pemosisian Sumbu <i>Linear Z Pada Software Carto explore</i> .....	IV-19
Tabel IV. 11 Hasil Pengukuran Penyimpangan Pengukuran Kelurusan Horizontal Sumbu X.....	IV-25
Tabel IV. 12 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran Kelurusan Horizontal Sumbu X Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-26
Tabel IV. 13 Kontribusi Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu X.....	IV-29
Tabel IV. 14 Hasil Pengukuran Penyimpangan Pengukuran Kelurusan Vertikal Sumbu X.....	IV-29
Tabel IV. 15 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran Kelurusan Vertikal Sumbu X Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-30
Tabel IV. 16 Hasil Pengukuran kelurusan horizontal sumbu Y.....	IV-32
Tabel IV. 17 Hasil Pengolahan Data Pengukuran Kelurusan Horizontal Sumbu Y Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-33
Tabel IV. 18 Kontribusi Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu Y.....	IV-35
Tabel IV. 19 Hasil Pengukuran kelurusan vertikal sumbu Y.....	IV-36
Tabel IV. 20 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran Kelurusan Vertikal Sumbu Y Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-37
Tabel IV. 21 Hasil Pengukuran kelurusan horizontal sumbu Z.....	IV-39
Tabel IV. 22 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran Kelurusan Horizontal Sumbu Z Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-40
Tabel IV. 23 Hasil Pengukuran kelurusan vertikal sumbu Z.....	IV-42
Tabel IV. 24 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran Kelurusan Vertikal Sumbu Z Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-43
Tabel IV. 25 Hasil Pengukuran <i>Angular Pitch</i> Sumbu X.....	IV-48
Tabel IV. 26 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran <i>Angular Pitch</i> Sumbu X Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-49
Tabel IV. 27 Hasil Pengukuran <i>Angular Yaw</i> Sumbu X.....	IV-51
Tabel IV. 28 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran <i>Angular Yaw</i> Sumbu X Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-52
Tabel IV. 29 Hasil Pengukuran <i>Angular Pitch</i> Sumbu Y.....	IV-54

Tabel IV. 30 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran <i>Angular Pitch</i> Sumbu Y Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-55
Tabel IV. 31 Hasil Pengukuran <i>Angular Yaw</i> Sumbu Y.....	IV-57
Tabel IV. 32 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran <i>Angular Yaw</i> Sumbu Y Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-58
Tabel IV. 33 Hasil Pengukuran <i>Angular Pitch</i> Sumbu Z.....	IV-60
Tabel IV. 34 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran <i>Angular Pitch</i> Sumbu Z Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-61
Tabel IV. 35 Hasil Pengukuran <i>Angular Yaw</i> Sumbu Z.....	IV-63
Tabel IV. 36 Hasil Pengolahan Data Penyimpangan Pengukuran <i>Angular Yaw</i> Sumbu Z Pada <i>Software Carto explore</i> .....	IV-64
Tabel IV. 37 Hasil Pengukuran Ketegaklurusan Sumbu XY <i>First Axis Movement</i> (Sumbu Y gerak dan Sumbu X sebagai datum) .....	IV-69
Tabel IV. 38 Hasil Pengukuran Ketegaklurusan Sumbu XY <i>Second Axis Movement</i> (Sumbu X gerak dan Sumbu Y sebagai datum) .....	IV-70
Tabel IV. 39 Hasil Pengolahan Data Ketegaklurusan Sumbu XY.....	IV-71
Tabel IV. 40 Kontribusi Penyimpangan Pengukuran ketegaklurusan sumbu XY.....	IV-73
Tabel IV. 41 Status penyimpangan geometri dengan status <i>in tolerance</i> .....	IV-74
Tabel IV. 42 Status penyimpangan geometri dengan status <i>out of tolerance</i> ...IV-74	
Tabel IV. 43 Penentuan Nilai Kompensasi Pemosisian Sumbu X <i>Forward Direction</i> .....	IV-80
Tabel IV. 44 Nilai Kompensasi Pemosisian Sumbu <i>Linear X</i> .....	IV-87
Tabel IV. 45 Nilai Kompensasi Pemosisian Sumbu <i>Linear Y</i> .....	IV-88
Tabel IV. 46 Nilai Kompensasi Pemosisian Sumbu <i>Linear Z</i> .....	IV-88
Tabel IV. 47 Hasil Pengukuran Pemosisian Sumbu <i>Linear X</i> Pada <i>Software Carto explore</i> Setelah Dilakukan Kompenasi.....	IV-97
Tabel IV. 48 Hasil Pengukuran Pemosisian Sumbu <i>Linear Y</i> Pada <i>Software Carto explore</i> Setelah Dilakukan Kompenasi.....	IV-100
Tabel IV. 49 Hasil Pengukuran Pemosisian dan Keterulangan Sumbu <i>Linear Z</i> Pada <i>Software Carto explore</i> Setelah Dilakukan Kompenasi.....	IV-103
Tabel IV. 50 Kelurusan Horizontal Sumbu X Setelah dikompensasi.....	IV-105

Tabel IV. 51 Kelurusan Vertikal Sumbu X Setelah dikompensasi.....	IV-106
Tabel IV. 52 Kelurusan Horizontal Sumbu Y Setelah dikompensasi.....	IV-107
Tabel IV. 53 Kelurusan Vertikal Sumbu Y Setelah dikompensasi.....	IV-107
Tabel IV. 54 Kelurusan Horizontal Sumbu Z Setelah dikompensasi.....	IV-108
Tabel IV. 55 Kelurusan Vertikal Sumbu Z Setelah dikompensasi.....	IV-109
Tabel IV. 56 Status penyimpangan geometri setelah dikompensasi.....	IV-110
Tabel IV. 57 Nilai kekakuan radial <i>deep groove ball bearing</i> ( <i>bearing</i> belakang/Sr) dengan kode 7006C pabrikan Nachi.....	IV-111
Tabel IV. 58 Nilai kekakuan radial <i>angular contact ball bearing</i> ( <i>bearing</i> depan/Sf) dengan kode 7008C pabrikan Nachi.....	IV-111
Tabel IV. 59 Hasil perhitungan manual defleksi spindel kondisi tanpa <i>tool holder</i> dan tanpa <i>endmill</i> .....	IV-111
Tabel IV. 60 Hasil perhitungan manual defleksi spindel kondisi dipasang <i>tool holder</i> BT30 dan <i>endmill</i> Ø10 mm <i>overhang</i> 35 mm.....	IV-112
Tabel IV. 61 hasil simulasi ANSYS defleksi spindel pada kondisi tanpa <i>tool holder</i> dan tanpa <i>endmill</i> .....	IV-112
Tabel IV. 62 Hasil simulasi ANSYS defleksi spindel kondisi dipasang <i>tool holder</i> BT30 dan <i>endmill</i> Ø10 mm <i>overhang</i> 35 mm.....	IV-113
Tabel IV. 63 Kontribusi penyimpangan pemosisian sumbu X pada produk....	IV-116
Tabel IV. 64 kontribusi penyimpangan pemosisian sumbu Y pada produk...	IV-116
Tabel IV. 65 Kontribusi penyimpangan kelurusan horizontal sumbu X pada produk.....	IV-117
Tabel IV. 66 Kontribusi penyimpangan kelurusan horizontal sumbu X pada produk.....	IV-118
Tabel IV. 67 Kontribusi penyimpangan dimensi pada produk.....	IV-119

## DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1 CNC DMG Mori <i>Vertical Milling Machine</i> M1 series [5].....	II-3
Gambar II. 2 CNC DMG Mori <i>Horizontal Milling Machine</i> NHX 4000 [5] ..	II-3
Gambar II. 3 CNC DMG Mori <i>5 Axis Milling</i> CMX 70 U [5] .....	II-3
Gambar II. 4 Penyimpangan geometri pada mesin perkakas [6]. .....	II-5
Gambar II. 5 Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu Linier.....	II-6
Gambar II. 6 Penyimpangan Kelurusan Pada Sumbu Mesin.....	II-6
Gambar II. 7 Penyimpangan <i>Angular</i> pada Sumbu Mesin .....	II-7
Gambar II.8 <i>Fishbone</i> Penyebab Penyimpangan Keakurasian Mesin.....	II-9
Gambar II. 9 <i>Circle Diamond Square Test</i> .....	II-10
Gambar II. 10 Skema Tekanan Hertz dan Deformasinya [14].....	II-13
Gambar II. 11 Skema defleksi radial pada spindel .....	II-14
Gambar II. 12 Tahapan <i>preprocessing</i> pada metode elemen hingga.....	II-17
Gambar II. 13 Laser Interferometer .....	II-18
Gambar II. 14 Skema Pengukuran Kesalahan Posisi dengan Laser Interferometer [24].....	II-20
Gambar II. 15 Skema Pengukuran Kelurusan Horizontal dengan Laser Interferometer [25].....	II-21
Gambar II. 16 Skema Pengukuran Kelurusan Vertikal dengan Laser Interferometer [25].....	II-21
Gambar II. 17 Skema Pengukuran <i>Angular Pitch</i> dengan Laser Interferometer [25].....	II-22
Gambar II. 18 Skema Pengukuran <i>Angular Yaw</i> dengan Laser Interferometer [25].....	II-22
Gambar II. 19 Skema Pengukuran Ketegaklurusan XY <i>First Axis Movement</i> dengan Laser Interferometer [24].....	II-23
Gambar II. 20 Skema Pengukuran Ketegaklurusan XY <i>Second Axis Movement</i> dengan Laser Interferometer [24] .....	II-23
Gambar II. 21 Skema Pengukuran Ketegaklurusan YZ dan XZ <i>First Axis Movement</i> dengan Laser Interferometer [24] .....	II-24
Gambar II. 22 <i>Tool holder &amp; Endmill</i> .....	II-25
Gambar II. 23 Mesin CMM .....	II-26

Gambar II. 24 <i>Test piece-Feature Nomenclature</i> ISO 10791-7:2014.....	II-35
Gambar III. 1 Diagram Alir Penelitian.....	III-1
Gambar III. 2 Mesin CNC <i>Milling</i> IKX Delta 3 <i>Axis</i> buatan POLMAN.....	III-3
Gambar III. 3 Penempatan WCS dan MCS Benda uji <i>cutting</i> .....	III-11
Gambar III. 4 Posisi Benda Uji <i>Cutting</i> Pada <i>Travel</i> Mesin.....	III-12
Gambar III. 5 Diagram Alir Pelaksanaan Kegiatan Pengukuran .....	III-14
Gambar III. 6 Diagram Alir Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer pada Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu X .....	III-15
Gambar III. 7 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer pada Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu X.....	III-16
Gambar III. 8 Diagram Alir Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer pada Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu Y .....	III-17
Gambar III. 9 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer pada Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu Y.....	III-18
Gambar III. 10 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer pada Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu Z .....	III-19
Gambar III. 11 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer pada Penyimpangan Pemosisian dan Keterulangan Sumbu Z .....	III-20
Gambar III. 12 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu X.....	III-21
Gambar III. 13 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu X.....	III-22
Gambar III. 14 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu X.....	III-22
Gambar III. 15 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Vertikal Sumbu X.....	III-24
Gambar III. 16 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Vertikal Sumbu X.....	III-25
Gambar III. 17 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Vertikal Sumbu X.....	III-25
Gambar III. 18 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Vertikal Sumbu X.....	III-25

Gambar III. 19 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu Y .....	III-27
Gambar III. 20 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu Y .....	III-28
Gambar III. 21 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu Y .....	III-28
Gambar III. 22 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu Y .....	III-29
Gambar III. 23 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Vertikal Sumbu Y .....	III-30
Gambar III. 24 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Vertikal Sumbu Y .....	III-31
Gambar III. 25 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Vertikal Sumbu Y .....	III-31
Gambar III. 26 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Vertikal Sumbu Y .....	III-32
Gambar III. 27 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu Z .....	III-33
Gambar III. 28 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu Z .....	III-34
Gambar III. 29 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Horizontal Sumbu Z .....	III-34
Gambar III. 30 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Vertikal Sumbu Z .....	III-36
Gambar III. 31 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Vertikal Sumbu Z .....	III-37
Gambar III. 32 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Kelurusan Vertikal Sumbu Z .....	III-37
Gambar III. 33 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Pitch</i> Sumbu X .....	III-39
Gambar III. 34 Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Pitch</i> Sumbu X .....	III-40

Gambar III. 35	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Pitch</i> Sumbu Y .....	III-41
Gambar III. 36	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Pitch</i> Sumbu Y .....	III-42
Gambar III. 37	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Pitch</i> Sumbu Z .....	III-43
Gambar III. 38	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Pitch</i> Sumbu Z .....	III-44
Gambar III. 39	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Yaw</i> Sumbu X .....	III-45
Gambar III. 40	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Yaw</i> Sumbu X .....	III-46
Gambar III. 41	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Yaw</i> Sumbu Y .....	III-47
Gambar III. 42	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Yaw</i> Sumbu Y .....	III-48
Gambar III. 43	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Yaw</i> Sumbu Z.....	III-49
Gambar III. 44	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan <i>Angular Yaw</i> Sumbu Z.....	III-50
Gambar III. 45	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Ketegaklurusan Sumbu XY <i>First Axis Movement</i> .....	III-51
Gambar III. 46	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada Penyimpangan Ketegaklurusan Sumbu XY <i>Second Axis Movement</i> .....	III-52
Gambar III. 47	Pengaturan Pengukuran Laser Interferometer Pada ketegaklurusan sumbu XY .....	III-53
Gambar III. 48	MCS <i>Capture data</i> Pengukuran Pemosisian Dan Keterulangan Sumbu <i>Linear X</i> .....	III-62
Gambar III. 49	MCS <i>Capture data</i> Pengukuran Pemosisian dan Keterulangan Sumbu <i>Linear Y</i> .....	III-63
Gambar III. 50	MCS <i>Capture data</i> Pengukuran Pemosisian dan Keterulangan Sumbu <i>Linear Z</i> .....	III-64

Gambar III. 51 MCS <i>Capture data</i> Kelurusan Horizontal Sumbu X .....	III-70
Gambar III. 52 MCS <i>Capture data</i> Kelurusan Vertikal Sumbu X.....	III-71
Gambar III. 53 MCS <i>Capture data</i> Kelurusan Horizontal Sumbu Y .....	III-72
Gambar III. 54 MCS <i>Capture data</i> Kelurusan Vertikal Sumbu Y.....	III-73
Gambar III. 55 MCS <i>Capture data</i> Kelurusan Horizontal Sumbu Z.....	III-74
Gambar III. 56 MCS <i>Capture data</i> Kelurusan Vertikal Sumbu Z.....	III-75
Gambar III. 57 MCS <i>Capture data</i> Pengukuran <i>Angular Pitch</i> sumbu X.....	III-81
Gambar III. 58 MCS <i>Capture data</i> Pengukuran <i>Angular Pitch</i> sumbu Y.....	III-82
Gambar III. 59 MCS <i>Capture data</i> Pengukuran <i>Angular Pitch</i> sumbu Z .....	III-83
Gambar III. 60 MCS <i>Capture data</i> Pengukuran <i>Angular Yaw</i> sumbu X.....	III-84
Gambar III. 61 MCS <i>Capture data</i> Pengukuran <i>Angular Yaw</i> sumbu Y.....	III-85
Gambar III. 62 MCS <i>Capture data</i> Pengukuran <i>Angular Yaw</i> sumbu Z.....	III-86
Gambar III. 63 MCS <i>Capture data</i> Pengukuran Ketegaklurusan XY .....	III-92
Gambar III. 64 Prinsip penentuan kompensasi secara <i>absolute</i> .....	III-99
Gambar III. 65 Prinsip penentuan kompensasi secara <i>inremen</i> .....	III-100
Gambar III. 66 Proses perhitungan defleksi spindel secara matematis.....	III-101
Gambar III. 67 Spindel objek mesin tanpa <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> (gambar teknik).....	III-102
Gambar III. 68 Pembagian kepala spindel dan badan spindel pada spindel objek mesin (kondisi tidak dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> ).....	III-103
Gambar III. 69 Konstruksi tumpuan spindel objek mesin.....	III-105
Gambar III. 70 Diagram benda bebas spindel tanpa <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> .....	III-106
Gambar III. 71 Nilai kekakuan aksial sepasang <i>deep grove ball bearing</i> dengan kode 7006C pabrikan Nachi.....	III-107
Gambar III. 72 Nilai kekakuan aksial sepasang <i>angular contact ball bearing</i> dengan kode 7008C pabrikan Nachi.....	III-110
Gambar III. 73 Spindel objek mesin dipasang <i>tool holder</i> BT30 dan <i>endmill</i> Ø 10 mm <i>overhang</i> 35 mm (gambar teknik) .....	III-114
Gambar III. 74 Pembagian kepala spindel dan badan spindel pada spindel objek mesin (kondisi dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> ) .....	III-115
Gambar III. 75 Konstruksi tumpuan spindel objek mesin.....	III-119

Gambar III. 76 Diagram benda bebas spindel dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> ....	III-120
Gambar III. 77 Fitur geometri ukuran <i>mesh</i> (kondisi spindel tidak dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> ).....	III-124
Gambar III. 78 Fitur geometri ukuran <i>mesh</i> (kondisi spindel dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> ) .....	III-124
Gambar III. 79 <i>Bonded connection</i> antara <i>tool holder</i> dan spindel.....	III-125
Gambar III. 80 <i>Bonded connection</i> antara <i>endmill</i> dan <i>tool holder</i> .....	III-125
Gambar III. 81 Nilai <i>Skewness</i> hasil <i>meshing</i> model spindel pada kondisi tidak dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> .....	III-126
Gambar III. 82 Nilai <i>Skewness</i> hasil <i>meshing</i> model spindel pada kondisi dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> .....	III-126
Gambar III. 83 Elemen <i>bearing</i> pada ansys versi 2022 R2 student.....	III-127
Gambar III. 84 Gaya radial pada model spindel dalam kondisi tidak dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> .....	III-128
Gambar III. 85 Gaya radial pada model spindel dalam kondisi dipasang <i>tool holder</i> dan <i>endmill</i> .....	III-129
Gambar III. 86 Pembatasan arah gaya yang diberikan (hanya pada sumbu x).III-	129
Gambar III. 87 Pembatasan arah deformasi (hanya pada sumbu x).....	III-129
Gambar III. 88 Data Temperature simulasi.....	III-130
Gambar IV. 1 Nilai toleransi <i>Circle Diamond Square Test</i> tipe M1_80.....	IV-2
Gambar IV. 2 Grafik Pengukuran Pemosisian dan Keterulangan Sumbu X ...	IV-8
Gambar IV. 3 Posisi MCS Pengukuran Pemosisian Sumbu X Terhadap Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-11
Gambar IV. 4 Grafik Pengukuran Pemosisian dan Keterulangan Sumbu Y....	IV-13
Gambar IV. 5 Posisi MCS Pengukuran Pemosisian Sumbu Y Terhadap Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-16
Gambar IV. 6 Grafik Pengukuran Pemosisian dan Keterulangan Sumbu Z....	IV-18
Gambar IV. 7 Posisi MCS Pengukuran Pemosisian Sumbu Z Terhadap Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-21
Gambar IV. 8 Grafik Pengukuran Kelurusan Horizontal Sumbu X.....	IV-26

Gambar IV. 9 Posisi MCS Pengukuran Kelurusan Horizontal Sumbu X Terhadap Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-28
Gambar IV. 10 Grafik Pengukuran Kelurusan Vertikal Sumbu X.....	IV-30
Gambar IV. 11 Posisi MCS Pengukuran Kelurusan Vertikal Sumbu X Terhadap Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-31
Gambar IV. 12 Grafik Pengukuran Kelurusan Horizontal Sumbu Y.....	IV-33
Gambar IV. 13 Posisi MCS Pengukuran Kelurusan Horizontal Sumbu Y Terhadap Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-35
Gambar IV. 14 Grafik Pengukuran Kelurusan Vertikal Sumbu Y.....	IV-37
Gambar IV. 15 Posisi MCS Kelurusan Vertikal Sumbu Y Terhadap benda uji <i>cutting</i> .....	IV-38
Gambar IV. 16 Grafik Pengukuran Kelurusan Horizontal Sumbu Z.....	IV-40
Gambar IV. 17 Posisi MCS Pengukuran Kelurusan Horizontal Sumbu Z Terhadap benda uji <i>cutting</i> .....	IV-41
Gambar IV. 18 Grafik Pengukuran Kelurusan Vertikal Sumbu Z.....	IV-43
Gambar IV. 19 Posisi MCS Pengukuran Kelurusan Vertikal Sumbu Z Terhadap benda uji <i>cutting</i> .....	IV-44
Gambar IV. 20 Grafik Pengukuran <i>Angular Pitch</i> Sumbu X.....	IV-49
Gambar IV. 21 Posisi MCS Pengukuran <i>Angular Pitch</i> Sumbu X Terhadap Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-50
Gambar IV. 22 Grafik Pengukuran <i>Angular Yaw</i> Sumbu X.....	IV-52
Gambar IV. 23 Posisi MCS Pengukuran <i>Angular Yaw</i> Sumbu X Terhadap Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-53
Gambar IV. 24 Grafik Pengukuran <i>Angular Pitch</i> Sumbu Y.....	IV-55
Gambar IV. 25 Posisi MCS Pengukuran <i>Angular Pitch</i> Sumbu Y Terhadap Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-56
Gambar IV. 26 Grafik Pengukuran <i>Angular Yaw</i> Sumbu Y.....	IV-58
Gambar IV. 27 Posisi MCS Pengukuran <i>Angular Yaw</i> Sumbu Y Terhadap Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-59
Gambar IV. 28 Grafik Pengukuran <i>Angular Pitch</i> Sumbu Z.....	IV-61

Gambar IV. 29 Posisi MCS Pengukuran <i>AngularPitch</i> Sumbu Z Terhadap Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-62
Gambar IV. 30 Grafik Pengukuran <i>Angular Yaw</i> Sumbu Z.....	IV-64
Gambar IV. 31 Posisi MCS Pengukuran <i>Angular Yaw</i> Sumbu Z Terhadap Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-65
Gambar IV. 32 Hasil Ketegaklurusan Sumbu XY.....	IV-71
Gambar IV. 33 Posisi MCS Pengukuran ketegaklurusan sumbu XY Terhadap Benda Uji <i>Cutting</i> .....	IV-73
Gambar IV. 34 Grafik hasil pengukuran pemosisian sumbu X.....	IV-76
Gambar IV. 35 Grafik hasil pengukuran pemosisian sumbu Y.....	IV-77
Gambar IV. 36 Grafik hasil pengukuran pemosisian sumbu Z.....	IV-78
Gambar IV. 37 Grafik Penentuan Nilai <i>Increment</i> Kompensasi Pemosisian Sumbu X <i>Forward Direction</i> .....	IV-83
Gambar IV. 38 parameter kompensasi pemosisian sumbu X <i>forward direction</i> pada <i>software Carto Capture</i> .....	IV-84
Gambar IV. 39 Proses <i>Generate Compensation</i> Penyimpangan Geometri.....	IV-85
Gambar IV. 40 Hasil pengukuran pemosisian X setelah kompensasi keseluruhan. ....	IV-94
Gambar IV. 41 Hasil pengukuran pemosisian Y setelah kompensasi keseluruhan.....	IV-95
Gambar IV. 42 Hasil pengukuran pemosisian Z setelah kompensasi keseluruhan.....	IV-96
Gambar IV. 43 Grafik penyimpangan kelurusan horizontal X setelah kompensasi.....	IV-106
Gambar IV. 44 Grafik penyimpangan kelurusan vertikal X setelah kompensasi.....	IV-106
Gambar IV. 45 Grafik penyimpangan kelurusan horizontal Y setelah kompensasi.....	IV-107
Gambar IV. 46 Grafik penyimpangan kelurusan vertikal Y setelah kompensasi.....	IV-108
Gambar IV. 47 Grafik penyimpangan kelurusan horizontal Z setelah kompensasi.....	IV-108

Gambar IV. 48 Grafik penyimpangan kelurusan vertikal Z setelah kompensasi.....	IV-109
Gambar IV. 49 Grafik Hasil perhitungan defleksi spindel kondisi tanpa <i>tool holder</i> dan <i>cutter</i> .....	IV-112
Gambar IV. 50 Grafik Hasil perhitungan defleksi spindel kondisi dipasang <i>tool holder</i> BT30 dan <i>endmill</i> Ø 10 mm <i>overhang</i> 35 mm.....	IV-113
Gambar IV. 51 Diagram kontribusi penyimpangan pemosisian sumbu X pada produk.....	IV-116
Gambar IV. 52 Diagram kontribusi penyimpangan pemosisian sumbu Y pada produk.....	IV-117
Gambar IV. 53 Diagram kontribusi penyimpangan kelurusan horizontal sumbu X pada produk.....	IV-118
Gambar IV. 54 Diagram kontribusi penyimpangan kelurusan horizontal sumbu Y pada produk.....	IV-118
Gambar IV. 55 Diagram kontribusi penyimpangan dimensi pada produk.....	IV-119

## DAFTAR LAMPIRAN

- LAMPIRAN A : PROSES PENYETINGAN LASER INTERFEROMETER  
UNTUK PENGUKURAN PEMOSISIAN DAN  
KETERULANGAN SUMBU *LINEAR*
- LAMPIRAN B : PROSES PENYETINGAN LASER INTERFEROMETER  
UNTUK PENGUKURAN KELURUSAN HORIZONTAL  
DAN KELURUSAN VERTIKAL
- LAMPIRAN C : PROSES PENYETINGAN LASER INTERFEROMETER  
UNTUK PENGUKURAN ANGULAR *PITCH* DAN  
*ANGULAR YAW*
- LAMPIRAN D : PROSES PENYETINGAN LASER INTERFEROMETER  
UNTUK PENGUKURAN KETEGAKLURUSAN
- LAMPIRAN E : SPESIFIKASI GAMBAR KERJA SPESIMEN UJI  
STANDAR ISO 10791-7:2014 *CIRCLE DIAMOND*  
*SQUARE TEST* TIPE M1\_80
- LAMPIRAN F : KARAKTERISTIK MATERIAL VCL 140 (DIN  
1.7225/AISI 4140)
- LAMPIRAN G : KARAKTERISTIK MATERIAL LOW ALLOY STEEL,  
CASE HARDENED (AISI 5115/SAE 5115)
- LAMPIRAN H : KARAKTERISTIK MATERIAL BOHLER S400(M7)  
*HIGH SPEED STEEL* (HSS) (EN 1.3348/AISI M7)
- LAMPIRAN I : SPESIFIKASI *BALL SCREW* HIWIN FSI 32-5T3  
(GRADE C6)
- LAMPIRAN J : SPESIFIKASI *LINEAR MOTION* HIWIN HGR30R1000C  
& *LINEAR MOTION BLOCK* HIWIN HGH30CA

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1 Latar Belakang**

Peningkatan jumlah penduduk Indonesia yang berusia produktif, saat ini terus mengalami kenaikan yang signifikan, dan diprediksi pada tahun 2045 Indonesia mendapatkan bonus demografi. Kuantitas SDM usia produktif yang melimpah tersebut, haruslah dibarengi dengan SDM yang berkualitas, agar bonus demografi tersebut dapat berdampak baik bagi bangsa Indonesia dan mensejahterakan masyarakatnya. Upaya untuk meningkatkan kualitas SDM, dapat melalui bidang pendidikan. Salah satu bidang keilmuan inti, untuk menunjang perkembangan suatu bangsa yaitu bidang teknologi dan manufaktur, seperti bidang kejuruan teknik. Hal lain yang juga penting dalam rangka memaksimalkan bonus demografi Indonesia yaitu dengan memperbanyaknya industri-industri dalam negeri serta karya-karya anak bangsa sehingga nantinya Indonesia menjadi negara yang mampu memenuhi kebutuhan dalam negerinya sendiri bahkan menjadi negara eksportir.

Berdasarkan data dari Direktorat Sekolah Menengah Kejuruan (SMK), kebutuhan mesin latih *CNC Milling Trainer* yaitu 4.491 unit, kemudian ditambah juga dengan adanya peluang pasar dari industri skala kecil dan menengah akan kebutuhan mesin *CNC Milling* dengan harga yang relatif lebih terjangkau dibanding dengan *merk* ternama, namun diharapkan memiliki kualitas mesin yang mendekati kualitas *merk* ternama tersebut. Maka, untuk menangkap peluang tersebut, POLMAN Bandung memproduksi mesin *CNC Milling 3 Axis*.

Progres pengembangan mesin *CNC Milling 3 Axis* POLMAN telah mencapai Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT) *level* 6 yaitu prototipe mesin sudah selesai dibangun. Selanjutnya, diperlukannya penelitian lanjutan untuk meningkatkan *level* TKT menjadi *level* 7 yaitu pengujian pengoperasian mesin dan *level* 8 yaitu penyempurnaan spesifikasi mesin.

Salah satu aspek terpenting pada kualitas Mesin CNC yaitu kualitas produk yang dihasilkan. Berbicara mengenai kualitas produk manufaktur, erat kaitannya dengan dimensi dan geometri dari produk yang dihasilkan tersebut. Menurut [1], agar mampu menghasilkan produk yang sesuai dengan spesifikasi, maka mesin

perkakas harus memenuhi persyaratan kualitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesifikasi produk yang akan diproduksi pada mesin tersebut. Namun pada dasarnya, dalam proses pemesinan terdapat penyimpangan atau kesalahan yang bersumber dari mesin perkakas itu sendiri, seperti kesalahan geometri, kesalahan servo, defleksi akibat beban statis & dinamis dan kesalahan termal.

Kesalahan geometri menjadi penyebab terbesar pada keakurasian dan kepresisian mesin perkakas, yang akhirnya secara langsung akan berpengaruh secara signifikan terhadap ketelitian geometri benda kerja yang dihasilkan [2]. Kesalahan geometri mesin perkakas yang terjadi dapat dikurangi dengan dua cara (i) desain, pembuatan dan *assembly* mesin perkakas yang presisi, serta (ii) mengatur parameter kompensasi *error*.

Untuk mengetahui nilai dari penyimpangan geometri pada suatu mesin perkakas, maka perlu dilakukan kegiatan pengujian ketelitian geometri. Pengujian ketelitian geometri dapat dilakukan dalam keadaan tidak dibebani (*non-cutting*), seperti proses pengujian geometri mesin dengan menggunakan alat ukur *Ballbar* dan laser interferometer. Kemudian pengujian pemotongan (*cutting*) dilakukan untuk mengkaji nilai penyimpangan akibat defleksi spindel dan alat potong yang terjadi selama proses pemotongan, terhadap penyimpangan produk hasil mesin perkakas tersebut. Kajian defleksi spindel dan alat potong dilakukan melalui metode simulasi dengan elemen hingga/*Finite Element Method* (FEM), dan uji eksperimen melalui pemotongan benda uji (*Circle Diamond Square Test*) sesuai standar ISO 10791-7. Hasil penyimpangan tersebut dibandingkan dengan status penyimpangan geometri mesin berdasarkan standar ISO 10791-2:2001 dan ISO 10791-4:1998.

Dari konsep tersebut, penulis akan melakukan penelitian untuk Tugas Akhir yang berjudul, “*Performance Assesment* Mesin CNC Vertikal *Milling 3 Axis IKX Delta* Berdasarkan Penyimpangan Geometri Mesin Dan Defleksi Spindel”. Metode pengurangan kesalahan geometri mesin akan dilakukan dengan metode pengaturan parameter kompensasi *error* pada *controller* mesin.

Dengan dilaksanakannya kegiatan penelitian tugas akhir ini, dapat diketahui status nilai penyimpangan *machining work* pada pemesinan mesin CNC Vertikal *Milling 3 Axis IKX Delta* akibat dari penyimpangan geometri mesin dan defleksi

pada spindel yang terjadi, serta langkah solutif untuk meningkatkan kualitas produk yang dihasilkan melalui metode meng-*input* nilai kompensasi penyimpangan *machining work* berdasarkan nilai penyimpangan geometri mesin.

## I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan diatas, maka yang menjadi rumusan masalah pada penelitian tugas akhir ini di antaranya adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mengidentifikasi penyimpangan geometri mesin perkakas CNC Vertikal *Milling 3 Axis* IKX Delta ?
2. Bagaimana hasil identifikasi dan status dari hasil pengukuran penyimpangan geometri mesin perkakas CNC Vertikal *Milling 3 Axis* IKX Delta berdasarkan standar ISO?
3. Bagaimana proses menstandarkan penyimpangan geometri yang berstatus *out of tolerance*?
4. Berapa kontribusi defleksi spindel dan alat potong yang terjadi terhadap penyimpangan bentuk dan dimensi pada produk yang dihasilkan?

## I.3 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan diatas, maka dibuat ruang lingkup untuk membatasi pembahasan masalah diantaranya:

1. Objek mesin perkakas yang diukur yaitu Mesin CNC Vertikal *Milling 3 Axis* IKX Delta di *workshop* Jurusan Teknik Manufaktur POLMAN Bandung.
2. Metode pengukuran ketelitian geometri yang digunakan adalah pengukuran yang dilaksanakan dalam keadaan tanpa beban pemotongan dan dengan beban pemotongan.
3. Alat yang digunakan dalam pengujian tanpa beban yaitu laser interferometer yang telah dikalibrasi.
4. Pengujian defleksi spindel dan alat potong yang terjadi saat proses pemesinan (*cutting*) dilakukan melalui metode simulasi dengan elemen hingga/*Finite*

*Element Method* (FEM), dan uji eksperimen melalui pemotongan benda uji (*Circle Diamond Square Test*) sesuai standar ISO 10791-7.

5. Kondisi penyimpangan geometri mesin perkakas CNC yang diukur dan dianalisis berupa, pemosisian sumbu *linear*, kelurusan horizontal dan vertikal, *angular pitch* dan *angular yaw*, dan ketegaklurusan antar sumbu.
6. Perbaikan penyimpangan geometri mesin dilakukan dengan metode memasukan nilai kompensasi *error* pada *controller* berdasarkan nilai penyimpangan geometri mesin tersebut.
7. Kontribusi penyimpangan dimensi dan bentuk pada benda hasil uji *cutting*, dianalisis hanya berdasarkan nilai penyimpangan geometri mesin, defleksi spindel dan alat potong dan kuasi *error* mesin CMM.

#### **I.4 Tujuan**

Berdasarkan rumusan dan batasan masalah yang sudah diuraikan diatas, tujuan dari dibuatnya tugas akhir ini di antaranya adalah untuk:

1. Mengidentifikasi kondisi dan status penyimpangan geometri yang terjadi pada Mesin CNC Vertikal *Milling 3 Axis* IKX Delta berdasarkan standar ISO.
2. Menstandarkan penyimpangan geometri mesin perkakas CNC *Vertical Milling* yang dijadikan objek mesin uji melalui metode memasukan parameter nilai kompensasi *error* geometri pada *controller* mesin.

#### **I.5 Metode Penelitian**

Proses pengumpulan data menjadi bagian yang penting dalam penelitian, karena data tersebut nantinya akan digunakan dalam penyelesaian rumusan masalah yang telah ditentukan juga menentukan kesimpulan dari tugas akhir yang dilakukan. Dalam menyelesaikan tugas akhir ini, peneliti melakukan beberapa jenis metode penelitian sebagai berikut:

##### a) Studi Literatur

Melakukan studi literatur dengan mencari dan memahami tinjauan pustaka berdasarkan buku-buku, modul pembelajaran, artikel, jurnal penelitian nasional

maupun internasional, literatur, dan hasil pengukuran yang sudah dilakukan oleh peneliti terdahulu mengenai penelitian serupa yang dapat menunjang pembahasan dan penyelesaian masalah. Pengumpulan data yang dilakukan pada studi literatur juga dilakukan dengan jalan mengumpulkan data-data nilai penyimpangan geometri mesin, defleksi *spindle* dan data lainnya yang berkaitan dengan pengukuran yang dilakukan sesuai dengan parameter dan batasan yang telah ditentukan serta kondisi mesin perkakas CNC yang menjadi objek uji.

b) Diskusi dan Tanya Jawab

Diskusi serta tanya jawab dilakukan dengan pembimbing serta pihak yang berkaitan secara langsung dalam penyusunan tugas akhir dan pelaksanaan penelitian untuk membantu menunjang pembahasan dan penyelesaian masalah.

c) Observasi

Dalam metode observasi, untuk melakukan pengukuran penyimpangan geometri pada mesin perkakas CNC *vertical Milling*, dilakukan dengan metode pengukuran tanpa beban menggunakan alat laser interferometer, dimana mesin dioperasikan dengan *g-code* yang telah dibuat dengan membentuk pergerakan tanpa melakukan pemotongan. Kemudian hasil pengukuran dikomparasikan dengan standar ISO, selanjutnya hasil dari *geometry error* mesin yang *out of tolerance* dilakukan perbaikan melalui metode memasukan kompensasi *geometry error* mesin pada *controller* mesin CNC *vertical Milling* tersebut sampai *geometry error* mesin sesuai standar ISO.

Untuk melakukan pengukuran defleksi *spindle* pada mesin perkakas CNC *vertical Milling*, dilakukan dengan metode simulasi dengan elemen hingga/*Finite Element Method* (FEM) serta melalui metode pengukuran dengan beban (pemotongan benda kerja). Mesin dioperasikan dengan *g-code* yang telah dibuat dengan membentuk pergerakan yang sekaligus dengan pemotongan benda kerja. Setelah proses pemesinan selesai, benda hasil pemotongan akan diukur pada mesin CMM (*Coordinate Measurement Machine*) untuk dilakukan analisis penyimpangan benda kerja akibat dari defleksi *spindle* mesin.

## **I.6 Sistematika Penulisan**

Karya tulis ilmiah tugas akhir disusun sedemikian rupa untuk mempermudah melihat dan mengetahui pembahasan yang ada pada karya tulis ilmiah ini secara menyeluruh, sehingga pembaca dapat memahami isi dari karya tulis ilmiah yang disusun dan dikemukakan dalam sistematika berupa kerangka dan pedoman penulisan karya tulis ilmiah. Adapun sistematika penulisan disusun sebagai berikut:

### **BAB I Pendahuluan**

Berisi uraian mengenai latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup dan batasan masalah, tujuan penelitian, metode penelitian, serta sistematika penulisan karya tulis.

### **BAB II Landasan Teori**

Bab II berisi mengenai teori-teori yang mendukung dan berkaitan dalam proses pengukuran, penyelesaian masalah yang dibahas, dan penyusunan karya tulis.

### **BAB III Metodologi Penelitian**

Bab ini menjelaskan mengenai langkah-langkah yang dilakukan dalam proses pengukuran penyimpangan geometri mesin dan defleksi *spindle*.

### **BAB IV Pengolahan dan Analisis**

Data Berisi uraian mengenai gambaran hasil data pengukuran yang telah dilakukan, proses pengolahan, analisis, dan pembahasan data hasil pengukuran.

### **BAB V Penutup**

Berisi kesimpulan yang didapat dari penelitian secara keseluruhan berdasarkan data yang diperoleh selama kegiatan berlangsung serta saran untuk mengatasi masalah yang dapat menunjang penelitian agar menjadi lebih baik