

ANALISIS PROFIL KEBULATAN UNTUK MENENTUKAN KESALAHAN GEOMETRIK PADA PEMBUATAN KOMPONEN MENGGUNAKAN MESIN BUBUT CNC

Muhammad Yanis

Jurusan Teknik Mesin-Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
Jl.Raya Prabumulih km 32, Indralaya-Ogan Ilir (30662)

Abstrak

Banyak komponen mesin khususnya komponen mesin atau peralatan yang berputar, memiliki penampang berbentuk bulat. Suatu komponen dengan permukaan silindris dengan tingkat kebulatan yang baik (sesuai toleransi yang ditentukan) sangat dibutuhkan, hal ini akan berhubungan dengan fungsi komponen tersebut. Ketidakbulatan (out of roundness) merupakan salah satu jenis kesalahan bentuk (geometrik) dan dapat dipergunakan untuk mengetahui beberapa kesalahan bentuk lainnya. Penelitian ini bertujuan mengetahui besar kesalahan geometrik yang terjadi pada pembuatan komponen menggunakan mesin bubut CNC dengan melakukan pengukuran profil kebulatan. Nilai kebulatan yang didapat juga akan digunakan untuk mencari nilai kesalahan geometrik lain, yaitu kesejajaran, ketegaklurusan dan toleransi geometrik. Dari hasil pengujian didapat bahwa kesalahan geometrik terbesar (ketidakbulatan) rata-rata $44,7 \mu\text{m}$ yang terjadi di posisi terluar dari tumpuan/pencekam. Kesalahan lain yaitu ketegaklurusan $5,5 \mu\text{m}$, ketidaksejajaran $4,5 \mu\text{m}$, dan toleransi kesalahan terbesar adalah $6,4 \mu\text{m}$. Dengan demikian mesin bubut CNC yang dipakai masih mampu membuat komponen yang teliti dilihat dari segi kesalahan geometrik yang terjadi. Nilai kesalahan geometrik masih dibawah nilai toleransi ($50 \mu\text{m}$).

Kata kunci : Ketelitian geometrik, kebulatan, toleransi dimensi, toleransi geometrik, kesejajaran dan ketegaklurusan.

I. PENDAHULUAN

Kualitas komponen yang dibuat menggunakan mesin perkakas dinilai dari ketelitian dimensi, geometrik (bentuk) dan kekasaran permukaan (surface roughness). Mesin perkakas tersebut terdiri atas mesin perkakas konvensional dan mesin perkakas CNC (computer Numerical Control). Sesuai kelebihan yang dimiliki mesin perkakas CNC (lebih teliti, lebih tepat, produktif dan kompleksitas tinggi), maka sudah tentu komponen yang dihasilkan akan memiliki kualitas yang lebih tinggi dari mesin perkakas konvensional (Rochim T., 2007).

Banyak komponen mesin atau peralatan lainnya, khususnya komponen mesin atau peralatan yang berputar, memiliki penampang berbentuk bulat. Suatu komponen dengan permukaan silindris dengan tingkat kebulatan yang baik (sesuai toleransi yang ditentukan) sangat dibutuhkan, hal ini akan berhubungan dengan fungsi komponen tersebut. Peran kebulatan pada fungsi suatu komponen diantaranya membagi beban sama rata,

mempelancar pelumasan, menentukan ketelitian putaran, menentukan umur komponen dan menentukan kondisi suaian (Rochim T., 2001).

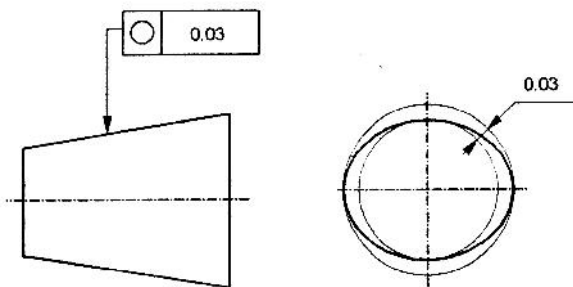
Ketidakbulatan (out of roundness) merupakan salah satu jenis kesalahan bentuk (geometrik) dan umumnya berkaitan erat dengan beberapa kesalahan bentuk lainnya, yaitu kesamaan sumbu, kelurusan, ketegaklurusan dan kesejajaran. Suatu komponen dengan kebulatan ideal sangat sulit untuk dibuat, sehingga dapat dipastikan akan terjadi suatu ketidakbulatan pada komponen tersebut. Walaupun secara visual penampang suatu komponen berbentuk bulat, namun bila dilakukan pembesaran maka akan terlihat suatu ketidakbulatan terjadi pada penampang tersebut. Keterbatasan yang ada pada proses pembuatan menyebabkan hal tersebut tidak dapat dihindarkan, sehingga ketidakbulatan yang terjadi harus ditolerir dalam batas-batas tertentu sesuai dengan tujuan dan fungsi dari komponen tersebut.

Penelitian ini bertujuan mengetahui besar kesalahan geometrik yang terjadi pada pembuatan komponen menggunakan mesin bubut CNC (TU2A EMCO-Austria) dengan melakukan pengukuran profil kebulatan. Kesalahan geometrik yang dicari adalah kebulatan pada posisi tertentu dari komponen, kesejajaran, ketegaklurusan dan toleransi. Manfaat dari pengujian ini adalah ingin melihat apakah mesin bubut CNC yang dipakai, apakah masih dapat membuat komponen yang teliti dilihat dari kesalahan geometrik yang terjadi. Hal ini dipandang perlu karena mesin yang ada tersebut sudah mulai “tua”.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kebulatan

Pada umumnya suatu profil kebulatan dikatakan bulat sempurna bila jarak titik-titik yang terdapat pada bentuk geometrik tersebut memiliki jarak yang sama terhadap sebuah titik yang disebut dengan *titik pusat*. Suatu profil kebulatan dikatakan tidak bulat sempurna jika terjadi ketidakbulatan yang ditandai dengan adanya perbedaan jarak antara titik-titik pada bentuk geometrik tersebut terhadap titik pusatnya. *ISO/R 1101* mendefinisikan toleransi kebulatan sebagai daerah toleransi pada bidang penampang yang dibatasi oleh dua lingkaran konsentris dengan selisih radius sebesar harga toleransinya (Rochim T., 2001).



Gambar 1. Toleransi untuk geometrik kebulatan

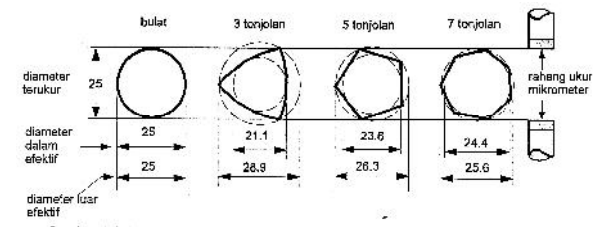
Hal-hal yang berhubungan dengan proses pembuatan yang dapat menyebabkan terjadinya ketidakbulatan pada komponen yang dibuat adalah sebagai berikut :

- Keausan yang terjadi pada bantalan poros utama mesin bubut atau mesin gerinda yang digunakan.
- Lenturan yang terjadi pada benda kerja atau pada mesin perkakas yang diakibatkan oleh gaya pemotongan yang cukup besar.
- Kesalahan posisi senter pemegang.
- Tekanan alat pemegang atau pencekam pada komponen yang berdinding tipis.
- Terjadi *chatter* pada proses pemotongan.

- Adanya ketidakbulatan cetakan pada proses ekstrusi atau penarikan(drawing).
- Adanya ketidakbulatan bahan yang mencolok pada proses gerinda tanpa senter.

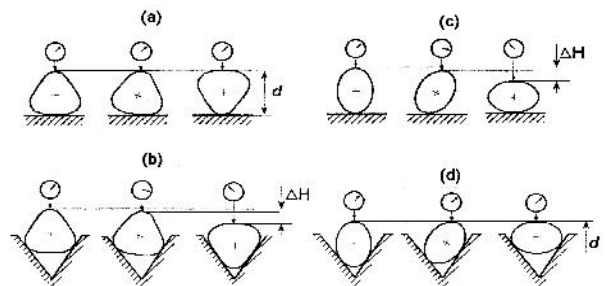
2.2. Pengukuran Kebulatan (Rochim T., 2001)

Pengukuran kebulatan dapat dilakukan dengan menggunakan alat ukur yang memiliki dua sensor yang saling bertolak belakang (180°), misalnya mikrometer. Dengan menggunakan mikrometer penampang poros dengan dua tonjolan beraturan (elips) akan dapat diketahui ketidakbulatannya, yaitu dengan mengukur diameter pada sisi terjauh dan diameter pada sisi terdekat. Tetapi alat ukur tersebut tidak dapat digunakan untuk mengetahui ketidakbulatan poros yang memiliki tonjolan berjumlah ganjil beraturan, karena alat ukur tersebut akan menunjukkan hasil yang selalu sama. Mengurangi sifat *adhesive* pada pahat potong dan geram.



Gambar 2. Pengukuran kebulatan dengan dua sensor

Pengukuran alat ukur dengan tiga sensor tersebut dapat disetarakan dengan cara pengukuran menggunakan blok-V (V block dengan sudut 60°) dan jam ukur.

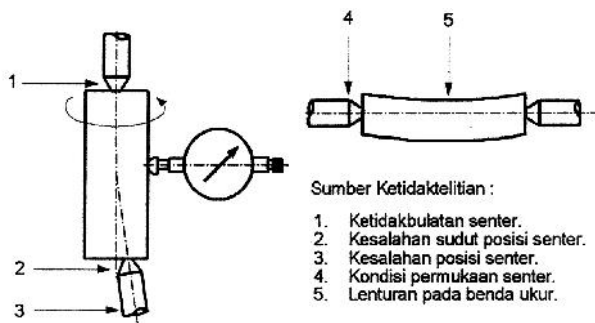


Gambar 3. Pengukuran kebulatan dengan blok-V (60°) dan jam ukur tidak selalu menunjukkan adanya ketidakbulatan; tergantung pada bentuk profil kebulatan poros yang diukur.

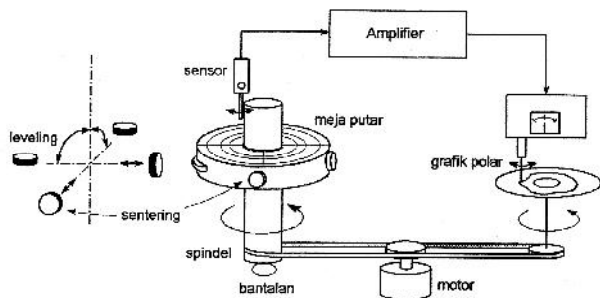
Pengukuran kebulatan poros dilakukan dengan cara meletakkan pada blok-V dan kemudian memutarinya dengan menempelkan sensor jam ukur di atasnya.

Cara tersebut merupakan cara klasik untuk mengetahui kebulatan.

Agar titik pusat benda ukur tidak berpindah, maka benda ukur dapat diputar di antara dua senter, sementara itu sensor jam ukur akan merasakan perubahan permukaan benda ukur. Cara pengukuran seperti ini hanya bisa dilakukan bila benda ukur mempunyai lubang senter, sementara itu dengan cara ini ketelitian putaran sangat dipengaruhi oleh posisi senter, bentuk senter dan ketidakbulatan senter. Meskipun cara-cara pengukuran kebulatan seperti tersebut di atas memiliki berbagai kelemahan, akan tetapi cara-cara tersebut masih sering dilakukan.



Gambar 4. Pengukuran kebulatan diantara dua senter



Gambar 5. Prinsip kerja alat ukur kebulatan

2.3. Parameter Kebulatan (Rochim T., 2001)

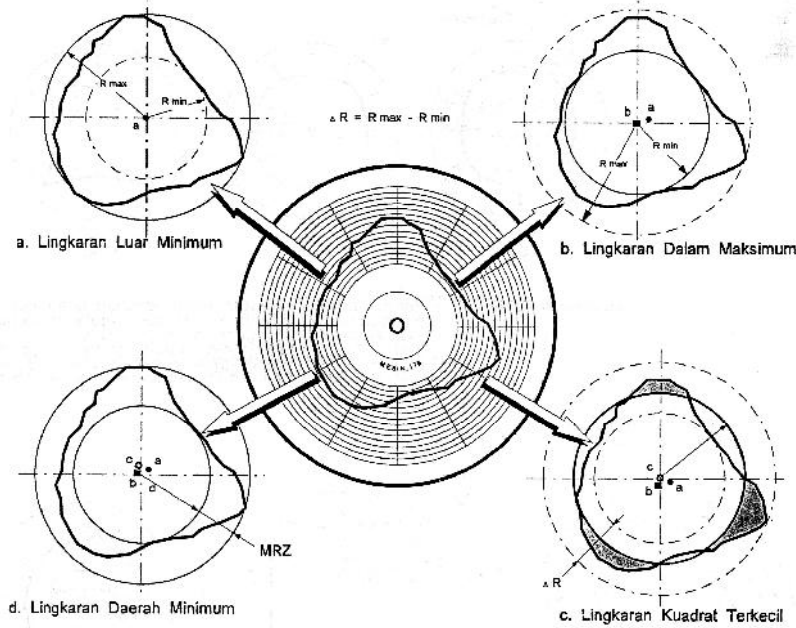
Untuk dapat menyatakan tingkat ketidakbulatan suatu benda ukur maka perlu ditetapkan suatu parameter kebulatan. Parameter kebulatan dapat dihitung berdasarkan profil kebulatan, relatif terhadap lingkaran referensinya. Dalam hal ini terdapat empat jenis lingkaran referensi yang dapat digunakan dalam menentukan harga parameter kebulatan.

Empat lingkaran referensi untuk menentukan parameter kebulatan :

1. Lingkaran luar minimum (minimum circumscribed circle)
Merupakan lingkaran terkecil yang mungkin dibuat diluar profil kebulatan tanpa memotong profil tersebut. Ketidakbulatan adalah sama dengan jarak radial dari lingkaran tersebut ke lekukan paling dalam.
2. Lingkaran dalam maksimum (maximum inscribed circle)
Merupakan lingkaran terbesar yang mungkin dibuat di dalam profil kebulatan tanpa memotong profil tersebut. Ketidakbulatan sama dengan jarak radial dari lingkaran tersebut ke tonjolan yang paling luar.
3. Lingkaran daerah minimum (minimum zone circle)
Dua buah lingkaran konsentris yang melingkupi profil kebulatan sedemikian rupa sehingga jarak radial antara kedua lingkaran tersebut adalah yang terkecil. Titik tengah dari lingkaran minimum tersebut disebut dengan *minimum zone center* (MZC). Sedang ketidakbulatan adalah selisih radius kedua lingkaran tersebut dan dinamakan *minimum radial zone* (MRZ).
4. Lingkaran kuadrat terkecil (least square circle)
Merupakan lingkaran yang ditentukan berdasarkan profil kebulatan sedemikian rupa sehingga jumlah kuadrat jarak dari sejumlah titik dengan interval sudut yang sama pada profil kebulatan ke lingkaran referensi adalah paling kecil. Titik tengah lingkaran kuadrat terkecil dinamakan *least square center* (LSC). Jarak radial harga mutlak rata-rata antara profil kebulatan dengan lingkaran kuadrat terkecil disebut *mean line average* (MLA).

Ditinjau dari segi teori maka parameter kebulatan *mean line average* (MLA) dapat dianggap paling baik untuk menyatakan harga ketidakbulatan serta titik pusat (LSC) dengan teliti. ISO menganjurkan penggunaan **lingkaran daerah minimum** sebagai referensi untuk menghitung harga ketidakbulatan, karena MRZ yang diperoleh adalah setaraf dengan defenisi toleransi kebulatan.

Jenis karakteristik geometrik yang dapat dikontrol dengan suatu toleransi serta simbol yang digunakan diperlihatkan tabel (1).



Gambar 6. Grafik polar dari empat jenis lingkaran referensi untuk menentukan parameter kebulatan yaitu $\Delta R = R_{\max} - R_{\min}$ (titik pusat masing-masing lingkaran referensi bisa berlainan).

Tabel 1. Jenis toleransi bentuk dan posisi menurut standar ISO

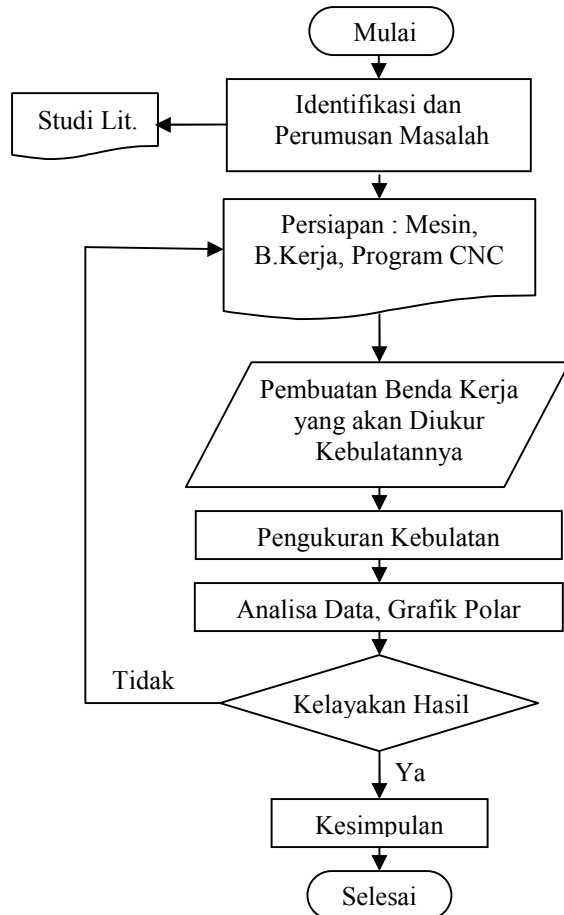
	Karakter yang dikontrol oleh toleransi	Simbol
Bentuk suatu Elemen	-Kelurusan (Straightness)	—
	-Kerataan (Flatness)	▭
	-Kebulatan (Circularity/Roundness)	○
	-Kesilindrisan (Cylindricity)	⊖
	-Ketelitian (kebenaran) bentuk garis (Profile of any line)	⤿
	-Ketelitian (kebenaran) bentuk bidang (Profile of any surface)	⤿
Orientasi	-Kesejajaran (Parallelism)	//
	-Ketegaklurusan (Perpendicularity)	⊥
	-Kesudutan/Kemiringan (Angularity)	∠
Posisi	-Posisi (Position)	⊕
	-Konsentrisitas & kesamaan-sumbu (Concentricity & Coaxiality)	⊙
	-Kesimetrisan (Symmetry)	≡
	Penyimpangan/kesalahan Putar (Run-out)	↗

III. METODOLOGI PENELITIAN

Analisis kualitas geometrik dari komponen yang dibuat dengan melihat hasil yang didapat dari pengukuran profil kebulatan. Nilai kebulatan tersebut ditampilkan dalam grafik polar. Untuk mendapatkan data tersebut langkah-langkah yang akan dilakukan adalah melakukan pengujian berdasarkan prosedur seperti gambar (8).

Langkah awal yang dilakukan untuk pengukuran kebulatan adalah pembuatan benda kerja; secara otomatis dari program CNC yang telah disiapkan sebelumnya. Bentuk benda kerja yang dibuat seperti gambar (9). Pengukuran kebulatan dilakukan dengan cara benda kerja tidak dilepas (metode dua senter) dan pada ujung bebas di *center* dengan *tailstock*. *Dial stand* dilekatkan pada lintasan lurus (*guide ways*) mesin perkakas disesuaikan posisinya didekat titik pengukuran. Pengukuran dilakukan dengan memutar

benda kerja berselang 10° (benda kerja ditandai berjarak 10°). Setiap pengukuran, jarum *dial indicator* diangkat untuk menghindari kesalahan pengukuran dan kerusakan sensor. Pengujian dilakukan di Lab. CNC-CAD/CAM Fakultas Teknik Unsri.



Gambar 7. Prosedur penelitian analisa kebulatan

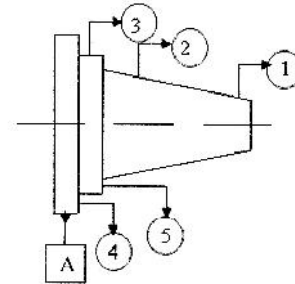
3.1. Bahan dan Peralatan Pengujian

Karena keterbatasan mesin CNC yang digunakan, pengujian menggunakan material Aluminium berdiameter awal 40 mm. Mesin CNC yang ada hanya mampu melakukan pemesinan untuk material Aluminium atau Kuningan dan tidak sanggup untuk material yang lebih keras seperti baja. Bahan dan peralatan pengujian yang digunakan dalam pengambilan data terdiri atas :

- Mesin bubut CNC-EMCO Mier TU2A-Austria, daya maksimum 0,75 kW
- Benda kerja hasil bubut (material aluminium)
- *Dial stand*
- *Dial indicator* (kecermatan 0,001 mm)

- Pahat dari jenis karbida (sudut potong utama 90° , Sudut geram, $\gamma_0 = 0^\circ$, Sudut sisi miring $\lambda_s = 0^\circ$)

Bentuk benda kerja yang dibuat seperti ditunjukkan gambar di bawah ini. Posisi A merupakan titik referensi pengukuran kebulatan. Posisi A berjarak ± 10 mm dari pencekam spindel mesin bubut dan kebulatan titik ini dianggap mempunyai kesalahan yang sangat kecil. Posisi 1 sampai dengan posisi 5 tempat dilakukan pengukuran kebulatan yang akan dipakai untuk analisis kesalahan geometrik.



Gambar 8. Posisi pengukuran pada benda kerja

3.2. Data Kondisi Pengujian :

Kondisi dan variabel pengujian yang diambil dengan menyesuaikan kondisi mesin yang digunakan serta pahat yang ada sebagai berikut :

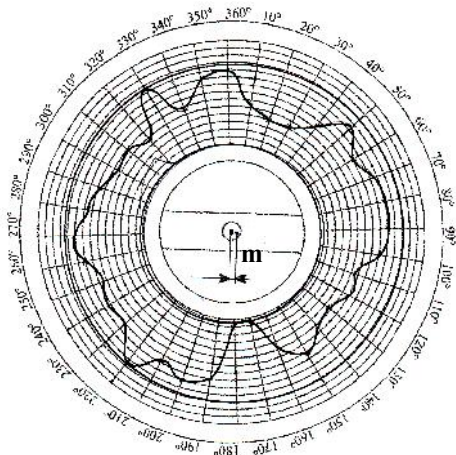
- Pahat Sudut potong utama, $\kappa_r = 90^\circ$
- Putaran spindel 1500 rpm
- Kecepatan makan 100 mm/min
- Kedalaman makan 0,25 mm, *finishing* 0,05 mm

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

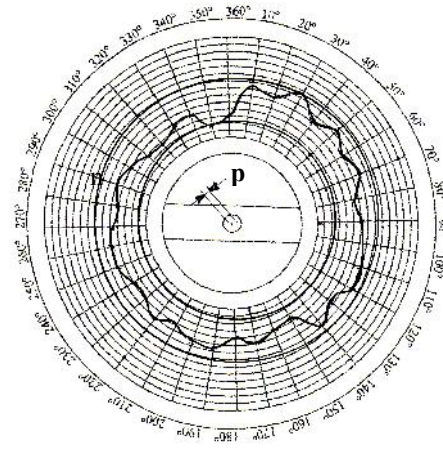
4.1. Analisa Data

Analisa data dilakukan dengan men-plot data hasil pengukuran kebulatan kedalam grafik polar. Dari grafik inilah akan dilakukan penentuan ketidakbulatan, penyimpangan terhadap kebulatan ideal, kesejajaran, ketegaklurusan dan toleransi dari titik yang diukur. Skala untuk setiap grafik disesuaikan nilai yang didapat sehingga ada kesesuaian dalam penggambaran di grafik polarnya.

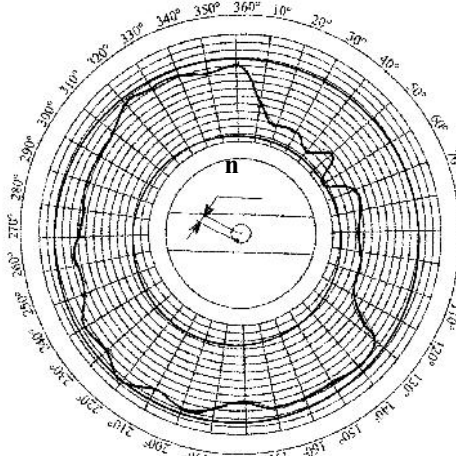
Berikut hasil pengukuran kebulatan yang langsung diplot grafik polar.



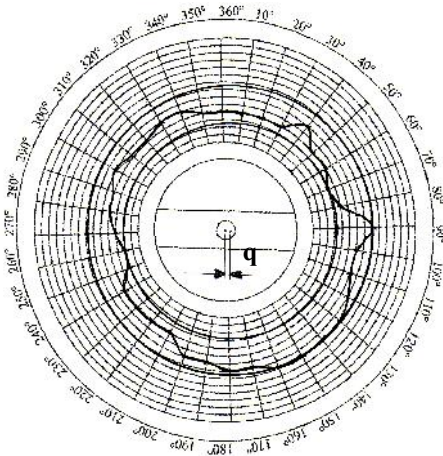
Gambar 9. Grafik kebulatan pengukuran posisi 1
(1 skala dalam grafik = 3 μm)



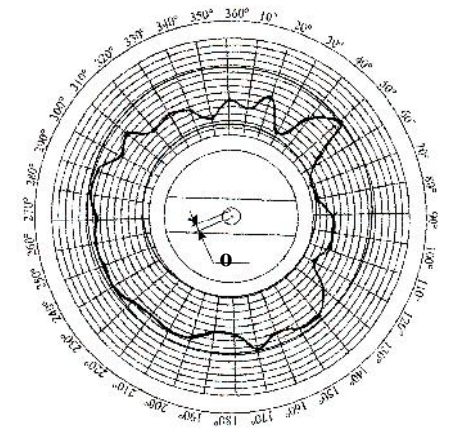
Gambar 12. Grafik kebulatan pengukuran posisi 5
(1 skala dalam grafik = 3 μm)



Gambar 10. Grafik kebulatan pengukuran posisi 2
(1 skala dalam grafik = 3 μm)



Gambar 13. Grafik kebulatan pengukuran posisi 1
(1 skala dalam grafik = 1 μm)



Gambar 11. Grafik kebulatan pengukuran posisi 3
(1 skala dalam grafik = 3 μm)

Dari ke-5 grafik itu maka dapat ditentukan data sebagai berikut :

a. Ketidakbulatan masing-masing titik pengamatan.

Penentuan ketidakbulatan dan penentuan jarak titik tengah MZC dengan titik tengah grafik polar dilakukan dengan dua cara yaitu dengan lingkaran daerah minimum (MZC) dan lingkaran kudrat terkecil (LSC).

- *Lingkaran daerah minimum (MZC)*

$$\text{MZC} = \text{Jari-jari lingk}_{\text{maks.}} - \text{Jari-jari lingk}_{\text{min.}}$$

Tabel 2. Harga ketidakbulatan berdasarkan MZC

Posisi	Ketidak bulatan μm	Jarak titik tengah grafik dengan titik tengah MZC, μm
posisi 1	40	m = 7
posisi 2	36	n = 5
posisi 3	32	o = 4
posisi 4	26	p = 4
posisi 5	4	q = 1,5

• *Lingkaran kuadrat terkecil (LSC)*

Untuk menentukan ketidak bulatan menggunakan pers. berikut (Rochim T. , 2001) :

$$a = \frac{2 \sum x}{n} \quad (1)$$

$$b = \frac{2 \sum y}{n} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum r}{n} \quad (3)$$

dimana :

a = Jarak titik tengah grafik dengan titik tengah profil kebulatan (MZC) arah x

b = Jarak titik tengah grafik dengan titik tengah profil kebulatan (MZC) arah y

R = Jari-jari lingkaran rata-rata dari LSC profil kebulatan (ketidakbulatan)

n = Jumlah data

Hasil perhitungan untuk seluruh posisi pengamatan didapat nilai sebagai berikut :

Tabel 3. Harga ketidakbulatan berdasarkan LSC

Posisi	Jarak (a) μm	Jarak (b) μm	Ketidak bulatan (R) μm	Jarak titik tengah grafik ke titik pusat profil, μm
1	3,0	1,5	49,3	m = 7,76
2	6,1	4,8	43,6	n = 4,90
3	4,6	1,7	35,3	o = 3,35
4	2,8	1,7	34,5	p = 3,28
5	1,9	2,1	16,4	q = 2,83

Bila dirata-ratakan untuk kedua cara tersebut, maka nilai ketidakbulatan dan jarak titik tengah grafik dengan titik pusat profil kebulatan menjadi sebagai berikut :

Tabel 4. Harga ketidakbulatan rata-rata berdasarkan MZC & LSC

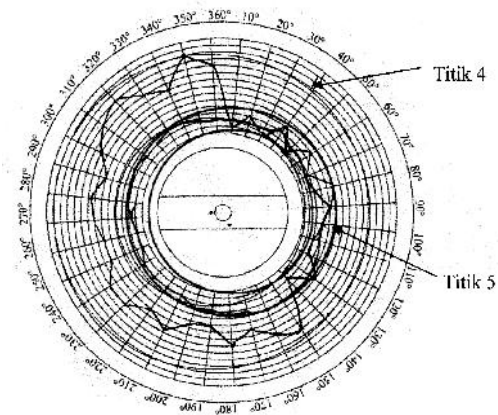
Posisi	Ketidak bulatan rata-rata, R	Jarak titik tengah grafik dengan titik pusat profil, Δ
posisi 1	44,65 μm	m = 6,38 μm
posisi 2	39,80 μm	n = 5,18 μm
posisi 3	33,65 μm	o = 4,45 μm
posisi 4	30,25 μm	p = 3,64 μm
posisi 5	10,20 μm	q = 2,17 μm

b. Ketidak sejajaran sumbu antara posisi 1 dan posisi 3, dicari menggunakan persamaan berikut :

$$\text{Ketidaksejajaran}_{\text{posisi 1 dan 3}} = \frac{m - o}{M \times H} \quad (4)$$

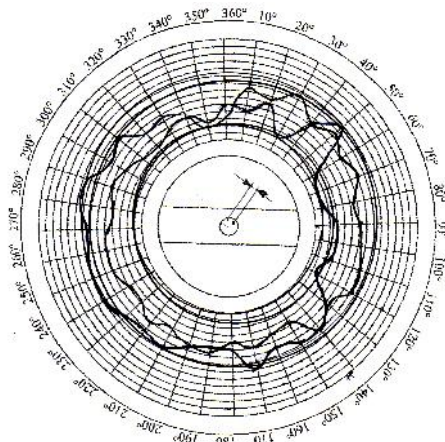
dimana M adalah pembesaran (M=1) dan H adalah jarak posisi 1 dan posisi 3 (H = 30 mm), maka didapat ketidak sejajaran = 0,064 μm .

c. Ketidaksejajaran bidang posisi 4 dan posisi 5 dicari dari jarak antara masing-masing MZC yaitu dari grafik didapat = 4,5 μm .

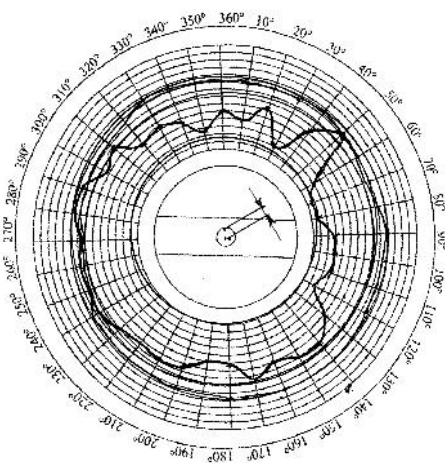


Gambar 14. Profil kebulatan gabungan posisi 4 dan posisi 5 (1 skala = 3 μm)

d. Ketegaklurusan posisi 4 dan posisi 5 terhadap posisi 3 adalah jarak posisi 4 dan posisi 5 ke posisi 3 dan dari grafik didapat = 4,5 μm . dan 5,5 μm .



Gambar 15. Profil kebulatan gabungan posisi 3 dengan posisi 4 (1 skala = 3 μm)



Gambar 16. Profil kebulatan gabungan posisi 3 dengan posisi 5 untuk menentukan ketegaklurusan (1 skala = 3 μm)

- e. Nilai toleransi untuk masing masing posisi
 Nilai toleransi ditentukan dari jarak titik tengah grafik dengan titik pusat profil kebulatan dibagi pembesaran grafik. Pembesaran untuk data diatas adalah $M = 1$, sehingga nilai toleransi kesalahan untuk posisi 1 sampai dengan posisi 5 adalah : 6,38 μm ; 5,18 μm ; 4,45 μm ; 3,64 μm ; 2,17 μm .

IV. PEMBAHASAN

- Penentuan ketidak bulatan antara cara MZC dan LSC terdapat perbedaan, namun perbedaan itu masih dibawah nilai toleransi kebulatan secara umum yaitu 50 μm . MZC dihitung berdasarkan pendekatan yang dicari dengan membuat dua buah lingkaran konsentris yang melingkupi profil kebulatan sedemikian rupa sehingga jarak radial

antara kedua lingkaran tersebut adalah yang terkecil. Sementara itu cara LSC berdasarkan perhitungan rata-rata untuk setiap data.

- Penyimpangan terbesar terjadi pada titik terjauh dari tumpuan, hal ini wajar karena di posisi tersebut timbul defleksi yang terbesar. Besar penyimpangan maksimum adalah 44,65 μm .
- Kesalahan lain yaitu ketidaksejajaran 4,5 μm , ketegaklurusan 5,5 μm dan toleransi kesalahan terbesar adalah 6,38 μm . Dengan demikian mesin bubut CNC yang dipakai masih dapat membuat komponen yang teliti dilihat dari segi kesalahan geometrik yang terjadi, terutama untuk komponen berukuran kecil.

V. KESIMPULAN

Dari hasil analisa data maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- Suatu komponen dengan kebulatan ideal sangat sulit untuk dibuat, sehingga dapat dipastikan akan terjadi suatu ketidakbulatan pada komponen tersebut.
- Kesalahan geometrik yang terjadi dari komponen pengujian yang dibuat tidak terlalu besar (dibawah 50 μm). Kesalahan terbesar berada di posisi terjauh dari tumpuan dengan besar ketidakbulatan 44,65 μm . Kesalahan lain yaitu ketidaksejajaran 4,5 μm , ketegaklurusan 5,5 μm dan toleransi kesalahan terbesar adalah 6,38 μm . Dengan demikian mesin bubut CNC yang dipakai masih dapat membuat komponen yang teliti dilihat dari segi kesalahan geometrik yang terjadi, terutama untuk komponen berukuran kecil.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Kalpakjian S, Manufacturing Engineering and Technology, Second Edition, Eddison-Wesley Publishing Co, 1992.
- [2]. Lab. CNC-CAD/CAM, , Petunjuk Pemrograman-Pelayanan EMCO TU 2A, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Unsri, inderalaya, 2008.
- [3]. Lab. Metrologi Industri, Metrologi Industri-Petunjuk Praktikum, Departemen Teknik Mesin FTI - ITB, Bandung, 2001.
- [4]. Reeve C.P., The Calibration of a Roundness Standard, National Engineering Lab., National Bureau of Standard NBSIR 79-1758, Washington, D.C, 2005.
- [5]. Rochim Taufiq, Wirjomartono S.H., Spesifikasi, Metrologi dan Kontrol Kualitas Geometrik,

- Modul 0, Lab. Metrologi Industri, Departemen Teknik Mesin FTI - ITB, Bandung, 1996.
- [6]. Rochim Taufiq, Spesifikasi, Metrologi dan Kontrol Kualitas Geometrik, Modul 3 & 4, Lab. Metrologi Industri, Departemen Teknik Mesin FTI - ITB, Bandung, 2001.
- [7]. Rochim Taufiq, Spesifikasi, Metrologi dan Kontrol Kualitas Geometrik – Buku 1, Penerbit ITB Bandung, 2007.
- [8]. Wibowo Agung, Analisis Kebulatan Berdasarkan Lingkaran Daerah Minimum dengan Metode Pendekatan Bertahap, Tesis S2, Teknik Produksi, Teknik Mesin FTI ITB, Bandung, 1998.