

Analisis Pengaruh Kedalaman Penyayatan Proses Bubut Terhadap Distorsi Sumbu Poros Pada Material AISI 4340 Pasca Proses *Hardening*

Aditya Wahyu Handoko^{1*}, Sudibitia Titio Koin¹, Agustinus Dewandana Susilo¹ dan Kristian Ismartaya²

¹ Program Studi Teknik Mesin Industri, Politeknik ATMI Surakarta,
Jl. Mojo No. 01, Karangasem, Laweyan, Surakarta.

² Program Studi Desain Produk, Fakultas Arsitektur dan Desain, Universitas Kristen Duta Wacana,
Jl. Dr. Wahidin Sudirohusodo No. 5-19, Kotabaru, Kecamatan Gondokusuman, Kota Yogyakarta.

*E-mail: wahyu.handoko@atmi.ac.id (corresponding author) (+62 85740890909)

Abstract

AISI 4340 alloy steel is widely applied in shaft components that demand high mechanical strength and wear resistance. Nevertheless, the hardening process frequently induces shaft axis distortion, leading to dimensional deviations and additional corrective machining. One of the contributing factors that has not been sufficiently addressed is the influence of machining parameters prior to heat treatment, particularly the turning depth of cut. This study experimentally investigates the relationship between turning depth of cut and shaft axis distortion after hardening in AISI 4340 steel. Cylindrical specimens with dimensions of $\varnothing 10 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ were machined using depth of cut variations of 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, and 2.0 mm, followed by a hardening process in an electric furnace with variations in quenching media and quenching orientation. Distortion was measured using a dial indicator at five axial positions, while hardness was evaluated using the Rockwell C method. Parameter influence was further analyzed using the Taguchi method. The results demonstrate that quenching media is the dominant factor affecting distortion, followed by turning depth of cut. An increase in depth of cut results in higher post-hardening shaft distortion, whereas vertical oil quenching produces the lowest distortion values. These findings provide practical machining and heat treatment references to minimize shaft distortion and improve manufacturing efficiency.

Keywords: shaft distortion, cutting depth, hardening, AISI 4340, Taguchi method

Abstrak

Baja paduan AISI 4340 banyak digunakan sebagai material poros yang memerlukan kekuatan tinggi dan ketahanan aus. Namun demikian, proses pengerasan sering memicu terjadinya distorsi sumbu poros yang menyebabkan penyimpangan dimensi dan meningkatkan kebutuhan proses koreksi. Salah satu faktor yang berpotensi mempengaruhi distorsi tersebut adalah parameter pemesinan sebelum perlakuan panas, khususnya kedalaman penyayatan pada proses bubut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara eksperimental pengaruh variasi kedalaman penyayatan terhadap besarnya distorsi sumbu poros material AISI 4340 setelah proses hardening. Spesimen berbentuk poros silindris berukuran $\varnothing 10 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ dikerjakan dengan variasi kedalaman penyayatan 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm, dan 2,0 mm, kemudian mengalami proses hardening menggunakan tungku listrik dengan variasi media dan posisi quenching. Pengukuran distorsi dilakukan menggunakan dial indicator pada lima titik pengukuran, sedangkan pengujian kekerasan menggunakan metode Rockwell C. Analisis pengaruh parameter dilakukan dengan metode Taguchi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa media quenching merupakan faktor paling dominan terhadap distorsi, diikuti oleh kedalaman penyayatan. Peningkatan kedalaman penyayatan menyebabkan peningkatan distorsi pasca hardening, sementara quenching oli dengan posisi vertikal menghasilkan distorsi paling rendah. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan penentuan parameter pemesinan untuk meminimalkan distorsi poros pasca hardening.

Kata Kunci: distorsi poros, kedalaman penyayatan, hardening, AISI 4340, metode Taguchi

1. Pendahuluan

Dalam industri manufaktur, baja paduan banyak digunakan untuk komponen mesin yang menuntut kekuatan tinggi, ketahanan aus, dan stabilitas dimensi yang baik, salah satunya adalah komponen poros [1]. AISI 4340 merupakan baja paduan yang umum dipilih untuk berbagai

aplikasi komponen dikarenakan memiliki kemampuan pengerasan yang baik serta memiliki kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang memadai setelah mendapat perlakuan panas (*Heat Treatment*) [1], [2]. Untuk meningkatkan sifat mekanik dari material AISI 4340 ini, diperlukan perlakuan panas (*heat treatment*) untuk membentuk struktur martensit sehingga kekerasan dan kekuatan material meningkat secara signifikan [2].

Meskipun mampu meningkatkan kekerasan dan kekuatan material, proses *hardening* seringkali juga diikuti dengan perubahan geometri dan penyimpangan dimensi, dimana kondisi ini memberikan dampak langsung pada meningkatnya kebutuhan proses koreksi seperti *straightening* atau *grinding* ulang, bahkan dapat menyebabkan komponen dikategorikan sebagai *reject* apabila distorsi melebihi *allowance* yang tersedia [3]. Distorsi pasca *hardening* terjadi akibat kombinasi gradien temperatur selama pendinginan yang dilakukan secara cepat, transformasi fasa austenit–martensit singkat, serta distribusi tegangan sisa yang tidak merata di dalam material [4]. Pada komponen yang berbentuk poros dengan rasio panjang terhadap diameter yang besar, distorsi umumnya muncul dalam bentuk penyimpangan sumbu poros sehingga komponen tidak lagi memenuhi toleransi geometrik yang dipersyaratkan [5].

Sejumlah penelitian melaporkan bahwa besarnya distorsi pasca perlakuan panas dipengaruhi oleh berbagai parameter proses, antara lain temperatur austenitisasi, waktu tahan, jenis media *quenching*, posisi *quenching*, serta geometri benda kerja [6]. Distorsi tidak hanya dipengaruhi oleh tahapan perlakuan panas saja, melainkan hasil akumulasi dari seluruh rantai proses manufaktur termasuk proses pemesinan awal.

Dalam konteks proses pemesinan awal, beberapa penelitian mengungkapkan bahwa tegangan sisa yang terbentuk dalam proses pemesinan memiliki pengaruh signifikan terhadap perubahan bentuk komponen setelah mendapat perlakuan panas karena mempengaruhi respons material terhadap siklus termal selama proses *hardening* [7]. Tegangan sisa ini dihasilkan oleh deformasi plastis dan panas yang timbul saat terjadinya proses pemotongan. Salah satu parameter yang berperan penting dalam pembentukan tegangan sisa adalah besarnya kedalaman penyayatan (*Depth of cut* / DOC) [8]. Peningkatan DOC pada proses pemesinan cenderung meningkatkan gaya potong, temperatur, serta deformasi plastis permukaan material yang pada akhirnya meningkatkan tegangan sisa tarik pada lapisan permukaan material. Beberapa studi menunjukkan bahwa variasi kedalaman penyayatan memengaruhi distribusi tegangan sisa pada baja paduan hasil proses bubut serta karakteristik mekanik lapisan permukaan material [9]. Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut hanya berfokus pada kondisi permukaan atau tegangan sisa setelah pemesinan, tanpa mengaitkannya secara langsung dengan besarnya distorsi yang terjadi setelah proses *hardening* [3], [5].

Penelitian terkait AISI 4340 dalam beberapa tahun terakhir lebih banyak membahas pengaruh perlakuan panas terhadap kekerasan, mikrostruktur, dan sifat mekanik material. Kajian yang secara khusus menghubungkan parameter pemesinan, terutama kedalaman penyayatan, dengan distorsi sumbu poros pasca *hardening* masih relatif terbatas, khususnya melalui pendekatan eksperimental yang merepresentasikan kondisi manufaktur aktual [1], [2]. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian (*research gap*) antara studi pemesinan dan studi perlakuan panas, terutama dalam memahami hubungan sebab-akibat antara DOC, tegangan sisa hasil pemesinan, dan distorsi pasca *hardening* pada poros AISI 4340.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan penelitian yang mengintegrasikan proses pemesinan dan perlakuan panas untuk menganalisis pengaruh variasi kedalaman penyayatan proses bubut terhadap distorsi sumbu poros material AISI 4340 setelah proses *hardening*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme terjadinya distorsi, serta menghasilkan referensi parameter pemesinan yang dapat digunakan untuk meminimalkan distorsi pasca *hardening*. Dengan demikian, hasil penelitian ini

tidak hanya berkontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan di bidang manufaktur dan perlakuan panas, tetapi juga memberikan manfaat praktis dalam meningkatkan efisiensi dan kualitas proses produksi komponen poros di industri.

Metode Taguchi merupakan pendekatan desain eksperimen yang efektif dalam mengoptimalkan parameter proses dengan jumlah percobaan minimal namun tetap menghasilkan analisis yang komprehensif [10], [11], [12]. Metode ini banyak digunakan dalam penelitian manufaktur untuk mengevaluasi pengaruh parameter seperti kedalaman penyayatan, kecepatan potong, dan kondisi pendinginan terhadap kualitas produk. Keunggulan metode ini terletak pada penggunaan *Orthogonal Array* serta analisis *Signal to Noise Ratio (SNR)* yang mampu mengidentifikasi faktor dominan dan kondisi optimum secara sistematis [13], [14], [15]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa metode Taguchi efektif dalam optimasi parameter pemrosesan dan perlakuan panas, terutama dalam mengendalikan variabilitas hasil dan meningkatkan kualitas produk [16], [17].

2. Metode dan Bahan

2.1. Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif untuk menganalisis pengaruh kedalaman penyayatan (*depth of cut* / DOC) terhadap distorsi sumbu poros setelah proses *hardening*. Untuk meningkatkan efisiensi jumlah spesimen dan keandalan analisis, penelitian ini diperkuat menggunakan metode Taguchi.

Tabel 1. Parameter Penelitian

Spesifikasi	
DOC 0.5 mm	Ø 10 mm - 200 mm
DOC 1.0 mm	Ø 10 mm - 200 mm
DOC 1.5 mm	Ø 10 mm - 200 mm
DOC 2.0 mm	Ø 10 mm - 200 mm
Heat Treatment Process	
<i>Pre Heating</i>	450° C
<i>Austenitizing</i>	850° C
Media Quenching	
<i>Media Quenching Oil</i>	<i>Oil Daphine Master Quench A-S</i>
<i>Media Water + Polymer</i>	<i>Water + Polymer Aqua Quench 354</i>
Posisi Quenching	
<i>Horizontal</i>	
<i>Vertical</i>	

Parameter-parameter yang digunakan dalam penelitian ini disajikan secara rinci pada Tabel 1, yang mencakup variasi *depth of cut*, proses *heat treatment*, jenis media quenching, dan posisi quenching yang digunakan selama pengujian. Setiap variasi DOC dibuat sebanyak tiga sampai lima spesimen untuk meningkatkan realibilitas data.

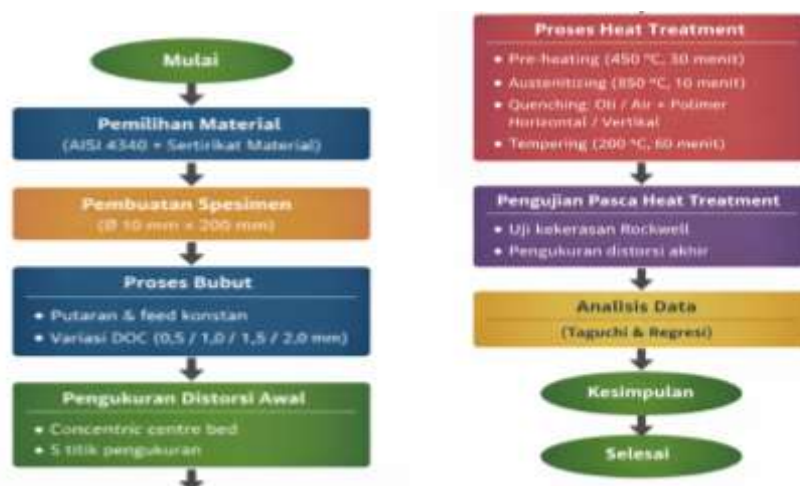
2.2. Bahan dan Spesimen

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja paduan rendah AISI 4340 yang dilengkapi sertifikat material untuk menjamin kesesuaian komposisi kimia. Spesimen uji berbentuk poros silindris dengan diameter 10 mm dan panjang 200 mm, sehingga memiliki rasio panjang terhadap diameter 1 : 20. Rasio ini dipilih karena merepresentasikan poros ramping yang rentan mengalami distorsi pasca proses perlakuan panas. Seluruh spesimen berasal dari satu batch material yang sama untuk meminimalkan pengaruh variasi material terhadap hasil pengujian.

2.3. Peralatan Penelitian

Proses pemesinan dilakukan menggunakan mesin bubut konvensional EMCO. Proses perlakuan panas dilakukan menggunakan tungku pemanas listrik (oven ILF). Pengukuran distorsi dilakukan menggunakan *concentric centre bed* dan dial indicator dengan resolusi 0,01 mm, sedangkan pengujian kekerasan dilakukan menggunakan mesin uji kekerasan Rockwell Albert Gnehm Horgenn tipe OM-150. Semua peralatan tersedia di Politeknik ATMI Surakarta saat dilakukan pengujian / eksperimen.

2.4. Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Diagram alir penelitian pada Gambar 1 menunjukkan tahapan penelitian yang dimulai dari pemilihan AISI 4340 dan pembuatan spesimen, dimana dilakukan proses pembubutan dengan berbagai variasi DOC. Proses selanjutnya dilakukan proses heat treatment diakhiri dengan pengecekan kekerasan dan distorsi dari masing-masing spesimen. Data hasil penelitian dianalisis menggunakan metode Taguchi dan regresi untuk menentukan parameter yang paling berpengaruh, kemudian dihasilkan Kesimpulan penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

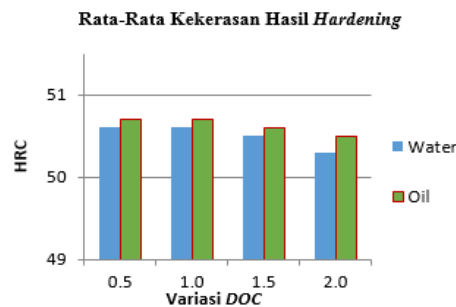
3.1 Hasil Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kedalaman penyayatan (*Depth of cut* /DOC) terhadap besarnya distorsi sumbu poros material AISI 4340 setelah proses *hardening*. Pengujian dilakukan dengan variasi DOC 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, dan 2.0 mm menggunakan media *quenching water + polymer and oil* dengan posisi *horizontal* dan *vertical*.

Parameter pengujian distorsi diukur menggunakan dial indicator dengan lima titik pengukuran pada setiap spesimen.

3.1.1 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan spesimen uji bertujuan untuk mengetahui keaslian dari material AISI 4340. Pengujian kekerasan menggunakan mesin Albert Gnehm Horgenn tipe OM – 150 yang berada di unit Heat Treatment Politeknik ATMI Surakarta. Metode pengujian kekerasan menggunakan Rockwell C dengan pembebanan 150 kg dan indentor yang terbuat dari kerucut diamond.



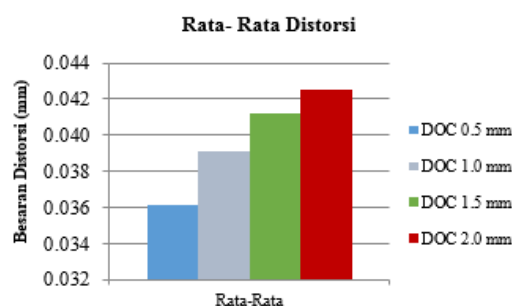
Gambar 2. Pengujian Kekerasan Spesimen

Gambar 2 menunjukkan bahwa material yang digunakan untuk spesimen uji sesuai dengan kriteria material AISI 4340 yang memiliki tingkat kekerasan ± 50 HRC.

3.1.2 Hasil Pengujian Konsentrisitas

Pengujian konsentrisitas spesimen uji bertujuan untuk mengetahui distorsi yang terjadi sebelum dan pasca proses *hardening*. Pengujian konsentrisitas menggunakan Concentric Centre Bed dan Outside Dial yang berada di unit WBS Gonzaga Politeknik ATMI Surakarta. Pengujian spesimen uji dibagi menjadi 5 titik dengan jarak 30 mm – 60 mm – 100 mm – 140 mm – dan 170 mm. Pengujian konsentrisitas dilakukan dalam 2 tahap yaitu sebelum dan pasca proses *hardening*.

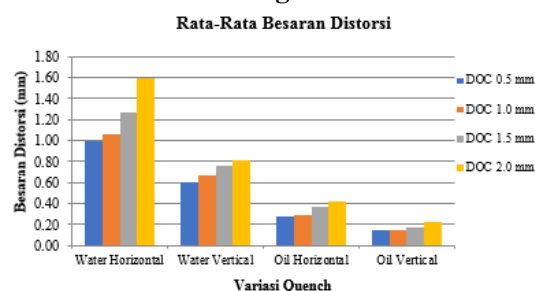
1 Pengujian Konsentrisitas Pasca Pemesinan



Gambar 3. Rata-Rata Distorsi Pasca Pemesinan

Gambar 3 menunjukkan bahwa distorsi yang terjadi setelah proses pemesinan dengan variasi DOC masih dalam nilai aman (dibawah *allowance* grinding 0.5 mm). Data distorsi yang terjadi sebelum proses *hardening* menunjukkan bahwa dampak tegangan sisa dari kedalaman penyayatan proses pemesinan belum terlihat.

2 Pengujian Konsentrisitas Pasca Hardening



Gambar 4. Besaran Distorsi Pasca *Hardening*

Berdasarkan Gambar 4 menunjukkan bahwa distorsi terlihat setelah dilakukan proses *hardening*. Penggunaan media *quench* memberikan nilai distorsi yang signifikan terhadap spesimen uji. Spesimen uji yang didinginkan dengan menggunakan *water + polymer* memiliki nilai distorsi yang besar melebihi batas maksimal *allowance grinding*. Variasi DOC 2.00 mm memiliki nilai distorsi tertinggi dari semua spesimen uji baik menggunakan media pendingin *water + polymer* maupun *oil*. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa tegangan dalam sisa proses pemesinan memegang pengaruh yang cukup signifikan terhadap hasil distorsi yang terjadi pasca proses *hardening*. Media pendingin *oil* memiliki nilai distorsi dibawah nilai maksimal *allowance grinding* baik secara *horizontal* maupun *vertical*. Nilai distorsi terendah didapat pada spesimen uji dengan beberapa variasi DOC yang didinginkan menggunakan media *oil* serta posisi *vertical*. Metode *quench oil vertical* menghasilkan distorsi minimum secara keseluruhan.

3.1.3 Interpretasi Metode Taguchi

Metode Taguchi digunakan untuk mengetahui faktor yang paling berpengaruh terhadap distorsi sumbu poros.

A. Orthogonal Array

Dalam Penelitian ini menggunakan Metode Taguchi dengan pendekatan *Orthogonal Array* (OA) untuk mengoptimalkan jumlah percobaan. Berdasarkan jumlah faktor dan level yang digunakan, maka dipilih *Orthogonal Array* L16 (4^3) yang mampu mengakomodasi tiga faktor dengan empat level. Faktor yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

Faktor A : Kedalaman Penyayatan (0.5 ; 1.0 ; 1.5 ; 2.0 mm)

Faktor B : Media *Quenching* (*Water + Polymer* ; *Oil*)

Faktor C : Posisi *Quenching* (*Horizontal* ; *Vertical*)

Tabel 2. *Orthogonal Array*

No	DOC	Media	Posisi
1	0.5	<i>Water + Polymer</i>	<i>Horizontal</i>
2	0.5	<i>Water + Polymer</i>	<i>Vertical</i>
3	0.5	<i>Oil</i>	<i>Horizontal</i>
4	0.5	<i>Oil</i>	<i>Vertical</i>
5	1.0	<i>Water + Polymer</i>	<i>Horizontal</i>
6	1.0	<i>Water + Polymer</i>	<i>Vertical</i>
7	1.0	<i>Oil</i>	<i>Horizontal</i>
8	1.0	<i>Oil</i>	<i>Vertical</i>
9	1.5	<i>Water + Polymer</i>	<i>Horizontal</i>
10	1.5	<i>Water + Polymer</i>	<i>Vertical</i>
11	1.5	<i>Oil</i>	<i>Horizontal</i>
12	1.5	<i>Oil</i>	<i>Vertical</i>
13	2.0	<i>Water + Polymer</i>	<i>Horizontal</i>
14	2.0	<i>Water + Polymer</i>	<i>Vertical</i>
15	2.0	<i>Oil</i>	<i>Horizontal</i>
16	2.0	<i>Oil</i>	<i>Vertical</i>

Tabel 2 menunjukkan susunan percobaan berdasarkan *Orthogonal Array* (L16) yang digunakan dalam metode Taguchi. Setiap baris pada tabel merepresentasikan satu kombinasi perlakuan yang terdiri dari tiga faktor, yaitu kedalaman penyayatan (DOC), media *quenching*, dan posisi *quenching*. Penyusunan ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh kombinasi

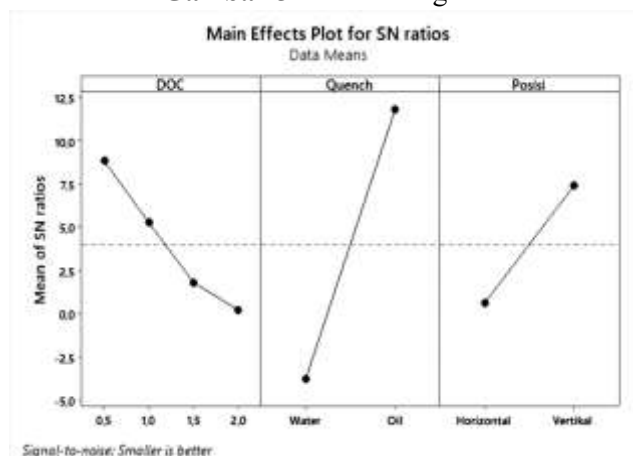
parameter dapat diuji secara sistematis dengan jumlah percobaan yang efisien, sehingga pengaruh masing-masing faktor terhadap distorsi dapat dianalisis secara optimal.

B. *Signal to Noise Ratio (SNR)*

Analisis *Signal to Noise Ratio (NSR)* menggunakan kriteria *smaller is better* karena karakteristik kualitas yang diinginkan adalah distorsi minimum seperti dijelaskan pada Gambar 5.

Response Table for Signal to Noise Ratios					Response Table for Signal to Noise Ratios					Response Table for Signal to Noise Ratios				
Smaller is better					Smaller is better					Smaller is better				
Level	DOC	Quench	Posisi		Level	DOC	Quench	Posisi		Level	DOC	Quench	Posisi	
1	24,23	13,39	19,03		1	8,8248	-3,7835	0,6214		1	5,1173	-3,4589	-1,6838	
2	20,67	28,44	22,79		2	5,2504	11,8221	7,4171		2	4,1162	8,3592	6,5841	
3	20,52				3	1,8006				3	-0,4293			
4	18,22				4	0,2013				4	0,9963			
Delta	6,01	15,05	3,77		Delta	8,6235	15,6056	6,7957		Delta	5,5466	11,8181	8,2679	
Rank	2	1	3		Rank	2	1	3		Rank	3	1	2	

Gambar 5. Metode Taguchi



Gambar 6. SNR Metode Taguchi

Main Effects Plot yang dijelaskan pada Gambar 6 menunjukkan bahwa peningkatan nilai SNR paling signifikan terjadi pada :

1. Media *Quenching*

Media quenching memiliki pengaruh terbesar karena menentukan laju pendinginan selama proses *hardening*. Pendinginan yang terlalu cepat menghasilkan tegangan termal yang besar sehingga meningkatkan terjadinya distorsi.

2. Kedalaman Penyayatan (DOC)

Kedalaman penyayatan menempati urutan kedua karena berkaitan langsung dengan tegangan sisa hasil proses pemesinan.

C. ANOVA

Analisis Variasi (ANOVA) dilakukan untuk mengetahui tingkat kontribusi masing-masing faktor terhadap distorsi yang terjadi. Hasil analisis menunjukkan bahwa media quenching memiliki kontribusi terbesar terhadap distorsi, diikuti oleh kedalaman penyayatan serta posisi *quenching*.

Tabel 3. ANOVA

Faktor	DOF	SS	MS	Kontribusi (%)
DOC	3	0.85	0.28	28 %
Media	1	1.72	1.72	52 %
Posisi	1	0.41	0.41	20 %

Berdasarkan hasil ANOVA pada Tabel 3, media *quenching* merupakan faktor paling dominan dengan kontribusi sebesar 52% yang menunjukkan laju pendinginan memiliki pengaruh signifikan terhadap terjadinya distorsi.

Hasil analisis Taguchi menunjukkan kombinasi parameter optimum untuk menghasilkan distorsi minimum yaitu dikerjakan dengan DOC kecil, penggunaan media *quench oil* dengan posisi vertikal.

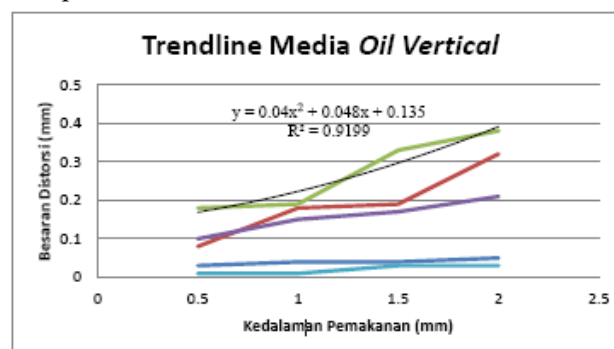
Interpretasi lebih lanjut menunjukkan bahwa metode Taguchi efektif untuk menentukan parameter optimum karena dapat membandingkan pengaruh setiap faktor secara sistematis. Analisis ini juga menunjukkan bahwa pengendalian distorsi tidak cukup hanya dengan mengatur DOC, tetapi harus dikombinasikan dengan pemilihan media *quench* yang tepat.

3.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil penelitian diketahui bahwa peningkatan DOC menyebabkan peningkatan distorsi pasca *hardening*. Distorsi setelah pemesian relatif kecil yaitu antara 0.036–0.043 mm, namun setelah proses *hardening* distorsi meningkat hampir 2 mm pada kondisi tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan sisa akibat proses pemesian berperan besar terhadap distorsi pasca *hardening*. Semakin besar DOC yang diberikan maka panas yang dihasilkan juga akan meningkat yang membuat tegangan sisa terjebak dan membuat distorsi pasca *hardening* semakin besar. Dengan demikian DOC merupakan parameter penting dalam mengontrol distorsi sumbu poros.

Hasil analisis Taguchi melalui SNR menunjukkan bahwa media *quenching* merupakan faktor yang paling berpengaruh, diikuti oleh DOC dan posisi *quenching*. Hal ini diperkuat oleh analisis ANOVA yang menunjukkan kontribusi media *quenching* sebesar 52% paling besar menentukan terjadinya distorsi. Dominasi media *quenching* berkaitan dengan laju pendinginan yang mempengaruhi gradien temperatur dan distribusi tegangan termal dalam material.

Distorsi minimal terjadi saat spesimen menggunakan media pendingin oil vertikal. Langkah antisipasi terjadinya distorsi, peneliti membuat formula sebagai prediksi terjadinya distorsi dengan berbagai variasi kedalaman penyayatan. Data diambil berdasarkan data distorsi yang telah terkumpul dalam penelitian.



Gambar 7. Trendline Oil Vertical

Trendline pada Gambar 7 menunjukkan besaran penyimpangan yang akan terjadi apabila terdapat variasi kedalaman penyayatan selain yang digunakan untuk penelitian.

$$y = 0.04x^2 + 0.048x + 0.135 \quad (1)$$

dimana :

y : Besaran distorsi (mm)

x : Kedalaman penyayatan (mm)

Persamaan 1 memiliki koefisien determinasi yang sangat kuat dengan tingkat prosentase mencapai 91.99%, sehingga persamaan 1 dapat digunakan untuk menentukan resiko distorsi yang mungkin terjadi pada media pendingin *oil vertical* dengan berbagai variasi kedalaman penyayatan pada proses pemesinan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian dan analisa yang dilakukan, dapat disimpulkan antara lain :

1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa spesimen uji dengan media *quench oil vertical* menghasilkan nilai distorsi minimum dari semua spesimen uji. Media *quenching oil* dengan posisi *vertical* direkomendasikan untuk pengerjaan yang serupa pada unit heat treatment Politeknik ATMI Surakarta sehingga dapat meminimalisir terjadinya distorsi yang membutuhkan waktu yang lama dan biaya untuk memperbaiki distorsi sumbu poros yang terjadi.
2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman penyayatan pada proses pemesinan memberikan pengaruh besar pada hasil distorsi pasca proses *hardening*. Penggunaan persamaan 1 untuk menentukan resiko distorsi sumbu poros yang mungkin terjadi pada media pendingin *oil vertical* dengan berbagai variasi kedalaman penyayatan, sehingga tidak menimbulkan nilai distorsi sumbu poros yang melebihi nilai *allowance grinding* (0.5 mm).
3. Hasil penelitian ini memperkuat bahwa integrasi antara proses pemesinan dan perlakuan panas sangat penting dalam mengendalikan terjadinya distorsi sehingga pendekatan berbasis parameter proses secara simultan menjadi kunci dalam peningkatan kualitas komponen manufaktur.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Industri Politeknik ATMI Surakarta yang telah membantu dalam menyelesaikan penelitian ini. Fasilitas-fasilitas yang diberikan oleh Politeknik ATMI surakarta dapat membantu menyelesaikan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] W. Jomaa, V. Songmene, and P. Bocher, "An Investigation of Machining-Induced Residual Stresses and Microstructure of Induction-Hardened AISI 4340 Steel," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 7, pp. 838–844, May 2016, doi: 10.1080/10426914.2015.1070431.
- [2] M. Souza, L. F. Serrão, J. M. Pardal, S. S. M. Tavares, and M. C. Fonseca, "Tempering Influence on Residual Stresses and Mechanical Properties of AISI 4340 Steel," Nov. 09, 2021. doi: 10.21203/rs.3.rs-1051431/v1.
- [3] T. Hart -Seco and / Vacuum, "Advanced Distortion Control for Heat Treated Components," 2019. [Online]. Available: www.asminternational.org

- [4] T. Hart and M. Korecki, "Advanced distortion control for heat treated components," in *30th ASM Heat Treating Society Conference and Exposition, Heat Treat 2019 - Extended Abstracts*, ASM International, 2019, pp. 245–252. doi: 10.31399/asm.cp.ht2019p0245.
- [5] K. h. Salman, A. H. Elsheikh, M. Ashham, M. K. A. Ali, M. Rashad, and Z. Haiou, "Effect of cutting parameters on surface residual stresses in dry turning of AISI 1035 alloy," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 41, no. 8, Aug. 2019, doi: 10.1007/s40430-019-1846-0.
- [6] S. Lubis, Rosehan, H. B.K, S. Lam, and N. R.K, "Optimization Of Cutting Parameters Of AISI 4140 Material Turning On Carbide Tool Life," *International Journal of Application on Sciences, Technology and Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 411–420, May 2023, doi: 10.24912/ijaste.v1.i2.411-420.
- [7] Y. Su, G. Zhao, Y. Zhao, J. Meng, and C. Li, "Multi-objective optimization of cutting parameters in turning AISI 304 austenitic stainless steel," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 2, 2020, doi: 10.3390/met10020217.
- [8] M. Indriyanto, "Analisis Distorsi dan Tegangan Sisa pada Poros Kapal terhadap Perlakuan Panas (Quenching) Menggunakan FEM," Surabaya, 2013.
- [9] A. Samuel and K. N. Prabhu, "Residual Stress and Distortion during Quench Hardening of Steels: A Review," Jul. 01, 2022, *Springer*. doi: 10.1007/s11665-022-06667-x.
- [10] G. Taguchi, S. Chowdhury, and Y. Wu, "4 Quality Engineering: The Taguchi Method Functionality Evaluation of System Using Power (Amplitude) 61 Quality Engineering of System Using Frequency 65," 2005.
- [11] P. J. Ross, "TAGUCHI TECHNIQUES FOR QUALITY ENGINEERING."
- [12] R. K. . Roy, *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [13] M. K. B. Jawale, M. M. M. Rohamare, M. S. N. Rajput, P. A. S. Autade, and B. E. Student, "Optimization of Cutting Parameters of CNC Machine using Taguchi Method," 2018. [Online]. Available: www.ijserd.com
- [14] T. Panyaphirawat, P. Sapsarnwong, and T. Pornyungyuen, "An Optimization of Machine Parameters for Modified Horizontal Boring Tool Using Taguchi Method," 2014.
- [15] Y. Hendronursito *et al.*, "OPTIMASI PERLAKUAN PANAS DAN PROSES STIR CASTING KOMPOSIT Al-BASALT TERHADAP SIFAT MEKANIK MENGGUNAKAN METODA TAGUCHI OPTIMIZATION OF HEAT TREATMENT AND STIR CASTING PROCESS OF Al-BASALT COMPOSITE ON MECHANICAL PROPERTIES USING TAGUCHI METHOD," *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik*, vol. 10, no. 2, pp. 66–73, doi: 10.37209/jtbbt.
- [16] T. Kivak, G. Samtaş, and A. Çiçek, "Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills," *Measurement (Lond)*, vol. 45, no. 6, pp. 1547–1557, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.measurement.2012.02.022.
- [17] K. K. Bhosale, "Parameters Optimization of CNC Machining using Taguchi Methodology," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 4, pp. 4594–4598, Apr. 2018, doi: 10.22214/ijraset.2018.4753.