

Analisis Pengaruh Dimensi Material dan Media Pendingin terhadap Resiko Distorsi Pasca Proses *Heat Treatment* pada Material AISI 4340 dan AISI 4140

Hieronimus Vikko Purohita^{1*}, Tri Hannanto Saputra², Chrisyanto Eko Nugroho¹, Dedi Kristanto¹, Archi Kun Cahyo Utomo¹, Fidelis Gigih Triatmaja¹

¹Program Studi D3 Teknik Mesin Industri, Politeknik ATMI Surakarta,

²Program Studi D3 Teknik Perancangan Mekanik dan Mesin, Politeknik ATMI Surakarta

Jl Mojo no 1 Karangasem, Laweyan, Surakarta

*E-mail: vikko.purohita@atmi.ac.id (+6289660327623)

Abstract

This study investigates the effects of material thickness and quenching media on distortion behavior following the hardening process in AISI 4140 and AISI 4340 steels, using Navy C-Ring specimens. The hardening process was performed by preheating to 450°C, followed by austenitizing at 850°C for 30 minutes. The specimens were then quenched using oil, water, and oil-water media in a horizontal position. Material thickness variations of 5 mm, 10 mm, and 15 mm were applied. Distortion evaluation was conducted for the flatness, gap width, inner diameter, and outer diameter parameters. Experimental data were analyzed using the Taguchi method based on Signal-to-Noise Ratio (SNR). The results showed that material thickness significantly affected flatness distortion in AISI 4340 and outer diameter distortion in both materials, while quenching media dominantly affected flatness distortion in AISI 4140 and inner diameter distortion in both materials. The minimum distortion was obtained in AISI 4340 steel with a thickness of 10 mm when oil quenching was used, resulting in an inner-diameter distortion of 0.007 mm and an SNR of 43.09 dB. The study confirms that the cooling rate and thermal gradients during quenching strongly influence the formation of distortion after heat treatment.

Keywords: *Distortion, Heat Treatment, Navy C-Ring, AISI 4140, AISI 4340, Quenching, Taguchi Method*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ketebalan material dan media quenching terhadap distorsi pascaproses hardening pada baja AISI 4140 dan AISI 4340 menggunakan spesimen Navy C-Ring. Proses hardening dilakukan melalui pre-heating pada temperatur 450°C dan austenitisasi pada temperatur 850°C dengan holding time selama 30 menit. Proses quenching dilakukan menggunakan media oil, water, dan oil-water pada posisi horizontal. Variasi ketebalan material yang digunakan yaitu 5 mm, 10 mm, dan 15 mm. Evaluasi distorsi dilakukan pada parameter flatness, gap width, inner diameter, dan outer diameter. Data hasil eksperimen dianalisis menggunakan metode Taguchi berdasarkan nilai Signal-to-Noise Ratio (SNR). Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketebalan material berpengaruh signifikan terhadap distorsi flatness pada material AISI 4340 dan outer diameter pada kedua material, sedangkan media quenching berpengaruh dominan terhadap distorsi flatness pada material AISI 4140 serta inner diameter pada kedua material. Nilai distorsi minimum diperoleh pada material AISI 4340 dengan ketebalan 10 mm menggunakan media quenching oil dengan nilai distorsi inner diameter sebesar 0,007 mm dan nilai SNR sebesar 43,09 dB. Penelitian ini menunjukkan bahwa cooling rate dan thermal gradient selama proses quenching memiliki pengaruh besar terhadap pembentukan distorsi pasca-heat treatment.

Kata kunci: *Distorsi, Heat Treatment, Navy C-Ring, AISI 4140, AISI 4340, Quenching, Metode Taguchi*

1. Pendahuluan

Industri manufaktur modern dituntut untuk menghasilkan komponen baja dengan kekuatan, kekerasan, dan ketahanan aus yang tinggi guna memenuhi kebutuhan aplikasi teknik seperti gear, shaft, mold, dan komponen otomotif. Salah satu metode yang umum digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik material baja adalah perlakuan panas (*heat treatment*), khususnya proses *hardening*. *Hardening* merupakan proses perlakuan panas yang dilakukan dengan memanaskan material hingga mencapai temperatur austenitisasi, menahannya pada temperatur dan waktu tertentu, kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginan cepat (*quenching*) menggunakan media pendingin tertentu [1][2]. Proses tersebut bertujuan untuk meningkatkan kekerasan material melalui pembentukan struktur martensit sehingga material memiliki ketahanan aus yang lebih baik.

Meskipun proses *hardening* mampu meningkatkan sifat mekanik material, proses ini juga memiliki kelemahan berupa munculnya distorsi dan bahkan retak (*crack*) pada benda kerja. Distorsi merupakan perubahan bentuk atau perubahan dimensi material setelah proses perlakuan panas akibat distribusi temperatur dan transformasi fasa yang tidak seragam selama proses pendinginan [3][4]. Distorsi menjadi permasalahan penting dalam industri manufaktur karena dapat menurunkan akurasi dimensi komponen, meningkatkan kebutuhan proses *machining* ulang, serta menyebabkan penolakan produk (*reject*).

Fenomena distorsi pada proses *quenching* dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya bentuk geometri material, ketebalan material, laju pendinginan media *quenching*, serta karakteristik transformasi mikrostruktur material. Pendinginan yang terlalu cepat akan menghasilkan thermal gradient yang tinggi antara permukaan dan inti material, sehingga memicu terbentuknya tegangan sisa (*residual stress*). Selain itu, transformasi fasa austenit menjadi martensit selama pendinginan juga menyebabkan perubahan volume material yang berkontribusi terhadap deformasi geometrik. Semakin tinggi *cooling rate* media pendingin, maka potensi terbentuknya distorsi akan semakin besar [5].

Salah satu spesimen yang umum digunakan untuk analisis distorsi pasca-*heat treatment* adalah *Navy C-Ring*. Geometri *Navy C-Ring* memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan dimensi akibat tegangan termal dan transformasi fasa sehingga sering digunakan untuk mengevaluasi perilaku distorsi material selama proses *quenching* [6]. Penelitian sebelumnya mengenai distorsi *Navy C-Ring* telah dilakukan pada material AISI 4340 dengan media pendingin berupa oli. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan media pendingin oil menghasilkan nilai distorsi yang relatif lebih rendah dengan kekerasan material yang tetap tinggi [7].

Material AISI 4140 dan AISI 4340 dipilih pada penelitian ini karena kedua material tersebut merupakan baja paduan yang banyak digunakan pada industri manufaktur dan memiliki kemampuan *hardenability* yang baik [5][8]. AISI 4340 memiliki kandungan nikel yang lebih tinggi dibandingkan dengan AISI 4140, sehingga memiliki *toughness* dan *hardenability* yang lebih baik, yang diperkirakan akan memengaruhi perilaku distorsi selama proses *quenching*. Selain jenis material, ketebalan material juga diperkirakan memberikan pengaruh terhadap distribusi temperatur dan kecepatan pendinginan selama proses *hardening* [9][10].

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas distorsi pasca *quenching* pada material AISI 4140 maupun AISI 4340 secara terpisah [11-15]. Namun demikian, penelitian mengenai kombinasi pengaruh ketebalan material dan media *quenching* terhadap distorsi multi-parameter seperti *flatness*, *gap width*, *inner diameter*, dan *outer diameter* menggunakan spesimen *Navy C-Ring* masih sangat terbatas [15-17]. Selain itu, sebagian besar penelitian sebelumnya hanya berfokus pada satu jenis material atau satu parameter distorsi tertentu tanpa melakukan perbandingan simultan antara material AISI 4140 dan AISI 4340 menggunakan pendekatan optimasi *Taguchi*.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ketebalan material dan media *quenching* terhadap distorsi pascaproses hardening pada material AISI 4140 dan AISI 4340 menggunakan spesimen *Navy C-Ring*. Parameter distorsi yang diamati meliputi *flatness*, *gap width*, *inner diameter*, dan *outer diameter*. Analisis data dilakukan menggunakan metode *Taguchi* untuk menentukan faktor yang paling dominan memengaruhi distorsi serta memperoleh kombinasi parameter proses yang menghasilkan nilai distorsi minimum.

Novelty penelitian ini terletak pada analisis kombinasi pengaruh ketebalan material dan media *quenching* terhadap distorsi multi-parameter pada spesimen *Navy C-Ring* dengan membandingkan dua jenis baja paduan, yaitu AISI 4140 dan AISI 4340, menggunakan pendekatan optimasi *Taguchi* secara simultan. Industri masa kini dituntut untuk mampu meningkatkan kualitas produk baja melalui proses *hardening*.

2. Metode dan Bahan

2.1. Metode Penelitian

Metode penelitian yang dipilih adalah metode eksperimental dan metode *Taguchi*. Metode eksperimental bertujuan untuk mengetahui pengaruh suatu variable terhadap variable yang lain [17]. Metode Eksperimental termasuk kedalam metode penelitian Kuantitatif yang digunakan untuk mengetahui pengaruh variabel independen (variable yang memberi pengaruh) terhadap variabel dependen (variable yang terpengaruhi) yang berhubungan dan menghasilkan sebab-akibat [18].

2.2. Objek Penelitian

Objek yang diamati pada penelitian ini adalah Navy C Ring. Objek ini digunakan untuk melihat distorsi pada bagian-bagian kritis spesimen. Alat yang digunakan dalam pembuatan spesimen antara lain Mesin Bubut Yunnan SP 1640T, Mesin Milling Mikron WF 3SA, Wire Cut V350, serta peralatan pendukung yang berada di Unit WAP Politeknik ATMI Surakarta, serta Oven ILF yang berada di Unit *Heat Treatment*. Sedangkan alat yang digunakan dalam mengolah data spesimen antara lain *Dial Caliper* resolusi 0.02 mm, *Dial Indicator* 0.01 mm, *Surface table*, dan Profile Projector Mitutoyo PJ311. Perangkat lunak yang digunakan adalah AutoCad untuk pembuatan gambar kerja spesimen dan Microsoft Excel untuk mengolah data hasil penelitian. Tahapan proses yang dilakukan dalam penelitian ini dapat digambarkan dalam diagram alir seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.3. Variabel Pengujian

Variasi penelitian ini adalah ketebalan material uji yang dibandingkan dan dituliskan seperti pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Penyimpangan Material Uji

Tabel Penyimpangan Material 4140 dan 4340										
Tebal Material	No	Hardness (HRC)	$\square$ (0) mm	$\square$ (1) mm	Gap (0) mm	Gap (1) mm	$\varnothing$ ID (0) mm	$\varnothing$ ID (1) mm	$\varnothing$ OD (0) mm	$\varnothing$ OD (1) mm
5 mm	1									
	2									
	3									
10 mm	1									
	2									
	3									
15 mm	1									
	2									
	3									

2.4. Variabel Penelitian

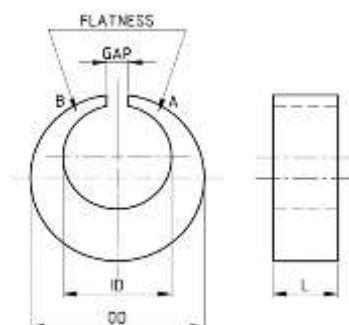
Variasi parameter penelitian ini meliputi tebal material, media pendingin, serta perbedaan material Aisi 4340 dan AISI 4140, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabel Parameter Penelitian

Parameter Penelitian	Keterangan
Jenis Material	AISI 4340
	AISI 4140
<i>Heat Treatment Process</i>	Suhu <i>Pre Heating</i> : 450° C
	Suhu <i>Austenitizing</i> : 850° C
	<i>Holding Time</i> : 30 menit
Variasi Tebal Material	5 mm
	10 mm
	15 mm
Media <i>Quenching</i>	<i>Oil Daphne Master Quench A-S</i>
	<i>Water + Polymer Aqua Quench 354</i>
	<i>Oil + Water</i>
Temperatur Media <i>Quenching</i>	Oil Temperature $\pm 30^{\circ}\text{C}$ Water Temperature $\pm 28^{\circ}\text{C}$
Posisi <i>Quenching</i>	<i>Horizontal</i>
Metode Analisis	<i>Taguchi</i>
<i>Orthogonal Array</i>	L9 (3 ²)

2.5. Prosedur Pengukuran dan Pengujian Spesimen

Penelitian menggunakan spesimen Navy C-Ring, beberapa faktor yang diteliti adalah : *Flatness*, *Gap Width*, *Inner Diameter*, & *Outer Diameter* [18]). Prosedur penelitian yang dipakai sebagai berikut :



Gambar 2. Spesimen Uji

1. Pengukuran *Flatness*

Pengukuran menggunakan alat ukur *dial indicator*, *surface table* sebagai referensi bidang, pengukuran *flatness* dari titik A dan B melewati bidang spesimen yang diukur, bisa dilihat pada gambar 2.

2. Pengukuran *Gap Width*

Gap Width diukur dengan *profile projector* untuk mengukur celah pada spesimen setelah proses pemesinan, sesuai dengan celah pada Gambar 2.

3. Pengukuran *Inner Diameter* (ID)

Pengukuran menggunakan alat ukur *profile projector*. Pengukuran *inner diameter* sesuai dengan Gambar 2.

4. Pengukuran *Outer Diameter* (OD)

Pengukuran menggunakan alat ukur dial caliper 0,02 mm, dengan pengukuran *outer diameter* sesuai dengan Gambar 2. Penelitian ini menggunakan metode Taguchi dengan desain *orthogonal array* L9 (3²) untuk mengurangi jumlah eksperimen, namun tetap mampu merepresentasikan pengaruh faktor penelitian secara optimal. Faktor yang digunakan meliputi ketebalan material dan media quenching, masing-masing dengan tiga level. Analisis dilakukan menggunakan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) dengan karakteristik “*smaller is better*” karena nilai distorsi yang diharapkan adalah seminimal mungkin [19].

$$SNR = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

Dimana :

- y : data percobaan
i : jumlah tes didalam percobaan
n : jumlah pengulangan

3. Hasil dan Pembahasan

Eksperimen spesimen dilakukan menggunakan tungku pemanas ILF di bengkel *Heat Treatment*, Politeknik ATMI Surakarta. Setelah eksperimen dilakukan, diperoleh beberapa data yang akan menjadi hasil penelitian. Secara garis besar diperoleh data hasil pengujian kekasaran material dan hasil pengujian distorsi pasca spesimen di *hardening*.

3.1. Pengujian Distorsi Aspek Flatness

Pengujian kerataan permukaan dilakukan menggunakan alat ukur *Outside Dial Indicator* merek Mitutoyo dan *Surface Table*, bertempat di unit *Measuring Tool*, dengan parameter pengukuran dari titik A menuju titik B secara melingkar mengikuti bentuk spesimen, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2. Setelah pengujian dengan *Outside Dial Indicator* dilakukan, diperoleh data sebagai berikut :

Tabel 3. Hasil Penyimpangan *Flatness* Material 4140

4140							
No	Tebal	Media <i>Quenching</i>	<i>Flatness</i> awal	<i>Flatness</i> akhir	Selisih	Y ²	SNR
1	5	<i>Oil</i>	0	0.04	0.04	0.0016	27.9588002
2	5	<i>Water</i>	-0.01	0.09	0.1	0.01	20
3	5	<i>Oil + water</i>	0.04	0.04	0	0	0
4	10	<i>Oil</i>	-0.01	0.04	0.05	0.0025	26.0205999
5	10	<i>Water</i>	0.02	0.07	0.05	0.0025	26.0205999
6	10	<i>Oil + water</i>	-0.03	0.06	0.09	0.0081	20.9151498
7	15	<i>Oil</i>	-0.01	0.03	0.04	0.0016	27.9588002
8	15	<i>Water</i>	-0.03	0.02	0.05	0.0025	26.0205999
9	15	<i>Oil + water</i>	-0.04	0.03	0.07	0.0049	23.0980392

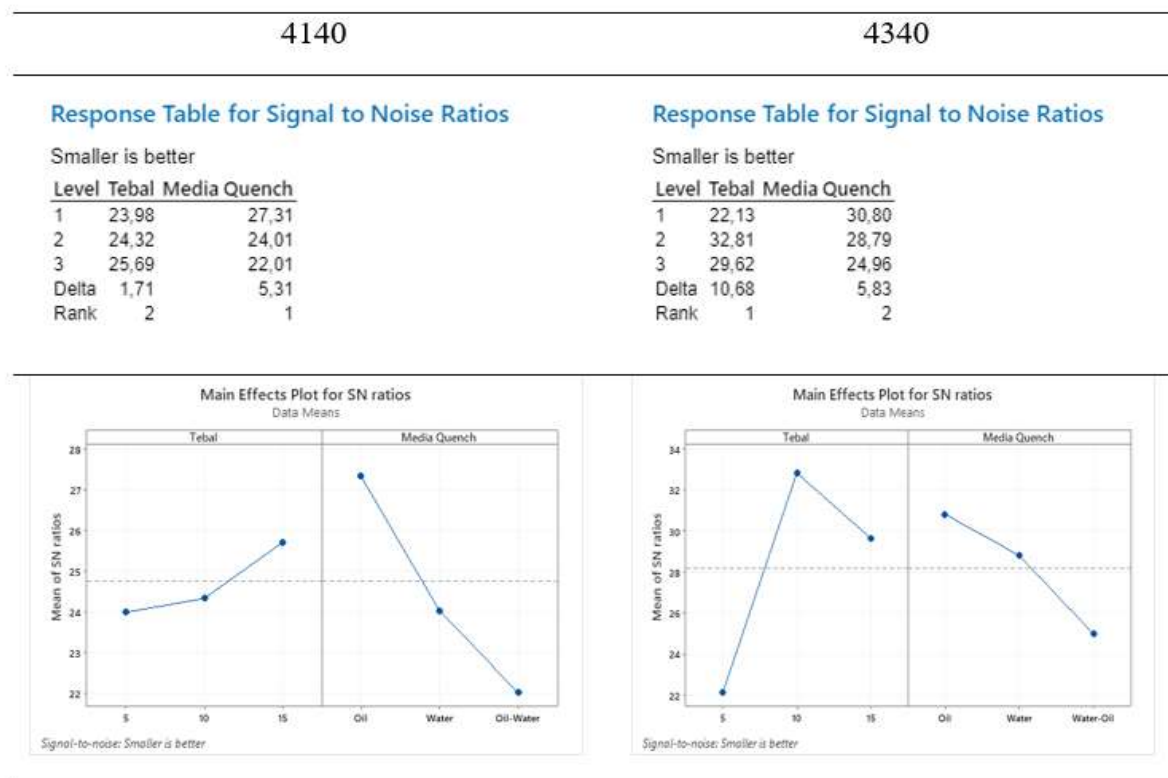
Tabel 4. Hasil Penyimpangan *Flatness* Material 4340

4340							
No	Tebal	Media <i>Quenching</i>	<i>Flatness</i> awal	<i>Flatness</i> akhir	Selisih	Y ²	SNR
1	5	<i>Oil</i>	-0.02	0.02	0.04	0.0016	27.9588002
2	5	<i>Water</i>	-0.01	0.05	0.06	0.0036	24.436975
3	5	<i>Oil + water</i>	-0.06	0.14	0.2	0.04	13.9794001
4	10	<i>Oil</i>	0.02	0.04	0.02	0.0004	33.9794001
5	10	<i>Water</i>	0.04	0.06	0.02	0.0004	33.9794001
6	10	<i>Oil + water</i>	0.02	0.05	0.03	0.0009	30.4575749
7	15	<i>Oil</i>	0	0.03	0.03	0.0009	30.4575749
8	15	<i>Water</i>	0.02	0.06	0.04	0.0016	27.9588002
9	15	<i>Oil + water</i>	0.08	0.05	-0.03	0.0009	30.4575749

Setelah hasil pengujian diperoleh, maka S/N Ratio untuk *flatness* dapat dicari dengan persamaan $S/NR = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$

Dari persamaan tersebut, diperoleh data sebagai berikut :

Tabel 5. Komparasi Analisis *Taguchi* dan *ANOVA* material 4140 dan 4340 untuk *Flatness*



Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Tebal	2	4.410	11.34	5.668	0.96	0.476
Media Quench	2	43.308	43.31	21.654	3.67	0.156
Residual Error	3	17.716	17.72	5.905		
Total	7	65.434				

Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Tebal	2	180.43	180.43	90.22	5.51	0.071
Media Quench	2	52.71	52.71	26.35	1.61	0.307
Residual Error	4	65.46	65.46	16.36		
Total	8	298.59				

Analisis varians (*Analysis of Variance/ANOVA*) terhadap nilai *Signal-to-Noise (S/N) ratio* dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh faktor ketebalan material dan *media quenching* terhadap distorsi pada aspek *flatness* material AISI 4140 dan AISI 4340.

Pada material AISI 4140, kedua faktor tersebut tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan (*P-value* tebal = 0,476; *media quenching* = 0,156). Namun demikian, berdasarkan persentase kontribusi, *media quenching* memiliki pengaruh dominan sebesar 66,18%, dibandingkan dengan ketebalan material sebesar 6,74%, dengan kontribusi *error* sebesar 27,08%.

Sementara itu, pada material AISI 4340, faktor tebal material menunjukkan kecenderungan pengaruh dengan nilai *P-value* sebesar 0,071, meskipun belum signifikan pada tingkat kepercayaan 95%. Faktor ini juga memiliki kontribusi terbesar, yaitu 60,43%, dibandingkan dengan *media quenching* sebesar 17,65%, dengan *error* sebesar 21,92%.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa faktor dominan yang memengaruhi distorsi berbeda pada masing-masing material, dimana *media quenching* lebih dominan pada AISI 4140, sedangkan tebal material lebih dominan pada AISI 4340. Namun, secara statistik, pengaruh kedua faktor tersebut belum signifikan, sehingga hasil ini lebih mencerminkan kecenderungan (tren) dan memerlukan validasi lebih lanjut dengan jumlah data yang lebih besar.

3.2. Hasil Pengujian Distorsi Aspek *Gap Width*

Pengukuran *Gap Width* dilakukan menggunakan alat ukur *Profile Projector* merek Mitutoyo, dengan parameter pengukuran sejauh jarak yang diukur, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2. Setelah pengujian dengan *Profile Projector* dilakukan, diperoleh data sebagai berikut :

Tabel 6. Hasil Penyimpangan *Gap* Material 4140

4140							
No	Tebal	Media <i>Quenching</i>	<i>Gap</i> Awal	<i>Gap</i> Akhir	Selisih	Y ²	SNR
1	5	<i>Oil</i>	6.397	6.693	0.296	0.087616	10.57417
2	5	<i>Water</i>	6.371	6.712	0.341	0.116281	9.344912
3	5	<i>Oil + water</i>	6.281	6.612	0.331	0.109561	9.60344
4	10	<i>Oil</i>	6.349	6.48	0.131	0.017161	17.65457
5	10	<i>Water</i>	6.25	6.574	0.324	0.104976	9.7891
6	10	<i>Oil + water</i>	6.438	6.67	0.232	0.053824	12.69024
7	15	<i>Oil</i>	6.294	6.63	0.336	0.112896	9.473214
8	15	<i>Water</i>	6.295	6.602	0.307	0.094249	10.25723
9	15	<i>Oil + water</i>	6.331	6.621	0.29	0.0841	10.75204

Tabel 7. Hasil Penyimpangan *Gap* Material 4340

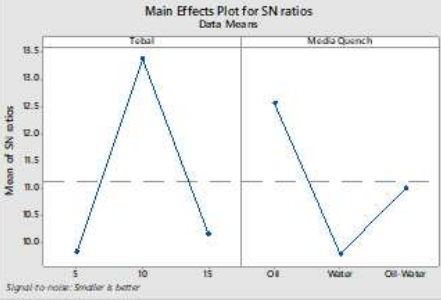
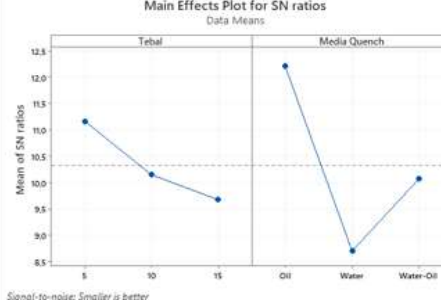
4340							
No	Tebal	Media <i>Quenching</i>	<i>Gap</i> Awal	<i>Gap</i> Akhir	Selisih	Y ²	SNR
1	5	<i>Oil</i>	6.27	6.458	0.188	0.035344	14.51684
2	5	<i>Water</i>	6.301	6.669	0.368	0.135424	8.683044
3	5	<i>Oil + water</i>	6.367	6.673	0.306	0.093636	10.28557
4	10	<i>Oil</i>	6.29	6.497	0.207	0.042849	13.68059
5	10	<i>Water</i>	6.29	6.646	0.356	0.126736	8.971
6	10	<i>Oil + water</i>	6.365	6.773	0.408	0.166464	7.786797
7	15	<i>Oil</i>	6.244	6.623	0.379	0.143641	8.427216
8	15	<i>Water</i>	6.236	6.614	0.378	0.142884	8.450164
9	15	<i>Oil + water</i>	6.243	6.49	0.247	0.061009	12.14606

Setelah hasil pengujian diperoleh, maka S/N Ratio untuk *Gap Width* dapat dicari dengan persamaan $S/NR = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$

Dari persamaan tersebut, diperoleh data sebagai berikut :

Tabel 8. Komparasi Analisis Taguchi material 4140 dan 4340 untuk Gap

4140				4340			
Response Table for Signal to Noise Ratios				Response Table for Signal to Noise Ratios			
Smaller is better				Smaller is better			
Level	Tebal	Media Quench		Level	Tebal	Media Quench	
1	9.841	12.567		1	11,162	12,208	
2	13.378	9.797		2	10,146	8,701	
3	10.161	11.015		3	9,674	10,073	
Delta	3.537	2.770		Delta	1,487	3,507	
Rank	1	2		Rank	2	1	

Main Effects Plot for SN ratios				Main Effects Plot for SN ratios			
Data Means				Data Means			
							

Analysis of Variance for SN ratios							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Tebal	2	22.96	22.96	11.482	2.11	0.237	
Media Quench	2	11.57	11.57	5.784	1.06	0.426	
Residual Error	4	21.75	21.75	5.437			
Total	8	56.28					

Analysis of Variance for SN ratios							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Tebal	2	3.466	3.466	1.733	0.25	0.792	
Media Quench	2	18.738	18.738	9.369	1.34	0.359	
Residual Error	4	28.033	28.033	7.008			
Total	8	50.238					

Analisis varians (*Analysis of Variance/ANOVA*) terhadap nilai *Signal-to-Noise (S/N) ratio* dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh faktor ketebalan material dan *media quenching* terhadap distorsi pada aspek *gap* material AISI 4140 dan AISI 4340.

Pada material AISI 4140, kedua faktor tersebut tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan (*P-value* tebal = 0,237; *media quenching* = 0,426). Namun demikian, berdasarkan persentase kontribusi, tebal material memiliki kontribusi lebih besar, yaitu 40,80%, dibandingkan dengan *media quenching* sebesar 20,56%, dengan kontribusi *error* sebesar 38,64%.

Sementara itu, pada material AISI 4340, kedua faktor tersebut juga tidak menunjukkan pengaruh signifikan (*P-value* tebal = 0,792; *media quenching* = 0,359). Persentase kontribusi menunjukkan bahwa *media quenching* memiliki kontribusi sebesar 37,31%, lebih besar dibandingkan dengan kontribusi tebal material sebesar 6,90%, dengan kontribusi *error* yang cukup besar, yaitu 55,79%.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa tidak terdapat pengaruh signifikan dari faktor yang diteliti terhadap distorsi pada aspek *gap*. Namun, terdapat perbedaan kecenderungan faktor dominan: ketebalan material lebih dominan pada AISI 4140, sedangkan *media quenching* lebih dominan pada AISI 4340, meskipun sebagian besar variasi masih dipengaruhi oleh *error* atau faktor lain di luar parameter penelitian.

3.3. Hasil Pengujian Distorsi Aspek *Outer Diameter*

Pengukuran *outer diameter* dilakukan menggunakan alat ukur Dial Caliper merek Mitutoyo, bertempat di unit *Measuring Tool*, dengan parameter pengukuran sesuai ketentuan yang berlaku. Bisa dilihat pada gambar 2. Setelah pengujian dengan Dial Caliper dilakukan, diperoleh data sebagai berikut :

Tabel 9. Hasil Penyimpangan *Outer Diameter* Material 4140

4140							
No	Tebal	Media <i>Quenching</i>	OD (0)	OD (1)	Selisih	Y ²	SNR
1	5	<i>Oil</i>	49.5	49.6	0.1	0.01	20
2	5	<i>Water</i>	49.5	49.6	0.06	0.0036	24.43697
3	5	<i>Oil + Water</i>	49.3	49.4	0.08	0.0064	21.9382
4	10	<i>Oil</i>	49.5	49.5	0.02	0.0004	33.9794
5	10	<i>Water</i>	49.6	49.6	0.06	0.0036	24.43697
6	10	<i>Oil + Water</i>	49.5	49.5	0.02	0.0004	33.9794
7	15	<i>Oil</i>	49.5	49.6	0.08	0.0064	21.9382
8	15	<i>Water</i>	49.4	49.4	0.04	0.0016	27.9588
9	15	<i>Oil + Water</i>	49.4	49.4	0.04	0.0016	27.9588

Tabel 10. Hasil Penyimpangan *Outer Diameter* Material 4340

4340							
No	Tebal	Media <i>Quenching</i>	OD (0)	OD (1)	Selisih	Y ²	SNR
1	5	<i>Oil</i>	49.6	49.5	0.02	0.0004	33.9794
2	5	<i>Water</i>	49.6	49.8	0.2	0.04	13.9794
3	5	<i>Oil + Water</i>	49.6	49.5	0.06	0.0036	24.43697
4	10	<i>Oil</i>	49.6	49.5	0.06	0.0036	24.43697
5	10	<i>Water</i>	49.4	49.5	0.12	0.0144	18.41638
6	10	<i>Oil + Water</i>	49.6	49.6	0.02	0.0004	33.9794
7	15	<i>Oil</i>	49.6	49.6	0.06	0.0036	24.43697
8	15	<i>Water</i>	49.5	49.6	0.12	0.0144	18.41638
9	15	<i>Oil + Water</i>	49.4	49.5	0.08	0.0064	21.9382

Setelah hasil pengujian diperoleh, maka S/N Ratio untuk *Outer Diameter* dapat dicari dengan persamaan $S/NR = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$

Dari persamaan tersebut, diperoleh data sebagai berikut :

Tabel 11. Komparasi Analisis Taguchi material 4140 dan 4340 untuk *Outer Diameter*

4140

4340

Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

Level Tebal Media Quench

1	22,13	25,31
2	30,80	25,61
3	25,95	27,96
Delta	8,67	2,65
Rank	1	2

Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

Level Tebal Media Quench

1	24,48	29,64
2	30,01	22,74
3	18,45	21,35
Delta	11,56	8,29
Rank	1	2

Main Effects Plot for SN ratios
Data Means

Signal-to-noise: Smaller is better

Main Effects Plot for SN ratios
Data Means

Signal-to-noise: Smaller is better

Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Tebal	2	113.37	113.37	56.683	2.76	0.176
Media Quench	2	12.64	12.64	6.322	0.31	0.751
Residual Error	4	82.12	82.12	20.531		
Total	8	208.13				

Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Tebal	2	229.0	229.0	114.51	2.03	0.246
Media Quench	2	118.2	118.2	59.11	1.05	0.430
Residual Error	4	225.5	225.5	56.38		
Total	8	572.8				

Analisis varians (*Analysis of Variance/ANOVA*) terhadap nilai *Signal-to-Noise (S/N) ratio* dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh faktor tebal material dan *media quenching* terhadap distorsi pada aspek diameter luar material AISI 4140 dan AISI 4340.

Pada material AISI 4140, kedua faktor tersebut tidak menunjukkan pengaruh signifikan (*P-value* tebal = 0,176; *media quenching* = 0,751). Namun demikian, berdasarkan persentase kontribusi, tebal material memiliki kontribusi dominan sebesar 54,47%, dibandingkan dengan *media quenching* sebesar 6,07%, dengan kontribusi *error* sebesar 39,46%.

Sementara itu, pada material AISI 4340, kedua faktor juga tidak menunjukkan pengaruh signifikan (*P-value* tebal = 0,246; *media quenching* = 0,430). Persentase kontribusi menunjukkan bahwa ketebalan material memiliki kontribusi sebesar 39,98%, diikuti oleh *media quenching* sebesar 20,63%, dengan kontribusi *error* yang relatif besar, yaitu 39,39%.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa tidak terdapat pengaruh signifikan dari faktor yang diteliti terhadap distorsi pada aspek *outer diameter*. Namun, ketebalan material cenderung menjadi faktor dominan pada kedua material, meskipun variasi respons masih cukup besar dan dipengaruhi oleh *error* atau faktor lain di luar parameter penelitian.

3.4. Hasil Pengujian Distorsi Aspek *Inner Diameter*

Pengukuran *inner diameter* dilakukan menggunakan alat ukur *Profile Projector* merek Mitutoyo, dengan parameter pengukuran sesuai ketentuan, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2. Setelah pengujian dengan *Projector* dilakukan, diperoleh data sebagai berikut :

Tabel 12. Hasil Penyimpangan *Inner Diameter* Material 4140

4140							
No	Tebal	Media <i>Quenching</i>	ID (0)	ID (1)	Selisih	Y ²	SNR
1	5	<i>Oil</i>	31.621	31.796	0.175	0.030625	15.13924
2	5	<i>Water</i>	31.638	31.724	0.086	0.007396	21.31003
3	5	<i>Oil + water</i>	31.724	31.884	0.16	0.0256	15.9176
4	10	<i>Oil</i>	31.601	31.818	0.217	0.047089	13.27081
5	10	<i>Water</i>	31.702	31.809	0.107	0.011449	19.41232
6	10	<i>Oil + water</i>	31.677	31.708	0.031	0.000961	30.17277
7	15	<i>Oil</i>	31.757	31.964	0.207	0.042849	13.68059
8	15	<i>Water</i>	31.803	31.887	0.084	0.007056	21.51441
9	15	<i>Oil + water</i>	31.814	31.975	0.161	0.025921	15.86348

Tabel 13. Hasil Penyimpangan *Inner Diameter* Material 4340

4340							
No	Tebal	Media <i>Quenching</i>	ID (0)	ID (1)	Selisih	Y ²	SNR
1	5	<i>Oil</i>	31.773	31.804	0.031	0.000961	30.17277
2	5	<i>Water</i>	31.785	31.853	0.068	0.004624	23.34982
3	5	<i>Oil + water</i>	31.637	31.738	0.101	0.010201	19.91357
4	10	<i>Oil</i>	31.78	31.787	0.007	4.9E-05	43.09804
5	10	<i>Water</i>	31.792	31.754	-0.038	0.001444	28.40433
6	10	<i>Oil + water</i>	31.627	31.717	0.09	0.0081	20.91515
7	15	<i>Oil</i>	31.766	31.931	0.165	0.027225	15.65032
8	15	<i>Water</i>	31.807	31.957	0.15	0.0225	16.47817
9	15	<i>Oil + water</i>	31.738	31.807	0.069	0.004761	23.22302

Setelah hasil pengujian diperoleh, maka S/N Ratio untuk *Inner Diameter* dapat dicari dengan persamaan $S/NR = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$

Dari persamaan tersebut, diperoleh data sebagai berikut :

Tabel 13. Komparasi Analisis Taguchi material 4140 dan 4340 untuk *Inner Diameter*

4140

4340

Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

Level	Tebal	Media Quench
1	17.46	14.03
2	20.95	20.75
3	17.02	20.65
Delta	3.93	6.72
Rank	2	1

Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

Level	Tebal	Media Quench
1	24.13	27.62
2	25.61	16.94
3	21.60	26.78
Delta	4.01	10.68
Rank	2	1

Main Effects Plot for SN ratios
Data Means

Factor	Level	Mean of SN ratios
Tebal	5	17.46
	10	20.95
	15	17.02
Media Quench	Oil	14.03
	Water	20.75
	Oil-Water	20.65

Signal-to-noise: Smaller is better

Main Effects Plot for SN ratios
Data Means

Factor	Level	Mean of SN ratios
Tebal	5	24.13
	10	25.61
	15	21.60
Media Quench	Oil	27.62
	Water	16.94
	Oil-Water	26.78

Signal-to-noise: Smaller is better

Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Tebal	2	27.88	27.88	13.94	0.49	0.643
Media Quench	2	88.94	88.94	44.47	1.58	0.312
Residual Error	4	112.73	112.73	28.18		
Total	8	229.55				

Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Tebal	2	24.72	24.72	12.36	0.38	0.706
Media Quench	2	211.74	211.74	105.87	3.26	0.145
Residual Error	4	129.87	129.87	32.47		
Total	8	366.33				

Analisis varians (*Analysis of Variance/ANOVA*) terhadap nilai *Signal-to-Noise (S/N) ratio* dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh faktor ketebalan material dan *media quenching* terhadap distorsi pada aspek *diameter* material AISI 4140 dan AISI 4340.

Pada material AISI 4140, kedua faktor tersebut tidak menunjukkan pengaruh signifikan (*P-value* tebal = 0,643; *media quenching* = 0,312). Namun demikian, berdasarkan persentase kontribusi, *media quenching* memiliki kontribusi lebih besar, yaitu 38,75%, dibandingkan dengan kontribusi ketebalan material sebesar 12,15% dan kontribusi *error* sebesar 49,10%.

Sementara itu, pada material AISI 4340, kedua faktor tersebut juga tidak menunjukkan pengaruh signifikan (*P-value* tebal = 0,706; *media quenching* = 0,145). Persentase kontribusi menunjukkan bahwa *media quenching* memiliki kontribusi dominan sebesar 57,81%, dibandingkan dengan kontribusi ketebalan material sebesar 6,75%, serta kontribusi *error* sebesar 35,44%.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa tidak terdapat pengaruh signifikan dari faktor yang diteliti terhadap distorsi pada aspek *diameter* dalam. Namun, *media quenching* cenderung menjadi faktor dominan pada kedua material, meskipun variasi respons masih cukup besar dan dipengaruhi oleh *error* atau faktor lain di luar parameter penelitian.

4. Kesimpulan

Setelah dilakukan penelitian dan pengujian-pengujian yang berfungsi mencari parameter yang tepat dan efisien yang bertujuan untuk menemukan nilai distorsi minimal, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan analisis *Taguchi* dan *Analysis of Variance (ANOVA)*, faktor tebal material dan *media quenching* menunjukkan kecenderungan mempengaruhi distorsi pada beberapa aspek, namun secara statistik tidak berpengaruh signifikan pada tingkat kepercayaan 95%.
2. Secara kontribusi, tebal material cenderung dominan pada aspek *flatness* (AISI 4340) dan *outer diameter*, sedangkan *media quenching* cenderung dominan pada aspek *inner diameter* dan *gap* (AISI 4340), meskipun pengaruh tersebut belum signifikan.
3. Variasi distorsi masih banyak dipengaruhi oleh *error* atau faktor lain di luar parameter penelitian, sehingga diperlukan penguatan jumlah data dan pengembangan variabel proses untuk memperoleh hasil yang lebih representatif. Kedua material (AISI 4140 dan AISI 4340) menunjukkan kecenderungan nilai distorsi yang relatif serupa.

Daftar Pustaka

- [1] T. V. Rajan, C. P. Sharma, and A. Sharma, *Heat Treatment: Principles and Techniques*, Second edi. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2011.
- [2] P. Trihutomo, "Analisa Kekerasan Pada Pisau Berbahan Baja Karbon Menengah Hasil Proses Hardening Dengan Media Pendingin Yang Berbeda," *J. Tek. MESIN*, vol. 1, no. April 2015, pp. 28–34, 2015.
- [3] M. Indaryanto, "ANALISIS DISTORSI DAN TEGANGAN SISA PADA POROS KAPAL TERHADAP PERLAKUAN PANAS (QUENCHING) MENGGUNAKAN FEM Distorsion and Residual Stress Analysis on Solid Silender of Quenching Treatment with FEM," *J. Wave*, vol. 7, no. 1, pp. 31–36, 2013.
- [4] T. Sonar, S. Lomte, C. Gogte, and Balasubramanian, "Minimization of Distortion in Heat Treated AISI D2 Tool Steel: Mechanism and Distortion Analysis," *Procedia Manuf.*, vol. 20, pp. 113–118, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.016.
- [5] R. Handika, R. Romdloni, H. Treatment, M. Pendingin, and T. Strength, "Pengaruh Variasi Temperatur Heat Treatment Tempering dan Media Pendingin Terhadap Kekuatan Tarik Pada Baja AISI 4140," *ARMATUR Artik. Tek. Mesin Manufaktur J.*, vol. 5, no. September, pp. 134–139, 2024.
- [6] M. M. Nunes, E. M. da Silva, R. A. Renzetti, and T. G. Brito, "Analysis of Quenching Parameters in AISI 4340 Steel by Using Design of Experiments," vol. 22, no. 1, pp. 1–7, 2019.
- [7] T. P. Kasih and N. T. Atmoko, "PENGARUH KONDUKTIVITAS PANAS DAN MEDIA PENDINGINAN PADA PROSES INDUCTION HEATING BAJA," vol. 10, no. April, pp. 1–8, 2025.
- [8] B. Bandanadjaja and D. Idamayanti, "Pengaruh Proses Normalising dan Tempering Ganda Terhadap Peningkatan Nilai Modulus of Toughness Baja AISI 4340," vol. 41, no. 2, pp. 134–141, 2020, doi: 10.14710/teknik.v41n2.25959.
- [9] K. Priyanto, M. H. Palmiyanto, and B. H. Priyambodo, "STUDI VARIASI TEMPERATUR HARDENING TERHADAP KEKERASAN BAJA AISI 4340 MELALUI JOMINY TEST," vol. 8, no. April, 2023.
- [10] K. Ismartaya, G. B. Karyadi, B. Bawono, and P. W. Anggoro, "Optimalisasi Ketangguhan dan Kekerasan Baja AISI 4340 pada Shank Holder Dovetail Cutter paska Proses Hardening dengan Minimasi Biaya Proses," vol. 17, no. 3, pp. 473–484, 2022.
- [11] A. D. Silva, T. A. Pedrosa, J. L. Gonzalez-mendez, X. Jiang, P. R. Cetlin, and T. Altan,

- “Distortion in quenching an AISI 4140 C-ring – Predictions and experiments,” *Mater. Des.*, vol. 42, pp. 55–61, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.05.031.
- [12] C. Sutowo and B. A. Susilo, “PENGARUH PROSES HARDENING PADA BAJA HQ 7 AISI 4140 DENGAN MEDIA OLI DAN AIR TERHADAP SIFAT MEKANIS DAN STRUKTUR MIKRO,” 2013. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:194483231>
- [13] R. L. Sianturi and R. Sianturi, “Sains dan Ilmu Terapan Optimasi Parameter Material untuk Simulasi Pemotongan Ortogonal AISI4140 pada Berbagai Kondisi Tempering,” vol. 1, pp. 43–48, 2023.
- [14] S. Mahardika, P. T. Mesin, F. Teknik, U. Qomaruddin, and R. S. Mekanik, “ANALISA REKAYASA SIFAT MEKANIK BAJA AISI 4140 DENGAN VARIASI SUHU TEMPERING UNTUK MENINGKATKAN KEULETAN DAN KEKERASAN,” vol. 6, no. 1, pp. 1–6, 2020.
- [15] M. Manivannan, D. Northwood, and V. Stoilov, “Use of Navy C-rings to study and predict distortion in heat treated components: Experimental measurements and computer modelling,” no. November 2016, 2014, doi: 10.1179/1749514814Z.000000000119.
- [16] H. Moralez, O. B. Méndez, I. Cruz, and J. A. B. Godínez, “Mathematical modelling of temperature and stress evolution during cooling of a stainless steel Navy C -ring probe,” *Mater. Prod. Technol.*, vol. 24, pp. 306–318, 2005.
- [17] F. E. Janitra *et al.*, “METODE PENELITIAN EKSPERIMENTAL,” *J. Kesehat.*, vol. 11, no. 2, pp. 67–79, 2024.
- [18] Amruddin *et al.*, *Metodologi Penelitian Kuantitatif*. Sukoharjo: Pradina Pustaka, 2021.
- [19] T. Mori and S.-C. Tsai, *Taguchi Methods: Benefits, Impacts, Mathematics, Statistics, and Applications by*. New York: ASME Press, 2011.