

Optimalisasi Ketangguhan dan Kekerasan Baja AISI 4340 pada *Shank Holder Dovetail Cutter* paska Proses *Hardening* dengan Minimasi Biaya Proses

Kristian Ismartaya^{1,2}, Gabriel Bagus Karyadi², Baju Bawono¹, Paulus Wisnu Anggoro^{1*}

¹Departemen Teknik Industri, Universitas Atma Jaya Yogyakarta,
Jalan Babarsari No.44, Yogyakarta 55281, Indonesia

²Jurusan Rekayasa Teknologi Manufaktur, Politeknik ATMI Surakarta,
Jalan Mojo No.1, Surakarta 57174, Indonesia

*E-mail : pauluswisnuanggoro@gmail.com

Diterima: 30-10-2022; Direvisi: 05-12-2022; Dipublikasi: 24-12-2022

Abstrak

UMKM bengkel manufaktur membuat *Shank Holder Dovetail Cutter* berbahan AISI 4340 secara mandiri. Nilai kekerasan pada *Shank Holder Dovetail Cutter* wajib dimiliki agar alat memiliki umur pakai panjang. Proses *hardening* menimbulkan dilema berupa resiko kerusakan pada area kritis *shank holder*, yaitu material pecah bila kekerasan terlalu tinggi namun ketangguhan rendah, atau material mengalami deformasi bila kekerasan rendah. Diperlukan analisis parameter proses *hardening* agar nilai kekerasan dan ketangguhan bahan maksimal, namun meminimalkan biaya proses *hardening* guna mendukung UMKM bengkel manufaktur. Penelitian bertujuan untuk 1) mengetahui parameter proses *hardening* yang berkontribusi terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan, serta 2) menemukan kombinasi parameter proses *hardening* terbaik yang menghasilkan nilai kekerasan, ketangguhan, dan biaya proses yang optimal. Desain eksperimen menggunakan metode *Response Surface Method* untuk optimalisasi respon dan analisis statistik ANOVA untuk mengidentifikasi kontribusi setiap parameter bagi variabel respon. Parameter suhu austenite, media *quench*, dan suhu temper menjadi variabel prediktor. Hasil pengujian kekerasan Rockwell-C ASTM E18 dan uji ketangguhan *Impact Charpy V-notch* E23 diterapkan sebagai variabel respon. Suhu temper merupakan parameter proses *hardening* yang secara signifikan mempengaruhi nilai kekerasan dan ketangguhan. Suhu temper memberikan kontribusi sebesar 87,44% terhadap respon nilai kekerasan, serta kontribusi 24,77% dan 43,44% terhadap respon nilai ketangguhan. Kombinasi parameter suhu austenite 871,76°C, media *quench* air, suhu temper 200°C memberikan respon optimal terbaik dengan nilai *desirability* 0,790; biaya proses Rp.42.586,58; nilai kekerasan 51,211 HRC; dan nilai ketangguhan 1,131 J/mm².

Kata kunci: AISI 4340; ANOVA; Optimasi; *Response Surface Method*; *Shank Holder*

Abstract

UMKM industrial manufacture independently makes *Shank Holder Dovetail Cutter* made of AISI 4340. Hardness value on *Shank Holder Dovetail Cutter* is mandatory, so that has a long service life. The *hardening* process poses a dilemma in the form of risk damage to the critical area of the *shank holder*. Tools will break because of high hardness, but low of toughness, or the material undergoes bad deformation if the hardness is low. It is necessary to analyze the *hardening* parameters to maximize material hardness and toughness and minimizing cost of *hardening* process to support manufacturing workshops. Research objectives are 1) to determine *hardening* parameters that contributed to hardness and toughness values and 2) to find the best combination parameters that produced optimal hardness, toughness, and process cost values. The experimental design uses the *Response Surface Method* for optimization and statistical analysis of ANOVA to identify the contribution of each parameter to every response variable. Parameters of austenite temperature, *quench* media, and tempering temperature became predictor variables. The results of the Rockwell-C ASTM E18 hardness test and *Impact Charpy V-notch* E23 toughness test was applied as response variables. Tempering temperature is a *hardening* parameter that significantly affects hardness and toughness values. Tempering temperature contributed 87.44% to response value, and contribution of 24.77% and 43.44% to toughness value. The combination of austenite temperature 871.76°C, water *quench*, and tempering temperature 200°C gave the best optimal response with 0.790 of *desirability* value; process cost Rp.42,586.58; hardness value 51,211 HRC; and 1.131 J/mm² of toughness value.

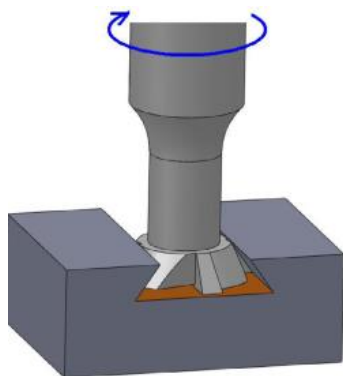
Keywords: AISI 4340; ANOVA; Optimization; *Response Surface Method*; *Shank Holder*

1. Pendahuluan

Frais merupakan pemesinan manufaktur untuk membentuk berbagai macam permukaan pada benda [1]. Proses frais berupa proses pemesinan dimana mata potong yang berputar melawan benda kerja [2]. Variasi proses pemesinan frais

didukung dengan adanya variasi mesin dan alat potong frais, salah satunya *cutter mill dovetail*. *Cutter mill dovetail* digunakan untuk membentuk alur *slot* dengan kemiringan dinding tertentu, seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**. Sudut mata potong pada *cutter mill dovetail* pada umumnya 45°, 50°, 55°, 60°, dan sudut lain tergantung pada desain peruntukannya [2]. Desain dengan sudut kemiringan mata potong tertentu menuntut diperlukannya *shank holder* khusus yang sesuai. Sudut kemiringan *shank holder* yang bervariasi menuntut UMKM bengkel manufaktur kerap membuat *shank holder* secara mandiri untuk menekan biaya proses produksi. Contoh *shank holder* khusus buatan UMKM bengkel manufaktur ditampilkan pada **Gambar 2**. *Shank holder* harus mampu menahan beban mekanik yang berasal dari gaya potong pada setiap mata potong saat proses pemesinan berlangsung [1]. Beban mekanik dari gaya potong berupa beban kejut impak yang berkorelasi dengan nilai ketangguhan material. *Shank holder* dituntut memiliki nilai kekerasan tinggi untuk meminimalkan keausan atau resiko deformasi dalam masa pemakaian. Area bertanda merah pada **Gambar 2** menunjukkan area kritis berupa alur *slot* dimana beban mekanik yang besar dapat menyebabkan kerusakan pada area tersebut. Bila *shank holder* terlalu keras maka area tersebut berpotensi pecah, namun bila terlalu lunak maka area tersebut berpotensi mengalami deformasi. Dengan demikian, perancang perlu mendesain *shank holder* dengan peningkatan sifat mekanik berupa ketangguhan terhadap beban kejut impak serta sifat keras untuk meminimalkan deformasi dan keausan.

Sifat mekanik baja seperti keuletan, ketangguhan, kekuatan, kekerasan, dan kekuatan tarik dapat dimodifikasi dengan memberi proses *heat treatment* pada *medium carbon steel* sesuai dengan kebutuhan desain [3, 4, 5]. *Hardening* adalah metode pemanasan dan pendinginan dengan interval waktu yang berbeda untuk meningkatkan kekuatan mekanik baja [6, 7]. Baja AISI 4340 merupakan baja *medium carbon steel* yang digunakan sebagai bahan pembuat *shank holder*. Baja AISI 4340 digunakan di beberapa industri karena karakteristik ketangguhan dan ketahanan lelahnya [8]. Permasalahan yang terjadi ialah sifat ketangguhan bertolakbelakang dengan sifat keras pada baja. Peningkatan nilai kekerasan dan kekuatan tarik akan mengorbankan nilai ketangguhan dan keuletan material [3, 9], dan sebaliknya. Dengan demikian diperlukan desain parameter proses *hardening* yang mengoptimalkan nilai ketangguhan dan nilai kekerasan secara bersamaan. Parameter proses *hardening* yang tepat memberikan kombinasi kekuatan mekanik yang lebih baik dalam aplikasi penggunaannya [9]. Kombinasi kekuatan, kekerasan, dan ketangguhan baja memenuhi standar kekuatan mekanik yang diperlukan *engineer* di industri [5, 10].



Gambar 1. Proses kerja *cutter mill dovetail* [2]



Gambar 2. *Shank holder* khusus buatan UMKM bengkel manufaktur

Penting untuk mengevaluasi semua parameter *hardening* seperti: *austenite*, *quench*, *temper*, dll, untuk mencapai keseimbangan antara kekerasan dan sifat mekanik lain [11]. Beberapa penelitian melibatkan parameter suhu austenite sebagai variabel prediktor. Kumar et al., 2019 [10] yang membandingkan metode *high temperature thermomechanical treatment* (HTMT), *bake hardening* (BH), dan *conventionally hardened and tempered* (CHT) dengan menggunakan variasi suhu austenite serta uji kekerasan dan kekuatan tarik material sebagai variabel respon. Hasilnya metode HTMT

menghasilkan nilai kekerasan tertinggi dan metode CHT menghasilkan nilai ketangguhan tertinggi. Gurumurthy et al., 2018 [6] menerapkan 3 variasi suhu austenite (750°C, 770°C, dan 790°C), dilanjutkan dengan pengujian nilai kekerasan dan kekuatan tarik terbaik. Hasil penelitian menunjukkan suhu *austenite* tinggi menghasilkan nilai kekerasan dan kekuatan yang tinggi. Sedangkan penelitian Gurumurthy et al., 2021 [4] menggunakan variasi temperatur yang sama, pengujian kekerasan dan tarik, namun diterapkan pada baja AISI 4340, AISI 4140, dan AISI 1040. Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu austenite yang tinggi menghasilkan nilai kekerasan dan kekuatan tarik lebih tinggi. Baja AISI 4340 menunjukkan hasil pengerasan yang paling baik, diikuti dengan AISI 4140 dan kemudian AISI 1040.

Penelitian melibatkan suhu *austenite* dan media *quench* dilakukan oleh Gurumurthy et al., 2018 [12] menggunakan variasi temperatur 780°C dan 900°C, dengan variasi metode pendinginan austempering dan air. Pengujian kekerasan, ketangguhan, kekuatan tarik, dan mikro struktur dilakukan untuk mengevaluasi hasil. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa temperatur 780°C dan 900°C dengan pendinginan austempering memberikan ketangguhan dan kekerasan yang sama. Pendinginan air memberikan nilai kekerasan sangat tinggi, namun nilai ketangguhan yang lebih rendah. Srivastava et al., 2021 [11] meneliti pengaruh variasi suhu austenite 850°C, 900°C, dan 950°C serta media *quench* air, oli (tertutup), oli (terbuka), dan udara, terhadap nilai kekerasan yang dapat dicapai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu austenite 900°C serta media *quench* air menghasilkan nilai kekerasan tertinggi.

Penelitian dengan media *quench* sebagai variabel prediktor dilakukan oleh Bilal et al., 2019 [9] menggunakan variasi temperatur *austempering* untuk meneliti pengaruhnya terhadap nilai kekerasan, nilai ketangguhan, dan struktur mikro baja AISI 4340 dan AISI 4140. Variasi temperatur *austempering* yang digunakan: 380°C, 340°C, 310°C, 452°C, 412°C, dan 372°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses *austempering* meningkatkan nilai kekerasan dan ketangguhan, dan baja AISI 4340 memiliki sifat yang lebih baik dari AISI 4140. MacKenzie, 2016 [13] mengevaluasi pemilihan media *quench* pada proses *hardening*. Media *quench* yang digunakan ialah: *brine*, air, oli, dan udara, dan masing-masing diberi perlakuan khusus sirkulasi dan agitasi pada 3 level (lemah, menengah, dan kuat). Hasil pengujian menunjukkan bahwa *Brine* menghasilkan nilai kekerasan tertinggi, diikuti dengan air, oli, dan terakhir udara.

Penelitian melibatkan suhu temper sebagai variabel prediktor dilakukan oleh Jami et al., 2021 [8] dan Azizi et al., 2019 [14] yang menguji respon baja terhadap variasi temperatur temper: 300°C, 350°C, dan 400°C. Perbedaannya material yang diuji Jami et al, 2021 [8] adalah AISI 4340, dengan pengujian kekerasan dan kekuatan puntir digunakan sebagai data pembandingan sifat mekanik material. Azizi et al., 2019 [14] meneliti ASSAB 705 dan pengujian yang dilakukan ialah uji kekerasan, uji keausan, dan uji struktur mikro. Kedua penelitian ini menyimpulkan hasil yang serupa bahwa temperatur temper yang rendah memberikan nilai kekerasan dan kekuatan puntir yang tinggi, serta ketahanan aus yang baik. Dewangan et al., 2020 [5] menguji perbedaan kekuatan material dengan proses temper 750°C dan tanpa proses temper paska proses *quench*. Pengujian yang dilakukan adalah uji tarik, *shear*, kekerasan, dan dampak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanpa proses temper menghasilkan nilai kekerasan yang tinggi namun getas (*brittle*) terhadap pembebanan, sehingga nilai ketangguhan sangat rendah. Kesimpulannya adalah suhu austenite, media *quench*, dan suhu temper pada proses *hardening* berpengaruh terhadap nilai kekerasan dan nilai ketangguhan baja.

Perubahan parameter dalam proses *hardening* memiliki dampak langsung terhadap terjadinya perubahan biaya proses. Unsur biaya proses merupakan hal yang sensitif bagi UMKM bengkel manufaktur karena berpengaruh besar bagi keuntungan yang diperoleh dan kemampuan untuk memberikan harga yang kompetitif kepada konsumen. Perhitungan biaya proses menggunakan metode *Activity-Based Costing (ABC) System* yang menggunakan pendekatan kegiatan atau aktivitas manufaktur dalam menghasilkan produk. *ABC system* merupakan metode estimasi biaya tradisional dan sederhana namun mampu menghasilkan estimasi biaya yang akurat [15]. Teknik *ABC system* berbasis pada jumlah

sumber daya yang digunakan pada aktivitas pembuatan produk sehingga mampu menghasilkan perhitungan yang akurat dan konsisten [16]. Hingga saat ini belum ditemukan penelitian yang mengevaluasi parameter dalam proses *hardening* dengan mengoptimalkan biaya proses *hardening*.

Kebaruan penelitian ini ialah menerapkan 3 faktor proses *hardening* (suhu austenite, media *quench*, dan suhu temper) secara bersamaan sebagai variabel prediktor dalam eksperimen. Kebaruan lain ialah penggunaan analisis statistik untuk mengoptimalkan kombinasi nilai kekerasan dan ketangguhan secara berimbang paska proses *hardening* baja ASSAB 4340, serta meminimalkan biaya proses. Penelitian menggunakan metode *Design of Experiment*. Pengujian kualitas menggunakan uji kekerasan Rockwell-C ASTM E18 dan uji ketangguhan Charpy V-Notch ASTM E23 [17]. Hasil pengujian dianalisis secara statistika dengan menggunakan ANOVA untuk menemukan faktor yang secara signifikan mempengaruhi variabel respon [18], dan metode *Response Surface Methodology* untuk proses optimalisasi.

Penelitian memiliki tujuan untuk 1) mengetahui faktor yang mempengaruhi nilai kekerasan dan ketangguhan material, dan 2) memperoleh parameter proses *hardening* yang menghasilkan nilai kekerasan dan ketangguhan baja yang optimal dengan biaya proses *hardening* yang minimal. Diharapkan dengan parameter proses *hardening* yang tepat menghasilkan kekuatan mekanik yang seimbang dan optimal pada *shank cutter mill dovetail*.

2. Material dan metodologi

2.1. Baja AISI 4340

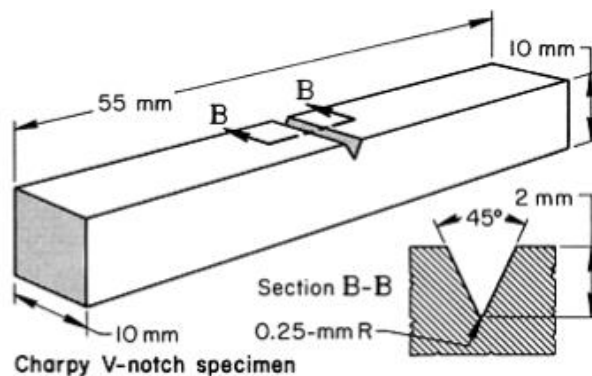
Baja AISI 4340 merupakan baja golongan *machinery steel* yang dikenal sebagai baja paduan dengan kekuatan tarik tinggi serta ketahanan terhadap aus [8, 12]. Komposisi AISI 4340 ditampilkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Komposisi baja AISI 4340

Element	Carbon	Silicon	Manganese	Nickel	Chromium	Molybdenum
Kadar (%)	0,40	0,25	0,70	1,85	0,80	0,25

Kadar *chromium* dan *molybdenum* merupakan pembentuk karbida yang meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus baja, sedangkan nikel mendukung austenite stabil yang meningkatkan kekuatan dan ketangguhan baja [6]. Material *raw* AISI 4340 yang digunakan berbentuk *cylindrical long-bar* diameter 5/8 inch. Proses manufaktur dilakukan untuk memperoleh spesimen dengan profil dan dimensi yang memenuhi standar pengujian impak Charpy V-Notch ASTM E23.

Gambar 3 menunjukkan gambar dan tuntutan spesifikasi spesimen Charpy V-Notch yang harus dipenuhi. Pengukuran dimensi spesimen dilakukan untuk memastikan profil dan dimensi telah sesuai standar yang ditetapkan, serta digunakan dalam perhitungan nilai ketangguhan paska uji impak.



Gambar 3. Dimensi standar spesimen uji impak Charpy V-notch [17]

2.2. Rancang Desain Eksperimen

Langkah awal perancangan desain eksperimen ialah dengan mengidentifikasi variabel yang digunakan dalam penelitian. Variabel respon yang digunakan ialah nilai kekerasan, nilai ketangguhan, dan biaya proses. Variabel prediktor yang digunakan dalam penelitian ialah faktor suhu austenite, faktor media *quench*, dan faktor suhu temper. Setiap faktor memiliki 3 level perlakuan, seperti ditampilkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Parameter proses *hardening*

Faktor	Unit	Level		
		1	2	3
A : Suhu Austenite	°C	830	860	900
B : Media <i>Quench</i>	-	<i>air</i>	<i>air-oli</i>	<i>oli</i>
C : Suhu Temper	°C	200	325	450

Selanjutnya, berdasarkan pada variabel prediktor yang telah ditentukan, disusun variasi proses *hardening* dengan metode desain eksperimen. Metode desain eksperimen menggunakan *Response Surface Method* dengan tipe Box-Behnken *Design* serta 3 faktor dan 15 *runs*. Pembuatan desain eksperimen menggunakan *software Design-Expert 13*. Eksperimen penelitian dilakukan dengan menerapkan seluruh kombinasi parameter proses *hardening* yang telah dirancang, seperti ditampilkan pada **Tabel 3** berikut.

Tabel 3. Desain eksperimen menurut *Response Surface Method* Box-Behnken

Faktor	Runs (coded value)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	1	3	1	3	1	3	1	3	2	2	2	2	2	2	2
B	1	1	3	3	2	2	2	2	1	3	1	3	2	2	2
C	2	2	2	2	1	1	3	3	1	1	3	3	2	2	2

2.3. Perhitungan Biaya Proses dan Pengujian Mekanik

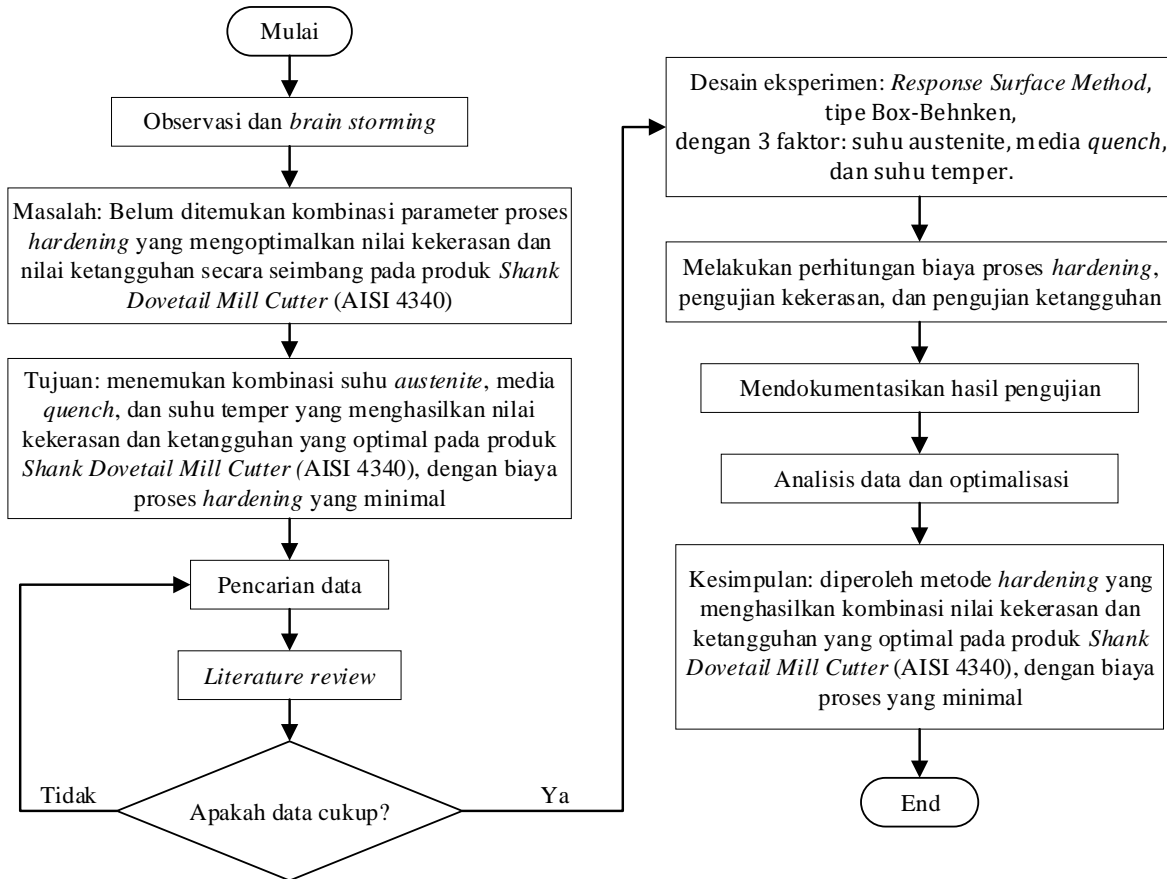
Berdasarkan pada data variasi proses *hardening*, dilakukan perhitungan biaya proses *hardening* dengan metode *Activity-Based Costing system*. Perhitungan biaya dimulai dengan mengidentifikasi dan mencatat detail proses, sumber daya, dan tahapan aktivitas yang ada. Aktivitas yang dicatat ialah aktivitas yang termasuk dalam kategori *unit-level activity*, yang memiliki keterkaitan langsung dengan proses produksi seperti: material, tenaga kerja langsung, biaya mesin, biaya energi [16]. Biaya proses *hardening* meliputi: biaya penggunaan listrik oven pemanas (perbedaan tergantung suhu penggunaan, waktu tahan proses, dan jenis oven pemanas yang digunakan), biaya penggunaan media *quench* (perbedaan tergantung pada jenis media *quench*), dan biaya operator (perbedaan tergantung pada aktivitas proses dan waktu proses). Selanjutnya, dilakukan perhitungan biaya untuk setiap aktivitas tercatat. Biaya untuk setiap variasi proses *hardening* dicatat dan didokumentasikan sebagai data biaya proses.

Paska proses *hardening*, setiap spesimen diuji nilai kekerasannya menggunakan mesin uji kekerasan merk Albert Gnehm-Horgen. Standar uji kekerasan yang digunakan ASTM E18 dengan mengukur ketahanan baja terhadap penetrasi indentor dalam satuan kekerasan Rockwell-C [8, 17]. Indentor uji berbentuk kerucut dengan sudut 120° dan berbahan intan, serta total pembebanan uji ialah 150 kgf [8]. Hasil pengujian kekerasan didokumentasikan sebagai data.

Pengukuran nilai ketangguhan menggunakan pengujian impak metode Charpy V-Notch. Mesin pengujian yang digunakan merk Gotech dengan massa pendulum 14 kg dan panjang lengan ayun pendulum 0,65 meter. Pengujian impak menggunakan standar uji ASTM E23 Charpy Impact Test [12]. Hasil pengujian impak didokumentasikan sebagai data.

2.4. Metodologi Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan ditampilkan dalam diagram alir pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Diagram alir penelitian

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Hasil Perhitungan dan Pengujian Eksperimen

Hasil uji eksperimen baja AISI 4340 paska proses *hardening* dengan desain *Response Surface Method* tipe Box-Behnken menghasilkan data nilai kekerasan dan ketangguhan, seperti ditampilkan pada **Tabel 4**. Biaya proses *hardening* berasal dari biaya operasional oven pemanas per satuan waktu, biaya media *quench* per satuan proses, serta biaya operasional operator per satuan proses.

Tabel 4. Hasil pengujian mekanik pada spesimen AISI 4340

Runs	Coded Values			Actual Un-coded Values			Perhitungan Biaya Hardening (Rupiah)	Hasil Eksperimen	
	A	B	C	Suhu Austenite	Media Quench	Suhu Temper		Nilai Kekerasan (HRC)	Nilai Ketangguhan (J/mm ²)
1	1	1	2	830	air	325	68.613,62	46,5	1,01635
2	3	1	2	900	air	325	74.297,83	46,5	0,27680
3	1	3	2	830	oli	325	68.100,20	44,5	0,88705
4	3	3	2	900	oli	325	73.784,41	48,0	0,50145
5	1	2	1	830	air-oli	200	66.907,51	49,0	0,75170
6	3	2	1	900	air-oli	200	72.591,72	52,0	1,07350
7	1	2	3	830	air-oli	450	181.048,18	43,0	1,17490
8	3	2	3	900	air-oli	450	186.732,39	41,0	1,23935

Runs	Coded Values			Actual Un-coded Values			Perhitungan Biaya Hardening (Rupiah)	Hasil Eksperimen	
	A	B	C	Suhu Austenite	Media Quench	Suhu Temper		Nilai Kekerasan (HRC)	Nilai Ketangguhan (J/mm ²)
9	2	1	1	860	air	200	65.549,34	51,5	0,97120
10	2	3	1	860	oli	200	65.035,92	51,0	0,96470
11	2	1	3	860	air	450	179.690,01	44,0	1,66130
12	2	3	3	860	oli	450	179.176,59	42,0	1,88475
13	2	2	2	860	air-oli	325	72.813,89	47,0	0,66650
14	2	2	2	860	air-oli	325	72.813,89	47,0	0,73485
15	2	2	2	860	air-oli	325	72.813,89	48,5	0,66715

3.2. Analisis Statistik dengan ANOVA

Data hasil pengujian dianalisis secara statistik menggunakan ANOVA pada aplikasi *Design-Expert 13*. Analisis statistik ANOVA dilakukan untuk mengetahui kontribusi setiap faktor terhadap variabel respon. Hasil analisis ANOVA untuk respon uji kekerasan ditampilkan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. *Analysis of Variance* untuk respon nilai kekerasan

Kode	Faktor	DF	Sum of Square	Coef. Est.	F-value	p-value	Kontribusi (%)
	Model	3	143,94	46,77	31,99	< 0,0001	
A	Austenite	1	2,53	0,5625	1,69	0,2204	1,57
B	Quench	1	1,13	-0,3750	0,7502	0,4049	0,70
C	Temper	1	140,28	-4,19	93,54	< 0,0001	87,44
	Residual	11	16,50				
	Total	14	160,43				

Data hasil analisis ANOVA pada **Tabel 5** menunjukkan bahwa suhu temper merupakan faktor yang secara signifikan memberikan pengaruh terbesar bagi respon nilai kekerasan dengan nilai kontribusi sebesar 87,44%. Selanjutnya suhu austenite memberikan kontribusi 1,57% dan media quench berkontribusi 0,70%. Model persamaan linier yang diperoleh berdasarkan analisis ANOVA memiliki nilai R^2 0,8972 dan *Adjusted R²* 0,8691. Dengan demikian model persamaan valid untuk menggambarkan prediksi pengaruh perubahan parameter proses *hardening* terhadap respon nilai kekerasan baja AISI 4340. Model persamaan untuk respon nilai kekerasan (y) ditampilkan pada persamaan [1].

$$y = 46,77 + 0,5625 \times A - 0,375 \times B - 4,19 \times C \quad (1)$$

Hasil analisis ANOVA untuk uji dampak dengan respon berupa nilai ketangguhan ditampilkan pada **Tabel 6**.

Tabel 6. *Analysis of Variance* untuk respon nilai ketangguhan

Kode	Faktor	DF	Sum of Square	Coef. Est.	F-value	p-value	Kontribusi (%)
	Model	9	2,01	0,6895	2,66	0,1469	
A	Austenite	1	0,0682	-0,0924	0,8109	0,4091	2,79
B	Quench	1	0,0122	0,0390	0,1449	0,7191	0,50
C	Temper	1	0,6046	0,2749	7,18	0,0438	24,77
AB	Aust-Que	1	0,0313	0,0885	0,3721	0,5685	1,28
AC	Aust-Temp	1	0,0166	-0,0643	0,1967	0,6759	2,45
BC	Que-Temp	1	0,0132	0,0575	0,1571	0,7082	0,54
A ²	Austenite ²	1	0,1003	-0,1649	1,19	0,3247	4,11
B ²	Quench ²	1	0,0785	0,1458	0,9322	0,3786	3,21
C ²	Temper ²	1	1,06	0,5352	12,57	0,0165	43,44
	Residual	5	0,4208				
	Total	14	2,44				

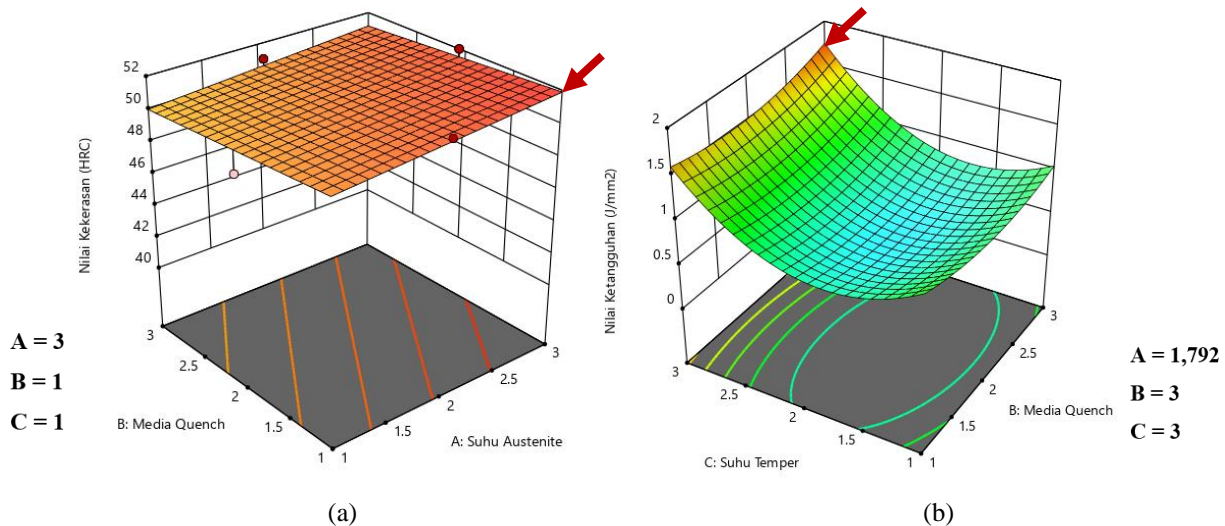
Data hasil analisis ANOVA pada **Tabel 6** menunjukkan bahwa suhu temper merupakan faktor yang secara signifikan memberikan pengaruh besar bagi respon nilai ketangguhan baja, dengan nilai kontribusi sebesar 24,77% dan 43,44%. Selanjutnya suhu austenite memberikan kontribusi 2,79% dan media *quench* berkontribusi 0,50%. Model persamaan kuadrat yang diperoleh berdasarkan analisis ANOVA memiliki nilai R^2 0,8272 dan $Adjusted R^2$ 0,5162. Dengan demikian model persamaan valid untuk menggambarkan prediksi pengaruh perubahan parameter proses *hardening* terhadap respon nilai ketangguhan baja AISI 4340. Model persamaan kuadrat untuk respon nilai ketangguhan (y) ditampilkan pada persamaan [2].

$$y = 0,6895 - 0,0924 \times A + 0,0390 \times B + 0,2749 \times C + 0,0885 \times AB - 0,0643 \times AC + 0,0575 \times BC - 0,1649 \times A^2 + 0,1458 \times B^2 + 0,5352 \times C^2 \quad (2)$$

3.3. Optimalisasi Respon

Proses optimalisasi dilakukan dengan menggunakan *software Design-Expert 13*, melanjutkan proses analisis sebelumnya. Solusi yang optimal terbaik dipilih berdasarkan nilai *desirability*. *Desirability* bernilai antara 0 hingga 1. *Desirability* 1 diinterpretasikan mampu menghasilkan nilai paling optimal untuk semua variabel respon, dan sebaliknya.

Hasil proses optimalisasi dengan memanfaatkan persamaan [1] menampilkan bahwa respon nilai kekerasan mencapai hasil optimal dengan nilai kekerasan 51,892 HRC. Nilai *desirability* yang dicapai ialah 0,990 dan kombinasi parameter proses *hardening* A3-B1-C1, atau dalam susunan *actual un-coded* berupa parameter suhu austenite 900°C, media *quench* air, dan suhu temper 200°C. Grafik *Response Surface Method* nilai kekerasan optimal ditampilkan pada **Gambar 5a**. Hasil proses optimalisasi nilai ketangguhan dengan persamaan [2] menghasilkan nilai ketangguhan 1,749 J/mm². Nilai *desirability* yang dicapai ialah 0,916 dengan kombinasi parameter proses *hardening* A1,792-B3-C3. Dalam *actual un-coded* kombinasi tersebut berarti suhu austenite 871,81°C dengan media *quench* oli dan suhu temper 450°C. Grafik *Response Surface Method* nilai ketangguhan optimal ditampilkan pada **Gambar 5b**.



Gambar 5. a) RSM untuk nilai kekerasan optimal pada A3-B1-C1; b) RSM untuk nilai ketangguhan optimal pada A1,792-B3-C3

Untuk proses optimalisasi 3 variabel respon secara bersamaan perlu dilakukan pengaturan awal terkait batasan atau *constraint* yang digunakan dalam proses optimalisasi. Tingkat kepentingan dan bobot untuk setiap respon diatur sama besar sehingga dapat diperoleh kombinasi parameter *hardening* yang seimbang antara nilai kekerasan dan nilai ketangguhan, serta biaya proses yang minimal. Tingkat kepentingan untuk setiap respon pada penelitian ini bernilai 3. Pengaturan batasan faktor dan respon ditampilkan dalam

Tabel 7.

Tabel 7. Pengaturan batasan dalam proses optimalisasi

Kode	Faktor	Unit	Tujuan	Batas		Tingkat Kepentingan
				Bawah	Atas	
A	Suhu Austenite	°C	Is in range	1	3	3
B	Media <i>Quench</i>	-	Is in range	1	3	3
C	Suhu Temper	°C	Is in range	1	3	3
	Biaya <i>Hardening</i>	Rp.	Minimize	65.035,9	186.732,0	3
	Nilai Kekerasan	HRC	Maximize	41	52	3
	Nilai Ketangguhan	J/mm ²	Maximize	0,2768	1,8847	3

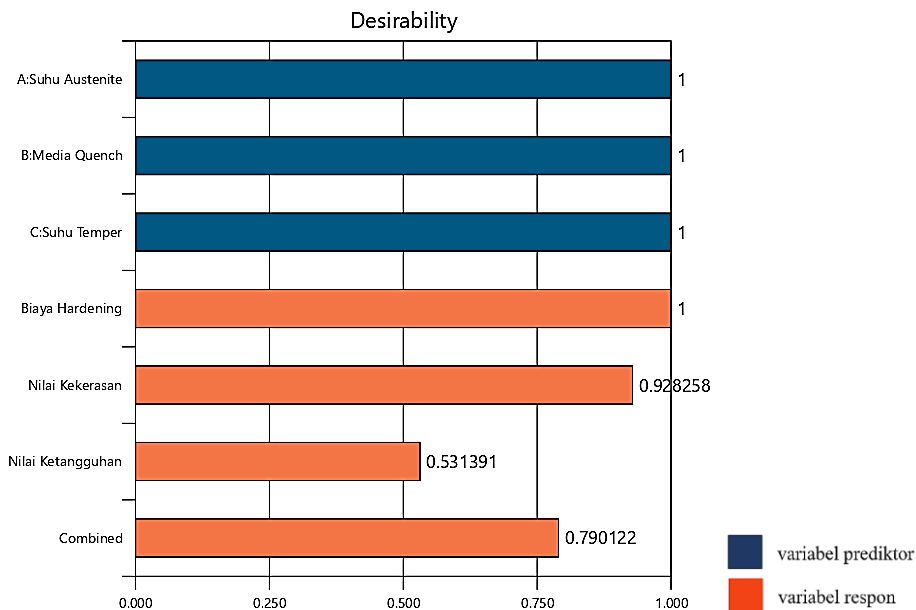
Proses optimalisasi menghasilkan 77 buah solusi berisi kombinasi faktor suhu austenite, media *quench*, dan suhu temper yang memberikan biaya proses *hardening*, nilai kekerasan, dan nilai ketangguhan yang optimal. **Tabel 8** berikut menampilkan 5 solusi terbaik (dengan kombinasi faktor atau parameter yang berbeda signifikan).

Tabel 8. Kombinasi faktor untuk solusi yang optimal

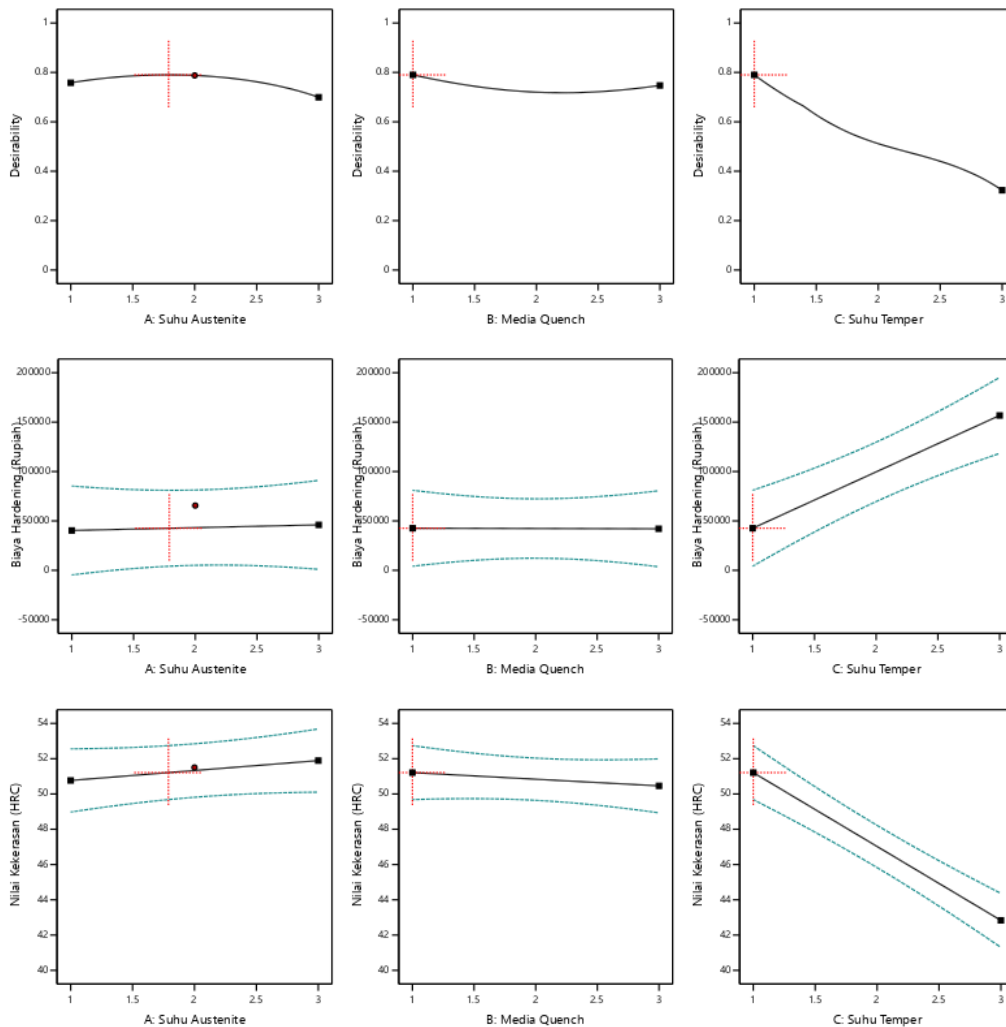
No	Faktor (coded)			Faktor (Un-coded value)			Solusi			<i>Desirability</i>
	A	B	C	Suhu Austenite (°C)	Media <i>Quench</i>	Suhu Temper (°C)	Biaya proses (Rp.)	Nilai Kekerasan (HRC)	Nilai Ketangguhan (J/mm ²)	
1	1,792	1,0	1,0	871,76	air	200	42.586,58	51,211	1,131	0,790
14	2,026	1,0	1,0	877,27	air	200	43.258,32	51,344	1,111	0,787
28	2,325	3,0	1,0	884,25	oli	200	43.593,54	50,762	1,079	0,762
32	1,052	1,0	1,0	854,54	air	200	40.491,55	50,796	1,076	0,762
48	2,605	3,0	1,0	890,78	oli	200	44.390,57	50,919	1,053	0,758

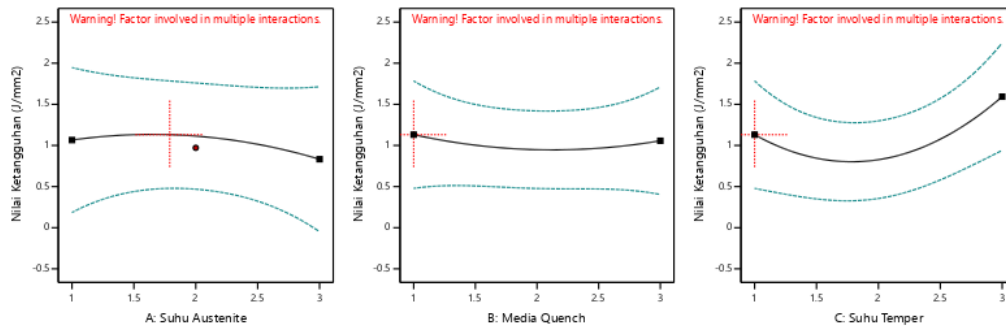
Nilai *desirability* tertinggi diperoleh pada Solusi 1 dengan nilai 0,790. Solusi 1 menghasilkan biaya *hardening* terkecil sebesar Rp.42.586,58 dengan nilai kekerasan tertinggi 51,211 HRC dan nilai ketangguhan tertinggi 1,131 J/mm². Hasil optimal ini diperoleh dengan mengkombinasikan parameter suhu austenite (A 1,792) setara 871,76°C, media *quench* (B 1,0) atau media air; dan suhu temper (C 1,0) setara 200°C.

Grafik pada **Gambar 6** menunjukkan *desirability* pada setiap faktor dan respon untuk Solusi 1. Faktor suhu austenite, media *quench*, dan suhu temper memiliki nilai *desirability* 1, menunjukkan bahwa variasi nilai pada setiap faktor digunakan secara optimal dalam proses penyusunan solusi. *Desirability* pada biaya proses *hardening* bernilai 1, menunjukkan bahwa biaya proses pada Solusi 1 merupakan biaya paling minimal dalam batas konstrain eksperimen. Nilai kekerasan memiliki *desirability* 0,9282 yang menunjukkan bahwa Solusi 1 memberikan hasil kekerasan hingga 92,82% dari nilai kekerasan maksimal yang dapat dicapai. *Desirability* pada nilai ketangguhan sebesar 0,5313 yang berarti Solusi 1 mampu mengoptimalkan nilai ketangguhan hingga 53,13% dari total nilai ketangguhan maksimal yang dapat dicapai. Grafik pada **Gambar 7** menunjukkan posisi *desirability* setiap variabel respon untuk masing-masing faktor parameter *hardening*. Tanda merah pada **Gambar 7** menunjukkan titik *desirability* pada setiap faktor. Dengan demikian menegaskan bahwa Solusi 1 memberikan optimalisasi nilai secara seimbang pada respon biaya proses, nilai kekerasan, dan nilai ketangguhan paska proses *hardening* baja AISI 4340.



Gambar 6. Bar-chart desirability untuk setiap faktor dan respon dalam penelitian





Gambar 7. Desirability setiap variabel respon untuk setiap parameter proses

4. Kesimpulan

Penelitian menghasilkan kesimpulan bahwa nilai kekerasan baja AISI 4340 pasca proses *hardening* dipengaruhi oleh suhu temper dengan kontribusi sebesar 87,44%. Nilai ketangguhan baja AISI 4340 pasca proses *hardening* dipengaruhi oleh suhu temper dengan kontribusi 24,77% dan 43,44%. Dengan demikian, pemilihan suhu temper yang tepat pada proses *hardening* sangat penting karena suhu temper berkontribusi secara signifikan terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan material AISI 4340.

Kombinasi parameter proses *hardening* yang mengoptimalkan biaya proses, nilai kekerasan, dan nilai ketangguhan baja AISI 4340 secara seimbang ialah A1,792 - B1 - C1 (suhu austenite 871,76°C, media *quench* air, suhu temper 200°C). Kombinasi parameter *hardening* ini menghasilkan nilai kekerasan 51,211 HRC; nilai ketangguhan 1,131 J/mm²; biaya proses *hardening* Rp.42.586,58; dengan nilai *desirability* mencapai 0,790.

Ucapan terima kasih

Penulis berterimakasih kepada Bapak Bagus Karyadi selaku kepala unit produksi *Heat Treatment* - Politeknik ATMI Surakarta atas dukungan dalam eksperimen, pengujian, dan pengambilan data penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] Beno, J., Mankova, I., Vrabel, M., Karpuschewski, B., Emmer, T., Schmidt, K., Operation Safety Performance of Milling Cutters with Shank Style Holders of Tool Inserts. *Procedia Engineering*. 2012; 48: p.15. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.479>.
- [2] Yao, C.W., Zhou, L.Z., Chien, Y.X., Measurement of the contact area of a dovetail milling cutter using an ultrasonic method. *Measurement*. 2013 November; 46(9): p. 3211. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.060>.
- [3] Senthilkumar, T., Ajiboye, T.K., Effect of Heat Treatment Processes on the Mechanical Properties of Medium Carbon Steel. *Journals of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2012 January; 11(2): p. 143. DOI: 10.4236/jmmce.2012.112011.
- [4] Gurumurthy, B.M., Kini, A.U., Sharma, S., Hiremath, P., Gowrishankar, M.C., Effect of intercritical processing temperature on mechanical properties, microstructure and microhardness of ferrite-bainite medium carbon dual phase steels. *Cogent Engineering*. 2021 January; 8(1): 1999062. DOI: 10.1080/23311916.2021.1999062.
- [5] Dewangan, S., Behera, S., Comparative analysis into mechanical properties and microstructural attributes of quenched and tempered 0.2%-C steel. *World Journal of Engineering*. 2020 January; 17(1): 127. DOI 10.1108/WJE-11-2019-0327.

- [6] Gurumurthy, B.M., Sharma, S., Kini, U.A., Hedge, A., Patil, A., Mechanical characteristics evaluation of dual phase and related hardening techniques on AISI 4340 steel. Journal of Mechanical Engineering and Sciences. 2018 December, 12(4): p. 4018. DOI: 10.15282/jmes.12.4.2018.03.0349.
- [7] Rajan, T. V., Sharma, C. P., Sharma, A., Heat Treatment: Principles and Techniques. 2nd edition. New Delhi: PHI Learning Private Limited; 2011. p. 3.
- [8] Jami, M., Gil, E., Ushiña, E., Cabrera, V. H., Determine hardness and torsional resistance of AISI/SAE 4340 steel, treated by quenching at 860°C and tempering at 300°C, 350°C and 400°C. Materials Today: Proceedings. 2022; 49(1): p. 35. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.439>.
- [9] Bilal, M.M., Yaqoob, K., Zahid, M.H., Haq, E.U., Tanveer, W.H., Wadood, A., Ahmed, B., Effect of austempering conditions on the microstructure and mechanical properties of AISI 4340 and AISI 4140 steels. Journal of Materials Research and Technology. November-December 2019; 8(6): p. 5194. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.08.042>.
- [10] Kumar, A., Jayakumar, P., Sharma, V. K., Microstructure and properties of thermomechanically treated and bake hardened AISI 4340 steel. Materials Today: Proceedings. 2019; 18(3): p. 848. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.514>.
- [11] Srivastava, K., Sinha, A.A., Sahani, R., Effect of heat treatment on hardness and toughness of EN8 steel. Materials Today: Proceedings. 2021; 42(2): p. 1297. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1015>.
- [12] Gurumurthy, B.M., Sharma, S.S., Kini, A., Ferrite-bainite dual phase structure and mechanical a characterization of AISI 4340 steel. Materials Today: Proceedings. 2018; 5(11): p. 24907. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.290>.
- [13] MacKenzie, D.S., Selection of oil quenchants for heat treating processes. International Heat Treatment and Surface Engineering. 2014 March; 8(1): p. 8. DOI: 10.1179/1749514813Z.00000000089.
- [14] Azizi, M.J., Jatimurti, W., Rochiem, R., Analisis pengaruh variasi temperatur dan waktu tahan tempering terhadap kekerasan baja ASSAB 705 yang di-hardening untuk aplikasi poros pompa multistage. Jurnal Teknik ITS. 2019 June; 8(1): ISSN: 2337. DOI: 10.12962/j23373539.v8i1.38059.
- [15] Niazi, A., Dai, J.S., Balabani, S., Seneviratne, L., Product Cost Estimation: Technique Classification and Methodology Review. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2006 May; 128(2): p. 563. DOI: 10.1115/1.2137750.
- [16] Andrade, M.C., Filho, R.C.P., Espozel, A.M., Maia, L.O.A., Qassim, R.Y., Activity-based costing for production learning. International Journal of Production Economics. September 1999; 62(3): p. 175. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(97\)00136-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(97)00136-9).
- [17] Kuhn, H., Medlin, D. 2000. ASM Handbook Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation. 1st edition. Ohio: ASM International; 2000. p. 416, 1270.
- [18] Bawono, B., Anggoro, P.W., Tauviquirrahman, M., Jamari, J., Bayuseno, A.P., Antony, A.A., Optimization Parameters Tooling Design to Increase the Surface Quality of Orthotic Insole Shoes using the Taguchi Approach and Surface Response Methods. Materials Today: Proceedings. 2019; 13(1): p. 47. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.185>.