SINERGI *Vol. 24, No.2, pp.314-325, Oktober 2026*
DOI : http://dx.doi.org/10.31963/sinergi.v24i2.6496

Efektivitas Media Pendingin Air Bonggol Pisang Terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon Rendah *Post Tempering*

Oktafianus Delpa[1*], Delon Rayndhika Embatau[2], Nitha Nitha[3], Christof Geraldi Simon[4]

[1,2] Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin , Universitas Kristen Indonesia Toraja, Indonesia
[3,4,] Jurusan Teknik Mesin, Universitas Kristen Indonesia Toraja, Indonesia
*E-mail korespondensi: oktafianus031@gmail.com

Abstract*: Heat treatment processes for steel typically employ synthetic cooling media, prompting the need for more environmentally friendly natural alternatives, such as banana corm liquid. This study aims to analyze the effect of banana corm liquid as a cooling medium in the post-tempering process on the hardness and wear rate of ST37 low-carbon steel. The experiments utilized tempering temperature variations of 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, and 600°C, with a holding time of 1 hour. Testing was conducted to evaluate the changes in the mechanical properties of the material after heat treatment. The results demonstrate that increasing the tempering temperature significantly affects the mechanical properties of ST37 steel. The highest hardness value was achieved at 600°C, reaching 127.7773 kg/mm², while the lowest was recorded at 200°C at 116.8886 kg/mm². In the wear test, the specimen tempered at 600°C exhibited the lowest wear rate of 0.00337 g/s, whereas the 200°C treatment resulted in the highest wear rate of 0.00380 g/s. Consequently, the utilization of banana corm liquid as a cooling medium in the post-tempering process is highly effective in increasing the hardness and reducing the wear rate of ST37 low-carbon steel.*

Keywords: *Banana corm liquid; ST37 steel; Hardness; Wear rate; Post-tempering*

Abstrak: Proses perlakuan panas (*heat treatment*) pada baja umumnya menggunakan media pendingin sintetis, sehingga diperlukan alternatif media alami yang lebih ramah lingkungan seperti air bonggol pisang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh media pendingin air bonggol pisang pada proses *post-tempering* terhadap kekerasan dan laju keausan baja karbon rendah ST37. Penelitian ini menggunakan variasi temperatur *tempering* 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C dengan *holding time* 1 jam. Pengujian dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat mekanik material setelah perlakuan panas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *tempering* memberikan pengaruh terhadap sifat mekanik baja ST37. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada temperatur 600°C sebesar 127,7773 kg/mm², sedangkan nilai terendah pada temperatur 200°C sebesar 116,8886 kg/mm². Pada pengujian keausan, spesimen dengan temperatur 600°C menunjukkan laju keausan terendah sebesar 0,00337 g/s, sedangkan temperatur 200°C menghasilkan laju keausan tertinggi sebesar 0,00380 g/s. Dengan demikian, penggunaan media pendingin air bonggol pisang pada proses *post-tempering* efektif meningkatkan kekerasan dan menurunkan laju keausan baja karbon rendah ST37.

Kata kunci : Air Bonggol Pisang; Baja ST37; Kekerasan; Laju Keausan; *Post Tempering*

I. PENDAHULUAN

Di era modern yang serba kompetitif, perkembangan teknologi material bergerak sangat dinamis seiring dengan tuntutan sektor manufaktur, otomotif, dan infrastruktur global yang membutuhkan material dengan spesifikasi mekanik unggul. Efisiensi energi, pengurangan emisi karbon, dan keberlanjutan siklus hidup produk industri mendorong para peneliti material untuk terus merekayasa karakteristik logam agar mampu beroperasi pada kondisi ekstrem. Peningkatan sifat mekanik logam, yang mencakup sifat fisik-struktural dan respons mekanis terhadap pembebanan, menjadi prioritas utama guna memperpanjang usia pakai komponen mesin, mengurangi biaya perawatan, serta menjamin keselamatan operasional [1]. Mengingat besarnya kontribusi logam di bidang teknologi industri, modifikasi melalui perlakuan panas dan rekayasa medium pendingin menjadi instrumen strategis yang paling rasional untuk mengoptimalkan performa material tanpa menaikkan biaya produksi secara signifikan [2].

Secara teoretis, baja dipahami sebagai zat atau benda yang menjadi dasar pembuatan produk yang secara struktural mendominasi rekayasa teknik modern [3]. Menurut penjelasan ilmiah para ahli, baja diklasifikasikan sebagai logam paduan ferro di mana unsur besi (Fe) bertindak sebagai matriks utama dan unsur karbon (C) berfungsi sebagai paduan intersisi dominan yang menentukan karakteristik dasarnya [4];[5]. Sebagai material teknik, baja memiliki densitas atom yang sangat teratur dan padat dibandingkan dengan material keramik maupun polimer organik, sehingga menghasilkan karakteristik mekanik inheren berupa ketangguhan yang baik, keliatan, elastisitas tinggi, serta kemampuan menghantarkan energi listrik dan panas secara efektif [2]. Berdasarkan persentase kandungan karbon dalam strukturnya, logam paduan ferro ini diklasifikasikan menjadi tiga kelompok utama, yaitu baja karbon rendah (*low carbon steel*) dengan rentang karbon 0,04%–0,30%, baja karbon sedang (*medium carbon steel*) dengan rentang karbon 0,3%–0,6%, dan baja karbon tinggi (*high carbon steel*) yang mengadopsi persentase karbon antara 0,60%–1,40% [6];[7];[1]. Di luar kategori tersebut, terdapat pula baja paduan khusus (*alloy steel*) yang sengaja ditambahkan unsur kromium, nikel, atau molibdenum untuk mendapatkan resistansi lingkungan tertentu. Dalam konvensi standardisasi material, baja ST37 menempati posisi yang sangat tegas dalam kelompok baja karbon rendah (*mild steel*), karena konsentrasi karbon totalnya yang berada di bawah 0,30%, menjadikannya sebagai material feritik-perlitik yang sangat ekonomis dan melimpah di pasar global [8]. Sebagai bagian dari kelompok *mild steel*, karakteristik baja ST37 sangat menonjol pada aspek daktilitas (kelenturan) yang tinggi, keuletan luar biasa, serta kemampuan mesin (*machinability*) dan kemampuan las (*weldability*) yang sangat baik tanpa memicu risiko retak las akibat pembentukan struktur getas [9]. Kendati demikian, baja ST37 memiliki kekurangan mendasar berupa tingkat kekerasan permukaan yang rendah dan ketahanan aus yang buruk, sehingga rentan mengalami deformasi plastis dan pengikisan makroskopis apabila dioperasikan pada lingkungan kerja yang melibatkan gesekan mekanis berulang [10]. Terlepas dari kelemahannya terhadap korosi dan abrasi, keunggulan ekonomis serta kemudahan fabrikasi menjadikan baja ST37 sebagai pilihan utama dalam aplikasi skala besar, mulai dari struktur tulangan beton, pipa distribusi minyak dan gas, komponen bodi mobil, kawat baja, hingga kerangka alat berat seperti *forklift* dan *crane* [9];[10]

Dalam menganalisis efektivitas suatu perlakuan material, parameter sifat mekanik menjadi indikator mutlak yang harus dievaluasi secara komprehensif. Sifat mekanik yang krusial meliputi kekerasan yang merepresentasikan kemampuan permukaan dalam menahan penetrasi, abrasi, atau goresan plastis [11];[12]. Selanjutnya, kekuatan tarik (*tensile strength*) mengukur kemampuan material menahan beban aksial hingga patah, sedangkan keuletan (*ductility*) menunjukkan kapasitas deformasi permanen sebelum kegagalan terjadi [13]. Ketangguhan (*toughness*) menilai seberapa besar energi impak yang dapat diserap oleh material tanpa mengalami patah getas, sementara analisis struktur mikro (*microstructure*) menjadi fondasi ilmiah yang menjelaskan bagaimana distribusi fasa mikro memengaruhi seluruh perilaku mekanik makro tersebut [14].

Berdasarkan Penelitian yang dilakukan [15] secara metodologis, terdapat beberapa jenis proses *heat treatment* konvensional yang memiliki fungsi unik masing-masing. *Annealing* bertujuan melunakkan material dan meningkatkan keuletan melalui pendinginan lambat di dalam tungku, sedangkan *normalizing* diterapkan untuk menyeragamkan butir kristal dengan pendinginan udara terbuka *Hardening* berfokus pada peningkatan kekerasan secara drastis melalui pendinginan cepat (*quenching*) guna memaksa fasa austenit bertransformasi menjadi martensit getas. Proses *tempering* dilakukan pasca-*hardening* dengan cara memanaskan kembali logam di bawah suhu kritis untuk memulihkan keuletan dan mereduksi kerapuhan[16]. Sementara itu, *austempering* dan *martempering* merupakan variasi perlakuan panas isotermal khusus yang dirancang untuk menghasilkan fasa bainit atau martensit dengan tingkat distorsi termal dan risiko retak quenching yang minimal [17]. Proses pendinginan cepat atau *quenching* pasca-pemanasan bertindak sebagai fase penentu terbentuknya fasa metastabil yang keras. Kecepatan laju pendinginan (*cooling rate*) secara langsung mengontrol mekanisme difusi atom karbon; laju pendinginan yang sangat tinggi akan membekukan atom karbon di dalam struktur besi, mencegah pembentukan ferit-perlit normal, dan memaksa kisi kristal bertransformasi menjadi struktur *Body Centered Tetragonal* (BCT) yang dikenal sebagai martensit [18].

Keberadaan fasa martensit inilah yang bertanggung jawab penuh atas lonjakan nilai kekerasan permukaan baja, meskipun konsekuensinya material menjadi sangat getas sehingga memerlukan proses lanjutan berupa *post-tempering* guna mengondisikan struktur martensit temper yang lebih stabil [19]. Karakteristik laju pendinginan tersebut sepenuhnya dikendalikan oleh jenis media pendingin (*quenching medium*) yang digunakan, di mana fluiditas, densitas, dan konduktivitas termal media memegang peranan vital. Media pendingin komersial seperti air murni menawarkan laju pendinginan tertinggi, namun berisiko menimbulkan distorsi dan retak termal akibat syok termal yang ekstrem. Media oli menyediakan laju pendinginan sedang yang lebih stabil untuk meminimalkan distorsi, namun memiliki kelemahan berupa biaya tinggi dan potensi bahaya kebakaran [20].

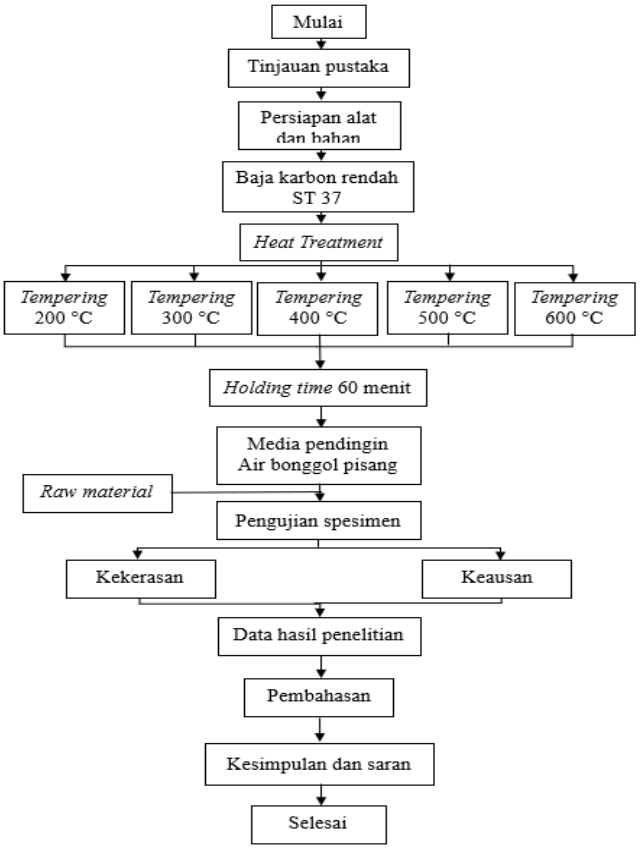
Sebagai alternatif solutif terhadap ketergantungan pada media pendingin sintetis berbahaya, pemanfaatan cairan biomaterial alami seperti air bonggol pisang mas (*Musa acuminata*) menawarkan prospek ilmiah yang sangat menjanjikan. Secara kimiawi, bonggol pisang segar merupakan limbah pertanian kaya air (76%–86%) yang mengandung mineral terlarut esensial seperti kalium, kalsium, besi, magnesium, serta senyawa polisakarida berupa pektin sebesar 3%–5% [21];[22]. Kehadiran mineral terlarut ini terbukti meningkatkan konduktivitas elektrik dan termal cairan, sementara kandungan pektin alami bertindak sebagai agen pengontrol viskositas yang mampu memodifikasi karakteristik *film boiling* selama fase *quenching* [23]. Mekanisme ini menghasilkan laju pendinginan yang lebih seragam dan terkontrol dibandingkan air murni, sehingga berpotensi menciptakan keseimbangan optimal antara peningkatan kekerasan permukaan dan penurunan laju keausan tanpa menimbulkan keretakan termal pada baja karbon rendah pasca-proses tempering.

Meskipun beberapa penelitian terdahulu telah menguji penggunaan air batang pisang pada proses *quenching* baja karbon sedang, masih terdapat kekosongan ilmiah (*research gap*) yang nyata terkait data kuantitatif pemanfaatan air bonggol pisang mas yang difokuskan secara spesifik sebagai media pendingin pasca *tempering* pada baja karbon rendah ST37. Pengukuran perubahan sifat mekanik baja akibat variasi temperatur *tempering* dan pendinginan air bonggol pisang ini difokuskan melalui dua parameter uji utama, yaitu pengujian kekerasan metode Vickers dan pengujian laju keausan metode abrasif. Pengujian kekerasan Vickers dipilih karena mampu mengukur resistensi material terhadap deformasi plastis secara akurat, sementara pengujian keausan abrasif ditujukan untuk menyimulasi kondisi keausan aktual guna mengukur laju terkikisnya massa material per satuan waktu akibat gesekan. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara empiris efektivitas media pendingin air bonggol pisang terhadap nilai kekerasan Vickers dan laju keausan abrasif baja karbon rendah ST37 pada berbagai variasi temperatur *post-tempering*.

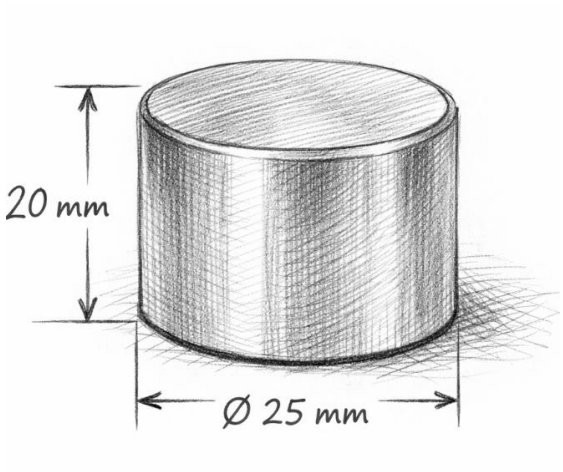
II. METODE PENELITIAN

2.1 Metode

Metode penelitian ini diawali dengan persiapan spesimen baja karbon rendah ST 37 yang kemudian diberi perlakuan panas (*heat treatment*) berupa proses *tempering* pada variasi suhu 200°C, 300°C. 400°C. 500°C, dan 600°C dengan *holding time* 60 menit, dilanjutkan dengan pendinginan menggunakan media air bonggol pisang, sebelum akhirnya dilakukan pengujian kekerasan dan keausan terhadap spesimen hasil perlakuan serta *raw material* untuk dianalisis datanya



Gambar 1. Diagram Alir



Gambar 2. Bentuk Dan Ukuran Spesimen Uji

2.2 Alat Dan Bahan

Peralatan utama yang digunakan meliputi tungku listrik (*furnace*) untuk siklus pemanasan termal, alat uji kekerasan metode Vickers, serta alat uji keausan metode abrasif.



Gambar 3. Tungku (Furnace)



Gambar 4. Alat Uji Kekerasan



Gambar 5. Alat Uji Keausan

Spesimen yang digunakan adalah baja karbon rendah ST37 dengan dimensi diameter 25 mm dan tinggi 20 mm. Media pendingin yang digunakan adalah air hasil ekstraksi murni dari bonggol pisang Mas yang telah berbuah (volume 2 liter per skenario).



Gambar 6. Baja ST37



Gambar 7. Air Bonggol Pisang

2.3 Prosedur Penelitian

Penelitian diawali dengan persiapan material baja karbon rendah ST37 yang dipotong sesuai dimensi spesimen pengujian dan permukaannya dihaluskan agar memiliki kondisi awal yang seragam. Media pendingin dipersiapkan dengan mengumpulkan bonggol pisang Mas yang telah berbuah, kemudian diekstraksi menggunakan metode pengepresan atau penyaringan hingga diperoleh air bonggol pisang, selanjutnya disiapkan sebanyak 2 liter untuk setiap perlakuan.

Spesimen baja ST37 selanjutnya diberi perlakuan panas tempering pada temperatur 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C dengan waktu penahanan (*holding time*) selama 1 jam pada setiap variasi temperatur.Setelah proses tempering selesai, setiap spesimen segera didinginkan dengan metode *quenching* menggunakan 2 liter air bonggol pisang Mas pada suhu ruang hingga suhu spesimen mendekati suhu lingkungan, dengan memastikan setiap spesimen terendam sempurna dan menggunakan media pendingin yang berbeda untuk setiap perlakuan.

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers pada seluruh spesimen setelah perlakuan panas, kemudian nilai kekerasan dari setiap variasi temperatur dihitung sebagai nilai rata-rata. Pengujian keausan dilakukan menggunakan mesin uji keausan abrasif dengan beban, kecepatan putar, dan waktu pengujian yang disesuaikan dengan standar pengujian, kemudian massa spesimen ditimbang sebelum dan sesudah pengujian untuk menentukan kehilangan massa sebagai dasar perhitungan laju keausan. Data hasil pengujian kekerasan dan keausan selanjutnya dianalisis dengan membandingkan setiap variasi temperatur tempering untuk menentukan pengaruh temperatur terhadap sifat mekanik baja ST37 serta memperoleh temperatur tempering yang memberikan kombinasi kekerasan dan ketahanan aus yang paling optimal.

2.4 Pengujian Kekerasan

Pengukuran kekerasan menggunakan metode lekukan *Vickers* (*Vickers Hardness Test*) dilakukan dengan memberikan beban penekanan (*load*) tertentu melalui indenter piramida intan bersudut 136˚. Pengujian dilakukan sebanyak tiga titik pengujian pada setiap spesimen untuk mendapatkan nilai rata-rata yang valid. Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan dengan metode observasi langsung, yaitu peneliti mengamati dan mencatat nilai hasil pengukuran yang ditampilkan pada layar *Leeb Hardness Tester* setelah proses pengujian selesai. Setiap spesimen diuji pada beberapa titik pengukuran untuk memperoleh data yang lebih representatif. Nilai kekerasan yang muncul pada layar alat kemudian dicatat secara manual ke dalam lembar pengamatan untuk selanjutnya diolah dan dianalisis.

2.5 Pengujian Keausan

Ketahanan aus diuji menggunakan metode abrasi mekanis. Spesimen ditimbang terlebih dahulu sebelum pengujian menggunakan timbangan digital untuk mengetahui massa awal (W_0). Pengujian keausan dilakukan dengan durasi total pengujian (s) selama 120 detik. Setelah mengalami abrasi, spesimen dibersihkan dan ditimbang kembali untuk mengetahui massa akhir (W_1). Selisih massa ($\Delta W = W_0 - W_1$) digunakan untuk menghitung laju keausan (W) dengan persamaan (1):

$$W = \frac{\Delta W}{s} \tag{1}$$

Di mana W adalah laju keausan (g/s), ΔW melambangkan kehilangan massa material (g), dan s merupakan durasi total pengujian gesek (s). Data yang diperoleh selanjutnya ditabulasi dan dianalisis secara komparatif untuk menentukan temperatur operasional optimal.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Uji Kekerasan

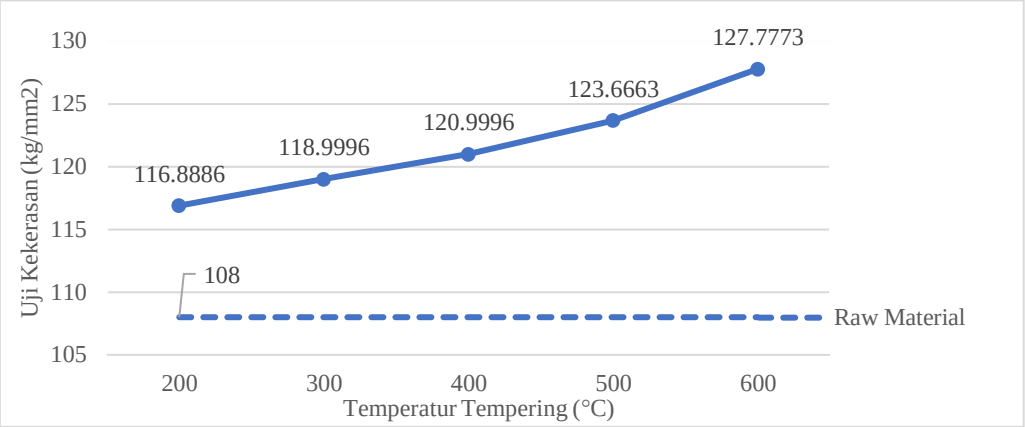
Pengukuran kekerasan permukaan dilakukan menggunakan metode *Vickers* dengan melakukan tiga titik penekanan (identasi) pada setiap spesimen untuk mendapatkan nilai rata-rata yang valid. Data hasil pengujian kekerasan *vickers* disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Hasil Pengujian Kekerasan dengan Metode Vickers

No	Temperatur *Tempering* (° C)	Spesimen	HV (kg/mm^2)			HV Rata-rata (kg/mm^2)	HV Total (kg/mm^2)
			HV_1	HV_2	HV_3		
1	*Raw Material*	1	108	108	108	108	108
		2	108	108	108	108	
		3	108	108	108	108	
2	200	1	122	111	110	114,333	116,8886
		2	118	120	113	117	
		3	116	115	127	119,333	
3	300	1	114	114	109	112,333	118,9996
		2	115	123	120	119,333	
		3	102	138	136	125,333	
4	400	1	110	114	134	119,333	120,9996
		2	114	134	116	121,333	
		3	124	122	121	122,333	
5	500	1	119	149	124	130,666	123,6663
		2	131	131	104	122	
		3	106	143	106	118,333	
6	600	1	125	134	115	124,666	127,7773
		2	121	115	143	126,333	
		3	137	127	133	132,333	

Berdasarkan data pada tabel tersebut, terdapat kecenderungan peningkatan nilai kekerasan (HV) total material seiring dengan meningkatnya temperatur *tempering* yang diberikan. Pada kondisi tanpa perlakuan panas (*raw material*), nilai kekerasan konstan sebesar 108 kg/mm² pada ketiga spesimen. Setelah proses *tempering* dilakukan, nilai kekerasan total mengalami kenaikan secara bertahap, dimulai dari temperatur 200°C sebesar 116,8886 kg/mm², lalu meningkat menjadi 118,9996 kg/mm² pada 300°C,

dan 120,9996 kg/mm² pada 400°C. Tren kenaikan ini terus berlanjut hingga mencapai nilai kekerasan total tertinggi sebesar 127,7773 kg/mm² pada temperatur *tempering* maksimal 600°C. Hal ini mengindikasikan bahwa perlakuan panas berupa variasi temperatur *tempering* memberikan pengaruh signifikan terhadap perubahan struktur mikro yang berkontribusi langsung pada peningkatan nilai kekerasan material dibandingkan dengan kondisi awalnya.



Gambar 8. Grafik Pengaruh Variasi Temperatur Tempering Terhadap Kekerasan Baja ST37

Berdasarkan grafik tersebut, terlihat tren peningkatan nilai kekerasan (kg/mm^2) material yang berbanding lurus dengan kenaikan temperatur *tempering* ($^{\circ}C$). Kondisi *raw material* awal yang ditunjukkan oleh garis putus-putus memiliki nilai kekerasan dasar terkecil sebesar 108 kg/mm^2. Setelah dilakukan proses perlakuan panas, terjadi kenaikan kekerasan yang signifikan sejak temperatur paling rendah, yaitu 116,8886 kg/mm^2 pada temperatur 200°C. Nilai kekerasan terus merangkak naik berturut-turut menjadi 118,9996 kg/mm^2 pada 300°C, 120,9996 kg/mm^2 pada 400°C, dan 123,6663 kg/mm^2 pada temperatur 500°C. Puncak kekerasan tertinggi dicapai pada temperatur *tempering* maksimal 600°C dengan nilai sebesar 127,7773 kg/mm^2. Fenomena kenaikan linear ini mengindikasikan bahwa peningkatan energi termal selama proses *tempering* pada rentang temperatur tersebut secara efektif mengubah karakteristik mekanis material menjadi lebih keras dibandingkan kondisi mentahnya (*raw material*).

Proses *tempering* pada baja karbon rendah ST 37 menggunakan media pendingin air bonggol pisang mas dengan variasi suhu memberikan pengaruh signifikan terhadap kekerasan material, di mana semakin tinggi suhu *tempering*, semakin besar pula nilai kekerasannya. Suhu 600°C terbukti paling efektif, menghasilkan kekerasan tertinggi 127,7773 kg/mm², sementara suhu 200°C hanya mencapai 116,8886 kg/mm². Tren ini sejalan dengan [25] yang menyatakan, "nilai kekerasan optimum didapatkan pada suhu 850 °C dengan nilai kekerasan 26,80 HRC dari sebelum dilakukan perlakuan panas yaitu 12,48 HRC. Proses *heat treatment* dengan suhu tinggi yang diikuti oleh proses pendinginan cepat juga memengaruhi tingkat kekerasan, semakin tinggi suhu, semakin tinggi kekerasannya".

3.2 Uji Keausan

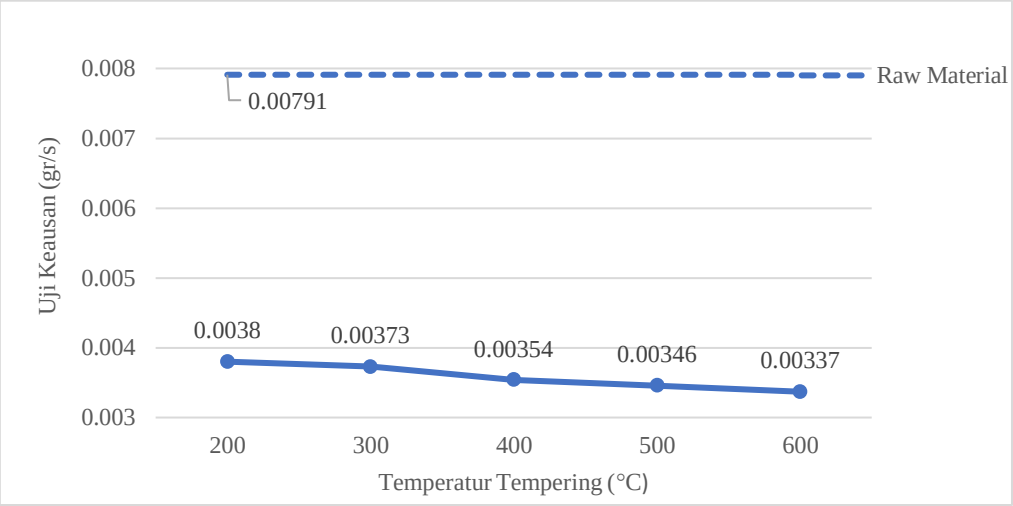
Pengujian keausan dilakukan dengan menggesekkan spesimen pada piringan abrasif selama 120 detik. Laju keausan (W) dihitung berdasarkan pengurangan berat spesimen sebelum (W0) dan sesudah (W1) pengujian per satuan waktu (g/s). Data hasil pengujian keausan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Hasil Pengujian Laju Keausan dengan Metode Abrasif

No	Temperatur *Tempering* (° C)	Spesimen	Wo (gr)	W1 (gr)	ΔW (gr)	Laju Keausan gr/s	Laju Rata-Rata gr/s
1	*Raw*	1	78,695	77,745	0,950	0.00791	0,00791

No	Temperatur *Tempering* (° C)	Spesimen	Wo (gr)	W1 (gr)	ΔW (gr)	Laju Keausan gr/s	Laju Rata-Rata gr/s
	Material	2	78,695	77,745	0,950	0.00791	
		3	78,695	77,745	0,950	0.00791	
2	200	1	78,695	78,255	0,440	0,00366	0,00380
		2	78,695	78,220	0,475	0,00395	
		3	78,695	78,240	0,455	0,00379	
3	300	1	78,695	78,215	0,510	0,00425	0,00373
		2	78,695	78,335	0,390	0,00325	
		3	78,695	78,250	0,445	0,00370	
4	400	1	78,695	78,115	0,480	0,00400	0,00354
		2	78,695	78,305	0,390	0,00325	
		3	78,695	78,290	0,405	0,00370	
5	500	1	78,695	78,300	0,395	0,00329	0,00346
		2	78,695	78,220	0,475	0,00395	
		3	78,695	78,315	0,380	0,00316	
6	600	1	78,695	78,275	0,420	0,00350	0,00337
		2	78,695	78,290	0,405	0,00337	
		3	78,695	78,305	0,390	0,00325	

Berdasarkan data hasil pengujian pada tabel tersebut, terlihat adanya tren penurunan laju keausan rata-rata material seiring dengan meningkatnya temperatur *tempering* yang diberikan. Pada kondisi tanpa perlakuan panas (*raw material*), laju keausan rata-rata berada pada nilai tertinggi sebesar 0,00791 gr/s dengan kehilangan berat (ΔW) yang konstan sebesar 0,950 gr pada ketiga spesimen. Setelah dilakukan proses *tempering*, ketahanan aus material meningkat yang ditunjukkan oleh penurunan laju keausan secara bertahap, dimulai dari temperatur 200°C sebesar 0,00380 gr/s, kemudian turun menjadi 0,00373 gr/s pada 300°C, dan 0,00354 gr/s pada 400°C. Tren penurunan laju keausan ini terus berlanjut hingga mencapai nilai terendah sebesar 0,00337 gr/s pada temperatur *tempering* maksimal 600°C. Fenomena ini mengindikasikan bahwa variasi temperatur *tempering* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan ketahanan aus mekanis material, di mana semakin tinggi temperatur perlakuan panas yang diterapkan, maka semakin rendah laju pengikisan atau keausan yang terjadi pada material tersebut.



Gambar 9. Grafik Pengaruh Variasi Temperatur Tempering Terhadap Laju Keausan Baja ST37

Berdasarkan grafik tersebut, terlihat tren penurunan laju keausan material yang berbanding terbalik dengan peningkatan temperatur *tempering* ($^{\circ}C$). Kondisi *raw material* awal yang digambarkan dengan garis putus-putus menunjukkan laju keausan tertinggi sebesar 0,00791 g/s. Setelah melalui proses perlakuan panas, nilai laju keausan langsung menurun secara signifikan menjadi 0,0038 g/s pada temperatur *tempering* paling rendah (200°C). Seiring dengan meningkatnya suhu perlakuan panas, laju keausan terus menurun secara konstan menjadi 0,00373 g/s pada 300°C, 0,00354 g/s pada 400°C, dan 0,00346 g/s pada 500°C, hingga mencapai titik terendah sebesar 0,00337 g/s pada temperatur maksimal 600°C. Penurunan nilai laju keausan ini membuktikan bahwa proses *tempering* pada rentang temperatur tersebut secara efektif meningkatkan ketahanan aus material secara signifikan dibandingkan dengan kondisi mentahnya (*raw material*).

Hasil pengujian keausan metode abrasif menunjukkan bahwa spesimen baja rendah karbon yang ditemper pada suhu 600°C dengan media pendingin air bonggol pisang Mas memiliki laju keausan paling rendah, yaitu 0,00337 g/s, sementara spesimen pada suhu 200°C mengalami keausan tertinggi sebesar 0,00380 g/s. Fenomena ini mengindikasikan bahwa peningkatan suhu *tempering* menghasilkan kombinasi optimal antara kekerasan dan ketangguhan, sehingga meningkatkan resistansi keausan. Temuan ini sejalan dengan [26] yang menyatakan, "nilai kekerasan material berbanding terbalik terhadap laju keausan material, di mana semakin keras suatu material, maka laju keausan material akan semakin kecil. Temperatur *tempering* yang paling optimal menghasilkan laju keausan sebesar 1,67 mm/jam".

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan dan keausan pada baja karbon rendah yang didinginkan menggunakan media air bonggol pisang mas serta diberi perlakuan panas *tempering* pada rentang suhu 200–600°C, dapat disimpulkan bahwa :

1. Kombinasi proses pendinginan menggunakan air bonggol pisang mas dan perlakuan *tempering* pada suhu yang lebih tinggi terbukti efektif menghasilkan permukaan baja yang lebih keras dengan nilai tertinggi 127,7773 kg/mm^2 pada suhu 600°C, sedangkan pada temperatur 200°C menghasilkan kekerasan terendah dengan nilai 116,8886 kg/mm^2.
2. Pola yang sama juga tercermin pada laju keausan, di mana peningkatan suhu *tempering* dalam rentang tersebut dan media pendingin air bonggol pisang berkontribusi terhadap penurunan nilai keausan (laju aus menjadi lebih kecil) dengan nilai terendah 0,00337 gram/s pada suhu 600°C, sementara pada suhu *tempering* 200°C laju keausan menunjukkan nilai yang lebih tinggi yaitu 0,00380 gram/s.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Kristofol Waas and Victor Danny Waas, "Pengaruh Holding Time Dan Variasi Media Quenching Terhadap Nilai Kekerasan Baja Karbon Rendah ST 42 Pada Proses Pengkarbonan Padat Menggunakan Arang Batok Biji Pala (Myristica fagrans)," *JURNAL SIMETRIK*, vol. 10, pp. 269–278, Jun. 2020.

[2] H. Kurnia, A. Dwi Wahyuni, N. Adistyani, and A. Arwan Sulaeman, "Penggunaan Material Logam Di berbagai Industri Manufaktur Indonesia: Sistematik Kajian Literatur," *Jurnal Industry Xplore*, vol. 8, no. 1, 2023.

[3] Sahlan, "Kajian Terkait Industri Material Hankam Dan Kebencanaan Dari Sisi Pasar," *Jurnal Power Plant*, pp. 1–65, May 2018.

[4] C. Pramono, *Material Teknik*. Anom Pustaka, 2020.

[5] R. Wahyudi, "Analisa Pengaruh Jenis Elektroda Pada Pengelasan SMAW Penyambungan Baja Karbon Rendah Dengan Baja Karbon Sedang Terhadap Tensile Strenght," *Journal of Welding Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 43–47, 2019.

[6] Eko Sulistiyo and Firman Prasetyo, "Identifikasi Material Tube High Pressure Economizer HRSG Unit 2.3 PLTGU UP Semarang," *Jurnal Power Plant*, vol. 4, p. 60, May 2016.

[7] M. Agus Shidiq and M. Fajar Sidiq, *Dasar Metalurgi*. 2022.

[8] D. Purnama Sari, Rahmayantia, and Kamaluddina, "Pengaruh Campuran Karbon Tempurung Kelapa Dan Batu Bara Sub Bituminus Pada Treatment Karburasi Terhadap Peningkatan Nilai Kekerasan Material Baja St37," *Jurnal Teknologi Kimia Material*, vol. 1, no. 1, pp. 42–46, 2022.

[9] Ahmad Royani, "Pengaruh Suhu Terhadap Laju Korosi Baja Karbon Rendah Dalam Media Air Laut," *Jurnal Simetrik*, vol. 10, pp. 344–349, Dec. 2020.

[10] S. T. Dwiyati, F. B. Susetyo, and A. D. P. Yudhantono, "Pengaruh Laju Aliran Gas Terhadap Nilai Kekerasan Baja Karbon Rendah Hasil Hardfacing Dengan Proses GTAW," *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*, vol. 5, no. 1, pp. 1–6, Apr. 2018, doi: 10.21009/jkem.5.1.1.

[11] Agus Tommy Kurniawan, "Analisa Kekerasan Bahan Dalam Proses Pengecoran Aluminum Sebagai Bahan Pembuatan Blok Silinder Motor Bakar," *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik [JIMT]*, vol. 4, pp. 98–110, Mar. 2024, [Online]. Available: http://jurnalmahasiswa.umsu.ac.id/index.php/jimt

[12] A. Patongkon Paujung, Nitha, and Y. Bontong, "Analisa Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Kekerasan Dan Ketangguhan Pada Heat Treatment Metode Quenching Baja St 37," pp. 40–45, 2022.

[13] M. Jordi, H. Yudo, and S. Jokosisworo, "Analisa Pengaruh Proses Quenching Dengan Media Berbeda Terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan Baja St 36 Dengan Pengelasan SMAW," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 5, no. 1, pp. 272–281, 2017, [Online]. Available: http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/naval

[14] I. Saefuloh, A. Pramono, W. Jamaludin, I. Rosyadi, and N. Diterima, "Studi Karakterisasi Sifat Mekanik Dan struktur Mikro Material Piston Alumunium-Silikon Alloy," *Jurnal Teknik Mesin Untirta*, vol. IV, no. 2, pp. 56–62, Oct. 2018, [Online]. Available: http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jwl

[15] A. Tri Wibowo, Kusairi Samlawi, and Akhmad Yani Km, "Pengaruh Proses Quencing Dengan Media Pendingin Air Dan Oli Terhadap Kekerasan Baja Dan Struktur Mikro Baja S45C," vol. 2, pp. 137–148, 2020, [Online]. Available: https://ppjp.ulm.ac.id/journals/index.php/rot

[16] D. Joko Purnomo, S. Jokosisworo, and U. Budiarto, "Analisa Pengaruh Holding Time Tempering Terhadap Kekerasan, Keuletan, Ketangguhan dan Struktur Mikro Pada Baja ST 70," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 07, no. 1, 2019, [Online]. Available: https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval

[17] M. A. Priadi, I. Nyoman, P. Nugraha, and G. Widayana, "Pengaruh Media Pendingin Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Hasil Pengelasan Oxy Acetylene Pada Material Baja ST-37," *Jurnal Jurusan Pendidikan Teknik Mesin (JJPTM)*, vol. 8, no. 2, p. 2017, 2017.

[18] G. D. Haryadi, A. Fredy Utomo, I. Made, and W. Ekaputra, "Pengaruh Variasi Temperatur Quenching dan Media Pendingin terhadap Tingkat Kekerasan Baja AISI 1045," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 16, no. 2, pp. 255–264, 2021, [Online]. Available: https://jurnal.polines.ac.id/index.php/rekayasa

[19] Johana. C C Sekeroney, Nevada. J.M Nanulaita, Frederick Dematacco, Mohammad Anas Fikri, and Ike Dayi Febriana, "Pengaruh Temperature Tempering Terhadap Kekerasan Pada Baja Karbon Sedang Hasil Pengelasan FCAW (Flux-Cored Arc Welding)," *Journal Mechanical Engineering*, vol. 1, Dec. 2023.

[20] T. Daryanto, "Pengaruh Variasi Media Quenching dan Tempering Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Baja AISI 1045," *Jurnal Creative Research in Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 52–62, 2022.

[21] Andini, F. Muhammad, M. Istiana Sari, and S. Joko Raharjo, "Karakterisasi Pektin Ekstrak Bonggol Pisang Kepok (Musa paradisiaca L.)," vol. 3, pp. 40–45, 2022.

[22] T. E. Rahmawati, I. M. Cahyani, and S. Munisih, "Karakterisasi Pati Bonggol Pisang Kepok Kuning (Musa paradisiaca L.) sebagai Bahan Tambahan Sediaan Farmasi," *Jurnal Sains dan Kesehatan*, vol. 5, no. 2, pp. 100–108, Apr. 2023, doi: 10.25026/jsk.v5i2.1658.

[23] S. Septianissa, F. Rohendi, M. Waldi, and Martoni, "Analysis of the Impact of Cooling Medium Temperature on Heat Treatment Properties of AISI 1040 Steel," pp. 17–26, 2024, doi: 10.2991/978-94-6463-618-5_3.

[24] M. Razi, "Pengaruh Variasi Temperatur Dan Media Pendingin Pada Baja AISI 1050 Menggunakan Arang Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Media Pack Carburizing," *Jurnal Mesin Sains Terapan*, vol. 7, pp. 82–87, Sep. 2023.

[25] N. A. Sukarno *et al.*, "Pengaruh Variasi Suhu Terhadap Sifat Kekerasan Baja Aisi 1045 Pada Proses Heat Treatment Dengan Media Pendingin Oli," *Perwira Journal Of Science & Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 78–80, 2024.

[26] Argyabrata, Rochman Rochiem, and Dian Mughni Felicia, "Analisis Pengaruh Variasi Temperatur Dan Waktu Tahan Tempering Pada Proses Hardening Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Material Hamer Crusher," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 7, pp. 113–118, 2018.