

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Berbagai penelitian telah dilakukan mengenai pengaruh media pendinginan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja. Ejiko dkk. (2024) menginvestigasi pengaruh quenching pada baja lunak menggunakan air, oli, dan udara, menemukan bahwa quenching air menghasilkan nilai kekerasan dan kekuatan tarik tertinggi, sementara pendinginan udara menghasilkan material dengan keuletan terbaik. Penelitian tersebut mengonfirmasi bahwa pemilihan media pendingin secara langsung memengaruhi distribusi dan jenis fasa mikro yang terbentuk, yang pada akhirnya menentukan sifat mekanik material.

Hassan dan Almtori (2022) melakukan penelitian pada baja karbon rendah AISI 1020 dengan variasi suhu quenching dan laju pendinginan, menyimpulkan bahwa peningkatan laju pendinginan dari pendinginan furnace hingga pendinginan air meningkatkan kekuatan tarik secara signifikan dari sekitar 400 MPa menjadi di atas 600 MPa, seiring dengan bertambahnya fraksi volume martensit dalam struktur mikro. Temuan ini sangat relevan sebagai landasan teoritis bagi penelitian ini karena baja ST42 memiliki komposisi kimia yang sebanding dengan AISI 1020.

Liang dkk. (2021) mengkaji pengaruh laju pendinginan terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik baja karbon rendah paduan rendah menggunakan teknik EBSD (Electron Backscatter Diffraction). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendinginan udara menghasilkan bainit granular dengan kekuatan tarik menengah dan ketangguhan impact yang tinggi, sementara

pendinginan cepat menghasilkan martensit lamellar dengan kekuatan tarik lebih tinggi namun ketangguhan lebih rendah.

Dari perspektif media pendingin yang lebih beragam, Trihutomo (2023) meneliti pengaruh berbagai media pendingin terhadap sifat mekanik pisau berbahan baja karbon dan menemukan bahwa kombinasi antara media pendingin dan suhu pemanasan yang tepat menghasilkan kekuatan tarik dan ketahanan yang optimal untuk aplikasi alat potong. Sementara itu, Supriyanto dkk. (2023) mengevaluasi baja karbon rendah yang mengalami perlakuan normalizing dan shot peening, menunjukkan bahwa perlakuan termomekanik dapat meningkatkan kekuatan tarik secara bermakna tanpa mengorbankan keuletan.

Radhakrishnan dan Muralidharan (2021) menemukan bahwa pendinginan oli menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan pendinginan udara pada baja paduan C-Cr-Mo-V, mengindikasikan bahwa viskositas oli yang lebih tinggi dari udara masih mampu menghasilkan laju pendinginan yang cukup untuk membentuk fasa yang lebih kuat. De la Rosa dkk. (2024) pada baja karbon rendah AISI 1020 menunjukkan bahwa perlakuan panas pada suhu austenitisasi di atas 850°C menghasilkan martensit yang lebih homogen dan kekuatan tarik yang lebih konsisten, memperkuat relevansi penelitian ini.

Dalam konteks media pendingin berbasis air dengan aditif, Nasir dkk. (2024) menemukan bahwa penambahan senyawa tertentu ke dalam air pendingin dapat mengubah tegangan permukaan dan laju transfer panas secara signifikan, sehingga memengaruhi laju pendinginan efektif dan pembentukan fasa mikro pada baja. Penelitian ini secara tidak langsung mendukung hipotesis bahwa air belerang dapat menghasilkan karakteristik pendinginan yang berbeda dari air biasa akibat senyawa sulfur terlarut. Yu dkk. (2022) dan Zhang dkk. (2022) juga menemukan korelasi positif antara variasi kondisi

quenching dengan kekuatan tarik dan perilaku kelelahan (fatigue) pada berbagai jenis baja.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas media pendinginan konvensional, belum ada studi yang secara khusus membandingkan efek pendinginan menggunakan air belerang, udara, dan oli bekas pada baja ST42 untuk aplikasi pembuatan keris. Penelitian ini bertujuan mengisi celah tersebut dengan menganalisis ketiga media pendinginan secara komparatif melalui pengujian tarik.

2.2 Baja ST42

2.2.1 Jenis Baja ST42

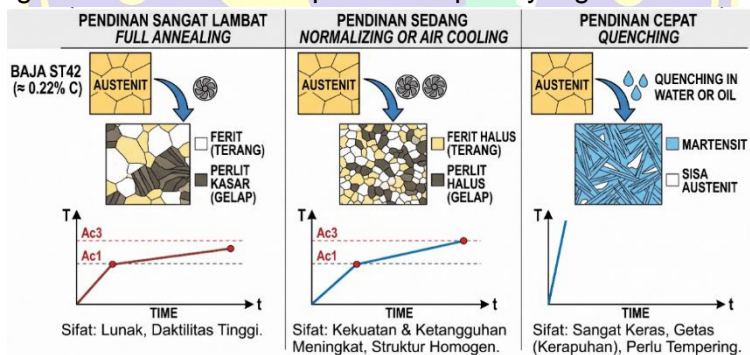
Kode penamaan ST42 mengacu pada standar DIN (Deutsches Institut für Normung) dari Jerman, di mana huruf ST berarti Stahl (baja) dan angka 42 mengacu pada kekuatan tarik minimum sebesar 420 MPa. Dalam standar internasional lain, baja ini setara dengan AISI/SAE 1020-1025 dalam standar Amerika dan SS400 dalam standar JIS Jepang. Komposisi kimia utama baja ST42 meliputi karbon (C) sekitar 0,18-0,23%, mangan (Mn) sekitar 0,30-0,60%, silikon (Si) kurang dari 0,35%, fosfor (P) kurang dari 0,04%, dan sulfur (S) kurang dari 0,05%.

Kandungan karbon di kisaran tersebut menempatkan baja ST42 pada posisi yang menguntungkan untuk proses penempaan dan perlakuan panas. Material ini cukup lunak untuk dibentuk secara plastis pada suhu tinggi, namun memiliki potensi pengerasan yang memadai melalui pembentukan fasa martensit apabila dilakukan pendinginan yang cepat. Unsur mangan berperan penting dalam meningkatkan hardenability dan mencegah kegetasan panas selama proses penempaan, sedangkan silikon berfungsi sebagai deoksidator dan sedikit meningkatkan kekuatan.

2.2.2 Struktur Mikro Baja ST42

Struktur mikro baja ST42 pada kondisi as-received umumnya terdiri dari campuran ferit (ferrite) dan perlit (pearlite). Ferit merupakan fasa besi murni dengan sedikit karbon terlarut dalam kisi BCC (Body-Centered Cubic), bersifat lunak dan ulet, sedangkan perlit merupakan struktur lamellar yang terdiri dari lapisan ferit dan sementit (Fe_3C) yang tersusun bergantian. Setelah mengalami pemanasan di atas suhu kritis A3 (sekitar $850^{\circ}C$ untuk baja dengan kandungan karbon 0,20%), seluruh fasa ferit dan perlit bertransformasi menjadi austenit, yaitu fasa besi dengan kisi FCC (Face-Centered Cubic) yang mampu melarutkan karbon dalam jumlah lebih besar.

Laju pendinginan yang kemudian diterapkan akan menentukan fasa akhir yang terbentuk. Callister dan Rethwisch (2020) menjelaskan bahwa transformasi austenit menjadi martensit terjadi melalui mekanisme geser tanpa difusi (diffusionless transformation), sehingga karbon terperangkap dalam kisi BCT (Body-Centered Tetragonal) yang menghasilkan tegangan kisi tinggi dan peningkatan kekuatan tarik yang signifikan. Pendinginan sangat cepat menghasilkan martensit yang keras, pendinginan sedang menghasilkan bainit dengan keseimbangan sifat yang lebih baik, dan pendinginan lambat menghasilkan kembali campuran ferit-perlit yang ulet.



Gambar 2. 1 Skema transformasi struktur mikro baja ST42 berdasarkan laju pendinginan.
(Sumber: Suratman, R. 1994)

Tabel 2. 1 Hubungan laju pendinginan, struktur mikro, dan sifat mekanik baja ST42

Struktur Mikro	Laju Pendinginan	UTS (MPa)	Elongasi (%)	Keuletan
Martensit	Sangat cepat (>200°C/s)	800-1200	< 5	Rendah (getas)
Bainit	Sedang (50-150°C/s)	600-900	10-20	Menengah
Perlit Halus	Sedang-lambat	450-600	20-30	Menengah-tinggi
Ferit + Perlit Kasar	Lambat (<10°C/s)	380-450	> 25	Tinggi (ulet)

Sumber: Callister dan Rethwisch (2020)

2.3.1 Sifat Mekanik Baja ST42

Sifat mekanik baja ST42 pada kondisi as-received ditentukan oleh komposisi kimia dan proses pembuatannya. Secara umum, baja ST42 memiliki kekuatan tarik ultimate sekitar 420 MPa, kekuatan luluh sekitar 250 MPa, dan elongasi sekitar 24% berdasarkan standar DIN 17100. Modulus elastisitas baja ST42 adalah sekitar 200 GPa, konsisten dengan baja karbon rendah pada umumnya. De la Rosa dkk. (2024) menunjukkan bahwa quenching pada suhu austenitisasi optimal mampu meningkatkan kekuatan tarik baja AISI 1020 dari sekitar 400 MPa menjadi lebih dari 600 MPa, disertai penurunan elongasi akibat terbentuknya martensit.

Tabel 2. 2 Ringkasan karakteristik baja ST42

Parameter	Nilai	Sumber
Standar	DIN 17100 (setara AISI 1020-1025)	DIN

Parameter	Nilai	Sumber
Kekuatan Tarik (UTS)	420 MPa (min)	DIN 17100
Kekuatan Luluh	~250 MPa	DIN 17100
Elongasi	~24%	DIN 17100
Modulus Elastisitas	~200 GPa	Callister & Rethwisch, 2020
Kekerasan	120-140 HB	DIN 17100
Karbon (C)	0,18-0,23%	DIN 17100
Mangan (Mn)	0,30-0,60%	DIN 17100
Silikon (Si)	< 0,35%	DIN 17100
Fosfor (P)	< 0,04%	DIN 17100
Sulfur (S)	< 0,05%	DIN 17100
Suhu Austenitisasi (A3)	~850°C (C~0,20%)	Callister & Rethwisch, 2020

Sumber: DIN 17100; Callister dan Rethwisch (2020)

2.3 Proses Penempaan (Forging)

Proses penempaan atau forging merupakan salah satu metode pembentukan logam yang dilakukan dengan memberikan tekanan tinggi pada material dalam keadaan panas. Penempaan bertujuan untuk memadatkan dan menghaluskan butiran logam (grain refinement) sehingga meningkatkan kekuatan dan ketangguhan material. Dalam konteks pembuatan keris secara tradisional, penempaan dilakukan secara manual oleh empu menggunakan palu tangan.

Penempaan baja ST42 dilakukan pada suhu pemanasan 900°C. Suhu ini dipilih karena berada sekitar 50°C di atas batas kritis A3 untuk baja dengan kandungan karbon 0,20%, sehingga

seluruh material berada dalam fasa austenit yang homogen, lebih lunak, dan mudah dibentuk secara plastis. Callister dan Rethwisch (2020) menjelaskan bahwa suhu austenitisasi yang tepat di atas A3 diperlukan untuk memastikan kelarutan karbon yang merata dalam austenit sebelum pendinginan. Liang dkk. (2021) juga mengonfirmasi bahwa austenitisasi penuh menghasilkan transformasi fasa yang lebih seragam selama pendinginan sehingga sifat mekanik material menjadi lebih konsisten.



*Gambar 2. 2 Proses Penempaan Keris
(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026)*

2.4 Pengujian Material

2.4.1 Uji Kekerasan (Rockwell dan Vickers)

Uji kekerasan merupakan pengukuran ketahanan material terhadap deformasi plastis lokal akibat indentasi. Pada metode Rockwell, nilai kekerasan diperoleh secara langsung dari mesin berdasarkan perbedaan kedalaman penetrasi indenter; skala HRC menggunakan indenter kerucut intan dengan beban 150 kgf untuk material baja yang telah mengalami pengerasan. Uji kekerasan Vickers menggunakan indenter piramida intan dengan

sudut 136° menghasilkan jejak berbentuk bujur sangkar, dengan nilai HV dihitung menggunakan persamaan $HV = 1,8544 \times P/d^2$.

2.4.2 Uji Tarik (Tensile Test)

Uji tarik adalah metode pengujian mekanik paling fundamental untuk mengkarakterisasi sifat mekanik material. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan gaya tarik aksial pada spesimen secara terkontrol hingga terjadi patah, sementara gaya dan perpanjangan dicatat secara kontinu untuk menghasilkan kurva tegangan-regangan (stress-strain curve). Parameter yang diperoleh meliputi: (1) kekuatan tarik ultimate (UTS), yaitu tegangan maksimum sebelum necking, dihitung dengan $UTS = F_{maks}/A_0$; dan (2) persentase perpanjangan (elongasi), yang mengindikasikan keuletan material, dihitung dengan $e\% = ((L_f - L_0)/L_0) \times 100\%$. Callister dan Rethwisch (2020) menegaskan bahwa informasi elongasi bersama dengan UTS memberikan gambaran paling komprehensif mengenai kemampuan suatu material untuk digunakan pada aplikasi yang menerima beban dinamis.

2.5 Mesin Uji Tarik

Mesin uji tarik (Universal Testing Machine, UTM) adalah alat yang digunakan untuk menerapkan gaya tarik aksial pada spesimen secara terkontrol sambil mencatat gaya dan perpanjangan secara kontinu. Dalam penelitian ini, pengujian tarik dilakukan menggunakan mesin UTM yang tersedia di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surabaya (nomor seri 032021001). Mesin ini dilengkapi dengan load cell untuk mengukur gaya yang diterapkan dan perangkat lunak khusus yang merekam dan menampilkan kurva gaya-perpanjangan secara real-time selama pengujian berlangsung.



*Gambar 2. 3 Mesin Uji Tarik (Universal Testing Machine)
(Sumber: Dokumentasi Lab Teknik Mesin UMSurabaya, 2026)*

2.6 Media Pendinginan

Media pendinginan merupakan faktor kritis dalam proses perlakuan panas karena berpengaruh langsung terhadap laju pendinginan dan sifat mekanik akhir material. Mekanisme transformasi fasa selama quenching dapat dijelaskan melalui diagram CCT (Continuous Cooling Transformation). Ketika laju pendinginan melampaui laju kritis, austenit akan bertransformasi menjadi martensit melalui mekanisme geser tanpa difusi. Untuk baja ST42 dengan kandungan karbon 0,20%, suhu awal pembentukan martensit dapat diestimasi sekitar 441°C menggunakan persamaan empiris Andrews.

2.6.1 Udara

Udara adalah media pendingin dengan laju pendinginan paling lambat dengan koefisien konveksi sekitar 5-25 W/m²K, dibandingkan air yang dapat mencapai 500-10.000 W/m²K. Pendinginan udara biasanya digunakan dalam proses normalizing yang bertujuan menghasilkan struktur mikro yang lebih beragam. Liang dkk. (2021) menunjukkan bahwa pendinginan udara pada baja karbon rendah paduan rendah menghasilkan struktur bainit granular yang memberikan

kombinasi kekuatan tarik menengah dengan ketangguhan impak yang jauh lebih tinggi dibanding struktur martensit.

2.6.2 Air Belerang

Air belerang adalah air yang mengandung senyawa belerang terlarut seperti hidrogen sulfida (H_2S), sulfat (SO_4^{2-}), atau thiosulfat, yang biasanya berasal dari mata air vulkanik atau sumber hidrotermal. Penggunaan air belerang sebagai media pendinginan dalam pembuatan senjata tradisional telah dikenal di kalangan pande besi di berbagai daerah di Jawa. Nasir dkk. (2024) mengonfirmasi bahwa aditif kimia dalam media pendingin berbasis air, termasuk senyawa sulfur, secara signifikan memengaruhi kecepatan pendinginan dan karakteristik struktur mikro yang terbentuk pada baja karbon.



Gambar 2. 4 Proses Pendinginan dengan Air Belerang
(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026)

2.6.3 Oli Bekas

Oli bekas merupakan media pendingin yang memiliki laju pendinginan lebih lambat dibandingkan air namun lebih cepat dibandingkan udara. Karena viskositasnya yang lebih tinggi dari air, oli bekas mengurangi risiko retak dan distorsi pada material selama proses pendinginan. Radhakrishnan dan Muralidharan

(2021) menemukan bahwa pendinginan oli menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan pendinginan udara, mengindikasikan bahwa oli masih mampu menghasilkan fraksi martensit atau bainit yang signifikan. Dari sisi ekonomi, penggunaan oli bekas merupakan pemanfaatan kembali limbah industri otomotif yang mudah diperoleh dan berbiaya rendah.



*Gambar 2. 5 Proses Pendinginan dengan Oli Bekas
(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026)*

SURABAYA