



Analisis Pengaruh Variasi Temperatur Austenisasi Pada Proses Quenching Tempering Baja ST37 Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Sebagai Material Poros Propeller

Mario Jonathan¹⁾, Untung Budiarto¹⁾ Sarjito Jokosisworo¹⁾

¹⁾Laboratorium Teknologi Material dan Produksi Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}e-mail :mariojonatan60@gmail.com

Abstrak

Poros propeller merupakan komponen pada kapal yang memiliki peran penting pada proses perpindahan daya dari main engine ketika kapal sedang beroperasi. Proses perpindahan daya yang terjadi menyebabkan poros yang bekerja akan menerima berbagai jenis beban akibat dari berbagai jenis gaya, sehingga diperlukan sifat mekanis dari material yang baik untuk digunakan sebagai material poros propeller. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur austenisasi pada proses quenching tempering pada baja ST 37 terhadap sifat mekanis dan struktur mikro sebagai material poros propeller. Metode yang tepat untuk meningkatkan sifat mekanis pada suatu material adalah dengan memberikan perlakuan panas (*heat treatment*) pada material tersebut, perlakuan panas berupa quenching tempering merupakan metode yang tepat untuk mendapatkan sifat mekanis material berupa kombinasi antara kekuatan dan keuletan. Variasi temperatur austenisasi yang digunakan pada penelitian ini adalah 750°C, 850°C, dan 950°C. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa sifat mekanis dari baja ST 37 setelah melalui proses quenching tempering cenderung mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya temperatur austenisasi yang digunakan. Berdasarkan dari data hasil pengujian, peningkatan sifat mekanis ditunjukkan oleh meningkatnya nilai kekuatan tarik, kekuatan puntir, dan kekerasan pada baja ST 37, serta penurunan sifat kekakuan dari material berupa penurunan nilai modulus young dan modulus geser. Nilai kekuatan tarik, puntir, dan kekerasan meningkat hingga mencapai 544,7 MPa, 114,7 MPa, dan 220,8 Hv pada variasi temperatur austenisasi 950°C. Peningkatan sifat mekanis pada baja ST 37 dikarenakan adanya transformasi struktur mikro pada baja berupa kombinasi antara ferrite dan tempered martensite setelah melalui proses *heat treatment quenching tempering*.

Kata Kunci : ST 37 Stell, Quenching, Tempering, Heat Treatment

1. PENDAHULUAN

Sistem propulsi pada kapal yang sedang beroperasi memiliki tiga komponen utama yaitu, motor penggerak utama (*main engine*), sistem transmisi, dan alat penggerak (*propulsor*). Daya yang dihasilkan dari mesin penggerak utama akan disalurkan menuju *propeller* melalui sistem transmisi dan poros *propeller* akan memiliki peran yang sangat penting dalam penyaluran daya yang dihasilkan dari *main engine*. Poros (*shaft*) yang bekerja akan menerima berbagai jenis beban akibat dari banyaknya bentuk gaya yang bekerja pada saat kapal beroperasi[1], oleh karena itu Biro Klasifikasi Indonesia sebagai badan klasifikasi menetapkan bahwa material yang akan digunakan

sebagai bahan dasar pembuatan poros haruslah melalui proses perlakuan panas (*heat treatment*) terlebih dahulu sebelum digunakan sebagai poros propeller, dengan tujuan untuk mendapatkan sifat material yang tangguh.[2]

Perlakuan panas (*heat treatment*) merupakan suatu metode yang digunakan dengan tujuan untuk mengubah atau memperbaiki sifat mekanis pada suatu material dengan cara mengubah struktur mikro yang ada pada material tersebut dengan mengkombinasikan antara proses pemanasan dan pendinginan pada material tanpa mengubah komposisi kimia yang ada pada material tersebut.

Penelitian sebelumnya yang berkaitan mengenai perlakuan panas (*heat treatment*) pada baja dengan jenis perlakuan *quenching* dan

tempering. Penelitian tersebut menyebutkan bahwa sampel uji yang mendapat perlakuan *tempering* akan menghasilkan peningkatan nilai kekuatan tarik dan kekerasan dibandingkan sampel yang tidak diberikan perlakuan *tempering*, hal ini dikarenakan struktur mikro *tempered martensit* dan *ferrite* yang dihasilkan dari perlakuan panas *tempering* [3]. Selain itu, penelitian lainnya yang berkaitan mengenai perlakuan panas pada baja menyebutkan bahwa nilai kekuatan puntir dari material mengalami peningkatan 114% dibandingkan dengan *raw material* dengan hasil penelitian nilai kekuatan puntir sebesar 1142,87 MPa dengan temperatur austenisasi 850°C[4].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisa mengenai penerapan *heat treatment quenching* dan *tempering* pada baja ST 37 sebagai material poros *propeller*. Pada penelitian ini baja ST 37 akan mendapat perlakuan panas *quenching* dengan menggunakan media pendingin berupa oli. Variasi temperatur austenisasi yang digunakan yaitu 750°C, 850°C, dan 950°C dengan lama waktu penahan selama 30 menit, kemudian baja yang sudah melalui proses *quenching* akan dilanjutkan dengan perlakuan *tempering* dengan temperatur 600°C dengan lama waktu penahanan 1 jam. Setelah baja mendapat perlakuan panas akan dilakukan pengujian struktur mikro dan pengujian sifat mekanis berupa uji tarik, puntir, dan kekerasan untuk mengetahui karakteristik dari baja st 37 sebelum dan sesudah melalui proses *heat treatment*.

2. METODE

2.1. Objek Penelitian

Objek penelitian yang digunakan dalam penelitian ini yaitu baja ST 37. Baja ST 37 mempunyai kandungan karbon sekitar 0,10-0,25 dan tergolong dalam baja karbon rendah, dengan komposisi kimia pada tabel 1.



Gambar 1. Baja ST 37

Tabel 1. Komposisi Kimia Baja ST 37

Kandungan	Komposisi (%)
Karbon (C)	0,25
Silikon (Si)	0,25
Mangan (Mn)	0,4
Fosfor (P)	0,3
Sulfur (S)	0,35

2.2. Heat Treatment

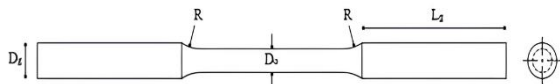
Pada penelitian ini menggunakan 2 jenis perlakuan panas (*heat treatment*) yaitu *quenching* dan *tempering*. *Quenching* merupakan suatu proses peningkatan nilai kekerasan dari suatu logam dengan cara memanaskan logam hingga mencapai temperatur *austenite*, kemudian dilakukan proses pendinginan cepat dengan perpindahan panas (*heat transfer*) menggunakan media pendingin berupa air, larutan garam, oli, dan polimer[5]. Proses pendinginan cepat yang terjadi menghasilkan perubahan struktur mikro pada logam. Struktur mikro yang terbentuk akibat dari proses *quenching* adalah *martensite*.

Tempering merupakan proses pemanasan kembali suatu material yang telah melalui proses *quenching* dengan tujuan untuk menghilangkan tegangan dalam sisa dan mengurangi sifat getas dari material akibat proses austenisasi. Hasil dari proses *tempering* akan menghasilkan sifat material yang ulet (*ductile*). Proses *tempering* sendiri dibagi menjadi 3 yaitu: *tempering* suhu rendah (100-200°C), *tempering* suhu menengah (300-500°C), dan *tempering* suhu tinggi (500-650°C).

Pada penelitian ini akan menggunakan 3 variasi temperatur austenisasi yaitu: 750°C, 850°C, dan 950°C dengan lama waktu penahan 30 menit. Spesimen yang sudah mencapai temperatur austenisasi kemudian akan dilakukan proses *quenching* dengan menggunakan media pendingin berupa oli. Setelah proses *quenching* pada spesimen selesai dilakukan dilanjutkan dengan proses *tempering* dengan menggunakan temperatur tinggi yaitu 600°C dengan lama waktu penahanan yaitu 1 Jam.

2.3. Pengujian Tarik

Pengujian tarik adalah jenis pengujian pada material yang bersifat merusak (*destructive*) dengan tujuan untuk dapat mengetahui nilai dari sifat mekanis pada material tersebut. Pengujian tarik yang dilakukan pada suatu material akan menghasilkan beberapa nilai yang menunjukkan sifat dari material tersebut antara lain: tegangan tarik (σ), regangan tarik (e), dan modulus elastisitas (E). Pengujian tarik pada penelitian ini menggunakan standar ASTM E8[6].



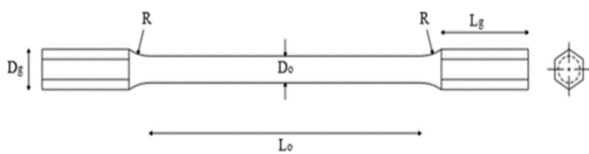
Gambar 2. Spesimen Pengujian Tarik

Tabel 2. Dimensi Spesimen Pengujian Tarik

Keterangan	Dimensi (mm)
D_o	8
L_o	60
R	15
D_g	12
L_g	60

2.4. Pengujian Puntir

Pengujian puntir merupakan suatu metode pengujian pada material yang bersifat merusak (*destructive*) dengan tujuan untuk memperoleh informasi mengenai tegangan geser torsi, torsi maksimum, dan modulus elastisitas geser pada suatu material. Pada umumnya sampel pengujian ditempatkan memanjang dalam alat pengujian dan salah satu ujung sampe diputar mengelilingi sumbu panjang hingga material uji mengalami patahan.



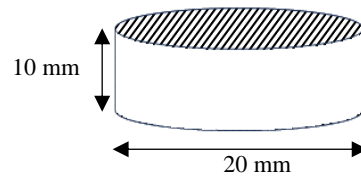
Gambar 3. Spesimen Pengujian Puntir

Tabel 3. Dimensi Spesimen Pengujian Puntir

Keterangan	Dimensi (mm)
D_o	8
L_o	100
R	15
D_g	12
L_g	32

2.5. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui nilai distribusi kekerasan pada material yang diuji. Kekerasan pada material merupakan satu hal yang penting karena nilai kekerasan dari material akan menentukan kemampuan material tersebut untuk menahan penetrasi atau deformasi plastis. Semakin tinggi nilai kekerasan pada material tersebut maka material tersebut akan mampu untuk menerima pembebanan secara gesek maupun penetrasi secara maksimal.



Gambar 4. Spesimen Pengujian Kekerasan

Tabel 4. Dimensi Spesimen Pengujian Kekerasan

Keterangan	Dimensi (mm)
Diameter (d)	20
Thickness(t)	10

2.6. Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro pada baja yang diteliti. Pengujian metalografi yang dilakukan akan menunjukan fasa, ukuran butir kristal dan komposisi dari struktur mikro suatu material. Pengujian metalografi pada penelitian ini akan dilakukan pada baja sebelum dan sesudah mendapat perlakuan panas, dan kemudian akan dilakukan pengamatan dan pengumpulan data menggunakan mikroskop optik. Struktur mikro yang terkandung dari suatu material akan menentukan sifat dari material tersebut dan struktur mikro akan berbeda-beda tergantung dari perlakuan panas yang diberikan kepada material tersebut, sehingga penting untuk dilakukan pengamatan struktur mikro pada suatu material melalui pengujian metalografi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengujian Tarik

Pengujian tarik pada penelitian ini mengacu pada ASTM E8, dan berdasarkan peraturan yang ditetapkan oleh Biro Klasifikasi Indonesia kekuatan tarik untuk material yang akan digunakan sebagai bahan dasar pembuatan sistem poros harus memiliki nilai kekuatan tarik yang berkisar antara 400-800 Mpa, dan terkhusus untuk poros *propeller* nilai kekuatan tarik tidak melebihi 760 MPa.

3.1.1. Tegangan Tarik

Nilai dari tegangan tarik suatu material akan menunjukan seberapa besar tegangan yang dapat ditahan oleh material tersebut sebelum mengalami patahan. Nilai dari tegangan tarik maksimum didapatkan melalui rumus berikut:

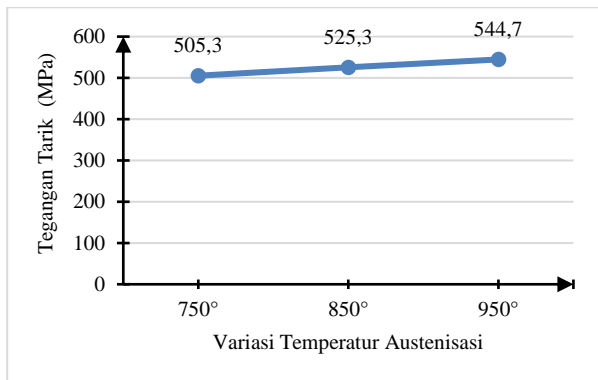
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

- F : Gaya (N)
- A : Luas Penampang (m²)
- σ : Tegangan (N/m²)

Tegangan tarik maksimum pada baja ST 37 sebelum dan sesudah mendapat perlakuan panas *quenching* dan *tempering* pada penelitian penelitian ini dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Data Hasil Tegangan Tarik

Spesimen	Area (mm)	Pmax (KN)	σMax (Mpa)	Standar Deviasi	Rata-rata (Mpa)
Raw	50	21,0	420,0	2,5	416,7
	50	20,7	414,0		
	50	20,8	416,0		
750°C	50	25,2	504,0	5,0	505,3
	50	25,6	512,0		
	50	25,0	500,0		
850°C	50	26,0	520,0	4,1	525,3
	50	26,5	530,0		
	50	26,3	526,0		
950°C	50	27,5	550,0	4,1	544,7
	50	27,2	544,0		
	50	27,0	540,0		



Gambar 5. Grafik Tegangan Tarik

Dari hasil pengujian tarik yang dilakukan pada baja ST 37, spesimen *raw material* memiliki nilai rata-rata tegangan tarik sebesar 416,7 MPa, sedangkan spesimen uji yang sudah melalui proses *quenching tempering* terlihat bahwa nilai tegangan tarik yang dihasilkan meningkat signifikan dibandingkan dengan nilai tegangan tarik dari spesimen uji *raw material*. Pada variasi temperatur 750°C tegangan tarik meningkat sebesar 21,26%, pada temperatur 850°C tegangan tarik meningkat sebesar 26,06%, dan pada variasi temperatur 950°C tegangan tarik meningkat sebesar 30,71%.

Hasil dari penelitian ini didukung juga oleh penelitian sebelumnya yang membahas mengenai hal serupa, yaitu peningkatan nilai tegangan tarik seiring meningkatnya temperatur austenisasi yang digunakan[7].

3.1.2. Regangan Tarik

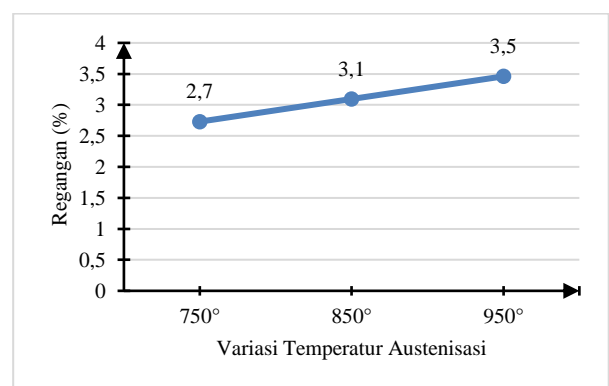
Nilai dari regangan tarik pada suatu material akan menunjukkan seberapa banyak material tersebut mampu untuk merenggang sebelum terjadi patahan ketika gaya tarik diterapkan pada material. Nilai dari regangan tarik akan menunjukkan sifat dari suatu material dilihat dari perubahan panjang yang terjadi terhadap panjang awal material. Nilai dari regangan tarik didapat dari rumus:

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

- e : Regangan (%)
- ΔL : Pertambahan Panjang (mm)
- L₀ : Panjang Awal (mm)

Tabel 6. Data Hasil Regangan Tarik

Spesimen	ΔL (mm)	L ₀ (mm)	Regangan (%)	Rata-rata (%)
Raw	4,5	210,0	2,1	2,0
	4,4	210,0	2,1	
	4,0	210,0	1,9	
750°C	5,5	210,0	2,1	2,7
	6,0	210,0	2,1	
	5,7	210,0	1,9	
850°C	7,0	210,0	3,3	3,1
	6,5	210,0	3,1	
	6,0	210,0	2,9	
950°C	7,0	210,0	3,3	3,5
	6,8	210,0	3,2	
	8,0	210,0	3,8	



Gambar 6. Grafik Regangan Tarik

Dari data hasil pengujian regangan tarik pada baja ST 37 terlihat bahwa, perlakuan *quenching tempering* pada baja meningkatkan kemampuan baja untuk merenggang sebelum mengalami deformasi permanen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kemampuan baja untuk merenggang setelah melalui proses

quenching tempering lebih baik dibanding *raw material*. Pada spesimen *raw material* kemampuan baja untuk merenggang dan kembali ke bentuk semula sebesar 2,0%. Sedangkan pada spesimen yang mendapat perlakuan *quenching tempering* nilai regangan dari material mengalami peningkatan hingga mencapai 3,5% pada variasi temperatur 950°C.

Peningkatan nilai regangan tarik baja pada penelitian ini menunjukkan bahwa setelah melalui proses *quenching tempering* sifat keuletan (*ductility*) dari material tersebut semakin baik sehingga menyebabkan material tersebut mampu untuk merenggang dan memungkinkan material tersebut kembali ke bentuk semula setelah mengalami pembebanan tarik[8].

3.1.3. Modulus Elastisitas

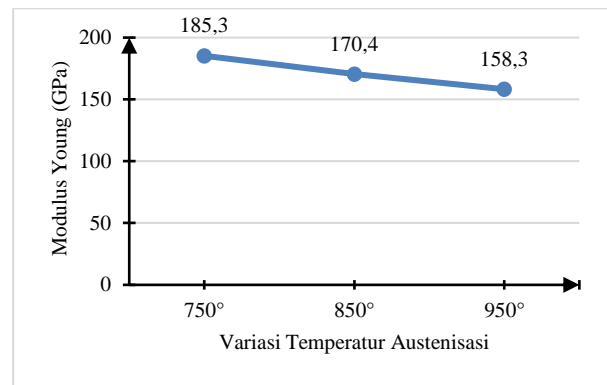
Modulus elastisitas pada pengujian tarik akan menunjukkan ukuran dari nilai kekakuan suatu material. Modulus elastisitas didapat melalui perbandingan antara tegangan tarik maksimum terhadap regangan tarik.

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad (3)$$

- E : Modulus Elastisitas (Gpa)
- σ : Tegangan Maksimu (Mpa)
- e : Regangan (%)

Tabel 7. Data Hasil Modulus Elastisitas

Spesimen	σ Tegangan (MPa)	e (%)	E (GPa)	e Rata- rata (GPa)
Raw	420,0	2,1	196,0	204
	414,0	2,1	197,6	
	416,0	1,9	218,4	
750°C	504,0	2,6	192,4	185,3
	512,0	2,9	179,2	
	500,0	2,7	184,2	
850°C	520,0	3,3	156,0	170,4
	530,0	3,1	171,2	
	526,0	2,9	184,1	
950°C	550,0	3,3	165,0	158,3
	544,0	3,2	168,0	
	540,0	3,8	141,8	



Gambar 7. Grafik Modulus Elastisitas

Perbandingan nilai modulus elastisitas dari data hasil pengujian tarik yang dilakukan menunjukkan bahwa perlakuan *quenching tempering* yang diberikan pada baja ST 37 mengubah sifat kekakuan dari *raw material* baja ST 37. Spesimen pengujian *raw material* baja ST 37 memiliki nilai modulus elastisitas sebesar 204 GPa, sedangkan spesimen pengujian *quenching tempering* dengan variasi temperatur austenitasi 750°C, 850°C, dan 950°C memiliki nilai modulus elastisitas yang semakin rendah dengan nilai modulus elastisitas sebesar 185,3 Gpa, 170,4 GPa, dan 158,3 GPa.

3.1.4. Poisson Rasio

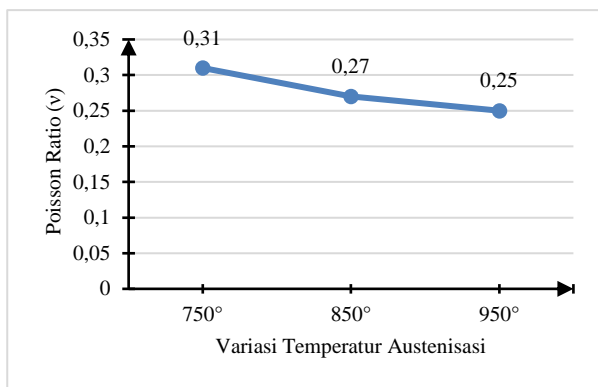
Poisson Rasio (ν) merupakan ukuran yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antara regangan aksial dengan regangan lateral pada suatu material ketika mengalami deformasi plastis. Poisson ratio akan menentukan seberapa banyak material akan menyusut atau melebar di arah tegak lurus terhadap gaya yang diterapkan.

$$\nu = \frac{e_{lateral}}{e_{aksial}} \quad (4)$$

- ν : Rasio Poisson
- e lateral* : Regangan Lateral
- e aksial* : Regangan Aksial

Tabel 8. Data Hasil Poisson Rasio

Spesimen	E Lateral	e aksial	Poisson Rasio	Rata-rata
Raw	0,5	2,1	0,25	0,26
	0,6	2,1	0,27	
	0,5	1,9	0,27	
750°C	0,9	2,6	0,33	0,31
	0,8	2,9	0,29	
	0,9	2,7	0,31	
850°C	0,9	3,3	0,25	0,27
	0,8	3,1	0,26	
	0,8	2,9	0,29	
950°C	0,9	3,3	0,25	0,25
	0,9	3,2	0,26	
	0,9	3,8	0,23	



Gambar 8. Grafik Poisson Rasio

Dari data hasil pengujian menunjukkan perbandingan nilai dari poisson ratio dari setiap variasi pengujian. Dari perbandingan nilai poisson ratio menunjukkan bahwa setiap spesimen material uji memiliki perbandingan nilai deformasi lateral yang relatif terhadap deformasi aksial saat gaya diterapkan. Pada spesimen raw material, nilai dari poisson ratio menunjukkan angka 0,26. Pada variasi 750°C nilai dari poisson ratio meningkat menjadi 0,31, pada variasi 850°C nilai dari poisson ratio sebesar 0,27, dan pada variasi 950°C nilai dari poisson ratio sebesar 0,25.

3.2. Pengujian Puntir

Pengujian puntir yang dilakukan pada penelitian ini mengacu pada standar ASTM E143[9]. Pengujian dilakukan dengan membandingkan kekuatan puntir dari raw material dengan material yang sudah mendapat perlakuan panas *quenching* dan *tempering*. Dari pengujian puntir yang dilakukan didapatkan hasil berupa momen puntir, sudut puntir maksimum, dan tegangan geser / kekuatan puntir maksimum dari baja ST 37.

3.2.1. Momen Puntir

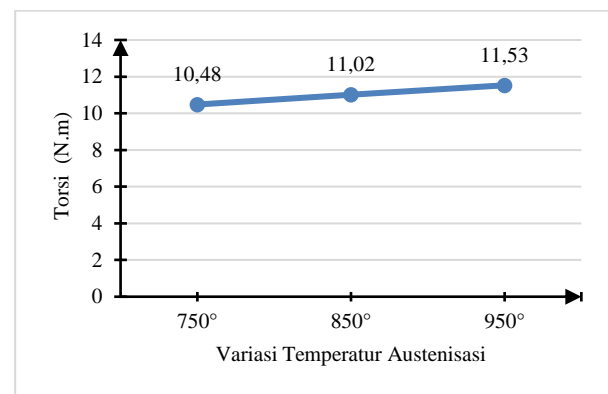
Nilai dari momen puntir dari hasil pengujian pada penelitian ini digunakan untuk mengidentifikasi kekuatan batas beban yang dapat ditoleransi oleh suatu material sebelum mengalami kegagalan. Nilai dari momen puntir didapat dari rumus:

$$T = F \cdot r \quad (5)$$

- T : Momen Puntir (Nm)
- F : Gaya (N)
- r : Jarak lengan (m)

Tabel 9. Data Hasil Momen Puntir

Spesimen	Max Force (Kg-m)	Max Force (N)	T (N.m)	Standar Deviasi	Rata-rata (N.m)
Raw	4,32	42,38	8,22	0,09	8,30
	4,42	43,36	8,41		
	4,35	42,67	8,28		
750°C	5,55	54,45	10,56	0,18	10,48
	5,57	54,64	10,60		
	5,40	52,97	10,27		
850°C	5,82	57,09	11,07	0,05	11,02
	5,76	56,50	10,96		
	5,79	56,80	11,02		
950°C	6,03	59,15	11,47	0,15	11,53
	6,15	60,33	11,70		
	6,00	58,86	11,41		



Gambar 9. Grafik Momen Puntir

Dari data hasil pengujian yang sudah dilakukan dapat dilihat bahwa, nilai dari momen puntir yang dari setiap variasi spesimen uji memiliki nilai momen puntir yang berbeda. Spesimen uji yang sudah mendapat perlakuan *quenching* *tempering* memiliki momen puntir yang lebih tinggi dibandingkan spesimen uji raw material. Pada variasi temperatur austenisasi 750°C nilai dari momen puntir spesimen uji mengalami kenaikan sebesar 26,20% dengan rata-rata momen puntir dari spesimen uji 10,48 N.m, pada variasi temperatur 850°C rata-rata momen

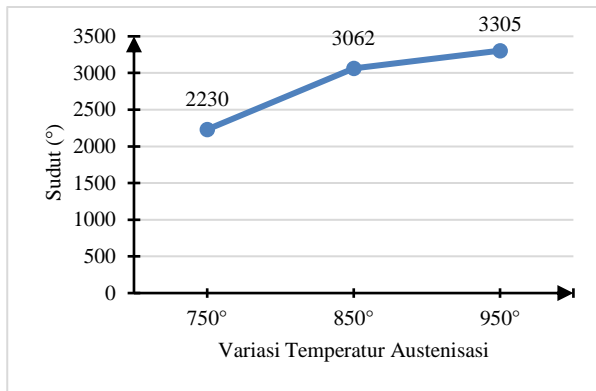
puntir meningkat sebesar 32,69% dengan rata-rata momen puntir 11,02 N.m, dan variasi temperatur 950°C juga mengalami peningkatan sebesar 38,88% dengan rata-rata momen puntir 11,53 N.m.

3.2.2. Sudut Puntir

Sudut puntir yang dihasilkan dari penelitian ini akan menunjukkan seberapa banyak putaran akibat momen puntir yang diberikan. Sudut puntiran akan memberikan gambaran kemampuan material untuk menahan deformasi putar yang terjadi pada material sebelum material tersebut mengalami kegagalan/patah.

Tabel 10. Data Hasil Pengujian Sudut Puntir

Spesimen	Sudut Puntir	Rata-rata Sudut Puntir Max
Raw	413°	448°
	706°	
	472°	
750°C	2286°	2230°
	2304°	
	2102°	
850°C	3127°	3062°
	3012°	
	3049°	
950°C	3390°	3305°
	3383°	
	3143°	



Gambar 10. Grafik Sudut Puntir

Dari data hasil pengujian, didapatkan hasil bahwa sudut puntir maksimum dari baja meningkat setelah melalui proses *quenching tempering*. Pada *raw material* spesimen baja ST 37, sudut puntir maksimum sebelum spesimen mengalami patah yaitu 448°. Pada spesimen yang melalui proses *quenching tempering* dengan variasi temperatur austenisasi 750°C, 850°C, dan 950°C sudut puntir yang dihasilkan sebelum material patah pada saat pengujian mengalami peningkatan sudut puntir yang signifikan. Hal ini menandakan bahwa,

perlakuan *quenching tempering* pada baja ST 37 meningkatkan sifat mekanis material yaitu sifat mekanis ulet (*ductile*) dan juga tangguh sehingga menyebabkan material mampu untuk deformasi torsi dengan lebih baik sebelum mengalami patah.

3.2.3. Tegangan Geser Maksimum

Tegangan geser merupakan tegangan yang terjadi pada material akibat pembebanan torsi yang terjadi pada suatu material. Tegangan geser penting untuk menganalisis kekuatan dan deformasi material pada poros. Nilai dari tegangan geser pada pengujian puntir didapatkan melalui rumus.

$$\tau_g = \frac{16 \cdot T_{max}}{\pi d^3} \quad (6)$$

τ_g : Tegangan geser (Mpa)

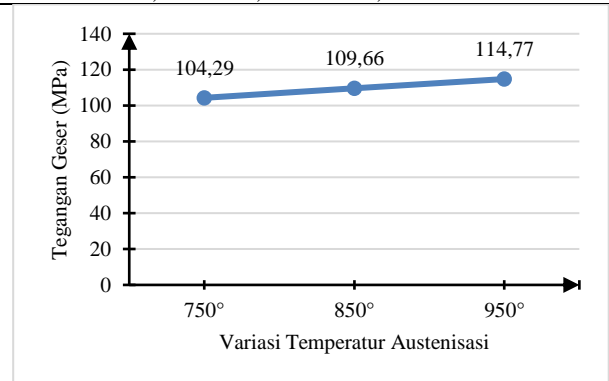
T_{max} : Momen Puntir (N.m)

π : 3.14

d : Jari-jari (mm)

Tabel 11. Data Hasil Pengujian Tegangan Geser

Spesimen	Max Force (N)	T (N.m)	Tg (MPa)	Standar Deviasi	Rata-rata (N.m)
Raw	42,38	8,22	81,82	0,96	82,64
	43,36	8,41	83,71		
	42,67	8,28	82,39		
750°C	54,45	10,56	105,12	1,76	104,29
	54,64	10,60	105,49		
	52,97	10,27	102,27		
850°C	57,09	11,07	110,23	0,57	109,66
	56,50	10,96	109,09		
	56,80	11,02	109,66		
950°C	59,15	11,47	114,21	1,50	114,77
	60,33	11,70	116,48		
	58,86	11,41	113,64		



Gambar 11. Grafik Tegangan Geser

Berdasarkan data hasil pengujian puntir yang dilakukan, proses *quenching tempering* pada

baja ST 37 menunjukkan bahwa, *heat treatment* yang diberikan pada baja mempengaruhi nilai tegangan geser dari material. Baja ST 37 yang tidak mendapat perlakuan *quenching tempering* memiliki tegangan geser maksimum sebesar 82,64 MPa. Pada baja yang mendapat perlakuan *quenching tempering*, nilai tegangan geser mengalami peningkatan. Pada variasi temperatur austenisasi 750°C nilai tegangan geser maksimum mencapai 104,29 MPa, dengan nilai tegangan geser tersebut menunjukkan bahwa nilai tegangan geser maksimum pada baja meningkat sebesar 26,20%. Pada variasi temperatur 850°C dan 950°C juga menunjukkan peningkatan, dengan nilai tegangan geser mengalami peningkatan sebesar 32,69% dan 38,88%.

3.2.4. Modulus Geser

Modulus geser merupakan ukuran kekakuan material ketika mengalami deformasi geser. Modulus geser digunakan untuk mengukur seberapa banyak suatu material akan menerima perubahan bentuk ketika menerima gaya geser.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (7)$$

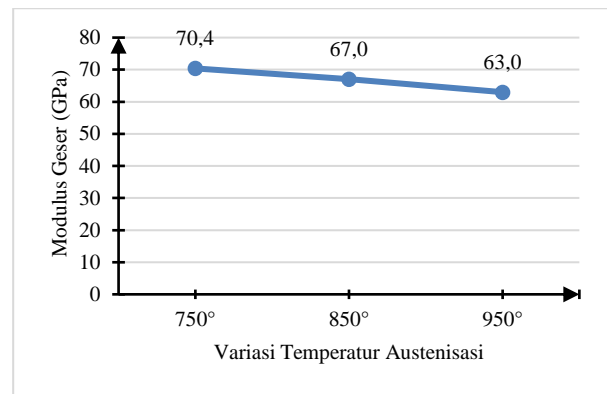
G : Modulus Geser (GPa)

E : Modulus Young (Gpa)

ν : Poisson Rasio

Tabel 12. Data Hasil Pengujian Modulus Geser

Spesimen	E	Poisson Rasio	G	Rata-rata (GPa)
Raw	196,0	0,25	78,3	80,6
	197,6	0,27	77,9	
	218,4	0,27	85,6	
750°C	192,4	0,33	72,1	70,4
	179,2	0,29	69,3	
	184,2	0,31	69,9	
850°C	156,0	0,25	62,2	67,0
	171,2	0,26	67,6	
	184,1	0,29	71,2	
950°C	165,0	0,25	65,2	63,0
	168,0	0,26	66,1	
	141,8	0,23	57,6	



Gambar 12. Grafik Modulus Geser

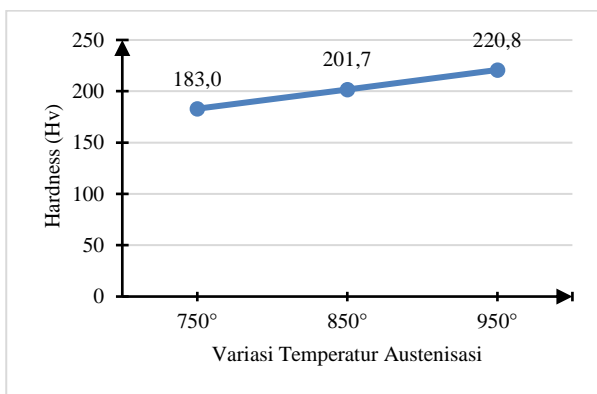
Perbandingan nilai modulus geser dari data hasil pengujian puntir yang dilakukan menunjukkan bahwa perlakuan panas *quenching tempering* yang diberikan pada baja ST 37 mengubah sifat kekakuan dari raw material baja ST 37. Spesimen pengujian raw material baja ST 37 memiliki nilai modulus puntir sebesar 80,64 GPa, sedangkan spesimen pengujian *quenching tempering* dengan variasi temperatur austenisasi memiliki nilai modulus geser yang lebih rendah dibandingkan dengan raw material. Pada variasi temperatur austenisasi 750°C nilai modulus puntir mengalami penurunan mencapai 70,4 GPa, nilai modulus puntir pada variasi temperatur 850°C dan 950°C juga semakin mengalami penurunan dibandingkan dengan variasi 750°C dan raw material dengan nilai modulus puntir sebesar 67 dan 63 GPa.

3.3. Pengujian Kekerasan

Pengujian nilai kekerasan pada spesimen penelitian ini menggunakan standard ASTM E384 *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*[10]. Pengujian dilakukan dengan memberikan indentasi dengan pembebanan 1000 kgf pada 4 sampel uji dengan jumlah indentasi sebanyak 3 kali indentasi pada tiap sampel uji dan titik uji yang digunakan secara acak, serta waktu indentasi selama 15 detik.

Tabel 13. Data Hasil Pengujian Kekerasan

Variasi	Spesimen	Nilai Kekerasan (Hv)	Rata-rata (Hv)
Raw Material	1	144	145,2
	2	146	
	3	145	
	4	146	
750°C	1	184	183
	2	182	
	3	183	
	4	183	
850°C	1	201,7	201,7
	2	203	
	3	200,3	
	4	201,7	
950°C	1	221	220,8
	2	220,3	
	3	222	
	4	220	



Gambar 13. Grafik Nilai Kekerasan

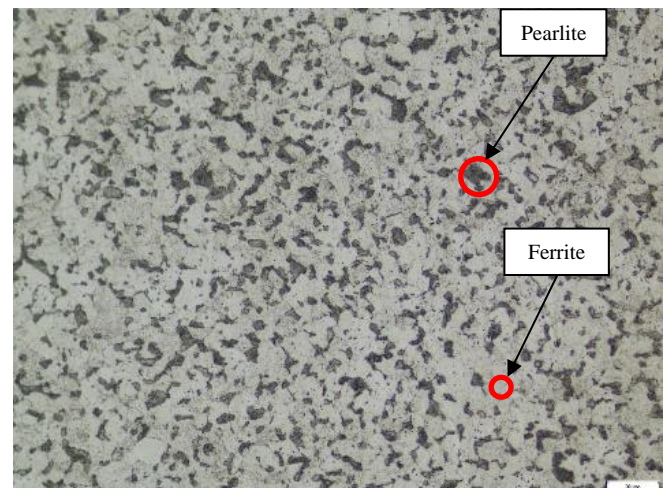
Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian, nilai kekerasan vickers pada spesimen uji yang sudah mendapat perlakuan panas quenching tempering menunjukkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai kekerasan raw material. Pada temperatur austenisasi 750°C nilai kekerasan mengalami peningkatan sebesar 26,03% dari raw material dengan rata-rata nilai kekerasan 183 Hv, pada temperatur 850°C nilai kekerasan meningkat sebesar 38,91% dari raw material dengan rata-rata nilai sebesar 201,7 Hv, dan pada temperatur 950°C nilai kekerasan meningkat sebesar 52,06% dengan rata-rata nilai kekerasan 220,8 Hv.

Nilai pengujian kekerasan pada penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur pemanasan yang digunakan pada proses austenisasi maka akan menyebabkan nilai kekerasan baja juga semakin meningkat. Hal ini juga didukung oleh penelitian sebelumnya yang membahas mengenai variasi temperatur pada proses *quenching* baja S45C dengan hasil penelitian menyatakan bahwa

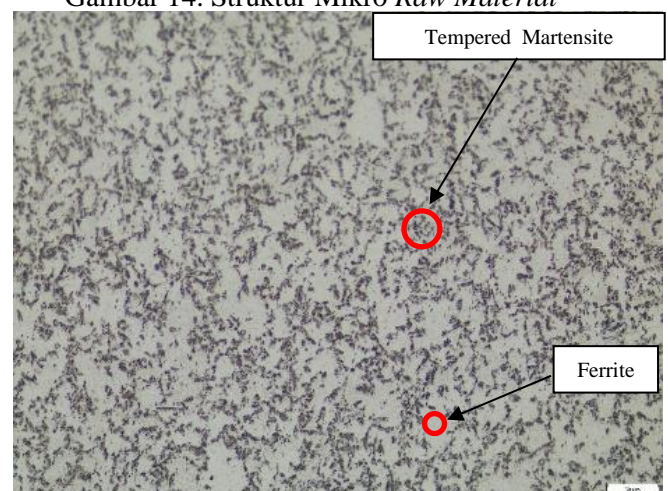
semakin tinggi temperatur pemanasan maka semakin tinggi pula nilai kekerasan material yang dihasilkan[11].

3.4. Pengujian Metalografi

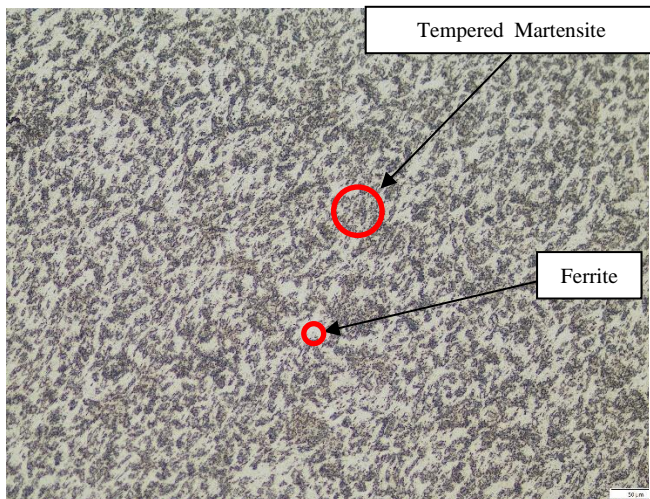
Pada penelitian ini pengujian metalografi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui fasa yang terbentuk pada struktur mikro pada setiap spesimen uji dengan variasi temperatur pemanasan 750°C, 850°C, dan 950°C, kemudian dibandingkan dengan struktur mikro dari spesimen *raw material*. Fasa pada struktur mikro suatu material akan berhubungan dengan sifat mekanis dari material tersebut, tiap fasa yang terbentuk pada struktur mikro memiliki karakteristik yang berbeda sehingga menghasilkan sifat material yang berbeda juga. Fasa yang terbentuk pada struktur mikro suatu baja akan berbeda berdasarkan perlakuan panas (*heat treatment*) yang diberikan pada baja tersebut.



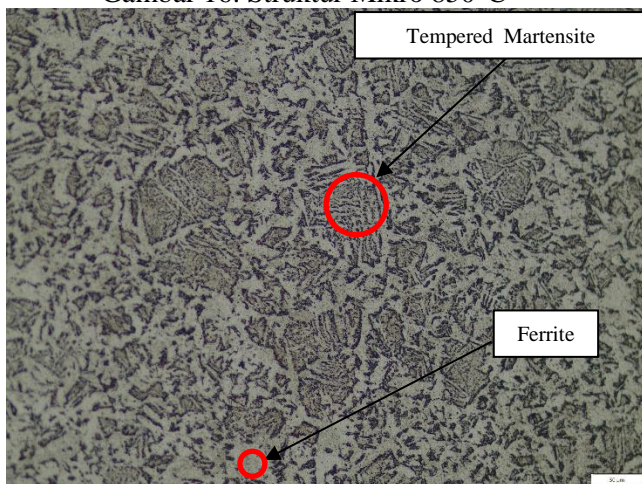
Gambar 14. Struktur Mikro Raw Material



Gambar 15. Struktur Mikro 750°C



Gambar 16. Struktur Mikro 850°C



Gambar 17. Struktur Mikro 950°C

Dari hasil pengujian metalografi yang dilakukan pada baja ST 37 menunjukkan bahwa struktur mikro pada baja yang melalui proses perlakuan panas akan mengalami transformasi fasa yang menyebabkan perubahan struktur mikro pada baja dan mengubah sifat mekanis baja tersebut. Fasa *austenite* bisa dicapai ketika suatu baja menerima perlakuan panas dengan temperatur diatas 727°C. Ketika baja yang mencapai temperatur austenite didinginkan secara cepat, struktur *ferrite* dan *pearlite* pada baja akan bertransformasi menjadi struktur *ferrite* dan *martensite*. Struktur penyusun yang mengalami transformasi pada baja akan mempengaruhi sifat mekanis pada baja tersebut. Struktur *martensite* yang terbentuk akan menghasilkan sifat mekanis baja yang keras dan getas (*brittle*), sehingga perlu penyesuaian kembali yaitu dengan perlakuan *tempering*. Proses *tempering* dilakukan dengan memanaskan kembali baja dengan temperatur dibawah temperatur kritis baja tersebut lalu didinginkan dengan menggunakan temperatur ruangan.

Baja yang dipanaskan kembali akan menghasilkan sifat material yang lebih baik

dikarenakan berkurangnya tegangan dalam sisa (*residual stress*) pasca perubahan fasa yang terjadi begitu cepat. Baja yang melalui proses *tempering* akan menghasilkan struktur *tempered martensite* yang memiliki struktur yang lebih halus dari martensite dengan sifat mekanis berupa kombinasi antara kekerasan dan ketangguhan material.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang dilakukan pada baja ST 37 dengan menganalisis sifat mekanis serta struktur mikro dari spesimen yang mendapatkan perlakuan panas (*heat treatment*) berupa *quenching* dan *tempering*, dengan demikian dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari hasil pengujian yang dilakukan pada baja ST 37 setelah melalui proses *quenching tempering* dengan variasi temperatur 750°C, 850°C, dan 950°C. Sifat mekanis dari material berupa kekuatan tarik, kekuatan puntir dan kekerasan pada baja ST 37 cenderung mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya temperatur austenisasi yang digunakan, dan sifat mekanis berupa sifat kekakuan material berupa modulus young dan modulus geser cenderung mengalami penurunan seiring meningkatnya temperatur austenisasi yang digunakan.
2. Perubahan struktur mikro yang terjadi pada variasi temperatur austenisasi 750°C, 850°C, dan 950°C menunjukkan bahwa transformasi struktur mikro yang semula *ferrite* dan *pearlite* menjadi *ferrite* dan *tempered martensite* setelah melalui proses *quenching tempering*. Transformasi struktur mikro dari baja ST 37 menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur austenisasi yang digunakan maka hasil dari transformasi struktur berupa *tempered martensite* akan cenderung memiliki butiran yang semakin besar dan dominan.
3. Berdasarkan data dari hasil pengujian pada penelitian ini, proses *quenching tempering* pada baja ST 37 dengan variasi temperatur austenisasi 750°C, 850°C, dan 950°C memiliki kekuatan tarik sebesar 505,3 MPa, 525,3 MPa, dan 544,7 MPa. Dengan demikian baja ST 37 yang telah melalui proses *heat treatment* sudah memenuhi standar Biro Klasifikasi Indonesia Vol III (*Rules for Machinery Installations*) sebagai

material poros *propeller*. Rules BKI Vol III menyebutkan bahwa material yang akan digunakan sebagai poros haruslah material yang sudah mendapat perlakuan panas (*heat treatment*) dan memiliki kekuatan tarik berkisar diantara 400-800 MPa, terkhusus untuk poros *propeller* nilai kekuatan tarik material haruslah tidak melebihi 760 MPa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. S. Carlton, "Marine Propellers and Propulsion", Second edition. UK: Elsevier Ltd, 2007.
- [2] P. Klasifikasi, K. Bagian, and K. Samudra, "Peraturan Instalasi Mesin Edisi Konsolidasi 2022 Biro Klasifikasi Indonesia," 2022.
- [3] D. A. Fadare, T. G. Fadara, and O. Y. Akanbi, "Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of NST 37-2 Steel," 2011.
- [4] D. Setiawan, and U. Budiarto "Analisi. Kekuatan Tarik, Kekuatan Puntir, Kekerasan Dan Sturktur Mikro Baja, Setelah Dilakukan Proses Quenching Sebagai Alternatif Gearbox Kapal Perikanan," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 11, no. 2, p. 59, 2023,
- [5] R. Purwanto, *Perlakuan Bahan*, Perdana., vol. 1. Malang: Polinema Press, 2016. Accessed: Oct. 07, 2023.
- [6] "ASTM E8/E8M 'Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials'", doi: 10.1520/E0008_E0008M-13A.
- [7] B. Deng, D. Yang, G. Wang, Z. Hou, and H. Yi, "Effects of austenitizing temperature on tensile and impact properties of a martensitic stainless steel containing metastable retained austenite," *Materials*, vol. 14, no. 4, pp. 1–20, Feb. 2021.
- [8] A. Çalık, O. Dokuzlar, and N. Uçar, "The effect of heat treatment on mechanical properties of 42crmo4 steel," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 98, no. 1, pp. 5–10, 2020.
- [9] "ASTM E143 'Standard Test Method for Shear Modulus at Room Temperature.'"
- [10] "ASTM E384 'Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials'"
- [11] A. Tama, "Analisa Kekuatan Tekuk, Kekuatan Puntir, dan Kekerasan Baja S45C Dengan Variasi Temperatur Quenching," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 8, no. 3, pp. 1-12, 2020