

**PENGARUH PERLAKUAN PANAS *SINGLE* DAN *DOUBLE*
QUENCHING-TEMPERING TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN
SIFAT MEKANIK BAJA JIS SUP 9A**

TESIS

Oleh:

**ANDREAS LUKI INDRATMOKO
NPM 2125021005**



**MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRACT

THE EFFECT OF SINGLE AND DOUBLE QUENCHING-TEMPERING HEAT TREATMENT ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF JIS SUP 9A STEEL

By

ANDREAS LUKI INDRATMOKO

An investigation was conducted to determine each parameter resulting from microstructural engineering under hot forging conditions, JIS SUP 9A leaf spring steel with chemical composition in % by weight: 0.5597C, 0.3540Si, 0.9111Mn, 0.0557Cu, 0.0290N, 0.0088Al, Fe- balanced, subjected to full annealing (FA), one- and two-step quenching (SQT) and (DQT) heat treatment. Tensile test specimens to ASTM E 8 standards have been prepared. The FA process was carried out by heating all samples in a furnace at a constant temperature of 800°C for 2 hours, followed by cooling in the furnace. Then, all specimens were heat treated with SQT and continued with DQT. The SQT and DQT processes were respectively carried out by heating all samples in a furnace at 800°C for 1 hour and 650°C for 1 hour, followed by immersion in crude palm oil (CPO) medium at a liquid temperature of 70°C until the test object reaches a temperature of 100°C. The FA process eliminates internal stresses with high microstructural softness, SQT, and DQT produce finer martensitic phase microstructures, which increase the mechanical strength (tensile strength and impact strength) with good elasticity. Scanning electron microscopy has been used to determine the concentration of impurities and microstructural changes in the mechanical properties of the specimens concerned. The results showed that the yield limit, maximum tensile stress, impact energy, and hardness increased by 113.5%, 16.3%, 705.2%, and 33% for DQT specimens on FA after heat treatment, respectively. In the future, it will be an alternative solution to environmental problems. The abundant availability of raw materials and the resulting toughness are the main advantages of this research.

Keywords: Leaf spring steel, single and double quenching tempering, crude palm oil, mechanical strength.

ABSTRAK

PENGARUH PERLAKUAN PANAS *SINGLE* DAN *DOUBLE* *QUENCHING-TEMPERING* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK BAJA JIS SUP 9A

Oleh

ANDREAS LUKI INDRATMOKO

Penyelidikan dilakukan untuk mengetahui masing-masing parameter hasil rekayasa struktur mikro dibawah kondisi penempaan panas, baja pegas daun JIS SUP 9A dengan komposisi kimia dalam %berat: 0.5597C, 0.3540Si, 0.9111Mn, 0.0557Cu, 0.0290N, 0.0088Al, Fe-seimbang, dikenai perlakuan panas anil penuh (FA), pendinginan satu dan dua langkah (SQT) dan (DQT). Spesimen uji tarik dengan standar ASTM E 8 telah disiapkan. Proses FA dilakukan dengan memanaskan semua sampel di dalam tanur suhu konstan 800°C selama 2 jam, dilanjutkan pendinginan di dalam tanur. Kemudian, semua specimen diberi perlakuan panas SQT dan dilanjutkan DQT. Proses SQT dan DQT masing-masing dilakukan dengan memanaskan semua sampel dalam tanur pada suhu 800°C selama 1 jam dan 650°C selama 1 jam, dilanjutkan dengan perendaman dalam media minyak sawit mentah (CPO) pada suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C. Proses FA menghilangkan tegangan internal dengan kelembutan struktur mikro yang tinggi, SQT dan DQT menghasilkan struktur mikro fasa martensit yang semakin halus, yang meningkatkan kekuatan mekanik (kekuatan tarik dan kekuatan impak) dengan elastisitas yang baik. Mikroskop elektron pemindaian telah digunakan untuk mengetahui konsentrasi pengotor dan perubahan struktur mikro pada sifat mekanik specimen yang bersangkutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa batas luluh, tegangan tarik maksimum, energi impak, dan kekerasan meningkat masing-masing sebesar 113,5%, 16,3%, 705,2%, dan 33% untuk specimen DQT terhadap FA setelah perlakuan panas. Kedepan akan menjadi solusi alternatif bagi permasalahan lingkungan. Ketersediaan bahan baku yang melimpah dan ketangguhan yang dihasilkan merupakan keunggulan utama dari penelitian ini.

Kata kunci: Leaf spring steel, single dan double quenching tempering, crude palm oil, kekuatan mekanik.

**PENGARUH PERLAKUAN PANAS *SINGLE* DAN *DOUBLE*
QUENCHING-TEMPERING TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN
SIFAT MEKANIK BAJA JIS SUP 9A**

Oleh:

ANDREAS LUKI INDRATMOKO

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK**

Pada

**Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

**JUDUL TESIS : PENGARUH PERLAKUAN PANAS
SINGLE DAN DOUBLE QUENCHING-
TEMPERING TERHADAP STRUKTUR
MIKRO DAN SIFAT MEKANIK BAJA
JIS SUP 9A**

Nama Mahasiswa : Andreas Luki Indratmoko

Nomor Pokok Mahasiswa : 2125021005

Program Studi : Magister Teknik Mesin

Fakultas : Teknik



Prof. M. Badaruddin, ST., M.T., Ph.D. Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D. IPU
NIP. 197212111998031002 NIP. 197008122001121001

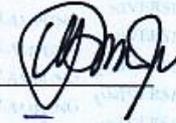
2. Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin

Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP.1961108261987021001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Prof. Moh. Badaruddin, ST., M.T., Ph.D**



Anggota Penguji : **Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D. IPU**



Penguji Utama I : **Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met.**



Penguji Utama II : **Prof. DR. Sugiyanto, M.T., DR., Prof., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP. 19750928 200112 1 002

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.

NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : **17 Mei 2023**

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Andreas Luki Indratmoko
NPM : 2125021005
Fakultas : Teknik
Jurusan : Teknik Mesin
Program Studi : Magister Teknik Mesin

Menyatakan bahwa tesis dengan judul **“PENGARUH PERLAKUAN PANAS SINGLE DAN DOUBLE QUENCHING-TEMPERING TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK BAJA JIS SUP 9A”** adalah karya saya sendiri dan bukan hasil plagiat sebagaimana diatur didalam Pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010.

Bandar Lampung, 29 Mei 2023

Yang membuat pernyataan, .



Andreas Luki Indratmoko

NPM. 2125021005

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Baturaja, Sumatera Selatan pada tanggal 08 September 1976, sebagai putra pertama dari tiga bersaudara, dari pasangan bapak (alm) Thomas Yuprpto dan ibu (alm) Patricia Tumilah.

Pendidikan diawali Taman Kanak-kanak (TK) Xaverius II Baturaja diselesaikan tahun 1983, Sekolah Dasar (SD) diselesaikan di SD Xaverius II, Baturaja pada tahun 1989. Sekolah Menengah Pertama (SMP) diselesaikan di SMP Xaverius I Baturaja tahun 1992, dan Sekolah Menengah Umum (SMU) di SMUN 2 Surakarta, Jawa Tengah pada tahun 1995. Pada tahun 1998 penulis menyelesaikan pendidikan Diploma III (Ahli Madya) dari Akademi Teknik Mesin Industri, Surakarta.

Pada tahun 2014 diterima untuk menjadi dosen di Politeknik Sugar Group Companies di Bandar Mataram, Lampung Tengah dan diberikan beasiswa untuk melanjutkan jenjang Sarjana (S1) di jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Metro dan selesai tahun 2016. Kemudian untuk persyaratan dan peningkatan fungsi dan tugas maka tahun 2021 diberikan beasiswa lagi untuk melanjutkan jenjang Sarjana Strata 2 (S2) di jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Lampung.

PERSEMBAHAN

Tesis ini penulis persembahkan kepada :

1. Monica Dhiyan Kusuma Edy, istriku yang tersayang dan anak Marie Patricia Chintya Mutiara Kyan Asmara juga Steven Dicky Putra Perdana yang telah memberikan banyak perhatian dan pengorbanan dalam menyelesaikan Tesis ini.
2. Ibu Purwati Lee Couhault selaku pemilik dari Sugar Group Companies yang telah memberikan beasiswa penuh pada program S2 Teknik Mesin ini.
3. Bapak dan ibu dosen yang telah banyak membantu sehingga tesis ini dapat selesai.
4. Terima kasih kepada bapak Prof. Moh. Badaruddin, ST., M.T., Ph.D dan bapak Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D. IPU yang ikhlas meluangkan waktu untuk membimbing sehingga tesis ini dapat selesai.
5. Teman-teman angkatan pada umumnya dan khususnya teman-teman dari program beasiswa Sugar Group yang selalu memberikan motivasi.
6. Almamater ku Universitas Lampung

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis ucapkan kepada ALLAH BAPA, ALLAH PUTRA DAN ALLAH ROH KUDUS karena atas rahmat dan karunia-Nya Tesis ini dapat diselesaikan.

Tesis dengan judul “Pengaruh Perlakuan Panas *Single* Dan *Double Quenching-Tempering* Terhadap Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik Baja JIS SUP 9A” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister sarjana Teknik Mesin di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin.
4. Bapak Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing utama atas kesediaannya memberikan bimbingan, saran dan masukan dalam proses menyelesaikan Tesis ini.
5. Bapak Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D., IPU. selaku Dosen Pembimbing kedua atas kesediannya memberikan bimbingan, saran dan masukan dalam proses menyelesaikan Tesis ini.
6. Ibu Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met. selaku Dosen Penguji I yang telah memberikan masukan dan saran selama proses pengujian.

7. Bapak Prof. Dr. Sugiyanto, M.T., DR., Prof., M.T. selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan dan saran selama proses pengujian.
8. Bapak Drs. A.F. Purwadi Santoso, M.Pd. selaku ketua yayasan YKBTG yang telah memberikan doa dan semangat untuk penulis dalam menyelesaikan pendidikannya.
9. Teman seperjuangan atau sahabat perkuliahan Rizal dan Purnomo yang saling membantu dan mendukung selama proses perkuliahan dan penelitian.
10. Teman-Teman kuliah Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin Universitas Lampung angkatan Tahun 2021.
11. Kepada pak Salamulloh yang selalu membantu membuatkan keperluan surat menyurat selama perkuliahan di Magister Teknik Mesin Universitas Lampung.
12. Kepada Mas Dadang yang selalu membantu menyiapkan tempat ketika seminar proposal, seminar hasil dan ujian komprehensif.
13. Semua pihak yang membantu penulis untuk menyelesaikan Tesis ini yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari banyak kekurangan dalam penyusunan dalam Tesis ini, oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun dan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Tesis ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 17 Mei 2023

Penulis,

Andreas Luki Indratmoko

NPM. 2125021005

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	ii
JUDUL TESIS	v
MENGESAHKAN	vi
SURAT PERNYATAAN.....	vii
RIWAYAT HIDUP.....	viii
PERSEMBAHAN	ix
UCAPAN TERIMA KASIH.....	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL.....	xxiv
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian	5
1.4. Batasan Masalah	5
1.5. Sistematika Penulisan	6
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1. Baja	8
2.1.1. Baja Karbon.....	10
2.1.2. Baja Paduan	14
2.2. Baja Pegas Daun (<i>Leaf Spring Steel</i>).....	16
2.3. Pengaruh Elemen Pemasu Baja Pegas.....	18
2.4. Sifat Mekanik Baja Paduan Fe-C.....	22
2.5. Penempaan Panas (<i>Hot-Forging</i>).....	28
2.6. Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>)	30
2.6.1. Anil Penuh (<i>Full Annealing</i>)	31

2.6.2. Pengerasan (<i>Hardening/Quenching</i>)	33
2.6.3. Temper (<i>Tempering</i>).....	33
2.6.3.1. Suhu Temper (<i>Tempering Temperatur</i>).....	34
2.6.3.2. <i>Holding Time of Tempering Process</i>	36
2.6.4. <i>Multiple Heat Treatment</i>	37
2.6.4.1. Double Quenching	38
2.6.4.2. Double Tempering	38
2.7. Transformasi Martensit.....	39
2.7.1. <i>Morphology Martensite</i>	42
2.7.2. <i>Tempering of Martensite</i>	43
2.7.3. Tahapan <i>Tempering</i> Martensit.....	44
2.8. Media <i>Quenching</i> CPO (<i>Crude Palm Oil</i>).....	47
2.8.1. Penyerapan Panas/Kalor (<i>Severity of Quench Media</i>).....	49
2.8.2. Pendingin Minyak Nabati (<i>Vegetable Oil</i>)	51
2.8.3. Pengujian Terdahulu <i>Quenching-Tempering</i> dengan CPO	54
2.9. Penelitian Terdahulu <i>Quenching-Tempering Spring Steel</i>	57
2.10. Pengujian Struktur Mikro (SEM).....	62
2.11. Pengujian Kekerasan (<i>Rockwell C</i>).....	67
2.12. Pengujian Komposisi Kimia (OES)	68
2.13. Pengujian OM (<i>Optic Microscope</i>)	70
2.14. Pengujian Tarik.....	72
2.15. Pengujian <i>Impact (Charpy)</i>	75
BAB III. METODE PENELITIAN	77
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	77
3.2. Alat Dan Bahan.....	78
3.3. Spesifikasi Bahan Uji.....	82
3.4. Langkah Pembuatan Bahan Uji	85
3.5. Langkah Pengujian.....	86
3.6. Proses Perlakuan Panas <i>Double Quenching Tempering</i>	93
3.7. Tabel Pengambilan Data	96
3.8. Diagram Alir Penelitian	97
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	99
4.1. Pemberian Kode Benda Uji	99
4.2. Hasil Uji Komposisi Kimia.....	100
4.3. Hasil Uji Tarik Statis	102
4.3.1. Nilai Uji Tarik Benda Uji Tanpa Perlakuan Panas (A_0).....	102

4.3.2.	Nilai Uji Tarik Benda Uji Dengan Perlakuan <i>Full Annealing</i> (FA)	106
4.3.3.	Nilai Uji Tarik Benda Uji Dengan Perlakuan <i>Single Quenching Tempering</i> (Q ₁ T ₁).....	109
4.3.4.	Nilai Uji Tarik Benda Uji Dengan Perlakuan <i>Double Quenching</i> (Q ₂).....	112
4.3.5.	Nilai Uji Tarik Benda Uji Dengan Perlakuan <i>Double Quenching Tempering</i> (Q ₂ T ₂).....	115
4.4.	Hasil Uji Kekerasan	119
4.4.1.	Nilai Uji Kekerasan Benda Uji Tanpa Perlakuan Panas (A ₀).....	119
4.4.2.	Nilai Uji Kekerasan Benda Uji Dengan Perlakuan <i>Full Annealing</i> (FA).....	120
4.4.3.	Nilai Kekerasan Benda Uji Dengan Perlakuan <i>Single Quenching Tempering</i> (Q ₁ T ₁).....	122
4.4.4.	Nilai Kekerasan Benda Uji Dengan Perlakuan <i>Double Quenching</i> (Q ₂).....	124
4.4.5.	Nilai Kekerasan Benda Uji Dengan Perlakuan <i>Double Quenching Tempering</i> (Q ₂ T ₂).....	126
4.5.	Hasil Uji Impak.....	130
4.5.1.	Nilai Impak Benda Uji Tanpa Perlakuan Panas (A ₀)	130
4.5.3.	Nilai Impak Benda Uji Dengan Perlakuan <i>Single Quenching Tempering</i> (Q ₁ T ₁).....	133
4.5.4.	Nilai Impak Benda Uji Dengan Perlakuan <i>Double Quenching</i> (Q ₂).....	136
4.5.5.	Nilai Impak Benda Uji Dengan Perlakuan <i>Double Quenching Tempering</i> (Q ₂ T ₂).....	138
4.6.	Hasil Uji Optic Miscroscope (OM).....	142
4.6.1.	Hasil Observasi Mikrostruktur Benda Uji Perlakuan Panas <i>Full Annealing</i> (FA)	142
4.6.2.	Hasil Observasi Mikrostruktur Benda Uji Dengan Perlakuan Panas <i>Single Quenching Tempering</i> (Q ₁ T ₁)	144
4.6.3.	Hasil Observasi Mikrostruktur Benda Uji Dengan Perlakuan Panas <i>Double Quenching Tempering</i> (Q ₂ T ₂)	145
4.7.	Hasil Analisa Struktur Mikro SEM/EDS dan XRD.....	147
4.7.1.	Hasil Analisa SEM-EDS/XRD Benda Uji Dengan Perlakuan Panas <i>Full Annealing</i> (FA).....	148
4.7.2.	Hasil Analisa SEM-EDS/XRD Benda Uji Dengan Perlakuan Panas <i>Single Quenching Tempering</i> (Q ₁ T ₁)	153
4.7.3.	Hasil Analisa SEM-EDS/XRD Benda Uji Dengan Perlakuan Panas <i>Double Quenching Tempering</i> (Q ₂ T ₂)	162

BAB V. PENUTUP.....	171
5.1. Kesimpulan	171
5.2. Saran	174
DAFTAR PUSTAKA	175
LAMPIRAN.....	185

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 1	Struktur mikro baja karbon dengan kandungan karbon yang bervariasi. (a) Ferit 0,0%C. 500x; (b) Ferit+Perlit 0,4%C. 500x; (c) Perlit 0,8%C. 1000x; (d) Perlit+Simentit 1, 4%C. 500x..... 9
Gambar 2	Pegas Daun (Leaf Spring) Truk Tronton Mitsubishi 8DC9 17
Gambar 3	Kurva Hubungan Tegangan-Regangan..... 23
Gambar 4	Kurva Classical Creep 26
Gambar 5	Proses Penempaan Baja Pegas Daun: (a) secara manual, (b) mesin forging secara otomatis..... 29
Gambar 6	Batas Temperatur Pengerjaan Panas..... 29
Gambar 7	Skema siklus suhu dan waktu untuk normalisasi, anil penuh dan pendinginan lambat menghasilkan transformasi suhu yang lebih tinggi menjadi ferit dan perlit dan struktur mikro yang lebih kasar daripada normalisasi. 32
Gambar 8	Diagram fasa Fe-C yang menunjukkan rentang suhu anil penuh, serta rentang suhu normalisasi. 32
Gambar 9	Diagram temper untuk baja pegas ISO 13 (AISI 6150). Diagram yang berlaku untuk stok batang Ø 20 mm dan Ø 50 mm, pendingin oli dari temperatur pengerasan 850-870°C..... 34
Gambar 10	Pengaruh waktu pada kekerasan suhu kamar saat quench 0,82 %C pada empat temperatur temper yang berbeda. 36
Gambar 11	Diagram transformasi isothermal untuk besi-karbon paduan eutectoid pembentukkan Martensite komposisi: A, austenite; B, bainit; M, martensit; P, perlit. 40

Gambar 12	Kemajuan atermal transformasi martensit dalam Paduan Fe-1.8C setelah pendinginan menjadi: (a) 24°C; (b) -60 °C; dan (c) -100 °C. etsa nital. Pembesaran, 500X, menunjukkan di sini pada 74%.....	41
Gambar 13	Plate martensite terbentuk dalam kristal tunggal austenitik dari paduan Fe-33.5Ni dengan pendinginan hingga 196°C. Pelat hanya terlihat karena relief permukaan yang dihasilkan oleh transformasi martensit.	42
Gambar 14	Martensit lath dalam paduan Fe-0,2 C. Dua paket, masing-masing dengan dua varian lath, adalah ditampilkan. elektron transmisi mikrograf.....	43
Gambar 15	Retained austenite dan cementite sebagai fungsi tempering temperatur pada baja tipe 4340 dan 4140. Jumlah fase adalah ditentukan oleh spektroskopi Mössbauer.	46
Gambar 16	Ilustrasi skema kurva pendinginan untuk berbagai quenchant umum yang ditumpangkan pada CCT diagram. A air dingin, B minyak bumi yang dipercepat (kecepatan tinggi), C minyak bumi konvensional (lambat) minyak, D air panas (82°C), E udara.	48
Gambar 17	Faktor-H Grossman diperkirakan untuk berbagai media pendinginan. (Fernandes, P. dan Prabhu, K.N., Int. J. Heat Mass Transfer, 51(3–4), 526, 2008). Mangalore, Karnataka State, India.....	50
Gambar 18	Variasi koefisien perpindahan panas (hk) dengan waktu selama pendinginan perendaman probe stainless steel dalam media berair (a), media minyak nabati (b), media oil (c)	51
Gambar 19	Kekerasan Vickers dari baja Saudi yang dipadamkan dalam minyak sawit pada suhu penangas 30°C setelah diaustenisasi pada 850°C.....	55
Gambar 20	Pengaruh suhu penangas minyak sawit terhadap kekerasan benda uji setelah austenisasi pada 850°C dan 900°C selama 5 (lima) menit.	56
Gambar 21	Diagram laku panas Hardening dan Tempering JIS SUP 9A.....	58

Gambar 22	(a) Diagram skema dari rute pemrosesan yang terperinci, yaitu: teknologi tempforming and reheating (TFR); (b) struktur mikro baja 65Mn setelah pemrosesan temporer.	60
Gambar 23	Ilustrasi skema prosedur eksperimental.	61
Gambar 24	Skema SEM (ASTM E2809-13. 2004).....	66
Gambar 25	Prinsip kerja untuk Pengujian Kekerasan Rockwell-C.....	67
Gambar 26	Spektrum Elektromagnetik pada OES	68
Gambar 27	Skema Optical Emission Spectroscopy	69
Gambar 28	Bagian-bagian Mikroskop Optik	70
Gambar 29	Skema Mikroskop Optik.....	71
Gambar 30	Benda kerja bertambah panjang ΔL ketika diberi beban P.....	73
Gambar 31	Kurva umum tegangan - regangan hasil uji Tarik	73
Gambar 32	Mekanisme Perpatahan benda uji impact	76
Gambar 33	Baja pegas daun kondisi bekas ($t=16$ mm).....	79
Gambar 34	Jangka Sorong.....	79
Gambar 35	Tungku Pemanas.....	80
Gambar 36	Alat Uji Kekerasan Mitutoyo Hardness Tester model HR200	81
Gambar 37	Alat Uji Impact Charpy.....	81
Gambar 38	Mesin MTS Landmark 100 kN.....	82
Gambar 39	Bahan Uji Kekerasan Pegas daun (leaf spring) (ASTM E384, 2004)	83
Gambar 40	Bahan Uji <i>Impact Charpy</i> (ASTM E23, 2004).....	84
Gambar 41	Bahan Uji Tarik Pegas daun (<i>leaf spring</i>) (ASTM E8, 2004).	85
Gambar 42	Alur Proses Perlakuan Panas pada Benda Uji Tarik, Uji Kekerasan dan Uji Impak; (a) <i>Single Quenching</i> <i>Tempering</i> (Q_1T_1), (b) <i>Double Quenching</i> (Q_2), (c) <i>Double Quenching Tempering</i> (Q_2T_2).....	88

Gambar 43	Diagram skematis proses <i>quenching</i> dan <i>tempering</i> pada JIS SUP 9A; (a) SQT (<i>Single Quenching Tempering</i>) dan (b) DQT (<i>Double Quenching Tempering</i>)	94
Gambar 44	Diagram Alir Penelitian	98
Gambar 45	Grafik Tegangan dan Regangan pada benda uji Tarik Tanpa Perlakuan Panas (A_0)	105
Gambar 46	Grafik Tegangan dan Regangan pada benda uji Perlakuan Panas <i>Full Annealing</i> (FA)	107
Gambar 47	Perbandingan Grafik Tegangan dan Regangan pada benda uji Tarik Tanpa Perlakuan Panas (A_0) dengan Perlakuan Panas <i>Full Annealing</i> (FA)	108
Gambar 48	Grafik Tegangan dan Regangan pada benda uji Perlakuan Panas <i>Single Quenching Tempering</i> (Q_1T_1).....	110
Gambar 49	Perbandingan Grafik Tegangan dan Regangan pada benda uji Tarik Tanpa Perlakuan Panas (A_0) terhadap benda uji <i>Full Annealing</i> (FA) dan <i>Single Quenching Tempering</i> (Q_1T_1).	111
Gambar 50	Grafik Tegangan dan Regangan pada benda uji Perlakuan Panas <i>Double Quenching</i> (Q_2).....	113
Gambar 51	Perbandingan Grafik Tegangan dan Regangan pada benda uji Tarik Tanpa Perlakuan Panas (A_0) terhadap benda uji <i>Full Annealing</i> (FA) dan <i>Single Quenching Tempering</i> (Q_1T_1) dan benda uji <i>Double Quenching</i> (Q_2).....	114
Gambar 52	Grafik Tegangan dan Regangan pada benda uji Perlakuan Panas <i>Double Quenching Tempering</i> (Q_2T_2).....	116
Gambar 53	Perbandingan Grafik Tegangan dan Regangan pada benda uji Tarik Tanpa Perlakuan Panas (A_0) terhadap benda uji <i>Single Quenching Tempering</i> (Q_1T_1) dan benda uji <i>Double Quenching</i> (Q_2) dan benda uji <i>Double Quenching Tempering</i> (Q_2T_2).	117
Gambar 54	Grafik Perbandingan Kekerasan benda uji Tanpa Perlakuan Panas (A_0) dengan benda uji Perlakuan Panas <i>Full Annealing</i> (FA).	122

Gambar 55	Perbandingan Grafik Kekerasan benda uji Tanpa Perlakuan Panas (A_0) terhadap benda uji Perlakuan Panas <i>Full Annealing</i> (FA) dan Perlakuan Panas <i>Single Quenching Tempering</i> (Q_1T_1).....	124
Gambar 56	Perbandingan Grafik Kekerasan benda uji Tanpa Perlakuan Panas (A_0) terhadap benda uji <i>Full Annealing</i> (FA) dengan benda uji <i>Single Quenching Tempering</i> (Q_1T_1) dan benda uji <i>Double Quenching</i> (Q_2).....	126
Gambar 57	Perbandingan Grafik Kekerasan benda uji Tanpa Perlakuan Panas (A_0) dengan benda uji <i>Full Annealing</i> (FA) dan benda uji <i>Single Quenching Tempering</i> (Q_1T_1) dan benda uji <i>Double Quenching</i> (Q_2) dan benda uji <i>Double Quenching Tempering</i> (Q_2T_2).....	128
Gambar 58	Grafik Perbandingan nilai Impak benda uji Tanpa Perlakuan Panas (A_0) dengan benda uji Perlakuan Panas <i>Full Annealing</i> (FA).	133
Gambar 59	Grafik Perbandingan nilai Impak benda uji Tanpa Perlakuan Panas (A_0) terhadap benda uji Perlakuan Panas <i>Full Annealing</i> (FA) dan benda uji Perlakuan Panas <i>Single Quenching Tempering</i> (Q_1T_1).....	135
Gambar 60	Grafik Perbandingan nilai Impak benda uji Tanpa Perlakuan Panas (A_0) terhadap benda uji perlakuan panas <i>Full Annealing</i> (FA) dengan benda uji <i>Single Quenching Tempering</i> (Q_1T_1) dan benda uji <i>Double Quenching</i> (Q_2).....	137
Gambar 61	Grafik Perbandingan nilai Impak benda uji Tanpa Perlakuan Panas (A_0) dengan benda uji <i>Full Annealing</i> (FA) dan benda uji perlakuan panas <i>Single Quenching Tempering</i> (Q_1T_1) dan benda uji <i>Double Quenching</i> (Q_2) dan benda uji <i>Double Quenching Tempering</i> (Q_2T_2).....	140
Gambar 62	Observasi mikrostruktur benda uji <i>Full Annealing</i> pada jarak (a) 0,5 mm, (b) 1 mm, (c) 1,5 mm dari patahan impak dengan perbesaran 1000x.....	143
Gambar 63	Observasi mikrostruktur benda uji <i>Single Quenching Tempering</i> pada jarak (a) 0,5 mm, (b) 1 mm, (c) 1,5 mm dari patahan impak dengan perbesaran 1000x.....	144

Gambar 64	Observasi mikrostruktur benda uji <i>Double Quenching Tempering</i> pada jarak (a) 0,5 mm, (b) 1 mm dan (c) 1,5 mm dari patahan impak dengan perbesaran 1000x.....	146
Gambar 65	Mikrograf SEM pada patahan impact Perlakuan <i>Full Annealing</i> (FA): (a) Jarak 0 mm pembesaran 56x, (b) Jarak 1 mm pembesaran 2.000x, (c) Jarak 5 mm pembesaran 2.000x, (d) Jarak 5 mm pembesaran 10.000x.....	149
Gambar 66	Analisa EDS Mapping <i>Full Annealing</i> (FA) dengan pembesaran 2.000x pada jarak 1 mm dari takikan.....	150
Gambar 67	Grafik hasil analisa EDS Mapping <i>Full Annealing</i> (FA) dengan pembesaran 2.000x pada jarak 1 mm dari takikan.	151
Gambar 68	Grafik pengujian X-Ray Diffraction pada benda uji Full Annealing (FA).....	153
Gambar 69	Mikrograf SEM pada patahan impak Perlakuan <i>Single Quenching-Tempering</i> (Q_1T_1): (a) Jarak 0 mm pembesaran 56x, (b) Jarak 1 mm pembesaran 2.000x, (c) Jarak 5 mm pembesaran 2.000x, (d) Jarak 5 mm pembesaran 10.000x.....	154
Gambar 70	Analisa EDS Mapping <i>Single Quenching-Tempering</i> (Q_1T_1) dengan pembesaran 2.000x pada jarak 1 mm dari takikan.	156
Gambar 71	Grafik hasil analisa EDS Mapping <i>Single Quenching-Tempering</i> (Q_1T_1) dengan pembesaran 2.000x pada jarak 1 mm dari takikan.	157
Gambar 72	Penembakan EDS Mapping <i>Single Quenching-Tempering</i> (Q_1T_1) dengan pembesaran 10.000x pada daerah inklusi nukleusi.	158
Gambar 73	Grafik hasil penembakan EDS Mapping <i>Single Quenching-Tempering</i> (Q_1T_1) dengan pembesaran 10.000x pada daerah inklusi nukleusi.....	158
Gambar 74	Grafik pengujian X-Ray Diffraction pada benda uji <i>Single Quenching Tempering</i> (Q_1T_1).....	160
Gambar 75	Grafik perbandingan pengujian X-Ray Diffraction pada benda uji <i>Full Annealing</i> (FA) dan <i>Single Quenching Tempering</i> (Q_1T_1)	161

Gambar 76	Mikrograf SEM pada patahan impact <i>Perlakuan Double Quenching-Tempering</i> (Q_2T_2): (a) Jarak 0 mm pembesaran 56x, (b) Jarak 1 mm pembesaran 2.000x, (c) Jarak 5 mm pembesaran 2.000x, (d) Jarak 5 mm pembesaran 10.000x.....	162
Gambar 77	Analisa EDS <i>Mapping Double Quenching-Tempering</i> (Q_2T_2) dengan pembesaran 2.000x pada jarak 1 mm dari takikan.	164
Gambar 78	Grafik hasil analisa EDS <i>Mapping Double Quenching-Tempering</i> (Q_2T_2) dengan pembesaran 2.000x pada jarak 1 mm dari takikan.	165
Gambar 79	Penembakan EDS <i>Mapping Double Quenching-Tempering</i> (Q_2T_2) dengan pembesaran 10.000x pada daerah <i>inklusi nukleusi</i>	166
Gambar 80	Grafik hasil analisa EDS <i>Mapping Double Quenching-Tempering</i> (Q_2T_2) dengan pembesaran 10.000x pada daerah <i>inklusi nukleusi</i>	166
Gambar 81	Grafik pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> pada benda uji <i>Double Quenching Tempering</i> (Q_2T_2).	168
Gambar 82	Grafik perbandingan pola <i>X-Ray Diffraction</i> benda uji <i>Full Annealing</i> (FA), <i>Single Quenching Tempering</i> (Q_1T_1) dan <i>Double Quenching Tempering</i> (Q_2T_2) pada penahanan 60 menit dan suhu tempering 650°C.....	169

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
Tabel 1	Spesifikasi Perbandingan Internasional (Lihat catatan umum A, B, dan C.).....	10
Tabel 2	Pembagian baja SUP dan penggunaannya.	18
Tabel 3	Komposisi Kimia Baja Pegas Daun	20
Tabel 4	Sifat mekanik dan termal material JIS SUP 9A	21
Tabel 5	Variasi Warna dan Temperatur pada Api.....	30
Tabel 6	Transformasi yang terjadi selama tempering ferrous martensit.	43
Tabel 7	Sifat fisika berbagai minyak nabati dan minyak hewani.....	52
Tabel 8	Mutu CPO Indonesia*	54
Tabel 9	Data hasil Kekerasan Rockwell baja AISI 4130	57
Tabel 10	Penjelasan jenis sinyal, detector, dan resolusi lateral serta kedalaman sinyal untuk menggambar dan menganalisa material di SEM (ASTM E2809-13. 2004).....	64
Tabel 11	Jadwal Penelitian.....	77
Tabel 12	Komposisi kimia pegas daun (leaf spring) truk Mitsubishi 8DC9 bekas	82
Tabel 13	Spesifikasi Bahan Uji Kekerasan	84
Tabel 14	Spesifikasi Bahan Uji <i>Impact Charpy</i>	84
Tabel 15	Spesifikasi Bahan Uji Tarik Pegas Daun (<i>Leaf Spring</i>).....	85
Tabel 16	Tabel Nilai Uji Keras Untuk Material Baja Pegas Daun (<i>Leaf Spring</i>).....	96

Tabel 17	Tabel Nilai Uji Tarik Untuk Material Baja Pegas Daun (<i>Leaf Spring</i>).....	96
Tabel 18	Tabel Nilai Uji Impact Untuk Material Baja Pegas Daun (<i>Leaf Spring</i>).....	96
Tabel 19	Kode Benda Pengujian	99
Tabel 20	Komposisi kimia material baja JIS SUP (JIS G 4801 <i>Spring Steels</i> , 1984)	101
Tabel 21	Hasil uji komposisi kimia (OES) baja pegas daun truk bekas	101
Tabel 22	Hasil uji tarik benda uji Tanpa Perlakuan Panas (A0)	104
Tabel 23	Hasil uji tarik benda uji Perlakuan Panas <i>Full Annealing</i> (FA).....	106
Tabel 24	Hasil uji tarik benda uji Perlakuan Panas <i>Single Quenching Tempering</i> (Q ₁ T ₁).....	109
Tabel 25	Hasil uji tarik benda uji dengan perlakuan <i>Double Quenching</i> (Q ₂).	113
Tabel 26	Hasil uji tarik benda uji dengan perlakuan <i>Double Quenching Tempering</i> (Q ₂ T ₂).....	115
Tabel 27	Nilai STDEV pada hasil Pengujian Tarik baja JIS SUP 9A	118
Tabel 28	Hasil nilai uji keras untuk benda uji Tanpa Perlakuan Panas (A ₀).....	120
Tabel 29	Hasil nilai uji kekerasan untuk benda uji dengan Perlakuan <i>Full Annealing</i> (FA).....	121
Tabel 30	Nilai kekerasan benda uji dengan perlakuan <i>Single Quenching Tempering</i> (Q ₁ T ₁).....	123
Tabel 31	Nilai uji kekerasan untuk benda uji dengan perlakuan panas <i>Double Quenching</i> (Q ₂).....	125
Tabel 32	Nilai uji kekerasan untuk benda uji dengan perlakuan <i>Double Quenching Tempering</i> (Q ₂ T ₂).	127
Tabel 33	Nilai STDEV pada hasil Pengujian Kekerasan baja JIS SUP 9A.....	129
Tabel 34	Hasil nilai uji impak untuk benda uji Tanpa Perlakuan Panas (A ₀).....	131

Tabel 35	Hasil nilai uji dampak untuk benda uji Perlakuan Panas <i>Full Annealing</i> (FA).....	132
Tabel 36	Nilai dampak benda uji dengan perlakuan <i>Single Quenching Tempering</i> (Q ₁ T ₁).....	134
Tabel 37	Nilai uji dampak untuk benda uji dengan perlakuan <i>Double Quenching</i> (Q ₂).	136
Tabel 38	Nilai uji Dampak untuk benda uji dengan perlakuan <i>Double Quenching Tempering</i> (Q ₂ T ₂).....	139
Tabel 39	Nilai STDEV pada hasil Pengujian Dampak baja JIS SUP 9A.....	141
Tabel 40	Nilai Perbandingan rata-rata Ukuran Butir (µm).	147
Tabel 41	Hasil nilai analisa EDS Mapping benda uji Perlakuan <i>Full Annealing</i> (FA) pada jarak 1 mm dan pembesaran 2.000x.....	151
Tabel 42	Hasil nilai analisa EDS <i>Mapping</i> benda uji Perlakuan <i>Single Quenching-Tempering</i> (Q ₁ T ₁) pada jarak 1 mm dan pembesaran 2.000x.....	157
Tabel 43	Hasil nilai kandungan unsur pada penembakan EDS <i>Mapping</i> benda uji Perlakuan <i>Single Quenching-Tempering</i> (Q ₁ T ₁) pada daerah <i>inklusi nukleusi</i>	158
Tabel 44	Hasil nilai analisa EDS <i>Mapping</i> benda uji Perlakuan <i>Double Quenching-Tempering</i> (Q ₂ T ₂) pada jarak 1 mm dan pembesaran 2.000x.....	165
Tabel 45	Hasil nilai kandungan unsur pada penembakan EDS <i>Mapping</i> benda uji Perlakuan <i>Double Quenching-Tempering</i> (Q ₂ T ₂) pada daerah inklusi nukleusi.	166
Tabel 46	Spesifikasi Peak pada setiap Spesimen	170

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Baja karbon paduan rendah saat ini banyak diminati sebagai material yang banyak digunakan dalam dunia industri karena mudah dalam pengerjaannya dan harganya yang relatif murah dibandingkan dengan baja karbon paduan tinggi lainnya. Kekuatan mekanik baja karbon paduan rendah biasanya ditingkatkan dengan proses *quenching* yang dilanjutkan dengan proses *tempering* Badaruddin et al. (2021). Oleh karena itu, baja karbon paduan rendah banyak digunakan untuk komponen teknik seperti material *bucket excavator*, *disc plow*, *slasher* dan *cane cutter*. Baja tahan aus diproduksi menggunakan metode TMCP (*Thermo Mechanical Control Process*), yaitu metode proses yang diterapkan dengan menggabungkan proses pengecoran terkontrol, *rolling* dan perlakuan panas dalam satu lini proses (Bhadeshia et al. 2006). Proses pembuatannya tidak sederhana dan rumit, sehingga harga baja tahan aus cukup tinggi. Dibandingkan dengan proses TMCP, menurut penelitian Ouchi. (2001), Lee et al. (2000), Yoo et al. (1995) perlakuan panas pada baja karbon dengan *double quenching-tempering* (DQT) lebih menguntungkan karena menghasilkan keseimbangan yang baik antara kekuatan dan daya tahan, konsumsi energi yang lebih rendah, ramah lingkungan, proses yang lebih singkat, dan biaya produksi baja tahan aus yang lebih rendah.

Masalah lingkungan baik nasional maupun global, termasuk dampak limbah industri, harus diselesaikan bersama. Hal ini juga mendorong dikembangkannya proses austenitisasi untuk baja karbon paduan rendah, yang dilanjutkan dengan proses *quenching-tempering* pada desain struktur mikro untuk mendapatkan komponen material dengan kekuatan mekanik yang relatif tinggi dan kekuatan yang sesuai. Baja JIS SUP 9A adalah salah satu baja karbon paduan rendah dari industri transportasi, biasanya diproduksi dalam baja kelas khusus,

lebih dikenal dengan baja pegas daun. Unsur paduan yang paling penting dari baja pegas adalah mangan (Mn), silikon (Si), fosfor (P), belerang (S) dan vanadium (V). Organisasi standar yang berbeda menetapkan kode yang berbeda untuk baja pegas daun untuk mengidentifikasinya. Salah satu baja pegas yang banyak digunakan adalah Japanese Industrial Standard Steel (JIS) SUP-9. Baja pegas setara JIS-SUP-9 dalam sistem standarisasi lainnya adalah: Standar Eropa (EN) 55Cr3, Standar Inggris (BS) 525A58 & 525H60, Association Francaise de Normalization (AFNOR) 55C3, American Society for Testing and Materials (ASTM) 5155 dan China Guobiao Standard (GB) 55CrMnA. SUP-9 digunakan terutama untuk membuat pegas daun untuk lokomotif dan gerbong (Arora et al. 2014, Lee et al. 2008) Ini adalah baja karbon dengan titik leleh tinggi 1450°C dan kapasitas panas spesifik 470 J kg⁻¹K (Chandra et al. 2018)

Menurut Unterweiser et al. (1993), Lee et al. (2004) baja fasa martensit banyak digunakan untuk bahan kekuatan dan kekerasan di industri otomotif, listrik, dan kedirgantaraan. Namun, menurut Unterweiser et al. (1993) peningkatan kekuatan martensitik menurunkan ketangguhan karena peningkatan kandungan karbon. Martensit diproduksi dengan pendinginan cepat tanpa penyebaran transformasi austenit, yang melibatkan sejumlah besar kristal distorsi, yang dengan cepat meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja. Namun, tekanan internal yang timbul selama pembentukan martensit dan struktur kembar menyebabkan penurunan ketangguhan yang signifikan. Semakin tinggi kandungan karbon, semakin tinggi tegangan sisa. *Quenched martensite* harus selalu ditempering untuk mencapai kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang diinginkan. Kandungan karbon menghilangkan atom karbon dari fase martensit. Pengaruh *quenching* pada struktur mikro dan sifat mekanik lath martensit telah dipelajari secara ekstensif, Bhardwaj. (2014), Xu et al. (2018), Jiang et al. (2017), Liu et al. (2014), Sanij et al. (2012), Meysami et al.(2010), Laxmi et al. (2022), Sun et al. (2018). Untuk baja martensit karbon tinggi, morfologi dan substruktur martensit terutama ditampilkan sebagai *plate* dan *twins*. Selain itu, baja martensit karbon tinggi selalu memiliki kekuatan yang tinggi tetapi ketangguhan yang rendah akibat *quench embrittlement*. menurut Zhang et al. (2012).

Dalam penelitian sebelumnya Sun et al. (2018), Sun et al. (2017), Wang et al. (2018) menunjukkan bahwa butiran halus selama transformasi martensit dalam dua baja karbon tinggi dalam paduan Cr dapat menyebabkan perubahan struktur martensit dari *twins* menjadi dislokasi, dan martensit yang dipindahkan memiliki ketangguhan yang lebih baik daripada martensit *twins*. Oleh karena itu, untuk menjaga agar butiran austenit tetap berada pada tingkat yang sangat halus, sangat perlu mempelajari proses austenitisasi. Menurut Lian et al. (2013) untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan optimal, baja paduan rendah dapat diaustenisasi dengan proses pemanasan dan pendinginan terkontrol yang menambahkan sifat khusus pada baja. Austenifikasi baja bertujuan untuk memperbaiki sifat mekanik baja dengan mengubah ukuran dan bentuk komponen mikronya (struktur fasa). Austenifikasi baja ditentukan oleh difusi karbon ke dalam austenit. Laju austenisasi tergantung pada komposisi kimia bahan, struktur mikro awal, ukuran butir, laju pemanasan dan suhu (Totten, 2006). Selain itu, austenit mengkonsumsi sementit dan kemudian tumbuh menjadi ferit dengan difusi pertumbuhan yang terkendali (Totten, 2006). Dalam struktur perlit, pembentukan austenit terjadi dalam dua tahap. Tahap pertama adalah pembubaran perlit dan tahap kedua adalah transformasi ferit menjadi austenit yang diakhiri dengan AC3 (Totten, 2006). Menurut Oliveira et al. (2007), kedua proses terjadi melalui nukleasi dan pertumbuhan; mengubah struktur mikro dapat secara signifikan meningkatkan perubahan sifat mekanik baja.

Dalam beberapa dekade terakhir, perlakuan panas *tempering* telah mendapat banyak perhatian dari Zhang et al. (2012), Xu et al. (2018), Jiang et al. (2017), Liu et al. (2014), Sanij et al. (2012), Meysami et al. (2010), Laxmi et al. (2022) karena sangat penting untuk meningkatkan kekuatan dan keawetan baja. *Quenching* dan *tempering* baja paduan karbon menengah pada temperatur yang berbeda dapat memberikan kombinasi yang berguna dari: kekuatan, daya tahan dan ketangguhan retak (Clarke et al. 2011). Pengaruh kondisi *quenching* terhadap struktur mikro dan perilaku mekanik selama *quenching* dan *tempering* baja juga telah dipelajari selama bertahun-tahun, Bhardwaj. (2014), Zhang et al. (2012), Zhu et al. (2019), Xu et al. (2018), Jiang et al. (2017), Liu et al. (2014). Oleh karena itu, yaitu evaluasi hasil perlakuan panas; kekerasan dan kekuatan (*tensile*

strength dan *impact strength*) menjadi bagian penting dari desain bahan yang aman untuk diproses. Proses perlakuan panas berulang pada baja pegas JIS SUP 9A diikuti kemudian dengan proses *tempering* yang dilakukan secara berulang menggunakan media pendingin cair CPO (*Crude Palm Oil*) yang dipertahankan suhu penangasnya belum begitu banyak atau bahkan belum dilakukan oleh beberapa peneliti di luar negeri.

Peningkatan kekuatan mekanik baja paduan rendah ini dicapai dengan cara austenisasi, yaitu mengubah sifat mekanik logam dengan mengubah struktur mikro melalui proses pemanasan dan mengatur laju pendinginan, dengan atau tanpa mengubah komposisi kimia logam yang bersangkutan, dengan tujuan memperoleh sifat-sifat logam yang diinginkan. Penelitian yang akan dilakukan kali ini adalah *austenisasi* pada baja pegas JIS SUP 9A menggunakan proses *Single Quenching Tempering* (SQT) dan *Double Quenching Tempering* (DQT) dengan kondisi awal penempaan panas (*hot-forging*) dan proses *annealing* menggunakan *furnace* temperatur 800°C dengan *holding time* 120 menit dengan laju pendinginan yang lambat di dalam tungku. Dilanjutkan proses perlakuan panas menggunakan *furnace* temperatur 800°C dengan *holding time* 60 menit dan dilanjutkan proses *tempering* pada temperatur 650°C dengan *holding time* selama 60 menit, lalu pada setiap proses *quenching* menggunakan media pendinginan cairan *Crude Palm Oil* (CPO) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C. Proses perlakuan panas dengan SQT dan DQT ini akan membuat struktur fasa martensit menjadi lebih halus dan akan meningkatkan kekuatan mekanik (kekuatan tarik, kekuatan impak dan tahan aus).

1.2.Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah pengaruh perlakuan panas *Single Quenching-Tempering* (SQT) dan *Double Quenching-Tempering* (DQT) terhadap struktur mikro dan sifat mekanik (kekuatan tarik, kekuatan impak dan ketahanan aus) bilah baja pegas JIS SUP 9A.

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini difokuskan pada proses perlakuan panas baja pegas daun JIS SUP 9A untuk mendapatkan pengaruh yang lebih lengkap dari setiap parameter terhadap perubahan struktur mikro dan kekuatan mekanik dengan kondisi awal penempaan panas (*hot-forging*) dan *full annealing*, kemudian *single quenching-tempering* (SQT) dan *double quenching-tempering* (DQT) dengan cairan CPO (*Crude Palm Oil*) yang dipertahankan suhunya. Investigasi terperinci meliputi: (1) Uji kekerasan *Rockwell C*, (2) Uji *Impact Charpy*, (3) Uji Tarik MTS *Landmark* 100 kN, (4) Uji struktur mikro dan fraktografi SEM/EDS, (5) Uji Kandungan Kimia (OES), Struktur Kristal XRD dan struktur mikro (OM) dilakukan.

1.4. Batasan Masalah

Untuk memperoleh hasil penelitian dan pembahasan yang terarah dan terstruktur secara objektif, maka diterapkan batasan masalah yang disajikan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Material yang digunakan adalah baja pegas daun kondisi bekas (tebal 15mm) dengan kandungan 0,5597%C, 0,3540%Si, 0,9111%Mn, 0,9287%Cr.
2. Kondisi awal *hot-forging* dan *full annealing* pada suhu 800°C ditahan 120 menit dengan pendinginan dalam tungku yang lambat.
3. Uji mikrostruktur dan sifat mekanik dilakukan setelah perlakuan panas SQT, DQ dan DQT pada suhu 800°C ditahan selama 60 menit dan suhu tempering 650°C ditahan selama 60 menit.
4. Media pendingin CPO (*Crude Palm Oil*) cair, adalah minyak kelapa sawit mentah Indonesia (Asia) berasal dari PT Lambang Bumi Perkasa, Lampung Tengah, dengan suhu cairan konstan 70°C.
5. Waktu yang diperlukan untuk memindahkan benda uji dari tungku ke pendingin adalah sama untuk setiap benda uji pada setiap langkah proses.

6. Uji sifat mekanik yang dilakukan meliputi: uji kekerasan *Rockwell C*, uji impak *Charpy* dan uji tarik MTS *Landmark*.
7. Pengamatan struktur mikro dan fraktografi-SEM/EDS, struktur kristal-XRD dan struktur mikro (OM) pada benda uji impact.

1.5. Sistematika Penulisan

1. PENDAHULUAN

Bab. I menjelaskan tentang; Baja karbon paduan rendah JIS SUP 9A dipilih untuk diselidiki. Rumusan masalah perlakuan panas (SQT) dan (DQT) terhadap struktur mikro dan sifat mekanik. Tujuan penelitian untuk mendapatkan pengaruh dari masing-masing parameter. Sistematika laporan meliputi judul-judul dan sub bab.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab II menjelaskan judul-judul dan sub bab; Baja, Baja Karbon, Baja Paduan, Baja Pegas Daun, Pengaruh Elemen Paduan Baja Pegas, Sifat Mekanik Baja Paduan Fe-C, *Hot Forging*, *Full Annealing*, Perlakuan Panas, Transformasi Martensit, CPO (minyak sawit mentah) *Quenching*, Pemindaian Mikroskop Elektron (SEM)/EDS, Kandungan Kimia (OES), Struktur Kristal XRD dan Struktur Mikro (OM), Uji Kekerasan, Uji Tarik dan Uji Impact.

3. METODE PENELITIAN

Bab III mengenai judul-judul dan sub bab; Waktu dan Tempat Penelitian, Alat dan Bahan, Spesifikasi Bahan uji, Langkah Pembuatan Bahan Uji, Langkah Pengujian, Proses Perlakuan Panas Double *Quenching* Tempering, Tabel Pengambilan Data, dan Diagram Alir Penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab IV berisi tentang hasil pengujian sifat mekanik melalui uji tarik, uji kekerasan, uji impak, SEM-EDS/XRD, OES, OM dan pembahasan data yang diperoleh selama pengujian.

5. PENUTUP

Bab V berisi kesimpulan dan saran untuk penelitian berikutnya.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

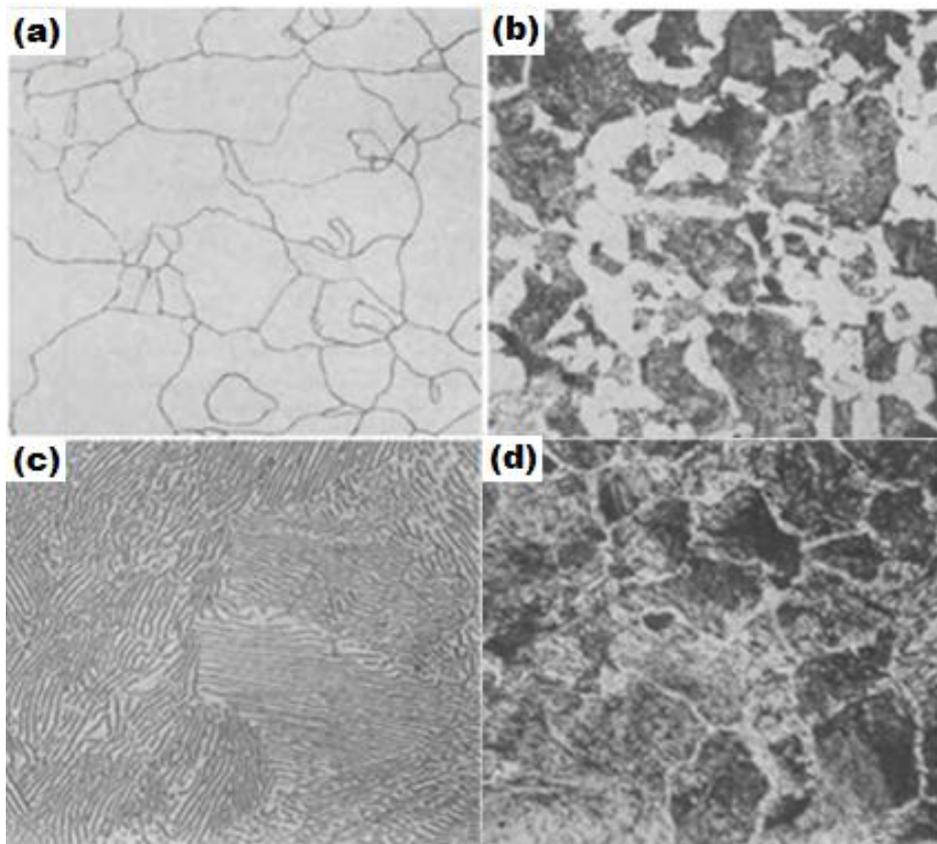
2.1. Baja

Baja adalah paduan yang sebagian besar terdiri dari besi dengan kandungan karbon antara 0,2 dan 1,7 atau 2,04% berat (C:1000–10.8.67 Fe), tergantung konsentrasinya. Paduan lain digunakan seperti mangan, vanadium, dan tungsten, tetapi karbon adalah *ferroalloy* yang paling hemat biaya (Ashby et al. 2013). Karbon dan elemen lainnya bertindak sebagai penguat dan mencegah perubahan kisi kristal atom besi agar tidak saling bergesekan. Memvariasikan jumlah elemen dan bentuk paduan dalam baja (elemen terlarut, tahap pengendapan) mengontrol sifat baja yang dihasilkan seperti kekerasan, daya tahan, dan kekuatan tarik. Kandungan karbon yang meningkat dapat membuat baja lebih keras dan lebih kuat dari besi, tetapi juga lebih rapuh. Kelarutan maksimum karbon dalam besi (dalam kisaran austenit) adalah 2,14% berat, terjadi pada 1149°C; konsentrasi karbon yang lebih tinggi atau suhu yang lebih rendah akan menghasilkan sementit. Paduan dengan kandungan karbon yang lebih tinggi disebut sebagai besi tuang karena titik lelehnya yang lebih rendah (Ashby et al. 2013).

Meskipun baja pada awalnya dibuat menggunakan sejumlah metode yang tidak efisien, penggunaannya saat ini menjadi lebih luas dengan ditemukannya proses Bessemer pada akhir tahun 1850-an, ketika baja menjadi produk produksi massal yang relatif murah. Penyempurnaan proses tambahan, seperti produksi baja rendah oksigen, semakin mengurangi biaya produksi dan meningkatkan kualitas logam. Saat ini, baja adalah salah satu bahan yang paling umum digunakan di dunia, dan merupakan komponen kunci dalam bangunan, perkakas, kendaraan, dan peralatan yang secara historis paling banyak menggunakan besi tempa. Baja

modern biasanya diidentifikasi dengan kualifikasi baja yang berbeda yang ditentukan oleh organisasi standar yang berbeda.

Baja mengalami perubahan karena perbedaan kandungan karbon (Gambar 1). Ketika kandungan karbon (%C) meningkat, bintik hitam (juga disebut bintik perlit) meningkat sementara bintik putih berkurang (ferit = besi murni). Ketika kandungan karbon mencapai 0,8%, besi dalam keadaan jenuh terhadap karbon.



Gambar 1 Struktur mikro baja karbon dengan kandungan karbon yang bervariasi. (a) Ferit 0,0%C. 500x; (b) Ferit+Perlit 0,4%C. 500x; (c) Perlit 0,8%C. 1000x; (d) Perlit+Simentit 1, 4%C. 500x.

Struktur seperti itu disebut serpihan perlit, yang merupakan campuran dari batang kristal yang sangat halus dan berbentuk. Campuran kristal terdiri dari ferit dan sementit. Jadi, dengan meningkatnya kandungan karbon, sementit berkurang dan bercak perlit meningkat. Kandungan karbon mencapai saturasi pada 0,8 yang meningkatkan kekerasan baja.

2.1.1. Baja Karbon

Bahan baja karbon yang digunakan dalam aplikasi mencakup berbagai sifat mekanik yang sangat luas. Bahan baja karbon terdaftar dalam *American Society of Mechanical Engineers (ASME) Boiler and Pressure Vessel Code (B&PV)* memiliki kekuatan tarik suhu ruangan di kisaran 40 kips/inci persegi (ksi) (275 megapascal [MPa]) hingga 100 ksi (690 MPa). Baja karbon digunakan di Amerika Serikat dan di seluruh dunia karena hampir semua alasan: Harga, fitur, kemudahan pembuatan, ketersediaan, kemampuan las, dll. Tabel 1 mencantumkan beberapa spesifikasi material ASME yang tercakup dalam laporan ini dan beberapa perbandingan dengan spesifikasi material Eropa dan spesifikasi Inggris, Jerman, dan Jepang dengan data referensi internasional.

Perhatikan, bagaimanapun, bahwa bahan-bahan ini tidak setara karena sedikit perbedaan dalam komposisi kimia atau sifat mekanik bahan. Perhatikan bahwa dalam Tabel 1 ini didefinisikan sebagai bahan referensi, bukan bahan yang setara. Spesifikasi material yang sebanding menurut ASME dan ASTM serupa dalam sifat kimia dan mekaniknya dengan spesifikasi internasional yang tercantum. Secara umum, campuran dianggap sebanding ketika: sifat mekanik yang dilaporkan pada dasarnya sama meskipun ada variasi komposisi. Spesifikasinya tidak sama dan karenanya tidak bisa dianggap setara. Ada kemungkinan bahwa bahan tersebut memenuhi persyaratan dari satu atau semua spesifikasi referensi. Jika tersedia, Sistem Penomoran Terpadu (UNS) (*Metals and Alloys in the Unified Numerical System*, ASTM) juga diberikan karena nama itu membuat asosiasi antara bahan dengan komposisi kimia yang sama dan memiliki beberapa arti penting dalam Kode ASME.

Tabel 1 Spesifikasi Perbandingan Internasional (Lihat catatan umum A, B, dan C.)

ASME /ASTM	UNS Number (Note 1)	CEN (European Normal)	BS (United Kingdom)	DIN (Germany)	JIS (Japan)
SA-27 60-30	J03000		3100 A1		G 5101 SC 410
SA-27 65-35	J03001				G 5102 SCW 450
SA-27 70-36	J03501		3100 A2		G 5101 SC 480

Tabel 1 Spesifikasi Perbandingan Internasional (Lihat catatan umum A, B, dan C.)

ASME /ASTM	UNS Number (Note 1)	CEN (European Normal)	BS (United Kingdom)	DIN (Germany)	JIS (Japan)
A-27 70-40	J02501		3100 A2		G 5101 SCW 480
SA-53 Gr. A	K02504 (Note 2)		3601 320	17175 St35.8 (Note 3)	
SA-53 Gr. B	K03005		3602-2 430	17175 St45.8	G 3454 STPG 410
SA-105	K03504 (Note 2)	10222-2 P 280GH			G 3202 SFVC 2 A
SA-106 Gr. B	K03006		3602-2 430	17175 St45.8	G 3454 STPG 410
SA-106 Gr. C	K03501		3602-2 490	17175 17Mn4	G 3456 STPT 480
SA-135 Gr. A	K02509		3601 320		
SA-135 Gr. B	K03018		3602-2 430	17175 St45.8	G 3454 STPG 410
A-139 Gr. A	--		3601 320		
A-139 Gr. B	K03003		3602-2 430	17175 St45.8	G 3454 STPG 410
A-139 Gr. C (Note 4)	K03004 (Note 2)		3602-2 430	17175 St45.8	G 3454 STPG 410
A-139 Gr. D (Note 4)	K03010		3602-2 430	17175 St45.8	G 3454 STPG 410
A-139 Gr. E (Note 4)	K03012		3602-2 490	17175 17Mn4	G 3456 STPT 480
SA-178 Gr. A	K01200		3059 320	28180 TTSt 35 N	G 3461 STB 340
SA-178 Gr. C	K03503		3059-2 440		G 3461 STB 410
SA-178 Gr. D	K02709				G 3461 STB 510
SA-179	K01200 (Note 2)		3059 320	28180 TTSt 35 N	G 3461 STB 340
SA-181 Cl. 60	K03502	10222-2 P245GH			G 3202 SFVC 1
SA-181 Cl. 70	K03502	10222-2 P280GH			G 3202 SFVC 2 A
SA-192	K01201		3059 320	28180 TTSt 35 N	G 3461 STB 340
SA-210 Gr. A1	K02707		3059-2 440	17175 St45.8	G 3461 STB 410
SA-210 Gr. C	K03501				G 3461 STB 510
SA-214	K01807		3059 320	28180 TTSt	G 3461 STB 340
SA-216 WCB	J03002	10213-2 GP280GH			G 5151 SCPH 2
SA-216 WCC (Note 4)	J02503	10213-2 GP280GH			G 5151 SCPH 2
SA-266 Gr. 1	K03506 (Note 2)	10222-2 P245GH QT			G 3202 SFVC 1

Tabel 1 Spesifikasi Perbandingan Internasional (Lihat catatan umum A, B, dan C.)

ASME /ASTM	UNS Number (Note 1)	CEN (European Normal)	BS (United Kingdom)	DIN (Germany)	JIS (Japan)
SA-266 Gr. 2	K03506 (Note 2)	10222-2 P280GH			G 3202 SFVC 2 A
SA-266 Gr. 4	K03017	10222-2 P280GH			G 3202 SFVC 2 B
SA-283 Gr. A	K01400	10025 S185			
SA-283 Gr. B	K01702				G 3101 SS330
SA-283 Gr. C	K02401				G 3101 SS400
SA-333 Gr. 1	K03008			17179 TStE 255	G 3460 STPL 380
SA-333 Gr. 6	K03006			17179 TStE 285	G 3460 STPL 450
SA-334 Gr. 1	K03008			17173 TTSt 35 N	G 3464 STBL 380
SA-334 Gr. 6	K03006		3603 carbon, 430 LT		
SA-350 LF1	K03009	10222-2 P245GH			G 3202 SFVC 1
SA-350 LF2	K03011	10222-2 P280GH			G 3202 SFVC 2 A
SA-352 LCA	J02504	10213-3 G17Mn5			G 5152 SCPL 1
SA-352 LCB	J03003	10213-3 G17Mn5			G 5152 SCPL 1
SA-352 LCC	J02505	10213-3 G20Mn5			G 5152 SCPL 1
SA-508 Gr. 1	K13502	10222-2 P280GH			G 3202 SFVC 2 A
SA-515 Gr. 60	K02401	10028-2 P265GH			G 3103 SB 410
SA-515 Gr. 65	K02800	10028-2 P295GH			G 3103 SB450
SA-515 Gr. 70	K03101	10028-5 P355ML			G 3103 SB 480
SA-516 Gr. 60	K02100	10028-2 P265GH			G 3103 SB 410
SA-516 Gr. 65	K02403	10028-2 P295GH			G 3103 SB450
SA-516 Gr.70	K02700	10028-5 P355ML			G 3103 SB 480

Tabel 1 Spesifikasi Perbandingan Internasional (Lihat catatan umum A, B, dan C.)

ASME /ASTM	UNS Number (Note 1)	CEN (European Normal)	BS (United Kingdom)	DIN (Germany)	JIS (Japan)
SA-537 Cl.1 (Note 4)	K12437	10028-5 P355ML2			G 3115 SPV 315
SA-541 Gr. 1	K03506	10222-2 P280GH			G 3202 SFVC 2 A
SA-541 Gr. 1A	K03020	10222-2 P280GH			G 3202 SFVC 2 A
A-573 Gr. 58	K02301				G 3101 SS400
A-573 Gr. 65	K02404	10025 S275J2G4			
A-573 Gr. 70	K02701	10025 E			G3106 SM490A

Catatan umum:

- A. Bahan yang dibuat dari bahan terdaftar lainnya yang tidak memiliki spesifikasi sebanding tidak disertakan.
- B. Tabel ini menghilangkan beberapa spesifikasi yang telah dibatalkan atau tidak dicantumkan sebagai tolok ukur dalam Handbook of Comparative World Steel Standards (Bringas, 2002).
- C. Spesifikasi non-AS yang tercantum dalam Tabel 1 adalah Standar Inggris (BS), Standar Industri Jepang (JIS), dan standar yang ditetapkan oleh Komite Eropa untuk Standardisasi (CEN) dan Institut Standardisasi Jerman (DIN).

Catatan:

1. Nomor UNS berasal dari ASTM DS-56I/SAE HS-1086/2004, Edisi ke-10, kecuali dinyatakan lain.
2. Nomor UNS berasal dari ASME B&PV, Bagian IX, Tabel QW/QB-422, Edisi 2004 dan Amandemen 2005.
3. Spesifikasi ini tidak tercantum untuk perbandingan dalam Handbook of Comparative World Steel Standards (Bringas, 2002).
4. Kekuatan luluh yang tinggi dari bahan ini cenderung mempengaruhi tegangan yang diijinkan dibandingkan dengan bahan sejenis.

Dari sini dapat disimpulkan bahwa baja karbon adalah baja yang unsur paduan utamanya adalah karbon, sedangkan unsur paduan lain jumlahnya sedikit, sehingga tidak terlalu mempengaruhi sifat-sifatnya. Konsisten dengan fakta ini, baja karbon sangat cocok untuk digunakan dalam sistem kerja yang mengutamakan kekuatan, beroperasi pada suhu atmosfer dan dalam kondisi non-korosif. Peningkatan kandungan karbon meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja karbon, tetapi di sisi lain, dalam aplikasi tertentu, seperti baja perkakas, bantalan bola dan rol dan baja pegas, kekerasan dan kemampuan pengerasannya tidak mencukupi, sehingga kelemahan tersebut dapat diatasi dengan produksi baja paduan.

2.1.2. Baja Paduan

Baja paduan diproses dengan menambahkan elemen lain ke baja, sehingga membutuhkan biaya yang lebih tinggi daripada baja karbon karena biaya pemrosesan yang meningkat. Setiap elemen atau elemen yang ditambahkan ke bahan berbasah dasar besi akan memiliki beberapa efek atau dampak pada sifat akhir bahan tersebut dan bagaimana bahan tersebut merespons proses pembuatan. Penambahan paduan menjelaskan banyak perbedaan antara jenis atau nilai baja karbon. Berikut ini adalah daftar unsur-unsur yang dapat dan biasanya ditambahkan pada besi serta pengaruh unsur-unsur tersebut terhadap bahan:

1) Karbon. (C)

Karbon adalah elemen paduan utama dalam baja dan dapat mencapai hingga 2%. Karbon dapat dilarutkan dalam besi atau dalam bentuk gabungan seperti besi karbida (Fe_3C). Peningkatan jumlah karbon meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik dan mempengaruhi perlakuan panas (sifat mampu keras).

2) Mangan. (Mn)

Baja biasanya mengandung setidaknya 0,3% mangan, yang bekerja dalam tiga cara: mendukung antioksidasi baja, mencegah pembentukan inklusi besi sulfida dan meningkatkan kekuatan dengan meningkatkan

kemampuan pengerasan baja. Baja karbon biasanya mengandung jumlah hingga 1,5%..

3) Silikon. (Si)

Secara umum, baja canai hanya memiliki jumlah yang kecil (0,2%) bila silikon digunakan sebagai antioksidan. Untuk baja tuang, bagaimanapun, 0,35-1,0% adalah umum. Silikon larut dalam besi dan memperkuatnya. Beberapa logam pengisi dapat mengandung hingga 1,0% silikon. Kelenturan berkurang yang disebabkan oleh pembubaran silikon dalam baja dapat menyebabkan masalah retak dalam beberapa situasi.

4) Sulfur. (S)

Belerang adalah pengotor yang tidak diinginkan dalam anggota baja paduan. Secara khusus, belerang harus dihilangkan atau diminimalkan dalam produksi baja. Penambahan belerang dalam jumlah 0,1% sampai 0,3% cenderung meningkatkan machinability baja. Jenis baja ini bisa disebut pemesinan otomatis.

5) Fosfor. (P)

Fosfor juga dianggap sebagai pengotor yang tidak diinginkan dalam baja. Ini biasanya ditemukan di sebagian besar baja karbon pada tingkat serendah 0,04%. Dengan baja yang dikeraskan, cenderung pahit. Pada baja paduan rendah dan baja berkekuatan tinggi, fosfor dapat ditambahkan hingga 0,10% untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan korosi.

6) Kromium. (Cr)

Chromium adalah elemen paduan yang kuat dalam baja. Ditambahkan karena dua alasan utama: Pertama, kemampuan pengerasan baja sangat meningkat; Kedua, sangat meningkatkan ketahanan korosi besi dan baja. Kehadirannya di beberapa baja dapat menyebabkan kekerasan yang berlebihan. Baja tahan karat mengandung lebih dari 12% kromium.

7) **Molibdenum. (Mo)**

Unsur ini merupakan pembentuk logam keras yang kuat dan biasanya kurang dari 1,0% pada baja paduan. Elemen-elemen ini ditambahkan untuk meningkatkan *hardenability* dan meningkatkan ketahanan suhu.

8) **Nikel. (Ni)**

Nikel ditambahkan ke baja untuk meningkatkan kekerasannya. Ini bekerja dengan baik dalam kapasitas ini karena sering meningkatkan kekuatan dan keuletan baja bahkan dengan peningkatan kekuatan dan kekerasan. Nikel sering digunakan untuk meningkatkan daya tahan baja pada temperatur rendah.

9) **Vanadium. (V)**

Penambahan vanadium meningkatkan kekerasan baja. Ini sangat efektif, sehingga biasanya ditambahkan dalam jumlah kecil. Pada konsentrasi di atas 0,05%, baja cenderung menjadi rapuh selama perlakuan panas tegangan.

10) **Elemen paduan lainnya.**

Beberapa spesifikasi baja karbon memungkinkan penambahan elemen tertentu lainnya, tetapi tidak sengaja ditambahkan. Pada spesifikasi lain, elemen ini dapat ditambahkan pada baja, namun akan kecil pada baja karbon.

2.2. **Baja Pegas Daun (*Leaf Spring Steel*)**

Menurut Chaudar et al. (2015), pegas didefinisikan sebagai benda elastis yang berubah bentuk saat dibebani dan kembali ke bentuk semula saat beban dilepas. Pegas daun adalah elemen suspensi penting yang digunakan pada mobil penumpang ringan maupun kendaraan berat yang diperlukan untuk meminimalkan getaran vertikal, guncangan, dan benturan akibat benturan jalan dan memastikan pengendaraan yang nyaman. Pegas daun sangat banyak digunakan untuk suspensi berbagai jenis mobil dan kereta api. Pegas daun yang ditunjukkan pada Gambar 2

perlu menyerap getaran vertikal dan guncangan akibat benturan jalan melalui fluktuasi perjalanan suspensi, sehingga energi potensial disimpan sebagai energi tegangan pada pegas dan kemudian dilepaskan secara perlahan sehingga meningkatkan kapasitas penyimpanan energi pegas daun.



Gambar 2 Pegas Daun (Leaf Spring) Truk Tronton Mitsubishi 8DC9
Sumber: Dokumentasi pribadi

Banyak jenis pegas yang tersedia saat ini, antara lain pegas daun, pegas koil, pegas torsi, pegas cakram, dan lain-lain. Jenis sumber tersebut memiliki sifat yang berbeda satu sama lain. Perbedaannya juga terletak pada bahan yang digunakan dan sifat mekaniknya. Hal ini disesuaikan dengan standar proses suspensi yang ada. Salah satu jenis bahan dasar pegas daun adalah JIS SUP 9A. Dalam buku mereka *Material for Spring*, Yamada et al. (2007) menunjukkan bahwa material JIS SUP 9A memiliki kekuatan tarik yang tinggi, elastisitas yang baik dan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan baja karbon lainnya. Pada Tabel 2 menunjukkan pengelompokan baja SUP menurut JIS G 4801, 1981 menjadi sembilan grade. Dalam proses produksi material JIS SUP 9A, austenizing merupakan bagian dari proses akhir ketika sifat mekanik material lebih baik dari material awal.

Tabel 2 Pembagian baja SUP dan penggunaannya.

Designation of Grade		Remark
SUP 3	High Carbon Steel	<i>Mainly used for laminated</i>
SUP 6	Silicon Manganese Steel	<i>Mainly used for laminated spring, coiled spring, and torsion bar spring.</i>
SUP 7		
SUP 9	Manganese Chromium Steel	
SUP 9A		
SUP 10	Chromium Vanadium Steel	<i>Mainly used for coiled spring, and torsion bar spring.</i>
SUP 11A	Manganese Chromium Boron Steel	<i>Mainly used for laminated spring, coiled spring, and torsion bar spring.</i>
SUP 12	Silicon Chromium Steel	<i>Mainly used for spring.</i>
SUP 13	Chromium Molybdenum Steel	<i>Mainly used for laminated spring and coiled spring.</i>

Sumber: JIS, Hand Book of Material, Japan, 1984

2.3. Pengaruh Elemen Padu Baja Pegas

Dalam buku mereka *Material for Spring*, Yamada et al. (2007) menyatakan bahwa material baja pegas dapat diklasifikasikan menjadi (a) material yang diberi perlakuan panas selama proses manufaktur sedangkan pegas dibentuk dengan pengerjaan panas dan (b) material yang membutuhkan sifat mekanik pegas, terutama kekuatan tarik dan kekerasan, dapat diperoleh sebelum pembentukan pegas. Dalam kasus (a), ukuran material, seperti diameter kawat pegas kawat dan ketebalan pegas daun, relatif besar, dan perlakuan panas dilakukan setelah pekerjaan panas (pekerjaan dingin jarang dilakukan). Bahan ini dapat digunakan untuk pegas seperti pegas daun, pegas koil dan batang torsi untuk

kendaraan kereta api dan/atau mobil. Dalam kasus (b), relatif kecil (diameter kawat, ketebalan, dll.) dan bentuk pegas dianggap dapat diproduksi dengan penempaan dingin.

Mengenai sifat material pegas yang dibutuhkan, selain modulus elastisitas, bentuk, dimensi, toleransi, kekasaran permukaan, ketahanan korosi dan sifat mekanik, ada banyak faktor lain yang mempengaruhi kekuatan dinamis pegas, banyak juga yang penting untuk dipertimbangkan. Cacat permukaan, dekarburisasi, kemampuan mengeras, inklusi non-logam, pemisahan, dll. persyaratan kekuatan tinggi dan meningkatkan keandalan. Baru-baru ini, berkat kemajuan dalam teknologi pemrosesan baja gabungan, pengurangan kotoran berbahaya dan inklusi non-logam dalam produksi industri menjadi mungkin dengan biaya rendah. Kemajuan dalam proses rolling dan teknologi pengujian non-destruktif telah sangat meningkatkan akurasi dimensi dan kualitas permukaan. Dengan kombinasi kemajuan teknis dan pengembangan material ini, tekanan desain pegas suspensi penumpang dapat meningkat dari 980MPa menjadi 1079MPa, selain itu, baru-baru ini tekanan 1275MPa digunakan dalam praktik, yang membantu menghemat bobot dan kesempitan celah pegas dalam desain suspensi.

Ada banyak bahan baja untuk pegas, seperti baja pegas bentuk panas, kawat baja tarik keras, baja tahan karat dan baja perkakas. Dari jumlah tersebut, yang disebut baja pegas yang digunakan untuk pembentukan panas meliputi baja karbon, baja Si, baja Mn, baja Si-Mn, baja Si-Cr, baja Mn-Cr, baja Cr-V, baja Si-Cr-V, baja Si-Ni-Cr, baja Ni-Cr-Mo, baja Cr-Mo, baja B dan lainnya yang dapat diklasifikasikan sebagai baja paduan rendah. Alasan sebagian besar jenis baja mengandung Si adalah karena Si dapat meningkatkan kinerja baja dan meningkatkan daya tahan rakitan pegas permanen. Sebagai baja untuk pegas besar, baja Ni-Cr-Mo, baja Cr-Mo, dan baja pengerasan yang sangat baik lainnya telah dikembangkan. Tabel 3 menunjukkan komposisi kimia baja pegas yang ditentukan atau direkomendasikan oleh beberapa negara (JIS G 4801 *Spring Steels*. 1984). Pendinginan dan temper minyak dapat menjadi perlakuan panas yang normal di setiap negara, dan kandungan karbonnya sebagian besar 0,50-0,65%, kecuali untuk baja karbon. Di Eropa, *quenching* air sebagian diterapkan

pada baja dengan kandungan karbon sekitar 0,5%, mengingat *quenching cracking*. Meskipun *quenching* air digunakan di Jepang, semua sumber baja sekarang dapat diquenching dengan minyak.

Tabel 3 Komposisi Kimia Baja Pegas Daun

Designation of Grade	C	Si	Mn	P ^[37]	S ^[37]	Cr	Mo	V	B
SUP 3	0.75 To 0.9	0.15 To 0.35	0.30 To 0.60	0.035 Max	0.035 Max	-	-	-	-
SUP 6	0.56 To 0.64	1.50 To 1.80	0.70 To 1.00	0,030 Max	0,030 Max	-	-	-	-
SUP 7	0,56 To 0,64	1,80 To 2,20	0,70 To 1,00	0,030 Max.	0,030 Max.	-	-	-	-
SUP 9	0.52 To 0.64	0.15 To 0.35	0.70 To 1.00	0,030 Max.	0,030 Max.	0,65 To 0,95	-	-	-
SUP 9A	0,56 To 0,64	0,15 To 0,35	0,70 To 1,00	0,030 Max.	0,030 Max.	0,70 To 1,00	-	-	-
SUP 10	0,47 To 0,55	0,15 To 0,35	0,65 To 0,95	0,030 Max.	0,030 Max.	0,80 To 1,10	-	0,15 To 0,25	-
SUP 11A	0,56 To 0,64	0,15 To 0,35	0,70 To 1,00	0,030 Max.	0,030 Max.	0,70 To 1,00	-	-	0,0005 Min.
SUP 12	0,51 To 0,59	1,20 To 1,60	0,60 To 0,90	0,30 Max.	0,30 Max.	0,60 To 0,90	-	-	-
SUP 13	0,56 To 0,64	0,15 To 0,35	0,70 To 1,00	0,030 Max.	0,030 Max.	0,70 To 0,90	0,25 To 0,35	-	-

(JIS G 4801 Spring Steels. 1984).

Dalam standar Jepang JIS G4801-1984 untuk baja pegas panas, yang menentukan komposisi kimianya. SUP3 adalah baja karbon dengan komposisi eutektoid dan telah banyak digunakan sebagai material baja pegas selama bertahun-tahun. Namun, karena kekasarannya tidak cukup baik untuk digunakan

pada pegas berukuran besar, maka sebagian besar digunakan untuk pegas daun pada kendaraan kereta api. SUP6 dan SUP7 adalah grade baja Si-Mn tinggi dengan kekuatan tinggi, ketahanan *quenching* yang baik, dan *tempering* yang relatif baik. Setelah *quenching* dan *tempering*, grade baja tersebut memperoleh sifat pegas yang sangat baik. Karena kinerjanya yang tinggi, baja ini memiliki berbagai aplikasi dan dapat bertahan dalam kondisi servis sedang-berat. SUP7 mencapai kekuatan kelelahan yang tinggi karena kandungan Si lebih tinggi dari SUP6, dan dapat digunakan secara luas pada pegas koil dan pegas daun untuk mobil. SUP9, baja Mn-Cr, menunjukkan deformasi termal dan kemampuan mengeras yang baik untuk digunakan pada batang penstabil, batang torsi, dan pegas koil yang relatif.

Tabel 4 Sifat mekanik dan termal material JIS SUP 9A

Mechanical Properties	Elastic Modulus (GPa)	Poisson Ratio	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Shear Modulus (Gpa)
	190	0,29	1225	1080	73
Thermal Properties	Melting Point (°C)	Specific Heat Capacity (J/kg-K)	Thermal Conductivity (W/m-K)	Thermal Expansion (µm/m-K)	
	1450	470	48	13	

Tabel 4 ini menunjukkan sifat mekanik dan termal SUP9A (Candra et al 2018) yang setara dengan baja SAE5160, pada dasarnya memiliki komposisi kimia yang sama dengan SUP9, dengan kandungan karbon yang sedikit lebih tinggi dan kisaran Mn dan Cr yang lebih tinggi untuk meningkatkan kemampuan pengerasan. SUP10 adalah baja Cr-V dengan kemampuan pengerasan yang baik dan ketangguhan tinggi dan digunakan dalam aplikasi kekerasan yang lebih tinggi. SUP11A adalah bahan yang sama dengan SUP9A, baja Mn-Cr yang diproses boron, dan kekerasannya sangat baik, umumnya sifat mekaniknya tidak berubah dari SUP9A. Baja Si-Cr, SUP12, banyak digunakan untuk bahan kawat yang dikeraskan minyak dari bahan pegas bentuk dingin. SUP13 adalah baja Cr-Mo dengan pengerasan yang lebih baik daripada SUP11A dengan tambahan boron.

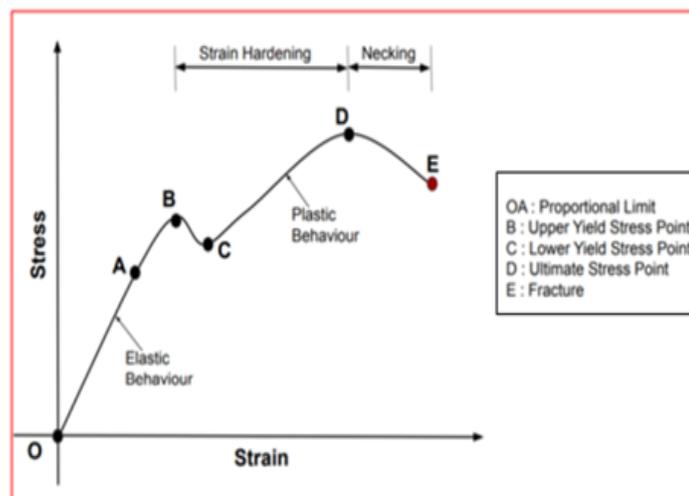
SUP13 dapat digunakan untuk pegas koil yang sangat besar dengan diameter lebih dari 100mm.

2.4. Sifat Mekanik Baja Paduan Fe-C

Murugan et al. (2017) pemilihan material dalam perencanaan konstruksi harus disesuaikan dengan sifat mekanik logam yang ada. Sifat mekanik adalah sifat yang mempengaruhi kekuatan mekanik dan kemampuan material untuk dicetak menjadi bentuk yang sesuai. Sifat-sifat ini mengacu pada kemampuan material untuk menahan gaya dan beban mekanis dan diukur menurut perilaku material saat mengalami gaya. Dalam studinya, Wei. (2014) menunjukkan bahwa sifat mekanik dapat ditentukan untuk informasi desain atau sebagai standar kontrol bahan baku. Sifat mekanik dapat diubah dengan proses perlakuan panas dan suhu kerja. Kekuatan, daya tahan dan kekerasan material terutama diukur setelah pembentukan. Tinjauan tentang pentingnya sifat mekanik bahan dan pengujian, meliputi konsep kekuatan, plastisitas, sifat mampu bentuk, kekakuan, kelenturan, kerapuhan, daya tahan, kelenturan, kelenturan, kelelahan, aliran dan bagaimana kesalahpahaman tentang sifat dapat menyebabkan kebingungan. Sifat mekanik yang paling penting antara lain :

[1] Kekuatan (*Strength*) dan Tegangan-Regangan (*Stress-Strain*)

Kekuatan material mengacu pada kemampuan material untuk menahan kekuatan eksternal tanpa putus. Kegembiraan terbesar adalah bahwa setiap materi bertahan sebelum dihancurkan. Gambar 3 menunjukkan hubungan antara tegangan dan regangan. Kurva tegangan dan regangan yang diperoleh dalam uji tarik menggambarkan daya tahan dan titik luluhnya (Xu et al. 2019). Meena et al. (2013) berdasarkan Gambar 3 sampai batas elastis bahan, hal ini berarti bahan tetap pada dimensi semula, di atas keadaan plastisitas bahan mengikuti dan tidak kembali ke dimensi semula, apabila bahan melebihi batas akhirnya, stress point, penyempitan mulai terjadi pada spesimen.



Gambar 3 Kurva Hubungan Tegangan-Regangan

Tegangan pengerasan dipertahankan antara titik luluh dan tegangan tarik. Materi mematuhi Hukum *Hooke* jika diukur dengan benar. Kurva tegangan dan regangan digunakan untuk mendapatkan modulus elastisitas bahan dengan cara membandingkan nilai tegangan dan regangan dengan batas elastisnya. Pada gambar, luas A-B diukur sebagai batas elastis. Kemampuan suatu bahan untuk menahan tegangan tanpa kerusakan atau deformasi yang tidak perlu disebut kekuatan dan dapat menjadi kemampuan suatu bahan untuk menanggapi gaya yang sama (ketegangan, tekan, geser) tanpa putus. Sederhananya, kekuatan adalah ketahanan maksimum suatu material terhadap deformasi. Demikian pula, ketangguhan adalah kemampuan material untuk menahan fraktur di bawah pengaruh gaya tarik.

[2] Kekakuan (*Stiffness*)

Kekakuan adalah kemampuan suatu material untuk menahan deformasi di bawah beban. Modulus elastisitas adalah ukuran kekakuan. Bahan yang mudah berubah di bawah beban sangat kaku. Misalnya, balok baja lebih kaku dari balok aluminium. Pada akhirnya, itu berarti bahwa kemampuan suatu bahan untuk menahan tekukan elastis disebut sebagai kekakuan.

[3] Kekenyalan (*Elasticity*)

Elastisitas adalah kemampuan suatu bahan untuk mendapatkan kembali bentuk aslinya setelah deformasi ketika gaya eksternal dihilangkan. Contohnya

adalah ekspansi atau kompresi pegas. Properti ini diinginkan untuk bahan yang digunakan dalam alat dan mesin. Baja lebih fleksibel daripada karet. Elastisitas adalah sifat tarik suatu bahan. Batas proporsional dan batas elastis menunjukkan fleksibilitas. Ini juga dikenal sebagai deformasi permanen. Ini terdiri dari dua fitur parsial di area elastis ini. Mereka adalah batas relatif dan batas elastis. Batas proporsionalitas adalah tegangan maksimum di mana suatu bahan akan mempertahankan tingkat tegangan yang konstan terhadap tegangan. Aplikasi batas proporsional adalah instrumen presisi, pegas, dll. Tegangan maksimum yang dapat ditahan suatu bahan tanpa jumlah tetap disebut batas elastis. Di luar batas elastis, bahan tidak akan kembali ke bentuk semula dan akan menghasilkan bentuk yang permanen.

[4] **Plastisitas (*Plasticity*)**

Dalam bukunya Metalurgi Mekanik, Dieter. et al (1961) menyatakan bahwa plastisitas adalah kemampuan suatu material untuk mengalami beberapa derajat deformasi permanen tanpa retak atau pecah. Ini berarti bahwa sifat material secara konstan berubah bentuk di bawah pengaruh beban. Deformasi plastis hanya terjadi ketika rentang elastis terlampaui oleh proses *sliding*, ketika tegangan geser pada bidang *sliding* mencapai nilai kritis. Perpindahan yang disebabkan oleh slip bersifat permanen dan bidang kristal tidak kembali ke posisi semula bahkan setelah tegangan dihilangkan. Aplikasi ini termasuk membentuk, menekan, kerja panas dan dingin, penempaan, rekayasa, *stamping*, *rolling*, menggambar, menekan dan lain-lain. Aluminium merupakan bahan dengan plastisitas yang baik.

[5] **Keuletan (*Ductility*)**

Ini adalah sifat material yang memungkinkannya diregangkan menjadi benang tipis oleh gravitasi. Bahan yang dibentuk harus kuat dan plastik. Bahan lunak adalah emas (bahan paling lunak), baja ringan, tembaga, aluminium, nikel, seng, timah. Daktilitas biasanya diukur sebagai persentase perpanjangan dan persentase pengurangan luas permukaan. Daktilitas dianggap sebagai kekuatan tarik. Bahan lunak menggabungkan sifat plastisitas dan kekuatan tarik. Ini juga disebut sebagai kemampuan suatu material untuk berubah bentuk di bawah beban tanpa pecah, atau kemampuan suatu material untuk menahan kerja dingin tanpa

pecah. Ketangguhan material adalah perpanjangan di bawah beban tarik dan retensi bentuk yang terdeformasi saat beban dihilangkan. Jika material mengalami beban tumbukan, cacat akan berkembang. Bahan lunak dapat dibentuk menjadi bentuk tanpa kehilangan kekuatan. Semua bahan yang dirancang harus ulet, misalnya menarik benang ke dalam bentuk.

[6] Kerapuhan (*Brittleness*)

Mematahkan material dengan sedikit penyimpangan permanen hanya mengungkapkan kerapuhannya. Bahan rapuh dalam ketegangan tanpa perpanjangan yang memadai Murugan et al. (2018). Secara umum, kekuatan tarik bahan rapuh hanya sebagian kecil dari kekuatan tekannya. Contoh bahan rapuh adalah kaca, batu bata, besi tuang dan lain-lain. Ada juga kecenderungan suatu material untuk pecah ketika mengalami beban impak atau benturan. Bahan yang halus juga merupakan bahan yang getas.

[7] Kelenturan (*Malleability*)

Ini adalah kemampuan material untuk digulung, diratakan atau dipalu menjadi lembaran tipis tanpa retak selama pengerjaan panas atau dingin. Bahan cetakan harus plastik tetapi tidak kuat dan fleksibel dianggap tingkat kompresi. Contoh kelenturan Al, Cu, Sn, Pb, baja ringan, besi tempa. Ini adalah sifat material untuk terus berubah bentuknya di bawah pengaruh beban tekan. Bahan yang akan ditempa menjadi bentuk akhir harus dapat ditempa. Proses penempaan dan penggulangan, jika material dapat ditempa, maka itulah kelenturan.

[8] Ketangguhan (*Toughness*)

Ini adalah kemampuan suatu material untuk menahan tekukan tanpa putus karena beban benturan yang tinggi. Jiang et al. (2017), ketangguhan material menurun saat dipanaskan. Ini juga diukur dengan jumlah energi yang diserap oleh satu satuan volume material setelah dikompresi hingga titik putus dan merupakan area di bawah kurva tegangan-regangan. Misalnya, jika Anda tiba-tiba memuat sepotong baja ringan dan kemudian sepotong kaca, baja ringan akan menyerap lebih banyak energi sebelum terjadi kerusakan. Jadi baja ringan dikatakan jauh lebih keras daripada kaca. Fitur ini diinginkan untuk bagian yang akan mengalami beban kejut dan benturan. Meysame et al. (2010), kekuatan takik mengukur

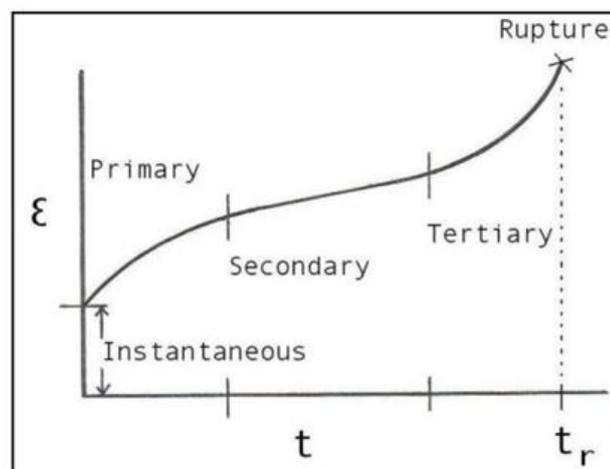
ketahanan logam terhadap patah getas dengan adanya cacat atau takik dan dalam kondisi pembebanan yang cepat. Contohnya adalah baja Mn, besi tempa, Ms dan lain-lain. Juga didefinisikan sebagai kemampuan untuk menyerap energi sebelum meledak. Kebalikan dari kerapuhan, kemampuan material untuk pecah di bawah beban benturan. Pada dasarnya ada dua uji impak utama yang tersedia untuk mengukur daya tahan bahan dalam joule, yaitu uji *Izod* dan *Charpy*.

[9] Gaya Pegas (*Resillience*)

Sifat material untuk menyerap energi dan menahan beban kejut dan benturan dikenal sebagai: kegigihan. Secara umum, jumlah energi yang diserap per satuan volume dalam batas elastis. Ini penting untuk bahan pegas. Ada dua jenis resistensi. resistensi bukti: Daya tahan adalah energi maksimum yang dapat disimpan dalam tubuh hingga batas elastisitasnya. Tetapi bukti resistansi per satuan volume disebut modulus ketahanan.

[10] *Creep*

Ketika suatu bagian mengalami tekanan konstan pada suhu tinggi untuk waktu yang lama, ia mengalami deformasi yang lambat dan permanen yang dikenal sebagai mulur. Properti ini diperhitungkan saat merancang mesin pembakaran internal, boiler, dan turbin. Sebagai jenis deformasi mulur yang paling sederhana, plastik kental, karet, dan material amorf sangat sensitif terhadap deformasi suhu terhadap *creep*.



Gambar 4 Kurva Classical Creep

Tegangan untuk laju regangan tertentu pada suhu konstan disebut titik luluh. Ketika suatu material dikenai beban tetap untuk jangka waktu yang lama, material tersebut dapat terus mengalami deformasi hingga cenderung pecah di bawah beban yang sama. Ini disebut tegangan jatuh. Jika dimuat dan dibiarkan dalam sampel selama berbulan-bulan atau bertahun-tahun, sampel perlahan akan mengembang. Untuk logam dengan temperatur leleh yang tinggi, *creep* pada temperatur yang lebih tinggi menjadi masalah. misalnya turbin gas yang beroperasi pada suhu tertinggi. ASTM E139 adalah metode uji standar untuk kekuatan mulur spesimen.

Uji kegagalan mulur dan tarik digunakan untuk menganalisis tegangan yang dapat ditahan material sebelum retak dan memanjang. Ini adalah indikator penting untuk produk di luar angkasa, otomotif, listrik, farmasi, minyak dan gas, dan banyak industri lainnya. Tiga fase kurva *creep* klasik ditunjukkan pada Gambar 4. *Creep* primer dimulai dengan kecepatan tinggi dan melambat seiring waktu. Tetapi jalan sekunder memiliki kecepatan yang relatif konstan. Pada tahap ketiga, aliran tersier, laju mulur telah dipercepat dan berakhir ketika material pecah. Hal ini terkait dengan penyempitan dan pembentukan rongga batas butir.

[11] Kelelahan (*Fatigue*)

Ini adalah kegagalan material di bawah beban siklik. Jika bagian tersebut dikenai beban berulang atau bervariasi, kegagalan akan terjadi pada beban yang nilai maksimumnya lebih kecil dari kekuatan tarik material. Contohnya adalah komponen mesin pesawat terbang dan turbin berkecepatan tinggi. Ini adalah sifat material untuk menahan beban yang terus berubah dan berubah. Arora et al. (2014) bagian, setelah dibebani hingga mendekati tegangan luluh, tidak akan pecah. Namun, jika berulang kali diisi ke level itu, pada akhirnya akan runtuh. Kegagalan ini dikenal sebagai *burnout*. Kelelahan adalah tujuan penting dalam desain mesin bergerak. Pada dasarnya, tiga tahapan proses kelelahan adalah (i) kelelahan kerusakan awal yang mengarah ke nukleasi retak dan inisiasi retak. Tahap (ii) Pertumbuhan retak siklik progresif, yaitu tahap penjarangan retak sampai sisa penampang yang tidak retak menjadi terlalu lemah untuk menahan beban yang diberikan. (iii) Tahap terakhir adalah pecah tiba-tiba.

[12] Kekerasan (*Hardness*)

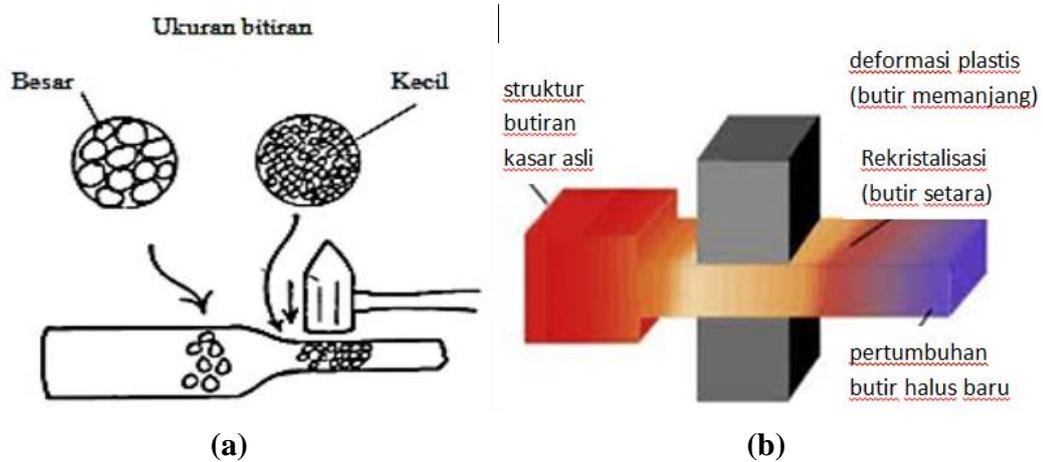
Sifat material untuk menahan penetrasi oleh material lain disebut kekerasan. Ini mencakup banyak sifat berbeda seperti ketahanan aus, ketahanan gores, deformasi dan lain-lain. Kekerasan material dapat didefinisikan sebagai ketahanan terhadap keausan, deformasi atau defleksi. Ada banyak metode pengukuran kekerasan yang tersedia, yaitu skala Moh, kekerasan Vicker, kekerasan Rockwell, uji Knoop dan kekerasan Brinell. Pada umumnya kekerasan suatu material diukur dengan kedalaman lekukan atau luas permukaan yang ditinggalkan oleh lekukan dengan gaya tertentu selama waktu tertentu (Sanij et al. 2012).

[13] Mampu Mesin (*Machinability*)

Machinability didefinisikan sebagai "kemudahan" dimana material dapat dikerjakan, seperti pengeboran, pembubutan, pemotongan dan lain-lain. *Machinability* logam dinyatakan dalam persen (%), yang menurut penelitian Xu et al. (2018) dikenal sebagai *indeks machinability*. Logam standar yang digunakan untuk *machinability* grade 100 adalah baja bebas. Bahan yang mudah dikerjakan dengan mesin dapat dipotong dengan usaha yang relatif sedikit dan dengan biaya rendah. Paduan dengan lebih dari 10% Si adalah yang paling sulit dikerjakan karena partikel silikon bebas yang keras menyebabkan keausan pahat yang cepat. Kemampuan kerja mesin dapat ditingkatkan dengan pengerjaan dingin.

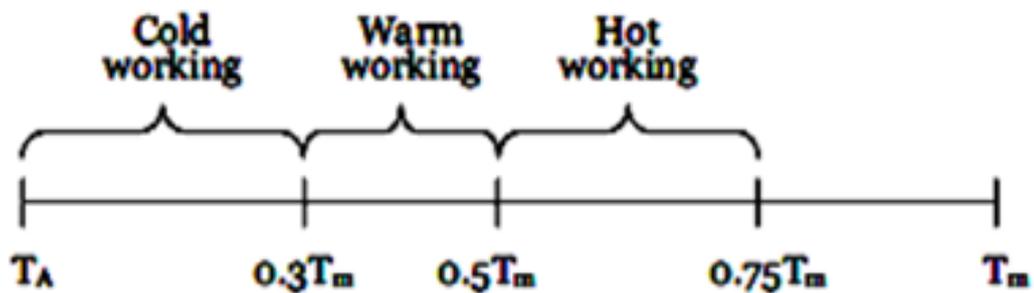
2.5. Penempaan Panas (*Hot-Forging*)

Penempaan adalah perubahan bentuk logam akibat deformasi plastis material. Proses penempaan menerapkan beban berulang atau siklik. Proses penempaan dapat dilakukan secara manual atau otomatis dengan mesin. Dalam studi mereka, Zhao et al. (2021) menunjukkan bahwa proses penempaan dapat menghaluskan struktur butir dan mengurangi proses pemesinan. Ukuran butir pada proses penempaan dipengaruhi oleh suhu, komposisi kimia dan proses mekanik. Ukuran butir meningkat dengan pemanasan. Bahan yang dihasilkan selama penempaan berbutir halus dalam arah penempaan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Ini juga meningkatkan kekuatan bahan.



Gambar 5 Proses Penempaan Baja Pegas Daun: (a) secara manual, (b) mesin forging secara otomatis

Proses penempaan dibagi menjadi dua jenis metode, yaitu penempaan dingin dan penempaan panas. Proses penempaan *hot forging* dilakukan dengan terlebih dahulu memanaskan material hingga suhu kurang lebih $0,75 T_m$, setelah itu dilakukan proses penempaan pada suhu $0,6 T_m$ hingga $0,5 T_m$. Proses ini menyebabkan struktur dan sifat logam tidak seragam karena deformasi di permukaan selalu lebih besar. Butiran rekristalisasi yang lebih kecil muncul di permukaan logam, hal ini dapat dihindari dengan mengatur suhu kerja sesuai seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Batas Temperatur Pengerjaan Panas.

Pandai besi tradisional sangat berpengalaman dalam menggunakan metode ini menurut Schey (2000). Mereka melakukan metode ini dengan mengatur suhu

secara manual berdasarkan warna baja dan pengamatan visual dari nyala api yang dihasilkan. Warna baja secara tidak langsung menunjukkan temperaturnya menurut Tabel 5 di bawah. Menurut Hrisoulas (1987), warna api atau baja yang digunakan untuk penempaan biasanya merah cherry atau pada temperatur tempa sekitar 800°C.

Tabel 5 Variasi Warna dan Temperatur pada Api

Temperatur (°F/°C)	Warna
1200°F / 648°C	<i>Dull red</i>
1400°F / 760°C	<i>Red</i>
1500°F / 815°C	<i>Cherry red</i>
1600°F / 871°C	<i>Full cherry red</i>
1800°F / 982°C	<i>Orange</i>
1900°F / 1037°C	<i>Orange yellow</i>
2000°F / 1093°C	<i>Yellow</i>
2200°F / 1204°C	<i>Full yellow</i>
2400°F / 1315°C	<i>Light yellow</i>

2.6. Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

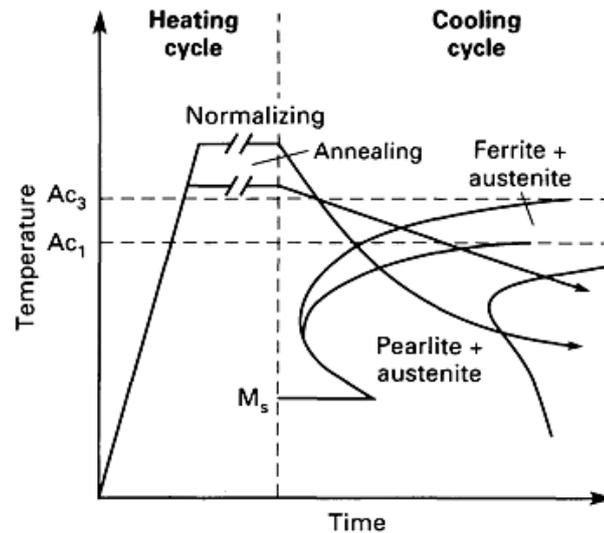
Produk baja diproduksi untuk digunakan dalam berbagai aplikasi yang sering mengalami proses perlakuan panas. Beberapa faktor dapat dimodifikasi selama perlakuan panas untuk menghasilkan baja dengan sifat mekanik yang baik dan konsisten. Mikrostruktur dan sifat mekanik yang dibutuhkan dapat diperbaiki dengan mengubah beberapa parameter seperti ukuran butir austenit, kelarutan partikel karbida, laju pendinginan dan komposisi baja. Secara umum, tujuan perlakuan panas adalah untuk melunakkan logam, untuk meningkatkan kekuatan dan keuletan, tetapi juga untuk meningkatkan atau menurunkan kekerasan dan kekuatan tergantung pada temperatur pemanasan dan laju pendinginan.

Perlakuan panas sering meningkatkan beberapa properti dengan mengorbankan yang lain. Selain itu, perlakuan panas digunakan untuk

mengurangi tekanan internal ketika logam mengalami tekanan tinggi selama deformasi. Dalam banyak kasus besar, perbedaan suhu eksternal dan internal objek harus dipertimbangkan selama pemanasan dan pendinginan. Gradien yang terlalu besar dapat mengakibatkan perbedaan struktur mikro yang dapat menyebabkan deformasi atau keretakan pada bagian-bagian tersebut. Grafik TTT dan CCT sering digunakan dalam perlakuan panas untuk menentukan kondisi yang tepat seperti waktu penahanan dan laju pendinginan. Beberapa proses perlakuan panas meliputi; lunakkan, normalkan, padamkan, dan keraskan.

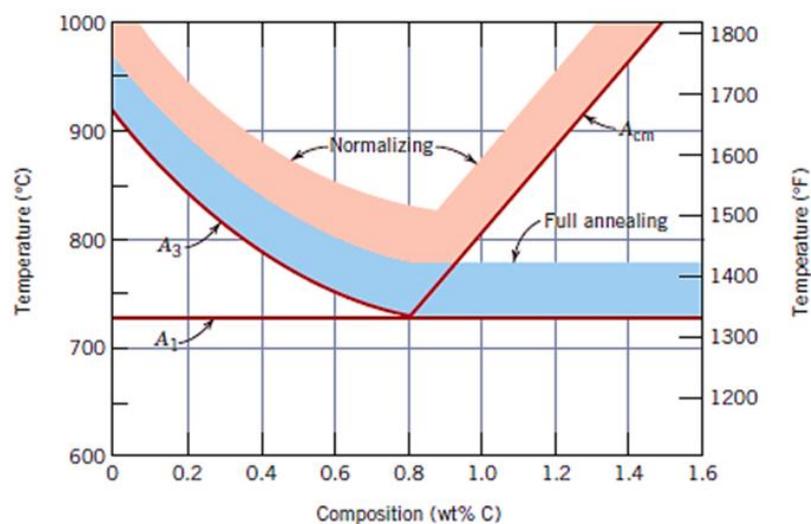
2.6.1. Anil Penuh (*Full Annealing*)

Proses *annealing* adalah perlakuan panas baja pada suhu austenit selama waktu tertentu pada suhu 25°C hingga 50°C di atas transformasi A3 untuk baja *hypoeutectoid* dan pada suhu 25°C hingga 50°C di atas transformasi A1 dan Acm untuk baja *hipereutektoid* diikuti dengan pendinginan lambat, sebagian besar dalam tungku (Krauss, 2005). Jika baja *hypoeutektoid* dipanaskan di atas A3, sementit *proeutektoid* terbentuk pada batas butir pada laju pendinginan rendah; karbida ini membantu perambatan retak dan membuat baja menjadi rapuh (Prabhudev, 1988). Dengan pendinginan lambat, anil penuh menyebabkan austenit berubah menjadi perlit kasar dan ferit atau sementit. Seperti dapat dilihat pada Gambar 7, parameter yang paling penting adalah suhu dan laju pendinginan untuk menghasilkan butiran halus yang sedikit lebih halus dari struktur mikro kasar dalam proses anil penuh.



Gambar 7 Skema siklus suhu dan waktu untuk normalisasi, anil penuh dan pendinginan lambat menghasilkan transformasi suhu yang lebih tinggi menjadi ferit dan perlit dan struktur mikro yang lebih kasar daripada normalisasi.

Secara umum, tujuan dari proses *annealing* adalah untuk mengurangi tekanan internal dan menciptakan struktur mikro yang menawarkan *machinability* yang baik, kelembutan yang tinggi dan kekuatan yang sedang. Gambar 8 menunjukkan tahapan yang berbeda dari proses anil penuh dan menunjukkan bahwa suhu anil untuk baja *hypoeutectoid* menurun dengan meningkatnya karbon, sedangkan untuk baja *hypereutectoid* hampir konstan di bawah suhu A_{cm} .



Gambar 8 Diagram fasa Fe-C yang menunjukkan rentang suhu anil penuh, serta rentang suhu normalisasi.

2.6.2. Pengerasan (*Hardening/Quenching*)

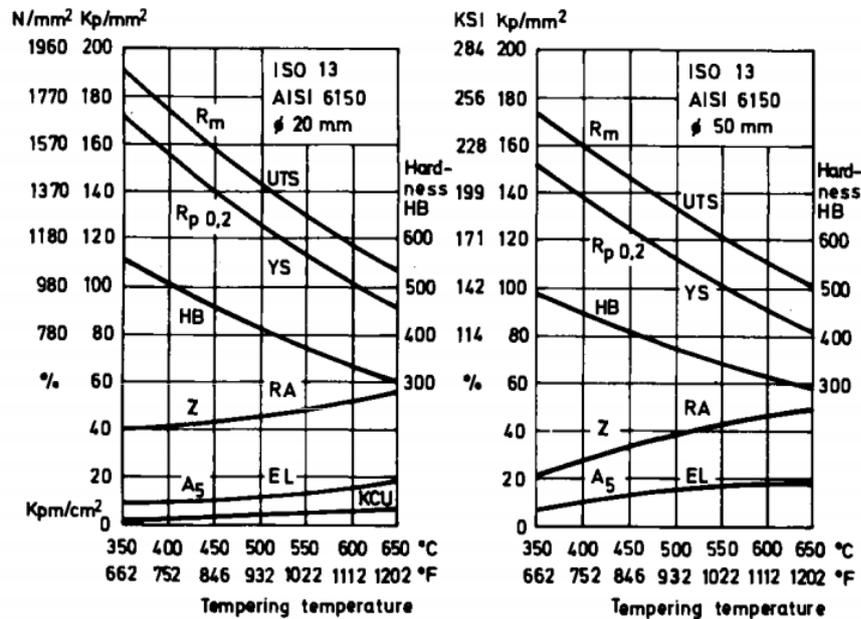
Quenching konvensional adalah proses perlakuan panas di mana baja dipanaskan hingga suhu zona austenit, ditahan cukup lama untuk seluruh struktur mikro menjadi austenit, dan didinginkan dengan sangat cepat hingga suhu kamar, atau dalam beberapa kasus di bawah suhu tersebut. Laju pendinginan, yang biasanya merupakan fungsi dari komposisi kimia baja dan ukuran butir austenit, diterapkan secara cepat untuk menghindari pembentukan ferit, perlit, atau bainit (Prabhudev. 1988). Selama pendinginan baja, yang dapat dikeraskan dengan baik dalam air, struktur martensit yang sangat kuat terbentuk, tergantung pada kandungan karbonnya, memiliki kekerasan dan kekuatan yang baik, tetapi juga sangat rapuh.

Dengan baja, pendingin yang berbeda digunakan untuk tujuan yang berbeda dan media yang paling umum digunakan adalah air, udara terkompresi, minyak dan air garam. Pendingin yang berbeda ini dipilih sesuai dengan kapasitas pendinginan yang diperlukan untuk menghindari atau meminimalkan risiko retak dan distorsi pendinginan (Haimbaugh, 2001). Untuk produk besar, khususnya produk dengan *curing* rendah, biasanya terdapat perbedaan temperatur antara permukaan dan bagian tengah selama pendinginan cepat. Perbedaan ini terjadi ketika permukaan telah benar-benar dingin sedangkan inti tetap hangat (dipadamkan). Oleh karena itu, untuk memperkecil perbedaan tersebut digunakan tangki pendingin khusus dengan sistem pendingin yang baik (Totten. 2006). sistem pendinginan yang baik digunakan untuk kurangi perbedaannya seminimal mungkin (Totten. 2006).

2.6.3. Temper (*Tempering*)

Pada Gambar 9 ditunjukkan bahwa setelah pengerasan pada laju pendinginan yang cepat, baja biasanya lebih keras dari yang diperlukan, terlalu rapuh, dan memiliki tegangan sisa yang tinggi yang membuat penanganan menjadi sulit di sebagian besar aplikasi. Oleh karena itu, proses *tempering*

digunakan untuk menghilangkan tekanan internal, mengurangi kerapuhan dan membentuk struktur mikro yang keras dan halus.



Gambar 9 Diagram temper untuk baja pegas ISO 13 (AISI 6150). Diagram yang berlaku untuk stok batang Ø 20 mm dan Ø 50 mm, pendingin oli dari temperatur pengerasan 850-870°C.

Tempering terdiri dari memanaskan baja martensit ke suhu yang dipilih, yaitu pada suhu transformasi yang lebih rendah (A1), menahannya selama waktu tertentu, dan kemudian mendinginkan logam hingga mencapai kombinasi sifat mekanik yang diperlukan (Boyer, 1984). Menurut Haimbaugh, (2001) dalam bukunya *“Practical Induction Heat Treatment”* besaran yang berhubungan dengan pengerasan yang paling penting yang mempengaruhi struktur mikro dan sifat mekanik adalah suhu temper, waktu penahanan pada suhu itu, dan komposisi kimia baja.

2.6.3.1. Suhu Temper (*Tempering Temperatur*)

Penemperan biasanya terjadi segera atau setelah pengerasan. Dalam beberapa kasus, pemulihan terjadi ketika suhu yang disetel mendekati 75°C

hingga 50°C. Ini terjadi karena baja dapat retak jika dibiarkan mendingin hingga suhu kamar sebelum mengeras. Ada banyak cara untuk memanaskan baja ke suhu temper termasuk pendinginan konvensional, konveksi, nyala gas atau tungku induksi listrik. Temperatur tempering dapat dikenali dari warna permukaan saat dipanaskan, dimana permukaan baja berubah dengan naiknya temperatur dan ini lebih mudah dibedakan, terutama pada temperatur tinggi (Thelning, 1984). Ukuran produk yang lebih besar membutuhkan lebih banyak waktu untuk memanaskan hingga mencapai suhu *temper*. Selain itu, untuk produk yang besar dan kompleks, pemanasan lambat menguntungkan karena pemanasan cepat dapat menyebabkan tekanan yang tidak diinginkan pada permukaan karena volume lapisan permukaan meningkat, yang menyebabkan retak. Namun, beberapa penelitian telah menemukan bahwa waktu yang diperlukan untuk memanaskan suatu bagian sampai suhu pengerasan kurang lebih tidak bergantung pada suhu (Thelning, 1984). Selama proses pengerasan, waktu dan suhu merupakan variabel yang saling bergantung, dimana sifat mekanik yang berbeda dapat dicapai dengan kombinasi waktu penahanan dan suhu pengerasan yang tepat.

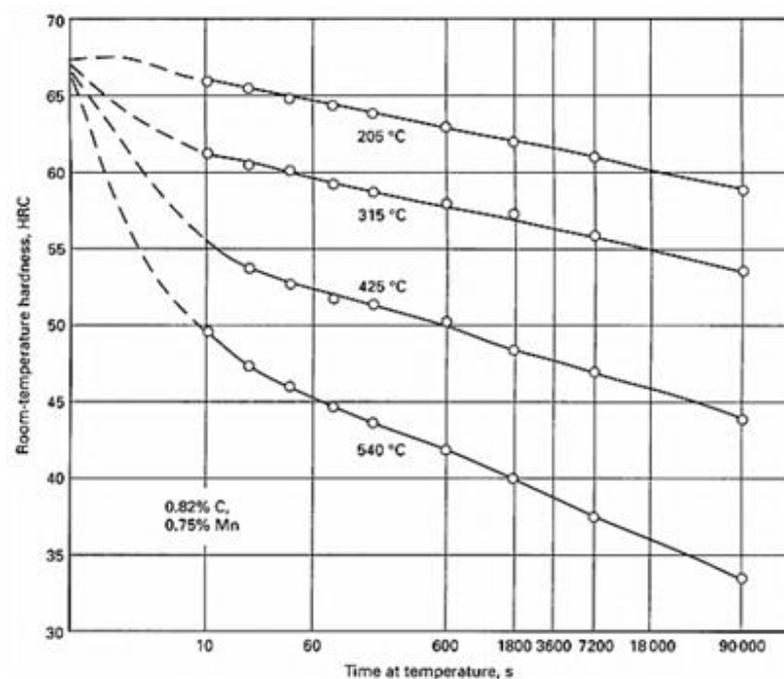
Namun, dari segi efektivitas, suhu *temper* memiliki pengaruh yang lebih besar daripada waktu penahanan, karena perubahan suhu yang kecil lebih berpengaruh daripada perubahan waktu yang kecil. Mengenai waktu *temper*, beberapa publikasi menyatakan aturan lama bahwa waktu *temper* harus 1-2 jam per ketebalan potongan 25,4 mm (Thelning, 1984). Yang kurang dari aturan ini adalah tidak disebutkan apakah waktu yang dihitung saat benda kerja langsung masuk ke dalam oven atau saat mencapai suhu yang dibutuhkan. Seringkali bagian yang mengeras ditempatkan di oven pada suhu di bawah suhu *temper*, yang membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai suhu yang mengeras, terutama untuk bagian format besar. Dengan demikian, waktu *temper* dimulai saat tungku telah mencapai suhu yang dibutuhkan. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9, pada suhu kamar kekuatan dan kekerasan menurun dengan meningkatnya suhu pendinginan, sedangkan ketangguhan diukur dengan pengurangan luas permukaan dan perpanjangan, meningkat dengan meningkatnya suhu temper (Haimbaugh, 2001).

2.6.3.2. Holding Time of Tempering Process

Karbon terbentuk selama pengerasan karena difusi karbon dan bahan paduan tidak hanya bergantung pada suhu tetapi juga pada waktu penahanan pada suhu tersebut. Holomon et al. (1945) mengembangkan, antara lain, teori empiris tentang parameter *temper* dalam hubungannya dengan kekerasan, waktu dan suhu pengerasan sebagai berikut:

$$P = T(k + \log t)$$

Dimana, *P* adalah parameter yang berhubungan dengan proses pengerasan (dalam hal nilai kekerasan), *T* adalah temperatur (Kelvin), *k* adalah konstanta dan *t* adalah waktu (jam). Tes ekstensif telah dilakukan untuk memastikan bahwa pernyataan ini berlaku untuk semua baja. Hasilnya menunjukkan korelasi yang baik dengan paduan rendah dan menengah yang dikeraskan secara khusus dan baja tempa, kecuali dalam kasus di mana austenit tertahan dalam jumlah besar (Chandler. 1995). Contoh pengaruh waktu penahanan temper terhadap kekerasan (pada



Gambar 10 Pengaruh waktu pada kekerasan suhu kamar saat quench 0,82 %C pada empat temperatur temper yang berbeda.

suhu kamar) baja karbon 0,82% yang ditempa pada suhu berbeda ditunjukkan pada Gambar 10 pada skala logaritmik.

Dalam 10 detik pertama, perubahan kekerasan terlihat jelas dan cepat. Saat perubahan ini berlanjut, efeknya berkurang dengan bertambahnya waktu penahanan, dengan perubahan yang lebih kecil terjadi antara 1-2 jam. Efek ini menjadi lebih penting pada suhu tinggi daripada suhu rendah. Oleh karena itu, untuk konsistensi dan untuk mengurangi ketergantungan pada variabilitas waktu penahanan atau data yang hilang, disarankan waktu moderasi 1-2 jam (Chandler, 1995). Pada penelitian ini waktu pengerasan baja pegas JIS SUP 9A adalah 1 jam per 14 mm yang dihitung dua kali waktu pendinginan yaitu 1/2 jam masing-masing 7 mm. Laju pendinginan dari suhu pengerasan juga mempengaruhi struktur dan dengan demikian sifat mekaniknya. Daya tahan, yang diukur dengan uji impak, adalah properti yang paling dipengaruhi oleh laju pendinginan dan dapat dikurangi jika laju pendinginan lambat digunakan dalam kisaran suhu tertentu. Fenomena ini disebut *temper embrittlement*, lebih sering terjadi pada baja yang mengandung unsur pembentuk karbida (Arai. 1991).

2.6.4. Multiple Heat Treatment

Dalam beberapa kasus, beberapa proses perlakuan panas digunakan selama satu siklus perlakuan panas untuk mencapai sifat mekanik yang diinginkan dari paduan, seperti kekuatan, ketangguhan atau kekuatan tekan maksimum untuk mencapai atau meningkatkan. Beberapa jenis perlakuan panas biasanya digunakan untuk paduan baja. Perlakuan panas yang digunakan dalam penelitian kami meliputi proses *quenching dan tempering*. Beberapa proses *quenching* dan *tempering* diperlukan dalam beberapa siklus perlakuan panas pada pengaturan yang berbeda untuk memastikan penyelesaian proses ini dan meningkatkan stabilitas struktur mikro akhir.

2.6.4.1. Double Quenching

Quenching biasanya digunakan untuk mengeraskan baja dengan menciptakan fase martensit dalam struktur mikro. Namun, dalam beberapa kasus proses ini dilakukan dua kali dalam siklus perlakuan panas yang sama untuk mencoba meningkatkan kehalusan ukuran butir atau persentase martensit dalam struktur mikro. Lee et al. (2009) tentang pengaruh *multiple hardening* terhadap kehalusan butir baja bantalan gelinding. Perlakuan panas baja karbon kromium tinggi dilakukan dengan proses *quenching* ganda untuk memperbaiki sifat kelelahan melalui perbaikan struktur mikro.

Studi ini menemukan bahwa ketika proses *quenching* ganda diterapkan, ukuran butir *ex-austenite* diperhalus, menghasilkan peningkatan kekuatan tarik, kekuatan impak dan kelelahan, dan pemanjangan. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa proses pendinginan ganda biasanya terkait dengan kandungan karbon dari beberapa perlakuan panas. Misalnya, pada beberapa baja yang disesuaikan dengan perbedaan kandungan karbon antara casing dan inti, seperti yang terjadi pada proses karburasi, *quenching* ganda sering dihilangkan karena deformasi dari dua transformasi martensit berikutnya dapat terjadi (Totten, 2006).

Nisbett. (2005) menyebutkan bahwa dalam situasi seperti itu kadang-kadang digunakan sirkuit pendinginan ganda, tergantung pada perbedaan kandungan karbon antara casing dan inti. Dengan demikian, proses pertama dilakukan pada suhu yang lebih tinggi sesuai dengan kandungan karbon inti untuk memurnikan butiran, sedangkan proses kedua dilakukan pada tingkat suhu yang lebih rendah dan lebih banyak kasus dengan kandungan karbon, siklus sebaiknya lebih disukai mengikuti minyak pendinginan.

2.6.4.2. Double Tempering

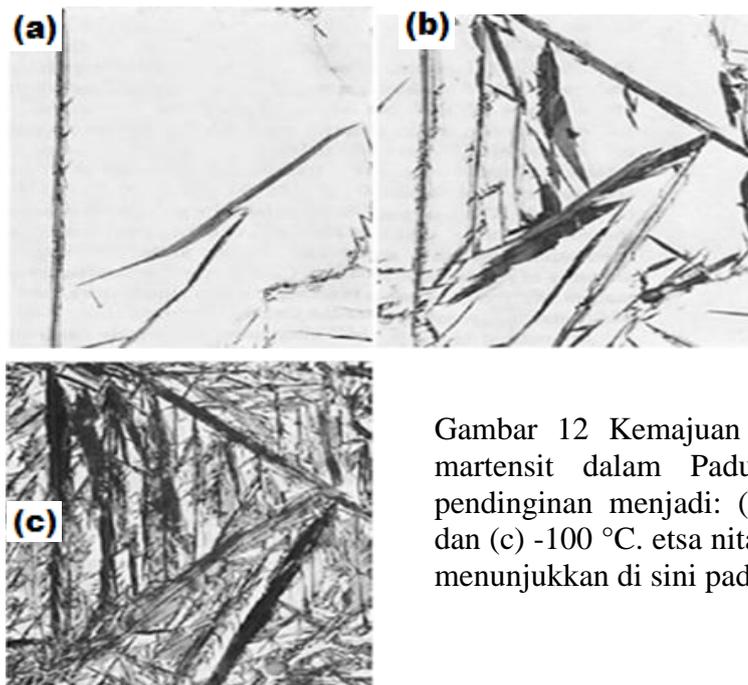
Sebagaimana diketahui, proses *tempering* setelah *quenching* berfungsi untuk mengurangi kerapuhan dan meningkatkan durabilitas paduan berbasis dasar besi melalui pengerasan martensit. Dalam beberapa kasus, tidak semua

austenit berubah menjadi martensit setelah pengerasan, tetapi tetap sebagai austenit sisa. Selama pengerasan pertama dan setelah beberapa waktu, austenit tidak berubah menjadi martensit. Martensit ini tidak diquench pada siklus pertama, sehingga siklus quench kedua akan membantu mentransfer martensit tersebut dan meningkatkan stabilitas struktur mikro yang dihasilkan. Selain itu, pengerasan ganda juga berkontribusi terhadap indentasi dan mengurangi risiko pembentukan karbida antar reng selama transformasi austenit sisa (Krauss. 2005).

Beberapa proses *tempering* ganda dapat berguna, tetapi tidak semua jenis baja paduan. Sebagai contoh, ini berguna pada baja paduan yang memiliki kemampukerasan tinggi dan kemungkinan austenit yang tersisa setelah proses pengerasan awal, sementara itu berguna pada baja yang digunakan untuk menghasilkan produk besar, seperti baja paduan yang dapat diberi perlakuan panas, yang kemudian membentuk bainit. mengeras atau yang sudah memiliki struktur bainit setelah pengerasan, pengerasan ulang tidak diperlukan. Setelah tempering pertama, ketika kekerasan yang diinginkan tercapai, tempering kedua harus dilakukan pada suhu 10-30°C lebih rendah dari *tempering* pertama untuk mempertahankan reduksi dari kekerasannya. (Thelning. 1984).

2.7. Transformasi Martensit

Martensit dalam baja yang dihasilkan di bawah kondisi laju pendinginan yang cukup cepat cenderung menyebabkan sebagian besar atom karbon yang terlarut dalam FCC- γ -Fe tetap larut dalam BCC dalam fase α -Fe. Sederhananya, martensit adalah larutan padat jenuh dengan atom karbon interstisial dalam α -besi. Martensit merupakan fasa non-ekuilibrium, sehingga tidak tampak pada diagram kesetimbangan Fe-Fe₃C, namun transformasi dari fasa austenit menjadi fasa martensit ditunjukkan pada diagram transformasi isothermal pada Gambar 11. Dapat dilihat dari Gambar 11 bahwa temperatur transformasi martensit hanya berubah sebagai fungsi T, bergantung pada komposisi paduan, dan tidak dengan waktu. Konversi semacam itu disebut konversi athermal. Gambar tersebut menunjukkan bahwa M adalah martensit.



Gambar 12 Kemajuan atermal transformasi martensit dalam Paduan Fe-1.8C setelah pendinginan menjadi: (a) 24°C; (b) -60 °C; dan (c) -100 °C. etsa nital. Pembesaran, 500X, menunjukkan di sini pada 74%.

Transformasi martensit juga dikenal sebagai transformasi termal. Ini berarti pembentukan martensit dimulai segera setelah suhu M_s tercapai, dan jika pendinginan sampai suhu tertentu dihentikan sebelum transformasi lengkap selesai, pembentukan martensit tidak akan terjadi lagi. Hal ini karena transformasi martensit tidak tergantung waktu dan gaya penggerak dari respon perubahan suhu (Krauss. 1990, Callister. 2010), berbeda dengan transformasi isothermal yang berubah terhadap waktu, misalnya pembentukan perlit terjadi secara terus menerus ketika austenit ditahan pada suhu konstan di bawah A_1 .

Namun, sifat pertumbuhan isothermal martensit pada beberapa paduan Fe-Ni dilaporkan oleh Porter et al. (2009) bahwa Christian dan Nishiyama memberikan perlakuan yang baik terhadap transformasi martensit. Mereka menemukan bahwa pembentukan martensit adalah proses acak pada Gambar 12 dan martensit biasanya lenticular. Pengamatan menunjukkan bahwa lensa ferit asli menutupi seluruh diameter butir dan lensa martensitik ini kemudian membentuk antarmuka yang koheren dengan austenit di sekitarnya. Laju perubahan martensit sangat cepat, sehingga butiran dapat terbentuk dalam waktu 10^{-7} detik.

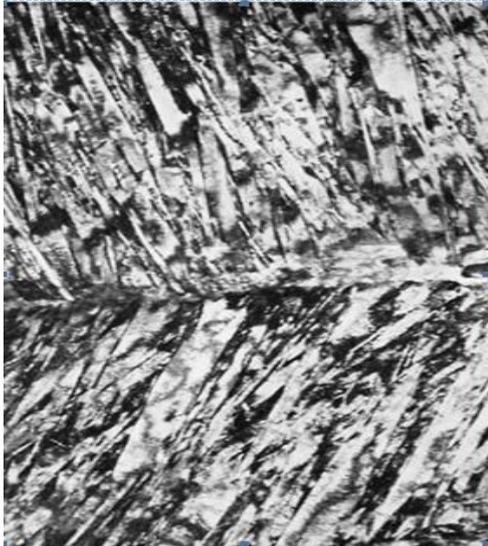
2.7.1. *Morphology Martensite*

Menurut morfologi utama, martensit dibagi menjadi dua jenis utama, reng dan pelat. Nama kedua morfologi ini awalnya berasal dari bentuk tiga dimensi dari elemen martensitik individu. Selain bentuknya, jenis martensit ini adalah: berbeda dari biasanya dalam susunan umum kristal, substruktur dan bidang. Martensit datar dengan kristal acicular atau lenticular tipis biasanya ditemukan pada baja karbon dan paduan besi non-karbon. Pelat-pelat yang berdekatan ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13, tidak selaras satu sama lain.



Gambar 13 Plate martensite terbentuk dalam kristal tunggal austenitik dari paduan Fe-33.5Ni dengan pendinginan hingga 196°C. Pelat hanya terlihat karena relief permukaan yang dihasilkan oleh transformasi martensit.

Reng martensit biasanya masif dan memiliki orientasi yang hampir sama, dan kristal dengan bentuk seperti pelat yang saling berhubungan ditemukan pada baja karbon rendah dan sedang (Totten, 2006). Dalam hal kandungan karbon, kepentingan industri dari bilah martensit sangat besar karena kandungan karbon dari sebagian besar baja yang dikeraskan adalah sedang. Pelat martensit penting dalam beberapa aplikasi perlakuan panas seperti: pada baja perkakas dan *structure casing* dengan kandungan karbon baja karbon yang tinggi. Dimensi piringan dibatasi oleh butiran austenit, yang berarti bahwa butiran martensit yang kecil memberikan struktur yang baik. Struktur ini disebut *structureless martensite* dan merupakan struktur mikro yang paling diinginkan (Krauss, 2005). Gambar 14 memperlihatkan TEM martensit reng pada paduan Fe-0,2%C.



Gambar 14 Martensit lath dalam paduan Fe-0,2 C. Dua paket, masing-masing dengan dua varian lath, adalah ditampilkan. elektron transmisi mikrograf

2.7.2. *Tempering of Martensite*

Martensit yang terbentuk selama *quenching* bukanlah struktur mikro yang setimbang, sehingga transformasinya menjadi fase stabil hanya terjadi pada suhu kamar dan membutuhkan waktu yang sangat lama. Selama kenaikan suhu baja karbon, ada banyak tahapan perubahan struktur mikro, di mana rentang suhu yang berbeda memberikan karakteristik struktur mikro dan sifat mekanik.

Tabel 6 Transformasi yang terjadi selama tempering ferrous martensit.

Temperatur (°C)	Transformasi	Keterangan
25 - 100	Pemisahan karbon menjadi dislokasi dan batas; pengelompokan <i>clustering</i> dan <i>ordering</i>	Pengelompokan dominan dalam baja karbon tinggi
100 - 200	Pengendapan transisi-karbida, diameter 2 nm (tahap pertama tempering)	Karbida dapat berupa $\eta(\text{Fe}_2\text{C})$ atau $\epsilon(\text{Fe}_2.4\text{C})$
200 - 350	Austenit yang tertahan berubah menjadi ferit dan sementit (tahap kedua).	Terkait dengan kerapuhan (<i>embrittlement</i>) pada tempering martensit.

Temperatur (°C)	Transformasi	Keterangan
250 - 350	Pengendapan Fe ₃ C seperti lath (tahap ketiga).	
350 - 550	Pemisahan pengotor dan elemen paduan.	Bertanggung jawab atas kerapuhan temper
400 - 600	Pemulihan substruktur dislokasi; aglomerat Fe ₃ C seperti lath untuk terjadi Fe ₃ C berbentuk bulat.	Struktur lath dipertahankan
500 - 700	Pembentukan paduan karbida (pengerasan sekunder atau tahap keempat).	Terjadi hanya pada baja yang mengandung Ti, Cr, Mo, V, Nb, atau W; Fe ₃ C dapat larut
600 - 700	Rekristalisasi dan pertumbuhan Pengkasaran Fe ₃ C berbentuk bulat.	rekristalisasi terhambat pada baja karbon menengah dan baja karbon tinggi; ferit terbentuk bulat.

Porter et al. (2009) terangkum dalam Tabel 6 mekanisme transformasi struktur martensit yang dipadankan pada suhu temper yang berbeda mulai dari suhu kamar. Seperti yang dapat dilihat dari tabel, ada tumpang tindih yang cukup besar antara rentang suhu dan sekali lagi rentang ini hanya perkiraan.

2.7.3. Tahapan *Tempering* Martensit

Beberapa penulis dari Thelning. (1984), Verhoeven. (2007), Krauss. (1990), Totten. (2006) menulis tentang mekanisme langkah seperti *quenching* martensit selama *tempering*, dibagi menjadi empat langkah utama. Perubahannya hampir sama, tetapi kisaran suhu kerasnya sedikit berbeda. Alasannya, suhu ini merupakan perkiraan karena bergantung pada waktu temper. Selanjutnya, berbeda dengan Porter et al. (2009), pada Tabel 5, dimana rentang temperatur dimulai dari 25°C dimana atom karbon pada kristal martensit tersusun ulang dan terpisah menjadi dislokasi dan batas.

1) Tahap pertama 100-200°C

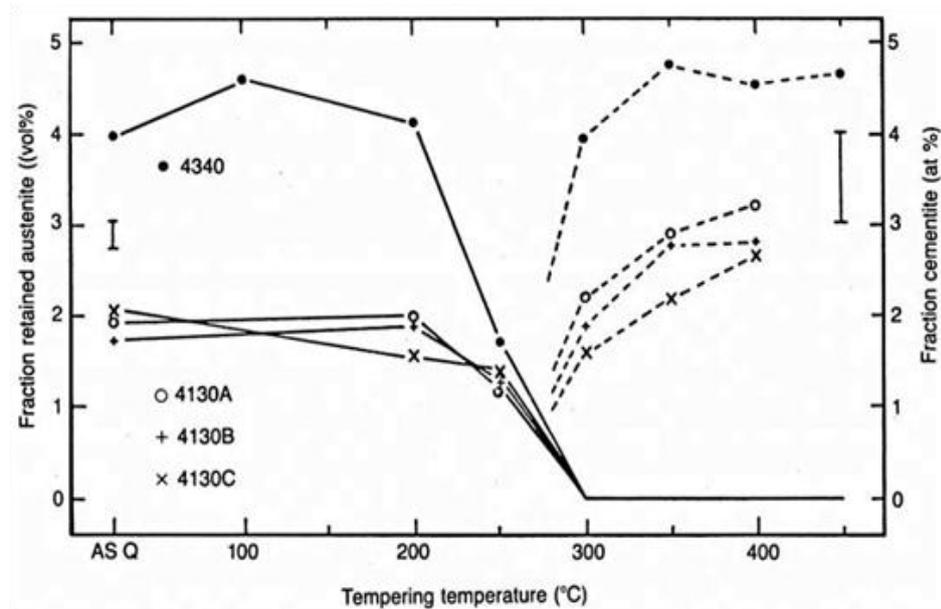
Karbida transisi terbentuk pada tahap ini, fase kaya karbon yang disebut karbida epsilon (ϵ) atau eta (η), mengendap menjadi martensit dan sangat kecil dan metastabil; ketidakstabilannya meningkat dengan meningkatnya suhu *tempering*. Pengendapan karbida ini tergantung pada kandungan karbon dalam baja. Menurut beberapa studi kinetik, proses pengerasan pada tahap ini bergantung pada difusi karbon melalui martensit (Roberts et al. 1953). Meskipun kandungan karbon martensit menurun menjadi sekitar 0,25% (Thelning. 1984) martensit masih jenuh dengan karbon, yang terurai lebih lanjut saat dipanaskan pada suhu yang lebih tinggi. Pada tahap ini, frekuensi presipitasi karbida meningkatkan ketangguhan, tetapi juga menyebabkan sedikit penurunan kekerasan dibandingkan martensit yang mengeras. Oleh karena itu, kekuatan dan kekerasan yang tinggi dipertahankan hampir sama karena temperatur *quenching* yang rendah membuat partikel karbida transisi menjadi sangat kecil dan menyebabkan sedikit perubahan pada substruktur dislokasi dari mikrostruktur yang di *quenching* (George Roberts et al. 1998).

2) Tahap kedua 200-350°C

Pada titik ini austenit, yang tidak berubah selama pendinginan, runtuh. Keberadaan austenit sisa dalam struktur mikro agak sulit untuk dideteksi secara langsung, terutama bila terdapat dalam konsentrasi rendah. Proporsi austenit permanen menjadi signifikan hanya pada baja karbon tinggi. Banyak penulis menyebutkan bahwa austenit sisa berubah menjadi ferit dan sementit pada tahap ini, sementara yang lain menyukai Thelning. (1984) menemukan bahwa austenit sisa terdekomposisi menjadi bainit. Selain itu, Bhadeshia menyarankan bahwa austenit sisa terurai menjadi ferit bainit dan sementit pada tahap ini, tetapi tidak cukup bukti untuk mengkonfirmasi hal ini (Bhadeshia et al. 2006).

Gambar 15 menunjukkan bahwa proporsi austenit sisa dalam sampel yang terbuat dari baja 4340 yang dikeraskan ($\sim 34\text{CrNiMo6}$) dan baja 4140 rendah dan proporsi ini menurun dengan meningkatnya suhu pengerasan.

Pada grade baja ini, transformasi austenit sisa dimulai tepat di atas temperatur tempering 200°C dan hampir selesai pada sekitar 300°C, dan sementit menjadi struktur yang lebih dalam pada temperatur tempering di atas 300°C (Krauss, 1990)



Gambar 15 Retained austenite dan cementite sebagai fungsi tempering temperatur pada baja tipe 4340 dan 4140. Jumlah fase adalah ditentukan oleh spektroskopi Mössbauer.

Ketangguhan efektif dan ketangguhan retak (K_{Ic}) dapat ditingkatkan karena adanya film austenit yang terperangkap di antara butiran martensit, tetapi peningkatan ini tercermin dan ketangguhan menurun seiring dengan peningkatan suhu pendinginan karena peningkatan degradasi austenit sisa; ini disebut sebagai pengerasan martensit *embrittlement* (Williamson et al. 1979). Tomas (1978) menemukan bahwa pengerasan rapuh martensit dapat dicegah pada suhu temper yang lebih tinggi jika pengendapan sementit selama pengerasan dapat ditunda dengan penambahan beberapa bahan paduan. Misalnya, dengan menambahkan Mn dan Ni, jumlah austenit yang tertahan dapat ditingkatkan; dengan demikian, dengan menggunakan elemen-elemen ini, pengendapan sementit dapat dipercepat atau diperlambat.

3) Tahap ketiga 250-400°C

Pada tahap temper ini, lebih banyak karbon bergabung dengan besi dan menjadi partikel sementit (Fe_3C) yang sangat halus. Partikel-partikel kecil ini disimpan dalam martensit dan tumbuh dengan mengorbankan β -karbida. Sementit yang dihasilkan memiliki struktur kristal ortorombik dan biasanya muncul sebagai lapisan Widmanstätten. Pada baja karbon tinggi, sementit mengendap di sepanjang batas ganda martensit dan juga terdapat pada austenit di depan batas butir atau kisi (Totten, 2006). Beberapa sarjana Thomas, (1978) menemukan bahwa ketangguhan berkurang secara signifikan ketika reng sekunder dan sementit intralath diendapkan selama pengerasan (Sarikaya et al. 1983).

Karbida interlath atau intralath yang diendapkan ini dapat merusak situs nukleasi, yang menyebabkan patah getas. Ada dua jalur fraktur: intergranular untuk martensit yang mengeras dan transgranular untuk bekas austenit. Ini berarti bahwa pada tahap ini partikel Fe_3C mulai berinti dan kemudian meluas secara dramatis melalui butiran austenit, yang dilemahkan oleh segregasi elemen sisa seperti fosfor dalam butiran austenit sebelum pendinginan (Lee et al. 1989).

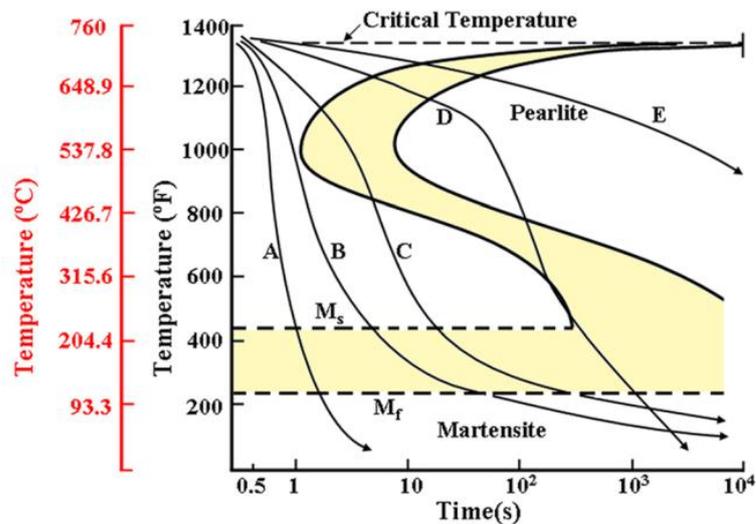
4) Tahap keempat 400-700°C

Pada suhu ini, partikel sementit terus tumbuh dan menjadi lebih kasar, ketika suhu temper meningkat, partikel ini menjadi bulat. Selain itu, rekristalisasi juga terjadi pada akhir rentang suhu ini, ketika martensit batas kisi secara bertahap menghilang karena mulai digantikan oleh butir ferit batas-kesetimbangan. Dengan demikian, struktur mikro akhir terdiri dari partikel sementit bulat kasar dan butir ferit *equicentric* (Bhadeshia et al. 2006).

2.8. Media Quenching CPO (Crude Palm Oil)

Baja dikeraskan dengan pemanasan pertama pada suhu austenisasi tertentu, biasanya antara 750 dan 1100°C, dan pendinginan untuk membentuk

struktur mikro yang diinginkan untuk mencapai sifat yang diperlukan seperti kekerasan, kekuatan, dan daya tahan. Tujuan utama dari setiap proses pemadaman atau *quenching* adalah untuk menghasilkan transformasi metalurgi yang diinginkan. Selain itu, temper harus mencegah retak dan meminimalkan deformasi yang disebabkan oleh perpindahan panas yang tidak merata pada permukaan baja.



Gambar 16 Ilustrasi skema kurva pendinginan untuk berbagai quenchant umum yang ditumpangkan pada CCT diagram. A air dingin, B minyak bumi yang dipercepat (kecepatan tinggi), C minyak bumi konvensional (lambat) minyak, D air panas (82°C), E udara.

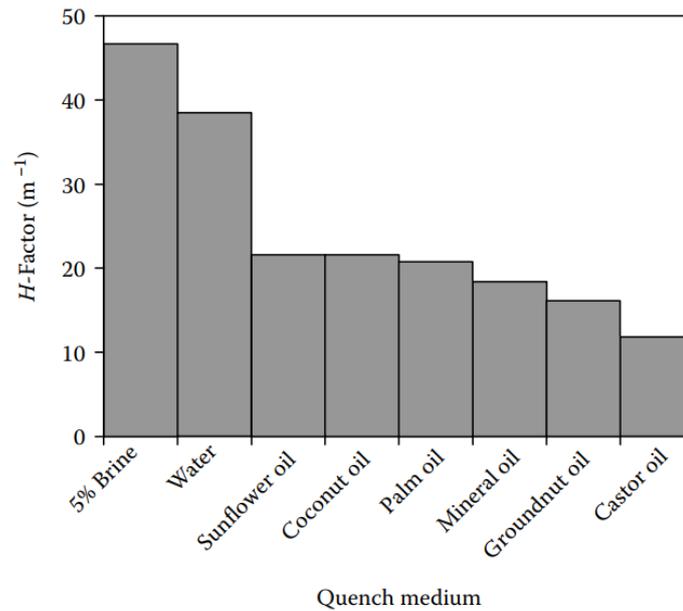
Struktur mikro yang terbentuk pada pendinginan tergantung pada sifat perpindahan panas dari antarmuka logam. Jalur waktu-suhu pendinginan disebut kurva pendinginan. Salah satu metode untuk menggambarkan struktur mikro transformasi baja yang terbentuk selama proses pendinginan adalah dengan melapiskan kurva waktu-suhu pendinginan dari baja yang didinginkan dalam media pendingin khusus pada kurva waktu-suhu transformasi pendinginan kontinyu (CCT) dari baja yang diinginkan. Hal ini ditunjukkan secara skematis pada Gambar 16, di mana kurva pendinginan beberapa alat pemadam api ditumpangkan pada kurva CCT (Totten et al. 1993).

Alat pemadam cair yang paling umum digunakan yang dapat diuapkan, termasuk air, adalah larutan polimer encer dan formulasi minyak bumi yang digunakan untuk proses ini biasanya memiliki suhu didih antara 100°C dan 300°C

pada tekanan atmosfer. Selama pendinginan baja dalam cairan ini, pembasahan permukaan biasanya bergantung pada waktu, yang memengaruhi proses pendinginan dan kekerasan yang dapat dicapai (Liscic et al. 2003). Untuk mencapai kekerasan optimal, baja harus didinginkan dengan cukup cepat untuk menghindari pembentukan perlit dan memaksimalkan pembentukan martensit. Sebagai aturan umum, *quenching* harus menghasilkan laju pendinginan yang sama atau lebih cepat dari laju pendinginan yang ditentukan dalam apa yang disebut "hidung" kurva transformasi perlit untuk mencapai kekerasan maksimum. Dalam banyak proses perlakuan panas, baja dengan kekerasan yang relatif rendah dapat menghasilkan kurva transformasi yang lebih jauh ke kiri daripada yang ditunjukkan pada Gambar 16. Dalam kasus seperti itu, laju pendinginan yang dapat dicapai dengan pendinginan oli konvensional (lebih lambat) tidak cukup untuk mencegah pembentukan perlit, sehingga menghasilkan pendinginan yang sangat buruk. Situasi seperti itu membutuhkan penggunaan minyak bumi yang dipercepat (cepat) atau bahkan air atau air garam sebagai alat pemadam.

2.8.1. Penyerapan Panas/Kalor (*Severity of Quench Media*)

Satu hal yang perlu diperhatikan dengan pengujian ini adalah jumlah *Severity of quench*, yaitu ukuran bagaimana cairan pendingin menyerap panas dari benda kerja. Metode penghitungan tingkat keparahan deterrence menggunakan *Grossman Quench Severity Factor* (H) dan metode Kobasko (Liscic, B. et al. 2010). Menurut Fernandes et al. (2008) berjudul: "*Comparative Study Of Heat Transfer And Wetting Behaviour Of Conventional And Bioquenchants For Industrial Heat Treatment*," pada Gambar 17 menunjukkan faktor H yang diperoleh dengan media pendingin yang berbeda. Nilai faktor H yang lebih tinggi diperoleh untuk media berair. Diantaranya adalah; Minyak jarak memiliki faktor H terendah ($11,81 \text{ m}^{-1}$). Nilai yang sama H ($21,65 \text{ m}^{-1}$) diperoleh dari minyak bunga matahari dan minyak kelapa. Minyak mineral konvensional ($18,50 \text{ m}^{-1}$) menghasilkan faktor H lebih rendah daripada minyak sawit ($20,47 \text{ m}^{-1}$). Metode Grossman tidak dapat membedakan agen *quenching* dengan tingkat penekanan yang hampir sama besarnya.

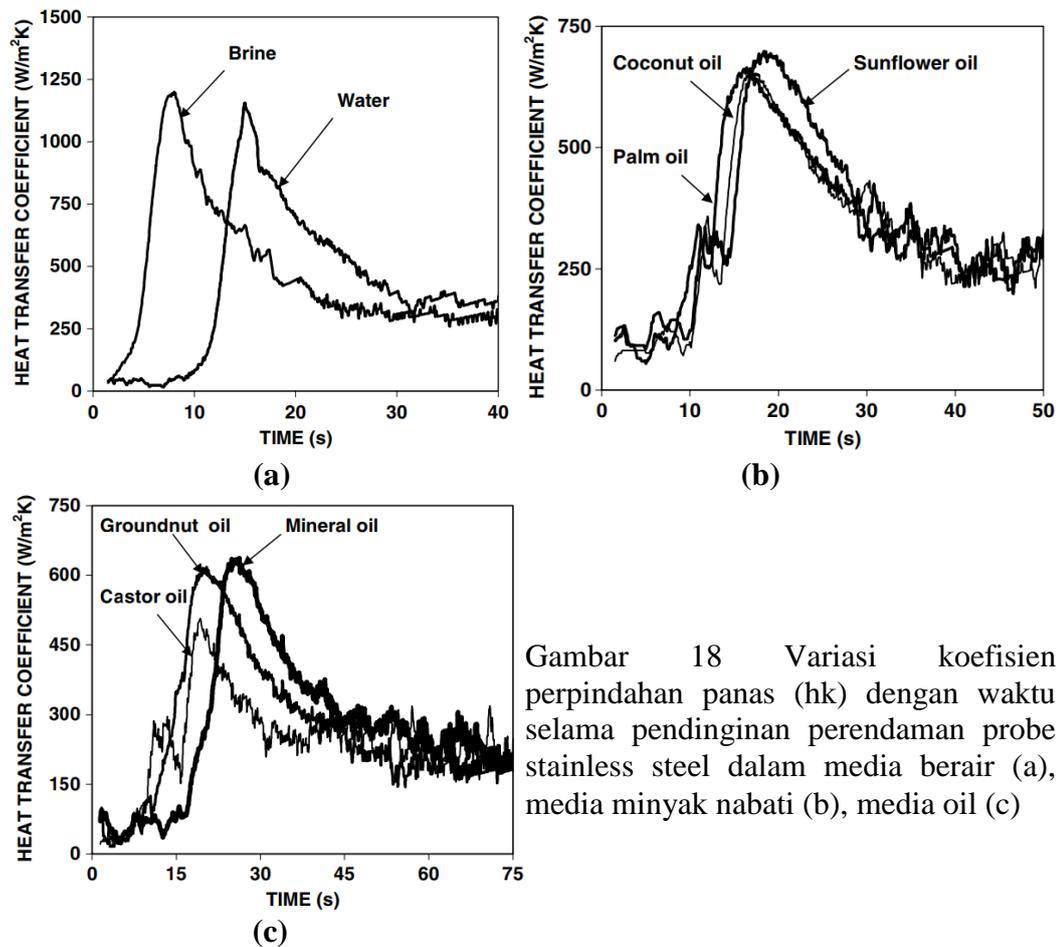


Gambar 17 Faktor-H Grossman diperkirakan untuk berbagai media pendinginan. (Fernandes, P. dan Prabhu, K.N., Int. J. Heat Mass Transfer, 51(3–4), 526, 2008). Mangalore, Karnataka State, India.

Pada saat yang sama, tingkat kekentalan (*viscosity*) mempengaruhi tingkat *severity of quench*. Menurut penelitian oleh Fernandes. (2007), minyak kelapa sawit di Mangalore, Negara Bagian Karnataka, India dipilih karena kinerja pendinginannya yang baik. Secara umum, minyak mineral memiliki kapasitas pendinginan tertinggi sekitar 600°C dan sedikit di bawah suhu martensit. Laju pendinginan minyak dapat ditingkatkan dengan tiga cara yaitu pencampuran, pemanasan minyak pada suhu yang lebih tinggi dari suhu kamar dan pengemulsi air (*water soluble*). Sepanjang sejarah dan hingga saat ini, air adalah zat pengeras yang paling umum digunakan dalam baja yang dikeraskan. Namun, laju pendinginan yang relatif tinggi dan pendinginan tidak seragam yang melekat serta suhu tinggi yang terkait dan gradien tegangan transformasi akibat baja sering mengakibatkan retak dan peningkatan *warping*. Oleh karena itu, digunakan pengeras alternatif seperti minyak dan lemak. Masalahnya adalah bahwa tingkat pendinginan yang lebih rendah dari *quencher* ini umumnya menghasilkan kekerasan yang lebih rendah tetapi daya tahan yang lebih tinggi daripada yang dapat dicapai dengan air (Rosa et al. 2012).

2.8.2. Pendingin Minyak Nabati (*Vegetable Oil*)

Meningkatnya harga minyak dan potensi masalah ketersediaan jangka panjang, selain toksisitas relatif dan biodegradabilitas yang buruk, membuat minyak nabati, dan dalam beberapa kasus minyak hewani, sekali lagi semakin menarik sebagai bahan baku terbarukan yang tidak beracun dan dapat terurai secara hayati. Ketertarikan ini didorong oleh pengembangan pemuliaan berbasis pasar dan rekayasa genetika untuk memodifikasi komposisi trigliserida minyak nabati. Fernandes et al. (2008) menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas (h_k) terhadap waktu selama pendinginan lateral probe stainless steel (tipe 304) di berbagai media pendingin ditunjukkan pada Gambar 18 dengan menggunakan metode Kobasko. Koefisien perpindahan panas puncak tertinggi $1255 \text{ W/m}^2\text{K}$ diperoleh untuk air garam 5% dan koefisien perpindahan panas puncak terendah $528 \text{ W/m}^2\text{K}$ untuk minyak jarak.



Gambar 18 Variasi koefisien perpindahan panas (h_k) dengan waktu selama pendinginan perendaman probe stainless steel dalam media berair (a), media minyak nabati (b), media oil (c)

Selama fase pendidihan nukleat, koefisien perpindahan panas puncak diperoleh untuk semua media pendingin. Peningkatan konduksi konvektif *quenching* selama fase awal pendidihan nukleat menyebabkan peningkatan laju pendinginan secara tiba-tiba, menghasilkan perpindahan panas yang lebih tinggi. Fernandes et al. (2008) menggunakan metode Kobasko untuk menunjukkan perubahan koefisien perpindahan panas (h_k) dari waktu ke waktu selama pendinginan lateral probe stainless steel (tipe 304) dalam pendingin yang berbeda. Minyak jarak dengan viskositas lebih tinggi memiliki koefisien perpindahan panas puncak yang paling rendah dibandingkan dengan minyak dengan viskositas sedang lainnya, sedangkan minyak bunga matahari dengan viskositas lebih rendah ($721 \text{ W/m}^2\text{K}$) dan minyak kelapa ($708 \text{ W/m}^2\text{K}$) memiliki koefisien perpindahan panas tertinggi. Koefisien perpindahan panas maksimum minyak sawit India ($691 \text{ W/m}^2\text{K}$) lebih tinggi daripada minyak mineral konvensional ($672 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Tabel 7 Sifat fisika berbagai minyak nabati dan minyak hewani.

Oil	Melting Point, °C	Open Cup Flash Point, °C	Kinematic Viscosity, cSt	
			Temperature, °C	cSt
Vegetable oils				
Canola oil	24	335-338	40	24.9
Coconut oil	25	288	37.8	29.8-31.6
Corn oil	-5	340-343	40	33.5
Cottonseed oil	0	234	37.8	37.9
Crambe oil	6	274	40	49
Gingelly (sesame) oil	-5	260	37.8	39.6
Hazelnut oil	22.2	221	38	24
Linseed oil	-24	222	37.8	30.5
Olive oil	-6	225	37.8	43.2
Palm oil	35	320	37.8	47.8
Peanut oil	3	340-343	37.8	32
Rapeseed oil	-10	246	37.8	54.1
Soybean oil	-16	343-346	40	31.5
Sunflower oil	-17	274	40	33.2
Tea seed	5.0-6.5	252	40	36.0
Animal oils				
Beef tallow	50	315	40	45.34
Fish oil (cod fish)	-3	62	37.8	32.1
Herring oil	10-15	>149	40	37.0
Lard oil	45	>221	37.8	41-47.5
Neatsfoot oil	-1	243	37.8	49.7
Sardine oil	0	312	37.8	27.9
Sperm oil	42-50	254	37.5	21-23
Whale oil	15	240	37.8	35-39.6

Tabel 7 memberikan gambaran tentang sifat fisik berbagai minyak nabati dan hewani. Oleh karena itu, proses *quenching* harus dapat mencegah retak dan

meminimalkan deformasi akibat perpindahan panas yang tidak merata pada permukaan baja. Sebagai hasil penelitian, Marsh et al. (1932) menyatakan bahwa quenching harus menyerap panas dari baja tanpa membusuk atau menguap. Namun, perlu juga dicatat bahwa bahan pemadam yang ideal akan memiliki karakteristik sebagai berikut: (1) konduktivitas termal yang tinggi, (2) panas spesifik yang tinggi, (3) laju pendinginan rendah yang cukup untuk meminimalkan tekanan pada suhu perengkahan, (4) stabilitas pada suhu tinggi, (5) tidak ada efek destruktif pada baja atau mesin, (6) volatilisasi rendah (penguapan karena degradasi minyak), (7) titik nyala tinggi, dan (8) ekonomis dalam penggunaan.

Minyak nabati *Crude Palm Oil* (CPO) dari PT Lambang Bumi Perkasa digunakan sebagai *quenching agent* dalam penelitian ini. Pabrik ini terletak di Jalan Lintas Timur Km 255. Kel. Terbangi Ilir Kec. Kota Mataram Udik, Kab. Lampung Tengah. Produk PT LBP merupakan produk Tanda Buah Segar (TBS) kelapa sawit yang dapat dimanfaatkan sebagai minyak nabati, biodiesel, kosmetik, makanan dan bahan lainnya. TBS yang disaring dan dimasak kemudian ditekan menjadi minyak sawit mentah. Proses tersebut kemudian disuling untuk memurnikan minyak sawit mentah. Menurut penelitian Ketaren. (1986), rumus kimia CPO Indonesia $C_{35}H_{71}O_2$ dengan ciri-ciri sebagai berikut: berat molekul: 546,71 g/mol, titik didih: 298°C Titik Beku: 5°C, berat jenis: 0,9 kepadatan: 0,895 g/cm³, jenis panas: 0,497 kal/g°C, Penampilan: Kemurnian cairan oranye-kuning: 98%, kotoran: 2% air. Dalam hal ini, CPO digunakan sebagai sample quencher dengan memanaskan tungku hingga 800°C. Proses pendinginan yang cepat ini mengubah kekuatan dan kekerasan sampel. Menurut penelitian Hasibuan (2012): “Kajian Mutu dan Khasiat Minyak Kelapa Sawit Indonesia dan Produk Pecahannya”, hasil kajian disajikan pada Tabel II. 7, di bawah ini:

Tabel 8 Mutu CPO Indonesia*

Parameter	Rerata	Range	Spesifikasi	Standar Acuan
ALB (%)	3,94	1,26 - 7,00	5% maks.	SNI 01-2901-2006
Air (%)	0,02	0,01 - 0,14	0,25% maks.	
Kotoran (%)	0,02	0,01 - 0,15	0,25 % maks.	
Karoten (ppm)	420	138 – 611	500 ppm	Codex, Stan 210-1999
DOBI	1,83	0,44 - 2,87	2,3	PORAM

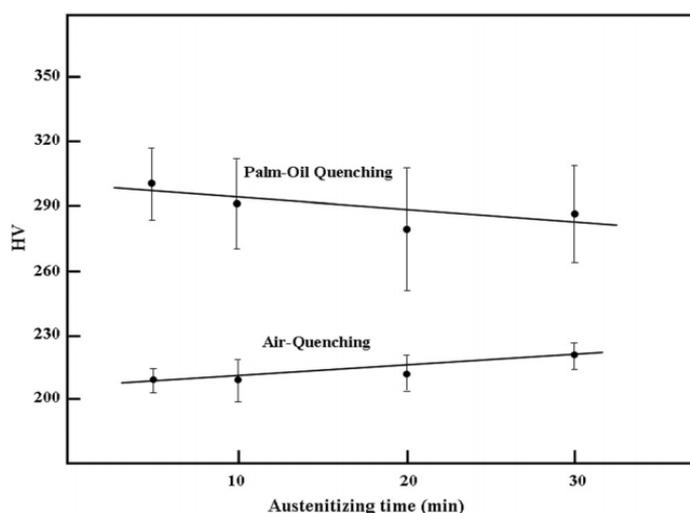
Keterangan: * = 250 sampel

Sifat kualitatif dan fisikokimia minyak sawit Indonesia (CPO) rata-rata kadar asam lemak bebas (ALB) 3,94%, kadar air 0,02%, kadar pengotor 0,02%, kadar karoten 420 ppm dan DOBI 1,83 tidak berbeda dengan Siaha et al. Al. (2009) melaporkan nilai ALB 3,51% (1,06–10,66%), kadar air 0,03% (0,01–0,19%) dan pengotor 0,02% (0,01–0,16%) dilaporkan). Namun kadar karoten dan nilai DOBI berbeda yaitu 553 ppm (271-790 ppm) dan 2,24% (0,9-2,99%). Data menunjukkan bahwa sebagian besar perusahaan secara konsisten menerapkan mutu CPO SNI 01-2901-2006 sesuai persyaratan.

2.8.3. Pengujian Terdahulu *Quenching-Tempering* dengan CPO

Dari Rahardja dkk. (2019), judul: “Harga besi St 37 dengan berbagai perlakuan panas menggunakan pendinginan minyak sawit mentah (CPO)”, dapat disimpulkan pemanasan dan pendinginan sampel yaitu: Dengan menaikkan suhu sampel dan mendinginkannya dengan CPO Indonesia, nilai kekerasan meningkat dibandingkan dengan sampel tanpa perlakuan. Peningkatan nilai kekerasan yang terjadi pada sampel CPO yang dipanaskan dan didinginkan pada sampel yang dipanaskan hingga 200°C sebesar 24,4% (49 HRC) dibandingkan dengan sampel yang tidak diberi perlakuan (37 HRC), peningkatan kekerasan sampel disebabkan oleh pemanasan hingga 400°C, 600°C, 800°C, 965°C hingga 36,6% (59 HRC), 31,9% (55 HRC), 9,7% (41 HRC) dan 29,9% (53HRC). Artinya, nilai kekerasan tertinggi pada benda uji adalah 400°C dengan pemanasan dan pendinginan CPO.

Dalam penelitian serupa oleh Razik et al. (1987), judul: “*Effect of Quenching Media on the Mechanical and Structural Properties of a Saudi-Steel.*” Kemampuan pengerasan minyak kelapa sawit (crude palm oil) dari benua Asia juga diuji menggunakan sampel uji batangan bulat 20 mm yang terbuat dari baja Arab Saudi dengan komposisi kimia rata-rata 0,37% C, 0,25% Si, 0,03% berat P, 0,03% berat S, 1,28% berat Mn, 0,16% berat Cr, 0,20% berat Cu, 0,15% berat Ni, 0,03% berat Mo dan 0,04% berat Sn.

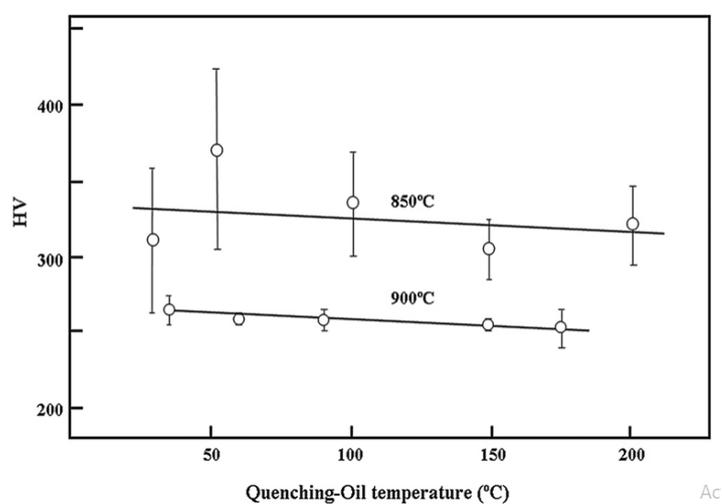


Gambar 19 Kekerasan Vickers dari baja Saudi yang dipadamkan dalam minyak sawit pada suhu penangas 30°C setelah diaustenisasi pada 850°C.

Batang dipotong menjadi potongan uji bulat setebal 0,7 mm. Empat sampel dipanaskan hingga 850°C untuk waktu yang berbeda: 5, 10, 20 dan 30 menit lalu didinginkan hingga 30°C dengan minyak sawit. Empat sampel lainnya dipanaskan dengan cara yang sama tetapi didinginkan udara. Gambar 19 menunjukkan bahwa pendinginan dengan minyak sawit meningkatkan kekerasan baja dibandingkan dengan pendinginan dengan udara dan memanaskan sampel uji tipis ini selama lima menit menghasilkan kekerasan tertinggi pada suhu 850°C. Struktur mikro benda uji yang didinginkan dalam minyak sawit yang dipanaskan selama lima menit ditemukan perlit dan ferit, yang serupa dengan struktur mikro baja yang disetujui yang digulung panas dan didinginkan udara hingga 800-850°C. Hasil ini harus dibandingkan dengan baja yang sama pada 30°C air yang

diquenching pada 1000°C setelah 20 menit austenitisasi, yang menghasilkan kekerasan 505 HV dan struktur martensit lentikular, tetapi keretakan terjadi pada kondisi pendinginan ini.

Pengaruh suhu pendinginan minyak sawit terhadap pendinginan baja Arab Saudi ditentukan dengan austenitisasi lima benda uji pada suhu 850°C selama lima (5) menit dan kemudian didinginkan dalam minyak sawit: diadakan pada suhu 30, 53, 101, 150 dan 202°C selama lima menit kemudian didinginkan udara. Proses ini diulang untuk sampel austenitisasi pada suhu 900°C dan hasil kekerasan untuk kedua kondisi uji austenitisasi ditunjukkan pada Gambar 20.



Gambar 20 Pengaruh suhu penangas minyak sawit terhadap kekerasan benda uji setelah austenitisasi pada 850°C dan 900°C selama 5 (lima) menit.

Analisis sampel uji dua tahap yang didinginkan ini menunjukkan bahwa campuran bainit bawah dan bainit atas terbentuk dalam struktur dan proporsi bainit atas dalam campuran meningkat dengan meningkatnya suhu media pendingin minyak sawit. Data mikrostruktur menunjukkan bahwa laju pendinginan benda uji lambat pada rentang transformasi bainit dan cepat di atas rentang tersebut. Jika efek pengerasan melemah pada suhu austenitisasi di atas 900°C , ini menunjukkan bahwa laju pendinginan sampel lebih lambat pada kisaran suhu bainit atas.

Berdasarkan hasil tes yang dilakukan dalam studi Was'i I.A. (2021) berjudul: “Analisis Kekerasan Baja Aisi 4130 Dengan Metode Packet Carburizing Menggunakan Media Quenching Minyak Kotor Sawit (MIKO) *Crude Palm Oil* (CPO) *Palm Kernel Oil* (PKO).” Menggunakan produk *Crude Palm Oil* (CPO) dari PT Lambang Bumi Perkasa untuk meningkatkan ketangguhan (*hardness/toughness*) untuk melakukan *treatment* tertentu yaitu *carburizing* dan *hardening*. Oleh karena itu, perlakuan harus direformasi untuk meningkatkan kekerasan masa lalu. Dilihat dari persentase peningkatan kekerasannya, pengeras dengan peningkatan kekerasan tertinggi adalah pendingin CPO (91,3%), minyak goreng (87,2%), kernel (85,2%), air garam (83,2%), minyak kotor sawit (58,4%).

Tabel 9 Data hasil Kekerasan Rockwell baja AISI 4130

Spesimen	Holding Time	Indentor	P (kg)	HRB	HRB Rata-Rata
Tanpa Perlakuan	30	Bola Baja $\varnothing \frac{1}{16}$	100 kg	95,2	96,5
	60			97,2	
	90			97,1	
Minyak Kotor Sawit	30			100,9	104,967
	60			106,3	
	90			107,7	
Kernel	30			86,8	88,0333
	60			88,8	
	90			88,5	
CPO	30			110	111,167
	60			109,5	
	90			114	

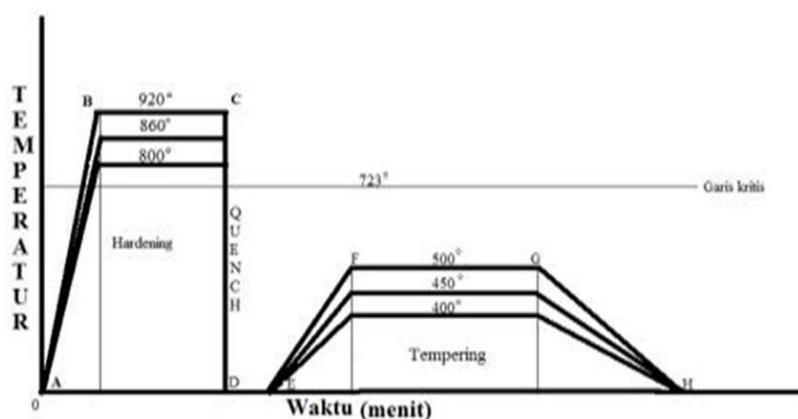
Melihat Tabel 9 dari jenis *quenching* pada tabel tersebut, CPO merupakan jenis *quenchan* yang berdampak pada kekerasan paling tinggi, diikuti oleh minyak kotor sawit, minyak tanpa perlakuan, dan minyak kernel.

2.9. Penelitian Terdahulu *Quenching-Tempering Spring Steel*

Halimi dkk. (2020) mempelajari kekerasan, ketangguhan dan struktur metalografi baja JIS SUP 9A di bawah siklus temperatur ganda. Proses perlakuan

panas dengan fluktuasi suhu ditunjukkan pada Gambar 21 yang dilakukan pada penelitian ini dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Temperatur pemanasan untuk proses *quenching* dan *tempering* diatur pada 800-920°C untuk *quenching* dan 400-500°C untuk *tempering*.
- Waktu pemanasan diatur dengan stopwatch. *Hardening* baja ini membutuhkan waktu 30 menit untuk mengeras dan 50 menit untuk pendinginan.
- Proses pengerasan dilakukan dengan pendinginan, perendaman dingin dalam penangas minyak, untuk pengerasan, proses *tempering* dilakukan di luar



Gambar 21 Diagram laku panas Hardening dan Tempering JIS SUP 9A

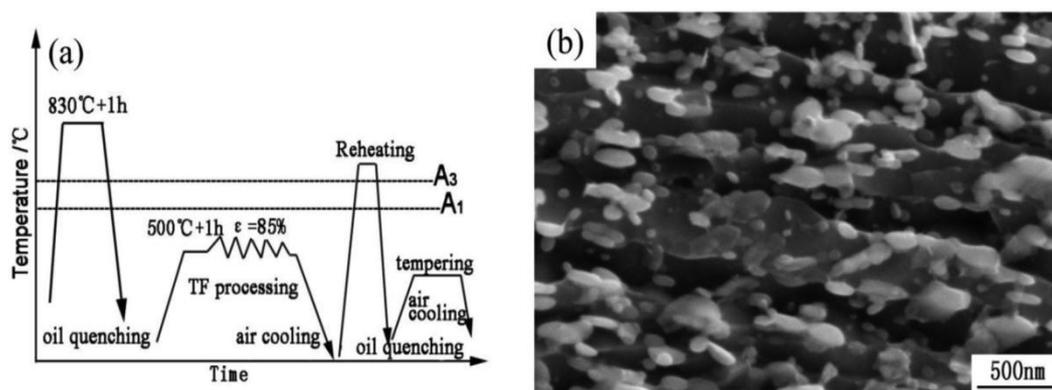
Nilai kekerasan tertinggi terjadi pada sampel dengan suhu *hardening* 860°C dan suhu *tempering* 400°C. Nilai kekerasan rata-rata adalah 49,1 HRC atau meningkat 40% dari sampel bahan baku. Nilai kekuatan elevasi tertinggi adalah 920°C pada pengerasan 500°C, rata-rata 42,81 joule atau 227%, struktur yang terbentuk pada bahan baku adalah ferit dan perlit, sedangkan hasil perlakuan panas menghasilkan pengerasan. Struktur martensitik, karbida dan austenit sisa. Pada struktur mikro material yang diberi perlakuan SUP 9A semuanya berubah pada suhu pengerasan 800°C pada suhu 400°C (a) 450°C (b) 500°C (c) fasa, martensit temper, karbida dan austenit sisa. Dimana struktur martensit yaitu struktur acicular muncul karena pendinginan yang cepat, fenomena ini

menyebabkan variasi pengerasan 800°C dan pengerasan 400°C, nilai kekerasan meningkat secara signifikan menjadi 49,1 HRC, karena nilai ketangguhan meningkat, tetapi tidak demikian secara signifikan 18,68 joule sehingga tidak memenuhi standar saat ini yaitu 19 joule, sedangkan perbedaan juga terlihat pada struktur mikro pada perlakuan tempering, dimana pada suhu 500°C struktur tampak lebih halus dan padat sehingga menimbulkan nilai Impact. materi meningkat secara signifikan sebesar 42,81 joule.

Semuanya berubah pada mikrostruktur bahan SUP 9 yang diberi perlakuan, pada suhu hardening 860°C pada temper 400°C (a) 450°C (b) 500°C (c) struktur masih martensit temper dan mudah membentuk austenit mendominasi residu, terlihat struktur martensitik yang membentuk bentuk seperti jarum mendominasi sehingga menyebabkan peningkatan kekerasan dan disertai dengan peningkatan ketangguhan, meskipun nilai ketangguhan tidak meningkat drastis karena kekasaran struktur. Pada mikrostruktur bahan SUP 9 yang diproses, pada suhu pengerasan 920°C pada pengerasan 400°C (a) 450°C (b) 500°C (c) struktur terlihat berbeda dengan fluktuasi suhu lainnya dimana Martensit temper halus adalah dan austenit sisa mendominasi struktur mikro, perbedaan ini disebabkan hubungan antara suhu tinggi dan kandungan austenit sisa, sehingga sifat kekerasan material sedikit berkurang tetapi sifat kekerasan meningkat, ini juga membuktikan bahwa semakin tinggi suhu pengerasan, semakin tinggi rasio dari austenit banyak tertahan (daerah putih).

Wang et al. (2019), dalam studi mereka: *“Super strength of 65Mn spring steel obtained by appropriate quenching and tempering in an ultrafine grain condition.”* Pengaruh suhu austenisasi dan temper pada struktur mikro dan sifat mekanik (pengerasan dan deformasi baja yang dikeraskan) dari baja pegas 65Mn yang ditingkatkan dengan pembentukan waktu diselidiki Gambar 22. Substruktur martensit dari butiran ultrafine terdiri dari dislokasi yang tersusun rapat dan banyak kembaran, tetapi pada baja martensit berbutir normal jumlah kembaran meningkat. Kekuatan super (2220 MPa) dan ketangguhan yang baik (8,6%) dicapai dalam ukuran butir 5,6 µm saat austenitisasi pada 790 °C dan temper pada 250 °C. Namun, tidak seperti butiran normal (18,7 µm), baja 65 Mn hampir tidak memiliki keuletan saat diperlakukan dengan parameter suhu yang sama. Dengan

demikian, pre-treatment sementara mempromosikan pengurangan ukuran butir dan pembentukan struktur kristalografi, yang bermanfaat untuk kualitas butir potensial setelah perlakuan panas berulang. Dengan perlakuan *quenching* dan *tempering* yang tepat setelah proses pembentukan waktu, baja pegas 65Mn menghasilkan butiran yang sangat halus dan kekuatan super serta keuletan yang baik.

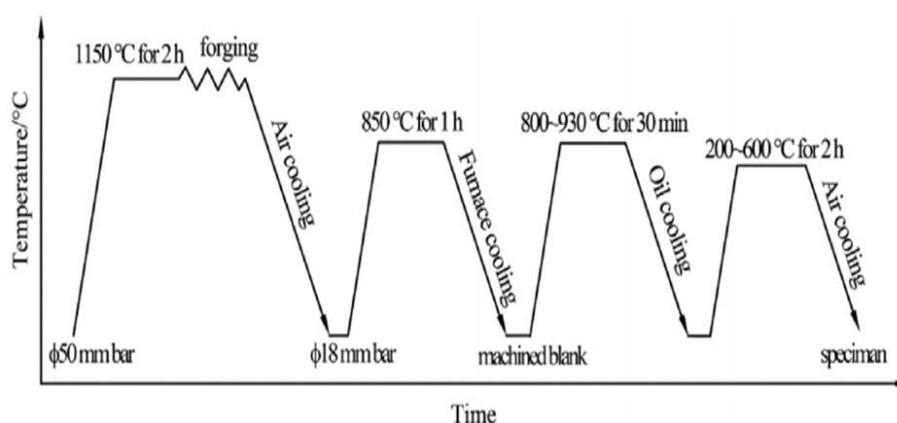


Gambar 22 (a) Diagram skema dari rute pemrosesan yang terperinci, yaitu: teknologi tempforming and reheating (TFR); (b) struktur mikro baja 65Mn setelah pemrosesan temporer.

Austenisasi selama 4 menit pada 790°C dan temper selama 2 jam pada 250°C. Substruktur dari sampel butir sangat halus yang diperlakukan dengan teknik TFR terutama terdiri dari dislokasi densitas tinggi, yaitu dislokasi martensit. Namun, *twins* terang terjadi pada butiran martensit normal, konsisten dengan penelitian sebelumnya. Pola difraksi elektron putus-putus sebenarnya terkait dengan pemurnian butir. Dan pengaruh ukuran austenit sebelumnya terhadap struktur substrat martensit telah banyak dibahas pada publikasi sebelumnya. Sampel yang dianil pada suhu yang berbeda juga dianalisis dengan XRD dan difraksi elektron area terpilih (SAED) oleh TEM untuk mempelajari perubahan fasa selama anil. Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa sampel yang telah diquenching mengandung beberapa sisa austenit. Austenit permanen hampir terdekomposisi seluruhnya setelah diquenching pada suhu 200°C. Ketika suhu tempering dinaikkan menjadi 250°C, puncak austenit benar-benar hilang,

menunjukkan bahwa austenit yang tersisa benar-benar terdekomposisi atau jumlah austenit yang tertahan dalam struktur mikro yang mengeras kurang dari batas deteksi minimum XRD.

Xu et al. (2018), dalam penelitiannya yang berjudul: “*Effects of soaking and tempering temperature on microstructure and mechanical properties of 65Si2MnWE spring steel*”. Dalam kasus baja pegas 65Si2MnWE, perlakuan panas perendaman, pendinginan minyak dan tempering digunakan (Gambar 23). Suhu perendaman dan pendinginan yang berbeda diuji untuk menentukan pengaruhnya terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja 65Si2MnWE. Mikrostruktur seperti martensit dan presipitat dipelajari secara hati-hati dan uji tarik, impak dan kekerasan dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekasaran martensit terjadi pada suhu perendaman yang tinggi karena pembubaran endapan, pengurangan dislokasi dan pengurangan cadangan austenit. Sejumlah besar endapan paduan karbida didistribusikan pada batas butir setelah pendinginan, dan endapan ini cenderung larut dalam matriks pada suhu pendinginan tinggi. Selain itu, ketika suhu pengerasan meningkat, perubahan dan pertumbuhan karbida dan pemulihan martensit terjadi secara bersamaan. Berdasarkan analisis sifat mekanik, temperatur optimum untuk perendaman adalah 850-900°C dan temperatur tempering optimal harus dalam kisaran 350-400°C.



Gambar 23 Ilustrasi skema prosedur eksperimental.

Seperti disebutkan di atas, setelah proses penempaan panas dan anil, baja 65Si2MnWE dipadatkan, ditempa, dan dikeraskan. Setelah direndam pada suhu yang berbeda dari 800°C hingga 900°C, pendinginan dan pengerasan oli pada suhu 420°C. Ketika suhu perendaman 800°C, sejumlah besar presipitasi nodular menunjukkan bahwa presipitasi terjadi di tepi pita martensit. Selain itu, ferit juga dapat diamati memanjang di antara butiran martensit. Menurut komposisi kimia baja 65Si2MnWE yang diperiksa, endapan dapat berupa karbida W dan karbida Si. Ferit dengan elonports terbentuk dengan mudah pada suhu perendaman yang lebih rendah karena energi difusi atom. Ferit longitudinal pada batang martensit bertindak sebagai fase pelunakan, yang sebagian mengurangi kekerasan dan kekuatan material. Ketika suhu pencelupan meningkat, jumlah presipitasi berangsur-angsur menurun karena suhu yang lebih tinggi menyediakan energi aktivasi termal yang cukup untuk difusi atom.

Di sisi lain, dengan meningkatnya suhu perendaman, ferit menghilang dan batas martensit menurun, mengakibatkan penurunan titik presipitasi. Ini menjelaskan fenomena yang mengurangi curah hujan. Selain itu, pengendapan batas butir berkontribusi pada pemurnian butir karena efek perekatnya. Pada suhu perendaman yang tinggi, efek tekan melemah karena kurangnya curah hujan. Dengan demikian, terlihat jelas bahwa pertumbuhan butir terjadi pada suhu perendaman 930 °C. Butir yang lebih besar dapat meningkatkan panjang dan lebar martensit. Martensit kasar berbahaya karena ketangguhan dan kekuatannya. Oleh karena itu, rentang suhu perendaman yang sesuai untuk baja 65Si2MnWE harus antara 830°C hingga 900°C, yang menguntungkan untuk mendapatkan martensit yang mengeras dengan baik. martensit temper yang halus.

2.10. Pengujian Struktur Mikro (SEM)

Tes mikroskop elektron pemindaian (SEM) disiapkan sesuai dengan ASTM E2809-13. 2004, adalah jenis mikroskop elektron yang memindai permukaan sampel dengan berkas elektron berenergi tinggi dalam pola pemindaian raster. Elektron berinteraksi dengan atom penyusun sampel, menghasilkan sinyal yang membawa informasi tentang topografi permukaan,

komposisi, dan karakteristik lainnya, seperti konduktivitas listrik. Jenis sinyal yang dihasilkan oleh SEM meliputi elektron sekunder, elektron *backscattered* (BSE), sinar-X karakteristik, cahaya (*cathodoluminescence*), arus sampel, dan emisi elektron. Detektor elektron sekunder adalah umum di semua SEM, tetapi mesin jarang memiliki detektor yang mampu membaca semua sinyal. Sinyal ini adalah hasil interaksi berkas elektron dengan atom di dekat permukaan sampel.

Metode deteksi yang paling umum atau standar, *secondary electron imaging* (SEI), SEM, dapat menghasilkan gambar permukaan sampel beresolusi sangat tinggi, memberikan detail yang berukuran lebih kecil dari 1 nm. Karena pancaran elektron sangat sempit, kedalaman gambar SEM dapat menghasilkan tampilan tiga dimensi yang khas yang membantu dalam memahami struktur permukaan sampel. Perangkat SEM memungkinkan pembesaran ganda, dari sekitar 10x (kira-kira setara dengan lensa portabel) hingga pembesaran lebih dari 500.000x, atau sekitar 250x pembesaran mikroskop optik. Hamburan elektron (BSE) adalah seberkas elektron yang dipantulkan dari sampel dengan hamburan elastis. BSE sering digunakan dalam analisis SEM dengan spektrum yang disiapkan dari sinar-X karakteristik. Karena intensitas sinyal BSE sangat bergantung pada nomor atom (*Z*) sampel, citra BSE dapat memberikan informasi tentang distribusi berbagai elemen dalam sampel. Untuk alasan yang sama, pencitraan BSE dapat mencitrakan putik emas koloid dengan diameter sekecil 5 atau 10 nm, sehingga sulit atau tidak mungkin untuk mendeteksi elektron sekunder dalam citra sampel biologis. Sinar-X tipikal dipancarkan ketika berkas elektron menghilangkan elektron dari kulit bagian dalam sampel, memungkinkan elektron berenergi lebih tinggi untuk mengisi kulit dan melepaskan energi. Sinar-X karakteristik ini digunakan untuk mengidentifikasi komposisi sampel dan mengukur kelimpahan unsur.

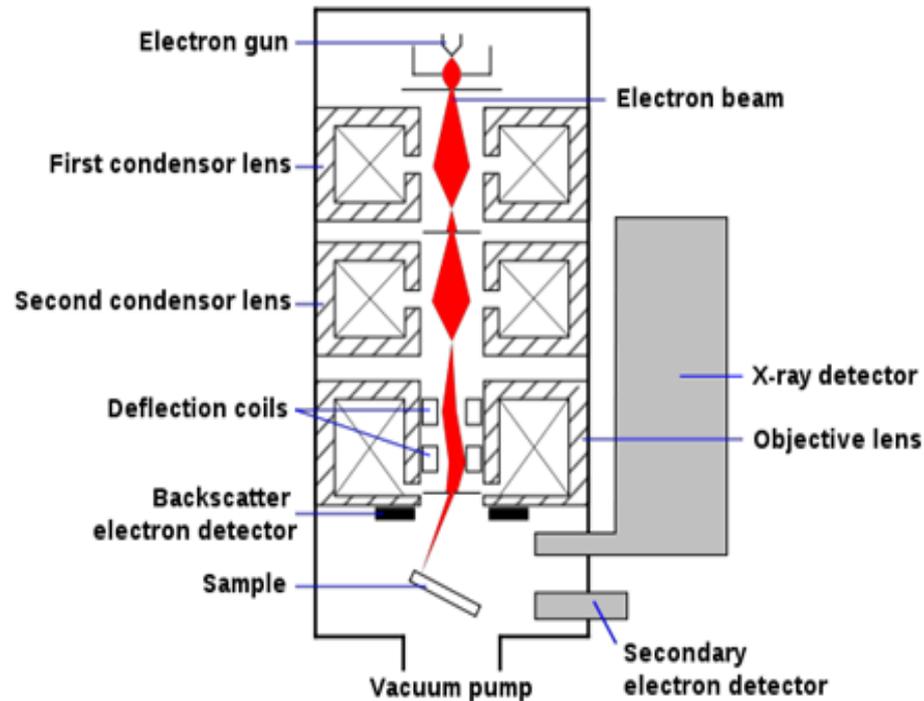
Tabel 10 Penjelasan jenis sinyal, detector, dan resolusi lateral serta kedalaman sinyal untuk menggambar dan menganalisa material di SEM (ASTM E2809-13. 2004)

Sinyal Deteksi	Informasi yang Didapat	Resolusi Lateral	Kedalaman dari Informasi
<i>Secondary electrons</i>	Topografi permukaan, kontras komposisi	5-100 nm	5-50 nm
<i>Backscattered electrons</i>	Kontras komposisi, topografi permukaan, orientasi kristal, domain magnet	50-100 nm	30-1000 nm
<i>Specimen current</i>	Kontras yang lengkap ke <i>backscattered</i> dan sinyal <i>secondary electron</i>	50-100 nm	30-1000 nm
<i>Characteristic x-rays (primary fluorescence)</i>	Komposisi elemen, distribusi elemen	0,5-2 μm	0,1-1 μm
<i>Cathodoluminescence</i>	Deteksi fasa nonmetal dan semikonduksi

Pengoperasian SEM dimulai dengan seberkas elektron yang berasal dari senjata elektron yang dilengkapi dengan katoda filamen tungsten. Tungsten banyak digunakan dalam senjata elektron karena memiliki titik leleh tertinggi dan tekanan uap terendah dari logam apa pun, memungkinkannya dipanaskan untuk memancarkan elektron, dan juga murah. Berkas elektron difokuskan oleh satu atau dua lensa kondensor ke suatu titik dengan diameter kira-kira 0,4 nm sampai 5 nm. Berkas kemudian melewati sepasang gulungan pemindaian atau pelat reflektor dalam kolom elektron, biasanya terdapat dalam lensa akhir, yang membengkokkan berkas pada sumbu x dan y sehingga dapat dipindai raster di atas area persegi panjang dari permukaan sampel.

Ketika berkas elektron primer berinteraksi dengan sampel, elektron kehilangan energi melalui hamburan acak berulang dan penyerapan oleh sampel, atau yang disebut volume interaksi, yang memanjang dari kurang dari 100 nm hingga sekitar 5 μm di permukaan. Ukuran volume interaksi bergantung pada energi yang digunakan elektron untuk menumbuk, jumlah atom, dan densitas sampel. Pertukaran energi antara berkas elektron dan sampel dapat dideteksi oleh pantulan elektron berenergi tinggi dalam hamburan elastis, emisi elektron sekunder dalam hamburan inelastis, dan emisi radiasi elektromagnetik, yang masing-masing dapat dideteksi oleh detektor khusus. Aliran cahaya yang diserap oleh sampel juga dapat dideteksi dan digunakan untuk menghasilkan gambar perambatan aliran sampel. Penguat elektronik memperkuat sinyal, yang muncul sebagai variasi kecerahan dalam tabung sinar katoda.

Gambar raster monitor CRT disinkronkan dengan pancaran sampel di mikroskop dan gambar yang dihasilkan adalah peta distribusi intensitas sinyal yang dikirimkan oleh area sampel yang dipindai. Gambar dapat ditangkap dengan fotografi tabung sinar katoda beresolusi tinggi, tetapi dengan peralatan digital modern, gambar diambil dan ditampilkan di layar komputer dan disimpan di hard drive komputer. Pengujian SEM membutuhkan permukaan sampel yang tidak rata, sehingga pengujian mikroskop cahaya dan spektrometer emisi melibatkan perataan sampel yang sudah halus dan rata dengan palu untuk mencegah permukaan menjadi rata. Karena tidak terlihat di layar pada percobaan pertama, sampel kemudian ditutup dengan emas (Arum), yang seharusnya meningkatkan kontras antara sampel yang dilihat dan sekitarnya.



Gambar 24 Skema SEM (ASTM E2809-13, 2004)
 (Sumber: https://id.wikipedia.org/wiki/mikroskop_pemindai_elektron)

Keunggulan SEM adalah sebagai berikut:

a) Keterpisahan yang tinggi

Menurut jalur pancaran media, SEM dapat diklasifikasikan sebagai optik metalurgi yang menggunakan prinsip refleksi, yang didefinisikan sebagai permukaan sampel yang memantulkan pancaran media.

b) Menunjukkan informasi permukaan sampel

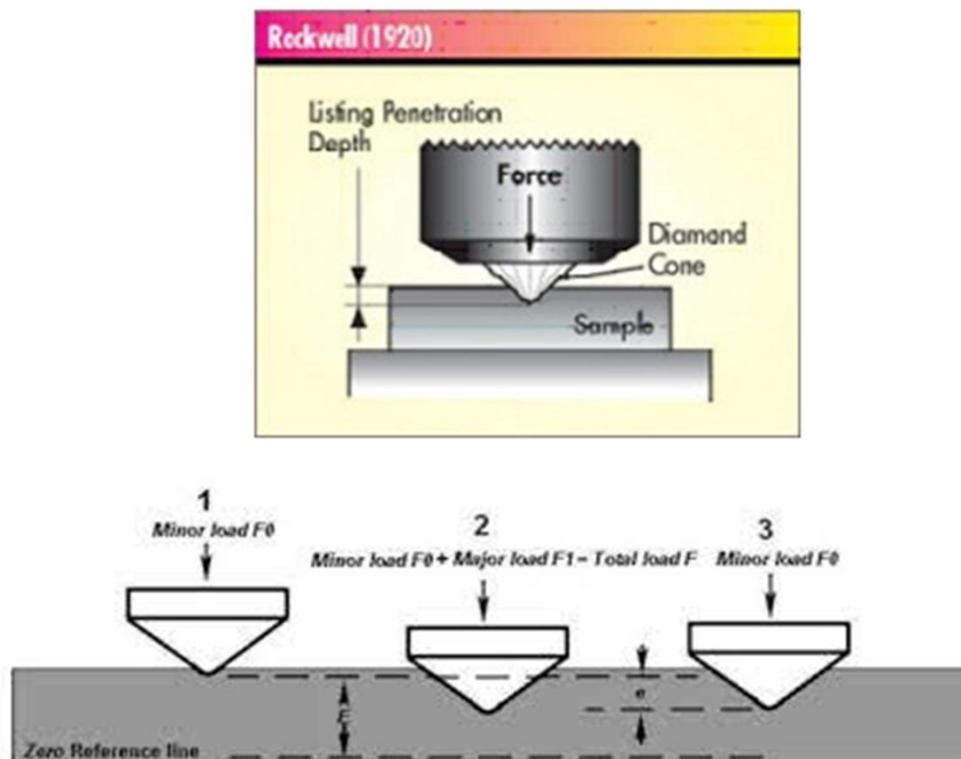
Teknologi SEM pada dasarnya adalah penelitian dan analisis permukaan. Data atau layar yang dihasilkan adalah data dari permukaan atau lapisan setebal 20 mikron dari permukaan.

c) Persiapan sampel sederhana

Sampel SEM bisa berupa material yang cukup tebal, sehingga pembuatannya sangat mudah. Inspeksi permukaan retak (*fraktografi*) adalah menjaga permukaan seperti apa adanya tetapi bebas dari kotoran seperti debu dan minyak. Permukaan sampel harus konduktif. Oleh karena itu permukaan sampel harus bersih dan tidak terkontaminasi oleh keringat.

2.11. Pengujian Kekerasan (*Rockwell C*)

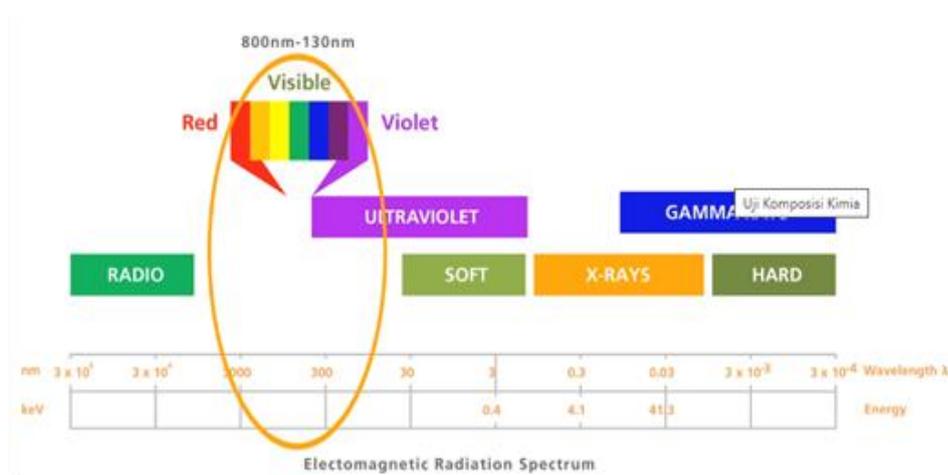
Kekerasan logam ditentukan oleh ketahanannya terhadap penetrasi dan memberikan indikasi cepat tentang perilaku deformasinya. Prinsip pengoperasian Mitutoyo *Hardness tester* model HR200 (Gambar 25) adalah bahwa sebuah *diamond cone* dengan sudut lancip 120° menjadi *test indenter* yang akan ditekan dan ditahan pada permukaan benda uji selama 15 detik. Beban minor 10 kg.f dan beban mayor 140 kg.f, selisih jejak kedalaman penetrasi yang ditimbulkan oleh beban mayor dan minor adalah nilai kekerasan Rockwell-C yang dapat dilihat langsung pada *dial indicator*. Uji kekerasan dipilih dengan metode Rockwell C (HRC) yang memenuhi persyaratan yaitu berukuran 15 x 20 x 40 mm, permukaan tidak kasar (membutuhkan pemolesan) dan tanpa noda minyak. Penopang harus digunakan untuk menghindari distorsi, pembengkokan, dan gerakan.



Gambar 25 Prinsip kerja untuk Pengujian Kekerasan Rockwell-C

2.12. Pengujian Komposisi Kimia (OES)

Optical Emission Spectroscopy (OES) adalah teknik analitik yang banyak digunakan untuk menentukan komposisi unsur berbagai logam. Bagian dari spektrum elektromagnetik yang digunakan dalam OES meliputi spektrum tampak dan bagian dari spektrum ultraviolet. Bagian spektrum yang digunakan dalam rentang panjang gelombang bervariasi dari 130 nanometer hingga sekitar 800 nanometer (Gambar 38).



Gambar 26 Spektrum Elektromagnetik pada OES
 Sumber: <https://www.detech.co.id/uji-komposisi-kimia/>

Karena memerlukan ukuran sampel kecil pada permukaan datar sebelum menguji spektrometer emisi optik sesuai standar ASTM E1131-08. 2004 diperlukan langkah-langkah awal berikut:

1. Pemotongan

Sampel dipotong kecil-kecil berukuran kurang lebih 1 x 1 cm agar sesuai dengan frame pada saat pengambilan spektrum.

2. Instalasi

Karena sampelnya kecil, maka perlu dibuat perlengkapan untuk memudahkan proses penggilingan. Bahan dudukan ini adalah resin,

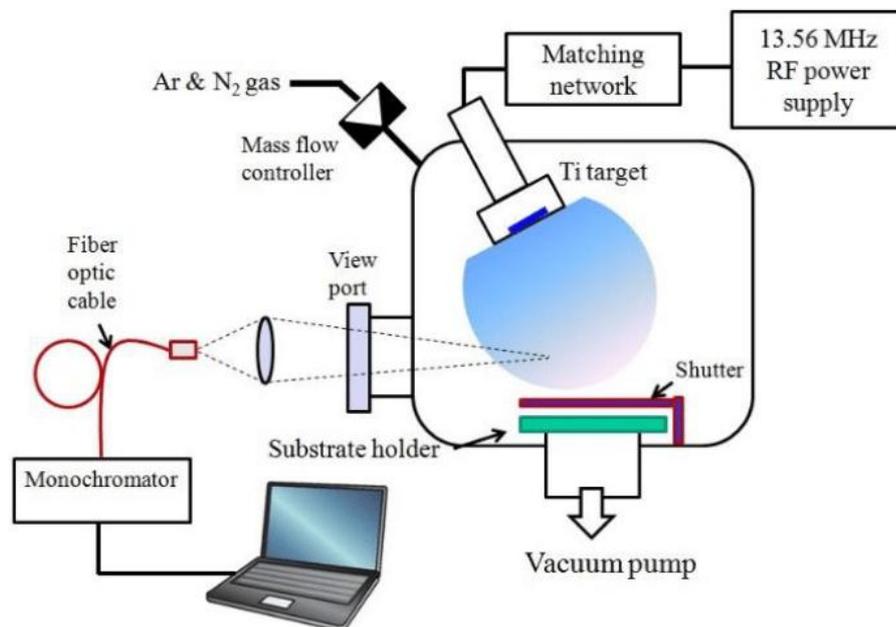
katalis, dan kobalt. Proses pengeringan memakan waktu sekitar satu hari.

3. Putaran (loop)

Karena pengujian membutuhkan permukaan yang halus dan rata, diperlukan penggilingan. Ukuran grit yang digunakan adalah 400, 600, 800, 1000, 1200.

4. Poles

Setelah menggiling hingga ukuran 1200, dilanjutkan dengan proses pemolesan untuk memoles permukaan sampel. Proses pemolesan ini dilakukan di dalam grinder. Bahan yang digunakan adalah kain beludru yang dimasukkan ke dalam mesin gerinda, setelah itu ditambahkan Autosol untuk memoles sampel, kemudian dilakukan seperti menggiling hingga permukaan sampel mengkilat tanpa goresan



Gambar 27 Skema Optical Emission Spectroscopy

Sumber: <https://www.researchgate.net/figure/Experimental-setup-for-optical-emission-spectroscopy>

2.13. Pengujian OM (*Optic Miscroscope*)

Mikroskop optik, juga dikenal sebagai "mikroskop cahaya", adalah jenis mikroskop yang menggunakan cahaya tampak dan sistem lensa untuk memperbesar gambar sampel kecil. Mikroskop optik ditemukan pada abad ke-17. Mikroskop optik dasar sangat sederhana, walaupun ada banyak desain yang lebih rumit yang dirancang untuk meningkatkan resolusi dan kontras sampel. Mikroskop cahaya mudah dibuat dan populer karena menggunakan cahaya tampak untuk mengamati sampel secara langsung dengan mata. Saat ini, gambar dapat ditangkap dengan mikroskop optik menggunakan kamera peka cahaya standar untuk membuat mikrograf dan terhubung langsung ke monitor komputer. Perbesaran mikroskop ini mencapai 1000x.



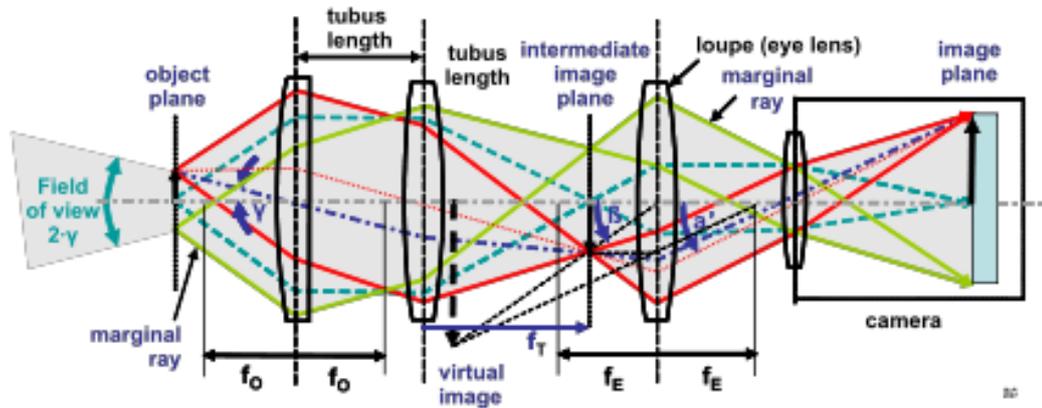
Keterangan:

1. Lensa okuler.
2. Putaran untuk memutar lensa objektif.
3. Lensa objektif.
4. Pemutar fokus (untuk kasar).
5. Pemutar fokus (untuk halus).
6. *Frame*.
7. Sumber cahaya atau cermin.
8. Diafragma atau lensa kondensor.
9. Tempat untuk menaruh sampel

Gambar 28 Bagian-bagian Mikroskop Optik

Komponen mikroskop optik modern sangat kompleks. Agar mikroskop berfungsi dengan baik, seluruh jalur sinar harus diposisikan dan dikontrol dengan sangat tepat. Namun, prinsip operasi dasar mikroskop cukup sederhana. Prinsip penting dari mikroskop adalah bahwa lensa dengan panjang fokus yang sangat

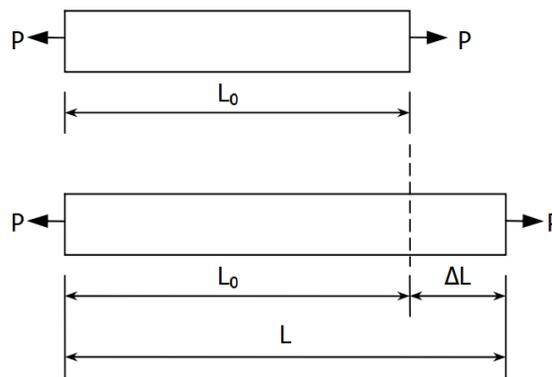
pendek (seringkali hanya beberapa mm) menciptakan bayangan nyata objek yang diperbesar.



Gambar 29 Skema Mikroskop Optik.

Lensa adalah kaca pembesar yang sangat kuat dengan panjang fokus yang sangat pendek. Lensa ini didekatkan dengan sampel yang akan diperiksa sehingga cahaya yang berasal dari sampel jatuh ke dalam tabung mikroskop dengan ketelitian kurang lebih 160 mm dan dengan demikian diperoleh bayangan objek yang diperbesar. Gambar yang dihasilkan dibalik dan dapat dilihat dengan melepas *eyepiece* dan meletakkan kertas kalkir di ujung tabung. Dengan memfokuskan spesimen yang sangat terang secara hati-hati, diperoleh gambar yang sangat besar. Gambar yang dihasilkan adalah gambar sebenarnya yang terlihat melalui lensa okuler dengan pembesaran tambahan.

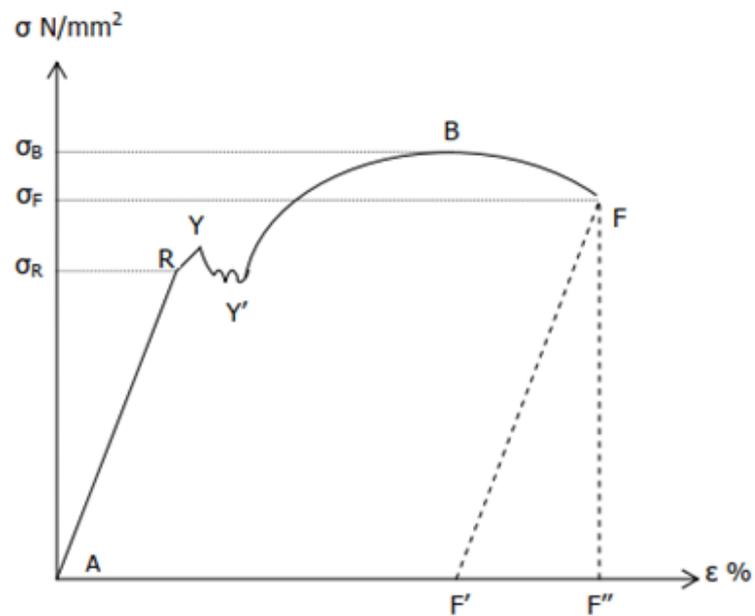
Pada kebanyakan mikroskop, lensa okuler adalah lensa majemuk dengan satu lensa komponen di dekat bagian depan tabung lensa okuler dan satu lagi di belakang. Pada beberapa model, bayangan maya difokuskan di antara dua lensa okuler. Lensa pertama menghadirkan bayangan nyata dan lensa kedua memungkinkan mata untuk fokus pada bayangan maya. Dengan semua mikroskop, gambar dimaksudkan untuk dilihat dengan mata terfokus tak terhingga (ingat bahwa posisi mata pada gambar di atas ditentukan oleh fokus mata pemeriksa). Permukaan sampel yang rata dan halus juga diperlukan untuk pengujian mikroskop optik ini menurut standar ASTM E3-01, 2004. Jadi



Gambar 30 Benda kerja bertambah panjang ΔL ketika diberi beban P

Hal-hal berikut harus diperhatikan saat mengatur regangan:

- Penampang baja struktural berkurang secara signifikan sebelum patah.
- Elongasi tertinggi terjadi pada titik keruntuhan, sedangkan elongasi terendah terjadi pada kedua ujung benda uji yang mengalami tegangan.



Gambar 31 Kurva umum tegangan - regangan hasil uji Tarik

Kurva tegangan-regangan hasil uji tarik biasanya terlihat seperti pada Gambar 31, gambar tersebut menunjukkan:

1. AR garis lurus. Pada bagian ini penambahan panjang sebanding dengan penambahan beban yang diberikan. Pada bagian ini berlaku hukum Hooke:

$$\Delta L = \frac{P}{A} \times \frac{L_0}{E} \dots\dots\dots(3)$$

Dengan :

- ΔL = penambahan panjang benda kerja (mm)
- L_0 = panjang benda kerja awal (mm)
- P = beban yang bekerja (N)
- A = luas penampang benda kerja (mm²)
- E = modulus elastisitas bahan (N/mm²)

Dari persamaan (1) dan (2) bila disubstitusikan ke persamaan (3), maka akan diperoleh persamaan:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \dots\dots\dots(4)$$

E = Modulus elastis (N/m²)

σ = Tegangan (MPa)

ϵ = Regangan (mm/mm)

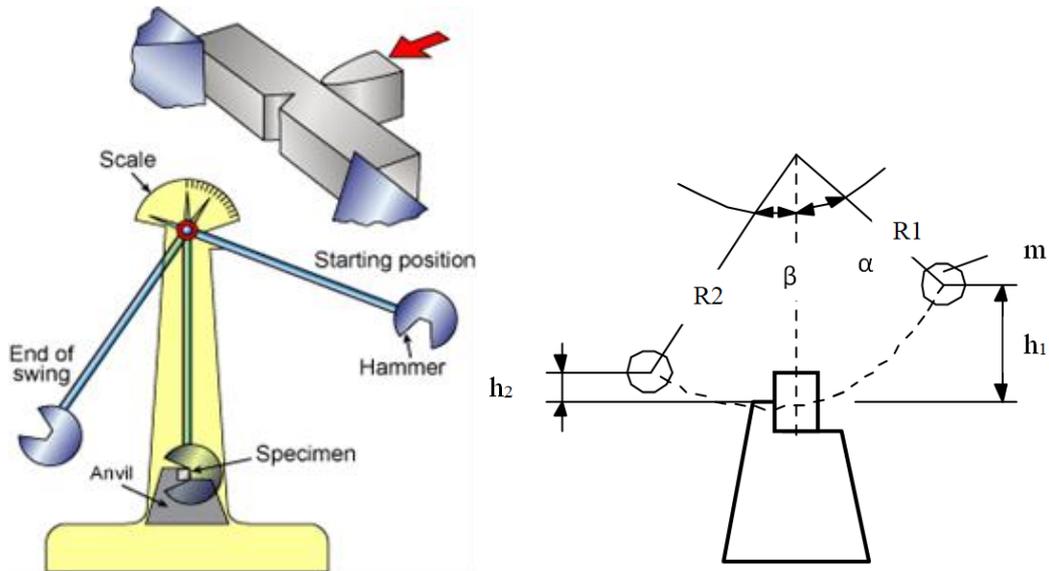
2. Y disebut diatas sebagai kekuatan luluh.
3. Y' disebut titik hasil bawah.
4. Di wilayah YY' benda kerja tampak meleleh dan perubahan beban disebut titik luluh.
5. Pada titik B tegangan mencapai maksimum dan titik ini sering disebut sebagai kekuatan tarik maksimum bahan (σ_B). Pada titik ini terlihat jelas bahwa benda kerja mengecil (necking).
6. Setelah titik B, beban mulai turun dan kemudian berhenti di titik F (kegagalan)
7. Titik R disebut batas relatif, yaitu batas rentang elastis dan interval AR disebut rentang elastis. Regangan yang diperoleh pada kisaran ini disebut regangan elastis.

8. Melebihi batas elasti sampai dengan benda kerja putus, umumnya disebut daerah plastis dan regangannya disebut regangan plastis.
9. Jika pertambahan panjang (ΔL) diukur setelah benda kerja dibongkar dan dipasang kembali (*aligning*), maka elongasi yang diperoleh dari hasil pengukuran ini adalah elongasi plastis (AF').

2.15. Pengujian *Impact (Charpy)*

Surdia dkk. (1995), meskipun logam ini secara inheren keras, beberapa bahan tiba-tiba dapat menjadi rapuh dan pecah karena perubahan suhu dan laju regangan. Fenomena ini dikenal sebagai gerakan lempung rapuh, yang penting untuk penggunaan material secara praktis. Fraktur benar-benar rapuh, yaitu tanpa deformasi plastis, sehingga rekahan terjadi pada bidang kristalografi tertentu pada bidang rekahan, berlawanan dengan bidang slip normal. Permukaan patahan pada bidang patahan memiliki kilap yang menunjukkan pola *chevron makroskopik* ke arah asal patahan. Fraktur terjadi pada takikan benda uji, yaitu material pecah tiba-tiba tanpa deformasi plastis. Dalam prakteknya, patahan artifisial seperti itu tidak pernah terjadi pada struktur mesin, tetapi mesin selalu memiliki bagian dengan konsentrasi tegangan dan mungkin memiliki cacat pada las, sehingga terjadinya cacat yang mengesankan seperti takik tidak dapat dihindari bahkan jika bahannya adalah bahan yang keras.

Uji dampak Charpy menurut standar ASTM E23, 2004 banyak digunakan untuk menentukan kualitas material. Batang uji yang dilengkapi dengan V-takik 2mm adalah yang paling umum digunakan. Selain itu, lebih dari 30 jenis tulangan uji termasuk yang menyebabkan retak lelah telah diusulkan. Pengujian ini menggunakan test bar berbentuk kotak dengan dimensi 10mm x 10mm x 55mm dan V-notch 2mm x 45°. Uji benturan Charpy dilakukan untuk menentukan sifat material, yang ditentukan oleh jumlah energi yang dibutuhkan untuk mematahkan batang uji dengan satu tumbukan. Bentuk uji notch dari metode Charpy (berasal dari Amerika) ditunjukkan pada Gambar 32.



Gambar 32 Mekanisme Perpatahan benda uji impact

Tenaga yang diserap benda uji atau tenaga untuk mematahkan benda uji dapat ditulis dalam bentuk rumus :

$$E = m \times g (h_1 - h_2)$$

$$= \text{ gaya jarak}$$

dimana :

- E = energi terserap = tenaga untuk mematahkan benda uji (Joule)
- m = massa palu godam (kg)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2) = 10 m/s^2
- R = jarak titik putar ke titik berat palu godam (m)

α = sudut jatuh

β = sudut ayun

h_1 = tinggi jatuh palu godam (m) = $R + R \sin (\alpha - 90^\circ)$

h_2 = tinggi ayunan palu godam (m) = $R + R \sin(\beta - 90^\circ)$

Sehingga :

$$\text{Harga Impact} = \frac{\text{energi terserap (Joule)}}{\text{Luas penampang patahan benda uji (mm}^2\text{)}}$$

Tabel 11 Jadwal Penelitian

No	Nama Kegiatan	Bulan 2022											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	Analisa hasil uji tarik dan analisa hasil karakterisasi dari kegiatan No. 3 dan 4 berikut uji kekerasan dan uji impact												
6	Penulisan manuscript ke Jurnal Internasional dan artikel Seminar Nasional (syarat lulus S2)												
7	Laporan kemajuan dan akhir												

3.2. Alat Dan Bahan

Dalam penelitian ini dipersiapkan alat-alat penunjang dan bahan pengujian sebagai berikut :

1. Baja Pegas Daun (*Leaf Spring*) JIS SUP 9A

Bahan pegas daun bekas yang ditunjukkan pada Gambar 33 berfungsi sebagai bahan uji/specimen untuk keperluan pengujian, yaitu baja pegas daun kondisi bekas (tebal 16 mm). Disiapkan dengan proses tempa panas (*hot-forging*) untuk membuat menjadi rata dan tidak melengkung, sebagai bahan uji disiapkan sebanyak 45 bahan uji untuk uji OES (1 pcs), uji SEM (4 pcs), Uji Kekerasan (12 pcs), Uji Tarik (12 pcs), Uji *Impact* (12 pcs) dan uji OM (4 pcs).



Gambar 33 Baja pegas daun kondisi bekas ($t=16$ mm)
Sumber: Dokumentasi Pribadi

2. Penggaris

Penggaris berfungsi untuk menggambar pola garisan bahan uji sesuai dengan ukuran yang sudah dibuat sebelumnya.

3. Jangka Sorong

Jangka sorong Gambar 34 ini berfungsi untuk mengukur tebal dan panjang pegas daun (*leaf spring*) atau bahan uji.



Gambar 34 Jangka Sorong
Sumber : Dokumentasi Pribadi

4. Amplas

Amplas berfungsi sebagai penghalus permukaan bahan uji sebelum dilakukanya pengujian.

5. Tang Penjepit

Tang berfungsi untuk menjepit bahan uji ketika masih dalam keadaan panas saat proses pengujian berlangsung.

6. Gerinda (*Hand Grinding*)

Gerinda ini berfungsi untuk memotong bahan uji sesuai dengan pola yang sudah ditentukan.

7. Mesin Gerinda Permukaan (*Surface Grinding*)

Mesin gerinda permukaan (*surface grinding*) ini berfungsi untuk membentuk bahan uji yang sesuai dengan ukuran dan kehalusan permukaan yang sudah ditentukan.

8. Tungku Pemanas

Tungku pemanas Gambar 35 ini berfungsi untuk memanaskan bahan uji sesuai dengan temperatur yang sudah ditentukan.



Gambar 35 Tungku Pemanas

Sumber: Dokumentasi Pribadi (Politeknik Sugar Group Companies)

9. Alat Uji Kekerasan *Mitutoyo Hardness Tester model HR200*

Alat pengujian kekerasan ini berfungsi untuk melakukan pengujian kekerasan pada bahan uji. Prinsip pengoperasian *Mitutoyo Hardness tester* model HR200 (Gambar 36) adalah bahwa sebuah *diamond cone* dengan sudut lancip 120° menjadi *test indenter* yang akan ditekan dan ditahan pada permukaan benda uji selama 15 detik. Beban minor 10 kg.f dan beban mayor 140 kg.f, selisih jejak kedalaman penetrasi yang ditimbulkan oleh beban mayor dan minor adalah nilai

kekerasan Rockwell-C yang dapat dilihat langsung pada *dial indicator*. Adapun gambar dari pengujian kekerasan yaitu sebagai berikut;



Gambar 36 Alat Uji Kekerasan Mitutoyo Hardness Tester model HR200
Sumber: Dokumentasi Pribadi (Lab. Teknik Mesin PTG)

10. Alat Uji *Impact Charpy*

Alat uji impak Gambar 37 ini berfungsi untuk melakukan pengujian *impact* pada bahan uji. Dimana pengujian *impact* ini dilakukan dengan memberikan suatu gaya *impact* pada suatu spesimen yang bentuk dan ukurannya standar.



Gambar 37 Alat Uji Impact Charpy
Sumber : Dokumentasi Pribadi (Lab. Teknik Mesin UNILA)

11. Mesin MTS *Landmark* 100 kN

Alat MTS *Landmark* Gambar 38 ini dapat digunakan untuk pengujian tarik statis dan fatik, yang tersedia di laboratorium Material Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Alat ini mampu menerima beban sebesar 100 kN.



Gambar 38 Mesin MTS *Landmark* 100 kN

Sumber: Dokumentasi Pribadi (Lab. Teknik Mesin UNILA)

3.3. Spesifikasi Bahan Uji

Untuk melakukan pengujian, peneliti telah melakukan uji komposisi pegas daun (*leaf spring*) bekas di PT. ITOKOH CEPERINDO, dimana komposisi bahan pegas daun sebagai bahan uji seperti pada Tabel 12 dibawah ini :

Tabel 12 Komposisi kimia pegas daun (*leaf spring*) truk Mitsubishi 8DC9 bekas

Unsur Kimia	% Unsur	Unsur Kimia	% Unsur
Fe	96,9900	P	0,0155
S	0,0179	Cu	0,0557
Al	0,0088	Ti	0,0077
C	0,5597	N	0,0290
Ni	0,0314	B	0,0005

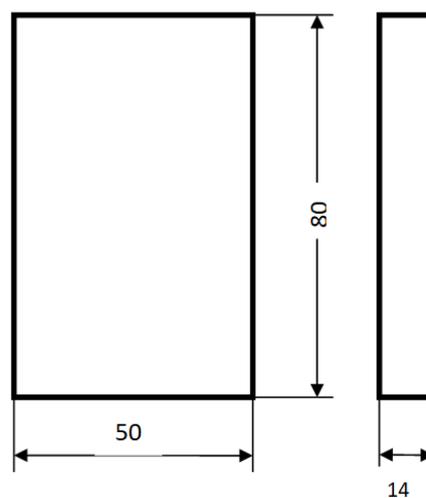
Tabel 12 Komposisi kimia pegas daun (leaf spring) truk Mitsubishi 8DC9 bekas

Unsur Kimia	% Unsur	Unsur Kimia	% Unsur
Si	0,3540	Pb	0,0080
Cr	0,9287	Sb	0,0074
V	0,0050	Ca	0,0000
Mn	0,9111	Mg	0,0003
Mo	0,0024	Zn	0,0001
W	-0,0002	Co	0,0111

Sumber: Uji Komposisi Kimia PT.ITOKOH CEPERINDO

A. Spesifikasi Bahan Uji Kekerasan

Bentuk dan dimensi ukuran bahan uji kekerasan disiapkan sesuai standar (ASTM E384, 2004) sejumlah 12 pcs. Kemudian dilakukan proses pemesinan pembuatan bahan uji menggunakan Milling CNC Feeler VMP 40A buatan Taiwan, yang akan dikerjakan di Politeknik SGC Lampung Tengah. Setelah bahan uji diberi perlakuan panas SQT (*Single Quenching Tempering*) dan DQT (*Double Quenching Tempering*) dengan media quenching CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C.



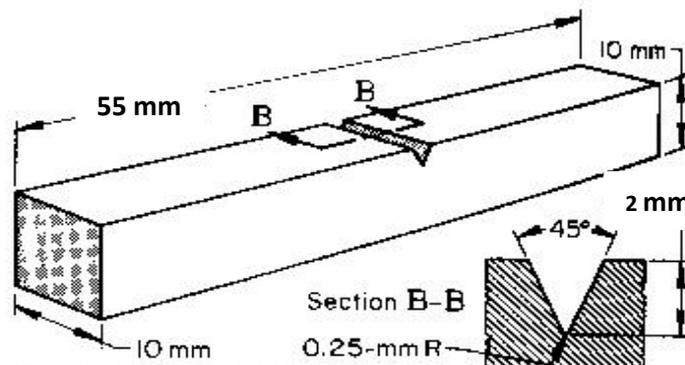
Gambar 39 Bahan Uji Kekerasan Pegas daun (leaf spring) (ASTM E384, 2004)

Tabel 13 Spesifikasi Bahan Uji Kekerasan

	Tebal	Lebar	Panjang
Pegas Daun (<i>Leaf Spring</i>)	14 mm	50 mm	80 mm

B. Spesifikasi Bahan Uji *Impact Charpy*

Bahan uji *impact* Gambar 40 menggunakan bahan berpenampang kotak disiapkan sesuai standar (ASTM E23, 2004) dengan ukuran 10 x 10 x 55 mm pada Tabel 14 yang berjumlah 12 pcs. Setelah bahan uji diberi perlakuan panas SQT (*Single Quenching Tempering*) dan DQT (*Double Quenching Tempering*) dengan media *quenching* CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C.

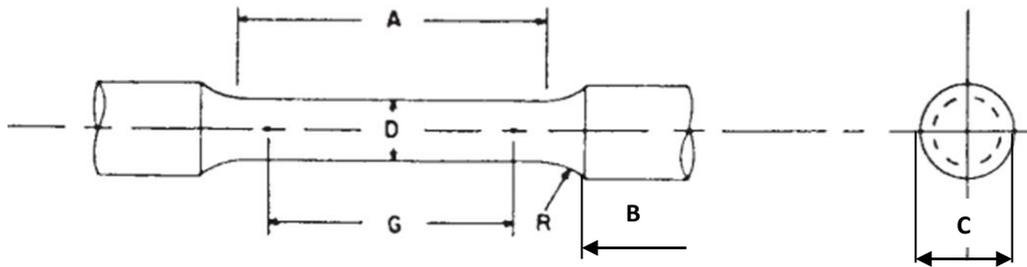
Gambar 40 Bahan Uji *Impact Charpy* (ASTM E23, 2004)Tabel 14 Spesifikasi Bahan Uji *Impact Charpy*

	Tebal	Lebar	Panjang	Dalam V notch	Sudut V notch	Radius V notch
Pegas Daun (<i>Leaf Spring</i>)	10 mm	10 mm	55 mm	2 mm	45°	0,25 mm

C. Spesifikasi Bahan Uji Tarik

Bahan uji tarik Gambar 41 menggunakan bahan berpenampang plat disiapkan sesuai standar (ASTM E8, 2004) dengan ukuran pada Tabel 15 adalah panjang 200 mm dan lebar 12 mm, dengan jumlah 12 pcs. Setelah bahan uji diberi perlakuan panas SQT (*Single Quenching Tempering*) dan DQT (*Double*

Quenching Tempering) dengan media *quenching* CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C.



Gambar 41 Bahan Uji Tarik Pegas daun (*leaf spring*) (ASTM E8, 2004).

Tabel 15 Spesifikasi Bahan Uji Tarik Pegas Daun (*Leaf Spring*)

G	D	A	R	B	C
50	6	70	15	60	12

3.4. Langkah Pembuatan Bahan Uji

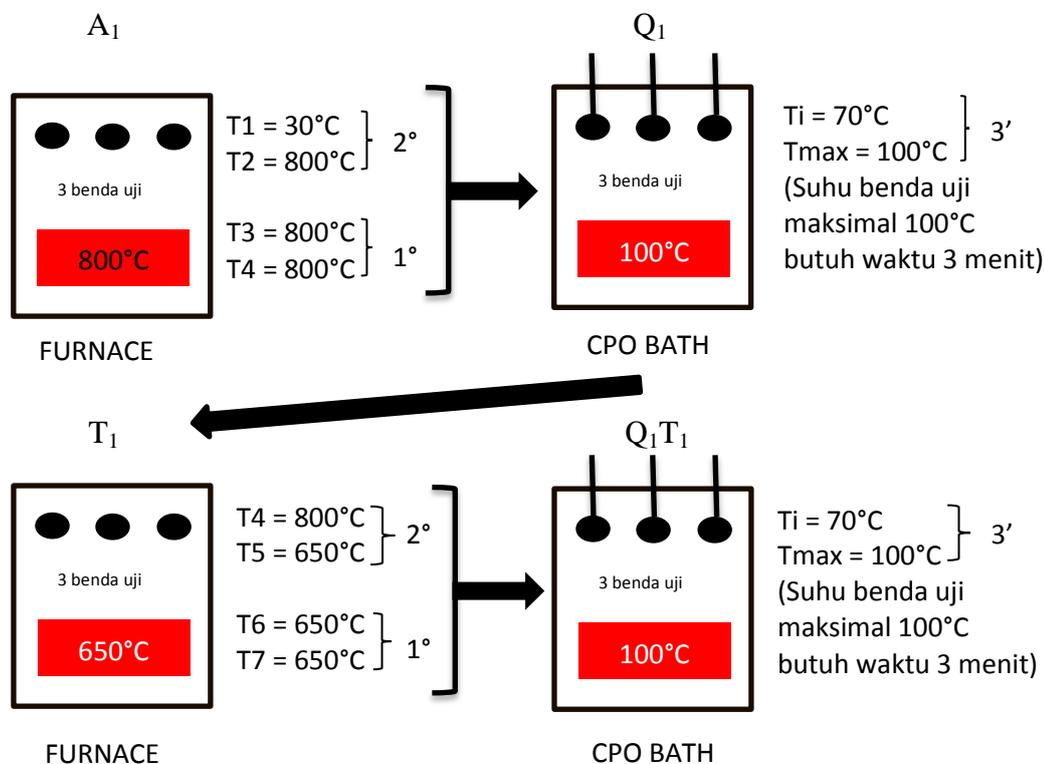
Pada pembuatan bahan uji/specimen diperlukan persiapan dan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Material baja pegas daun bekas diratakan agar tidak melengkung dengan proses tempa panas (*hot-forging*)
2. Siapkan jangka sorong dan penggaris untuk menentukan ukuran pola benda uji kekerasan sesuai standar ASTM E384.
3. Benda uji *impact* ukuran sudah ditentukan sesuai standar ASTM E23.
4. Untuk benda uji Tarik ukuran sudah ditentukan sesuai standart ASTM E8.
5. Persiapan bahan uji untuk dilakukan uji struktur mikro dan fasa-fasa yang terbentuk dilakukan menggunakan SEM dan EDS dan struktur kristal dengan X-RD sesuai standar ASTM E2809-13

6. Untuk uji komposisi dengan OES-*spectroscopy* sesuai dengan ASTM E1131-08.
7. Pengambilan struktur mikro dengan mikroskop optik (OM) sesuai ASTM E3-01
8. Buat pola benda uji dikertas lalu dipotong menggunakan gunting.
9. Potong benda uji dengan gerinda sesuai pola yang sudah ditentukan.
10. Benda uji *impact* dan uji kekerasan lalu di ratakan permukaannya dengan menggunakan bantuan mesin *surface grinding*.

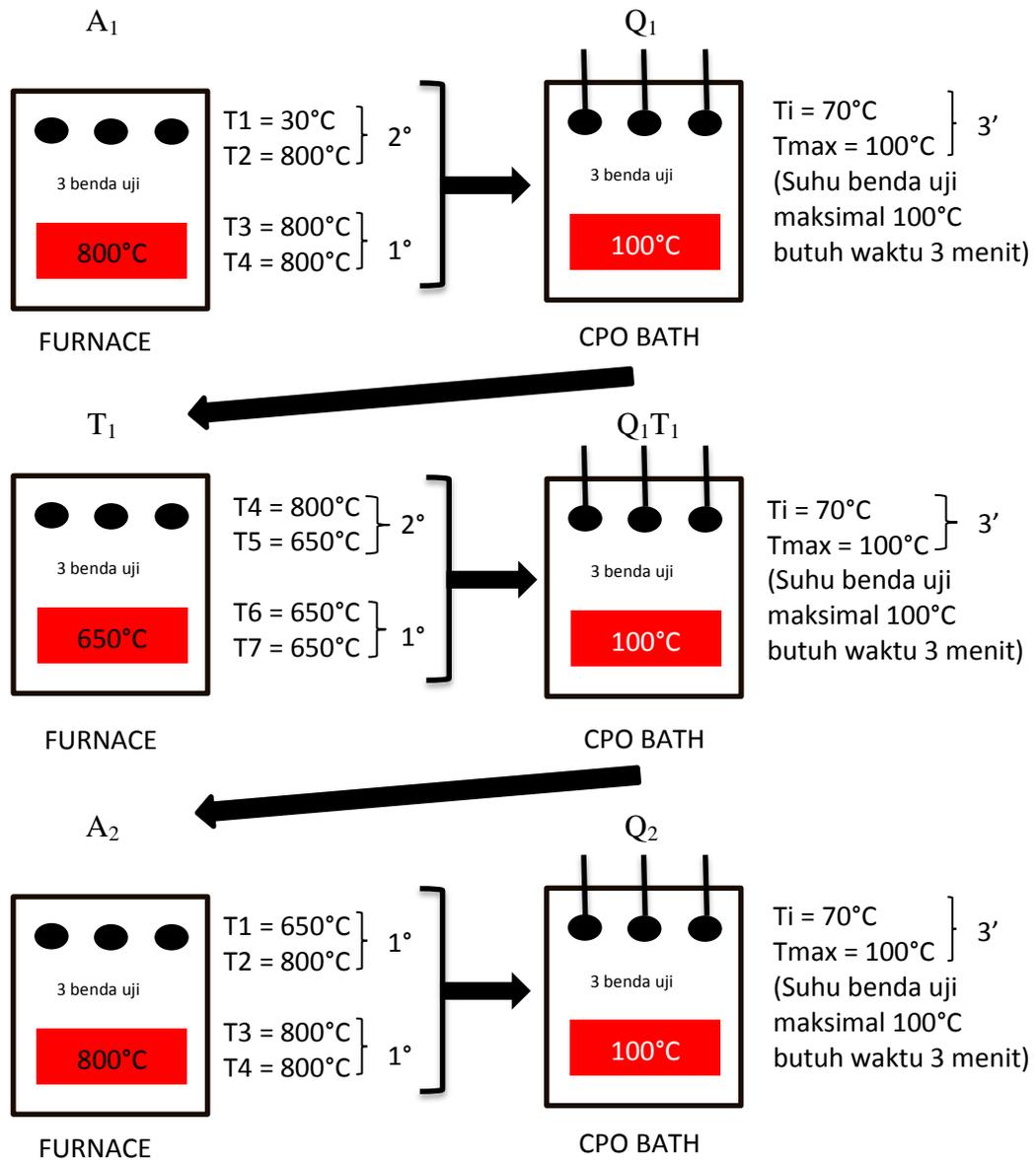
3.5. Langkah Pengujian

Tahapan proses pengujian, Gambar 3. 10 (a, b, c) dibawah ini menunjukkan alur pengujian yang sama pada benda uji kekerasan, uji *impact* dan uji tarik statis. Diberikan juga gambaran mengenai *setting* temperatur pada *furnace* dan waktu yang dibutuhkan pada setiap prosesnya:

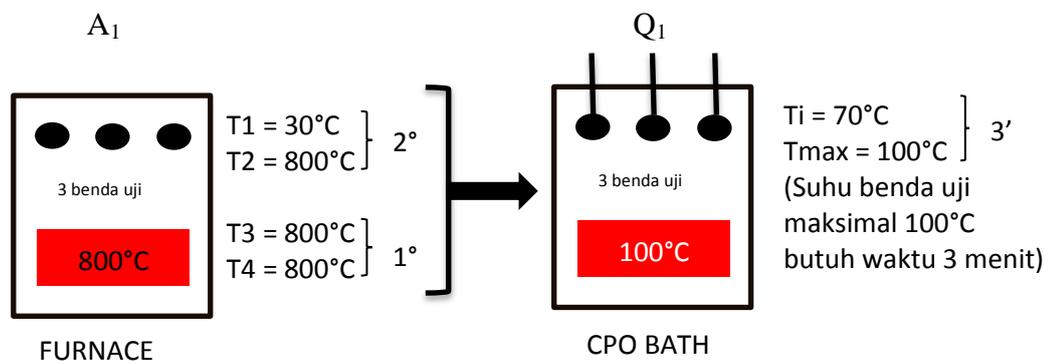


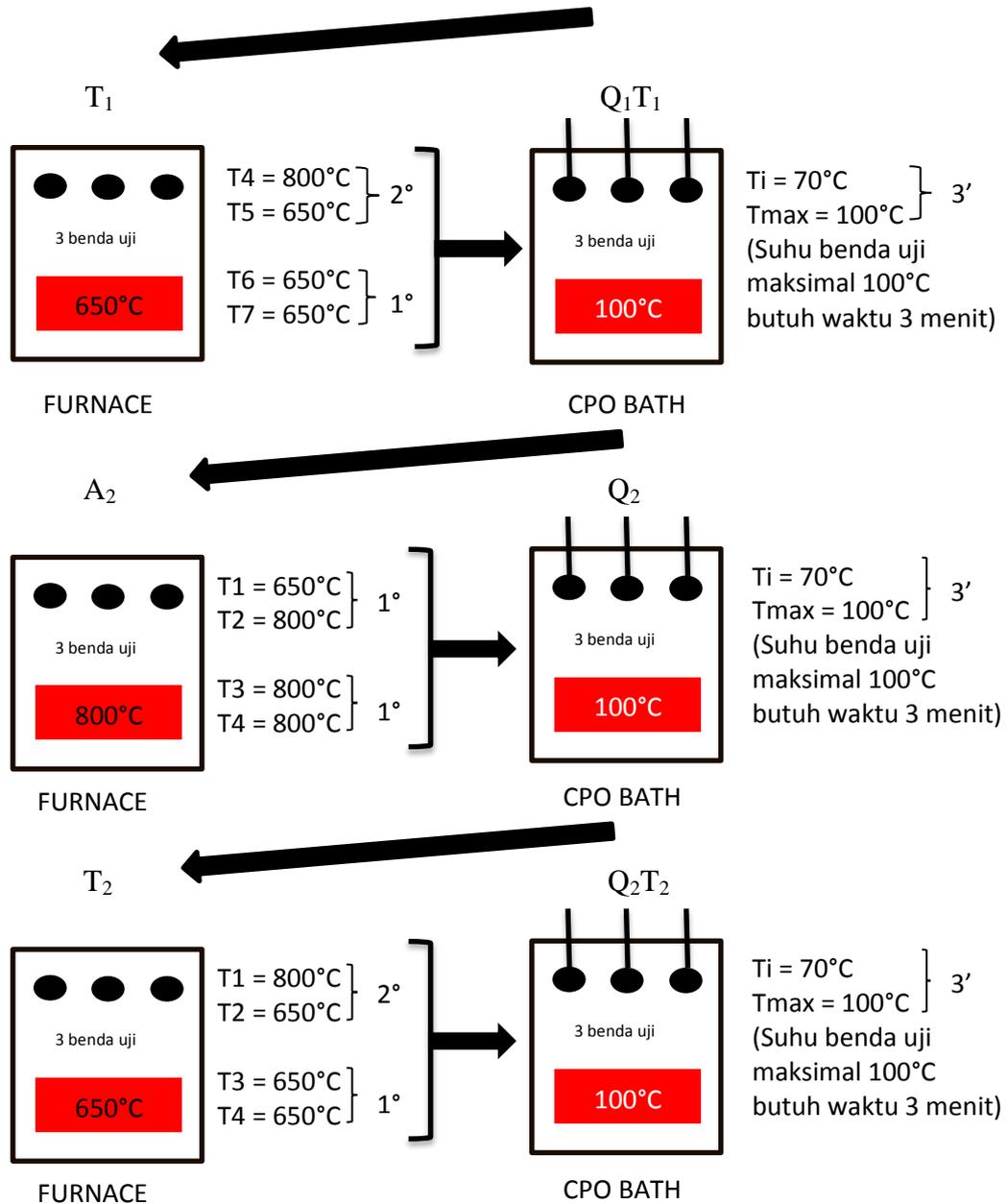
Waktu Perlakuan Panas 6 jam, Kode Pengujian Q_1T_1

(a)



Waktu Perlakuan Panas 8 jam, Kode Pengujian Q₂
(b)





Waktu Perlakuan Panas 11 jam, Kode Pengujian Q_2T_2
(c)

Gambar 42 Alur Proses Perlakuan Panas pada Benda Uji Tarik, Uji Kekerasan dan Uji Impak; (a) *Single Quenching Tempering* (Q_1T_1), (b) *Double Quenching* (Q_2), (c) *Double Quenching Tempering* (Q_2T_2)

Metode penelitian pada perlakuan panas Gambar 42(a), 42(b), dan 42(c) dapat dijelaskan menjadi beberapa tahap pengujian di bawah ini, antara lain:

- A. Untuk pengujian Kekerasan *Rockwell-C* (HRC) sebanyak 15 benda uji perlu langkah-langkah sebagai berikut :
1. Sisihkan 3 bahan uji baja pegas daun dengan kode A_0 tanpa perlakuan untuk pembanding utama dengan dimensi dan ukuran sesuai standar ASTM E384 untuk dilakukan pengujian.
 2. Bahan uji lainnya dibentuk mendekati ukuran standar ASTM E384, kemudian diratakan agar tidak melengkung dengan proses tempa panas (*hot-forging*).
 3. Persiapkan bahan uji yang telah rata dan tidak melengkung dengan proses *machining* menjadi dimensi dan ukurannya sesuai standar ASTM E384, lanjutkan dengan proses *full annealing* pada temperature 800°C dan *holding time* 120 menit, didinginkan lambat dalam tungku.
 4. Sisihkan 3 bahan uji baja pegas daun dengan kode FA perlakuan panas *full annealing* untuk dilakukan pengujian.
 5. Panaskan bahan uji di tungku pemanas dengan jumlah 3 buah pada temperatur 800°C dan *holding time* 60 menit. (A_1)
 6. Padamkan dengan cepat (*quenching*) dalam cairan CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C (Q_1).
 7. Lanjutkan ke 3 buah bahan uji tersebut untuk dilakukan proses perlakuan panas *tempering* dengan temperatur 650°C dan *holding time* 60 menit. (T_1)
 8. Padamkan dengan cepat (*quenching*) dalam cairan CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C (Q_1T_1).
 9. Pisahkan 3 buah bahan uji dengan kode proses (Q_1T_1) untuk dilakukan pengujian.
 10. Lakukan langkah yang sama dari no. 5 sampai dengan no. 8 pada 3 buah bahan uji yang lain, kemudian lakukan proses perlakuan

panas kembali dengan temperatur 800°C dan *holding time* 60 menit. (A₂)

11. Padamkan dengan cepat (*quenching*) dalam cairan CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C (Q₂).
 12. Pisahkan 3 buah bahan uji dengan kode proses (Q₂) untuk dilakukan pengujian.
 13. Lakukan langkah yang sama dari no. 10 sampai dengan no. 11 pada 3 buah bahan uji yang terakhir, kemudian lakukan proses perlakuan panas *tempering* dengan temperatur 650°C dan *holding time* 60 menit. (T₂)
 14. Padamkan dengan cepat (*quenching*) dalam cairan CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C (Q₂T₂).
 15. Ambil 3 buah bahan uji yang terakhir ini dengan kode proses (Q₂T₂) untuk dilakukan pengujian.
 16. Kemudian benda uji kode A₀, FA, Q₁T₁, Q₂ dan Q₂T₂ di uji dengan mesin uji Kekerasan *Rockwell-C* (HRC), lalu tulis hasil dari pengujian tersebut.
- B. Untuk pengujian Impak *Charpy V-Notch* sebanyak 15 benda uji perlu langkah-langkah sebagai berikut :
1. Sisihkan 3 bahan uji baja pegas daun dengan kode A₀ tanpa perlakuan untuk pembandingan utama dengan dimensi dan ukuran sesuai standar ASTM E23
 2. Bahan uji lainnya dibentuk mendekati ukuran standar ASTM E23, kemudian diratakan agar tidak melengkung dengan proses tempa panas (*hot-forging*).
 3. Persiapkan bahan uji yang telah rata dan tidak melengkung dengan dimensi dan ukuran sesuai standar ASTM E23, lanjutkan

dengan proses *annealing* pada temperature 800°C dan *holding time* 120 menit, didinginkan lambat dalam tungku.

4. Sisihkan 3 bahan uji baja pegas daun dengan kode FA perlakuan panas *full annealing* untuk dilakukan pengujian.
5. Panaskan bahan uji di tungku pemanas dengan jumlah 3 buah pada temperatur 800°C dan *holding time* 60 menit. (A₁)
6. Padamkan dengan cepat (*quenching*) dalam cairan CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C (Q₁).
7. Lanjutkan ke 3 buah bahan uji tersebut untuk dilakukan proses perlakuan panas *tempering* dengan temperatur 650°C dan *holding time* 60 menit. (T₁)
8. Padamkan dengan cepat (*quenching*) dalam cairan CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C (Q₁T₁).
9. Pisahkan 3 buah bahan uji dengan kode proses (Q₁T₁) untuk dilakukan pengujian.
10. Lakukan langkah yang sama dari no. 5 sampai dengan no. 8 pada 3 buah bahan uji yang lain, kemudian lakukan proses perlakuan panas kembali dengan temperatur 800°C dan *holding time* 60 menit. (A₂)
11. Padamkan dengan cepat (*quenching*) dalam cairan CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C (Q₂).
12. Pisahkan 3 buah bahan uji dengan kode proses (Q₂) untuk dilakukan pengujian.
13. Lakukan langkah yang sama dari no. 10 sampai dengan no. 11 pada 3 buah bahan uji yang terakhir, kemudian lakukan proses perlakuan panas *tempering* dengan temperatur 650°C dan *holding time* 60 menit. (T₂)

14. Padamkan dengan cepat (*quenching*) dalam cairan CPO (Crude Palm Oil) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C (Q₂T₂).
 15. Ambil 3 buah bahan uji yang terakhir ini dengan kode proses (Q₂T₂) untuk dilakukan pengujian.
 16. Kemudian benda uji kode A₀, FA, Q₁T₁, Q₂ dan Q₂T₂ di uji dengan mesin uji *Impact Charpy*, lalu tulis hasil dari pengujian tersebut.
- C. Untuk pengujian Tarik Statis sebanyak 15 benda uji perlu langkah-langkah sebagai berikut :

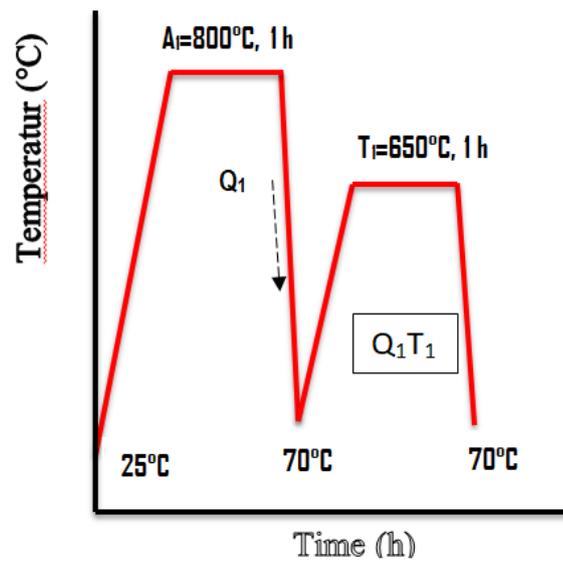
Pengujian Tarik Statis harus dilakukan terlebih dahulu untuk mendapatkan data nilai tegangan luluh (σ_y) baja. Adapun prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan bahan uji sesuai dengan standar ASTM E8, kemudian dilakukan langkah perlakuan panas seperti uji *impact* dan uji kekerasan sehingga dihasilkan benda uji masing-masing 3 buah dengan kode A₀, FA, Q₁T₁, Q₂, dan Q₂T₂.
2. Membuka program Controller 793B setelah itu klik *manual command*, pilih *displacement mode*, lalu naikan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
3. Pasang spesimen pada *cross head grip* atas kemudian bahan uji dicekam.
4. Lalu *cross head* diturunkan sampai ujung bawah bahan uji masuk ke dalam grip bawah dengan kedalaman 3 cm.
5. Klik *manual command* dan klik *control mood* ke *force*.
6. Kemudian klik *auto offset* untuk *force*. Setelah itu grip bagian bawah dicekam sehingga ujung bahan uji bagian bawah tidak berubah.

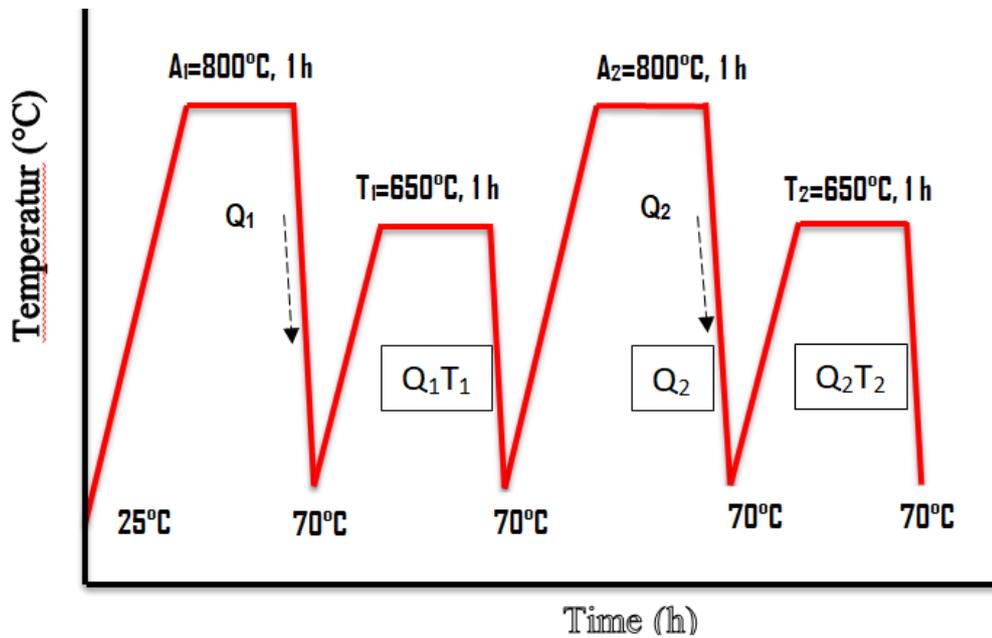
7. Pasang *extensometer* ke bahan uji dengan posisi zero pin, dan klik manual *offset* untuk *extensometer*. Lalu lepaskan zero pin dari *extensometer*.
8. Membuka Software MTS Test Suite (MPE), pilih template untuk uji tarik statis.
9. Memasukkan data diameter *gauge length* pada benda uji.
10. Memasukan *initial speed* dan *secondary speed* (mm/s).
11. Setelah menginput semua data lalu klik RUN.

3.6. Proses Perlakuan Panas *Double Quenching Tempering*

Pada penelitian kali ini, media *quenching* menggunakan CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga specimen mencapai suhu 100°C dan proses austenisasi menggunakan *furnace* Naberthem 1300°C. Pemilihan suhu 70°C media pendingin CPO ditentukan berdasarkan titik awal pembentukan fasa martensit yang dapat diprediksi menggunakan *software* Bhadeshia (Bhadeshia et al, 2006) Media *quenching* minyak CPO dipanaskan dalam bak stainless steel menggunakan *heater* silika 3 kW dan suhu penangas minyak dikontrol menggunakan termokopel Tipe K (XCIB dari OmegaUSA) dengan pengontrol autonik untuk mendinginkan suhu minyak tadi, dialirkanlah air pendingin dari *chiller* secara sirkuler dalam tangki terbuka tempat minyak *quenching* tadi, untuk mendinginkan minyak dan menjaga suhu minyak tetap terjaga secara terus menerus. Bahan uji dibuat dari baja paduan JIS SUP 9A kondisi bekas pakai dan dibeli di PT Gula Putih Mataram-Lampung Tengah. Proses SQT dan DQT pada baja pegas daun kondisi *hot forging* secara skematik dapat dilihat pada Gambar 43(a) dan Gambar 43(b). Masing-masing 3 bahan uji diberi perlakuan A₀, Q₁T₁, Q₂ dan Q₂T₂ dengan prosedur mengikuti Gambar 42(a), 42(b) dan 42(c).



(a)



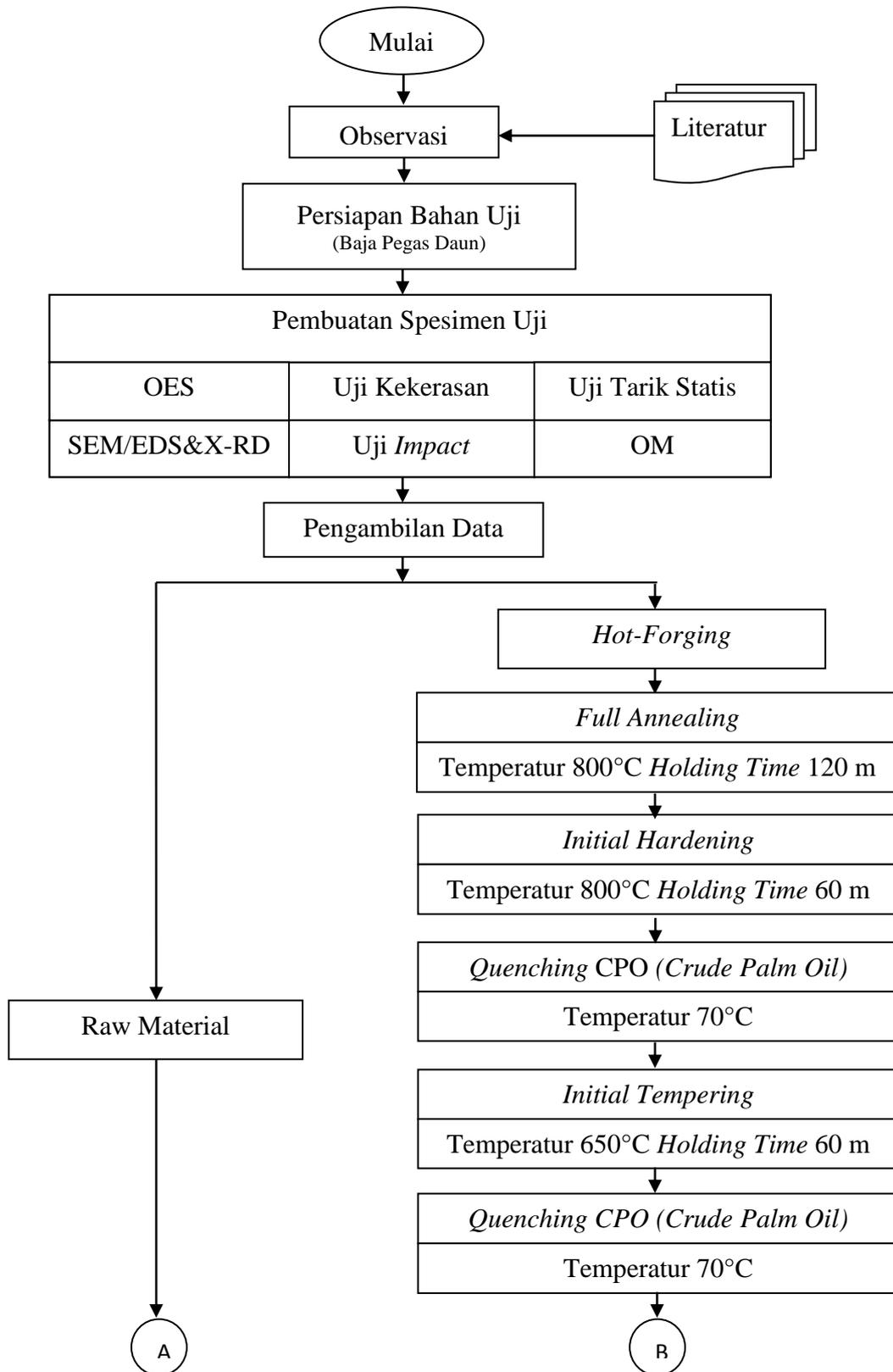
(b)

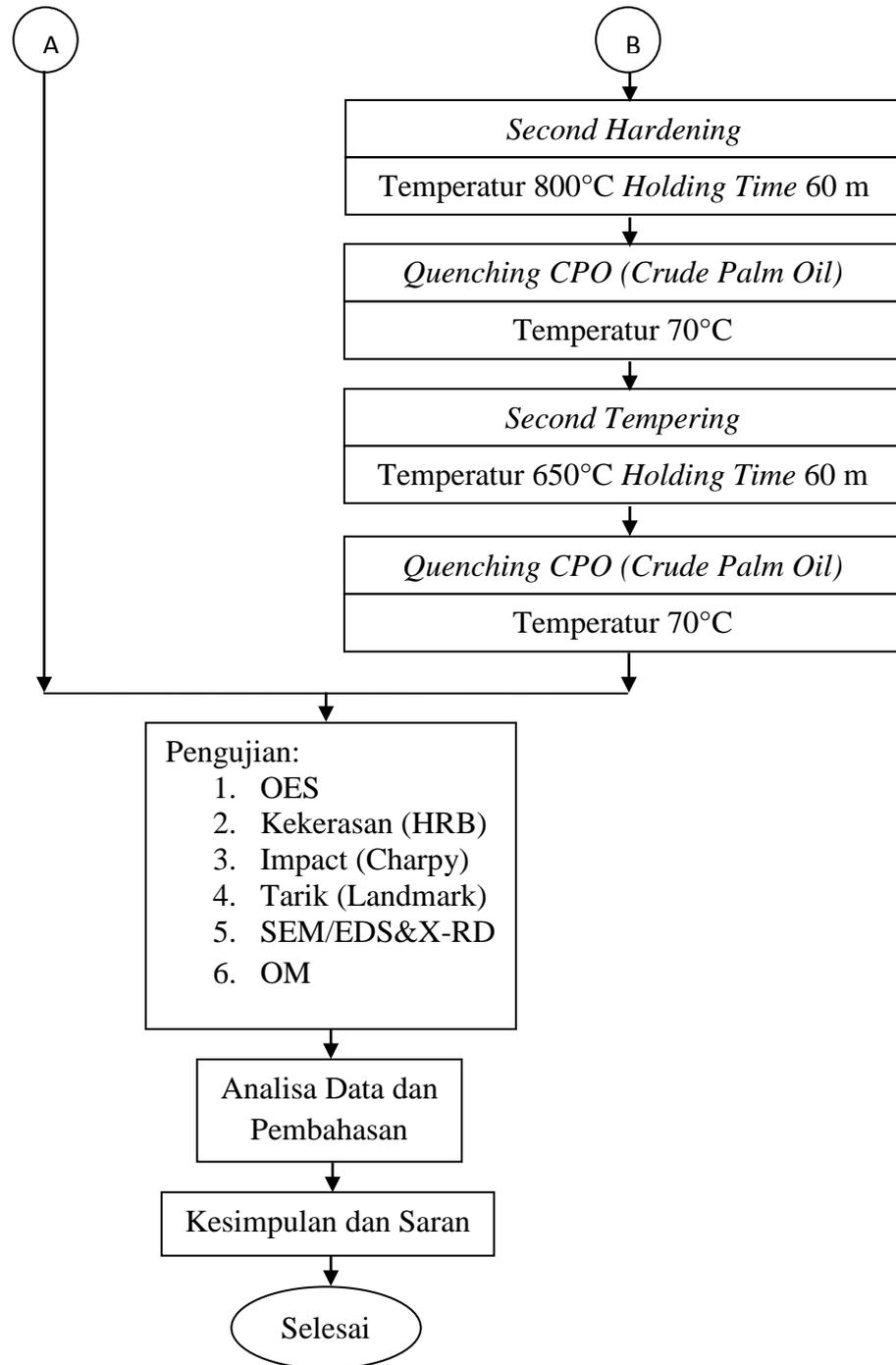
Gambar 43 Diagram skematis proses *quenching* dan *tempering* pada JIS SUP 9A; (a) SQT (*Single Quenching Tempering*) dan (b) DQT (*Double Quenching Tempering*)

Proses perlakuan panas SQT (*Single Quenching Tempering*) dan DQT (*Double Quenching Tempering*) untuk membuat Pegas Daun (*Leaf Spring*) memiliki sifat mekanis dan struktur mikro yang lebih baik, dapat dijelaskan Gambar 43 adalah sebagai berikut:

1. Material baja pegas daun bekas dibentuk sesuai ukuran terluar dari benda uji kekerasan, uji impact dan uji tarik.
2. Material baja pegas daun bekas ini diratakan agar tidak melengkung dengan proses tempa panas (*hot-forging*).
3. Melakukan proses perlakuan panas *annealing* untuk melunakkan dan memperbaiki ukuran butir pada temperatur *furnace* 800°C dengan *holding time* 120 menit, dilanjutkan proses pendinginan yang lambat didalam *furnace*.
4. Melakukan proses *hardening* pertama pada temperatur 800°C dengan *holding time* 60 menit, kemudian dilakukan proses *quenching* menggunakan CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C.
5. Selanjutnya benda uji yang telah mengalami *quenching* dimasukkan kembali ke dalam tungku untuk proses *Tempering* pertama pada temperatur 650°C dengan *holding time* 60 menit, kemudian dilakukan proses *quenching* menggunakan CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C.
6. Setelah mengalami proses *Tempering* pertama maka proses berikutnya adalah melakukan kembali proses *hardening* kedua pada temperatur 800°C dengan *holding time* 60 menit, kemudian dilakukan proses *quenching* menggunakan CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C.
7. Kemudian proses yang terakhir adalah melakukan proses *Tempering* kedua pada temperatur 650°C dengan *holding time* 60 menit, kemudian dilakukan proses *quenching* menggunakan CPO (*Crude Palm Oil*) dengan suhu cairan 70°C hingga benda uji mencapai suhu 100°C.
8. Proses perlakuan panas SQT dan DQT ini diharapkan dapat memperbaiki sifat mekanik yaitu kekerasan dan keuletan dari baja pegas daun (*leaf spring*).

3.8. Diagram Alir Penelitian





Gambar 44 Diagram Alir Penelitian

BAB V. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan tujuan dari penelitian ini, maka beberapa hal terkait masing-masing parameter perubahan struktur mikro terhadap kekuatan mekanik baja JIS SUP 9A yang dapat disimpulkan adalah sebagai berikut :

1. Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES) dari baja pegas daun (*leaf spring*) dalam kondisi bekas yang dilakukan di PT ITOKOH CEPERINDO hasil kandungan kimianya dapat diperbandingkan dengan standar Jepang JIS G 4801 *Spring Steels*, 1984 yaitu, C 0,5597% = 0,56-0,64; Si 0,3540% = 0,15-0,35; Mn 0,9111% = 0,70-1,00; P 0,0155% = max 0,030; S 0,0179% = max 0,030 dan Cr 0,9207% = 0,70-1,00. Baja pegas dalam penelitian ini masuk dalam kelompok baja JIS, maka dapat disimpulkan bahwa baja pegas daun truk bekas mempunyai kandungan yang mirip dengan baja JIS SUP 9A.
2. Perhitungan pengujian tarik benda uji perlakuan panas menunjukkan perubahan kekuatan dan ketangguhan sebagai berikut: Nilai tegangan tarik maksimal benda uji FA adalah 712,132 Mpa dengan regangan 12,167%, Benda uji Q₁T₁ meningkat 16,32% menjadi 828,321 Mpa dengan regangan 13,25%, dan Benda uji Q₂T₂ meningkat 18,2% menjadi 841,722 Mpa dengan regangan 11,417% terhadap FA. Peningkatan nilai tegangan dan penurunan nilai regangan menunjukkan bahwa benda uji Q₂T₂ memiliki kekuatan dan ketangguhannya lebih baik daripada benda uji FA dan benda uji Q₁T₁.

3. Pengaruh perlakuan panas *quenching-tempering* menggunakan cairan CPO (*Crude Palm Oil*) yang memiliki nilai *Grossman Quench Severity Factor* (H) $20,47 \text{ m}^{-1}$ meningkatkan nilai kekerasan dari pegas daun sebagai berikut: Nilai kekerasan benda uji FA adalah 33,03 HRC, benda uji Q_1T_1 meningkat 30,40% menjadi 43,07 HRC, dan benda uji Q_2T_2 meningkat 33% menjadi 43,93 HRC. Hasil uji kekerasan ini, khususnya benda uji Q_2T_2 sesuai dengan standar SUP 9A yang ada pada JIS G 4801 - 1984. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan panas Q_2T_2 dapat menghilangkan tegangan sisa.
4. Benda uji perlakuan *Full Annealing* menjadi perlakuan awal dari benda uji lainnya, perbandingan harga impact Charpy V-notch nya adalah sebagai berikut: Harga impact (FA) adalah $0,154 \text{ Joule/mm}^2$, benda uji Q_1T_1 meningkat 714,29% menjadi $1,254 \text{ Joule/mm}^2$, dan benda uji Q_2T_2 meningkat 417,13% menjadi $0,878 \text{ Joule/mm}^2$. Baja pegas JIS SUP 9A kondisi bekas perlu dihilangkan tekanan internalnya dengan proses FA, dimana austenit karena laju pendinginan yang lambat berubah menjadi perlit kasar dan ferit. Sementara perlakuan panas Q_1T_1 dan Q_2T_2 telah mengoptimalkan kekuatan dan ketangguhan (duktilitas) dengan pembentukan ferit-martensit sehingga meningkat harga impactnya dibandingkan FA .
5. Observasi struktur mikro dilakukan pada bidang patahan uji impact dengan jarak 0 mm, 0,5 mm, 1 mm dan 5 mm dari takikan menunjukkan terdapat *initial cracking* dan *micro cracking* yang sangat jelas. Pada benda uji FA, retakan terjadi dibagian tengah ujung takikan sampai merembet secara horisontal mengarah ke titik pusat beban impact. Tampak fasa ferit dan perlit berwarna hitam yang lebih terang atau bergaris-garis dan berbintik-bintik putih. Kondisi yang berbeda pada benda uji Q_1T_1 dan Q_2T_2 retakan terjadi sejajar takikan sampai merembet mengarah ke titik pusat beban impact secara vertikal. Terbentuk *cleavage surface* dan fasa martensit menyerupai warna hitam dan menyebar secara merata yang semakin halus pada Q_2T_2 .

6. Hasil analisa *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) pada benda uji FA terdapat kandungan sebaran unsur tidak merata; Fe 97,55%, C 1,94% dan Mn 0,51%. Benda uji Q₁T₁ kandungan sebaran unsur lebih merata; Fe 97,00%, C 2,52% dan Mn 0,48%. Adapun kandungan dalam inklusi nukleusasinya berupa 7,1% Karbon, 4,9% Oksigen, 30,86% Sulfur, 29,07% Mangan, dan 5,03% Iron. Benda uji Q₂T₂ sebaran kandungannya semakin homogen; Fe 96,49%, C 2,90% dan Mn 0,61%. Adapun kandungan dalam inklusi nukleusasinya berupa 3,2% Karbon, 30,51% Oksigen, dan 66,29% Iron. Pada benda uji Q₁T₁ dan Q₂T₂ terdapat kandungan oksigen 4,9% dan 30,51% yang pada awalnya untuk pertama kali terbentuk adalah inklusi MnS (mangan sulfida), kemudian terbentuk inklusi oksida yang lebih kecil dan akhirnya menjadi karbida kecil yang keras berbentuk granular.
7. Analisa *X-ray Diffraction* (XRD) menggunakan sudut 2 theta (5°–80°) dengan panjang gelombang internal K α sebesar 2,5 Å dengan aplikasi *Expert High Score Plus*. Penembakan x-ray pada benda uji FA, Q₁T₁ dan Q₂T₂ dilakukan pada intensitas difraksi yang hampir sama yaitu sudut 2 theta 44-46 dan 64-66. Hasil pengamatan struktur kristal FA yang tampak adalah struktur kubik BCC dengan fasa iron alpha (Fe)/ferit. Sementara benda uji Q₁T₁ dan Q₂T₂ memiliki struktur kristal tetragonal BCT dengan fasa martensit (Fe₃C). Terdapat pergeseran atom-atom secara serentak pada jarak tempuh tidak lebih dari jarak antar atom (*lattice spacing*).
8. Observasi *Optic Microscope* (OM) dilakukan pada spesimen *heat-treated* dengan perbesaran 100x, 400x dan 1000x. Pada benda uji FA, Q₁T₁ dan Q₂T₂ ditemukan bentuk butir bulat, pipih dan memanjang area gelap pearlit area terang ferit yang cukup kasar dan titik hitam martensit, ukuran butir austenit tidak homogen antara 1,0-34,95 μm , masing-masing menjadi rata-rata 19,84 μm , 2,075 μm dan 1,227 μm yang semakin lebih halus dan merata. Ukuran butir < 1 μm terdistribusi merata pada daerah batas butir. Kekerasan menurun walaupun tidak secara signifikan dengan bertambahnya ukuran butir, selanjutnya dengan perlakuan panas Q₁T₁ dan Q₂T₂ kekerasan kembali meningkat dengan menghalusnya ukuran butir.

5.2. Saran

1. Hasil penelitian dengan metode *Single* dan *Double Quenching-Tempering* berbahan pegas daun truk bekas ini sudah dapat memberi kesimpulan dan menjadi salah satu alternatif pemanfaatan limbah industri dalam penanganan isu lingkungan secara nasional maupun global. Proses perlakuan panas yang sederhana dan ekonomis menjadi keunggulan utama metode ini.
2. Penelitian selanjutnya pada baja JIS SUP 9A dapat menggunakan pengujian *high cycle fatigue* dan *low cycle fatigue* yang dapat melihat sejauh mana tingkat ketangguhan dalam durasi tertentu dan keekonomisan rekayasa perlakuan panas ini pada pemakaian produk turunannya.
3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan silikon (Si) dari JIS SUP 9A cukup tinggi (0,3540% berat) yang menyebabkan karbida sulit terbentuk maka dibutuhkan pelapisan atau pencelupan aluminium agar dapat mengikat silikon sehingga *hardenability* baja bisa ditingkatkan.
4. Perlakuan panas metode induksi sangat mungkin dilakukan untuk mendapat keakurasian titik atau lokasi dan temperatur pemanasan. Akibat pemanasan induksi maka energi yang diperlukan lebih sedikit daripada pemanasan pada keseluruhan produk, waktu yang dibutuhkan lebih singkat dan mengurangi distorsi panas yang berlebihan.

DAFTAR PUSTAKA

- A.H Meysami, R. Ghasemzadeh, S.H. Seyedein and M.R. Aboutalebi, *An Investigation on the Microstructure and Mechanical Properties of Direct-Quenched and Tempered AISI 4140 Steel*. Mater. Des. 31 1570–1575 (2010).
- A.J. Clarke, R.P. Hjelm, K.D. Clarke, J. Van Den Bosch, P. Hosemann, M.K. Miller, D.H. Sherman, T.E. Clements, P. Zhao, *Examination of Carbon Redistribution in a Medium Carbon, High Silicon Steel after Quenching and Tempering Using Atom Probe Tomography and Small Angle Neutron Scattering*, Los Alamos National Laboratory (LANL), 2011.
- Ashby, Michael F.; David R. H. Jones (2013). *Engineering Materials 2*, with corrections (in English), Oxford: Pergamon Press. ISBN 0-08-032532-7.
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code, various editions. American Society of Mechanical Engineers, New York.
- ASTM E1131-08 2004 *Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry*.
- ASTM E23 2004 *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, West Conshohocken, United States.
- ASTM E2809-13 2004 *Standard Guide for Using Scanning Electron Microscopy/X-Ray Spectrometry in Forensic Paint Examinations*.
- ASTM E3-01 2004 *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*.
- ASTM E384 2004 *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, West Conshohocken, United States.

ASTM E8 2004 *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, West Conshohocken, United States.

B. Jiang, M. Wu, M. Zhang, F. Zhao, Z. Zhao dan Y. Liu, *Microstructural Characterization, Strengthening and Toughening Mechanisms of a Quenched and Tempered Steel: Effect of Heat Treatment Parameters*. Mater. Sci. Ind. A 707 306–314 (2017).

B. L. A. C.S. Roberts, and M. Cohen, "*The Mechanism and Kinetics of the First Stage of Tempering*," Trans. ASM, vol. 45, pp. 576-604, 1953.

B. Laxmi, S. Sharma, P.K. Jayashree, and A. Hegde J. *Quenchant Oil Viscosity and Tempering Temperature Effect on Mechanical Properties of 42CrMo4 Steel*. Mater. Res. Technol. 16 581–587 (2022).

B.P Bhardwaj 2014. *The complete book on production of automobile components & allied products NIIR Project Consultancy Services*. (New Delhi, India: NIIR Project Consultancy Services).

Bo Xu, Junwu Xia, et al. 2019 *Investigation on True Stress-Strain Curves of Flat and Corner Regions of Cold-Formed Section Using 3D Digital Image Correlation Method*, <https://doi.org/10.1155/2019/3138176>.

C. Ouchi, *Development of Steel Plates by Intensive Use of TMCP and Direct Quenching Processes*. ISIJ Int. 41 5428 (2001).

C. Zhang, Q. Wang, J. Ren, R. Li, M. Wang, F. Zhang dan Z. Yan, *Effect of Microstructure on the Strength of 25CrMo48V Martensitic Steel Tempered at Different Temperature and Time*. Mater Des. 36 220–226 (2012).

C.S. Lee and W.Y. Choo, *Effects of Austenite Conditioning and Hardenability on Mechanical Properties of B-Containing High Strength Steels*. ISIJ Int. 40 189 (2000).

Chaudari, Mayuri A., 2015, "*Design and Analysis of Leaf Spring of Tanker Trailer Suspension System*", Department of Mechanical Engg. S.S.V.P.S's B.S.Deore COE Dhule (MS), India.

D Gandy, *Carbon Steel Handbook*, EPRI Palo Alto. CA 2007. 1014670.

- D. A. Porter, K. E. Easterling, and M. Y. Sherif, *"Phase transformations in metals and alloys,"* 3rd ed. / David A. Porter, Kenneth E. Easterling, and Mohamed Y. Sherif. Ed Boca Raton, Fla. ; London: CRC, 2009.
- D. L. Williamson, R. G. Schupmann, J. P. Materkowski, and G. Krauss, *"Determination of small amounts of austenite and carbide in hardened medium carbon steels by Mössbauer spectroscopy,"* Metallurgical Transactions A, vol. 10, pp. 379- 382, 1979.
- Davis, H.E., Troxell, G.E., Wiskocil, C.T., 1955, *The Testing and Inspection of Engineering Materias*, McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
- E. G. Nisbett, *"Steel forgings : design, production, selection, testing, and application,"* ed West Conshohocken, PA: ASTM International, 2005.
- Ellis, C., *"Analytical Constants of Hydrogenated Oils,"* J. Ind. Eng. Chem., Vol. 6, No. 2, 1914, pp. 117–122.
- Encyclopedia Britannica. *"Bessemer process"*. Britannica 2. (2005). 168. Retrieved on 2005-08-06.
- F. Zhao, Hao Hu, X. Liu, Z. Zhang, J. Xie, *Effect of billet microstructure and deformation on austenite grain growth in forging heating of a medium carbon microalloyed steel*, Journal of Alloys and Compounds, 2021.
- F.L. Lian, H.J. Liu, J.J. Sun, X.J. Sun, S.W. Guo, Y.N. Liu, L.X. Du, *Ultrafine Grain Effect on Pearlitic Transformation in Hypereutectoid Steel*, J. Mater. Res. 28 (5) (2013) 757–765.
- Fernandes, F. B. M., Denis, S., and Simon, A., *Mathematical model coupling phase transformation and temperature evolution during quenching of steels*, Materials Science and Technology 10, 838–844, 1985
- Fernandes, P., & Prabhu, K. N. (2008). *Comparative study of heat transfer and wetting behaviour of conventional and bioquenchant for industrial heat treatment*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 51(3-4), 526-538.
- Fernandes. 2007. *Effect of substrate surface roughness on wetting behaviour of vegetable oils*. Journal of National Institute of Technology Karnataka. India

- G. E. Totten, "*Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies*," in *Steel Heat Treatment Handbook*, Second Edition ed, 2006.
- Ghozali, I. (2016) *Aplikasi Analisis Multivariete Dengan Program IBM SPSS 23*. Edisi 8. Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro.
- G. K. George Roberts, Richard Kennedy, "*Tool steels*," 5th ed. Materials Park, OH: ASM International, 1998, p. 101.
- G. Krauss, "*Steels : heat treatment and processing principles*," ed Materials Park, Ohio: ASM International, 1990.
- G. M. B. T Arai, "*Heat Treating*," in *ASM Handbook*. vol. 4, ed: ASM International, 1991, p. 128.
- G. Ramesh, K. Narayan, Prabhu, *Wetting kinetics, kinematics and heat transfer characteristics of pongamia pinnata vegetable oil for industrial heat treatment*, *Applied Thermal Engineering* (65), Issues 1–2, (2014), 433-446.
- G. Thomas, "*Retained austenite and tempered martensite embrittlement*," *Metallurgical Transactions A*, vol. 9, pp. 439-450, 1978.
- George E Dieter, *Mechanical Metallurgy*, SI Metric edition, McGraw-Hill publication, 1987.
- H. Chandler, "*Heat treater's guide : practices and procedures for irons and steels*," 2nd ed. ed Materials Park, Ohio: ASM International, 1995.
- H. Chandra, D.K. Pratiwi and M. Zahir. *High temperature quality of accelerated spheroidization on SUP9 leaf spring to enhance machinability*. *Heliyon* 4 1–10 (2018).
- H. E. Boyer, "*Practical heat treating*," ed Metals Park, OH: American Society for Metals, 1984.
- H. K. D. H. Bhadeshia and R. W. K. Honeycombe, "*Steels : microstructure and properties*," 3rd ed. ed Amsterdam ; London: Butterworth-Heinemann, 2006.

- Halimi, A. D. (2017). *Uji eksperimen tingkat kekerasan dan ketangguhan baja pegas jis sup 9 dengan metode laku panas hardening dan tempering*. Jurnal Teknik Mesin, 5(03).
- Hasibuan, H. A. (2012). *The study of quality and characteristic on Indonesian palm oil and its fractionation products*. J. Standadisasi, 14(1), 13-21.
- Hrisoulas, Jim. 1987. *The Complete Blacksmith: Forging Your Way to Perfection*. Colorado: Paladin Enterprises, Inc.
- J. D. Verhoeven, "Steel metallurgy for the non-metallurgist," ed Materials Park, Ohio: ASM International, 2007, p. 100.
- J. E. Bringas, *Handbook of Comparative World Steel Standards*, 2nd Edition. ASTM DS67A. ASTM International, West Conshohocken, PA: 2002.
- J. H. Hollomon, and Jaffe, L. D. , "Time-Temperature Relations In Tempering Steel," Trans. AIME, vol. 162, pp. 223-249 1945.
- J. Liu, H. Yu, T. Zhou, C. Song and K. Zhang, *Effect of Double Quenching and Tempering Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of a Novel 5Cr Steel Processed by Electro-Slag Casting*. Mater. Sci. Ind. A 619 212–220 (2014).
- J. Sun, T. Jiang, Y. Wang, S. Guo, Y. Liu, *Effect of Grain Refinement on High-Carbon Martensite Transformation and its Mechanical Properties*, Mater. Sci. Eng. 726 (2018) 342–349.
- J. Sun, Y. Liu, Y. Zhu, F. Lian, H. Liu, T. Jiang, S. Guo, W. Liu, X. Ren, *Super-Strong Dislocation-Structured High-Carbon Martensite Steel*, Sci. Rep. 7 (1) (2017) 6596.
- J. Zhu, Zh. Zhang dan J.Xie, *The Martensitic Crystallography and Strengthening Mechanisms of Ultra-High Strength Rare Earth H13 Steel*. Mater. Sci. Ind. A 752 101–114 (2019).
- J.Y. Yoo, W.Y. Choo, W.T. Park and Y.W. Kim, *Microstructures and Age Hardening Characteristics of Direct Ouenched Cu Bearing HSLA Steel*. ISIJ Int. 35 1034–40 (1995).

- JIS (1984) *JIS G 4801 Spring Steels*, Japanese Standard Association, 1596-1597.
- K. H. Prabhudev, "*Hand book of Heat Treatment of Steels*," T. M.-H. Education, Ed., ed, 1988.
- K. O. Lee, S. K. Hong, Y. K. Kang, H. J. Yoon, and S. S. Kang, "*Grain refinement in bearing steels using a double-quenching heat-treatment process*," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 10, pp. 697-702, 2009/12/01 2009.
- K.-E. Thelning, "*Steel and its heat treatment*," 2nd ed London ; Boston: Butterworths, 1984.
- K.L. Meena, Dr. A. Manna, et al.. *An Analysis of Mechanical Properties of the Developed Al/SiCMMC's*. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2013; 1(1):14-19. doi: 10.12691/AJME-1-1-3.
- L. Xu, L. Chen dan W. Sun, *Effects of Soaking and Tempering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of 65Si2MnWE Spring Steel*. *Vakum* 154 322–332 (2018).
- Liscic, B., Tensi, H. M., Canale, L. C., & Totten, G. E. (Eds.). (2010). *Quenching theory and technology*. CRC Press.
- Liscic, B., Tensi, H. M., Totten, G. E., and Webster, G. M., "*Non-Lubricating Process Fluids: Steel Quenching Technology*," *Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance and Testing*, G. E. Totten, S. R. Westbrook, R. J. Shah, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, pp. 587–634.
- M. Badaruddin and R. P. Pratama, "Effect of Single and Double Quenching-Tempering Heat Treatments on Microstructures and Tensile Strength of AISI 4140 in Annealing Condition", 2022.
- M. Sarikaya, A. K. Jhingan, and G. Thomas, "*Retained austenite and tempered martensite embrittlement in medium carbon steels*," *Metallurgical Transactions A*, vol. 14, pp. 1121-1133, 1983.
- M.H.K. Sanij, S.S.G. Banadkouki, A.R. Mashreghi and M. Moshrefifar, *The Effect of Single and Double Quenching and Tempering Heat Treatments*

on the Microstructure and Mechanical Properties of AISI 4140 Steel. Mater. Des. 42 339–346 (2012).

Marsh, E. C. J. and Mills, E., “*Oil Quenching of Steel – An Analysis of the Properties of Various Oils Showing Their Relative Stability,*” *Aircr. Eng.*, Vol. 4, No. 10, 1932, pp. 260–269.

Metals and Alloys in the Unified Numbering System. SAE HS-1086/ASTM DS-56, various editions. SAE International, Warrendale, PA and ASTM International, Conshohocken, PA.

N.A. Razik, N. A. and Momen, M. A., “*Effect of Quenching Media on the Mechanical and Structural Properties of a Saudi Steel,*” *Arab Gulf J. Res. Math. Phys. Sci.*, Vol. A5, No. 2, 1987, pp. 259–269.

Oliveira, F. L. G., Andrade, M. S. and Cota, A. B. *Kinetics of Austenite Formation During Continuous Heating in a Low Carbon Steel.* Mater. Char., 2007, 58, 256-261.

P.M. Unterweiser, H.E. Boyer and J.J. Kubbs (ed) 1993 *Heat Treater’s Guide: Standard Practices and Procedures for Steel.* (9639 Kinsman Road Materials Park, OH 44073-0002: Heat Treating Society (HTS)ASM International) 402

R. E. Haimbaugh, “*Practical induction heat treating,*” ed Materials Park, OH: ASM International, 2001.

Rahardja, I. B., Prumanto, D., & Muchayar, A. I. R. *Hardening Of Iron St 37 With Various Heat Treatments Using Cooling Crude Palm Oil (CPO).* Int. Journal of Scientific & Technology Research, Vol 8, 2019 ISSN 227-8616.

Razik, N. A. (1987). NA and Momen, MA, “*Effect of Quenching Media on the Mechanical and Structural Properties of a Saudi Steel,*” *Arab Gulf J. Res. Math. Phys. Sci.*, 5(2), 259-269.

R. Padmanabhan and W. E. Wood, “*Microstructural analysis of a multistage heat-treated ultrahigh strength low alloy steel,*” *Mater. Sci. Eng.*, vol. 66, no. 2, pp. 125–143, 1984, doi: 10.1016/0025-5416(84)90175-7.

S. Ketaren; 1986, *Pengantar Teknologi Minyak dan Lemak Pangan*, Universitas Negeri Malang.

- S. Lee, C. Lee and Y. Cho Mater. *Effect on aqua quenching of spring steel (JIS SUP 9)*. Sci. Forum 566 249–54 (2008).
- S. Lee, D. Y. Lee, and R. J. Asaro, "Correlation of microstructure and tempered martensite embrittlement in two 4340 steels," Metallurgical Transactions A, vol. 20, pp. 1089-1103, 1989.
- S.H. Lee and D.S. Shim J. *Effect of Shot Peening on Fatigue Life of Heat Treated Spring Steel*. of the Korean Society for Heat Treatment 17 336 (2004).
- Schey, John A. 2000. *Introduction to Manufacturing Processes*. Singapura: Mc Graw Hill.
- Senthil Murugan S, et al. *Mechanical Properties of SiC, Al₂O₃ Reinforced Aluminium 6061-T6 Hybrid Matrix Composite*, 1J. Inst. Eng. India Ser. D (2018) 99:71-77, DOI 10.1007/s40033-017-0142-3.
- Senthil Murugan S, Jegan V, *Development of Hybrid Composite for Automobile Application and its Structural Stability Analysis Using ANSYS*, International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering (IJMSME) Volume 3, Issue 1, 2017, PP 23-34 ISSN 2454-9711 (Online) DOI: <http://dx.doi.org/10.20431/2454-9711.0301004>.
- Simencio-Otero, R., Canale, L., & Totten, G. (2012). *Use of Vegetable Oils and Animal Oils as Steel Quenchants: A Historical Review—1850-2010*. In Testing and Use of Environmentally Acceptable Lubricants. ASTM International.
- Smith, G. J., "Next Generation Feedstocks from New Frontiers in Oilseed Engineering," Proceedings of WTC2005 World Tribology Congress III, Washington, D.C., Sept 12-16, 2005, Paper Number WTC 2005-63523.
- SSAB (2014), "Hardox Wear Plate", SSAB Company, Sweden
- Surdia, Tata dan Saito, Shinroku. 1995. *Knowledge of Engineering Materials*. Pradiya Paramita. Cetakan ketiga. Jakarta.
- Subiyanto, I. H. *Analisa Rekondisi Baja Pegas Daun Bekas Sup 9a Dengan Metode Quench-Temper Pada Temperatur Tempering 460°C Terhadap Kekerasan Dan Kekuatan Tarik*. ITS Surabaya (2017)

- Taufik, M., & Seftiono, H. (2018). *Karakteristik Fisik dan Kimia Minyak Goreng Sawit Hasil Proses Penggorengan dengan Metode Deep-Fat Frying*. Jurnal Teknologi, Vol. 10 No. 2, 123-130.
- Totten, G. E. (ed.). *Steel Heat Treatment Handbook*, Chapter 6 - Steel Heat Treatment. ASM International, 2006.
- Totten, G. E., Bates, C. E., and Clinton, N. A., "*Quenching Oils*," Handbook of Quenchants and Quenching Technology, ASM International, Materials Park, OH, 1993.
- V.K. Arora, G. Bhushan and M.L. Aggarwal, *Fatigue life assessment of 65Si7 leaf springs: a comparative study*. International Scholarly Research Notices Article ID 1–11 607272 (2014).
- W. (Bill) Wei, *Teaching the Concepts of the Mechanical Properties of Materials in Conservation*, 2014 <https://doi.org/10.4000/ceroart.4215>.
- W. D. Callister, Jr. / Rethwisch, David G., "*Materials science and engineering: an introduction*," 8th ed: John Wiley & Sons, 2010.
- W.F. Gale and T.C. Totemeier, *Smithells Metals Reference Book*, 2004.
- Wang, Y., Sun, J., Jiang, T., Yang, C., Tan, Q., Guo, S., & Liu, Y. (2019). *Super strength of 65Mn spring steel obtained by appropriate quenching and tempering in an ultrafine grain condition*. Materials Science and Engineering: A, 754, 1-8.
- Was'i, I. A. (2021). "*Analisa Kekerasan Baja Aisi 4130 Dengan Metode Pack Carburizing Menggunakan Media Quenching Minyak Kotor Sawit (Miko) Cruide Palm Oil (Cpo) Palm Kernel Oil (Pko)*". Machinery: Jurnal Teknologi Terapan, 2(3), 133-140.
- Xu, L., Chen, L., & Sun, W. (2018). *Effects of soaking and tempering temperature on microstructure and mechanical properties of 65Si2MnWE spring steel*. Vacuum, 154, 322-332.
- Y. Wang, J. Sun, T. Jiang, Y. Sun, S. Guo, Y. Liu, *A Low-Alloy High-Carbon Martensite Steel with 2.6 GPa Tensile Strength and Good Ductility*, Acta Mater. 158 (2018) 247–256.

- Y. Weng, *Ultra-fine grained steels*. Springer, 2009. [Online]. Available: <https://lib-63vsc6hn5osfsnoz7ztrb6uv.1lib.ph/book/594682/c9d994>
- Y. Xiao, W. Li, H. S. Zhao, X. W. Lu, X. J. Jin, *Investigation of carbon segregation during low temperature tempering in a medium carbon steel*, *Materials Characterization* 117 (2016) 84-90.
- Yamada, Yosiro. 2007. *Material for Spring*. New York.