

**EFEK PROSES *QUENCHING* DAN *PARTITIONING*
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR
MIKRO PADA BAJA HSLA**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

Dwi Rahayu
3334200073

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON - BANTEN
2025**

LEMBAR PENGESAHAN

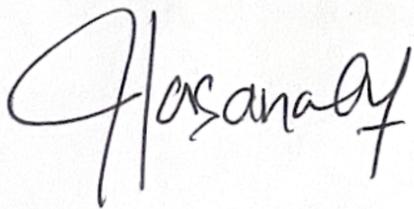
**EFEK PROSES *QUENCHING* DAN *PARTITIONING*
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR
MIKRO PADA BAJA HSLA**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.
NIP. 199012142019032022

Pembimbing II



Prof. Dr.Eng Ir. A. Ali Alhamidi, S.T., M.T.
NIP. 197312131999031001

LEMBAR PERSETUJUAN

**EFEK PROSES *QUENCHING* DAN *PARTITIONING*
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR
MIKRO PADA BAJA HSLA**

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh:

Dwi Rahayu

3334200073

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal

5 Mei 2025

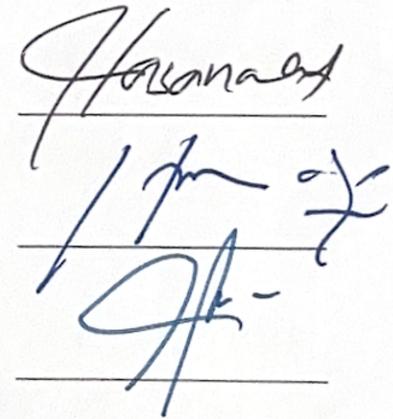
Susunan Dewan Penguji

Tanda Tangan

Penguji I : Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.

Penguji II : Prof. Dr.Eng Ir. A. Ali Alhamidi, S.T., M.T.

Penguji III : Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.



Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 198003072005011002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis skripsi berikut:

Judul : Efek Proses *Quenching* dan *Partitioning* terhadap Sifat
Mekanik dan Struktur Mikro pada Baja HSLA

Nama Mahasiswa : Dwi Rahayu

NIM : 3334200073

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukakarya saya, maka saya bersedia dituntut hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 14 Februari 2025



Dwi Rahayu
NIM. 3334200073

ABSTRAK

Baja AISI 4140 menjadi salah satu jenis baja HSLA yang banyak diaplikasikan dalam industri otomotif sebagai bahan baku pembuatan poros penggerak (*propeller shaft*). Kualitas baja AISI 4140 ditentukan oleh sifat mekaniknya yaitu harus memiliki kekerasan, kekuatan, dan ketangguhan yang baik sehingga meminimalisir kegagalan serta menunjang umur pakai dari poros penggerak tersebut. Guna meningkatkan sifat mekanik tersebut dapat direkayasa melalui proses perlakuan panas salah satunya adalah proses *quenching* dan *partitioning* yang bertujuan untuk mengontrol austenit sisa yang dihasilkan pada baja. Proses *quenching* dan *partitioning* dimulai dengan proses austenisasi pada temperatur 950°C lalu dilakukan *initial quenching* menggunakan oli selama 5 detik mencapai 200°C. Selanjutnya, dilakukan proses *partitioning* dengan memvariasikan temperatur yaitu 250°C, 325°C, dan 400°C serta waktu tahan selama 5, 10, dan 15 menit. Kemudian, dilakukan *final quenching* menggunakan air mencapai temperatur ruang. Sampel baja AISI 4140 hasil dari proses *quenching* dan *partitioning* dilakukan pengujian meliputi uji kekerasan, uji impak, dan pengamatan struktur mikro untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada struktur mikro dan sifat mekaniknya. Berdasarkan penelitian yang dilakukan menghasilkan bahwa semakin tinggi temperatur *partitioning* maka nilai kekerasan dan ketangguhan semakin meningkat. Lalu, semakin lama waktu *partitioning* maka nilai kekerasan menurun sedangkan nilai ketangguhan meningkat. Nilai kekerasan tertinggi sebesar 108,34 RHN pada temperatur *partitioning* 400°C selama 5 menit serta harga impak tertinggi sebesar 0,952 J/mm² pada temperatur *partitioning* 325°C selama 15 menit. Dengan demikian, hubungan antara kekerasan dan ketangguhan berbanding terbalik yaitu semakin tinggi kekerasan maka ketangguhan yang dihasilkan semakin rendah. Adapun struktur mikro sampel baja AISI 4140 pada kondisi tanpa proses *quenching* dan *partitioning* mengandung fasa ferit dan perlit mengalami perubahan setelah melewati proses *quenching* dan *partitioning* menghasilkan fasa akhir yang terdiri dari austenit sisa dan martensit.

Kata Kunci : Baja AISI 4140, Proses *Quenching* dan *Partitioning*, Kekerasan, Ketangguhan, Austenit sisa.

ABSTRACT

AISI 4140 steel is one type of HSLA steel that is widely applied in the automotive industry as a raw material for making propeller shafts. The quality of AISI 4140 steel is determined by its mechanical properties, namely it must have good hardness, strength, and toughness so as to minimize failure and support the service life of the propeller shaft. In order to improve these mechanical properties, it can be engineered through a heat treatment process, one of which is the quenching and partitioning process which aims to control the residual austenite produced in the steel. The quenching and partitioning process begins with the austenitization process at a temperature of 950°C then initial quenching is carried out using oil for 5 seconds reaching 200°C. Furthermore, the partitioning process is carried out by varying the temperature, namely 250°C, 325°C, and 400°C and holding times for 5, 10, and 15 minutes. Then, final quenching is carried out using water to reach room temperature. AISI 4140 steel samples resulting from the quenching and partitioning process were tested including hardness tests, impact tests, and microstructure observations to determine changes that occur in the microstructure and mechanical properties. Based on the research conducted, it was found that the higher the partitioning temperature, the higher the hardness and toughness values. Then, the longer the partitioning time, the lower the hardness value while the toughness value increases. The highest hardness value was 108.34 RHN at a partitioning temperature of 400°C for 5 minutes and the highest impact value was 0.952 J/mm² at a partitioning temperature of 325°C for 15 minutes. Thus, the relationship between hardness and toughness is inversely proportional, namely the higher the hardness, the lower the resulting toughness. The microstructure of the AISI 4140 steel sample in conditions without quenching and partitioning processes containing ferrite and pearlite phases underwent changes after going through the quenching and partitioning process resulting in a final phase consisting of residual austenite and martensite.

Keywords: AISI 4140 Steel, Quenching and Partitioning Process, Hardness, Toughness, Retained Austenite.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan penulisan skripsi dengan judul “**Efek Proses *Quenching* dan *Partitioning* terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro pada Baja HSLA**” dengan sebaik-baiknya. Laporan skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat mengerjakan tugas akhir pada program S1 di Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Selesaiannya proposal skripsi ini tidak lepas dari bantuan beberapa pihak, sehingga penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi FT. UNTIRTA.
2. Ibu Andinnie Juniarsih, S.T., M.T. selaku Koordinator skripsi jurusan Teknik Metalurgi FT. UNTIRTA.
3. Ibu Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T. selaku pembimbing I dan Bapak Prof. Dr.Eng Ir. A. Ali Alhamidi, S.T., M.T. selaku pembimbing II yang telah membimbing dengan memberikan masukan, kritik, dan motivasi membangun yang berguna bagi penulis dalam penyusunan laporan skripsi ini.
4. Keluarga terutama kedua orang tua penulis, yaitu Bapak Sugianto dan Ibu Darmiati yang selalu memberikan dukungan baik moral maupun moril kepada penulis dalam penyusunan laporan skripsi ini.
5. Auffa Naznabila selaku rekan penelitian yang telah banyak membantu penulis selama penelitian hingga penyusunan laporan skripsi ini.
6. Abrianti Luthvia, Endah Sukma Cahyani, Miftahul Jannah Ardani, Relsa Usva Munggaran, Rizal Amin, dan Afika Apriliana yang merupakan teman-teman penulis yang selalu memberikan semangat dan membantu penulis.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan laporan skripsi ini, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Harapan penulis semoga laporan skripsi ini dapat berguna sebagai

acuan penelitian bagi penulis dan bermanfaat bagi rekan-rekan mahasiswa maupun pihak-pihak lain yang memerlukannya sebagai bahan kajian dan studi maupun sumber referensi. Atas perhatiannya, penulis ucapkan terimakasih.

Cilegon, 14 Februari 2025

Dwi Rahayu

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Baja High Strength <i>Low Alloy</i>	7
2.2 Baja AISI 4140	8
2.3 Perlakuan Panas	9
2.4 Proses <i>Quenching</i> dan <i>Partitioning</i>	13
2.5 Pengaruh Unsur Paduan Pada Baja	20
BAB III METODE PENELITIAN	24
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	24
3.2 Alat dan Bahan	25
3.3 Prosedur Penelitian	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Karakteristik Awal Material	31
4.2 Hasil Analisa Pengamatan Struktur Mikro	33

4.3 Hasil Analisa Pengujian Kekerasan.....	40
4.4 Hasil Analisa Pengujian Ketangguhan	45
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	56
5.1 Kesimpulan.....	56
5.2 Saran	57
DAFTAR PUSTAKA	58
LAMPIRAN A CONTOH PERHITUNGAN	62
LAMPIRAN B DATA PENELITIAN.....	67
LAMPIRAN C GAMBAR ALAT DAN BAHAN	72

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Sifat Mekanik dan Aplikasi berbagai jenis Baja HSLA	8
Tabel 2.2 Komposisi Kimia Baja AISI 4140	9
Tabel 4.1 Komposisi Kimia Baja AISI 4140 <i>as received</i>	31
Tabel 4.2 <i>Mechanical Properties</i> Baja AISI 4140 <i>as received</i>	32
Tabel 4.3 Struktur Mikro Baja AISI 4140 setelah Proses <i>Quenching</i> dan <i>partitioning</i>	34
Tabel 4.4 Data Volume Fraksi Austenite Sisa	39
Tabel 4.5 Data Ukuran Butir Baja AISI 4140	40
Tabel 4.6 Data Hasil Pengujian Kekerasan Sampel Baja AISI 4140	41
Tabel 4.7 Data Hasil Pengujian Impak Sampel Baja AISI 4140	46
Tabel B.1 Data Ukuran Butir Struktur Mikro Baja 4140	70

DAFTAR GAMBAR

Gambar		Halaman
Gambar 2.1	Struktur Mikro Baja AISI 4140 tanpa Perlakuan Panas	8
Gambar 2.2	Diagram Kesetimbangan Fe-Fe ₃ C	10
Gambar 2.3	Diagram TTT Baja AISI 4140	11
Gambar 2.4	Diagram CCT Baja AISI 4140	12
Gambar 2.5	Skema pada Proses <i>Quenching</i> dan <i>Partitioning</i>	14
Gambar 2.6	Pengaruh Temperatur <i>Partitioning</i> terhadap Kekerasan Baja WRM KS1045	15
Gambar 2.7	Struktur Mikro Baja WRM KS1045.....	16
Gambar 2.8	Pengaruh Waktu <i>Partitioning</i> pada Kekerasan Baja AISI 4340	16
Gambar 2.9	Struktur Mikro Baja AISI 4340 pada berbagai Variasi Waktu <i>Partitioning</i>	17
Gambar 2.10	Pengaruh Temperatur <i>Quenching</i> , Temperatur dan Waktu <i>Partitioning</i> terhadap Ketangguhan	18
Gambar 2.11	Pengaruh Temperatur <i>Quenching</i> , Temperatur dan Waktu <i>Partitioning</i> terhadap Kekerasan	19
Gambar 2.12	Pengaruh Unsur Paduan terhadap Kekerasan Baja	22
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	24
Gambar 3.2	Dimensi Ukuran Sampel yang digunakan	27
Gambar 3.3	Skema Proses <i>Quenching</i> dan <i>Partitioning</i>	27
Gambar 3.4	Titik Identasi pada Sampel	29
Gambar 4.1	Struktur Mikro Sampel Baja AISI 4140 <i>as received</i>	32
Gambar 4.2	Struktur Mikro Sampel Baja AISI 4140 QP325-5	36

Gambar 4.3	Struktur Mikro Sampel Baja AISI 4140 QP250-15	37
Gambar 4.4	Pengaruh Temperatur dan Waktu <i>Partitioning</i> terhadap Nilai Kekerasan Sampel Baja AISI 4140	43
Gambar 4.5	Struktur Mikro Baja AISI 4140 (a) QP400-5, (b) QP400-10, dan (c) QP400-15	45
Gambar 4.6	Pengaruh Temperatur dan Waktu <i>Partitioning</i> terhadap Harga Impak Sampel Baja AISI 4140	47
Gambar 4.7	Struktur Mikro Baja AISI 4140 (a) QP250-15, (b) QP325-15, dan (c) QP400-15	50
Gambar 4.8	Perpatahan pada setiap Sampel Baja AISI 4140 (a) <i>as received</i> , (b) QP250-5, (c) QP250-10, (d) QP250-15, (e) QP325-5, (f) QP325-10, (g) QP325-15, (h) QP400-5, (i) QP400-10, (j) QP400-15	52
Gambar 4.9	Permukaan Perpatahan Sampel Baja AISI 4140 (a) <i>as received</i> , (b) QP250-5, (c) QP250-10, (d) QP250-15, (e) QP325-5, (f) QP325-10, (g) QP325-15, (h) QP400-5, (i) QP400-10, (j) QP400-15	55
Gambar B.1	Sertifikat Baja AISI 4140	68
Gambar B.2	Data Hasil Pengujian Impak	69
Gambar B.3	Ukuran Butir <i>Software ImageJ</i>	70
Gambar C.1	Air	73
Gambar C.2	Alat Pelindung Diri	73
Gambar C.3	Alat Uji Impak	73
Gambar C.4	Alat Uji Kekerasan	73
Gambar C.5	Ampelas	73
Gambar C.6	Aquades	73
Gambar C.7	Baja AISI 4140	73
Gambar C.8	Ember	73
Gambar C.9	<i>Furnace</i>	74

Gambar C.10 <i>Nabertherm Furnace</i>	74
Gambar C.11 Gelas Beker	74
Gambar C.12 <i>Hair Dryer</i>	74
Gambar C.13 Krusibel	74
Gambar C.14 Larutan Asam Nitrat (HNO_3)	74
Gambar C.15 Mesin <i>Grinding</i> dan <i>Polishing</i>	74
Gambar C.16 <i>Metal Polish</i>	74
Gambar C.17 Mikroskop Optik	75
Gambar C.18 Oli	75
Gambar C.19 Oven	75
Gambar C.20 Tang Penjepit	75
Gambar C.21 <i>Thermogun</i>	75
Gambar C.22 <i>Wool Polish</i>	75
Gambar C.23 Resin	75
Gambar C.24 Katalis	75

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi dalam industri otomotif menjadi faktor yang mempengaruhi penggunaan material dengan sifat mekanik yang baik pada setiap bagian komponennya sehingga akan menunjang umur pakai dari komponen tersebut. Salah satu komponen utama sebagai penggerak mobil adalah poros penggerak atau *propeller shaft*. Poros penggerak bekerja dengan cara menyalurkan energi dari mesin induk sehingga roda mobil dapat berputar. Energi yang diterima oleh poros penggerak akan mengalami pengaruh gaya eksternal seperti beban tekan, tegangan, beban lentur, atau kombinasi dari gaya tersebut secara berlebihan dan berulang-ulang menyebabkan kegagalan atau deformasi bentuk pada poros sehingga mengurangi umur pakai dari poros penggerak [1]. Kegagalan tersebut akan mengganggu kinerja kendaraan dan membahayakan pengendara sehingga harus diminimalisir terjadinya kegagalan pada poros penggerak. Pada penggunaan aplikasi tersebut memerlukan baja dengan kombinasi sifat ketangguhan dan kekerasan tinggi. Selain itu, bobot komponen pun perlu diperhatikan karena pada industri otomotif penggunaan komponen terutama poros penggerak dengan bobot yang berat harus dihindarkan [2]. Dengan demikian, pemilihan material yang tepat menjadi faktor utama dalam memproduksi poros penggerak mobil karena dibutuhkan material dengan sifat mekanik yang unggul serta biaya produksi yang rendah harus dipertimbangkan.

Pada umumnya, kendaraan mobil dengan konfigurasi mesin depan dan penggerak roda belakang atau *Rear Wheel Drive* (RWD) menggunakan *propeller shaft* bermaterial baja S45C yang memiliki sifat mekanik berupa kekerasan sebesar 649 VHN dan ketangguhan sebesar 39 Joule. Kini, material dalam industri otomotif banyak menggunakan baja HSLA atau *High Strength Low Alloy* karena menawarkan sifat mekanik yang unggul berupa kekuatan, ketangguhan, ketahanan korosi, dan *weldability*. Sifat mekanik tersebut diperoleh dari unsur-unsur paduan dalam jumlah rendah seperti karbon, vanadium, mangan, dan titanium. Penggunaan unsur paduan yang rendah membuat baja HSLA membutuhkan biaya yang rendah dalam produksinya [3]. Salah satu jenis baja HSLA yang banyak penggunaannya dalam aplikasi struktural maupun otomotif yaitu baja AISI 4140. Pada umumnya baja AISI 4140 yang mendapatkan perlakuan panas menjadi material bahan baku pembuatan poros engkol (*crankshaft*), rangka pesawat, dan mur karena tanpa perlakuan panas pada baja AISI 4140 memiliki sifat ketangguhan yang rendah [4].

Dalam upaya untuk meningkatkan sifat mekanik yang sudah dimiliki oleh baja AISI 4140 dapat dilakukan suatu proses yaitu perlakuan panas atau *heat treatment*. Perlakuan panas merupakan suatu proses pengerjaan panas pada logam dengan kombinasi proses berupa pemanasan, penahanan temperatur, dan pendinginan bertujuan untuk mengubah struktur internal logam sehingga meningkatkan sifat mekanik. Terdapat salah satu proses perlakuan panas yang inovatif guna menurunkan bobot komponen mobil namun dapat memperbaiki sifat mekanik sehingga tingkat keamanan pengendara meningkat yaitu proses

quenching dan *partitioning*. Proses *quenching* dan *partitioning* merupakan proses perlakuan panas yang dilakukan dengan proses *quenching* diantara temperatur *martensite start* dan *martensite finish* kemudian diikuti proses *partitioning* sehingga diperoleh struktur mikro berupa martensit dan austenit sisa. Menurut penelitian, proses *quenching* dan *partitioning* pada baja dapat meningkatkan sifat mekaniknya. Penelitian tersebut telah dibuktikan oleh Zhou, W et al. pada tahun 2016 yang menggunakan material *low alloy* untuk meningkatkan sifat mekanik berupa ketangguhan, keuletan, dan kekerasannya dengan memvariasikan temperatur *quenching*, temperatur *partitioning*, dan waktu *partitioning* sehingga terjadi peningkatan sifat mekanik yang optimum yaitu nilai energi dampak sebesar 24 Joule pada temperatur *quenching* 200°C, temperatur *partitioning* 300°C, dan waktu *partitioning* 5 menit. Lalu, nilai kekuatan tarik optimum sebesar 1730 MPa pada temperatur *quenching* 150°C, temperatur *partitioning* 350°C, dan waktu *partitioning* 30 menit. Sedangkan, nilai kekerasan yang optimum sebesar 51,8 HRC pada temperatur *quenching* 100°C, temperatur *partitioning* 350°C, dan waktu *partitioning* 5 menit [5]. Dengan demikian, pada penelitian ini akan dilakukan proses *quenching* dan *partitioning* dengan tujuan untuk meningkatkan sifat mekanik berupa kombinasi sifat kekerasan dan ketangguhan pada baja AISI 4140.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah, maka dapat dirumuskan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi waktu *partitioning* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja AISI 4140?
2. Bagaimana pengaruh variasi temperatur *partitioning* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja AISI 4140?
3. Bagaimana pengaruh proses *quenching* dan *partitioning* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja AISI 4140?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini secara umum adalah untuk mengetahui proses *quenching* dan *partitioning* yang optimal pada baja AISI 4140, sedangkan tujuan penelitian ini secara khusus adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi waktu *partitioning* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja AISI 4140.
2. Menganalisis pengaruh variasi temperatur *partitioning* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja AISI 4140.
3. Menganalisis pengaruh proses *quenching* dan *partitioning* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja AISI 4140.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material digunakan adalah baja AISI 4140.
2. Proses perlakuan panas yang dilakukan adalah proses *quenching* dan *partitioning*.

3. Proses austenisasi dilakukan pada temperatur 950°C selama 1 jam
4. Proses *quenching* dilakukan mencapai temperatur 200°C dengan media pendingin yaitu oli selama 5 detik.
5. Proses *partitioning* digunakan dengan variabel bebas sebagai berikut:
 - a. Temperatur *partitioning* 250°C, 325°C, dan 400°C.
 - b. Waktu *partitioning* 5, 10, dan 15 menit.
6. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian kekerasan, pengujian dampak, dan pengamatan struktur mikro.
7. Penelitian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada penelitian ini terdiri dari lima bab. Bab I berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab II berisi tinjauan pustaka yang menjelaskan teori-teori dasar yang mendukung berlangsungnya penelitian ini dan sebagai acuan dalam analisa dan pembahasan pada hasil penelitian. Bab III berisi penjelasan mengenai metode penelitian yang terdiri dari diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, serta prosedur penelitian. Bab IV berisi hasil penelitian dan pembahasan berdasarkan data-data yang telah diperoleh serta analisis untuk mencapai tujuan yang diharapkan dari penelitian. Bab V berisi kesimpulan dan saran peneliti untuk penelitian selanjutnya. Laporan penelitian ini juga memuat daftar pustaka yang berisi literatur-literatur yang digunakan peneliti

sebagai dasar teori dan pendukung data-data hasil penelitian serta terdapat lampiran yang berisi contoh perhitungan, gambar alat dan bahan yang digunakan pada penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja High Strength Low Alloy

Baja *High Strength Low Alloy* atau yang biasa disebut baja HSLA merupakan baja yang termasuk kedalam golongan baja paduan rendah karena sedikit mengandung unsur paduan kurang dari 10% berupa penambahan unsur-unsur paduan seperti tembaga (Cu), niobium (Nb), titanium (Ti), vanadium (V), dan sebagainya dalam jumlah rendah untuk menghasilkan sifat mekanik yang unggul berupa ketangguhan, kekuatan, dan *weldability*. Peningkatan kekuatan baja HSLA dapat dilakukan dengan meningkatkan jumlah unsur paduan mikro melalui pengerasan presipitasi, penghalusan butiran, dan pengerasan larutan padat. Baja HSLA banyak diminati dalam berbagai industri karena tingginya rasio kekuatan terhadap beratnya dan tingginya keuletan dengan biaya produksi yang rendah. Adapun aplikasi baja HSLA dalam berbagai industri seperti untuk pipa perminyakan, otomotif, maupun konstruksi [3]. Sifat mekanik baja HSLA untuk kekuatan tarik dapat mencapai 450MPa dan keuletan mencapai 30% [6]. Produk baja HSLA tersedia dalam *grade hot* dan *cold rolled* dengan tipe yang spesifik berdasarkan kuat luluh. Ditinjau dari *grade* produk baja HSLA maka pengaplikasiannya pun terdapat perbedaan yaitu *hot rolled* HSLA biasanya digunakan untuk kebutuhan dengan mampu bentuk yang baik seperti aplikasi roda, dudukan mesin, dan komponen *suspense*. Sedangkan, pada *cold rolled* HSLA banyak digunakan untuk aplikasi yang tidak membutuhkan mampu bentuk

yang baik. Berikut ini disajikan sifat mekanik dari beberapa jenis baja HSLA dan aplikasinya yang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat Mekanik dan Aplikasi Berbagai Jenis Baja HSLA [7]

AISI/SAE atau ASTM	<i>Tensile Strength</i> [MPa (ksi)]	<i>Yield Strength</i> [MPa (ksi)]	<i>Ductility</i> [%EL di 50 mm]	Aplikasi
A440	435 (63)	290 (42)	21%	Struktur yang di baut
A633 Grade E	520 (95)	380 (55)	23%	Struktur di temperatur rendah
A656 Grade 1	655 (95)	552 (80)	15%	Gerbong kereta api

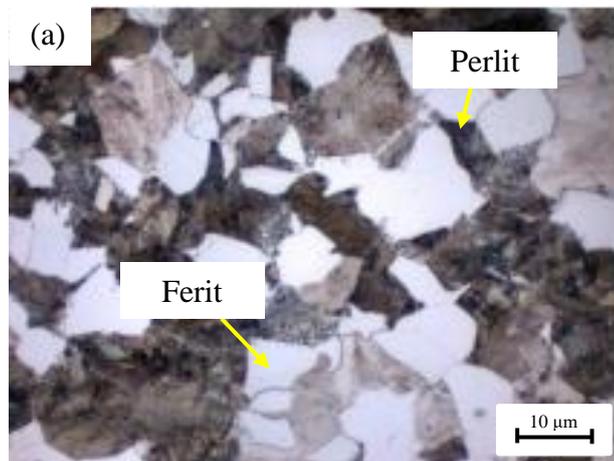
2.2 Baja AISI 4140

Baja AISI 4140 merupakan salah satu jenis baja HSLA yang seringkali digunakan dalam kondisi telah melalui perlakuan panas untuk berbagai aplikasi struktural, seperti roda pendaratan pesawat, poros engkol otomotif, rangka pesawat, mur, dan *roller* baja. Baja paduan ini kurang tangguh dalam keadaan tanpa perlakuan panas sebab strukturmikro yang terdiri dari fasa perlit dan ferit akan mempengaruhi sifat mekaniknya sehingga memiliki nilai kekerasan sebesar 235,16 HV dan nilai ketangguhan sebesar 8 Joules. Saat baja AISI 4140 diberi perlakuan panas seperti *quenching* dan *tempering* pada temperatur dan waktu tertentu akan meningkatkan sifat mekanik yaitu ketahanan abrasi, kelelahan yang tinggi, dan kekuatan yang tinggi namun tidak meningkatkan ketangguhannya. Kandungan karbon dalam paduan ini berkisar antara 0,28 sampai 0,43% sehingga digolongkan pada baja *hypotectoid* serta persentase karbon digunakan dalam

menentukan temperatur pada perlakuan panas [4]. Selain itu, unsur paduan lainnya seperti silikon (Si), molibdenum (Mo), dan kromium (Cr) juga terdapat dalam komposisi kimianya. Berikut ini merupakan komposisi kimia baja AISI 4140.

Tabel 2.2 Komposisi Kimia Baja AISI 4140 [4]

%wt	Ni	Cr	Mn	C	Mo	Si	Cu
AISI 4140	0,03	1,00	0,59	0,43	0,18	0,27	0,02



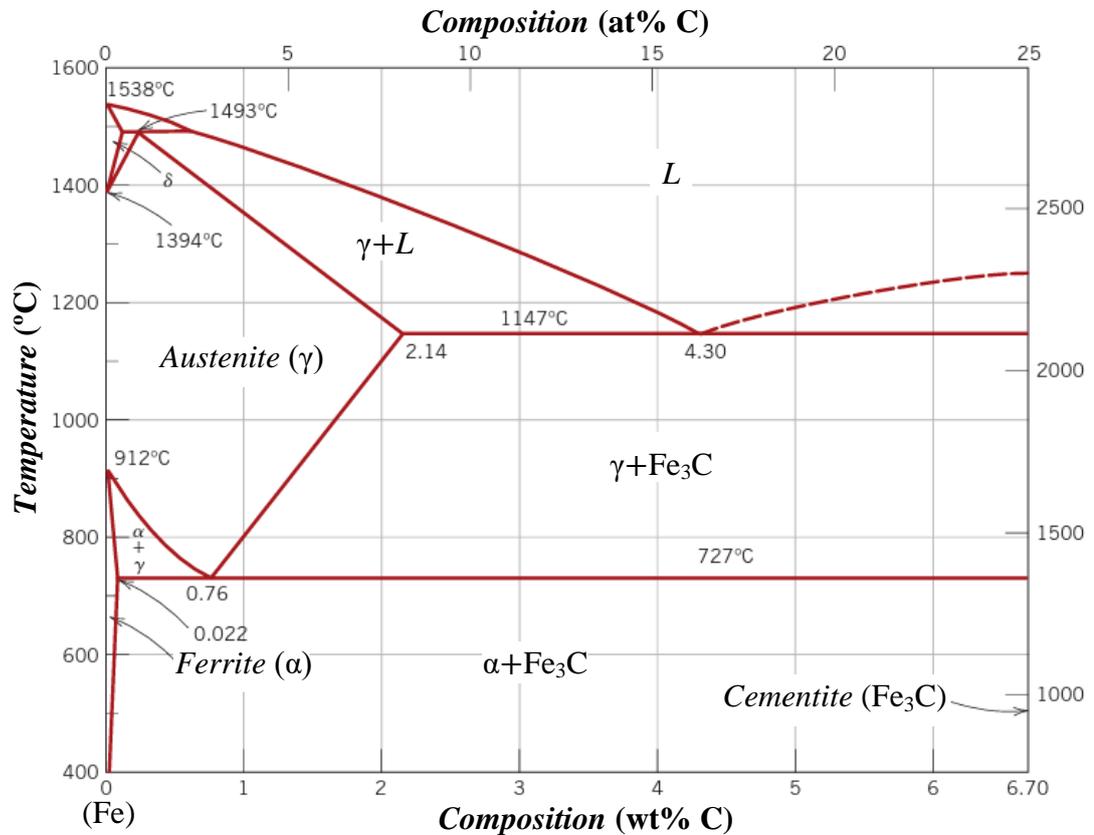
Gambar 2.1 Struktur Mikro Baja AISI 4140 tanpa Perlakuan Panas [8]

2.3 Perlakuan Panas

Perlakuan panas atau *heat treatment* merupakan suatu kombinasi perlakuan yang terdiri dari pemanasan, penahanan, dan pendinginan material dengan tujuan untuk mendapatkan sifat kimia maupun sifat fisik yang diinginkan. Pada umumnya, perlakuan panas akan merekayasa mikrostruktur sehingga sifat kimia dan sifat fisik yang diperoleh akan berbeda tergantung dari aspek struktural material tersebut. Aspek struktural pada material tersedia dalam berbagai jenis

skala besarannya seperti struktur atom, struktur kristal, struktur nano, struktur mikro, atau struktur makro. Perubahan aspek struktural akan terjadi selama perlakuan panas sehingga struktur kristal dan komposisi kimia mengalami perubahan yang berpengaruh pada sifat akhir yang diinginkan pada material. Terdapat beberapa sifat fisik akhir yang dihasilkan adalah meningkatkan kekerasan, kekuatan, ketangguhan, keuletan ketahanan korosi, dan ketahanan aus. Adapun tahapan pada perlakuan panas terdiri dari 3 tahapan yaitu memanaskan material hingga temperatur austenisasi sehingga diperoleh fasa yang homogen. Lalu, menahan di temperatur tinggi dengan durasi waktu yang dibutuhkan. Kemudian, mendinginkan material mencapai temperatur ruang. Beberapa metode perlakuan panas meliputi *annealing*, *quenching*, dan *tempering* [9].

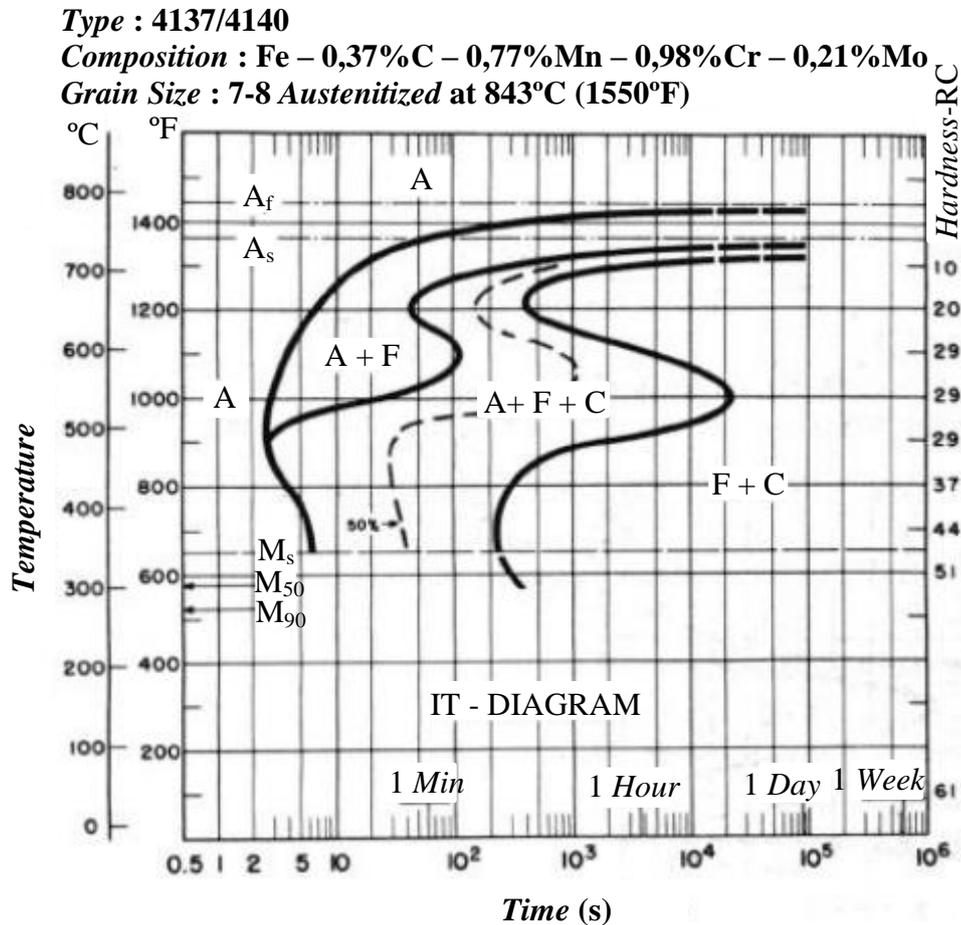
Pada baja karbon, komposisi unsur karbon akan menentukan temperatur pemanasan serta struktur mikro yang terbentuk. Hubungan antara kandungan karbon dengan temperatur dinyatakan dalam diagram kesetimbangan Fe-Fe₃C. Diagram kesetimbangan Fe-Fe₃C atau diagram fasa merupakan diagram untuk perlakuan panas bagi logam dan diagram fasa besi-karbon yang diberlakukan untuk baja. Diagram fasa menunjukkan hubungan antara komposisi karbon (wt%) pada sumbu Y dengan temperatur pada sumbu X terhadap struktur mikro yang terbentuk sehingga menentukan sifat-sifat mekanis suatu material. Terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan didalam diagram Fe-Fe₃C yaitu, perubahan fasa ferit (α), austenit (γ), sementit (Fe₃C), perlit, dan martensit [10].



Gambar 2.2 Diagram Kesetimbangan Fe-Fe₃C [7]

Dalam proses perlakuan panas, setelah baja dipanaskan hingga mencapai temperatur austenisasi, dilakukan pendinginan hingga mencapai temperatur ruangan menggunakan berbagai metode pendinginan. Metode pendinginan yang digunakan akan mengendalikan kecepatan waktu pendinginan baja yang menentukan hasil akhir struktur mikro pada baja serta sifat mekaniknya. Selama proses pendinginan, fasa baru akan terbentuk dengan sifat mekanik yang khas untuk masing-masing fasa tersebut. Untuk dapat menentukan fasa yang terbentuk dari proses pendinginan yang dilakukan maka dapat menggunakan suatu diagram transformasi yakni diagram transformasi waktu temperatur atau *time temperature*

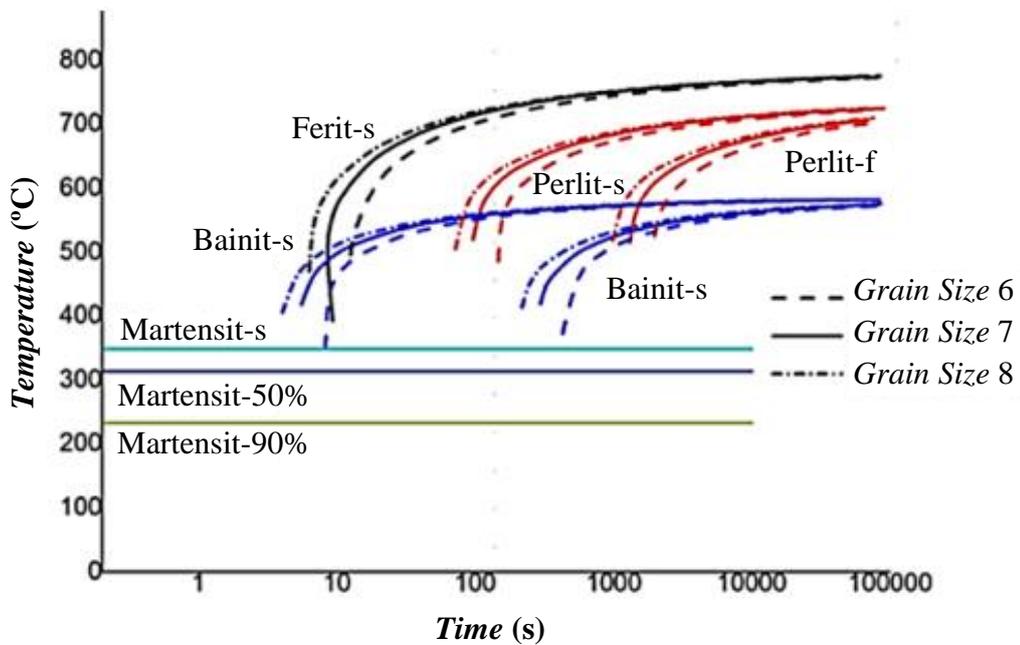
transformation (TTT) dan diagram transformasi pendinginan kontinyu atau *continuous cooling transformation* (CCT) [11].



Gambar 2.3 Diagram TTT Baja AISI 4140 [12]

Diagram TTT atau *time temperature transformation* adalah diagram transformasi yang memainkan peran penting dalam merancang proses perlakuan panas yang tepat pada baja dengan menggambarkan hubungan antara waktu penahanan, suhu, dan kuantitas transformasi fasa yang dapat dilihat pada gambar 2.3. Oleh karena itu, membuat prediksi diagram TTT baja baru dengan cepat dan akurat merupakan hal yang sangat penting secara praktis, terutama untuk

penentuan eksperimental yang mahal dan memakan waktu [13]. Sementara itu, diagram *continuous cooling transformation* atau CCT merupakan suatu diagram yang menunjukkan suatu hubungan antara temperatur dengan waktu yang digunakan selama pendinginan. Pada diagram CCT terdapat informasi transformasi fasa yang terbentuk ketika material awalnya mengalami austenisasi terus-menerus didinginkan pada laju pendinginan tertentu tertentu. Selain itu, struktur mikro akhir dan karakteristik mekanik dapat ditentukan [14]. Adapun diagram CCT pada baja AISI 4140 dapat dilihat pada gambar sebagai berikut.

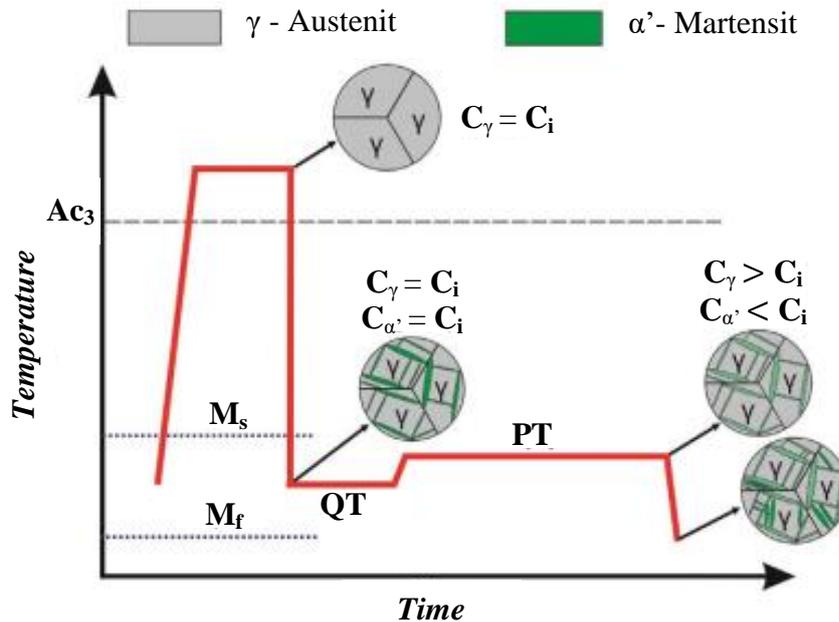


Gambar 2.4 Diagram CCT Baja AISI 4140 Berdasarkan *Grain Size* [12]

2.4 Proses *Quenching* dan *Partitioning*

Sifat mekanik material dengan kombinasi ketangguhan dan kekerasan yang baik menjadi tujuan utama material tersebut digunakan. Peningkatan kualitas sifat ketangguhan dan kekerasan dapat dicapai dengan salah satu proses perlakuan

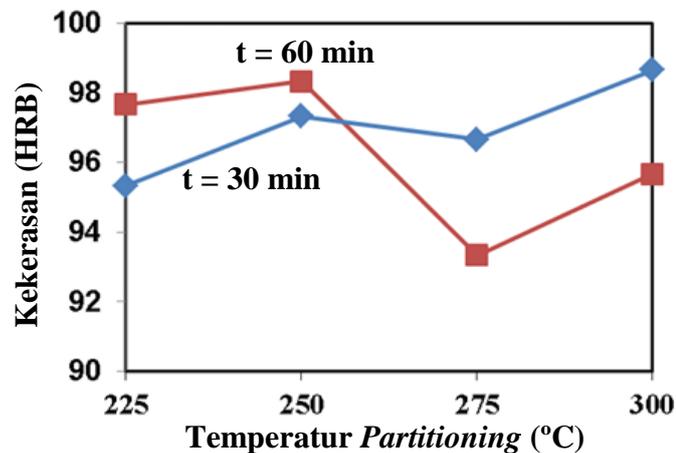
panas yang inovatif yaitu proses *quenching* dan *partitioning*. Pada mulanya, proses *quenching* dan *partitioning* diperkenalkan oleh J. G. Speer pada tahun 2003 yang bertujuan untuk meningkatkan sifat ketangguhan dan kekuatan yang lebih baik dengan biaya yang rendah sehingga dinilai lebih efektif [15]. Proses *quenching* dan *partitioning* merupakan suatu metode perlakuan panas yang terdiri dari 2 tahapan proses yaitu tahap pertama adalah *quenching* dan tahap kedua adalah *partitioning*. Proses *quenching* dilakukan dengan cara austenisasi material lalu didinginkan secara cepat namun tidak mencapai temperatur ruang yaitu diantara temperatur martensit mulai terbentuk atau *martensite start* (Ms) dan temperatur transformasi akhir martensit atau *martensite finish* (Mf). Kemudian, dilanjutkan dengan tahap *partitioning* yang dilakukan dengan cara memanaskan kembali material hingga temperatur *partitioning* (Tp) dan temperatur ditahan selama waktu yang diinginkan. Pada proses *quenching* tersebut diperoleh martensit hasil dari sebagian struktur mikro yang bertransformasi. Saat dilanjutkan dengan proses *partitioning* terjadi fenomena difusi atom karbon dalam martensit menuju austenit sisa sehingga memperkaya kandungan karbon dalam austenit sisa selama temperatur dipanaskan kembali lalu austenit sisa menjadi stabil pada temperatur ruang. Stabilitas austenit sisa sangat berpengaruh dalam menghasilkan efek selama deformasi plastis yaitu *transformation induced plasticity* (TRIP) [16]. Adapun skema dalam proses *quenching* dan *partitioning* dapat dilihat pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Skema pada Proses *Quenching* dan *Partitioning* [17]

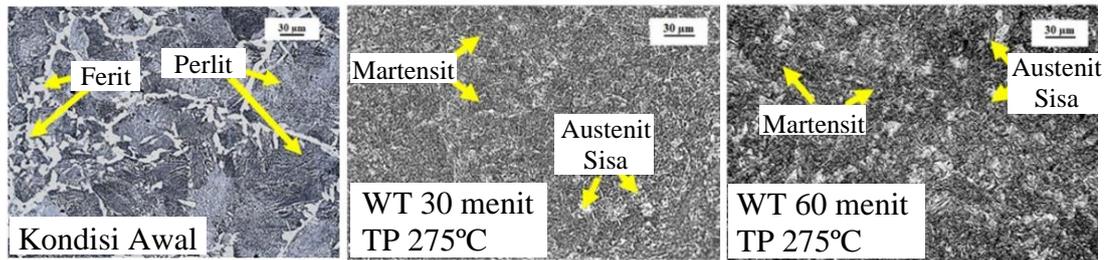
Proses *quenching* dan *partitioning* sangat mempengaruhi sifat mekanik material terutama dapat meningkatkan kekuatan tarik mencapai 2000 MPa dan elongasi mencapai 15%. Selain itu, stabilitas austenit sisa hasil dari proses *quenching* dan *partitioning* dipengaruhi oleh komposisi kimia yang terkandung dalam material seperti karbon (C), mangan (Mn), silikon (Si), dan krom (Cr). Adapun pengaruhnya yaitu karbon (C) akan mengontrol temperatur martensit mulai terbentuk dan temperatur akhir martensit. Kemudian, mangan (Mn) akan memperlambat pembentukan perlit sehingga kelarutan karbon akan meningkat. Lalu, silikon (Si) memiliki kelarutan yang rendah sehingga akan menghambat endapan karbida yang terbentuk. Sedangkan, krom (Cr) akan meningkatkan ketahanan material terhadap *tempering* dan meningkatkan kemampuan pengerasan dengan menghambat pembentukan bainit dan perlit [18].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat parameter-parameter yang mempengaruhi proses *quenching* dan *partitioning* yaitu temperatur *quenching*, temperatur *partitioning*, dan waktu tahan *partitioning*. Hal tersebut dibuktikan dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Alhamidi, A dengan sifat mekanik yang didapatkan pada baja WRM KS1045 berupa kekerasan yang terjadi penurunan seiring peningkatan temperatur *partitioning* dan waktu tahan *partitioning* autenisasi lalu terjadi peningkatan nilai kekerasan kembali yang dapat dilihat pada grafik sebagai berikut [19].



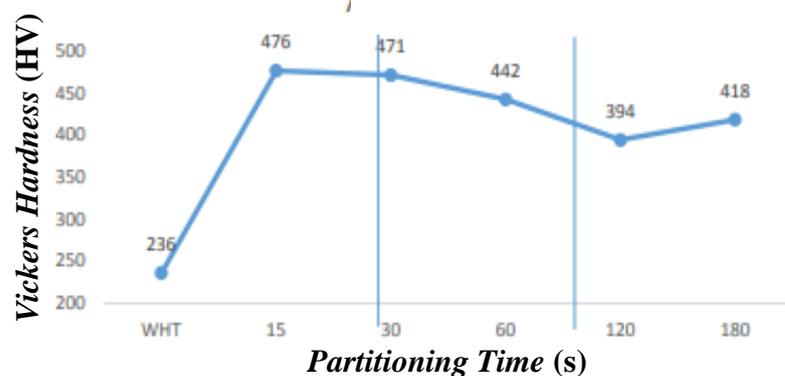
Gambar 2.6 Pengaruh Temperatur *Partitioning* terhadap Kekerasan Baja WRM KS1045

Dengan demikian, temperatur *partitioning* mempengaruhi kekerasan baja WRM KS1045 yang dihasilkan dari struktur mikro yang bertransformasi. Adapun struktur mikro awal berupa fasa ferit dan perlit lalu bertransformasi menjadi fasa martensit dan austenit sisa dengan jumlah fraksi yang berbeda bergantung dari waktu tahan *quenching* (WT) dan temperatur *partitioning* (TP) serta waktu tahan *partitioning* yang dilakukan.



Gambar 2.7 Struktur Mikro Baja WRM KS1045

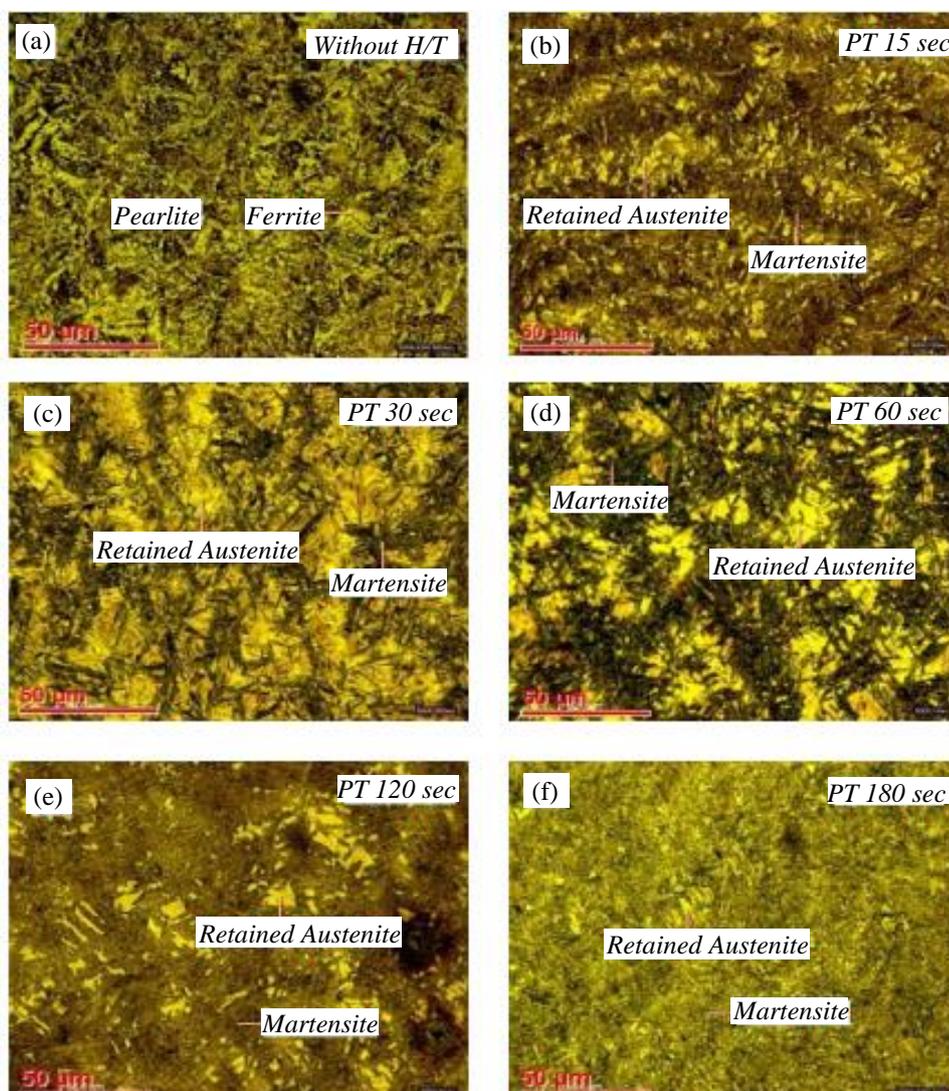
Sementara itu, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Inam, A. dkk di tahun 2017 mengenai *quenching* dan *partitioning* pada baja AISI 4340 menyatakan bahwa variasi waktu *partitioning* mempengaruhi peningkatan kekerasan sampel disebabkan oleh banyaknya fraksi martensit dari proses *quenching* dan *partitioning*. Namun, waktu *partitioning* lebih dari 15 detik sampel mengalami penurunan kekerasan yang disebabkan oleh volume fraksi martensit yang menurun karena berdifusi menjadi austenit sisa [15].



Gambar 2.8 Pengaruh Waktu *Partitioning* pada Kekerasan Baja AISI 4340

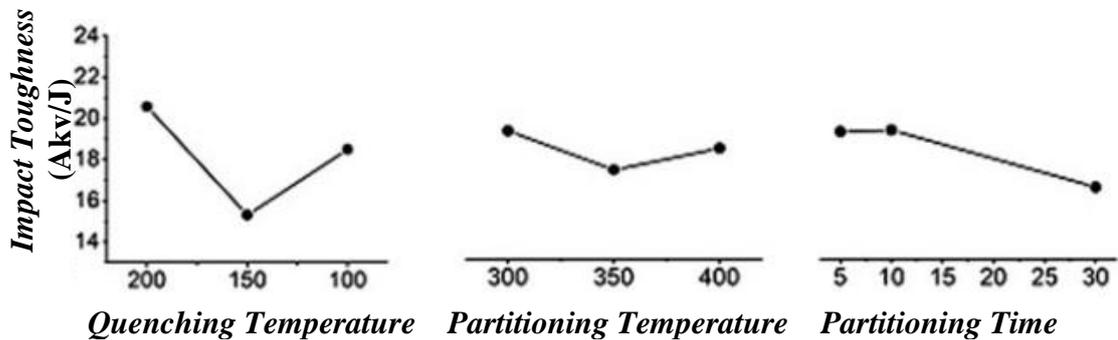
Selain itu, sebelum proses *quenching* dan *partitioning* struktur mikro pada baja AISI 4340 berupa perlit dan ferit. Namun, setelah baja diaustenisasi mengalami transformasi menjadi austenit. Kemudian, dilakukan proses

partitioning dengan memvariasikan waktu penahanan *partitioning* sehingga diperoleh struktur mikro akhir berupa austenit sisa dan martensit. Jumlah fraksi austenit sisa pada awalnya dalam fraksi yang sedikit namun seiring bertambahnya lama waktu penahanan jumlah fraksi austenit sisa semakin banyak. Setelah itu, semakin bertambahnya waktu *partitioning* fasa karbida epsilon mulai terbentuk [15].



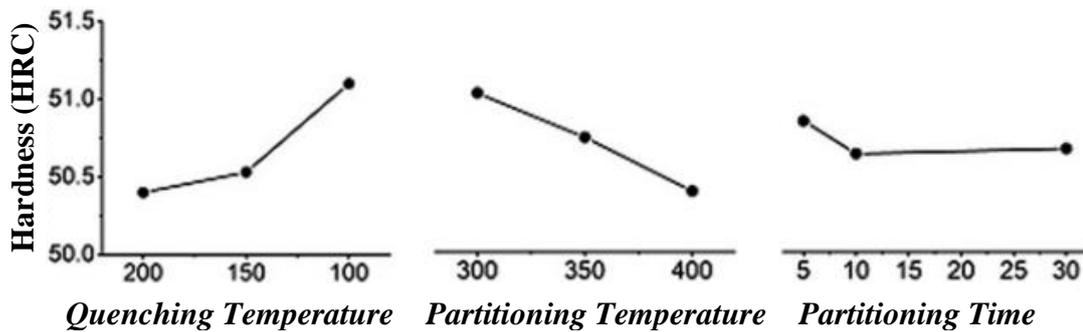
Gambar 2.9 Struktur Mikro Baja AISI 4340 pada berbagai Variasi Waktu *Partitioning*

Kemudian, dalam penelitian yang dilakukan oleh Wenqian Zhou et al. pada tahun 2016 mengenai efek proses *quenching* dan *partitioning* pada baja paduan rendah tahan aus yang menggunakan parameter temperatur *quenching*, temperatur *partitioning*, dan waktu tahan *partitioning* diperoleh bahwa mempengaruhi sifat mekanik yaitu ketangguhan dan kekerasan pada baja paduan rendah tahan aus [5].



Gambar 2.10 Pengaruh Temperatur *Quenching*, Temperatur dan Waktu *Partitioning* terhadap Ketangguhan

Ketangguhan dari baja paduan rendah tahan aus mengalami penurunan lalu peningkatan yang tidak optimal seiring bertambahnya temperatur *quenching*. Lalu, nilai ketangguhan terjadi penurunan dan peningkatan yang tidak signifikan seiring bertambahnya temperatur *partitioning*. Sedangkan, ketangguhan mengalami peningkatan dan penurunan yang signifikan seiring bertambahnya waktu *partitioning*. Adapun perubahan kekerasan dari baja paduan rendah tahan aus yaitu semakin tinggi temperatur *quenching* maka semakin tinggi nilai kekerasan. Sedangkan, berbanding terbalik pada parameter temperatur *partitioning* yaitu jika semakin tinggi temperatur *partitioning* maka kekerasan akan menurun. Begitupun dengan parameter waktu *partitioning* yang akan mengalami penurunan seiring bertambahnya waktu *partitioning* [5].



Gambar 2.11 Pengaruh Temperatur *Quenching*, Temperatur dan Waktu *Partitioning* terhadap Kekerasan

2.5 Pengaruh Unsur Paduan Pada Baja

Pada umumnya, baja karbon biasa memiliki kekurangan sehingga penggunaannya terbatas dalam banyak aplikasi. Baja karbon biasa tidak sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan sifat kekuatan dan ketangguhan yang jauh lebih tinggi. Selain itu, baja ini tidak mampu menahan korosi yang tinggi dan lingkungan yang ekstrim. Keterbatasan baja karbon biasa ini dapat ditanggulangi dengan memadukan baja dengan unsur paduan atau elemen lain. Berdasarkan definisinya, unsur-unsur yang sengaja ditambahkan untuk mencapai sifat yang diinginkan dalam suatu sistem logam disebut unsur paduan, sedangkan unsur-unsur yang pasti ada dalam baja tanpa adanya kesengajaan untuk memberikan tujuan tambahan dikenal sebagai pengotor. Baja yang mengandung unsur paduan disebut baja paduan. Adapun jenis unsur paduan lainnya adalah unsur yang menstabilkan fasa ferit. unsur penstabil fasa ferit ini secara umum adalah struktur kristal BCC [9]. Penambahan setiap unsur paduan dapat mempengaruhi tingkat kekerasan baja yang dapat dilihat pada Gambar 2.12 dan berikut ini merupakan unsur-unsur paduan yang dapat ditambahkan diantaranya yaitu:

- a. Mangan (Mn), mangan memiliki kelarutan yang sangat tinggi dalam

austenit karena struktur FCCnya, namun kelarutannya dalam besi BCC kurang dari 3%wt. Selain itu, pembentuk karbida sedang, membentuk karbida isomorph, dan menjadi bahan untuk meningkatkan *hardenability* yang sangat baik.

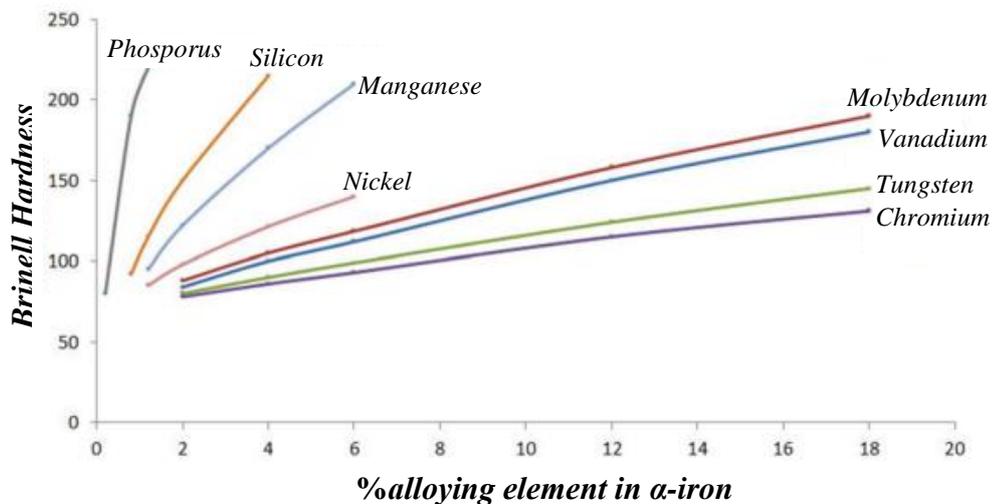
- b. Molibdenum (Mo), merupakan unsur penstabil ferit, sangat larut dalam besi BCC, dan memiliki kelarutan lebih besar dari 35%wt sedangkan hanya larut hingga 3%wt dalam besi FCC. Unsur ini dapat meningkatkan *hardenability* yang lebih kuat dari sebagian besar unsur paduan lainnya. Selain itu, Molibdenum memberikan ketahanan terhadap korosi, dapat meningkatkan ketahanan abrasi dengan membentuk partikel molibdenum karbida keras dalam matriks ferit, dan memperlambat kinetika pengendapan kromium karbida, sehingga membatasi material menjadi getas.
- c. Nikel (Ni), Nikel dengan struktur FCC merupakan unsur penstabil austenit, dengan kelarutan tak terbatas dalam besi FCC. Namun, kelarutannya di besi BCC dibatasi hingga 10%wt, Nikel mampu menguatkan dan mengeraskan baja dengan pengerasan larutan padat. Ketika unsur Nikel dikombinasikan dengan unsur Krom dan Molibdenum maka akan meningkatkan pengerasan secara signifikan. Selain itu, Nikel menyebabkan butiran menjadi kasar pada temperatur tinggi.
- d. Kromium (Cr), kromium adalah penstabil ferit dan memiliki kelarutan padat tak terbatas dalam besi BCC. Batasannya kelarutan dalam besi

FCC sekitar 13% wt. Namun, hal ini dapat diperbesar hingga 20%wt dengan penambahan karbon hingga 0,5%wt. Selain itu, unsur Kromium menjadi pembentuk karbida yang kuat dan kecenderungan pembentukan karbidanya lebih besar dibandingkan unsur Mangan tetapi lebih kecil dari unsur Tungsten. Kemudian, Kromium dapat meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi dengan membentuk lapisan kromium oksida yang sangat tipis serta memberikan ketahanan abrasi dan aus yang sangat baik dengan membentuk Kromium karbida dalam struktur mikro.

- e. Silikon (Si), silikon menjadi unsur paling tidak larut dalam besi FCC dengan kelarutan hingga 2%wt. Silikon meningkatkan aktivitas unsur karbon dalam ferit. Kelarutannya dalam besi BCC sekitar 18%wt. Silikon dapat mengeraskan baja sehingga kehilangan plastisitasnya dan menjadi unsur pengoksidasi yang sangat kuat. Kemudian, Silikon mempengaruhi *tempering* pada baja karbon rendah melalui pengerasan larutan padat. Pada umumnya, Silikon digunakan sebagai *deoxidizer* sehingga meningkatkan ketahanan oksidasi baja.
- f. Titanium (Ti), titanium sedikit larut dalam austenit, dengan kelarutan kurang dari 1%wt. Namun kelarutannya dalam besi BCC lebih tinggi yaitu sekitar 6%wt. Unsur ini meningkatkan pengerasan tetapi umumnya ditambahkan ke baja dalam konsentrasi yang sangat rendah untuk pembentukan titanium karbida yang meningkatkan sifat material

selama perlakuan termomekanis. Selain itu, mencegah pembentukan austenit yang mengandung kromium dalam jumlah tinggi

- g. Vanadium (V), vanadium sangat sedikit larut dalam besi FCC, dengan kelarutan hingga 1%wt sedangkan kelarutannya dalam besi BCC tidak terbatas. Unsur vanadium sebagai penambah pengerasan pada baja dengan membentuk karbida yang kuat tetapi kecenderungan pembentukan karbidanya lebih kecil dibandingkan titanium dan niobium. Lalu, vanadium sama seperti molibdenum karena dapat meningkatkan temperatur pengerasan butir austenit sebab pelarutan vanadium karbida dalam austenit membutuhkan waktu lebih lama.



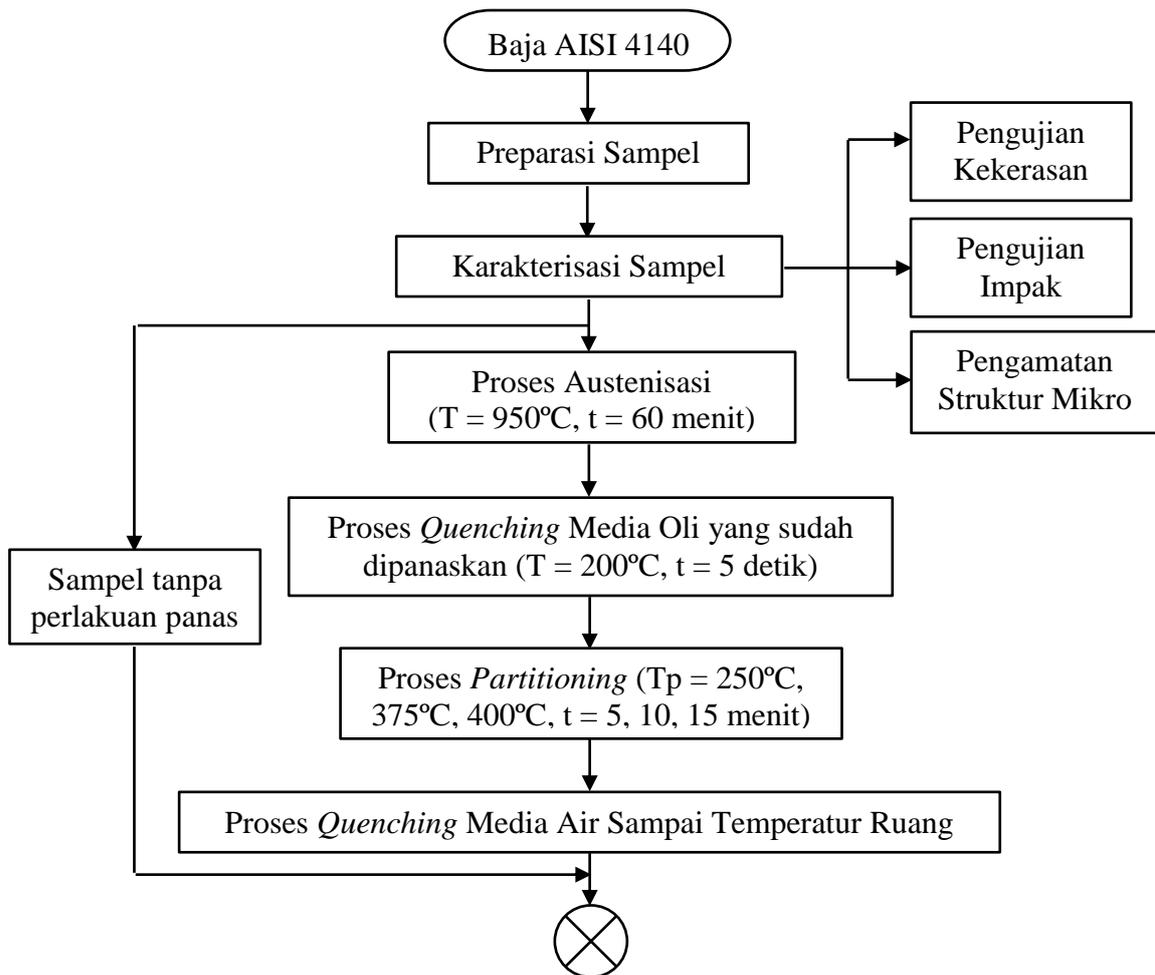
Gambar 2.12 Pengaruh Unsur Paduan terhadap Kekerasan Baja [9]

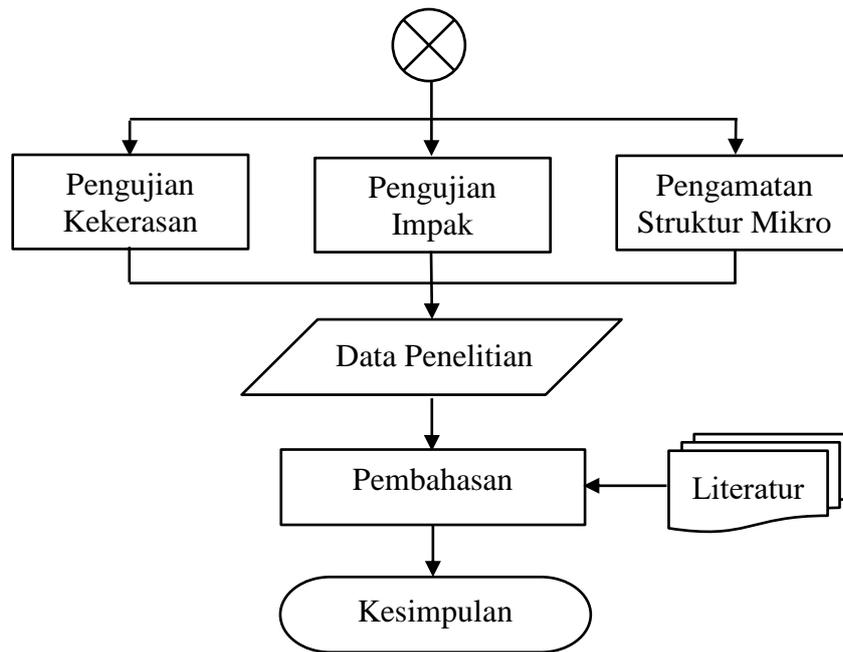
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini terdapat tahapan-tahapan proses yang akan dilakukan. Adapun material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja AISI 4140 yang akan dilakukan proses perlakuan panas berupa proses *quenching* dan *partitioning* dengan memvariasikan temperatur *partitioning* dan waktu *partitioning* sehingga akan meningkatkan ketangguhan dan kekerasan pada baja AISI 4140. Berikut ini merupakan diagram alir penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat-alat yang digunakan

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Alat pelindung diri
2. Alat *grinding* dan *polishing*
3. Alat uji impak
4. Alat uji kekerasan
5. Ember
6. *Furnace*
7. Gelas beker
8. *Hair dryer*

9. Krusibel
10. Mikroskop Optik
11. *Nabertherm furnace*
12. Oven
13. Tang penjepit
14. *Thermogun*

3.2.2 Bahan-bahan yang digunakan

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

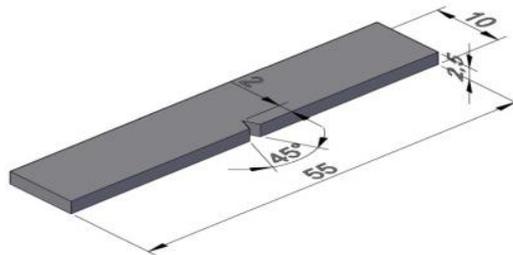
1. Air
2. Ampelas *grid* 80, 120, 240, 320, 500, 800, 1200, dan 1500
3. Aquades
4. Baja AISI 4140
5. Katalis
6. Larutan asam nitrat (HNO_3)
7. *Metal polish*
8. Oli
9. Resin
10. *Wool polish*

3.3 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

3.3.1 Preparasi Sampel

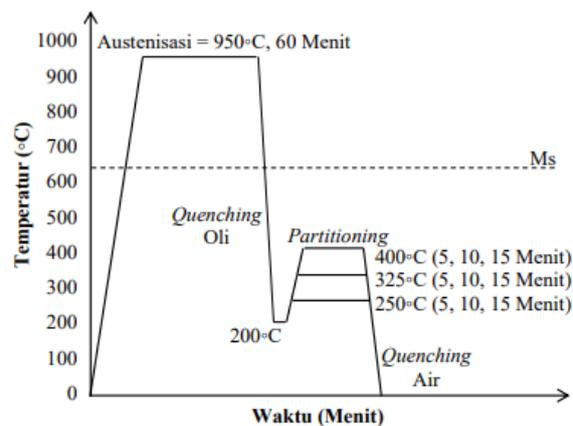
Sampel dalam penelitian ini menggunakan baja AISI 4140 yang akan dipreparasi terlebih dahulu sebelum dilakukan proses *quenching* dan *partitioning*. Preparasi sampel bertujuan untuk mendapatkan dimensi ukuran sampel berdasarkan standar ASTM E23 (*Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*). Dimensi ukuran sampel yang digunakan berukuran 2,5 x 10 x 55 mm dengan sudut takik V notch sebesar 45°. Adapun gambar sampel yang digunakan adalah sebagai berikut.



Gambar 3.2 Dimensi Ukuran sampel yang digunakan

3.3.2 Perlakuan Panas

Perlakuan panas yang akan dilakukan setelah sampel dipreparasi yaitu proses *quenching* dan *partitioning* dengan skema proses yang dapat dilihat pada Gambar 3.3.



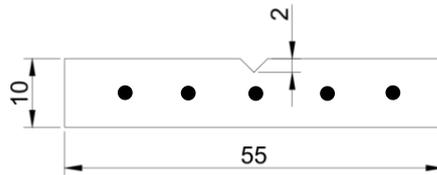
Gambar 3.3 Skema Proses *Quenching* dan *Partitioning*

Dalam skema perlakuan panas proses *quenching* dan *partitioning* tersebut menunjukkan bahwa proses diawali dengan sampel yang dipanaskan mencapai austenisasi menggunakan *nabertherm furnace* pada temperatur 950°C selama 1 jam. Lalu, sampel dilakukan *quenching* menggunakan media oli yang sudah dipanaskan dengan oven pada temperatur 200°C. Kemudian, sampel dilakukan proses *partitioning* dengan memanaskan kembali sampel menggunakan *furnace* pada variasi temperatur *partitioning* 250°C, 325°C, dan 400°C serta variasi waktu *partitioning* selama 5, 10, dan 15 menit. Setelah proses *partitioning* selesai dilakukan maka sampel akan di*quenching* menggunakan media air mencapai temperatur ruang.

3.3.3 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari proses *quenching* dan *partitioning* dengan variasi temperatur dan waktu *partitioning* terhadap kekerasan pada sampel baja AISI 4140. Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan alat *FR-X Digital Microhardness Tester*. Sebelum pengujian kekerasan, sampel dipreparasi dengan dilakukan proses *grinding* bertujuan untuk mendapatkan permukaan yang rata sehingga nilai kekerasan sampel yang diperoleh akan akurat. Sampel yang telah di*grinding* selanjutnya diletakkan di dudukan alat uji dan diatur menggunakan tuas hingga nilai kekerasan sampel akan muncul pada *display screen* yang telah terhubung dengan alat uji kekerasan. Indentor yang digunakan pada *micro hardness tester* yaitu berupa indentor bola baja, adapun pengujian kekerasan

ini dilakukan pada setiap sampel sebanyak 5 titik indentasi yang dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Titik Indentasi pada sampel

3.3.4 Pengujian Impak

Setelah dilakukan pengujian kekerasan pada sampel maka dilakukan pengujian impak untuk mengetahui pengaruh dari variasi temperatur dan waktu pada proses *partitioning* terhadap ketangguhan sampel baja AISI 4140 yaitu dilihat dari perubahan nilai energi yang diserap oleh sampel baja AISI 4140. Pengujian impak ini menggunakan mesin uji impak *charpy* model HT-8041A. Sampel yang telah dipreparasi berdasarkan ukuran standar ASTM E23 lalu dilakukan pengujian impak dengan meletakkan sampel pada alat uji impak dengan posisi mendatar serta kedua ujungnya berada pada tumpuan, lalu pembebanan yang diberikan akan datang dari arah belakang takikan pada sampel.

3.3.5 Analisa Struktur Mikro

Sampel baja AISI 4140 yang diberi perlakuan proses *quenching* dan *partitioning* serta pengujian berupa pengujian kekerasan dan pengujian impak kemudian sampel dilakukan pengamatan struktur mikro untuk menganalisa fasa yang didapatkan dari proses *quenching* dan *partitioning*. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan metode metalografi

yang terdiri dari tahapan *grinding* dan *polishing*. Sampel dilakukan *mounting* sebelum *grinding*, tahapan *grinding* bertujuan untuk menghaluskan dan meratakan permukaan sampel baja AISI 4140 menggunakan kertas ampelas dengan ukuran *grid* 80, 120, 240, 320, 500, 800, 1200, dan 1500. Setelah permukaan sampel halus dan rata, dilanjutkan dengan tahapan *polishing* menggunakan *metal polish* pada sampel. Kemudian, sampel dietsa menggunakan larutan nital 5% yang dicelupkan selama 3 detik. Setelah itu, sampel dianalisa menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 200x, 500x, dan 1000x. Lalu, struktur mikro yang dihasilkan oleh setiap sampel tersebut dianalisa lebih lanjut menggunakan *software ImageJ* bertujuan untuk menganalisa persen volume austenit sisa yang terkandung pada sampel baja AISI 4140.

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Awal Material

Baja AISI 4140 atau yang dapat dikenal dengan baja paduan kromium-molibdenum merupakan salah satu jenis baja *High Strength Low Alloy* (HSLA) yang digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi industri seperti industri otomotif. Baja paduan ini sering digunakan dalam penggunaan bahan utama poros dan roda gigi karena memiliki sifat mekanik yang unggul meliputi sifat mampu keras, keuletan, dan kekerasan. Adapun komposisi kimia baja AISI 4140 *as received* yang berasal SeAH Besteel Corp, Korea dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Baja AISI 4140 *As Received*

%wt	P	Cr	Mn	C	Mo	Si	Cu
AISI 4140	0,16	1,03	0,67	0,41	0,15	0,25	0,25

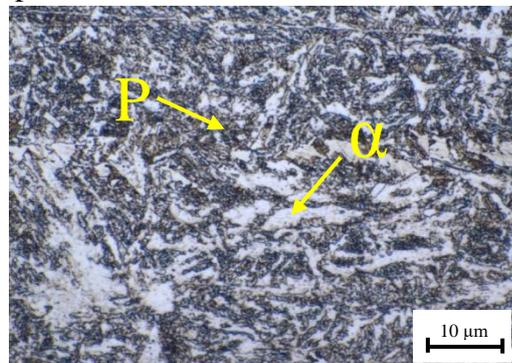
Pada Tabel 4.1 menunjukkan komposisi kimia yang terkandung dalam baja AISI 4140 *as received* sehingga mempengaruhi sifat mekanik yang dimilikinya. Berdasarkan kandungan unsur karbonnya, baja AISI 4140 *as received* mengandung kadar karbon yang sedang yaitu sebesar 0,41% dengan penambahan unsur padu yang tinggi seperti Cr, Mn, Mo, Si, dan Cu. Dapat dilihat pada Tabel 4.2 menunjukkan sifat mekanik yang telah dilakukan pengujian mekanik meliputi pengujian impak dan pengujian kekerasan pada sampel baja AISI 4140 *as received* sebelum dilakukan proses perlakuan panas *quenching* dan

partitioning. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat mekanik yang akan terjadi pada baja AISI 4140.

Tabel 4.2 *Mechanical Properties* Baja AISI 4140 *as received*

<i>Mechanical Properties</i>	Hasil Pengujian
Harga Impak (J/mm ²)	0,218
Kekerasan (RHN)	105,28

Struktur mikro pun telah diamati pada sampel baja AISI 4140 *as received* sebelum diberi perlakuan panas *quenching* dan *partitioning* sebagai kondisi awal sampel guna untuk membandingkan kondisi sebelum dan sesudah perlakuan panas *quenching* dan *partitioning* yang dapat dilihat pada Gambar 4.1. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa struktur mikro terdiri dari matriks fasa ferit dan terdistribusi fasa perlit yang tidak merata. Masing-masing fasa tersebut memiliki sifat yang berbeda seperti fasa ferit (α) yang ditandai dengan warna putih bersifat lunak dan ulet. Sedangkan, fasa perlit (P) yang ditandai dengan warna hitam karena terdiri dari lapisan ferit dan sementit bersifat lebih kuat dan keras. Fasa awal yang terbentuk tersebut mempengaruhi sifat mekanik pada baja AISI 4140 *as received* yang tertera pada Tabel 4.2.



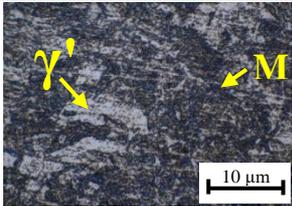
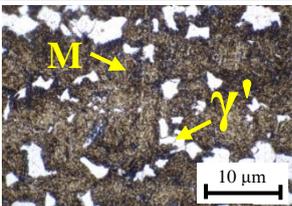
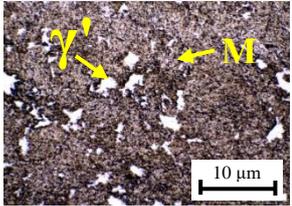
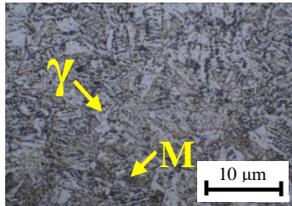
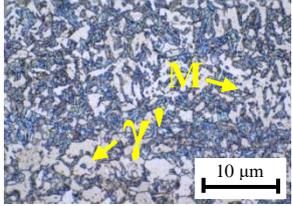
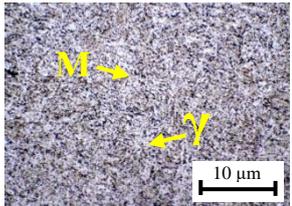
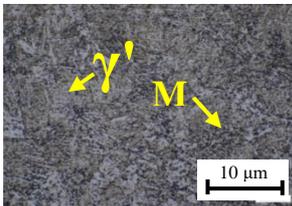
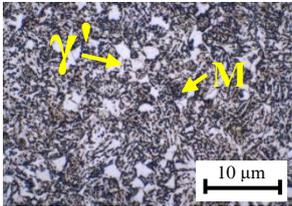
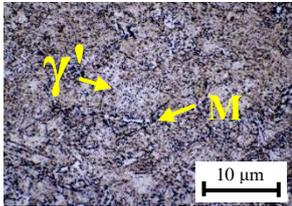
Gambar 4.1 Struktur Mikro Baja AISI 4140 *as received*

4.2 Hasil Analisa Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui fasa akhir yang terbentuk setelah dilakukan proses perlakuan panas *quenching* dan *partitioning* dengan parameter berupa variasi temperatur dan waktu *partitioning* serta pengamatan struktur mikro melalui metode metalografi menggunakan mikroskop optik perbesaran 200x, 500x, dan 1000x. Analisa struktur mikro ini dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif untuk menghitung persen volume austenit sisa yang terkandung pada setiap sampel baja AISI 4140. Adapun hasil dari pengamatan struktur mikro pada sampel baja AISI 4140 dapat dilihat pada Tabel 4.3. Gambar yang tertera pada Tabel 4.3 merupakan gambar struktur mikro dari sampel yang telah melewati proses *quenching* dan *partitioning* dengan menggunakan mikroskop optik perbesaran 1000x. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa terjadi perubahan struktur mikro akibat dari proses autenisasi yang menyebabkan seluruh struktur mikro awal baja AISI 4140 *as received* yang terdiri dari ferit dan perlit berubah menjadi austenit. Lalu, ketika dilakukan proses *quenching* pertama atau *initial quenching* ke dalam oli yang sudah dipanaskan mencapai 200°C selama 5 detik maka karbon yang terkandung dalam austenit membuat austenit stabil akan berubah menjadi martensit sepenuhnya dan austenit yang tidak stabil menjadi austenit sisa. Kemudian, dilakukan proses *partitioning* yaitu pemanasan kembali sampel baja AISI 4140 ke dalam *furnace* dengan variasi temperatur 250°C, 325°C, dan 400°C serta variasi waktu tahan selama 5, 10, dan 15 menit sehingga memberi waktu austenit sisa menjadi stabil membuat fasa martensit menjadi menurun. Lalu, dilakukan proses *quenching* terakhir

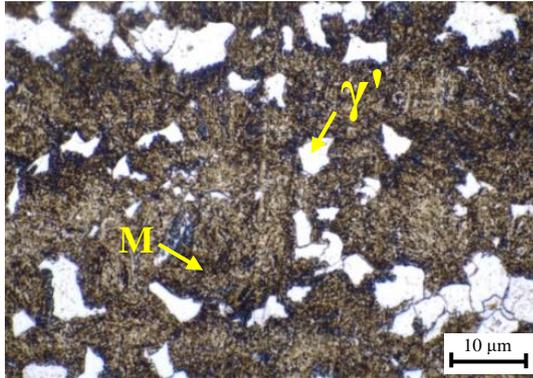
menggunakan media air mencapai temperatur ruang akan menghasilkan martensit dengan sifat yang lebih keras. Fasa-fasa yang dihasilkan tersebut dapat diidentifikasi melalui warna dan bentuknya, yaitu fasa austenit sisa (γ') berwarna putih sedangkan fasa martensit (M) berwarna hitam.

Tabel 4.3 Struktur Mikro Baja AISI 4140 Setelah Proses *Quenching* dan *Partitioning*

T_p t	250°C	325°C	400°C
5 Menit			
10 Menit			
15 Menit			

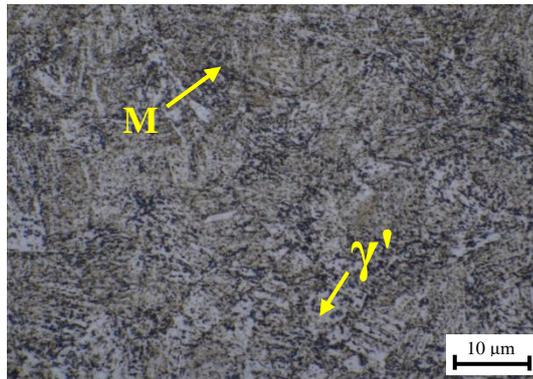
Pada gambar yang tertera di Tabel 4.3 dapat dianalisa bahwa terdapat parameter yang mempengaruhi struktur mikro akhir setelah dilakukan proses *quenching* dan *partitioning* sampel baja AISI 4140 yaitu meliputi parameter temperatur *partitioning* dan waktu *partitioning*. Mengutip dari penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa upaya dilakukan untuk memahami mekanisme-mekanisme yang berperan selama proses *quenching* dan *partitioning* yaitu tidak hanya fraksi volume dari austenit sisa tapi juga kestabilannya terkait dengan ukuran, bentuk, tipe seperti lapisan tipis atau *block*, distribusi, serta

kandungan karbon sangat penting dalam proses *quenching* dan *partitioning* untuk mencapai sifat mekanik yang diinginkan. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kestabilan austenit sisa, seperti temperatur austenitisasi, riwayat deformasi, laju pendinginan, temperatur *quenching*, serta temperatur dan waktu *partitioning* [20]. Dari penelitian yang dilakukan untuk variasi temperatur *partitioning* yang digunakan yaitu 250°C, 325°C, dan 400°C karena temperatur tersebut berada diantara *martensite start* (Ms) dan *martensite finish* (Mf) sehingga mempengaruhi struktur mikro dan ukuran butir fasa yang dihasilkan. Dapat dilihat pada Tabel 4.3 untuk parameter temperatur *partitioning* mengalami perubahan dari banyaknya fraksi fasa austenit dan martensit yang mana semakin tinggi temperatur maka semakin cepat proses difusi karbon dalam martensit yang berpindah keluar menuju austenit sisa serta ukuran butir yang halus. Menurut penelitian yang dilakukan sebelumnya terkait proses *quenching* dan *partitioning* pada *advanced high-strength steel* menghasilkan bahwa pemilihan rentang temperatur *partitioning* yang digunakan berada diantara *martensite start* (Ms) dan *martensite finish* (Mf) guna menghindari transformasi bainit meskipun temperatur yang lebih tinggi mempercepat proses difusi karbon [21]. Selain itu, berdasarkan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa karbon memiliki kemampuan untuk larut dalam struktur martensit jauh lebih rendah dibandingkan dengan austenit sehingga atom-atom karbon yang berada di dalam martensit akan berpindah keluar seiring meningkatnya temperatur *partitioning* [16]. Adapun fraksi fasa austenit sisa tertinggi dihasilkan saat temperatur *partitioning* 325°C yang ditunjukkan oleh Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Struktur Mikro Sampel Baja AISI 4140 QP325-5

Adapun untuk parameter waktu *partitioning* menggunakan variasi waktu 5, 10, dan 15 menit mempengaruhi struktur mikro serta persebaran fasa yang dihasilkan. Dapat dilihat pada gambar yang tertera dalam Tabel 4.3 yang menunjukkan bahwa semakin lama waktu *partitioning* maka persebaran fasa austenit sisa dan martensit semakin merata. Hal tersebut disebabkan karena dibutuhkannya waktu untuk atom-atom karbon berpindah dari martensit menuju austenit sisa. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Penha dan Martin pada tahun 2022 menyatakan bahwa lama waktu yang diperlukan untuk mengurangi atom karbon dalam martensit bergantung pada temperatur *partitioning*. Temperatur *partitioning* yang lebih tinggi membutuhkan waktu yang lebih sedikit untuk menyelesaikan proses *partitioning*. Pemilihan waktu *partitioning* perlu diperhatikan karena kandungan karbon dari austenit sisa berkurang seiring bertambahnya waktu *partitioning* [21]. Dari penelitian proses *quenching* dan *partitioning* yang telah dilakukan pada sampel baja AISI 4140 yang mengandung banyak fraksi austenit sisa pada temperatur *partitioning* terjadi saat waktu *partitioning* selama 15 menit yang ditunjukkan pada Gambar 4.3



Gambar 4.3 Struktur Mikro Sampel Baja AISI 4140 QP250-15

Selanjutnya, untuk memperoleh data volume dari fraksi austenit sisa yang terkandung pada sampel baja AISI 4140 maka dianalisa menggunakan *software ImageJ*. Fraksi austenit sisa serta ukuran butir akan mempengaruhi sifat mekanik yang diinginkan yaitu sifat ketangguhan dan kekerasan pada baja AISI 4140. Adapun volume fraksi austenit sisa yang dihasilkan dari masing-masing sampel baja AISI 4140 setelah melewati proses *quenching* dan *partitioning* dapat dilihat pada Tabel 4.4. Pada tabel tersebut menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya temperatur *partitioning*, maka stabilitas dari fasa austenit cenderung berubah. Saat sampel baja AISI 4140 dilakukan *partitioning* pada temperatur 250°C yang merupakan temperatur mendekati *martensite finish* (Mf) terjadi fenomena difusi atom karbon yang lambat dari martensit ke austenit sehingga austenit menjadi lebih kaya karbon membuat austenit sisa lebih stabil. Oleh karena itu, pada pendinginan sampel ke temperatur ruang menggunakan media air membuat austenit sisa tidak lagi mudah berubah menjadi martensit karena stabilisasi karbon tersebut menghasilkan volume fraksi austenit sisa yang tinggi dibandingkan dengan martensit. Sementara itu, sampel dengan *partitioning*

400°C yang mendekati temperatur *martensite start* (M_s) menyebabkan karbon berdifusi lebih cepat tetapi variasi waktu *partitioning* selama 5, 10, dan 15 menit tidak cukup untuk menstabilkan seluruh austenit sisa menghasilkan sebagian besar austenit sisa tidak stabil sehingga saat proses pendinginan selanjutnya austenit sisa yang tidak stabil tersebut berubah menjadi martensit dalam jumlah besar. Berdasarkan penelitian Speer yang menyatakan bahwa pada temperatur yang lebih tinggi, jumlah austenit sisa mengalami sedikit penurunan saat waktu *partitioning* mencapai 1000 detik. Penurunan ini disebabkan oleh terbentuknya karbida yang juga disertai pembentukan bainit sehingga mengurangi karbon yang tersedia. Sementara itu, pada temperatur terendah yaitu 300°C, fraksi austenit sisa justru terus meningkat meskipun waktu *partitioning* sudah maksimal. Selain itu, pada kondisi ini ditemukan fraksi austenit sisa yang cukup tinggi, bahkan melebihi target 15% pada beberapa sampel [22]. Sementara itu, penelitian yang dilakukan adalah penelitian oleh Belfi et al. pada tahun 2024 yang menyatakan bahwa dalam *partitioning* 240°C dengan waktu penahanan yang bervariasi selama 1 menit hingga 10 menit, didapatkan kesimpulan yaitu semakin banyak karbon yang berdifusi dari martensit ke austenit sehingga akan menghasilkan fraksi austenit sisa yang meningkat. Namun, seiring dengan meningkatnya waktu penahanan di atas 10 menit, didapatkan bahwa nilai stabilitas austenit sisa cenderung menurun karena meningkatnya presipitasi senyawa karbida. Dengan demikian, hal ini juga menjadi penanda bahwa seiring meningkatnya temperatur *partitioning*, stabilitas termodinamika dari austenit cenderung akan berkurang yang mana diakibatkan

oleh *rapid diffusion* yang cenderung membentuk fasa lebih stabil seperti martensit dan bainit yang cenderung dapat menurunkan fraksi fasa austenit sisa [23].

Tabel 4.4 Data Volume Fraksi Austenit Sisa

Tp t	250°C	325°C	400°C
5 Menit	28,326%	34,142%	18,382%
10 Menit	34,438%	36,502%	22,896%
15 Menit	42,913%	45,190%	23,090%

Ukuran butir pada baja AISI 4140 yang telah melewati proses *quenching* dan *partitioning* menghasilkan ukuran butir yang semakin halus dalam Tabel 4.5. Secara literatur, seiring dengan meningkatnya temperatur *partitioning* maka cenderung menghasilkan butir yang cenderung kasar (*coarsening*). Hal ini diakibatkan pada proses *partitioning* terjadi pergerakan batas butir dan reduksi densitas dislokasi yang mengakibatkan berkurangnya fraksi kristal FCC dan menghasilkan butir yang cenderung kasar. Fenomena ini berbanding terbalik dengan data aktual hasil penelitian dimana butir cenderung menghalus seiring dengan meningkatnya temperatur *partitioning*. Menurut Wang pada tahun 2001 menyatakan bahwa pada temperatur *partitioning* yang lebih tinggi maka stabilisasi fasa austenit dapat terjadi melalui difusi karbon. Austenit yang distabilkan ini dapat menghambat pertumbuhan butir selama pendinginan, menghasilkan struktur martensit dengan ukuran butir yang lebih halus. Meningkatnya temperatur *partitioning* juga dapat meningkatkan laju nukleasi partikel karbida yang terbentuk sehingga menghalangi pergerakan batas butir yang menyebabkan

memperlambat pertumbuhan butir. Sementara itu, waktu tahan yang tepat dapat mencegah pertumbuhan partikel yang berlebihan [24]. Hal ini dapat menghasilkan distribusi partikel yang lebih halus dan homogen sehingga menghambat pertumbuhan butir. Selain itu, ukuran butir mempengaruhi sifat mekanik yang dihasilkan karena ukuran butir yang semakin halus telah terbukti menjadi strategi penguatan yang efektif dalam struktur mikro karena penghalusan ukuran butir akan mengontrol pembentukan batas butir yang berperan untuk menghambat pergerakan dislokasi sehingga material akan mengalami peningkatan kekuatan dan kekerasan karena deformasi plastis menjadi lebih sulit [25].

Tabel 4.5 Data Ukuran Butir Baja AISI 4140

T_p / t	250°C	325°C	400°C
5 Menit	2,35 μm	2,64 μm	1,97 μm
10 Menit	2,16 μm	1,65 μm	1,51 μm
15 Menit	1,54 μm	1,38 μm	1,23 μm

4.3 Hasil Analisa Pengujian Kekerasan

Baja paduan AISI 4140 menjadi salah satu baja paduan yang dikenal memiliki kombinasi sifat mekanik yang baik salah satunya yaitu sifat kekerasan yang tinggi sehingga banyak digunakan dalam industri otomotif untuk pembuatan poros penggerak (*propeller shaft*). Sifat kekerasan pada *propeller shaft* berkontribusi pada daya tahan, kinerja, dan umur panjang komponen tersebut sehingga memastikan *propeller shaft* dapat berfungsi secara efisien dalam berbagai kondisi operasional. Oleh karena itu, sifat kekerasan pada baja AISI

4140 perlu diperhatikan karena sifat kekerasan yang diperoleh tergantung dari proses perlakuan panas yang digunakan sehingga untuk meningkatkan sifat kekerasan pada sampel baja AISI 4140 dapat dilakukan proses perlakuan panas *quenching* dan *partitioning*. Pada penelitian ini, telah dilakukan proses *quenching* dan *partitioning* menggunakan parameter variasi temperatur 250°C, 325°C, dan 400°C serta variasi waktu tahan *partitioning* selama 5, 10, dan 15 menit. Lalu, dilakukan pengujian kekerasan menggunakan alat *FR-X Digital Microhardness Tester* dengan indenter berupa bola baja pada lima titik yang berbeda pada permukaan sampel baja AISI 4140. Tabel 4.6 merupakan nilai dari pengujian kekerasan yang telah diberi perlakuan panas *quenching* dan *partitioning* pada sampel baja AISI 4140.

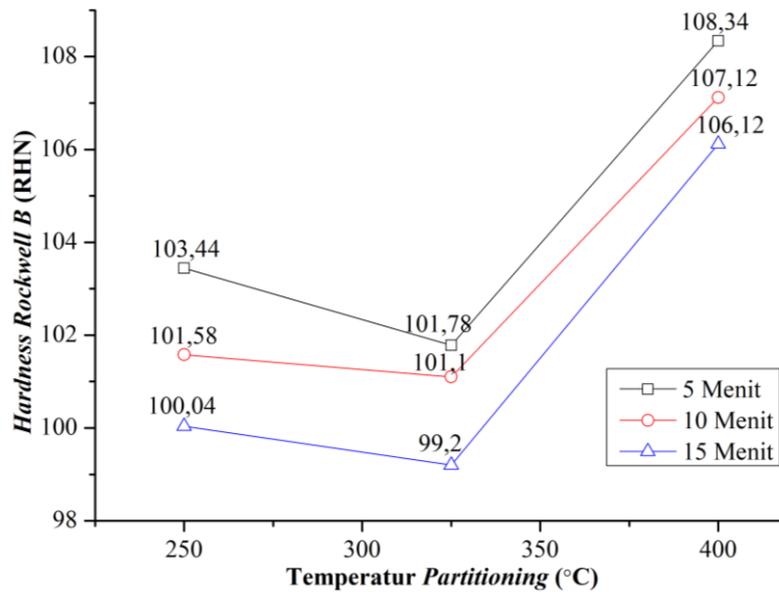
Tabel 4.6 Data Hasil Pengujian Kekerasan Sampel Baja AISI 4140

Sampel	Kekerasan (RHN)					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
<i>As Received</i>	104,7	106	106,2	105,3	104,2	105,28
QP250-5	101,6	105,7	106	105,3	98,6	103,44
QP250-10	97,6	95,6	105,2	106,3	103,2	101,58
QP250-15	95,3	91,4	103,5	102,2	107,8	100,04
QP325-5	100,3	100,7	103,6	101,9	102,4	101,78
QP325-10	98,1	101	102	101,4	103	101,1
QP325-15	103,4	104,4	97,5	97,4	93,3	99,2
QP400-5	109,4	108,7	109,3	109,7	104,6	108,34
QP400-10	106,7	107,9	107,8	106,5	106,7	107,12

Tabel 4.6 Tabel Lanjutan

Sampel	Kekerasan (RHN)					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
QP400-15	105,1	105,7	108,4	106,3	105,1	106,12

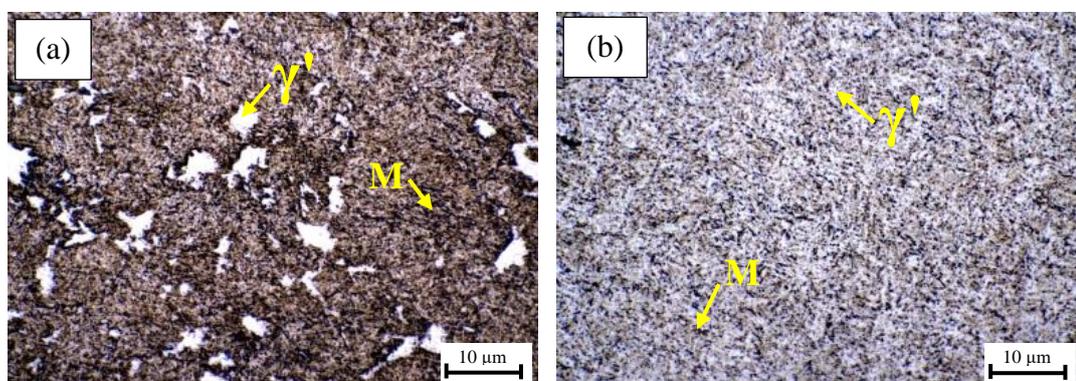
Nilai pengujian kekerasan yang dihasilkan pada Tabel 4.5 dapat disajikan melalui grafik hubungan antara nilai kekerasan terhadap variasi temperatur dan waktu tahan *partitioning* yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.4. Grafik tersebut menunjukkan bahwa diperoleh grafik garis yang fluktuatif yaitu garis tersebut menggambarkan perubahan nilai kekerasan baik menurun maupun meningkat yang diperoleh seiring meningkatnya waktu *partitioning*. Dari penelitian yang telah dilakukan ini, sampel baja AISI 4140 mengalami penurunan namun tidak signifikan lalu peningkatan nilai kekerasan yang signifikan seiring meningkatnya temperatur dan waktu tahan *partitioning* yang dilakukan. Pada parameter variasi temperatur dan waktu tahan *partitioning* didapatkan nilai kekerasan tertinggi yaitu pada temperatur 400°C dan waktu tahan *partitioning* selama 5 menit dengan nilai kekerasan sebesar 108,34 RHN. Sedangkan, nilai kekerasan terendah yaitu pada temperatur 325°C dan waktu tahan *partitioning* selama 15 menit. Pada dasarnya nilai kekerasan tertinggi yang diperoleh pada sampel baja AISI 4140 dipengaruhi oleh temperatur *partitioning* dan waktu tahan *partitioning*.

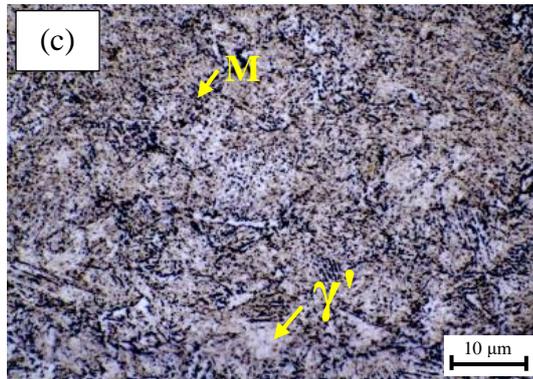


Gambar 4.4 Pengaruh Temperatur dan Waktu *Partitioning* Terhadap Nilai Kekerasan Sampel Baja AISI 4140

Dengan demikian, terjadinya peningkatan nilai kekerasan tertinggi untuk temperatur *partitioning* yang sama yaitu 400°C dengan waktu *partitioning* yang berbeda diperoleh pada waktu *partitioning* selama 5 menit. yang disebabkan oleh struktur mikro yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.5. Pada gambar 4.5 (a) menunjukkan struktur mikro hasil temperatur *partitioning* 400°C selama 5 menit yaitu persebaran fasa austenit sisa dan martensit yang tidak merata karena sedikitnya waktu *partitioning* membuat proses difusi atom karbon terjadi tidak sempurna sehingga didominasi oleh fasa martensit dibandingkan pada hasil dengan waktu *partitioning* lainnya yaitu 10 menit dan 15 menit membuat kekerasan sampel baja AISI 4140 memperoleh nilai kekerasan tertinggi yaitu 108,34 RHN. Sementara itu, terjadinya penurunan nilai kekerasan berturut-turut pada waktu *partitioning* 10 menit dan 15 menit disebabkan oleh struktur mikro yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.5 (b) dan (c). Dari gambar tersebut

menunjukkan bahwa struktur mikro sampel baja AISI 4140 mengandung persebaran fasa austenit sisa dengan martensit lebih merata karena waktu *partitioning* yang lama serta menghasilkan ukuran butir lebih kecil sehingga nilai kekerasan menurun karena sifat dari austenit sisa adalah lebih lunak dibandingkan martensit. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai pengaruh variasi waktu *partitioning* terhadap kekerasan pada baja AISI 4340 didapatkan hasil bahwa semakin lama waktu *partitioning* maka volume fraksi martensit semakin menurun dengan seiring meningkatnya fasa austenit sisa namun pada waktu *partitioning* terlama yaitu 180 detik fraksi austenit sisa menurun karena distribusi fasa yang merata antara austenit sisa dengan martensit serta ukuran butir yang semakin kecil [15]. Selain itu, menurut penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pada waktu *partitioning* 60 dan 180 detik, karbon dalam austenit sisa memiliki cukup waktu untuk mencapai homogenisasi atau penyebaran yang merata. Perubahan konsentrasi kandungan karbon pada austenit sisa menjadi lebih kecil dan lebih seragam setelah dilakukan proses *partitioning*. Jumlah martensit yang banyak dan austenit sisa yang stabil dalam baja memberikan kekuatan tarik dan perpanjangan yang tinggi [26].





Gambar 4.5 Struktur Mikro Baja AISI 4140 (a) QP400-5, (b) QP400-10, dan (c) QP400-15

4.4 Hasil Analisa Pengujian Ketangguhan

Selain sifat mekanik kekerasan, ketangguhan menjadi sifat yang harus dimiliki oleh komponen poros penggerak (*propeller shaft*). Ketangguhan pada poros penggerak berdasarkan dalam kemampuan komponen tersebut untuk menahan atau menyerap energi dari gaya atau beban yang bekerja padanya tanpa mengalami kerusakan atau patah sehingga ketangguhan sangat penting agar poros ini bisa bekerja dengan baik di bawah kondisi operasional yang berat. Terdapat faktor yang mempengaruhi ketangguhan poros penggerak meliputi material yang digunakan, adapun material yang digunakan pada penelitian ini yaitu baja AISI 4140. Dalam penelitian yang telah dilakukan, sampel baja AISI 4140 *as received* yang mengandung kadar karbon sedang memiliki sifat ketangguhan yang tidak terlalu tinggi tanpa perlakuan panas yaitu sebesar $0,218 \text{ J/mm}^2$ sehingga perlu dilakukan proses perlakuan panas *quenching* dan *partitioning* guna meningkatkan sifat ketangguhan serta dapat dianalisa pengaruh dari parameter variasi temperatur *partitioning* dan waktu tahan *partitioning* yang digunakan. Adapun metode pengujian impak yang dilakukan adalah uji impak *charpy*, setelah dilakukan

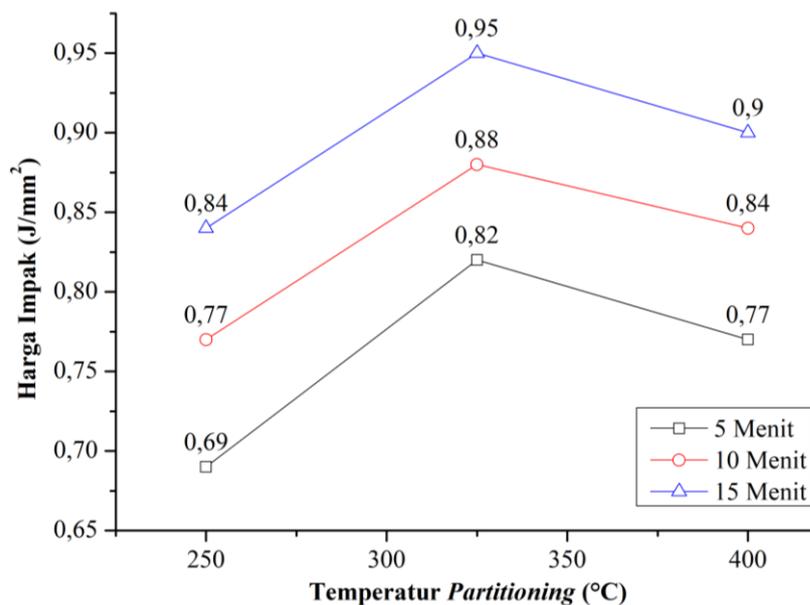
pengujian impak pada setiap sampel yang telah melewati proses *quenching* dan *partitioning* dengan parameter variasi yang berbeda-beda maka akan didapatkan hasil berupa nilai energi yang diserap dari setiap sampel serta menandakan seberapa tangguh sampel baja AISI 4140 saat menerima beban kejut. Berikut ini adalah data hasil yang didapat setelah pengujian impak pada setiap sampel baja AISI 4140 dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Data Hasil Pengujian Impak Sampel Baja AISI 4140

Sampel	Energi (Joule)	Harga Impak (J/mm²)
<i>As Received</i>	4,36	0,21
QP250-5	13,81	0,69
QP250-10	15,53	0,77
QP250-15	16,84	0,84
QP325-5	16,40	0,82
QP325-10	17,71	0,88
QP325-15	19,04	0,95
QP400-5	15,53	0,77
QP400-10	16,84	0,84
QP400-15	18,15	0,90

Dari data nilai pengujian impak yang diperoleh pada Tabel 4.6 dapat disajikan melalui grafik hubungan antara harga impak dengan temperatur dan waktu tahan *partitioning* yang dapat dilihat pada Gambar 4.6. Gambar tersebut menunjukkan bahwa grafik garis yang diperoleh adalah fluktuatif yang mana

harga impak mengalami peningkatan diikuti penurunan harga impak pada saat temperatur *partitioning* 400°C. Adapun nilai impak tertinggi diperoleh pada temperatur 325°C dengan waktu tahan selama 15 menit yaitu sebesar 0,952 J/mm². Sedangkan, nilai impak terendah diperoleh pada temperatur 250°C dengan waktu tahan selama 5 menit. Hasil yang didapat dari pengujian impak tersebut berbanding terbalik dengan hasil yang didapat dari pengujian kekerasan.

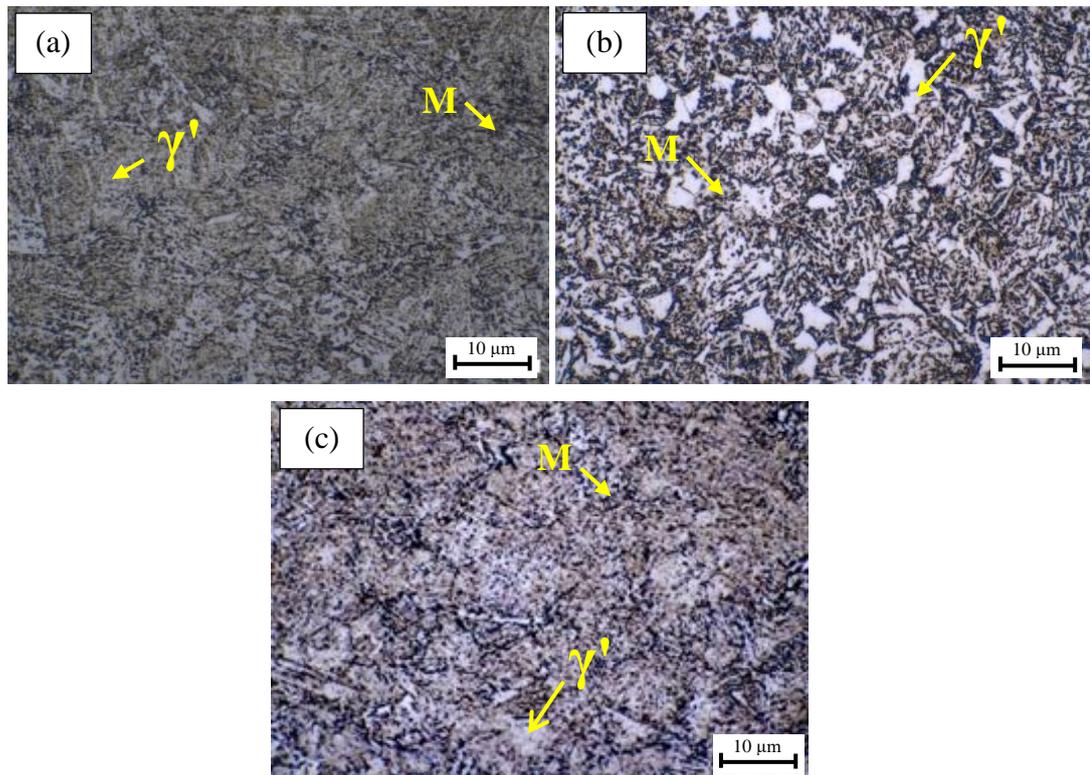


Gambar 4.6 Pengaruh Temperatur dan Waktu *Partitioning* terhadap Harga Impak Sampel Baja AISI 4140

Nilai harga impak dari hasil pengujian impak yang diperoleh dipengaruhi oleh parameter temperatur *partitioning* dan waktu *partitioning* sehingga terjadi peningkatan serta penurunan nilai harga impak. Temperatur *partitioning* dan waktu *partitioning* akan mengontrol fasa austenit sisa yang dihasilkan. Fasa austenit sisa mempengaruhi sifat ketangguhan dari sampel baja AISI 4140 yang telah melewati proses *quenching* dan *partitioning*. Mengutip dari penelitian sebelumnya yang menjelaskan bahwa cara yang efektif untuk meningkatkan

keuletan pada baja berkekuatan tinggi adalah dengan memanfaatkan austenit sisa sehingga dapat berkontribusi untuk meningkatkan ketangguhan dan kemampuan bentuk melalui efek *transformation induced plasticity* (TRIP) [27]. Dari penelitian yang telah dilakukan terdapat pengaruh temperatur *partitioning* dan waktu *partitioning* terhadap peningkatan dan penurunan harga impact yang diamati melalui struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 4.7. Adapun nilai harga impact tertinggi diperoleh sebesar $0,95 \text{ J/mm}^2$ pada temperatur *partitioning* 325°C selama 15 menit dengan struktur mikro yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 (b) bahwa persebaran merata dari fasa austenit sisa dan martensit namun didominasi dengan fasa austenit sisa karena adanya kontribusi dalam efek *transformation induced plasticity* (TRIP) sehingga diperoleh harga impact tertinggi. Sedangkan pada Gambar 4.7 (a) dan (c) yaitu temperatur *partitioning* 250°C dan 400°C mendapat harga impact terendah berturut-turut karena struktur mikro yang diperoleh didominasi oleh fasa martensit akibat persebarannya tidak merata dengan fasa austenit sisa sehingga diperoleh harga impact terendah sebab fasa martensit berkontribusi dalam meningkatkan kekerasan. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa kandungan karbon dalam austenit sisa setelah proses *partitioning* pada temperatur 350°C lebih tinggi dibandingkan temperatur 500°C . Perbedaan kandungan karbon ini sangat berpengaruh dalam menentukan sejauh mana austenit sisa rentan untuk berubah menjadi martensit yaitu fase kristal yang lebih keras dan rapuh ketika diberi regangan, baik dalam pengujian dengan beban statis maupun dinamis [28]. Selain itu, menurut penelitian yang telah dilakukan menghasilkan bahwa setelah proses *partitioning* pada temperatur 500°C selama 30

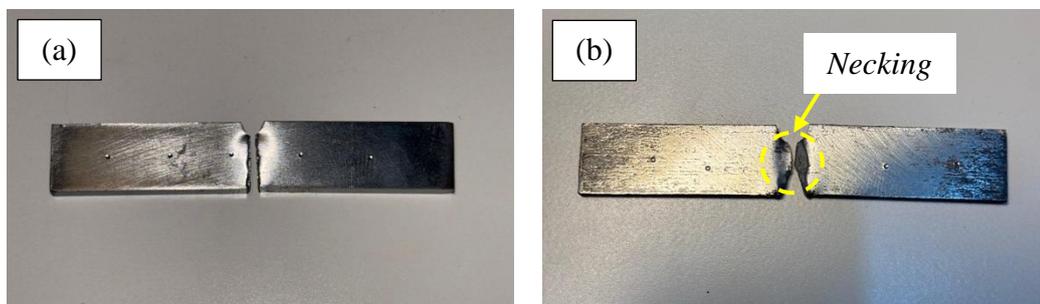
detik diperoleh fraksi volume austenit sisa sedikit lebih rendah dibandingkan dengan yang diperoleh pada temperatur 470°C selama 60 detik sehingga terjadi penurunan yang signifikan pada kandungan austenit sisa akibat dimulainya presipitasi karbida [29]. Lalu, pada penelitian sebelumnya yang memperoleh penurunan nilai elongasi saat temperatur *partitioning* divariasikan tertinggi dengan menjelaskan bahwa terjadinya peningkatan kehalusan pada volume austenit sisa dan konsentrasi karbon pada austenit sisa seiring dengan meningkatnya temperatur *partitioning*. Peningkatan volume austenit sisa yang terjadi karena peningkatan temperatur *partitioning* disebabkan oleh peningkatan konsentrasi karbon pada austenit sisa sehingga meningkatkan stabilitas austenit sisa. Dengan meningkatkan temperatur *partitioning* hingga 410°C membuat austenit sisa telah mengalami kejenuhan karbon yang menyebabkan karbon ditolak dari austenit sisa ke fase sekitarnya (fase ferit), sehingga meningkatkan fraksi volume fase ferit secara bersamaan. Penolakan karbon dari austenit sisa menyebabkan penurunan konsentrasi karbon dan volume austenit sisa. Sebenarnya, konsentrasi karbon dalam austenit sisa mungkin lebih tinggi dibandingkan dengan fase ferit dan martensit pada temperatur *partitioning* 410°C, yang menyebabkan difusi dan penolakan atom karbon dari austenit sisa (daerah dengan konsentrasi tinggi) ke fase ferit dan martensit (daerah dengan konsentrasi lebih rendah). Penolakan karbon dan penurunan kandungan karbon pada austenit sisa menyebabkan penurunan stabilitas austenit sisa [30].

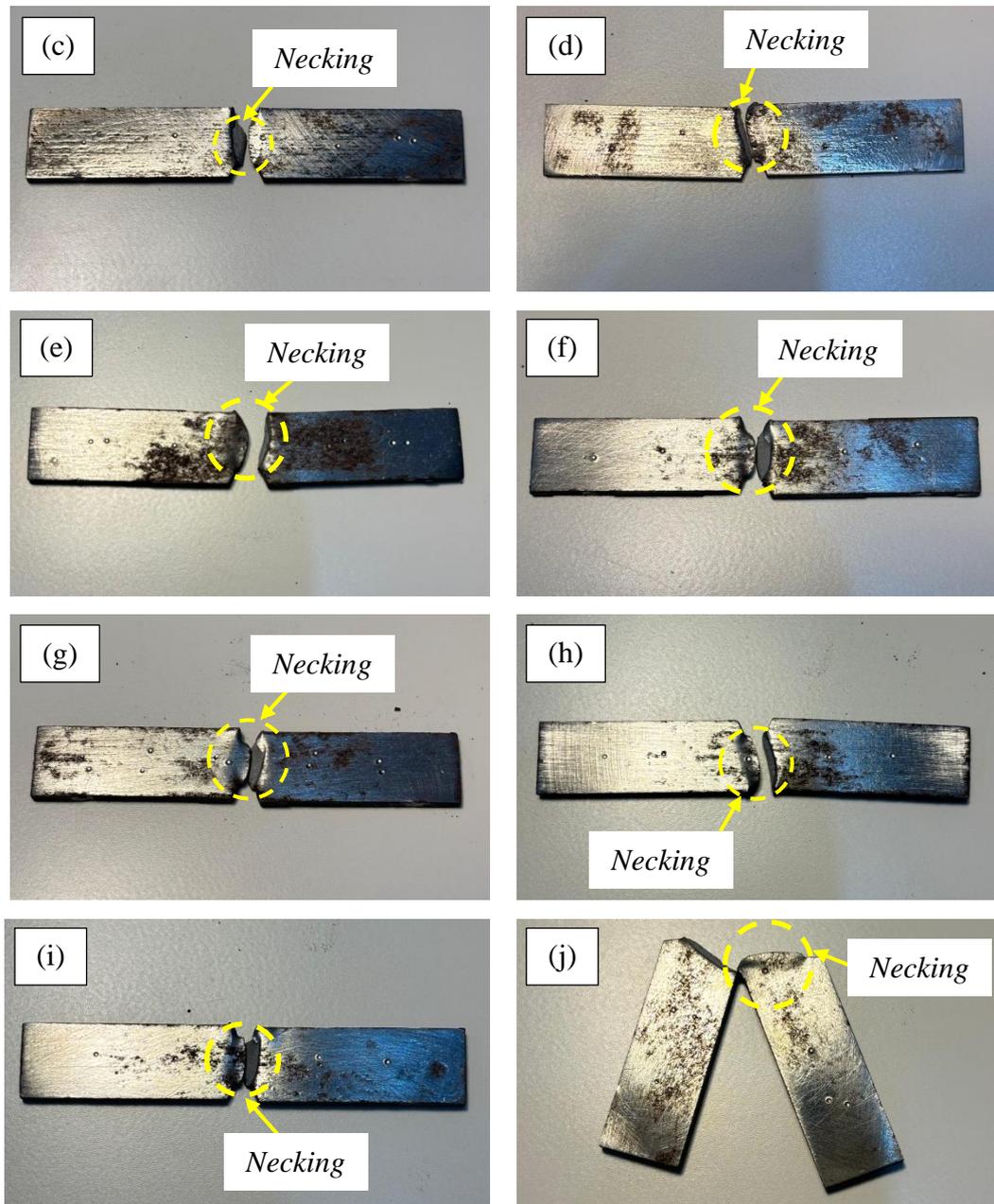


Gambar 4.7 Struktur Mikro Baja AISI 4140 (a) QP250-15, (b) QP325-15, dan (c) QP400-15

Harga impak yang diperoleh dari setiap sampel baja AISI 4140 hasil pengujian impak akan menyebabkan material yang terdeformasi akibat beban kejut yang diterima sehingga didapatkan perpatahan pada setiap sampel yang dapat dilihat secara makroskopis pada Gambar 4.8. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa masing-masing sampel yang melewati proses *quenching* dan *partitioning* mengalami perpatahan yang sama yaitu patah ulet. Patah ulet merupakan perpatahan yang terjadi akibat beban kejut yang diterimanya sehingga ketika beban tersebut dihilangkan maka penjaran retak akan berhenti. Perpatahan tersebut ditandai dengan adanya deformasi plastis di area sekitar patahan sebab menyerap energi dari beban kejut membuat permukaan patahan kasar, berwarna kelabu, dan berserabut. Meskipun seluruh patah sampel patah ulet

yang tidak seperti halnya Gambar 4.8 (j) namun ditandai adanya *necking* yang menunjukkan bahwa sampel baja AISI 4140 cukup tangguh saat menerima beban kejut dibandingkan dengan sampel baja AISI 4140 *as received* pada Gambar 4.8 (a) yang tidak terjadi *necking* saat patah. Berdasarkan penelitian sebelumnya mengenai proses *hot stamping* dan *quenching & partitioning* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik pada *ultra high strength steel* menyatakan bahwa dalam proses *quenching* dan *partitioning* menghasilkan austenit sisa yang sangat penting karena dapat menghasilkan efek *Transformation Induced Plasticity* (TRIP). Efek ini terjadi selama deformasi plastis sehingga meningkatkan kombinasi dari ketangguhan dan keuletan [31]. Selain itu, menurut penelitian terkait peningkatan stabilitas austenit sisa dengan proses *quenching* dan *partitioning* menyimpulkan bahwa perubahan austenit sisa menjadi martensit dapat menghasilkan pengerasan lokal yang membantu menunda terjadinya *necking* sehingga meningkatkan kemampuan material untuk meregang secara merata. Efek TRIP yang dihasilkan oleh austenit sisa juga memperkuat material dengan meningkatkan laju pengerasan kerja pada regangan tinggi [32].



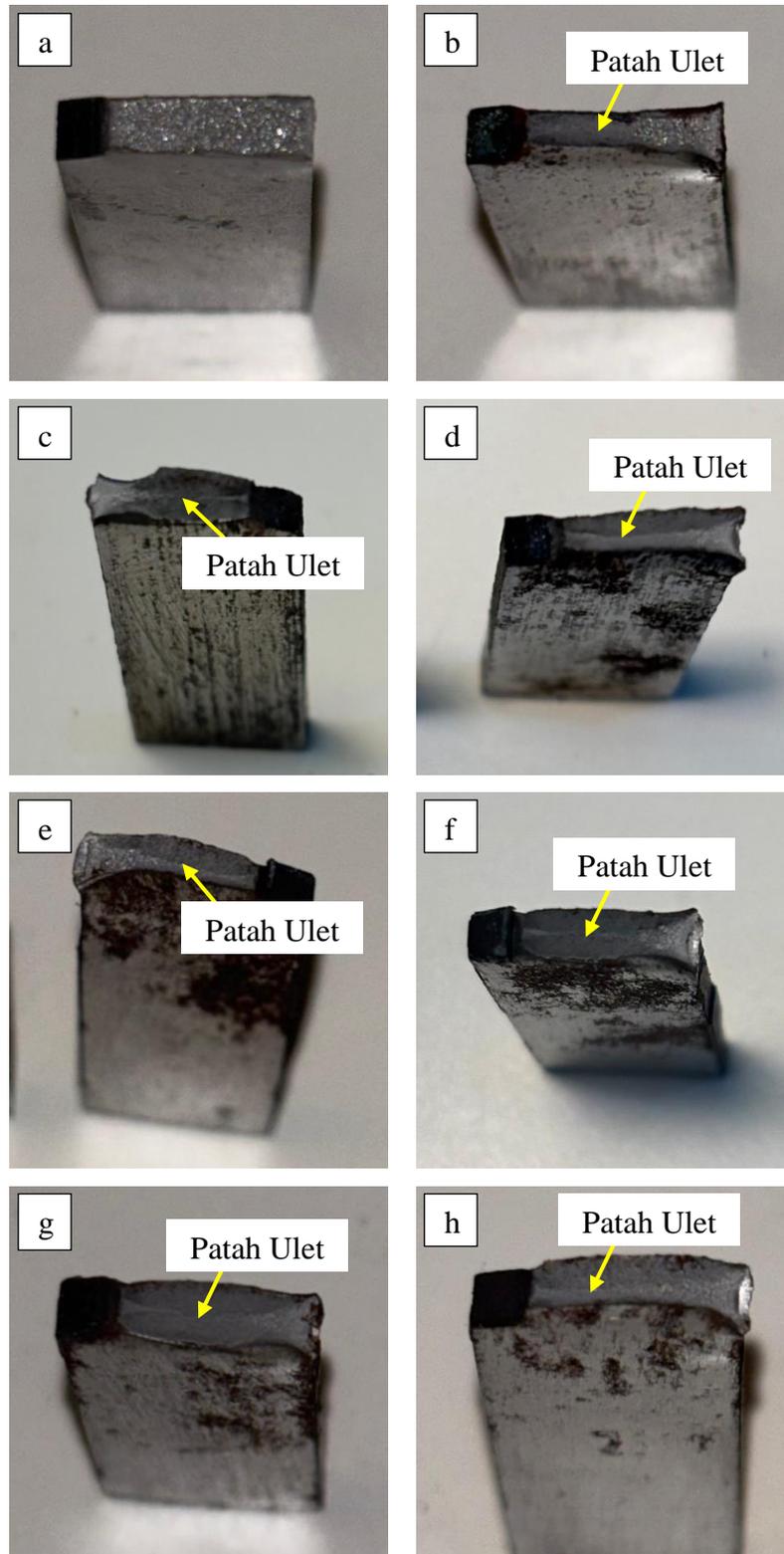


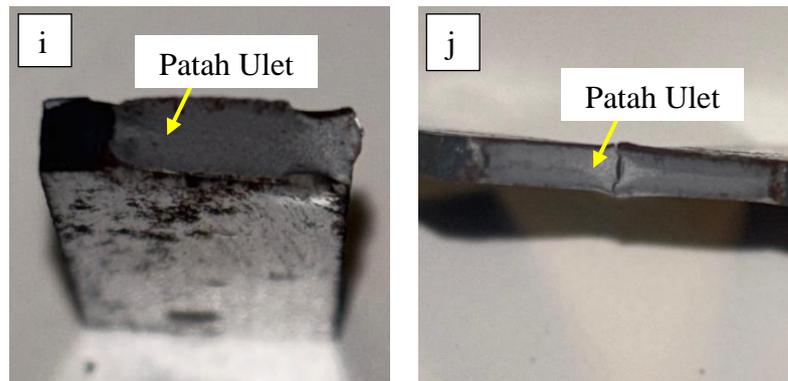
Gambar 4.8 Perpatahan pada setiap Sampel Baja AISI 4140 (a) *As Received*, (b) QP250-5, (c) QP250-10, (d) QP250-15, (e) QP325-5, (f) QP325-10, (g) QP325-15, (h) QP400-5, (i) QP400-10, (j) QP400-15

Selain dari jenis perpatahan pada sampel, untuk mengetahui ketangguhan dari sampel baja AISI 4140 dapat dilihat dari permukaan hasil perpatahannya. Pada gambar 4.9 (a) yaitu sampel baja AISI 4140 *as received* menunjukkan bahwa

permukaan patahan sampel tanpa proses *quenching* dan *partitioning* tidak cukup tangguh ditandai dengan permukaan memantulkan cahaya namun sedikit granular serta tidak adanya *necking* yang membuat energi impact yang diserap oleh sampel baja AISI 4140 *as received* cukup rendah yaitu sebesar 4,36 Joule dibandingkan dengan sampel yang telah melewati proses *quenching* dan *partitioning* menghasilkan sampel yang tangguh seperti pada Gambar 4.9 (j) yaitu sampel baja AISI 4140 dengan temperatur *partitioning* 400°C dan waktu *partitioning* selama 15 menit yang menunjukkan terjadinya patah ulet sehingga sampel memiliki ketangguhan yang tinggi dengan energi impact yang diserap sebesar 19,04 Joule. Menurut penelitian yang telah dilakukan terdapat beberapa jenis patahan dilihat dari permukaan patah material yang terdiri dari patah getas, patah ulet, dan patah campuran. Patah getas dilihat dari permukaan patah yang datar dan mengkilap serta retakan tidak disertai deformasi plastis lalu patah ulet yang dilihat dari permukaan tidak rata, tidak mengkilap, berserat, dan terjadi deformasi plastis pada retakan kemudian patah campuran yang merupakan gabungan patah getas dan patah ulet [33]. Dengan demikian, hubungan antara kekerasan dengan ketangguhan dari baja AISI 4140 dapat dijelaskan melalui kondisi bahwa semakin tinggi kekerasan baja AISI 4140 maka akan menghasilkan patah kurang ulet atau getas karena lebih sedikit energi yang diserap sampel sehingga semakin berkurang ketangguhannya. Sebaliknya, jika kekerasan baja AISI 4140 lebih rendah maka perpatahan yang terjadi bersifat ulet ditandai deformasi plastis berupa “*necking*” atau semakin penyempitan bagian sampel saat sebelum patah sehingga semakin

tinggi ketangguhannya karena lebih banyak menyerap energi dari beban yang diberikan.





Gambar 4.9 Permukaan Pada Perpatahan Sampel Baja AISI 4140 (a) *As Received*, (b) QP250-5, (c) QP250-10, (d) QP250-15, (e) QP325-5, (f) QP325-10, (g) QP325-15, (h) QP400-5, (i) QP400-10, (j) QP400-15

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan mengenai efek proses *quenching* dan *partitioning* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja HSLA maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Waktu *partitioning* memiliki pengaruh terhadap struktur mikro baja AISI 4140 yaitu semakin lama waktu *partitioning* maka persebaran fasa austenit sisa dan martensit merata sehingga meningkatkan sifat kekerasan dan ketangguhan baja AISI 4140. Adapun persebaran fasa austenit sisa tertinggi adalah 45,190% pada temperatur *partitioning* 325°C selama 15 menit yang disebabkan oleh pengaruh kestabilan austenit sisa, seperti temperatur austenitisasi, riwayat deformasi, temperatur *quenching*, temperatur *partitioning* dan waktu *partitioning*.
2. Temperatur *partitioning* memiliki pengaruh terhadap struktur mikro baja AISI 4140 yaitu semakin cepat proses difusi karbon dari martensit menjadi austenit sisa sehingga ukuran butir semakin halus yaitu 1,23 μm pada temperatur *partitioning* 400°C selama 15 menit yang disebabkan oleh pengaruh dari stabilisasi fasa austenit sisa dapat menghambat pertumbuhan butir dan peningkatan laju nukleasi partikel karbida.

3. Proses *quenching* dan *partitioning* dapat meningkatkan kekerasan dan ketangguhan baja AISI 4140 dengan nilai optimal yang diperoleh yaitu 107,12 RHN dan 0,84 J/mm² pada temperatur *partitioning* 400°C selama 10 menit.

5.2 Saran

Adapun saran yang penulis berikan untuk mengembangkan penelitian mengenai efek proses *quenching* dan *partitioning* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja HSLA adalah sebagai berikut.

1. Menggunakan variasi temperatur sampel untuk pengujian impak.
2. Melakukan pengujian ketahanan aus untuk mengetahui hubungannya dengan nilai ketangguhan dan kekerasan pada baja HSLA.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. H. Zhao, Q. K. Xing, J. Y. Wang, S. L. Li, and S. L. Zheng, "Failure and root cause analysis of vehicle drive shaft" *Eng. Fail. Anal.*, vol. 99, no. July 2017, pp. 225–234, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.025.
- [2] Z. Hu, X. Gu, R. Liu, and L. Lin, "Effect of different microstructural design on properties for quenching and partitioning steel with tensile strength of 980MPa" *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2368, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2368/1/012020.
- [3] X. Li, L. Shi, Y. Liu, K. Gan, and C. Liu, "Achieving a desirable combination of mechanical properties in HSLA steel through step quenching" *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 772, no. October, p. 138683, 2020, doi: 10.1016/j.msea.2019.138683.
- [4] M. M. Bilal *et al.*, "Effect of austempering conditions on the microstructure and mechanical properties of AISI 4340 and AISI 4140 steels" *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 5194–5200, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.08.042.
- [5] W. Zhou, Y. Sun, Q. Wang, and L. Ding, "Effect of quenching and partitioning process to low-alloy wear resistant steel" *J. Mater. Res.*, vol. 31, no. 5, pp. 663–669, 2016, doi: 10.1557/jmr.2016.58.
- [6] M. Attributes, "Material Attributes" *Prim. Flat Roll. Second Ed.*, pp. 163–191, 2014, doi: 10.1016/B978-0-08-099418-5.00008-1.
- [7] R. Steadman, *Materials science*, vol. 5, no. 2. 1970.
- [8] L. Lv, L. Fu, S. Ahmad, and A. Shan, "Effect of heavy warm rolling on microstructures and mechanical properties of AISI 4140 steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 704, pp. 469–479, 2017, doi: 10.1016/j.msea.2017.07.089.
- [9] M. K. Banerjee, *Fundamentals of Heat Treating Metals and Alloys*, vol. 2–3. Elsevier Ltd., 2017.
- [10] R. Saputra and E. Tyastomo, "Perbandingan Kekerasan Dan Struktur Mikro Pegas Daun Yang Mengalami Proses Heat Treatment" *Bina Tek.*, vol. 12, no. 2, p. 185, 2017, doi: 10.54378/bt.v12i2.72.
- [11] "Rohmat, Y. N., Endramawan, T., Haris, E., Basori, I., Susetyo, F. B., & Ilmihaqie, D. N. (2022). Analisa Proses Carburizing Baja AISI 4140 terhadap Sifat Mekanik dan Mikrostruktur. In Prosiding Seminar Nasional Terapan Riset.pdf." .
- [12] M. Melih Tecer, "Effects of Various Heat Treatment Procedures on the

- Toughness of Aisi 4140 Low Alloy Steel” *Int. J. Mater. Eng. Technol.*, vol. 003, pp. 131–149, 2020, [Online]. Available: <http://dergipark.gov.tr/tijmet>.
- [13] X. Huang *et al.*, “Study on time-temperature-transformation diagrams of stainless steel using machine-learning approach” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 171, no. September 2019, p. 109282, 2020, doi: 10.1016/j.commatsci.2019.109282.
- [14] Y. AL, N. EA, S. LF, and B. EA, “Annealing and Normalizing of AISI 1045 Steel: A Lamellae Analysis” *Int. J. Metall. Met. Phys.*, vol. 5, no. 2, 2020, doi: 10.35840/2631-5076/9253.
- [15] A. Inam, M. Ishtiaq, M. A. Hafeez, M. H. Hassan, A. Hafeez, and Nawaz, “Quenching and Partitioning of AISI 4340 steel” *J. Fac. Eng. Technol.*, vol. 24(2), no. April, pp. 47–56, 2020, [Online]. Available: <http://journals.pu.edu.pk/journals/index.php/jfet/article/view/1128>.
- [16] M. Masoumi, E. A. A. Echeverri, A. P. Tschiptschin, and H. Goldenstein, “Improvement of wear resistance in a pearlitic rail steel via quenching and partitioning processing” *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-43623-7.
- [17] W. Bleck, X. Guo, and Y. Ma, “The TRIP Effect and Its Application in Cold Formable Sheet Steels” *Steel Res. Int.*, vol. 88, no. 10, pp. 35–45, 2017, doi: 10.1002/srin.201700218.
- [18] M. Thomä and G. Wagner, “Effect of quenching and partitioning heat treatment on the fatigue behavior of 42SiCr Steel” *Metals* 11, no.11, 2021.
- [19] A. Alhamidi, “Proses Quenching and Partitioning Terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon Medium,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 15, no. 2, p. 118, 2020, doi: 10.32497/jrm.v15i2.1869.
- [20] P. K. Kantanen, V. Javaheri, M. C. Somani, D. A. Porter, and J. I. Kömi, “Effect of deformation and grain size on austenite decomposition during quenching and partitioning of (high) silicon-aluminum steels” *Mater. Charact.*, vol. 171, 2021, doi: 10.1016/j.matchar.2020.110793.
- [21] R. N. Penha, Y. Francisco, and S. Marins, “Quenching and partitioning heat treatment : the third generation of advanced high- strength steel Tratamento térmico de têmpera e partição : terceira geração dos aços avançados de alta resistência Tratamiento térmico de temple y partición : tercera genera” vol. 2022, pp. 1–10, 2022.
- [22] J. G. Speer, A. M. Streicher, D. K. Matlock, F. Rizzo, and G. Krauss, “Quenching and partitioning: A fundamentally new process to create high strength trip sheet microstructures” *Mater. Sci. Technol. 2003 Meet.*, pp.

505–522, 2003.

- [23] M. Belfi *et al.*, “On the Strain Hardening and Tensile Properties of AISI 4140 Steel via Single-Step Quenching and Partitioning Treatments” *Steel Res. Int.*, vol. 2400513, 2024, doi: 10.1002/srin.202400513.
- [24] J. Wang and S. V. A. N. D. E. R. Zwaag, “Stabilization Mechanisms of Retained Austenite in Transformation-Induced Plasticity Steel” vol. 32, no. June, pp. 1527–1539, 2001.
- [25] C. Celada-Casero, C. Kwakernaak, J. Sietsma, and M. J. Santofimia, “The influence of the austenite grain size on the microstructural development during quenching and partitioning processing of a low-carbon steel” *Mater. Des.*, vol. 178, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.107847.
- [26] K. Ren, Y. Kang, and S. Zhu, “Effect of partitioning time on the microstructure and mechanical properties of Q&P steels” *Mater. Sci. Forum*, vol. 749, pp. 303–307, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.749.303.
- [27] G. Luo, H. Li, Y. Li, and J. Mo, “Microstructures and properties of a low-carbon-chromium ferritic stainless steel treated by a quenching and partitioning process”, *Materials* 12, no. 10, 2019.
- [28] E. Tkachev, S. Borisov, Y. Borisova, T. Kniaziuk, and R. Kaibyshev, “Relationships between Strength, Ductility and Fracture Toughness in a 0.33C Steel after Quenching and Partitioning (Q&P) Treatment,” *Crystals*, vol. 13, no. 10, 2023, doi: 10.3390/cryst13101431.
- [29] E. Paravicini Bagliani, M. J. Santofimia, L. Zhao, J. Sietsma, and E. Anelli, “Microstructure, tensile and toughness properties after quenching and partitioning treatments of a medium-carbon steel,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 559, pp. 486–495, 2013, doi: 10.1016/j.msea.2012.08.130.
- [30] A. Almasi, A. Kianvash, and A. Tutunchi, “Effects of Partitioning Time and Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of a High Strength Microalloyed Steel,” *Metallogr. Microstruct. Anal.*, vol. 10, no. 4, pp. 525–533, 2021, doi: 10.1007/s13632-021-00762-6.
- [31] C. Jing, D. Ye, J. Zhao, T. Lin, C. Wu, and Q. Lei, “Effect of hot stamping and quenching & partitioning process on microstructure and mechanical properties of ultra-high strength steel,” *Mater. Res. Express*, vol. 8, no. 3, p. 36506, 2021, doi: 10.1088/2053-1591/abe976.
- [32] Z. R. Hou and X. M. Zhao, “Enhanced Stability of Retained Austenite by Quenching and Double Partitioning Process,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 281, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/281/1/012037.

- [33] S. Sunarno and Z. Zainuddin, “Impact Test Analysis on Steel Metal Materials and Aluminum,” *J. Soc. Res.*, vol. 2, no. 7, pp. 2378–2392, 2023, doi: 10.55324/josr.v2i7.1198.

LAMPIRAN A
CONTOH PERHITUNGAN

Lampiran A. Contoh Perhitungan

1. Perhitungan Ukuran Butir *ImageJ*

a. *Quenching & Partitioning* 250°C selama 5 Menit (QP250-5)

$$\text{Ukuran Butir 1} = \frac{116}{47} = 2,46 \mu\text{m}$$

$$\text{Ukuran Butir 2} = \frac{116}{51} = 2,27 \mu\text{m}$$

$$\text{Ukuran Butir 1} = \frac{116}{50} = 2,32 \mu\text{m}$$

$$\text{Rata-rata ukuran butir} = \frac{2,46 + 2,27 + 2,32}{3} = 2,35 \mu\text{m}$$

2. Perhitungan nilai rata-rata uji kekerasan (RHN)

a. *As Received*

$$\text{As Received} = \frac{104+106+106,2+105,3+104,2}{5} = 105,28 \text{ RHN}$$

b. *Quenching & Partitioning* 250°C selama 5 Menit (QP250-5)

$$\text{QP250-5} = \frac{101,6+105,6+106+105,3+98,6}{5} = 103,44 \text{ RHN}$$

c. *Quenching & Partitioning* 250°C selama 10 Menit (QP250-10)

$$\text{QP250-10} = \frac{97,6+95,6+105,2+106,3+103,2}{5} = 101,58 \text{ RHN}$$

d. *Quenching & Partitioning* 250°C selama 15 Menit (QP250-15)

$$\text{QP250-15} = \frac{95,3+91,4+103,5+102,2+107,8}{5} = 100,04 \text{ RHN}$$

e. *Quenching & Partitioning* 325°C selama 5 Menit (QP325-5)

$$QP325-5 = \frac{100,3+100,7+103,6+101,9+102,4}{5} = 101,78 \text{ RHN}$$

f. *Quenching & Partitioning* 325°C selama 10 Menit (QP325-10)

$$QP325-10 = \frac{98,1+101+102+101,4+103}{5} = 101,1 \text{ RHN}$$

g. *Quenching & Partitioning* 325°C selama 15 Menit (QP325-15)

$$QP325-15 = \frac{103,4+104,4+97,5+97,4+93,3}{5} = 99,2 \text{ RHN}$$

h. *Quenching & Partitioning* 400°C selama 5 Menit (QP400-5)

$$QP400-5 = \frac{109,4+108,7+109,3+109,7+104,6}{5} = 108,34 \text{ RHN}$$

i. *Quenching & Partitioning* 400°C selama 10 Menit (QP400-10)

$$QP400-10 = \frac{106,7+107,9+107,8+106,5+106,7}{5} = 107,12 \text{ RHN}$$

j. *Quenching & Partitioning* 400°C selama 15 Menit (QP400-15)

$$QP400-15 = \frac{105,1+105,7+108,4+106,3+105,1}{5} = 106,12 \text{ RHN}$$

3. Perhitungan Harga Impak (J/mm^2)

$$\text{Luas Penampang} = 2,5 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} = 20 \text{ mm}^2$$

$$\text{Harga Impak (HI)} = \frac{\text{Energi (J)}}{\text{Luas Penampang (mm}^2\text{)}}$$

a. *As Received*

$$NQP = \frac{4,36 \text{ J}}{20 \text{ mm}^2} = 0,218 \text{ J}/\text{mm}^2$$

b. *Quenching & Partitioning* 250°C selama 5 Menit (QP250-5)

$$QP250-5 = \frac{13,81 \text{ J}}{20 \text{ mm}^2} = 0,6905 \text{ J/mm}^2$$

c. *Quenching & Partitioning* 250°C selama 10 Menit (QP250-10)

$$QP250-10 = \frac{15,53 \text{ J}}{20 \text{ mm}^2} = 0,7765 \text{ J/mm}^2$$

d. *Quenching & Partitioning* 250°C selama 15 Menit (QP250-15)

$$QP250-15 = \frac{16,84 \text{ J}}{20 \text{ mm}^2} = 0,842 \text{ J/mm}^2$$

e. *Quenching & Partitioning* 325°C selama 5 Menit (QP325-5)

$$QP325-5 = \frac{16,40 \text{ J}}{20 \text{ mm}^2} = 0,82 \text{ J/mm}^2$$

f. *Quenching & Partitioning* 325°C selama 10 Menit (QP325-10)

$$QP325-10 = \frac{17,71 \text{ J}}{20 \text{ mm}^2} = 0,8855 \text{ J/mm}^2$$

g. *Quenching & Partitioning* 325°C selama 15 Menit (QP325-15)

$$QP325-15 = \frac{19,04 \text{ J}}{20 \text{ mm}^2} = 0,952 \text{ J/mm}^2$$

h. *Quenching & Partitioning* 400°C selama 5 Menit (QP400-5)

$$QP400-5 = \frac{15,53 \text{ J}}{20 \text{ mm}^2} = 0,7765 \text{ J/mm}^2$$

i. *Quenching & Partitioning* 400°C selama 10 Menit (QP400-10)

$$QP400-10 = \frac{16,84 \text{ J}}{20 \text{ mm}^2} = 0,842 \text{ J/mm}^2$$

j. *Quenching & Partitioning* 400°C selama 15 Menit (QP400-15)

$$\text{QP400-15} = \frac{18,15 \text{ J}}{20 \text{ mm}^2} = 0,9075 \text{ J/mm}^2$$

LAMPIRAN B
DATA PENELITIAN

Lampiran B. Data Penelitian

1. Data Karakteristik Material Baja AISI 4140

BESTEEL **SeAH Besteel Corp.**
1-6, SORYONG-DONG, KUNSAN,
CHEONGBUK, KOREA(573-711)

MILL CERTIFICATE

TEL : +82-(0)63-460-8572, 8318(QA)
+82-(0)63-460-8114(Repres.)
FAX : +82-(0)63-460-8423 Page(0/0)

Date : 2019-01-11
Cert. No. : 201901-039434
Customer :
Heat No. : 286991

Steel Grade : AISI 4140/SCM 440
Shape of Product : ROUND BAR
Delivery Condition : As Rolled

Size (mm) : 16 - 600
Length (mm) : 6,000
Weight (kg) :
Quantity(pcs) : 1

Inspection Items	Chemical Composition (wt. %)								
	C	SI	MN	P	S	CU	NI	CR	MO
	x 100	x 100	x 100	x 100	x 100	x 100	x 1000	x 1000	x 100
Spec.	Min.	38	15	75				80	15
	Max.	43	35	100	35	20		110	25
	Result	41	25	67	16	20	25	103	15

Inspection Items	Product Hardness (HB)		
	SURFACE	255-273 HB	50-52 HRC

Mechanical Properties AISI 4140/SCM 440

Mechanical Properties	Symbol	Steel
Yield strength (N/mm ²)		≥739
Tensile Strength (N/mm ²)		≥892
Extension ratio (%)		≥18.2
Area reduction (%)		≥63
Impact (V)		87 - 88

<<Remarks>>

B/DS : 4

End of report

<p>We hereby certify that the material described herein has been made in accordance with the rules of the contract.</p>	<p>Certified by <i>O. Y. Cho</i> Manager of Quality Assurance Dept.</p>
---	---

Gambar B.1 Sertifikat Baja AISI 4140

2. Data Hasil Uji Impak Menggunakan Metode Charpy

DETECH
Material Testing Laboratory

TESTING REPORT

Customer : Dwi Rahayu
Address : UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
Total of Page : 1 of 1
Date of Received : December 2, 2024
Date of Tested : December 2, 2024

Object to be Tested : Sample
Location of Performance : PT Detech Profesional Indonesia

Client's Description of Sample
Material Type/Grade : AISI 4140
Material Size : -
Heat No. : -
Testing Purpose : Material Testing
Sample Marking : -

Environment Temp : 25 ± 2 °C
Type of Test : Charpy Impact Test (Charpy V-Notch)
Test Method : ASTM E23-23a
Reference Code : -

Specimen Size (mm)	Test Temp (°C)	Sample Orientation
2.5 x 10 x 55	25	-

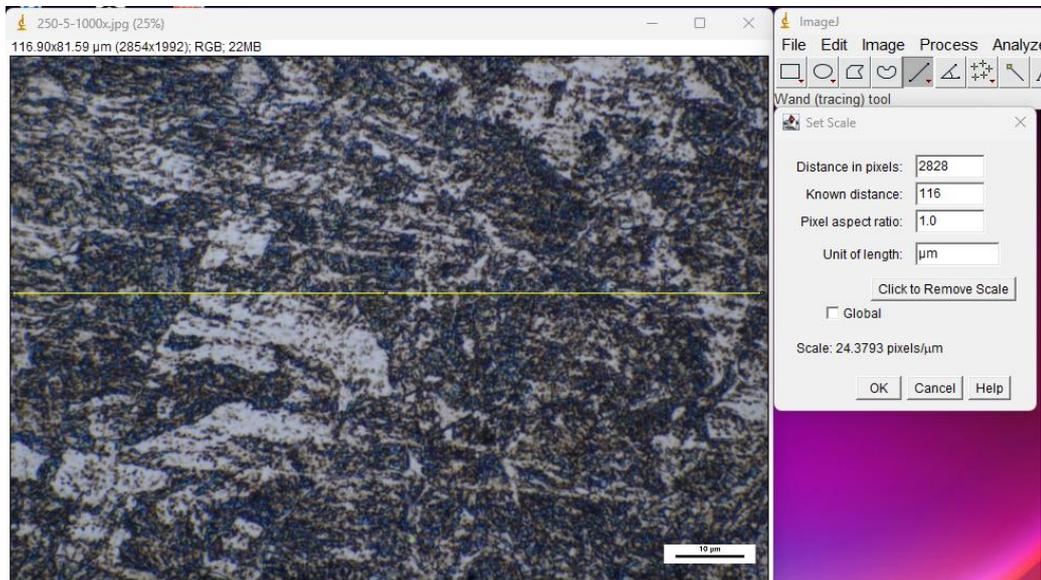
No.	V-Notch Position	Impact Value Specimen (J)	Average (J)	Lateral Expansion (mm)	Remarks
1	Non HT	4.36	-	-	-
2	Partitioning 250°C, 5 menit	13.81	-	-	-
3	Partitioning 250°C, 10 menit	15.53	-	-	-
4	Partitioning 250°C, 15 menit	16.84	-	-	-
5	Partitioning 325°C, 5 menit	16.40	-	-	-
6	Partitioning 325°C, 10 menit	17.71	-	-	-
7	Partitioning 325°C, 15 menit	19.04	-	-	-
8	Partitioning 400°C, 5 menit	15.53	-	-	-
9	Partitioning 400°C, 10 menit	16.84	-	-	-
10	Partitioning 400°C, 15 menit	18.15	-	-	-

Testing Machine Used : Charpy Impact Tester, Model : HT-8041A, S/N : 7472
Remarks : -

Test Conducted by : Muhammad Baihaqi, S.T
Witnessed By : -

Gambar B.2 Data Hasil Pengujian Impak

3. Menghitung Ukuran Butir dari *Software ImageJ*



Gambar B.3 Ukuran Butir *Software ImageJ*

4. Data Ukuran Butir Struktur Mikro Baja 4140

Tabel B.1 Data Ukuran Butir Struktur Mikro Baja 4140

Sampel	Ukuran Butir (μm)	Rata-rata Ukuran Butir (μm)
QP250-5	2,46	2,35
	2,27	
	2,32	
QP250-10	2,32	2,16
	2,10	
	2,07	
QP250-15	1,43	1,54
	1,57	
	1,64	
QP325-5	2,85	2,64
	2,23	
	2,85	

Tabel B.1 Tabel Lanjutan

Sampel	Ukuran Butir (μm)	Rata-rata Ukuran Butir (μm)
QP325-10	1,54	1,65
	1,77	
	1,66	
QP325-15	1,40	1,38
	1,35	
	1,41	
	2,10	
QP400-5	1,93	1,97
	1,90	
	1,49	
QP400-10	1,57	1,51
	1,47	
	1,22	
QP400-15	1,20	1,23
	1,28	

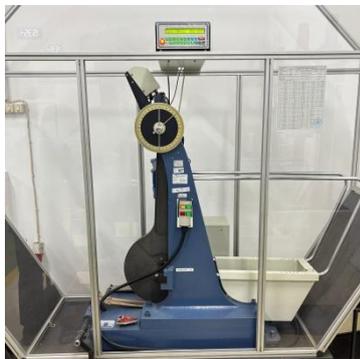
LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN



Gambar C.1 Air



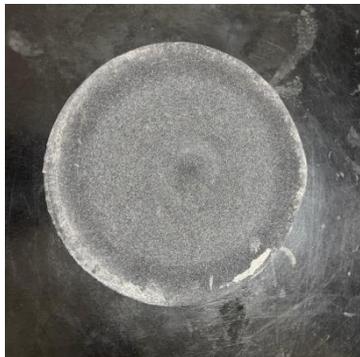
Gambar C.2 Alat Pelindung Diri



Gambar C.3 Alat Uji Impak



Gambar C.4 Alat Uji Kekerasan



Gambar C.5 Ampelas



Gambar C.6 Aquades



Gambar C.7 Baja AISI 4140



Gambar C.8 Ember



Gambar C.9 *Furnace*



Gambar C.10 *Nabertherm Furnace*



Gambar C.11 *Gelas Beker*



Gambar C.12 *Hair Dryer*



Gambar C.13 *Krusibel*



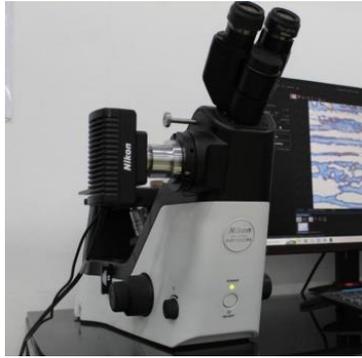
Gambar C.14 *Larutan Asam Nitrat (HNO₃)*



Gambar C.15 *Mesin Grinding dan Polishing*



Gambar C.16 *Metal Polish*



Gambar C.17 Mikroskop Optik



Gambar C.18 Oli



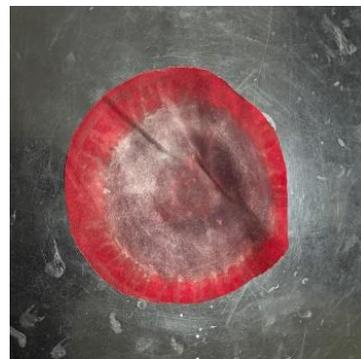
Gambar C.19 Oven



Gambar C.20 Tang Penjepit



Gambar C.21 Thermogun



Gambar C.22 WoolPolish



Gambar C.23 Resin



Gambar C.24 Katalis