

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

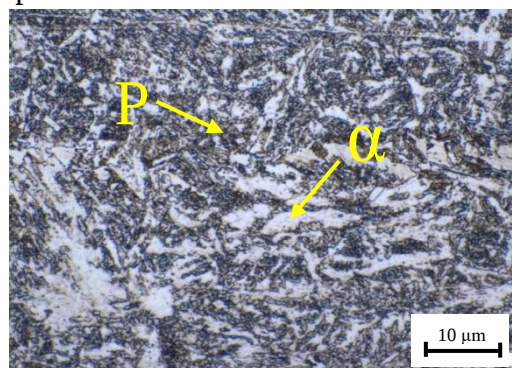
Pada Tabel 4.1 menunjukkan komposisi kimia yang terkandung dalam baja AISI 4140 *as received* sehingga mempengaruhi sifat mekanik yang dimilikinya. Berdasarkan kandungan unsur karbonnya, baja AISI 4140 *as received* mengandung kadar karbon yang sedang yaitu sebesar 0,41% dengan penambahan unsur padu 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>	<i>Hasil Pengujian</i>
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.



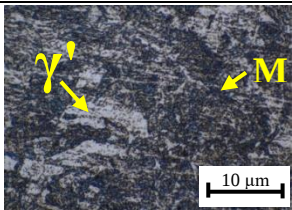
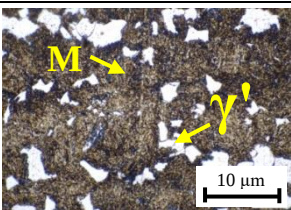
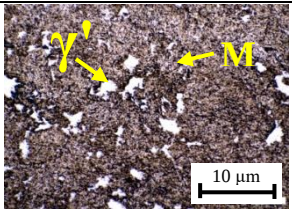
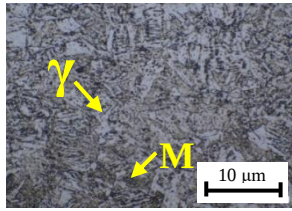
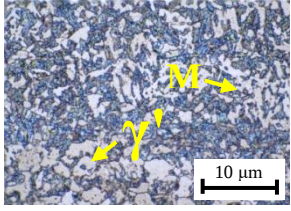
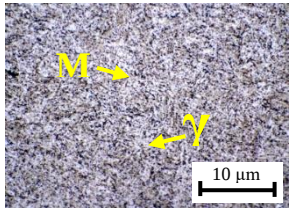
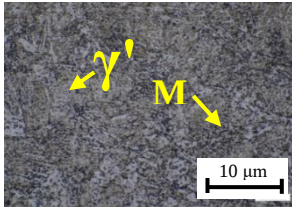
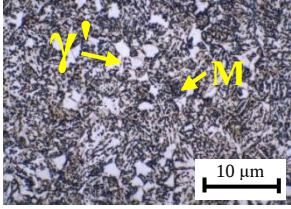
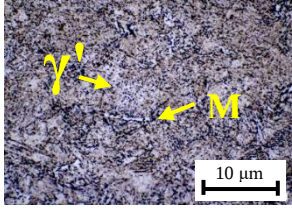
Gambar 4.1 Struktur Mikro Baja AISI 4140 *as received*

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

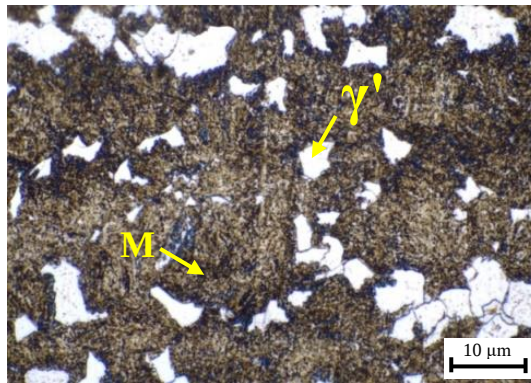
menggunakan media air mencapai temperatur ruang akan menghasilkan martensit dengan sifat yang lebih keras. Fasa-fasa yang dihasilkan tersebut dapat diidentifikasi melalui warna dan bentuknya, yaitu fasa austenit sisa (γ') berwarna putih sedangkan fasa martensit (M) berwarna hitam.

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			

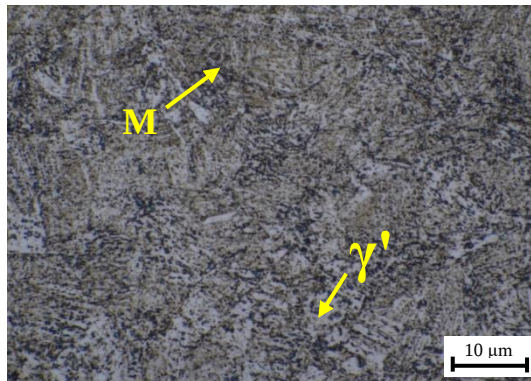
Pada gambar yang tertera di Tabel 4.3 dapat dianalisa bahwa terdapat parameter yang mempengaruhi struktur mikro akhir setelah dilakukan proses *quenching* dan *partitioning* sampel baja AISI 4140 yaitu meliputi parameter temperatur *partitioning* dan waktu *partitioning*. Mengutip dari penelitian sebelumnya 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* (M_f) 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

T_p / 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

$T_p \backslash t$	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.

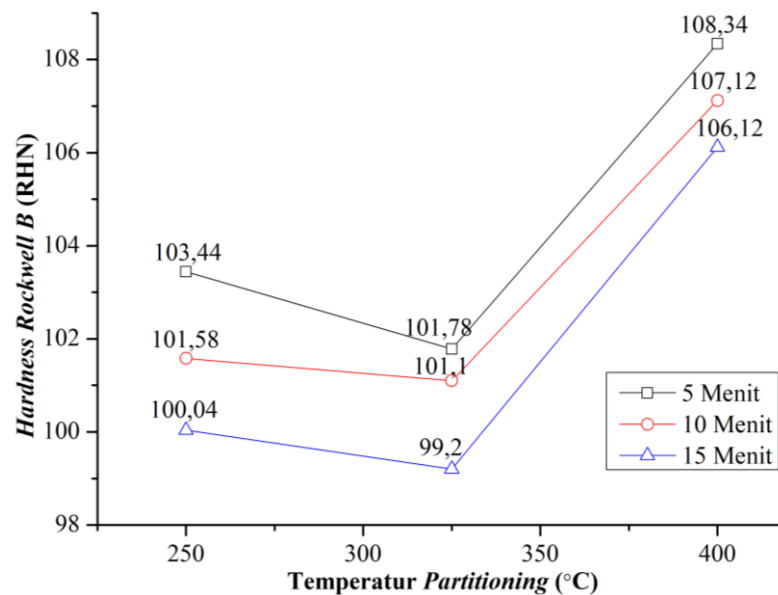
Tabel 4.6 Data Hasil Pengujian Kekerasan Sampel Baja AISI 4140

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

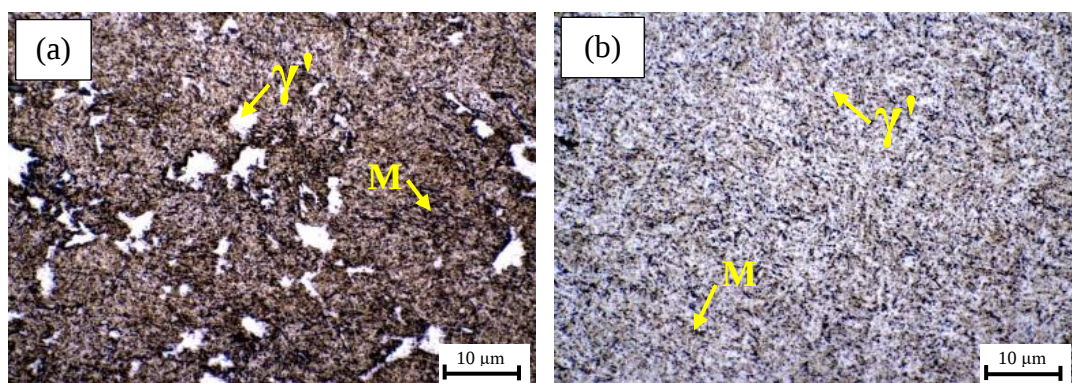
Nilai pengujian kekerasan yang dihasilkan pada Tabel 4.5 dapat disajikan melalui grafik hubungan antara nilai kekerasan terhadap variasi temperatur dan waktu tahan *partitioning* yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.4. Grafik tersebut menunjukkan bahwa diperoleh grafik garis yang fluktuatif 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*.

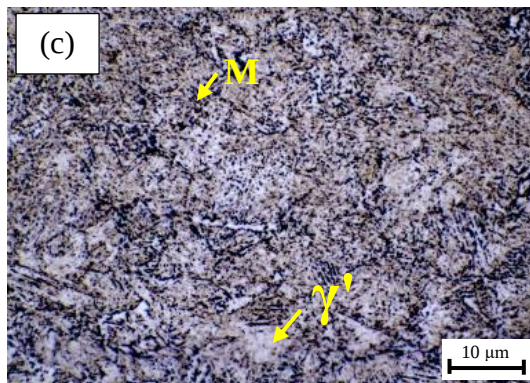


Gambar 4.4 Pengaruh Temperatur dan Waktu *Partitioning* Terhadap Nilai Kekerasan Sampel Baja AISI 4140

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

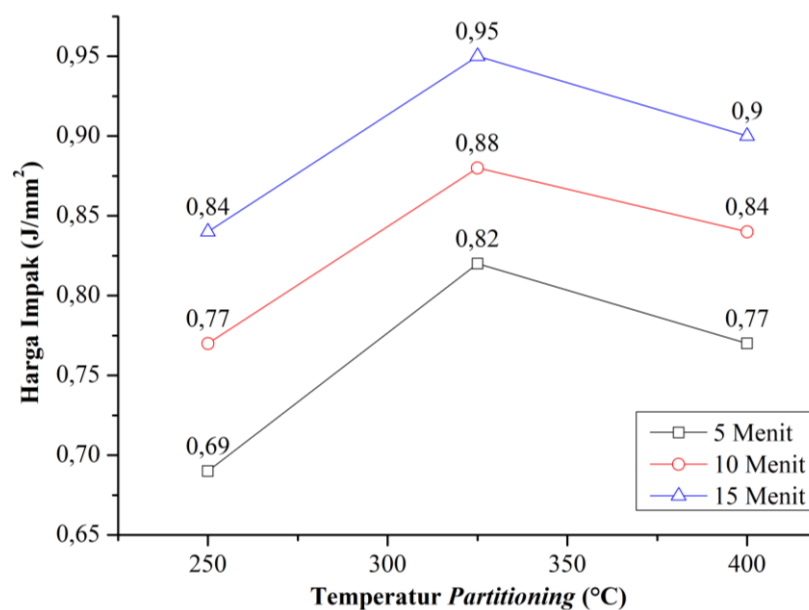
pengujian impak pada setiap sampel yang telah melewati proses *quenching* dan *partitioning* dengan parameter variasi yang berbeda-beda maka akan didapatkan hasil berupa nilai energi yang diserap dari setiap sampel serta menandakan seberapa tangguh sampel baja AISI 4140 saat menerima beban kejut. Berikut 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/mm ²)
<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 impact mengalami peningkatan diikuti penurunan harga impact pada saat temperatur *partitioning* 400°C. Adapun nilai impact tertinggi diperoleh pada temperatur 325°C dengan waktu tahan selama 15 menit yaitu sebesar 0,952 J/mm². Sedangkan, nilai impact terendah diperoleh pada temperatur 250°C dengan waktu tahan selama 5 menit. Hasil yang didapat dari pengujian impact tersebut berbanding terbalik dengan hasil yang didapat dari pengujian kekerasan.

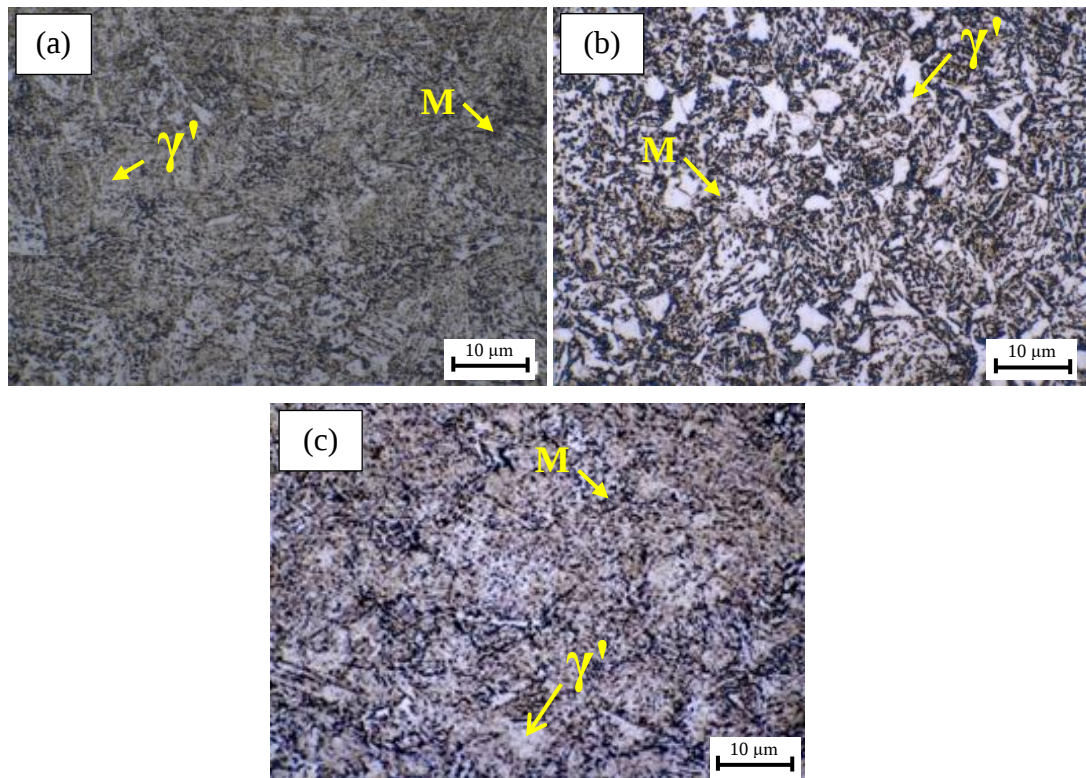


Gambar 4.6 Pengaruh Temperatur dan Waktu *Partitioning* terhadap Harga Impact Sampel Baja AISI 4140

Nilai harga impact dari hasil pengujian impact yang diperoleh dipengaruhi oleh parameter temperatur *partitioning* dan waktu *partitioning* sehingga terjadi peningkatan serta penurunan nilai harga impact. 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

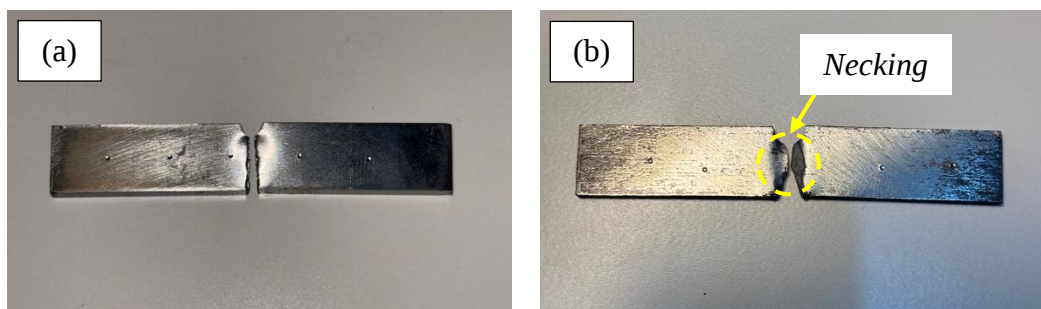
detik diperoleh fraksi volume austenit sisa sedikit lebih rendah dibandingkan dengan yang diperoleh pada temperatur 470°C selama 60 detik sehingga terjadi penurunan yang signifikan pada kandungan austenit sisa akibat dimulainya presipitasi karbida [29]. Lalu, pada penelitian sebelumnya yang memperoleh penurunan nilai elongasi saat temperatur *partitioning* divariasi 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].

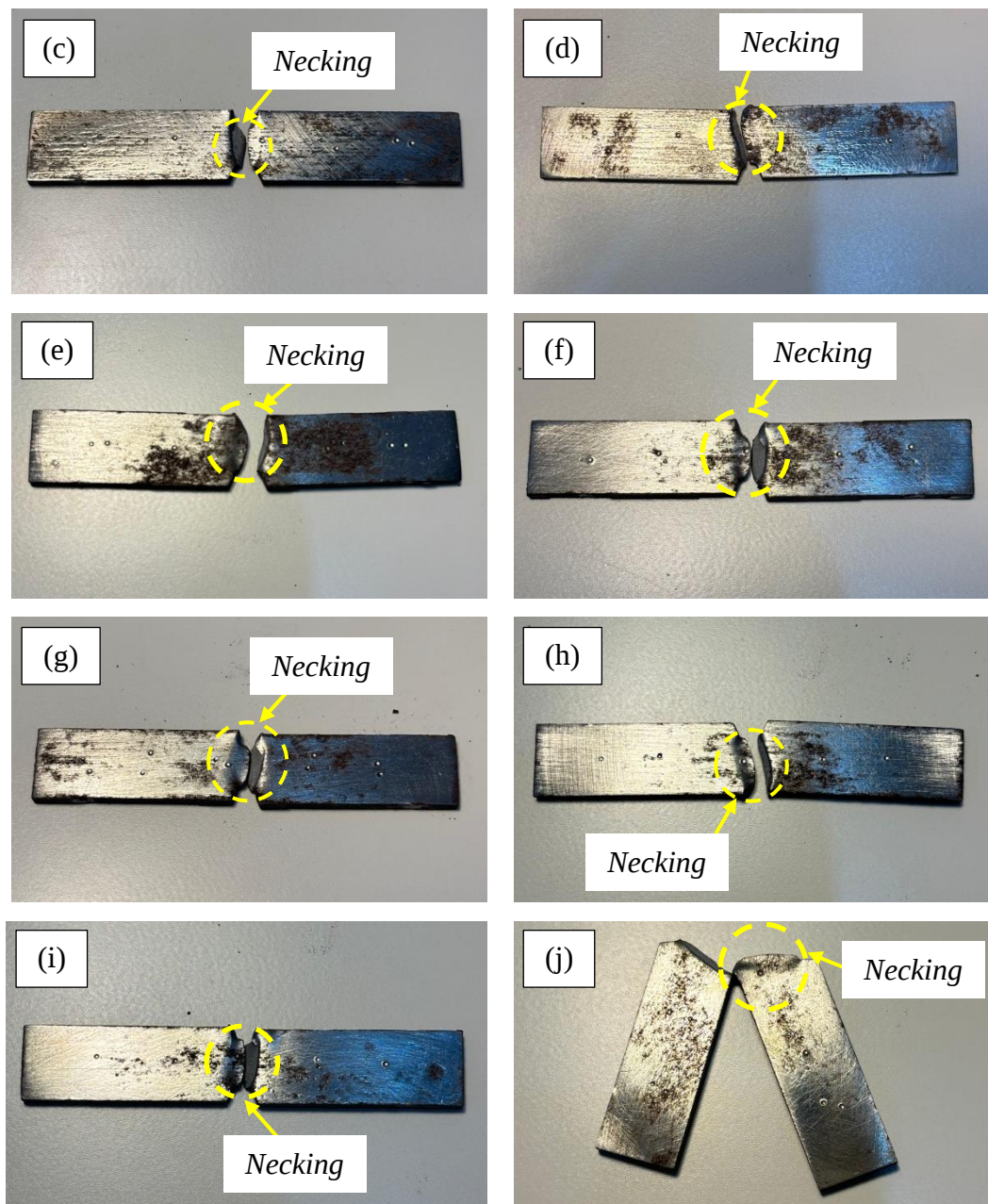


Gambar 4.7 Struktur Mikro Baja AISI 4140 (a) QP250-15, (b) QP325-15, dan (c) QP400-15

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].



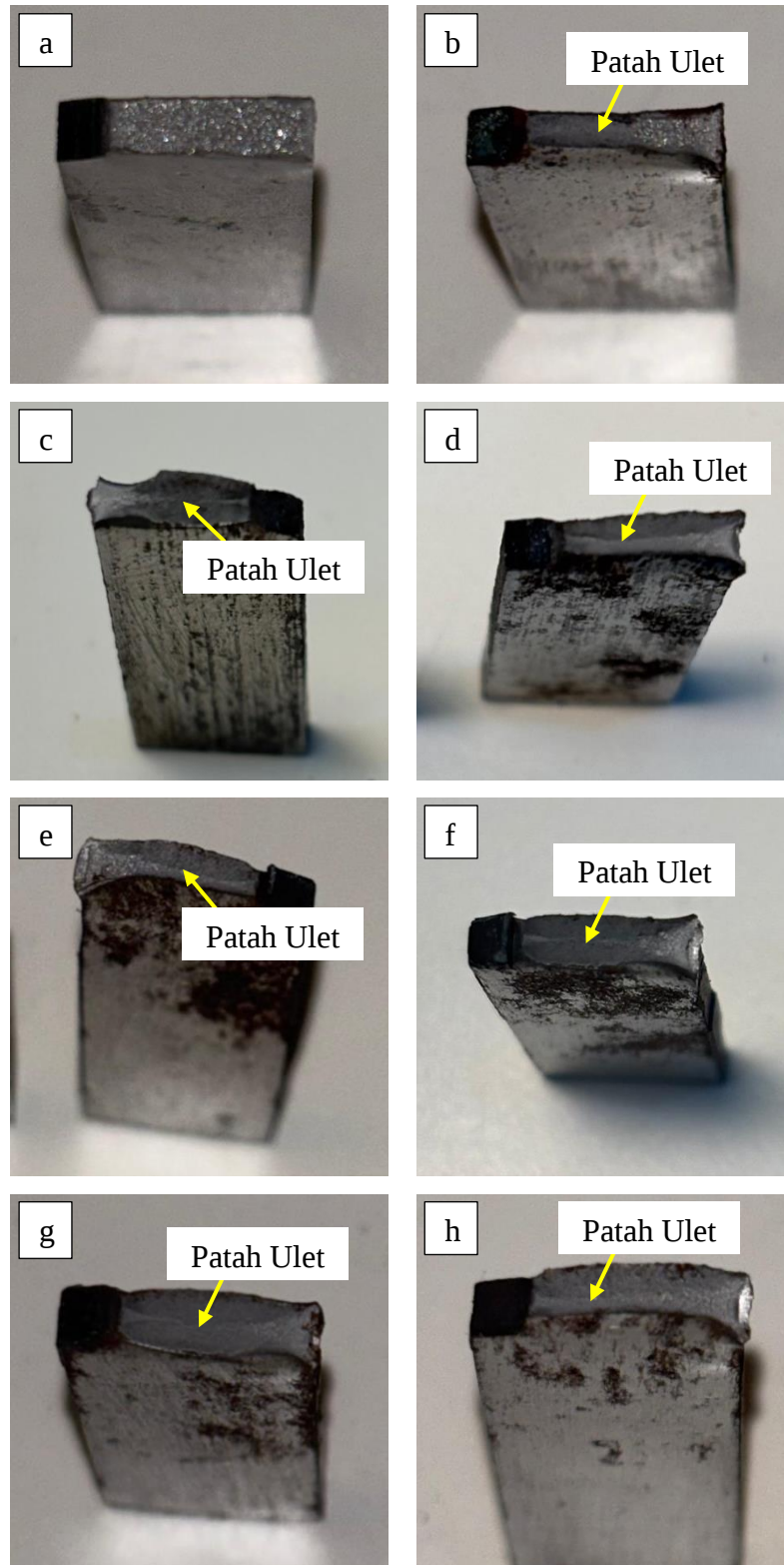


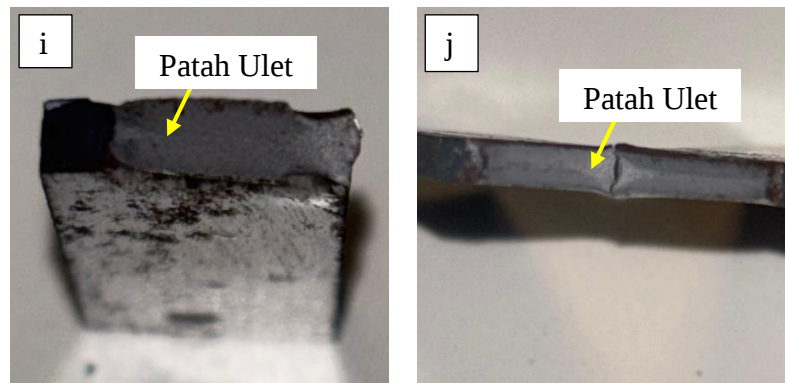
Gambar 4.8 Perpatahan pada setiap Sampel Baja AISI 4140 (a) *As Received*, (b) QP250-5, (c) QP250-10, (d) QP250-15, (e) QP325-5, (f) QP325-10, (g) QP325-15, (h) QP400-5, (i) QP400-10, (j) QP400-15

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