

## **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]

<b>AISI/SAE atau ASTM</b>	<b><i>Tensile Strength</i> [MPa (ksi)]</b>	<b><i>Yield Strength</i> [MPa (ksi)]</b>	<b><i>Ductility</i> [%EL di 50 mm]</b>	<b>Aplikasi</b>
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

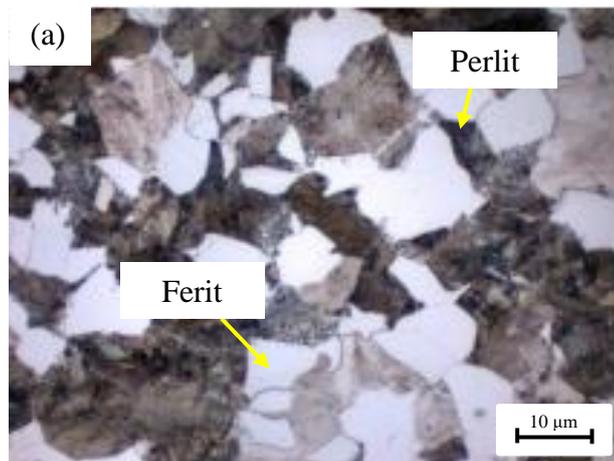
## 2.2 Baja AISI 4140

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



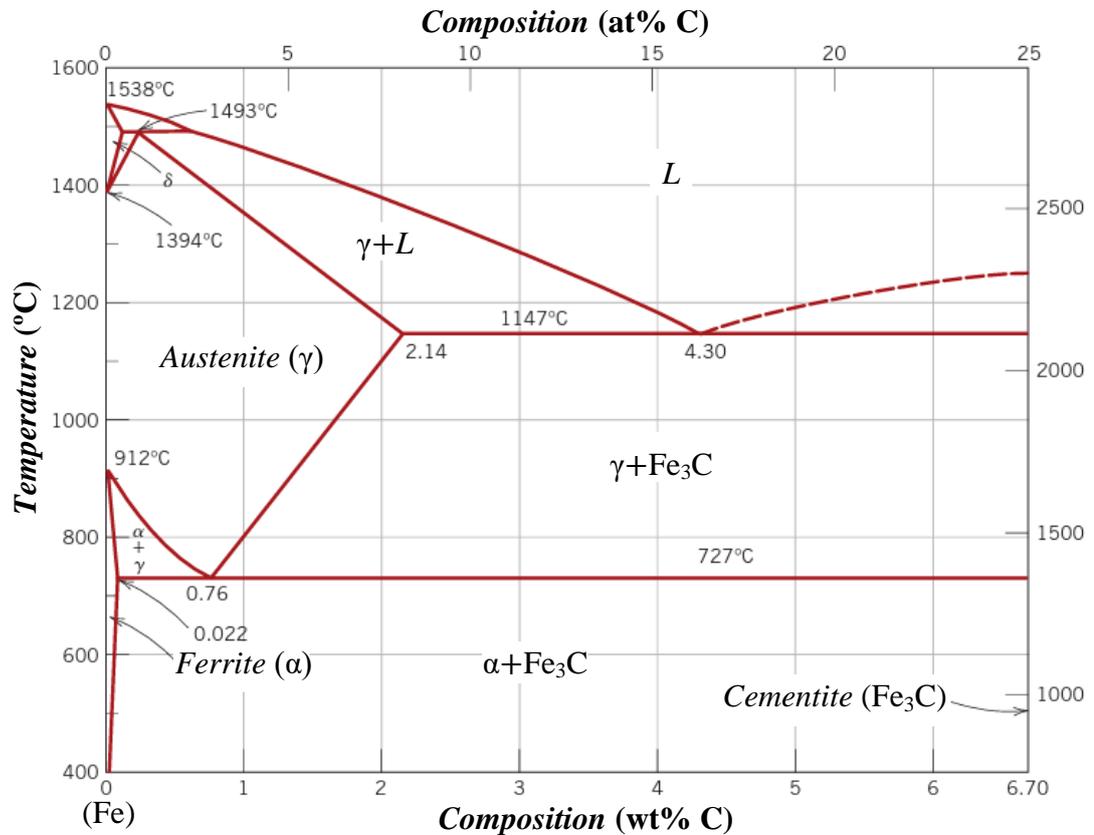
**Gambar 2.1** Struktur Mikro Baja AISI 4140 tanpa Perlakuan Panas [8]

### 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].

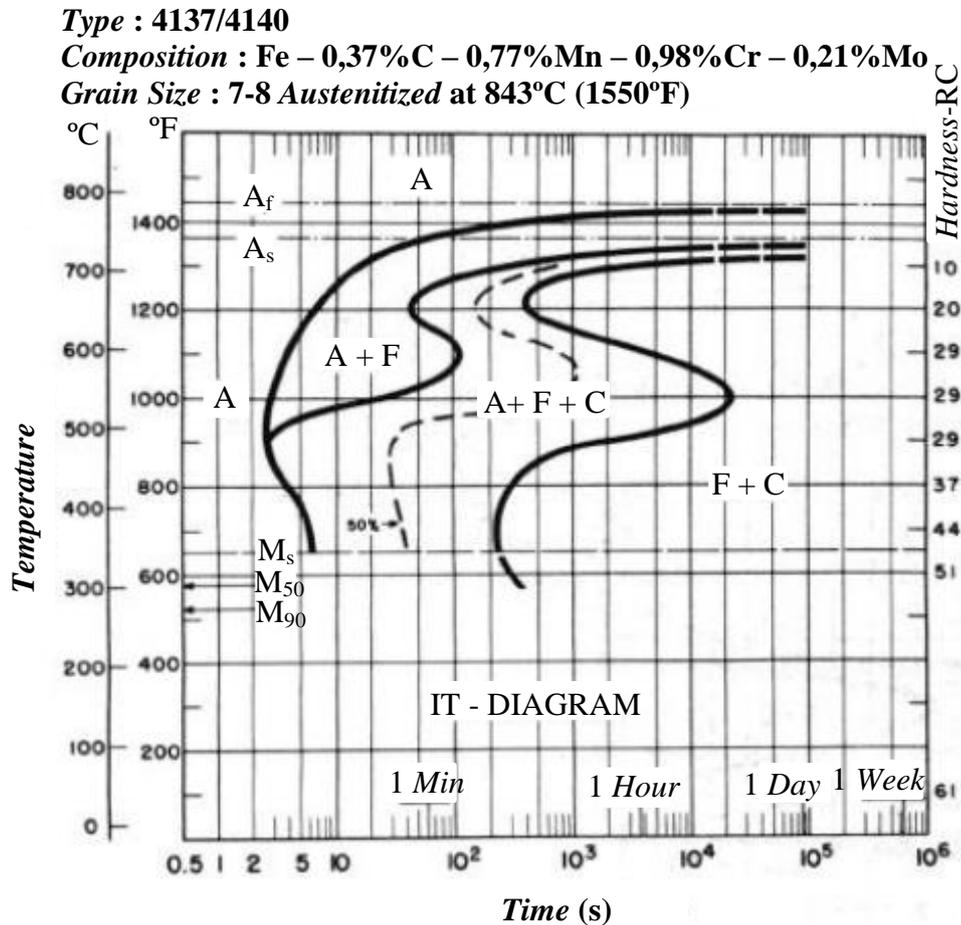
Pada baja karbon, komposisi unsur karbon akan menentukan temperatur pemanasan serta struktur mikro yang terbentuk. Hubungan antara kandungan karbon dengan temperatur dinyatakan dalam diagram kesetimbangan Fe-Fe<sub>3</sub>C. Diagram kesetimbangan Fe-Fe<sub>3</sub>C atau diagram fasa merupakan diagram 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-Fe<sub>3</sub>C yaitu, perubahan fasa ferit ( $\alpha$ ), austenit ( $\gamma$ ), sementit (Fe<sub>3</sub>C), perlit, dan martensit [10].



**Gambar 2.2** Diagram Kesetimbangan Fe-Fe<sub>3</sub>C [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*

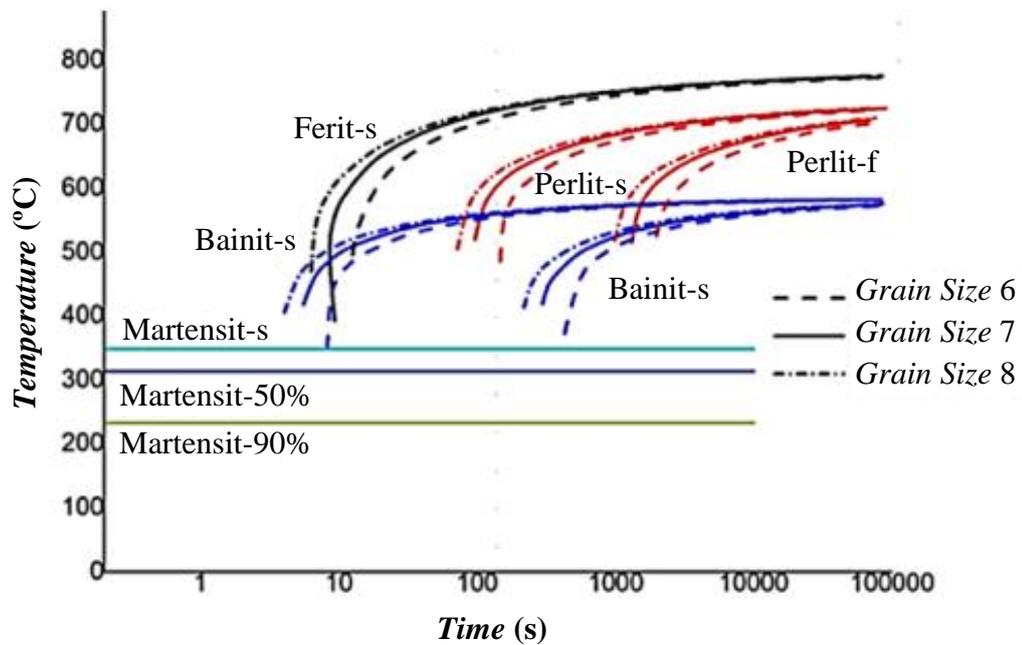
*transformation* (TTT) dan diagram transformasi pendinginan kontinyu atau *continuous cooling transformation* (CCT) [11].



**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.

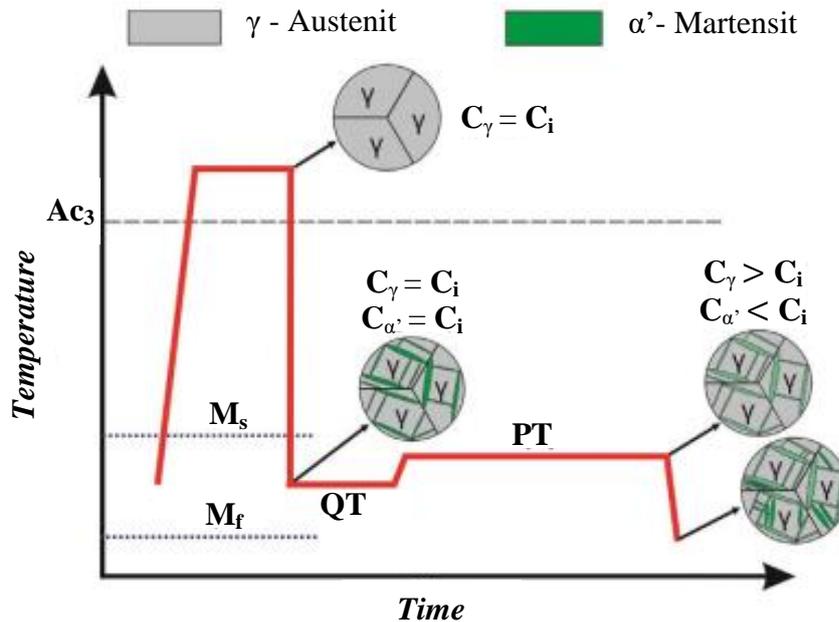


**Gambar 2.4** Diagram CCT Baja AISI 4140 Berdasarkan *Grain Size* [12]

#### 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

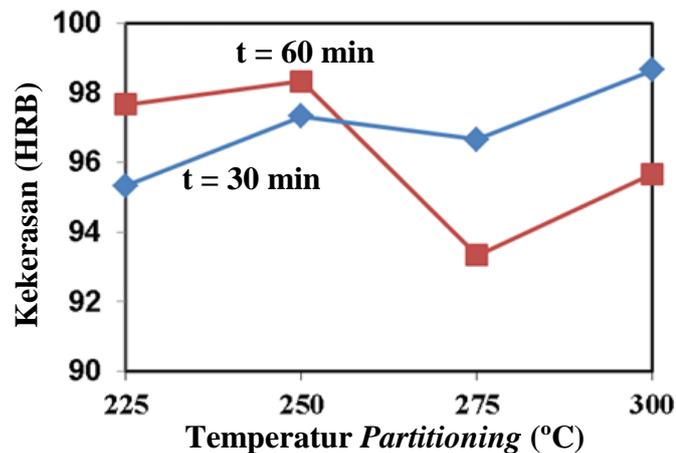
panas yang inovatif yaitu proses *quenching* dan *partitioning*. Pada mulanya, proses *quenching* dan *partitioning* diperkenalkan oleh J. G. Speer pada tahun 2003 yang bertujuan untuk meningkatkan sifat ketangguhan dan kekuatan yang lebih baik dengan biaya yang rendah sehingga dinilai lebih efektif [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]

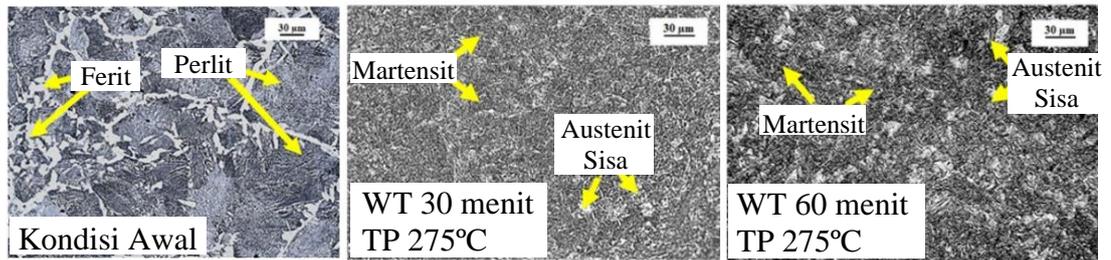
Proses *quenching* dan *partitioning* sangat mempengaruhi sifat mekanik material terutama dapat meningkatkan kekuatan tarik mencapai 2000 MPa dan elongasi mencapai 15%. Selain itu, stabilitas austenit sisa hasil dari proses *quenching* dan *partitioning* dipengaruhi oleh komposisi kimia yang terkandung 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].



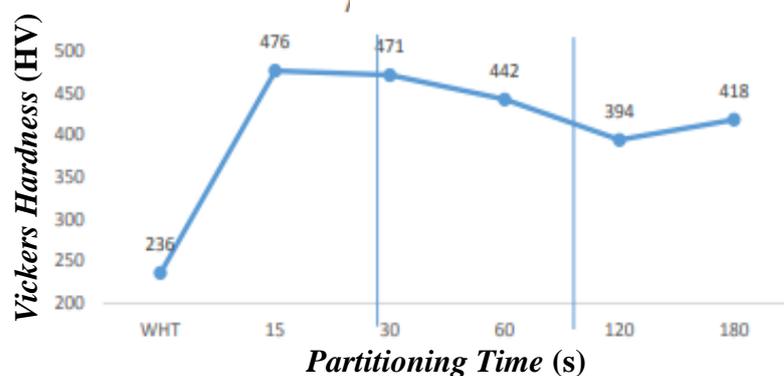
**Gambar 2.6** Pengaruh Temperatur *Partitioning* terhadap Kekerasan Baja WRM KS1045

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

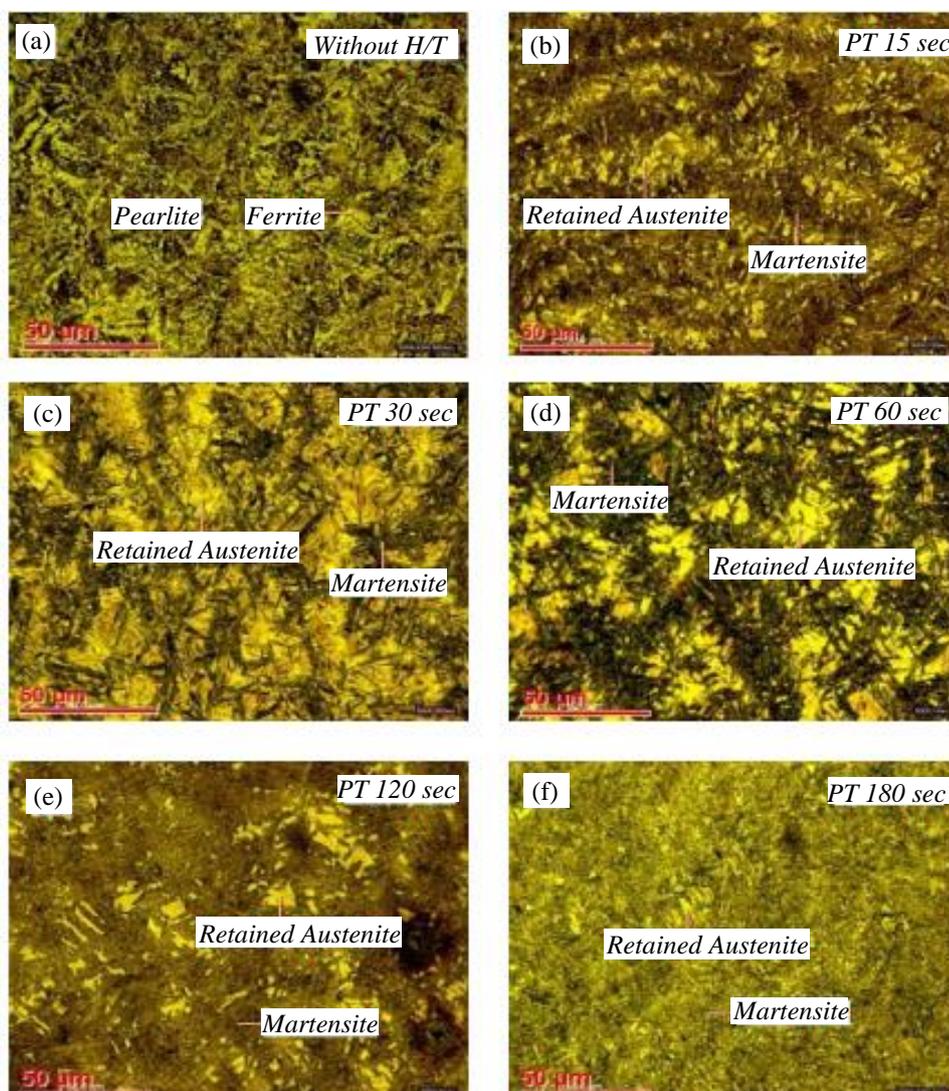
Sementara itu, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Inam, A. dkk di tahun 2017 mengenai *quenching* dan *partitioning* pada baja AISI 4340 menyatakan bahwa variasi waktu *partitioning* mempengaruhi peningkatan kekerasan sampel disebabkan oleh banyaknya fraksi martensit dari proses *quenching* dan *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

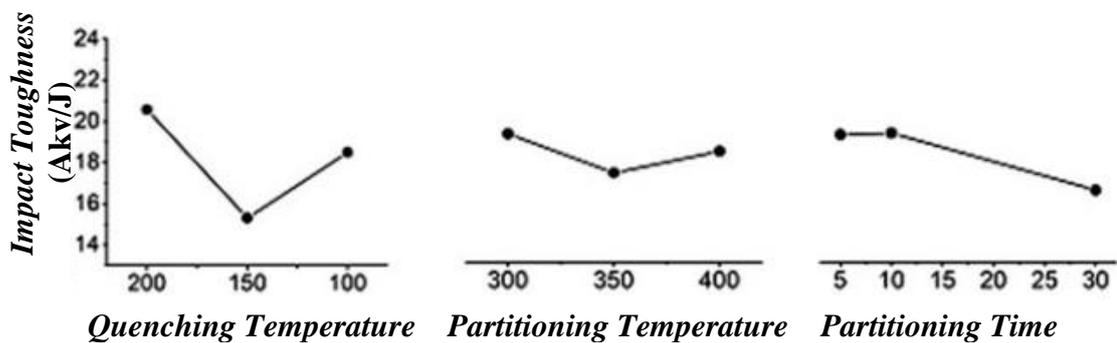
Selain itu, sebelum proses *quenching* dan *partitioning* struktur mikro pada baja AISI 4340 berupa perlit dan ferit. Namun, setelah baja diaustenisasi mengalami transformasi menjadi austenit. Kemudian, dilakukan proses

*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].



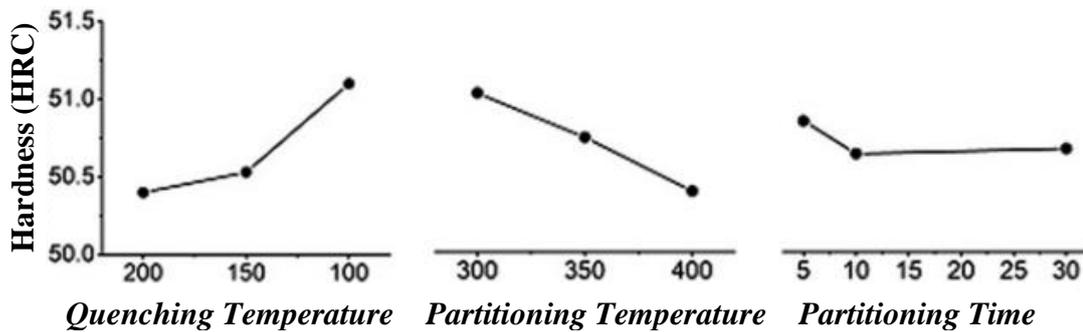
**Gambar 2.9** Struktur Mikro Baja AISI 4340 pada berbagai Variasi Waktu *Partitioning*

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.

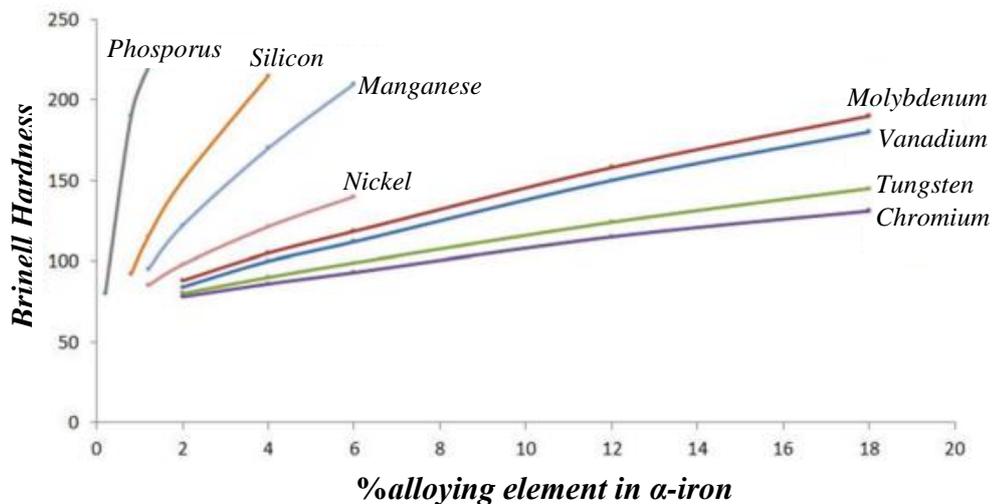
- b. Molibdenum (Mo), merupakan unsur penstabil ferit, sangat larut dalam besi BCC, dan memiliki kelarutan lebih besar dari 35%wt sedangkan hanya larut hingga 3%wt dalam besi FCC. Unsur ini dapat meningkatkan *hardenability* yang lebih kuat dari sebagian besar unsur paduan lainnya. Selain itu, Molibdenum 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]