

Studi Eksperimen Temperatur *Tempering* Pada Proses *Quenching-Tempering* Terhadap Sifat Mekanik Baja AISI 4140

Wahyu Wijanarko, Wajan Berata, Indra Sidharta, dan Suprapti

Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus Keputih Sukolilo, Surabaya, 60118
wijanarko@me.its.ac.id

Abstrak

Baja AISI 4140 adalah tipe baja paduan rendah (low alloy steel) dengan komposisi kimia 0.40% C, 0.79% Mn, 0.89% Cr, dan 0.16% Mo. Contoh aplikasi dari baja AISI 4140 ini adalah untuk komponen kendaraan, misalnya poros, as mobil dan bejana bertekanan (W. F. Smith, 2006). Dari contoh aplikasi tersebut, dapat diketahui bahwa AISI 4140 digunakan untuk peralatan yang membutuhkan kekuatan dan ketangguhan yang tinggi.

Kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang tinggi ini dapat diperoleh dari perlakuan panas, dimana prinsip dari perlakuan panas adalah dekomposisi austenite menjadi fasa-fasa yang lain yang diinginkan. Proses perlakuan panas yang dilakukan pada penelitian ini adalah proses *quenching-tempering*. Proses ini dimulai dengan memanaskan spesimen baja AISI 4140 sampai temperatur 885°C dengan menggunakan dapur. Waktu penahanan pada temperatur tersebut adalah 1 jam. Proses ini dinamakan proses austenisasi dimana semua fasa bertransformasi menjadi austenite 100%. Proses kemudian dilanjutkan dengan cara mencelupkan spesimen AISI 4140 ke dalam oli sampai temperatur kamar. Proses ini dinamakan *quenching* dimana hampir semua fasa austenite berubah menjadi martensite. Dikarenakan martensite hasil *quenching* ini terlalu keras dan getas, sehingga diperlukan *tempering* untuk menaikkan keuletan tanpa mengurangi kekuatan secara signifikan. Proses *tempering* dilakukan dengan cara memanaskan kembali spesimen AISI 4140 hasil *quenching* dengan menggunakan dapur. Terdapat 3 variasi temperatur *tempering* yang digunakan yaitu 350°C, 400°C, dan 450°C. Proses kemudian dilanjutkan dengan mencelupkan spesimen AISI 4140 ke dalam air pada temperatur kamar.

Sifat mekanik yang dibahas pada penelitian ini adalah kekuatan tarik, kekuatan luluh, kekerasan dan kekuatan *impact*. Kekuatan tarik tertinggi dicapai dengan cara proses *quenching-tempering* dengan temperatur *tempering* 350°C dengan nilai kekuatan tarik 1651 MPa, dan kekuatan luluh 1541 MPa. Kekerasan tertinggi dicapai dengan cara proses *quenching-tempering* dengan temperatur *tempering* 350°C dengan nilai kekerasan 49.2 HRC. Kekuatan *impact* tertinggi dicapai dengan cara proses *quenching-tempering* dengan temperatur *tempering* 450°C dengan nilai kekuatan *impact* 0.54 J/mm². Pengujian lain yang dilakukan untuk membahas perilaku sifat mekanik tersebut adalah *metalography* dan XRD. Dari hasil *metalography* pada proses *quenching-tempering* dengan temperatur *tempering* 350°C terlihat bahwa bentuk lath dari martensite temper masih tampak cukup jelas, sehingga dominasi sifat martensite masih besar, hal ini didukung dengan hasil XRD dimana struktur mikro yang terbentuk adalah martensite.

Keywords: AISI 4140, *quenching-tempering*, sifat mekanik, struktur mikro, XRD

Pendahuluan

Unsur logam dominan dipakai sebagai bahan dasar peralatan yang digunakan manusia, sehingga logam mempunyai peranan penting dalam kehidupan manusia. Guna menunjang perkembangan teknologi, maka timbul usaha-usaha manusia untuk memperbaiki sifat-sifat dari logam tersebut, yaitu dengan merubah sifat mekanis dan sifat fisiknya.

Adapun sifat mekanis dari logam antara lain: kekerasan, kekuatan, keuletan, kelelahan dan lain-lain, sedangkan dari sifat fisiknya yaitu dimensi, konduktivitas listrik, struktur mikro, densitas, dan

lain-lain. Pada permintaan yang semakin beragam maka dibutuhkan pemilihan bahan yang sesuai. Pemilihan bahan tersebut dapat dipersempit berdasarkan kegunaannya, misalnya pada baja paduan. Baja paduan menjadi pertimbangan karena memiliki kekuatan dan ketangguhan yang lebih baik daripada baja karbon. Baja paduan AISI 4140 adalah salah satu jenis baja paduan rendah dengan unsur tambahan kromium dan molibdenum. Baja ini memiliki kandungan sebesar 0.38-0.43% C, 0.75-1% Mn, 0.15-0.3% Si, 0.8-1.10% Cr dan 0.15-0.25% Mo (H. Chandler 1995). Baja AISI 4140 banyak digunakan dalam pembuatan poros, as mobil dan baja bertekanan.

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Material

Spesimen yang digunakan adalah baja AISI 4140 berbentuk *barr* dengan diameter 35 mm dan panjang 6 meter, memiliki sertifikat resmi dari PT ALSTOM NABINDO, sehingga preparasi dibutuhkan untuk membentuk spesimen sesuai dengan dimensi spesimen uji. Hasil uji komposisi kimia menunjukkan baja AISI 4140 ini memiliki kandungan 0.40% C, 0.79% Mn, 0.89% Cr, dan 0.16% Mo.

Proses Quenching-Tempering

Skema proses *quenching* dapat dilihat pada gambar 1. Proses ini dimulai dengan pemanasan spesimen uji dalam dapur pemanas. Spesimen uji dipanaskan hingga temperatur austenisasi 885°C, dengan *heat rate* sebesar 0.2°C/detik dan waktu penahanan pada temperatur austenisasi selama 60 menit (Copley Stephen M. 1991). Proses pendinginan dilakukan dengan mencelup masing-masing spesimen uji ke dalam oli. Pencelupan dilakukan sampai temperatur spesimen uji mendekati suhu kamar, selanjutnya spesimen uji dibersihkan dari bekas-bekas oli dan kerak. Setelah *quenching*, proses dilanjutkan dengan *tempering*.

Skema proses *tempering* dapat dilihat pada gambar 2. Spesimen tersebut dipanaskan kembali dalam dapur pemanas hingga mencapai temperatur *tempering*, dimana terdapat 3 variasi temperatur *tempering* yaitu 350°C, 400°C dan 450°C dengan *heat rate* yang sama dengan proses *quenching*, selanjutnya proses penahanan pada masing-masing temperatur tersebut selama 60 menit dan kemudian didinginkan hingga mencapai temperatur ruang. Media pendingin yang digunakan dalam proses *tempering* adalah air (*water*).

Pengujian Mekanik

Spesimen uji yang telah mengalami proses perlakuan panas *quenching-tempering* akan diuji mekanik. Pengujian mekanik yang dilakukan adalah uji tarik, uji kekerasan dan uji *impact*.

Uji tarik yang dilakukan berdasarkan standar pengujian JIS Z 2241. Spesimen yang akan diuji tarik dibentuk yang sesuai standar JIS Z (Akasaka, 2006). Mesin uji tarik yang digunakan adalah *Wolfert Tensile-Bending testing machining* dengan kapasitas 30 ton. Hasil dari pengujian adalah grafik P-ΔL, sedangkan grafik tegangan-regangan, kekuatan tarik, , kekuatan luluh, dan keuletan dihitung secara manual.

Uji kekerasan yang dilakukan berdasarkan standar pengujian JIS Z 2245 (Akasaka, 2006). Uji kekerasan ini menggunakan mesin uji *Frank*. Metode yang digunakan adalah *Rockwel C*, dimana angka kekerasan langsung dibaca dari mesin

Uji *impact* yang dilakukan menggunakan standar pengujian JIS Z 2242. Spesimen yang akan diuji *impact* dibentuk yang sesuai standar JIS Z G2131 (Akasaka, 2006). Uji *impact* ini menggunakan mesin uji *Frank*. Pengujian dilakukan pada temperatur kamar menggunakan metode *charpy*, dimana energi *impact* dapat dibaca langsung dari mesin.

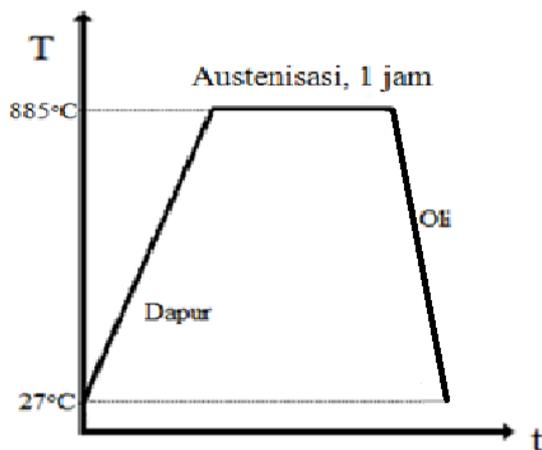
Uji Metalography dan X-Ray Diffraction

Selain dilakukan pengujian mekanik, spesimen uji akan dianalisa struktur mikro dan fasa yang terbentuk dengan menggunakan teknik *metalography* dan *X-Ray Diffraction (XRD)*.

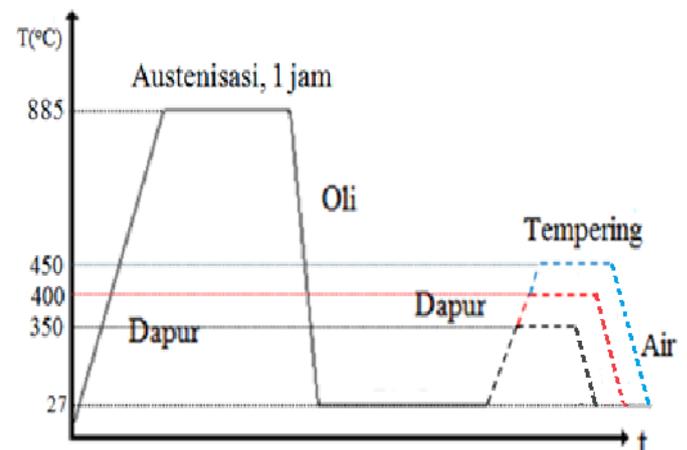
Pada *metalography* spesimen uji digerinda dengan menggunakan kertas gosok mulai grid 180 sampai 2000. Kemudian spesimen uji dipoles dengan menggunakan bubuk alumina. Proses etsa dilakukan dengan menggunakan Nital 3-5 detik lalu spesimen segera dicuci dengan menggunakan air aquades.

Setelah itu dilakukan pengamatan mikro struktur dengan menggunakan mikroskop optik Olympus yang dilengkapi dengan kamera digital dengan perbesaran 100x, 200x, 500x dan 1000x.

Fraksi austenit sisa dan martensit diamati dengan menggunakan XRD. Mesin XRD yang digunakan adalah Philips X’Pert dengan radiasi tembaga (Cu). Spesimen juga dipreparasi dengan menggunakan prosedur metalografi standar yang melibatkan gerinda dan poles, tanpa etsa.



Gambar 1. Skema proses *quenching*.

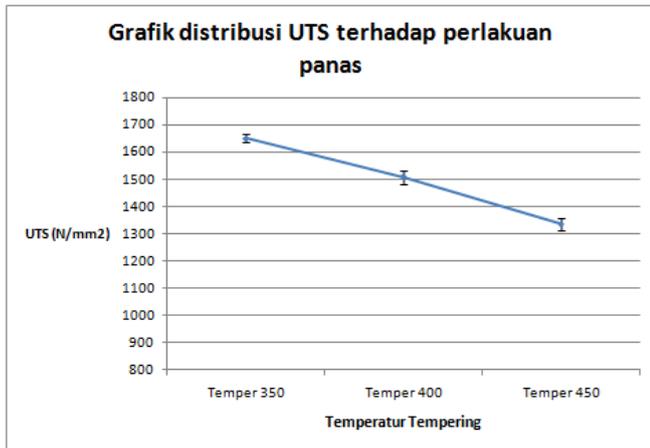


Gambar 2. Skema proses *tempering*.

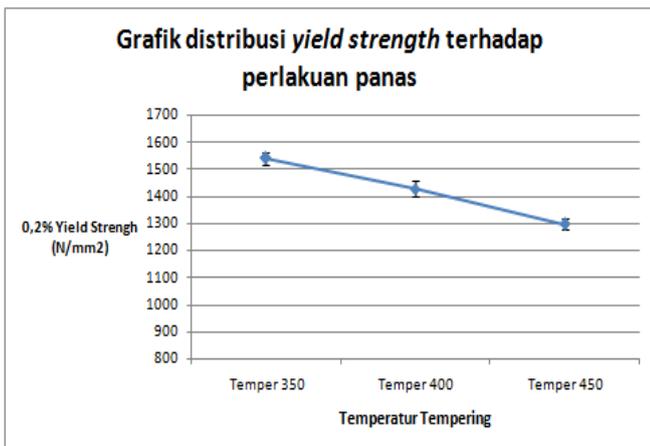
Hasil dan Pembahasan

Pengujian Tarik

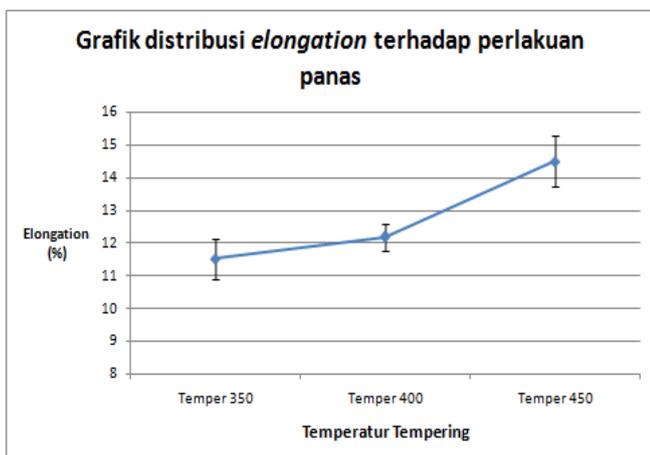
Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan material maksimum, kekuatan luluh dan keuletan. Pada pengujian ini digunakan 3 spesimen uji demi mendapat hasil yang akurat. Data hasil pengujian tensile dapat dilihat pada gambar 3, 4 dan 5.



Gambar 3. Distribusi kekuatan tarik terhadap temperatur *tempering*.



Gambar 4. Distribusi kekuatan luluh terhadap temperatur *tempering*.



Gambar 5. Distribusi keuletan terhadap temperatur *tempering*.

Selain spesimen yang telah mengalami perlakuan panas, pada penelitian ini juga menguji spesimen kondisi awal (*as-received*) sebagai pembandingan. Hasil kekuatan tarik, kekuatan luluh dan keuletan untuk spesimen awal masing-masing adalah 935 MPa, 893 MPa dan 16,9 %.

Pada pengujian terhadap spesimen *quenching-tempering* menunjukkan kenaikan nilai kekuatan tarik berkisar 31% - 77% dan kenaikan berkisar 27% - 67% untuk kekuatan luluh, sedangkan pada keuletan spesimen *quenching-tempering* menunjukkan penurunan berkisar 12% - 37% dibandingkan nilai pada spesimen awal. Hal ini menunjukkan bahwa spesimen hasil *quenching-tempering* memiliki ketahanan terhadap beban tarik lebih baik, disebabkan adanya fasa martensit hasil dari proses *quenching* yang bersifat lebih keras, namun memiliki keuletan lebih rendah dibandingkan spesimen awal.

Distribusi nilai kekuatan tarik dan kekuatan luluh pada spesimen *tempering* memiliki kecenderungan semakin berkurang dengan naiknya temperatur *tempering*, dimana spesimen *tempering* 350°C memiliki nilai kekuatan tarik sebesar 1651 MPa dan kekuatan luluh 1541 MPa, lalu semakin berkurang hingga pada *tempering* 450°C dimana memiliki nilai kekuatan tarik sebesar 1345 MPa dan kekuatan luluh sebesar 1300 MPa (gambar 3 dan gambar 4). Pada nilai keuletan menunjukkan kecenderungan sebaliknya dengan meningkat mengikuti kenaikan temperatur *tempering* yaitu 10% pada spesimen *tempering* 350°C lalu meningkat hingga mencapai 14% pada *tempering* 450°C (gambar 5). Hal ini menandakan bahwa kekuatan tarik dan kekuatan luluh lebih baik pada temperatur *tempering* rendah dan sebaliknya sifat keuletan akan lebih baik pada spesimen temperatur *tempering* tinggi, dikarenakan semakin tinggi temperatur *tempering* maka akan semakin banyak karbon yang keluar dari fasa martensit membentuk karbida, akibatnya fasa martensit yang ada kehilangan kekuatannya sehingga spesimen menjadi lebih lunak dan ulet.

Pengujian Kekerasan

Dimensi spesimen uji yang mendapatkan perlakuan panas *quenching-tempering* adalah 10x10x55 mm, dimana bagian yang diamati pada pengujian kekerasan adalah bagian penampang yang dipotong pada jarak 27,5 mm dari sisi kanan dengan titik pengujian sejumlah 5 titik dan hasilnya dirata-rata. Selain itu juga dilakukan pengujian pada permukaan spesimen uji untuk mengetahui keseragaman kekerasan pada permukaan.

Grafik hasil pengujian kekerasan pada penampang spesimen *quenching-tempering* dapat dilihat pada gambar 6, sedangkan nilai kekerasan pada penampang spesimen awal adalah 38,4 HRC. Grafik hasil

pengujian kekerasan pada permukaan spesimen awal dapat dilihat pada gambar 7 sedangkan nilai kekerasan pada permukaan spesimen awal adalah 37 HRC. Pada spesimen *quenching-tempering* nilai kekerasan tertinggi ada pada *tempering* 350°C yaitu 49.2 HRC dan terendah ada pada *tempering* 450°C yaitu 45.4 HRC, sehingga nilai kekerasan cenderung turun mengikuti kenaikan dari temperatur *tempering*. Nilai kekerasan yang berkurang ini dikarenakan semakin banyak karbon yang keluar dari martensit membentuk karbida, hingga mengurangi tegangan yang terjadi pada martensit. Dibandingkan kekerasan pada spesimen awal, nilai kekerasan pada spesimen *quenching-tempering* mengalami kenaikan seikitar 18% - 29%, ini dikarenakan adanya fasa martensit yang merupakan hasil dari proses *quenching*.

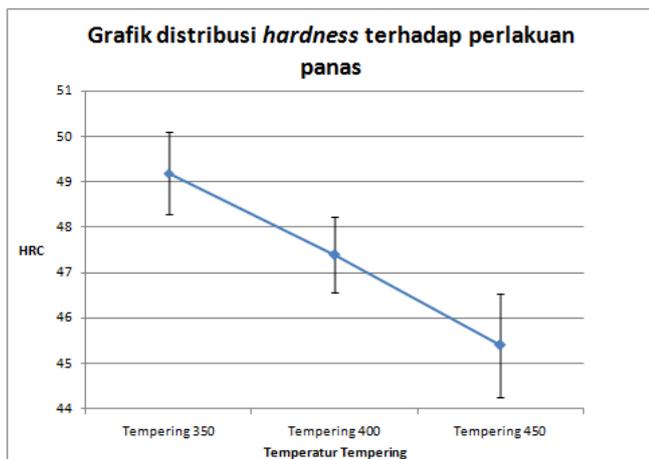
Pengujian Impact

Preparasi spesimen telah dilakukan sebelumnya sehingga spesimen uji memiliki dimensi 10x10x55 mm dan dengan V notch (45°), untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat digunakan 3 spesimen uji. Pengujian *impact* dibutuhkan untuk mengetahui kemampuan material menghadapi beban kejut.

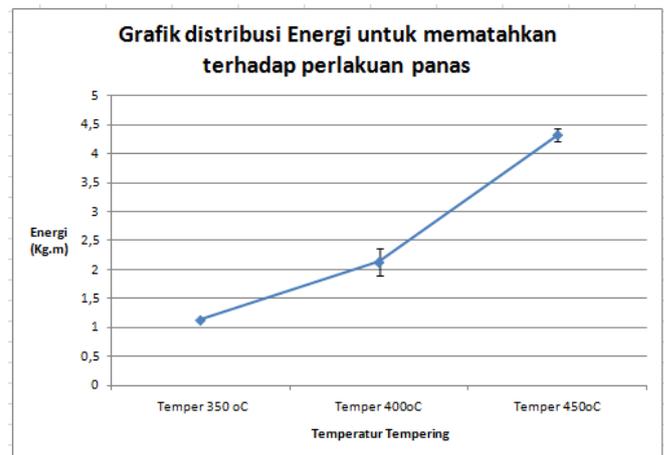
Hasil pengujian *impact* berupa grafik energi *impact* dan kekuatan *impact* dapat dilihat pada gambar 8 dan gambar 9.

Pada pengujian spesimen awal didapat nilai energi *impact* sebesar 1.8 Kg.m dan nilai kekuatan *impact* sebesar 0.23 J/mm² dengan keseluruhan pola patahan berupa butiran/*clevage* tanpa adanya ditemukan *shear fracture* (gambar 10.a). Nilai energi *impact* dan kekuatan *impact* pada spesimen awal diketahui lebih tinggi dibandingkan dengan nilai pada spesimen *tempering* temperatur 350°C, tetapi lebih rendah dibandingkan nilai pada spesimen *tempering* temperatur 400°C dan 500°C.

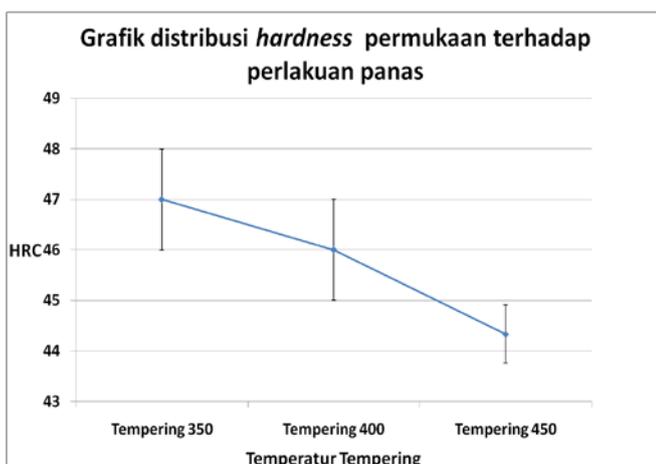
Pada spesimen *tempering* menunjukkan distribusi nilai energi *impact* dan kekuatan *impact* cenderung meningkat mengikuti kenaikan temperatur *tempering* yaitu dimana pada spesimen *tempering* 350°C memiliki nilai energi *impact* dan kekuatan *impact* sebesar 1 Kg.m dan 0.13 J/mm², dengan pola patahan akan tetapi mulai ditemukan adanya *shear fracture* dengan persentasi yang kecil (gambar 10.b). Nilai energi *impact* dan kekuatan *impact* terus meningkat hingga pada spesimen *tempering* temperatur 400°C sebesar 2.13 Kg.m dan 0.27 J/mm²,



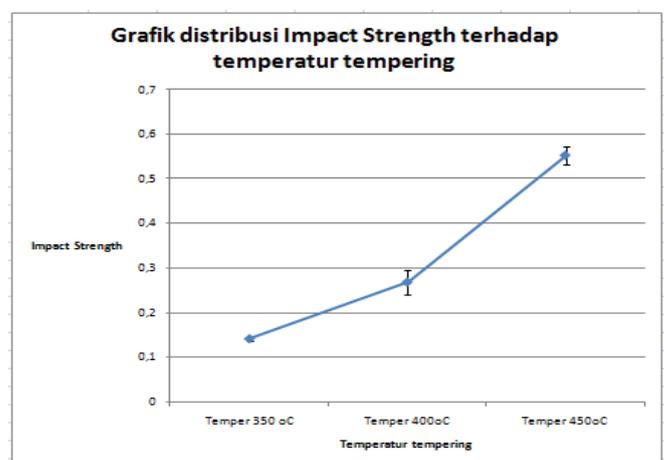
Gambar 6. Grafik kekerasan pada penampang spesimen terhadap temperatur *tempering*.



Gambar 8. Grafik energi *impact* terhadap temperatur *tempering*.



Gambar 7. Grafik kekerasan pada permukaan spesimen terhadap temperatur *tempering*.

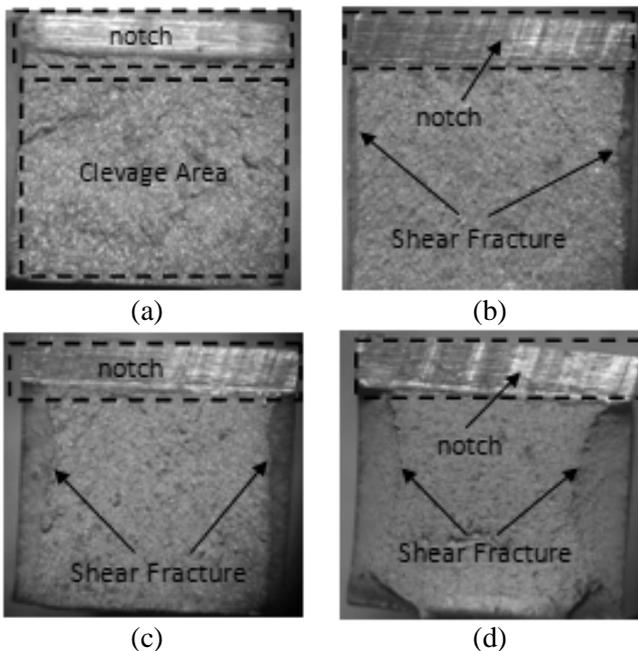


Gambar 9. Grafik kekuatan *impact* terhadap temperatur *tempering*.

dengan pola patahan serabut dan tampak bahwa persentasi *shear fracture* yang semakin membesar (gambar 10.c). Kemudian nilai energi *impact* dan kekuatan *impact* terus meningkat hingga pada spesimen *tempering* temperatur 450°C sebesar 4.4 Kg.m dan 0.54 J/mm², dengan pola patahan serabut dan tampak bahwa persentasi *shear fracture* yang semakin membesar (gambar 10.d).

Maka jika dibandingkan dengan spesimen awal pada *tempering* temperatur 350°C terjadi penurunan nilai energi *impact* dan kekuatan *impact* sebesar 40% dan 50% dan pada *tempering* temperatur 450°C terjadi peningkatan nilai energi *impact* dan kekuatan *impact* sebesar 130% dan 150%. Kenaikan ini menunjukkan bahwa spesimen *tempering* temperatur lebih tinggi memiliki sifat ketangguhan yang lebih baik dibandingkan dengan spesimen *tempering* temperatur lebih rendah, hal ini juga ditunjang dengan pola patahan yang lebih berserabut pada spesimen dengan temperatur *tempering* yang lebih tinggi.

Hal ini dikarenakan semakin tinggi temperatur *tempering* maka akan semakin banyak karbon yang dikeluarkan oleh fasa martensit untuk membentuk karbida. Karbon yang keluar akan mengurangi tegangan sisa yang terjadi di dalam fasa martensit sehingga menjadikan fasa martensit kehilangan sifat kekerasannya dan lebih ulet. Karbida yang terbentuk menyebar secara luas berbentuk (bulatan) *sphrodile* sehingga memiliki ketahanan terhadap tegangan luar lebih baik dan akhirnya meningkatkan kekuatan terhadap beban *impact*.



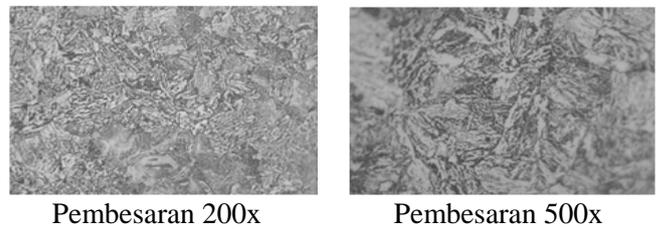
Gambar 10. Patahan spesimen setelah uji *impact* pada kondisi; (a) spesimen awal, (b) spesimen *tempering* pada temperatur 350°C, (c) spesimen *tempering* pada temperatur 400°C, dan (d) spesimen *tempering* pada temperatur 450°C.

Pengujian Metalography

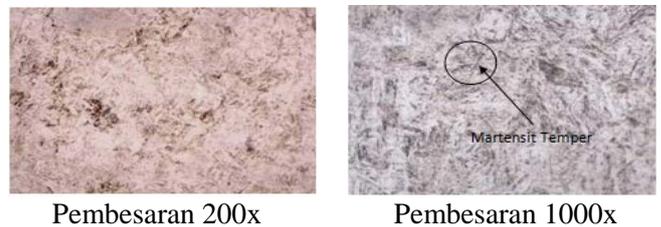
Hasil pengujian *metalography* untuk spesimen awal dapat dilihat pada gambar 11 dan spesimen *quenching-tempering* dapat dilihat pada gambar 12, 13 dan 14.

Pada gambar 11 yang merupakan gambar material awal sisi penampang terlihat bahwa struktur mikro yang ada didominasi oleh perlit. Hal ini dipertegas dengan pengujian *mikrohardness* dimana nilai kekerasan minimum 25 dan maximum 37 (HRC) yang merupakan nilai range kekerasan fasa perlit.

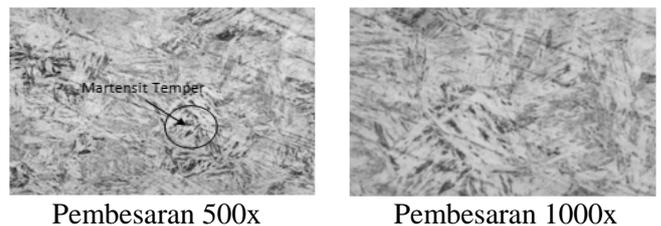
Pada gambar 12 tampak bahwa bentuk lath dari martensit temper masih tampak cukup jelas, pengaruh dari temperatur *tempering* yang rendah sehingga energi yang diberikan hanya cukup untuk kecepatan pembentukan karbida yang rendah. Sehingga dominasi sifat martensit masih tampak jelas, hal ini sesuai dengan hasil uji kekerasan yang menunjukkan bahwa material ini memiliki nilai kekuatan dan kekerasan tertinggi.



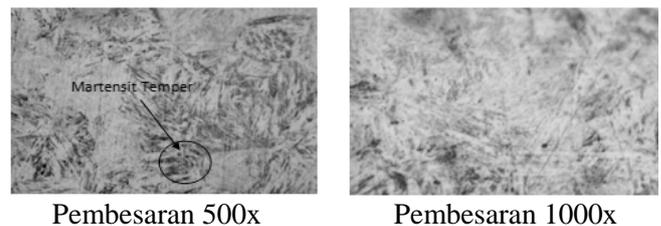
Gambar 11. Hasil uji *metalography* spesimen awal.



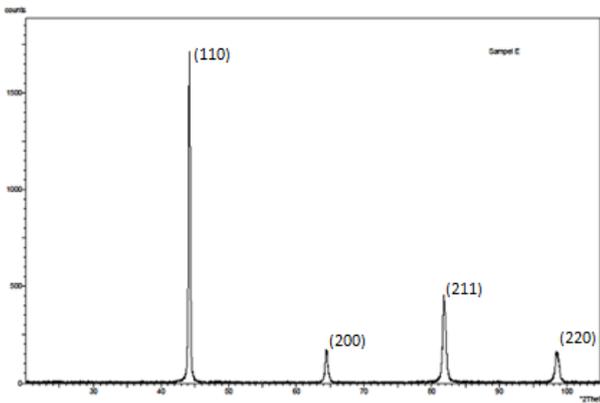
Gambar 12. Hasil uji *metalography* spesimen *tempering* pada temperatur 350°C.



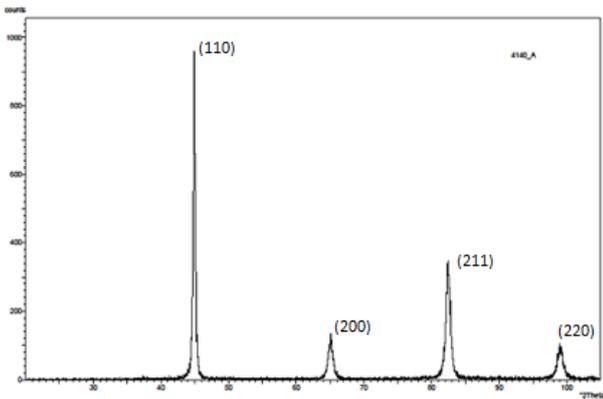
Gambar 13. Hasil uji *metalography* spesimen *tempering* pada temperatur 400°C.



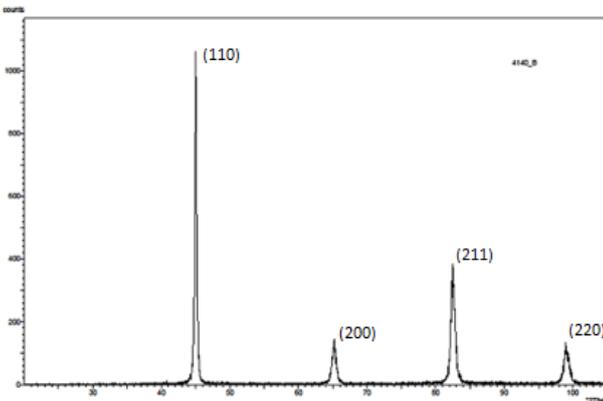
Gambar 14. Hasil uji *metalography* spesimen *tempering* pada temperatur 450°C.



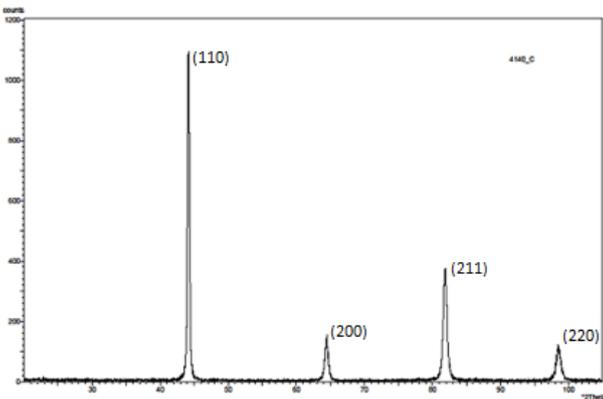
Gambar 15. Hasil uji XRD spesimen awal.



Gambar 16. Hasil uji XRD spesimen tempering pada temperatur 350°C.



Gambar 17. Hasil uji XRD spesimen tempering pada temperatur 400°C.



Gambar 18. Hasil uji XRD spesimen tempering pada temperatur 450°C

Pada gambar 13 tampak bahwa martensit temper masih jelas terlihat memiliki bentuk lath namun mulai ditemukannya fasa ferit (tampak putih) yang terbentuk pada sela-sela bentuk lath dari martensit, ini sesuai dengan tren kenaikan nilai dari grafik distribusi keuletan bahwa ferit yang mulai terbentuk akan menaikkan nilai keuletan menaikkan sedikit nilai kekerasan.

Pada gambar 14 tampak bahwa telah cukup banyak karbida yang terbentuk, meskipun martensit lath yang ditemper masih tampak terlihat, namun kekerasan dan keuletan pada material telah banyak berubah. Hal ini dapat dilihat pada nilai kekuatan dan kekerasan dari material *tempering* 450°C yang merupakan nilai terendah tetapi memiliki nilai keuletan tertinggi.

Pengujian XRD

Pada gambar 15 sampai 18, tampak bahwa semua spesimen memiliki gelombang pada sudut 2Theta 46, 65, 83 dan 99 yaitu pada bidang (110) (200) (211) (220) secara berurutan, dimana sudut gelombang diatas dimiliki oleh fasa martensit atau ferit.

Pada spesimen awal dengan dukungan data *metalography*, microhardness dan XRD dapat disimpulkan bahwa spesimen awal mempunyai fasa ferit dan perlit. Sedangkan untuk spesimen *quenching-tempering* dapat disimpulkan bahwa spesimen-spesimen tersebut mempunyai fasa martensit temper.

Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan berdasarkan data dan analisa diatas adalah sebagai berikut :

1. Material AISI 4140 yang ditemper pada temperatur 350°C memiliki nilai kekuatan tarik 1651 MPa, kekuatan luluh 1541 MPa, keuletan 11.5%, kekerasan 49.2 HRC, dan kekuatan impact 0.15 J/mm² dengan struktur mikro berupa martensit temper.
2. Material AISI 4140 yang ditemper pada temperatur 400°C memiliki nilai kekuatan tarik 1500 MPa, kekuatan luluh 1450 MPa, keuletan 12.5%, kekerasan 47.4 HRC, dan kekuatan impact 0.28 J/mm² dengan struktur mikro berupa martensit temper.
3. Material AISI 4140 yang ditemper pada temperatur 450°C memiliki nilai kekuatan tarik 1350 MPa, kekuatan luluh 1300 MPa, keuletan 14.5%, kekerasan 45.4 HRC, dan kekuatan impact 0.55 J/mm² dengan struktur mikro berupa martensit temper.
4. Pada foto mikro didapatkan bahwa martensit lath yang terbentuk setelah proses temper semakin berkurang mengikuti kenaikan temperatur

tempering, dimana pada spesimen temperatur temper 350°C martensit masih tampak jelas dan pada spesimen temperatur temper 450°C sudah berkurang, hal ini disebabkan karena kecepatan pembentukan karbida meningkat mengikuti kenaikan temperatur *tempering* sehingga pada temperatur *tempering* 450°C karbida yang terbentuk lebih banyak walaupun dengan waktu penahanan *tempering* yang sama sehingga lebih banyak kristal BCT kehilangan atom carbonnya ataupun rasio c/a dan membentuk kristal BCC maka semakin banyak karbida yang terbentuk akan semakin menurunkan dominasi sifat kekerasan dari martensit. Ini sesuai dengan fenomena perubahan sifat mekanik yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada pengujian XRD pola difraksi yang dihasilkan sama yaitu pola difraksi untuk fasa martensit yang memiliki sudut 2Theta 45, 63, 83 dan 99. Maka hal ini mendukung dari hasil foto mikro yang telah dilakukan sebelumnya.

Referensi

W. F. Smith, “*Structure and Properties of Engineering Alloys*”, 2 ed.: McGraw Hill, 2006.

H. Chandler, “*Heat Treater’s Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*”, 2 ed.: ASM International, 1995.

Coply Stephen M., “*Heat Treating*”, vol. 4: ASM Internasional Handbook Committee, 1991.

Akasaka, Minato-ku, “*JIS Handbook Ferrous Materials & Metallurgy I*,” ed: Japanese Standards Association, 2006.