

Pengaruh Waktu Temper Perlakuan Panas *Quench-Temper* terhadap Umur Lelah Baja St 41 pada Pembebanan Lentur Putar Siklus Tinggi

Ahmad Fahrur Rozaq dan Soeharto

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: hartoits@me.its.ac.id

Abstrak—Baja St 41 sering kali diaplikasi sebagai bahan dasar pembuatan komponen mesin maupun bahan konstruksi. Sering dijumpai bahwa kerusakan atau kegagalan banyak terjadi pada beban dinamik, walaupun beban berulang yang diterima oleh material masih jauh dari tegangan statis maksimum material. Maka dari itu perlu dilakukan perbaikan sifat mekanik material supaya didapatkan kekerasan dan umur lelah yang lebih tinggi dengan cara perlakuan panas. Dalam penelitian ini digunakan material uji baja St 41 dengan dua alur pengujian yaitu pengujian tanpa perlakuan panas dan pengujian setelah proses perlakuan panas. Pengujian yang dilakukan meliputi pengamatan struktur mikro, uji kekerasan dan uji lelah yang dilanjutkan dengan pengamatan pola patahan. Sedangkan perlakuan panas yang digunakan dalam penelitian ini berupa *quench-temper*. Perlakuan panas dilakukan dengan memanaskan material hingga temperatur 850°C dengan waktu penahanan selama 30 menit dan dilakukan pendinginan cepat dalam media air. Kemudian material dipanaskan kembali hingga temperatur 200°C dengan variasi waktu temper 15 menit, 1 jam dan 5 jam dan dilakukan pendinginan di udara bebas. Selanjutnya material diamati perubahan struktur mikro, kekerasan dan umur lelahnya dari kondisi awal tanpa perlakuan panas. Dari penelitian ini diperoleh bahwa struktur mikro material awal berupa karbida sferoidal yang tersebar dalam matriks ferit dan didapat nilai kekerasan serta umur lelah tertinggi dibandingkan dengan material dengan perlakuan panas. Sedangkan pada material dengan perlakuan panas menunjukkan struktur mikro berupa martensit, perlit dan martensit temper. Semakin lama waktu temper maka martensit temper yang terbentuk makin banyak sehingga nilai kekerasannya menurun diikuti dengan meningkatnya keuletan. Hal ini menyebabkan umur lelah yang didapatkan makin menurun pula.

Kata Kunci—St 41, *quench-temper*, umur lelah, struktur mikro, lentur putar

I. PENDAHULUAN

BAJA merupakan material yang mempunyai peranan penting dalam dunia industri. Baja ini sering kali diaplikasi sebagai bahan dasar pembuatan komponen mesin maupun bahan konstruksi. Dengan banyaknya jenis baja yang ada dipasaran mengakibatkan perlunya melakukan pemilihan baja yang memiliki efisiensi dan efektivitas yang tinggi untuk mendapatkan hasil yang optimal sesuai dengan keinginan.

Suatu komponen mesin sering kali terjadi kerusakan dalam operasinya. Kerusakan atau kegagalan banyak terjadi pada beban dinamik, walaupun beban berulang yang diterima oleh material masih jauh dari tegangan statis maksimum material. Kegagalan ini disebut dengan

kegagalan akibat lelah (*fatigue failure*), misalnya terjadi pada komponen mesin putar (*rotary*) seperti poros baja.

Novika [1] sebelumnya telah melakukan penelitian mengenai perbandingan umur lelah material awal baja AISI 1045 dengan material setelah mengalami proses *quench* dan temper pada temperatur 200°C selama 1 jam. Yang selanjutnya dikembangkan oleh Budi Darmawan [2] pada material dan proses yang sama hanya saja proses temper divariasikan pada temperatur dan waktu temper yang berbeda untuk mengoptimalkan umur lelah material baja AISI 1045. Sedangkan Sumiyanto dan Rudi [3] meneliti pengaruh perlakuan panas *quench-temper* variasi temperatur temper pada baja St 41 terhadap struktur mikro dan kekerasannya.

Baja St 41 adalah baja konstruksi yang memiliki nilai kekuatan dan kekerasan cukup tinggi. Selain itu, secara ekonomis baja St 41 ini memiliki nilai lebih murah dari pada baja AISI 1045. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan ditinjau sejauh mana pengaruh perlakuan panas proses *quench-temper* dengan waktu temper terhadap umur lelah dari baja poros St 41.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi dari penelitian ini dari awal sampai akhir meliputi beberapa tahapan, yaitu:

A. Tahap Persiapan dan Pembentukan Spesimen

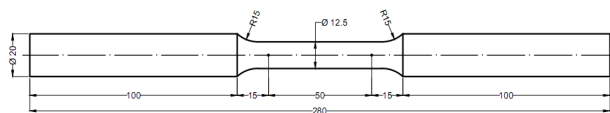
Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja St 41. Baja St 41 yang digunakan dalam penelitian ini merupakan jenis baja karbon medium yang mempunyai kadar karbon 0.3% dengan kekuatan tarik minimum 41 kg/mm².

Sebelum dilakukan pengujian lelah dilakukan pengujian tarik terlebih dahulu untuk memperoleh kekuatan tarik sebagai dasar pemberian beban saat melakukan uji lelah. Pengujian tarik dilakukan pada tiga spesimen uji dengan menggunakan mesin uji tarik Woolpert Machine tipe 30 TUZ 750 kapasitas 300 kN. Dimensi spesimen seperti Gambar 1.

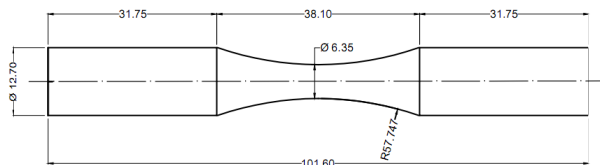
Sedangkan bentuk spesimen yang dipergunakan dalam pengujian umur lelah baja St 41 adalah sesuai dengan standar ASTM E08-04 Vol. 03-01. Mesin yang dipergunakan untuk pengujian umur lelah material ini adalah mesin lentur putar (*rotating bending*) tipe RBF 200, lihat Gambar 2.

Berdasarkan gambar 3, mesin uji lelah terdiri dari:

1. Pemegang spesimen (*Chucking*) terhubung dengan motor.
2. Batang beban.



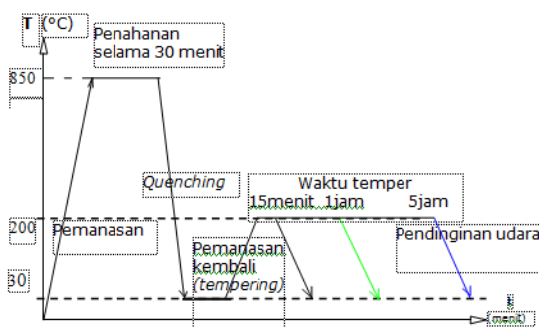
Gambar 1. Spesimen uji tarik (JIS 2201 No 10).



Gambar 2. Bentuk spesimen uji lelah.



Gambar 3. Bagian-bagian mesin uji lelah



Gambar 4. Proses quench-temper

3. Pengatur fase kecepatan putaran motor.
4. Alat pengukur siklus umur material (skala 1:100).
5. Pengatur beban (max. 200 lb.in).
6. Sensor otomatis untuk mematikan kerja motor ketika spesimen patah.

B. Tahap Perlakuan Panas

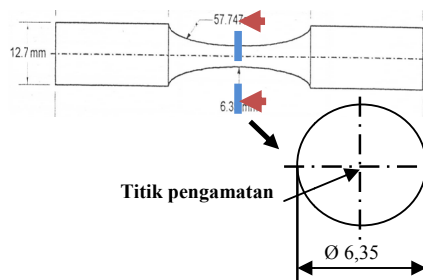
Proses Quench

Quench dilakukan dengan memanaskan spesimen di dalam dapur sampai temperatur 850°C dan ditahan selama 30 menit kemudian didinginkan di dalam air (30°C). Dalam setiap pemanasan digunakan tujuh spesimen (1 spesimen untuk pengamatan struktur mikro dan uji kekerasan, dan 6 spesimen untuk uji kelelahan).

Proses Temper (Pemanasan Kembali)

Spesimen hasil quench selanjutnya akan diberikan proses temper untuk mendapatkan perbaikan sifat mekanik dan ketahanan lelah. Temper dilakukan pada temperatur 200°C dengan variasi waktu penahanan selama 15 menit, 1 jam, dan 5 jam.

Dari Gambar 4, setelah proses quench berakhir, tujuh spesimen hasil quench selanjutnya dimasukkan dan ditata dalam dapur pemanas kembali. Setelah itu heater diatur pada temperatur peak sebesar 200 °C dengan waktu penahanan (*holding time*) sesuai dengan variasi yang digunakan.



Gambar 5. Titik pengambilan foto struktur mikro.

Apabila telah melewati waktu temper yang divariasikan, spesimen segera diangkat untuk didinginkan di udara bebas.

C. Tahap Pengujian

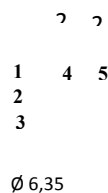
Pengamatan Struktur Mikro

Adapun tahap dari metallografi adalah sebagai berikut :

1. *Gerinda (Grinding)*
Gerinda bertujuan untuk menghaluskan permukaan material setelah proses pemotongan. Proses ini memanfaatkan gesekan permukaan kertas gosok dengan material. Kertas gosok yang digunakan merupakan permukaan kasar silikon karbid yang bervariasi. Pada proses ini kertas gosok yang digunakan mulai 80, 120, 150, 180, 320, 400, 800, 1000, 1200, 1500 sampai 2000.
2. *Poles (Polishing)*
Poles dilakukan untuk mendapatkan permukaan spesimen yang mengkilap sehingga mampu memantulkan cahaya dari mikroskop optis. Poles dilakukan dengan menggosokkan material pada kain wol yang ditaburi dengan serbuk alumina.
3. *Etsa (Etching)*
Tujuan dari etsa adalah untuk mendapatkan permukaan yang dapat diamati dengan mikroskop optis. Etsa dilakukan dengan mencelupkan material ke dalam *etching reagent* tertentu selama waktu tertentu pula sesuai dengan karakteristik dari jenis *etching reagent* yang digunakan pada material tertentu. Adapun *etching reagent* yang digunakan adalah 2% nital selama 3 – 5 detik. Larutan ini digunakan karena memiliki kemampuan yang cukup baik untuk menunjukkan struktur mikro pada material baja[4].
4. *Pengamatan struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optis.*
Setelah dilakukan etsa, material dapat diamati struktur mikronya pada posisi sesuai gambar 3.5 dengan menggunakan mikroskop optis. Pengambilan gambar dilakukan dengan menggunakan kamera otomatis yang dihubungkan dengan komputer sehingga mampu menangkap gambar secara digital. Spesimen yang telah di etsa, dikeringkan baru kemudian di foto dengan perbesaran 100x dan 500x pada pusat lingkarannya. Pengamatan struktur mikro dilakukan pada satu spesimen tanpa perlakuan panas dan satu spesimen dengan perlakuan panas pada setiap variasi waktu temper yang diberikan.

Pengujian Kekerasan

Setelah proses pengamatan struktur mikro dilakukan selanjutnya dilakukan uji kekerasan pada penampang potong yang sama. Pengujian ini menggunakan mesin Rockwell C dimana harga kekerasan dapat dilihat secara langsung pada display mesin.



Gambar 6. Titik-titik indentasi pada pengujian kekerasan.

Pada pengujian kekerasan rockwell dilakukan proses indentasi dengan beban awal (*minor load*) sebesar 10 kg, setelah itu penekanan diteruskan dengan memberikan beban utama (*major load*) sebesar 150 kg selama beberapa saat, kemudian beban utama dilepas. Hal ini dilakukan pada empat titik indentasi.. Titik indentasi diambil mulai dari tengah hingga tepi dengan jarak 2.0 mm antar titik indentasinya.

Pengujian Kelelahan

Pengujian kelelahan dilakukan pada R=-1 dan frekwensi = 50 Hz dengan pembebanan $0,5\sigma_{u(awal)}$, $0,6\sigma_{u(awal)}$ dan $0,7\sigma_{u(awal)}$. Pada tingkat pembebanan minimal ini didapatkan putaran kritis material dimana material mulai mengalami batas umur lelah (*fatigue limit*).

Material untuk pengujian *fatigue* hendaknya memiliki kekasaran permukaan yang sangat kecil sekali untuk meminimalisir goresan (*scratch*) yang memicu terjadinya awal retakan (*crack initiation*).

Momen bending pada pengujian lentur putar dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$M_b = \pi Sd^3/32 \dots\dots\dots [1]$$

dimana : M_b = Momen bending yang bekerja (lb.in)

S = Kekuatan tarik material (lbf/in²)

d = diameter material uji (in)

Pengujian umur lelah material dengan lentur putar dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Spesimen uji dipasang tepat berada di tengah (diantara ke dua *holder*) kemudian kencangkan spesimen uji dengan seperangkat kunci.
2. Beban diset dengan menggeser bandul beban.
3. Mesin dihidupkan lalu dengan perlahan memberikan frekwensi yang ditentukan dan spesimen uji berada pada kondisi seimbang (*balance*).
4. Saat spesimen patah, secara otomatis mesin akan mati.
5. Putaran yang tercatat pada mesin adalah 1:100 dengan kondisi riil.
6. Jumlah siklus yang didapat pada masing-masing tingkat tegangan diplot dalam grafik tegangan dan umur lelah (S-N Diagram).

III. DATA DAN PEMBAHASAN

A. Data Hasil Pengujian Tarik Material

Dari pengujian tarik material awal baja St 41, didapatkan hasil sesuai Tabel 1. Dari data tersebut didapatkan kekuatan tarik rata-rata material adalah 578,85 MPa. Data kekuatan tarik ini selanjutnya akan digunakan untuk menentukan tingkat beban pada pengujian lelah. Sedangkan kekuatan mulur rata-rata material sebesar 542,17 MPa digunakan sebagai batas maksimum yang diijinkan dalam pemberian tingkat pembebanan.

Tabel 1.
Hasil uji tarik material awal

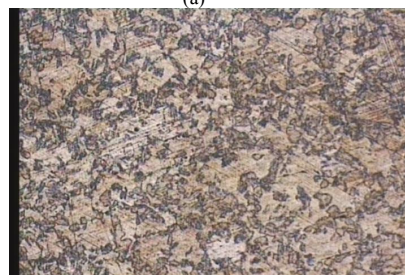
No. Spesimen	Yield Strength, σ_y (MPa)	Tensile Strength, σ_u (MPa)
1.	543,40	576,43
2.	547,99	584,64
3.	535,12	575,52
Rata-rata	542,17	578,85



Gambar 7. Struktur mikro material awal.



(a)



(b)



(c)

Gambar 8. Struktur mikro material hasil quench-temper temperatur 200°C pada masing-masing waktu temper dengan perbesaran 100x dan 500x (a) waktu temper 15 menit (b) waktu temper 1 jam (c) waktu temper 5 jam.

B. Analisa Struktur mikro

Dari hasil pengamatan metalografi, diperoleh foto struktur mikro spesimen. Dalam hal ini struktur mikro yang diamati meliputi struktur mikro material awal, material dengan perlakuan panas proses quench-temper pada masing-masing variasi waktu temper (15 menit, 1 jam dan 5 jam). Foto metalografi ditunjukkan pada Gambar 7 (struktur mikro material awal) dan Gambar 8 (struktur mikro hasil *quench-temper*).

Dari Gambar 7 terlihat bahwa strukturmikro material awal terdiri dari karbida spheroidal dalam matriks ferit. Ini menunjukkan bahwa material awal telah dilakukan perlakuan panas sebelumnya berupa spheroidising anil pada temperatur dibawah A_1 . Spheroidising dilakukan pada baja karbon medium hingga tinggi, hal ini dilakukan untuk meningkatkan keuletan material yang memiliki kekuatan tarik cukup tinggi sehingga dapat meningkatkan ketangguhan[5]-[6].

Dengan proses quench yang dilakukan pada material awal hasil hasil spheroidising, ketika berada pada temperatur austenisasi seluruh struktur mikro akan berubah pada fase austenit namun dimungkinkan masih adanya sedikit sekali karbida-karbida sisa. Dan ketika didinginkan secara cepat dalam media air terjadi pendinginan kontinyu yang memungkinkan dimulainya proses pembentukan perlit dengan warna gelap dan cenderung bulat, namun pembentukan ini tidak berlangsung lama diteruskan dengan pembentukan martensit pada tempertur rendah. Struktur martensit memiliki kekerasan yang tinggi. Hal ini disebabkan proses *driving force* pada saat proses pendinginan cepat sehingga terbentuk struktur BCT. Pada saat quench, austenit memiliki jumlah karbon lebih besar sedangkan ferrit hanya mampu melarutkan sedikit sekali karbon. Akhirnya karbon yang seharusnya keluar dari larutan akan terperangkap dan tidak bisa berdifusi keluar karena tidak adanya energi (akibat temperatur yang sudah terlalu rendah). Struktur yang seharusnya berupa BCC menjadi struktur terdistorsi yakni struktur BCT. Akibat adanya karbon yang terperangkap ini menjadikan tegangan dalam material meningkat sehingga meningkatkan kekerasannya namun tidak begitu jauh dengan kekerasan material awal yang telah mengalami spheroidising anil.

Setelah proses quench selesai dilanjutkan dengan pemanasan kembali pada temperatur $200^{\circ}C$, sehingga muncullah martensit temper yang merupakan karbida akibat dari karbon yang berdifusi keluar struktur BCT. Pertumbuhan martensit temper ini tidak lepas dari peranan energi panas (akibat kenaikan temperatur dan lama penahanan). Struktur BCT martensit yang masih tegang akibat adanya atom karbon yang terperangkap berubah menjadi BCC. Semakin lama waktu penahanan akan memberikan kesempatan terhadap atom karbon untuk keluar dari struktur BCT. Oleh karena itulah jumlah martensit temper semakin banyak ketika material ditemper dengan waktu penahanan makin lama [5].

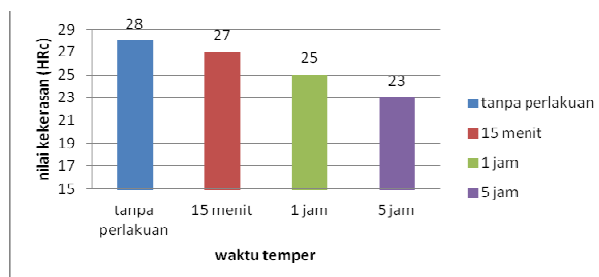
Dari penjelasan tersebut kekerasan akan semakin menurun dengan bertambahnya waktu penahanan karena martensit temper yang dihasilkan makin banyak, hal ini disebabkan martensit temper bersifat lebih stabil dan lunak dari martensit hasil quench.

C. Perbandingan Pengaruh Kekerasan Material Awal dengan Kekerasan Material Setelah Mengalami Perlakuan Panas Terhadap Umur Lelah

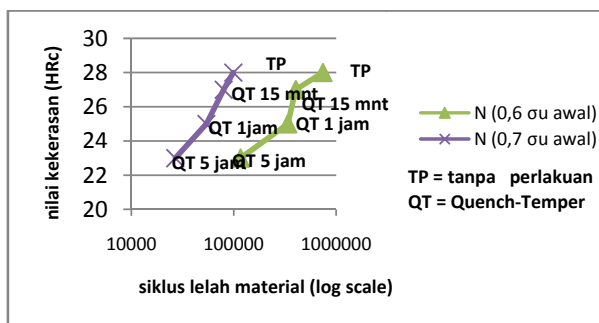
Material sebelum dan setelah mengalami proses tempering diuji dan didapatkan data-data kekerasan seperti pada Table 2 didapatkan bahwa kekerasan material tidak homogen namun selisihnya relatif kecil antara titik satu dengan titik lainnya. Dari tabel 2 dapat dibuat diagram hubungan waktu temper Terhadap nilai kekerasan material seperti yang terlihat pada Gambar 9.

Tabel 2. Hasil pengujian kekerasan material

Letak Indentasi	Nilai Kekerasan (HRC)			
	Spesimen Awal	Waktu Tempering		
		15 menit	1 jam	5 jam
Titik 1	28	25	24	21
Titik 2	29	27	25	24
Titik 3	27	28	25	24
Titik 4	27	26	26	23
Titik 5	29	27	25	22
HRC rata-rata	28	27	25	23



Gambar 9. Diagram hubungan waktu temper dengan nilai kekerasan.



Gambar 10. Grafik hubungan kekerasan dengan umur lelah material.

Menurut Gambar 9 ini selain dapat dibuat untuk mengetahui pengaruh waktu temper perlakuan panas berupa quench-temper juga dapat digunakan untuk melihat perbandingan nilai kekerasan material sebelum dan sesudah dilakukannya perlakuan panas quench-temper dengan variasi waktu temper. Dari Gambar 9 diketahui bahwa kekerasan rata-rata tertinggi diperoleh pada material awal sebesar 28 HRC, kemudian material hasil quench temper pada waktu temper 15 menit dengan nilai kekerasan sebesar 27 HRC diikuti waktu temper 1 jam sebesar 25 HRC dan 23 HRC pada waktu temper 5 jam. Dari data tersebut diperoleh bahwa semakin tinggi waktu temper maka kekerasan akan makin rendah, secara persentase kekerasan pada waktu temper 15 menit menurun sangat kecil yaitu sebesar 3,57% HRC awal, dilanjutkan pada waktu temper 1 jam menurun kekerasannya hingga 10,71% HRC awal dan makin menurun pada waktu temper 5 jam hingga mencapai 17,86% HRC awal.

Dari penjelasan tersebut diperoleh semakin menurunnya kekerasan akibat penambahan waktu temper yang diberikan. Hal ini terjadi karena lama waktu temper yang diberikan berpengaruh terhadap perubahan strukturmikro yang terjadi. struktur mikro hasil quench berupa martensit bersifat keras karena adanya tegangan dalam yang besar akibat pendinginan cepat yang menjadikan struktur tidak stabil. Ketika dilakukan

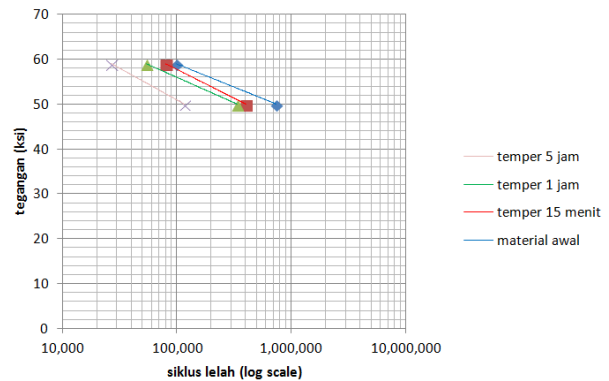
pemanasan kembali (temper) struktur mikro berupa martensit yang tidak stabil akan berangsur-angsur berubah menjadi struktur yang lebih stabil dan lunak yaitu martensit temper, semakin lama waktu temper yang diberikan maka akan semakin banyak martensit temper yang dihasilkan sehingga kekerasannya makin rendah [5]. kekerasan yang makin rendah ini diikuti dengan sifat keuletan yang makin meningkat. Berdasarkan Gambar 10 diketahui bahwa semakin tinggi kekerasan maka umur lelah yang dihasilkan akan makin tinggi dengan pembebanan yang sama sehingga batas lelah yang dihasilkan makin tinggi pula. Hal ini sesuai dengan teori [7]-[8] menjelaskan bahwa kekerasan material dapat mempengaruhi besarnya batas lelah suatu material. Sampai kekerasan tertentu harga batas lelah akan semakin meningkat, kemudian batas lelah justru akan turun yang menunjukkan material mulai bersifat getas.

D. Perbandingan Umur Lelah Material Awal dengan Material Hasil Quench-Temper

Pengujian umur lelah baja St 41 dilakukan pada material awal dan yang telah mengalami perlakuan panas quench-temper. Sesuai dengan metode yang telah dipaparkan sebelumnya bahwa material diberikan perlakuan temper pada temperatur 200°C dengan waktu temper selama 15 menit, 1 jam, dan 5 jam.

Dari Gambar 11 diperoleh umur lelah mulai dari yang tertinggi secara berturut-turut pada beban yang sama yaitu terjadi pada material awal, material perlakuan panas quench-temper pada waktu penahanan selama 15 menit, waktu penahanan 1 jam dan waktu penahanan 5 jam. Terlihat bahwa umur lelah rata-rata yang didapatkan pada waktu temper 15 menit menurun sebesar 34,30% dari umur lelah material awal pada pembebanan 0,6 σ dan sedikit menurun sebesar 7,23% dari umur lelah material awal pada pembebanan 0,7 σ . Sedangkan pada waktu temper 1 jam didapatkan umur lelah rata-rata lebih rendah lagi yaitu menurun sebesar 59,70% dari umur lelah material awal pada pembebanan 0,6 σ dan 26,83 % dari umur lelah material awal pada pembebanan 0,7 σ . Umur lelah material makin menurun dengan bertambahnya waktu temper, yaitu pada waktu temper 5 jam umur lelah material menurun hingga 80,54% dari umur lelah material awal pada pembebanan 0,6 σ dan 63,05 % dari umur lelah material awal pada pembebanan 0,7 σ .

Dari hasil tersebut dapat dijelaskan bahwa lamanya waktu temper akan mempengaruhi jumlah martensit temper yang terbentuk. Semakin lama waktu temper maka martensit temper yang terbentuk akan semakin banyak, hal ini yang akan menyebabkan kekerasan material semakin menurun. Telah dijelaskan sebelumnya dengan bertambahnya kekerasan diikuti turunnya keuletan material akan menyebabkan umur lelah material yang makin rendah hal ini terjadi karena fenomena tersebut masih berada pada daerah dimana dengan kekerasan yang dimiliki material belum melampaui batas lelah maksimumnya sehingga kekerasan berbanding lurus dengan umur lelah material [7,8]. Hal ini dapat pula diartikan bahwa kekerasan optimal yang dihasilkan material hasil quench-temper (15 menit) masih bersifat tangguh dimana kekerasan tinggi diikuti dengan keuletan yang cukup tinggi pula sehingga dengan menambah waktu temper akan mengakibatkan ketangguhan menurun, begitu juga dengan umur lelah yang diperoleh akan semakin turun.



Gambar 11. Grafik perbandingan umur lelah material awal dengan hasil variasi waktu quench-temper pada 200°C.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material awal memiliki struktur mikro berupa karbida spheroidal dalam matriks ferit sedangkan struktur mikro hasil quench-temper terdiri dari martensit, perlit dan martensit temper. Semakin lama waktu temper yang diberikan maka martensit temper yang terbentuk akibat proses temper akan semakin banyak pula sedangkan martensit hasil quench makin sedikit, hal ini akan menurunkan nilai kekerasan dari material karena sifat dari martensit temper yang lebih lunak dari pada martensit hasil *quench*.
2. Umur lelah tertinggi dihasilkan oleh material awal. Dengan semakin lama waktu temper maka martensit temper yang terbentuk akan semakin banyak, hal ini yang akan menyebabkan kekerasan material semakin menurun. Dengan turunnya kekerasan diikuti naiknya keuletan material akan menyebabkan umur lelah material yang makin rendah, hal ini terjadi karena fenomena tersebut masih berada pada daerah dimana dengan kekerasan yang dimiliki material belum melampaui batas lelah maksimumnya sehingga kekerasan berbanding lurus dengan umur lelah material.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Soeharto, Liestiana Novika Rakhmatanti, *Umur Lelah Baja AISI 1045 Akibat Perlakuan Panas Hasil Quench-Temper Dengan Beban Lentur Putar Pada Siklus Lelah Tinggi*, Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XI (SNTTM XI) & Thermo fluid IV, Universitas Gadjah Mada (UGM), Yogyakarta (2012).W.-K. Chen, *Linear Networks and Systems* (Book style). Belmont,CA: Wadsworth (1993) 123–135.
- [2] Budi Darmawan, *Studi Eksperimen Umur Lelah Baja Poros AISI 1045 Hasil Quenching-Tempering Variasi Temperatur Dan Waktu Temper Pada Uji Rotating Bending*, Tugas Akhir Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS (2010)
- [3] Sumiyanto dan Rudi Saputra, "Analisis Sifat Mekanis Baja Dua Fasa Akibat Variasi Temperatur Austenitasi", Institut Sains dan Teknologi Nasional.
- [4] Vander Voort G.F, 1984, "Metallography Principles and Practice", Mc Graw Hill Book Company, New York.
- [5] Avner, Sidney H, 1974, "Introduction to Physical Metallurgy", Mc Graw Hill Book Company, New York.
- [6] Callister, W.D, 2007, "Material Science and Engineering", John Wiley and Sons, Inc., New York.
- [7] Dieter, G.E, 1988, "Mechanical Metallurgy second edition" Mc Graw Hill Book Company, New York.
- [8] Juvinall, R.C. and Marshek, K.M., 2000, "Fundamentals of Machine Component Design, 3rd edition", John Wiley and Sons, Inc., New York.