

PENGARUH KECEPATAN AIR SIRKULASI SEBAGAI MEDIUM QUENCHING TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO PADA BAJA AISI 4140

Gunawan Dwi Haryadi¹⁾

Abstrak

Baja karbon yang dipanaskan sampai pada suhu austenit kemudian didinginkan secara cepat akan terbentuk struktur martensit yang memiliki kekerasan yang lebih tinggi dari struktur perlit maupun ferit, proses ini biasa dikenal dengan *Quenching*. Proses *quenching* sederhana menghasilkan selubung uap pada sekitar spesimen yang pada gilirannya akan mengakibatkan ketidakseragaman proses pendinginan yang pada akhirnya memunculkan fasa bukan martensit. Penelitian ini diawali dengan perancangan dan pembuatan alat uji yang berupa sistem *quenching* dengan air tersirkulasi, dilanjutkan dengan penyiapan spesimen baja AISI 4140 dengan panjang 100 mm dan diameter 35 mm, kemudian spesimen diperlakukan panas hingga temperatur austenit kemudian didinginkan pada medium *quenching* dengan sistem air tersirkulasi. Variasi penelitian yang dilakukan antara lain dengan tanpa air tersirkulasi, $v = 0,597$ m/s, $v = 0,696$ m/s, $v = 0,833$ m/s. Karakterisasi dan evaluasi dari penelitian ini dilakukan dengan uji kekerasan dan foto struktur mikro (mikrografi).

PENDAHULUAN

Proses perlakuan panas (*Heat-Treatment*) umumnya merupakan operasi pemanasan dengan pendinginan secara terkontrol untuk mendapatkan mikrostruktur khusus yang merupakan kombinasi dari penyusunnya. [Ref.14.hal. 1]

Baja karbon yang dipanaskan sampai pada suhu austenit kemudian didinginkan secara cepat akan terbentuk struktur martensit yang memiliki kekerasan yang lebih tinggi dari struktur perlit maupun ferit, proses ini biasa dikenal dengan *Quenching*.

Berbagai mikrostruktur dapat terbentuk pada paduan baja, martensit merupakan yang paling keras dan kuat tetapi getas. Kekerasannya tergantung pada kandungan karbon yang ada pada paduan tersebut. Austenit lebih padat daripada martensit, bagaimanapun pada waktu transformasi fasa dengan *quenching* volumenya akan berkurang. Konsekuensinya, sebagian besar *quenching* akan mengalami keretakan (*crack*) karena pengaruh *internal stresses*. [Ref.1.Hal.331]

Baja carbon AISI 4140 memiliki unsur pokok diantaranya karbon 0,38 - 0,45% berat, Cromium 0,5 - 1,1 % berat, Molibdenum 0,15 - 0,25 % berat. [Ref.17.]

Temperatur larutan pendingin pada bak harus tetap dijaga seragam, sehingga setiap bagian dari spesimen baja yang di-*quench* tetap dapat didinginkan pada temperatur yang sama. Akibat adanya perpindahan panas dari spesimen baja ke larutan pendingin maka terjadi pembentukan gelembung-gelembung udara yang kemudian berlanjut dengan terbentuknya selubung udara pada permukaan spesimen tersebut, selubung udara tersebut perlu segera disingkirkan agar perpindahan panas dari spesimen menuju larutan pendingin tetap baik. Untuk spesimen yang berbentuk tidak teratur/rumit sangat tidak baik jika dilakukan proses *quench* hanya dengan pencelupan pada larutan pendingin, karena akan cenderung terjadi pembentukan lapisan uap pada bagian-bagian permukaan

an tertentu, maka akan terjadi laju pendinginan yang tidak seragam. Masalah-masalah tersebut selalu dihadapi pada proses *quenching*, karena akan terjadi penurunan laju pendinginan spesimen baja sehingga tujuan utama pembentukan baja yang seluruh bagiannya bermikrostruktur *martensite* tidak dapat tercapai.

Untuk mengatasi masalah diatas dapat dilakukan dengan dua cara, pertama adalah dengan membuat larutan pendingin pada bak tersirkulasi, atau dengan cara membuat spesimen bergerak berputar-putar di dalam bak larutan pendingin. Membuat spesimen bergerak berputar-putar di dalam bak larutan pendingin sangat sulit jika spesimen memiliki dimensi yang besar. Sehingga membuat larutan pada bak tersirkulasi adalah cara terbaik untuk mengatasi masalah yang dihadapi pada metode *quenching*. [Ref.19.]

Setelah memperhatikan apa yang dipaparkan pada latar belakang diatas penulis tertarik melakukan penelitian untuk mengamati fenomena yang terjadi karena pelakuan *quenching* dengan sistem air tersirkulasi pada baja AISI 4140, dilihat dari tingkat kekerasan dan perubahan struktur mikro yang terjadi karena perlakuan tersebut.

Tujuan yang hendak dicapai dalam Tugas Akhir dengan pembuatan alat uji *quenching* dengan sistem air tersirkulasi adalah :

1. Mengetahui sistem kerja medium *quenching* dengan sistem air tersirkulasi.
2. Memahami fenomena perubahan kekerasan dan struktur mikro pada baja AISI 4140 yang didinginkan secara cepat dalam medium air tersirkulasi.

Masalah yang dibahas dalam Tugas Akhir ini dibatasi oleh beberapa hal diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Spesimen yang digunakan merupakan baja AISI 4140
2. Dimensi spesimen yang digunakan dalam penelitian ini memiliki adalah (diameter (d)=35 mm, dan panjang 100 mm)

¹⁾ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP

3. Medium *quenching* adalah air tanah dengan volume yang ditentukan
4. Analisa hasil proses *quenching* dengan menggunakan uji kekerasan dan *metalografi*.

DASAR TEORI

1. Baja AISI 4140

Baja merupakan material yang paling banyak dipakai dalam dunia perancangan teknik bahkan mencapai 90 % dari seluruh produk engineering menggunakan baja sebagai komponen utamanya.

Kebanyakan baja karbon dan baja paduan yang dihasilkan oleh pabrikan perlu diberikan proses perlakuan panas sebelum siap digunakan di lapangan. Proses perlakuan panas yang dilakukan untuk mengubah sifat material baja karbon dan baja paduan, seperti kekerasan, ketangguhan, dan ketahanan korosi, serta untuk peningkatan kemampuan lainnya.

Baja AISI 4140 merupakan material yang banyak dipakai sebagai bahan dasar dari *crankshaft*, *shaft*, *gear*, gandar, dan berbagai part mesin dimana bagian – bagian tersebut membutuhkan sifat tahan aus, kekerasan yang tinggi dan tangguh, disamping itu pada industri perminyakan digunakan untuk *pump liner* [Ref.10.Hal. 25&29] Table 2.1. menunjukkan komposisi kimia dari baja AISI 4140.[Ref.10.Hal.20]

Tabel 2.1 Komposisi kimia (%berat) baja AISI 4140

Baja	Komposisi Kimia (% berat)								
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	P	S	
AISI 4140	0,37	0,65	0,20	0,75	0,15	—	—	—	
	—	—	—	—	—	—	—	—	
	0,44	1,10	0,35	1,2	0,25	—	—	—	
	Perlakuan panas								
	Normalising		Austenisasi			Tempering			
	870 – 920 °C		840 – 870 °C			550 – 675 °C			

Memperhatikan komposisi dan penggunaannya diperlukan suatu *treatment* untuk meningkatkan sifat – sifat baja AISI 4140 salah satunya adalah kekerasannya. Proses untuk menghasilkan baja sehingga lebih keras dengan terbentuknya martensit pada struktur mikronya dapat dilakukan dengan *quenching*. Namun proses *quenching* sederhana memiliki banyak kekurangan, dan tidak dapat dilakukan pada baja-baja karbon rendah, karena diperlukan pendinginan yang lebih cepat jauh melebihi laju pendinginan kritisnya.

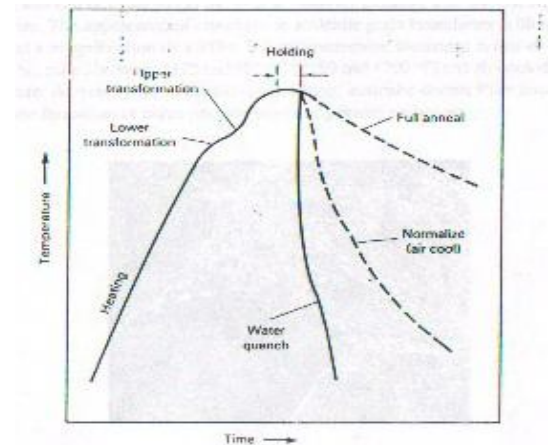
2. Diagram Fasa

Diagram fasa besi-karbon (Fe-C) merupakan sebuah peta yang dapat digunakan sebagai sebuah daftar rangkaian operasi yang menunjukkan fasa yang terbentuk pada besi-karbon dengan komposisi karbon dan temperatur tertentu. Diagram fasa besi-karbon hanya merupakan petunjuk, karena banyak jenis baja mengandung elemen yang mengubah posisi dari batas fasa.

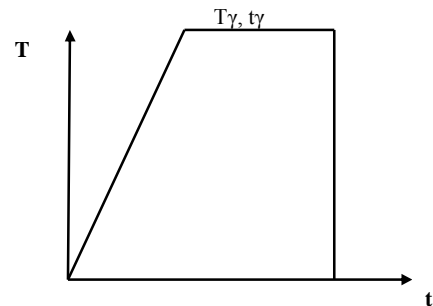
3. Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Proses perlakuan panas secara umum merupakan operasi pemanasan dengan pendinginan secara terkontrol untuk mendapatkan struktur mikro khusus yang merupakan kombinasi dari penyusunnya.[Ref.14.Hal. 1]

Elemen pokok dari beberapa perlakuan panas adalah siklus pemanasan (*Heating Cycle*), temperatur penahanan (*Holding temperature*), waktu, dan siklus pendinginan (*Cooling cycle*). Siklus pemanasan dan tiga tipe siklus pendinginan secara skematik digambarkan oleh gambar 2.2. [Ref.14.hal.1]



Gambar.1. Diagram sederhana siklus pendinginan [Ref.14.hal.2]



Gambar 2. Diagram skematis proses *quenching* [Ref.8.Hal.4]

Sebagian besar baja karbon dan baja paduan rendah mengandung kurang dari 0,8% berat Carbon. Memiliki bentuk struktur mikro yang merupakan paduan dua fasa terdiri dari besi α (*ferrite*) dan *pearlite*, yang berstruktur kubus pemusatan ruang, kpr (BCC) dan bila dipanaskan sampai temperatur austenit akan berubah strukturnya menjadi kubus pemusatan sisi, kps (FCC). Pendinginan yang lambat akan menghasilkan komposisi fasa yang sama seperti sebelum pemanasan yaitu pearlite dan ferrite, namun bila dilakukan proses pendinginan yang cepat dimungkinkan untuk menghindari transformasi austenite menjadi ferrite dan pearlite dan menghasilkan struktur *body centered tetragonal* (BCT) yang dikenal dengan martensit. Martensit merupakan baja yang

memiliki kekerasan paling tinggi pada komposisi yang sama. [Ref.14.]

Secara skematis proses perlakuan panas pada sistem *quenching* ditunjukkan seperti pada gambar 2. Spesimen dipanaskan sampai T_γ dan ditahan selama t_γ , pada proses ini diharapkan semua unsur paduan (karbon, krom, *molybdenum*) larut dalam baja. Hasil akhir dari proses austenisasi adalah fasa austenit yang memiliki komposisi kimia yang homogen di semua tempat dan ukurannya tertentu. Selanjutnya spesimen didinginkan secara cepat kedalam medium pendingin. [Ref.8.Hal.4]

Perubahan *austenit* menjadi *martensite* dimulai saat temperatur tertentu yang disebut *martensit start (Ms) temperature* dan dilanjutkan dengan penurunan temperatur sampai *martensit finish (Mf) temperature*. Pada M_f reaksi dari austenit menjadi martensit berhenti. M_s dan M_f dipengaruhi oleh konsentrasi elemen penyusun, konsentrasi karbon, dan pemisahan paduan yang terjadi selama pembekuan. Pengaruh dari konsentrasi karbon terhadap M_s dan M_f temperatur seperti terlihat pada gambar 3.

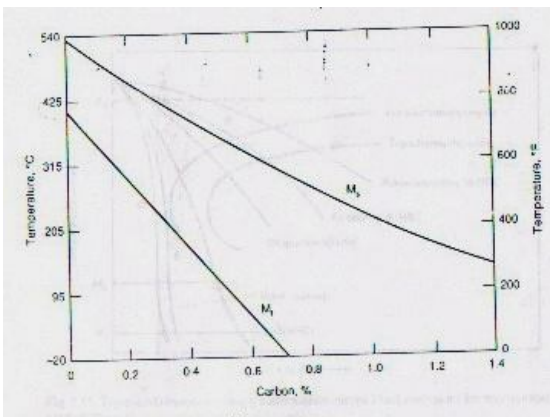
Temperatur M_s untuk beberapa baja dapat diperoleh dengan percobaan dan dapat pula didekati dengan menggunakan rumus empiris. Salah satu rumus yang buat oleh Grange and Steward adalah :

$$M_s(^{\circ}F) = 1000 - 650x\%C - 70x\%Mn - 35x\%Ni - 70x\%Cr - 50x\%Mo \quad (\text{Pers.1})$$

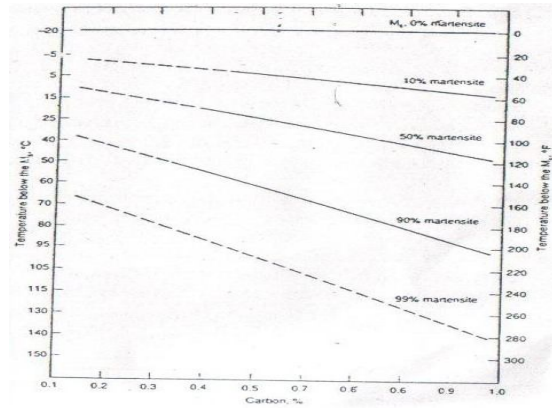
Semua konsentrasi elemen penyusun ditunjukkan dengan persen berat, dan (Pers.2.1) berlaku bila semua karbida menyebar pada austenite. Rumus empiris yang lain ditunjukkan oleh Atkins. [Ref.1.hal.8]

$$M_s(^{\circ}C) = 539 - 432x\%C - 30,4x\%Mn - 17,7x\%Ni - 12,1x\%Cr - 7,5x\%Mo \quad (\text{Pers.2})$$

Temperatur M_f penting ketika percobaan untuk meminimalisir tahanan austenit pada baja *quench*. Pengaruh konsentrasi karbon pada proporsi terbentuknya martensit pada temperatur yang diberikan dibawah M_s digambarkan pada Gambar. 4.



Gambar. 3. Pengaruh karbon pada temperatur M_s dan M_f [Ref.14.hal.8]

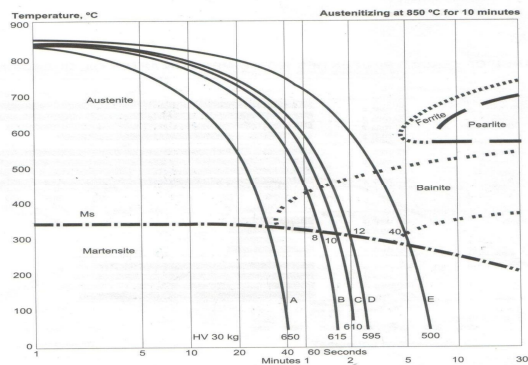


Gambar. 4. Hubungan antara konsentrasi karbon pada baja dan proporsi martensit yang dibentuk pada temperature yang diberikan. [Ref.14.hal.9]

4. Kurva Pendinginan

Metode yang umum digunakan pada penguatan baja meliputi pendinginan tanpa henti (*continuously cooling*) dari temperatur austenite pada cairan yang cepat menyerap panas. Kecepatan pendinginan pada spesimen menunjukkan karakteristik pengeluaran panas dari medium pendingin, karakteristik thermal paduan, dan ketebalan dari spesimen. Kurva pendinginan digabungkan dengan kurva C merepresentasikan awal dan akhir dari transformasi. Titik dimana kurva pendinginan bertemu dengan awal dan akhir kurva merepresentasikan awal dan akhir dari transformasi sebagai indikasi kecepatan pendinginan. [Ref.14.hal.9]

Diagram CCT seperti yang ditunjukkan pada gambar 5. diagram ini merupakan diagram CCT untuk baja AISI 4140 berikut kurva pendinginan dan perkerasan yang dicapai dengan temperatur austenisasi 850 °C serta waktu penahanan 10 menit, dimana digambarkan bentuk pendinginan yang paling cepat seperti pada kurva A dan yang paling lambat seperti pada kurva E, dimana kurva A akan menghasilkan perkerasan maksimum karena strukturnya tersusun atas martensit sempurna dengan kekerasan 650 HVN, sedangkan pada kurva E akan menghasilkan perkerasan yang paling kecil dengan nilai kekerasan 500 HVN karena strukturnya tersusun atas martensit dan bainit yang tebal.



Gambar 5. Kurva CCT untuk baja AISI 4140 dengan temperatur austenizing 850 °C

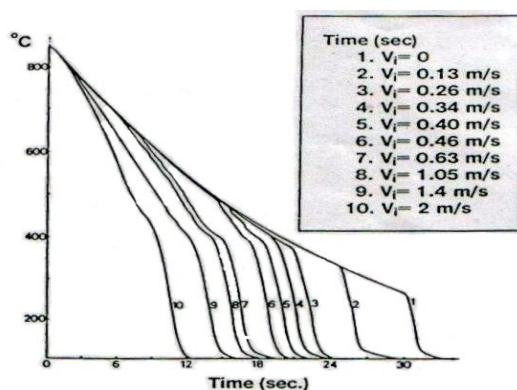
Proses *quenching* menyebabkan transformasi fasa dari γ - FCC menjadi α -BCT. Kecepatan transformasi ini melebihi kecepatan suara sehingga fenomenanya susah untuk diamati dalam eksperimen. Hasil proses *quenching* adalah fasa α yang memiliki sifat sangat keras (65 -66 HRC) tetapi getas. Sifat keras fasa α disebabkan oleh adanya distorsi kisi pada struktur kristal akibat :

- Adanya unsur karbon yang terjebak didalam sisi *oktahedral BCC*.
- Adanya atom pengotor pada batas butir austenit.
- Terbentuknya karbida selama *quenching*.
- Timbulnya tegangan sisa hasil *quenching*. [Ref..8.Hal.5.]

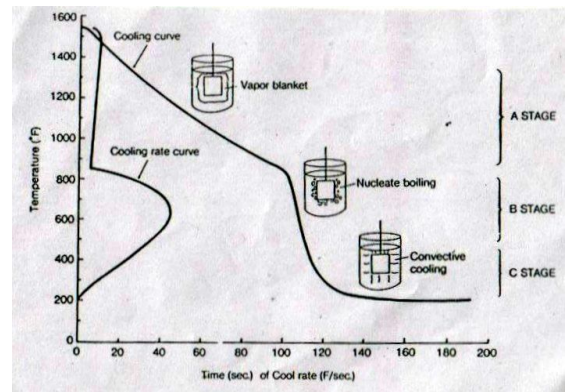
5. Perancangan sistem *Quenching*

Keseragaman kondisi medium *quenching* penting untuk meminimalisir adanya *cracking*, *distorsi*, dan ketidakseragaman kekerasan, hal ini berarti bahwa selama proses *quenching* sebisa mungkin perpindahan panasnya seragam atau dengan kata lain temperatur temperatur larutan pendingin pada bak harus tetap dijaga seragam, sehingga setiap bagian dari spesimen yang *diquench* tetap didinginkan pada temperatur yang sama. Akibat adanya perpindahan panas dari spesimen baja kelarutan pendingin maka terjadi pembentukan gelembung-gelembung udara yang kemudian berlanjut dengan terbentuknya selubung udara pada permukaan spesimen tersebut, selubung udara tersebut perlu segera disingkirkan agar perpindahan panasnya tetap baik.

Permasalahan selubung udara diatas dapat diatasi dengan dua cara, pertama adalah dengan membuat larutan pada bak pendingin tersirkulasi, atau dengan cara membuat spesimen bergerak berputar-putar didalam bak larutan pendingin. Membuat spesimen bergerak dalam larutan pendingin cukup sulit apalagi jika spesimennya besar dan tidak beraturan, sehingga membuat larutan pada bak *quench* tersirkulasi merupakan cara yang paling baik. [Ref.17.] Pengaruh agitasi pada hasil *quench* dengan memvariasikan kecepatan aliran menunjukkan adanya peningkatan kekerasan dengan meningkatnya kecepatan aliran.[Ref.14.Hal. 339-340]



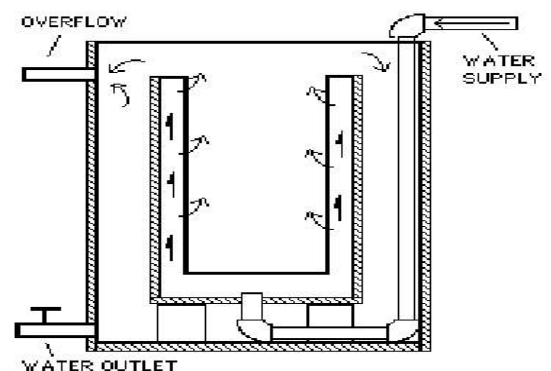
Gambar 6. Efek agitasi pada kurva pendinginan [ref. 14. hal. 241]



Gambar 7. Mekanisme pendinginan pada spesimen yang di-*quench*. [Ref. 14 hal. 70]

Quenching yang dilakukan pada logam spesimen panas (setelah proses austenisasi) pada medium pendingin akan mengalami mekanisme pendinginan seperti pada Gb. 7. yang memperlihatkan laju pendinginan panas dari logam sebagai fungsi dari temperatur permukaan logam. Gb. 7. juga menghubungkan temperatur permukaan logam dan koefisien perpindahan panas terhadap mekanisme pelepasan panas. Awal pencelupan, logam pertama kali akan diselubungi oleh selubung uap, yang akan pecah saat logam mendingin. Perpindahan panas saat terbentuknya selubung uap ini buruk, dan logam akan mendingin dengan lambat pada tahap ini.

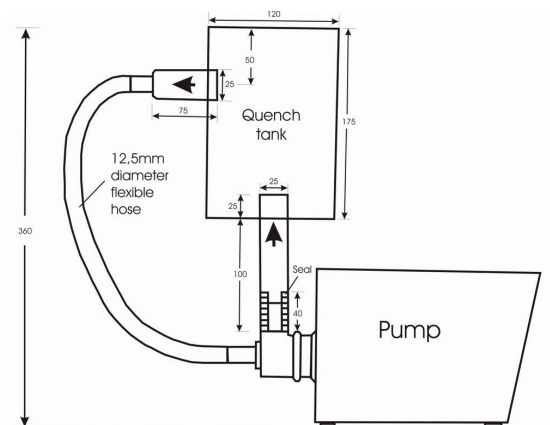
Tahap kedua dari kurva pendinginan dinamakan tahap didih nukleat dan pada tahap ini terjadi perpindahan panas yang cepat karena logam langsung bersentuhan dengan air. Pada tahap ini, logam masih sangat panas dan air akan mendidih dengan hebatnya. Kecepatan pembentukan uap air menunjukkan sangat tingginya laju perpindahan panas. Pada tahap ketiga, merupakan tahap pendinginan konveksi dan konduksi, dimana permukaan logam telah bertemperatur dibawah titik didih air. Tahap ini hanya mengalami perpindahan panas melalui konveksi dan konduksi.



Gambar 8. Bentuk sistem *quench* untuk *quenchant* air atau air garam (Ref.17)

Instalasi *quenching* dengan agitasi telah banyak dibuat oleh para ahli material, bahkan telah dijual bebas dipasar. Perbedaan setiap instalasi memiliki kelebihan sendiri-sendiri, dan dibuat

berdasarkan jenis media pendingin dan menghindari terbentuknya selubung uap pada spesimen panas yang dicelup.



Gambar. 9. Sistem *quenching* yang lain [Ref.14.Hal.349]

Sistem *quenching* pada gambar 9. diatas menggunakan pompa sentrifugal sebagai pengatur sirkulasi. Instalasi bak penampung media pendingin terdapat dibagian atas dan pompa diletakkan pada bagian bawahnya. Air yang disemburkan langsung mengenai spesimen uji yang tercelup pada bak. Kecepatan semburan air yang nantinya akan mempengaruhi kecepatan pendinginan memiliki hubungan dengan debit aliran yang mampu dialirkan oleh pompa dan hal tersebut dipengaruhi oleh kecepatan putaran pompa. Sedangkan untuk pompa sentrifugal yang tidak dapat diatur kecepatannya, maka diberikan sistem *by pass* untuk mengatur aliran yang keluar dari pipa utama yang selanjutnya menyembur spesimen benda uji.

Komponen penting yang lain dalam perancangan sistem *quenching* adalah posisi penempatan material (keranjang spesimen). Rekomendasi umum yang dapat dipakai untuk menentukan posisi penempatan material yang tepat antara lain :[Ref.14. Hal.360]

- Part harus ditempatkan untuk mendapatkan aliran media pendingin secara maksimum dan selalu bersinggungan selama *quench* berlangsung.
- Mencegah tergelincir
- Untuk benda-benda simetris seperti bearing, silinder, dapat disusun pada rak
- Part datar seperti mata gergaji, plat kopling, bagus untuk ditempatkan pada batang slot horisontal yang terpisah satu sama lain untuk memudahkan fluida bersinggungan.
- Gulungan kawat dapat ditopang dengan bentuk vertikal seperti sarang laba-laba atau secara horisontal yang ditopang oleh batang.
- Part yang kecil dapat ditempatkan pada keranjang untuk membuat selalu bersinggungan dengan medium *quenching* selama pencelupan.
- Sederhana, (bila mungkin bebas dari las), dan mudah untuk dikelola.

- Total berat dari spesimen dan peralatan harus sebisa mungkin mampu menampung perpindahan panas selama *quench* untuk mengurangi kenaikan temperatur medium *quenching*.

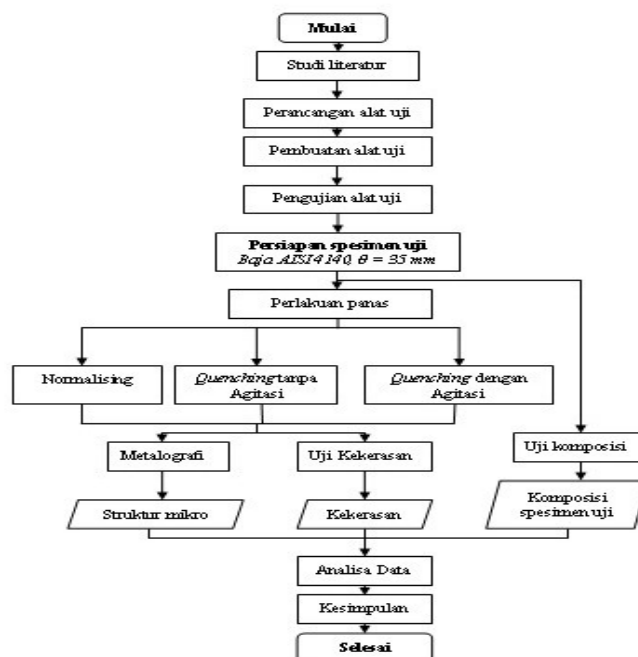
Perancangan sebuah bak penampung media pendingin pada instalasi *quenching* dengan agitasi memiliki pertimbangan berupa dimensi dan besar volume media pendingin yang ditampung. Semakin besar volume media yang ditampung oleh bak, maka semakin besar pula panas yang dapat diserap oleh media pendingin, selain itu faktor – faktor yang menjadi pertimbangan adalah :

- a. Sifat thermal dari spesimen benda uji
- b. Sifat umum dari media pendingin, seperti kapasitas panas, densitas, viskositas dan lainnya.

Karakteristik pembentukan selubung uap dari media pendingin pada permukaan spesimen panas.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini terdiri dari berbagai macam kegiatan yaitu antara lain : studi literatur, perancangan dan pembuatan alat uji *quenching*, proses perlakuan panas, dan pengujian material hasil perlakuan. Urutan penelitian ditunjukkan pada gambar 10.



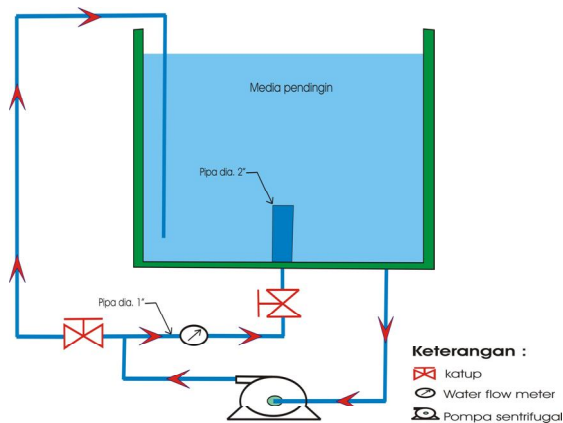
Gambar 10. Diagram alir penelitian

PERANCANGAN ALAT *QUENCHING* DENGAN METODE SISTEM AIR TERSIRKULASI

1. Sistem umum *quenching* dengan air tersirkulasi

Melalui tahap studi literatur perancangan instalasi *quenching* dengan sistem air tersirkulasi maka dapat ditentukan mekanisme sirkulasi yang ditentukan, volume bak *quench*, dan bentuk keranjang spesimen

yang tempat spesimen benda uji. Gambar 11. merupakan diagram instalasi quenching dengan agitasi yang dibuat pada penelitian ini, dimana didalamnya terdapat katub dengan sistem *by pass* untuk memvariasi debit aliran yang masuk kedalam media pendingin. Sistem *by pass* digunakan karena pompa sentrifugal yang digunakan pada instalasi tidak dapat diatur kecepatan putarannya.



Gambar 11. Sistem umum *quenching* dengan air tersirkulasi

2. Proses Pembuatan Instalasi *Quenching* dengan Sistem Air Tersirkulasi

Langkah-langkah yang dilakukan dalam proses perakitan instalasi *quenching* dengan air tersirkulasi adalah sebagai berikut :

1. Mengukur panjang besi siku yang akan digunakan sebagai rangka dari instalasi alat ini. Kemudian memotong dan mengelas sehingga membentuk sebuah rangka dengan dimensi 65cm x 65cm x 110cm (p x l x t).
2. Memasang roda-roda pada bagian bawah rangka.
3. Memasang pipa galvanis pada bak penampung medium pendingin dengan melubangi dasarnya tepat ditengah-tengah dengan diameter 2 inci, lalu mengelas pipa tersebut hingga menyatu dengan bak penampung medium pendingin.

4. Mempersiapkan bak penampung medium pendingin dengan meratakan seluruh bagiannya, dan mendempul bagian dasarnya.
5. Melubangi bak penampung medium pendingin dengan diameter 1 inci sebanyak dua buah. Satu dibagian dasar bak penampung medium pendingin sebagai saluran isap menuju pompa air, dan satu di dinding bak penampung medium pendingin sebagai saluran masuk sebagai *by pass*.
6. Meletakkan bak penampung medium pendingin pada rangka, dan memastikan sudah tepat ditengah-tengah.
7. Memasang pompa air dibagian bawah rangka dengan tambahan rangka penyangga.
8. Memasang pipa PVC untuk saluran isap dari bagian dasar bak penampung menuju pompa air.
9. Memasang pipa PVC untuk saluran keluar pompa, memasang *water flow meter*, dan *ball valve* sebagai *by pass*. Dengan menggunakan sambungan T sebagai pembagi aliran, satu bagian dialirkan menuju lubang di bagian dinding bak penampung medium pendingin dengan melewati sebuah *ball valve* sebagai pengatur jumlah aliran. Dan satu bagian lainnya menuju bagian dasar bak pada pipa galvanis, dan aliran melewati *water flow meter* untuk mengetahui debit aliran yang mengalir menuju pipa galvanis yang nantinya akan menyemburkan air ke spesimen uji.
10. Mengecat seluruh bagian rangka dan bak penampung medium pendingin.
11. Mengukur panjang kawat stainless steel, kemudian memotong dan mengelasnya menjadi berbentuk keranjang dengan diameter 9cm, dan tinggi 25 cm.
12. Mengukur lebar plat seng, kemudian memotong dan mengelingnya sehingga membentuk selimut tabung, dengan diameter 11 cm, dan tinggi 30 cm.
13. Mengecat plat seng tersebut.
14. Memasukkan plat seng tersebut sebagai selubung keranjang.
15. Meletakkan keranjang di dalam bak penampung medium pendingin, tepat diatas pipa galvanis penyembur air.
16. Melakukan pengecekan dan pengujian pada instalasi *quenching* dengan sistem aliran tersebut.

3. Pengujian Alat

Pengujian alat dilakukan untuk mengetahui kapasitas dan kemampuan alat *quenching* dengan metode air tersirkulasi sehingga dalam penggunaan dalam pengujian dapat diketahui parameter yang mempengaruhinya. Parameter yang diuji antara lain :

- a. Kapasitas aliran
- b. Kapasitas maksimum sistem *quenching*
- c. Perhitungan kecepatan pendinginan

4. Pengukuran kapasitas aliran

Pengaturan kecepatan aliran dilakukan dengan mengatur bukaan *by pass* yang terpasang pada sistem

aliran, beberapa variasi yang dilakukan pada penelitian ini antara lain :

- Katup by pass tertutup penuh
 $V_2 = 0,833 \text{ m/s}$
- Katup by pass terbuka ¼ bagian
 $V_2 = 0,696 \text{ m/s}$
- Katup by pass terbuka penuh
 $V_2 = 0,597 \text{ m/s}$

5. Perhitungan Kapasitas maksimum sistem *quenching*

a. Bak medium pendingin (*quenchant*)

$$\begin{aligned} \phi_{\text{bak}} &= 57,5 \text{ cm} \\ \text{tinggi (t)} &= 40 \text{ cm} \\ \text{Volume} &= A_{\text{Alas}} \cdot t \\ &= 0,104 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Kenaikan temperatur yang diijinkan adalah 5°C , Sehingga $\Delta T = 5^\circ\text{C}$
 Diasumsikan pada percobaan didapatkan data sebagai berikut :

$$\begin{aligned} T_{\text{rata-rata}} &= (32+27)/2 \\ &= 29,5^\circ\text{C} \\ T_1 &= 27^\circ\text{C} \\ T_2 &= 32^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\text{Sehingga, } \rho = \frac{m}{V} \text{ dan } m = \rho \cdot V \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{dimana } \rho \text{ air pada } 29,5^\circ\text{C} &= 995,3 \\ &= 995,3 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,104 \text{ m}^3 \\ &= 103,38 \text{ kg} \end{aligned}$$

Jadi berat air yang ditampung oleh bak adalah 103,38 kg. Sesuai persamaan 2.6. maka :

$$\begin{aligned} T_r &= Q / (W_q \cdot C_{pq}) \\ \therefore C_{pq} \text{ pada } 29,5^\circ\text{C} &= 4,1765 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \\ Q &= T_r \cdot W_q \cdot C_{pq} \\ &= 5^\circ\text{C} \cdot 90,46 \text{ kg} \cdot 4,1765 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \\ &= 2158,85 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Jumlah kalor yang diterima oleh air sebesar 2158,85 kJ

b. Logam (Spesimen Uji)

Data yang didapat pada penelitian ini adalah :

$$\begin{aligned} T_1 &= 850^\circ\text{C} \\ T_2 &= 50^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Baja AISI 4140 memiliki kadar karbon 0,4 % diketahui :

$$C_{\text{pm}} \text{ baja karbon } 0,4\% \text{C} = 0,46 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$Q = C_{\text{pm}} \cdot W_m \cdot (T_1 - T_2)$$

$$W_m = \frac{Q}{C_{\text{pm}} \cdot (T_1 - T_2)}$$

$$W_m = 5,46 \text{ kg (Berat spesimen maksimum)}$$

6. Perhitungan Kecepatan Pendinginan

- Katup tutup penuh $t = 26,79$ detik
- Katup terbuka ¼ bagian $t = 27,96$ detik
- Katup buka penuh $t = 27,98$ detik
- Tanpa Sistem Aliran $t = 38,99$ detik

DATA DAN ANALISA HASIL PENGUJIAN MATERIAL BAJA AISI 4140

Hasil pengujian terhadap spesimen perlakuan *quench* dengan sistem air tersirkulasi berupa komposisi spesimen uji, kekerasan, dan struktur mikro yang pembahasannya adalah sebagai berikut:

1. Komposisi spesimen uji

Hasil pengujian komposisi kimia terhadap spesimen awal yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh tabel 2.

Tabel 2. Komposisi kimia hasil pengujian dan standar

Unsur	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Pengujian	0,4	0,26	0,84	0,012	0,03	0,94	0,16	-
Standar	0,37 0,44	0,30 0,35	0,65 1,10	-	-	0,75 1,20	0,15 0,25	

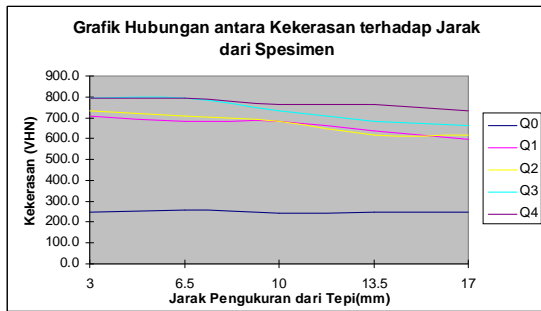
Dari pengujian komposisi kimia diatas menunjukkan bahwa spesimen yang digunakan untuk pengujian ini merupakan baja AISI 4140.

2. Analisis kekerasan

Hasil pengujian kekerasan dengan menggunakan *hardness vickers tester* terhadap spesimen benda uji adalah sebagai berikut :

Tabel 3. Harga Kekerasan Vickers

Perlakuan	Jarak dari tepi(mm)					VHN Rata-rata
	3	6.5	10	13.5	17	
Q0	246.6	257.3	241.5	246.6	246.6	247.7
Q1	709.6	684.9	684.9	639.3	598.0	663.3
Q2	735.6	709.6	684.9	618.1	618.1	673.3
Q3	792.2	792.2	735.6	684.9	661.5	733.3
Q4	792.2	792.2	763.1	763.1	735.6	769.2



Keterangan :

- Q₀ : Normalising
- Q₁ : Quenching tanpa agitasi (V = 0 m/s)
- Q₂ : Quenching dengan agitasi *by pass* bukaan penuh (V = 0,597 m/s)
- Q₃ : Quenching dengan agitasi *by pass* buka ¼ (V = 0,696 m/s)
- Q₄ : Quenching dengan agitasi *by pass* tutup penuh (V = 0,833 m/s)

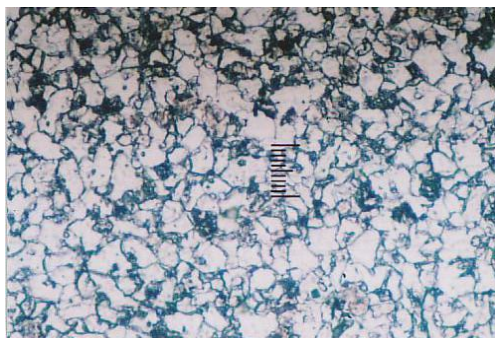
Gambar 12. Grafik hubungan antara kekerasan terhadap jarak dari tepi spesimen

Gambar 12. memperlihatkan bahwa dengan perlakuan *quenching* material akan memiliki peningkatan kekerasan yang besar bila dibandingkan dengan material yang dinormalising, serta pada saat dipergunakan mekanisme *quenching* dengan aliran grafik kekerasannya juga terus meningkat seiring dengan pertambahan kecepatan aliran.

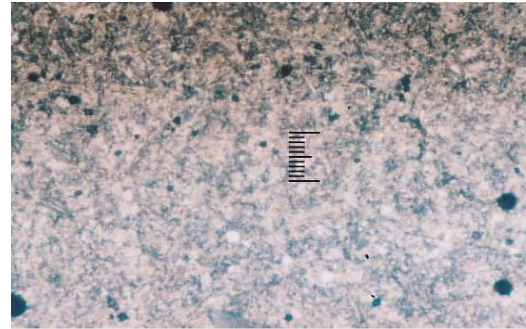
Berdasarkan gambar 5. baja AISI 4140 yang mengalami perkerasan martensit akan memiliki kekerasan diatas 650 VHN dan dari Tabel 5.2. terlihat bahwa semua *quenching* yang dilakukan baik dengan air diam maupun tersirkulasi akan menghasilkan material dengan kekerasan martensit, terutama bagian tepinya walaupun pada bagian yang tengah untuk *quench* tanpa agitasi dan dengan agitasi *by pass* bukaan penuh (V=0,597 m/s) belum terbentuk martensit sempurna karena kekerasannya masih dibawah 650 VHN.

3. Analisis struktur mikro

Mikrografi menghasilkan gambar-gambar seperti pada gambar 13 –gambar 17. dimana fasa tersebut dimunculkan dengan dietsa oleh larutan HNO₃ dan pembesaran yang diambil adalah 500x, dari pembesaran tersebut 10 garis yang terdapat dalam foto mewakili jarak 20 μm .



Gambar 13. Struktur mikro spesimen Q₀, T γ = 900 °C , t_γ = 30 menit dengan pembesaran 500X

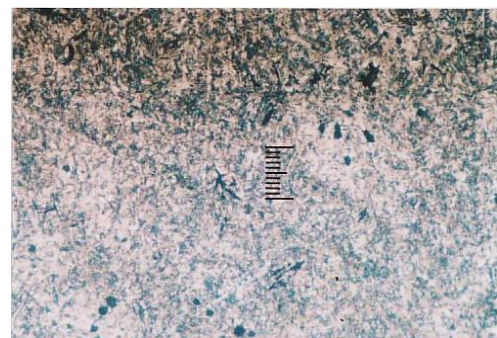


Gambar 14. Struktur mikro spesimen Q₁, T γ = 850 °C , t_γ = 83 menit dengan pembesaran 500X

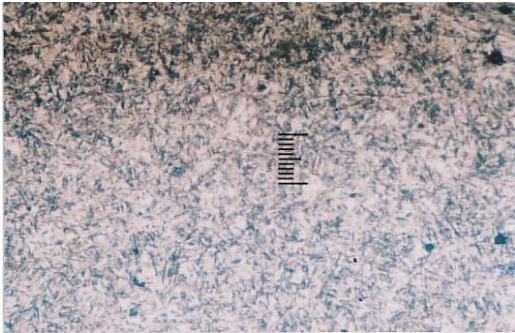
Gambar 13. menunjukkan spesimen material baja AISI 4140 yang dinormalising, yaitu dengan pemanasan sampai temperatur 900 °C ditahan selama 30 menit kemudian didinginkan diudara bebas. Terlihat bagian atas lebih buram dibanding bagian bawah hal ini terjadi karena material tidak rata yang disebabkan oleh kesalahan pengampelasan. Masih sangat jelas terlihat batas butir antar fasa yang terjadi. Ferit (*α proeutectoid*) ditunjukkan oleh butir yang berwarna terang sedangkan pearlite ditunjukkan oleh butir yang berwarna gelap, Perlit sendiri sebenarnya tersusun dari karbida (Fe₃C) dan *α eutectoid* (ferit eutektoid) jumlah ferit pada material ini terlihat lebih banyak bila dibandingkan dengan pearlite.

Gambar 14. menunjukkan spesimen baja AISI 4140 yang diquench dengan tanpa aliran (V = 0 m/s), terlihat adanya bagian yang lebih gelap hal ini diakibatkan oleh spesimen uji yang tidak rata yang disebabkan oleh kesalahan pengampelasan. Bintik – bintik hitam yang nampak merupakan void atau kotoran yang terbentuk karena polishing yang tidak sempurna.

Gambar ini tidak terlihat batas butir secara jelas, yang nampak adalah jarum kecil-kecil yang strukturnya tidak beraturan sebagai indikasi terbentuknya struktur martensit. Masih terlihat adanya daerah berwarna putih yang merupakan fasa *α eutectoid* yang tidak berubah menjadi martensit secara sempurna. Terbentuknya martensit dan *α eutectoid* mengakibatkan spesimen ini lebih keras dibandingkan dengan spesimen yang dinormalising.



Gambar 15. Struktur mikro spesimen Q₂, T γ = 850 °C , t_γ = 83 menit dengan pembesaran 500X

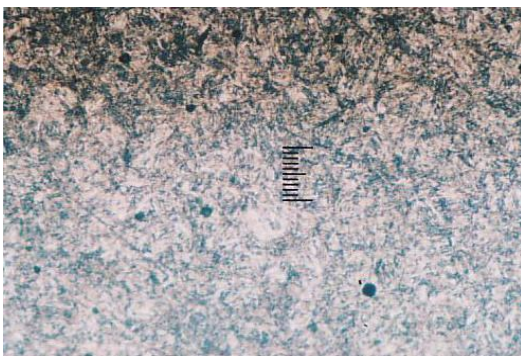


Gambar 16. Struktur mikro spesimen Q₃,

$T_{\gamma} = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\gamma} = 83$ menit dengan pembesaran 500X

Spesimen uji baja AISI 4140 yang diberikan proses *quenching* dengan aliran katup *by pass* buka penuh ($V_i = 0,597$ m/s) diperlihatkan pada Gb. 15. Disini terlihat juga *void* banyak tertinggal karena ketidak sempurnaan *polishing*. Foto hasil pemotretan juga tampak bagian yang buram karena spesimen uji yang tidak rata. Tidak nampak adanya bulatan putih seperti pada material yang *quenched* tanpa aliran, yang nampak secara jelas adalah struktur mikro martensit yang ditandai dengan bentuk seperti jarum yang tersusun secara acak. Terbentuknya struktur martensit mengakibatkan spesimen yang *quenched* dengan aliran *by pass* buka penuh ($V_i = 0,597$ m/s) menjadi lebih keras bila dibanding dengan material yang *quenched* sederhana maupun yang dinormalising.

Foto Struktur mikro spesimen uji baja AISI 4140 dengan proses *quenching* dengan aliran pada katup *by pass* terbuka $\frac{1}{4}$ bagian ($V_i = 0,699$ m/s) diperlihatkan Gb. 16 Pada foto tampak bagian yang buram dikarenakan spesimen uji yang tidak rata yang disebabkan ketidaksempurnaan pengamplasan. Tidak nampak adanya bulatan putih seperti pada material yang *quenched* tanpa aliran, yang nampak secara jelas adalah struktur mikro martensit yang ditandai dengan bentuk seperti jarum yang tersusun secara acak. Terbentuknya struktur martensit mengakibatkan spesimen yang *quenched* dengan aliran katup *by pass* terbuka $\frac{1}{4}$ bagian ($V_i = 0,699$ m/s) menjadi lebih keras bila dibanding dengan material yang dinormalising.



Gambar 17. Struktur mikro spesimen Q₄, $T_{\gamma} = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$,

$t_{\gamma} = 83$ menit dengan pembesaran 500X

Foto struktur mikro spesimen baja AISI 4140 yang *quenched* dengan aliran pada katup *by pass* tutup penuh ($V = 0,833$ m/s) diperlihatkan oleh gambar 17., terlihat adanya bagian yang lebih gelap hal ini diakibatkan oleh spesimen uji yang tidak rata yang disebabkan oleh kesalahan pengamplasan. Bintik – bintik hitam yang nampak merupakan void atau kotoran yang terbentuk karena *polishing* yang tidak sempurna.

Gambar ini tidak terlihat adanya batas butir, tidak nampak adanya bulatan putih seperti pada material yang *quenched* tanpa aliran, yang nampak secara jelas adalah struktur mikro martensit yang ditandai dengan bentuk seperti jarum yang tersusun secara acak. Terbentuknya struktur martensit mengakibatkan spesimen yang *quenched* dengan aliran katup *by pass* tutup penuh ($V = 0,833$ m/s) menjadi lebih keras bila dibanding dengan material yang dinormalising.

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Dari perancangan alat dan penelitian yang dilakukan dengan mengambil material baja AISI 4140 yang *quenched* dengan metode sistem air tersirkulasi dapat diambil kesimpulan :

1. Alat *quenching* dengan metode sistem air tersirkulasi ini dapat digunakan untuk meng-*quench* baja sebanyak 5,46 kg pada kondisi volume air 0,104 m³.
2. Semakin cepat laju aliran kecepatan pendinginannya semakin tinggi.
3. *Quenching* dengan metode air tersirkulasi pada baja AISI 4140 mampu meningkatkan kekerasan.
4. *Quenching* dengan metode air tersirkulasi pada baja AISI 4140 menunjukkan peningkatan keseragaman kekerasan martensit pada permukaan dari material yang *quenched*.
5. *Quenching* pada baja AISI 4140 akan menghasilkan struktur mikro martensit.

2. Saran

Penelitian ini masih banyak kekurangan yang perlu diperbaiki dan disempurnakan pada penelitian berikutnya, untuk itu penulis menyarankan beberapa hal untuk dilakukan pada penelitian selanjutnya, antara lain :

1. Alat *quenching* yang kami buat ini masih dapat ditingkatkan kemampuannya dengan memperbaiki sistem alirannya.
2. Keranjang spesimen dapat dibuat lebih kecil dengan selubung aliran sama dengan pipa out put.
3. Temperatur medium pendingin perlu dikontrol untuk menghasilkan penelitian dengan kondisi yang seragam pada semua perlakuan.
4. Pengukuran kekerasan dari ujung terdekat dengan aliran sampai yang terjauh perlu dilakukan untuk melihat tingkat perkerasan sepanjang spesimen.

DAFTAR PUSTAKA

1. Callister, William D. *Materials Science and Engineering* John Willey & Sons, Inc. USA 1994.
2. Dieter, George E. *Metalurgi Mekanik*. Erlangga. Jakarta. 1993
3. Giir, CH, Tuncer, BO, "Investigating the Microstructure-Ultrasonic Property Relationships in Steel"; jurnal Welding tech & NDT Center, Ankara, Turkey
4. Holman JP, Perpindahan Kalor, Erlangga, Jakarta, 1994
5. Incopera, P, De Witt PD, "Fundamental of Heat Treatment and Mass Transfer" John Willey and Son. Canada, 1990.
6. Krauss, G, "Steel : Heat Treatment and Processing Principles"
7. Meyrick, G, "Physical Metallurgy of Steel", Class Notes and Lecture Material, USA, 2001
8. Nugroho, Sri, *Karakterisasi Austenit Sisa dan Kekerasan pada Baja Bantalan SAE 52100*, Tesis Magister, Program Pascasarjana, Teknik Mesin, ITB Bandung 2003
9. Okumura, Toshie. *Teknologi Pengelasan Logam*. PT. Pradnya Paramitha. Jakarta. 1996
10. Parker, ER, "Material Data Book, For Engineer and Scientists", Mc.Graw-Hill Book Company, New York, 1967
11. Petty, ER. *Physical Metallurgy of Engineering Materials*. George Allen and Unwin Ltd. London. 1970
12. RAJAN, T.V., *Heat Treatment Principles and Techniques*, Prentice-Hall of India, New Delhi-India, 1997
13. Suryanarayana, A.V.K. "Testing of Metallic Material." Prentice Hall of India. New Delhi. 1985
14. Totten, GE, Bates, CE, Clinton, NA, *Handbook of Quenching and Quenching Technology*, ASM International, USA, 1993
15. Van Vlack, Lawrence H, *Ilmu dan teknologi Bahan*. Erlangga. Jakarta. 1989
16. www.precision-steel.com
17. www.sentry.com, Quench System for Oil and Water
18. www.tiraaustenite.com
19. www.zianet.com, Machinery's 1924 Handbook