

ANALISIS PERUBAHAN SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO BESI COR NODULAR 700 SETELAH MENGALAMI PROSES PERLAKUAN PANAS

Rochim Suratman⁽¹⁾, dan Beny Bandanadjaja⁽²⁾

⁽¹⁾ Staf pengajar Departemen Teknik Mesin ITB

Jl. Ganesha 10 Bandung, 022-2502265; E-mail: r-suratman@lycos.com

⁽²⁾ Staf pengajar Program Studi Teknik Pengecoran Logam Polman Bandung

Jl. Kanayakan 21 Dago Bandung, 022-2500241 fax. 022-2502649

E-mail: beny_bj@hotmail.com

ABSTRAK

Besi cor nodular 700 (BCN 700) adalah besi dengan kandungan karbon > 2 % memiliki struktur mikro perlitis dengan sedikit ferrit dan grafit berbentuk bulat. Harga kuat tarik BCN 700 as-cast berkisar 700 N/mm², elongasi min. 2 %, kekerasan 229 – 302 HB dan energi impak 7 joule. Proses perlakuan panas adalah suatu proses yang diterapkan pada material logam. Dengan memanaskan material sampai temperatur austenisasi kemudian mengatur laju pendinginan. Tujuan proses tersebut adalah untuk memperbaiki/mengubah sifat-sifat mekanik yang ada pada material tersebut. Pada tulisan ini dibahas mengenai penelitian sejauh mana perubahan sifat mekanik maupun struktur mikro BCN 700 apabila BCN 700 diberi proses perlakuan panas. Pola pendinginan dilakukan secara isothermal dan kontinyu. Variasi laju pendinginan dan temperatur penahanan isothermal juga diberikan. Dari hasil penelitian di peroleh tingkat perubahan sifat mekanik dan struktur mikro. Perubahan yang terjadi sangat dipengaruhi oleh laju pendinginan pada pola pendinginan kontinyu dan temperatur penahanan pada pola penahanan isothermal.

ABSTRACT

Ferro casting ductile 700 (FCD 700) is a ferrous material with carbon content > 2 %. It has pearlitic microstructure with a little amount of ferrite and nodular graphite. In as-cast condition FCD 700 has tensile strength 700 N/mm², elongation 2 % min., hardness 229 – 302 BHN and impact value 7 joule. Heat treatment process is a process that can be executed to ferrous material. With heating the material until a range of austenite temperature then controlling the cooling rate. The objective is to repair or to modify the mechanical properties of material belongs before. In this article there's a research about how far the exchange of mechanical properties or microstructure in FCD 700 if it being heat-treated. Cooling rate is given by isothermal and continuous condition. The variation of cooling rate and holding in some isothermal temperature is also accomplished. Research data affirm some gradation of mechanical properties and microstructure. The variety associate with cooling rate and isothermal holding which is performed.

Keywords: Ferro Casting Ductile 700, Heat Treatment Processes, Continuous Cooling, Isothermal Cooling, Mechanical Properties, Microstructure.

1. PENDAHULUAN

Besi cor nodular (BCN) atau istilah lain FCD/Ferro Casting Ductile adalah jenis besi dengan kandungan karbon diatas 2,06 %, memiliki matrik perlit dan/atau ferit dan mengandung grafit berbentuk bulat. Besi cor nodular dalam kondisi as-cast tanpa paduan khusus memiliki sifat-sifat mekanik yang cukup baik dapat dilihat dari Tabel 1 berikut yang diambil dari JIS Handbook.

Dengan mampu tarik yang berkisar antara 37 kgf/mm² s/d 80 kgf/mm² maka besi cor nodular dapat dijadikan alternatif pengganti baja.

Tabel 1 Sifat Mekanik Besi Cor Nodular 700 Menurut Standar JIS

No	Kualitas	Kuat tarik	Elongasi	Kekerasan
		(kgf/N/mm ²)	(%)	(BHN)
1	FCD 37	37	17 min.	179 maks.
2	FCD 40	40	12 min.	201 maks.
3	FCD 45	45	10 min.	143 s/d 217
4	FCD 50	50	7 min.	170 s/d 241
5	FCD 60	60	3 min.	192 s/d 269
6	FCD 70	70	2 min.	229 s/d 302
7	FCD 80	80	2 min.	248 s/d 352

Salah satu kelebihan besi cor nodular yaitu temperatur cair besi cor nodular lebih rendah daripada baja cor sehingga proses pengecorannya menjadi lebih mudah dan murah dibanding baja cor, maka dewasa ini banyak komponen mesin yang memakai bahan dari besi cor nodular.

Pengembangan proses untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik yang lebih baik dari besi cor nodular dapat diperoleh melalui 2 cara yaitu :

1. Perlakuan pada saat cair (*liquid treatment*)
2. Perlakuan pada saat padat (*solid treatment*)

Proses *liquid treatment* dilakukan dengan cara mengatur komposisi paduan pada proses peleburannya yaitu mengatur kadar C, Si, Mn, S, P dan Mg serta penambahan paduan (*Alloying*) khusus seperti Cu, Cr, Ni dan lain-lain. *Alloying* dapat menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik dibanding kondisi tanpa paduan, yaitu dapat menghasilkan kekuatan dan kekerasan material yang lebih tinggi.

Proses *solid treatment* (perlakuan padat) adalah suatu proses pemanasan material dalam bentuk padat sampai temperatur pemanasan austenit, tidak sampai temperatur cair, kemudian diatur laju pendinginannya. Pendinginan material sampai temperatur kamar dapat dilakukan secara kontinyu media pendingin, misalnya oli atau dilakukan penahan isothermal pada temperatur transformasi fasa yang diinginkan, misalnya ditahan pada 300 °C maka akan menghasilkan fasa bainitik. Proses tersebut merupakan proses lanjutan yang dapat dilakukan apabila ternyata sifat mekanik material yang didapatkan dari proses *liquid treatment* tidak dapat tercapai atau tidak sesuai dengan tuntutan sifat mekanik yang diinginkan.

Perubahan sifat mekanik dan struktur mikro BCN 700 sangat erat kaitannya dengan laju pendinginan dan pola pendinginan yang diberikan. Laju pendinginan yang tinggi pada pola pendinginan kontinyu dapat menghasilkan kekuatan tarik dan kekerasan yang tinggi, namun elongasi dan harga dampak cenderung menurun. Pada pola pendinginan isothermal, semakin rendah temperatur penahanan akan menghasilkan kuat tarik dan kekerasan yang tinggi. Hal yang berbeda pada pola penahanan isothermal adalah adanya peningkatan energi dampak pada temperatur pertengahan (sekitar 400 °C), dibanding dengan temperatur penahanan tinggi 700 °C atau temperatur penahanan rendah 260 °C.

Sejauh mana perubahan sifat mekanik dan struktur mikro yang terjadi secara lebih spesifik pada BCN 700 dapat diteliti dengan memberikan variasi pada 2 macam pola pendinginan. Variasi kecepatan pendinginan diberikan pada pola pendinginan kontinyu. Variasi temperatur penahanan diberikan pada pola penahanan isothermal.

2. PROSES PERLAKUAN PANAS

Pada pola pendinginan kontinyu, variasi laju pendinginan diberikan dengan membedakan media pendingin dan dilakukan dengan membiarkan sampel mendingin secara kontinyu sampai temperatur ruangan.

Urutan media pendingin dari yang paling lambat sampai cepat dapat diperoleh yaitu : dalam tungku – udara bebas – udara tiup – oli – air.

Pada pola penahanan isothermal dilakukan dengan memanfaatkan bak garam cair yang dapat dipergunakan untuk menahan temperatur. Jenis garam yang dipakai 50 % KNO₃ dan 50 % NaNO₃ dengan rentang operasi 200 °C s/d 500 °C. Penahanan temperatur di bak garam dilakukan pada 400 °C dan 260 °C. Dilakukan juga penahanan 700 °C di dalam tungku HT.

Proses HT dilakukan pada sampel yang sudah berbentuk sampel uji tarik dan sampel uji dampak (tanpa notch). Pola pendinginan kontinyu, masing-masing sampel dipanaskan 900 °C ditahan 2 jam kemudian diberikan variasi pendinginan seperti tertulis pada tabel 2 :

Tabel 2 Variasi pendinginan pada laju pendinginan kontinyu

No Kode	Nama Proses	Media Pendinginan
K1	Annealing	Dalam tungku
K2	Normalising 1	Udara bebas
K3	Normalising 2	Udara tiup
K41	Hardening 1	Oli
K42	Tempering 1 (500 °C)	Udara bebas
K51	Hardening 2	Air
K52	Tempering 2 (500 °C)	Udara bebas

Pola penahanan isothermal, masing-masing sampel dipanaskan 900 °C, ditahan selama 2 jam kemudian diberikan variasi penahanan isothermal :

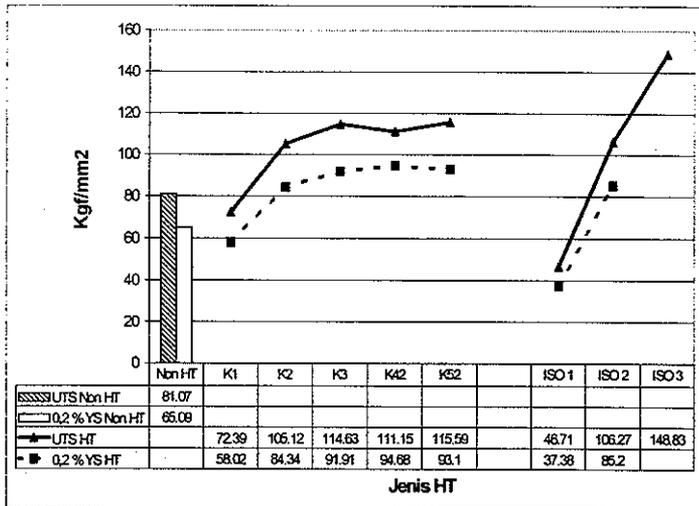
Tabel 3 Variasi penahanan pada pola penahanan isothermal

No Kode	Nama Proses	Temperatur Penahanan	Media penahanan	Media Pendingin
ISO 1	Anil 700	700 °C	Tungku	Udara bebas
ISO 2	Austempering 400	400 °C	Bak garam	Udara bebas
ISO 3	Austempering 260	260 °C	Bak garam	Udara bebas

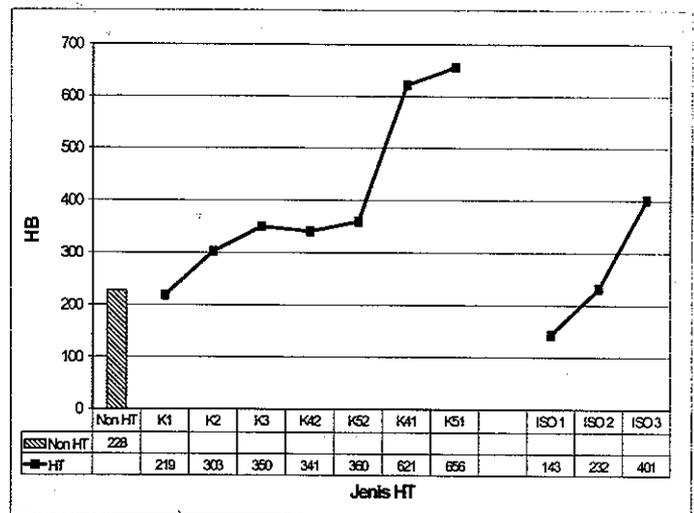
Setelah proses pada masing-masing sampel dilakukan pengujian mekanik meliputi uji tarik, kekerasan, dampak dan pemeriksaan metalografi.

3. DATA PENGUJIAN DAN ANALISIS

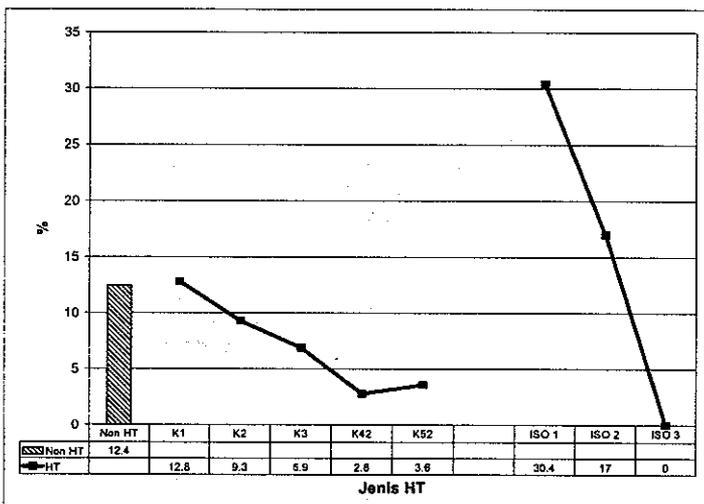
Pengujian mekanik yaitu uji tarik kekerasan dan dampak serta pemeriksaan metalografi dilakukan pada masing-masing sampel. Hasil pengujian mekanik diberikan pada grafik 1 s/d 4 dan hasil pemeriksaan metalografi pada gambar 1 s/d 9 :



Grafik 1. Data dan Grafik Kuat Tarik dan Kekuatan Luluh Hasil Uji Tarik.

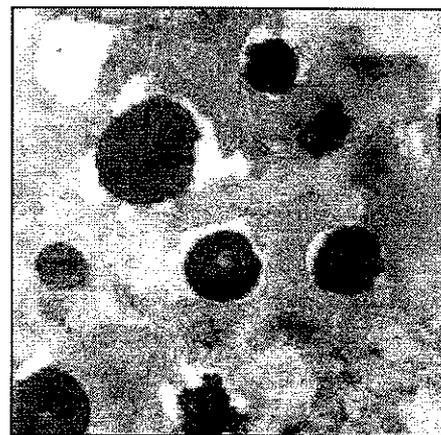


Grafik 4. Data dan Grafik Hasil Uji Kekerasan.

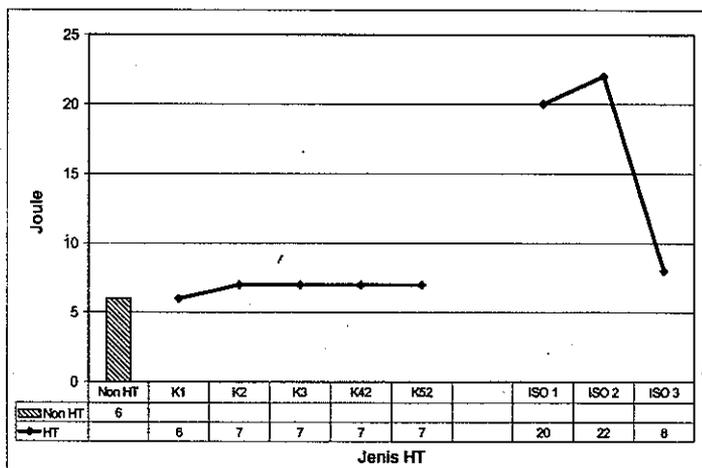


Grafik 2. Data dan Grafik Elongasi Hasil Uji Tarik.

Hasil pengujian metalografi:



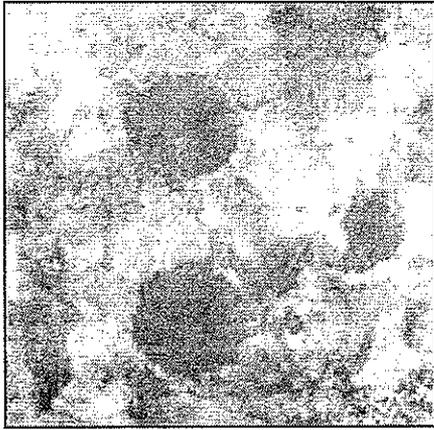
Gambar 1. Struktur mikro sebelum proses HT : ferrit 5 %, perlit 95 %, grafit bola, etsa nital 3 %.



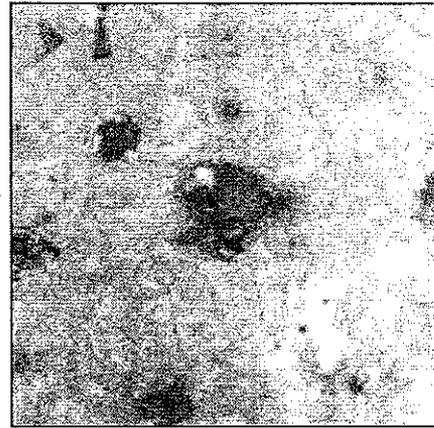
Grafik 3. Data dan Grafik Hasil Uji Impak.



Gambar 2. Struktur mikro setelah proses HT, pendinginan kontinyu dalam tungku (K1): Perlit kasar 100 %, grafit bola, etsa nital 3 %.



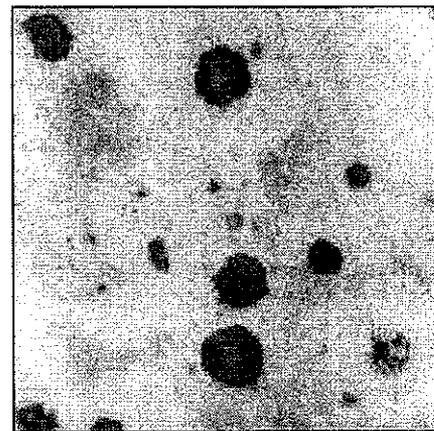
Gambar 3. Struktur mikro setelah proses HT, pendinginan kontinyu udara bebas (K2) : perlit halus 100 %, grafit bola, etsa nital 3 %.



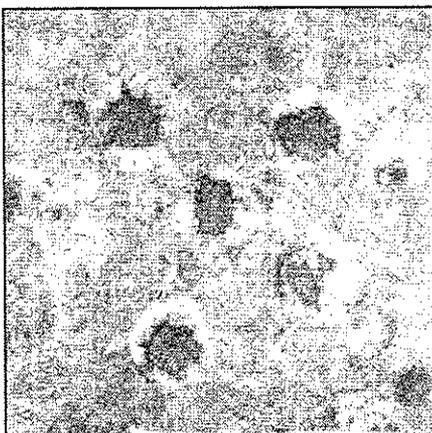
Gambar 6. Struktur mikro setelah proses HT, pendinginan kontinyu celup air (K51) : martensit 100 %, grafit bola mengecil, etsa nital 3 %.



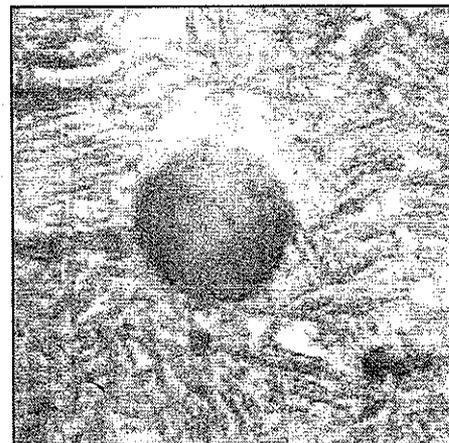
Gambar 4. Struktur mikro setelah proses HT, pendinginan kontinyu udara tiup (K3) : perlit halus 100 % , terlihat struktur bainit sedikit, grafit bola, etsa nital 3 %.



Gambar 7. Struktur mikro setelah proses HT, penahanan isothermal 700 °C (ISO 1): ferrit 90 %, perlit bulat 10 %, grafit bola, etsa nital 3 %.



Gambar 5. Struktur mikro setelah proses HT, pendinginan kontinyu celup oli (K41) : martensit 100 %, grafit bola mengecil, etsa nital 3 %.



Gambar 8 . Struktur mikro setelah proses HT, penahanan isothermal 400 °C (ISO 2): ausferrit 100 %, grafit bola, etsa nital 3 %.



Gambar 9. Struktur mikro setelah proses HT, penahanan isothermal 260 °C (ISO 3) : Martensit kasar 100 %, grafit bola, etsa nital 3 %.

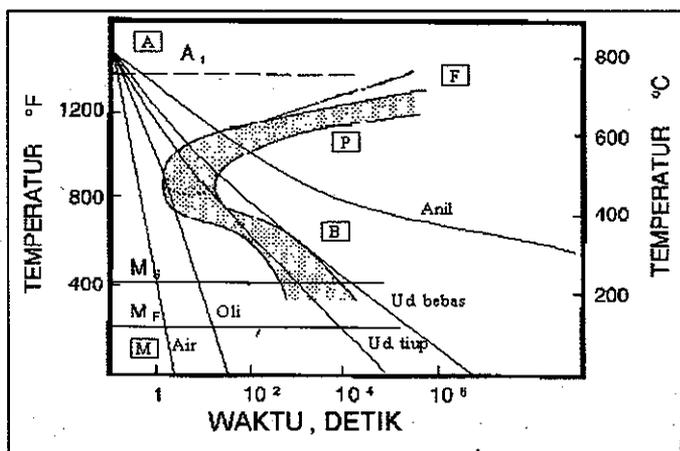
4. ANALISIS

Analisis perubahan sifat mekanik dan struktur mikro dapat ditinjau dari diagram TTT (*Time Transformation Temperatur*). Diagram TTT menggambarkan temperatur dan waktu transformasi fasa dari kondisi fasa austenit menjadi fasa lain.

Dari diagram TTT dapat dilihat bahwa laju pendinginan dan temperatur penahanan isothermal menentukan fasa yang terjadi. Sifat mekanik berkaitan erat dengan jenis fasa yang terjadi.

Pada pola pendinginan kontinyu yang terjadi adalah sebagai berikut :

Kondisi awal struktur mikro sampel sebelum proses perlakuan panas adalah perlit 95 % dan ferrit 5 % dengan bentuk perlit yang halus (gambar 1). Gambar 10 menunjukkan garis - garis pendinginan untuk pola kontinyu yang dilakukan pada 5 sampel.



Gambar 10. Garis Proses Pola Pendinginan Kontinyu Pada Diagram TTT Besi Cor Nodular.

Ketika material besi cor nodular dipanaskan sampai pada temperatur 900 °C kemudian ditahan selama 2 jam maka struktur mikro bertransformasi menjadi 100 % γ - austenit yang jenuh dengan atom karbon. Pada saat didinginkan maka semakin lambat kecepatan pendinginan maka karbon memiliki kesempatan untuk berdifusi dan memisahkan diri dari besi, kecenderungan struktur mikro akan mengarah ke fasa ferrit. Perlit yang terdiri dari ferrit dan Fe_3C akan membentuk pola kasar, yaitu jarak Fe_3C -nya akan lebih jauh, fasa ferrit pada perlit akan membesar. Hal tersebut dapat terlihat dari hasil percobaan K1 yaitu annealing sampel didinginkan kontinyu dalam tungku, maka struktur mikro yang terjadi adalah perlit dengan pola kasar (Gambar 2).

Semakin cepat kecepatan pendinginan maka atom karbon semakin sedikit kesempatan untuk memisahkan diri dari besi dan terjadi pembentukan perlit yang lebih halus dan sedikit bainit. Terlihat dari hasil percobaan K2 sampel didinginkan dengan udara bebas maka terbentuk perlit halus (Gambar 3) dan percobaan K3 sampel didinginkan dengan udara tiup terbentuk perlit halus dengan sedikit bainit (Gambar 4).

Pada kondisi yang pendinginan yang sangat cepat maka akan terbentuk martensit, Dari hasil percobaan K4 sampel didinginkan pada media oli maka terbentuk martensit (Gambar 5), dan percobaan K5 sampel didinginkan pada media air juga terbentuk martensit (Gambar 6).

Semakin tinggi kecepatan pendinginan maka semakin tinggi kuat tarik dan kekerasannya (Grafik 1 dan Grafik 3). Tingginya kekerasan dan kuat tarik pada struktur perlit yang halus dibanding dengan perlit kasar karena semakin halus perlit maka akan semakin banyak batas butir yang merupakan *barrier*/penghalang bagi Bergeraknya dislokasi pada saat terjadi deformasi. Berlawanan dengan nilai kuat tarik dan kekerasan maka elongasi yang terjadi menurun (Grafik 2) akibat sulitnya dislokasi bergerak.

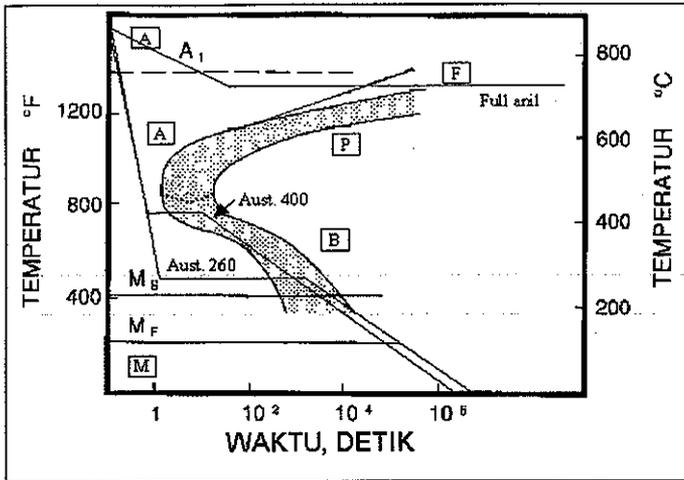
Pada fasa martensit kristal yang terbentuk adalah BCT (*body centered tetragonal*), sesungguhnya merupakan kristal BCC yang terdistorsi oleh adanya atom karbon yang tidak sempat berdifusi keluar pada saat pendinginan. Kondisi terdistorsi mengakibatkan terjadinya tegangan dan tegangan menghasilkan peningkatan kekerasan. Struktur martensit memiliki sifat paling keras dan paling tinggi kuat tariknya namun elongasi paling rendah (Gambar 4,1 dan 2).

Harga impact yang relatif tetap (Grafik 3) disebabkan karena adanya perubahan ukuran grafit. Semakin keras suatu material maka semakin kecil harga impactnya. Namun pada BCN 700 keberadaan grafit bulat mempengaruhi harga impactnya. Semakin besar ukuran grafit maka semakin berpengaruh menurunkan harga impact. Ukuran grafit berubah karena pengaruh kecepatan pendinginan. Pada waktu dipanaskan sampai temperatur austenisasi terjadi difusi karbon keluar grafit. Untuk laju pendinginan yang sangat cepat yaitu celup oli dan air, karbon tidak sempat berdifusi kembali ke grafit

sehingga ukuran grafit menjadi lebih kecil. Sedangkan pada laju pendinginan yang lambat ukuran grafit lebih besar. Dengan kondisi tersebut maka harga impact relatif tetap.

Pada pola penahanan isothermal yang terjadi adalah sbb:

Gambar 11 menunjukkan garis-garis penahanan isothermal yang dilakukan pada 3 sampel.



Gambar 11. Garis Proses Pola Penahanan Isothermal Pada Diagram TTT Besi Cor Nodular.

Diagram TTT menggambarkan daerah-daerah transformasi struktur mikro berdasarkan temperatur dan waktu transformasi. Pada penahanan di temperatur 650 °C s/d 723 °C merupakan daerah pembentukkan ferrit (+ perlit). Pada penahanan di temperatur 400 °C s/d 650 °C daerah pembentukkan perlit. Pada penahanan di temperatur 230 °C s/d 400 °C adalah daerah pembentukkan bainit. Dan < 230 °C merupakan daerah pembentukkan martensit.

Pada percobaan ISO 1 yaitu dilakukan proses penahanan isothermal pada temperatur 700 °C setelah memanaskan sampel sampai kondisi austenit (900 °C), kemudian temperatur diturunkan sampai 700 °C dan ditahan selama 12 jam, maka terjadi pembentukkan ferrit yang lebih sempurna karena tersedianya waktu yang cukup bagi karbon untuk berdifusi keluar dari austenit. Sebagian besar karbon membentuk grafit. Besi-Ferrit yang terbentuk memiliki bentuk kristal BCC dan kandungan karbon dalam ferrit rendah yaitu 0,02 %. Kandungan karbon yang rendah pada struktur mikro ferrit menghasilkan sifat material menjadi lebih lunak, elongasi meningkat, kuat tarik menurun dan harga impact meningkat. Hal tersebut dapat terlihat dari hasil percobaan struktur mikro yang terbentuk adalah ferrit 90 % + perlit 10 % dan grafit (Gambar 12).

Pada percobaan ISO 2 dan ISO 3 yaitu proses austempering dengan penahanan isothermal 400 °C dan 0 °C proses penahanan isothermal pada daerah pembentukkan bainit. Proses penahanan tidak dilakukan sampai garis akhir pembentukkan bainit (*bainit ends*)

namun dihentikan pada saat pertengahan antara garis *bainit begins* dan *bainit ends* kemudian didinginkan di udara bebas. Pada saat itu kondisi struktur mikro adalah austenit dan acicular ferrit. Austenit distabilkan pada kondisi proses transformasi belum berakhir di batas garis *bainit ends* seperti yang ada pada diagram TTT. Sehingga struktur mikro akhir yang terbentuk adalah ausferrit (austenit stabil dan acicular ferrit). Ausferrit berbeda dengan bainit dimana bainit terdiri dari Fe₃C dan acicular ferrit, Fe₃C pada bainit menyebabkan sifat bainit lebih getas dibanding ausferrit.

Pada temperatur penahanan isothermal 260 °C sudah tidak terlihat bentuk struktur mikro ausferrit atau bainit yang terbentuk strukturnya lebih mirip dengan martensit (Gambar 14). Hal tersebut dapat terjadi karena pada temperatur tersebut dimungkinkan sudah masuk daerah transformasi martensit. Sifat mekaniknya berubah dibanding sebelum HT yaitu kuat tarik sangat tinggi, elongasi paling kecil, kekerasan paling tinggi, dan harga impact rendah (Gambar 2,3,4 dan 5).

Pada temperatur penahanan isothermal 400 °C, temperatur cukup tinggi. Daerah tersebut merupakan daerah transformasi bainit, penahanan tidak sampai batas akhir transformasi bainit ends menghasilkan struktur ausferrit. Sifat mekaniknya berubah yaitu kuat tarik dan kekerasan meningkat walau tidak terlalu tinggi (grafik 1 dan 2), elongasi meningkat (grafik 4) dan hal yang paling signifikan adalah harga impact yang meningkat tajam grafik (grafik 3). Kuat tarik dan kekerasan yang meningkat karena bentuk struktur mikro adalah acicular ferrit dalam matrik austenit banyak batas antar fasa menghalangi gerak dislokasi.

Meningkatnya elongasi dan tingginya harga energi impact karena adanya matriks austenit yang memiliki kristal FCC dengan bidang slip (111). Susunan atom bidang (111) FCC cukup padat (*close packed*) kondisi tersebut lebih membuat material mudah slip atau lebih ulet dibanding dengan kristal BCC yang memiliki bidang slip (110) dimana susunan atomnya pada bidang itu kurang padat. Pada pengujian impact pemberian beban yang tiba-tiba mengakibatkan kecepatan regangan pada material tinggi bila tidak diimbangi dengan sifat ulet material maka akan menghasilkan patah getas. Kecepatan regangan yang tinggi dikompensasikan oleh adanya struktur austenit yang ulet sehingga mampu menyerap energi yang diberikan pada uji impact, nilai energi impactnya menjadi tinggi.

5. KESIMPULAN

Pada proses pendinginan kontinyu, laju pendinginan mempengaruhi hasil struktur mikro dan sifat mekanik yang terjadi. Semakin cepat laju pendinginan maka akan terjadi beberapa perubahan sifat mekanik. Berikut ini data dari hasil percobaan dimana semakin cepat laju pendinginan maka :

- Kuat tarik dan kekuatan luluh meningkat, paling tinggi pada laju pendinginan dengan media air yaitu 115,59 kgf/mm² dan 93.1 kgf/mm²

- Elongasi cenderung menurun, paling rendah pada laju pendinginan dengan media oli yaitu 2,8 %
- Kekerasan meningkat paling tinggi pada laju pendinginan dengan media air yaitu 656 HB
- Harga impact relatif stabil untuk semua laju pendinginan

Pada proses penahanan isothermal temperatur penahanan mempengaruhi hasil struktur mikro dan sifat mekanik. Berikut ini data dari hasil percobaan dimana semakin rendah temperatur penahanan maka :

- Kuat tarik meningkat paling tinggi pada penahanan di temperatur 260 °C yaitu 148,83 kgf/mm², namun pada kondisi tersebut tidak ditemui batas kekuatan luluh.
- Kekerasan meningkat paling tinggi pada penahanan di temperatur 260 °C yaitu 401 HB
- Elongasi menurun paling rendah pada penahanan di temperatur 260 °C, dimana tidak ada elongasi.
- Harga energi impact berupa parabolik, meningkat kemudian menurun kembali, energi impact tertinggi terjadi pada temperatur penahanan pertengahan yaitu sekitar 400 °C. sebesar 22 joule.

6. PUSTAKA

1. Burdit Michael F; *Ductile Iron Handbook*. American Foundrymen's Society Inc. 1993.
2. F. Smith, William; *Principles of Materials Science And Engineering*; 3rd Ed. ; McGraw Hill Book Company inc. ; New York ;1996.
3. Karl - Erik Thelning ; *Steel and Its Heat Treatment*; Bofors Handbook ; London 1984.
4. QIT ; *Ductile Iron Data for Design Engineers*; QIT-Fer et Titane Inc. ; Canada 1990; <http://www.ductile.org/didata>
5. Standard JIS Handbook
6. Suratman, Rochim ; *Panduan Proses Perlakuan Panas* ; Lembaga Penelitian Institut Teknologi Bandung ; 1994.