

ANALISIS SIFAT MAGNETIK BAHAN YANG MENGALAMI PROSES ANNEALING DAN QUENCHING

Edi Istiyono

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengetahui pengaruh temperatur *annealing* terhadap permeabilitas, koersivitas, remanensi bahan, (2) mengetahui pengaruh temperatur *quenching* terhadap permeabilitas, koersivitas, remanensi bahan, (3) memperoleh temperatur *annealing* optimum bahan ditinjau dari permeabilitas, koersivitas dan remanensinya, dan (4) memperoleh temperatur *quenching* optimum bahan ditinjau permeabilitas, koersivitas dan remanensinya.

FCD yang dipakai pada penelitian ini terdiri dari beberapa unsur dengan komposisi sebagai berikut: (1) Karbon 3,752 %, (2) Silikon 1,741 %, (3) Mangan 0,442 %, (4) Fosfor 0,043 %, dan (5) Belerang 0,026 %. Ukuran FCD yang digunakan sebagai benda uji panjang 60 mm dan diameter 8 mm. Untuk melakukan *quenching* digunakan furnice, dan untuk menguji kurva histerisis digunakan *Magnetic Circuit*

Dari analisis data penelitian diperoleh bahwa: (1) semakin tinggi temperatur *annealing*, semakin rendah permeabilitas, semakin tinggi koersivitas bahan maksimum pada 600 °C kemudian menurun lagi, semakin tinggi remanensi FCD dan maksimum pada 600 °C kemudian menurun lagi, (2) Semakin tinggi temperatur *quenching*, semakin tinggi permeabilitas, semakin tinggi koersivitas, semakin tinggi remanensi FCD, (3) Kondisi optimum proses *annealing* pada temperatur 600 °C menghasilkan FCD dengan sifat kemagnetan yang keras yaitu permeabilitas tinggi, remanensi dan koersivitas tinggi, dan (4) Kondisi optimum proses *quenching* pada temperatur 1000 °C menghasilkan FCD dengan sifat kemagnetan yang keras yaitu permeabilitas rendah, remanensi dan koersivitas tinggi.

Kata kunci: FCD, temperatur *annealing*, temperatur *quenching*, permeabilitas, koersivitas, dan remanensi

PENDAHULUAN

Bahan-bahan yang ada di alam semesta masing-masing memiliki sifat-sifat yang khas (karakteristik) yang dapat dimanfaatkan untuk proses industri. Perkembangan, penemuan dan pemilihan bahan-bahan sangat menentukan proses dan hasil suatu industri, karena bahan-bahan memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda-beda dimana sifat dan karakteristik bahan ditentukan oleh struktur intern penyusun bahan tersebut.

Salah satu jenis bahan di alam yang banyak digunakan untuk proses industri adalah jenis bahan magnetik. Berdasar sifat kemagnetannya bahan magnetik dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu; diamagnetik, paramagnetik dan feromagnetik. Masing-masing jenis bahan tersebut memiliki sifat dan karakteristik yang khas dan berbeda-beda. Dengan sifat dan karakteristiknya ternyata jenis bahan feromagnetik paling banyak dipilih sebagai bahan untuk teknik dan industri, seperti pada aplikasi untuk motor listrik, generator, loudspeaker dan beberapa aplikasi yang lain.

Dengan sifatnya yang khas ternyata bahan feromagnetik tidak selalu ideal. Pada beberapa contoh aplikasi untuk rangkaian magnetik seringkali kita menginginkan suatu medan magnet yang kuat dengan arus yang sekecil mungkin. Karena arus sebanding dengan intensitas medan magnet H dan B berbanding lurus dengan μH , maka dengan pertimbangan tersebut menuntut agar bahan memiliki permeabilitas yang tinggi. Dengan permeabilitas tinggi yang dimiliki oleh bahan feromagnetik maka didapat rapat fluks magnet B yang kuat.

Ada banyak bahan ferromagnetik, antara lain: besi lunak, alnico, ferit, dan FCD (*ferro casting ductile*). Dalam penelitian ini akan digunakan bahan ferromagnetik yaitu besi lunak dan logam paduannya (FCD). FCD banyak digunakan, karena bahan tersebut mudah dalam pembentukannya setelah melalui proses tuang, alasan lain karena performa yang tidak kalah dari logam tuang lain dan harga yang lebih murah.

FCD seperti halnya dengan bahan ferromagnetik yang lain juga ternyata tidak selalu ideal dalam pemakaiannya. Berdasar dari fenomena tersebut maka perlu dilakukan upaya untuk mendapatkan bahan dengan sifat dan karakteristik yang sesuai, sehingga memenuhi syarat-syarat sebagai bahan untuk proses teknik dan industri.

Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan memberikan perlakuan panas pada FCD. Perlakuan panas ada beberapa macam, antara lain: *annealing*, *quenching*, dan temper. Dalam penelitian ini akan digunakan laku panas *annealing* dan *quenching* yang mewakili dua laku panas yang berlawanan. Di samping itu laku panas tersebut lebih praktis daripada temper yang merupakan pemanasan berulang atau gabungan dua laku panas. Dengan proses *annealing* atau *quenching* maka suatu bahan akan mengalami perubahan struktur intern. Karena sifat dan karakteristik suatu bahan erat kaitannya dengan struktur intern dari bahan itu sendiri maka dengan berubahnya struktur intern suatu bahan akan mengubah pula sifat dan karakteristik dari bahan tersebut.

Proses *annealing* adalah proses laku panas dengan bahan mengalami pemanasan yang mendadak, temperatur dipertahankan tetap selama waktu tertentu kemudian dilakukan pendinginan secara pelan-pelan. Temperatur yang dipertahankan tetap pada proses ini dinamakan **temperatur *annealing***. Proses *quenching* merupakan laku panas dengan cara bahan mengalami pemanasan yang mendadak, temperatur dipertahankan tetap selama waktu tertentu kemudian dilakukan pendinginan secara sangat cepat. Temperatur yang dipertahankan tetap pada proses ini dinamakan **temperatur *quenching***.

Dengan *annealing* atau *quenching* diharapkan akan mendapatkan FCD dengan sifat dan karakteristik yang baik untuk digunakan sebagai inti dalam rangkaian magnetik. Dengan demikian perlulah kiranya penelitian tentang pengaruh *annealing* atau *quenching* terhadap sifat kemagnetan FCD.

Berdasarkan uraian di atas pada pendahuluan, ada beberapa masalah yang muncul pada penelitian ini. Masalah-masalah tersebut dapat dirumuskan, yakni:

1. Bagaimanakah pengaruh temperatur *annealing* terhadap permeabilitas, koersivitas, remanensi bahan ?
2. Bagaimanakah pengaruh temperatur *quenching* terhadap permeabilitas, koersivitas, remanensi bahan ?
3. Berapakah temperatur *annealing* optimum bahan ditinjau dari permeabilitas, koersivitas, dan remanensinya?
4. Berapakah temperatur *quenching* optimum bahan ditinjau dari permeabilitas, koersivitas, dan remanensinya?

Perlakuan panas dengan berbagai temperatur *annealing* dan temperatur *quenching* yang berbeda-beda dimungkinkan akan memberikan efek yang berbeda secara permanen pada bahan.

Penelitian ini dibatasi pada pengaruh temperatur *annealing* dan temperatur *quenching* dari 100⁰C sampai 900⁰C terhadap sifat magnetik bahan ferromagnetik yang diwakili oleh permeabilitas, koersivitas, dan remanensi bahan. Untuk dapat menemukan koersivitas dan remanensi bahan, harus terlebih dahulu dibuat kurva histerisisnya. Untuk itu diperlukan kurva histerisis pada setiap temperatur *annealing* dan temperatur *quenching* yang berbeda.

1. Koersivitas dan Remanensi Bahan

Sifat dan karakteristik magnetik dari suatu bahan erat kaitannya dengan suseptibilitas magnetik (*magnetic susceptibility*) χ_m dan permeabilitas magnetik (*magnetic permeability*) μ (Arthur F. Kip, 1992). Rapat fluks magnet B , medan magnet H dan Magnetisasi M sangat diperlukan

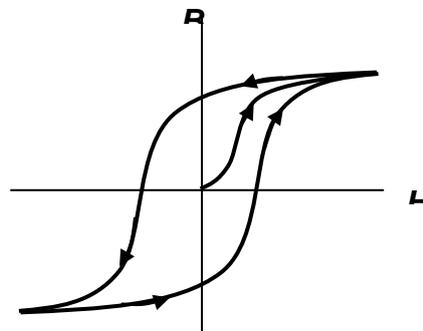
karena berhubungan dengan suseptibilitas dan permeabilitas magnetik dari suatu bahan. Hubungan antara B , H dan M dapat ditulis dengan persamaan:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (1)$$

$$M = \chi_m H \quad (2)$$

Berdasarkan permeabilitas magnetik (μ_m) bahan magnetik dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok yaitu; diamagnetik ($\mu_m < 0$), paramagnetik ($\mu_m > 0$) dan ferromagnetik ($\mu_m \gg 0$).

Bahan ferromagnetik mula-mula memiliki magnetisasi nol pada daerah yang bebas medan magnetik, bila mendapat pengaruh medan magnetik yang lemah saja akan memperoleh magnetisasi yang besar. Jika diperbesar medan magnetnya, akan makin besar pula magnetisasinya. Eksperimen menunjukkan bila medan magnetik ditiadakan, magnetisasi bahan tidak kembali menjadi nol. Jadi bahan ferromagnetik itu dapat mempunyai magnetisasi walaupun tidak ada medan, sehingga bahan dikatakan memiliki magnetisasi spontan. Di atas temperatur Curie, ferromagnetik berubah menjadi paramagnetik.



Gambar 1. Histeresis untuk bahan ferromagnetik
(John P. Reitz, 1993)

Apabila kurva magnetisasi dilanjutkan dengan mengurangi besarnya medan magnet H maka rapat fluks magnetik B akan turun, tetapi turunnya rapat fluks magnetik B tidak mengikuti kurva naiknya (Gambar 4). Rapat fluks magnetik B turun membentuk kurva baru menuju titik B_r ketika medan magnet H sama dengan nol, sehingga pada gambar jelas sekali terlihat bahwa ketika medan magnet $H = 0$, rapat fluks magnetik B tidak sama dengan nol, akan tetapi berada pada titik B_r , hal ini menunjukkan bahwa pada bahan tersebut masih terdapat rapat fluks magnetik yang tertinggal. Titik B_r disebut sebagai *kerapatan fluks remanensi* atau *remanensi bahan* yaitu besarnya rapat fluks magnetik B yang tertinggal pada bahan pada saat medan magnet H samadengan nol. Ketika medan magnet H dibalik arahnya maka rapat fluks magnetik B akan mencapai nilai nol di titik H_c . Titik H_c ini disebut sebagai *gaya koersif* atau *koersivitas bahan* yaitu besarnya medan magnet atau intensitas H yang diperlukan unrtuk mengembalikan rapat fluks magnetik menjadi nol. Apabila siklus ini diteruskan maka akan didapat kurva dengan bentuk simetris yang dikenal dengan fenomena *histeresis* seperti pada Gambar 1 di atas.

Dari kurva histeresis dapat diketahui besarnya koersivitas bahan H_c , remanensi bahan B_r , dan permeabilitas bahan μ yang besaran-besaran tersebut menentukan sifat dan karakteristik kemagnetan suatu bahan.

2. Laku Panas

Laku panas yang biasa dilakukan ada tiga macam, yakni: *quenching*, *annealing*, dan *temper*. Berikut akan dibahas perlakuan panas yang digunakan dalam pelitian ini, yakni *annealing* dan *quenching*.

a. Annealing

Proses *annealing* adalah proses laku panas dimana bahan mengalami pemanasan yang mendadak disusul dengan pendinginan secara pelan-pelan pula (Van Vlack, 1991: 437). Ada dua

macam *annealing*, yakni: *annealing* isothermal dan *annealing* isokronal. *Annealing* isothermal jika *annealing* dilakukan pada temperatur yang sama sedangkan waktunya berubah-ubah. *Annealing* isokronal adalah *annealing* yang dilakukan pada temperatur yang berubah-ubah namun waktunya tetap (Edi Istiyono, 2003).

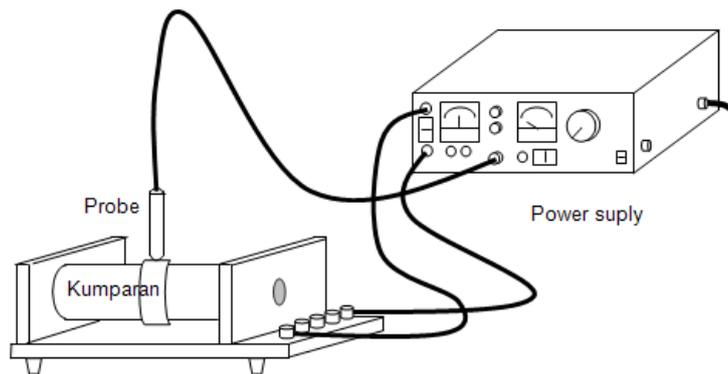
b. Quenching

Proses *quenching* adalah proses laku panas dimana bahan mengalami pemanasan yang mendadak disusul dengan pendinginan secara mendadak pula (Van Vlack, 1991: 438). Seperti pada *annealing*, ada dua macam *quenching*, yakni: *quenching* isothermal dan *quenching* isokronal. *Quenching* isothermal jika *quenching* dilakukan pada temperatur yang sama sedangkan waktunya berubah-ubah. *Quenching* isokronal adalah *quenching* yang dilakukan pada temperatur yang berubah-ubah namun waktunya tetap.

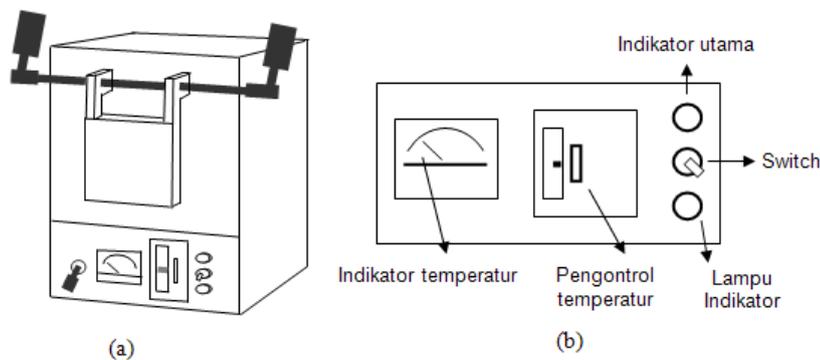
METODE PENELITIAN

Variabel penelitian terdiri atas variabel bebas (*independent*), variabel gayut (*dependent*), dan variabel kontrol. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah: temperatur *annealing* dan temperatur *quenching*. Variabel gayut adalah: permeabilitas, koersivitas, dan remenensi. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah: waktu *annealing* dan waktu *quenching*.

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian antara lain: furnace, alat uji remanensi dan koersivitas *circuit magnetic*, dan FCD. *Circuit Magnetic* adalah alat untuk mengukur besarnya rapat fluks magnet dengan kuat arus I sebagai besaran yang ditetapkan. Alat ini terdiri dari: power supply, unit kumparan, probe Flukmeter, batang magnetik circuit, dan perangkai. Skema alat ini dinyatakan pada Gambar 2.



Gambar 2 Rangkaian Circuit Magnet.



Gambar 3. Furnace: (a) furnace secara keseluruhan (b) bagian pengontrol furnace

Furnace adalah alat untuk memberikan perlakuan panas pada bahan dengan besar temperatur sesuai dengan keinginan. Alat ini memiliki spesifikasi: temperatur maksimal 1200°C , temperatur maksimal yang direkomendasikan 1150°C , over temperature protection : Thermal fuse (1250°C), maxi. power (240 V input) 6 kW, dan power suply required 210/220V atau 230/240V. Skema alat dinyatakan Gambar 3.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen. Pengumpulan data dilakukan dengan melaksanakan percobaan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

Annealing yang dilakukan dalam penelitian ini, yakni *annealing* isokronal yang dilakukan dalam waktu konstan 30 menit pada temperatur 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 500°C , 600°C , 700°C , 800°C , dan 900°C . *Annealing* isothermal tidak dilakukan karena pada umumnya variasi waktu *annealing* tidak besar pengaruhnya.

Quenching yang dilakukan dalam penelitian ini, yakni *quenching* isokronal yang dilakukan dalam waktu konstan 30 menit pada temperatur 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 500°C , 600°C , 700°C , 800°C , dan 900°C . *Quenching* isothermal juga tidak dilakukan karena pada umumnya variasi waktu *quenching* tidak besar pengaruhnya.

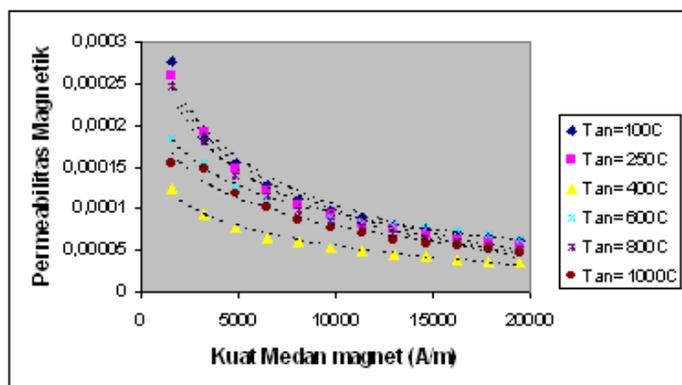
Langkah menentukan permeabilitas, koercivitas, dan remenensi adalah: (1) memasukkan dua sampel FCD ke dalam kumparan dan probe fluks meter di tengah-tengahnya, (2) menaikkan arus kumparan mulai nol sambil mengukur medan magnet pada tengah kumparan sampai medan tidak naik lagi, (3) arus diturunkan sampai nol, lalu arah arus dibalik dan dinaikkan hingga medan tetap, dan (4) arus diturunkan kembali sampai nol dan arah arus dibalik lagi sampai dengan medan hampir tetap.

Analisis data pada penelitian ini meliputi: (1) membuat grafik kurva histeresis untuk FCD berbagai temperatur *annealing* dan *quenching*, (2) menghitung dan menentukan permeabilitas magnetik, remanensi, dan koercivitas, dan (3) membuat grafik: (a) hubungan antara temperatur *annealing* dan *quenching* dengan remanensi FCD; (b) hubungan antara temperatur *annealing* dan *quenching* dengan koersivitas FCD.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh *Annealing* terhadap Permeabilitas Magnetik

Berdasarkan Gambar 4, semakin tinggi temperatur *annealing*, maka semakin kecil permeabilitas FCD pada medan magnet rendah, tertinggi temperatur *annealing* 100°C . Pada medan magnet tinggi, permeabilitas FCD tertinggi pada temperatur *annealing* 600°C . Temperatur *annealing* optimal untuk permeabilitas adalah 600°C . Hal ini karena pemanasan pada temperatur tinggi akan menyebabkan pertumbuhan butiran dan lapisan austenit. Tetapi karena pendinginannya perlahan, *annealing* menyebabkan karbon dapat keluar dari struktur matriks austenit, sehingga menimbulkan struktur ferit yang stabil. Ferrit tersebut memiliki permeabilitas magnet yang tinggi dan kerugian histeresis rendah (<http://www.darton-international.com/ductiron.htm>.)



Gambar 4. Hubungan permeabilitas dengan temperatur *annealing* pada berbagai kuat medan magnet

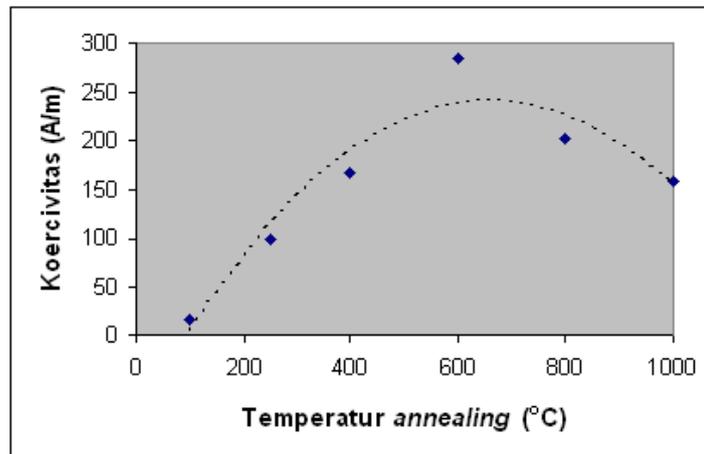
Pengaruh *Annealing* terhadap Koersivitas dan Remanensi

Koersivitas adalah besarnya kuat medan magnet yang diperlukan untuk mengembalikan rapat fluks magnet atau induksi magnet, menjadi nol. Nilai koersivitas terjadi pada saat nilai rapat fluks magnet B sama dengan nol. Besarnya koersivitas dapat diketahui dari kurva histeresis masing-masing FCD.

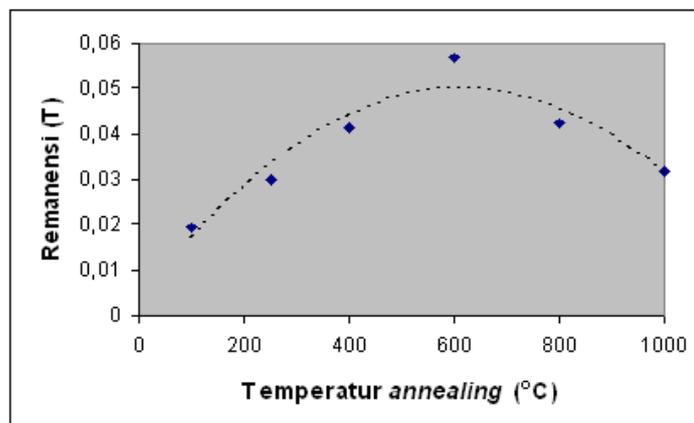
Remanensi adalah besarnya rapat fluks magnet atau induksi magnet yang masih tertinggal ketika medan magnet menjadi nol atau tidak ada lagi. Besarnya Remanensi dapat diketahui langsung dari data kurva histeresis masing-masing FCD yaitu ketika medan magnet sama dengan nol. Remanensi sangat menentukan keras dan lunaknya magnet, semakin tinggi remanensi menunjukkan semakin tinggi rapat fluks yang tertinggal di dalam bahan, sehingga bahan dengan keadaan seperti ini merupakan magnet keras.

Berdasarkan Gambar 4 dan 5, kenaikan temperatur *annealing* dapat menaikkan koersivitas dan remanensi bahan secara kuadratik serta mencapai optimum pada temperatur 600 °C, kemudian di atas temperatur 600 °C koersivitas dan remanensi menurun.. Hal ini karena pemanasan pada temperatur tinggi akan menyebabkan pertumbuhan butiran dan lapisan austenit. Di samping itu, karena pendinginannya perlahan, *annealing* menyebabkan karbon dapat keluar dari struktur matriks austenit, sehingga menimbulkan struktur ferit yang stabil. Ferit ini yang berperan meningkatkan sifat kemagnetan bahan. Semakin tinggi temperatur *annealing* dapat menaikkan jari-jari orbit elektron, sehingga momen dwikutub magnetik meningkat yang akhirnya dapat meningkatkan koersivitas dan remanensi bahan.

Berdasarkan uraian di atas, maka keadaan optimum dicapai pada temperatur *annealing* 600 °C. Hal ini karena pada keadaan tersebut bahan memiliki permeabilitas, koersivitas, dan remanensi yang maksimum



Gambar 5. Hubungan antara temperatur *annealing* dengan koersivitas

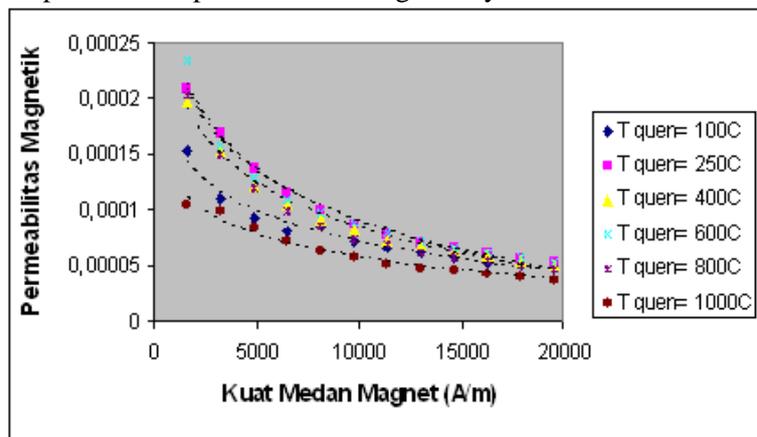


Gambar 6. Hubungan antara temperatur *annealing* dengan remanensi

Pengaruh *Quenching* terhadap Permeabilitas Magnetik

Berdasarkan kurva permeabilitas pada Gambar 7 bahwa permeabilitas tertinggi terjadi pada FCD yang *diquenching* pada temperatur 600°C, sedangkan permeabilitas magnet terendah terjadi pada FCD yang *diquenching* pada temperatur 1000°C. Hal ini karena FCD *diquenching* pada temperatur 600°C perubahan struktur mikro yang terjadi sangat jelas, sebagian besar matriks struktur yang terbentuk berupa ferit dengan grafit sferoid dan flake yang cukup banyak. Struktur mikro dengan bentuk matriks ferit menyebabkan permeabilitas magnet yang dimiliki bahan menjadi naik (<http://www.darton-international.com/ductiron.htm>). Jadi semakin banyak ferit dalam matriks maka permeabilitas magnetnya menjadi semakin tinggi.

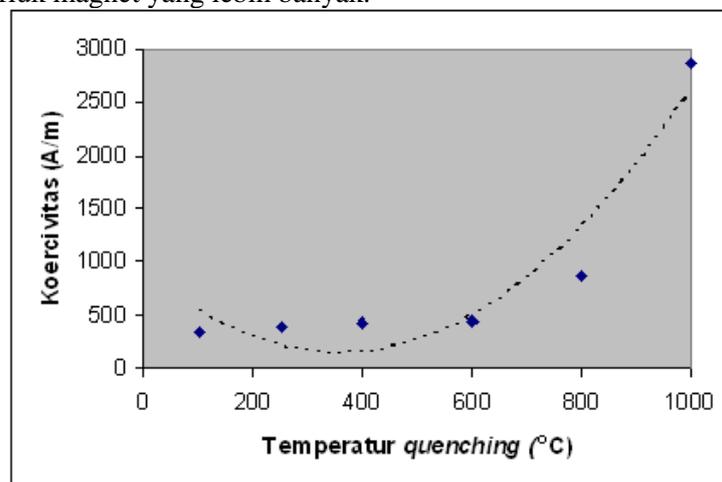
FCD yang *diquenching* pada temperatur tinggi, 800°C dan 1000°C dan rendah 100°C dan 250°C memiliki permeabilitas yang lebih rendah. Matriks yang terbentuk pada temperatur *quenching* tersebut berupa martensit. Di dalam matriks martensit grafit berbentuk flak sudah tidak ada lagi, sedangkan grafit berupa sferoid masih ada dan persentasinya berkurang. Keadaan tersebut berpengaruh terhadap kenaikan permeabilitas magnetiknya.



Gambar 7. Hubungan permeabilitas dengan temperatur *quenching* pada berbagai kuat medan magnet

Pengaruh *Quenching* terhadap Koercivitas dan Remanensi

Berdasarkan Gambar 8 diketahui bahwa semakin tinggi temperatur *quenching*, maka koercivitas semakin tinggi pula mencapai maksimum pada temperatur 1000°C. Semakin tinggi nilai koersivitas bahan, maka untuk mengembalikan rapat fluks magnet kembali menjadi nol akan dibutuhkan medan magnet yang tinggi. Dengan demikian bahan dengan keadaan seperti ini mampu menyimpan rapat fluks magnet yang lebih banyak.

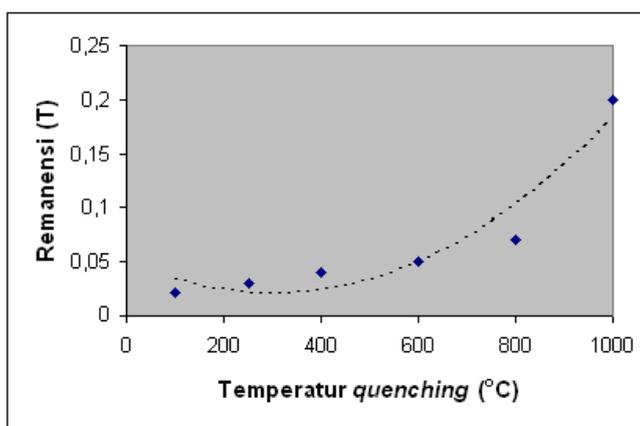


Gambar 8. Hubungan antara temperatur *quenching* dengan koersivitas

Berdasarkan Gambar 9, diketahui bahwa besarnya remanensi tertinggi pada FCD yang diquenching pada temperatur 1000°C . Tingginya nilai remanensi ini sangat dipengaruhi oleh matriks strukturmikronya. Pada quenching temperatur ini matriks yang dihasilkan berupa martensit yang memiliki sruktur lebih homogen dibanding matriks strukturmikro yang lain serta memiliki jumlah grafit yang lebih sedikit.

Kehomogenan struktur inilah yang menyebabkan arah domain-domain magnetnya ketika dilewati medan magnet luar akan tersusun menjadi searah sehingga rapat fluk yang ditimbulkan menjadi semakin besar karena tidak ada atau sedikit momen magnetik yang arahnya berlawanan atau tolak menolak.

Berdasarkan uraian di atas, maka keadaan optimum dicapai pada temperatur *quenching* 600°C untuk permeabilitas, karena pada keadaan tersebut permeabilitasnya maksimum. Namun keadaan optimum untuk koercivitas dan remanensi dicapai pada temperatur *quenching* 1000°C , karena koercivitas dan remanensi mencapai maksimum. Dengan demikian keadaan optimum proses *quenching* pada temperatur 1000°C .



Gambar 9. Hubungan antara temperatur *quenching* dengan remanensi

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan diperoleh simpulan sebagai berikut :

1. Semakin tinggi temperatur *annealing*, maka:
 - a. semakin rendah permeabilitas FCD,
 - b. semakin tinggi koercivitas FCD dan setelah mencapai maksimum (600°C) kemudian menurun lagi.
 - c. semakin tinggi remanensi FCD dan setelah mencapai maksimum (600°C) kemudian menurun lagi.
2. Semakin tinggi temperatur *quenching*, maka:
 - a. semakin rendah permeabilitas FCD
 - b. semakin tinggi pula koersivitas FCD.
 - c. semakin tinggi remanensi FCD
3. Kondisi optimum proses *annealing* pada temperatur 600°C menghasilkan FCD dengan sifat kemagnetan yang keras yaitu permeabilitas tinggi, remanensi dan koersivitas tinggi.
4. Kondisi optimum proses *quenching* pada temperatur 1000°C menghasilkan FCD dengan sifat kemagnetan yang keras yaitu permeabilitas rendah, remanensi dan koersivitas tinggi.

Saran

Karena beberapa keterbatasan dalam penelitian ini, maka disarankan sebagai berikut:

1. Untuk penelitian lebih lanjut hendaknya mencoba melakukan proses *annealing* dan proses *quenching* dengan variasi waktu *annealing* dan *quenching*.
2. Tentukan juga karakteristik kemagnetan FCD setelah mengalami proses *annealing* dan *quenching* dapat menggunakan metode *Magnetic Force Microscopy* (MFM), sehingga akan dapat diketahui arah-arrah domain magnetiknya.

DAFTAR PUSTAKA

- Amanto, Hari (1999). *Ilmu Bahan*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Dalven, Richard (1990). *Introduction To Applied Solid State Physics*. Berkeley, California: Plenum Press.
- Edi Istiyono (2003). *Kajian Sifat Mekanik Bahan yang Mengalami Proses Anilisasi*. (Laporan Penelitian). Yogyakarta: FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta.
- Hayt, William (1997). *Elektromagnetika Teknologi*. Erlangga.
- John. V.B. (1987). *Introduction To Engineering Materials*. London: English Language Book Society.
- Karsay, Stephen I (1992). *Ductile Iron I Production*. Canada: QIT-Fer et Titanic Inc
- Kip, Arthur F (1992). *Fundamental Of Electricity And Magnetism*. Tokyo: McGraw-Hall Kogakusha, Ltd.
- Kittel, C (1996). *Introduction to Solids State Physics*, Sixth Edition. New York
- Metal Task Force and INI International. *Specifications for Ductile Iron*. diakses tanggal 3 Mei 2007 dari [http://www.key-to-steel.com/ Specifications for Ductile Iron.htm](http://www.key-to-steel.com/Specifications%20for%20Ductile%20Iron.htm).
- R Reitz, J (1993). *Dasar Teori Listrik Magnet*. Edisi Ketiga, Penerbit ITB Bandung
- Rio Tinto Iron and Titanium, Inc. *Ductile Iron Data for Design Engineers*. diakses tanggal 8 April 2007 dari <http://www.ductile.org/didata/Section3/3part2.htm>.
- Rio Tinto Iron and Titanium, Inc. *Nodular Ductile Iron . The Wordl's Most Comphenesive Stell Database*. diakses tanggal 3 Mei 2007 dari [http://www.key-to-steel.com/Nodular Ductile Iron.htm](http://www.key-to-steel.com/Nodular%20Ductile%20Iron.htm).
- Van Vlack, L. (1991). *Ilmu dan Teknologi Bahan*, Edisi Kelima, Penerbit Erlangga, Jakarta