

PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI FERIT HEKSAGONAL $BaFe_{12}O_{19}$

Oleh: *Marsongkohadi**, *M. Daveny Soufyan**, *Sri Kusmanto**,
*Kurniadi Sumaamidjaya***, dan *Achmad Arslan*** .

SARI

Polikristal ferit heksagonal $BaFe_{12}O_{19}$ telah dibuat dengan cara standar pembuatan keramik. Serbuk murni $BaCO_3$ dan Fe_2O_3 dengan komposisi non-stoikiometrik $BaO \cdot n Fe_2O_3$ ($n = 5,5, 5,7, \text{ dan } 5,9$) digiling dengan bola-bola baja dan dipanaskan pada suhu kalsinasi selama beberapa jam. Penambahan fluks 0,5% NaF pada campuran tersebut mengakibatkan penurunan suhu kalsinasi dengan $150^\circ C - 200^\circ C$ sehingga pembentukan ferit heksagonal dapat terjadi pada suhu $900^\circ C$, bukan pada $1100^\circ C - 1200^\circ C$ seperti halnya tanpa fluks.

Cuplikan yang diarahkan oleh medan magnet telah dikarakterisasi dengan difraksi sinar-X, menggunakan radiasi $MoK\alpha$. Cuplikan-cuplikan tersebut juga diteliti dengan difraksi neutron dengan panjang gelombang $\lambda = 1,071 \text{ \AA}$ dan dilakukan pengukuran magnetik konvensional. Semua hasilnya dibandingkan terhadap hasil pengukuran pada cuplikan $BaFe_{12}O_{19}$ buatan pabrik Sumitomo, Jepang. Hasilnya jelas menunjukkan bahwa struktur kristal dan sifat-sifat magnetik ferit yang dibuat dalam percobaan ini mendekati cuplikan Sumitomo, sehingga cuplikan tersebut berguna sebagai bahan magnet permanen.

ABSTRACT

Polycrystalline hexagonal ferrites $BaFe_{12}O_{19}$ have been prepared by standard processes of ceramics. Pure $BaCO_3$ and Fe_2O_3 powders of non-stoichiometric compositions, $Ba \cdot n Fe_2O_3$ ($n = 5.5, 5.7, \text{ and } 5.9$) were ball-milled and calcined for several hours. Addition of 0.5% NaF flux reduced the calcining temperature by $150^\circ C - 200^\circ C$ thus enabling the formation of hexagonal ferrite at $900^\circ C$ instead of $1100^\circ C - 1200^\circ C$.

Magnetically aligned specimens were characterized by X-ray diffraction using $MoK\alpha$ radiation. These specimens were also examined by neutron diffraction with $\lambda = 1.071 \text{ \AA}$ and standard magnetic measurements. All the present results were compared with those obtained from the $BaFe_{12}O_{19}$ specimens manufactured by Sumitomo, Co, Japan. The results clearly showed that the present made ferrites had crystal structures and magnetic properties fairly similar to those specimens manufactured by Sumitomo, Co and thus enabling them to be used as permanent magnet material.

* Jurusan Fisika, ITB

** Pusat Penelitian Teknik Nuklir, BATAN

1. Pendahuluan

Ada dua jenis ferit yang banyak digunakan dalam teknologi, yakni *ferroxcube* dan *ferroxdure*. *Ferroxcube*, atau ferit spinel pertama kali dibuat di Laboratorium Phillips oleh Snoek (1946). Sifat-sifat khas *ferroxcube* antara lain resistivitas listrik tinggi, koersivitas rendah, dan permeabilitas magnetik tinggi. Karena itu *ferroxcube* digolongkan dalam kelas bahan magnet lunak. Penggunaan *ferroxcube* terutama dalam bidang elektronika frekuensi tinggi, yakni sebagai induktan dan transformator frekuensi tinggi.

Beberapa tahun setelah *ferroxcube* yang pertama dibuat, di laboratorium yang sama telah ditemukan suatu ferit jenis baru yang dinamakan *ferroxdure* (Went, *et al*, 1952), dengan struktur heksagonal. Selain resistivitas listriknya tinggi, bahan ini mempunyai sifat magnetik yang berlawanan dengan *ferroxcube*, yakni koersivitasnya sangat tinggi dan permeabilitas magnetiknya rendah. Oleh karena itu bahan ini digolongkan dalam kelas bahan magnet keras dan sangat baik digunakan sebagai magnet permanen. Berbeda dengan bahan magnet permanen lainnya, *ferroxdure* tidak mengandung Ni atau Co yang mahal harganya. Itulah sebabnya bahan ini mempunyai nilai ekonomi yang penting.

Penggunaan ferit untuk magnet permanen pertama kali dikemukakan oleh Kato dan Takei (1938). Akan tetapi karena bahannya mempunyai $(BH)_{maks}$ terlalu kecil, maka magnet tersebut tidak banyak kegunaannya. *Ferroxdure* dengan $(BH)_{maks} = 1$ MGOe mulai banyak digunakan sejak tahun 1952. Dalam tahun 1957 magnet ferit barium dengan $(BH)_{maks} = 3,5$ MGOe berhasil dibuat dan terdapat dipasaran. Sampai tahun 1962 kebanyakan magnet ferit adalah ferit barium. Akan tetapi akhir-akhir ini ferit strontium mulai berperan dan menggantikan ferit barium dan magnet logam (Cochardt, 1963).

Dalam rangka pembuatan magnet permanen yang murah, telah dibuat polikristal *ferroxdure* atau juga dinamakan ferit heksagonal jenis M, $BaFe_{12}O_{19}$.

Ada dua cara pembuatan polikristal ferit heksagonal, yakni dengan cara endapan kimia (Haneda & Kojima, 1974) dan cara serbuk metalurgi (Baretka & Ridge, 1968). Cara pertama tidak efisien untuk produksi besar-besaran dan tidak praktis karena memerlukan pengawasan dan ketelitian yang tinggi. Oleh karena itu dalam percobaan ini telah dipakai cara kedua yang lebih praktis dan sederhana pelaksanaannya.

Campuran serbuk $BaCO_3$ dan Fe_2O_3 dalam perbandingan yang dikehendaki digiling lalu dipanaskan pada suhu kalsinasi selama beberapa jam. Dengan menambahkan fluks 0,5% NaF pada campuran tersebut suhu kalsinasi dapat diturunkan sebesar $150^{\circ}C - 200^{\circ}C$ (Baretka, 1968).

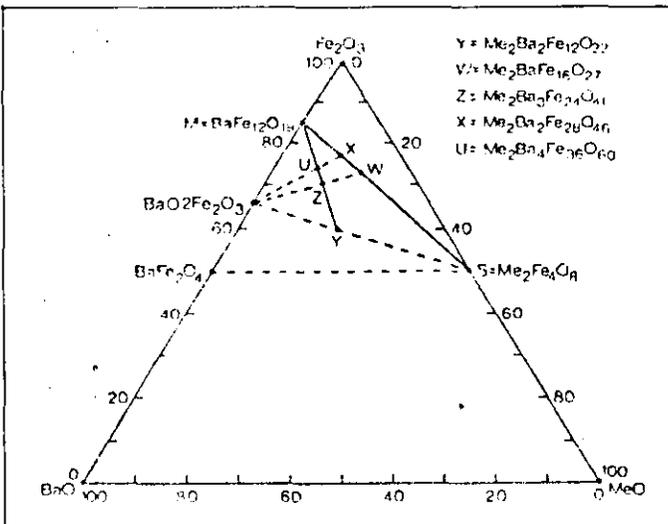
Karakterisasi hasil pembuatan ini dilakukan dengan difraksi sinar-X, difraksi

neutron, dan pengukuran magnetik konvensional. Hasil pengukuran tersebut dibandingkan dengan hasil pengukuran cuplikan $BaFe_{12}O_{19}$ buatan pabrik Sumitomo, Jepang. Dapat disimpulkan bahwa sifat-sifat cuplikan hasil pembuatan ini tidak berbeda jauh dari cuplikan buatan pabrik Sumitomo, sehingga dapat digunakan sebagai bahan magnet permanen.

2. Cara pembuatan ferit heksagonal $BaFe_{12}O_{19}$

2.1 Mekanisme pembentukan ferit barium

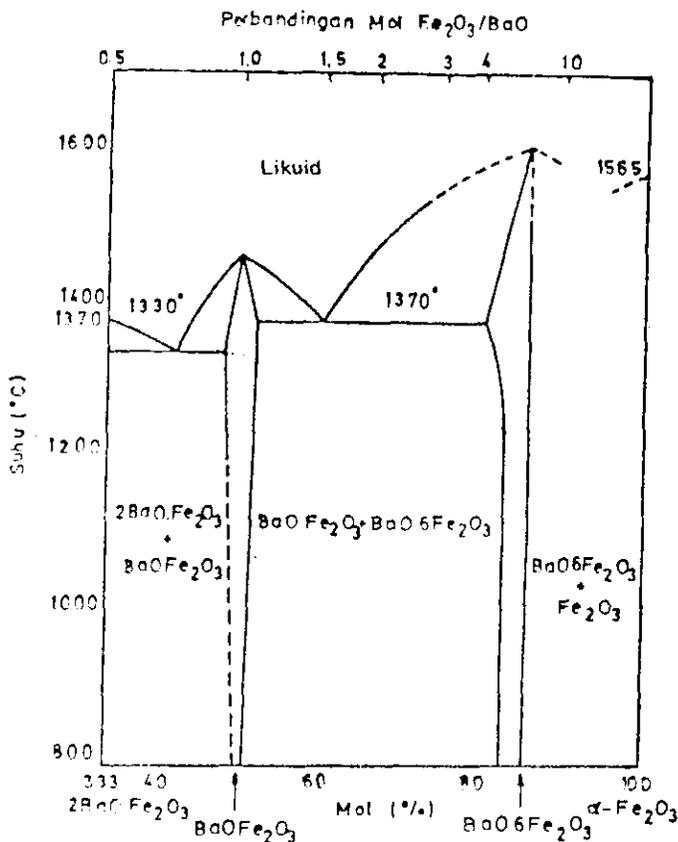
Ferit heksagonal pada umumnya dibuat dengan cara standar pembuatan keramik, yakni dengan mencampur oksida MO (M = Ba, Sr, Pb), Fe_2O_3 , dan MeO (Me = Zn, Mg, Mn) dan memanaskannya pada suhu kalsinasi. Komposisi kimia ferit barium dapat digambarkan dalam diagram terner dengan BaO, Fe_2O_3 , dan MeO sebagai puncak-puncak segitiga sama sisi (gambar 1). Ada beberapa jenis ferit yang dapat dibuat dari ketiga bahan baku tersebut. Yang paling baik digunakan untuk magnet permanen ialah jenis M, $BaFe_{12}O_{19}$. Menurut diagram terner, bahan ini dapat dibuat dari BaO dan Fe_2O_3 sebagai bahan awal. Akan tetapi, dalam percobaan ini telah dipakai serbuk $BaCO_3$ dan Fe_2O_3 sebagai bahan awal.



Gambar 1 Diagram terner menunjukkan komposisi berbagai ferit barium. Me adalah kation divalen

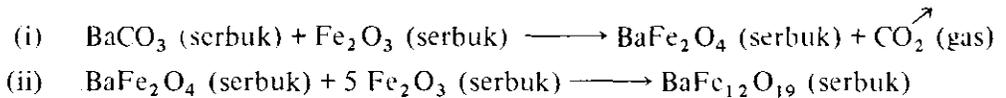
Beberapa peneliti sebelumnya telah mempelajari reaksi antara $BaCO_3$ (serbuk) dengan Fe_2O_3 (serbuk) pada berbagai suhu (Erchak *et al*, 1946; Suchet, 1956;

Sadler *et al*, 1964). Akan tetapi tidak ada kesepakatan mengenai jumlah fasa yang terbentuk. Menurut Goto dan Takada (1960) hanya tiga fasa yang terbentuk, yakni BaO , Fe_2O_3 (BaFe_2O_4), 2BaO , Fe_2O_3 ($\text{Ba}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$), dan BaO , $6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$). Dari ketiga fasa tersebut hanya $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang bersifat magnetik. Berdasarkan ketiga fasa yang terbentuk Goto dan Takada (1960) berhasil membuat diagram fasanya (gambar 2). Dari diagram fasa tersebut dapat disimpulkan bahwa suhu pembentukan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ adalah di atas 800°C dan melebur pada 1600°C . Perbandingan molar $\text{BaO}:\text{Fe}_2\text{O}_3$ dalam larutan padat fasa BaO , $6\text{Fe}_2\text{O}_3$ adalah $18,2 : 81,8$ (BaO , $4,5\text{Fe}_2\text{O}_3$) pada suhu 1350°C dan $16,7 : 83,3$ (BaO , $5,0\text{Fe}_2\text{O}_3$) pada suhu 800°C .



Gambar 2 Diagram fasa sistem $\text{BaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$

Menurut Baretka dan Ridge (1968) reaksi antara BaCO_3 dengan Fe_2O_3 dalam larutan pada terjadi dalam dua tahap :



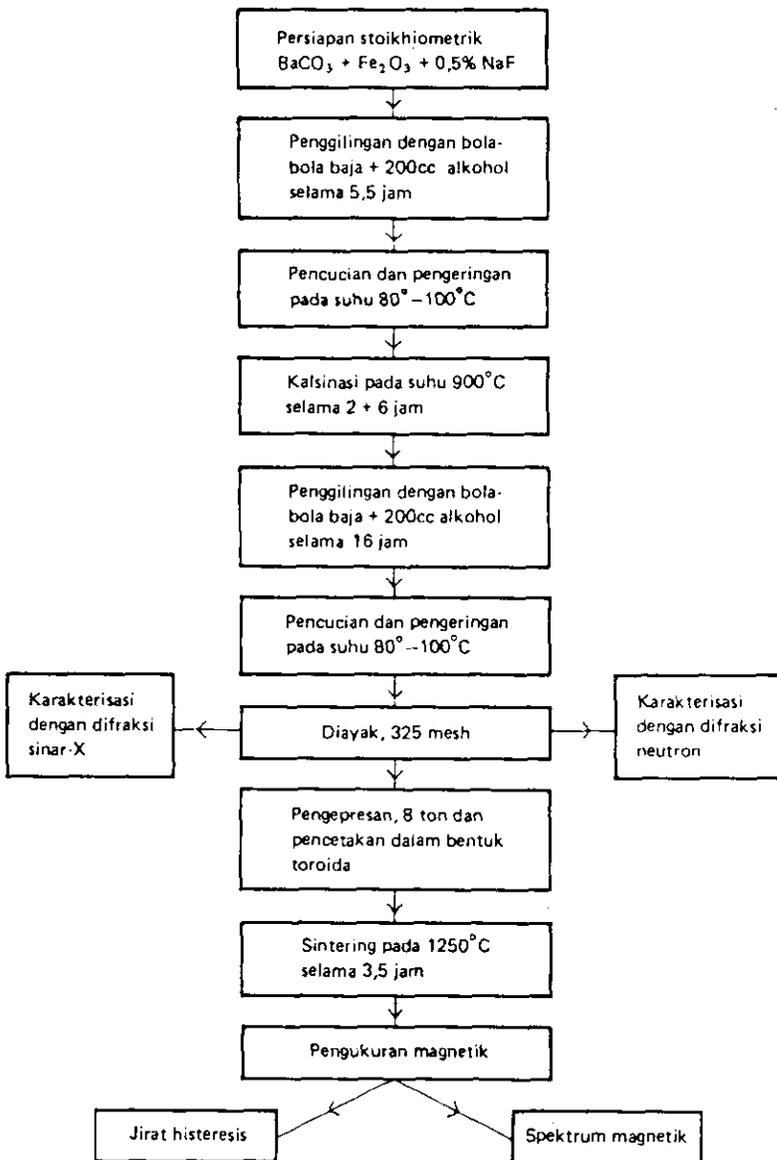
Kedua reaksi tersebut terjadi pada komposisi 1 BaCO₃ : 6 Fe₂O₃. Reaksi (i) dimulai di sekitar 600°C dan pada suhu 800°C mencapai maksimum. Pada waktu itulah BaO, Fe₂O₃ mulai bereaksi dengan kelebihan Fe₂O₃ membentuk BaO, 6 Fe₂O₃. Di atas 850°C, BaOFe₂O₃ mulai menghilang dan 90% dari seluruh reaksi (ii) terjadi pada suhu 1100°C. Dilihat dari mekanisme reaksi di atas, BaCO₃ terurai dan langsung bereaksi dengan Fe₂O₃. Itulah sebabnya pada reaksi ini tidak ditemukan BaO pada setiap tahap. Baretka (1968) telah menunjukkan bahwa dengan memberi fluks 0,5% NaF dalam campuran BaCO₃ dan Fe₂O₃, suhu kalsinasi turun sebesar 150°C–200°C. Hal ini mempunyai keuntungan ekonomi dalam pembuatan ferit heksagonal. Dengan penambahan fluks NaF ferit mulai terbentuk pada suhu 700°C dan pembentukan menjadi lebih sempurna pada suhu di sekitar 900°C, yang tanpa penambahan fluks baru terjadi pada suhu 1100°C.

Penggilingan serbuk memegang peranan penting dalam pembuatan magnet permanen. Dengan penggilingan, ukuran bulir mengecil dari *multidomain* menjadi *single domain*, sehingga menaikkan koersivitas. Penggilingan selama 24 jam akan menaikkan koersivitas akan tetapi penggilingan lebih dari 24 jam menyebabkan penurunan koersivitas (Haneda & Kojima, 1974). Hal ini terjadi karena timbul cacat dan *stress* pada polikristal selama digiling.

2.2 Prosedur pembuatan ferit heksagonal

Dalam percobaan ini dibuat tiga cuplikan masing-masing beratnya 100 gram dengan perbandingan non-stoikiometrik 1 : 5,5; 1 : 5,7; dan 1 : 5,9.

Bahan baku yang dipakai buatan pabrik Merck, Jerman Barat dengan kemurnian: BaCO₃ (99%), Fe₂O₃ (99%), dan NaF (99%). Setelah serbuk BaCO₃ dan Fe₂O₃ dengan perbandingan yang telah ditetapkan dicampur dengan 0,5% NaF, lalu digiling dengan bola-bola baja dalam medium alkohol (200 cc) selama 5,5 jam. Campuran tersebut dikeringkan dalam *oven* pada suhu 80°C–100°C supaya alkoholnya menguap. Kemudian campuran itu dimasukkan ke dalam tungku dan suhunya dinaikkan dengan laju 7°C–10°C/menit sampai mencapai 900°C dan dibiarkan pada suhu ini selama 6 jam. Maka terjadilah reaksi pembentukan ferit dan setiap partikel mengelompok dan memadat. Hasilnya digiling hingga tercapai ukuran yang dikehendaki. Sebagian diteliti dengan difraksi sinar-X dan difraksi neutron. Untuk pengukuran magnetik, serbuk ferit dicetak dan ditekan dalam bentuk toroida. Gambar 3 menunjukkan aliran langkah-langkah dalam pembuatan ferit heksagonal.



Gambar 3 Diagram aliran langkah-langkah pembuatan ferit heksagonal.

3. Karakterisasi ferit heksagonal

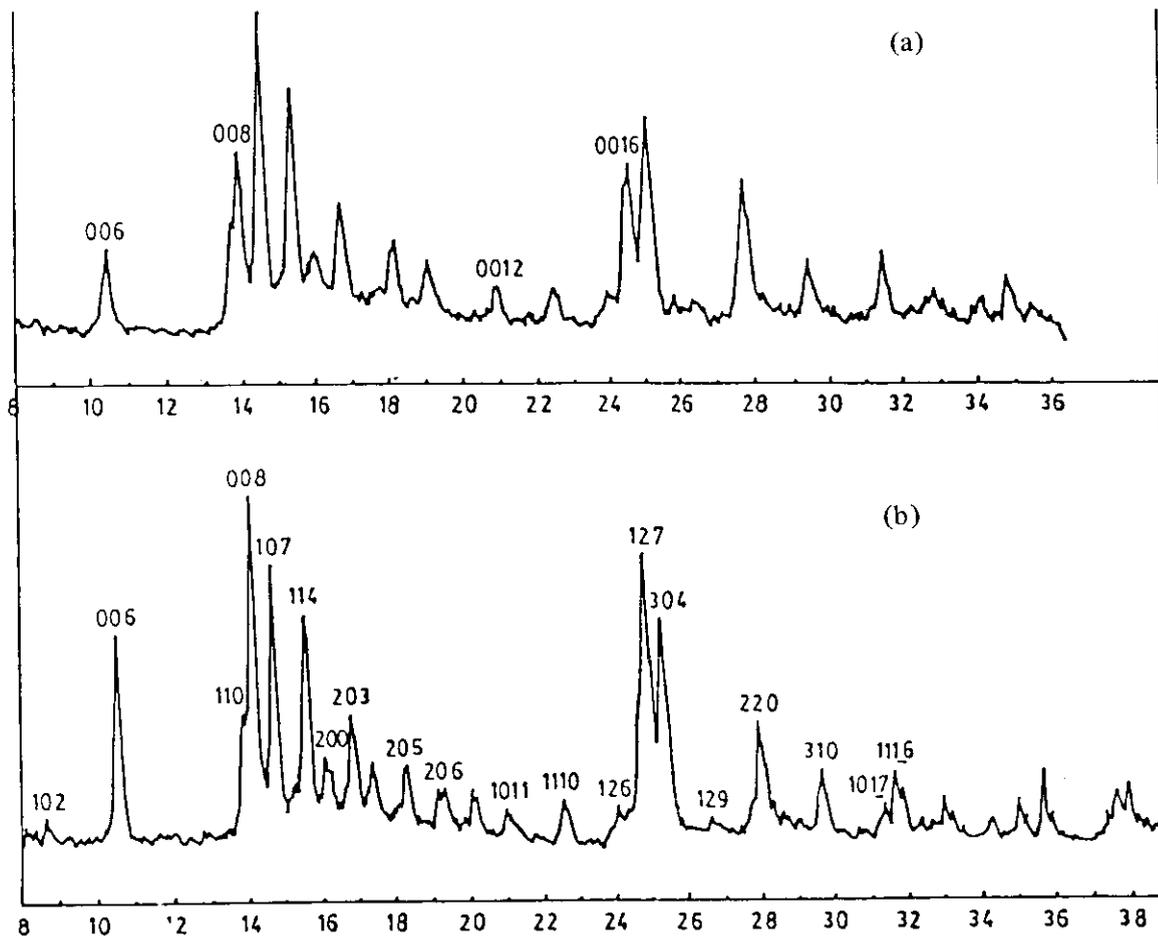
Karakterisasi ferit heksagonal hasil percobaan ini dilakukan dengan difraksi neutron, difraksi sinar-X, dan pengukuran magnetik. Hasilnya dibandingkan dengan hasil pengukuran pada cuplikan buatan pabrik Sumitomo. Khususnya untuk pengukuran magnetik, hasilnya juga dibandingkan dengan hasil pengukuran cuplikan ferit spinel. $\text{Ni}_{0,50}\text{Zn}_{0,50}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

3.1 Difraksi sinar-X

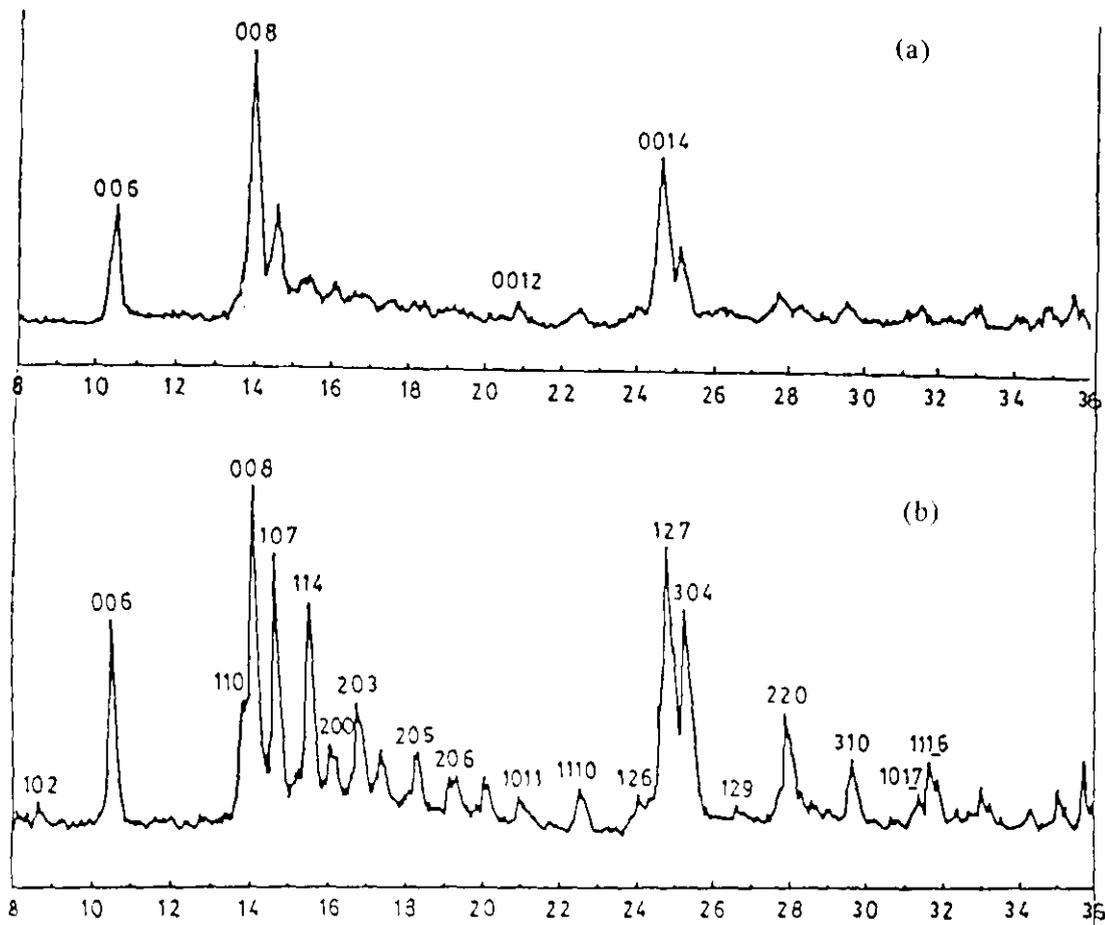
Penyediaan cuplikan

Gorter (1957) telah menunjukkan bahwa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ bersifat feromagnetik kolinear dengan arah magnetisasinya sejajar dengan sumbu c. Oleh karena itu, apabila serbuk $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ditaruh dalam medan magnet kuat, kristalitnya akan berorientasi dengan sumbu c searah dengan medan magnet luar. Maka pola difraksi sinar-X cuplikan ini menunjukkan penambahan intensitas puncak-puncak (OO ℓ) dengan $\ell = \text{genap}$, sedangkan puncak-puncak lainnya rendah.

Cuplikan terarah dapat dibuat dengan mencampur serbuk $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dengan pengikat, dalam percobaan ini dipakai gondorukem yang dilarutkan dalam alkohol. Campuran tersebut ditebarkan merata di permukaan pelat kaca, kemudian diberi medan magnet tegak lurus pada pelat kaca sebesar 4 kGauss, selama 24 jam. Dalam selang waktu tersebut, alkohol menguap dan cuplikan menjadi keras. Apabila cuplikan dikeluarkan dari medan magnet, orientasi kristalit tidak berubah dan arah sumbu c tetap tegak lurus pada pelat kaca. Analisis sinar X dilakukan pada suhu kamar dengan difraktometer buatan Phillips dengan sumber radiasi $\text{MoK}\alpha$ ($\lambda = 0,71069 \text{ \AA}$) dan filter Zr. Pola difraksi dari salah satu cuplikan yang telah dibuat dalam percobaan ini dapat dilihat dalam gambar 4a dan 4b, masing-masing untuk cuplikan terarah ($H = 4 \text{ kGauss}$) dan tak terarah ($H = 0$). Gambar 5a dan 5b menunjukkan salah satu cuplikan buatan pabrik Sumitomo, Jepang. Telah pula dibuat pola difraksi dari Fe_2O_3 dan BaCO_3 untuk perbandingan. Ternyata puncak-puncak kedua zat tersebut tidak muncul dalam pola difraksi ferit barium. Untuk memastikan lagi kemurnian ferit barium hasil buatan ini, telah diteliti adanya puncak-puncak yang sesuai dengan $\alpha\text{-BaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_4$ (pada 1100°C) dan $\beta\text{-BaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (pada 950°C) menurut tabel Hanawalt. Puncak-puncak tersebut ternyata tidak muncul. Dari analisis difraksi sinar-X tersebut di atas diperoleh hampir 90% posisi puncak difraksi cuplikan dalam percobaan ini sesuai dengan tabel Hanawalt. Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran parameter kisi untuk tiga cuplikan yang dibuat (5,5-,5,7-, dan 5,9- $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$), tiga cuplikan Sumitomo (3241, 3234, dan 3226), dibandingkan dengan tabel Hanawalt.



Gambar 4 Difraksi sinar-X dari 5,7-BaFe₁₂O₁₉ untuk cuplikan searah, H = 4 kGauss (a) dan tak terarah, H = 0 (b)



Gambar 5 Pola difraksi sinar-X dari cuplikan 3234 buatan Sumitomo untuk cuplikan terarah $H = 4$ kGauss (a) dan tak terarah $H = 0$ (b)

Tabel 1 Parameter kisi beberapa cuplikan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, ditentukan dengan difraksi sinar-X; $\text{MoK}\alpha$, $\lambda = 0,71069 \text{ \AA}$

Cuplikan	Parameter kisi (\AA)	
5,5 – $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	$a = 5,83 \pm 0,004$	$c = 23,65 \pm 0,49$
5,7 – $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	$a = 5,90 \pm 0,03$	$c = 23,37 \pm 0,20$
5,9 – $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	$a = 5,88 \pm 0,01$	$c = 23,21 \pm 0,04$
3241 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	$a = 5,84 \pm 0,03$	$c = 23,74 \pm 0,59$
3234 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	$a = 5,84 \pm 0,03$	$c = 23,47 \pm 0,31$
3226 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	$a = 5,88 \pm 0,01$	$c = 23,20 \pm 0,03$
Tabel Hanawalt	$a = 5,876$	$c = 23,17$

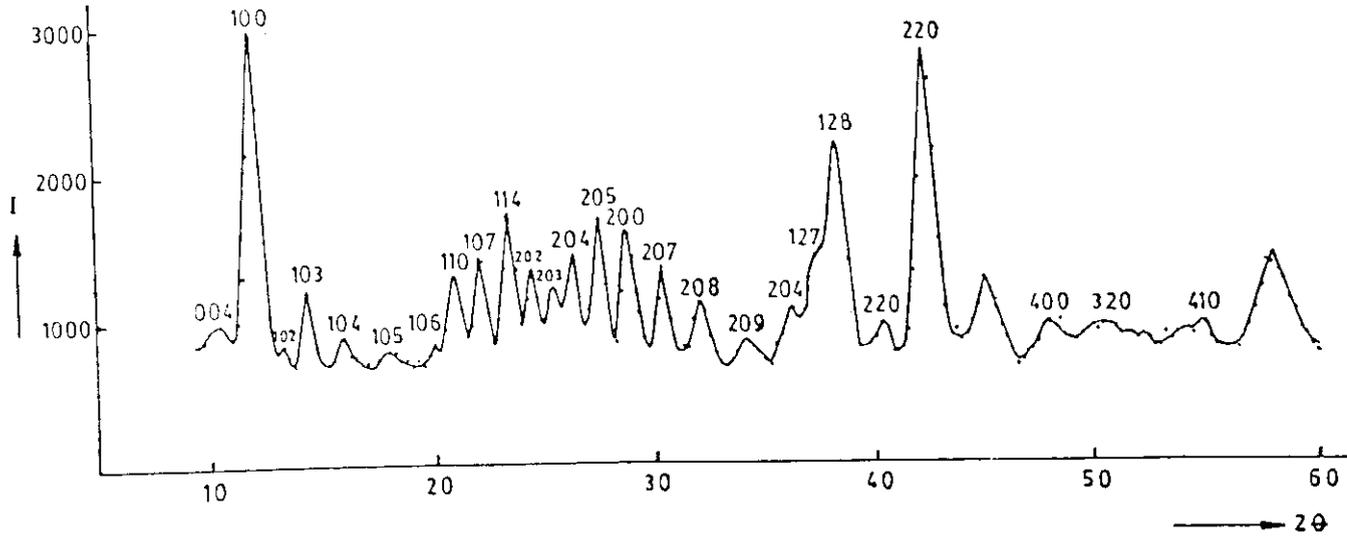
3.2 Difraksi neutron

Serbuk ferit barium diayak melalui ayakan 325 mesh lalu dimasukkan ke dalam wadah cuplikan berupa silinder vanadium. Difraksi neutron dilakukan dengan difraktometer neutron Pusat Penelitian Teknik Nuklir, dengan $\lambda = 1,071 \text{ \AA}$, pada suhu kamar. Gambar 6 dan 7 masing-masing menunjukkan pola difraksi neutron salah satu cuplikan yang dibuat dan cuplikan buatan pabrik Sumitomo. Untuk lengkapnya pola-pola difraksi tersebut juga dibandingkan dengan hasil percobaan Aleshko-Ozhevskii, Faek, dan Yamzin (1969) yang dilakukan dengan $\lambda = 1,22 \text{ \AA}$ pada suhu $T = 4,2 \text{ K}$. Hasil pengukuran parameter kisi dengan difraksi neutron sesuai dengan hasil difraksi sinar-X.

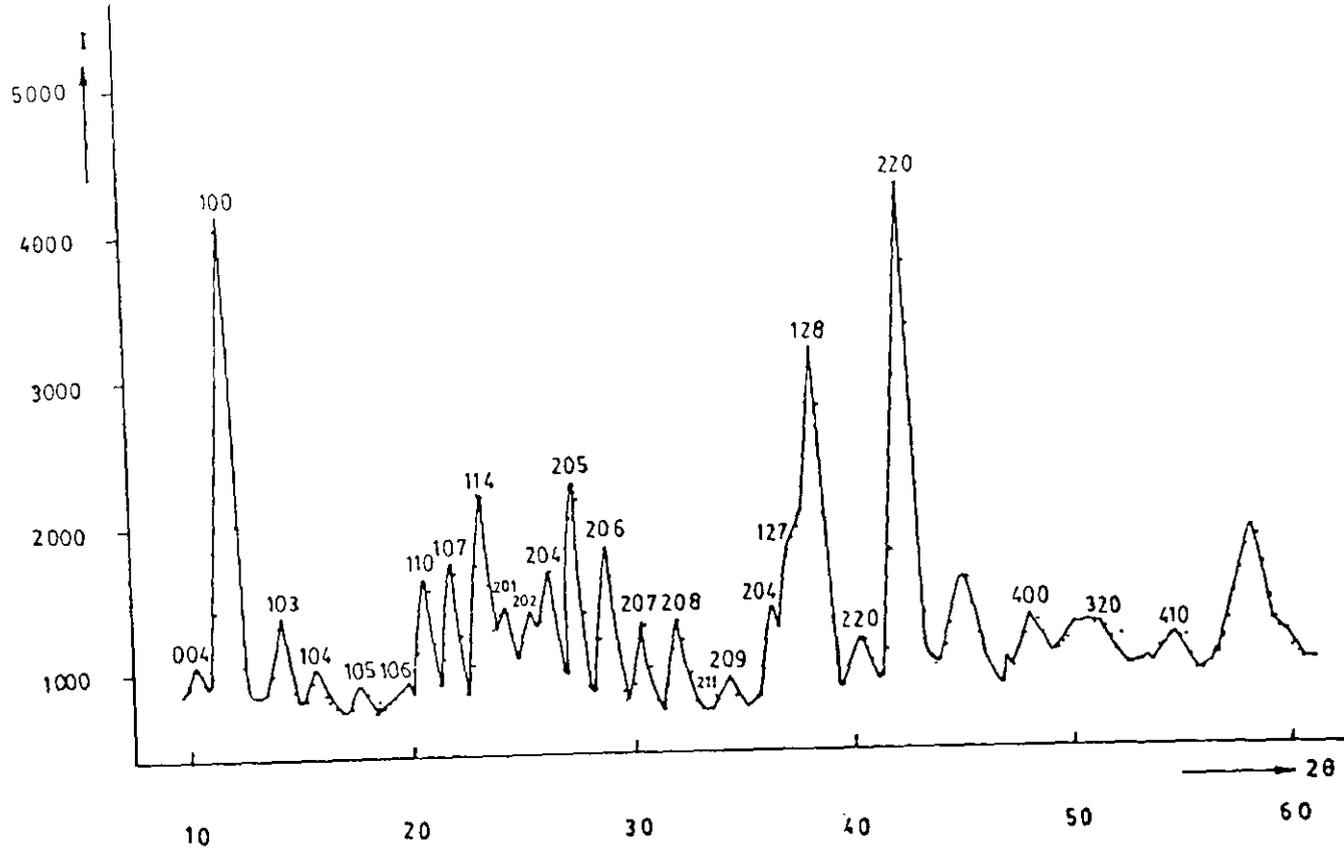
3.3 Pengukuran magnetik

Penyediaan cuplikan

Untuk pengukuran magnetik, serbuk ferit harus dicetak berbentuk toroida, dengan ukuran diameter luar 2,21 cm, diameter dalam 1,71 cm, dan tinggi 0,58 cm. Pencetakan dilakukan dengan cara penekanan kering (*dry-pressing*). Bubuk dicampur dengan 2% polyvinil alkohol (PVA) yang dilarutkan dalam air. PVA ini berlaku sebagai pengikat. Lalu dibubuhkan 1% asam stearat sebagai pelincir. Setelah dimasukkan ke dalam alat pencetak kemudian ditekan sampai mencapai 8 ton, dan dibiarkan selama dua puluh menit. Toroida lalu dipanaskan (*sintering*) dengan laju kenaikan suhu $2^\circ\text{C} - 3^\circ\text{C}/\text{menit}$ sampai mencapai 400°C dan ditahan selama 1 jam, kemudian dinaikkan suhunya ($10^\circ\text{C} - 11^\circ\text{C}/\text{menit}$) sampai 1250°C dan ditahan selama 3,5 jam. Setelah mendingin toroida dililiti dengan kawat tembaga setebal 0,45 mm untuk lilitan primer dan setebal 0,2 mm. untuk lilitan sekunder. Dengan cara ini telah dibuat tiga jenis toroida, masing-



Gambar 6 Pola difraksi neutron cuplikan 5,7-BaFe₁₂O₁₉



Gambar 7 Pola difraksi neutron cuplikan 3234 buatan Sumitomo

masing dari cuplikan 5,7-BaFe₁₂O₁₉ (dibuat dalam percobaan ini), 3234 (dibuat di pabrik Sumitomo), dan Ni_{0,50}Zn_{0,50}Fe₂O₄ (dibuat oleh Hidayat Brahim, 1981). Tabel 2 mencantumkan data lengkap ketiga toroida tersebut.

Tabel 2 Data fisika toroida untuk pengukuran magnetik

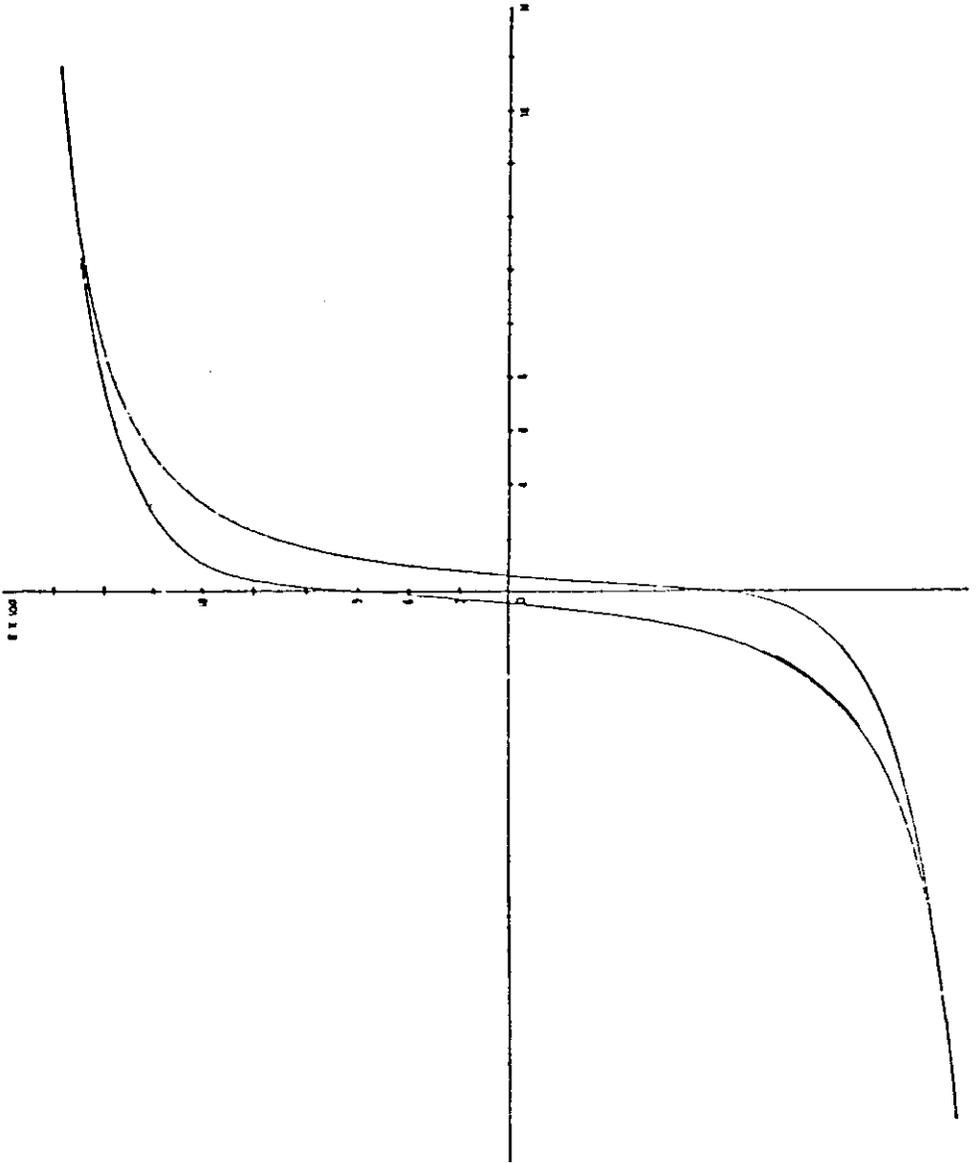
Cuplikan	m (X10 ⁻² kg)	pr	$\bar{\ell}$ (X10 ⁻³ m)	A (X10 ⁻¹³ m ²)	N ₁	N ₂
BaFe ₁₂ O ₁₉ (3234)	3,4507	0,01	5,962	1,28	100	313
BaFe ₁₂ O ₁₉ (5,7)	3,0146	0,06	5,529	0,64	100	433
Ni _{0,50} Zn _{0,50} Fe ₂ O ₄	3,0133	0,03	5,749	0,74	59	300

Keterangan :

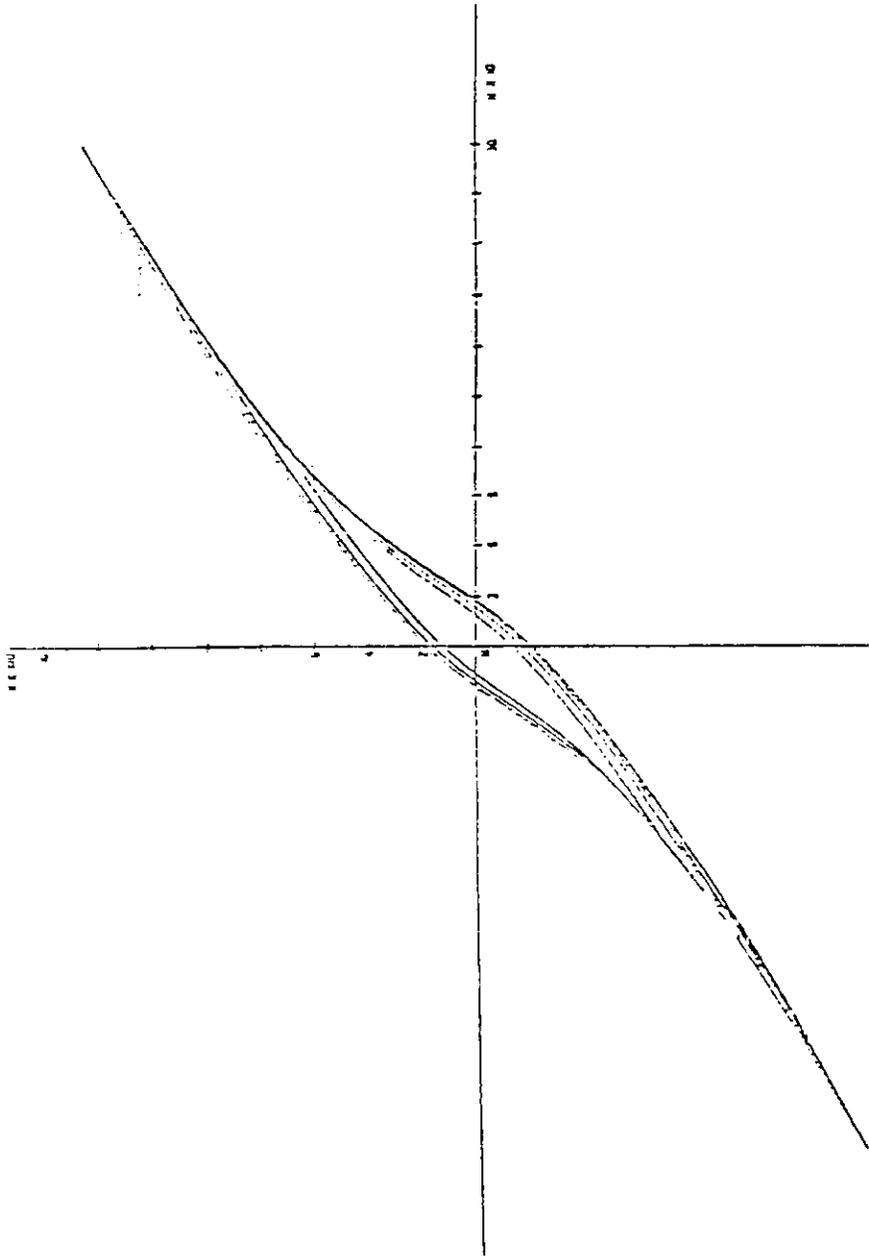
- m — massa setelah dipress
- pr — porositas
- $\bar{\ell}$ — keliling rata-rata
- A — luas toroida
- N₁ — jumlah lilitan primer
- N₂ — jumlah lilitan sekunder

Pengukuran jirat histeresis

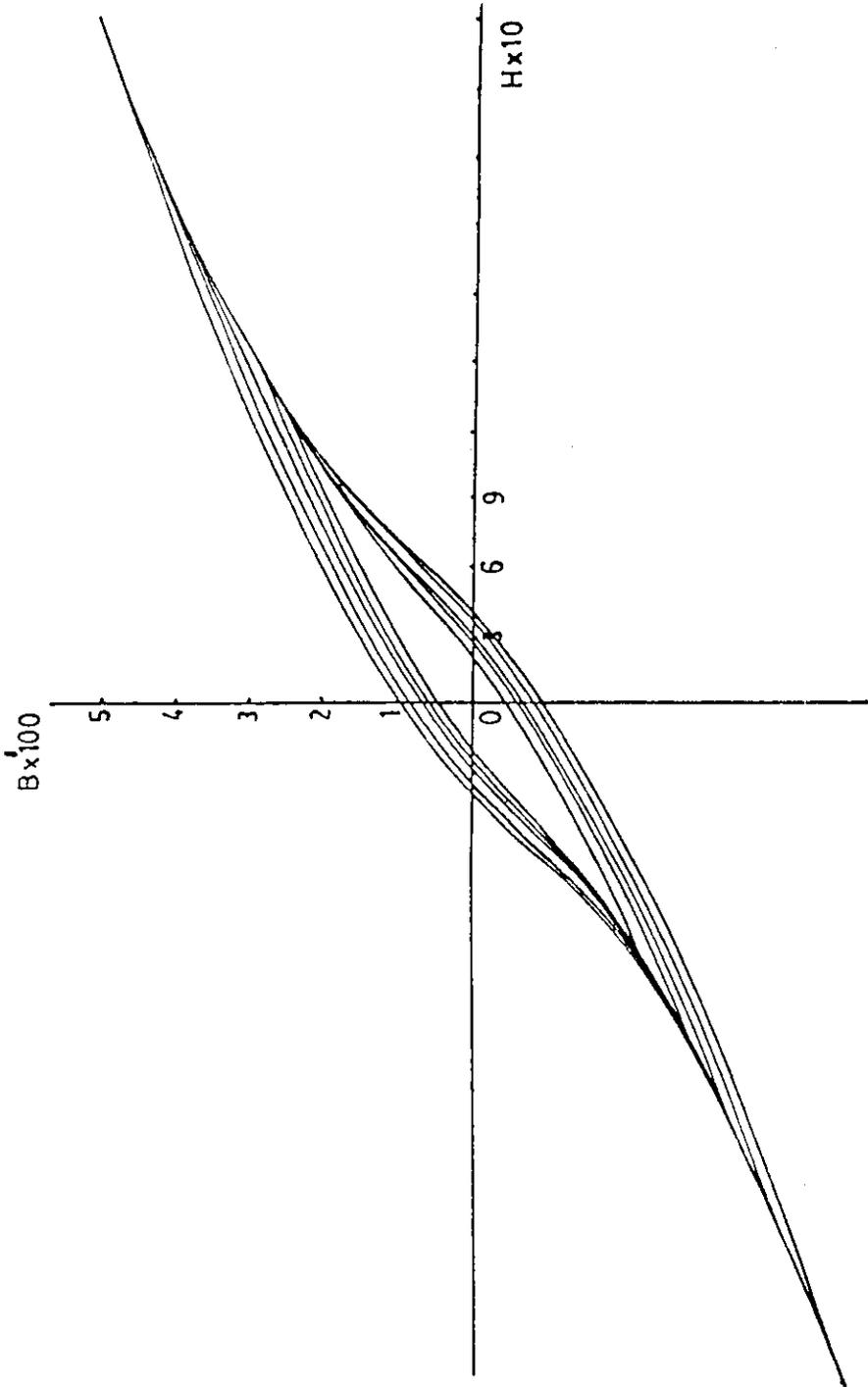
Pengukuran jirat histeresis dilakukan dengan D.C. Hysteresis Tracer, buatan Yokogawa Elektrik Works (YEW), Jepang. Alat ini berdaya 40 VA, sehingga hanya dapat mengukur bahan magnet lunak. Untuk bahan magnet keras dibutuhkan alat khusus dengan daya 300 VA. Oleh karena alat tersebut tidak tersedia, pengukuran jirat histeresis dilakukan dengan daya 40 VA. Gambar 8 menunjukkan jirat histeresis Ni_{0,50}Zn_{0,50}Fe₂O₄. Dari bentuknya, terlihat jelas jirat ini tergolong bahan magnet lunak. Pengukuran jirat menghasilkan: remanensi 1050 gauss, koersivitas 0,5 Oe dan μ_r maksimum 1129. Gambar 9 dan 10 masing-masing menunjukkan jirat histeresis cuplikan 5.7-BaFe₁₂O₁₉ dan 3234. Kedua jirat menunjukkan bahwa harga B_{maks} belum tercapai meskipun harga H telah mencapai harga terbesar yang dapat dihasilkan alat tersebut (300 Oe). Ini menunjukkan bahwa kedua bahan itu tergolong bahan magnet keras. Harga-harga remanensi dan koersivitas tak dapat ditentukan karena B_{maks} tak tercapai. Data dari pabrik Sumitomo menunjukkan remanensi cuplikan 3234 besarnya 4,02 kGauss, koersivitasnya 2,01 kOe, dan (BH)_{maks} 3,58 MGOe. Dari



Gambar 8 Jirat histeresis cuplikan $Ni_{0.6}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ dengan arus magnetisasi maksimum 5 ampere



Gambar 9 Jirat histeresis cuplikan 5,7-BaFe₁₂O₁₉ dengan arus magnetisasi maksimum 15 ampere



Gambar 10 Jirat histeresis cuplikan 3234 buatan Sumitomo, dengan arus magnetisasi maksimum 15 ampere

pengukuran jirat histeresis kedua cuplikan tersebut dapat ditentukan μ_r maksimum yaitu 6,38 untuk cuplikan 5,7-BaFe₁₂O₁₉ dan 2,02 untuk cuplikan 3234.

Pengukuran spektrum magnetik

Yang dimaksud dengan spektrum magnetik ialah kurva μ' dan μ'' dari permeabilitas awal sebagai fungsi frekuensi. Untuk ferit polikristal, apabila interaksi magnetik diabaikan maka suseptibilitas resultannya adalah,

$$\chi = \frac{(\mu_0 - 1)}{4\pi} = 1/3 \left(\frac{M_s}{H_\phi^A} + \frac{M_s}{H_\theta^A} \right) \tag{3.1}$$

dengan μ_0 adalah permeabilitas awal, M_s adalah magnetisasi jenuh suatu domain, dan H^A adalah medan anisotropi.

Frekuensi resonansi magnetiknya adalah

$$\omega_r = \gamma (H_\phi^A H_\theta^A)^{1/2}; \tag{3.2}$$

di sini γ adalah perbandingan giromagnetik. H_ϕ^A adalah medan anisotropi yang timbul apabila vektor magnetisasi dibelokkan dengan sudut ϕ di dalam bidang magnetisasi mudah (*easy magnetization*). H_θ^A adalah medan anisotropi yang timbul apabila vektor magnetisasi diputar sebesar sudut θ , keluar dari bidang magnetisasi mudah.

Untuk ferit spinel $H_\phi^A = H_\theta^A = H^A$, sehingga (3.1) menjadi

$$(\mu_0 - 1) = 8\pi/3 (M_s/H^A); \tag{3.3}$$

di sini H^A kecil, yakni $10^2 - 10^4$ A/m.

Frekuensi resonansi magnetiknya menjadi

$$\omega_r = \gamma H^A \text{ atau } f_r (\mu_0 - 1) = 4/3 \gamma M_s. \tag{3.4}$$

Untuk ferit BaFe₁₂O₁₉ yang mempunyai arah magnetisasi mudah ke arah sumbu c, $H_\phi^A = H_\theta^A = H^A$; akan tetapi H^A besar yaitu 10^6 A/m, sehingga permeabilitas awalnya 10^2 lebih kecil dari ferit spinel. Hal ini terbukti dari hasil percobaan.

Dengan adanya kehilangan daya (*losses*), permeabilitasnya dapat dituliskan sebagai

$$\mu = \mu' - i\mu'' \tag{3.5}$$

dengan $\mu' = \mu_0$ adalah permeabilitas awal dan $\tan \delta = \mu''/\mu'$ menunjukkan kehilangan daya.

μ' dan μ'' dapat diukur dengan LCR-meter.

Apabila toroida dialiri arus bolak-balik dengan frekuensi f , maka imp. dansinya

$$Z = R_s + ifL_s \quad (3.6)$$

dengan $R_s = f(N^2 A/\ell)\mu'' \quad (3.7)$

$$L_s = (N^2 A/\ell)\mu'. \quad (3.8)$$

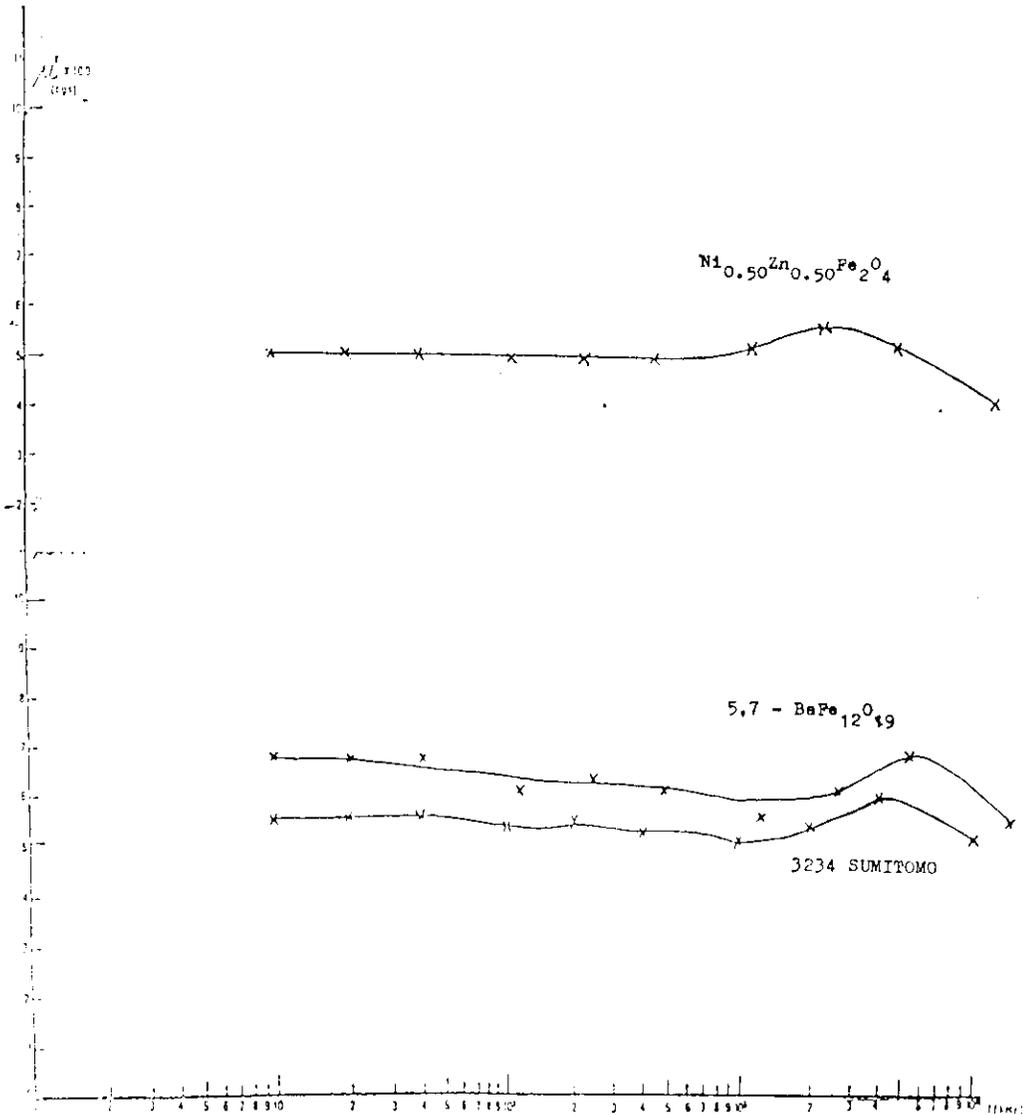
N , A , dan ℓ masing-masing adalah jumlah lilitan, luas penampang, dan keliling rata-rata toroida (tabel 2). Dalam percobaan ini hanya μ' yang diukur. Pada prinsipnya apabila μ' diketahui sebagai fungsi frekuensi, maka μ'' dapat dihitung dengan relasi Kramers-Kronig. Harga-harga μ' telah ditentukan menggunakan LCR-meter buatan Hewlet-Packard dimulai dari 1 kHz s/d 10 MHz. Gambar 11 menunjukkan hasil pengukuran spektrum magnetik ketiga cuplikan tersebut.

Spektrum magnetik ferit spinel menunjukkan bahwa μ' konstan pada harga 500 sampai terjadi resonansi pada frekuensi 2 MHz, lalu menurun dengan tajam. Bersamaan dengan ini μ'' naik dengan tajam yang berarti kehilangan daya semakin besar. Penelitian terdahulu (Smith & Wijn, 1969) menunjukkan bahwa permeabilitasnya konstan pada $\mu' = 250$ dan terjadi resonansi magnetik di sekitar 6 MHz. Penyimpangan puncak resonansi tersebut masih dalam batas-batas yang diperkenankan, yakni antara 1 – 100 MHz (Van den Broek & Stuyts, 1977).

Bentuk spektrum magnetik kedua ferit heksagonal hampir serupa. Pada ferit 5,7-BaFe₁₂O₁₉ harga μ' konstan di sekitar 6 dan resonansi terjadi di sekitar 4 MHz, sedangkan cuplikan 3234 menunjukkan μ' konstan di sekitar 5 dengan puncak resonansi di sekitar 5 MHz. Menurut peneliti terdahulu (Smit & Wijn, 1969) bentuk spektrum ferit heksagonal amat tergantung pada *texture*-nya. Untuk *texture* acak, μ' konstan pada harga 2,5 dan puncak resonansi terjadi di sekitar 20 MHz; di atas frekuensi tersebut harga μ' menurun dengan tidak terlampau cepat. Pada frekuensi 500 MHz harga μ' mulai menurun dengan drastis.

4. Pembicaraan dan kesimpulan

Dalam proses pembentukan ferit heksagonal jenis M, telah ditambahkan fluks 0,5% NaF untuk menurunkan suhu kalsinasi (Baretka, 1968). Karakterisasi dengan difraksi sinar-X maupun difraksi neutron tidak menunjukkan adanya fasa kedua. Jadi, dipandang dari sudut struktur kristalnya, ferit yang dibuat dalam percobaan ini telah memenuhi syarat. Akan tetapi, jika dipandang dari sifat-sifat magnetnya, agak berbeda dengan ferit buatan pabrik Sumitomo. Ada beberapa parameter yang perlu diperhatikan dalam pembentukan sifat-sifat



Gambar 11 Spektrum magnetik cuplikan-cuplikan $Ni_{0,50}Zn_{0,50}Fe_2O_4$, $5,7-BaFe_{12}O_{19}$ dan cuplikan 3234 buatan Sumitomo

magnetik ferit, yakni ukuran bulir, perlakuan panas, dan kepadatan, porositas. Dalam percobaan ini penggilingan perlu diperbaiki untuk dapat mencapai ukuran bulir kurang dari $1 \mu\text{m}$. Perlakuan panas pada 1000°C selama satu jam dapat meninggikan koersivitas (Haneda & Kojima, 1974), sedangkan rapat massa dapat dipertinggi dengan menambah fluks 5% Bi_2O_3 pada campuran BaCO_3 dan Fe_2O_3 (Bradley, 1969). Hal ini penting karena jika rapat massanya tinggi, sifat listrik, magnet, dan mekanik menjadi optimum.

Akhirnya perlu dicatat bahwa pengukuran magnetik dalam percobaan ini telah dilakukan pada serbuk yang orientasi kristalitnya acak, sedangkan dalam pembuatan magnet permanen, serbuk ferit ditekan dalam medan magnet kuat. Ini menyebabkan sifat magnetiknya menjadi jauh lebih baik.

Ucapan terima kasih

Pembuatan cuplikan ferit dan pengukuran spektrum magnetik dilakukan di Lembaga Fisika Nasional, LIPI, pengukuran jirat histeresis dilakukan di Lembaga Elektroteknika Nasional, LIPI, sedangkan difraksi neutron dilakukan di Pusat Penelitian Teknik Nuklir (PPTN) BATAN. Pada kesempatan ini kami ucapkan terima kasih kepada ketiga lembaga tersebut.

Kepustakaan

- Aleshko-Ozhevskii, M. K. Faek & I. I. Yamzin, *Sov. Phys. Cryst.*, 14, 367, (1969)
- Baretka, J., Res. CSIRO, A, Reprt F (1968)
- Baretka, J., & M. J. Ridge, *J. Chem. Soc. A*, 2463 (1968)
- Bradley, F. N., *J. Aust. Ceram. Soc.*, 5, 9 (1969)
- Brahim, Hidayat, 1981, Pembuatan cuplikan dan pengukuran permeabilitas magnetik ferit tercampur $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_3$, Tesis ITB
- Cochardt, A., *J. Appl. Phys.*, 34, 1273 (1963)
- Erchak, M., I. Fankuchen, and R. Ward, *J. Am. Chem. Soc.*, 68, 2085 (1946)
- Gorter, E. W., *Proc. Inst. Elect. Engrs. Suppl.*, B104, 255 (1957)
- Goto, Y and T. Takada, *J. Am. Ceram. Soc.*, 44, 150 (1960)
- Haneda, K. and H. Kojima, *J. Am. Ceram. Soc.*, 57, 68 (1974)
- Molony, B. and M. J. Ridge, *J. Chem. Soc. (A)*, 1631 (1967)
- Sadler, A. G., W. D. Westwood, and D. C. Lewis, *J. Can. Ceram. Soc.*, 33, 127 (1964)

- Smith, J. and H. P. J. Wijn, 1959, *Ferrites*, John Wiley, New York
- Snoek, J. L., *Philips Tech. Rev.* 8, 353 (1946)
- Suchet, J., *Bull. Soc. Fr. Ceram.*, 33, 33 (1956)
- Takei, T., *Kikai Denki*, 2, 67, 379, 540 (1937)
- Van den Broek, C. A. M. and A. L. Stuyts, *Philips Tech. Rev.*, 37, 37 (1977)
- Went, J. J., G. W. Rathenau, E. W. Gorter, and G. W. van Oosterhout, *Philips Tech. Rev.* 13, 194 (1952)