

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา

ต.แสนสุข อ.เมืองจ.ชลบุรี 20131
รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

ศึกษาโครงสร้างและสมบัติแม่เหล็กของ Sm-Co-Cr โดยการเติม Nd ภายใต้การเผาในไนโตรเจน
The Study Structure and Magnetic Property Compounds Doped by Nd and
Exchanged Sintering under Nitrogen Gas

นายชัยศักดิ์ อิศโร

นายภูวคต วรรณนะชัยแสง

น.ส.ยุพา วานิชชัย

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2543

BU 0064984
22 ส.ค. 2552
249017

เริ่มบริการ
23 ส.ค. 2552

รายงานสรุปฉบับสมบูรณ์

ชื่อโครงการ : ศึกษาโครงสร้างและสมบัติแม่เหล็กของ Sm-Co-Cr โดยการเติม Nd ภายใต้การเผา
ในไนโตรเจน

ชื่อหัวหน้าโครงการ : นายชัยศักดิ์ อิศโร

หน่วยงาน : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

1. การดำเนินงาน ได้ดำเนินงานตามแผนงานทุกประการ
2. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย
 - 2.1 วัดหาสมบัติทางแม่เหล็กของสารประกอบ โดย Hyteresis loop ที่อุณหภูมิห้อง
 - 2.2 หาความหนาแน่นของสารประกอบโดยการแทนที่น้ำ
 - 2.3 วัดหาโครงสร้างผลึกของสารประกอบและการแทรกตัวของอะตอมไนโตรเจน โครงสร้างผลึกของสารประกอบ โดยเทคนิค X-ray diffraction

ลงนาม

(นายชัยศักดิ์ อิศโร)

หัวหน้าโครงการ

ประกาศอนุญาต

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.พงษ์ทิพย์ วิโนทัย ที่ให้คำแนะนำต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาเซรามิกชั้นสูง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ(MTEC) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนด้านเครื่องมือและสถานที่ และสำนักงานประมาณแผ่นดิน ไร่ ๓ ที่นี้ ที่ได้ให้การสนับสนุนแก่โครงการวิจัยนี้ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ชัยศักดิ์ อิศโร

ภูวดล วรรณนะชัยแสง

ยุพา วานิชชัย

ศึกษาโครงสร้างและสมบัติแม่เหล็กของ Sm-Co-Cr โดยการเติม Nd ภายใต้การเผาในไนโตรเจน

The Study Structure and Magnetic property Compounds Doped by Nd and Exchanged Sintering under Nitrogen Gas

บทคัดย่อ

การแทรกตัวของแก๊สไนโตรเจนในสารประกอบของโลหะทรานซิชันและRare-Earth สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแม่เหล็กของสารประกอบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาและพัฒนาสมบัติทางแม่เหล็กของสารประกอบ Sm-Co-Cr ที่เติม Nd ภายใต้กระบวนการเผาในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจน เปรียบเทียบกับสถานะการเผาในแก๊สอาร์กอน โดยศึกษาโครงสร้าง ค่าความอิ่มตัวทางแม่เหล็ก(M_s) และCoercivity(H_c) ของสารประกอบ ($Sm_{1-x}Nd_x$) $Co_{6.9}Cr_{0.1}$, ($Sm_{1-x}Nd_x$) $Co_{16.6}Cr_{0.4}$ และ ($Sm_{1-x}Nd_x$) $(Co_{0.85}Cr_{0.15})_{29}$ ที่ $x = 0.0, 0.1, 0.2$ และ 0.3 จากการศึกษพบว่าค่า M_s สูงขึ้น และ H_c มีค่าลดลง แต่ที่สถานะการเผาในไนโตรเจน สารประกอบ ($Sm_{1-x}Nd_x$) $Co_{6.9}Cr_{0.1}$ ที่ $x = 0.1$ จะให้ค่า M_s สูงสุด เท่ากับ 3.72 emu/g เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบตัวอื่นๆ ในขณะที่ ค่า M_s และ H_c ในกลุ่ม ($Sm_{1-x}Nd_x$) $(Co_{0.85}Cr_{0.15})_{29}$ ให้ค่าต่ำสุด สำหรับการศึกษาคโครงสร้างโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ไม่สามารถแสดงการแทรกตัวของอะตอมไนโตรเจนในโครงสร้างของสารประกอบได้

Abstract

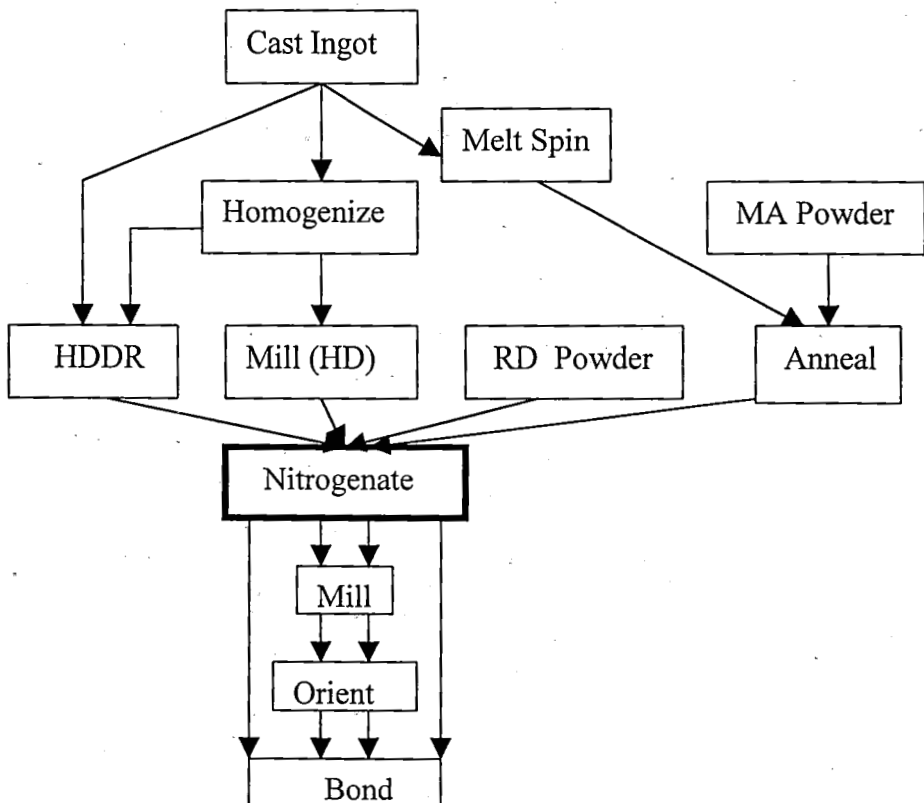
The change of magnetic property was achieved by introducing Nitrogen gas into transition metal- rare earth compounds. This property of Sm-Co-Cr compound doped by Nd under Nitrogen sintering process was studied and developed comparing with the Argon condition. The structure, magnetization (M_s) and coercivity (H_c) of compound were obtained. It was found that under the Nitrogen condition, M_s of ($Sm_{1-x}Nd_x$) $Co_{6.9}Cr_{0.1}$, ($Sm_{1-x}Nd_x$) $Co_{16.6}Cr_{0.4}$ and ($Sm_{1-x}Nd_x$) $(Co_{0.85}Cr_{0.15})_{29}$ compounds at $x = 0.0, 0.1, 0.2$ and 0.3 increased with decreasing of H_c when comparing with the Argon condition. For under Nitrogen gas condition, it was observed that M_s of these compounds more increased but ($Sm_{1-x}Nd_x$) $Co_{6.9}Cr_{0.1}$ compound at $x=0.1$ showed the maximum M_s of 3.72 emu/g , comparing with the others. While the minimum of M_s and H_c were obtained in ($Sm_{1-x}Nd_x$) $(Co_{0.85}Cr_{0.15})_{29}$ compounds. The insertion of Nitrogen atoms in compound structure can't be display by using X-ray diffraction technique.

สารบัญ

	หน้า
บทนำ	1
1.1 สมบัติของแม่เหล็กถาวร	3
1.2 แม่เหล็กถาวรของ Lanthanide-Cobalt (SmCo_5)	4
1.3 จุดมุ่งหมายของการวิจัย	5
วิธีการทดลอง	6
2.1 รายละเอียดของการทดลอง	6
2.2 การตรวจสอบสมบัติของสารประกอบด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์	7
ผลการวิจัย	9
3.1 ผลการวิเคราะห์หาขนาดเกรนของสารประกอบหลังการเผา	9
3.2 การวิเคราะห์สมบัติแม่เหล็กด้วย Hysteresis loop	10
3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบแม่เหล็กโดย XRD	13
สรุปผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย	15
เอกสารอ้างอิง	16
ภาคผนวก	17
ภาคผนวก 1 ตารางแสดงขนาดอนุภาคของสารประกอบ	17
ภาคผนวก 2 X-ray diffraction pecks (XRD)	19
ภาคผนวก 3 Hysteresis loop	27

บทนำ

ที่ผ่านมางานวิจัยจำนวนมากสนใจที่จะศึกษาสารประกอบของแม่เหล็กถาวร ในกลุ่มของสารประกอบ Rare-Earth กับโลหะทรานซิชัน ที่อยู่ในรูปของ $R_2Fe_{17-x}T_x$ (2:17) และ $RFe_{12}T_x$ (1:12) ต่อมาจะได้มีการผลิตสารประกอบตัวใหม่ที่เป็นแม่เหล็กถาวรในรูปของ $R_3Fe_{29-x}T_x$ (3:29) เมื่อ R คือ Rare-Earth และ T คือ โลหะทรานซิชัน หรือ Metalloid (Si,Al,Ga) รวมทั้งยังได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของสารประกอบที่อยู่ในรูป RT_5 ⁽⁵⁾ โดยอะตอมของ R จะเข้าไปแทนที่ในส่วนของพันธะระหว่างโลหะทรานซิชัน พบว่าโครงสร้างของ(2:17) มักจะอยู่ในรูป Hexagonal หรือ Rhombohedral หลังจากนั้นเริ่มมีผู้สนใจโลหะผสมที่มีกลุ่มธาตุเหล่านี้มากกว่า 2 ชนิด เนื่องจากสารประกอบเหล่านี้มีสมบัติแม่เหล็กที่ดี เช่นสารประกอบ $Nd_2Fe_{14}B$, $SmCo_5$, Sm_2Co_{17} และ Sm_2Fe_{17} เป็นต้น ซึ่งมีความสำคัญและเป็นที่ต้องการในตลาดปัจจุบัน สารประกอบเหล่านี้มีค่าความอิ่มตัวทางแม่เหล็ก Magnetization (M_s) และ Coercivity (H_c) ก่อนข้างสูง สำหรับวิธีการเตรียมโลหะผสมมีอยู่หลายวิธี ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการบดผงของสารประกอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนจะนำไปเผาเพื่อให้เกิดเป็นเนื้อเดียวกันอีกครั้ง หลังจากนั้นก็นำมาเผาอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนอีกครั้งหนึ่ง โดยก่อนหน้านี้ Coey และ Smith ⁽³⁾ ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติทางแม่เหล็กของสารประกอบ Sm_2Fe_{17} ในรูปไนไตรด์ ^(5,7) ซึ่งเป็นสารประกอบแม่เหล็กที่มีคุณภาพสูง อันเนื่องจากเมื่ออะตอมของไนโตรเจนแทรกอยู่ในโครงสร้างของสารประกอบในรูป $Sm_2Fe_{17}N_x$ ที่ $0 < x < 3$ จะให้ค่าสมบัติทางแม่เหล็กเพิ่มขึ้น โดยขบวนการเตรียมสารประกอบมีอยู่หลายวิธีขึ้นกับชนิดของสารประกอบ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังไดอะแกรมข้างล่าง

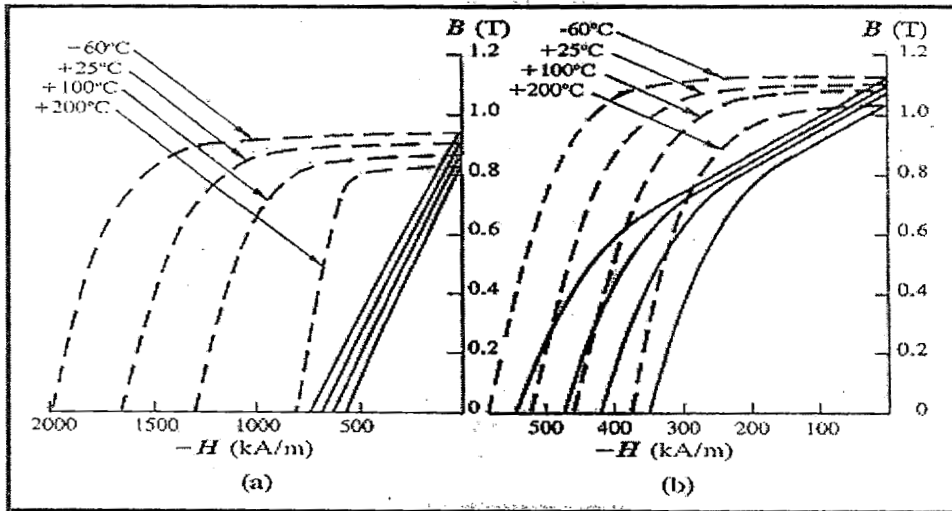


กระบวนการเตรียมสารประกอบแม่เหล็กในรูปในไตรด์

ขณะที่ Milham ได้ทำการศึกษาผลของการให้ความแตกต่างของอุณหภูมิกับการบดสารประกอบ Sm-Fe ที่มีสัดส่วนจำนวนโมล 1: 2 จากการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง XRD แสดงโครงสร้างในรูปของ α -Fe ในการเผาอบที่อุณหภูมิ 500°C เมื่อนำสารประกอบมาบด พบว่าค่า Remanence Magnetization (M_r) จะเพิ่มขึ้นจาก 23.5 emu/g ไปเป็น 40.9 emu/g และค่า Coercivity เพิ่มขึ้นจาก 0.58 ไปเป็น 2.1 kOe เมื่อพิจารณาสาเหตุที่อะตอมไนโตรเจนแทรกตัวในสารประกอบแม่เหล็กบางชนิด แล้วสามารถเพิ่มสมบัติทางแม่เหล็กนั้น เกิดจากการที่อะตอมของไนโตรเจนสามารถแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของสารประกอบ ที่มี unpair อิเล็กตรอน 3d และ 3d-4f ทำให้เกิดการยึดของโครงผลึก จากงานวิจัยที่ศึกษาสารประกอบทางแม่เหล็กที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ และมีสภาพเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกอย่างอ่อน สามารถทำให้มีสภาพเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกที่แรงขึ้น อันเนื่องจากอิทธิพลของอะตอมไนโตรเจนที่แทรกอยู่ในโครงผลึกแบบ BCC, FCC และ HCD ของสารประกอบ และจากการค้นพบในปี 1990 ของ Coey และ Sun การที่อะตอมไนโตรเจนแทรกตัวในสารประกอบ R_2Fe_{17} ($\text{R} = \text{Rare-Earth}$) แล้วทำให้สารประกอบที่ได้มีค่าอุณหภูมิ Curie และ โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมของเหล็กสูงขึ้น ต่อมา Koyama⁽⁶⁾ และคณะ ได้ทำการเตรียมสารประกอบในสัดส่วนระหว่างอะตอมของโลหะกลุ่ม 3d และ 4f เป็น 29:3 , 17:2 และ 12:1 และทำการทดสอบคุณสมบัติดังกล่าว ขณะที่ M.Kubis และคณะ ได้ทำการเตรียมสารประกอบ SmCo_5 ภายใต้กระบวนการ(HDDR) ในสภาวะการเผาภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน ความดันระหว่าง 1 ถึง 7 MPa พบว่าการดูดกลืนอะตอมไฮโดรเจนของสารประกอบ จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 100°C และไม่ดูดกลืนที่อุณหภูมิประมาณ 600°C รวมทั้งได้อธิบายถึงการลดลงของเอนทัลปีอิสระของซั่มมาเรียมไฮไตรด์ เมื่อมีการเพิ่มความดันของไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังมี W. Liu และ P.G. McCormick ได้ทำการเตรียมสารประกอบ $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ซึ่งมีขนาดอนุภาคในระดับ 10-250 นาโนเมตร โดยใช้กระบวนการทางเคมีจากสารตั้งต้น SmO_3 , CoO และ Ca โดยนำสารประกอบที่ได้จากการเตรียม ประกอบด้วย $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ และ CaO มีค่า coercivity 14.2 kOe โดย CaO สามารถที่จะล้างออกได้ ขณะที่ค่าความอิ่มตัวทางแม่เหล็ก M_s จะมีค่าสูงถึง 92.0 emu/g ภายใต้สนามแม่เหล็ก 50 kOe จากรายงานของ M. Juzcyk และ J. Jakubowicz ได้ใช้วิธีการบดสารประกอบและศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งใช้อะตอมของโลหะทรานซิชันมากกว่า 1 ตัว อยู่ในรูป $\text{Nd}_{12.6}\text{Fe}_{19.8-x}\text{Co}_{11.6}\text{Cr}_x\text{B}_6/\alpha\text{-Fe}$ ($0 \leq x \leq 6$) ให้ค่า H_c สูงสุดที่ $x = 2$ เมื่อทำการเผาอบสารประกอบในบรรยากาศของ Ar และบดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยได้ทำการเผาอบที่ช่วงอุณหภูมิ $600\text{-}800^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน

1.1 สมบัติของแม่เหล็กถาวร

เป็นวัสดุที่มี H_c และ Remanent magnetic induction (Br) สูง เมื่อพิจารณาจาก Hysteresis loop จะมีลักษณะกว้างและสูง ในการประยุกต์สนามแม่เหล็กภายนอกให้กับวัสดุแม่เหล็กชนิดนี้ ต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีค่าค่อนข้างสูง จึงสามารถทำให้โดเมนมีทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก ในการทำลายความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กถาวรนั้นแต่ละชนิด สามารถพิจารณาได้จาก รูป 1 ซึ่งสามารถเปรียบเทียบความแรงของวัสดุแม่เหล็กนั้นได้



รูปที่ 1 แสดงเส้นโค้งสนามแม่เหล็กกลับล้างภายในวัสดุแม่เหล็ก (a) $SmCo_5$ และ (b) Sm_2Co_{17} ที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อพิจารณาวัสดุที่เป็นแม่เหล็กถาวรกับสัมประสิทธิ์พลังงานของโครงสร้างแม่เหล็กในแนวเดียวกัน คือ K_1 กับค่าความอึดตัวทางแม่เหล็ก M_s มีความสัมพันธ์กับค่า coercivity H_c ตามสมการ

$$H_c = \frac{2K_1}{\mu_0 M_s}$$

สมบัติที่ดีของวัสดุแม่เหล็กถาวร

- มีค่าความอึดตัวทางแม่เหล็กสูง M_s (Saturation magnetization)
- มีค่า M_r สูง (Remanent Magnetization)
- มีค่า K_1 และ พลังงาน BH สูง
- มี Coercivity H_c สูง
- อุณหภูมิ T_c สูง (Curie Temperature)

- อุณหภูมิ T_c สูง (Curie Temperature)

1.2 แม่เหล็กถาวรของ Lanthanide-Cobalt (SmCo_5)

สมบัติแม่เหล็กของ Lanthanide-Cobalt มีค่าพลังงาน BH อยู่ประมาณ 180 kJm^{-3} รวมทั้งค่าฟลักซ์ Coercivity จะมีค่าอยู่ที่ 700 kOe ส่วนโครงสร้างของ SmCo_5 อยู่ในรูป Hexagonal มีพารามิเตอร์ของโครงสร้าง $a = 0.5004 \text{ nm}$ $c = 0.3971 \text{ nm}$ และ $c/a = 0.7936$ ความหนาแน่นของสารประกอบมีค่า $8.58 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ขณะเดียวกันเมื่อทำการศึกษา ขนาดของโดเมนของ SmCo_5 เกี่ยวกับสมบัติทางแม่เหล็ก สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์

$$d_c = \frac{18\gamma}{\mu_0 M_s^2}$$

M_s ค่าความอิ่มตัวทางแม่เหล็ก (Saturation Magnetization)

μ_0 ค่าซาบซิมได้ในสุญญากาศ

$\gamma = 4(Ak_1)^2$ พลังงานกำแพงโดเมนต่อพื้นที่

$A \approx \left(\frac{KT_c}{a}\right)$ พลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างสปิน

a ระยะห่างระหว่างสปิน

เนื่องจากปัจจุบัน Sm มีราคาค่อนข้างแพง จึงพยายามหาสารตัวอื่นมาทดแทนในการผสมรวมกับ Sm ซึ่งสารที่ให้สมบัติแม่เหล็กสูงดังกล่าวคือกลุ่ม Cerium mischmetal (MM) ซึ่งมีราคาถูกกว่า Sm และมีอยู่ในธรรมชาติค่อนข้างมาก Cerium mischmetal ประกอบไปด้วยธาตุต่างๆ ในสัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 53% Ce , 24% La , 16% Nd , 5% Pr และ 2% ของโลหะ Lanthanide ตัวอื่นๆ เมื่อรวมอยู่ในรูปสารประกอบ $(\text{MM}_{1-x}\text{Sm}_x)\text{Co}_5$ จะมีค่า Intrinsic Coercivities μH_c อยู่ในช่วง $0.73\text{-}1.90 \text{ MOe}$ และมีสมบัติแม่เหล็กดีที่สุดในที่ $x = 0$ นอกจากนี้ยังมีสารประกอบแม่เหล็กตัวอื่นๆ ที่มีการพัฒนาขึ้นมาใหม่และมีสมบัติที่ดีกว่าเดิม เช่น $(\text{MM}_{0.9}\text{Nd}_{0.1})_{0.85}\text{Sm}_{0.15}\text{Co}_5$ รวมทั้ง $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ซึ่งมีโครงสร้างแบบ Hexagonal หรือ Rhombohedral

ต่อมาได้มีการศึกษาการเพิ่มสมบัติทางแม่เหล็กของสาร โดยการให้อะตอมของไนโตรเจนไปแทรกในสารประกอบทางแม่เหล็ก เช่น Samarium-Iron โดยคำนวณโครงสร้างอิเล็กตรอนโดยใช้ Local spin approximation (LSDA) และในส่วนของ Atomic spheres approximation ซึ่งในกรณีของการแทรกตัวของอะตอมไนโตรเจนในเหล็ก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้น $3d$ ของเหล็ก และลดความแตกต่างของอิเล็กตรอนในสถานะ $3d\uparrow$ และ $3d\downarrow$ ทั้ง

ยังเกิดการขยายตัวของโครงสร้าง เมื่อมีไนโตรเจนเข้าไปแทรก ทำให้ลดการเลื่อนกันระหว่างแถบพลังงาน 3d-3d เหล็กจะมีความเป็นแม่เหล็กไฟโรแมกเนติกสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงสมมาตรของเหล็ก ตามการอธิบายของ Kanomori ให้เหตุผลว่า การลดลงของโมเมนต์ของอะตอมเหล็ก เนื่องจากอะตอมไนโตรเจนได้เข้าไปอยู่ใกล้ ทำให้อะตอมตามหลักของเพาลีมีโมเมนต์เพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนในสถานะ 3d ของเหล็ก เมื่ออยู่ใกล้กับอิเล็กตรอนในสถานะ sp ของไนโตรเจน จะลดการเกิด spin splitting ทำให้โมเมนต์ของเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น เกินกว่า $2.7\mu_B$ และน่าจะเกิดกับโลหะทรานซิชันตัวอื่นได้ นอกจากนี้ในกลุ่มของโลหะผสม Rare-earth จะมีพลังงานสูงสุด $(BH)_{max}$ ถึง 30 MG.Oe และมี Coercivities ถึง 40 kOe สมบัติของธาตุ Rare earth และโลหะทรานซิชัน จะมี uppair อิเล็กตรอนไปในทิศทางเดียวกัน โดยอิเล็กตรอนในชั้น 4f ของธาตุ Rare earth อยู่ในแนวเดียวกันกับ uppair อิเล็กตรอนในชั้น 3d ของโลหะทรานซิชัน ทำให้สารแม่เหล็กกลุ่มนี้มีความเป็นแม่เหล็กสูง

1.3 จุดมุ่งหมายของการวิจัย

ต้องการศึกษาหลักการเตรียมโลหะผสมของโลหะกลุ่ม ทรานซิชันและกลุ่ม Rare-Earth ที่มีมากกว่า 1 ชนิด ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน โดยโลหะในกลุ่ม Rare-Earth ได้แก่ Nd และ Sm โดยโลหะกลุ่มทรานซิชันที่ใช้คือ Cr และ Co ทำการผสมอยู่ในรูปสารประกอบ $(Sm_{1-x}Nd_x)_3(Co_{0.89}Cr_{0.15})_{29}$, $(Sm_{1-x}Nd_x)_2Co_{16.6}Cr_{0.4}$ และ $(Sm_{1-x}Nd_x)_2Co_{6.9}Cr_{0.1}$ เมื่อ $0 \leq x \leq 0.3$ นำมาเผาที่อุณหภูมิ $1200^\circ C$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปบดและเผาอบที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และนำสารประกอบที่ได้ไปศึกษาคุณสมบัติแม่เหล็กในรูปไนไตรด์ เปรียบเทียบกับก่อนการอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พร้อมทั้งศึกษาโครงสร้างสารประกอบดังกล่าวที่ได้จากการเตรียม

วิธีการทดลอง

2.1 รายละเอียดของการทดลอง

อุปกรณ์และสารเคมี

- Sm มีความบริสุทธิ์ 99.9 %
- Nd มีความบริสุทธิ์ 99.9 %
- Co มีความบริสุทธิ์ 99.8 %
- Cr มีความบริสุทธิ์ 99+ %

สารเคมีทั้งหมดในกลุ่มธาตุทรานซิชัน (Co, Cr) และกลุ่ม Rare earth (Sm, Nd)

นำมาผสมกันในตู้ระบบปิด ที่มีไนโตรเจนแก๊สไหลผ่าน ทำการชั่งมวลสารภายในตู้ โดยชั่งสารดังกล่าวใส่ในถ้วยของเครื่องบดในสัดส่วนของแต่ละสารประกอบ ซึ่งภายในถ้วยจะประกอบไปด้วยลูกบอลสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm สำหรับบดให้ผงของสารเคมีเป็นเนื้อเดียวกันและขนาดของอนุภาคเล็กกลง โดยใช้หลักการแกว่งด้วยอัตราเร็วสูง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำผงที่ได้จากการบด มาทำการเผาภายใต้อาร์กอนแก๊ส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ขั้นตอนการทำให้เกิดเป็นเนื้อเดียวกันและเกิดโครงสร้างของสารประกอบมีสัดส่วนของจำนวนสารที่ใช้ ดังนี้ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม

- $\text{Sm}_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.5})_{29}$ ประกอบด้วย

Sm จำนวน 4.235 กรัม

Co จำนวน 13.640 กรัม

Cr จำนวน 2.124 กรัม

และในรูปของสารประกอบ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.5})_{29}$ เมื่อ x มีค่า 0.1, 0.2 และ 0.3

- $\text{Sm}_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$ ประกอบด้วย

Sm จำนวน 4.127 กรัม

Co จำนวน 15.058 กรัม

Cr จำนวน 0.320 กรัม

และอยู่ในรูปของสารประกอบ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$ เมื่อ x มีค่า 0.1, 0.2 และ 0.3

- $\text{SmCo}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ ประกอบด้วย

Sm จำนวน 5.349 กรัม

Co จำนวน 14.466 กรัม

Cr จำนวน 0.185 กรัม

และอยู่ในรูปของสารประกอบ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ เมื่อ x มีค่า 0.1, 0.2 และ 0.3

หลังจากทำการเผาสารที่อุณหภูมิ 1,200 °C ภายใต้บรรยากาศแก๊สอาร์กอน เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้ว นำสารประกอบแต่ละอัตราส่วนมาบดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารประกอบที่บดเป็นผง แล้ว แบ่งออกเป็น 2 ส่วน นำส่วนหนึ่งไปเผาภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ อุณหภูมิ 400 °C นำผงของสารทั้ง 2 กรณีอัดขึ้นรูปที่ความดัน 9.982 MPa (1,447.2 psi) โดยมีเส้น ผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.00 เซนติเมตร

2.2 การตรวจสอบสมบัติของสารประกอบด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์

2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและขนาดอนุภาคของสารประกอบแม่เหล็กด้วยเครื่อง XRD ในการศึกษาโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบ ทำการศึกษาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray (Cu K α) ที่มีความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม มุมที่ทำการวัดอยู่ระหว่าง 20 ถึง 80 องศา นอกจากนี้ยังใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ หากการกระจายตัวของขนาดเกรนเฉลี่ย จากความกว้างของพีคโดยใช้หลักการของ Scherrer⁽⁸⁾ ซึ่งพิจารณา

ในรูปสมการ

$$\beta_{hkl} = \frac{0.89\lambda}{D_{hkl} \cos \theta}$$

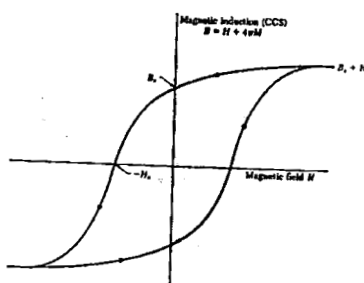
$$D_{hkl} = \text{ขนาดของอนุภาค}$$

$$\beta_{hkl} = \text{ความกว้างของมุมที่ครึ่งหนึ่งของความเข้ม}$$

2.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กโดย Hysteresis Graph.

สมบัติทางแม่เหล็กของสารประกอบมีเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาอยู่หลายชนิด การวิเคราะห์สารประกอบด้วย Hysteresis Graph โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง B-H ($4\pi M$) กับ H ค่าที่ได้จากการวัดของ B-H จะมีหน่วยเป็นเกาส์ (Gauss) และ H มีหน่วยเป็น ออยสเตดส์ (Oe) แต่ปริมาณของ B-H จะขึ้นกับมวลสารจึงมักจะบอกในรูปที่มีหน่วยเป็น cgs/g ซึ่งมักจะหาโดยการเทียบกับความหนาแน่นของสารประกอบที่จะนำมาวัด ขณะเดียวกันสามารถหาอยู่ในรูปของค่าความอิ่มตัวของแม่เหล็ก M_s (Saturation of Magnetisation) มีความสัมพันธ์ในรูปสมการของระบบ cgs

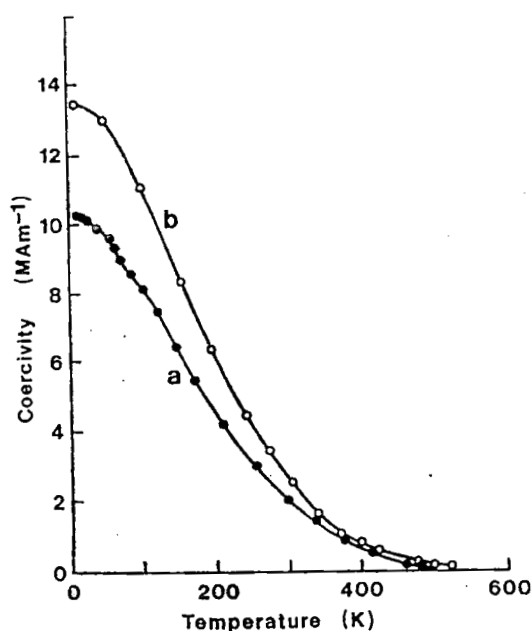
$$B = H + 4\pi M$$



รูปที่ 2 Hysteresis loop ในการวัดสมบัติทางแม่เหล็กระหว่าง B กับ H⁽²⁾

2.2.3 การเผาสารประกอบแม่เหล็ก

ก่อนการบดผงของโลหะผสมจะมีลักษณะเป็นผงหยาบ โดยทำการบดในระบบที่มีไนโตรเจนหรือไฮโดรเจนแก๊สอยู่ เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ผงของโลหะผสมหลังการบด จะมีขนาดการกระจายตัวของโครงสร้างผลึกแคบ เนื่องจากขนาดอนุภาคเล็กลง สำหรับการอัดขึ้นรูปทำให้เกิดแนวของสนามแม่เหล็กขึ้นขนานหรือตั้งฉากกับระนาบการอัด ซึ่งพบว่าในการเตรียมสารแม่เหล็ก Nd-Fe-B เมื่อทำการเผาครั้งแรกที่อุณหภูมิ 1150 °C จะให้ค่า Coercivity ที่สูง หลังจากนั้นทำการเผาอบที่ 630 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะเพิ่มพลังงาน BH ให้มีค่ามากขึ้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่า Coercivity ของแม่เหล็กถาวร จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิของสารแม่เหล็กเพิ่มขึ้นดังรูป

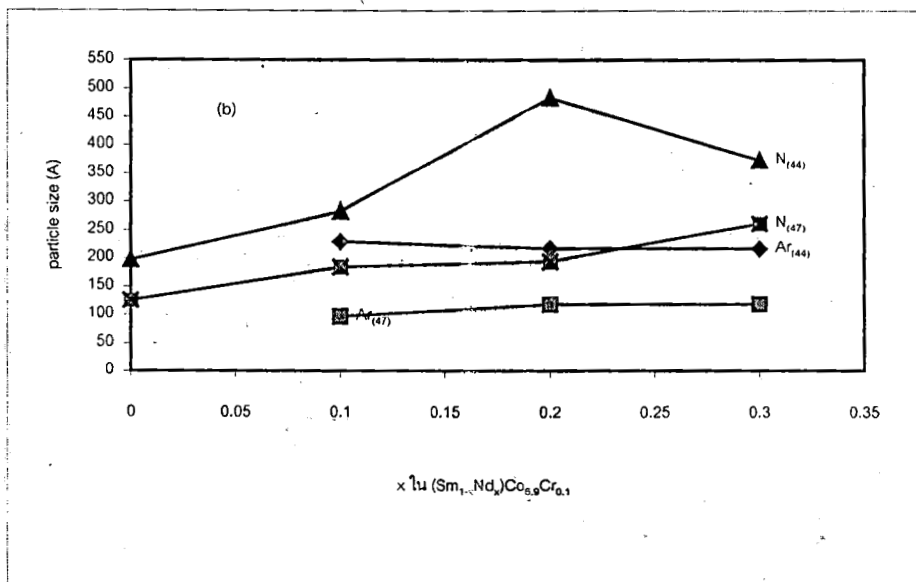
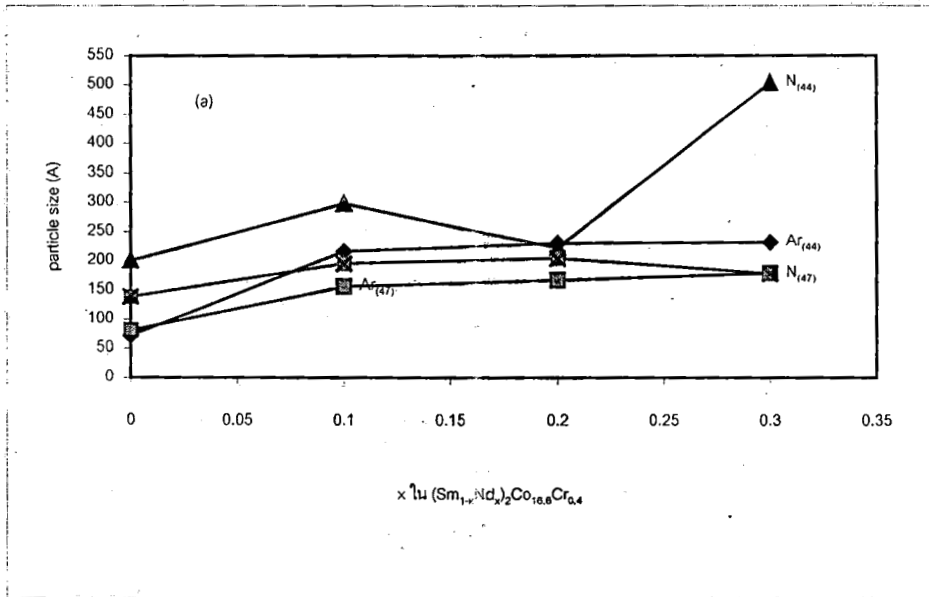


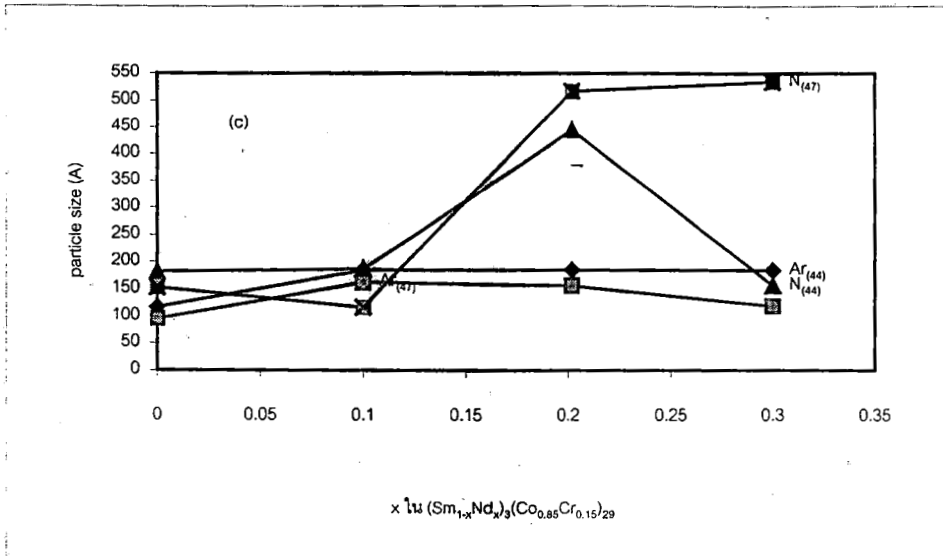
รูปที่ 3 แสดงค่า Coercivity ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (a) การเผาแม่เหล็ก Nd₁₅Fe₇₇B₈ และ (b) Pr₁₅Fe₇₇B₈⁽¹⁾

ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์หาขนาดเกรนของผงสารประกอบจากการเผา

ผลการวิเคราะห์การเผาสารประกอบ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.5})_{29}$, $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$ และ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ เมื่อ x เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3 ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน เปรียบเทียบกับการนำสารประกอบดังกล่าวเผาอีกครั้งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จะให้ขนาดของเกรนของสารประกอบเพิ่มขึ้น เมื่อทำการคำนวณหาขนาดของเกรนที่ตำแหน่งมุมเดียวกัน โดยพิจารณาที่มุม 44 และ 47 องศา



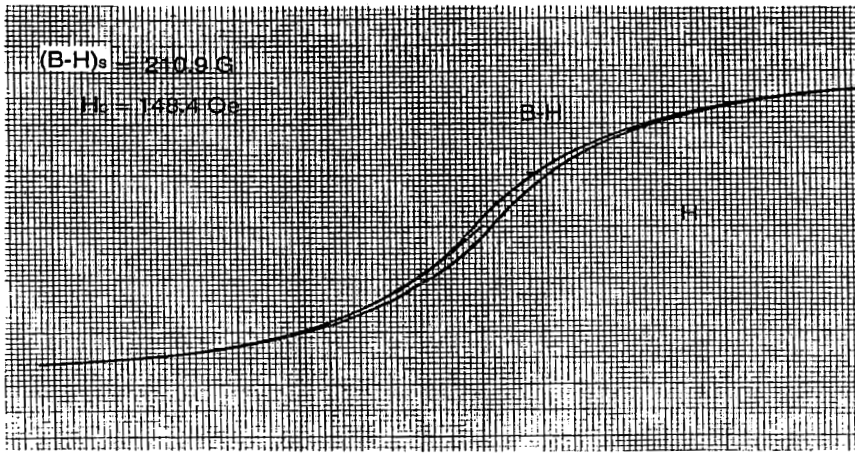


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาค (a) $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$, (b) $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ และ (c) $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.15})_{29}$ กับปริมาณของ x ในสารประกอบ

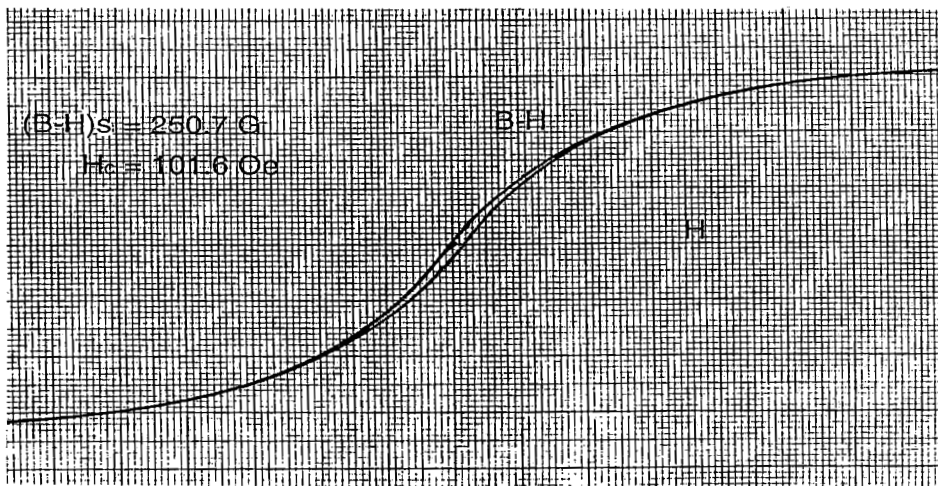
จากกราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าการเผาครั้งที่สองภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนจะมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ส่วนผลของการเพิ่มปริมาณของ x ในแต่ละสารประกอบไม่สามารถบอกความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการเผาเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้น

3.2 การวิเคราะห์สมบัติแม่เหล็กด้วย Hysteresis loop

สมบัติแม่เหล็กของสารประกอบ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$, $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ และ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.15})_{29}$ เมื่อ $x = 0.0, 0.1, 0.2$ และ 0.3 หลังจากการประยุกต์สนามแม่เหล็กภายนอก (H) แก่สารประกอบ ให้ผลของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง (B-H) กับ H ของการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปรียบเทียบค่า Coercivity (H_c) และ Saturation Magnetization (M_s) ของสารประกอบชนิดเดียวกันกับปริมาณของ x ที่แตกต่างกันดังรูปและตาราง



รูป 4a ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



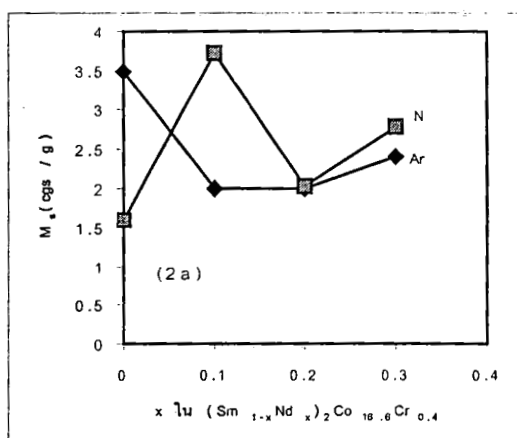
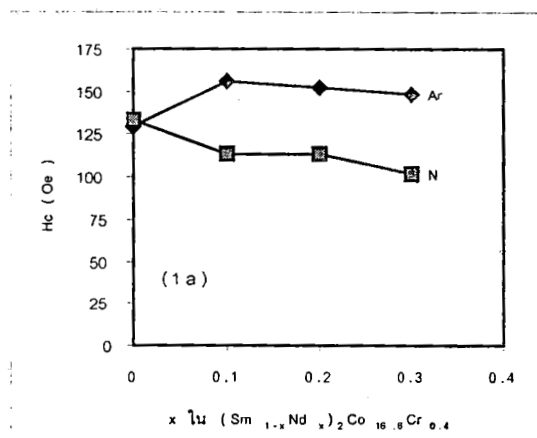
รูป 4b ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

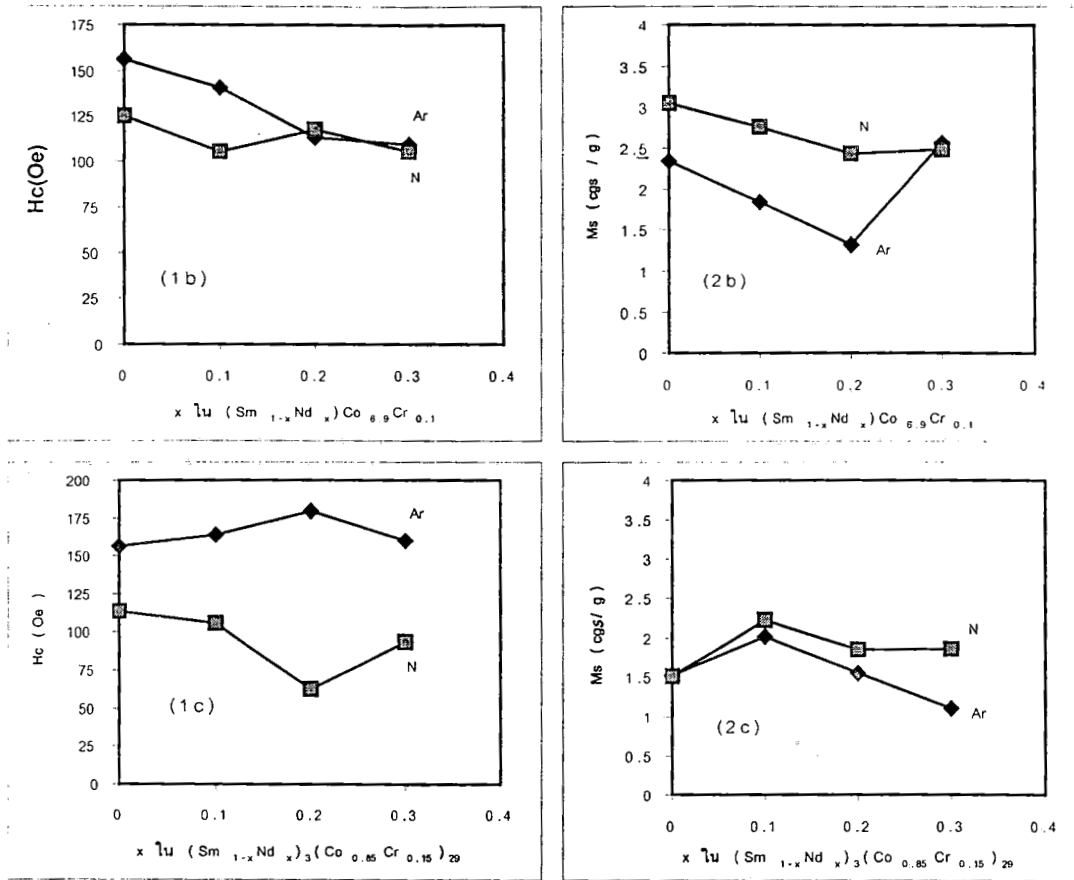
ตาราง แสดงสมบัติทางแม่เหล็กของสารประกอบ

ชนิดของสารประกอบ	สัญลักษณ์	Density (g/cm^3)	Magnetization M_s (emu/g)	Coercivity H_c (Oe)
$(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$ ($x=0.0$)	1Ar	5.7171	3.49	128.9
$x = 0.0$	1N	6.1276	1.60	132.8
$x = 0.0$	2Ar	7.1215	2.00	156.2
$x = 0.0$	1N	4.4221	3.72	113.3
$x = 0.0$	2Ar	6.9400	1.00	113.3

x = 0.2	3N	7.3154	2.03	113.3
x = 0.2	4Ar	6.9854	2.40	148.4
x = 0.2	3N	7.1814	2.78	101.6
$(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ (x=0.0)	5Ar	6.0823	2.34	156.2
x = 0.0	3N	5.2917	2.03	125.0
x = 0.0	5Ar	6.5442	1.84	140.4
x = 0.0	6N	7.4519	2.78	101.6
x = 0.0	5Ar	7.0857	1.32	113.3
x = 0.0	3N	6.9163	2.03	117.8
x = 0.0	4Ar	6.7942	2.40	109.4
x = 0.0	6N	7.3962	2.40	105.5
$(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.15})_{29}$ (x=0.0)	5Ar	6.4382	1.32	156.2
x = 0.2	6N	5.4595	1.51	113.3
x = 0.0	10Ar	6.1175	2.03	164.1
x = 0.2	10N	5.4550	2.34	105.5
x = 0.2	10Ar	6.1175	1.51	179.7
x = 0.2	10N	5.2988	2.03	62.5
x = 0.3	12Ar	6.5367	1.32	164.1
x = 0.2	10N	5.9674	1.84	93.7

* Ar การเผาภายใต้บรรยากาศอาร์กอน , N การเผาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน





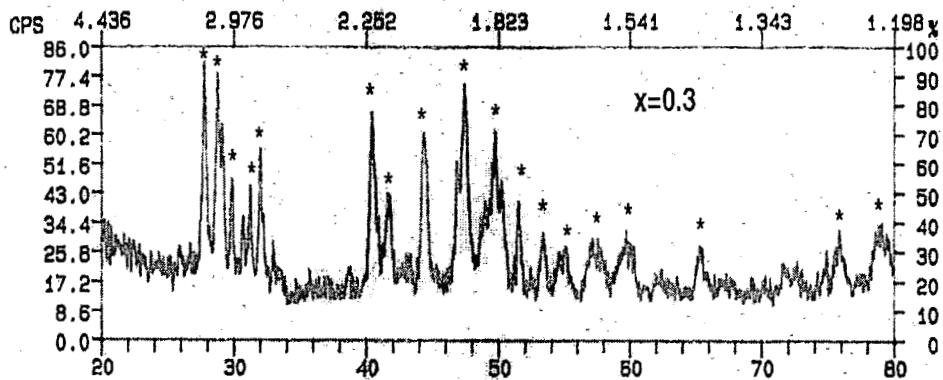
รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงสมบัติแม่เหล็กใน $(Sm_{1-x}Nd_x)_2Co_{16.6}Cr_{0.4}$, $(Sm_{1-x}Nd_x)_3(Co_{0.85}Cr_{0.15})_{29}$ และ $(Sm_{1-x}Nd_x)_3(Co_{0.85}Cr_{0.15})_{29}$ กับปริมาณของ x ในสารประกอบ

จากรูปที่ 2 ค่า H_C ของสารประกอบ ใน 1a–1c ที่ทำการเผาภายใต้บรรยากาศของอาร์กอนจะให้ค่าสูงกว่า หลังจากที้นำไปเผาในบรรยากาศของไนโตรเจน ขณะที่การเปลี่ยนแปลงปริมาณของ x ใน 1a และ 1c จะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งต่างจากรูป 1b จะให้ H_C ลดลงเมื่อ x เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณของ M_S ในรูป 2a-2c ในแต่ละสารประกอบของการเผาในบรรยากาศของไนโตรเจนจะแสดงค่าที่สูงกว่าในการเผาในอาร์กอน เนื่องจากการเข้าไปแทรกของอะตอมในโครงสร้างของสารประกอบ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดเมนแม่เหล็กของสารประกอบ ทำให้โดเมนแม่เหล็กมี polarize เพิ่มขึ้น ปริมาณของ x ในแต่ละสารประกอบจะให้ค่า M_S สูงสุด ในบางค่าเท่านั้น ซึ่งสมบัติทางแม่เหล็กควรมีค่า M_S และ H_C ที่สูง

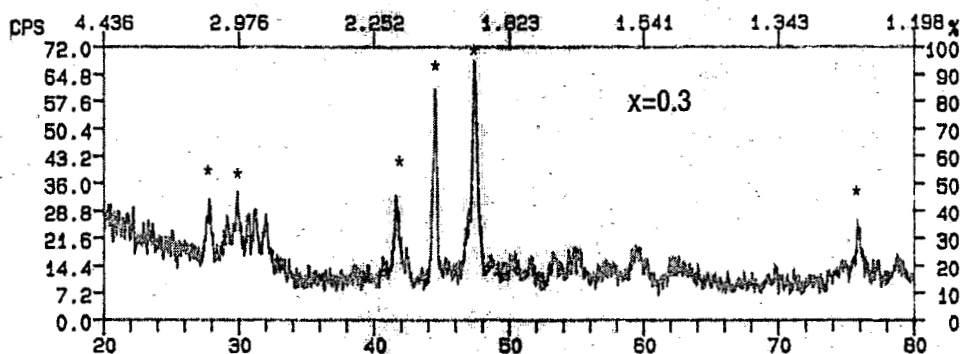
3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบแม่เหล็กโดย XRD

การตรวจสอบโครงสร้างผลึก โดยวิธี x-ray diffraction technique ก่อนนำไปขึ้นรูปนำผงที่ได้จากการเผาภายใต้อาร์กอนและไนโตรเจน มาบดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการหมุนของ

เครื่องบด 300 รอบต่อนาที เพื่อศึกษาความแตกต่างของฟิสิก เมื่อมีการดูดกลืนไนโตรเจนเกิดขึ้น เป็นการตรวจสอบการแทรกตัวของอะตอมไนโตรเจนในโครงสร้างของสารประกอบแม่เหล็ก ขณะเดียวกันทำการตรวจสอบหาชนิดของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นเกิดแบบใดได้บ้าง วิธีการตรวจสอบนี้อาจจะไม่สามารถบอกได้แน่ชัดว่ามีการแทรกตัวของอะตอมของไนโตรเจนเกิดขึ้นจริงหรือไม่ เพราะอาจจะมีอะตอมของธาตุอื่น เช่น ออกซิเจนที่มีอยู่ใน chamber ของเตาเผาจับกับสารประกอบ และให้ฟิสิกที่ต่างไปจากกรณีที่เผาในแก๊สอาร์กอนได้



รูปที่ 6 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 7 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากลักษณะและตำแหน่งฟิสิกที่ได้จากการเผาไนโตรเจนแก๊สจะให้ฟิสิกที่แหลมและมีจำนวนน้อยกว่าฟิสิกที่เผาในอาร์กอนแก๊ส ดังปรากฏในรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งฟิสิกที่แหลมบอกได้ว่าความเป็นผลึกของโครงสร้างในสารประกอบมีมาก แต่จากตำแหน่งฟิสิกที่ได้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นโครงสร้างแบบใด

สรุปผลและอภิปรายผลการทดลอง

- การเพิ่มสมบัติทางแม่เหล็กของสารประกอบในกลุ่มโลหะทรานซิชันและกลุ่มRare-Earth ภายใต้กระบวนการเผาภายใต้ไนโตรเจน ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแม่เหล็กของ ค่า Magnetization (M_s) และ Coercivity (H_c) โดยค่า M_s จะให้ค่าเพิ่มขึ้นหลังการเผา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของอิลคตรอนของสารประกอบในชั้น 3d และเมื่อพิจารณาสารประกอบ $(Sm_{1-x}Nd_x)Co_{6.9}Cr_{0.1}$ ที่ $x=0.0$ จะให้ค่า M_s และ H_c ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับสารประกอบในกลุ่มเดียวกัน ขณะที่ในสารประกอบ $(Sm_{1-x}Nd_x)_2Co_{16.6}Cr_{0.4}$ ที่ $x=0.2$ ให้ค่า M_s และ H_c สูงกว่าสารประกอบตัวอื่นๆ

- การเพิ่มอะตอมของ Nd ในสารประกอบ ไม่ทำให้สมบัติทางแม่เหล็กของสารเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้มีสมบัติทางแม่เหล็กลดลงพิจารณาจากค่า M_s และ H_c เนื่องจาก Sm จะรวมตัวกับอะตอมของ Co ได้ดีกว่า เมื่อพิจารณาสมบัติทางแม่เหล็กของสารประกอบดังกล่าวเทียบกับสารประกอบที่อยู่ในรูปของ $SmCo_5$, Sm_2Co_{17} และ $Sm_3Fe_{24.7}Cr_{4.3}$ ซึ่งการเผาสารประกอบในบรรยากาศอาร์กอนในตอนแรกจะให้ค่า M_s ต่ำ แต่เมื่อนำมาเผาในบรรยากาศไนโตรเจนอีกครั้งจะให้ค่า M_s ที่สูงขึ้น แต่ในส่วน of ค่า H_c จะมีค่าลดลง

- ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารประกอบโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของ X-ray ไม่สามารถบอกได้ว่าการแทรกตัวของอะตอมไนโตรเจนในสารประกอบ แต่สามารถพิจารณาได้จากค่า M_s ที่ทำการวัดโดย Hysteresis loop ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง Coey และ Sun เนื่องจากสารประกอบจะให้ค่า magnetization เพิ่มขึ้นเมื่ออะตอมไนโตรเจนแทรกตัวในโครงสร้างของสารประกอบกลุ่มโลหะทรานซิชันและ Rare-Earth

เอกสารอ้างอิง

1. R.A. McCurrie, *Ferromagnetic Materials*, Academic Press, London 1994, p247-264.
2. C.Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 6th Edition, John Wiley & Sons Inc. New York 1991 p. 450.
3. J.M.D. Coey and P.A.I. Smith, *J. Magn. Magn.Mater.* 200(1999) 405-424.
4. X. Chen, Z. Altounian and J.O. Ström-Olsen, *J. Appl. Phys.* 81(1997) 4557-4559.
5. Xiu-Feng Han, M.C. Zhang, Yi Qiao, F.M. Yang, C.P. Yang, G.C. Liu, Y.Z. Wang and B.P. Hu, *J. Magn. Magn.Mater.* 192(1999) 314-320.
6. K. Koyama, H. Fujii and S. Suzuki, *J. Magn. Magn.Mater.* 161(1996) 118-126.
7. Z. Hu, W.B. Yelon, O.Kalogirou and V.Psycharis, *J. Appl. Phys.* 80(1996) 2955-2959.
8. M. Jurczyk and J. Jakubowicz, *J. Magn. Magn.Mater.* 185 (1998) 66-70.

ภาคผนวก 1

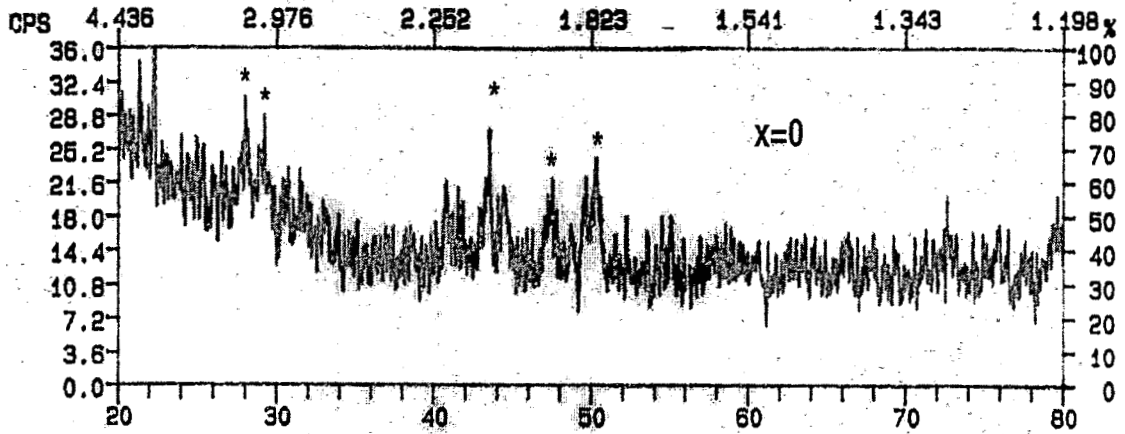
ตารางแสดงขนาดอนุภาคของสารประกอบ

สัญลักษณ์	2theta	FWHM	Gain size (Å)
1Ar	44.346	1.337	71.265
	47.249	1.202	80.121
1N	44.265	0.476	200.111
	47.266	0.694	138.777
	50.168	0.064	1522.204
2Ar	27.977	0.276	329.478
	29.118	0.225	405.184
	44.471	0.440	216.644
	47.362	0.616	156.407
	50.090	0.895	108.816
	57.704	0.177	569.117
2N	41.564	0.476	198.269
	44.383	0.320	297.793
	47.304	0.494	194.991
	75.804	0.530	210.948
3Ar	27.826	0.355	256.074
	29.028	0.359	253.894
	40.682	0.667	141.086
	44.386	0.413	230.738
	47.297	0.576	167.227
	49.934	1.048	92.870
2N	41.588	0.060	1573.062
	44.388	0.428	222.652
	47.340	0.471	204.540
	75.766	0.183	610.785
4Ar	27.674	0.452	201.054
	40.604	0.614	153.226
	42.938	0.610	155.433
	44.231	0.411	231.733

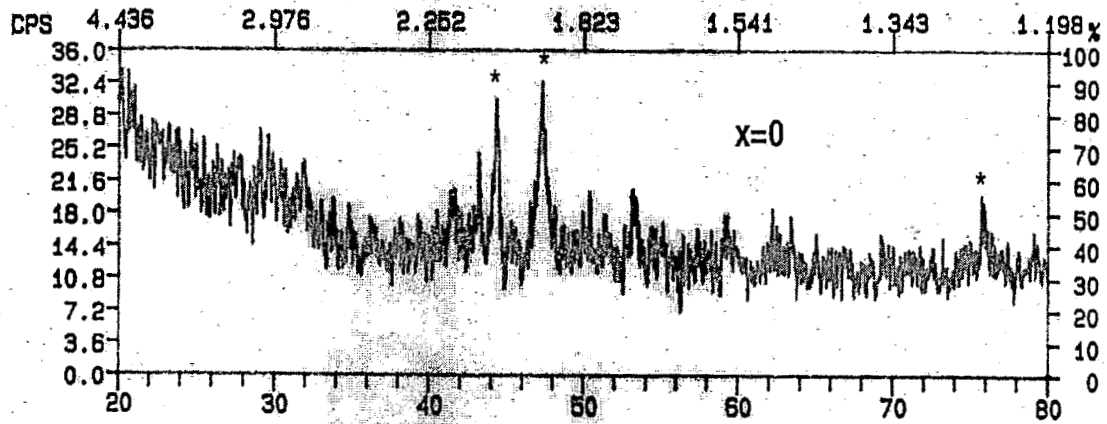
	47.162	0.538	178.946
	49.612	1.231	78.961
4N	41.512	0.296	318.783
	44.326	0.189	504.098
	47.256	0.541	178.018
	75.757	0.628	177.972
5Ar	22.293	0.060	1498.947
5N	44.2302	0.484	125.564
	47.257	0.767	196.781
6Ar	44.323	0.415	229.574
	47.238	0.989	97.372
6N	41.617	0.440	214.529
	44.362	0.336	283.590
	47.316	0.521	184.894
	75.798	0.171	653.789
7Ar	27.756	0.251	362.122
	44.315	0.438	217.513
	47.275	0.812	118.614
4N	41.549	0.361	261.417
	44.365	0.197	483.693
	47.251	0.494	194.951
	75.679	0.060	1861.795
8Ar	27.734	0.225	403.957
	40.431	0.449	209.417
	41.619	0.470	200.837
	44.333	0.438	217.527
	47.269	0.807	119.346
	53.282	0.424	232.810
	59.637	1.599	63.597
	75.762	0.742	150.634
5N	41.644	0.285	331.232
	44.456	0.255	373.798

	47.393	0.367	262.556
9Ar	41.225	0.400	235.677
	44.837	0.813	117.403
	47.632	1.011	95.397
	50.285	1.319	73.895
9N	29.394	0.363	251.305
	41.048	0.302	311.975
	44.486	0.525	181.578
	47.517	0.631	152.779
	50.377	0.212	459.926
10Ar	28.123	0.363	168.142
	40.941	0.302	359.479
	44.548	0.525	184.786
	47.463	0.631	162.810
	50.283	0.212	257.848
10N	44.229	0.510	186.748
	47.117	0.820	117.386
11Ar	40.854	0.442	213.024
	44.508	0.514	185.479
	47.400	0.613	157.195
11N	32.936	0.924	99.581
	44.039	0.214	444.755
	47.215	0.186	517.703
11Ar	44.322	0.517	184.281
	47.233	0.808	119.182
	49.774	1.522	63.906
9N	32.913	0.345	266.688
	44.225	0.606	157.162
	47.271	0.180	535.074
	51.377	0.198	494.491
	75.702	0.316	353.560

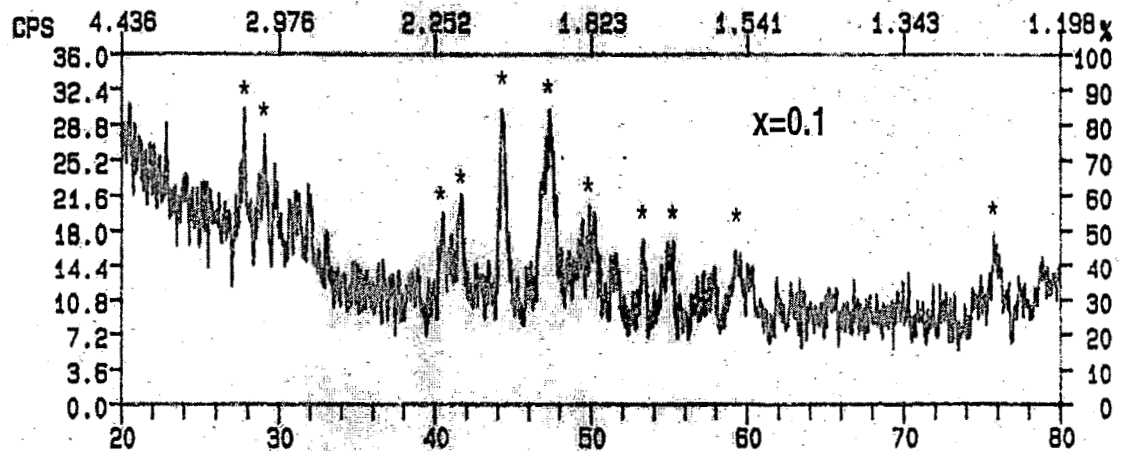
ภาคผนวก 2
X-ray diffraction pecks (XRD)



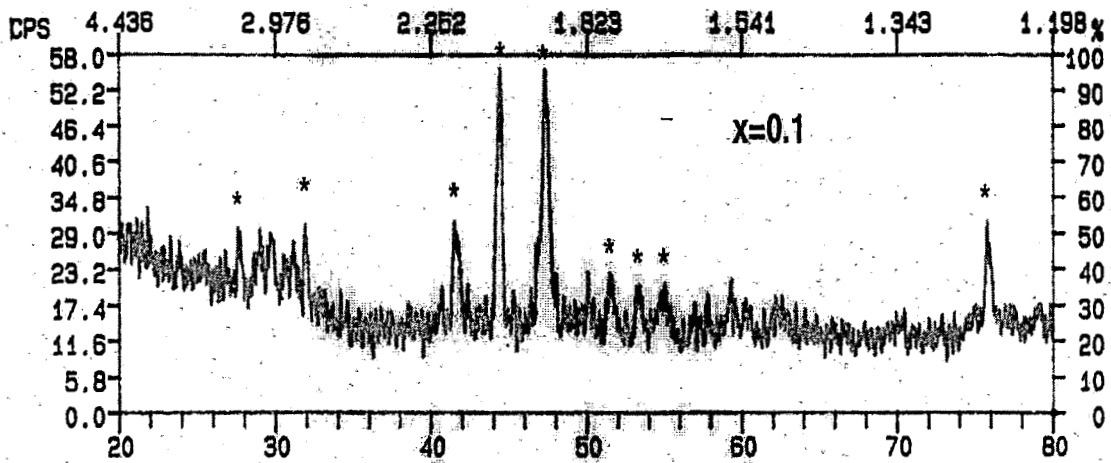
รูป 1 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



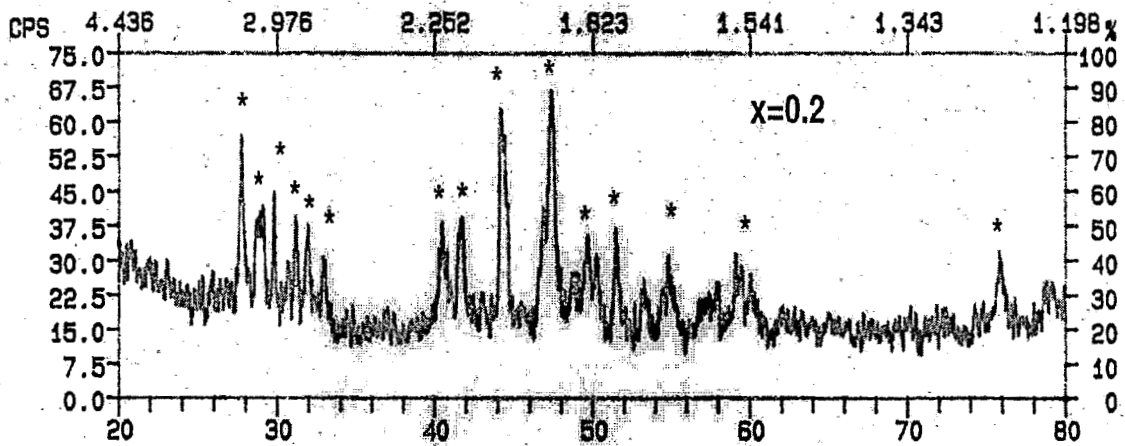
รูป 2 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



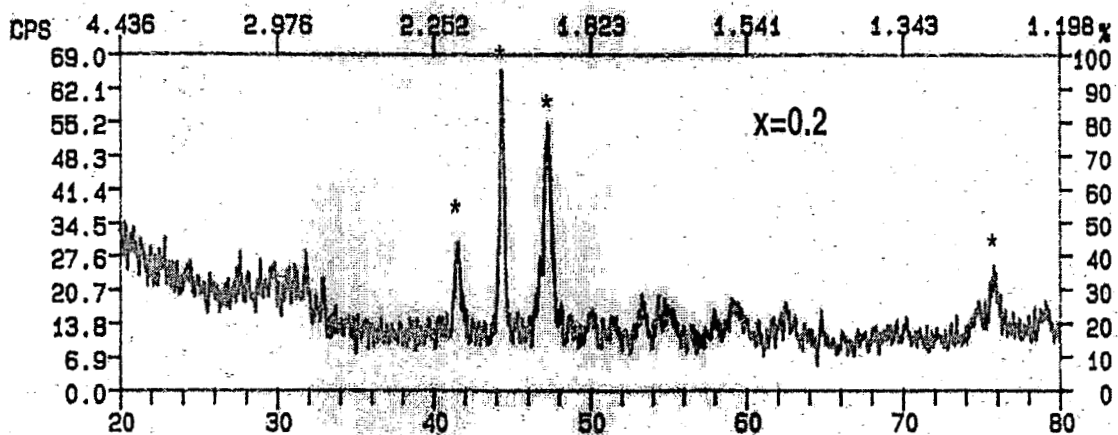
รูป 3 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



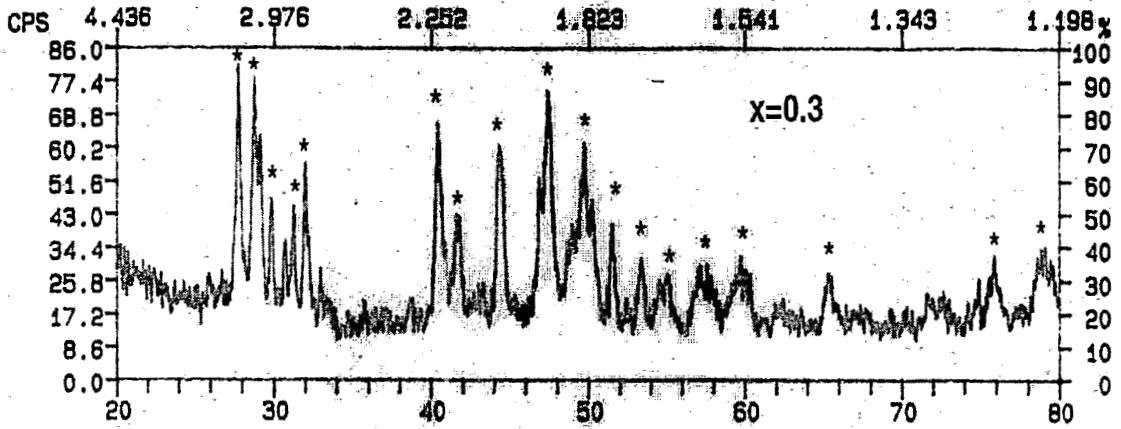
รูป 4 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



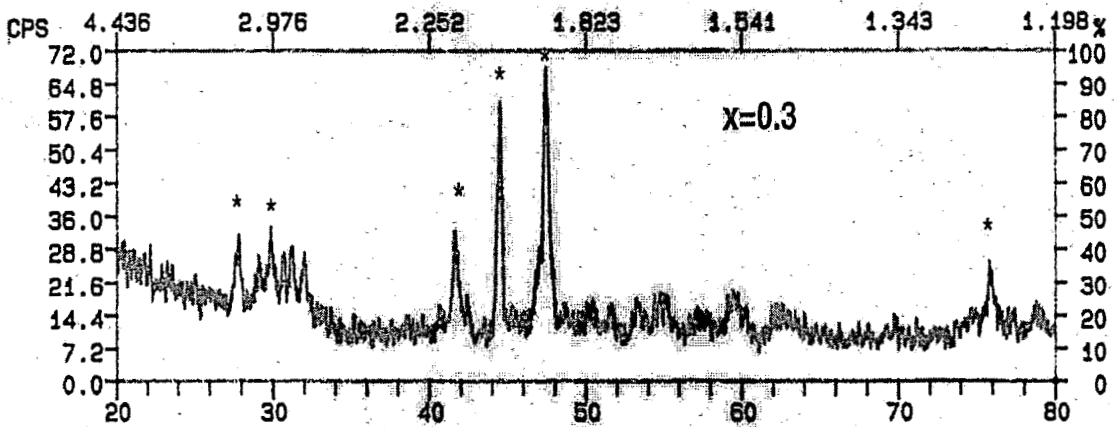
รูป 5 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



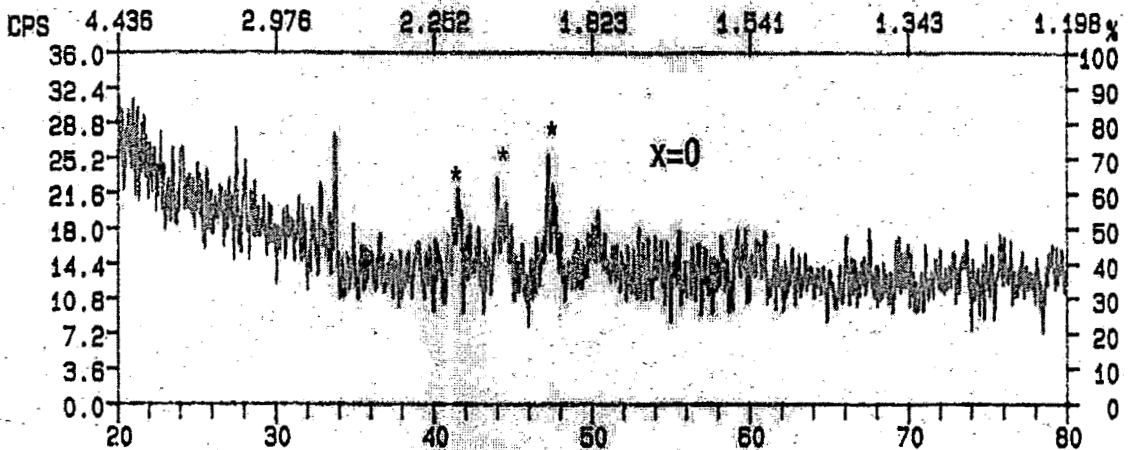
รูป 6 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



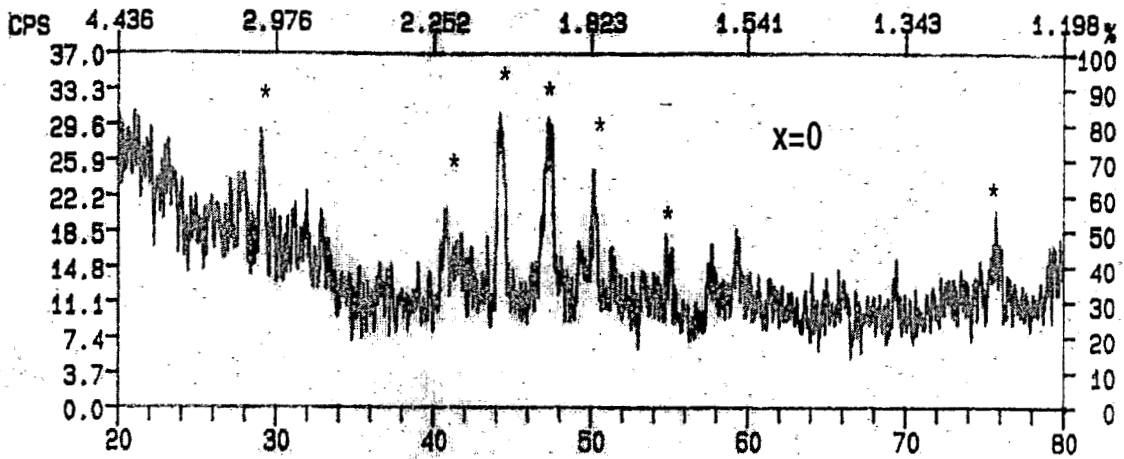
รูป 7 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



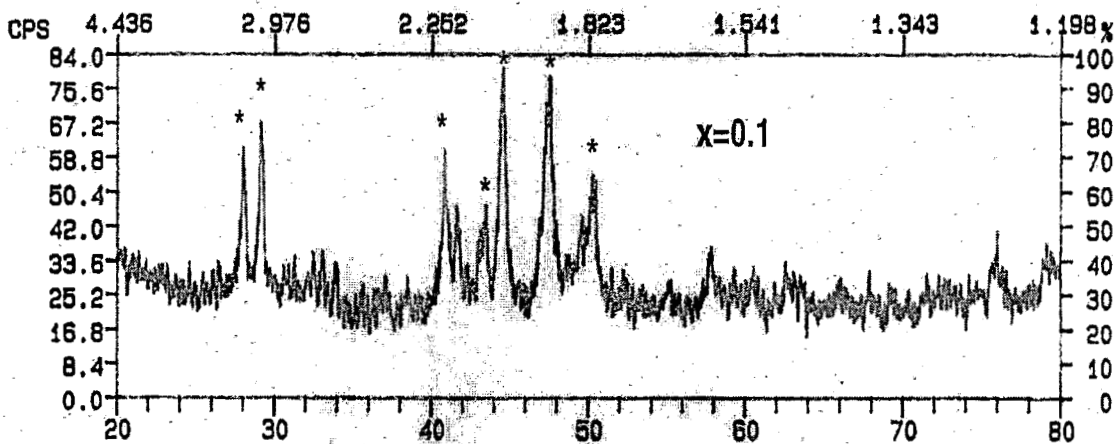
รูป 8 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)\text{Co}_{6.9}\text{Cr}_{0.1}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



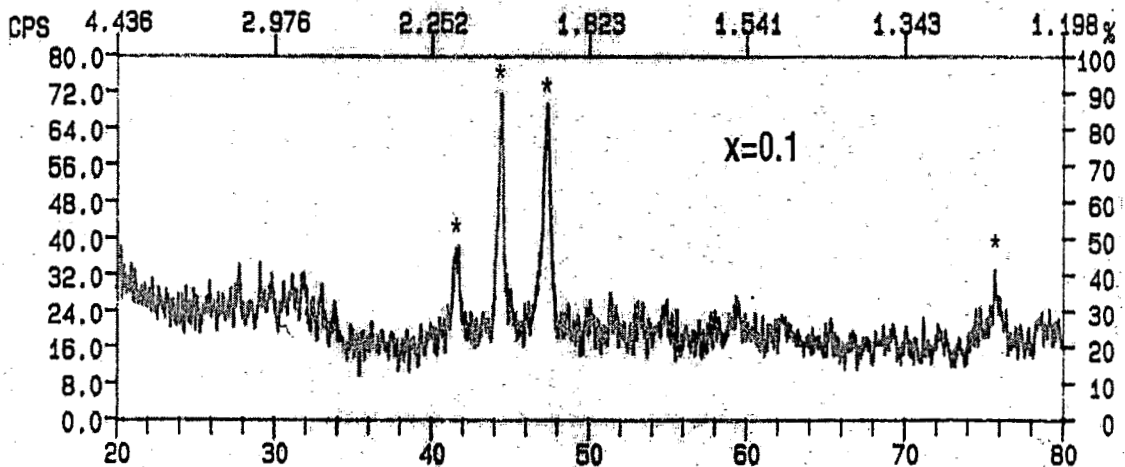
รูป 9 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



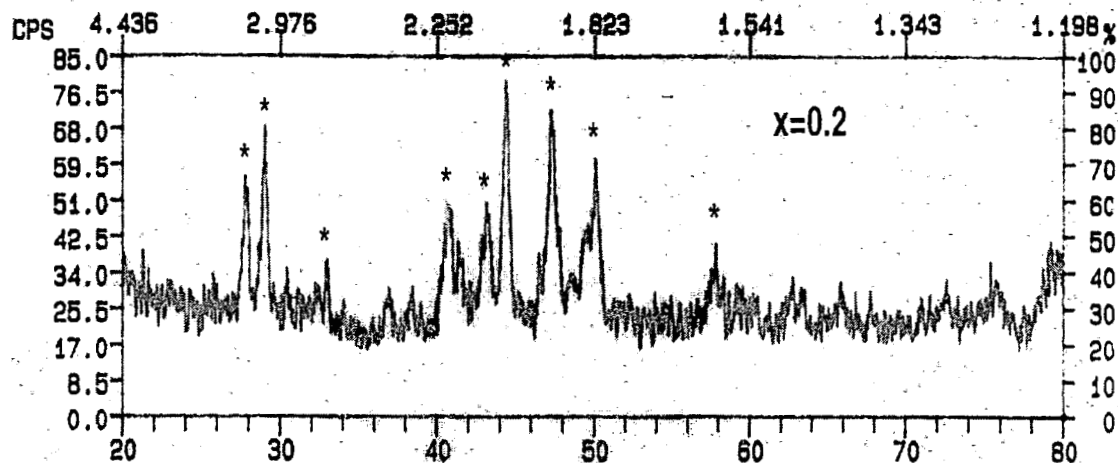
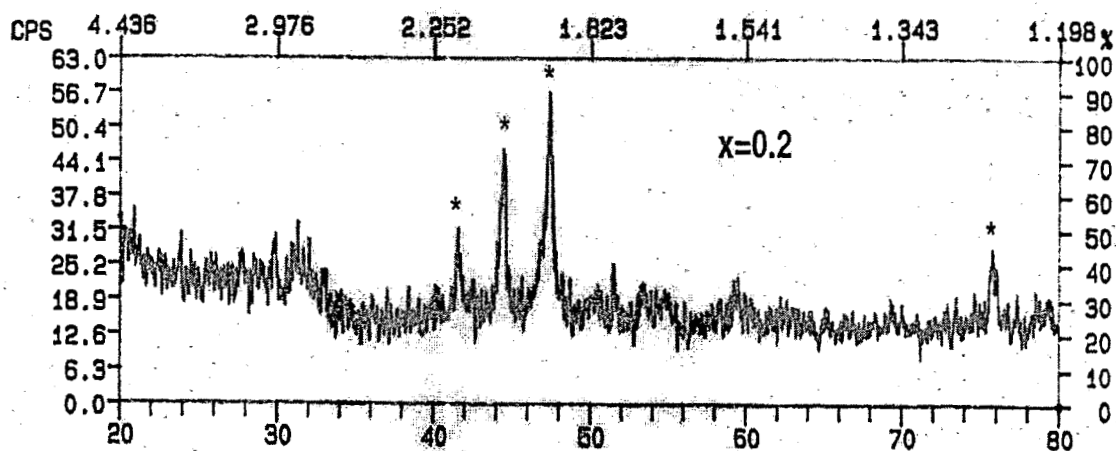
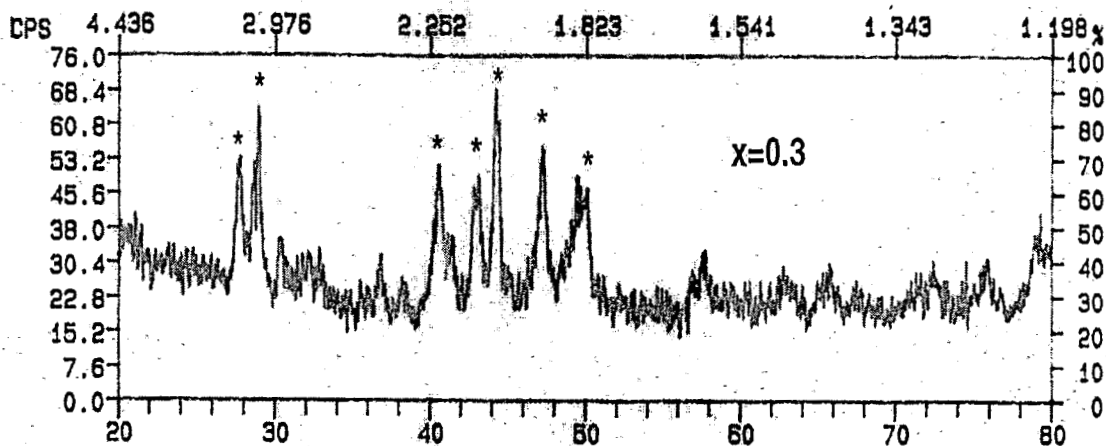
รูป10 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



รูป11 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูป12 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

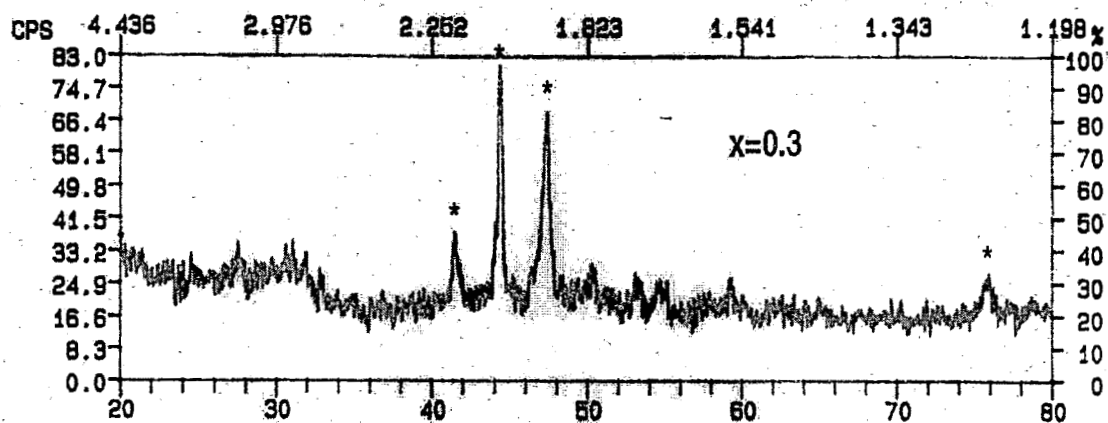
รูป13 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงรูป14 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงรูป15 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

538.9

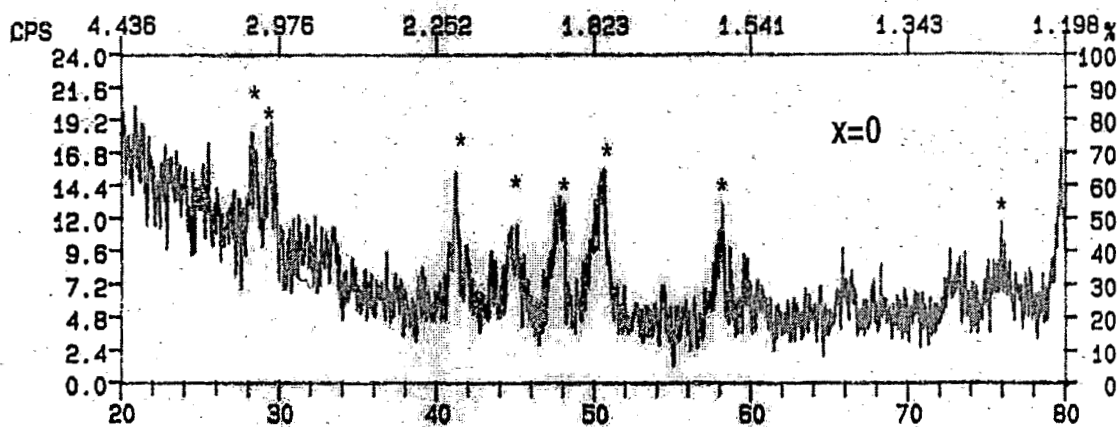
๕๓๘.๙

๕.๔

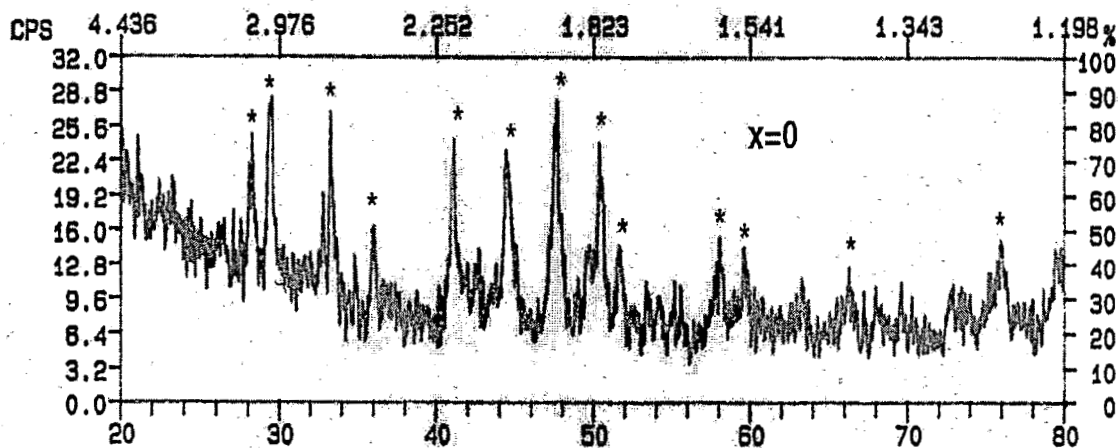
249017



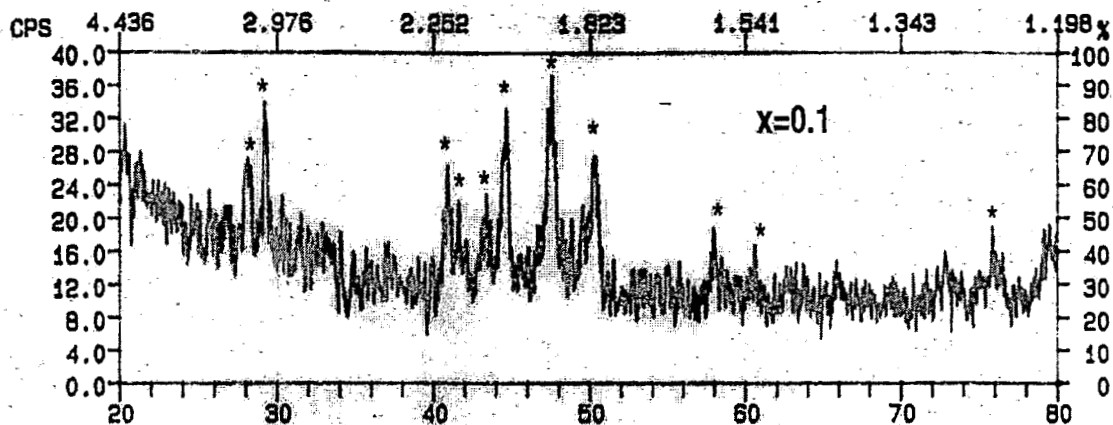
รูป 16 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{0.4}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



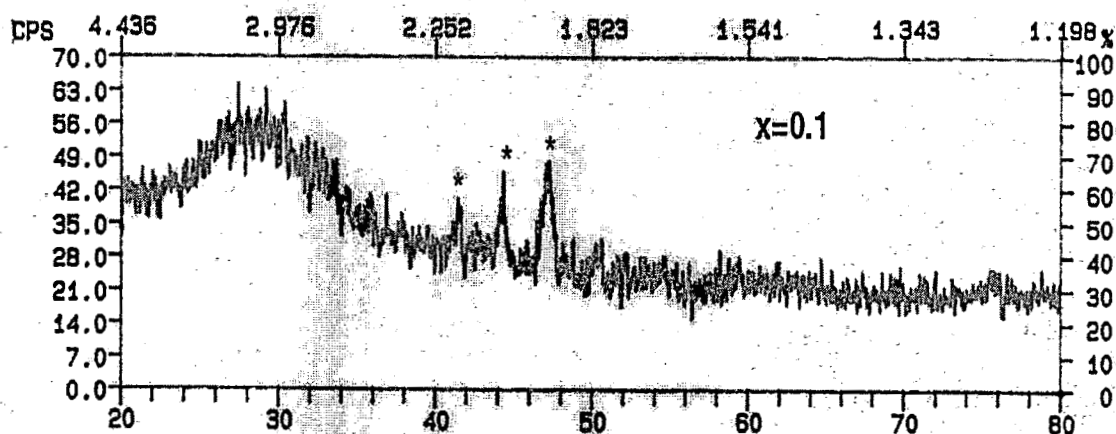
รูป 17 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.15})_{29}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



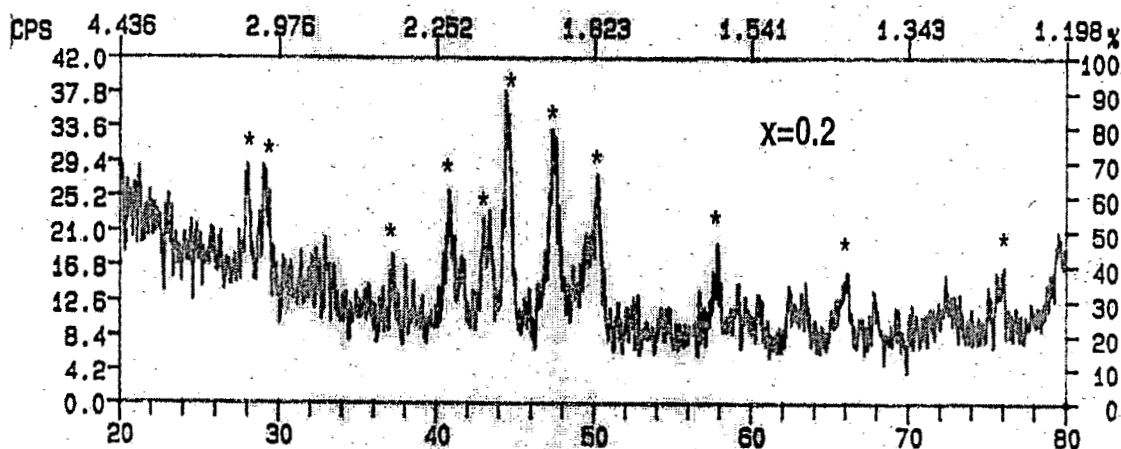
รูป 18 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.15})_{29}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



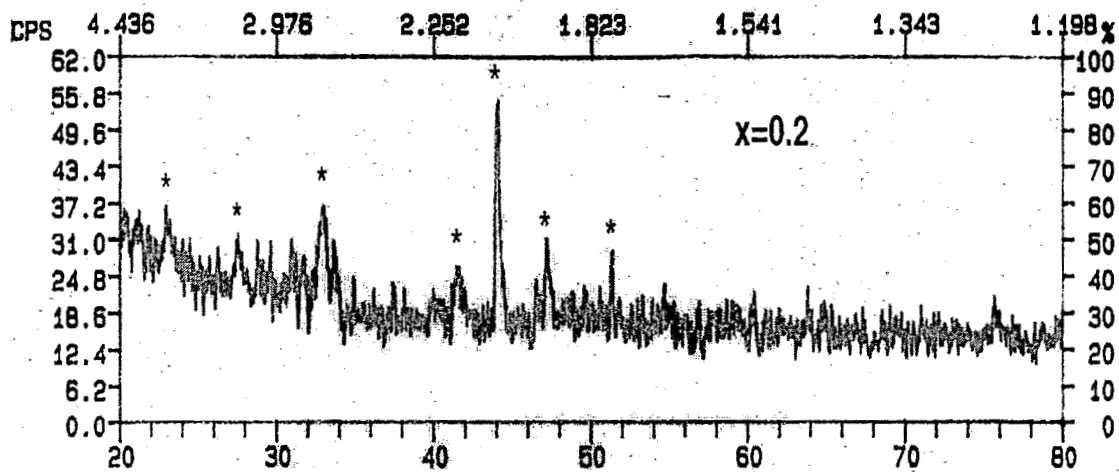
รูป 19 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.15})_{29}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



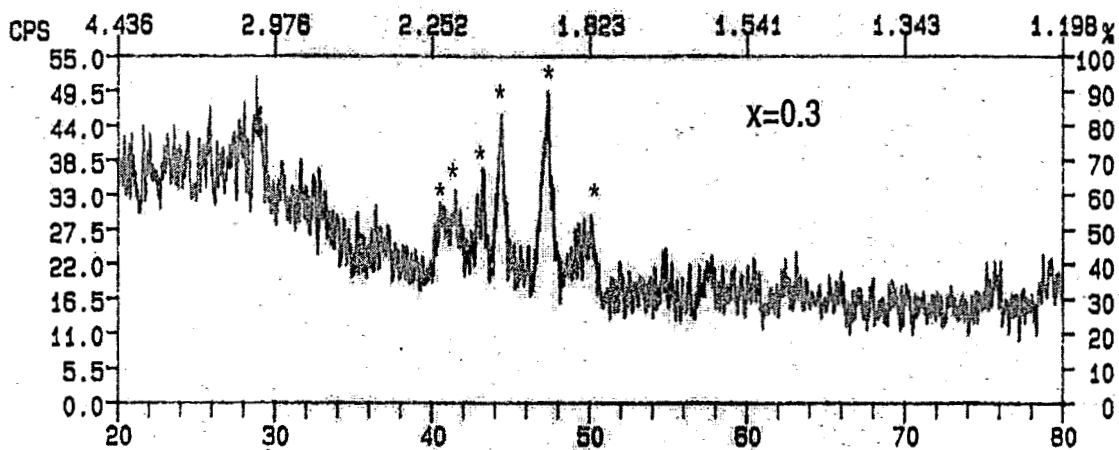
รูป 20 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.15})_{29}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



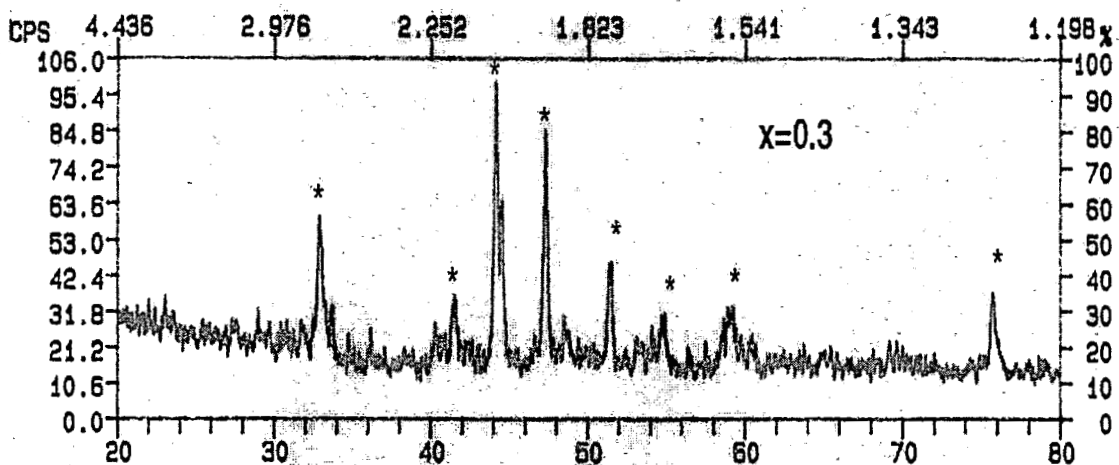
รูป 21 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.15})_{29}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูป 22 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.15})_{29}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

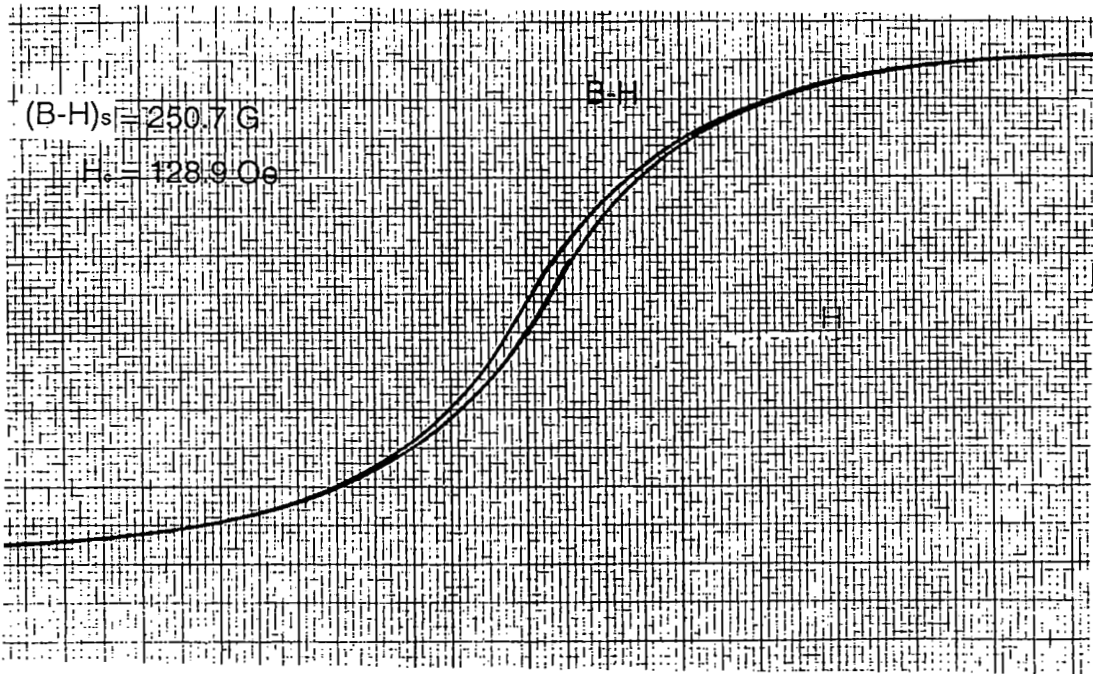


รูป 23 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.15})_{29}$ ในบรรยากาศ Ar ที่ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

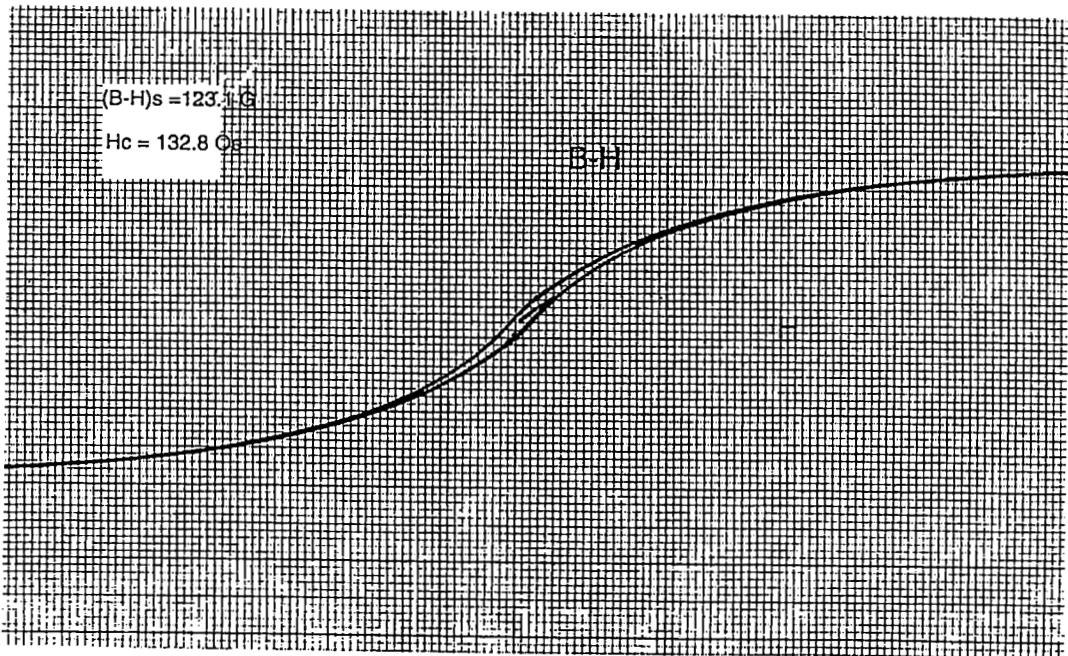


รูป 24 XRD ของ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Nd}_x)_3(\text{Co}_{0.85}\text{Cr}_{0.15})_{29}$ ในบรรยากาศ N_2 ที่ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

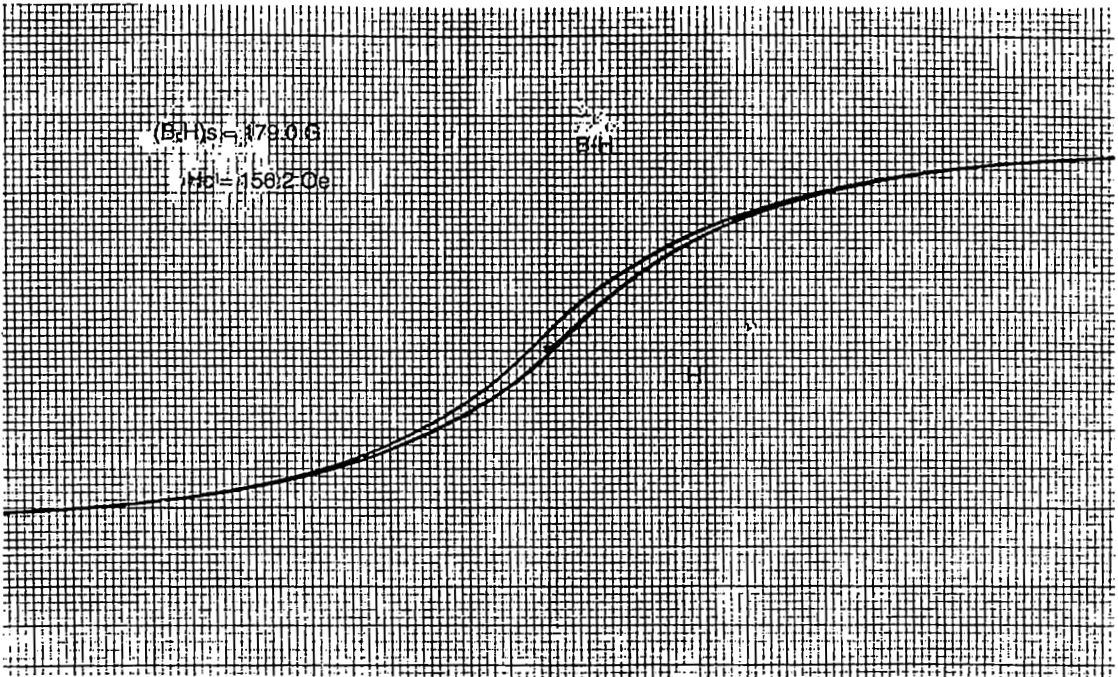
ภาคผนวก 3
Hysteresis loop



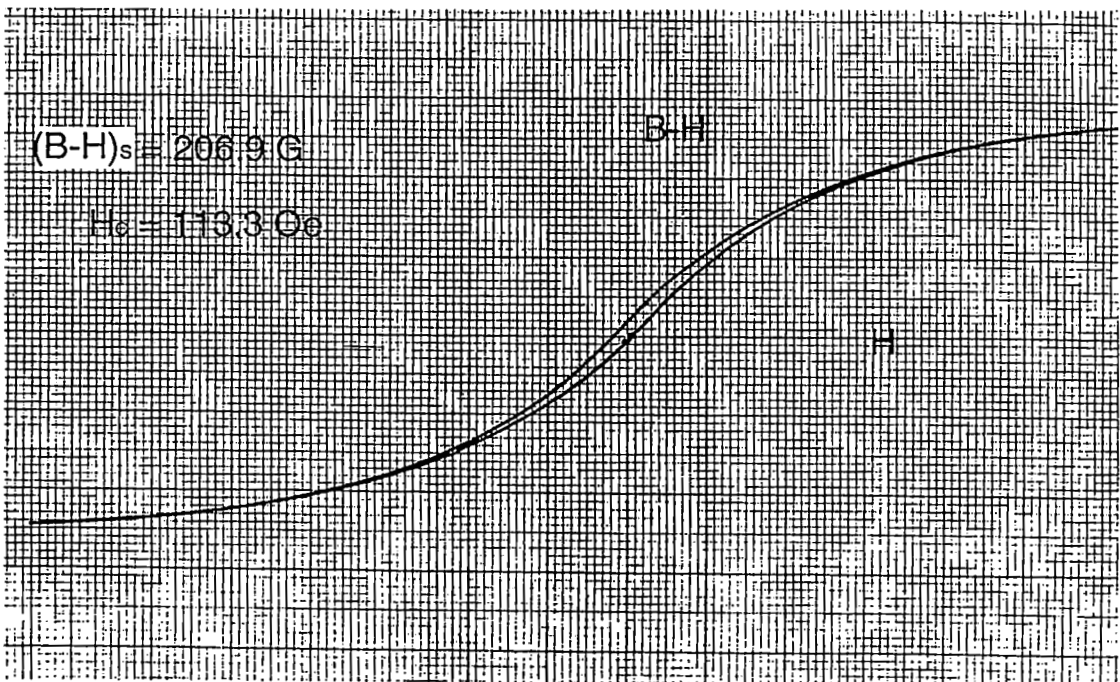
รูป 1a



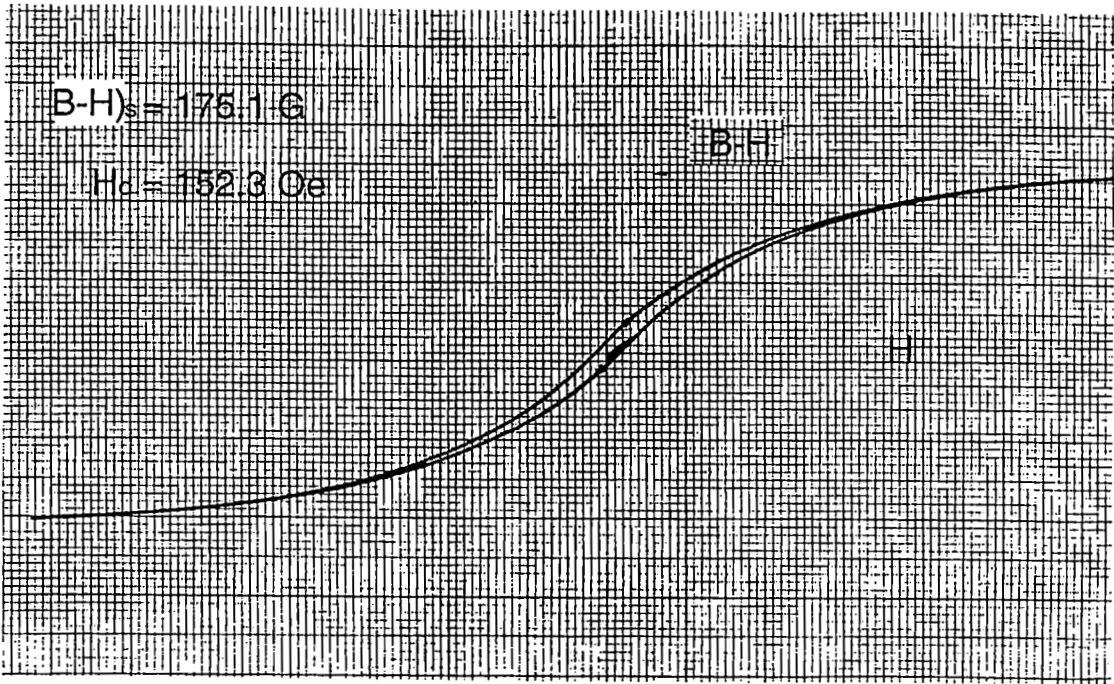
รูป 1n



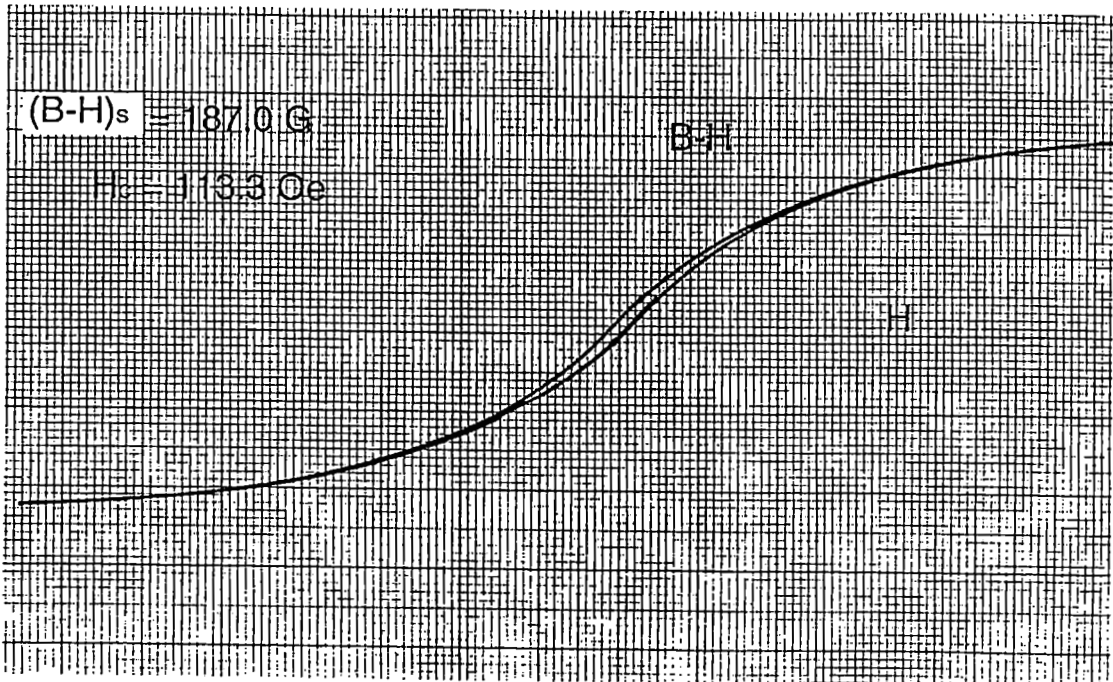
រូប 2a



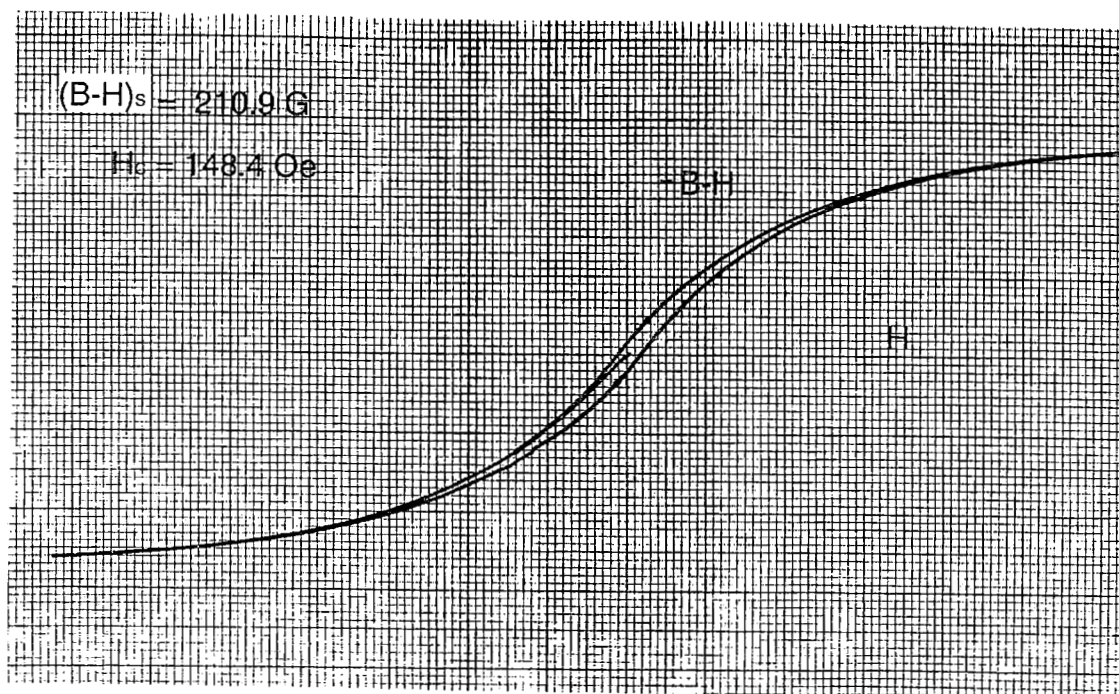
រូប 2n



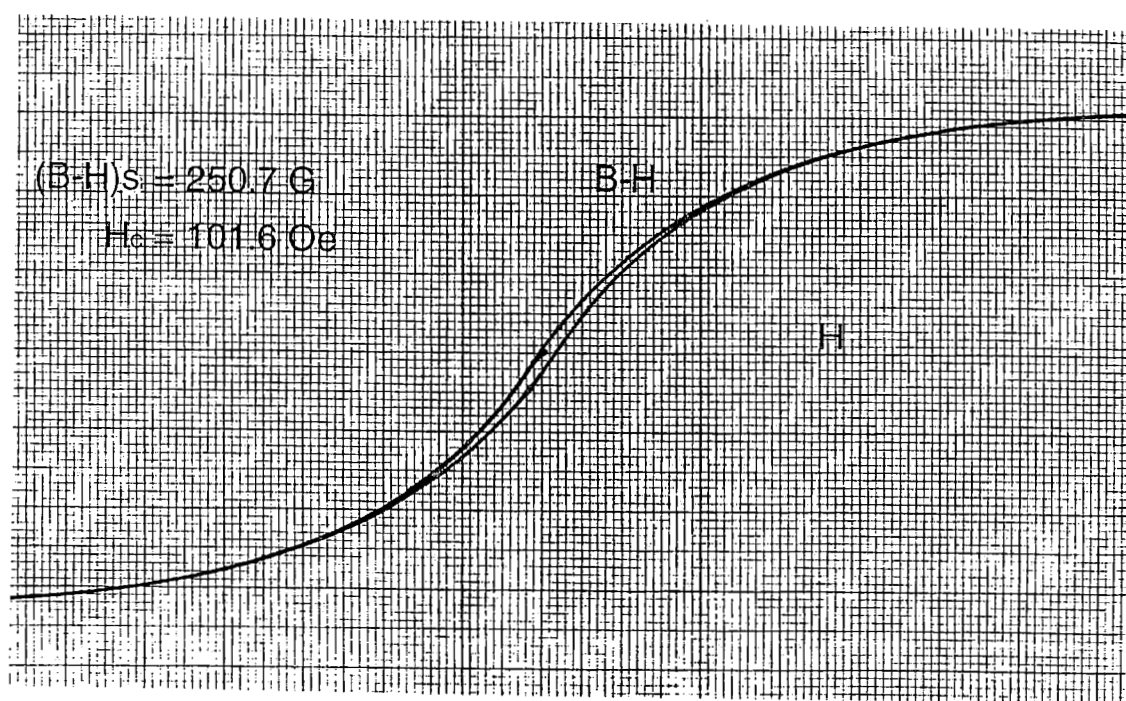
រូប 3a



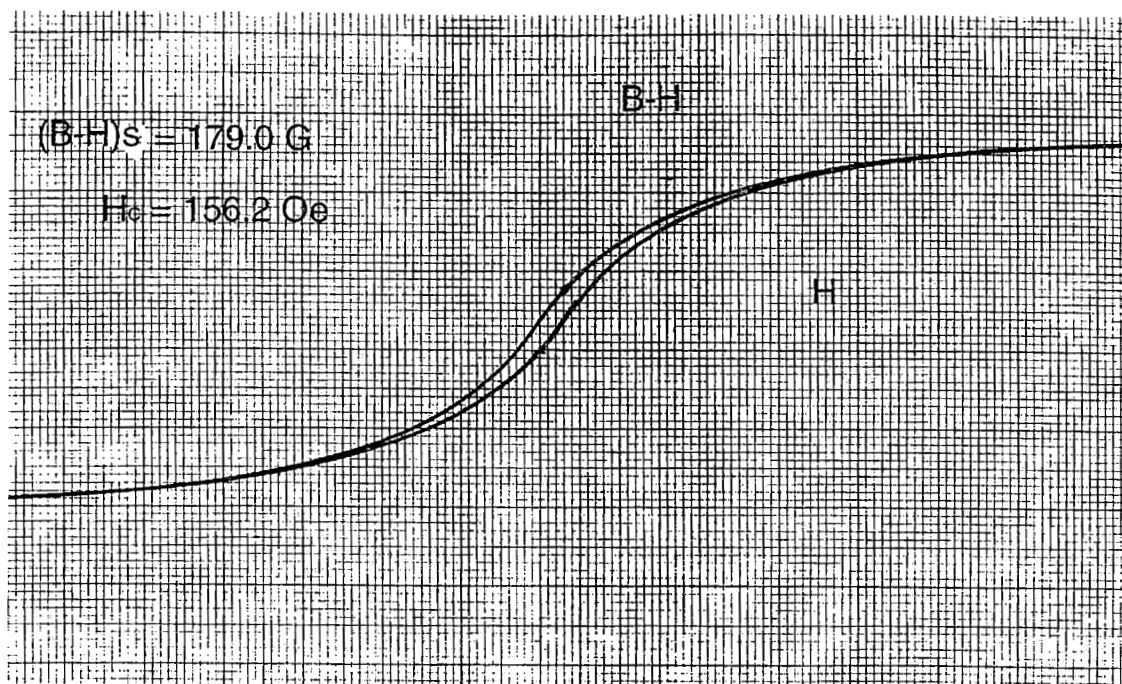
រូប 3n



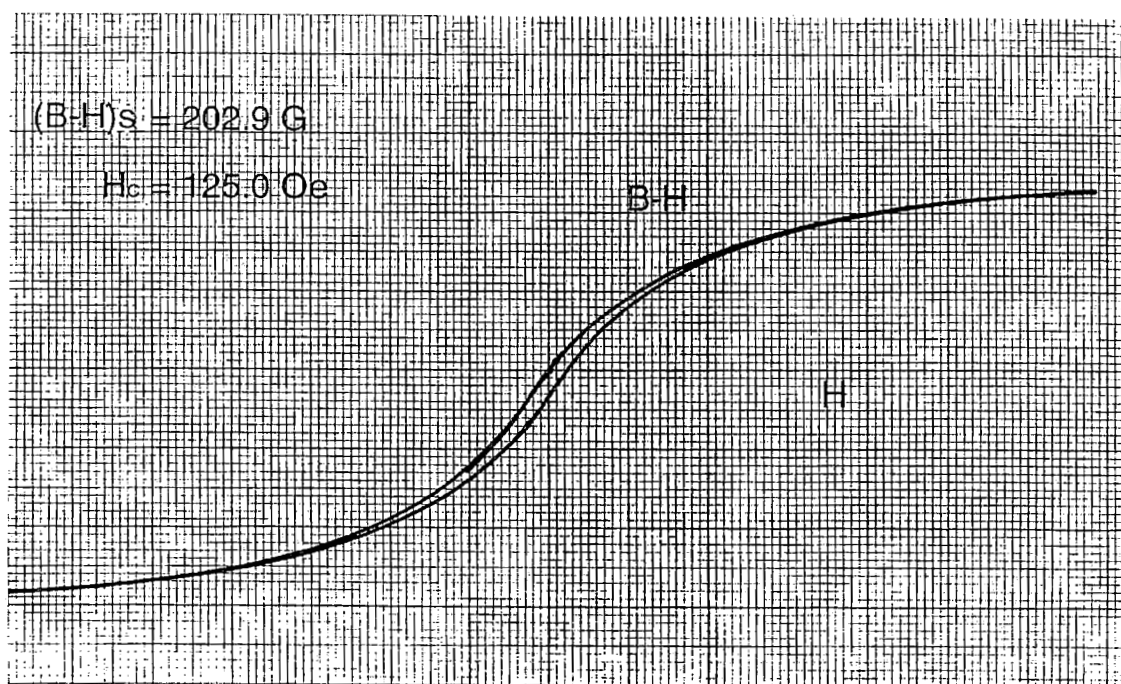
រូប 4a



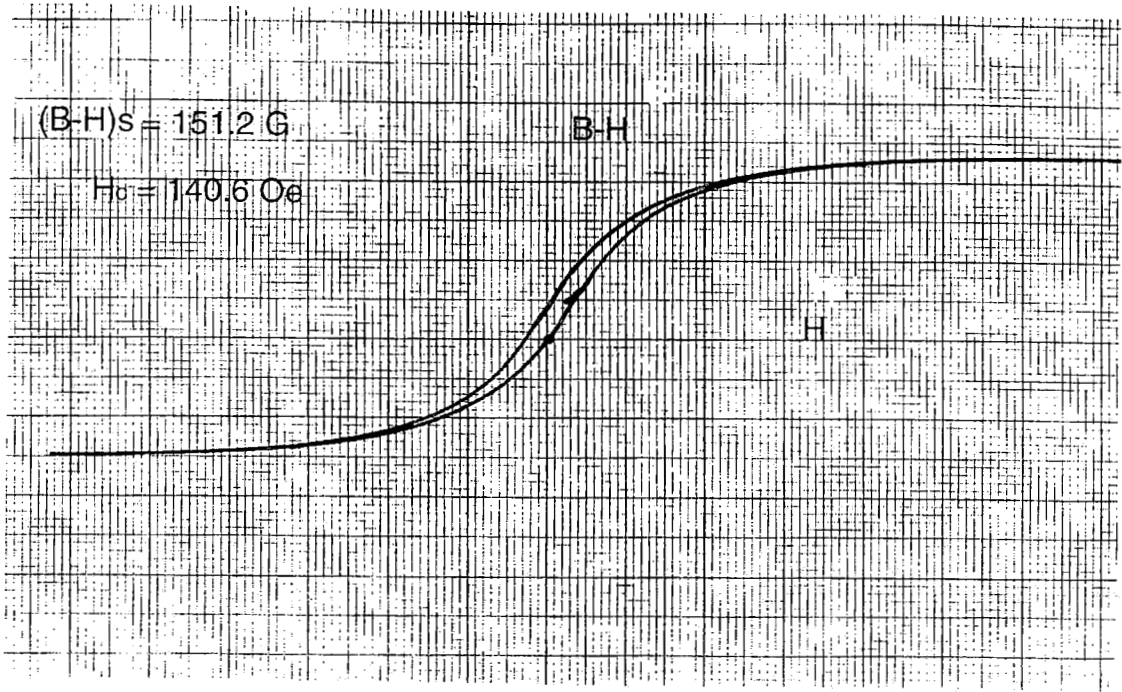
រូប 4b



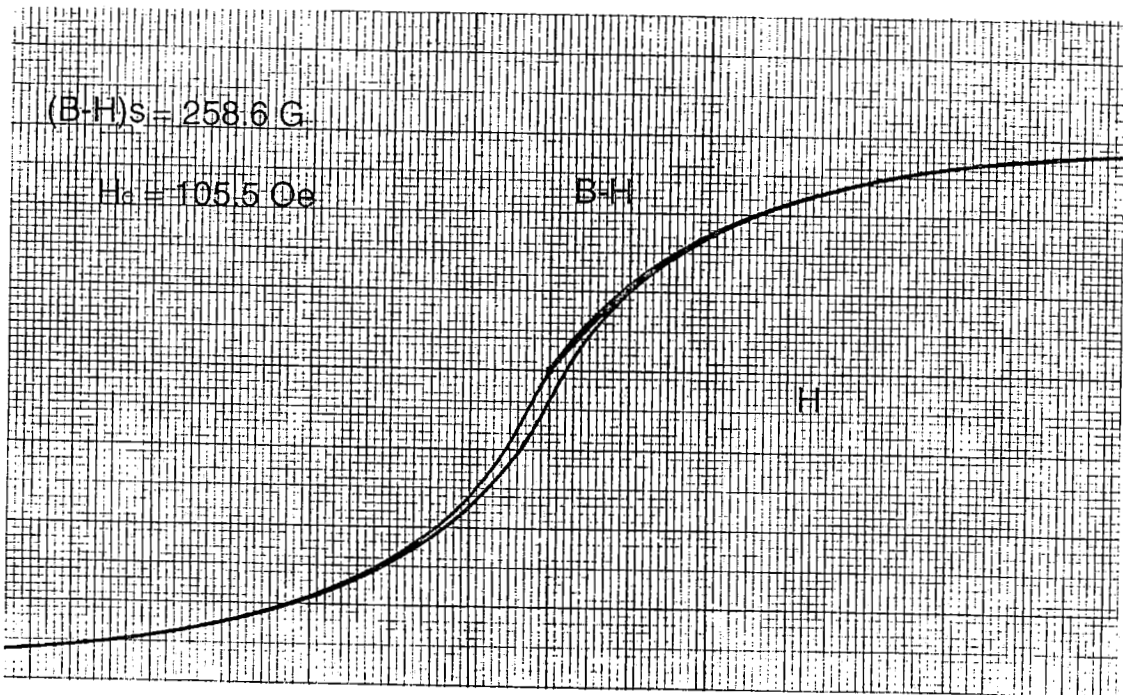
រូប 5a



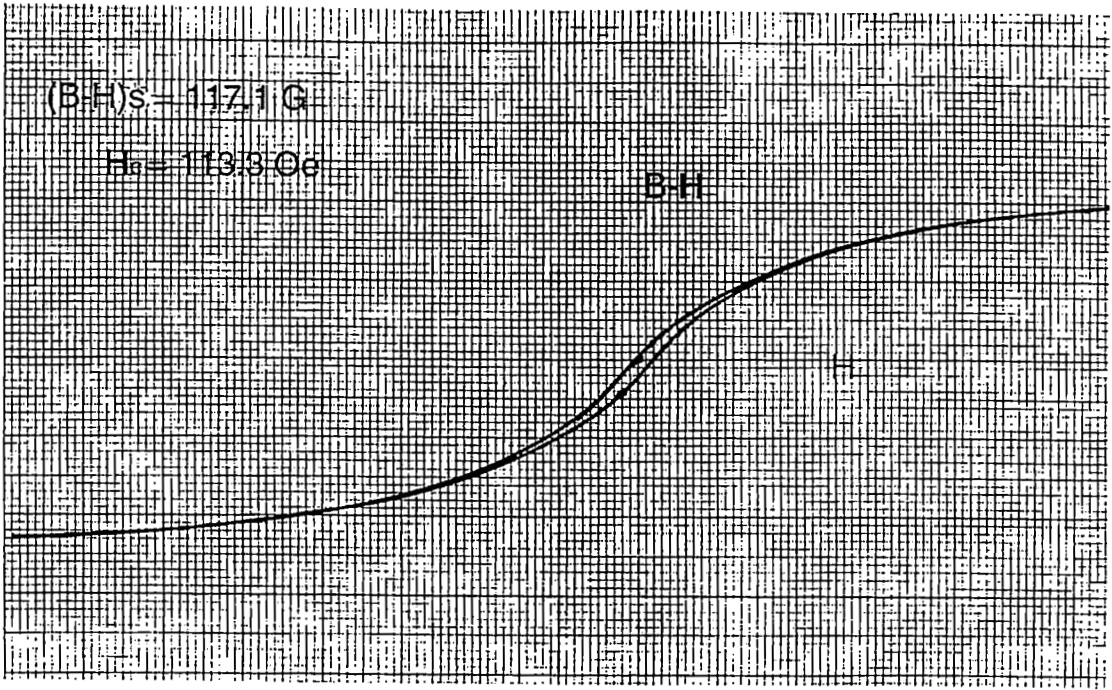
រូប 5n



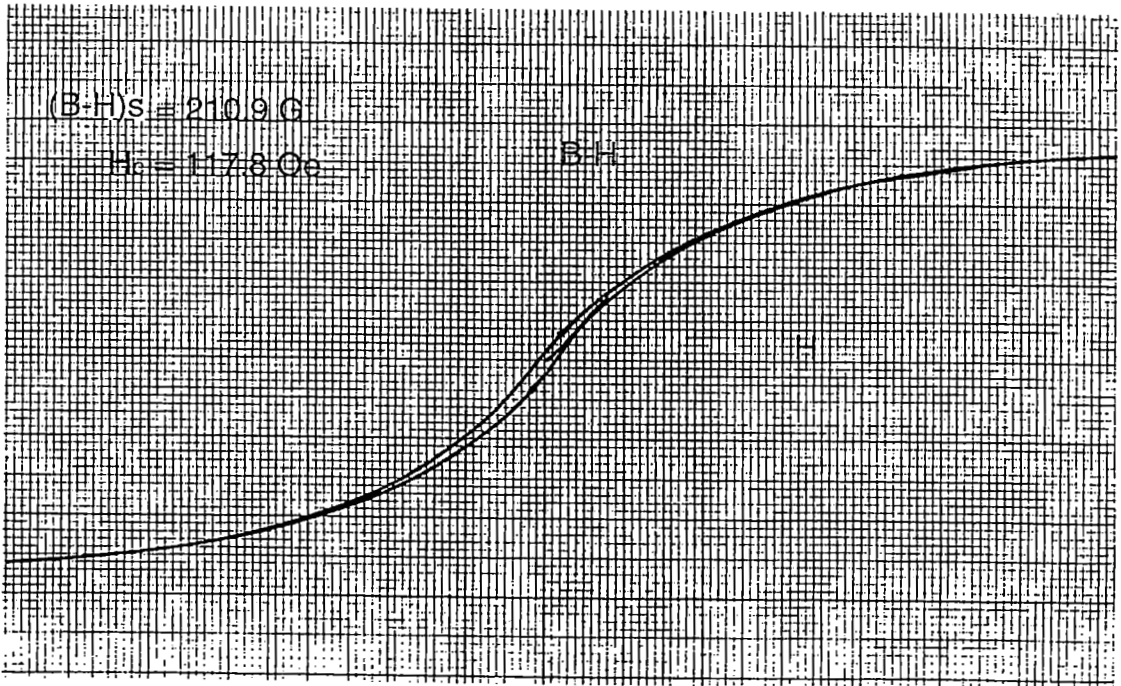
រូប 6a



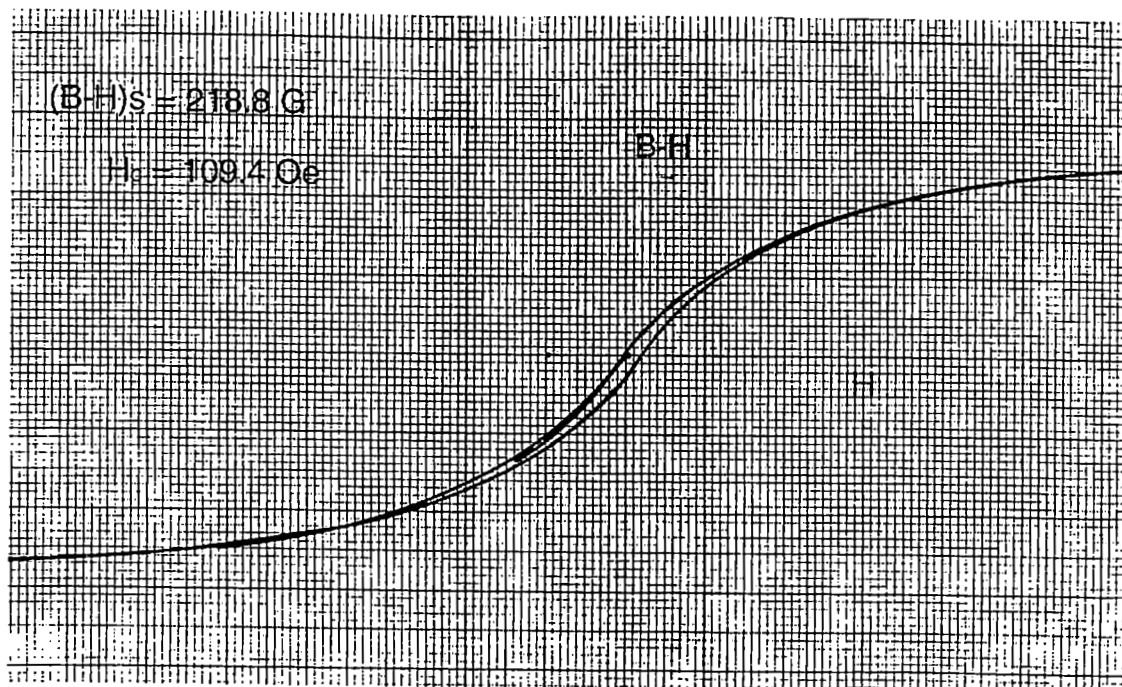
រូប 6b



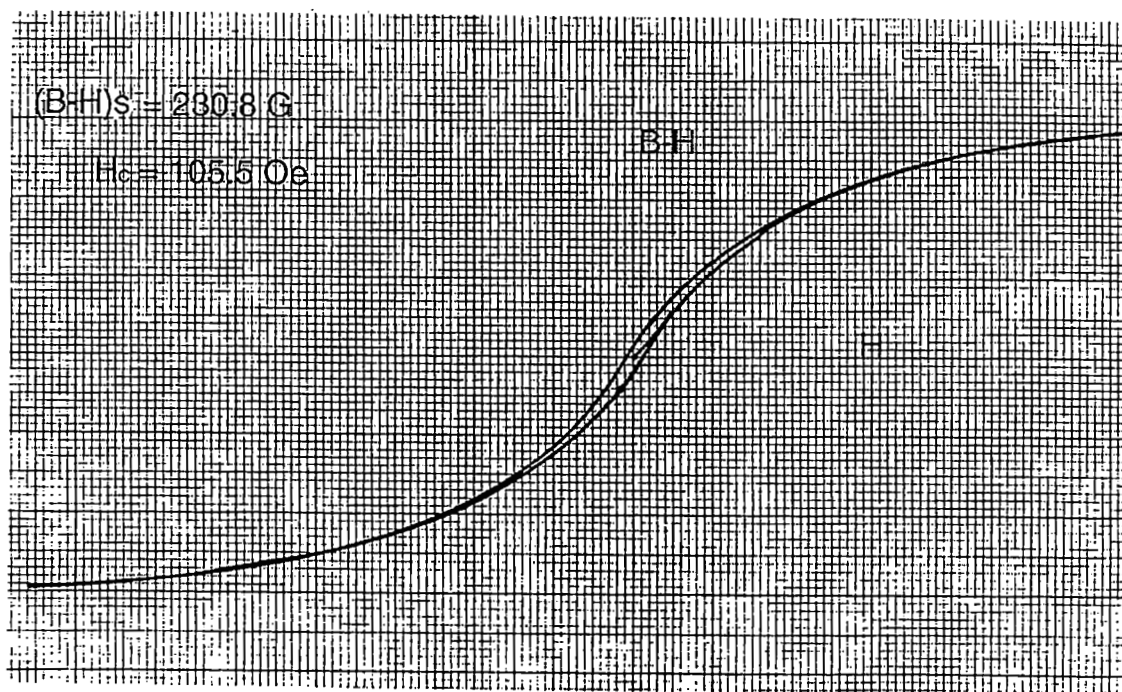
រូប 7a



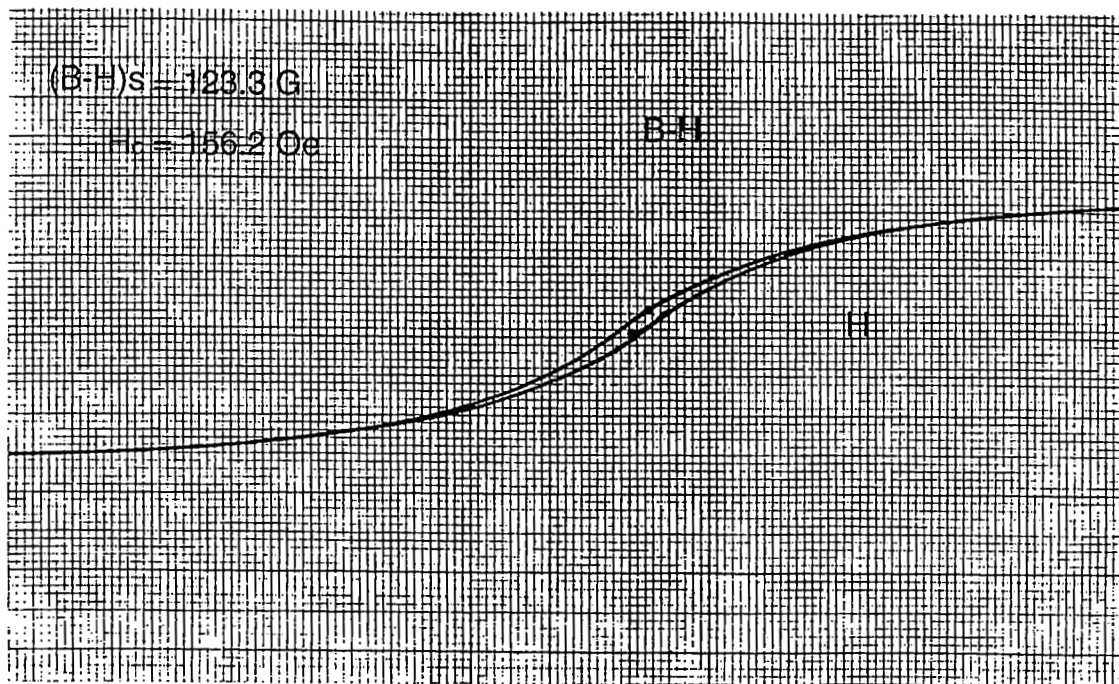
រូប 7b



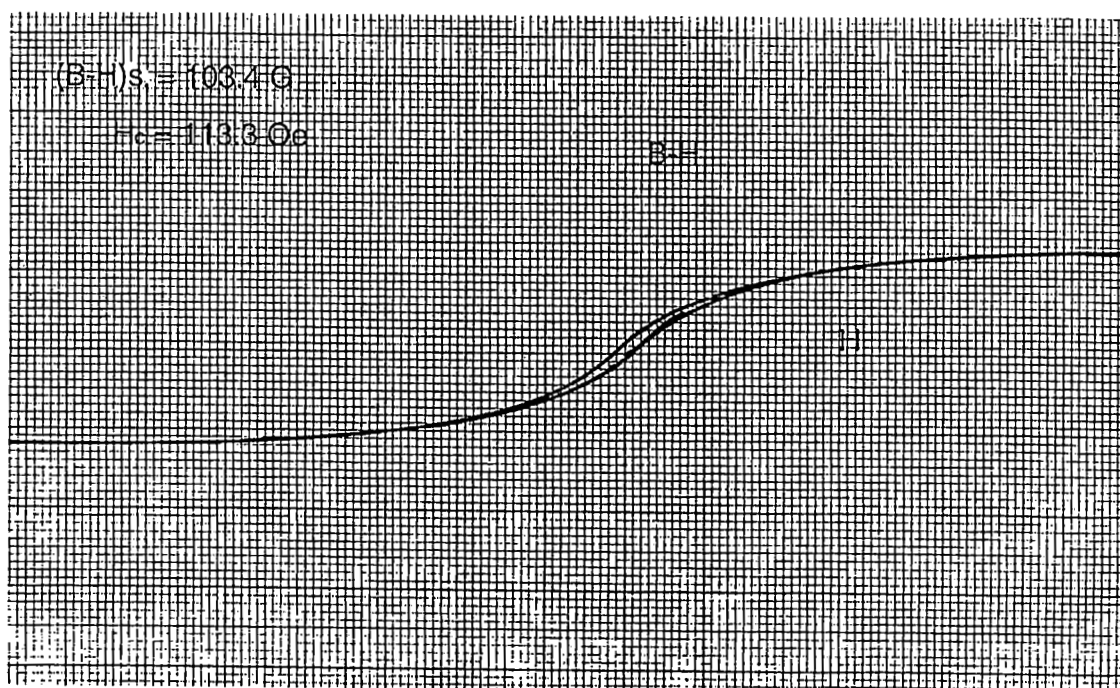
រូប 8a



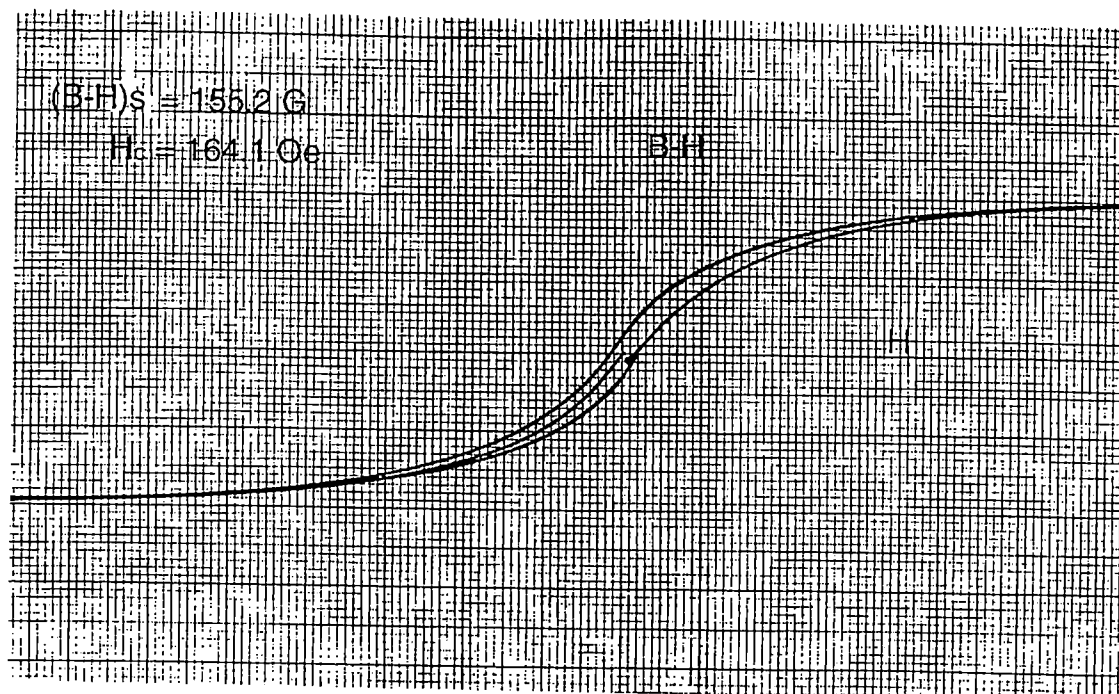
រូប 8b



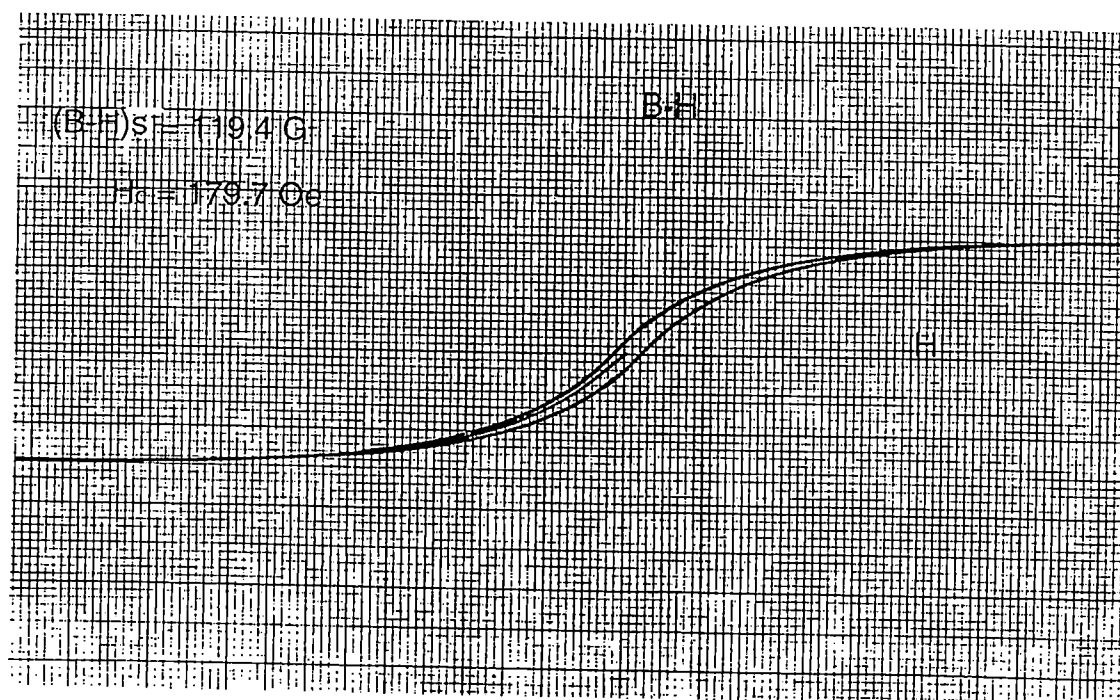
၇၂ ၅a



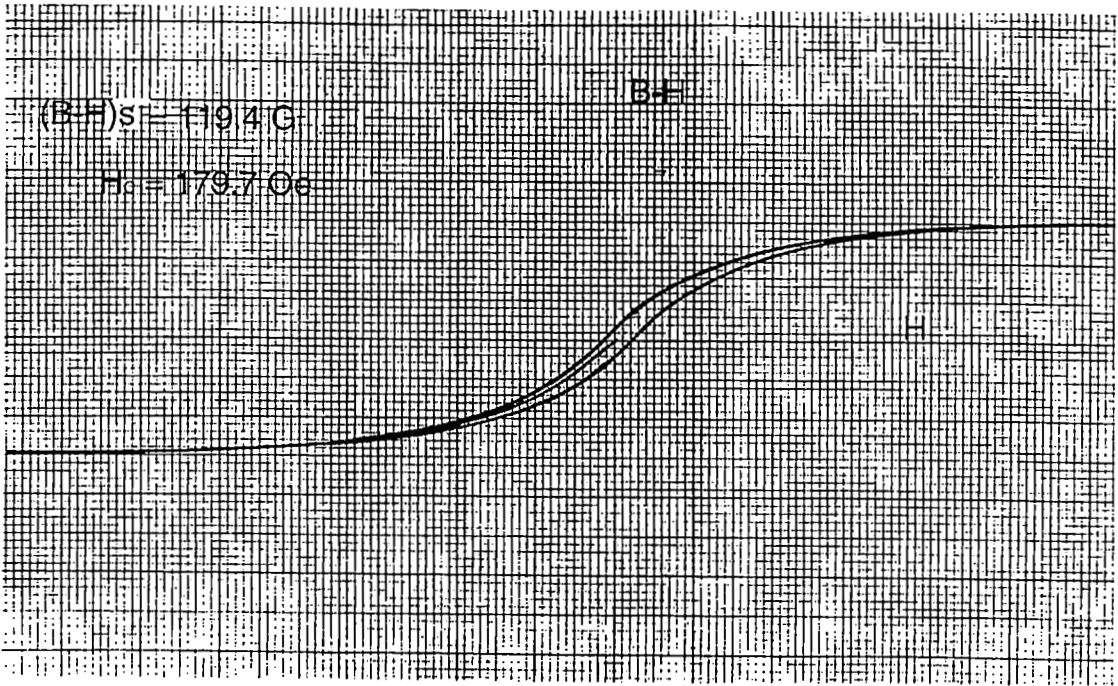
၇၂ ၅b



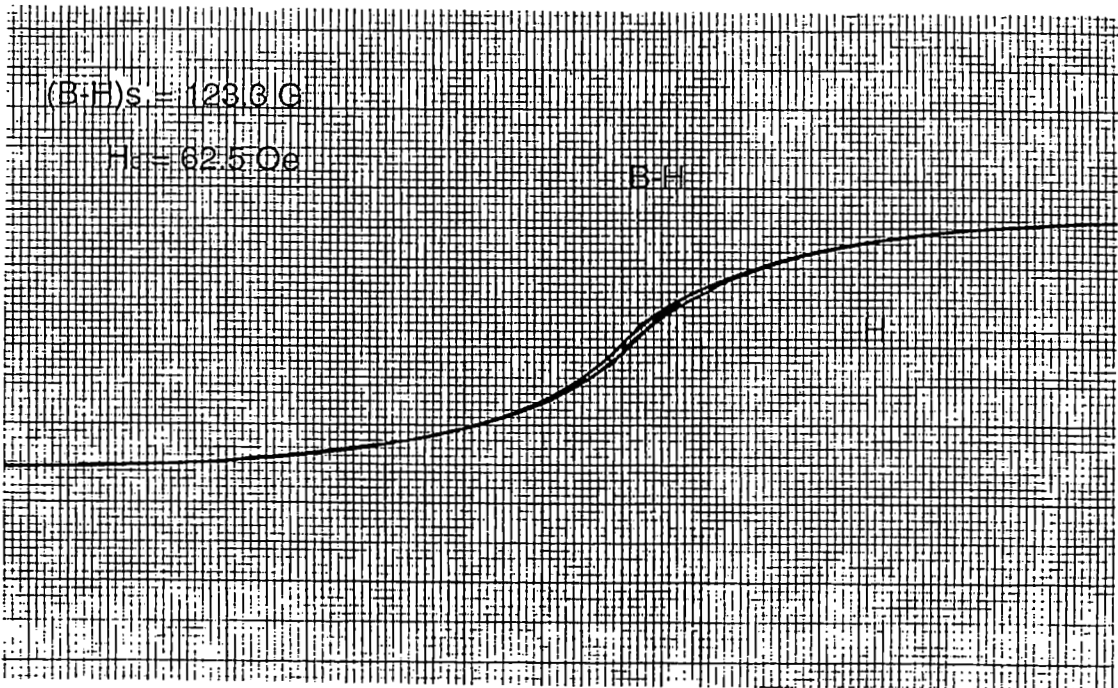
နွဲ 10a



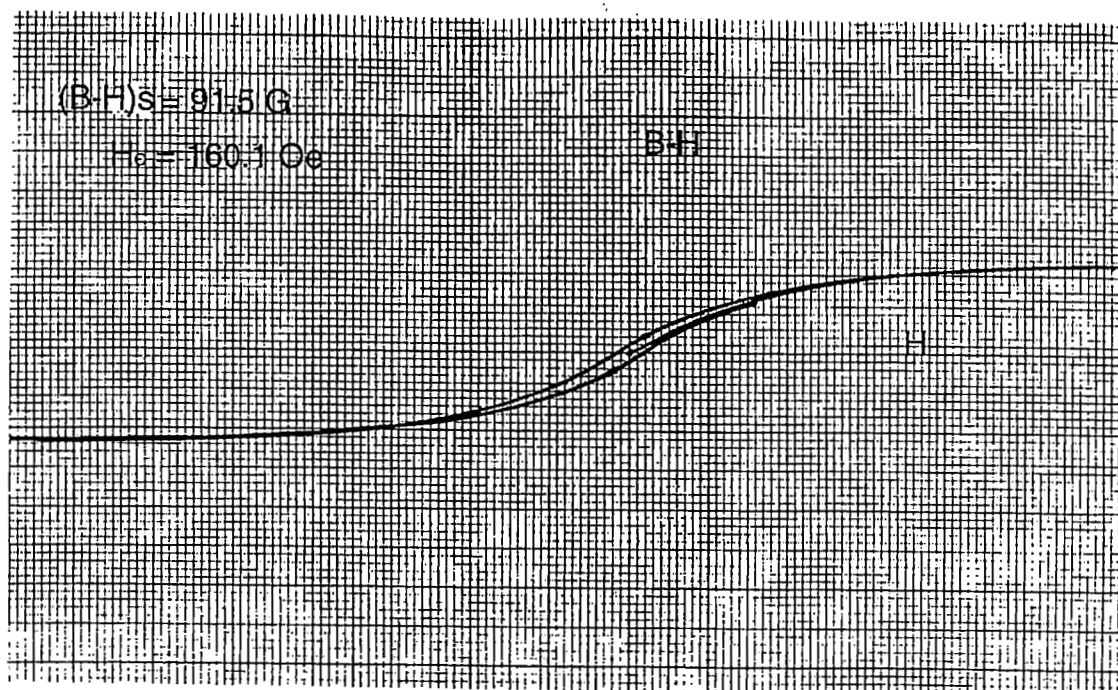
နွဲ 10n



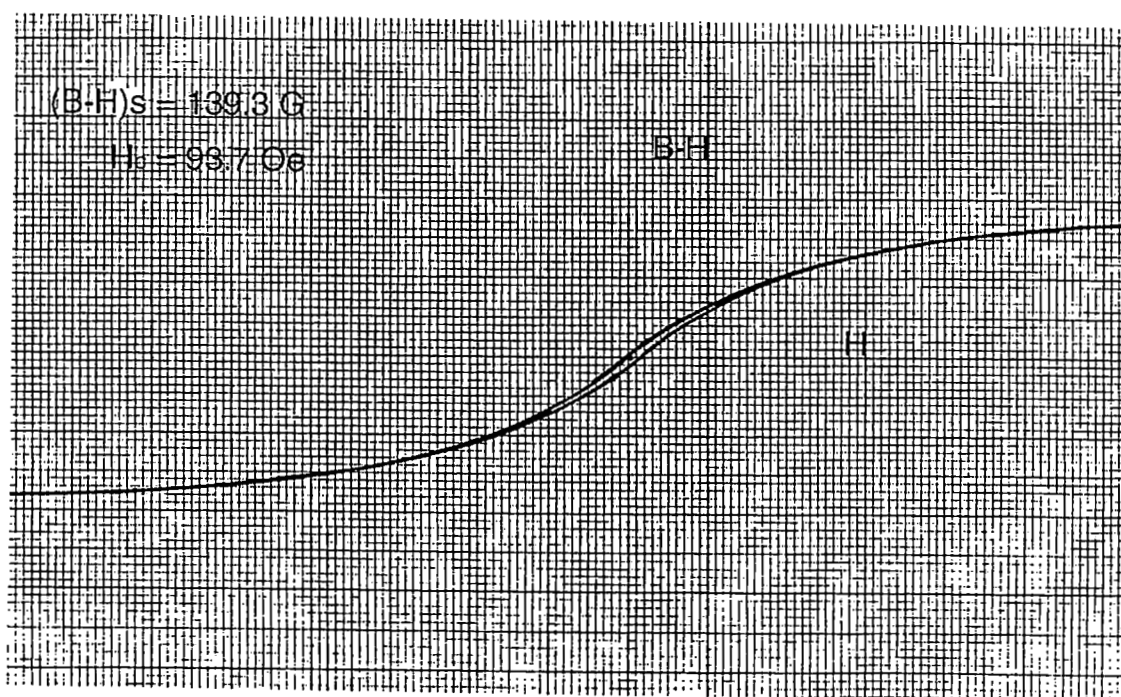
រូប 11a



រូប 11n



រូប 12a



រូប 12n