2. ทฤษฎี

1. การศึกษาไดอิเล็กตริก[1] (dielectric study) ในวงจรไฟฟ้า

1.1 ไดอิเล็กตริกในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งจ่ายไฟฟ้าจ่ายประจุไฟฟ้าให้แก่ตัวเก็บประจุ แผ่นโลหะที่ต่ออยู่กับขั้วบวกจะมีประจุไฟฟ้าบวก แผ่นโลหะที่ต่ออยู่กับขั้วลบจะมีประจุไฟฟ้าลบ ดังรูปที่ 2.1

ภาพ p.7 เล่ม1

รูปที่ 2.1 แสดงปรากการณ์ที่เกิดขึ้นภายในตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจรกระแสตรง [Buchanan, 1991]

โดยที่ประจุบวกและลบนี้เรียกว่า“ประจุอิสระ” (free charge, q_f) ประจุอิสระบวก-ลบนี้จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นซึ่งเรียกว่า”สนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุอิสระ” (free electric field, E_f) สนามไฟฟ้า E_f จะส่งแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนของอะตอมไดอิเล็กตริกแล้วทำให้การกระจายของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสเปลี่ยนจากรูปวงกลมเป็นวงรี จุดศูนย์กลางของประจุบวกของนิวเคลียสกับจุดศูนย์กลางของประจุลบของอิเล็กตรอนจะถูกแยกออกจากกัน มีโมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้า (electric dipole moment, p) เกิดขึ้น ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเรียกว่า ประจุโพลาไรเซชัน[2] (polarization charge, q_r) สนามไฟฟ้า E_f จะส่งแรงกระทำให้โมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้าเรียงตัวขนานกัน มีโพลาไรเซชัน (polarization, P)

---

[1] สารที่มีโพลาไรเซชันเกิดขึ้นในขณะที่ป้อนสนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไป และโพลาไรเซชันจะหายไปเมื่อเอาสนามไฟฟ้าออก

[2] ประจุโพลาไรเซชันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เรียกว่า “ความหนาแน่นประจุโพลาไรเซชัน”

เกิดขึ้นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุโพลาไรเซชัน (polarization charge electric field , E_p) จะเกิดขึ้นสนามไฟฟ้า E_f กับสนามไฟฟ้า E_p จะรวมตัวกลายเป็น $E = E_f + E_p$

1.2 ไดอิเล็กตริกในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

แหล่งจ่ายไฟฟ้าจ่ายประจุไฟฟ้าให้แก่ตัวเก็บประจุ แผ่นโลหะที่ต่ออยู่กับขั้วบวกจะมีประจุไฟฟ้าบวก แผ่นโลหะที่ต่ออยู่กับขั้วลบจะมีประจุไฟฟ้าลบดังรูปที่ 2.2

ภาพ p.8 เล่ม1

รูปที่ 2.2 แสดงปรากการณ์ที่เกิดขึ้นภายในตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจรกระแสสลับ [Buchanan, 1991]

เมื่อวางไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ เราพบว่าพฤติกรรมของไดอิเล็กตริกจะแตกต่างจากกรณีที่อยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในวงจรกระแสไฟฟ้าสลับจะอยู่ในรูปเชิงซ้อน (complex number)

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' + \varepsilon_r'' \quad \text{..... (2.1)}$$

เมื่อ ε_r' เทอมจริง (real part) แสดงถึงปริมาณที่แปรตามพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูญเสียในวัสดุ

ε_r'' เทอมจินตภาพ (imaginary part) จะแสดงถึงปริมาณที่เปลี่ยนแปลงตามพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนโดยไดอิเล็กตริก

2. **สมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริก**[3] (ferroelectric)

2.1 **วงการล้าเฟอร์โรอิเล็กตริก** (ferroelectric hyteresis loop)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชัน (P) กับความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ดังรูปที่ 2.3

ภาพ p.5 **เล่ม3**

รูปที่ 2.3 แสดงวงการล้าเฟอร์โรอิเล็กตริก [ดุสิต,2535]

การมีโดเมนในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กตริก ทำให้เกิด“ วงการล้า ” (hysteresis loop) ในสนามไฟฟ้า จากภาพประกอบที่ 2.3 ซึ่งการเปลี่ยนโพลาไรเซชันที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าภายนอก วงการล้าจะเป็นเส้นกราฟที่ไม่ซ้ำรอยเดิม โดยจะเริ่มต้นจากจุด O ซึ่งเมื่อใส่สนามไฟฟ้า E เข้าไป จะทำให้เกิดโพลาไรเซชันขึ้นในวัสดุ (จะเห็นการเคลื่อนย้ายขอบโดเมน) ผ่านจุด A จนอิ่มตัวที่จุด B และเมื่อสนามไฟฟ้าลดลงจน E = 0 ปรากฏว่าโพลาไรเซชันจะไม่กลับมาที่จุดเริ่มต้น เพราะยังมีโพลาไรเซชันเหลืออยู่ในวัสดุ (remanent polarization,P_R) และถ้าใส่สนามไฟฟ้าในทิศตรงข้าม ($-E_C$) โพลาไรเซชันจะลดลงเหลือศูนย์ เรียกว่า สนามโคเออซิฟ (coersive field[4]) เมื่อเพิ่ม $-E_C$ ต่อไปจนถึงจุด D โพลาไรเซชันจะอิ่มตัวอีกครั้งหนึ่ง และถ้าลดสนามไฟฟ้าจากจุด D จน $-E_C = 0$

---

[3] สารที่มีโพลาไรเซชันเกิดขึ้นในขณะที่ไดรับสนามไฟฟ้าภายนอก และเมื่อนำสนามไฟฟ้าภายนอกออกไปโพลาไรเซชันยังคงค้างอยู่ภายในสาร

[4] สนามไฟฟ้าที่ทำให้โพลาไรเซชันลดลงเหลือศูนย์

ในทำนองเดียวกันพบว่าโพลาไรเซชันยังคงเหลืออยู่ในวัสดุซึ่งถ้ากลับทิศของสนามไฟฟ้าอีกครั้ง และเพิ่มต่อไปเรื่อยๆจนโพลาไรเซชันเพิ่มขึ้นถึงจุด B ก็จะได้วงการล้าครบวงจร (ดุสิต, 2535)

3. ทฤษฎีแถบพลังงาน

ส่วนกลไกการนำไฟฟ้าด้วยทฤษฎีแถบพลังงาน ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแถบพลังงานประกอบด้วยแถบเต็ม และแถบที่ว่างซึ่งแถบทั้งสองถูกแยกจากกันด้วยแถบต้องห้ามที่อุณหภูมิปกติอิเล็กตรอนบางส่วนที่อยู่ในชั้นแถบเต็มจะได้รับพลังงานความร้อนแล้วถูกกระตุ้น (thermal excited) ให้กระโดดขึ้นไปอยู่ในชั้นแถบว่างด้านบนเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปแล้วทำให้เกิดช่องว่างหรือโฮลขึ้นในแถบเต็ม จำนวนของโฮลเท่ากับจำนวนของอิเล็กตรอนที่กระโดดขึ้นไปดังรูปที่ 2.4 ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลนี้จะมีผลในการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากแถบว่างนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดีก็ต่อเมื่อมีอิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปอยู่ เราจึงเรียกแถบนี้ว่า แถบนำไฟฟ้า หรือแถบคอนดักชัน

รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน [ดุสิต,2535]

เมื่อ E_C คือ แถบนำไฟฟ้า หรือแถบคอนดักชัน (conduction band)

E_V คือ แถบที่ว่าง (vacant band)

E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap)

E_F คือ แถบต้องห้าม (forbidden band)

4. เทอร์มิสเตอร์ (thermistor)

เทอร์มิสเตอร์เป็นตัวต้านทานที่ไวต่อความร้อน (thermally sensitive resistor) ซึ่งมีชื่อย่อเป็น TSR เทอร์มิสเตอร์มี 2 ประเภทคือ แบบ PTC และแบบ NTC

4.1 ปรากฏการณ์ NTC (negative temperature coefficient effect)

ปรากฏการณ์ที่ความต้านทานลดลงในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ρ- T ของเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC [Buchanan, 1991]

ปรากฏการณ์นี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC เทอร์มิสเตอร์แบบนี้มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต่านทานเป็นลบ (negative temperature coefficient of resistance, NTCR) สูง เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ที่มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนไปเกิดจากผลของลักษณะสมบัติอินทรินซิค (intrinsic characteristic) สารที่ใช้ทำเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ลักษณะสมบัติเชิงไฟฟ้าของหัววัดถูกกำหนดโดยสูตร ρ = RA/L โดย ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ (material resistivity) R เป็นความต้านทานไฟฟ้า (resistance) A เป็นพื้นที่ยังผล (effective area) และ L เป็นความหนาของสาร สภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ขึ้นกับอุณหภูมิดังสมการ

$$\rho\,(T) = \rho_{\alpha}\exp(B/T) \quad \text{.....(2.2)}$$

เมื่อ ρ (T) เป็นสภาพต้านทานที่อุณหภูมิใดๆ ρ_{α} เป็นค่าที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

B เป็นค่าคงที่ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับพลังงานที่ใช้ไปเพื่อให้อิเล็กตรอนนำกระแส

เมื่อทำการหาอนุพันธ์ของสมการบนจะได้ α ซึ่งเป็นค่า NTCR

$$\alpha = \left(\frac{1}{\rho}\right)\frac{d\rho}{dT} \quad \text{..... (2.3)}$$

หรือ

$$\alpha = \left(\frac{1}{\rho}\right)\left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{T_2 - T_1}\right) \quad \text{.....(2.4)}$$

เมื่อ ρ_1 และ ρ_2 เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ T_1 และ T_2 ตามลำดับ
หรือใช้สูตร

$$\alpha = \left(\frac{1}{R_1}\right)\left(\frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1}\right) \quad \text{.....(2.5)}$$

เมื่อค่า R_1 และ R_2 เป็นความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ T_1 และ T_2 ตามลำดับ

เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC สามารถประยุกต์ทำเป็นหัววัดอุณหภูมิ (temperature sensor) หัววัดการไหลความร้อน (heat flow sensor) หัววัดการแผ่รังสี (radiation sensing sensor) หัววัดสุญญากาศ (vacuum gauge) หัววัดความดัน (pressure gauge) และหัววัดการชดเชยอุณหภูมิ (temperature compensation sensor) (Buchanan, 1991)

4.2 ปรากฏการณ์ PTC (positive temperature coeffcient effect)

เทอร์มิสเตอร์แบบ PTC มีชื่อเรียกอย่างอื่นอาทิเช่น ตัวต้านทานแบบ PTC (PTC resistor) และตัวต้านทานอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature resistor) โดยเทอร์มิสเตอร์แบบนี้มี PTCR สูง ซึ่ง PTCR ย่อมาจากสัมประสิทธิ์อุณหภูมิความต้านทานที่เป็นบวก (positive temperature coffcient of resistance) หรือค่า α ค่า PTCR เทอร์มิสเตอร์แบบ PTC ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น มีความเกี่ยวข้องกับจุดคูรีของเฟอร์โรอิเล็กตริก (ferroelectric Curie point) หรืออุณหภูมิคูรี (Curie temperature,T_C) ดังรูปที่ 2.6

ภาพ p.11 **เล่ม** project

รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log ρ-T ของเทอร์มิสเตอร์แบบ PTC [Buchanan, 1991]

จากภาพในช่วงแรก (AB) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างคงที่หรือแสดง NTCR เล็กน้อย ช่วงอุณหภูมิคูรี (BC) สภาพต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหรือแสดง PTCR และช่วงอุณหภูมิหนึ่ง (CD) สภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงหรือแสดง NTCR อีกครั้ง

$$\text{Log } R = AT + A' \quad \text{.....(2.6)}$$

หรือ

$$A = \left(\frac{\log R/R_0}{T - T_0} \right) \quad \text{.....(2.7)}$$

5. ปรากฏการณ์ให้ความร้อน (heating effect)

ปรากฏการณ์ให้ความร้อน คือ ปรากฏการณ์ที่สารให้ความร้อนเมื่อได้รับไฟฟ้า ส่วนสารให้ความร้อน (heating element) คือ สารที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้ดี อุปกรณ์ให้ความร้อนใช้ทำขดลวดเตาหลอม (furnace element) เมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทาน จะสามารถแบ่งอุปกรณ์ให้ความร้อนได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) อุปกรณ์ให้ความร้อนที่มีความต้านทานต่ำ (lowly resistive element) ซึ่งอุปกรณ์ประเภทนี้ ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันต่ำ (low voltage power supply)
2) อุปกรณ์ให้ความร้อนที่มีความต้านทานสูง (highly resistive element) ซึ่งอุปกรณ์ประเภทนี้ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันสูง (high voltage power supply)

6. ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กตริก (thermoelectric effect)

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กตริกเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าและความร้อน เมื่อเรานำโลหะต่างชนิดกัน 2 ชนิดมาประกบเป็นวงจรปิดดังรูปที่ 2.7 และถ้าอุณหภูมิที่รอยต่อมีความแตกต่างกัน 2 แห่ง คือ Th(K) และ Tc(K) จะเกิดความต่างศักย์ที่แปรตรงกับค่า Th-Tc เราเรียกความต่างศักย์นี้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าความร้อน (thermoelectromotive force)

รูปที่ 2.7 การทดลองเทอร์โมอิเล็กตริก [ดุสิต,2535]

การเกิดเทอร์โมอิเล็กตริก (thermoelectric generation) เป็นการแปลงพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่า Z ดังสมการ

$$Z = \sigma^2\alpha/k \quad \text{.....(2.8)}$$

เมื่อ α เป็นสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient)

σ เป็นสภาพนำไฟฟ้า (electric conductivity)

k เป็นสภาพนำความร้อน (thermal conductivity)

สำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กตริกที่ดีพบว่า Z, α และ σ มีค่ามาก แต่ k มีค่าน้อย วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์กำเนิดเทอร์โมอิเล็กตริก (thermoelectric generator) จะต้องมีค่า Z มาก ตัวอย่างสารที่ใช้

ทำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูง (high temperature thermoelectric material) ได้แก่ $FeSi_2$, $CrSi_2$, SiC และ ZnO เป็นสารที่มีสภาพนำไฟฟ้าดีในช่วงอุณหภูมิกว้าง

7. สมบัติเฟอร์โรแมกนีติก (ferromagnetics)

เมื่อใส่หรือวางแท่งเหล็กในสนามแม่เหล็ก พบว่าแท่งเหล็กนั้นจะกลายเป็นแม่เหล็กทันที และจะแสดงขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) เมื่อนำแท่งเหล็กออกจากสนามแม่เหล็ก แท่งเหล็กนั้นยังคงมีความเป็นแม่เหล็ก (อ่อน) เหลืออยู่ เราเรียกแท่งเหล็กนั้นว่า “แม่เหล็กเฟอร์โร” ซึ่งสารแม่เหล็กมี 2 ประเภท คือ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetics materals) กับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริ (ferrimagnetics materals) ซึ่งสารแม่เหล็กทั้งสองจะแสดงปรากฏการณ์ต่างๆดังนี้

7.1 ปรากฏการณ์วงการล้า (hysteresis effect)

รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะสมบัติทางแม่เหล็กของเฟอร์โรแมกเนติก [ดุสิต,2535]

จากรูปที่ 2.8 แนวนอนคือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) และในแนวตั้งคือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก(B) ที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุ เริ่มจากการนำวัสดุที่ยังไม่เคยได้รับสนามแม่เหล็กมาก่อนมาวางในสนามแม่เหล็ก จากนั้นเพิ่มสนามแม่เหล็กจากศูนย์ไปเรื่อยๆ วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกจะเริ่มเป็นแม่เหล็ก โดยมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามแนวเส้น ABC และเมื่อเราลดค่าสนามแม่เหล็กลง ลักษณะเส้นกราฟของฟลักซ์แม่เหล็กจะลดลงแต่ไม่ซ้อนเส้นเดิมคือ จะลดลงไปตามแนวเส้น CD ค่า B_r (ที่ D) คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (residual magnetic flux density) ที่เกิดขึ้น

แม้สนามแม่เหล็กจะเป็นศูนย์ การทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กเป็นศูนย์ได้ต้องเปลี่ยนขั้วของสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามกับเดิมไปอยู่ที่ H_C เราเรียก H_C ว่า แรงโคเออซิฟซึ่งแสดงขนาดของสนามแม่เหล็กที่จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ได้

ลักษณะความอ้วนหรือผอมของกราฟ B-H นี้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุแม่เหล็ก โดย แบ่งเป็นสองชนิด ดังรูปที่ 2.9

รูปที่ 2.9 เส้นโค้งวงการล้าของวัสดุ 2 ชนิด [ดุสิต,2535]

1. วัสดุที่มีค่า B เพิ่มขึ้นขณะที่เพิ่ม H เรียกว่า วัสดุแม่เหล็กอ่อน (soft magnetic material) จะแสดงอำนาจแม่เหล็กเฟอร์โร

2. วัสดุที่มีค่าแรงโคเออซิฟ (H_C) สูงเรียกว่า วัสดุแม่เหล็กแข็ง (hard magnetic material) จะแสดงอำนาจแม่เหล็กเฟอร์ริ

วัสดุแม่เหล็กอ่อนมีคุณสมบัติมีค่าสภาพซาบซึมได้สูงสุด (maximum permeability) สูงและพื้นที่ในเส้นโค้งการล้ามีค่าน้อย ได้แก่ เหล็กบริสุทธ์, silicon steel, permalloy, เฟอร์ไรต์ของ Mn-Zn ใช้เป็นแกนในหม้อแปลงและมอเตอร์ได้ ส่วนวัสดุแม่เหล็กแข็งมีคุณสมบัติมีค่าสภาพซาบซึมได้สูงสุด ดังนั้นจึงนิยมใช้เป็นวัสดุของแม่เหล็กถาวร ได้แก่ carbon steel, KS steel, KM steel และเฟอร์ไรต์ของ Ba เป็นต้น

7.2 **โดเมนแม่เหล็ก** (magnetic domain)

ถ้านำวัสดุเฟอร์โรอิเล็กตริกมาขัดผิวให้เรียบ แล้วโรยผงเหล็กออกไซด์ลงบนผิวนั้น พบว่ามีการแบ่งเขตย่อยๆ โดยในแต่ละเขตมีแมกนีไตเซชันที่สม่ำเสมอ เรียกเขตย่อยว่า “โดเมนของแม่เหล็ก” ดังรูปที่ 2.10

รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของโดเมนบนราบ (001) ของผลึกเหล็ก [ดุสิต,2535]

ซึ่งในแต่ละโดเมนมีแมกนีไตเซชันที่แตกต่างกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “แมกนีไตเซชันอิ่มตัว” (spontaneous magnetization) ดังรูปที่ 2.11

รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของโดเมนชนิดต่างๆ [ดุสิต,2535]

7.3 กลไกการเป็นแม่เหล็ก

จากกราฟวงการล้าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง M (B) และ H เมื่อเพิ่มค่า M ค่า H ค่อยๆ เพิ่มตามและจะอิ่มตัวในที่สุด ปรากฏการณ์ค่อยๆเพิ่มขึ้นของ M นี้สามารถอธิบายเจากการหมุนตัวของโดเมนและการเคลื่อนย้ายมราของกำแพงโดเมน ดังรูปที่ 2.12

รูปที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนค่าแมกนีไตเซชันของโคบอลท์ [ดุสิต,2535]

เมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กเข้าไปในทิศทาง [0001] หรือแกน C ทำให้โคบอลท์กลายเป็นแม่เหล็กได้ง่ายและอิ่มตัวเร็ว เรียกแกนวัสดุที่เป็นกลายเป็นแม่เหล็กได้ง่ายว่า แกนแม่เหล็กง่าย ส่วนกรณีเพิ่มสนามแม่เหล็กในทิศทาง [1010] พบว่าเป็นแม่เหล็กได้ยาก เรียกแกนวัสดุที่เป็นกลายเป็นแม่เหล็กได้ยาก แกนแม่เหล็กยาก

7.4 สาเหตุของการเกิดแม่เหล็ก

สาเหตุของการเกิดแม่เหล็กมี 2 ประการ คือ

1. การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปในทิศทางใดๆ จะทำเกิดกระแสไฟฟ้าไหล และกระแสไฟฟ้านั้นทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก
2. การหมุนรอบตัวเอง เรียกว่า สปิน (spin) ของอิเล็กตรอน ทำเกิดโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment)

สาร $CoFe_2O_4$ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบสปินเนล (spinel structure) มีอุณหภูมิคูรี = 520 ^{0}C มีแมกนีไตเซชันอิ่มตัว = 5000 gauss ที่ 20 ^{0}C (Buchanan, 1991) และสารตัวอย่างเป็นแม่เหล็กเฟอร์ริ (Fayek, 1992) โดยสารมีค่าแมกนีไตเซชันไม่เป็นศูนย์ จะมีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้นเสมอ ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{u}}{V} \quad \text{.....(2.9)}$$

และ

$$\vec{u} = \vec{u_L} + \vec{U_S} \quad \text{.....(2.10)}$$

เมื่อ M คือ แมกนีไตเซชัน

$\sum \vec{u}$ คือ ผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็ก

V คือ ปริมาตรของสาร