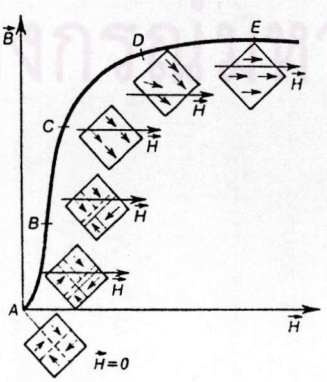
บทที่ 2
ความรู้เบื้องต้นทางวิชาการ

2.1 เฟอร์ไรท์ (Ferrite)

เฟอร์ไรท์จัดเป็นวัสดุที่ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุแม่เหล็ก (Magnetic Meterial) กันอย่างกว้างขวาง มีการปรับปรุงสมบัติของเฟอร์ไรท์ให้เหมาะสมกับการใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น เครื่องแปลงไฟฟ้า (Transformer) สวิทชิงโมด เพาเวอร์ซัพพลาย (Switching mode Power Supply) อินเวอร์เตอร์ (Inverters) คอนเวอร์เตอร์ เพาเวอร์ ซัพพลาย เป็นต้น เนื่องจากข้อดีที่เฟอร์ไรท์มีประสิทธิภาพดีเมื่อใช้งานที่ความถี่มากกว่า 60 เฮิร์ท (Hz) มีขนาดเล็ก สามารถใช้ได้กับทั้งกระแสไฟสลับและกระแสไฟตรง สิ่งเหล่านี้จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่มีการยอมรับเฟอร์ไรท์กันอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมปัจจุบัน

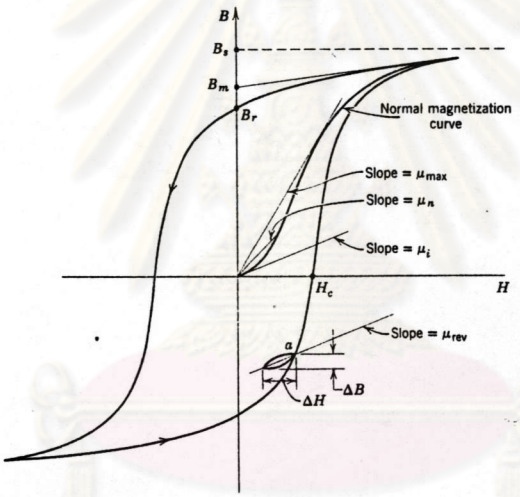
เฟอร์ไรท์จัดเป็นเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) ที่มีสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ของออกไซด์ผสมโดยมี Fe_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักเนื้อสารประกอบด้วย โดเมน (domain) เล็ก ๆ ที่มีโมเมนต์แม่เหล็กหันไปในทิศทางเดียวกัน และมีหลาย ๆ โดเมน เมื่อสารแม่เหล็กถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กโดยการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก โดเมนเหล่านี้ก็จะค่อย ๆ เปลี่ยนทิศทางให้โมเมนต์แม่เหล็กอยู่ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก ดังภาพที่ 1 เมื่อ $\vec{B}$ คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnatic Flux density) และ $\vec{H}$ คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field strength)



ภาพที่ 1 แสดงการเปลี่ยนทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็ก เมื่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเปลี่ยนแปลงโดเมนเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนขึ้นอยู่กับการเพิ่มหรือลดความเข้มสนามแม่เหล็ก ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหากค่อย ๆ เพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ในช่วงแรก ๆ ขณะที่โดเมนยังไม่เปลี่ยนทิศทาง ถ้าเอาสนามแม่เหล็กออก โดเมนก็จะกลับไปสู่จุดเริ่มต้นได้ ความชัน (Slope) ในช่วงนี้เราเรียกว่า ความชิมชาบทางแม่เหล็ก (Initial Permeability, μ_{inc}) ถ้าเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กต่อไปจะทำให้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ($\vec{B}$) เพิ่มมากขึ้น จะได้ค่าความชันสูงสุด (μ_{max}) และในที่สุดโดเมนก็จะหมุนตัวไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก สารแม่เหล็กถูกเหนี่ยวนำถึงจุดอิ่มตัว



ภาพที่ 2 แสดงสมบัติทางแม่เหล็ก และฮีสเตอรีซีส ลูป ที่เกิดจากปฏิกิริยาของโดเมน

โดยอาศัยทฤษฎีเดียวกัน เมื่อลดความเข้มสนามแม่เหล็กลงค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ($\vec{B}$) จะไม่กลับไปที่ศูนย์ แต่จะหยุดค้างอยู่ที่ Br (Remanence) เนื่องจากผลการเรียงตัวของโดเมน เมื่อสนามแม่เหล็กถูกเปลี่ยนทิศทางต้องใช้ความเข้มโคเออซีพฟอร์ค (Coercive force, Hc) เข้ามาเหนี่ยวนำเพื่อให้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ แต่ไม่ตรงตำแหน่งเดิม และการที่สนามแม่เหล็กเปลี่ยนทิศทางกลับไปกลับมาเช่นนี้ ทำให้เกิดฮีสเตอรีซีส ลูป ดังภาพที่ 2 และฮีสเตอรีซีส ลูปนี้ จะเป็นลักษณะเฉพาะของเฟอร์ไรท์ชนิดหนึ่ง ๆ เท่านั้น

เฟอร์ไรท์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ซอฟท์ เฟอร์ไรท์ (Soft Ferrite) และฮาร์ด เฟอร์ไรท์ (Hard Ferrite)

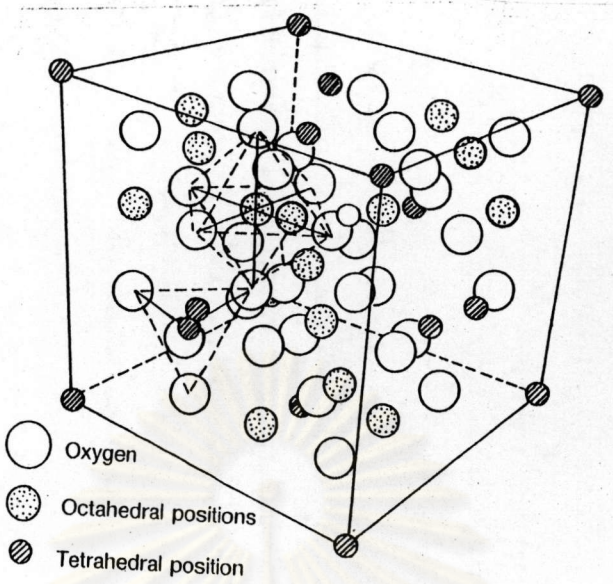
ก. ซอฟท์ เฟอร์ไรท์ จัดเป็นวัสดุที่ทำให้เป็นแม่เหล็กได้ง่าย จะสูญเสียความเป็นแม่เหล็กเมื่อเอาสนามแม่เหล็กออก มีความซึมซาบทางแม่เหล็ก (Permeability) สูง ฮีสเตอรีซีส ลูป (Hysteresis loop) แคบ ค่าโคเอร์ซีพ ฟอร์ค (Coercive force) ต่ำ เฟอร์ไรท์ที่ใช้กันแพร่หลายมากได้แก่ แมงกานีส-ซิงค์ เฟอร์ไรท์ (Manganese-Zinc Ferrite) ซึ่งมีคุณภาพดีเมื่อนำไปใช้งานที่ความถี่ 1 ถึง 1500 กิโลเฮิร์ท (kHz) และนิเกิล-ซิงค์ เฟอร์ไรท์ (Nikel-Zine Ferrite) ซึ่งใช้งานได้ดีที่ความถี่ 0.1 ถึง 200 เมกะเฮิร์ท (MHz)

ข. ฮาร์ด เฟอร์ไรท์ สารแม่เหล็กพวกนี้จะมีค่าโคเออร์ซีพ ฟอร์ดสูง มีสมบัติทางแม่เหล็กสูง ตัวอย่างของฮาร์ด เฟอร์ไรท์ เช่น แบเรี่ยม เฟอร์ไรท์ (Barium Ferrite) สตรอนเทียม เฟอร์ไรท์ (Strontium Ferrite) เป็นต้น

แมงกานีส-ซิงค์ เฟอร์ไรท์ จัดเป็นสารแม่เหล็กประเภท ซอฟท์ เฟอร์ไรท์ มีโครงสร้างเป็น สไปเนล (Spinel) ชนิด อินเวิร์ส สไปเนล (Inverse Spinel) มีสูตรทั่วไปคือ AB_2O_4 ลักษณะหน่วยเซลเป็นรูปลูกบาศก์ (Cubic) องค์ประกอบที่สำคัญของแมงกานีส-ซิงค์ เฟอร์ไรท์ คือ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แมงกานีส ออกไซด์ (Mn_3O_4) และซิงค์ ออกไซด์ (ZnO) สำหรับเหล็กออกไซด์ควรมีปริมาณมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์โมล เนื่องจากเหตุผลเพื่อเปลี่ยนสถานะไปเป็น FeO เพื่อปรับสมบัติบางประการทางแม่เหล็ก ส่วนแมงกานีสออกไซด์ และ ซิงค์ ออกไซด์ สามารถเปลี่ยนได้หลายค่าตามความเหมาะสม

Material	Saturation flux density (gausses)	Resistivity (ohm-cm)
Iron	21500	10×10^{-6}
Silicon-Iron	20000	50×10^{-6}
79% Nickel Iron	8000	55×10^{-6}
Mn-Zn Ferrite	4000–5000	10^2–10^3
Ni-Zn Ferrite	3000–4000	10^4
Yttrium,-Iron Garnet	1750	10^{10}–10^{12}

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ



ภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบสไปเนล

2.2 แกนแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ (Ferrite Core)

จัดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในเครื่องแปลงไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำหรือทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กขึ้นบนแกนเฟอร์ไรท์ มีผลทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์ (Flux density) สูงกว่าการเหนี่ยวนำเป็นแกนเหล็กธรรมดามาก เนื่องจากเฟอร์ไรท์มีค่าอิ่มตัวฟลักซ์แม่เหล็ก (Saturation Magnetic Flux) ที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 3,000 กับ 4,000 เกาส์ จึงได้มีการพัฒนาเพื่อนำแกนแม่เหล็กเฟอร์ไรท์มาใช้ในเครื่องแปลงไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหม้อแปลงสวิทชิ่ง (Switching Transformer)

เป็นที่ทราบกันดีว่า การใช้แกนภายในเครื่องแปลงไฟฟ้าซึ่งเป็นโลหะในหลายทศวรรษที่ส่วนมากพบว่า ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการในการควบคุมการสูญเสียพลังงานให้อยู่ในอัตราต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เห็นได้ชัด คือ เอ็ดดีเคอเรนท์ ลอส วิธีการเก่าที่จะปรับปรุงแกนโลหะเพื่อลดการสูญเสียพลังงานทำได้โดยการนำเอาโลหะแผ่นบาง ๆ หลาย ๆ แผ่นมาอัดซ้อนหลาย ๆ ชั้น หรืออาจใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบาง ๆ ของธาตุโลหะบางชนิดลงบนแผ่นโลหะ หรืออาจนำแผ่นโลหะไปผ่านขบวนการทางความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในสภาวะสูญญากาศ หรืออาจผสมธาตุบางชนิดเข้าไป เช่น ซิลิคอน ก็สามารถลดการสูญเสียพลังงานได้ดีในระดับหนึ่งโดยเฉพาะในความถี่ที่ค่อนข้างต่ำ (ไม่เกิน 10 kHz)

แมงกานีส-ซิงค์ เฟอร์ไรท์ จึงเป็นวัสดุตัวหนึ่งที่ได้รับคิดค้น พัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทน และพบว่ามีความเป็นได้สูงในการลดการสูญเสียพลังงานภายในแกนเครื่องแปลงไฟฟ้า (Transformer Core) ในช่วงความถี่ใช้งานที่สูงขึ้น กล่าวคือ แกนเครื่องแปลงไฟฟ้าที่ทำจากแมงกานีส-ซิงค์ เฟอร์ไรท์ จะให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูง และค่าการสูญเสียพลังงานที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับแกนเครื่องแปลงไฟฟ้าแบบเก่าที่ทำจากโลหะ

2.3 แม่เหล็กและการสูญเสียพลังงาน (Magnetic and Power loss)

การนำเฟอร์ไรท์ไปทำเป็นแกนในเครื่องแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้ในระบบงานการโทรคมนาคม และไฟฟ้ากำลังนั้น ในแง่ทฤษฎีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก (Initial Permeability) นับว่าเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรก แต่ในทางปฏิบัติแล้ว เรื่องการสูญเสียพลังงานจะถูกจัดให้มีความสำคัญเป็นอันดับแรก

การสูญเสียพลังงาน (Power loss) เป็นที่ทราบกันดีว่า การสูญเสียพลังงานของแม่เหล็กภายในแกน (Core loss) สามารถแบ่งออกได้ 3 แบบ คือ

ก. เอ็ดดี เคอเรนท์ ลอส (Eddy Current loss) เกิดจากกระแสไหลวนภายในแกนเนื่องจากการเหนี่ยวนำในแกนเองประกอบกับภายในแกนเองจะมีความต้านทานอยู่ด้วย ดังนั้นจะเกิดกำลังไฟฟ้า (I^2R) ขึ้นในแกนและแสดงผลออกมาในรูปของความร้อน

เอ็ดดี เคอเรนท์ ลอส สามารถลดได้โดยการปรับปรุงสมบัติของเกรนและขอบเกรนภายในโครงสร้างจุลภาค

ข. ฮีสเตอรีซีส ลอส (Hysteresis loss) เกิดจากการกลับตัวของฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนเนื่องจาอิทธิพลของขั้วแม่เหล็ก ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในแกนกลางเป็นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อแกนหมุนตัวผ่านขั้วเหนือ และขั้วใต้ทำให้เกิดการกลับของฟลักซ์แม่เหล็กที่แกน ทำให้เกิดความสูญเสียขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าการสูญเสียที่เกิดจากความถี่ใช้งานโดยตรง

ฮีสเตอรีซีส ลอส สามารถทำให้ลดลงได้โดยการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมี หรือ ปรับปรุงความหนาแน่นให้สูงขึ้น และ/หรือ ลดความเค้น (Stress) ภายในเกรน และบริเวณขอบเกรน

ค. เรสชิดอล ลอส (Residual loss) เป็นความสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากผ่านการใช้งาน และสัมบัติของแกนโดยตรง อย่างไรก็ตามจะไม่ค่อนคำนึงถึงเนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียพลังงานแบบอื่น

โดยทั่วไปการสูญเสียพลังงาน (P_B) คือ ผลรวมของการสูญเสียพลังงานทุกชนิด เช่น เอ็ดดี เคิเรนท์ ลอส (Pe) ฮีสเตอรีซีส ลอส (Ph) และเรสชิดอล ลอส (Pr) จึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$P_B = Ph + Pe \qquad \ldots\ldots(1)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า P_B-Ph ก็คือ เอ็ดดี เคอเรนท์ ลอส (Pe) นั่นเอง

$$P_B - Ph = Pe$$

เมื่อนำมาประกอบเข้ากับเทอมของความถี่ จะนำไปสู่ผลที่เป็นปฏิภาคกับค่าความต้านทานไฟฟ้า (ρ) ดังนั้น

$$P_B - Ph = Pe = (\pi^2/4)\, R^2 f^2 Bm^2/\rho \qquad \ldots\ldots(2)$$

เมื่อ R = ขนาดวงจรของเอ็ดดี เคอเรนท์

f = ความถี่ใช้งาน

Bm = ค่าแมกเนติค ฟลักซ์

f = ค่าความต้านทาน

จากสูตรข้างบน สามารถสรุปได้ว่า ถ้าหากค่าความต้านทานไฟฟ้า (ρ) มีค่าสูงขึ้น ค่าเอ็ดดี เคิเรนท์ ลอส (Pe) ก็จะมีค่าต่ำลง

แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากพิจารณาในแง่ทฤษฎีเกี่ยวกับการสูญเสียพลังงานภายในแกน จะพบว่า คอร์ลอส (Pe) เกิดจากการเพิ่มขึ้นของฟังค์ชัน ฮีสเตอรีซีส ลอส (Ph) และเอ็ดดี เคอเรนท์ ลอส (Pe) นั่นคือ

$$Pc = f\,(Ph, Pe) \qquad \ldots\ldots(3)$$