

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวมาจากอาร์เอฟไอดีทำให้เกิดผลกระทบต่อหัวอ่านในกระบวนการเขียนข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เรียกว่า ป็อปปคอนนอยส์ โดยได้ทำการศึกษารูปร่างของสายอากาศอาร์เอฟไอดีและระยะการติดตั้งอาร์เอฟไอดี ทำให้เห็นว่ารรัศมีของสายอากาศอาร์เอฟไอดีและตำแหน่งการวางหัวอ่าน เช่น ระยะห่างและมุมการวางระหว่างหัวอ่านกับสายอากาศอาร์เอฟไอดี โดยสัญญาณรบกวนป็อปปคอนจะมีผลกระทบมากที่ตำแหน่งมุม 90 องศา [1]

ศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากโทรศัพท์ต่อหัวอ่านแบบGMR และเครื่องมือทดสอบ โดยทดสอบกับคลื่นโทรศัพท์อยู่ 3 แบบ คือ AMPS ส่งสัญญาณในย่านความถี่ 800MHz TDMA (Time Domain Multiplex Access) ส่งสัญญาณในย่านความถี่อยู่ 2 ย่านคือ 800/900MHz และ 1800/1900MHz ส่วน CDMA (Code Division Multiplex Access) ส่งสัญญาณในย่านความถี่ประมาณ 800MHz โดยสัญญาณทั้ง 3 แบบทำให้เกิดความเสียหายต่อหัวอ่านGMR ซึ่งเกี่ยวข้องกับระยะและความถี่ของสัญญาณหากสัญญาณอยู่ในบริเวณใกล้กับหัวอ่าน GMR และมีความถี่สูงจะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงาน(ESD) ไปยังหัวอ่านจึงทำให้หัวอ่านเกิดความเสียหายได้ [2]

ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาของฟิวไลหะที่ส่งผลกระทบต่อระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูง โดยใช้โปรแกรม HFSS9.0 ในการจำลองผลการทดลองและการวิเคราะห์คุณลักษณะของสนามแม่เหล็กที่อยู่ใกล้แผ่นโลหะของระบบอาร์เอฟไอดีความถี่ 13.56MHz โดยได้จำลองสถานการณ์ของระบบอาร์เอฟไอดีอยู่ 2 แบบ คือกรณีมีแผ่นเฟอร์ไรท์และไม่มีแผ่นเฟอร์ไรท์ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแผ่นเฟอร์ไรท์สามารถทำให้ทิศทางและขนาดของสนามแม่เหล็กที่อยู่ใกล้กับตัวแท็กส์ของอาร์เอฟไอดีมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับไม่มีแผ่นเฟอร์ไรท์ [3]

ได้ทำการทบทวนบทความต่างๆ ที่เกี่ยวกับผลของคลื่นสัญญาณอาร์เอฟ ซึ่งมีผลต่อการเกิดความร้อนขึ้นระหว่างกระบวนการถ่ายภาพแบบเอ็มอาร์ เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กความถี่สูงจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นเนื่องมาจากกระแสไหลวนซึ่งเป็นผลให้ภาพถ่ายจากเครื่องเอ็มอาร์มีความผิดเพี้ยนไป [4]

2.2 ทฤษฎีสถานแม่เหล็กไฟฟ้า [5]-[6]

2.2.1 กระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current and Current Density)

กระแสไฟฟ้า(หน่วยเป็นแอมป์) โดยทั่วไปหมายถึง การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าไปตามตัวสื่อนำไฟฟ้านานหนึ่งวินาที ถ้าใช้ “I” เป็นสัญลักษณ์ของกระแสไฟฟ้า จะได้ว่า

$$I = \frac{Q}{t} \text{ แอมป์}$$

ค่า Q หมายถึง ประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอมบ์
t หมายถึง เวลาเป็นวินาทีที่ให้ประจุไฟฟ้า Q คูลอมบ์ ไหลบนตัวสื่อนำไฟฟ้า
เขียนในรูปอนุพันธ์ จะได้

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

กระแสไฟฟ้านั้นเป็นปริมาณทางสเกลาร์คือมีเฉพาะขนาดเท่านั้น ถ้าจะมองหรือพิจารณากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ณ จุดใดๆ บนตัวสื่อนำไฟฟ้า มักนิยมใช้ปริมาณทางเวกเตอร์ตัวหนึ่งเป็นหลัก ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า คำนิยามของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1 แอมป์ต่อตารางเมตร หมายถึง กระแสไฟฟ้า 1 แอมป์ ไหลผ่านตัวสื่อนำไฟฟ้าที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางเมตร ถ้าให้ $\vec{J}$ เป็นสัญลักษณ์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า จะได้

$$\Delta I = \vec{J} \cdot \Delta \vec{S} \tag{2.1}$$

$\vec{J}$ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีทิศทางเดียวกับพื้นที่หน้าตัด $\Delta \vec{S}$
เขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$I = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{S} \tag{2.2}$$

2.2.2 เส้นแรงแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

สมการของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วางอยู่ในอากาศ คือ

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{2.3}$$

เมื่อ $\overline{B}$ คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น Wb/m^2

$$1 \text{ Wb/m}^2 = 1,000 \text{ gauss} = 1 \text{ Tesla}$$

μ_0 คือ Permeability of free space มีค่าคงที่

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Henry/m}$$

เมื่อ $\overline{H}$ คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นแอมป์/เมตร

สำหรับค่าของ $\overline{B}$ ที่ไหลในแกนเหล็กมีสมการดังนี้

$$\overline{B} = \mu \overline{H} \text{ wb/พท.หน้าตัดของแกนเหล็กเป็นตารางเมตร}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\mu_r = \text{Relative permeability ของเหล็ก}$$

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเรียกสั้นๆว่า “สนามแม่เหล็ก $\overline{B}$ ” เป็นปริมาณทางเวกเตอร์ ถ้าจะเปรียบเทียบสนามแม่เหล็ก $\overline{B}$ ก็คล้ายกับความหนาแน่นสนามไฟฟ้า $\overline{D}$ ในเรื่องของไฟฟ้าสถิตยน์เอง คือ $\overline{D} = \epsilon \overline{E}$ ส่วน $\overline{B} = \mu \overline{H}$ จะเห็นว่าสนามแม่เหล็ก $\overline{B}$ ก็มีลักษณะคล้ายๆ กับสนามไฟฟ้า $\overline{D}$

กำหนดว่า ϕ คือเส้นแรงแม่เหล็ก หาค่าของ ϕ ได้ดังนี้

$$\phi = \int_S \overline{B} \cdot d\overline{S} \text{ wb} \dots\dots\dots (2.4)$$

จะเห็นว่าสมการ 2.4 ก็คล้ายๆ กับสมการสนามไฟฟ้าคือ $\phi = \int_S \overline{D} \cdot d\overline{S}$ ในเรื่องของไฟฟ้าสถิตยน์เอง จะต่างกันก็เป็นการอินทิกรัลคือกรณีของสนามแม่เหล็กเป็นการอินทิกรัลพื้นที่หน้าตัด ส่วนสนามไฟฟ้าเป็นการอินทิกรัลพื้นที่ผิวแบบปิด

2.2.3 กฎของไบโอท ซาวาร์ต

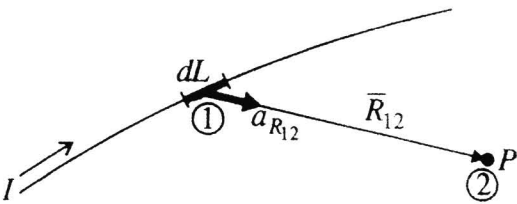
สมมุติมีกระแสไฟฟ้าตรงไหลไปตามวัสดุสื่อำไฟฟ้าที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กมาก “เส้นลวดไฟฟ้า” โดยทั่วไปแล้วก็คือวัสดุสื่อำไฟฟ้ารูปทรงกระบอกตันที่ยาวมาก ฉะนั้นเมื่อเทียบกับความยาวของมันแล้ว พื้นที่หน้าตัดจึงมีขนาดเล็กมาก

สมมุติมีกระแสไฟฟ้าตรง I ไหลบนเส้นลวดไฟฟ้าที่ยาวมาก ย่อมเกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ บริเวณที่เส้นลวดไฟฟ้าวางอยู่ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ไบโอท ซาวาร์ตบอกว่ามันจะเป็นสัดส่วน

โดยตรงกับ ผลคูณของกระแสไฟฟ้า กับระยะทางที่กระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านและเป็นสัดส่วนผกผันกับ ระยะทางยกกำลังสองระหว่างจุดที่ต้องการหาสนามแม่เหล็กกับจุดที่กระแสไฟฟ้า I ผ่าน นั่นคือ

$$d\overline{H} = \frac{Id\overline{L} \times \hat{a}_R}{4\pi R^2} \dots\dots\dots (2.5)$$

- เมื่อ $d\overline{H}$ หมายถึง ความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นเวกเตอร์ มีหน่วยเป็นแอมป์ต่อความยาว
เส้นลวดไฟฟ้าหนึ่งเมตร
 - $\hat{a}_R$ หมายถึง ยูนิตเวกเตอร์ทิศทางเริ่มจากจุดที่กระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านไปยังจุดที่
ต้องการหาค่าสนามแม่เหล็ก $d\overline{H}$
 - $d\overline{L}$ หมายถึง ระยะทางและทิศทางกระแสไฟฟ้า I ไหล
 - R หมายถึง ระยะจากที่ $Id\overline{L}$ ผ่าน กับจุดที่ต้องการหาค่า $d\overline{H}$
- รูปที่ 2.1 ข้างล่างแสดงจุดที่ $Id\overline{L}$ ผ่าน (จุด 1 และจุดที่ต้องการหาค่า $d\overline{H}$ (ที่จุด2))



รูปที่ 2.1 แสดงการหาความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าตรง I ตามกฎของไบโอท ซาวาร์ต ทิศทางของ $d\overline{H}_2$ จะพุ่งเข้าไปในกระดาษ และทำมุม 90 องศากับกระดาษ อีกด้วย

จากรูปที่ 2.1 อาศัยหลักการของไบโอท ซาวาร์ต จะได้

$$d\overline{H}_2 = \frac{Id\overline{L} \times \hat{a}_{R12}}{4\pi R_{12}^2} \dots\dots\dots (2.6)$$

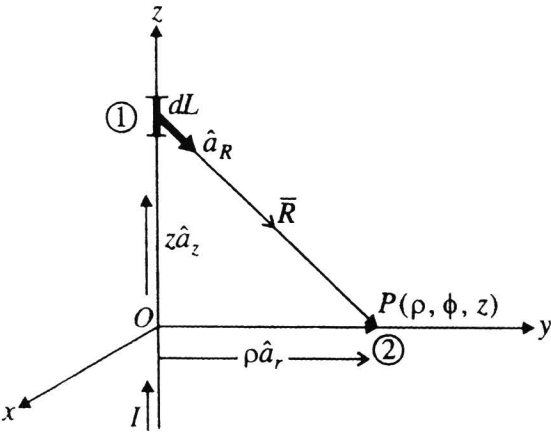
- ถ้า $d\overline{H}_2$ คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุด (2) ซึ่งเกิดจาก $Id\overline{L}$ ที่จุด(1)
- $\hat{a}_{R12}$ คือ ยูนิตเวกเตอร์ทิศทางเริ่มจากจุด (1) พุ่งไปที่จุด (2)
- R_{12} คือ ระยะห่างระหว่างจุด (1) กับจุด (2)

จะเห็นว่ากฎของไบโอท ซาวาร์ท ก็คือ กฎของแอมแปร์สำหรับกระแสไฟฟ้านั่นเอง
เมื่อพูดถึงกฎของไบโอท ซาวาร์ท สำหรับ $Id\bar{L}$ ก็ให้นึกถึงกฎของคูลอมบ์ที่เกี่ยวกับประจุไฟฟ้า
กล่าวคือ จากรูป 1 ถ้าที่จุด(1) มีประจุไฟฟ้า dQ_1 แทน $Id\bar{L}$ ย่อมได้ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ณ
ที่จุด (2) ว่า

$$d\bar{E}_2 = \frac{dQ_1 \hat{a}_{R12}}{4\pi R_{12}^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

จะเห็นว่าทั้งกฎของไบโอท ซาวาร์ทและกฎของคูลอมบ์คล้ายคลึงกันคือ นอกจากจะใช้หลักของกฎ
ผกผันกำลังสองทั้งคู่แล้ว เอมซายมือสุดยังเป็นฟังก์ชันของ $Id\bar{L}$ (dQ_1) เหมือนกัน ที่แตกต่างกันก็
เห็นจะเป็นทิศทางของ $d\bar{H}_2$ และ $d\bar{E}_2$

ต่อไปนี้จะนำกฎของไบโอท ซาวาร์ทไปใช้กับกระแสไฟฟ้าตรงไหลผ่านเส้นลวดไฟฟ้าที่ยาวเป็น
อนันต์ ถูกว่าอยู่ในแนวของแกน z ดังรูป 2.2 จุดประสงค์คือต้องการหาสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$ ณ จุด P (ρ, ϕ, z)



รูปที่ 2.2 กระแสไฟฟ้า I ไหลในเส้นลวดไฟฟ้าที่ยาวอนันต์ ต้องการหาสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$
ณ จุด P (ρ, ϕ, z)

จะเห็นว่ารูป 2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าของมุม ϕ และระยะ z มิได้ทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ จุด
หนึ่งจุดใดรอบๆ แกน z เปลี่ยนไป หมายความว่าค่า $\bar{H}$ ไม่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรได้แก่มุม ϕ และ z
แต่อย่างใด แต่ค่าดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันของตัวแปรอีกตัวหนึ่งคือรัศมี ρ เสมอ พิสูจน์
ข้อเท็จจริงให้เห็นต่อไปนี้

$$\bar{R} = \rho \hat{a}_r - z \hat{a}_z$$

ดังนั้น

$$\hat{a}_R = \frac{\overline{R}}{|R|} = \frac{\rho \hat{a}_r - z \hat{a}_z}{\sqrt{\rho^2 + z^2}}$$

และเพราะว่า

$$d\overline{L} = \partial z \hat{a}_z$$

จากสมการ 2.6

$$dH = \frac{Id_z \hat{a}_z \times (\rho \hat{a}_r - z \hat{a}_z)}{\sqrt{4\pi(\rho^2 + z^2)^{3/2}}}$$

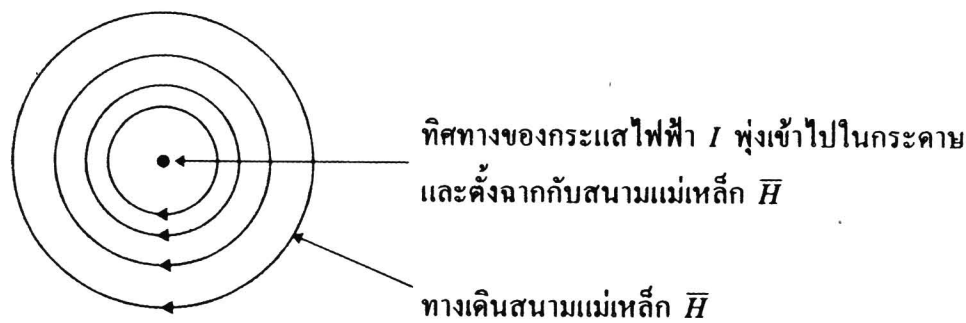
เพราะว่ากระแสไฟฟ้า I ไหลจาก $-\infty$ ถึง $+\infty$ ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} \overline{H}_{(\rho,\phi,z)} &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Id_z \hat{a}_z \times (\rho \hat{a}_r - z \hat{a}_z)}{\sqrt{4\pi(\rho^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}} \\ &= \frac{I\rho}{5\pi\rho^2} \hat{a}_\phi \cdot \frac{3}{\sqrt{\rho^2 + z^2}} \end{aligned}$$

เพราะว่าค่า ρ และยูนิตเวกเตอร์ $\hat{a}_\phi$ มีค่าคงที่ ดังนั้นจะพบว่า

$$\begin{aligned} \overline{H}_{(\rho,\phi,z)} &= \frac{I\rho \cdot \hat{a}_z}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d_z}{(\rho^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \\ &= \frac{I\rho \cdot \hat{a}_z}{4\pi\rho} \cdot \frac{z}{(\rho^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \Bigg|_{-\infty}^{+\infty} \\ \therefore H &= \frac{1}{2\pi\rho} \cdot \hat{a}_\phi \dots\dots\dots(2.8) \end{aligned}$$

แสดงให้เห็นว่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า $\overline{H}$ ณ จุดใดๆ รอบๆ เส้นลวดไฟฟ้าตรง (อยู่ในแนวแกน z ดังรูป 2.2 ที่มีกระแสไฟฟ้าตรง I ไหลผ่านจะมีทิศทางไปทางยูนิตเวกเตอร์ $\hat{a}_\phi$ เสมอ ดังนั้นทิศทางของสนามแม่เหล็ก $\overline{H}$ จะเป็นวงกลมรอบแกน z ขนาดของ $|H|$ ขึ้นอยู่กับจำนวนกระแสไฟฟ้า I และระยะทางระหว่างจุดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านกับจุดที่ต้องการหาสนามแม่เหล็ก

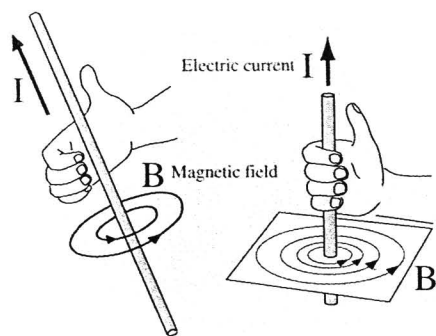


รูปที่ 2.3 แสดงเส้นกราฟของสนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ ซึ่งเกิดขึ้นรอบเส้นลวดไฟฟ้าที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน

ลักษณะเส้นกราฟสนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ เป็นดังรูปที่ 2.3 จุดดำๆ ตรงกลางคือ กระแสไฟฟ้าตรง I นั่นเอง ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า I จะพุ่งเข้าไปในกระดาษ วงกลมรอบๆ จุดดำดังกล่าวคือเส้นกราฟของสนามแม่เหล็กที่ซึ่งรัศมี ρ มีค่าต่างๆ กัน ถ้าใช้กฎมือขวาช่วยจะทำให้จดจำง่ายขึ้น

กฎสกรูของแมกซ์เวลล์ กล่าวว่าทิศของสนามแม่เหล็กรอบๆ เส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะอยู่ในทิศสกรูหมุน เมื่อขันสกรูเข้าไปตามทิศของกระแสไฟฟ้า [7]

กฎมือขวา (Right-hand rule) กล่าวว่าทิศของสนามแม่เหล็กรอบเส้นลวดอยู่ในแนวนิ้วมือขวาที่กำรอบเส้นลวด โดยที่นิ้วหัวแม่มือชี้ไปตามทิศของกระแสในเส้นลวด [8]



2.2.4 กฎแอมแปร์ (Ampere’s Circuital Law)

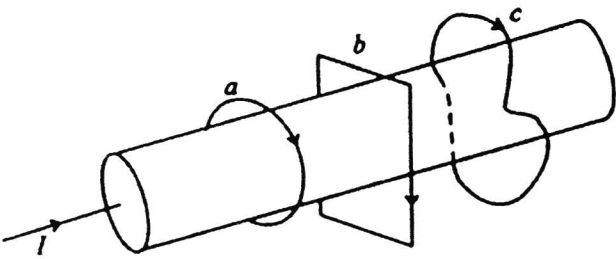
กฎของไบโอท ซาวาร์ท ได้กล่าวว่า “ถ้ามีกระแสไฟฟ้าตรงไหลผ่านวัสดุสื่อ นำไฟฟ้ายอมเกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ วัสดุสื่อ นำไฟฟ้านั้น ลักษณะกราฟของสนามแม่เหล็กเป็นทางแบบวงจรปิด (loop or closed path) ดังในรูป 3 ในทางกลับกันถ้ามีสนามแม่เหล็กแอมแปร์เวียนวัสดุสื่อ นำไฟฟ้าก่อ

ย่อมจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุสื่อำไฟฟ้าขึ้นนั้นได้ นั้นแสดงว่ากระแสไฟฟ้าดังกล่าวเกิด
สนามแม่เหล็กที่ไหลเป็นทางแบบวงจรปิด นั่นคือ

$$\oint_{\text{close path}} \overline{H} \cdot d\overline{L} = I \text{ แอมป์}$$

.....(2.9)

กฎแอมแปร์กล่าวไว้ว่า “สนามแม่เหล็กซึ่งไหลเป็นแบบวงจรปิดรอบวัสดุสื่อำไฟฟ้าคูณกับความยาวของสนามแม่เหล็ก (เส้นรอบวง) จะมีค่าเท่ากับจำนวนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุสื่อำไฟฟ้านั้น” จะเห็นว่ากฎแอมแปร์พัฒนามาจากกฎของไบโอท ซาวาร์ตนั่นเอง รูปที่ 2.4 แสดงทางเดินของสนามแม่เหล็ก $\overline{H}$ รอบวัสดุสื่อำไฟฟ้า จะเห็นว่าเส้นทางของ $\overline{H}$ เป็นแบบวงจรปิดเสมอ ไม่ว่าการเดินทางของมันจะมีเส้นทางเป็นวงหรือเป็นเหลี่ยม



รูปที่ 2.4 เส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กรอบวัสดุสื่อำไฟฟ้าคือวงจรหรือเส้นทาง a (หรือ b) นั้นเมื่อคูณกับค่าของสนามแม่เหล็ก $\overline{H}$ แล้วจะเท่ากับจำนวนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุสื่อำไฟฟ้านั้น ส่วนเส้นทาง c คูณกับค่าของ $\overline{H}$ จะได้กระแสไฟฟ้า I_c มีค่าน้อยกว่ากระแสไฟฟ้า I ทั้งนี้เพราะว่าวงจร c ล้อมวัสดุสื่อำไฟฟ้าดังกล่าวเพียงบางส่วนเท่านั้น

จากรูป 2.4 ถ้าวจร a เป็นวงกลม แสดงว่าทุกๆ จุดบนวงกลมมีค่า $\overline{H}$ เท่ากันหมด แต่กรณีวงจร b ซึ่งเป็นสี่เหลี่ยมจะพบว่าทุกจุดบนเส้นทางมีค่าสนามแม่เหล็ก $\overline{H}$ บนเส้นทาง a และ b จะเท่ากัน นั่นคือ

$$\oint_a \overline{H} \cdot d\overline{L} = \oint_b \overline{H} \cdot d\overline{L} = I$$

..... (2.10)

แต่กรณีเส้นทาง c จะได้ว่า $\oint_c \overline{H} \cdot d\overline{L} = I_c < I$

จะเห็นความแตกต่างในด้านการนำไปใช้งานระหว่างกฎของเกาส์กับกฎแอมแปร์เซอร์กิต กล่าวคือกฎของเกาส์นั้นเป็นการหาจำนวนประจุไฟฟ้าที่ถูกล้อมรอบด้วยพื้นที่ผิวปิด คือ $Q = \oint \vec{D} \cdot d\vec{S}$ ส่วนกฎแอมแปร์เซอร์กิตเป็นการหาจำนวนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุสื่อำไฟฟ้าที่ล้อมด้วยสนามแม่เหล็ก นั่นคือ

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{L} = I$$

เมื่อกลับไปดูวิธีหาค่าสนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดไฟฟ้าตรงที่ยาวมาก รายละเอียดดังรูปที่ 2 ที่ผ่านมา จะพบว่าขนาดของสนามแม่เหล็กที่ไปทาง $\hat{a}_z$ คือ H_z นั้นมีค่าเป็นศูนย์ ทำนองเดียวกับขนาดของ $\vec{H}$ ที่ไปทาง $\hat{a}_\rho$ ก็เท่ากับศูนย์ด้วยฉะนั้นจึงมีขนาดของสนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ เพียงค่าเดียวคือ ค่า H_ϕ ที่อยู่ในทาง $\hat{a}_\phi$ เท่านั้น คือ $H_\phi = \frac{I}{2\pi\rho}$ อาศัยกฎแอมแปร์เซอร์กิต เพื่อหาค่า H_ϕ ดังกล่าวได้อีกทางหนึ่งดังนี้

จากสมการ 2.9 คือ

$$I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{L}$$

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{2\pi} \vec{H}_\phi \cdot \rho d\phi \\ &= H_\phi \rho \int_0^{2\pi} d\phi \end{aligned}$$

$\therefore \rho$ คงที่

เพราะฉะนั้น

$$I = H_\phi \rho (2\pi)$$

นั่นคือ

$$H_\phi = \frac{I}{2\pi\rho} \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

2.2.5 กฎของฟาราเดย์

ในปี ค.ศ. 1831 ฟาราเดย์ได้พบว่า อำนาจของสนามแม่เหล็กสามารถทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ขั้นตอนการทดลองของเขา คือ พันขดลวดสองขดบนแกนเหล็กรูปวงกลม ขดลวดชุดหนึ่งเรียกว่า ขดปฐมภูมิ ต่อกับแบตเตอรี่ อีกชุดหนึ่งเรียกว่า ขดทุติยภูมิ ต่อเข้ากับกัลวานอ์มิเตอร์ เมื่อสับสวิตช์ให้ไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เข้าวงจรขดปฐมภูมิ เข็มของกัลวานอ์มิเตอร์ที่ต่อด้านทุติยภูมิจะกระดิกไปทางหนึ่ง และเมื่อเอาแบตเตอรี่ออกเข็มของกัลวานอ์มิเตอร์ก็จะกระดิกไปอีกทางหนึ่งในทิศทางตรงกันข้ามกับตอนแรก การทดลองครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กตามเวลา ย่อมทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่กัลวานอ์มิเตอร์

จากการทดลองยังพบอีกว่า มิใช่เฉพาะการเปลี่ยนแปลงหรือเคลื่อนไหวกของสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเท่านั้น การเคลื่อนที่ของขดลวดใดๆ ในสนามแม่เหล็กก็ย่อมทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดนั้นได้ หลักการนี้ได้ถูกพัฒนามาจนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สามารถกล่าวได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กตามเวลาหรือสนามแม่เหล็กไดนามิกส์ ย่อมทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force เขียนย่อว่า emf.) มีหน่วยเป็น โวลต์ ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ก็เป็นแหล่งที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้านั่นเอง สมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์คือ

$$emf. = -\frac{d\phi}{dt} \text{ โวลต์} \dots\dots\dots(2.12)$$

emf. เกิดจากวัสดุื่อนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก ทำนองเดียวกัน emf. เกิดจากการเปลี่ยนแปลงหรือเคลื่อนไหวกของสนามแม่เหล็กที่ล้อมรอบตัวนำนั้นๆ อีกด้วย

$\frac{d\phi}{dt}$ ในสมการ 5.1 หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของเส้นสนามแม่เหล็กตามเวลาหรือสนามแม่เหล็กไดนามิกส์ และ ϕ คือเส้นสนามแม่เหล็กที่ล้อมรอบ (linking) ตัวนำหรือขดลวด กำหนดให้มีค่าเป็นลบหมายความว่า emf. ที่เกิดขึ้นนั้นจะสร้างสนามแม่เหล็กใหม่ที่มีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็กเดิม ทำให้สนามแม่เหล็กในวงจรลดลงนั่นคือค่า emf. ลดลง ซึ่งนี่คือหลักของเลนซ์ (Lenz's Law) ถ้าขดลวดที่เป็นตัวนำดังกล่าวมี N รอบจะได้สมการของ emf. ใหม่คือ

$$emf. = -N\frac{d\phi}{dt} \text{ โวลต์} \dots\dots\dots(2.13)$$

เนื่องจาก emf. เป็นปริมาณสเกลาร์ ดังนั้นจะได้ว่า

$$emf. = \oint \vec{E}.d\vec{L} \dots\dots\dots(2.14)$$

$\oint \vec{E}.d\vec{L}$ หมายถึงประจุไฟฟ้าขนาดหนึ่งคูลออมป์เคลื่อนที่เป็นวงจรปิด (Close path) ในสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ค่า $\oint \vec{E}.d\vec{L}$ ไม่จำเป็นต้องมีค่าเป็นศูนย์สำหรับสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา นั่นคือ emf. หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนตามเวลาจะไม่เท่ากับศูนย์เสมอไป

$$\oint \vec{E}.d\vec{L} = \frac{d\phi}{dt}$$

หรือ

นั่นคือ



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุด ม.วิจัย	
วันที่.....	๕ ก.ค. 2555
เลขทะเบียน.....	247268
เลขเรียกหนังสือ.....	

13

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

$$emf. = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

สมการ 2.15 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอินทิกรัลวงจรปิดกับอินทิกรัลพื้นที่ผิว ซึ่งทิศทางของ $\vec{B}$ และ $d\vec{S}$ จะไปในทิศทางเดียวกัน วิธีจำง่ายๆ ใช้กฎมือขวาคือ กำแท่งดินสอดด้วยมือขวาให้นิ้วหัวแม่มือตั้งฉากกับนิ้วทั้งสี่ ทิศทางของหัวแม่มือเป็นทิศทางของ $\vec{B}$ และ $d\vec{S}$ ส่วนนิ้วทั้งสี่เป็นทิศทางของทางเดินวงจรปิด ซึ่งเป็นทิศทางของสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ ด้วย พิจารณาสมการ 2.16 ซึ่งให้เห็นถึงการเกิด emf. หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ตามเวลา

2.2.6 สมการสนามไฟฟ้าสถิต

มีสองกฎหลักที่อยู่ภายใต้ Gauss's law (Divergence theory) โดยเมื่อ $D = \epsilon E$ ประกอบด้วย

Integral form	$\oint D \cdot dS = \int \rho_v dV$	$\dots\dots\dots (2.17)$
---------------	-------------------------------------	--------------------------

	$\oint E \cdot dL = 0$	$\dots\dots\dots (2.18)$
--	------------------------	--------------------------

	$V = -\int E \cdot dL$	$\dots\dots\dots (2.19)$
--	------------------------	--------------------------

Differential form	$\nabla \cdot D = \rho_v$	$\dots\dots\dots (2.20)$
-------------------	---------------------------	--------------------------

	$\nabla \times E = 0$	$\dots\dots\dots (2.21)$
--	-----------------------	--------------------------

	$E = -\nabla V$	$\dots\dots\dots (2.22)$
--	-----------------	--------------------------

2.2.7 สมการสนามแม่เหล็กในสถานะสนามแม่เหล็กสถิต

กฎพื้นฐานของสนามแม่เหล็กคือ Ampere's law โดย $B = \mu H$, $J = \sigma E$

Integral form	$\oint_L H \cdot dL = \int_S J \cdot dS$	$\dots\dots\dots (2.23)$
---------------	--	--------------------------

	$\oint B \cdot dS = 0$	$\dots\dots\dots (2.24)$
--	------------------------	--------------------------

	$V = -\int E \cdot dL$	$\dots\dots\dots (2.25)$
--	------------------------	--------------------------

Differential form	$\nabla \times H = J$	$\dots\dots\dots (2.26)$
-------------------	-----------------------	--------------------------

	$\nabla \times B = 0$	$\dots\dots\dots (2.27)$
--	-----------------------	--------------------------

การอ้างอิงไปสู่แบบจุลของ Ohm’s law ในเทอมของ magnetic vector potential A จะใช้รูปแบบคือ

$$B = \nabla \times A$$

..... (2.28)

2.2.8 สมการสนามแม่เหล็กในสถานะสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนตามเวลา

กฎพื้นฐานของสนามแม่เหล็กคือ Faraday’s law of induction ประกอบไปด้วย

Integral form

$$\oint_S D \cdot dS = \int_V \rho_v dv$$

..... (2.29)

$$\oint_S B \cdot dS = 0$$

..... (2.30)

$$\oint_l E \cdot dL = - \int_S \left(\frac{\partial B}{\partial t} + J_m \right) \cdot dS$$

..... (2.31)

$$\oint_l H \cdot dL = - \int_S \left(J_e + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dS$$

..... (2.32)

Differential form

$$\nabla \cdot D = \rho_v$$

..... (2.33)

$$\nabla \cdot B = 0$$

..... (2.34)

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} - J_m$$

..... (2.35)

$$\nabla \times H = J_e + \frac{\partial D}{\partial t}$$

..... (2.36)

2.2.9 สมการสนามแม่เหล็กในสถานะสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนตามความถี่

การพิจารณาสนามแม่เหล็กเมื่อกระแสเป็นรูปคลื่นไซน์ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็น Time varying หรือ Time harmonic ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ (คาบเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นสัดส่วนคงที่) รูปคลื่นไซน์ ω การเปลี่ยนแปลงซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$F(r, t) = \text{Re}[F(r)e^{j\omega t}]$$

..... (2.37)

เมื่อ F(r) = เป็นรูปแบบเฟสเซอร์ของ F(r, t)

ω = ความถี่เชิงมุม (rad/sec)

ปริมาณสนามแม่เหล็กสามารถกำหนดในรูปเฟสเซอร์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} E(r,t) \\ D(r,t) \\ H(r,t) \\ B(r,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E(r) \\ D(r) \\ H(r) \\ B(r) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.38)$$

การใช้เฟสเซอร์สามารถเขียนได้ด้วย

$$\frac{\partial e^{j\omega t}}{\partial t} = j\omega e^{j\omega t} \dots\dots\dots (2.39)$$

จาก Time Varying สามารถเขียนใหม่ในรูป Time Harmonic ได้เป็น [13]

Differential form

$$\nabla \cdot D = \rho_v \dots\dots\dots (2.40)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \dots\dots\dots (2.41)$$

$$\nabla \times E = -j\omega B - J_m \dots\dots\dots (2.42)$$

$$\nabla \times H = J_e + j\omega D \dots\dots\dots (2.43)$$

2.3 สมการเชิงอนุพันธ์ด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3.1 สมการความถี่สนามแม่เหล็ก

จากสมการสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่นั้นในการศึกษาและวิเคราะห์สนามแม่เหล็กเพื่อให้ได้สมการมาซึ่งมีวิธีการสร้างสมการดังนี้

จากสมการที่ 2.33 ถึง 2.36 ในหัวข้อสมการสนามแม่เหล็กในสภาวะสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time Varying Fields) เมื่อพิจารณาค่าต่างๆที่ ($\rho_v = 0, J = 0$)

พิจารณาสมการที่ 2.35

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} - J_m \dots\dots\dots (2.44)$$

เมื่อ $J = J_m$ จะเหลือเพียง

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \dots\dots\dots (2.45)$$

โดยที่ $B = \mu H$ และใส่ Curl ทั้งสองข้างจะได้

$$\nabla \times \nabla \times E = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times H) \dots\dots\dots (2.46)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.38

$$\nabla \times H = J_e + \frac{\partial D}{\partial t} \dots\dots\dots (2.47)$$

เมื่อ $J = J_e = 0$ จะเหลือเพียง

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \dots\dots\dots (2.48)$$

โดยที่ $D = \epsilon E$

$$\nabla \times H = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \dots\dots\dots (2.49)$$

แทน 2.49 ใน 2.46 จะได้

$$\nabla \times \nabla \times E = -\mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \dots\dots\dots (2.50)$$

ทำการประยุกต์ใช้เอกลักษณ์ความเหมือนของเวกเตอร์

$$\nabla \times (\nabla \times F) = \nabla (\nabla \cdot F) - \nabla^2 F \dots\dots\dots (2.51)$$

ดังนั้น

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla (\nabla \cdot E) - \nabla^2 E \dots\dots\dots (2.52)$$

แทน 2.52 ใน 2.50 จะได้

$$\nabla (\nabla \cdot E) - \nabla^2 E = -\mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \dots\dots\dots (2.53)$$

เมื่อ $\rho_v = 0$ และ $\nabla \cdot D = \rho_v$ โดยที่ ดังนั้น จึงได้

$$\nabla^2 E = -\mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \dots\dots\dots (2.54)$$

ซึ่งเวกเตอร์ที่ขึ้นกับเวลาอยู่ในรูปสมการแฮมิลตันและสมการเวฟอย่างง่ายในรูปแบบลักษณะเดียวกัน
ถ้าวิเคราะห์สมการโดยใช้ค่า H แทนค่า E ตั้งแต่ต้นแบบเดียวกันนั้นจะได้สมการ H เป็น

$$\nabla^2 H = -\mu \epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \dots\dots\dots (2.55)$$

สมการ 2.54 และสมการ 2.55 คือสมการการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กในตัวนำแม่เหล็กภายใต้
สิ่งที่พิจารณา velocity ความเร็วในหน่วย เมตรต่อวินาทีของการแพร่ขยายคือ

$$u = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \dots\dots\dots (2.56)$$

เมื่อ $u = c \approx 3 \times 10^8$ เมตรต่อวินาทีในอวกาศ เป็นที่รู้จักทั่วไปของสมการเวกเตอร์ (บรรยาการ) ในสมการ 2.54 และสมการ 2.55 มีค่าคงที่สามองค์ประกอบ ดังนั้นทั้งหมดเราจะมีหกสมการค่าคงที่ คือ $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$ ดังนั้นแต่ละองค์ประกอบของสมการเวฟมีรูปแบบคือ

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \tag{2.57}$$

2.3.2 สมการความศักย์สนามแม่เหล็กที่เป็นไปได้

แม้ว่าบ่อยครั้งที่ความเข้มสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามแม่เหล็ก ($\overline{E}$ และ $\overline{H}$) ซึ่งเป็นค่าที่สามารถตรวจวัดได้ทางกายภาพ โดยปกติฟังก์ชันช่วยในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กซึ่งเป็นฟังก์ชันของปริมาณศักย์ V และเวกเตอร์ศักย์แม่เหล็ก A แม้ว่าฟังก์ชันที่เหมาะสมนั้นผล มันจะต้องเข้ากับสมการแมกซ์เวลล์ได้ อนุพันธ์ต่างๆถูกใช้ในสองเวกเตอร์หลักซึ่งแสดงด้วยสมการดังนี้

$$\nabla \times \nabla \Phi = 0 \tag{2.58}$$

และ

$$\nabla \cdot (\nabla \times F) = 0 \tag{2.59}$$

ซึ่งผลค่าสนาม Φ และเวกเตอร์สนาม F จะต้องแน่นอน สมการแมกซ์เวลล์จากสมการที่ 2.34 ตามสมการที่ 2.59 พอที่จะใช้ได้ถ้าเรากำหนดนั้น A เป็น

$$B = \nabla \times A \tag{2.60}$$

แทนสมการที่ 2.60 ในสมการที่ 2.35 จะได้

$$-\nabla \times \left(E + \frac{\partial A}{\partial t} \right) = 0$$

เป็นสมการที่เข้ากันได้กับสมการ 2.58 เราสามารถเลือกปริมาณสนาม V นั้นดังนี้

$$\begin{aligned} E + \frac{\partial A}{\partial t} &= -\nabla V \\ E &= -\nabla V - \frac{\partial A}{\partial t} \end{aligned} \tag{2.61}$$

ดังนั้นถ้าทราบถึงฟังก์ชัน V และ A ที่เหมาะสมถูกต้องค่าสนาม E และ B สามารถหาได้จากสมการที่ 2.60 และสมการ 2.61 แต่อย่างไรก็ตามเรายังคงต้องการทราบถึงสมการที่ถูกต้องเหมาะสม เมื่อแทนที่สมการ 2.60 และสมการ 2.61 ลงในสมการที่ 2.34 และสมมุติความเป็นเชิงเส้นเสมอกันโดยตลอดที่จุดกลาง

$$\nabla \times \nabla \times A = \mu J + \mu \epsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(-\nabla V - \frac{\partial A}{\partial t} \right) \tag{2.62}$$

เมื่อประยุกต์ความเหมือนกันของสมการที่ 2.53 นำมาใช้กับสมการที่ 2.63 เขียนได้เป็น

$$\nabla^2 A - \nabla(\nabla \cdot A) = -\mu J + \mu \epsilon \nabla \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \mu \epsilon \nabla \frac{\partial A}{\partial t} \dots\dots\dots (2.63)$$

แทนสมการที่ 2.61 ลงในสมการที่ 2.33 จะได้

$$\nabla^2 V + \frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot A) = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \dots\dots\dots (2.64)$$

สอดคล้องกับทฤษฎีแอมโพรของกรวิเคราะห์เวกเตอร์ เวกเตอร์ที่ถูกกำหนดให้มีลักษณะเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่างของเคิลว์และไคเวอร์เจนซ์ที่ถูกกำหนด เรากำหนดใช้เคิลว์กับ A ในสมการที่ 2.60 ดังนั้นเราอาจเลือกใช้ ไคเวอร์เจนซ์ A ได้กับสมการที่ 2.63 และสมการที่ 2.64 เป็นรูปแบบที่ง่าย ดังนั้นสิ่งที่ได้นี้จึงเรียกว่า “เงื่อนไขของโลเรนซ์”

$$\nabla \cdot A = \mu \epsilon \frac{\partial V}{\partial t} \dots\dots\dots (2.65)$$

รวมเงื่อนไขจากสมการที่ 2.65 นี้เข้าไปในสมการที่ 2.63 และสมการที่ 2.64 ผลคือ

$$\nabla^2 A - \mu \epsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu J \dots\dots\dots (2.66)$$

และ

$$\nabla^2 V - \mu \epsilon \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \dots\dots\dots (2.67)$$

ด้วยสมการความถี่นั้นไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นสมการแมกซ์เวลล์ในเทอมของ V และ A ที่เป็นไปได้ลดลงเหลือสามสมการคือสมการที่ 2.65 จนถึงสมการที่ 2.67 อาจกล่าวได้ว่าสมการทั้งสามเทียบเท่าเสมือนรูปแบบปกติของสมการแมกซ์เวลล์ที่เหมาะสมเป็นจริงโดยแท้ เมื่อใช้สมการแมกซ์เวลล์กับ E และ B ในสมการที่ 2.60 และ 2.61 วิธีการทั้งหมดเพื่อนำมาใช้สมการที่ 2.66 และสมการที่ 2.67 ซึ่งวิธีนี้ถูกเรียกว่าวิธีการแบบช้า (แบบยาว)

$$A = \int \frac{\mu [J] dv}{4\pi R} \dots\dots\dots (2.68)$$

และ

$$A = \int \frac{[\rho_v] dv}{4\pi \epsilon R} \dots\dots\dots (2.69)$$

เมื่อ R คือระยะห่างระหว่างจุดกำเนิดไปผู้จุดสนาม ในวงเล็บสี่เหลี่ยมแสดงถึง ρ_v และ J ถูกกำหนดด้วยช่วง $R = \mu \epsilon^{1/2}$ ก่อนที่จะนำไปใช้เพื่อใช้ในการหา A และ V ต่อไป

2.4 การแก้ปัญหасмการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์

วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นวิธีที่ใช้สำหรับการประมาณหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ส่วนย่อย (Partial Differential Equation) หรือสมการอินทิกรัล วิธีการหาคำตอบเป็นการใช้เทคนิคจัดสมการเชิงอนุพันธ์ออกหรือจัดสมการเชิงอนุพันธ์ส่วนย่อยไปสู่สมการเชิงอนุพันธ์ทั่วไป ซึ่งสามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีพื้นฐาน เช่น ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ เป็นต้น การใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เป็นการวิเคราะห์เกี่ยวกับโครงสร้างเป็นวิธีการทางตัวเลข (Numerical Method) ใช้การป้อนหรือแทนที่ค่าเพื่อหาผลลัพธ์คำตอบที่ต้องการซึ่งสะดวกมากกว่าการหาคำตอบด้วยสมการดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งมีความยุ่งยากในการหาคำตอบเนื่องจากต้องใช้ความสัมพันธ์จากตัวแปรต่าง

จากหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3 ซึ่งเป็นทฤษฎี สมการแม่เหล็กในสภาวะต่างๆ ,กฎ , สมการแม่เหล็กในสภาวะต่างๆ ในการพิจารณาวงจรแม่เหล็กในระบบอาร์เอฟไอดี การนำสมการแม่เหล็กมาใช้ในการพิจารณานั้นองค์ประกอบหรือตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในวงจรแม่เหล็กนั้นประกอบด้วย ฟลักซ์แม่เหล็ก : Φ นเส้นแรงแม่เหล็กความหนาแน่น: $\overline{B}$ ความเข้มสนามแม่เหล็ก: $\overline{H}$ และแรงเคลื่อนแม่เหล็กหรือศักย์แม่เหล็ก: $\overline{E}$ เนื่องด้วยวงจรมอเตอร์ใช้งานในสภาวะที่มีความถี่ดังนั้นสมการที่จำเป็นต้องใช้ในการพิจารณาจึงประกอบด้วยจากหัวข้อ 2.2.8 สมการสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนตามความถี่ (Time Harmonic Fields) มีสมการที่ใช้ดังนี้

สมการในรูป Integral form

$$\oint_l H \cdot dL = \int_s J \cdot dS = I$$
$$\oint B \cdot dS = 0$$
$$V = -\int E \cdot dL$$

วิธีการที่ใช้ช่วยในการศึกษาที่สำคัญประกอบด้วยสมการ

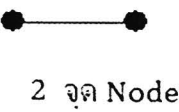
จากหัวข้อ 2.2.9 สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนตามความถี่ (Time Harmonic Fields) มีสมการที่ใช้ดังนี้

$$\nabla \cdot D = \rho_v$$
$$\nabla \cdot B = 0$$
$$\nabla \times E = -j\omega B - J_m$$
$$\nabla \times H = J_e + j\omega D$$

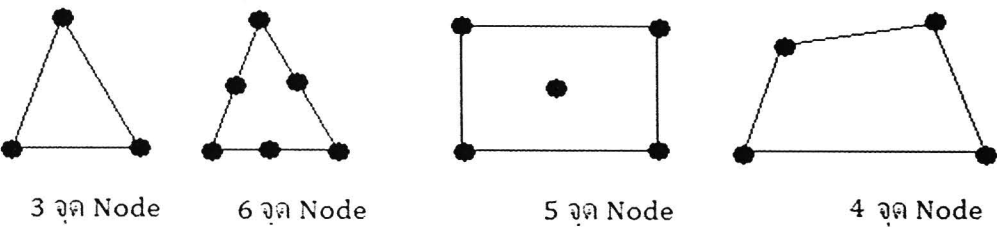
2.4.1 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

ประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 4 ขั้นตอน

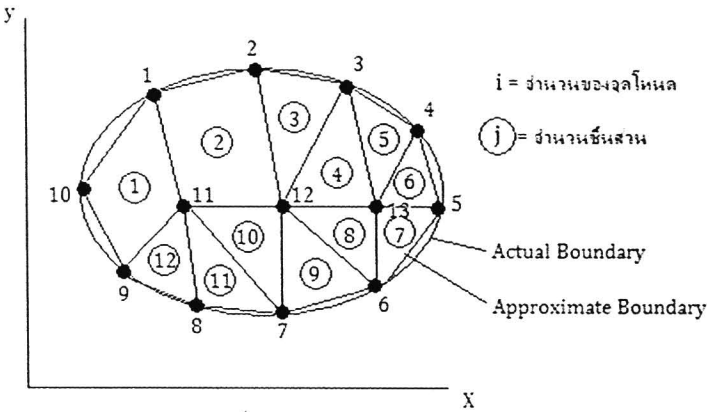
- 1. ทำการแบ่งแยกส่วนบริเวณที่จะทำการพิจารณาหาคำตอบเป็นส่วนย่อยหรือเป็นชั้นๆ แสดงดังรูปที่ 2.1 ถึง 2.3
- 2. สมการที่ใช้สามารถครอบคลุมและเหมาะสมชิ้นงาน
- 3. รวบรวมผลของทุกส่วนย่อยที่ทำการพิจารณา
- 4. แก่สมการของระบบที่ใช้ประกอบ



รูปที่ 2.5 การกำหนดขอบเขตบริเวณใน 1 มิติ



รูปที่ 2.6 การกำหนดขอบเขตบริเวณใน 2 มิติ



รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างการกำหนดขอบเขตบริเวณใน 2 มิติ

2.4.2 ขั้นตอนของวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์

ประกอบไปด้วย 3 สมการดังนี้

1. Solution of Laplace’s Equation

การประยุกต์ใช้งานวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับการแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กจากขั้นตอนทั้ง 4 ขั้นตอนด้านบนสามารถแก้ไขโดยสมการลาปลาซใน 2 มิติคือ

$$\nabla^2 V = 0 \dots\dots\dots (2.70)$$

1.1 การกำหนดบริเวณที่ไม่ต่อเนื่องกัน (Finite Element Discretization)

เมื่อ N = จำนวนชิ้นส่วน ดังนั้นค่าศักย์มีสมการเป็น

$$V(x,y) = \sum_{e=1}^N V_e(x,y) \dots\dots\dots (2.71)$$

ค่าศักย์ใน 2 มิติ $V_e(x,y) = a + bx + cy \dots\dots\dots (2.72)$

ค่าศักย์ใน 3 มิติ $V_e(x,y) = a + bx + cy + dz \dots\dots\dots (2.73)$

ค่าศักย์ทั้งหมดที่พื้นผิว 2 มิติ $E_e = -\nabla V_e = -(ba_x + ca_y) \dots\dots\dots (2.74)$

1.2 การกำหนดสมการบริเวณที่ครอบคลุมในบริเวณย่อย (Element Governing Equation)

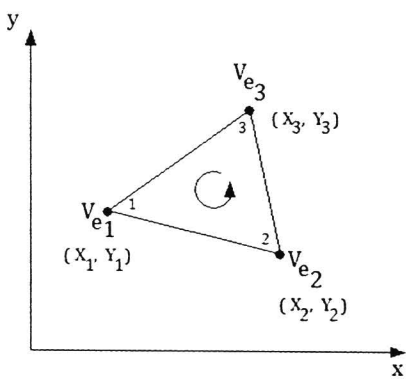
พิจารณาตัวอย่างวัตถุสามเหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 2.8 ค่าศักย์ V_{e1} , V_{e2} และ V_{e3} ที่จุด 1, 2 และ 3 ตามลำดับได้มาจากสมการที่ 2.72 โดยสามารถหาค่าองค์ประกอบได้จากสมการที่เขียนในรูปเมตริกส์ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.75)$$

โดยค่าโคออดิเนตได้จากสมการด้านบนสามารถหาค่าโดย

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.76)$$

จากหลักการของสมการทั้งสองแสดงได้ดังรูปด้านล่างนี้



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างวัตถุสามเหลี่ยมที่หมุนไปตามตำแหน่งจุดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

โดยที่ค่าสักร่วมหาได้ดังนี้

$$V_e = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} (x_2y_3 - x_3y_2) & (x_3y_1 - x_1y_3) & (x_1y_2 - x_2y_1) \\ (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.77)$$

เมื่อ N = 3 = จำนวนจุดโนด ดังนั้นค่าสักร่วมมีสมการเป็น

$$V_e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i(x,y) V_{ei} \dots\dots\dots (2.78)$$

โดยที่

$$\alpha_1 = \frac{1}{2A} [(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \dots\dots\dots (2.79)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2A} [(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \dots\dots\dots (2.80)$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2A} [(x_1y_2 - x_2y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \dots\dots\dots (2.81)$$

ซึ่งที่ A คือพื้นที่ของวัตถุ

$$2A = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.82)$$

$$= (x_2y_3 - x_3y_2) + (x_3y_1 - x_1y_3) + (x_1y_2 - x_2y_1) \dots\dots\dots (2.83)$$

$$A = \frac{1}{2} [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \dots\dots\dots (2.84)$$

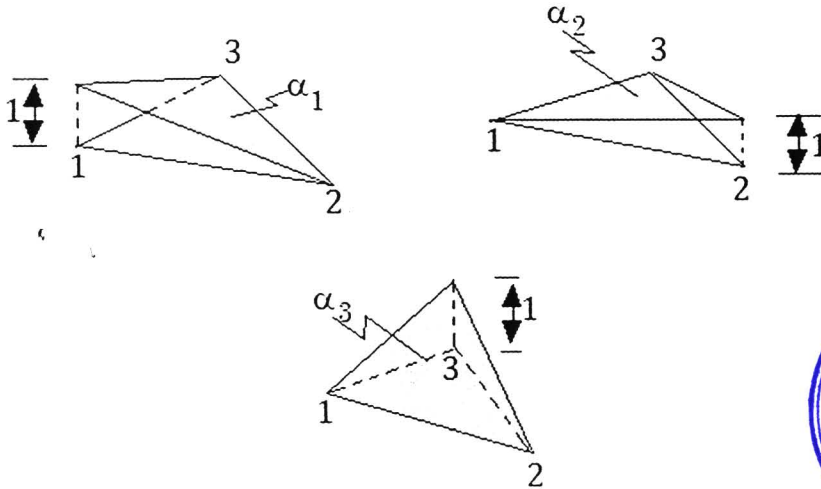
ณ ที่จุด (x, y) ใดๆ เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.80

$$\alpha_i = 1 \quad \text{เมื่อ } i = j \quad \dots\dots\dots (2.85)$$

$$\alpha_i = 0 \quad \text{เมื่อ } i \neq j \quad \dots\dots\dots (2.86)$$

ดังนั้น

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) V_{ei} = 1 \quad \dots\dots\dots (2.87)$$



รูปที่ 2.9 ฟังก์ชันของ α_1 , α_2 และ α_3 สำหรับวัตถุสามเหลี่ยม

รูปแบบฟังก์ชัน α_1 , α_2 และ α_3 แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.5 ซึ่งรูปแบบฟังก์ชันคล้ายกับสมการลาปลาซ $\nabla^2 V = 0$ ดังนั้น

$$W_e = \frac{1}{2} \int \epsilon |E|^2 dS = \frac{1}{2} \int \epsilon |\nabla V_e|^2 dS \quad \dots\dots\dots (2.88)$$

เมื่อ W_e คือพลังงานต่อหน่วยความยาวซึ่งเกิดขึ้นในวัตถุซึ่งเมื่อนำไปใช้ในสมการ 2.78 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\nabla V_e = \sum_{i=1}^3 V_{ei} \nabla \alpha_i \quad \dots\dots\dots (2.89)$$

ทำการแทนที่สมการ 2.89 ลงใน 2.90 ซึ่งจะได้

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \epsilon V_{ei} \left[\int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j dS \right] V_{ej} \quad \dots\dots\dots (2.90)$$

ถ้ากำหนดเทอมในวงเล็บของสมการ 2.90 ให้เป็น

$$C_{ij}^{(e)} \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j dS \quad \dots\dots\dots (2.91)$$

ซึ่งสามารถเขียนสมการในรูปเมตริกได้ดังนี้

$$W_e = \frac{1}{2} \epsilon [V_e]^t [C^{(e)}] [V_e] \quad \dots\dots\dots (2.92)$$

เมื่อ e ของเมตริก V_e คือทรานสโพสของเมตริก V_e ซึ่งเมตริก V_e แสดงได้ดังนี้

$$V_e = \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.93)$$

และ

$$[c^{(e)}] = \begin{bmatrix} c_{11}^{(e)} & c_{12}^{(e)} & c_{13}^{(e)} \\ c_{21}^{(e)} & c_{22}^{(e)} & c_{23}^{(e)} \\ c_{31}^{(e)} & c_{32}^{(e)} & c_{33}^{(e)} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.94)$$

โดย เมตริก $c^{(e)}$ เป็น โคออฟฟิเชียนเมตริกในการวิเคราะห์โครงสร้างซึ่งองค์ประกอบเมตริก $c_{ij}^{(e)}$ แต่ละตัวถูกใช้ในกรณีพิจารณาค่าระหว่างจุด i และ j โดยค่าต่างๆหาได้จากสมการ 2.79 ถึง 2.81 และสมการ 2.91

ตัวอย่างเช่น

$$\begin{aligned} c_{12}^{(e)} &= \int \nabla \alpha I \nabla \alpha 2 dS \\ &= \frac{1}{4A^2} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] \int dS \\ &= \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] \dots\dots\dots (2.95a) \end{aligned}$$

ในลักษณะเดียวกัน

$$c_{13}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] \dots\dots\dots (2.95b)$$

$$c_{23}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1)] \dots\dots\dots (2.95c)$$

$$c_{11}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)^2 + (x_3 - x_2)^2] \dots\dots\dots (2.95d)$$

$$c_{22}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)^2 + (x_1 - x_3)^2] \dots\dots\dots (2.95e)$$

$$c_{33}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2] \dots\dots\dots (2.95f)$$

เช่นเดียวกัน

$$c_{21}^{(e)} = c_{12}^{(e)}, c_{31}^{(e)} = c_{13}^{(e)}, c_{32}^{(e)} = c_{23}^{(e)} \dots\dots\dots (2.95g)$$

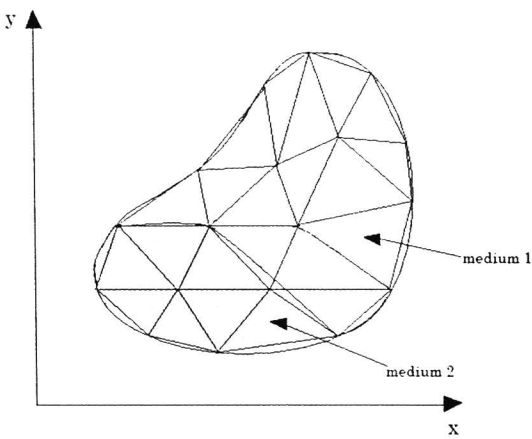
1.3 การหาค่าพลังงานรวมของทุกบริเวณย่อยขององค์ประกอบ (วัสดุ)(Assembling of all Elements)

$$W = \sum_{e=1}^N We = \frac{1}{2} \epsilon [V]^T [C] [V] \dots\dots\dots (2.96)$$

โดยที่

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.97)$$

เมื่อ n คือจำนวนของจุดโนด N คือจำนวนของชิ้นวัสดุ C คือ โคออฟฟิเชียลโดยรวม ซึ่งค่าโคออฟฟิเชียลจะมีค่าเท่ากัน โดยตลอดในวัตถุที่เป็นเนื้อเดียวกันรวมถึงค่าความซึมซาบจำเพาะของวัตถุ ϵ ก็เท่ากับทั้งหมดโดยมีค่าเท่ากับ ϵ , แสดงดังรูปที่ 2.10 โดยสามารถใช้สมการที่ 2.88 ในการพิจารณาได้



รูปที่ 2.10 การแยกส่วนของการแก้ปัญหาบริเวณที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

การพิจารณาจำนวนเมรทที่ประกอบของสามขอบเขตจากรูปที่ 2.7 สังเกตจากจำนวนของเมรท จำนวนจุดโนดประกอบด้วย 1, 2, 3, 4 และ 5 ถูกเรียกว่า global และ จำนวนของ (จำนวนรวม)i, j, k ถูกเรียกว่า local (จำนวนจำเพาะ) ซึ่งเหมือนกันกับจุด 1-2-3 ของวัตถุในรูปที่ 2.4 (โดยจำนวนเฉพาะ) สำหรับสามองค์ประกอบ (โนดขององค์ประกอบลำดับจะต้องอยู่ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจากทุกจุดสามารถเลือก4-3-5 แทนที่ 3-5-4 ซึ่งตรงกับ 1-2-3 ขององค์ประกอบในรูปที่ 2.4 ดังนั้นจำนวนในรูปที่ 2.7 ยังไม่แน่นอน สมมุติจำนวนสามเหลี่ยมในรูปที่ 2.7 ค่าโคออฟฟิเชียลสามารถเขียนในรูป

$$[c]=\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} \end{bmatrix}$$

..... (2.98)

ซึ่งเมตริก5×5 จะมี 5 จุดโนด (n=5) อัตราของ C_{ij} ขึ้นอยู่กับค่าระหว่าง i และ j ซึ่ง C_{ij} ได้มาจากองค์ประกอบการกระจายตัวที่จะต้องต่อเนื่องครอบคลุมขอบเขตเงื่อนไขโดยตำแหน่ง i และ j เมตริก $[c]$ มาจากโนดของทุกองค์ประกอบของ i และ j สำหรับตัวอย่างจากรูปที่ 2.11 องค์ประกอบ 1 และ 2 โดยโนด 1 เป็นคอมมอนคั้งนั้น

$$c_{11} = c_{11}^{(1)} + c_{11}^{(2)}$$

..... (2.99)

โนด 2 จะมี 1 องค์ประกอบเท่านั้น ดังนั้น

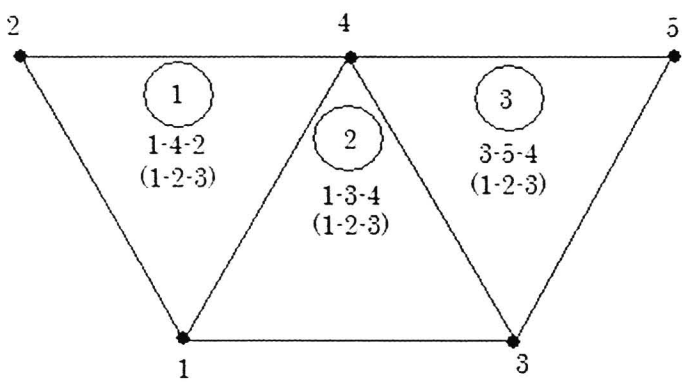
$$c_{33} = c_{33}^{(1)}$$

..... (2.100)

โนด 4 จะมี 1,2 และ 3 องค์ประกอบตามลำดับ

$$c_{44} = c_{22}^{(1)} + c_{33}^{(2)} + c_{33}^{(3)}$$

..... (2.101)



รูปที่ 2.11 การรวมสามองค์ประกอบ i, j, k มาจากจำนวนเฉพาะ (1-2-3) ขององค์ประกอบในรูปที่ 2.8

โนด 1 และ 4 ได้จากองค์ประกอบ 1 และ 2 ดังนั้น

$$c_{14} = c_{41} = c_{12}^{(1)} + c_{13}^{(2)}$$

..... (2.102)

เนื่องจากโนด 2 และ 3 ไม่มีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกัน

$$c_{14} = c_{41} = 0$$

..... (2.103)

สามารถหาค่าเมตริกส์โคออปิเซียลรวมโดยพิจารณาจากรูปที่ 2.11

$$\begin{bmatrix} c_{11}^{(1)} + c_{11}^{(2)} & c_{13}^{(1)} & c_{12}^{(2)} & c_{12}^{(1)} + c_{13}^{(2)} & 0 \\ c_{31}^{(1)} & c_{33}^{(1)} & 0 & c_{32}^{(1)} & 0 \\ c_{21}^{(2)} & 0 & c_{22}^{(2)} + c_{11}^{(3)} & c_{23}^{(2)} + c_{13}^{(3)} & c_{12}^{(3)} \\ c_{21}^{(1)} + c_{31}^{(2)} & c_{23}^{(1)} & c_{32}^{(2)} + c_{31}^{(3)} & c_{22}^{(1)} + c_{33}^{(2)} + c_{33}^{(3)} & c_{32}^{(3)} \\ 0 & 0 & c_{21}^{(3)} & c_{23}^{(3)} & c_{22}^{(3)} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.104)$$

- (1) สำหรับเมตริกส์ที่มีความสมมูล ($c_{ij} = c_{ji}$)
- (2) $C_{ij} = 0$ ถ้าไม่มีความสัมพันธ์อยู่ในแกนของ i และ j แนนอนสำหรับองค์ประกอบที่ใหญ่แต่องค์ประกอบเมตริกไม่ครบ

$$\sum_{i=1}^3 c_{ij}^{(e)} = 0 = \sum_{j=1}^3 c_{ij}^{(e)}$$

- (3) หากสมาชิกในเมตริกส์ขาดสามารถใช้การเติมค่าในเมตริกส์เพื่อพยายามหาค่าตามกำของเมตริกส์ได้

1.4 การแก้ปัญหาโดยใช้ผลของสมการ (Solving the Resulting Equation)

จากแนวคิดในการพัฒนาสามารถใช้สมการลาปลาซและบิวของได้และเพื่อการหาพลังงานที่ต่ำสุดดังนั้นต้องพิจารณาส่วนย่อยของพลังงาน W โดยวิธีการโนดซึ่งในวงปิดใดๆผลรวมของพลังงานมีค่าเป็น 0 ประกอบด้วย

$$\frac{\partial W}{\partial V_1} = \frac{\partial W}{\partial V_2} = \dots = \frac{\partial W}{\partial V_n} = 0$$

หรือ $\frac{\partial W}{\partial V_k} = 0$ เมื่อ $k = 1,2,3,\dots,n$ (2.105)

สำหรับตัวอย่างเมื่อ การกำหนดเมรทในรูปที่ 2.7 จากสมการที่ 2.98 และ 2.100 เมื่อหาค่าอนุพันธ์ของ W โดยพิจารณาเทียบกับ V จะได้

$$\frac{\partial W}{\partial V_1} = 2V_1c_{11} + V_2c_{12} + V_3c_{13} + V_4c_{14} + V_5c_{15} + V_2c_{21} + V_3c_{31} + V_4c_{41} + V_5c_{51} = 0$$

หรือ $V_1c_{11} + V_2c_{12} + V_3c_{13} + V_4c_{14} + V_5c_{15} = 0$ (2.106)

เมื่อ $\frac{\partial W}{\partial V_k} = 0$ ดังนั้น

$$\sum_{i=3}^5 V_i C_{ik} = 0 \dots\dots\dots (2.107)$$

1. วิธีการทำซ้ำ (Iteration Method)

เมื่อสมมุติโนด 1 ในรูปที่ 2.11 เป็นโนคอิสระ โดยพิจารณาจากสมการที่ 2.101

$$V_1 = -\frac{1}{c_{11}} \sum_{i=2}^5 V_i C_{1i} \dots\dots\dots (2.108)$$

เมื่อ k = จุดโนคใดๆ (ทำเรียงกันไปจาก 1, 2, 3, ..., n)

$$V_k = -\frac{1}{c_{kk}} \sum_{i=1 \atop i \neq k}^n V_i C_{ki} \dots\dots\dots (2.109)$$

ที่ k อิสระและ $c_{ki} = 0$ เมื่อจุด k ไม่เชื่อมโยงโดยตรงกับจุด i ดังนั้น V_k คือค่าศักย์ที่ไม่ทราบซึ่งมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยแสดงดังสมการ

$$V_{ave} = \frac{1}{2} (V_{min} + V_{max}) \dots\dots\dots (2.110)$$

2. วิธีการในรูปแบบทางเมตริกซ์ (Band Matrix Method)

เป็นรูปแบบที่ใช้หลักการในการหาค่าแบบแบบวิธี Minor และ Cofactor

$$W = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} V_f & V_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{ff} & C_{fp} \\ C_{pf} & C_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ V_p \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.111)$$

เมื่อ f และ p คือศักย์อิสระและศักย์คงที่ โดย V_p เป็นค่าคงที่ซึ่งสามารถเปลี่ยนสมการ 2.103 เป็นสมการที่ 2.112

$$\begin{bmatrix} C_{ff} & C_{fp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ V_p \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots (2.112)$$

$$\begin{bmatrix} C_{ff} \end{bmatrix} V_f = - \begin{bmatrix} C_{fp} \end{bmatrix} V_p \dots\dots\dots (2.113)$$

สมการสามารถเขียนได้เป็น

$$[A][V] = [B] \dots\dots\dots (2.114)$$

$$[V] = [A]^{-1} [B] \dots\dots\dots (2.115)$$

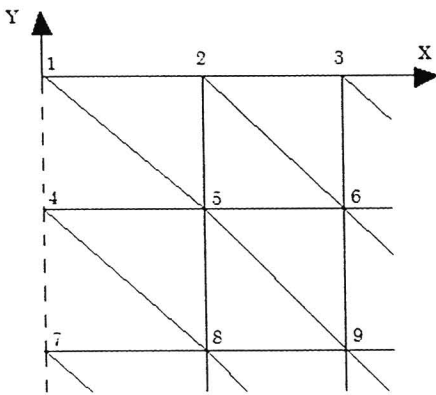
ที่โดยที่ $[V] = [V_f]$, $[A] = [C_{ff}]$, $[B] = -[C_{fp}] V_p$ แต่ $[A]$ คือรูปแบบทั่วไปที่ไม่เป็นอิสระศักย์ของโนคอิสระสามารถหาได้จากสมการ 2.114 และ 2.115 เราสามารถหาค่า $[V]$ จากสมการ 2.114 โดยเทคนิควิธีเกาส์เพื่อแก้ปัญหสมการ 2.113 โดยใช้อินเวอร์เมติกส์เมื่อขนาดเมติกส์ไม่ใหญ่นักบางครั้งจำเป็นต้องกำหนดใช้เงื่อนไขของนิวแมนท์ $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$ ในเงื่อนไขขอบเขตหรือที่เส้น(ค่า)ของระบบสมมาตรเมื่อจะใช้แก้ปัญห สมมุติถ้ากำหนดให้ค่าของบริเวณสมมาตรตลอดแกน y เป็นดังในรูปที่ 2.12 ถ้ากำหนดเงื่อนไข $\frac{\partial V}{\partial x} = 0$ โดยตลอดแกน y จะได้

$$V_1 = V_2, V_4 = V_5, V_7 = V_8 \dots\dots\dots (2.116)$$

หมายเหตุ จากสมการ 2.88 คำตอบหาในรูปสองมิติด้วยสมการลาปลาซ $\nabla^2 V = 0$ ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่ใช้พัฒนาในการวิเคราะห์ขอบเขตของปัญหา รวมถึงสมการปัวซอง

$(\nabla^2 V = \frac{\rho_v}{\epsilon}, \nabla^2 A = -\mu J)$ หรือสมการเวฟ $(\nabla^2 \Phi - \gamma^2 \Phi = 0)$ จากทฤษฎีด้านท้าย

2.1 ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์
พิจารณาเมรชสององค์ประกอบจากรูปที่ 2.12 ใช้วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์หาค่าศักย์ภายใน
เมช



รูปที่ 2.12 บริเวณดำเนินการแก้ปัญหาซึ่งสมมาตรตลอดแนวแกน Y

โคออร์ดิเนตฟิเชิลเมตริกขององค์ประกอบสามารถคำนวณโดยใช้สมการ 2.95a และ 2.95f แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถที่จะคำนวณได้ง่ายถ้าเรานิยาม

$$P_1 = (y_2 - y_3), P_2 = (y_3 - y_1), P_3 = (y_1 - y_2),$$
$$Q_1 = (x_3 - x_2), Q_2 = (x_1 - x_3), Q_3 = (x_2 - x_1) \dots\dots\dots (2.117)$$

ด้วยค่า P_i และ Q_i ($i = 1, 2, 3$ คือ โหนดเฉพาะแต่ละเทอมใน (ออฟฟิเชิลเมตริกส์หาได้โดย

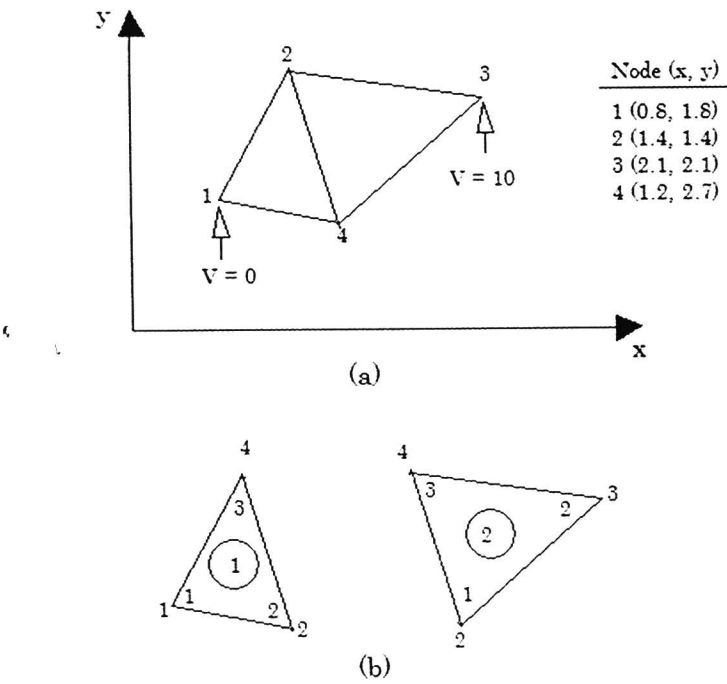
$$c_{ij}^{(e)} = \frac{1}{4A} [P_i P_j + Q_i Q_j] \dots\dots\dots (2.118)$$

ที่ $A = \frac{1}{2} [P_i P_j + Q_i Q_j]$ แสดงในสมการ 2.48 ซึ่งสะดวกมากกว่า ใช้สมการ 2.95a และ 2.95f สำหรับองค์ประกอบที่ 1 ประกอบไปด้วย โหนด 1-2-4 สัมพันธ์สอดคล้องกับจำนวนเฉพาะ 1-2-3 แสดงดังรูปที่ 2.13(b)

แทนที่ค่าต่างๆในสมการ 2.119 จะได้

$$P_1 = -1.3, P_2 = 0.9, P_3 = 0.4$$
$$Q_1 = -0.2, Q_2 = -0.4, Q_3 = 0.6$$
$$A = \frac{1}{2}[0.54 + 0.16] = 0.35$$

..... (2.119)



รูปที่ 2.13 ภาพประกอบตัว (a) เมชสององค์ประกอบ (b) จำนวนค่าเฉพาะทั้งหมดที่องค์ประกอบ

สำหรับองค์ประกอบที่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบของโนด 2-3-4 สัมพันธ์สอดคล้องกับจำนวนเฉพาะ 1-2-3 แสดงดังรูปที่ 2.13(b)

$$P_1 = -0.6, P_2 = 1.3, P_3 = -0.7$$
$$Q_1 = -0.9, Q_2 = 0.2, Q_3 = 0.7$$
$$A = \frac{1}{2}[0.91 + 0.14] = 0.525$$

ดังนั้น

$$[c^{(2)}] = \begin{bmatrix} 0.5571 & -0.4571 & -0.1 \\ -0.4571 & 0.8238 & -0.3667 \\ -0.1 & -0.3667 & 0.4667 \end{bmatrix}$$

..... (2.120)

เทอมของเมตริกโคออร์ดิเนตทั้งหมดประกอบด้วยค่าต่างๆดังนี้

$$\begin{aligned} c_{22} &= c_{22}^{(1)} + c_{11}^{(2)} = 0.6929 + 0.5571 = 1.25 \\ c_{24} &= c_{23}^{(1)} + c_{13}^{(2)} = 0.0857 - 0.1 = -0.0143 \\ c_{44} &= c_{33}^{(1)} + c_{33}^{(2)} = 0.3714 + 0.4667 = 0.8381 \\ c_{21} &= c_{21}^{(1)} = -0.7786 \\ c_{23} &= c_{12}^{(1)} = -0.4571 \\ c_{41} &= c_{31}^{(1)} = -0.4571 \\ c_{43} &= c_{33}^{(1)} = -0.3667 \end{aligned}$$



จากการหาค่าโคออร์ดิเนตเมตริกด้านบนเป็นการค่าจำนวนเฉพาะและต่อไปเป็นการหาค่าจำนวนทั่วไปหรือจำนวนทั้งหมด

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11}^{(1)} & c_{12}^{(1)} & 0 & c_{13}^{(1)} \\ c_{21}^{(1)} & c_{23}^{(1)} + c_{11}^{(2)} & c_{12}^{(2)} & c_{23}^{(1)} + c_{13}^{(2)} \\ 0 & c_{21}^{(2)} & c_{22}^{(2)} & c_{23}^{(2)} \\ c_{31}^{(1)} & c_{32}^{(1)} + c_{31}^{(2)} & c_{32}^{(2)} & c_{33}^{(1)} + c_{33}^{(2)} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2.121)$$

จาก $\sum_{i=1}^4 c_{ij} = 0 = \sum_{j=1}^4 c_{ij}$ จะถูกใช้ตรวจสอบคุณลักษณะ C ที่ได้จากสมการที่ 2.109 ที่โนดอิสระ 2 และ 4 รวมถึงโนดอื่นๆ

$$v_2 = -\frac{1}{c_{22}}(V_1 c_{12} + V_3 c_{32} + V_4 c_{42}) \quad \dots\dots\dots (2.122)$$

$$v_4 = -\frac{1}{c_{44}}(V_1 c_{14} + V_2 c_{24} + V_3 c_{34}) \quad \dots\dots\dots (2.123)$$

หรือ

$$v_2 = -\frac{1}{1.25}(-4.571 - 0.0143V_4) \quad \dots\dots\dots (2.122)$$

$$v_4 = -\frac{1}{0.8381}(-0.143V_2 - 3.667) \quad \dots\dots\dots (2.123)$$

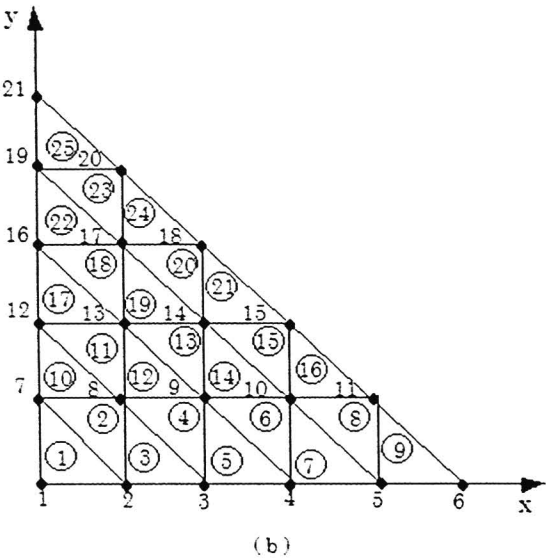
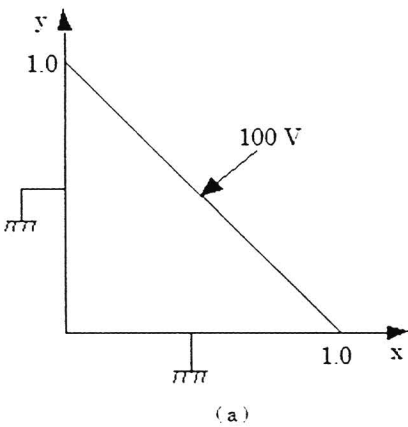
โดยเริ่มต้นกำหนดให้ $v_2 = 0$ เราสามารถประยุกต์ใช้สมการ 2.122 และสมการ 2.123 แทนที่ซึ่งกันและกันซึ่งจะได้โดยจะได้ผลออกมาสองประการ

1) ค่า v_2, v_4

$$v_2 = 3.6568$$

$$v_4 = 4.4378$$

2) รูปแสดงการหาค่าศักย์



รูปที่ 2.14 (a) การแก้ปัญหาหาค่าศักย์ไฟฟ้าสองมิติ (b) การแบ่งพื้นที่ออกเป็นรูปสามเหลี่ยม 25 ชิ้น

รูปที่ 2.14 แสดงการแบ่งส่วนอีลิเมนต์และการกำหนดจุดโนดซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2.77 แต่เป็นเมทริกซ์ขนาดใหญ่ขนาด 25×25 จึงควรใช้การคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์เท่านั้นซึ่งจะไม่แสดงในที่นี้แต่จะสามารถศึกษาค้นคว้าจากหนังสืออ้างอิง

2. Solution of Poisson’s Equation

สมการปัวซองใน 2 มิติคือ

$$\nabla^2 V = \frac{\rho_s}{\epsilon} \tag{2.124}$$

2.1 Deriving Element – governing Equations

$$V_e = \sum_{i=1}^N V_{ei} \alpha_i(x, y) \tag{2.125}$$

$$\rho_{se} = \sum_{i=1}^N \rho_{ei} \alpha_i(x, y) \dots\dots\dots (2.126)$$
$$T_{ij}^{(e)} = \int \alpha_i \alpha_j dS \dots\dots\dots (2.127)$$
$$T_{ij}^{(e)} = A/12 \quad \text{เมื่อ } i \neq j$$
$$= A/6 \quad \text{เมื่อ } i = j \dots\dots\dots (2.128)$$

จากค่า

2.2 เทคนิควิธีการทำซ้ำ (Solving the Resulting Equation)

$$V_k = -\frac{1}{c_{kk}} \sum_{i=1}^n V_i C_{ki} + \frac{1}{\in c_{kk}} \sum_{i=1}^n T_{ki} \rho_i \dots\dots\dots (2.129)$$

2.3 วิธีการในรูปแบบทางเมตริกซ์ (Band Matrix Method)

$$[A][V] = [B] \dots\dots\dots (2.130)$$

3. Solution of the Wave Equation

เมื่อ N = จำนวนจุดโนด ดังนั้นค่าศักย์มีสมการเป็น

$$\Phi_e(x, y) = \sum_{e=1}^N \alpha_i \Phi_{ei} \dots\dots\dots (2.131)$$

$$g_e(x, y) = \sum_{e=1}^N \alpha_i g_{ei} \dots\dots\dots (2.132)$$

2.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก

เป็นสมการที่ง่ายให้กับตัวส่งสัญญาณ(Reader) ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในการหาการกระจายสนามแม่เหล็กของอาร์เอฟไอดีความถี่ 13.56MHz ที่ตัวส่งสัญญาณ สามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการของแมกซ์เวลล์ได้ดังนี้

$$(j\omega\sigma - \omega\epsilon_0)A + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times A) = j^e \dots\dots\dots (2.133)$$

เมื่อกำหนดให้

- ω

คือ

ความถี่เชิงมุม
- ϵ_0

คือ

Permittivity of free space
- μ_0, μ_r

คือ

Permeability of free space and relative permeability
- $B = \nabla \times A$

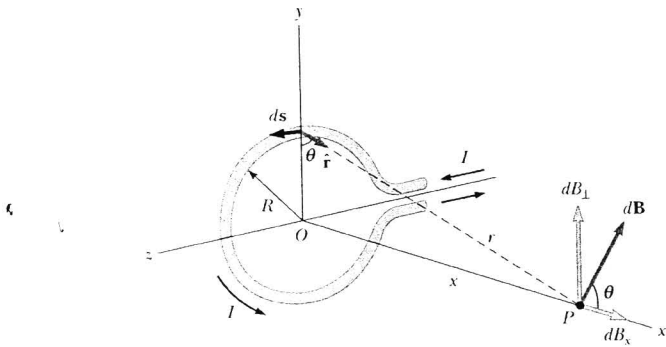
คือ

ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก
- A

ปริมาณเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็ก

2.6 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณขดลวดวงกลม

หลักในการสร้างสนามแม่เหล็กของขดลวดสายอากาศอาร์เอฟไอดี (RFID) อาศัยทฤษฎีการเหนี่ยวนำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไหลในขดลวดสายอากาศตัวส่งสัญญาณ(Reader) จะทำให้เกิด สนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆตัวมัน ซึ่งสามารถที่จะคำนวณความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของขดลวด ตัวส่งสัญญาณ(Reader) กฎของ Biot-Savart กับ current element ที่อยู่ทางด้านซ้ายของวงจะได้ ซึ่ง เขียนอธิบายสมการได้ดังนี้



รูปที่ 2.15 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดที่กระแสไหลเป็นวงกลม

$$dB = \frac{\mu_0 I ds}{4\pi r^2}$$
$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{ds}{(\sqrt{x^2 + y^2})^{1/2}}$$
$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{ds}{(x^2 + y^2)}$$

ส่วนประกอบของเวกเตอร์ $\vec{dB}$

$$dB_x = dB \cos \theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{ds}{(x^2 + R^2)} \frac{R}{(x^2 + R^2)^{1/2}}$$
$$dB_x = dB \sin \theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{ds}{(x^2 + R^2)} \frac{x}{(x^2 + R^2)^{1/2}}$$

เมื่อ $\vec{B} = \int dB_x + \int dB_y$

แต่เมื่อ $dB_y = 0$

ดังนั้น $B_x = \int dB \cos \theta$

$$= \frac{\mu_0 IN}{4\pi} \frac{R}{(x^2 + R^2)(x^2 + R^2)^{1/2}} \int ds$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\mu_0 IN}{4\pi} \frac{R}{(x^2 + R^2)(x^2 + R^2)^{1/2}} (2\pi R) \\ &= \frac{\mu_0 IN}{2} \frac{R^2}{(x^2 + R^2)^{3/2}} \\ B_x &= \frac{\mu_0 INx^2}{2(x^2 + R^2)^{3/2}} \dots\dots\dots(2.134) \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้

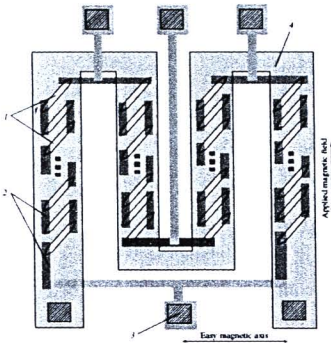
- I คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวด N คือ จำนวนรอบของขดลวด
- R คือ ระยะรัศมีของขดลวด x คือ ระยะแนวแกนถึงจุดพิจารณา
- μ_0 คือ ค่าการซึมซับภายในอากาศ $4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/meter)

2.7 ชนิดของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

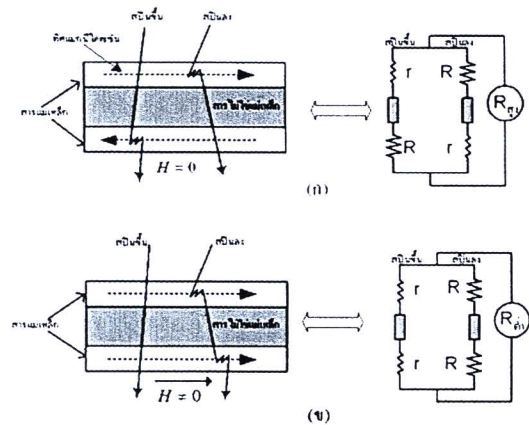
หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่นำไปใช้งานสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด ดังนี้

2.7.1 Anisotropic Magneto- resistive (AMR)

AMR เป็นโลหะที่ใช้นิกเกิล เหล็ก หรือนิกเกิล เหล็ก ทองแดงของฟิล์มบาง ได้มีการวิเคราะห์เพื่อใช้ในเซนเซอร์สนามแม่เหล็กและชนิดของความสามารถในการเป็นแม่เหล็กได้สูง ฟิล์มบางเปลี่ยนความต้านทานได้ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ในการควบคุมระหว่างการถ่ายทอดความเป็นแม่เหล็กได้สูงของฟิล์ม และการควบคุมกระแสในแผ่นฟิล์ม ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทั้งหมดกับอัตราส่วนการเปลี่ยนค่าความต้านทานด้วยแม่เหล็ก (MR ratio) เน้นอนการเปลี่ยนแปลงในการแยกความต้านทานโดยความต้านทานต่ำสุดเป็นโลหะ Ni-19Fe ที่มากกว่า 2% ความไวสนามแม่เหล็กมีขนาดใหญ่กว่ามากทะลุผ่านขดลวดที่ พันรอบเซนเซอร์สนามแม่เหล็กมีการเหนี่ยวนำที่แตกต่าง AMR เซนเซอร์มีอัตราความเร็วอิสระรูปแบบอุปกรณ์ประกอบด้วยหัวอ่านในฮาร์ดดิสก์ที่มีความหนาแน่นสูง เซนเซอร์สนามแม่เหล็กที่นำไปใช้งานที่หลากหลาย และMRAM (Magneto resistive random access memory) [9]



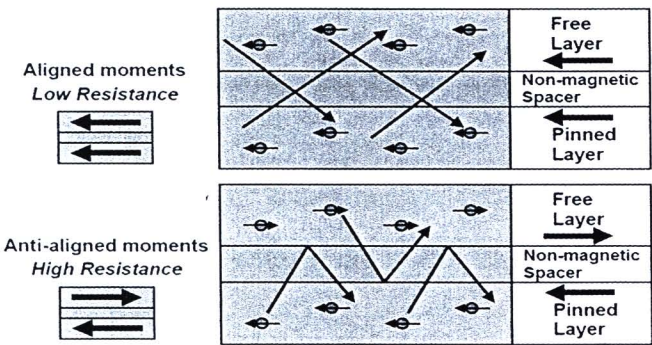
รูปที่ 2.16 องค์ประกอบของตัวเอ็มอาร์เซนเซอร์



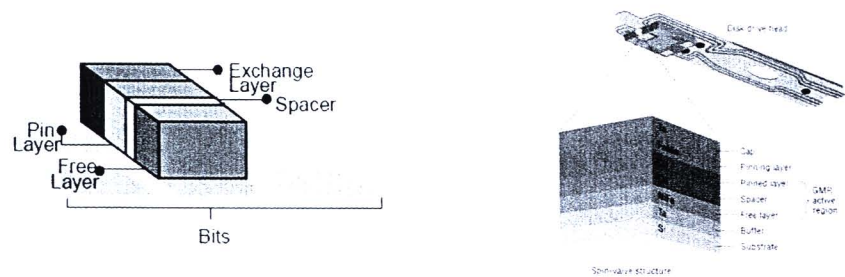
รูปที่ 2.17 การกระเจิงของอิเล็กตรอนที่มีสปินแบบ AMR

2.7.2 Giant Magneto resistive (GMR)

ปรากฏการณ์ Giant Magneto-resistive (GMR) เป็นผลทางกลศาสตร์ควอนตัมซึ่งถูกพบในโครงสร้างประกอบของฟิล์มบางของโลหะที่เป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกและสารโลหะที่ไม่เป็นแม่เหล็ก (nonmagnetic metal) โดยที่ชั้นของสารทั้งสองชนิดวางซ้อนสลับ กันไปเป็นชั้นๆคล้ายกับขนมชั้น ลักษณะเด่นที่พบก็คือการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานทางไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งความต้านทานจะมีค่ามาก เมื่อสถานะสปินในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรมีทิศสวนกัน กล่าวคือเกิด anti-ferromagnetic coupling ระหว่างชั้น และจะมีความต้านทานน้อยที่สุดเมื่อสถานะสปินในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรมีทิศขนานกัน การค้นพบนี้นำไปสู่การพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนฮาร์ดดิสก์ (hard disk) ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์[10] ซึ่ง ค่า MR Ratio ($\Delta R / R$) มีค่ามากกว่า 20% [11]



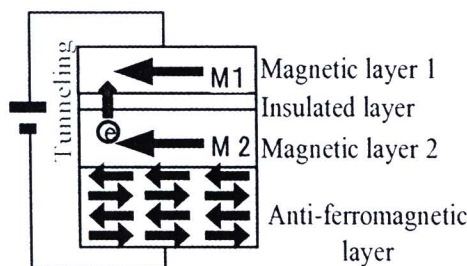
รูปที่ 2.18 การกระเจิงของอิเล็กตรอนที่มีสปินแบบ GMR



รูปที่ 2.19 โครงสร้าง Spin-valves ประกอบขึ้นจากชั้นของฟิล์มบางต่างๆ

2.7.3 Tunneling Magneto-resistive (TMR)

TMR head คือหัวอ่านที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานแม่เหล็กในทีแคบ ไม่ว่าอย่างไรทำให้เกิดผลการเปลี่ยนในทีแคบของอิเล็กตรอนชั่วขณะวิ่งทะลุผ่านชั้นฉนวนที่อยู่ตรงกลางชั้น โดยมีแม่เหล็ก 2 ชั้น ทำให้เกิดความต้านทานแม่เหล็กมีการเปลี่ยนความต้านทานขนาดใหญ่ ดังนั้นการอ่านค่าเอาต์พุตของหัวอ่านTMR มีอยู่หลายค่าเวลาที่สูงกว่าหัวอ่านGMR โดย ค่า MR Ratio ($\Delta R / R$) มีค่ามากกว่า 30% [11]



รูปที่ 2.20 แสดงแผนผังโครงสร้างของหัวอ่าน TMR

ในรูปที่ 2.19 แสดงแผนผังโครงสร้างชั้น MTJ มี 2 ขั้วไฟฟ้าที่ผลิตจากวัสดุที่เป็นทองแดง เหล็ก โบรอน ขณะที่แยกกันกลางด้วยแมกนีเซียม ออกซิเจน เป็นการยกระดับคุณลักษณะของอุปกรณ์ ชั้นที่คงเหลือในโครงสร้างเป็นสิ่งที่เพิ่มขึ้นในการเลือกวัสดุและคุณลักษณะแม่เหล็กของอุปกรณ์ ชนิดเป็นสิ่งที่หนึ่งที่เป็นผลโดยตรง การทำงานมี 2 ขั้ว ขั้วหนึ่งจะเป็นขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า (pinned layer) ในแต่ละเซนเซอร์จะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กที่แน่นอนโดยเปลี่ยนการป้อน ขณะที่ขั้วไฟฟ้าที่คงเหลือ (free layer) ที่สัมผัสจากสนามภายนอก ในกรณีนี้ที่ติดกับชั้น อิริเดียม แมกนีส (pinning layer) เป็นชั้นเดียวกับ pinned layer [12]

2.8 ระบบอาร์เอฟไอดี (RFID)

RFID ย่อมาจาก Radio Frequency Identification เป็นวิธีการใช้คลื่นความถี่วิทยุเข้ามาช่วย "อ่าน" รหัสประจำตัวของสินค้าชิ้นต่างๆ เพื่อแสดงตำแหน่งหรือแสดงตนเองได้ โดยการติดป้ายฉลากด้วยแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีการลงโปรแกรมควบคุมที่ระบุอย่างเฉพาะเจาะจง โดยติดไปกับวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ และระบุถึงข้อมูลของวัตถุนั้นๆ

2.8.1 วิวัฒนาการทางเทคโนโลยีในการติดตามและระบุสิ่งของ

ย้อนหลังไปกว่าสิบปีที่ Bar Code ได้ถูกใช้เป็นมาตรฐานในการตรวจสอบสินค้าตลอดจนถูกใช้ในการระบุสิ่งของต่างๆ ตั้งแต่สินค้าในห้างไปจนถึงผลิตภัณฑ์ในคลังสินค้า หรือกระเป๋าสัมภาระในการเดินทางโดยเครื่องบิน ซึ่งก็ได้สร้างความสะดวกสบาย รวดเร็วและถูกต้องขึ้นอย่างมาก แต่ทั้งหมดนี้กำลังจะถูกแทนที่ด้วย เทคโนโลยีใหม่ที่เรียกว่า RFID ใช้คลื่นวิทยุที่รู้จักกันในชื่อว่า RFID เป็นเทคโนโลยีที่อาศัยคลื่นวิทยุสื่อสารในการระบุสิ่งของ สัตว์เลี้ยง หรือแม้แต่บุคคล ซึ่งนับว่าเป็นแถบป้ายอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถส่งข้อมูลต่างๆ ไปยังอุปกรณ์ภาครับได้ ทั้งนี้ถือว่าเป็นวิวัฒนาการทางเทคโนโลยีในการติดตามและระบุสิ่งของ ที่เริ่มจากการผูกผ้าริบบิ้นสีต่างๆ การติดป้ายชื่อ มาเป็นการใช้บาร์โค้ดที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน และอนาคตอันใกล้นี้จะถูกแทนที่ด้วย RFID อุปกรณ์ชิปอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่สามารถบรรจุข้อมูลต่างลงไปได้

ปัจจุบันมีการนำไปใช้ในหลายวงการ เช่น ที่ใช้ในการบันทึกสัมภาระหีบห่อของผู้โดยสารว่าจะนำลงที่สนามบินใด สำหรับผู้ใช้ทางที่เสียค่าบริการผ่านทางพิเศษเหมาจ่ายรายเดือน ที่พิพิธภัณฑ์จะบันทึกข้อมูลโบราณวัตถุและภาพเขียนมีค่า การฝังไมโครชิปใต้ผิวหนังสุนัขและแมวที่ใช้เพื่อการระบุตัวเจ้าของ ทีมลรัฐฟลอริดาหมีครอบครัวยาวหนึ่งถึงกับปลูกถ่ายแถบดังกล่าวไว้ในตัวเพื่อบันทึกข้อมูลทางการแพทย์ไว้เพื่อการบำบัดรักษาโรคได้อย่างแม่นยำ

2.8.2 จุดเด่นของระบบ RFID (Radio Frequency Identification)

1. การอ่านข้อมูลของฉลากที่ได้โดยไม่ต้องมีการสัมผัส
2. สามารถอ่านค่าได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี
3. ทนต่อความเปียกชื้น แรงสั่นสะเทือน การกระทบกระแทก
4. สามารถอ่านข้อมูลได้ถูกต้องรวดเร็ว
5. สามารถอ่านข้อมูลได้พร้อมกันหลายๆ แถบ RFID
6. มีความละเอียด และสามารถบรรจุข้อมูลได้มากกว่า ซึ่งทำให้สามารถแยกความแตกต่าง

ของสินค้าแต่ละชิ้นแม้จะเป็น SKU (Stock Keeping Unit-ชนิดสินค้า) เดียวกันก็ตาม

7. ค่าเฉลี่ยของความถูกต้องของการอ่านข้อมูลด้วยเทคโนโลยี RFID นั้นจะอยู่ที่ประมาณ 99.5%

8. สามารถเขียนทับข้อมูลได้ จึงทำให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ซึ่งจะลดต้นทุนของการผลิตป้ายสินค้า ซึ่งคิดเป็นประมาณ 5% ของรายรับของบริษัท

9. ระบบความปลอดภัยสูงกว่ายากต่อการปลอมแปลงและลอกเลียนแบบ



2.8.3 องค์ประกอบของระบบอาร์เอฟไอดี(RFID)[13]

ระบบอาร์เอฟไอดีประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ ดังนี้

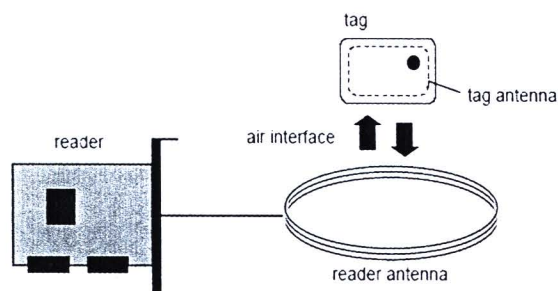
2.8.3.1 Tags หรือ Transponders

แท็กส์ (Tag) นั้นเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Transponder มาจากคำว่า Transmitter ผสมกับคำว่า Responder นั่นเอง ถ้าจะแปลให้ตรงตามศัพท์ แท็กส์ก็จะทำหน้าที่เป็นตัวรับและส่งสัญญาณข้อมูลที่บันทึกอยู่ในแท็กส์ตอบสนองไปที่ตัวอ่านข้อมูล การสื่อสารระหว่างแท็กส์และตัวอ่านข้อมูลจะเป็นแบบไร้สายผ่านอากาศ ภายในแท็กส์จะประกอบไปด้วยชิปสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Chip) ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับสายอากาศ

ตัวรับและส่งข้อมูลอาจมีรูปร่างได้หลายแบบขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน โดยอาจมีรูปร่างเหมือนบัตรเครดิตในการใช้งานทั่วไป หรือเล็กขนาดใส่ดินสอยาวเพียง 10 มิลลิเมตร เพื่อฝังเข้าไปใต้ผิวหนังสัตว์ในกรณีนำไปใช้ในงานปศุสัตว์ หรืออาจมีขนาดใหญ่มากสำหรับแท็กส์ที่ใช้ติดกับเครื่องจักรขณะทำการขนส่ง แท็กส์อาจนำไปติดไว้กับสินค้าในร้านค้าปลีกทั่วไปเพื่อป้องกันขโมย โดยจะมีการติดตั้งสายอากาศของตัวอ่านข้อมูลขนาดใหญ่ไว้ตรงประตูทางออกเพื่อทำการตรวจจับขโมย

ชิปที่อยู่ในแท็กส์จะมีหน่วยความจำซึ่งอาจเป็นแบบอ่านได้อย่างเดียว (ROM) หรือทั้งอ่านทั้งเขียน (RAM) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน โดยปกติหน่วยความจำแบบ ROM จะใช้เก็บข้อมูลเกี่ยวกับการรักษาความปลอดภัย เช่น ข้อมูลของบุคคลที่มีสิทธิผ่านเข้าออกในบริเวณที่มีการควบคุม หรือระบบปฏิบัติการ ในขณะที่ RAM จะใช้เก็บข้อมูลชั่วคราวในระหว่างที่แท็กส์และตัวอ่านข้อมูลทำการติดต่อสื่อสารกัน

นอกจากนี้อาจมีการนำหน่วยความจำแบบ EEPROM มาใช้ในกรณีต้องการเก็บข้อมูลในระหว่างที่แท็กส์และตัวอ่านข้อมูลทำการสื่อสาร และข้อมูลยังคงอยู่ถึงแม้จะไม่มีพลังงานไฟฟ้าป้อนให้แก่แท็กส์

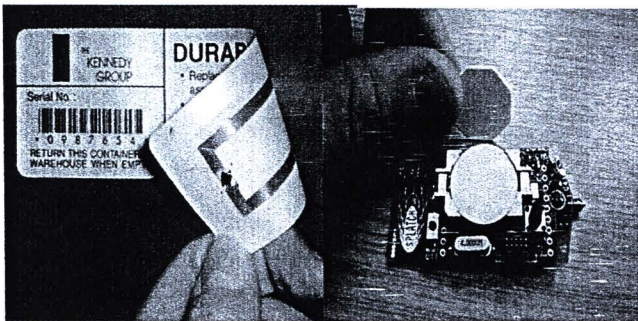


รูปที่ 2.21 ลักษณะการรับ-ส่งข้อมูลของอาร์เอฟไอดี

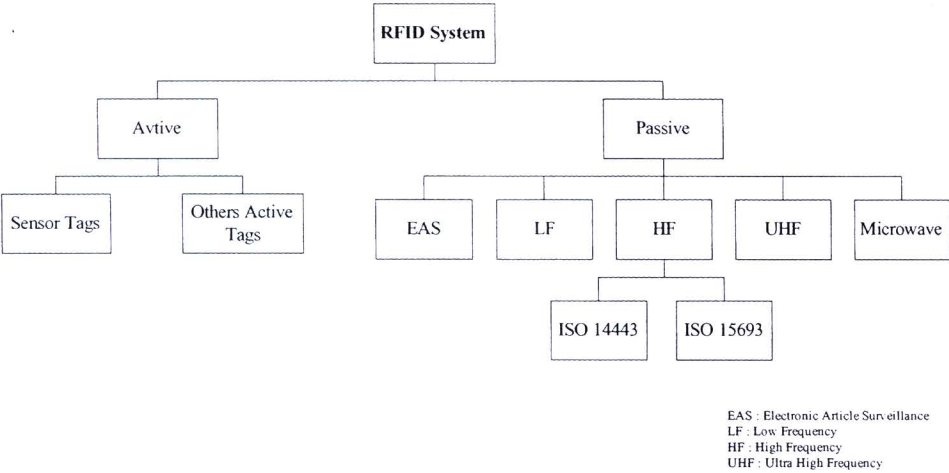
สามารถแบ่งชนิดของแท็กส์ออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. ตัวรับและส่งข้อมูลชนิดแอ็กทีฟ (Active Tag) แท็กส์ชนิดนี้จะมีแบตเตอรี่อยู่ภายใน เพื่อป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แท็กส์ทำงานโดยปกติ เราจะสามารถทั้งอ่านและเขียนข้อมูลลงในแท็กส์ชนิดนี้ได้ และการที่ต้องใช้แบตเตอรี่จึงทำให้แท็กส์ ชนิดแอ็กทีฟมีอายุการใช้งานจำกัดตามอายุของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่หมดก็ต้องนำแท็กส์ไปทิ้งไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากจะมีการ seal ที่ตัวแท็กส์จึงไม่สามารถเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้ อย่างไรก็ตามถ้าเราสามารถออกแบบวงจรของแท็กส์ให้กินกระแสไฟน้อยๆ ก็อาจจะมีอายุการใช้งานนานนับสิบปี แท็กส์ชนิดแอ็กทีฟนี้จะมีกำลังส่งสูงและระยะการรับส่งข้อมูลไกลกว่าแท็กส์ชนิดพาสซีฟ นอกจากนี้ยังทำงานในบริเวณที่มีสัญญาณรบกวนได้ดี

2. ตัวรับและส่งข้อมูลชนิดพาสซีฟ (Passive Tag) จะไม่มีแบตเตอรี่อยู่ภายใน แต่จะทำงานโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวอ่านข้อมูล จึงทำให้แท็กส์ชนิดพาสซีฟมีน้ำหนักเบากว่าแท็กส์ชนิดแอ็กทีฟ ราคาถูกกว่า และมีอายุการใช้งานไม่จำกัด แต่ข้อเสียก็คือระยะการรับส่งข้อมูลใกล้ และตัวอ่านข้อมูลจะต้องมีความไวสูง นอกจากนี้แท็กส์ชนิดพาสซีฟมักจะมีปัญหาเมื่อนำไปใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่มีสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนสูงอีกด้วย แต่ข้อได้เปรียบในเรื่องราคาและอายุการใช้งานทำให้แท็กส์ชนิดพาสซีฟนี้เป็นที่นิยมมากกว่า



รูปที่ 2.22 แสดง RFID Tags แบบ Passive และ Active

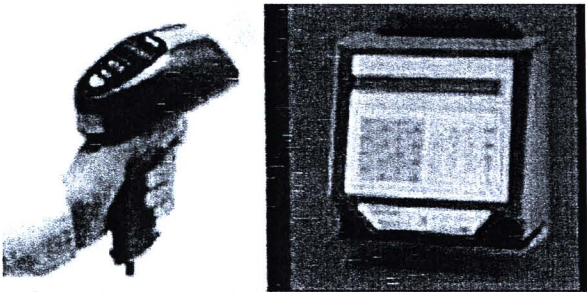


รูปที่ 2.23 ระบบอาร์เอฟไอดี

2.8.3.2 Reader หรือ Interrogator

หน้าที่สำคัญของตัวอ่านข้อมูล (Reader หรือ Interrogator) ก็คือการรับข้อมูลที่ส่งมาจากแท็กส์ แล้วทำการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล ถอดรหัสข้อมูล และนำข้อมูลผ่านเข้าสู่กระบวนการต่อไป นอกจากนี้ตัวอ่านข้อมูลที่ดีต้องมีความสามารถในการป้องกันการอ่านข้อมูลซ้ำ เช่นในกรณีที่แท็กส์ถูกวางทิ้งอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตัวอ่านข้อมูลสร้างขึ้น หรืออยู่ในระยะการรับส่ง ก็อาจทำให้ตัวอ่านข้อมูลทำการรับหรืออ่านข้อมูลจากแท็กส์ซ้ำอยู่เรื่อยๆ ไม่สิ้นสุด

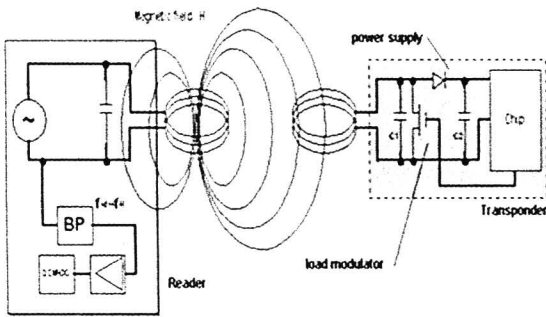
ดังนั้นตัวอ่านข้อมูลที่ดีต้องมีระบบป้องกันเหตุการณ์เช่นนี้ที่เรียกว่าระบบ "Hands Down Polling" โดยตัวอ่านข้อมูล จะสั่งให้แท็กส์หยุดการส่งข้อมูลในกรณีเกิดเหตุการณ์ดังกล่าว หรืออาจมีบางกรณีที่มีแท็กส์หลายแท็กส์อยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมกัน หรือที่เรียกว่า "Batch Reading" ตัวอ่านข้อมูลควรมีความสามารถที่จะจัดลำดับการอ่านแท็กส์ทีละตัวได้



รูปที่ 2.24 แสดงตัวอย่างการใช้งานตัวอ่านข้อมูล(Reader)

2.8.4 หลักการพื้นฐานและการทำงาน

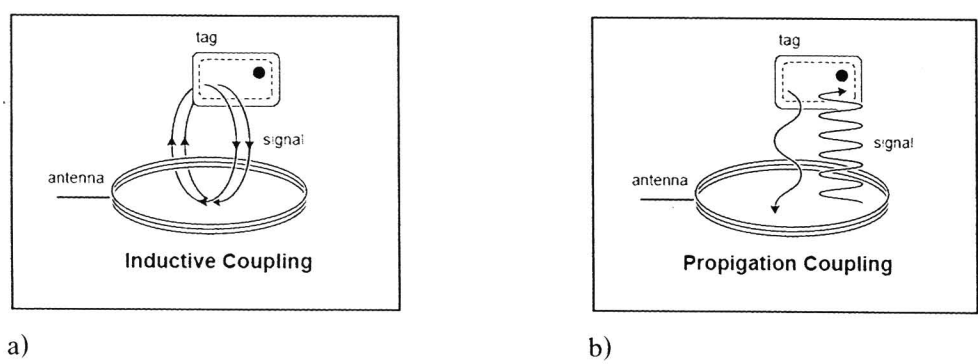
- 1. ตัวอ่านข้อมูล (Reader) จะปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาตลอดเวลา และคอยจับว่ามีแท็กส์ (Tag or Transponder) เข้ามาอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไม่ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือการคอยตรวจจับว่ามีการมอดูเลตสัญญาณเกิดขึ้นหรือไม่
- 2. เมื่อมีแท็กส์เข้ามาอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แท็กส์จะได้รับพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้แท็กส์เริ่มทำงานและจะส่งข้อมูลในหน่วยความจำที่ผ่านการ มอดูเลตกับคลื่นพาหะแล้วออกมาทางสายอากาศที่อยู่ภายในแท็กส์
- 3. คลื่นพาหะที่ถูกส่งออกมาจากแท็กส์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) ความถี่ (Frequency) หรือเฟส (Phase) ขึ้นอยู่กับวิธีการมอดูเลต
- 4. ตัวอ่านข้อมูลจะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของคลื่นพาหะแปลงออกมาเป็นข้อมูลแล้วทำการถอดรหัสเพื่อนำข้อมูลไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 2.25 องค์ประกอบของระบบอาร์เอฟไอดี

2.8.5 การแพร่กระจายคลื่น [14]

การสื่อสารข้อมูลของระบบ RFID ก็ีระหว่างแท็กส์และตัวอ่านข้อมูล (Reader หรือ Interrogator) จะสื่อสารแบบไร้สายผ่านอากาศ โดยจะนำข้อมูลมาทำการมอดูเลต (Modulation) กับคลื่นพาหะที่เป็นคลื่นความถี่วิทยุโดยมีสายอากาศ (Antenna) ที่อยู่ในตัวอ่านข้อมูลเป็นตัวรับและส่งคลื่นซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกันคือ วิธีเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Inductive Coupling หรือ Proximity Electromagnetic) กับวิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Propagation Coupling) ดังรูปที่ 2.25 โดยการ ถ่ายโอนพลังงานและการรับ-ส่งข้อมูลทั้ง 2 วิธี จะแยกการใช้งานตามย่านความถี่คือวิธีเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใช้ในย่าน LF และ HF เพราะเป็นสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ ส่วนวิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใช้ในย่าน UHF และ Microwave



รูปที่ 2.26 การแพร่กระจายคลื่นระหว่างแท็กส์(Tag) กับตัวอ่านข้อมูล(Reader)

ตารางที่ 2.1 บอกลักษณะการแพร่กระจายสัญญาณที่ใช้ตัวแท็กแบบ Passive และระยะของการสื่อสารข้อมูลในแต่ละย่านความถี่ที่จะนำไปใช้งาน

ตารางที่ 2.1 ระยะและวิธีการสื่อสารข้อมูลของอาร์เอฟไอดี

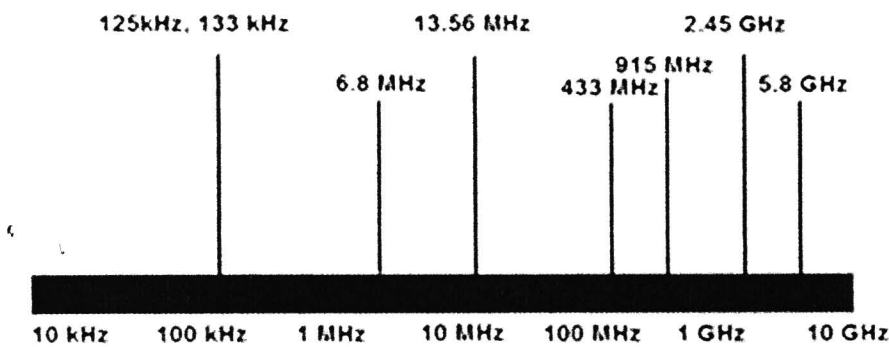
Frequency Band	Common Frequency	Coupling	Communication Range		Data Rate
			Typical	Maximum	
LF	125 to 135kHz	Inductive	20cm	100cm	Low
HF	13.56 MHz	Inductive	10cm	70cm	High
UHF	868 to 928 MHz	Backscatter	3m	10cm	Medium
Microwave	2.45 GHz	Backscatter	3m	?	Medium
	5.8 GHz	Backscatter	3m	?	Medium

2.8.6 ย่านความถี่ที่ใช้งาน [15]

ในปัจจุบันได้มีการรวมกลุ่มระหว่างแต่ละประเทศ เพื่อทำการกำหนดมาตรฐานความถี่คลื่นพาหะของระบบ RFID โดยมีสามกลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มประเทศในยุโรปและแอฟริกา (Region1), กลุ่มประเทศอเมริกาเหนือและอเมริกาใต้ (Region2) , และสุดท้ายคือกลุ่มประเทศตะวันออกไกลและออสเตรเลีย (Region3) ซึ่งแต่ละกลุ่มประเทศจะกำหนดแนวทางในการเลือกใช้ความถี่ต่างๆ ให้แก่บรรดาประเทศสมาชิก

ความถี่ของคลื่นพาหะที่นิยมใช้งานมีอยู่ 4 ย่านความถี่ คือ

- ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency : LH) ต่ำกว่า 150kHz
- ย่านความถี่สูง (High Frequency : HF) 13.56MHz
- ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency : UHF) 433/868*/915**MHz
- ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave) 2.4/5.8 GHz



รูปที่ 2.27 ย่านความถี่ที่ระบบอาร์เอฟไอดีถูกนำไปใช้งาน

นอกจากนี้รัฐบาลของแต่ละประเทศ โดยทั่วไปจะมีการออกกฎหมายเกี่ยวกับระเบียบการใช้งานย่านความถี่ต่างๆ รวมถึงกำลังส่งของระบบ RFID ด้วย

ตารางที่ 2.2 ย่านความถี่ต่างๆ ของระบบ RFID และการใช้งาน

ย่านความถี่	คุณลักษณะ	การใช้งาน
ย่านความถี่ต่ำ 100-500 kHz ความถี่มาตรฐานที่ใช้งานทั่วไปคือ 125 kHz	- ระยะการรับส่งข้อมูลใกล้ - ต้นทุนไม่สูง - ความเร็วในการอ่านข้อมูลต่ำ - ความถี่ในย่านนี้เป็นที่แพร่หลายทั่วโลก	- Access Control - ปุศสัตว์ - ระบบคลัง - รถยนต์
ย่านความถี่กลาง 10-15 MHz ความถี่มาตรฐานที่ใช้งานทั่วไปคือ 13.56 MHz	- ระยะการรับส่งข้อมูลปานกลาง - ราคามีแนวโน้มถูกลงในอนาคต - ความเร็วในการอ่านข้อมูลปานกลาง - ความถี่ในย่านนี้เป็นที่แพร่หลายทั่วโลก	- Access Control - สมาร์ตการ์ด
ย่านความถี่สูง 850-950 MHz 2.4-5.8 GHz ความถี่มาตรฐานที่ใช้งานทั่วไปคือ 2.45 GHz	- ระยะการรับส่งข้อมูลไกล (10 เมตร) - ความเร็วในการอ่านข้อมูลสูง - ราคาแพง	- รถไฟ - ระบบเก็บค่าผ่านทาง

2.8.7 อัตราการรับส่งข้อมูลและแบนด์วิดท์

อัตราการรับส่งข้อมูล (Data Transfer Rate) จะขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นพาหะ โดยปกติถ้าความถี่ของคลื่นพาหะยิ่งสูง อัตราการรับส่งข้อมูลก็จะยิ่งสูงตามไปด้วย ส่วนการเลือกแบนด์วิดท์ หรือย่านความถี่นั้นก็จะส่งผลต่ออัตราการรับส่งข้อมูลเช่นกัน โดยมีหลักว่า แบนด์วิดท์ควรจะมีค่ามากกว่าอัตราการรับส่งข้อมูลที่ต้องการอย่างน้อยสองเท่า ยกตัวอย่างเช่น ถ้าใช้แบนด์วิดท์ในช่วง 2.4-2.5 GHz ก็จะสามารถรองรับอัตราการรับส่งข้อมูลได้ถึงประมาณ 2 megabits ต่อวินาที เป็นต้น แต่การใช้แบนด์วิดท์ที่กว้างเกินไปก็อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนมาก หรือทำให้ S/N Ratio ต่ำลงนั่นเอง ดังนั้นการเลือกใช้แบนด์วิดท์ให้ถูกต้องก็เป็นส่วนสำคัญในการพิจารณา

2.8.8 ระยะการรับส่งข้อมูลและกำลังส่ง

ระยะการรับส่งข้อมูลในระบบ RFID ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญต่างๆ คือ กำลังส่งของตัวอ่านข้อมูล (Reader/Interrogator Power) กำลังส่งของแท็กส์ (Tag Power) และสภาพแวดล้อม ส่วนการออกแบบสายอากาศของตัวอ่านข้อมูล จะเป็นตัวกำหนดลักษณะรูปร่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมาจากสายอากาศ ดังนั้นระยะการรับส่งข้อมูล บางทีอาจขึ้นอยู่กับมุมของการรับส่งระหว่างแท็กส์และตัวอ่านข้อมูลด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสำคัญ

ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปจะลดลงตามระยะทางโดยแปรผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง แต่ในบางสภาพแวดล้อมซึ่งอาจมีการสะท้อนกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสิ่งต่างๆรอบตัว เช่น โลหะ ก็อาจทำให้ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว โดยอาจแปรผกผันกับระยะทาง ยกกำลังสี่ ปรากฏการณ์เช่นนี้เราเรียกว่า "Multi-path Attenuation" ซึ่งจะส่งผลให้ระยะการรับส่งข้อมูลสั้นลง หรือแม้กระทั่งความชื้นในอากาศก็อาจมีผลในกรณีที่ความถี่สูงๆ ดังนั้นการนำระบบ RFID ไปใช้งานก็ควรมีการคำนึงถึงสภาพแวดล้อม เพราะจะมีผลกระทบกับระยะการรับส่งข้อมูล และพยายามติดตั้งระบบให้ห่างไกลจากโลหะ ซึ่งอาจทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

กำลังส่งของแท็กส์ที่จะส่งกลับมายังตัวอ่านข้อมูลนั้น โดยทั่วไปจะมีกำลังที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับกำลังส่งของ ตัวอ่านข้อมูล ดังนั้นความไวในการตรวจจับสัญญาณของตัวอ่านข้อมูล ก็เป็นอีกจุดหนึ่งที่ต้องพิจารณา

ถึงแม้ในทางเทคนิคเราจะสามารถทำให้ตัวอ่านข้อมูลมีกำลังส่งมากแค่ไหนก็ได้ แต่โดยทั่วไปก็จะถูกจำกัดโดยกฎหมายของแต่ละประเทศ เช่นเดียวกับความถี่ ดังนั้นในระบบ RFID โดยทั่วไปจะมีกำลังส่งเพียงระหว่าง 100 -500 mW

2.8.9 มาตรฐานการใช้งานอาร์เอฟไอดี

จากการที่เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี (RFID) มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการกำหนดมาตรฐานโลกของการใช้งาน เพื่อให้ผู้ผลิตหรือผู้ใช้งานสามารถบริการและจัดการใช้งานเทคโนโลยีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกระบวนการพัฒนามาตรฐานจำเป็นจะต้องเป็นที่ยอมรับและสามารถใช้งานได้ในทุกประเทศทั่วโลก และเครื่องอ่านทุกยี่ห้อสามารถทำงานได้ที่ความถี่ที่เข้ากันได้โดยการพัฒนามาตรฐานระหว่างประเทศสำหรับการใช้งานอาร์เอฟไอดี (RFID) มีหลายกลุ่มองค์กรได้พยายามพัฒนามาตรฐานระหว่างประเทศขึ้น อาทิเช่น มาตรฐาน ISO และมาตรฐาน EPC

2.8.9.1 มาตรฐาน ISO/IEC

ISO หรือ International Organization for Standardization เป็นองค์กรระหว่างประเทศที่ว่าด้วยมาตรฐาน ก่อตั้งเมื่อปี พ.ศ. 2489 ตั้งอยู่ ณ กรุงเจนีวา ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ เป็นองค์กรชำนาญพิเศษที่ไม่ใช่หน่วยงานรัฐบาล โดยเกิดจากการรวมตัวระหว่างองค์กรอุตสาหกรรมนานาชาติที่มีพันธะสัญญาที่จะพัฒนามาตรฐานอุตสาหกรรมประกอบด้วยสมาชิก 110 ประเทศ แต่ละประเทศจะมีหน่วยงานทางด้านมาตรฐานหรือองค์กรมาตรฐานของประเทศนั้นๆ เป็นตัวแทน มีวัตถุประสงค์เพื่อส่งเสริมความร่วมมือ และการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมให้เป็นอันหนึ่งอันเดียวกันเพื่อประโยชน์ทางการค้าระหว่างประเทศหรือเกิดระบบมาตรฐานของโลกที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นไปในอนาคต

2.8.9.2 มาตรฐานเทคโนโลยี ISO/IEC 18000

มาตรฐานนี้กำหนดว่าด้วยเรื่องเทคโนโลยีเกี่ยวกับการใช้งานอาร์เอฟไอดี (RFID) ในการจัดการสิ่งของต่างๆ การเชื่อมผ่านทางคลื่นวิทยุ (RFID for Item Management-Air Interface) โดยมาตรฐานส่วนนี้ได้ถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ ดังนี้

Part 1 ระบุตัวแปรสำคัญ (Parameter) ความหมายเพื่อใช้ในการกล่าวถึงในส่วนย่อยอื่นๆ ต่อไป

Part 2 ตัวแปรในการส่งข้อมูลด้วยคลื่นวิทยุความถี่ต่ำกว่า 135 kHz

Part 3 ตัวแปรในการส่งข้อมูลด้วยคลื่นวิทยุความถี่ต่ำกว่า 13.56 MHz

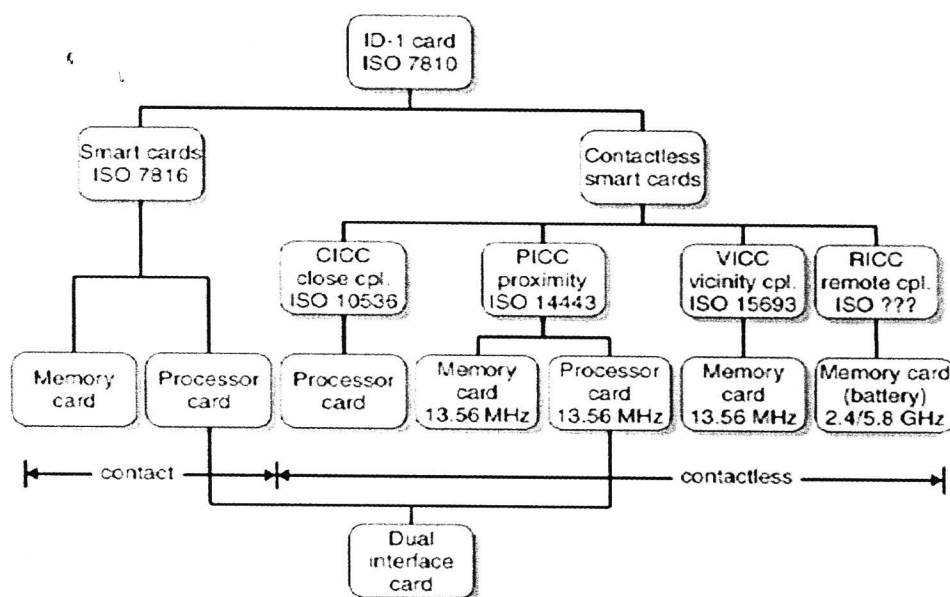
Part 4 ตัวแปรในการส่งข้อมูลด้วยคลื่นวิทยุความถี่ต่ำกว่า 2.45 GHz

Part 5 ตัวแปรในการส่งข้อมูลด้วยคลื่นวิทยุความถี่ระหว่าง 860-930 MHz

Part 6 ตัวแปรในการส่งข้อมูลของอาร์เอฟไอดีแบบแอคทีฟ (Active RFID) ด้วยคลื่นวิทยุความถี่ต่ำกว่า 433 MHz

2.8.9.3 การใช้งานด้านบัตรสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัส

การใช้งานอาร์เอฟไอดี (RFID) เป็นบัตรสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัสนั้น ปัจจุบันกำลังเป็นที่นิยมอย่างสูงเนื่องจากความสะดวกในการใช้ทั้งนี้ได้มีการนำไปใช้ในหลายลักษณะเช่น ตัวโดยสารอิเล็กทรอนิกส์ บัตรจ่ายเงินอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น โดยส่วนใหญ่อาร์เอฟไอดี (RFID) ที่นำมาใช้ในรูปแบบบัตรสมาร์ทการ์ดไร้สายนี้ บางครั้งบางคนอาจรู้จักในชื่อ Contactless Smart Cards ซึ่งอาจแบ่งออกตามมาตรฐานการใช้งานได้หลักๆ อยู่ 3 ประเภทดังแสดงในรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 2.28 แสดงประเภทต่างๆ ของมาตรฐานการใช้งานด้านบัตรสมาร์ทการ์ด

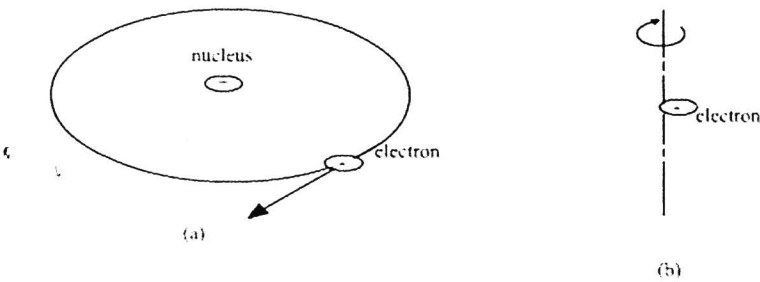
ISO/IEC 10536 – Close Coupling Smart Card เป็นมาตรฐานบัตรสมาร์ทการ์ดรุ่นแรกๆ ที่เริ่มนำมาใช้งาน โดยระยะการอ่านข้อมูลค่อนข้างใกล้ได้ไม่เกิน 1 เซนติเมตร ซึ่งปัจจุบันไม่เป็นที่นิยมเท่าที่ควร เนื่องจากระยะการอ่านมันค่อนข้างใกล้มากนั่นเอง

ISO/IEC 1443-Proximity Card เป็นมาตรฐานในการใช้งานบัตรสมาร์ทการ์ดที่ใช้ความถี่ที่ 13.56 MHz ระยะในการอ่านข้อมูลประมาณ 7-15 เซนติเมตร โดยทั้งนี้มาตรฐาน ISO1443 ยังสามารถแบ่งย่อยออกได้อีก 3 แบบ คือ Type A, B และ C ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละส่วนก็จะมีรายละเอียดปลีกย่อยที่ต่างกันในรูปแบบการส่งข้อมูลของบัตร อัตราการส่งข้อมูล กำลังของเครื่องอ่าน การป้องกันการชนกันของข้อมูล (Anti-Collision) ตลอดจนการเข้ารหัสเพื่อปลอดภัยของข้อมูล มีทั้งแบบ

Memory card และ Process card ส่วนใหญ่จะใช้ในงานที่ต้องการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลบนบัตร เช่น ใช้เป็นตั๋วโดยสารอิเล็กทรอนิกส์ บัตรประชาชน เป็นต้น

2.9 สนามแม่เหล็กที่เกิดกับวัสดุ

เมื่อพิจารณาสนามแม่เหล็ก(Magnetization) ในวัสดุ เราสมมติว่าแบบจำลองอะตอมประกอบด้วยอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสที่เป็นบวก และหมุนรอบแกนของอิเล็กตรอน ดังรูปที่

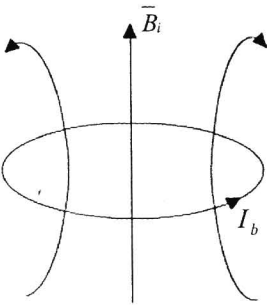


รูปที่ 2.29 แบบจำลองอะตอม

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

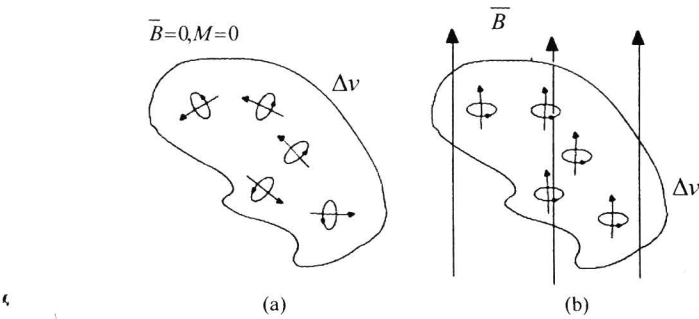
- เคลื่อนที่รอบนิวเคลียสที่เป็นประจุบวก -> กระแสผูกพัน(Bound Current, I_b)
- หมุนรอบแกนของอิเล็กตรอนเอง -> สนามแม่เหล็กภายใน (B_i)

การหมุนรอบแกนของอิเล็กตรอนเองจะสร้างสนามแม่เหล็กภายใน B_i ส่วนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสจะสร้างกระแสผูกพัน (Bound Current; I_b) ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะคล้ายกับสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากลูปกระแสนขนาดเล็กในรูป 8.7a และมีโมเมนต์แม่เหล็ก $m = I_b A \hat{a}_n$ โดย S เป็นพื้นที่ของลูปกระแส



รูปที่ 2.30 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกที่มี $\overline{B}$ มากระทำกับวัสดุ ผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอน m ในปริมาตรของวัสดุที่กำหนด (Δv) จะเป็นศูนย์เนื่องจากการหมุนของอิเล็กตรอนไม่เป็นระเบียบรูปที่ a เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกที่มี $\overline{B}$ กระทำต่อวัสดุทำให้โมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนมีทิศทางเดียวกับ $\overline{B}$ ดังนั้น โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิจึงไม่เป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ b



รูปที่ 2.31 ลักษณะการกระทำสนามแม่เหล็กภายนอกกับวัสดุ

ถ้ามีอะตอมจำนวน N อะตอมในปริมาตรที่กำหนด และอะตอมลำดับที่ k มีโมเมนต์แม่เหล็ก m_k เราหาเวกเตอร์ของการเกิดสนามแม่เหล็ก(Magnetization, M [A/m]) ซึ่งเป็นไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรได้ดังนี้

$$\overline{M} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=1}^N m_k}{\Delta v}$$

วัสดุใดที่ M ไม่เป็น 0 ในทุกตำแหน่ง เราจะเรียกวัสดุนั้นว่าเป็นวัสดุที่ถูกทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetized)

จากสมการของศักย์แม่เหล็กที่เป็นแบบเวกเตอร์และไดโพลโมเมนต์ที่เราได้ศึกษามาทำให้สามารถสรุปได้ว่า

$$J_b = \nabla \times \overline{M} \quad \text{และ} \quad K_b = \overline{M} \times \hat{a}_n$$

โดยที่

- J_b คือ ความหนาแน่นของกระแสเชิงปริมาตรผูกพัน(Bound Volume Current Density) หรือความหนาแน่นของกระแสเชิงปริมาตรในการเกิดสนามแม่เหล็ก (Magnetization Volume Current Density)
- K_b คือ ความหนาแน่นของกระแสเชิงผิวผูกพัน (Bound Surface Current Density)
- $\hat{a}_n$ คือ Unit Vector ที่ตั้งฉากกับพื้นที่ผิว

เนื่องจาก $\mathbf{M}$ คล้ายกับเวกเตอร์ของโพลาริเซชัน P ในไดอิเล็กตริก เราจึงเรียก M ว่าเป็น ความหนาแน่นของโพลาริเซชันแม่เหล็ก (Magnetic Polarization Density) ของวัสดุ
ในสุญญากาศมีค่า $M = 0$ ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$J_f = \nabla \times \overline{H} \quad \text{หรือ} \quad J_f = \nabla \times \left(\frac{\overline{B}}{\mu_0} \right)$$

เมื่อ J_f คือ ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของกระแสอิสระ (Free Current Volume Density)
ในค่า M ไม่เท่ากับ 0 ทำให้ B เปลี่ยนไป

$$\nabla \times \left(\frac{\overline{B}}{\mu_0} \right) = J_f + J_b = \nabla \times \overline{H} + \nabla \times \overline{M}$$

หรือ

$$\overline{B} = \mu_0 (\overline{H} + \overline{M})$$

สมการนี้เป็นจริงในวัสดุทุก ๆ ชนิดไม่ว่าจะเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นก็ตาม
สำหรับวัสดุที่เป็นเชิงเส้น M ขึ้นอยู่กับ H ที่เป็นเชิงเส้นดังนี้

$$\overline{M} = \chi_m \overline{H}$$

χ_m suscetpibility แม่เหล็ก (Magnetic Susceptibility) สามารถใช้วัดความไวต่อสนามแม่เหล็กของวัสดุ
เพราะฉะนั้น

$$\overline{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \overline{M}$$

หรือ

$$\overline{B} = \mu_0 \mu_r \overline{H}$$

โดยที่

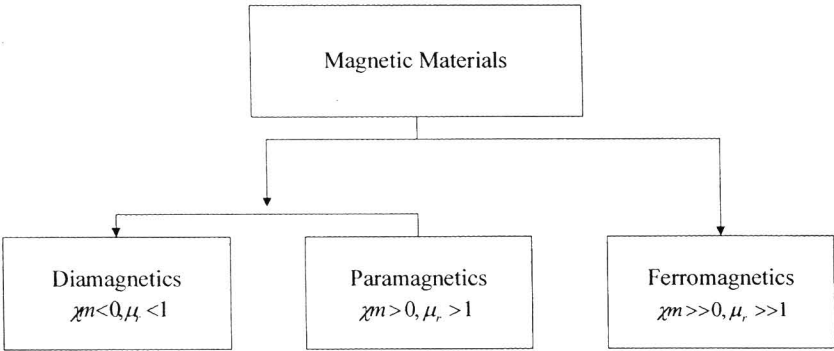
$$\mu_r = 1 + \chi_m = \frac{\mu}{\mu_0}$$

เมื่อให้

$\mu = \mu_0 \mu_r$ คือ เพอร์มีบิลิตี (Permeability) ของวัสดุ [H/m]
 μ_r คือ เพอร์มีบิลิตีสัมพันธ์ (Relative Permeability) ของวัสดุ [ไม่มีหน่วย]

โดยทั่วไปเราใช้ χ_m หรือ μ_r เพื่อแบ่งประเภทของวัสดุในเทอมของคุณสมบัติทางแม่เหล็ก
ถ้า $\chi_m = 0$ เราเรียกว่าวัสดุนั้นไม่เป็นแม่เหล็ก (Nonmagnetic) แต่ถ้าวัสดุไม่เป็นไปตามเงื่อนไข
ดังกล่าวเราถือว่าเป็นแม่เหล็ก





1. ไดอาแมกเนติก (Diamagnetics)

เป็นวัสดุที่มีสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสและการหมุนรอบแกนของอิเล็กตรอนเองหักล้างซึ่งกันและกัน โมเมนต์แม่เหล็กถาวรของแต่ละอะตอมเป็น 0 วัสดุชนิดนี้จึงได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กเพียงเล็กน้อย (บิสมัท, ตะกั่ว, ทองแดง, ซิลิกอน, เพชร, โซเดียมคลอไรด์) ตัวนำยิ่งยวดเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้ศูนย์สัมบูรณ์จะเปลี่ยนเป็นวัสดุไดอาแมกเนติก

$$\chi_m = -1, \mu_r = 0, \overline{B} = 0$$
 ดังนั้นตัวนำยิ่งยวดจึงไม่มีสนามแม่เหล็ก

2. พาราแมกเนติก เป็นวัสดุที่มีสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสและการหมุนรอบแกนของอิเล็กตรอนเองไม่หักล้างซึ่งกันอย่างสมบูรณ์ (อากาศ, พลาตินัม, ทังสแตน, โพแทสเซียม) นิยมใช้งานในตัวส่งคลื่นวิทยุ

$$\overline{M} \neq 0$$

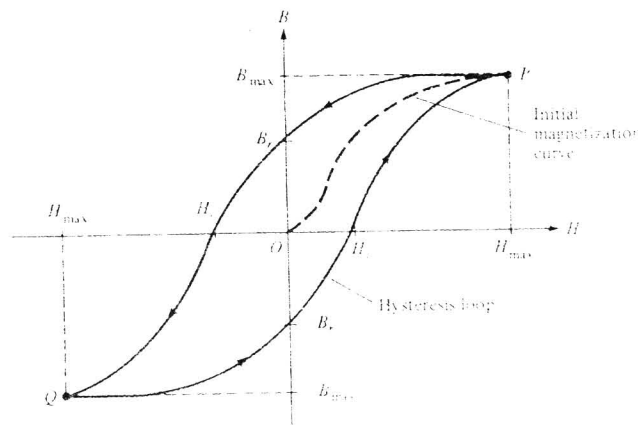
3. เฟอร์โรแมกเนติก เกิดขึ้นในวัสดุซึ่งมีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรขนาดใหญ่อยู่ในอะตอม (เหล็ก, โคบอลต์, นิกเกิล, อลูมิเนียม) ซึ่งปกติมันใช้วัสดุประเภทนี้มากกว่าประเภทอื่น ๆ

$$\overline{M} \neq 0$$

วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- 1. สามารถใช้สนามแม่เหล็กภายในสร้างเป็นแม่เหล็กได้
- 2. สามารถคงความเป็นแม่เหล็กแม้ไม่ได้อยู่ในสนามแม่เหล็ก
- 3. เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเหนือจุด ๆ หนึ่ง จะสูญเสียความเป็นแม่เหล็ก
- 4. ความสัมพันธ์ระหว่าง $\overline{B}$ กับ $\overline{H}$ ไม่เป็นเชิงเส้น

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\overline{B}$ กับ $\overline{H}$ ของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีลักษณะดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

- เส้น OP เราจะเรียกว่า Vergin หรือ Initial Magnetization Curve
- B_r Permanent Flux Density
- เราเรียกคุณลักษณะนี้ว่า Hysteresis Loop

4. แอนติเฟอร์โรแมกเนติก แรงที่เกิดจากอะตอมหักล้างกันเองทำให้ไม่มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น ทำให้ $\overline{M} = 0$ วัสดุประเภทนี้แม้จะมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกเข้ามาก็ไม่สามารถที่จะทำให้สนามแม่เหล็กของอะตอมเกิดการหักล้างกันได้ (NiO, ซัลไฟด์, CoCl_2)

5. เฟอร์แมกเนติก มีอะตอมหนาแน่นสูง และมีทิศทางของสนามแม่เหล็กไปในทางเดียวกันเป็นส่วนใหญ่ แต่มีค่าน้อยกว่าวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก แต่วัสดุประเภทนี้ก็ยังสามารถเป็นแม่เหล็กได้ง่ายเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำ และข้อดีอีกอย่างหนึ่งของวัสดุประเภทนี้คือมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ (ความต้านทานสูง) จึงนิยมนำมาทำแกนหม้อแปลงเพื่อลดสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) (เหล็กออกไซด์, นิกเกิลเฟอไรท์)

2.10 วัสดุป้องกันสนามแม่เหล็กมู-เมทัล (Mu-metal)

มูเมทัลเป็นโลหะผสมระหว่างนิกเกิล(Ni) ประมาณ 77% เหล็ก(Fe) 16% ทองแดง 5% และโครเมียม หรือโมลิบดีนัม 2% ซึ่งโลหะประเภทนี้จะมีค่าการซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุได้สูง โดยมีค่าประมาณ 80,000-100,000 และเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กธรรมดาที่มีค่ามากกว่าหลายพันเท่า เราสามารถที่จะใช้โลหะอื่นที่มีค่าการซึมซาบได้เช่น เพอร์เมอลอยด์ ดังตารางที่ 2.3ซึ่งมูเมทัลสามารถที่จะกรอง

สนามแม่เหล็กได้ทั้งในวงจรแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ และความหนามีขนาดบางประมาณ 0.25mm-100mm ซึ่งทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของโลหะชนิดต่างๆ

METAL	SPECIFIC ELECTRIC CONDUCTIVITY σ_r	SPECIFIC PERMEABILITY $\mu_r (\leq 10 \text{ kHz})$	SPECIFIC ABSORPTION LOSS $A = k_l \sqrt{\sigma_r \mu_r}$	SPECIFIC REFLECTION LOSS $R = k \sqrt{\sigma_r / \mu_r}$	SPECIFIC REFLECTION LOSS R (dB)	DENSITY $\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Silver	1.064	1	1.03	1.3	0.3	10.501
Copper (solid)	1	1	1	1	0	8.96
Copper (flame spray)	0.1	1	0.32	0.32	-10	N/A
Gold	0.7	1	0.88	0.88	-1.1	19.282
Chromium	0.664	1	0.81	0.81	-1.8	7.19
Aluminum (soft)	0.63	1	0.78	0.78	-2.1	2.6
Aluminum (tempered)	0.4	1	0.63	0.63	-4	N/A
Aluminum (household foil, 1 mil)	0.53	1	0.73	0.73	-2.8	2.698
Aluminum (flame spray)	0.036	1	0.19	0.19	-14.4	N/A
Brass (91%Cu, 9%Zn)	0.47	1	0.69	0.69	-3.3	8.7
Brass (66%Cu, 34%Zn)	0.35	1	0.52	0.52	-5.7	8.5
Zinc	0.305	1	0.57	0.57	-4.9	7.134
Tin	0.151	1	0.39	0.39	-8.2	7.287
Supralloy	0.023	100,000	53.7	0.0005	-65.4	8.9

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของโลหะชนิดต่างๆ (ต่อ)

M E T	SPECIFIC ELECTRIC CONDUCTIVITY σ_r	SPECIFIC PERMEABILITY $\mu_r (\leq 10 \text{ kHz})$	SPECIFIC ABSORPTION LOSS $A = k_I \sqrt{\sigma_r \mu_r}$	SPECIFIC REFLECTION LOSS $R = k \sqrt{\sigma_r / \mu_r}$	SPECIFIC REFLECTION LOSS R (dB)	DENSITY ρ (g/cm ³)
Permedur(50 Cu, 1-2 V, %Fe)	0.247	800	14.1	0.0018	-35.1	N/A
Hypernick	0.0345	4,500	12.5	0.0028	-51.1	N/A
45 Permalloy (1200 anneal)	0.0384	4,000	12.4	0.0031	-50.2	8.25
45 Permalloy (1050 anneal)	0.0384	2,500	9.8	0.0039	-48.1	8.25
Hot-Rolled Silicon Steel	0.0384	1,500	7.59	0.0051	-45.9	3.58
Snimax	0.0192	3,000	7.59	0.0025	-51.9	1.04
4%Silicon Iron (grain oriented)	0.037	1,500	7.45	0.005	-46.1	N/A
78 Permalloy	0.108	8,000	29.4	0.0037	-48.7	8.6
Purified Iron	0.17	5,000	29.2	0.0058	-44.7	7.85
Conetic AA	0.031	20,000	28.7	0.0011	-58.8	N/A
4-79 Permalloy	0.0314	20,000	25.1	0.0013	-58	N/A
Mumetal	0.0289	20,000	24	0.0012	-58.4	8.75