

หน่วยที่ 9

วัสดุและอุปกรณ์แม่เหล็ก

9.1 บทนำ

ตามแบบจำลองอะตอมของวัสดุ อะตอมของวัสดุทุกประเภทประกอบด้วยนิวเคลียส (ประจุบวก) และอิเล็กตรอน(ประจุลบ) โดยอิเล็กตรอนจะโคจรรอบนิวเคลียส และในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนเองก็จะหมุนรอบแกนตัวเองด้วย การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสองลักษณะนี้ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กภายในขึ้น ดังนั้นสารที่แสดงตัวหรือมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กจึงขึ้นอยู่กับลักษณะของสนามแม่เหล็กภายในดังกล่าว และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ด้วยการนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์แม่เหล็ก เช่น ตัวเหนี่ยวนำ เป็นต้น

9.2 ประเภทของสารแม่เหล็ก

สารแม่เหล็กแบ่งออกเป็นกลุ่มอย่างกว้างๆ ได้ 3 ชนิดคือ สารไดอะแมกเนติก สารพาราแมกเนติก และสารเฟอร์โรแมกเนติก

9.2.1 สารไดอะแมกเนติก (Diamagnetic substance)

สารไดอะแมกเนติกเป็นสารที่ไม่มีคุณสมบัติของแม่เหล็กถาวร เนื่องจากสนามแม่เหล็กภายในที่เกิดจากการโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสและการหมุนรอบแกนของอิเล็กตรอนเอง เกิดการหักล้างซึ่งกันและกันอย่างสมบูรณ์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำ สารแม่เหล็กประเภทนี้จึงได้รับผลกระทบต่ำ ตัวอย่างของสารไดอะแมกเนติกได้แก่ บิสมัท ไฮเดรเจน อีเลียม ทองแดง เงิน ซิลิกอน เจอร์เมเนียม เป็นต้น

9.2.2 สารพาราแมกเนติก (Paramagnetic substance)

สารชนิดนี้มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กถาวรอย่างอ่อนๆ เนื่องจากสนามแม่เหล็กภายในที่เกิดจากการโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสและการหมุนรอบแกนของอิเล็กตรอนเอง เกิดการหักล้างซึ่งกันและกันอย่างไม่สมบูรณ์ และจะแสดงตัวเป็นแม่เหล็กก็ต่อเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระตุ้น ตัวอย่างของสารพาราแมกเนติกได้แก่ โพแทสเซียม และทังสเตน เป็นต้น

9.2.3 สารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic substance)

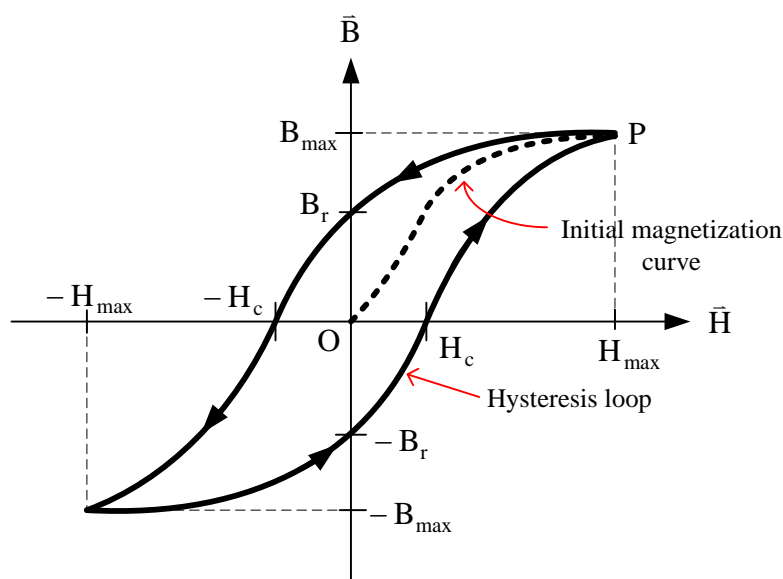
สารชนิดนี้มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กถาวร อยู่แล้ว เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำ สนามแม่เหล็กภายในเนื้อสารจะเสริมกับสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้สนามผลรวมภายในมีค่าความเข้มสูงกว่าสนามภายนอกมาก และเมื่อนำเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออก สนามภายในจะยังคงมีความเข้มเหลือค้างอยู่ในเนื้อสารอยู่ ตัวอย่างของสารเฟอร์โรแมกเนติกได้แก่ เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ โลหะผสมอัลนิโก และแมงกานีส เป็นต้น สารเฟอร์โรแมกเนติกถูกนำไปใช้ในทางปฏิบัติมากกว่าสารประเภทไดอะแมกเนติกและพาราแมกเนติก โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญดังต่อไปนี้

- (1) สร้างเป็นแม่เหล็กด้วยสนามแม่เหล็กและได้แรงแม่เหล็กมาก
- (2) เมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออก จะยังคงสภาพเป็นแม่เหล็กได้อย่างดียิ่ง

- (3) ถ้าทำให้อุณหภูมิของสารมีค่าสูงเกินกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) ของสารนั้น จะทำให้สารเฟอร์โรแมกเนติกสูญเสียสภาพความเป็นแม่เหล็ก (เช่น อุณหภูมิ คูรีของเหล็กมีค่า 770°C)
- (4) ความสัมพันธ์ระหว่าง \vec{B} กับ \vec{H} ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ $\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$ จะได้ว่าค่า μ_r ไม่เป็นค่าเดียวกันทุกเงื่อนไขของความสัมพันธ์ระหว่าง \vec{B} กับ \vec{H}

9.3 เส้นโค้งความสัมพันธ์ $\vec{B}-\vec{H}$ ($\vec{B}-\vec{H}$ curve)

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (\vec{B}) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (\vec{H}) ของสารเฟอร์โรแมกเนติกแสดงได้ดังรูปที่ 9.1 เริ่มต้นจากสารเฟอร์โรแมกเนติกยังไม่เป็นแม่เหล็ก (จุด O ในรูป) เมื่อ \vec{H} เพิ่มขึ้น (จากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก) จากจุด O ถึงความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด H_{\max} จะทำให้ได้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมากขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่าง \vec{B} กับ \vec{H} เป็นตามเส้นโค้งเส้นประ OP ซึ่งเรียกว่าเส้นโค้งการเป็นแม่เหล็กเริ่มต้น (Initial magnetization curve) ที่จุด P เป็นจุดอิ่มตัว เนื่องจากถ้ายังคงเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก \vec{H} ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก \vec{B} จะคงที่ไม่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 9.1 เส้นโค้ง $\vec{B}-\vec{H}$ ของสารเฟอร์โรแมกเนติก

ภายหลังจากที่สารเฟอร์โรแมกเนติกอิ่มตัวแล้ว ถ้าลดความเข้มสนามแม่เหล็กลง แต่ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กไม่ลดลงตามเส้นโค้งการเป็นแม่เหล็กเริ่มต้น แต่จะลดลงช้าหลัง \bar{H} การเกิดภาวะเช่นนี้เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) เมื่อลดค่าของ \bar{H} ลงจนเป็นศูนย์ ค่า \bar{B} จะมีค่าอยู่ที่ B_r ซึ่งเรียกว่าความหนาแน่นของฟลักซ์ถาวร (Permagnet flux density) ดังนั้นการเป็นแม่เหล็กถาวรของสารแม่เหล็กจึงขึ้นอยู่กับค่า B_r ของสารชนิดนั้น

เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นในทางลบมากขึ้น (โดยการกลับทิศทางของกระแส) ทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็น $-H_c$ ถ้าเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กในทางลบมากขึ้นต่อไปอีก ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กจะเป็นลบ (กลับทิศทาง) จนเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กเป็น $-H_{max}$ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูงสุด $-B_{max}$ ที่จุด Q (จุดอิ่มตัวทางอีกฟากฝั่งหนึ่งของเส้นโค้ง $\bar{B}-\bar{H}$)

ถ้าลดความเข้มสนามแม่เหล็กลง(ในทิศทางลบ) จะได้เส้นโค้งในทิศทางตรงข้ามจนถึงจุด P ภาพเส้นโค้งรวมทั้งหมดจึงเป็นเส้นโค้งแบบปิดที่เรียกว่า ลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ซึ่งในแต่ละสารแม่เหล็กจะมีขนาดแตกต่างกันไป พื้นที่ภายในลูปคือพลังงานที่สูญเสีย (Hysteresis loss) ที่อยู่ในรูปของพลังงานความร้อน ดังนั้นสารที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้า ควรมีลูปฮิสเทอรีซิสที่สูงแต่แคบเพื่อให้ได้ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด และเกิดการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด

9.4 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ปรากฏอยู่ในวงจรไฟฟ้า ประกอบด้วยตัวนำซึ่งมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กคล้องเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้านั้น คุณสมบัติเฉพาะของตัวเหนี่ยวนำที่มีผลต่อวงจรไฟฟ้าหรือฟลักซ์ที่คล้องเกี่ยวกับคือ ความเหนี่ยวนำ (Inductance) โดยมีนิยามดังนี้

นิยาม ความเหนี่ยวนำ L คืออัตราส่วนของค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux linkage) ผลรวม λ ต่อกระแสไฟฟ้า I ที่คล้องเกี่ยวกับฟลักซ์แม่เหล็กในตัวเหนี่ยวนำ

เขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (9.1)$$

เมื่อ

L คือค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น เฮนรี่ (H)

หรือมีค่าเท่ากับ เวเบอร์ต่อแอมแปร์ (Wb/A)

λ คือค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (Wb)

I คือกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำมีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

ค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์แม่เหล็ก λ จะมีค่าแตกต่างกันไปตามลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ ในกรณีของตัวเหนี่ยวนำแบบขดลวดดังแสดงในรูปที่ 9.2 จะนิยามค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์แม่เหล็ก λ ได้ดังนี้

นิยาม ค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์แม่เหล็ก λ คือผลคูณของจำนวนรอบ (N) ของขดลวดกับฟลักซ์แม่เหล็กค้ำเกี่ยวในแต่ละรอบ (Φ) ของตัวนำ

เขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

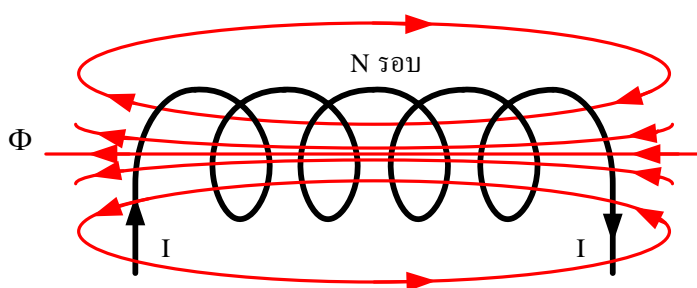
$$\lambda = N\Phi \quad (9.2)$$

เมื่อ

λ คือฟลักซ์แม่เหล็กค้ำเกี่ยวผลรวม มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (Wb)

N คือจำนวนรอบของตัวนำ

Φ คือฟลักซ์แม่เหล็กค้ำเกี่ยวในแต่ละรอบของตัวนำ มีหน่วยเป็น เวเบอร์



รูปที่ 9.2 ขดลวดตัวนำ N รอบ

และจากสมการที่ (9.1) และ (9.2) จะได้

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (9.3)$$

จากคุณสมบัติการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวเหนี่ยวนำนั้น ทำให้เกิดพลังงานสะสมอยู่ในสนามแม่เหล็กตามสมการที่ (9.4) ดังนี้

$$W_H = \frac{LI^2}{2} \quad (9.4)$$

เมื่อ

W_H คือพลังงานที่สะสมในสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น จูล (Joule)

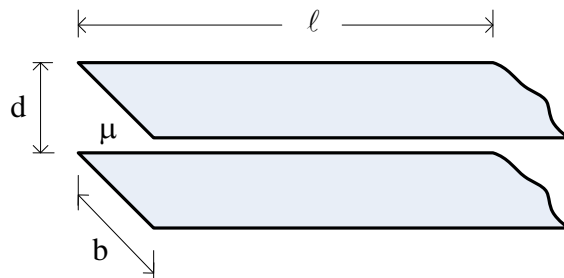
L คือค่าความเหนี่ยวนำของลวดตัวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี

I คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น แอมแปร์

สำหรับตัวเหนี่ยวนำรูปแบบอื่นๆที่มีรูปแบบเป็นทรงเรขาคณิตสม่ำเสมอจะมีค่าความเหนี่ยวนำดังนี้

(1) สายส่งชนิดแผ่นขนาน $d \ll b$ (ค่าความเหนี่ยวนำคิดต่อหนึ่งหน่วยความยาว)

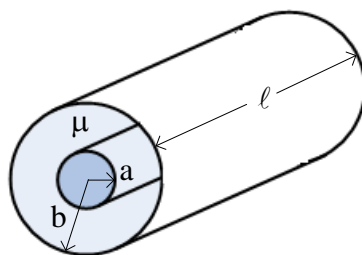
$$\frac{L}{\ell} = \frac{\mu d}{b} \quad (\text{H/m}) \quad (9.5)$$



รูปที่ 9.3 สายส่งชนิดแผ่นขนาน

(2) สายส่งชนิดโคแอกเซียล (ค่าความเหนี่ยวนำคิดต่อหนึ่งหน่วยความยาว)

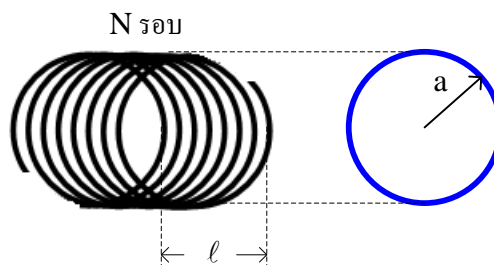
$$\frac{L}{\ell} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (\text{H/m}) \quad (9.6)$$



รูปที่ 9.4 สายส่งชนิดโคแอกเซียล

(3) ขดลวดโซลินอยด์ $a \ll \ell$

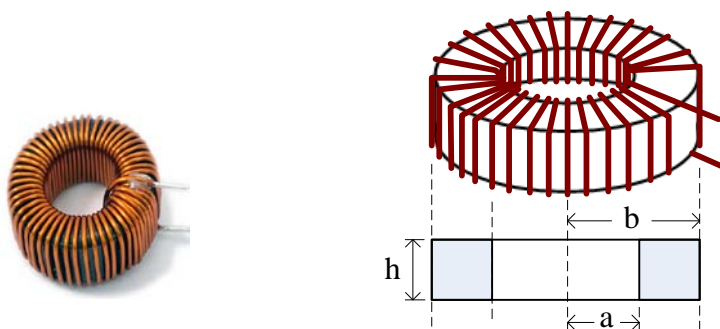
$$L = \frac{\mu N^2 \pi a^2}{\ell} \quad \text{H} \quad (9.7)$$



รูปที่ 9.5 ขดลวดโซลินอยด์

(4) ขดลวดทอรอยด์

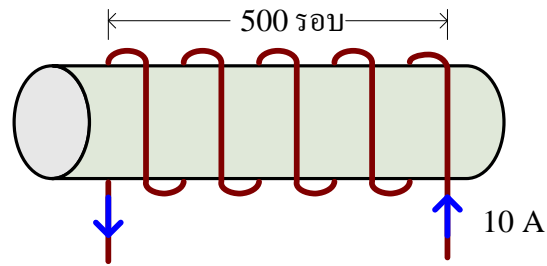
$$L = \frac{\mu N^2 h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad \text{H} \quad (9.8)$$



รูปที่ 9.6 ขดลวดทอรอยด์

ตัวอย่างที่ 9.1 ขดลวดทองแดงแกนอากาศมีจำนวนรอบเท่ากับ 500 รอบ เมื่อจ่ายกระแส 10 แอมแปร์ จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก 10 mWb ในแต่ละรอบของขดลวด จงหา

- ก) ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด
- ข) พลังงานที่สะสมในขดลวด



รูปที่ 9.7 ขดลวดทองแดงแกนอากาศ

ก) ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

วิธีทำ

จาก

$$L = \frac{N\Phi}{I}$$

$$L = \frac{500(10 \times 10^{-3})}{10}$$

$$L = 500 \quad \text{mH}$$

ตอบ 500 mH

ข) พลังงานที่สะสมในขดลวด

วิธีทำ

จาก

$$\begin{aligned} W_H &= \frac{LI^2}{2} \\ &= \frac{(500 \times 10^{-3})(10)^2}{2} \\ &= 25 \quad \text{J} \end{aligned}$$

ตอบ 25 J

ตัวอย่างที่ 9.2 จงหาค่าความเหนี่ยวนำของสายโคแอกเซียล ความยาว 2 เมตร ที่มีรัศมีวงใน $a = 1.5$ มิลลิเมตร และรัศมีวงนอก $b = 7.5$ มิลลิเมตร ตัวกลางของสายโคแอกเซียลเป็นสารเฟอร์ไรท์ (ferrite) ที่มีค่า $\mu_R = 120$

วิธีทำ

จากสมการที่ (9.6)
$$\frac{L}{\ell} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$L = \frac{\mu_R \mu_0 \ell}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$= \frac{(120)(4\pi \times 10^{-7})(2)}{2\pi} \ln \frac{7.5}{1.5}$$

$$= 77.25 \quad \mu\text{H}$$

ตอบ 77.25 μH

ตัวอย่างที่ 9.3 ขดลวดทอรอยด์ 600 รอบ (แสดงได้ดังรูปที่ 9.8) พันบนแกนไม้รูปสี่เหลี่ยม พื้นที่หน้าตัด 2×2 cm. โดยมีระยะจากจุดกึ่งกลางถึงขอบด้านในเท่ากับ 2.5 cm. เมื่อไม่มีค่า $\mu_R = 1$ โดยประมาณ

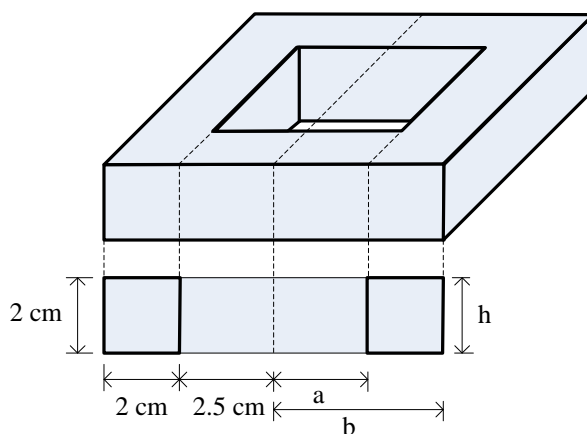
วิธีทำ

จากรูปที่ 9.8 จะได้

$$a = 2.5 \text{ cm.}$$

$$b = 4.5 \text{ cm.}$$

$$h = 2.0 \text{ cm.}$$



รูปที่ 9.8 แสดงส่วนแกนไม้ของขดลวดทอรอยด์

จากสมการที่ 9.8

$$L = \frac{\mu N^2 h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{\mu_R \mu_0 N^2 h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \\
 &= \frac{(1)(4\pi \times 10^{-7})(600)^2 (2)}{2\pi} \ln\left(\frac{4.5}{2.5}\right) \\
 &= 846.41 \quad \mu\text{H}
 \end{aligned}$$

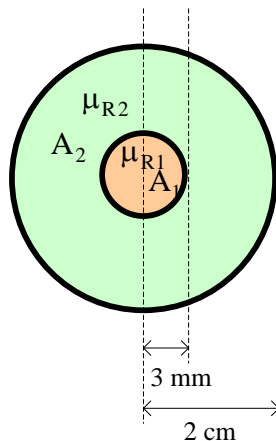
ตอบ 846.41 μH

ตัวอย่างที่ 9.4 จงหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโซลินอยด์ 600 รอบ ยาว 40 cm. รัศมี 2 cm. แกนกลางเป็นสารแม่เหล็กรูปทรงกระบอกที่มี $\mu_R = 100$ ที่ $0 < \rho < 3$ mm. และ $\mu_R = 1$ ที่ $0.3 < \rho < 2$ cm.

วิธีทำ

เพื่อให้เกิดความชัดเจน จะใช้รูปที่ 9.8 ประกอบการคำนวณ จากข้อกำหนดของโจทย์และรูปที่ 9.8 จะให้

ส่วนพื้นที่ A_1 รัศมี $0 < \rho < 3$ mm มี μ เป็น $\mu_{R1} = 100$
 ส่วนพื้นที่ A_2 รัศมี $0.3 < \rho < 2$ cm มี μ เป็น $\mu_{R2} = 1$



รูปที่ 9.9 แสดงภาคตัดขวางของแกนกลางของขดลวดโซลินอยด์

ดังนั้นจะได้พื้นที่ A_1 เป็น

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \pi(0.003)^2 \\
 &= 2.827 \times 10^{-5} \quad \text{m}^2
 \end{aligned}$$

พื้นที่ A_2 เป็น

$$\begin{aligned}
 A_2 &= \pi(0.02)^2 - \pi(0.003)^2 \\
 &= 1.256 \times 10^{-3} - 2.827 \times 10^{-5} \\
 &= 1.228 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2
 \end{aligned}$$

จาก

$$L = \frac{\mu N^2 \pi a^2}{\ell}$$

หรือ

$$L = \frac{\mu N^2 A}{\ell}$$

เมื่อ A เป็นพื้นที่ของแกนกลางรูปทรงกระบอก

ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโซลินอยด์จึงเป็น

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{\mu_1 N^2 A_1}{\ell} + \frac{\mu_2 N^2 A_2}{\ell} \\
 &= \frac{\mu_{R1} \mu_0 N^2 A_1}{\ell} + \frac{\mu_{R2} \mu_0 N^2 A_2}{\ell} \\
 &= \frac{\mu_0 N^2}{\ell} [\mu_{R1} A_1 + \mu_{R2} A_2] \\
 &= \frac{(4\pi \times 10^{-7})(600)^2}{0.4} [(100)(2.827 \times 10^{-5}) + (1)(1.228 \times 10^{-3})] \\
 &= \frac{0.452}{0.4} (2.827 \times 10^{-3} + 1.228 \times 10^{-3}) \\
 &= (1.13)(4.055 \times 10^{-3}) \\
 &= 4582 \quad \mu\text{H}
 \end{aligned}$$

ตอบ 4582 μH



แบบฝึกหัดหน่วยที่ 9

1. สารแม่เหล็กมีกี่ชนิดอะไรบ้างและแต่ละชนิดมีคุณสมบัติด้านความเป็นแม่เหล็กอย่างไร
2. จงอธิบายเส้นโค้งความสัมพันธ์ $B-H$
3. ขดลวดทองแดงแกนอากาศมีจำนวนรอบ 150 รอบมีค่าความเหนี่ยวนำ 0.1 mH เมื่อจ่ายกระแส 0.5 แอมแปร์ จงหาฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบของขดลวด
4. ขดลวดโซลินอยด์ ยาว 10 ซม. แกนกลางมีเป็นรูปทรงกระบอกรัศมี 0.5 ซม. จำนวนรอบของขดลวด 800 รอบ จงคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำถ้าแกนกลางของขดลวดโซลินอยด์ เป็น
ก) อากาศ
ข) สารเฟอร์โรแมกเนติกที่มี $\mu_R = 150$

