

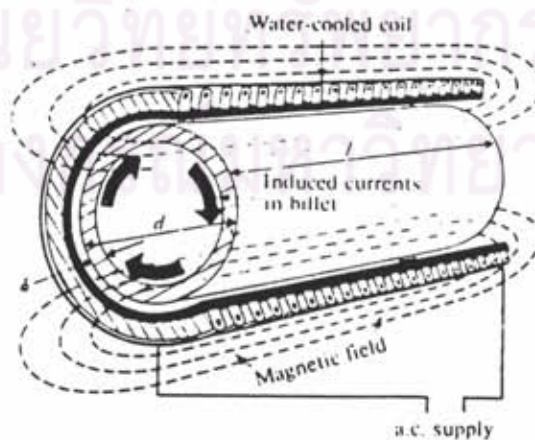


บทที่ 2

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ

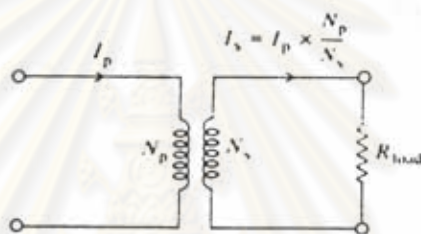
บทนำ

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Heating) เป็นปรากฏการณ์ทั้งทางไฟฟ้าและทางความร้อนร่วมกัน ซึ่งประกอบด้วย การเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) ปรากฏการณ์ผิว (skin Effect) และการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) [P.G.Simpson, 1966] จากปรากฏการณ์พื้นฐานทั้งสามสามารถอธิบายการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำโดยย่อได้ดังนี้ เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานอยู่ภายใน กระแสไฟฟ้าสลับจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในขดลวดคล้องผ่านชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานเป็นโลหะสนามแม่เหล็กคล้องผ่านชิ้นงานจะเหนี่ยวนำให้มีกระแสไหล โดยกระแสส่วนมากจะไหลผ่านชิ้นงานในระดับความลึกผิว (Skin Depth) กระแสที่ไหลวนรอบชิ้นงานจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นงาน ความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่เหนี่ยวนำ และความต้านทานสมมูลของเส้นทางที่กระแสไหลผ่านและความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปบริเวณอื่น โดยการนำ การพา และการแผ่รังสีที่บริเวณผิว

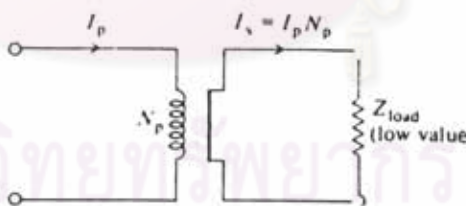


รูปที่ 2.1 การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำอย่างง่าย

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำอย่างง่าย กล่าวคือ ถ้าวางชิ้นงานไว้ในขดลวดหรือใกล้กับขดลวด ชิ้นงานนั้นจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นถ้าพิจารณาทั้งระบบว่าเป็นหม้อแปลงชุดหนึ่ง ขดลวดเหนี่ยวนำจะเป็นเสมือนขดปฐมภูมิของหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนที่ชิ้นงานจะเปรียบเสมือนขดทุติยภูมิของหม้อแปลง ที่มีจำนวนรอบเป็นหนึ่งรอบ และมีโหลดต่อแบบเกือบลัดวงจร เพราะความต้านทานสมมูลของโลหะที่เป็นชิ้นงานจะมีค่าค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงทั่วไป



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน

รูปที่ 2.2 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงทั่วไป ส่วนรูปที่ 2.3 แสดงวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน จะเห็นว่า ถ้า I_c เป็นกระแสที่ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำและ I_w เป็นกระแสที่ไหลในชิ้นงาน โดยอาศัยความสัมพันธ์ของหม้อแปลงจะทำให้กระแสทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังนี้

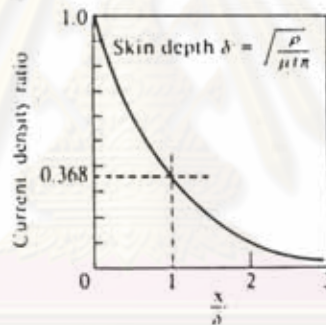
$$I_w = N_c I_c \tag{2.1}$$

โดยที่ N_c คือจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ
และกำลังสูญเสียเป็นความร้อนในชิ้นงานจะมีค่าเท่ากับ

$$P_w = N_c^2 I_c^2 R_w \quad (2.2)$$

โดยที่ R_w คือ ความต้านทานสมมูลของชิ้นงาน

รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวของชิ้นงาน เนื่องจากปรากฏการณ์ที่ผิว ทำให้ความหนาแน่นกระแสมีความสัมพันธ์กับระยะทางจากผิวเป็นฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล ที่ระดับความลึกผิว (Skin depth) ความหนาแน่นกระแส จะมีค่าเพียง 0.368 เท่าของความหนาแน่นกระแสที่ผิวชิ้นงาน จึงประมาณว่ากระแสโดยมากจะไหลอยู่ในระดับความลึกผิวนี้ (δ)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวของชิ้นงาน

รูปที่ 2.5 แสดงทิศทางการไหลของกระแสที่ชิ้นงาน ผลของปรากฏการณ์ผิวจะทำให้กระแสส่วนมากอยู่ในระดับความลึกผิว เราสามารถหาความต้านทานสมมูลของชิ้นงานได้โดยการพิจารณา รูปที่ 2.6 ซึ่งเมื่อทำการคลี่ชิ้นงานออก และประมาณว่ากระแสไหลเป็นแผ่นบางมีความหนาเท่ากับความลึกผิว (δ) ความยาว เท่ากับขนาดเส้นรอบวงของชิ้นงานทรงกระบอก (τd) ทำให้ได้ค่าความต้านทานของชิ้นงานดังนี้

$$R_w = 2\tau R_p / \delta l \quad (2.3)$$

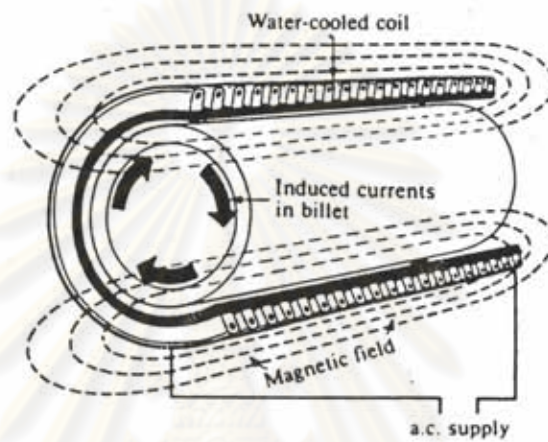
โดยที่ ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน

$$\delta \text{ คือ ความลึกผิว} = \sqrt{\rho / (\mu f \pi)} = \sqrt{(2\rho) / (\mu \omega)}$$

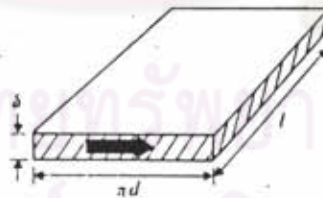
μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน และ $f \cdot \omega$ คือ ความถี่
 R คือ รัศมีของชิ้นงาน

I_w คือ ความยาวของชิ้นงานซึ่งมีค่าเท่ากับความสูงของขดลวดเหนี่ยวนำ

จากสมการที่ (2.3) จะเห็นได้ว่าความต้านทานสมมูลจะมีความสัมพันธ์กับ
 ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน ความลึกผิวและลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงานด้วย

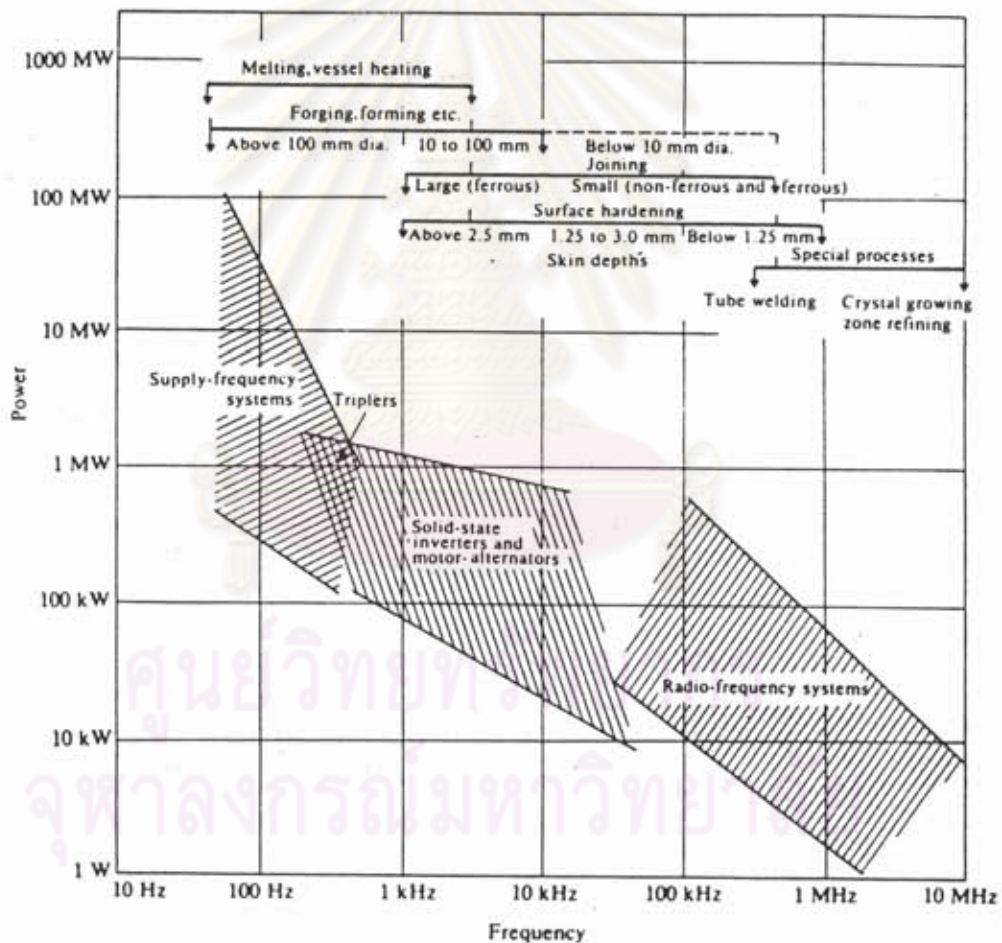


รูปที่ 2.5 ทิศทางการไหลของกระแสที่ผิว



รูปที่ 2.6 แสดงแผ่นค้ำของชิ้นงาน

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนี้ไม่ได้ใช้แหล่งความร้อนจากภายนอก แต่ความร้อนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นในชิ้นงานเอง อีกทั้งชิ้นงานก็ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งได้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำ การให้ความร้อนจึงทำได้โดยสะดวก การให้ความร้อนแบบนี้สามารถทำให้เกิดความร้อนสูงเฉพาะตำแหน่งที่ต้องการ ทั้งยังสามารถควบคุมเวลาที่จะให้ความร้อนตลอดจนพื้นที่และความลึกผิวของชิ้นงานที่ได้รับความร้อน การกำหนดพื้นที่ที่กำหนดได้จากรูปร่างลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน และความลึกผิวเลือกใช้ความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เหมาะสม



รูปที่ 2.7 แสดงประเภทและลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในย่านความถี่ต่างๆ

รูปที่ 2.7 แสดงชนิดของแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแต่ละแบบ ที่มีความถี่ในการใช้งานกำลังออกต่างๆกัน สามารถจำแนกได้ดังนี้

1) เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้พลังงานจากโรงไฟฟ้าโดยตรง ไฟฟ้ากระแสสลับจากโรงไฟฟ้ามีความถี่ 50/60 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ ความลึกผิว r จะมีค่าสูง ในบางครั้งจะใช้เครื่องทวีคูณความถี่ซึ่งประกอบด้วยหม้อแปลงอิมพัลส์ได้ เครื่องทวีคูณความถี่จะนำอาร์โมนิกส์ที่ 3 (150/180 เฮิรตซ์) หรือ อาร์โมนิกส์ที่ 5 (250/300 เฮิรตซ์) มาใช้ในการเหนี่ยวนำ โดยปรกติเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดนี้ จะใช้ในงานหลอมโลหะ ซึ่งมีกำลังหลายร้อยเมกกะวัตต์

2) เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้ระบบมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดนี้ใช้พลังงานจากโรงไฟฟ้ามาขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ และใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ของโรงไฟฟ้า โดยมีความถี่อยู่ในย่าน 500 เฮิรตซ์ ถึง 10 กิโลเฮิรตซ์ ระบบเช่นนี้ให้กำลังหลายร้อยกิโลวัตต์ และเหมาะสำหรับการเผาเหล็ก การขึ้นรูป และการเชื่อมโลหะ การชุบแข็ง เป็นต้น

3) เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสถิต เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เป็นแบบพลวัต ซึ่งมีขีดจำกัดทางด้านกลศาสตร์ ทำให้ไม่สามารถเพิ่มความถี่สูงมากได้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสถิตใช้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจำพวก ทรานซิสเตอร์กำลัง มอสเฟตกำลัง หรือพวกริซิสเตอร์ เพื่อแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าให้เป็นไฟตรงโดยใช้วงจรเรียงกระแส แล้วแปลงผันให้เป็นไฟสลับอีกครั้งที่มีความถี่สูงขึ้นโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสถิตนี้ สามารถสร้างความถี่ได้ถึงหลายร้อยกิโลเฮิรตซ์ และตัวอย่างการใช้งานเหมือนข้อ 2

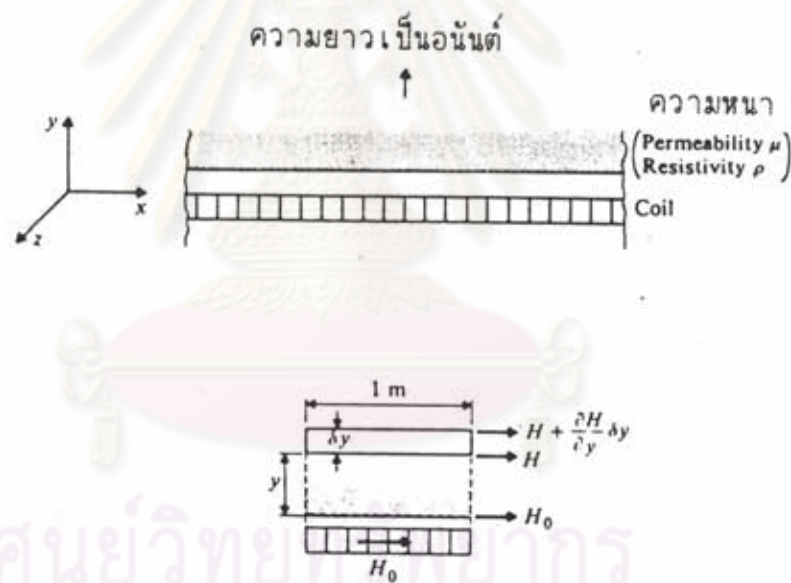
4) เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความถี่วิทยุ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้จะใช้ความถี่วิทยุ โดยมีย่านความถี่ระดับหลายร้อยกิโลเฮิรตซ์ถึงหลายเมกกะเฮิรตซ์ ซึ่งปัจจุบันนี้ยังคงใช้หลอดสูญญากาศเพราะสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำยังมีสมรรถนะในการใช้งาน ที่ความสูงๆไม่เพียงพอ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้หลอดสูญญากาศให้กำลังได้หลายสิบกิโลวัตต์ เหมาะสำหรับการชุบแข็งที่ผิว



ทฤษฎีเบื้องต้นของการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ

1) การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานในอุดมคติ

ทฤษฎีการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำสามารถอธิบายให้เข้าใจโดยอาศัยทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในที่นี้จะอธิบายการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานที่มีลักษณะอุดมคติ ที่เรียกว่า Semi-Infinite Slab เป็นเบื้องต้นก่อน ซึ่งสามารถอธิบายตามสมการคณิตศาสตร์ที่ง่ายในรูปของฟังก์ชันไซน์ และเอ็กซ์โปเนนเชียล จะทำให้เข้าใจการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนกับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกตันได้ง่ายขึ้น ซึ่งผลที่ได้จะเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนในรูปของ Bessel Function และ Hyperbolic Function



รูปที่ 2.8 การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานในอุดมคติ

รูปที่ 2.8 แสดงระบบที่ประกอบด้วยขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กและชิ้นงาน โดยถือว่าชิ้นงานยาวมากและหนามาก โดยชิ้นงานจะวางอยู่ในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ชิ้นงานที่มีลักษณะอุดมคติดังกล่าวอาจเทียบได้กับไหลตรงทรงกระบอกที่มีรัศมีเป็นอนันต์ ทำให้สมมติได้ว่าที่ผิวของชิ้นงานมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็น H_0 เท่ากับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสร้างชิ้น โดยความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาในทิศ

ทางตามแกน x และเป็นปริมาณเวกเตอร์โดยจะเห็นยวนำทำให้เกิดกระแสไหลที่ผิวของชิ้นงานในทิศทางแกน z ส่วนทิศทางตามแกน y จะชี้ไปตามความหนาของชิ้นงานในที่นี้จะสมมติเงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กที่ผิวชิ้นงานดังนี้

$$\begin{aligned} H_{x(y=0)} &= H_{0m} \cos \omega t \\ H_y &= 0 \\ H_z &= 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

โดยที่ H_{0m} คือ ค่ายอดของ H_x ที่ผิวของชิ้นงาน ($y=0$)
จากสมการพื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

$$\nabla^2 \bar{H} = \frac{\mu \bar{H}}{\rho \omega t} \quad (2.5a)$$

$$\nabla^2 \bar{E} = \frac{\mu \bar{E}}{\rho \omega t} \quad (2.5b)$$

$$\nabla^2 \bar{J} = \frac{\mu \bar{J}}{\rho \omega t} \quad (2.5c)$$

จากสมการ (2.5a)

$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{\mu}{\rho \omega t} (H_x + H_y + H_z)$$

แต่เนื่องจาก $H_y = H_z = 0$ ดังนั้น $H = H_x$ เท่านั้น และเนื่องจากสนามแม่เหล็กไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดที่เวลาใดเวลาหนึ่งตามแนวแกน x และแกน z ดังนั้น

$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} = \frac{\mu H_x}{\rho \omega t} \quad (2.6)$$

คำตอบของสมการอนุพันธ์ย่อยจะมีผลเฉลยอยู่ในรูป $H_x = H_x(y) \cos \omega t$ โดยที่ $H_x(y)$

คือการเปลี่ยนแปลงของ H_x กับระยะทางตามแนวแกน y (ความลึกของชั้นงาน) ซึ่งสามารถเขียน H_x ในรูปของฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล โดยพิจารณาเฉพาะ ส่วนจริงของ $H_x(y)\exp(j\omega t)$ แล้วเมื่อแทนค่าสมการ (2.6) ผลเฉลยที่ได้จะนำ ค่าส่วนจริง (Real Part) ไปใช้

$$\frac{d^2 H_x}{dy^2} - \frac{\mu j \omega H_x}{\rho} = 0$$

ให้ $\alpha^2 = \mu \omega / 2\rho = 1/\delta^2$

$$\frac{d^2 H_x}{dy^2} - 2j\alpha^2 H_x = 0$$

เขียนสมการใหม่ได้

$$\frac{d^2 H_x}{dy^2} - k^2 H_x = 0$$

โดยที่ $k^2 = 2j\alpha^2$ สมการข้างบนจะมีผลเฉลยดังนี้

$$H_x(y) = A_1 \exp(ky) + A_2 \exp(-ky)$$

จากเงื่อนไขขอบเขต เมื่อ $y = \alpha$ และ H_x มีค่าจำกัดค่าใดค่าหนึ่ง จะได้ $A_1 = 0$ และเมื่อ $y = 0$ และ $H_x = H_{om} \exp(j\omega t)$ ดังนั้น

$$H_x(y) = H_{om} \exp(-\alpha y \sqrt{2j}) \exp(j\omega t)$$

แต่ $\sqrt{2j} = 1+j$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} H_x(y) &= H_{om} \exp[-(1+j)\alpha y + j\omega t] \\ &= H_{om} \exp(-\alpha y) \exp[j(\omega t - \alpha y)] \end{aligned}$$

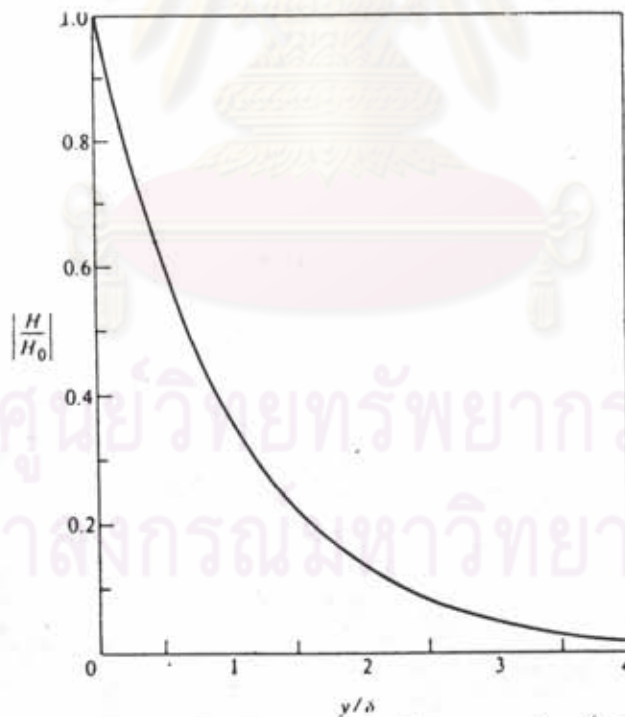
ใช้คำตอบเฉพาะส่วนจริง

$$H_x(y) = H_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.7)$$

จากผลเฉลยตามสมการ (2.7) พบว่าที่บริเวณผิวของชิ้นงาน $y=0$ จะได้ค่า $H_x = H_0 \cos \omega t$ ตามเงื่อนไขขอบเขตที่สมมติไว้ในสมการ (2.4) และที่ระยะทางใดๆจากผิวของชิ้นงานในทิศทางแกน y ขนาดของสนามแม่เหล็กจะลดลงเป็นเอกซ์โปเนนเชียล และการเปลี่ยนแปลงของมุมที่ระยะใดๆจากผิวของชิ้นงานจะเป็นแบบ ล้าหลังเมื่อเทียบกับมุมเฟสที่ผิวเป็นปริมาณ $\alpha y = y/\delta$ จากสมการ(2.7) เมื่อ $y=1/\alpha$ ปริมาณของ H จะลดลงเป็น e^{-1} เท่าของค่า H_0 ที่ผิวและเฟสจะเปลี่ยนไป 1 เรเดียน (57.3 องศา) ที่ความลึกซึ่งขนาดของ H เป็น $1/e = 0.368$ เท่าของค่าที่ผิว ค่า y ที่จุดนี้เป็นปริมาณสำคัญซึ่งนิยามให้เรียกว่า ความลึกผิว (Skin Depth or depth of penetration) แทนด้วยสัญลักษณ์ δ

$$\text{จากที่นิยามไว้ } \alpha^2 = \frac{\mu \omega}{2r} \quad \text{ดังนั้น}$$

$$\text{ความลึกผิว } \delta = 1/\alpha = \sqrt{\frac{2r}{\mu \omega}} = \sqrt{\frac{r}{\pi f \mu_r \mu_0}} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะจากผิวชิ้นงาน

จากรูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะจากผิวชิ้นงานซึ่งบอกเป็นอัตราส่วน y/δ หรือ จำนวนเท่าของความลึกผิวซึ่งเป็นระยะทาง

จากผิวของชิ้นงานที่นิยมใช้ในงานของการเหนี่ยวนำความร้อน มาจากค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (\bar{H}) จะสามารถหาค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (\bar{B}) ความหนาแน่นกระแส (\bar{J}) และความเข้มสนามไฟฟ้า (\bar{E}) ได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \bar{B} &= \mu\bar{H} \\ \text{แทน } H &\text{ จากสมการ (2.7)} \end{aligned}$$

$$B_x(y) = B_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.9)$$

จากสมการของแมกซ์เวล $\bar{J} = \text{curl}(\bar{H})$

$$\text{curl}(\bar{H}) = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix}$$

เนื่องจาก $H_y = H_z = 0$ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ H ในทิศทางตามแกน x และ แกน z ดังนั้น

$$\text{curl}(\bar{H}) = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ H_x & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

และจาก $\bar{J} = \text{curl}(\bar{H})$

$$\begin{aligned} \text{แสดงว่า} \quad J_x &= \frac{-\bar{k}}{\partial y} \frac{\partial H_x}{\partial y} = \frac{\bar{k} \{-\exp(j\omega t) [\frac{\partial}{\partial y} \exp(-\alpha y \sqrt{2j})]\}}{\partial y} H_{om} \\ &= \bar{k} [\alpha \sqrt{2j} \exp((- \alpha y) \sqrt{2j} + j\omega t)] H_{om} \end{aligned}$$

$$\text{แต่ } \sqrt{2j} = 1+j = \sqrt{2} \exp(j\pi/4)$$

$$\text{ดังนั้น } J_x = \bar{k}[\alpha\sqrt{2}\exp[-\alpha y(1+j) + j\omega t + j\tau/4]]H_{om} \quad (2.10)$$

$$\text{ใช้เฉพาะส่วนจริง } J_x = \bar{k}[\alpha\sqrt{2j}\exp((- \alpha y)\cos(\omega t - \alpha y + \tau/4)]H_{om} \quad (2.11)$$

จะเห็นว่า ความหนาแน่นกระแสที่เหนี่ยวนำมีทิศทางตั้งฉากกับความเข้มแม่เหล็กเสมอ กล่าวคือกระแสมีทิศทางตามแกน Z และมีมุมเฟสนำหน้าความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ 45 องศา ($\tau/4$)

$$\text{เมื่อ } y=0 ; \quad J_{x0} = \sqrt{2}H_{om}\alpha\exp[j(\omega t + \tau/4)] = \sqrt{2}H_{x0}\exp(j\tau/4)$$

$$\text{ดังนั้น } J_x(y) = J_{om}\exp(j\omega t - \alpha y)\sqrt{2j}$$

$$\text{ใช้เฉพาะส่วนจริง } J_x(y) = J_{om}\exp(-\alpha y)\cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.12)$$

จากผลเฉลยของความหนาแน่นของกระแสสามารถหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจากความสัมพันธ์ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\text{จาก } \bar{E} = \mu \bar{J}$$

$$\text{ดังนั้น } E_x = \mu J_x$$

$$E_x(y) = \mu J_{om}\exp(-\alpha y)\cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.13)$$

จากผลเฉลยของสมการข้างต้นจะพบว่าปริมาณ \bar{H} , \bar{B} , \bar{J} และ \bar{E} จะมีลักษณะที่เหมือนกันคือเป็นไปตามปรากฏการณ์ผิว

จากค่าความหนาแน่นของกระแสสามารถหาค่ากระแสผลรวมต่อหน่วยความยาวได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\infty} J_x dy (*1) \\ &= \int_0^{\infty} J_{om}\exp(-\alpha y)\cos(\omega t - \alpha y) dy \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I &= J_{om} \operatorname{Re} \left[\int_0^{\infty} \exp[j\omega t - (1+j)\alpha y] dy \right] \\
 &= J_{om} \operatorname{Re} \frac{[\exp(j\omega t)]}{(1+j)\alpha} = \frac{J_{om} \exp(j\omega t)}{\alpha \sqrt{2} \exp(j\pi/4)}
 \end{aligned}$$

ใช้เฉพาะส่วนจริง $I = \frac{J_{om}}{\sqrt{2}\alpha} \cos(\omega t - \pi/4)$ (2.14)

จากผลเฉลยของสมการ (2.14) จะพบว่ากระแสผลรวมต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะมีมุมเฟสล่าหลังมุมเฟสของความหนาแน่นกระแสที่ผิวอยู่ 45 องศา ($\pi/4$)

แต่จาก

$$\begin{aligned}
 J_{om} &= \sqrt{2} H_{om} \alpha \exp j(\omega t + \pi/4) \\
 I &= \frac{\sqrt{2} H_{om} \alpha \exp j(\omega t + \pi/4) \exp[-j\pi/4]}{\sqrt{2}\alpha} \\
 I &= H_{om} \exp(j\omega t)
 \end{aligned}$$

ใช้เฉพาะส่วนจริง $I = H_{om} \cos \omega t$ (2.15)

จากสมการ (2.15) กระแสต่อหนึ่งหน่วยความยาวมีค่าเท่ากับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิว ซึ่งสอดคล้องกับกฎของฟาราเดย์ที่ว่า

$$\begin{aligned}
 \oint H dl &= I \\
 H_{om} * 1 &= I
 \end{aligned}$$

หรือ $I = H_{om} \cos \omega t$

จากที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อมีกระแสไหลในชิ้นงานย่อมเกิดความร้อนขึ้น กำลังสูญเสียต่อ 1 ตารางเมตรที่ผิวชิ้นงานจะมีค่า

$$\begin{aligned}
 P_m &= \int_0^{\infty} \rho J_x^2(y) dy (*1)(*1) \\
 &= \rho J_{om}^2 \int_0^{\infty} \exp(-2\alpha y) \cos^2(\omega t - \alpha y) dy dt
 \end{aligned}$$

เนื่องจากความหนาแน่นกระแสแปรตามเวลาเป็นรายคาบ ในการหาค่ากำลังสูญเสีย ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จึงต้องหาค่าเฉลี่ยของกำลังต่อ 1 คาบเวลาด้วย สมการข้างต้น จึงเป็น

$$P_{\text{avg}} = \frac{\rho J_{\text{om}}^2}{T} \int_0^T \int_0^{\infty} \exp(-2\alpha y) \cos^2(\omega t - \alpha y) dy dt$$

$$P_{\text{avg}} = \frac{\rho J_{\text{om}}^2}{2} \int_0^{\infty} \exp(-2\alpha y) dy \quad (2.16)$$

$$P_{\text{avg}} = \frac{\rho J_{\text{om}}^2}{4\alpha} = \frac{\rho J_{\text{om}}^2 \delta}{4} \quad (2.17)$$

แต่จาก $|J_{\text{om}}| = \sqrt{2} |H_{\text{om}}| \alpha = \sqrt{2} |H_{\text{om}}| / \delta$

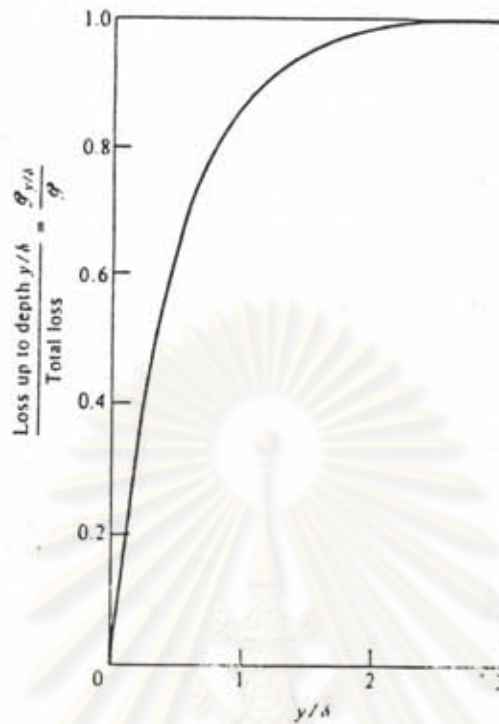
$$P_{\text{avg}} = \frac{\rho H_{\text{om}}^2}{2\delta}$$

$$= \frac{\rho H_0^2}{\delta} \quad (2.18)$$

โดยที่ H_0 เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของ H ที่ผิว

จากสมการ (2.16) เราสามารถหาค่ากำลังสูญเสียต่อ 1 หน่วยได้อย่างง่าย โดยแสดงเป็นสัดส่วนของกำลังสูญเสียจากผิวถึงระดับความลึก y ($P_{\text{avg},y}$) ต่อกำลังสูญเสียของชิ้นงาน (P_{avg}) ด้วยวิธีการเปลี่ยนขอบจำกัดบนของการอินทิเกรต ดังนี้

$$\frac{P_{\text{avg},y}}{P_{\text{avg}}} = \frac{[\exp(-2\alpha y)]_0^y}{[\exp(-2\alpha y)]_0^{\infty}} = 1 - \exp(-2\alpha y) \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียต่อพื้นที่ผิวกับระยะจากผิวชั้นงาน

จากรูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของ P_{loss} และ P_{total} กับสัดส่วนของระยะทางจากผิวและความลึกผิว โดยจะเห็นว่ากำลังสูญเสียเกือบ 90 % จะเกิดขึ้นในช่วงความลึกผิว ทำให้สามารถใช้ผลประโยชน์สำหรับการชุบแข็งที่ผิว

จากค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก B ในสมการ (2.9) สามารถหาค่าฟลักซ์สนามแม่เหล็กผลรวมต่อหนึ่งหน่วยความยาวและค่าแรงเคลื่อนสนามไฟฟ้าที่เกิดจากฟลักซ์สนามแม่เหล็กดังกล่าว ได้ดังนี้

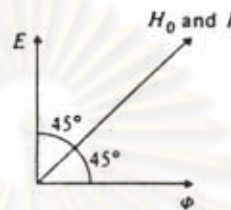
$$\phi = \mu H_{om} \int_0^{\infty} \exp[j\omega t - (1+j)\alpha y] (dy * 1)$$

$$\text{ใช้เฉพาะส่วนจริง } \phi = \frac{\mu H_{om}}{\sqrt{2\alpha}} \cos(\omega t - \pi/4) \quad (2.20)$$

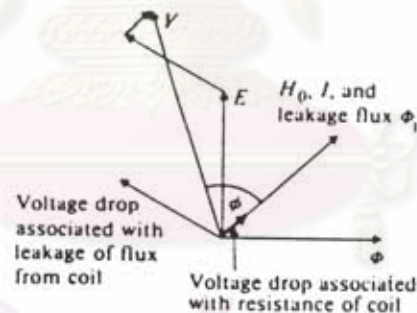
และจาก $E = Nd\phi/dt$

$$E = -\frac{\mu H_{om} N \omega \sin(\omega t - \tau/4)}{\sqrt{2\alpha}}$$

$$= \frac{\mu H_{om} N \omega \cos(\omega t + \tau/4)}{\sqrt{2\alpha}} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.11 เฟลเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง
ความเข้มสนามแม่เหล็กและแรงดัน

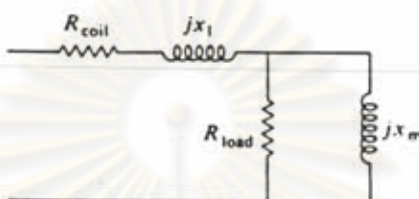


รูปที่ 2.12 เฟลเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง
ความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันในกรณีที่ตัวลวดไม่อุดมคติ

จากสมการที่ (2.20) และ (2.21) ผลรวมฟลักซ์สนามแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก H_{om} และมุมเฟลจะล่าหลังมุมเฟลของความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผิวอยู่ 45 องศา ($\tau/4$) ส่วนแรงดันที่เกิดขึ้นจะนำหน้ากระแสผลรวมอยู่ $\tau/4$ โดยในขณะที่ผลรวมของกระแสที่ไหลในชิ้นงานจะมีมุมเฟลเดียวกันกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นตัวประกอบกำลังของชิ้นงานจึงหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง E และ I โดยดูจาก



เฟลเซอร์ไดอะแกรม ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งจากไดอะแกรมตัวประกอบกำลังจะเป็นแบบล้าหลัง มีค่าเป็น 0.707 แสดงว่าส่วนประกอบในส่วนจริงและส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ ในวงจรสมมูลมีค่าเท่ากัน แต่ในความจริงขดลวดเหนี่ยวนำก็มีความต้านทานอยู่ค่าหนึ่งแล้ว ทำให้เฟลเซอร์ไดอะแกรมของระบบเปลี่ยนแปลงไปดังในรูปที่ 2.12 และสามารถเขียน วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของระบบได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน

จากแบบจำลองของระบบที่มีชิ้นงานที่เรียกว่า Slab นี้ถ้าจมองว่าเป็น รีแอกเตอร์ (Reactor) แกนเหล็กที่มีไหลดเป็นลักษณะพิเศษ คือมีค่าความต้านทานและค่า รีแอกเตอร์เท่ากันฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านรีแอกแตนต์ก็คือแมกนีโตซิงค์ฟลักซ์นั่นเอง

2) การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานทรงกระบอกตัน

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานที่เป็นทรงกระบอกที่มี ลักษณะเป็นอุดมคติ ซึ่งหมายถึงชิ้นงานที่มีความยาวเป็นอนันต์ จะต่างกับชิ้นงานที่ใช้ใน ทางปฏิบัติที่มีความยาวจำกัด ในที่นี้จะพิจารณาชิ้นงานที่มีลักษณะที่เป็นทรงกระบอก โดย จะทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของชิ้นงานทรงกระบอกที่มีความยาวเป็นอนันต์ ซึ่ง เป็นแนวทางในการหาวงจรมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำต่อไป

[John Davies and Peter Simpson, 1979]

สมมติให้ความเข้มสนามแม่เหล็ก $H = H_m \cos \omega t$

สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในพิกัดทรงกระบอกคือ

$$\frac{d^2 H}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH}{dr} - k^2 H = 0$$

(2.22)

โดยที่ $k^2 = \frac{j\mu\omega}{r} = 2j\alpha^2$

สมการ (2.22) เป็นรูปหนึ่งใน Bessel's Equation ดังนั้นผลเฉลยของสมการจะอยู่ในรูปของ Bessel's function

$$H = AI_0(kr) + BK_0(kr) \quad (2.23)$$

โดยที่ I_0 และ K_0 เป็น Bessel's Function อันดับศูนย์ A และ B คือค่าคงที่ ส่วน k เป็นปริมาณเชิงซ้อน ในการหาค่าผลเฉลยของสมการ (2.23) จะต้องหาค่าคงที่ทั้งสองโดยการแทนค่าขอบเขตของชิ้นงานในพิกัดทรงกระบอก ซึ่งในที่นี้จะไม่แสดงรายละเอียดแต่สามารถหาข้อมูลได้จาก Induction Heating Handbook [John Davies and Peter Simpson, 1979] โดยผลเฉลยที่สมบูรณ์ของ H_r ซึ่งเป็นความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะ r จากจุดศูนย์กลางของชิ้นงานจะเป็นดังนี้

$$\frac{H_r}{H_R} = \frac{\text{ber}\sqrt{2}\alpha r + j\text{bei}\sqrt{2}\alpha r}{\text{ber}\sqrt{2}\alpha R + j\text{bei}\sqrt{2}\alpha R} \quad (2.24)$$

โดยที่ R คือ รัศมีทรงกระบอก

r คือ รัศมีใด ๆ ในพิกัดทรงกระบอก

H_R คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวชิ้นงาน

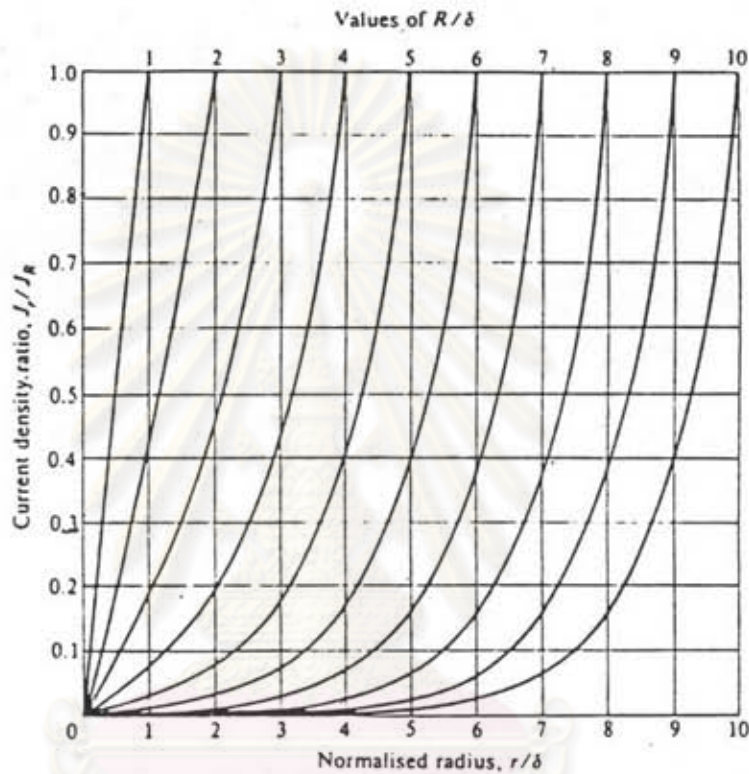
เราสามารถหาค่าความหนาแน่นของกระแสที่ระยะทางใด ๆ จากจุดศูนย์กลางได้ดังนี้

$$J_r = \frac{\sqrt{2}\alpha H_R \text{ber}'\sqrt{2}\alpha r + j\text{bei}'\sqrt{2}\alpha r}{\text{ber}\sqrt{2}\alpha R + j\text{bei}\sqrt{2}\alpha R} \quad (2.25)$$

$$\frac{J_r}{J_R} = \frac{\text{ber}'\sqrt{2}\alpha r + j\text{bei}'\sqrt{2}\alpha r}{\text{ber}'\sqrt{2}\alpha R + j\text{bei}'\sqrt{2}\alpha R} \quad (2.26)$$

$$\left| \frac{J_r}{J_R} \right| = \frac{\sqrt{\{\text{ber}'^2 \sqrt{2\alpha r} + \text{bei}'^2 \sqrt{2\alpha r}\}}}{\sqrt{\{\text{ber}'^2 \sqrt{2\alpha R} + \text{bei}'^2 \sqrt{2\alpha R}\}}} \quad (2.27)$$

จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ของ $\left| \frac{J_r}{J_R} \right|$ กับ r/s โดยมี R/s เป็นค่าพารามิเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสที่ระยะใด ๆ

(J_r/J_R) กับระยะทางจากจุดศูนย์กลางไปยังจุดใด ๆ บนทรงกระบอก (r/s) สำหรับทรงกระบอกตันที่มีรัศมี R ที่ค่าต่าง ๆ กัน (R/s)

จะเห็นว่าผลเฉลยอยู่ในสมการคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนในการวิเคราะห์จึงนิยมใช้กราฟแทนการวิเคราะห์ทางสมการโดยตรง ซึ่งจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.14 จะช่วยให้เราเข้าใจการเห็นวน้ำที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทรงกระบอกตันได้ดี และถ้าพิจารณาทรงกระบอกตันมีขนาดใหญ่ โดยค่า R/s มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จะสังเกตได้ว่า อัตราส่วนความเข้มของกระแส J_r/J_R ที่ระดับความลึก s จะมีค่าเข้าใกล้ 0.368 ซึ่งสอดคล้องกับกรณีที่ชิ้นงานเป็นแบบขอมคคติ

ส่วนฟังก์ชันนามแม่เหล็กรวมภายในทรงกระบอกตันที่ค่ารัศมีใด ๆ มีค่าดังนี้

$$\phi_r = \frac{2\pi\mu H_{rm} r \text{ber}'\sqrt{2\alpha r} - \text{ber}'\sqrt{2\alpha r}}{\sqrt{2\alpha} \text{ber}\sqrt{2\alpha r} + j\text{bei}\sqrt{2\alpha r}} \quad (2.28)$$

$$\text{ที่ } r = R \quad \phi_m = \frac{\sqrt{2\pi}\mu H_{rm} R \text{ber}'\sqrt{2\alpha R} - \text{ber}'\sqrt{2\alpha R}}{\alpha \text{ber}\sqrt{2\alpha R} + j\text{bei}\sqrt{2\alpha R}} \quad (2.29)$$

จากสมการข้างต้นสามารถจัดสมการให้ง่ายขึ้น โดยแบ่งให้เป็นส่วนจริง และ ส่วนจินตภาพได้

$$\phi_m = \mu H_{rm} A_w (q - jp) = \phi_q - j\phi_p \quad (2.30)$$

โดยที่ ϕ_m เป็นฟลักซ์สนามแม่เหล็กทั้งหมดที่คล้องผ่านชิ้นงาน

$$q = \frac{\sqrt{2} \text{bei}'\sqrt{2\alpha R} \text{ber}\sqrt{2\alpha R} - \text{ber}'\sqrt{2\alpha R} \text{bei}\sqrt{2\alpha R}}{\alpha R \text{ber}^2\sqrt{2\alpha R} + \text{bei}^2\sqrt{2\alpha R}} \quad (2.31)$$

$$p = \frac{\sqrt{2} \text{bei}'\sqrt{2\alpha R} \text{bei}\sqrt{2\alpha R} + \text{ber}'\sqrt{2\alpha R} \text{ber}\sqrt{2\alpha R}}{\alpha R \text{ber}^2\sqrt{2\alpha R} + \text{bei}^2\sqrt{2\alpha R}} \quad (2.32)$$

และ A_w คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน = πR^2

ตัวแปร p และ q เป็นตัวแปรที่สำคัญมากในการกำหนดค่าฟลักซ์สนามแม่เหล็กและค่ากำลังงานที่ชิ้นงาน จากสมการ (2.31) และ (2.32) สามารถเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p, q กับ d/s ได้ดังรูปที่ 2.15 โดยที่ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน จากการคำนวณพบว่าถ้า $d/s > 8$ แล้ว q จะมีค่าเท่ากับ $2/(d/s)$ และ p จะมีค่าเท่ากับ $2/(1.23+d/s)$

จากค่าความหนาแน่นกระแสสามารถหาค่ากำลังสูญเสียต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ดังนี้

$$P_w = (1/2) \int_0^R r \left| J_{rm} \right|^2 2\pi r dr (*1)$$

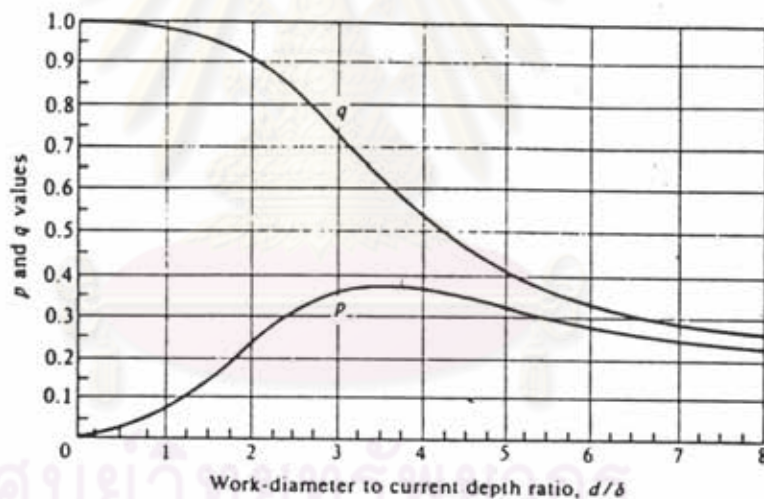
จากสมการ (2.25)

$$J_r = \sqrt{2}H_{\text{rm}} \frac{\text{ber}'\sqrt{2\alpha r} + j\text{bei}'\sqrt{2\alpha r}}{\text{ber}\sqrt{2\alpha R} + j\text{bei}\sqrt{2\alpha R}}$$

$$\left| J_{\text{rm}} \right|^2 = 2\alpha^2 H_{\text{rm}}^2 \frac{\text{ber}'^2\sqrt{2\alpha r} + \text{bei}'^2\sqrt{2\alpha r}}{\text{ber}^2\sqrt{2\alpha R} + \text{bei}^2\sqrt{2\alpha R}} \quad (2.33)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_w &= 2\pi\rho\alpha^2 H_{\text{rm}}^2 \int_0^s \frac{(\text{ber}'^2\sqrt{2\alpha r} + \text{bei}'^2\sqrt{2\alpha r})rdr}{\text{ber}^2\sqrt{2\alpha R} + \text{bei}^2\sqrt{2\alpha R}} \\ &= \sqrt{2}\pi\rho\alpha H_{\text{rm}}^2 R \frac{[\text{ber}\sqrt{2\alpha R} \text{ber}'\sqrt{2\alpha R} + \text{bei}\sqrt{2\alpha R} \text{bei}'\sqrt{2\alpha R}]}{\text{ber}^2\sqrt{2\alpha R} + \text{bei}^2\sqrt{2\alpha R}} \quad (2.34) \end{aligned}$$



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p และ q กับ d/s

จากสมการที่ (2.34) พจน์ในวงเล็บจะเป็นค่าของ p ตามสมการ (2.32)

ดังนั้นจึงสามารถเขียน P_w ในเทอมของ p ได้ดังนี้

$$P_w = \mu\pi f H_{\text{rm}}^2 (l_w A_w) p \quad (2.35)$$

โดยที่ l_w คือ ความยาวของชิ้นงาน

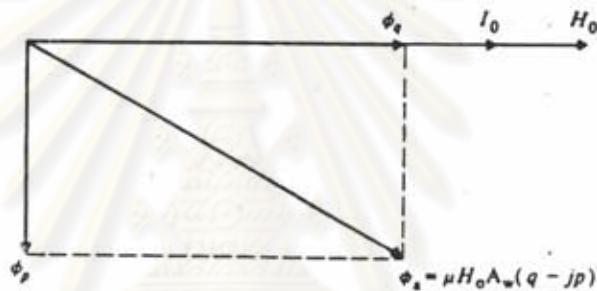
A_w คือ พื้นที่ผิวของทรงกระบอกตัน

P_w คือ กำลังสูญเสียที่เกิดในปริมาตรทรงกระบอกตัน

คิดกำลังสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผิวของชิ้นงานดังนี้

$$P_w = \mu r f H_{zn}^2 \frac{R}{2} p \quad (2.36)$$

จากสมการพลักซ์ผลรวมของสนามแม่เหล็กในชิ้นงานจะล้าหลังกระแสผลรวมในชิ้นงานด้วยมุมเฟสค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของเฟสเซอร์ไดอะแกรมของปริมาณต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของปริมาณต่าง ๆ

นอกจากกำลังสูญเสียที่ชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับตัวแปร p แล้วยังขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ งาน ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ขนาดของชิ้นงาน รวมทั้งความต้านทานจำเพาะและค่าความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน มีผลต่อกำลังที่ชิ้นงาน แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างไร จึงสมควรที่จะได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ทางด้านนี้ด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับคุณสมบัติของชิ้นงาน

1) ความต้านทานจำเพาะของโลหะกับอุณหภูมิ

[John Davies Simpson, 1979]

ความต้านทานจำเพาะโดยทั่วไปจะขึ้นกับสารที่เป็นชิ้นงานโดยปรกติสารที่เป็นโลหะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความต้านทานจำเพาะจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ความสัมพันธ์ในลักษณะทั่วไป แสดงได้ดังสมการ

$$\rho_c = \rho_1 [1 + \alpha(\theta - \theta_1)] \quad (2.37)$$

โดยที่ ρ_c คือ ความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ θ ใด ๆ

ρ_1 คือ ความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ θ_1

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสารชนิดต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

	α	$\rho_{20^\circ\text{C}}$ ($\Omega \text{ m}$)	Melting point ($^\circ\text{C}$)
Aluminium	4.29×10^{-3}	2.65×10^{-8}	660
Brass (65 per cent Cu, 35 per cent Zn)	1.6×10^{-3}	6.4×10^{-8}	931
Bronze (90 per cent Cu, 11 per cent Zn)	1.86×10^{-3}	3.9×10^{-8}	1046
Copper	3.93×10^{-3}	1.72×10^{-8}	1084
Pure iron	6.5×10^{-3}	9.71×10^{-8}	1538
Lead	3.36×10^{-3}	20.65×10^{-8}	327
Silver	4.1×10^{-3} (slightly non-linear)	1.59×10^{-8}	962

ตารางที่ 2.1 ค่า ρ และ α ของสารชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20°C

ในทางปฏิบัติจะพบว่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิแต่สำหรับการคำนวณอาจต้องหาค่าความต้านทานจำเพาะ ที่เป็นค่าสมมูลซึ่งใช้ได้ตลอดช่วงอุณหภูมิจากสมการที่ (2.18) กำลังสูญเสียที่ชิ้นงานจะแปรโดยตรงกับ ρ / s ในขณะที่ s แปรตาม \sqrt{r} นั้นหมายความว่า กำลังสูญเสียที่ชิ้นงานจะเป็นสัดส่วนกับ \sqrt{r} ถ้าปริมาณอื่น ๆ มีค่าคงที่ และเนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะโดยทั่วไป จะแปรตามอุณหภูมิอย่างเป็นเชิงเส้นในช่วงกว้างของอุณหภูมิ ทำให้เขียนสมการ (2.37) ใหม่ได้ดังนี้

$$r_2 = r_1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1} (r_2 - r_1) \quad (2.38)$$

โดยที่ r_1 และ r_2 คือ ความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิเริ่มต้น θ_1 และ อุณหภูมิสุดท้าย θ_2 และเนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นสัดส่วนกับกำลังสูญเสีย ดังนั้นจึงเป็นสัดส่วนกับ \sqrt{P} ด้วย นั่นคือ

$$\frac{d\theta}{dt} = \text{constant} \times \sqrt{P} \quad (2.39)$$

แทนค่า (2.38) ลงในสมการ (2.39) แล้วจัดรูปใหม่

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{\sqrt{[r_1 + \{(\theta - \theta_1)/(\theta_2 - \theta_1)\}(r_2 - r_1)]}} = \int_0^t (\text{constant}) dt$$

ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนจนอุณหภูมิ θ_1 เปลี่ยนเป็น θ_2 เท่ากับ

$$t = \frac{2(\theta_2 - \theta_1)(\sqrt{r_2} - \sqrt{r_1})}{(r_2 - r_1)(\text{constant})} \quad (2.40)$$

ถ้าสมมติให้ความต้านทานจำเพาะมีค่าคงที่และมีค่าเท่ากับ r_m ตลอดช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน θ_1 ถึง θ_2 โดยนิยามเรียกว่าค่าความต้านทานจำเพาะรวม

(Integrated Resistivity)

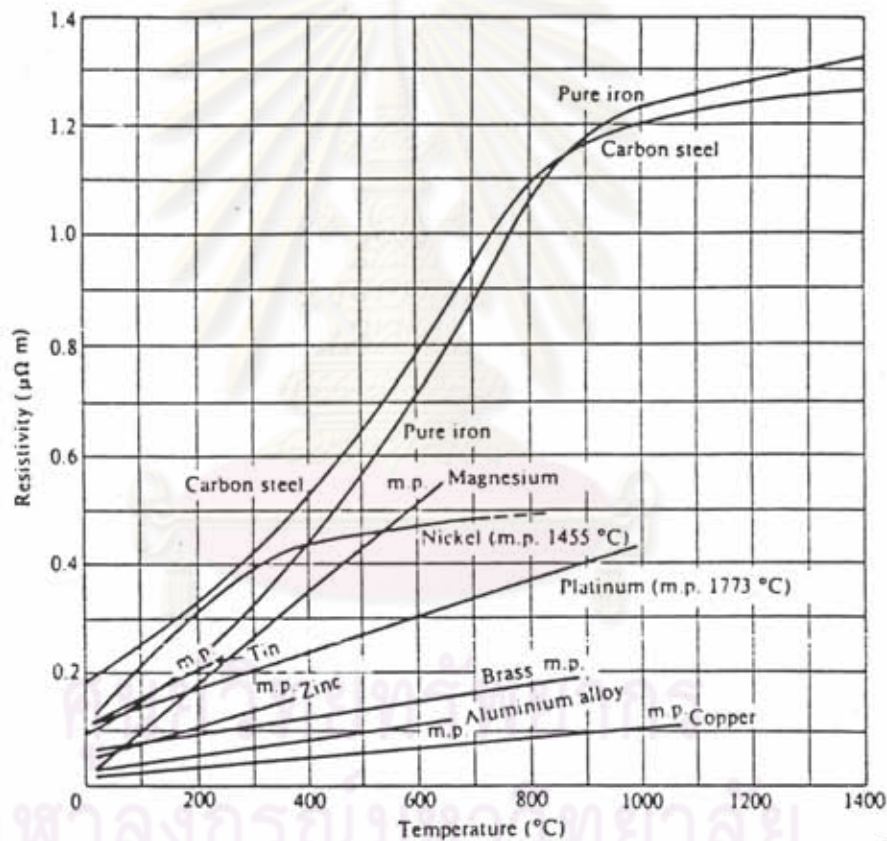
$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = \int_0^t (\text{constant}) \sqrt{r_m} dt$$

$$t = \frac{\theta_2 - \theta_1}{(\text{constant}) \sqrt{r_m}} \quad (2.41)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (2.40) และสมการ (2.41) จะได้ว่า

$$\rho_m = \frac{(\sqrt{\rho_2} + \sqrt{\rho_1})^2}{4} \quad (2.42)$$

รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานจำเพาะกับอุณหภูมิของโลหะชนิดต่าง ๆ สำหรับเหล็กผสมคาร์บอนความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานจำเพาะกับอุณหภูมิจะไม่เปลี่ยนแปลงกับปริมาณของส่วนผสมคาร์บอน และจากกราฟจะเห็นว่าโลหะที่เป็นสารเฟอร์โรแมกเนติก การเปลี่ยนแปลงของ ρ กับอุณหภูมิจะไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วงอุณหภูมิ ดังนั้นการคำนวณโดยใช้ค่า $\sqrt{\rho_m}$ จึงต้องแยกพิจารณาในช่วงที่เป็นเชิงเส้นทีละช่วงไป



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานจำเพาะกับอุณหภูมิของโลหะชนิดต่าง ๆ

- 2) ความเข้มข้นของโลหะกับอุณหภูมิ และความเข้มข้นแม่เหล็ก
ค่าความเข้มข้นของโลหะนั้นปกติจะมีค่าคงที่ แต่สำหรับสารที่เป็นเฟอร์โรแมกเนติกแล้วนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับความเข้มข้น

สนามแม่เหล็กจะไม่เป็นเชิงเส้น แต่จะเป็นไปตามกราฟทำแม่เหล็ก จากหนังสืออ้างอิง [John Davies and Peter Simpson, 1979] จะพบว่า ความซึมซาบของสารเฟอร์โรแมกเนติก จะขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็ก และระดับความอิ่มตัวของความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กด้วย ได้มีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบของสารกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ได้ผลเป็นที่ยอมรับตามสมการที่ (2.43)

$$\mu = (1.43 * 10^{-6} \frac{B_m}{H_{om}} + 1) \mu_0 \quad (2.43)$$

โดยที่ B_m คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัว
 H_{om} คือ ค่ายอดความเข้มสนามแม่เหล็ก
 μ_0 คือ ค่าความซึมซาบได้ของอากาศ

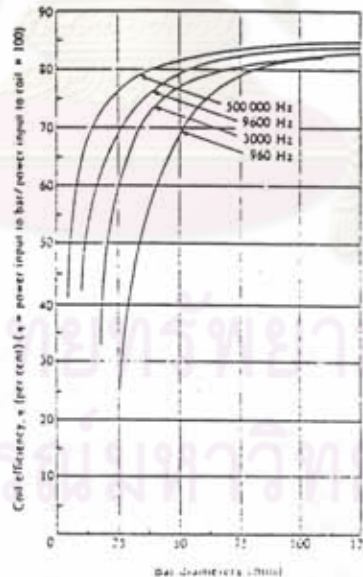
นอกจากนี้ค่าความซึมซาบของสารเฟอร์โรแมกเนติก ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ด้วยกล่าวคือ ประสิทธิภาพความซึมซาบของสารประเภทนี้จะมียาค่าค่อนข้างคงที่กับอุณหภูมิ แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุดคูรี (Curie Point) แล้วค่าความซึมซาบของสารจะลดลงเป็นค่าความซึมซาบของอากาศทันที ($\mu=1$) มีผลให้สารนั้นหมดสภาพความเป็นสารแม่เหล็ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเลือกความถี่ที่ใช้ในเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำ

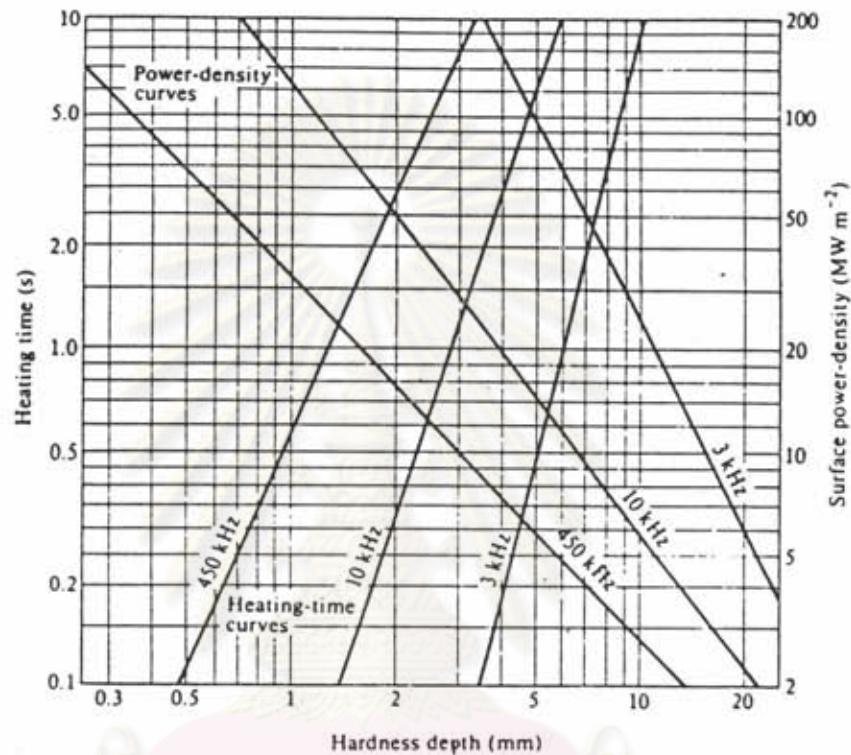
ความถี่เป็นตัวแปรสำคัญต่อประสิทธิภาพ ความลึกผิวในชิ้นงาน และกำลังเข้าของชิ้นงาน เมื่อใช้ความถี่สูงขึ้น ความลึกผิวจะลดลง ประสิทธิภาพและกำลังเข้าของชิ้นงานจะสูงขึ้น

รูป 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำกับเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานโดยมีความถี่เป็นตัวพารามิเตอร์ จะเห็นได้ว่า เมื่อความถี่สูงขึ้น ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งหมายถึง อัตราส่วนของกำลังที่ชิ้นงานต่อกำลังเข้าที่ขดลวด จะมีค่ามากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำยังขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน โดยประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับความถี่คงที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มของประสิทธิภาพกับเส้นผ่านศูนย์กลางจะน้อยลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานมีค่ามากกว่า 100 มม. การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพกับเส้นผ่านศูนย์กลาง และความถี่จะมีค่าไม่มากนัก



รูปที่ 2.18 ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำกับขนาดของชิ้นงานโดยชิ้นงานที่เป็นเหล็กผสมคาร์บอน 0.45 % และมีความแตกต่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของขดลวดเหนี่ยวนำและเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของชิ้นงานเท่ากับ 3 มม.

รูปที่ 2.19 เป็นกราฟที่ใช้ในการเลือกความถี่และความหนาแน่นกำลังต่อพื้นที่ผิว (Surface power-density) สำหรับความลึกผิว (Hardness depth) ที่ต้องการค่าหนึ่ง นอกจากนี้แล้วเรายังสามารถหาเวลาในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน (Heating time) จากกราฟได้ด้วย เมื่อมีการกำหนดความลึกผิวและความถี่



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการให้ความร้อนความหนาแน่นกำลังงานต่อพื้นที่ผิวและความถี่โดยมีความลึกผิวเป็นพารามิเตอร์

จากรูปที่ 2.19 สามารถสรุปได้ว่า

- 2.4.1 สำหรับความลึกผิวค่าหนึ่ง เมื่อความถี่ลดลงจะต้องใช้กำลังงานต่อพื้นที่ผิวสูงขึ้น
- 2.4.2 สำหรับความลึกผิวค่าหนึ่งเมื่อความถี่สูงขึ้นเวลาการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจะสูงขึ้น

ตารางที่ 2.2 เป็นตารางที่แสดงแนวทางในการเลือกความถี่ที่ใช้งานสำหรับความลึกผิวและเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่ค่าต่าง ๆ กัน

ความลึกผิว (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มม.)	ความถี่ในการใช้งาน (เฮิรตซ์)
0.40 - 1.25	5 - 25	450000
1.25 - 2.50	10 - 16	450000 (100000)
	16 - 25	10000 ; 450000
	25 - 50	10000 (3000 ; 450000)
	มากกว่า 50	10000 ; (3000)
2.50 - 5.00	20 - 50	10000 ; (3000)
	50 - 100	3000 (1000 ; 3000)
	มากกว่า 100	1000 (3000)

ตาราง 2.2 การเลือกความถี่ในการใช้งานสำหรับความลึกผิวและเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่ค่าต่าง ๆ กัน

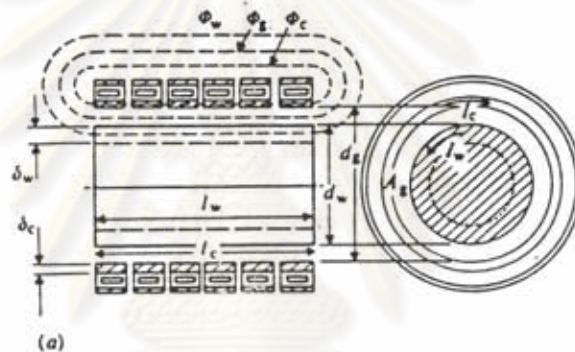
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วงจรมุมของขดลวดเหนี่ยวนำและการออกแบบ

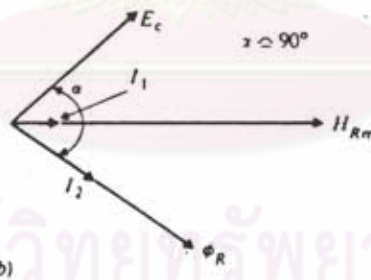
เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้งานไม่ใช่ทรงกระบอกที่มีความยาวเป็นอนันต์ ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ทฤษฎีทรงกระบอกที่มีความยาวเป็นอนันต์มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำได้ จึงได้มีการศึกษาทฤษฎีในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เป็นทรงกระบอกที่มีความยาวจำกัด เพื่อที่จะใช้ในการออกแบบและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำที่จะใช้งาน ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

(John Davies and Peter Simpson, 1979)

1) การคำนวณวงจรมุมของขดลวดเหนี่ยวนำ



(a)



(b)

- รูปที่ 2.20 a) ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านขึ้นงานกับขดลวดเหนี่ยวนำ
b) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของระบบ

รูปที่ 2.20 แสดงถึงฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากความเข้มสนามแม่เหล็ก H_{Rm} ที่ได้จากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ โดยฟลักซ์ที่คล้องผ่านระบบประกอบด้วย ฟลักซ์ 3 ส่วนด้วยกันคือ

1. ϕ_w คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านขึ้นงาน
2. ϕ_c คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านช่องอากาศ

3. ϕ_c คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ผ่านผิวของขดลวดเหนี่ยวนำ

จากสมการ (2.35) และ (2.30) ได้ว่า

$$P_w = \mu_r f H_{rm}^2 (l_w A_w) p \quad (2.35)$$

$$\text{และ } \phi_{wm} = \mu H_{rm} A_w (q - ip) \quad (2.30)$$

โดยที่ P_w คือ กำลังสูญเสียในชิ้นงาน (วัตต์)
 H_{rm} คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กค่ายอดที่ผิวของชิ้นงาน (A/m)
 ϕ_{wm} คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กค่ายอดที่คล้องผ่านชิ้นงาน (Wb)
 l_w คือ ความยาวของชิ้นงานที่ถูกเหนี่ยวนำ (m)
 A_w คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

จากหัวข้อ การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานทรงกระบอกตัน
 ถ้า $d/r > 8$ แล้ว

$$p = 2 / (1.23 + d/r) \quad (2.46)$$

$$q = 2 / (d/r) \quad (2.47)$$

ϕ_g คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กในช่องอากาศ (Air gap flux)
 ฟลักซ์สนามแม่เหล็กในช่องอากาศโดยปรกติแล้วจะมีค่าค่อนข้างใหญ่ในขณะที่ไม่มีชิ้นงานใน
 ขดลวดเหนี่ยวนำ แต่จะมีขนาดเล็กลงเมื่อมีชิ้นงานในขดลวดเหนี่ยวนำ เพราะพื้นที่
 หน้าตัดที่ฟลักซ์คล้องผ่านจะมีค่าลดลง ช่องอากาศนี้มีให้เพื่อเป็นระยะห่างทางเชิงกล เพื่อ
 ให้ชิ้นงานป้อนเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำได้สะดวก และยังช่วยเป็นฉนวนความร้อนระหว่างชิ้น
 งานกับตัวขดลวดเหนี่ยวนำเองด้วย ฟลักซ์สนามแม่เหล็กส่วนนี้จะมิผลให้ตัวประกอบกำลัง
 ของขดลวดเหนี่ยวนำต่ำลง

$$\phi_{gm} = \mu_0 H_{rm} A_g \quad (2.48)$$

โดยที่ A_g คือ พื้นที่ฟลักซ์สนามแม่เหล็กคล้องผ่านอากาศ

ϕ_c คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล่องผ่านตัวขดลวดเอง ตัวขดลวดเหนี่ยวนำก็มีปรากฏการณ์ผิวเช่นเดียวกับชิ้นงาน ตามปรกติขดลวดเหนี่ยวนำจะใช้ทองแดงที่มีคุณสมบัติไม่เป็นแม่เหล็ก จากหัวข้อการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานในอุดมคติ เนื่องจากฟลักซ์สนามแม่เหล็กจะล้าหลังความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ 45 องศา ดังนั้น ϕ_{cm} คำนวณได้จากสมการ

$$\phi_{cm} = k_r \mu_o \epsilon_c \nu d_c H_{om} (1-j)/2 \quad (2.49)$$

โดยที่ ϵ_c คือ ความลึกผิวที่เกิดในขดลวด

k_r คือ Correction Factor ปรกติจะมีค่าระหว่าง 1-1.5 โดยทั่วไปจะใช้ 1.15

d_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวดเหนี่ยวนำ

ฟลักซ์สนามแม่เหล็กทั้งหมด คือผลรวมของฟลักซ์ทั้งสาม

$$\phi_{om} = \phi_{wm} + \phi_{gm} + \phi_{cm}$$

ถ้าคิดเป็นค่า อาร์เอ็มเอส จะได้

$$\phi_o = \phi_w + \phi_g + \phi_c$$

จัดรูปใหม่

$$\phi_{om} = \mu_o H_{om} \left[(A_g + \mu_r q A_w + \frac{k_r \nu d_c \epsilon_c}{2}) - j (\mu_r p A_w + \frac{k_r \nu d_c \epsilon_c}{2}) \right] \quad (2.50)$$

ถ้าละเลยค่า Reluctance ของวงจรมแม่เหล็กภายนอก เราสามารถคำนวณหา H_{om} ในรูปของ N_c , I_c และ l_c ได้ดังนี้

$$H_{om} = \sqrt{2} I_c N_c / l_c \quad (2.51)$$

ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันคร่อมขดลวด

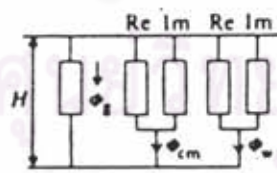
$$E_c = \frac{j2}{\sqrt{2}} \pi f N_c \phi_{om} \quad (2.52)$$

แทนค่าสมการ (2.50) และสมการ (2.51) ลงในสมการ (2.52)

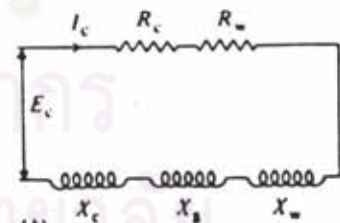
จะได้ว่า

$$E_c = \frac{2\pi f \mu_0 N_c^2 I_c [(\mu_r p A_w + k_r d_c s_c) + j(A_w + \mu_r q A_w + \frac{k_r d_c s_c}{2})]}{l_c} \quad (2.53)$$

จากสมมติฐานที่ว่า ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ และเป็นผลที่มาจากความเข้มสนามแม่เหล็กเดียวกัน ทำให้สามารถแทนสมการ (2.53) ได้ด้วยวงจรสมมูลทางแม่เหล็กซึ่งเป็นแบบขนาน ดังรูปที่ 2.21(a) และถ้าพิจารณา วงจรสมมูลทางไฟฟ้า จะอยู่ในรูปความต้านทานกับความเหนี่ยวนำต่อแบบอนุกรม ดังรูปที่ 2.21(b) โดยส่วนที่เป็นความต้านทานจะแทนด้วยกำลังสูญเสียในชิ้นงานและตัวขดลวดเหนี่ยวนำ และส่วนที่เป็นความเหนี่ยวนำจะเป็นส่วนของฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านชิ้นงาน ตัวขดลวดเหนี่ยวนำ และช่องว่างอากาศ ซึ่งจะมีเฟสเดียวกันกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก และสามารถเขียนในรูปของอิมพีแดนซ์รวมได้ดังนี้



(a)



(b)

รูปที่ 2.21(a) วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก

รูปที่ 2.21(b) วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

$$Z = (R_w + R_c) + j(X_s + X_w + X_c) \quad (2.54)$$

โดยที่

$$\text{ความต้านทานของชิ้นงาน} \quad R_w = K(\mu_r p A_w) \quad \text{โอห์ม} \quad (2.55)$$

ความต้านทานของขดลวด $R_c = K(k_r d_c r_c) / 2$ โอห์ม (2.56)

รีแอกแตนซ์จากช่องว่างอากาศ $X_m = K(A_m)$ โอห์ม (2.57)

รีแอกแตนซ์จากชิ้นงาน $X_w = K(\mu_r q A_w)$ โอห์ม (2.58)

รีแอกแตนซ์จากขดลวด $X_c = K(k_r d_c r_c) / 2$ โอห์ม (2.59)

โดยที่ $K = 2\pi f \mu_0 [N_c^2 / l_c]$ โอห์ม/เมตร² (2.60)

จากสมการเหล่านี้สามารถที่จะนำมาคำนวณคุณสมบัติของขดลวดเหนี่ยวนำที่สำคัญ ได้ดังนี้

ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำ $\eta = R_w / (R_c + R_w)$ (2.61)

ตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำ $\cos\phi = (R_w + R_c) / Z$ (2.62)

โดยที่ $Z^2 = (R_c + R_w)^2 + (X_m + X_w + X_c)^2$ (2.63)

กำลังที่ขดลวดเหนี่ยวนำ $P = P_w / \eta$ (2.64)

กำลังปรากฏที่ขดลวดเหนี่ยวนำ coil VA, $(VA)_c = P / \cos\phi = I_c^2 Z$ (2.65)

แรงดันต่อรอบที่ขดลวด $\frac{E_c}{N_c} = \frac{(\text{coil VA})}{(\text{Total ampere-turns})} = \frac{(VA)_c}{H_o I_c}$ (2.66)

coil ampere turns $I_c N_c = H_o l_c$ (2.67)

โดยที่ I_c และ E_c เป็นค่าอาร์เอ็มเอส

จากที่กล่าวมาข้างต้น ถ้าพิจารณาโดยละเอียดจะพบว่า

$$R_c = \sqrt{\epsilon} k_r d_c [N_c^2 / l_c] \sqrt{[\rho_c \mu_o f]} \quad (2.68)$$

$$R_w = 4\sqrt{\epsilon} A_w [N_c^2 / (d_w l_c)] \sqrt{[\rho_w \mu_r \mu_o f]} \quad (2.69)$$

$$L_c = \frac{\sqrt{\epsilon} k_r d_c}{2} [N_c^2 / l_c] \sqrt{[\rho_c \mu_o / \mu_r f]} \quad (2.70)$$

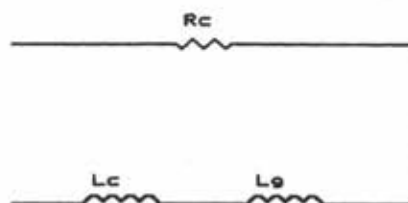
$$L_w = \frac{2A_w}{\sqrt{\epsilon} d_w} [N_c^2 / l_c] \sqrt{[\rho_w \mu_o \mu_r / f]} \quad (2.71)$$

$$L_g = \mu_o [N_c^2 / l_c] A_g \quad (2.72)$$

จากสมการของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน จะเห็นว่า วงจรสมมูลจะขึ้นอยู่กับลักษณะขนาดของทั้งชิ้นงาน และขดลวด รวมทั้งจำนวนรอบของขดลวดด้วย และถ้าพิจารณาให้ชิ้นงานและขดลวดเหนี่ยวนำคงที่ความต้านทานของชิ้นงานและขดลวดจะแปรตามรากที่สองของความถี่ รากที่สองของความต้านทานจำเพาะ และรากที่สองของความซึมซาบแม่เหล็ก สำหรับกรณีความเหนี่ยวนำของชิ้นงานและขดลวด จะแปรตามรากที่สองของความต้านทานจำเพาะ รากที่สองของความซึมซาบแม่เหล็ก แต่จะแปรผกผันกับรากที่สองของความถี่ ส่วนกรณีความเหนี่ยวนำเนื่องจากช่องว่างอากาศพบว่า จะขึ้นกับลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำและพื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศ แต่จะไม่ขึ้นกับความถี่

จากสมการดังกล่าวข้างต้น เป็นการพิจารณาสมการขดลวดเหนี่ยวนำไปพร้อมกับชิ้นงาน แต่สำหรับกรณีที่ไม่มีชิ้นงานในขดลวด วงจรสมมูลทางไฟฟ้าก็ยังเป็นลักษณะอนุกรมเหมือนเดิม แต่ความต้านทานจะมีเฉพาะความต้านทานของขดลวด (R_c) และความเหนี่ยวนำจะมีเฉพาะความเหนี่ยวนำเนื่องจากขดลวด (L_c) และช่องว่างอากาศ (L_g) ดังรูปที่ 2.22 โดยค่า R_c และ L_c จะมีค่าเท่าเดิม แต่ L_g จะมีค่าเปลี่ยนไปในทางที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะพื้นที่หน้าตัดของส่วนที่เป็นช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเท่ากับพื้นที่หน้าตัดภายในของขดลวด ดังแสดงในสมการ (2.73)

$$L_{gn} = N_c^2 \mu_o (\epsilon d_c^2 / 4 l_c) \quad (2.73)$$



รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำกรณีไม่มีโหลด

2) การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมักต้องใช้กระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีค่าสูง ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำได้โดย การทำให้ค่า Ampere-turn ของขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ซึ่งถ้าขดลวดเหนี่ยวนำมีจำนวนรอบน้อย กระแสในขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องมีค่าสูง ถ้าต้องการให้กระแสน้อยลง ขดลวดเหนี่ยวนำจะมีจำนวนรอบมากขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำที่เป็นโหลดของอินเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

จะเห็นได้ว่า เมื่อกระแสออกและแรงดันออกจะถูกกำหนดโดยแรงดันของแหล่งจ่ายพลังงานและกำลังงานที่ต้องการซึ่งเท่ากับเป็นการกำหนดอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำที่จะใช้เป็นโหลดของอินเวอร์เตอร์

ในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าไม่เหมาะสมกับกระแส และแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำ ให้มีความเหมาะสมกับกระแสและแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์

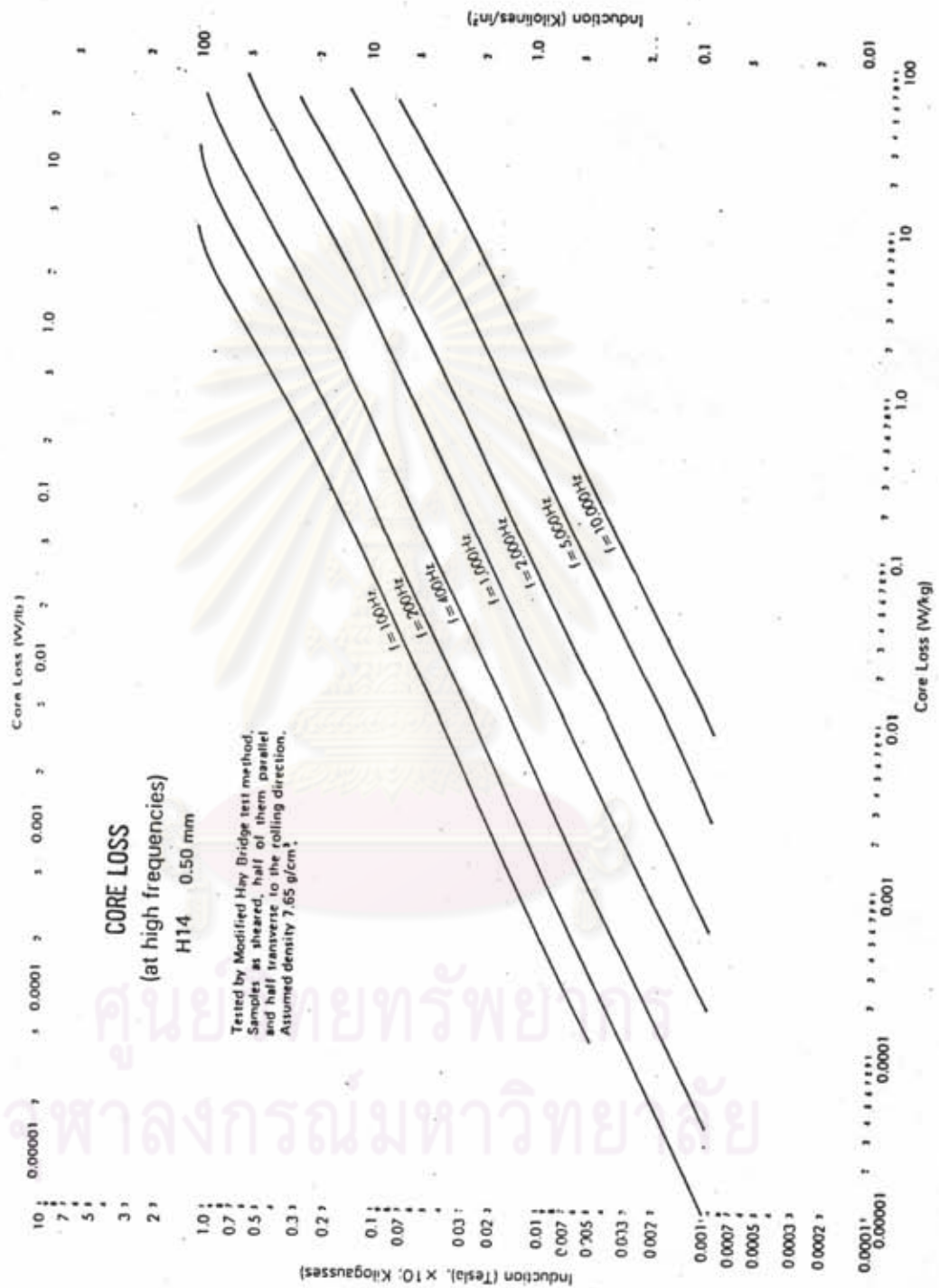
เนื่องจากหม้อแปลงที่ใช้งานในย่านความถี่ปานกลางนั้น ถ้าเป็นหม้อแปลงแกนเหล็กมักจะมีกำลังสูญเสียในแกนต่อน้ำหนัก (core loss/weight) ค่อนข้างสูง จากรูปที่ 2.23 จะเห็นว่า ถ้านำแกนเหล็กมาใช้งานที่ความถี่ 3500 เฮิรตซ์ โดยใช้ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสูงสุด (B_{max}) เท่ากับ 1.2 เทสลา กำลังการสูญเสียในแกนต่อน้ำหนักจะประมาณ 1 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัม แต่ถ้าลดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กลง เพื่อลดค่ากำลังการสูญเสียในแกนต่อน้ำหนักลงในระดับที่ใช้งานทั่วไป ขนาดแกนของหม้อแปลงที่ใช้งานก็จะใหญ่มาก จึงไม่สมควรที่จะนำมาใช้ ยกเว้นจะใช้หม้อแปลงแกนแม่เหล็กชนิดพิเศษ เช่น Tape-Wound Core ที่มีความหนาของแผ่นเทปค่อนข้างน้อยเพื่อลดกำลังสูญเสียในแกนต่อน้ำหนักให้ต่ำลง แกนหม้อแปลง

ชนิดดังกล่าวจะหาได้ยากตามท้องตลาดในบ้านเรา แกนเฟอร์ไรต์ซึ่งออกแบบไว้สำหรับงานที่ความถี่สูงก็ยังไม่เหมาะสมกับการใช้งานที่ย่านความถี่นี้ เนื่องจากความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสูงสุดของแกนเฟอร์ไรต์มีค่าต่ำกว่าแกนเหล็กมาก ทำให้ต้องใช้แกนขนาดใหญ่ในช่วงความถี่ดังกล่าว (รูปที่ 2.24) ประติแกนเฟอร์ไรต์มักจะใช้ในงานที่ความถี่สูง ๆ ซึ่งจะทำให้ขนาดแกนเล็กลง

เพื่อเป็นการตัดปัญหาในเรื่องหม้อแปลง จึงได้ออกแบบให้ขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าอิมพีแดนซ์เหมาะสมกับกระแสและแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลง อย่างไรก็ตามการกระทำดังกล่าวก็มีผลเสียเช่นกัน เนื่องจากไม่มีการแยกโดด (Isolation) ของโหลดจากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการแยกโดดด้วยหม้อแปลง 3 เฟส ทางด้านขาเข้าของเครื่อง เนื่องจากที่ความถี่ดังกล่าว กำลังสูญเสียในแกนไม่มากนักและการใช้หม้อแปลง 3 เฟส จะทำให้ขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับหม้อแปลง 1 เฟส 3 ตัว ที่มีขนาด VA เท่า ๆ กัน

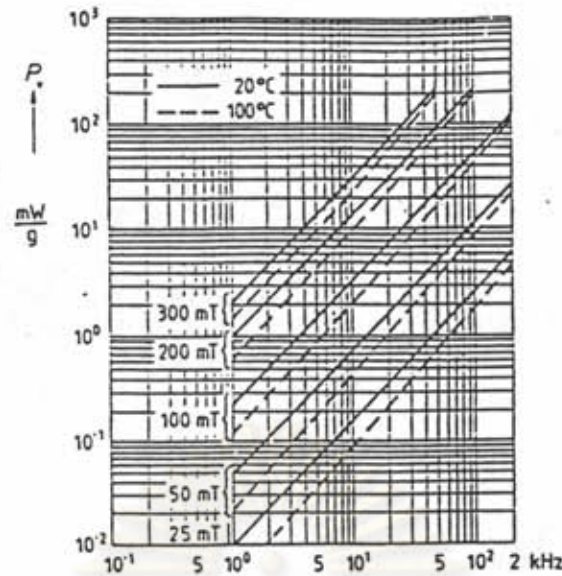


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับกำลังงานต่อน้ำหนัก (แกนเหล็ก)

[Hilitecore Homecore ,MITSUI & co.,LTD]



รูปที่ 2.24 กราฟแสดงกำลังการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ต่อน้ำหนัก กับความถี่
 [SIEMENS ; Ferrites Data book 1986/87]

เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำและรูปร่างของชิ้นงาน โดยค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของชิ้นงานจะมีค่าเป็นสัดส่วนตามจำนวนรอบยกกำลังสอง ในการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องมีความเหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าแรงดันออกสูงและกำลังงานออกที่ไม่มากนัก จำเป็นต้องใช้ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง จึงเป็นผลให้ต้องใช้จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำมาก ทำให้ขดลวดเหนี่ยวนำความยาวมาก ส่งผลให้กำลังงานต่อพื้นที่ผิว (Power density) มีค่าต่ำ ดังนั้นเพื่อให้กำลังงานต่อพื้นที่ผิวสูงขึ้น จำเป็นต้องลดขนาดความยาวของขดลวดเหนี่ยวนำลง ซึ่งสามารถทำได้โดยการออกแบบให้มีขดลวดเหนี่ยวนำพันทับซ้อนกันหลายชั้น โดยอาศัยแนวทางดังกล่าว ได้ออกแบบให้ขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้ทฤษฎีการคำนวณตัวแปรของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีความยาวเป็นอนันต์ และได้ทำการปรับสมการการออกแบบโดยใช้ผลที่ได้จากการวัดค่าตัวแปรของขดลวดเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้น ทำให้สามารถออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำได้ใกล้เคียงจากนั้นได้มีการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีความเหมาะสมที่จะใช้ในอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงรายละเอียดไว้ในโปรแกรม MathCAD ในภาคผนวก

ได้ขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.175 มม. มีความหนาต่อ 0.5 มม. พันทับซ้อนกัน 5 ชั้น มีความยาวของขดลวดเหนี่ยวนำ 52 มม. มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขดลวดเหนี่ยวนำ 57 มม. มีจำนวนรอบที่พัน 12 รอบต่อชั้น

และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่เป็นเหล็กผสมคาร์บอน 0.45 % ขนาด 42 มม.

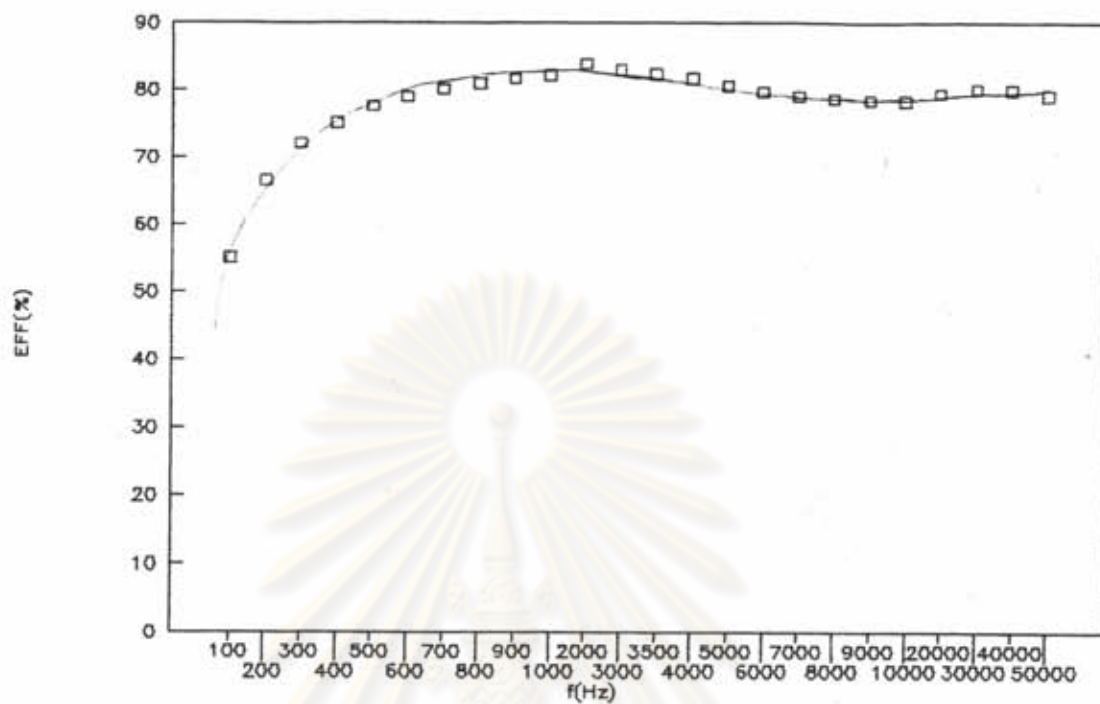
เมื่อนำค่าที่ได้จากการออกแบบมาสร้างขดลวดเหนี่ยวนำขึ้น แล้วทำการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์หาร์มอนิกที่ค่าความถี่ต่าง ๆ โดยวัดทั้งกรณีที่มีชิ้นงานภายในขดลวดและไม่มีชิ้นงาน ทำการวัดแบบอนุกรม ได้ผลดังนี้

CHARACTERISTICS OF COIL

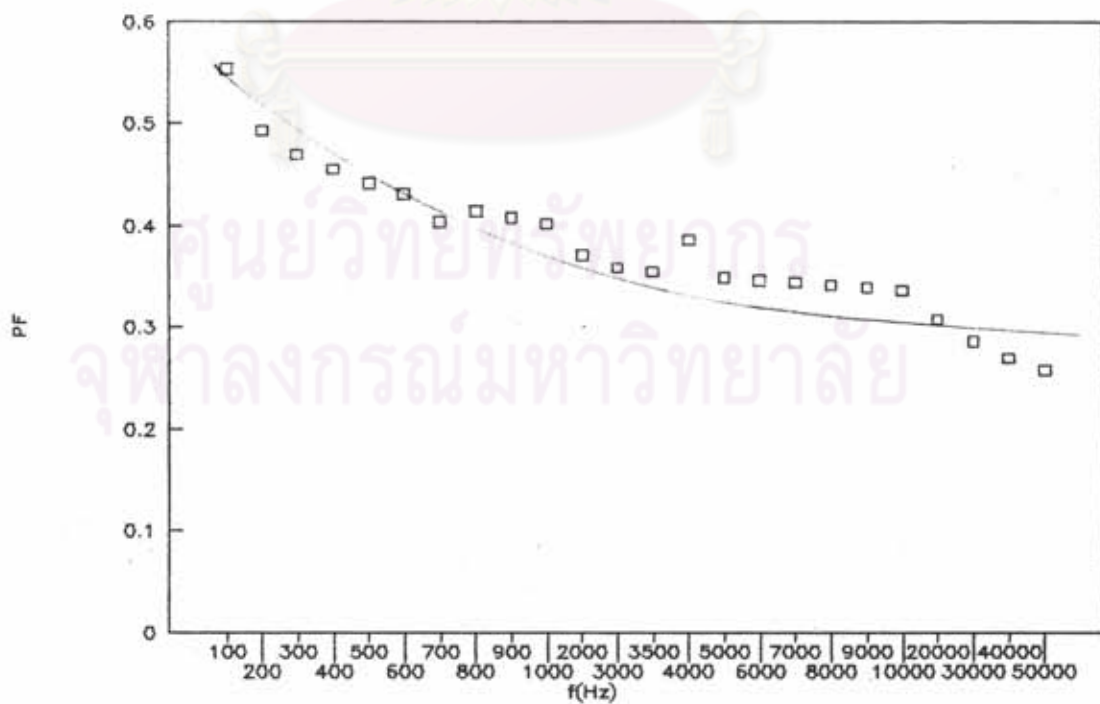
f (Hz)	NO-LOAD		LOAD					EFF (%)	PF
	Lc (mH)	Rc (ohm)	Ll (mH)	RI (ohm)	Rw (ohm)	Xl (ohm)	Z (ohm)		
100	0.16	0.085	0.452	0.189	0.104	0.283982	0.341126	55.02645	0.554047
200	0.159	0.09	0.379	0.27	0.18	0.476236	0.547449	55.55555	0.493198
500	0.158	0.094	0.338	0.339	0.245	0.637075	0.721655	72.27138	0.468753
400	0.154	0.099	0.311	0.4	0.301	0.781580	0.877990	75.25	0.455595
500	0.153	0.102	0.296	0.458	0.356	0.929554	1.036529	77.72925	0.441859
600	0.152	0.106	0.282	0.508	0.402	1.063049	1.178193	79.12385	0.431168
700	0.1519	0.11	0.267	0.557	0.447	1.262214	1.378650	80.25134	0.403725
800	0.1514	0.114	0.264	0.604	0.49	1.326927	1.457927	81.12582	0.414286
900	0.151	0.118	0.2568	0.648	0.53	1.452646	1.590624	81.78012	0.407387
1000	0.1507	0.122	0.2508	0.692	0.57	1.575726	1.720981	82.36994	0.402096
2000	0.1485	0.173	0.2152	1.08	0.907	2.704117	2.911812	83.98148	0.370903
3000	0.1467	0.242	0.1986	1.437	1.195	3.743292	4.009639	83.15935	0.356386
3500	0.1459	0.26	0.1921	1.604	1.324	4.224240	4.518520	82.54364	0.354983
4000	0.145	0.319	0.188	1.767	1.448	4.222041	4.578890	81.94680	0.386069
5000	0.1433	0.4	0.178	2.082	1.682	5.551692	5.966719	80.76770	0.346635
6000	0.1417	0.478	0.171	2.38	1.902	6.446152	6.871483	78.91586	0.346258
7000	0.14029	0.552	0.1652	2.664	2.112	7.265428	7.736434	78.27927	0.344255
8000	0.13902	0.619	0.1602	2.928	2.31	8.052036	8.567874	78.89344	0.341741
9000	0.13793	0.678	0.15609	3.183	2.505	8.626140	9.382549	78.68934	0.339246
10000	0.13696	0.733	0.15247	3.421	2.686	9.179385	10.17191	78.57351	0.336318
20000	0.1322	1.09	0.132	5.36	4.27	16.59558	17.43113	79.66417	0.307495
30000	0.1307	1.36	0.1229	6.81	5.55	23.16468	24.17334	80.21837	0.285852
40000	0.13	1.64	0.1174	8.27	6.83	29.50402	30.64115	80.16928	0.269689
50000	0.1296	1.97	0.1136	9.54	7.57	35.68830	36.93648	79.35010	0.258260

ตารางที่ 2.3 แสดงข้อมูลการวัดของขดลวดเหนี่ยวนำ

- โดยที่ NO-LOAD เป็นกรณีที่ไม่มีชิ้นงานภายในขดลวดเหนี่ยวนำ
- LOAD เป็นกรณีที่มีชิ้นงานภายในขดลวดเหนี่ยวนำ
- Lc ความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำ
- Ll ความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำ ช่องว่างอากาศ และชิ้นงาน
- RI ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมชิ้นงาน
- Rc ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ
- Rw ความต้านทานของชิ้นงาน เท่ากับ RI - Rc
- XI ค่ารีแอคแตนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำ ช่องว่างอากาศและชิ้นงาน
- Z ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมชิ้นงาน
- $$Z = \sqrt{(Rw + Rc)^2 + (Xg + Xw + Xc)^2}$$
- EFF เป็นค่าประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำ เท่ากับ $Rw / (Rc + Rw)$
- PF เป็นค่าตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำ เท่ากับ $(Rw + Rc) / Z$



รูปที่ 2.25 แสดงประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำที่ความถี่ต่าง ๆ กัน



รูปที่ 2.26 แสดงตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำที่ความถี่ต่าง ๆ กัน

จากตารางที่ 2.3 รูปกราฟที่ 2.25 และรูปกราฟที่ 2.26 เห็นได้ว่า ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะเป็นตัวแปรที่สำคัญมาก กล่าวคือ ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นกับความถี่ ในขณะที่ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าลดลง

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ดี ควรจะมีประสิทธิภาพและค่าตัวประกอบกำลังสูง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั้งสองกับความถี่มีความขัดแย้งกัน ดังนั้นจึงควรเลือกความถี่ที่เหมาะสมที่สุด โดยควรให้ความสำคัญต่อประสิทธิภาพก่อน โดยมีการพิจารณาตัวประกอบกำลังร่วมด้วย กล่าวคือจะเลือกความถี่เพื่อให้ประสิทธิภาพมีค่าที่ยอมรับได้ ส่วนค่าตัวประกอบกำลังนั้นจะปรับให้สูงขึ้นโดยการให้ตัวเก็บประจุ (รายละเอียดจะกล่าวไว้ในบทที่ 3)

ได้เลือกความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 3500 เฮิรตซ์ เป็นความถี่ในการใช้งาน โดยค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ กับค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ มีค่าใกล้เคียงกัน แตกต่างกันบ้างเล็กน้อย ดังแสดงการเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 2.4 และสามารถอธิบายค่าความแตกต่างกันได้ดังนี้

ตัวแปร	จากการคำนวณ	จากการวัด
Rwt	1.676 โอห์ม	1.324 โอห์ม
Rct	0.223 โอห์ม	0.28 โอห์ม
Ltt	0.19 mH	0.1921 mH

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการวัดขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน

โดยที่ Rwt (Rw) คือ ความต้านทานของชิ้นงาน

Rct (Rc) คือ ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ

Ltt (L1) คือ ความเหนี่ยวนำของขดเหนี่ยวนำ อากาศและชิ้นงาน

$$=Lct+Lgt+Lwt$$

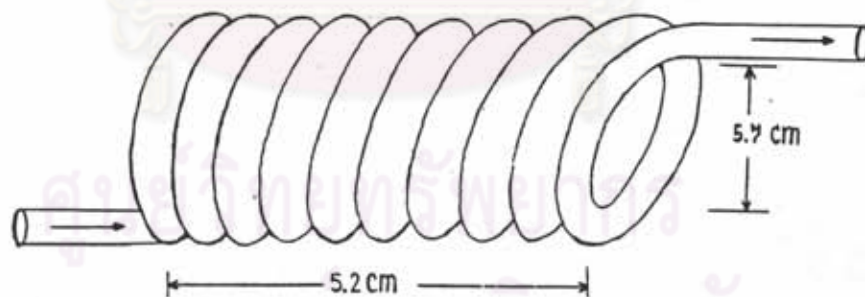
ค่า R_{wt} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงกว่าการวัด ค่าความแตกต่างนี้น่าจะมีผลมาจากการใช้สมการที่ใช้ในการคำนวณซึ่งใช้สำหรับชิ้นงานที่มีความยาวเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติจะมีความยาวจำกัด ทำให้มีกระแสเหนี่ยวนำไหลในบริเวณที่ขดลวดเหนี่ยวนำคลุมไม่ถึง ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่กระแสเหนี่ยวนำไหลผ่านจะมากกว่าความเป็นจริง ทำให้มีค่าความต้านทานค่าที่ได้จากการคำนวณสูงกว่าการวัด

ค่า R_{ct} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการวัด น่าจะมีผลมาจากการที่การคำนวณไม่ได้รวมผลของความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำที่ต่อจากขดลวดเหนี่ยวนำไปยังอินเวอร์เตอร์ และผลของความต้านทานของฉนวนลัมผัส

ค่า L_{tt} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการวัด น่าจะมีผลมาจากการที่ผลการคำนวณไม่ได้คำนึงผลของค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากค่า Reluctance ที่ขอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

รูปที่ 2.27 แสดงการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นในงานวิจัย

พันทับซ้อนกัน 5 ชั้น



รูปที่ 2.27 ขดลวดเหนี่ยวนำ