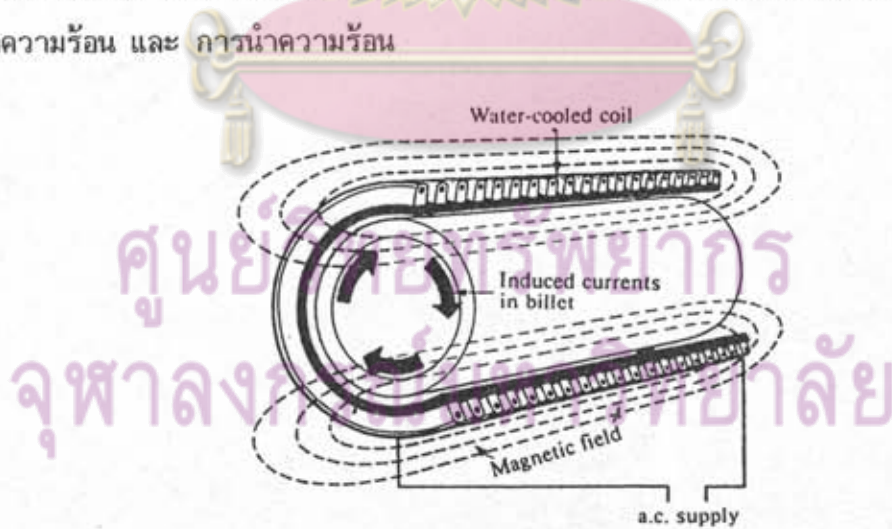


การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

2.1 บทนำ

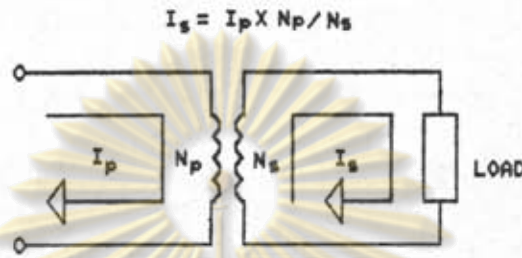
การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (Induction Heating) เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ ทั้งทางไฟฟ้าและทางความร้อนร่วมกันโดยมีสาเหตุมาจาก การเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) ปรากฏการณ์ผิว (Skin Effect) และการถ่ายเท ความร้อน (Heat Transfer) จากสาเหตุมูลฐานทั้งสามสามารถอธิบายการให้ความร้อน แบบเหนี่ยวนำโดยย่อได้ดังนี้ เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับผ่าน เข้าสู่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่มี ชิ้นงานอยู่ภายใน กระแสไฟฟ้าสลับจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กคล้องผ่านขดลวดสร้าง สนามแม่เหล็ก ถ้าชิ้นงานเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านชิ้นงานจะ เหนี่ยวนำให้มีกระแสไหล โดยกระแสส่วนมากจะไหลผ่านชิ้นงานในระดับความลึกผิว (Skin Depth) กระแสที่ไหลวนรอบชิ้นงานเป็นเส้นทางปิดจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณ ผิวของชิ้นงาน ความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับกระแสที่เหนี่ยวนำ และ ความต้านทานสัมผัสของเส้นทางที่ กระแสไหลผ่าน และความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปบริเวณอื่น โดยการแผ่รังสีที่บริเวณผิว การ พาคความร้อน และ การนำความร้อน



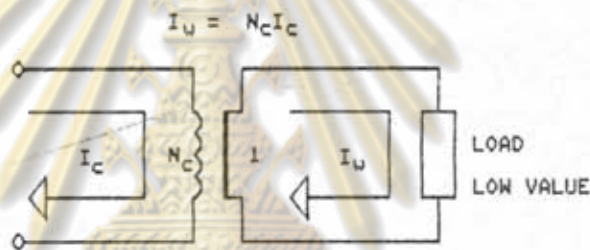
รูปที่ 2.1 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอย่างง่าย

รูปที่ 2.1 แสดงการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอย่างง่าย ถ้าวางชิ้นงานไว้ใน

ขดลวดหรือใกล้กับขดลวด ชิ้นงานนั้นจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้น ถ้าพิจารณาทั้งระบบ เป็นหม้อแปลงชุดหนึ่ง ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะเป็นเสมือนขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ส่วนชิ้นงานจะเปรียบเสมือนขดทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบเป็นหนึ่งรอบ และมีโหลดต่ออยู่ในลักษณะเกือบลัดวงจร เพราะ ความต้านทานสมมูลของโลหะที่เป็นชิ้นงานจะมีค่าค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงทั่วไป



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อน

รูปที่ 2.2 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงโดยทั่วไป ส่วนรูปที่ 2.3 แสดงวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน จะเห็นว่าถ้า I_c เป็นกระแสที่ไหลในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ส่วน I_u เป็นกระแสที่ไหลในชิ้นงาน กระแสทั้งสองจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

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

โดยที่ N_c คือจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

กำลังสูญเสียเป็นความร้อนในชิ้นงานมีค่าเท่ากับ

$$P_w = N_c^2 I_c^2 R_w \tag{2.2}$$

โดยที่ R_w คือความต้านทานสมมูลของชิ้นงาน

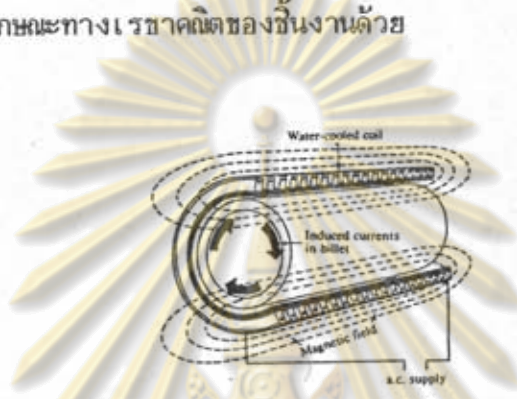
รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางการไหลของกระแสที่ชิ้นงาน จากปรากฏการณ์ผิวถ้าพิจารณาว่ากระแสโดยส่วนมากไหลอยู่ในระดับความลึกผิว จะสามารถหาความต้านทานสมมูลของชิ้นงานได้ดังรูปที่ 2.5 เมื่อทำการคลี่ชิ้นงานออกความต้านทานของชิ้นงานจะมีค่า

(2.3)

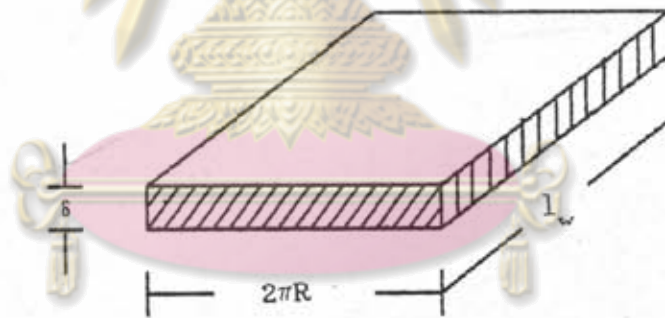
$$R_w = \frac{2\pi R\rho}{\delta l_w}$$

- โดยที่
- ρ คือสภาพความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน
 - δ คือความลึกผิว $= \sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}}$
 - μ คือค่าซึมได้ของชิ้นงาน และ f, ω คือความถี่
 - R คือรัศมีของชิ้นงาน และ l_w คือความยาวของชิ้นงาน

จากสมการที่ (2.3) ความต้านทานสมมูลจะมีความสัมพันธ์กับ สภาพความต้านทาน ความลึกผิว และ ลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงานด้วย

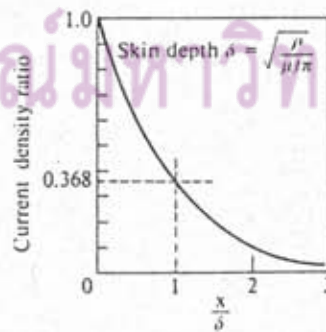


รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลของกระแสที่ผิว



รูปที่ 2.5 ความต้านทานสมมูลของชิ้นงาน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส กับระยะทางจากผิวของชิ้นงาน

รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส กับระยะทางจากผิวของชิ้นงาน เนื่องจากปรากฏการณ์ผิว จึงทำให้ความหนาแน่นกระแสมีความสัมพันธ์กับระยะทางจากผิวเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ที่ระดับความลึกผิวความหนาแน่นของกระแส จะมีค่าเพียง 0.368 เท่าของความหนาแน่นของกระแสที่ผิวชิ้นงาน จึงประมาณว่ากระแสโดยส่วนมากจะไหลอยู่ในระดับความลึกผิวนั้น

ถ้าพิจารณาการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะพบว่า ไม่มีการใช้แหล่งความร้อนจากภายนอกแต่ใช้ชิ้นงาน เป็นแหล่งความร้อนของตัวเองอีกทั้งชิ้นงานก็ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก การให้ความร้อนในลักษณะนี้จึงสามารถทำได้สะดวก นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดความร้อนในเฉพาะบริเวณที่ต้องการ ทั้งยังสามารถควบคุมระยะเวลาในการให้ความร้อนได้ ถ้าเป็นงานลักษณะชิ้นแข็งที่ยังสามารถเลือกระดับความลึกผิวที่ต้องการชิ้นแข็งได้โดยเลือกความถี่ที่ใช้งานให้เหมาะสมกับความถี่ที่ต้องการ ระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้ในปัจจุบัน สามารถจำแนกได้ตามลักษณะการกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และช่วงความถี่ในการใช้งานได้ดังนี้

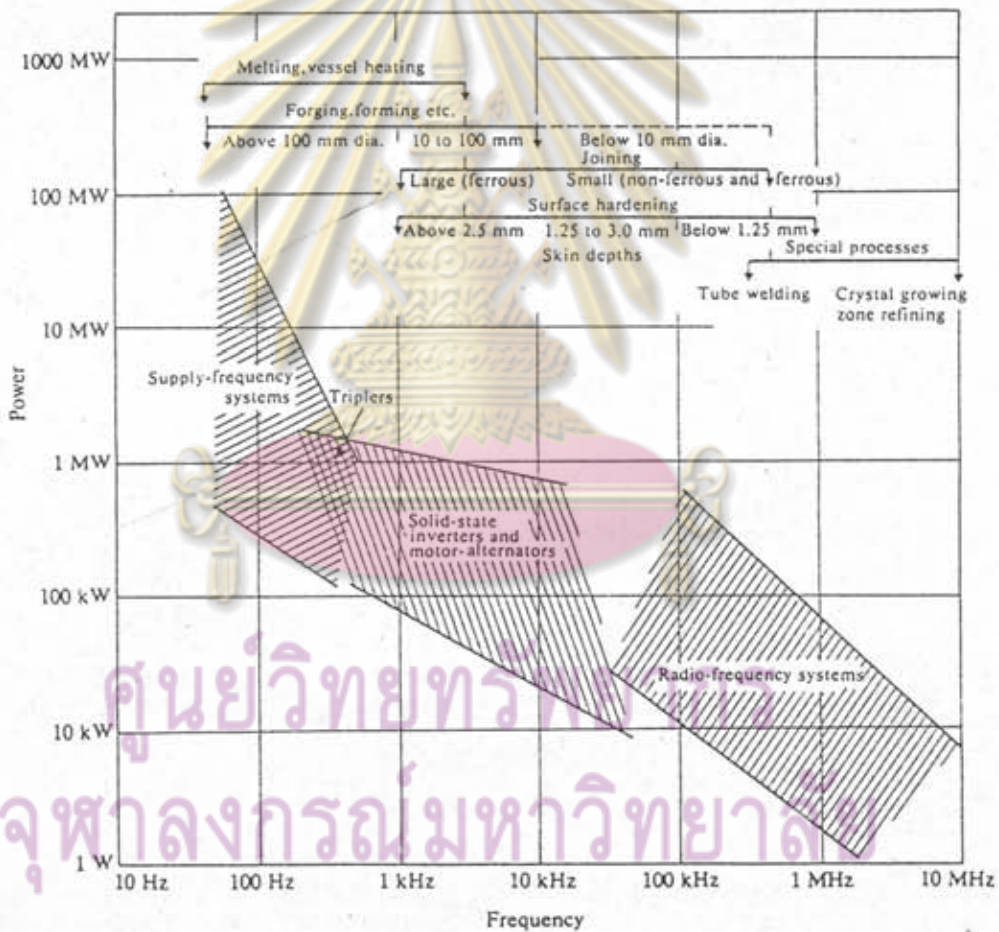
2.1.1 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้ไฟจากโรงไฟฟ้าโดยตรง แรงดันไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้ามีความถี่ค่อนข้างต่ำจึงทำให้ระดับความลึกผิวในการให้ความร้อนมีค่ามากในบางกรณีอาจใช้หม้อแปลงอิมิตัวตัวควบคุมความถี่ เพื่อนำฮาร์โมนิกที่ 3 หรือฮาร์โมนิกที่ 5 มาใช้ในการเหนี่ยวนำแทน โดยปรกติเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำประเภทนี้ จะใช้ในงานหลอมโลหะ ซึ่งมีกำลังหลายร้อยเมกะวัตต์

2.1.2 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้มอเตอร์ และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดนี้ จะใช้พลังงานจากโรงไฟฟ้ามาขับเคลื่อนมอเตอร์และใช้มอเตอร์ไปขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสร้างแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงขึ้น อยู่ในย่าน 500 เฮิรตซ์ ถึง 10 กิโลเฮิรตซ์ เครื่องให้ความร้อนชนิดนี้สามารถให้กำลังได้ หลายร้อย กิโลวัตต์ โดยทั่วไปจะใช้ในเตาเผาและขึ้นรูปโลหะ และเตาเชื่อมต่อโลหะ

2.1.3 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแบบสถิต เนื่องจากเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นแบบพลวัต มีขีดจำกัดทางกลศาสตร์ทำให้ไม่สามารถเพิ่มความถี่ที่ใช้งานให้สูงมากได้ เครื่องให้ความร้อนแบบสถิตจะใช้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจำพวก ทรานซิสเตอร์กำลัง มอสเฟตกำลัง หรือพาว์ไทรซิสเตอร์ เพื่อแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าให้เป็นไฟตรง แล้วแปลงผันให้เป็นไฟสลับอีกครั้งที่มีความถี่สูงขึ้นโดยใช้

วงจรรินเวอร์เตอร์ เครื่องให้ความร้อนแบบสวิตช์สามารถสร้างความถี่ที่ใช้ในการชุบแข็งได้ตั้งแต่ความถี่ค่อนข้างต่ำจนกระทั่งความถี่สูงๆระดับร้อยกิโลเฮิรตซ์ การใช้งานเครื่องให้ความร้อนแบบนี้จะมีที่ใช้ ลักษณะเดียวกับเครื่องให้ความร้อนที่ใช้มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.1.4 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ทำงานย่านความถี่วิทยุ โดยจะทำงานตั้งแต่ความถี่หลายร้อยกิโลเฮิรตซ์ จนถึงความถี่หลายเมกะเฮิรตซ์ ซึ่งปัจจุบันนี้ยังคงใช้หลอดสุญญากาศ เพราะสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำยังมีสมรรถนะในการใช้งาน ที่ความถี่สูงๆไม่เพียงพอ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำลักษณะนี้จะให้กำลังงานค่อนข้างต่ำ ในระดับหลายสิบลวัตต์ เหมาะแก่การชุบแข็งผิว

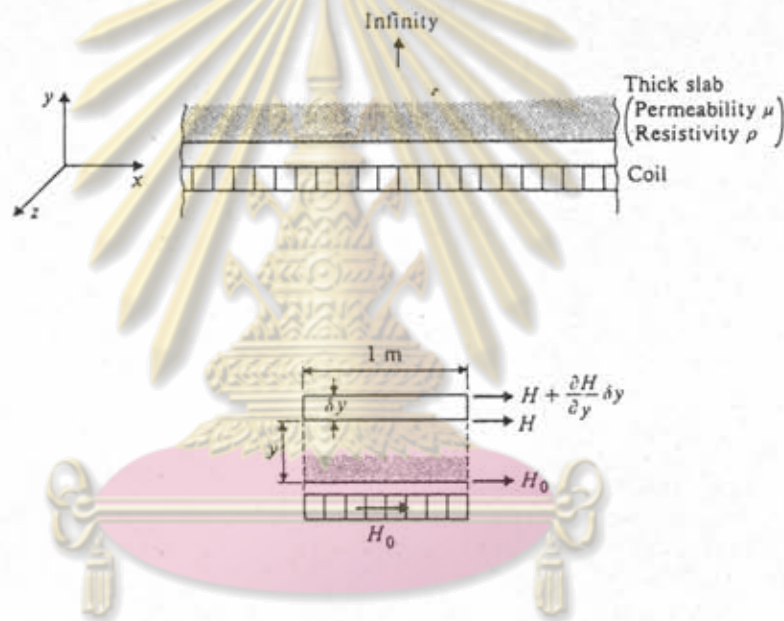


รูปที่ 2.7 ประเภทและลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในย่านความถี่ต่างๆ

2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

2.2.1 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชิ้นงานในอุดมคติ

ทฤษฎีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ สามารถอธิบายให้เข้าใจโดยอาศัยทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในที่นี้จะอธิบายการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชิ้นงานที่มีลักษณะอุดมคติที่เรียกว่า Semi-infinite slab ถ้าสามารถทำความเข้าใจกับชิ้นงานที่มีลักษณะอุดมคติ จะทำให้เข้าใจการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนกับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกได้ง่ายขึ้น โดยจะอธิบายตามหนังสืออ้างอิง (John Davies and Peter Simpson, 1979)



รูปที่ 2.8 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชิ้นงานในอุดมคติ

รูปที่ 2.8 แสดงระบบที่ประกอบด้วยขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กและชิ้นงาน โดยถือว่าชิ้นงานยาวและหนามาก โดยชิ้นงานจะวางอยู่ในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นอุดมคติดังกล่าวอาจเทียบได้กับไหลตรงทรงกระบอกที่มีรัศมีเป็นอนันต์ ในที่นี้สมมติว่าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ทำให้ผิวของชิ้นงานมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็น H_0 เนื่องจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอยู่ชิดกับชิ้นงานมาก ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขดลวดจะมีค่าเท่ากับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวชิ้นงานโดยความเข้มของสนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาในทิศทางตามแกน x และสร้างกระแสเหนี่ยวนำขึ้นที่ผิวชิ้นงานตามแกน z โดยความเข้มสนามแม่เหล็กจะเป็นปริมาณเวกเตอร์

ในที่นี้จะสมมติเงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กที่ผิวชั้นงานดังนี้

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

โดยที่ H_{om} คือค่ายอดของ H_x ที่ผิวชั้นงาน ($y = 0$) จากสมการพื้นฐานทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะพบว่า

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{H} &= \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla^2 \vec{E} &= \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla^2 \vec{J} &= \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.5)$$

จาก $\nabla^2 \vec{H} = \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial H_x}{\partial t} + \frac{\partial H_y}{\partial t} + \frac{\partial H_z}{\partial t} \right)$ (2.6)

เนื่องจากชั้นงานมีลักษณะเป็นอุดมคติทำให้ $H_y = H_z = 0$ ดังนั้น \vec{H} จะมีส่วนประกอบในทิศทางแกน x อย่างเดียวแสดงว่า

$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (2.7)$$

คำตอบของสมการอนุพันธ์ย่อยจะมีผลเฉลยในรูป $H_x = H_x(y) \cos \omega t$ ซึ่ง $H_x(y)$ คือการเปลี่ยนแปลงของ H_x กับระยะทางในแนวแกน y ซึ่งสามารถเขียนสมการที่ (2.7) ใหม่ในรูปปริมาตรเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$\frac{d^2 H_x}{dy^2} - j \frac{\mu}{\rho} \omega H_x = 0 \quad (2.8)$$

ให้ $\alpha^2 = \frac{\mu \omega}{2\rho} = \frac{1}{\epsilon^2}$ (2.9)

$$\frac{d^2 H_x}{dy^2} - 2j\alpha^2 H_x = 0 \quad (2.10)$$

เขียนสมการใหม่ได้ $\frac{d^2 H_x}{dy^2} - k^2 H_x = 0$ (2.11)

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

$$H_x(y) = A_1 \exp(ky) + A_2 \exp(-ky) \quad (2.12)$$

จากเงื่อนไขขอบเขตเมื่อ $y = \infty$; H_x จะต้องมีค่าจำกัดค่าใดค่าหนึ่ง แสดงว่า $A_1 = 0$ และเมื่อ $y = 0$; $H_x(y) = H_{om} \exp(j\omega t)$ ดังนั้น

$$H_x(y) = H_{om} \exp(-ky) \exp(j\omega t) \quad (2.13)$$

$$H_x(y) = H_{om} \exp(-\sqrt{(2j)}\alpha y) \exp(j\omega t) \quad (2.14)$$

แต่ $\sqrt{(2j)} = \pm(1+j)$ ดังนั้น

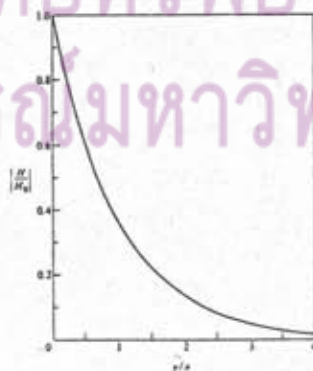
$$H_x(y) = H_{om} \exp(-\alpha y(1+j)) \exp(j\omega t) \quad (2.15)$$

ใช้คำตอบเฉพาะส่วนจริง

$$H_x(y) = H_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.16)$$

จากผลเฉลยตามสมการที่ (2.16) พบว่าที่บริเวณผิวของชิ้นงาน $y = 0$; $H_x = H_{om} \cos \omega t$ ตามเงื่อนไขขอบเขตที่สมมติไว้ และที่ระยะใดๆจากผิวของชิ้นงานในทิศทางแกน y ขนาดของความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสที่ระยะใดๆจากผิวของชิ้นงานจะเป็นแบบล่าหลังเมื่อเทียบกับมุมเฟสที่ผิวเป็นปริมาณ $\alpha y = \frac{y}{\delta}$

ศูนย์วิทยุโทรพยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะจากผิวชิ้นงาน

จากสมการที่ (2.16) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนของ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะใด ๆ กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวชั้นงาน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 ถ้ากำหนดให้ความลึกผิวแทนด้วยสัญลักษณ์ δ ความลึกผิวนี้จะมีค่า $\sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r \mu_0}}$ จะเห็นว่าที่ ระดับความลึกผิว ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าเพียง 0.368 ของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิว ส่วนค่าความหนาแน่นกระแส ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก และฟลักซ์สนามแม่เหล็ก สามารถคำนวณได้ตามความสัมพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังนี้

จาก
$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.17)$$

$$B_x(y) = B_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.18)$$

และจาก
$$\vec{J} = \text{curl}(\vec{H}) \quad (2.19)$$

แสดงว่า
$$\vec{J}_z = -\frac{\partial H_x}{\partial y} \vec{k} ; \vec{J}_x = \vec{0} ; \vec{J}_y = \vec{0} \quad (2.20)$$

$$\vec{J}_z = (\alpha \sqrt{2j} \exp[-\alpha y \sqrt{2j} + j\omega t]) H_{om} \vec{k} \quad (2.21)$$

$$\vec{J}_z = (\sqrt{2} \alpha \exp[-\alpha y (1+j) + j\omega t + j\frac{\pi}{4}]) H_{om} \vec{k} \quad (2.22)$$

ใช้เฉพาะส่วนจริงได้
$$\vec{J}_z = \sqrt{2} \alpha H_{om} [\exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y + \frac{\pi}{4})] \vec{k} \quad (2.23)$$

จะเห็นว่าความหนาแน่นกระแสที่เหนี่ยวนำมีทิศทางตั้งฉาก กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก เสมอและมีมุมเฟสนำหน้าความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ $\pi/4$

เมื่อ $y = 0$
$$J_{zo} = \sqrt{2} H_{om} \alpha \exp(j(\omega t + \pi/4))$$

$$J_{zo} = \sqrt{2} H_{xo} \alpha \exp(j\pi/4) \quad (2.24)$$

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

$$J_z(y) = J_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.25)$$

จากผลเฉลยของความหนาแน่นกระแส สามารถหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า จากความสัมพันธ์ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

$$E_z = \rho J_z \quad (2.26)$$

$$E_z = \rho J_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.27)$$

จากผลเฉลยตามสมการข้างต้นจะพบว่าปริมาณ H , B , J และ E จะมีลักษณะที่เหมือนกันคือเป็นไปตามปรากฏการณ์ผิว และจากความหนาแน่นกระแส สามารถหาค่ากระแสผลรวมต่อหน่วยความยาวได้ดังนี้

$$I = \int_0^\infty J_z(y) dy \quad (2.28)$$

$$I = \int_0^\infty J_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) dy$$

$$I = J_{om} \operatorname{Re} \left[\int_0^\infty \exp(j\omega t - (1+j)\alpha y) dy \right]$$

$$I = J_{om} \operatorname{Re} \left[\frac{\exp(j\omega t)}{(1+j)\alpha} \right]$$

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

จากผลเฉลยของสมการที่ (2.28) จะพบว่ากระแสผลรวมต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะมีมุมเฟสช้าหลังมุมเฟสของความหนาแน่นกระแสที่ผิวอยู่ $\pi/4$ แต่จาก

$$J_{om} = \sqrt{2} H_{om} \alpha \exp(j\pi/4) \quad (2.29)$$

แสดงว่า

$$I = \sqrt{2} H_{om} \alpha \exp j(\omega t - \pi/4) \exp[(j\pi/4)] / (\sqrt{2}\alpha)$$

$$I = H_{om} \exp(j\omega t) \quad (2.30)$$

ใช้เฉพาะส่วนจริง

$$I = H_{om} \cos \omega t \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (2.31) จะเห็นว่ากระแสต่อหนึ่งหน่วยความยาวมีค่าเท่ากับ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวซึ่งสอดคล้องกับกฎของฟาราเดย์ที่ว่า

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (2.32)$$

$$H(x_1) = I$$

หรือ

$$I = H_{om} \cos \omega t$$

จากที่กล่าวมาเมื่อมีกระแสไหลในชั้นงานย่อมเกิดความร้อนขึ้น กำลังสูญเสียต่อ 1 ตารางเมตรที่ผิวชั้นงานจะมีค่า กำลัง

$$P_u = \int_0^{\infty} \rho J_z^2(y) dy (x_1) (x_1) \quad (2.33)$$

เนื่องจากความหนาแน่นกระแสแปรกับเวลาเป็นรายคาบในการหาค่ากำลังสูญเสีย ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จึงต้องหาค่าเฉลี่ยของกำลังต่อ 1 คาบเวลาด้วย สมการที่ (2.33) จึงเป็น

$$P_u = \frac{\rho}{T} J_{om}^2 \int_0^T \int_0^{\infty} \exp(-2\alpha y) \cos^2(\omega t - \alpha y) dy dt \quad (2.34)$$

$$P_u = \frac{\rho}{2} J_{om}^2 \int_0^{\infty} \exp(-2\alpha y) dy \quad (2.35)$$

$$P_u = \frac{\rho}{4\alpha} J_{om}^2$$

ศูนย์วิทยุพัทยากร

แต่จาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

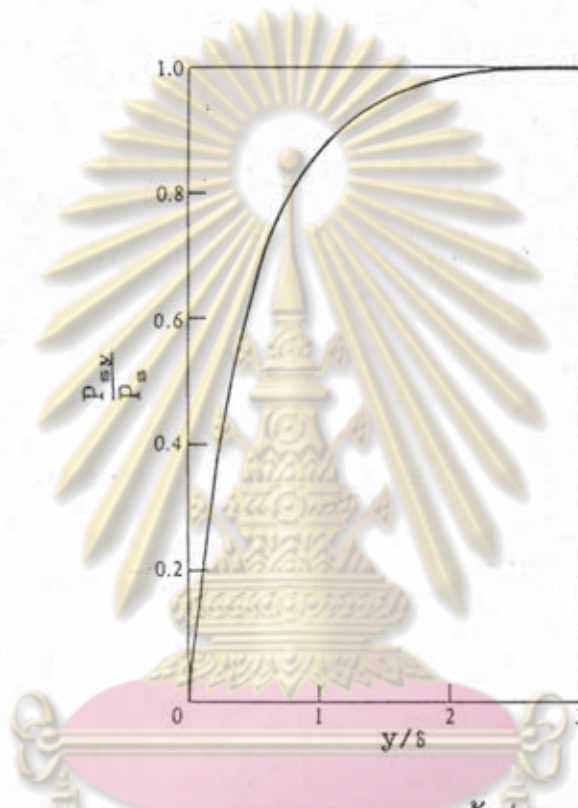
$$P_u = \frac{\rho}{\delta} H_o^2 \quad (2.36)$$

$$\frac{P_{sy}}{P_u} = 1 - \exp(-2\alpha y) \quad (2.37)$$

โดยที่ H_o คือค่า อาร์เอ็มเอส ของ H_{om} ถ้าให้ P_{sy} คือกำลังสูญเสียของชั้นงานจากผิว

ถึงระดับความลึก y สัดส่วนของ P_{xy} กับ P_m แสดงดังสมการที่ (2.37) และความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของ P_{xy} และ P_m กับ สัดส่วนของระยะทางจากผิวและความลึกผิวแสดง ดังรูปที่ 2.10 จากค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก สามารถหาค่าฟลักซ์สนามแม่เหล็กผลรวมต่อหนึ่งหน่วยความยาวและค่าแรงเคลื่อนสนามไฟฟ้าที่เกิดจากฟลักซ์สนามแม่เหล็กดังกล่าว ได้ดังนี้

$$\psi = \int B_x(y) dy$$



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียต่อพื้นที่ผิวกับระยะจากผิวชั้นงาน

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดัน

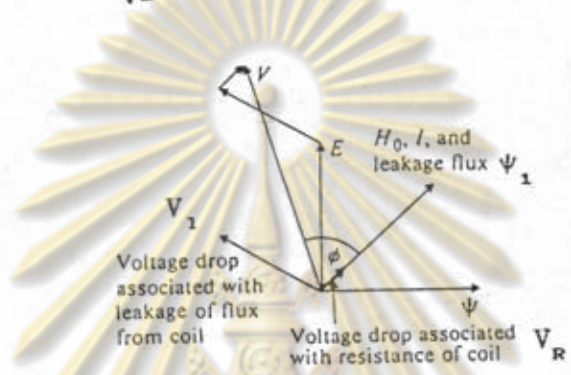
$$\psi = \text{Real} \left[\mu H_{om} \int_0^{\infty} \exp[(j\omega t - (1+j)\alpha y) dy] \right] \quad (2.38)$$

$$\psi = \frac{\mu H_{om}}{\sqrt{2}\alpha} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) \tag{2.39}$$

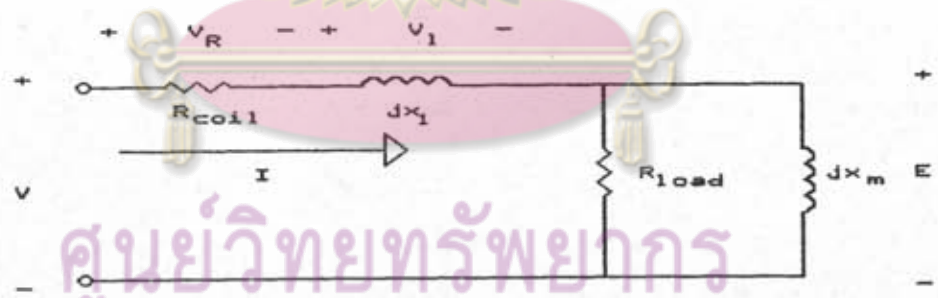
และจาก $E = N \frac{d\psi}{dt} \tag{2.40}$

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

$$E = \frac{\mu H_{om} Nw}{\sqrt{2}\alpha} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \tag{2.41}$$



รูปที่ 2.12 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันในกรณีที่ตัวขดลวดไม่อุดมคติ



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อนและทำงาน

จากสมการที่ (2.39) และสมการที่ (2.41) จะเห็นว่าฟลักซ์สนามแม่เหล็กผลรวมจะเป็นสัดส่วนกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก H_{om} และมุมเฟสจะล้าหลังมุมเฟสของความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ $\frac{\pi}{4}$ และแรงดันที่เกิดขึ้นจะนำหน้ากระแสผลรวมอยู่ $\frac{\pi}{4}$ จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาสามารถนำมาเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมของปริมาณต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2.11 จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมจะพบว่าในกรณีที่ทำงานเป็นลักษณะอุดมคติ วงจรทางไฟฟ้าจะมีตัวประกอบ

กำลังเป็นแบบล้าหลังที่มีค่าเป็น 0.707 แสดงว่าส่วนประกอบในส่วนจริงและจินตภาพของอิมพีแดนซ์ในวงจรสมมูลมีค่าเท่ากัน แต่ตามความเป็นจริง ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะมีความเหนี่ยวนำรั่วไหล ซึ่งทำให้ตัวประกอบกำลังของระบบเลวลง และตัวขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กก็มีความต้านทานของตัวเองอยู่ค่าหนึ่งแล้ว ทำให้เฟสเซอร์ไดอะแกรมของระบบเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.12 และสามารถเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของระบบได้ดังรูปที่ 2.13

2.2.2 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชิ้นงานทรงกระบอก

การพิจารณาการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชิ้นงานอุดมคติ จะต่างกับในทางปฏิบัติเพราะชิ้นงานจะมีขอบเขตที่จำกัด ในที่นี้จะพิจารณาชิ้นงานที่มีลักษณะทรงกระบอก เพื่อความสะดวกจะใช้พิกัดทรงกระบอก (John Davies and Peter Simpson, 1979)

$$\text{สมมติให้ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ } H = H_{rm} \cos \omega t$$

$$\text{สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในพิกัดทรงกระบอกคือ } \frac{d^2 H}{dt^2} + \frac{1dH}{rdt} - k^2 H = 0 \quad (2.42)$$

$$\text{โดยที่ } k = \frac{j\omega\mu}{\rho} = 2\alpha^2 j \quad (2.43)$$

$$H = AI_0(kr) + BK_0(kr) \quad (2.44)$$

ผลเฉลยของสมการนี้จะอยู่ในรูป Bessel's Function โดยมีรูปแบบดังสมการที่ (2.44) โดยที่ I_0 และ K_0 คือ Bessel's Function อันดับศูนย์ A และ B คือค่าคงที่ ในการหาผลเฉลยของสมการที่ (2.44) จะต้องหาค่าของค่าคงที่ทั้งสอง โดยแทนเงื่อนไขขอบเขตของชิ้นงานในพิกัดทรงกระบอก ในที่นี้จะไม่แสดงรายละเอียด แต่สามารถหาข้อมูลจาก (John Davies and Peter Simpson, 1979) ซึ่งผลเฉลยที่สมบูรณ์จะเป็นดังนี้

$$\frac{H_r}{H_R} = \frac{\text{ber}(\sqrt{2\alpha}r) + j\text{bei}(\sqrt{2\alpha}r)}{\text{ber}(\sqrt{2\alpha}R) + j\text{bei}(\sqrt{2\alpha}R)} \quad (2.45)$$

โดยที่ H_r คือความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่ผิวชิ้นงานและ H_R คือความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่ระยะ r จากศูนย์กลางชิ้นงาน และสามารถหาค่าความหนาแน่นกระแสได้ดังนี้

$$J_r = \sqrt{2\alpha} H_r \frac{\text{ber}'(\sqrt{2\alpha}r) + j\text{bei}'(\sqrt{2\alpha}r)}{\text{ber}(\sqrt{2\alpha}R) + j\text{bei}(\sqrt{2\alpha}R)} \quad (2.46)$$

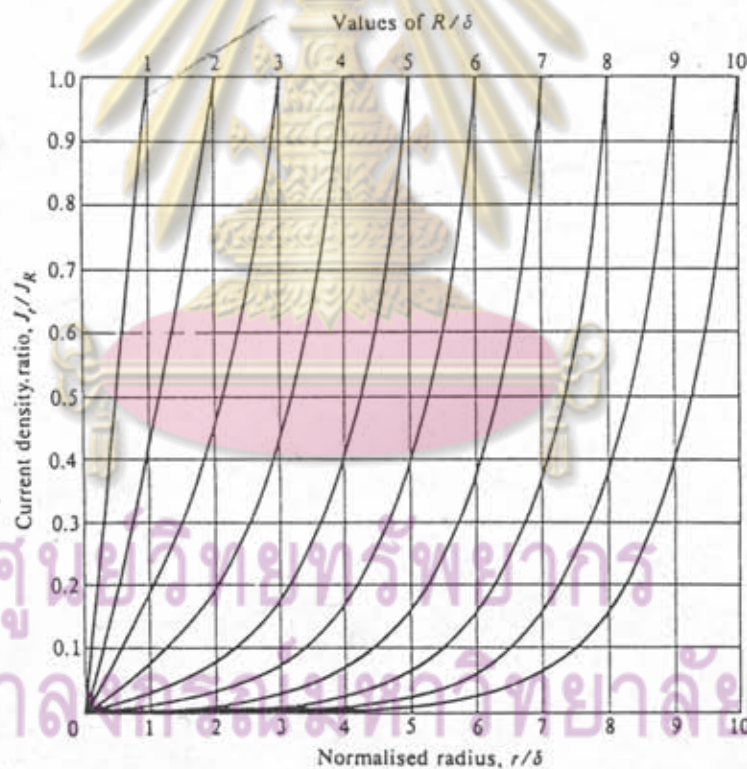
$$\frac{J_r}{J_R} = \frac{\text{ber}'(\sqrt{2}\alpha r) + j\text{bei}'(\sqrt{2}\alpha r)}{\text{ber}'(\sqrt{2}\alpha R) + j\text{bei}'(\sqrt{2}\alpha R)} \quad (2.47)$$

$$\left| \frac{J_r}{J_R} \right| = \sqrt{\frac{(\text{ber}'(\sqrt{2}\alpha r))^2 + (\text{bei}'(\sqrt{2}\alpha r))^2}{(\text{ber}'(\sqrt{2}\alpha R))^2 + (\text{bei}'(\sqrt{2}\alpha R))^2}} \quad (2.48)$$

จากสมการข้างต้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ของ $\left| \frac{J_r}{J_R} \right|$ กับ $\frac{r}{\delta}$ โดยมี $\frac{R}{\delta}$ เป็นตัวพารามิเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.14 และสามารถหาฟังก์ชันแม่เหล็กผลรวมได้ดังสมการ (2.50)

$$\psi_r = \left[\frac{2\pi\mu H_{Rm} r}{\sqrt{2}\alpha} \right] \left[\frac{\text{bei}'(\sqrt{2}\alpha r) - j\text{ber}'(\sqrt{2}\alpha r)}{\text{ber}'(\sqrt{2}\alpha r) + j\text{bei}'(\sqrt{2}\alpha r)} \right] \quad (2.49)$$

$$\psi_R = \left[\frac{\sqrt{2}\pi\mu H_{Rm} R}{\alpha} \right] \left[\frac{\text{bei}'(\sqrt{2}\alpha R) - j\text{ber}'(\sqrt{2}\alpha R)}{\text{ber}'(\sqrt{2}\alpha R) + j\text{bei}'(\sqrt{2}\alpha R)} \right] \quad (2.50)$$



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสแล้ที่ระยะใดๆ (J_r/J_R) กับระยะจากผิวชั้นงาน (r/δ) โดยมี $\frac{R}{\delta}$ เป็นตัวพารามิเตอร์

จากสมการ ψ_R คือฟังก์ชันแม่เหล็กทั้งหมดที่ค้ต้องผ่านชั้นงาน ถ้าจัดรูป

สมการที่ (2.50) ใหม่จะได้

$$\psi_R = \mu H_{Rm} A_w (q - jp) = \psi_q - j\psi_p \quad (2.51)$$

$$\text{โดยที่ } q = \frac{\sqrt{2}}{\alpha R} \frac{\text{ber}'\sqrt{2\alpha R} \text{ber}\sqrt{2\alpha R} - \text{ber}'\sqrt{2\alpha R} \text{bei}\sqrt{2\alpha R}}{\text{ber}^2\sqrt{2\alpha R} + \text{bei}^2\sqrt{2\alpha R}} \quad (2.52)$$

$$p = \frac{\sqrt{2}}{\alpha R} \frac{\text{ber}'\sqrt{2\alpha R} \text{bei}\sqrt{2\alpha R} + \text{ber}'\sqrt{2\alpha R} \text{ber}\sqrt{2\alpha R}}{\text{ber}^2\sqrt{2\alpha R} + \text{bei}^2\sqrt{2\alpha R}} \quad (2.53)$$

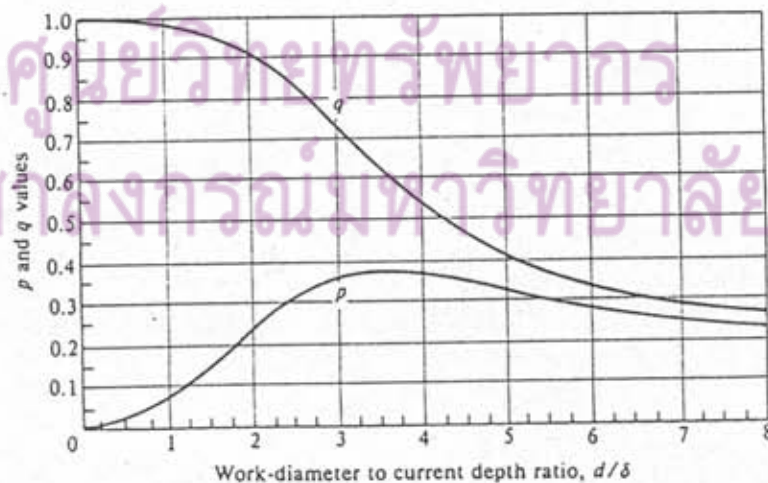
$$\text{และ } A_w = \pi R^2$$

ตัวแปร p และ q เป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดค่าฟังก์ชันสนามแม่เหล็ก และค่ากำลังงานที่ขึ้นงานโดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p และ q กับ $\frac{d}{s}$ ได้ดังรูปที่ 2.15 โดยที่ $d = 2R$ คือเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานจากการคำนวณพบว่าถ้า $\frac{d}{s}$ มากกว่า 8 แล้ว q จะมีค่า $\frac{2}{d/s}$ และ p จะมีค่า $\frac{2}{(1.23d/s)}$ และจากค่าความหนาแน่นกระแสสามารถหาค่ากำลังสูญเสียต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ดังนี้

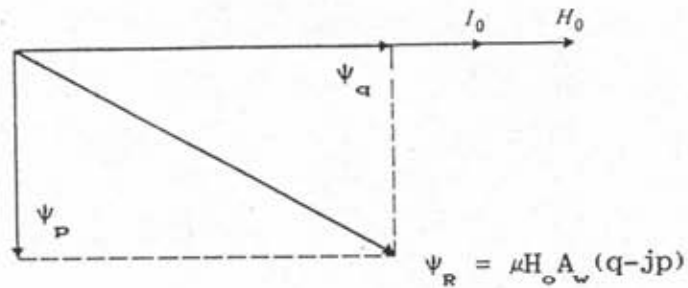
$$P_w/l_w = \frac{1}{2} \int_0^R \rho |J_{rm}|^2 2\pi r dr (x1) \quad (2.54)$$

$$P_w/l_w = 2\pi \rho \alpha^2 H_{Rm}^2 \int_0^R \frac{(\text{ber}'^2\sqrt{2\alpha r} + \text{bei}'^2\sqrt{2\alpha r}) r dr}{\text{ber}^2\sqrt{2\alpha R} + \text{bei}^2\sqrt{2\alpha R}} \quad (2.55)$$

$$P_w/l_w = \sqrt{2\pi} \rho \alpha^2 H_{Rm}^2 R \left[\frac{\text{ber}\sqrt{2\alpha R} \text{ber}'\sqrt{2\alpha R} + \text{bei}\sqrt{2\alpha R} \text{bei}'\sqrt{2\alpha R}}{\text{ber}^2\sqrt{2\alpha R} + \text{bei}^2\sqrt{2\alpha R}} \right] \quad (2.56)$$



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง p และ q กับ d/s



รูปที่ 2.16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของปริมาณต่างๆ

หรือสามารถเขียนสมการ (2.56) ใหม่ได้ว่ากำลังสูญเสียของชิ้นงานเท่ากับ

$$P_w = \mu \pi f H_{Rm}^2 l_w A_w p \tag{2.57}$$

หรือกำลังสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผิวของชิ้นงาน

$$P_m = \mu \pi f H_{Rm}^2 \frac{R}{2} p \tag{2.58}$$

จากสมการพลักซ์ผลรวมของสนามแม่เหล็กในชิ้นงานจะล้าหลัง กระแสผลรวมในชิ้นงานด้วยมุมเฟสค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของเฟสเซอร์ไดอะแกรมของปริมาณต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2.16



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ระยะใดๆกับระยะจากผิว

2.2.3 การประมาณการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

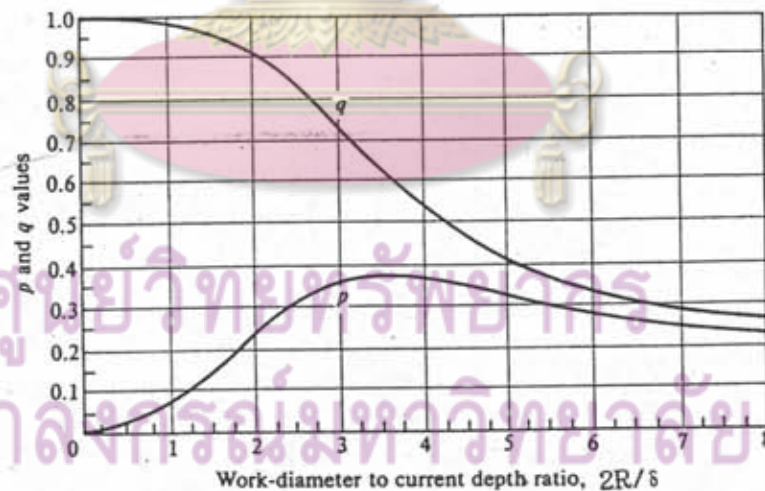
$$\text{จาก } \delta = \sqrt{\left[\frac{\rho}{\mu \pi f} \right]} \quad (2.59)$$

- โดยที่
- δ คือความลึกผิว
 - ρ คือสภาพความต้านทานจำเพาะ
 - μ คือความซึมได้ของชิ้นงาน
 - f คือความถี่ที่ใช้งาน
- สำหรับชิ้นงานที่เป็นแท่งโลหะทรงกระบอกรัศมี R ให้
- I_R คือกระแสที่ผิวของชิ้นงาน
 - I_r คือกระแสที่ระยะรัศมีใดๆจากศูนย์กลาง

ในกรณีที่สมมติว่า R ใหญ่กว่า δ มากๆแล้วความสัมพันธ์ระหว่าง I_R กับ I_r จะเป็นดังนี้

$$I_r = I_R \exp\left[-\frac{(R-r)}{\delta}\right] \quad (2.60)$$

ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง p และ $2R/\delta$

กระแสที่ไหลในชิ้นงานได้จากการ อินทิเกรต กระแสที่รัศมีใดๆกับความลึก กระแสที่ได้จะมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.17 แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ใต้กราฟ

ดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับพื้นที่ที่แรงจล กล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าถึงแม้ว่ากระแสไหลในชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับระยะทางเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลแต่เหมือนกับว่ามีกระแสคงที่ขนาด I_R ไหลอยู่ที่ผิวชิ้นงานในระดับความลึก δ ถ้าชิ้นงานมีความยาว l_w แล้วความต้านทานสมมูลที่กระแสคงที่ขนาด I_R ไหลผ่านจะมีค่า

$$R_w = \frac{2\pi R \rho}{\delta l_w} \quad (2.61)$$

ถ้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำมีจำนวนรอบเท่ากับ N_c และมีกระแสไหลผ่านขดลวดเป็น I_c แล้วจะมีกระแสไหลผ่านชิ้นงาน $N_c I_c$ กำลังปรากฏที่ชิ้นงานจะมีค่า

$$P_w = \frac{2\pi R \rho}{\delta l_w} N_c^2 I_c^2 \quad (2.62)$$

ในกรณีที่ R ไม่ได้มากกว่า δ มากๆ แล้ว จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสรุปได้ว่า

$$P_w = \mu \pi f H_{Rm}^2 l A_w p \quad (2.63)$$

ซึ่ง p เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับ $\frac{2R}{\delta}$ โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.18 ในภาพคำนวณกำลังความร้อนที่เกิดขึ้นที่ชิ้นงานกำลังที่ได้จะขึ้นกับ ความถี่ที่ใช้ งาน ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก และคุณสมบัติของชิ้นงานซึ่งหมายถึงขนาด และรูปร่าง รวมทั้งค่าสภาพความต้านทาน และค่าความซาบซึมของชิ้นงาน เนื่องจากค่าสภาพความต้านทานและค่าความซาบซึม มีผลต่อกำลังที่ชิ้นงานจึงควรศึกษาว่าค่าเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือเมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก แต่โดยทั่วไปความถี่จะไม่มีผลต่อค่าทั้งสองเท่าใดนัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร

2.2.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าสภาพความต้านทานโดยทั่วไปจะขึ้นกับสารที่เป็นชิ้นงานโดยปกติสารที่เป็นพวกโลหะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าสภาพความต้านทานจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ความสัมพันธ์ในลักษณะทั่วไปจะเป็นดังสมการที่ (2.64) โดย ρ_θ คือค่าสภาพความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆ และ ρ_1 คือค่าสภาพความต้านทานที่อุณหภูมิ θ_1 ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ α ของสารชนิดต่างๆ ในทางปฏิบัติจะพบว่าค่าสภาพความต้านทานของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไป

$$\rho_\theta = \rho_1 [1 + \alpha(\theta - \theta_1)] \quad (2.64)$$

จะพบว่าค่าสภาพความต้านทานของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิ ในการคำนวณจึงอาจต้องหาค่าสภาพความต้านทานที่เป็นค่าสมมูลที่สามารถใช้แทนตลอดช่วงอุณหภูมิ โดยในการคำนวณค่าสภาพความต้านทานสมมูล จะพิจารณาจากกำลังที่ชิ้นงานเนื่องจากกำลังที่ชิ้นงานจะแปรตาม $\sqrt{\rho}$ ถ้าให้ตัวแปรอื่นคงที่ และพิจารณาว่าค่าสภาพความต้านทานของชิ้นงานจะแปรกับอุณหภูมิอย่างเชิงเส้น จะได้ว่า

Material	a	$\rho_{20^\circ\text{C}} (\Omega\text{m})$
Aluminium	4.29×10^{-3}	2.65×10^{-8}
Brass (65%Cu, 35%Zn)	1.6×10^{-3}	6.4×10^{-8}
Bronze (90%Cu, 11%Zn)	1.86×10^{-3}	3.9×10^{-8}
Copper	3.93×10^{-3}	1.72×10^{-8}
Pure Iron	6.5×10^{-3}	9.71×10^{-8}
Lead	3.36×10^{-3}	20.65×10^{-8}
Silver	4.1×10^{-3}	1.59×10^{-8}

ตารางที่ 2.1 ค่า a และค่าสภาพความต้านทานของสารที่ 20°C

$$\rho_\theta = \rho_1 + \left[\frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1} \right] (\rho_2 - \rho_1) \quad (2.65)$$

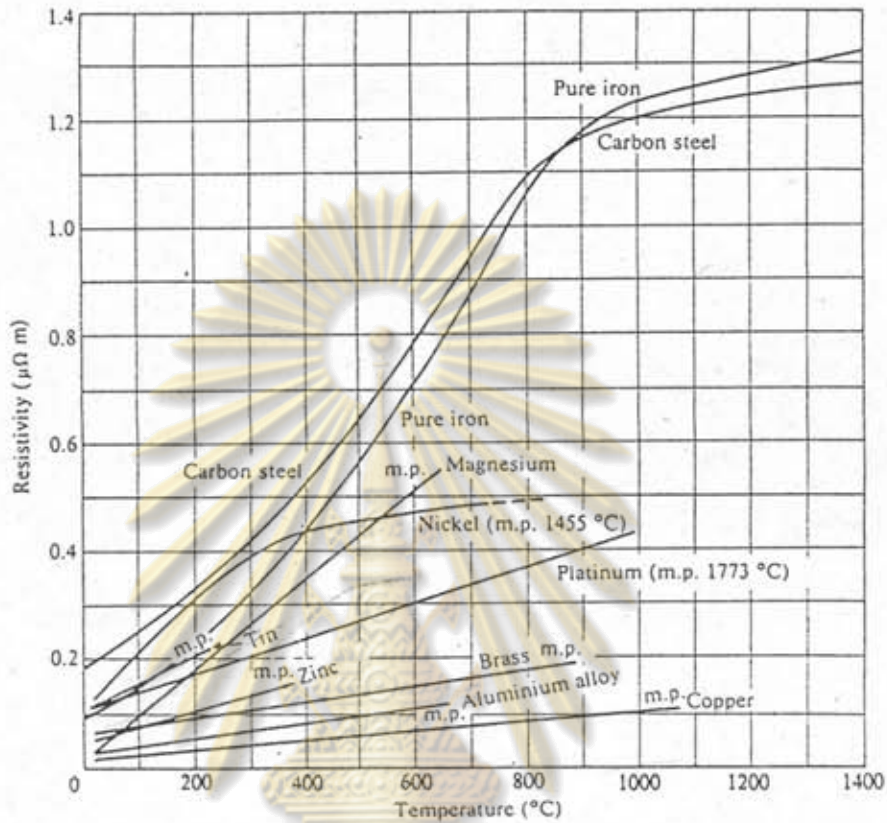
และ
$$\frac{d\theta}{dt} = C\sqrt{\rho} \quad (2.66)$$

แทนสมการที่ (2.65) ลงในสมการที่ (2.66) ได้ดังนี้

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{\sqrt{[\rho + (\theta - \theta_1)(\rho_2 - \rho_1) / (\theta_2 - \theta_1)]}} = \int_0^t C dt \quad (2.67)$$

ได้

$$t = \frac{2(\theta_2 - \theta_1)(\sqrt{\rho_2} + \sqrt{\rho_1})}{C(\rho_2 - \rho_1)} \tag{2.68}$$



รูปที่ 2.19 ค่าสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิ

ถ้าสมมติให้ค่าสภาพความต้านทานมีค่าคงที่และ มีค่าเป็น ρ_m

ตลอดช่วงอุณหภูมิการใช้งาน เมื่อแทนในสมการที่ (2.66) จะได้

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = \int_0^t C\sqrt{\rho_m} dt \tag{2.69}$$

$$t = \frac{\theta_2 - \theta_1}{C\sqrt{\rho_m}} \tag{2.70}$$

จากสมการที่ (2.68) และสมการที่ (2.70) ได้ว่า

$$\rho_m = \frac{(\sqrt{\rho_2} + \sqrt{\rho_1})^2}{4} \tag{2.71}$$

จากสมการ (2.71) ค่าสภาพความต้านทานสมมูลที่ได้อาจจะใช้ได้กับโลหะบางประเภทที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิเป็นเชิงเส้น แต่กับเหล็กและสารเฟอร์โรแมกเนติกอาจจะไม่สามารถใช้ค่าความต้านทานสมมูลดังกล่าวได้ เพราะค่าสภาพความต้านทานค่อนข้างจะมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิ รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสภาพความต้านทานของสารต่างๆกับอุณหภูมิ

2.2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความซาบซึมกับอุณหภูมิ และความเข้มสนามแม่เหล็ก

ความซาบซึมของโลหะนี้ปกติจะมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่สำหรับสารที่เป็นประเภท เฟอร์โรแมกเนติกแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับ ความเข้มสนามแม่เหล็กจะไม่เป็นเชิงเส้น แต่จะเป็นไปตามกราฟกระแสทำแม่เหล็ก จาก (John Davies and Peter Simpson, 1979) จะพบว่าความซาบซึมของสารเฟอร์โรแมกเนติก จะขึ้นกับความเข้มสนามแม่เหล็ก และระดับความอิ่มตัวของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กด้วย ได้มีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ ระหว่างความซาบซึมของสารกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ได้ผลเป็นที่ยอมรับตามสมการที่ (2.72) นอกจากนี้ค่าความซาบซึมของสารเฟอร์โรแมกเนติก ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วยกล่าวคือ ปกติค่าความซาบซึมของสารประเภทนี้จะค่อนข้างมีค่าคงที่กับอุณหภูมิ แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุดคูรีแล้ว ค่าความซาบซึมของสารนั้นจะลดลงเป็นค่าความซาบซึมของสภาวะอากาศทันที มีผลให้สารนี้หมดสภาพความเป็นสารแม่เหล็กสำหรับเหล็กผสมคาร์บอน 0.50% จะมีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ประมาณ 760°C

$$\mu = (1.43 \times 10^6 \frac{B_m}{H_{om}} + 1) \mu_0 \quad (2.72)$$

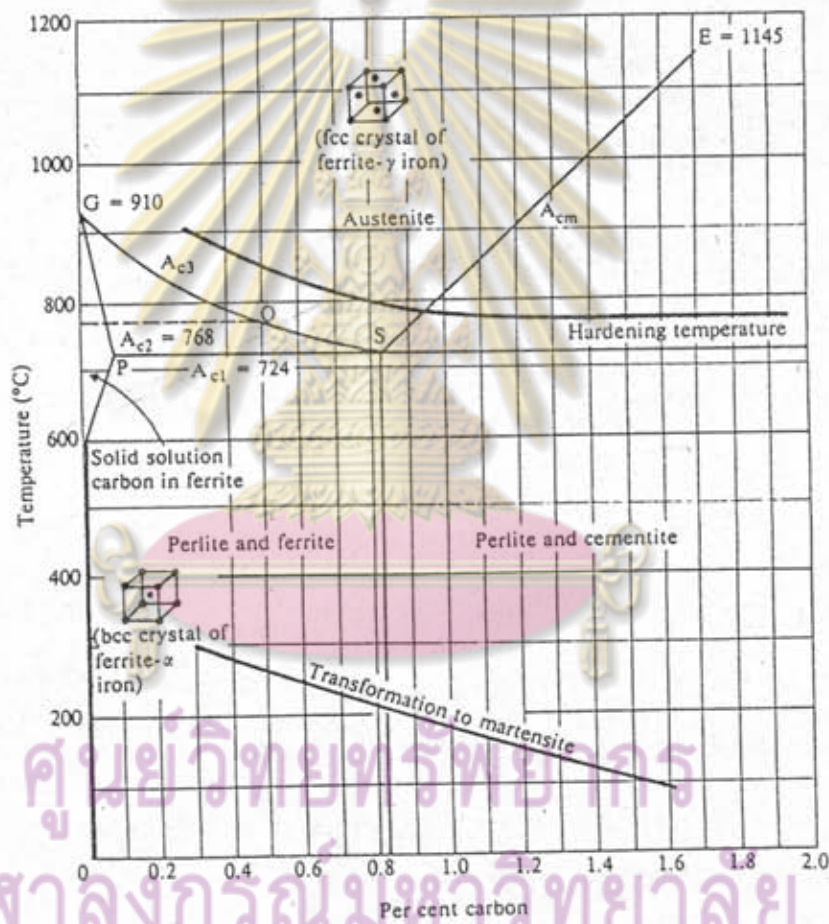
B_m ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัว

H_{om} ค่ายอดความเข้มสนามแม่เหล็ก

μ_0 คือค่าความซาบซึมได้ของสภาวะอากาศ

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับโครงสร้างทางโลหะของเหล็กผสมคาร์บอน

อุณหภูมิมีผลต่อคุณสมบัติทั้งทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็ก คือสภาพความต้านทานและความซึมของสาร เมื่ออุณหภูมิของสารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกสูงถึงจุดคูรี คุณสมบัติของสารเฟอร์โรแมกเนติกจะกลายเป็นสารที่ไม่เป็นแม่เหล็ก ความซึมของสารประเภทนี้จะมีค่าเท่ากับค่าความซึมของสุญญากาศ ในขบวนการชุบแข็งจะพบว่าทั้งสภาพความต้านทานและความซึมจะมีผลต่อทั้งความลึกลับ และกำลังที่ขึ้นงานได้รับ นอกจากนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิยังมีผลต่อกลไกในการชุบแข็ง และโครงสร้างทางโลหวิทยา



รูปที่ 2.20 แผนภาพสมดุลเหล็กผสมคาร์บอน

รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพสมดุลเหล็กคาร์บอน กับอุณหภูมิในสภาวะต่างๆ จากรูปจะพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 721 องศาเซลเซียส เหล็กที่มีส่วนผสมคาร์บอนต่ำจาก 0.3 ถึง 0.83 เปอร์เซ็นต์ ในสภาวะปกติประกอบด้วย Pure Iron และ Perlite โดยที่ Perlite คือ

สารผสมระหว่าง Pure Iron[Ferrite] กับ Cementite และ Cementite คือ Ferrite และชั้นของคาร์บอนที่เรียงตัวกัน จากแผนภาพถ้าเพิ่มอุณหภูมิจนสูงกว่า 724 องศาเซลเซียส คือเส้น AC_1 ในแผนภาพ ส่วนที่เป็น Cementite จะเริ่มเปลี่ยนเป็นสารละลายจนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงเส้น AC_3 สารทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็น Austenite โดยสมบูรณ์ ซึ่ง Austenite คือ Ferrite ที่มีการเปลี่ยนโครงสร้างจากเดิม ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ Body Center Cubic[BCC] ที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กกลายเป็นโครงสร้างใหม่ที่มีคุณสมบัติไม่เป็นแม่เหล็กที่เรียกว่า Face Center Cubic [FCC]

จากแผนภาพใต้เส้น PS หรือเส้น AC_1 เหล็กผสมคาร์บอนจะมีสององค์ประกอบคือ Ferrite กับ Pearlite และมีโครงสร้างทางโลหะเป็นแบบ BCC ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก ในสภาวะนี้ถ้าส่วนผสมของคาร์บอนน้อยกว่า 0.008 เปอร์เซ็นต์แล้วคาร์บอนจะเป็นสารละลายอยู่ใน Ferrite ถ้าส่วนผสมคาร์บอนมากกว่า 0.008 เปอร์เซ็นต์แล้ว คาร์บอนจะไม่สามารถผสมกลมกลืนเข้ากับเหล็กได้หมดจึงเกิดเป็นสาร Cementite

ระหว่างเส้น AC_1 กับเส้น AC_3 เช่นที่เส้น AC_2 Ferrite และ Pearlite จะเริ่มเปลี่ยนเป็น Austenite เหนือเส้น AC_3 การเปลี่ยนแปลงจะสมบูรณ์เหล็กที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ไม่เป็นแม่เหล็ก และจากแผนภาพจะพบว่าอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสาร Austenite จะขึ้นกับเปอร์เซ็นต์ของสารคาร์บอนที่มีอยู่ ถ้าเปอร์เซ็นต์ของสารคาร์บอนมีค่า 0.83 แล้วการเปลี่ยนแปลงจาก Pearlite เป็น Austenite จะเกิดขึ้นทันทีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุด S จะไม่มีสถานะระหว่างกลางเช่นกรณีที่เกิดแบบเส้น AC_2 จากแผนภาพถ้าเหล็กมีส่วนผสมของสารคาร์บอนมากกว่า 0.83 เปอร์เซ็นต์แล้ว เหล็กจะประกอบด้วย Pearlite และ Cementite โดยจะไม่มี Ferrite เป็นส่วนประกอบเพราะว่าสารคาร์บอนที่มีอยู่มากพอจะรวมกับ Ferrite กลายเป็น Cementite หมด

ในกรณีที่เหล็กมีส่วนผสมคาร์บอนมากกว่า 0.83 เปอร์เซ็นต์แล้ว เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปถึงเส้นที่ระดับ S และถ้าเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีกเล็กน้อย สาร Pearlite กับ Cementite จะกลายเป็นสารผสมระหว่าง Austenite กับ Cementite แทนและถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจนกระทั่งถึงเส้น AC_m โครงสร้างของเหล็กจะกลายเป็น Austenite หมด และอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับเปอร์เซ็นต์ของสารคาร์บอนที่เป็นส่วนผสม

2.3.1 กลไกการชุบแข็ง

จากรูปที่ 2.20 ถ้าทำให้เหล็กผสมคาร์บอนมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงเส้น AC_3 เหล็กที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นสารที่เรียกว่า Austenite มีคุณสมบัติไม่เป็นแม่เหล็กถ้าทำให้เหล็กนี้ค่อยๆ เย็นลง โครงสร้างเหล็กจะกลับคืนสู่สภาวะเดิมเหมือนกับช่วงก่อนที่จะถูกทำให้ร้อน แต่ถ้าทำให้เหล็กมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงเส้น AC_3 แล้วทำให้เย็นลงโดยฉับพลัน โดยทำให้อุณหภูมิลดลงของเหล็กเหลือประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส เหล็กที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใหม่ที่เรียกว่า Martensite โดยจะไม่มี Ferrite กับ Pearlite ในขณะที่เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว คาร์บอนที่เป็นส่วนผสมจะแยกตัวออกมาอย่างรวดเร็วและเกิดเป็นโครงสร้างใหม่ที่เรียกว่า Martensite โครงสร้างดังกล่าวจะมีความแข็งเป็นพิเศษ ทำให้เหล็กที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้น ถ้าส่วนผสมของคาร์บอนมีมากขึ้น 0.8 ถึง 1.7 เปอร์เซ็นต์ แล้วเหล็กที่ได้จะมีความแข็งเพิ่มขึ้น จากที่กล่าวมาการทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงถึงเส้น AC_3 หรือ จุดคูรี แล้วทำให้เหล็กเย็นตัวอย่างรวดเร็วก็คือกลไกการชุบแข็งอย่างง่าย

ในทางปฏิบัติในการชุบแข็งเหล็ก จะทำให้อุณหภูมิของเหล็กผสมคาร์บอนสูงขึ้นไปถึง Hardening Temperature ถ้าเหล็กที่ใช้มีส่วนผสมคาร์บอนที่น้อยกว่า 0.83 % อุณหภูมิที่ใช้จะสูงกว่าอุณหภูมิคูรีประมาณ 10 - 60 องศา แต่ถ้าเหล็กที่ใช้มีส่วนผสมของคาร์บอนมากกว่า 0.83 เปอร์เซ็นต์แล้วอุณหภูมิจะต่ำกว่าจุดคูรี ดังแสดงในรูปที่ 2.20

ในการชุบแข็ง ถ้าเราไม่สามารถทำให้ชิ้นงานเย็นลงได้อย่างฉับพลัน ชิ้นงานที่ได้จะเหมือนกับไม่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง โดยทั่วไปอัตราในการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงจะค่อนข้างสำคัญ ถ้าส่วนผสมที่เป็นคาร์บอนมีปริมาณมากขึ้นอัตราเร็วในการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ถ้าสารมีส่วนประกอบเป็นโลหะอื่นเช่น โมลิบดีนัม โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล อัตราในการทำให้สารนั้นเย็นตัวลงจะมีค่าลดลง จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า

อัตราการให้ความร้อนควรจะรวดเร็ว เพื่อที่จะสามารถทำให้ชิ้นงานถึงอุณหภูมิในการชุบแข็งอย่างรวดเร็ว ผิวของชิ้นงานจึงจะได้รับความร้อนเกินขนาด นอกจากนี้การทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงควรจะรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

2.3.2 สารที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงและกระบวนการที่ชิ้นงานเย็นตัวลง

ในการทำให้เหล็กที่ร้อนแดงเย็นลงอย่างรวดเร็ว หรือการชุบ (Quench) ถือว่าเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการการชุบแข็ง การปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงตามธรรมชาติจะ

เข้าไปโดยปกติจะใช้วิธีการทำให้เย็นตัวลงโดยใช้ น้ำ น้ำมัน น้ำเกลือ หรือใช้ลม แต่จะนิยมใช้น้ำเป็นส่วนมากเพราะหาง่าย ราคาถูก และมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี

การทำให้ชิ้นงานที่ร้อนเย็นลงอย่างรวดเร็ว ขบวนการที่พบมักจะเป็นแบบ Single Shot Hardening คือจะให้ชิ้นงานได้รับความร้อนทั้งชิ้นงานในเวลาเดียวกันแล้วทำให้ชิ้นงานเย็นลงพร้อมกัน โดยอาจใช้วิธีจุ่มชิ้นงานลงในสารระบายความร้อน หรือใช้วิธีผ่านสารระบายความร้อนไปที่ชิ้นงานทั้งชิ้นในเวลาเดียวกัน ชิ้นงานที่ใช้วิธีนี้จะค่อนข้างเล็ก

อีกวิธีที่มักพบเห็นในขบวนการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงคือแบบ Scanning วิธีนี้ขดลวดให้ความร้อนจะมีขนาดค่อนข้างเล็ก มักจะเป็นการให้ความร้อนเฉพาะบริเวณ โดยตัวขดลวดให้ความร้อนจะมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับบริเวณที่ต้องการให้ความร้อน และชิ้นงานจะถูกทำให้เย็นตัวลงโดยทันทีโดยสารที่เป็นตัวระบายความร้อน การให้ความร้อนลักษณะนี้ตัวขดลวดให้ความร้อนจะมีกำลังไม่สูงมากนัก แต่จะสามารถใช้ชุบแข็งชิ้นงานที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ได้โดยจะใช้วิธีเลื่อนบริเวณที่ต้องการให้ความร้อนเข้าสู่ขดลวดให้ความร้อน ซึ่งทำให้เวลาที่ใช้ชุบแข็งชิ้นงานทั้งชิ้นมากขึ้น

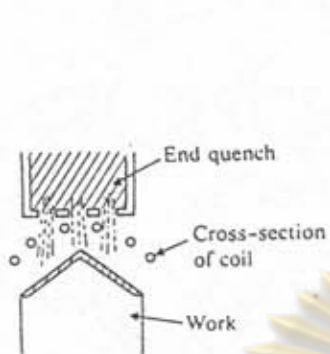
รูปที่ 2.21 ถึงรูปที่ 2.26 แสดงการให้ความร้อนและวิธีในการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงลักษณะต่าง ๆ กัน



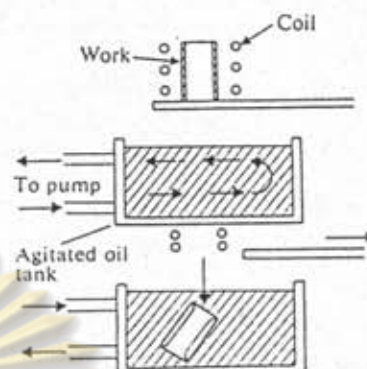
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.21 และ รูปที่ 2.22 แสดงวิธีการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงแบบ Scanning โดยรูปที่ 2.21 ชิ้นงานเป็นลักษณะแผ่นเรียบ รูปที่ 2.22 ชิ้นงานเป็นทรงกระบอก ในทั้งสองวิธีชิ้นงานจะมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับขดลวดให้ความร้อน และถูกทำให้เย็นตัวลงโดยฉับพลันโดยการฉีดสารระบายความร้อนหลังจากที่ชิ้นงานได้รับความร้อน การให้ความร้อนลักษณะนี้ชิ้นงานจะมีความแข็งค่อนข้างสม่ำเสมอ เพราะชิ้นงานจะมีอัตราการเคลื่อนที่คงที่เมื่อเทียบกับขดลวดให้ความร้อน นอกจากนี้ในรูปที่ 2.22 ชิ้นงานจะมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเพื่อ

เลือกบริเวณที่ต้องการชุบแข็ง เข้าสู่คลวดให้ความร้อนด้วย



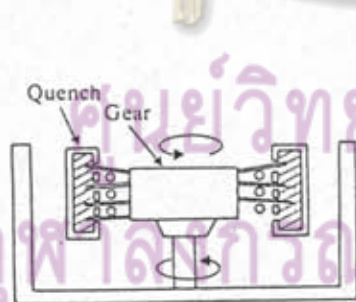
รูปที่ 2.23



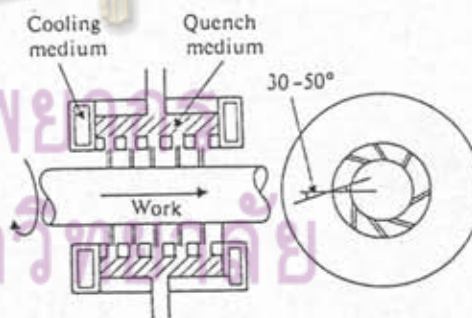
รูปที่ 2.24

รูปที่ 2.23 แสดงการให้ความร้อนที่บริเวณชิ้นงาน โดยจะทำคลวดให้ความร้อนมีลักษณะที่เหมาะสมกับบริเวณที่ต้องการชุบแข็ง และในรูปจะทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลง โดยการฉีดสารระบายความร้อนจากด้านบนผ่านคลวดให้ความร้อนสู่บริเวณผิวของชิ้นงาน วิธีนี้จะเป็นแบบ Single Shot

รูปที่ 2.24 แสดงการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานลักษณะทรงกระบอก เมื่อชิ้นงานร้อนทั้งชิ้นแล้วจะปล่อยให้ตกลงในถังใส่สารระบายความร้อน วิธีการนี้เป็นแบบ Single Shot



รูปที่ 2.25



รูปที่ 2.26

รูปที่ 2.25 และรูปที่ 2.26 การทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงจะค่อนข้างซับซ้อน

รูปที่ 2.25 หลังจากที่ยังงานได้รับความร้อนแล้วจะยังคงอยู่ในเขตลวดให้ความร้อน และจะเป็นตัวลงโดยหัวฉีดที่อยู่ด้านข้างของเขตลวดให้ความร้อนจะฉีดสารระบายความร้อนสู่ผิวชิ้นงาน วิธีนี้จะใช้กับชิ้นงานประเภทเกียร์ ส่วนรูปที่ 2.26 ชิ้นงานจะถูกทำให้เย็นตัวลงโดยจับปล้นหลังจากที่เขตลวดให้ความร้อนหยุดให้พลังงานแล้ว

สารที่ใช้ระบายความร้อนโดยทั่วไป จะใช้น้ำกับโลหะที่มีส่วนผสมต่ำ เช่น เหล็กที่มีส่วนผสมคาร์บอนต่ำ และเหล็กหล่อที่มีรูปทรงอย่างง่าย โดยจะใช้น้ำแทนน้ำเมื่อชิ้นงานเป็นเหล็กที่มีส่วนผสมคาร์บอนสูง และ กับชิ้นงานที่มีบริเวณที่ได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอ ส่วนน้ำเกลือจะใช้กับเหล็กที่มีความแข็งค่อนข้างต่ำ และอากาศใช้กับการชุบแข็งโลหะประเภท สแตนเลส

การใช้น้ำมันชุบแข็งชิ้นงานจะมีปัญหาเรื่องกลิ่นและควันของน้ำมัน ในกรณีที่ชิ้นงานที่ไม่สามารถใช้น้ำแทนได้เพราะอาจทำให้ผิวชิ้นงานแตกร้าว ก็อาจใช้สารประเภท โพลีเมอร์แทนได้สารประเภทนี้จะเป็นสารอินทรีย์ทางเคมี ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก สามารถละลายได้ดีในน้ำที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่เช่นน้ำ นอกจากนี้ยังไม่มีการปนเปื้อน ไม่ติดไฟและไม่ทำอันตรายต่อผิวหนัง ปัจจุบันนี้มักจะไม่ใช้น้ำมันเพราะมีราคาแพง ทั้งยังมีคุณสมบัติที่ไม่ดีดังที่กล่าว จึงมักใช้สารประเภทโพลีเมอร์แทน

Aquaquench 251 Concentration (%)	Time (s)	Quench	Time (s)
2	11.5	Water	12.0
5	12.5	10 % Soluble Oil	13.0
10	14.0	An Additive-Treated Fast quenching Oil	20.5
20	24.5	A High-Grade Mineral Quenching Oil	26.0

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสารที่ใช้ในการ Quenching และเวลาที่ใช้

อัตราในการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลง สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยขึ้นกับ

ความเข้มข้นของสารโพลีเมอร์ที่ใช้ ปัจจุบันมีสารที่มีชื่อทางการค้าว่า Aquaquench 251 ซึ่งสามารถทำให้ชิ้นงานเปียกได้มากกว่าน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ได้กับชิ้นงานที่ต้องการความแข็งไม่มากนัก ซึ่งน้ำไม่สามารถใช้ได้

ในการชุบแข็งชิ้นงานอาจเกิดรอยร้าวได้ โดยส่วนมากมักมาจากการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงไม่เหมาะสม หรือใช้สารที่เป็นตัวระบายความร้อนไม่ถูกต้อง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว ในขบวนการระบายความร้อนจากชิ้นงานควรที่จะ

- 2.3.2.1 การให้ความร้อนในการชุบแข็งควรทำด้วยความสม่ำเสมอ
- 2.3.2.2 ควรเลือกใช้สารในการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลง ให้เหมาะสมและเลือกระยะเวลาที่ระดับความแข็งที่ต้องการให้สัมพันธ์กัน
- 2.3.2.3 ขณะทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงควรทำด้วยความสม่ำเสมอ
- 2.3.2.4 ควรหลีกเลี่ยง ที่จะชุบแข็งชิ้นงานในบริเวณที่มีความแตกต่างของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานมากๆ

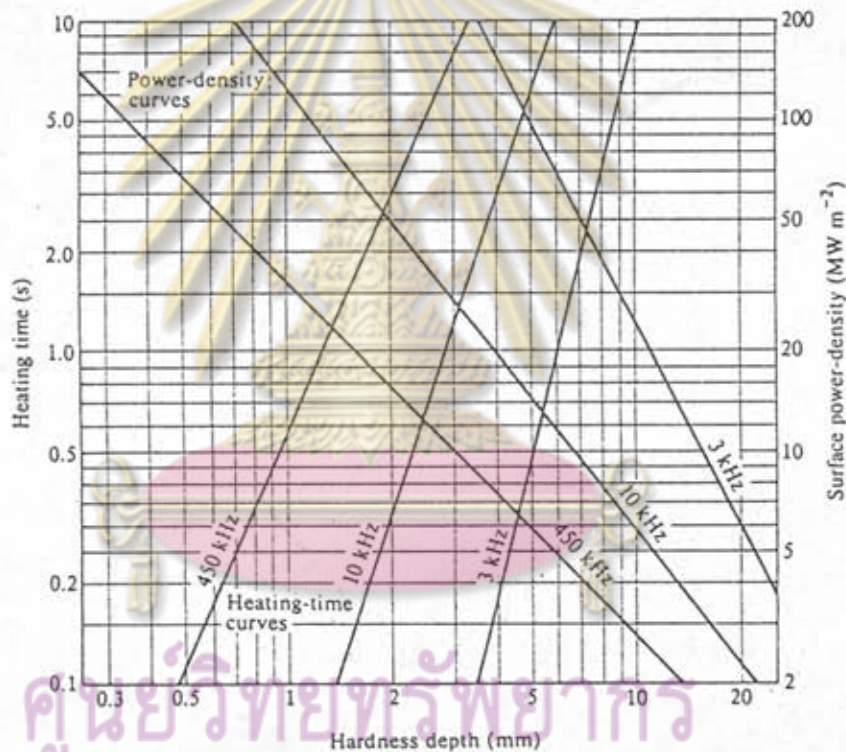


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 การเลือกความถี่ในการชุบแข็ง

จาก $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}}$
 และ $P = \mu\pi f H_{Rm}^2 (1 - A_w) p$

จากสมการข้างต้นทั้งสองจะพบว่า ความถี่มีผลต่อความลึกผิวในการชุบแข็งและกำลังที่ปรากฏต่อชิ้นงาน ในงานชุบแข็งโดยปกติจะต้องการความถี่เพียงที่ผิวเท่านั้นถ้าเป็นไปได้ควรจะเลือกความถี่ที่ใช้ให้ค่อนข้างสูงเพื่อจะได้เป็นไปตามจุดประสงค์ที่ต้องการ ถ้าความถี่ที่ใช้มีค่าสูงแล้ว กำลังของชิ้นงานจะมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งจะเป็นการประหยัดกำลังงานกว่าถ้าเลือกใช้งานที่ความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความลึกผิว ความหนาแน่นกำลังต่อพื้นผิวและระยะเวลาในการให้ความร้อน โดยมีค่าเป็นตัวพารามิเตอร์

จากรูปที่ 2.27 สามารถสรุปได้ว่า

2.4.1 สำหรับความถี่ใดๆแล้ว ถ้าเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อน ความลึกผิวที่แข็งจะสูงขึ้น

2.4.2 สำหรับความถี่ใดๆแล้ว ถ้าเพิ่มความหนาแน่นกำลังต่อพื้นที่ผิวที่ชิ้นงานแล้ว ความลึกผิวจะมีค่าลดลง

2.4.3 สำหรับระยะเวลาการให้ความร้อน และความหนาแน่นกำลังต่อพื้นที่ผิวคงที่แล้ว การเพิ่มความถี่จะทำให้ความลึกผิวที่แข็งลดลง

จากกราฟในรูปที่ 2.27 (John Davies and Peter Simpson, 1979) สามารถแสดงความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ และความหนาแน่นกำลังต่อพื้นที่ผิว กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน [d] โดยมีความถี่เป็นตัวพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$\text{time} = 0.56d^{2.34} \quad \text{ที่ความถี่ 450 กิโลเฮิร์ตซ์} \quad (2.73a)$$

$$= \frac{4.25}{10^4} d^{4.36} \quad \text{ที่ความถี่ 3 กิโลเฮิร์ตซ์} \quad (2.73b)$$

$$\text{Power Density} = 31.3d^{-1.06} \quad \text{ที่ความถี่ 450 กิโลเฮิร์ตซ์} \quad (2.74a)$$

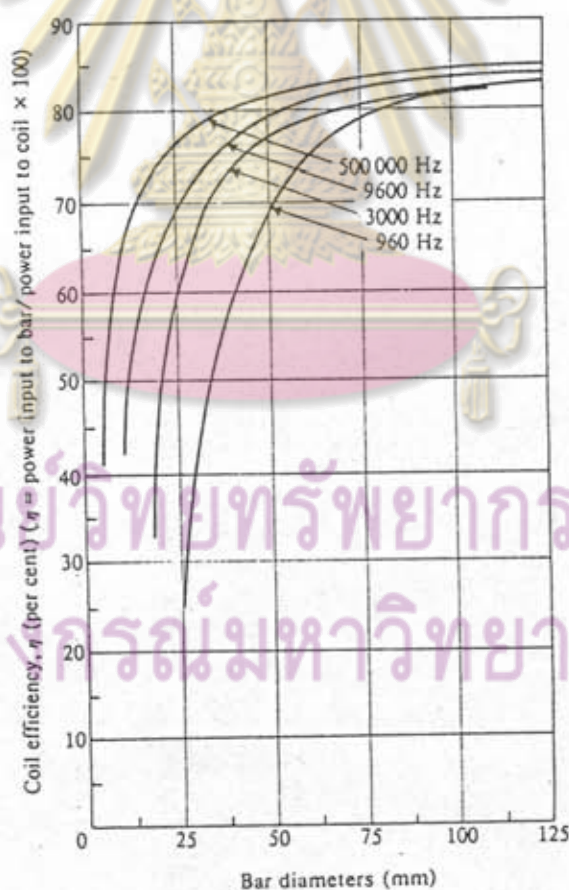
$$= 2604d^{-2.06} \quad \text{ที่ความถี่ 3 กิโลเฮิร์ตซ์} \quad (2.74b)$$

Hardened Depth(mm)	Diameter Of Bar(mm)	Frequency Used In Practice (Hz)
0.4 - 1.25	5 - 25	450000
1.25 - 2.5	10 - 16	450000 (10000)
	16 - 25	10000; 450000
	25 - 50	10000 (3000; 450000)
	Over 50	10000 (3000)
2.5 - 5	20 - 50	10000; 3000
	50 - 100	3000 (1000; 3000)
	Over 100	1000 (3000)

ตารางที่ 2.3 ระดับความลึกผิวและช่วงความถี่ในการชุบแข็งชิ้นงานที่เหมาะสม

จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะเห็นว่าเวลาที่ใช้ และความหนาแน่นกำลังต่อพื้นที่ผิว นอกจากจะขึ้นกับความถี่แล้วยังขึ้นกับปริมาตรของชิ้นงาน ในทางปฏิบัติเวลาที่ใช้จะเป็นตัวกำหนดที่ค่อนข้างสำคัญเพราะเวลาจะเป็นตัวกำหนดอัตราการผลิต

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกผิว เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานและความถี่ที่เหมาะสมในทางปฏิบัติที่เลือกใช้ จะพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางมีผลต่อการเลือกความถี่ในการชุบแข็ง ถ้าชิ้นงานมีขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 มิลลิเมตร ถึง 25 มิลลิเมตร ความลึกผิวในการชุบแข็งที่ต้องการจะค่อนข้างต่ำ แต่ความถี่ที่ใช้จะค่อนข้างสูงอยู่ในย่าน 450 กิโลเฮิรตซ์ และถ้าชิ้นงานต้องการความลึกผิวมากขึ้นจะยังคงสามารถใช้ความถี่เดิมเพียงแต่เพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อน ถ้าชิ้นงานมีขนาดใหญ่มาแล้ว เช่นมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 มิลลิเมตร ความลึกผิวที่ต้องการชุบแข็งจะมีขนาดมากขึ้น ความถี่ที่ใช้จะลดลงอยู่ในย่าน 3 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 10 กิโลเฮิรตซ์ แต่ความหนาแน่นกำลังต่อพื้นที่ผิวจะมากขึ้นเพื่อให้ระยะเวลาในการให้ความร้อนไม่นานเกินไป



รูปที่ 2.28 ประสิทธิภาพขดลวดให้ความร้อนกับขนาดชิ้นงาน

จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพของขดลวดให้ความร้อน กับ เส้นผ่านศูนย์กลาง โดยมีความถี่เป็นตัวพารามิเตอร์ จะพบว่าที่ความถี่ใดๆ ประสิทธิภาพของขดลวดให้ความร้อนซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของกำลังที่ขึ้นงานต่อกำลังที่ขดลวด จะมีค่ามากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดใหญ่ขึ้น โดยเมื่อขดลวดมีขนาดใหญ่กว่าค่าประสิทธิภาพของขดลวดให้ความร้อนจะมีค่าค่อนข้างคงที่

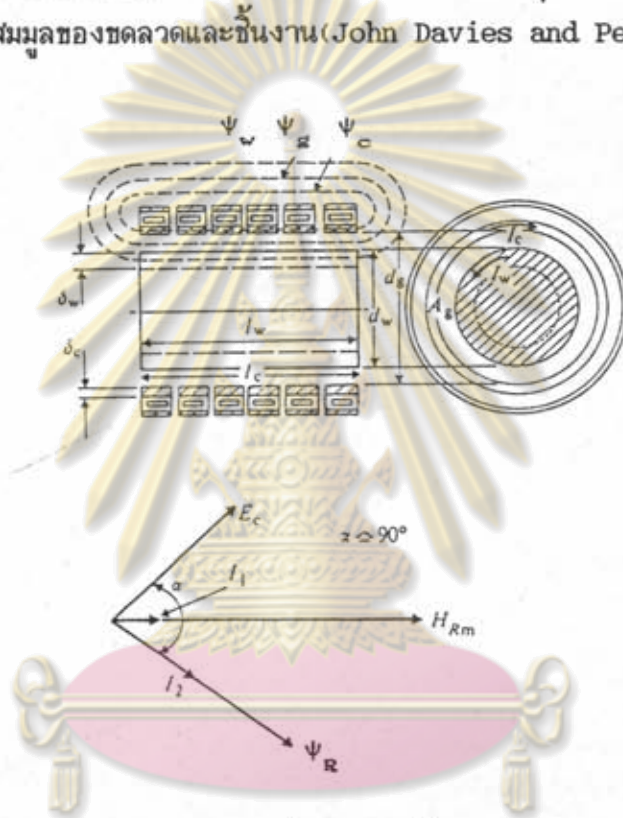
จากรูปที่ 2.28 ถ้าพิจารณาที่เส้นผ่านศูนย์กลางใดๆแล้ว ประสิทธิภาพของขดลวดให้ความร้อนจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความถี่มีค่ามากขึ้นและจะพบว่าประสิทธิภาพของขดลวดให้ความร้อนจะมีความแตกต่างกันอย่างมากในช่วงที่เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดมีขนาดค่อนข้างต่ำ แต่ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดให้ความร้อนมีขนาดเพิ่มขึ้นมากๆ เช่น 100 มิลลิเมตร ถึง 125 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพของขดลวดให้ความร้อนจะแตกต่างกันไม่มากนัก เช่นที่ความถี่ 450 กิโลเฮิรตซ์ ถ้าขดลวดให้ความร้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพของขดลวดให้ความร้อนจะมีค่าสูงถึง 84 เปอร์เซ็นต์ และถ้าขดลวดให้ความร้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพของขดลวดให้ความร้อนจะสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 การคำนวณวงจรสมมูลของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

เนื่องจากขดลวดให้ความร้อนเมื่อความสั่นพ้องที่ใกล้เคียงกับหม้อแปลง โดยมีขดลวดให้ความร้อนเป็นเสมือนขดปฐมภูมิและชิ้นงานเป็นเสมือนขดทุติยภูมิที่มีจำนวนรอบเป็นหนึ่งรอบโดยที่วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อน สามารถที่จะพิจารณาว่ามีความต้านทานต่ออันดับอยู่กับความถี่ยวน่า ในทางปฏิบัติสามารถที่จะวัดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์วัด เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์จะสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ได้ที่แตกต่างกันในที่นี้จะกล่าวถึงวงจรสมมูลของขดลวดและชิ้นงาน (John Davies and Peter Simpson, 1979)



รูปที่ 2.29 ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล่องผ่านชิ้นงานและขดลวดให้ความร้อน

จากรูปที่ 2.29 ให้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวของชิ้นงานคือ H_{Rm} และฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่คล่องผ่านระบบประกอบด้วย

- ψ_w คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล่องผ่านชิ้นงาน
- ψ_a คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล่องผ่านอากาศ
- ψ_c คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ผ่านผิวของขดลวดให้ความร้อน

จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กล่าวในหัวข้อ 2.2 สามารถสรุปได้ว่า

$$P_w = \mu \pi f H_{Rm}^2 (l_w A_w) p \quad (2.75)$$

$$\psi_{wm} = \mu H_{Rm} A_w (q - jp) = \mu_o \mu_r H_{Rm} A_w (q - jp) \quad (2.76)$$

ψ_{wm} คือ แอมพลิจูดฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล่องผ่านชิ้นงาน

l_w คือความยาวชิ้นงานที่ถูกเหนี่ยวนำ

A_w คือพื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน

จากหัวข้อ 2.2 ถ้า $\frac{d}{s} > 8$ แล้ว

$$p = \frac{2}{(1.23 + d/s)} \quad (2.77)$$

$$q = \frac{2}{d/s} \quad (2.78)$$

ψ_w คือฟลักซ์สนามแม่เหล็กในช่องอากาศ ซึ่งปกติฟลักซ์สนามแม่เหล็กในช่องอากาศจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ในขณะที่ไม่มีชิ้นงานในขดลวดให้ความร้อน แต่จะมีขนาดเล็กลงเมื่อมีชิ้นงานอยู่ในขดลวดให้ความร้อน เพราะพื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์คล่องผ่านจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ฟลักซ์สนามแม่เหล็กส่วนนี้ยังมีผล ให้อัตราประกอบกำลังของขดลวดให้ความร้อนเลวลง โดยปกติ

$$\psi_{wm} = \mu_o H_{Rm} A_w \quad (2.79)$$

โดยที่ A_w คือพื้นที่ที่ฟลักซ์สนามแม่เหล็กคล่องผ่านอากาศ

ψ_c คือฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล่องขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ตัวขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กก็เกิดปรากฏการณ์ผิว เช่นเดียวกับที่ชิ้นงาน ตามปกติขดลวดให้ความร้อนจะสร้างจากทองแดงที่มีคุณสมบัติไม่เป็นแม่เหล็ก จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถสรุปได้ว่า

$$\psi_{cm} = k_r \mu_o s_c \pi d_c H_{om} \frac{(1-j)}{2} \quad (2.80)$$

ϵ_c คือความลึกผิวที่เกิดในขดลวด และ k_r คือ Correction Factor ปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 และ 1.5 โดยทั่วไปจะใช้ค่า 1.15

จาก
$$\psi_{om} = \psi_{wm} + \psi_{cm} + \psi_{cm} \tag{2.81}$$

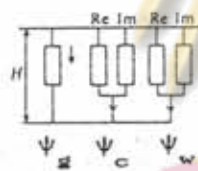
$$\psi_{om} = \mu_o H_{om} \left[(A_w + \mu_r q A_w + k_r d_c \epsilon_c \frac{\pi}{2}) - j(\mu_r p A_w + k_r d_c \epsilon_c \frac{\pi}{2}) \right] \tag{2.82}$$

จาก
$$H_{om} = \frac{\sqrt{2} I_c N_c}{l_c} \tag{2.83}$$

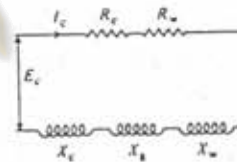
ให้ E_c เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันคร่อมขดลวด

$$E_c = \frac{j 2\pi f N_c}{\sqrt{2}} \psi_{om} \tag{2.84}$$

ได้ว่า
$$E_c = \frac{2\pi f \mu_o}{l_c} N_c^2 I_c \left[(\mu_r p A_w + k_r d_c \epsilon_c \frac{\pi}{2}) + j(A_w + \mu_r q A_w + k_r d_c \epsilon_c \frac{\pi}{2}) \right] \tag{2.85}$$



รูปที่ 2.30



รูปที่ 2.31

จากสมการฟลักซ์สนามแม่เหล็กสามารถที่จะเขียนเป็นเส้นทางเดินของสนามแม่เหล็ก ได้ดังรูปที่ 2.30 ส่วนรูปที่ 2.31 เป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า ส่วนที่เป็นความต้านทานมาจากชิ้นงานและตัวขดลวดให้ความร้อน ส่วนที่เป็นความเหนี่ยวนำมาจากทั้งชิ้นงาน ขดลวดให้ความร้อน และส่วนที่เป็นอากาศ ซึ่งเขียนในรูปของอินพีแดนซ์ได้

$$Z = (R_w + R_c) + j(X_s + X_w + X_c) \tag{2.86}$$

ความต้านทานจากชิ้นงาน
$$R_w = K(\mu_r p A_w) \tag{2.87}$$

ความต้านทานจากขดลวด
$$R_c = \frac{K}{2}(k_r \pi d_c \epsilon_c) \tag{2.88}$$

รีแอกแตนซ์จากช่องอากาศ $X_g = K A_g$ (2.89)

รีแอกแตนซ์จากชั้นงาน $X_w = K(\mu_r q A_w)$ (2.90)

รีแอกแตนซ์จากขดลวด $X_c = \frac{K}{2}(k_r \pi d_c \delta_c)$ (2.91)

โดยที่ $K = 2\pi f \mu_o [N_c^2 / l_c]$ (2.92)

ค่าเหล่านี้สามารถที่จะนำมาคำนวณเป็นคุณสมบัติของขดลวดเหนี่ยวนำที่สำคัญได้ดังนี้

ประสิทธิภาพขดลวดให้ความร้อน $\eta = [R_w / (R_c + R_w)]$ (2.93)

ตัวประกอบกำลังของขดลวดให้ความร้อน $\cos \theta = \frac{R_c + R_w}{|Z|}$ (2.94)

โดยที่ $Z^2 = (R_c + R_w)^2 + (X_g + X_w + X_c)^2$ (2.95)

กำลังงานที่ขดลวดให้ความร้อน $P_c = \frac{P}{\eta}$ (2.96)

กำลังปรากฏที่ขดลวด $\text{Coil VA} = \frac{P}{\cos \theta}$ (2.97)

$\text{Coil VA} = I_c^2 |Z|$ (2.98)

แรงดันต่อรอบที่ขดลวด $\frac{E_c}{N_c} = \frac{\text{Coil VA}}{\text{Total Ampere Turn}}$ (2.99)

จากที่กล่าวมาข้างต้นถ้าพิจารณาโดยละเอียดจะพบว่า

$R_c = \pi \sqrt{\pi} k_r d_c [N_c^2 / l_c] \sqrt{[\rho_c \mu_o f]}$ (2.100)

$R_w = 4 \sqrt{\pi} A_w [N_c^2 / d_c l_c] \sqrt{[\rho_w \mu_w f]}$ โดยประมาณ (2.101)

$L_c = \frac{\sqrt{\pi}}{2} k_r d_c [N_c^2 / l_c] \sqrt{\left[\frac{\rho_c \mu_o}{f} \right]}$ (2.102)

$$L_w = \frac{2A_w}{\sqrt{\pi d_w}} [N_c^2 / l_c] \sqrt{\left[\frac{P_w \mu_w}{f} \right]} \quad \text{โดยประมาณ} \quad (2.103)$$

$$L_{\#} = \mu_o [N_c^2 / l_c] A_{\#} \quad (2.104)$$

จากค่าพารามิเตอร์ที่ได้ พบว่าค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อนและขึ้นงานจะขึ้นกับลักษณะและขนาดของขดลวดให้ความร้อน รวมทั้งจำนวนรอบของขดลวดให้ความร้อน และถ้าพิจารณาให้ขดลวดและขึ้นงานคงที่ สำหรับ ความต้านทานเนื่องจากขึ้นงานและความต้านทานเนื่องจากขดลวดให้ความร้อน จะแปรตามรากที่สองของสภาพความต้านทาน รากที่สองของความซับซ้อนทางแม่เหล็ก และรากที่สองของความถี่

ในกรณีของความเหนียวนำเนื่องจากขึ้นงานและขดลวดให้ความร้อน จะแปรตามรากที่สองของสภาพความต้านทาน รากที่สองของความซับซ้อนทางแม่เหล็ก และแปรผกผันกับรากที่สองของความถี่

ในกรณีความเหนียวนำเนื่องจากแกนอากาศ พบว่าจะขึ้นกับลักษณะของขดลวดให้ความร้อน พื้นที่หน้าตัดที่สนามแม่เหล็กคล่องผ่าน โดยจะไม่มีความสัมพันธ์กับความถี่

ถ้าพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของขดลวดให้ความร้อน จะพบว่าเป็นการยากที่จะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ เพราะค่าเหล่านี้จะขึ้นกับขนาดของขดลวดให้ความร้อน และคุณสมบัติทางแม่เหล็กและไฟฟ้าของขึ้นงานด้วย และจากที่กล่าวมาในการคำนวณจะคิดว่าเป็นกรณีอุดมคติคือขดลวดให้ความร้อนมีความยาวมากๆ และฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่คล่องผ่านช่องอากาศจะมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งในการคำนวณค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ค่าที่ได้อาจผิดไปจากความเป็นจริง เช่น ในกรณีฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล่องผ่านอากาศ จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนสูตรที่ใช้ในการคำนวณให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น โดยจะคำนวณค่าความเหนียวนำที่คล่องผ่านอากาศตามหนังสืออ้างอิง (Kjeld Thorborg, 1985) รูปที่ 2.32 แสดงขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่มีจำนวนรอบเป็น N_c รอบซึ่งสูตรที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นสูตรที่มีการปรับปรุงให้ถูกต้องยิ่งขึ้น

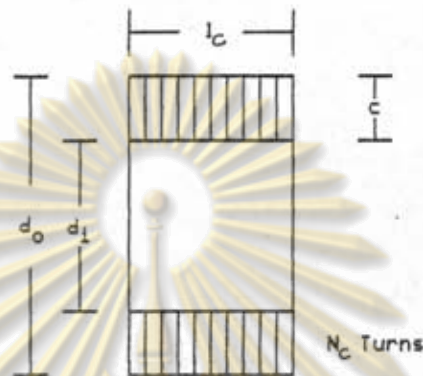
$$L_{\#} = \lambda d N_c^2 [\mu H] \quad (2.105)$$

$$\lambda = \frac{0.1\pi^2}{\{0.45 + \gamma + \beta + 2\gamma\beta(\gamma + 1_c) / [3(\gamma + 2)]\}} \quad (2.106)$$

$$\gamma = \frac{l_c}{d} \quad (2.107)$$

$$\beta = \frac{c}{d} \quad (2.108)$$

$$d = [d_o + d_i]/2 \quad (2.109)$$



รูปที่ 2.32 ขดลวดให้ความร้อนที่มีจำนวน N_c รอบ

ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้นี้จะเป็นค่าความเหนี่ยวนำของช่องอากาศทั้งหมดใน
กรณีที่มีชิ้นงานอาจต้องคูณด้วยตัวประกอบ เพื่อให้เป็นเพียงพื้นที่ส่วนที่ล็กซ์สนามแม่เหล็กต้อง
ผ่านเท่านั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย