

บทที่ 4

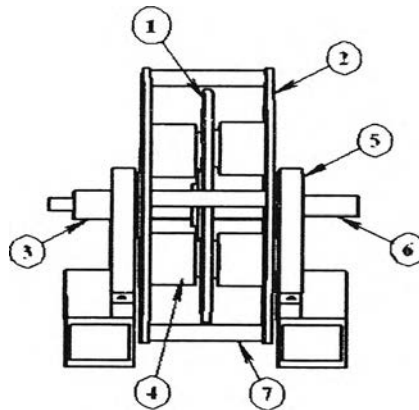


ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

4.1 กล่าวนำ

ไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวน (eddy-current dynamometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดกำลังของเครื่องต้นกำลังแบบซิมซับนชนิดหนึ่ง โดยหลักการทำงานก็คือ การสร้างไหลคเพื่อต้านการเคลื่อนที่ของเครื่อง ซึ่งไหลคที่สร้างขึ้นมานี้เป็นผลมาจากการเกิดกระแสหมุนวน (eddy-current) ที่แผ่นจานหมุน (rotor disk) ที่จะต่อเข้าโดยตรงกับเพลลาของเครื่องจักรหรือเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ โดยไหลคที่ใส่เข้าไป ทำหน้าที่เสมือนเบรกเพื่อซิมซับเอากำลังที่เครื่องสามารถทำงานได้ ซึ่งจะแปรเปลี่ยนกำลังที่ซิมซับได้นั้นออกมาในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นบนแผ่นจานหมุน โดยจะใช้ระยะขีดของสปริงเป็นตัววัดแรงบิดด้านที่เกิดขึ้น และนำแรงบิดที่ได้นั้นไปคำนวณเพื่อหากำลังของเครื่องจักรต้นกำลังนี้ต่อไป

ไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวนมีส่วนประกอบทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวน

และหน้าที่ของส่วนประกอบแต่ละชิ้น มีดังนี้

1. แผ่นจานหมุน (Rotor Disk) เป็นชิ้นส่วนที่มีการเกิดกระแสหมุนวน เพื่อเป็นภาระไหลคให้กับเครื่องจักรต้นกำลังขณะทดสอบ และหมุนในอัตราเร็วเท่ากับเครื่องต้นกำลัง
2. แผ่นเพล (Cradle) เป็นชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นแผ่นประกบทั้งสองด้านของเครื่อง และใช้สำหรับติดตั้งชุดชดเชยความคลาดของแคง
3. บุช (Bush) เป็นชิ้นส่วนที่ใช้ในการติดตั้งแผ่นเพลเข้ากับกับแท่นฐาน และบังคับให้ระดับของแผ่นเพลทั้งสองด้านและเพลาส่งกำลังอยู่ในแนวเดียวกัน

4. อุปกรณ์ที่ใช้สร้างฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux generator) มีลักษณะเป็นชุดขดลวดทองแดงที่พันรอบแกนเหล็ก โดยมีหน้าที่สร้างฟลักซ์สนามแม่เหล็กเพื่อทำให้เกิดกระแสหมุนวนขึ้นที่แผ่นจานหมุน ซึ่งจัดเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากสำหรับเครื่องไคนาโมมิเตอร์ชนิดนี้

5. แท่นฐาน (Cradle Base) ใช้เป็นชิ้นส่วนที่รองรับการติดตั้งแผ่นเพลตทั้ง 2 ด้าน และเพลตที่มีการติดตั้งแผ่นจานหมุนเรียบร้อยเข้าด้วยกัน

6. เพลาส่งกำลัง (Shaft) เป็นส่วนที่ติดตั้งแผ่นจานหมุน และรับกำลังทั้งหมดที่ถูกส่งผ่านจากเครื่องจักรต้นกำลังมายังเครื่องไคนาโมมิเตอร์

7. แกนยึดแผ่นเพลต (Cradle Rod) ใช้ยึดแผ่นเพลต 2 ด้านเข้าด้วยกันเพื่อทำให้แผ่นเพลตเคลื่อนที่แบบสมดุลกัน ในขณะที่ใช้วัดแรงเบรกและช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเครื่องขณะที่ทำงาน

ที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นการแสดงให้เห็นถึงลักษณะการทำงาน โครงสร้างและหน้าที่ของส่วนประกอบแต่ละอย่างของไคนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวน ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญที่ต้องการศึกษาในงานวิทยานิพนธ์

โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาในเรื่องเกี่ยวกับพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องไคนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวน คือ ปริมาณแรงดันแม่เหล็ก, จำนวนชุดขดลวดทองแดงและระยะในแนวรัศมีของการติดตั้ง, ความเร็วหรือเปรียบเสมือนความถี่ของแผ่นจานหมุน และสุดท้ายเป็นผลของความหนาของแผ่นจานหมุน ที่จะส่งผลต่อสมรรถนะในการวัดกำลังของเครื่องต้นกำลังอย่างไร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องต้นกำลังเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 7.5 kW. ความเร็ว 1,450 rpm. เป็นตัวทดสอบ

เมื่อพิจารณาในส่วนของโครงสร้างของเครื่องไคนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวนนี้ พบว่าอุปกรณ์ที่สำคัญที่มีบทบาทในการทำงานของเครื่อง ได้แก่ ชุดขดลวดทองแดง, แผ่นจานหมุน, เพลาส่งกำลัง และในส่วนของการวัดแรงบิดที่เกิดขึ้น รวมไปถึงวิธีการที่ใช้ถ่ายถอดกำลังจากเครื่องจักรต้นกำลังมายังเครื่องไคนาโมมิเตอร์ด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ การส่งกำลังโดยสายพาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการสร้างเครื่องไคนาโมมิเตอร์ตามเครื่องต้นแบบซึ่งมีพิสัยของขนาดต่างๆ แสดงในภาคผนวก ก แต่ได้มีการปรับขนาดของชิ้นส่วนบางอย่างให้สอดคล้องกับการใช้ทดสอบในงานวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้นในส่วนของทฤษฎีที่กล่าวไว้ในเนื้อหาของบทที่ 4 นี้ จึงแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ (1.) ส่วนที่เกี่ยวกับทางด้านไฟฟ้าโดยจะกล่าวถึงในเรื่อง ทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้า และนำทฤษฎีดังกล่าวมาไปประยุกต์ในบทที่ 5 เพื่อแสดงถึงหลักการที่ใช้ในการออกแบบขดลวดทองแดงและวิธีการใช้หลักดังกล่าวในการคำนวณ, (2.) ส่วนที่เกี่ยวกับทางด้านเครื่องกล จะกล่าวในเรื่องของการออกแบบชิ้นส่วนบางอย่างที่ได้ทำการปรับให้เหมาะสมกับการใช้ทดสอบกับมอเตอร์ขนาด

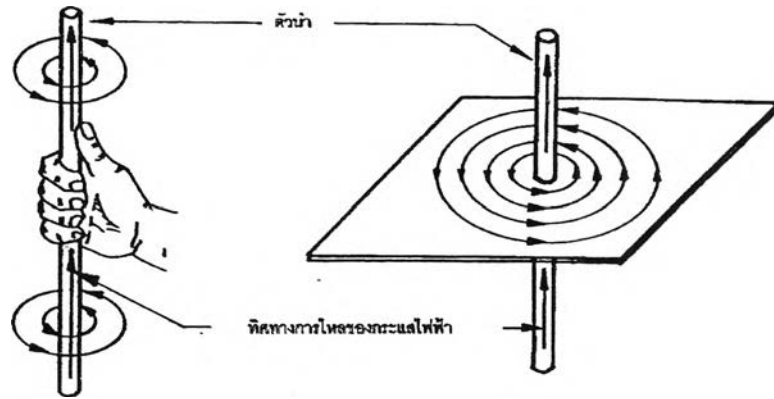
7.5 kW. ได้แก่ ขนาดเพลาส่งกำลัง, ขนาดแมริงที่สามารถทนแรงกระทำเมื่อทำการทดสอบตามเงื่อนไขต่างๆ และหลักการสำหรับการออกแบบสายพานให้สามารถปรับความเร็วได้ตามขอบเขตของพารามิเตอร์ที่ทำการทดสอบ รวมไปถึงการพิสูจน์ถึงความแข็งแรงของแผ่นจานหมุนที่สร้างขึ้นว่าสามารถใช้งานได้ที่ความเร็วสูงๆ ได้อย่างปลอดภัย และ(3.) ส่วนที่เกี่ยวกับการวัดค่าแรงบิด ซึ่งเมื่อได้ส่วนประกอบหลักๆ ดังกล่าวมาแล้วจึงได้ทำการออกแบบขนาดของส่วนประกอบอื่นๆ ให้เหมาะสมกัน โดยในการออกแบบได้ใช้โปรแกรม Solid Works ในการเขียนส่วนประกอบแต่ละชิ้นขึ้นมาและ ตรวจสอบโดยการนำชิ้นส่วนแต่ละชิ้นมาประกอบเข้ากัน เมื่อได้ขนาดของส่วนประกอบที่เหมาะสมและสมบูรณ์จึงนำแบบของชิ้นส่วนเหล่านั้นมาทำการสร้างเครื่องโคનાโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวนขึ้น เพื่อใช้ดำเนินการทดสอบต่อไป

4.2 ทฤษฎีทางด้านไฟฟ้า (Electrical Theory)

เนื่องมาจากว่าเครื่องโคนาโมมิเตอร์ชนิดนี้ส่วนที่สำคัญที่สุด คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กซึ่งไปเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหมุนวน ซึ่งในที่นี้คือชุดขดลวดทองแดงที่มีแกนเหล็กสอดอยู่ตรงกลาง โดยมีหลักการทำงานต่างๆ ทั้งในเรื่องของการสร้างสนามแม่เหล็กและการเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า เป็นไปตามทฤษฎีทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะกล่าวเป็นลำดับๆ ดังนี้

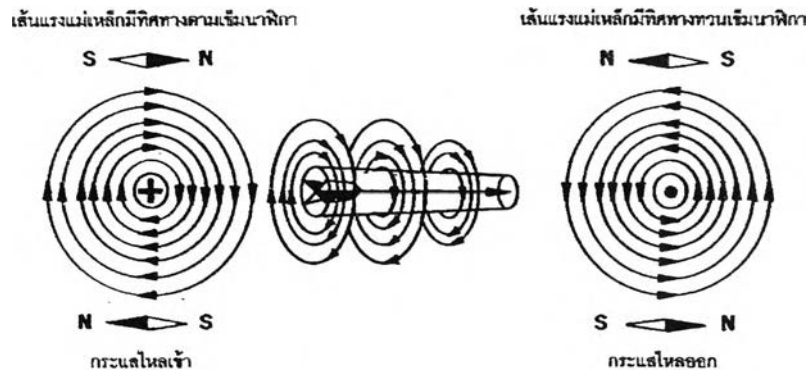
4.2.1 แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic)

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำ อาทิเช่นแท่งโลหะ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเสมอ โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้ประกอบไปด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก (flux line) หรือเรียกว่า ฟลักซ์แม่เหล็ก จำนวนหนึ่งจัดเรียงเป็นวงรอบๆ ตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านนั้น โดยตัวนำจะเปรียบเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านั้น โดยเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้ถ้ายังอยู่ห่างจากตัวนำมากอำนาจแม่เหล็กก็จะยิ่งน้อย ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบๆ ตัวนำไฟฟ้ากับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำสามารถหาได้โดยการใช้กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก (right hand rule for magnetic field) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.2

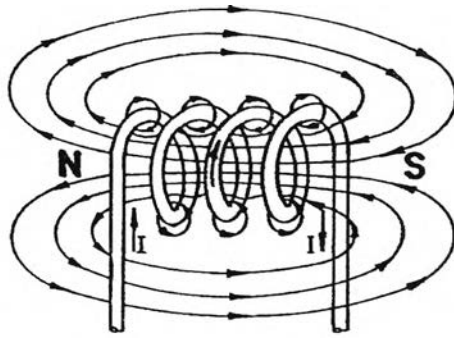


รูปที่ 4.2 แสดงกฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก [3]

ลูกศรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าจะใช้แสดงทิศทางกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวของตัวนำไฟฟ้า โดยกำหนดให้ด้านที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าคือด้านที่เห็นเป็นกันของลูกศรนั้นแทนด้วยเครื่องหมายกากบาท (+) หรือเปรียบเสมือนว่ากระแสมีทิศทางพุ่งเข้าสู่กระดาษ ส่วนด้านที่กระแสไหลออก คือด้านที่เป็นหัวลูกศรแทนด้วยเครื่องหมาย (•) หรือก็คือกระแสมีทิศทางพุ่งออกจากกระดาษ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดที่มีกระแสไหลผ่านก็หาได้โดยใช้กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็กเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4

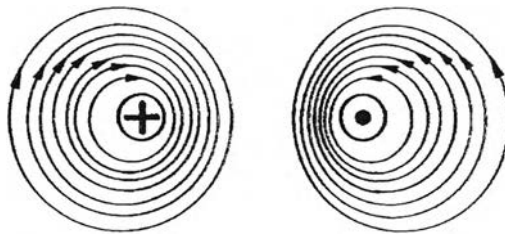


รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของทิศทางกระแสไฟฟ้ากับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ [3]

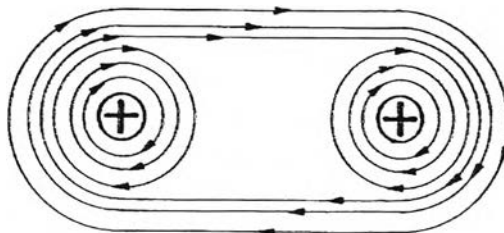


รูปที่ 4.4 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด [3]

เมื่อนำตัวนำ 2 ตัวมาวางขนานกัน และมีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางตรงข้ามกัน ดังรูปที่ 4.5 (A) จะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำทั้งสองนั้นมีทิศทางไปในทางเดียวกันทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่เหมือนกัน จึงเกิดเป็นแรงผลักกันระหว่างตัวนำทั้งสองนั่นเอง แต่ถ้าตัวนำทั้งสองที่วางขนานกันนั้นมีกระแสไหลไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 4.5 (B) จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำทั้งสองมีทิศทางไปในทางเดียวกัน เป็นผลทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่ต่างกัน เป็นเหตุให้เกิดแรงดูดกันขึ้น ตัวนำทั้งสองจึงดูดเข้ามาหากัน



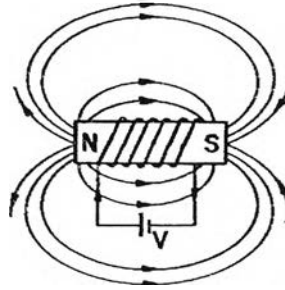
รูปที่ 4.5 (A) แสดงทิศทางกระแสไหลของกระแสในทิศทางตรงกันข้ามกันในตัวนำที่วางขนานกัน [3]



รูปที่ 4.5 (B) แสดงทิศทางกระแสไหลของกระแสในทิศทางเดียวกันในตัวนำที่วางขนานกัน [3]

4.2.2 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)

วงจรแม่เหล็ก หมายถึง ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งกฎเกณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ก็คล้ายกับวงจรไฟฟ้า ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6 เป็นลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดที่พันบนแกนเหล็ก โดยต่อให้ขดลวดนั้นมีกระแสไหลผ่าน ส่วนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กหาได้โดยใช้กฎมือขวาดังที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดเมื่อมีกระแสไหลผ่าน [3]

4.2.3 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density)

เป็นปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็ก หรือฟลักซ์แม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ สำหรับสนามแม่เหล็กที่มีค่าสม่ำเสมอ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการที่ 4-1

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (4.1)$$

โดยที่ B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์ต่อตารางเมตร, Wb/m²)
 ϕ = เส้นแรงแม่เหล็ก หรือฟลักซ์แม่เหล็ก (เวเบอร์, Wb)
 A = พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็ก (ตารางเมตร, m²)

4.2.4 ความซึมซาบได้ (Permeability)

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในตัวนำนั้นจะขึ้นอยู่กับ โมเลกุลของแกนเหล็กว่าจะสามารถวางตัวในแนวเดียวกันได้ง่ายเพียงใด หรือก็คือเป็นตัวที่กำหนดว่าตัวนำหนึ่งๆ จะยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ง่ายหรือยากเพียงไร เรียกค่าจัดความเหล่านี้นี้ว่า ความซึมซาบได้ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ μ และสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (4.2)$$

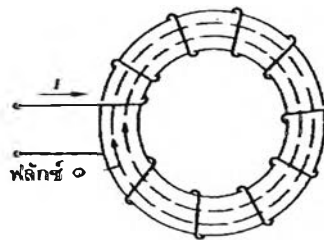
- โดยที่ μ = ค่าความซึมซาบได้ของตัวนำใดๆ เช่น เหล็ก = 589.12×10^{-5}
- B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์ต่อตารางเมตร, Wb/m^2)
- H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (แอมแปร์ต่อเมตร, A/m)

และค่าความซึมซาบได้ยังเขียนใหม่ได้เป็น $\mu = \mu_0 \mu_r$ (4.13)

- โดยที่ μ_0 = ค่าความซึมซาบได้ของอากาศ = $4\pi \times 10^{-7}$ เวเบอร์/แอมแปร์-เมตร
- μ_r = ค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (relative permeability) ของตัวนำใดๆ

4.2.5 เส้นโค้งของการเกิดอำนาจแม่เหล็ก

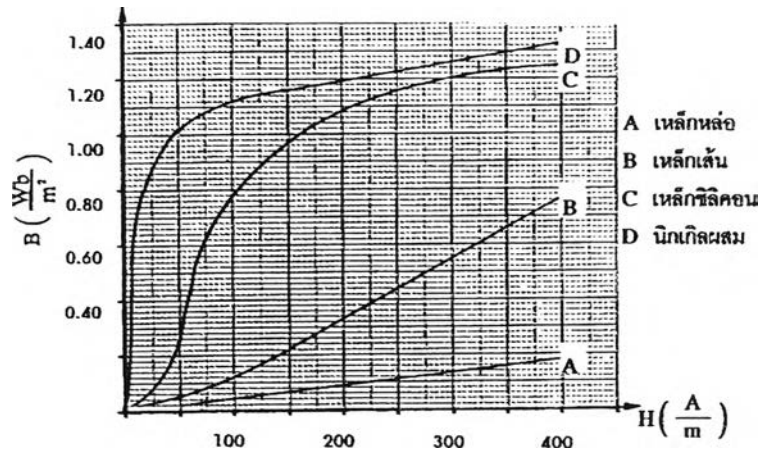
พิจารณาขดลวด โซลินอยด์ที่ขดเป็นวงกลม เรียกว่าวงแหวนทอรอยด์ (toroidal ring) แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



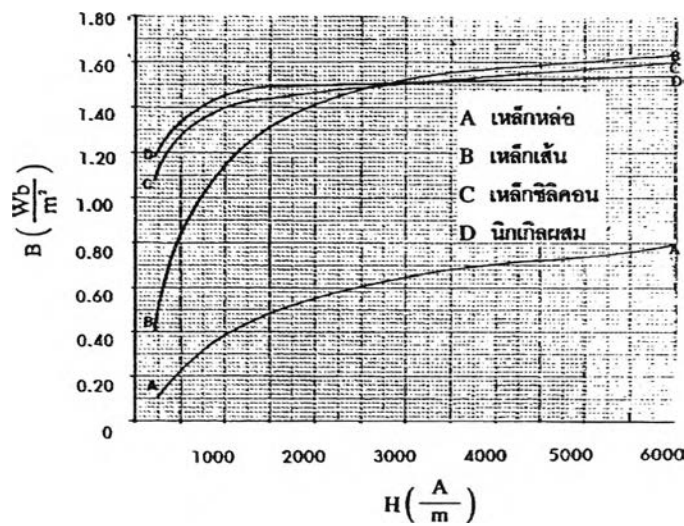
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของวงจรมแม่เหล็กทอรอยด์ [4]

เมื่อทำการขดหรือพันขดลวดโซลินอยด์ให้เป็นวงกลมและมีความยาวเฉลี่ยหนึ่งหน่วย ความยาว สนามแม่เหล็กภายในจะยังไม่เปลี่ยนค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) แต่ถ้าเรานำแกนเหล็กมาใส่ไว้ภายในขดลวดโซลินอยด์นั้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนไปโดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นหลายร้อยเท่าของค่าเดิม ซึ่งความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าความซึมซาบได้ของแกนเหล็ก หรือ ค่า μ_r

เส้นโค้งของการเกิดอำนาจแม่เหล็กนี้ เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) โดยหลักการของขดลวดทอรอยด์นั้น ถ้าเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ถ้าเริ่มต้นจากกระแสเป็นศูนย์และมีเครื่องมือวัดค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแกนทอรอยด์จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H โดยถ้าเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแกนเหล็ก เช่น ทอรอยด์จะได้เส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 4.8 (A) และ (B) ซึ่งในรูป A จะเป็นช่วงที่เส้นโค้งเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนอย่างชัดเจนและ B จะเป็นช่วงที่เส้นโค้งเริ่มคงที่หรือเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว โดยที่จุด 400 จะเป็นจุดแบ่งของช่วงเฉลี่ยของสารต่างๆ เหล่านี้



รูปที่ 4.8 (A) แสดง B-H curve เมื่อ $H < 400$ แอมแปร์ต่อเมตร [2]



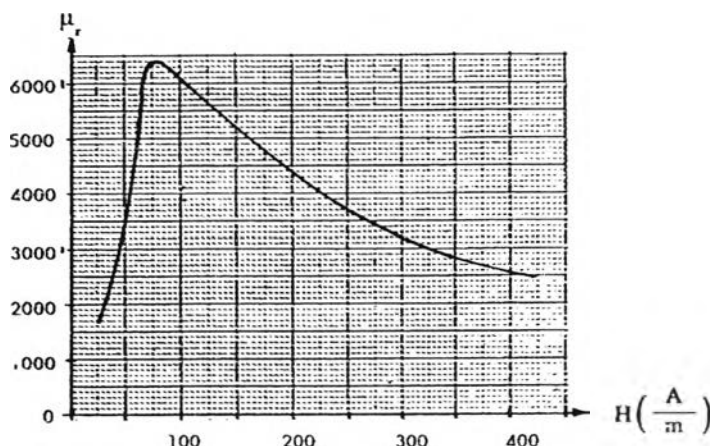
รูปที่ 4.8 (B) แสดง B-H curve เมื่อ $H > 400$ แอมแปร์ต่อเมตร [2]

แต่ค่าความซึมซาบ μ จะไม่คงที่ เมื่อค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ค่า μ จะเพิ่มจนถึงค่าสูงสุด เมื่อถึงค่าสูงสุดแล้วการเพิ่มขึ้นของ H ก็จะไม่ทำให้ B เพิ่มขึ้นมากนักจนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว จะทำให้ค่า μ ลดลงเมื่อ H เพิ่มขึ้นอีกดังรูปที่ 4.9 เส้น โค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มของสนามแม่เหล็กบางครั้งเรียกว่า B-H curve หรือเส้นโค้งการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็กหรือเส้น โค้งก่าเนดแม่เหล็ก

จากรูปที่ 4.8 (A) และ(B) ค่าความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรง และจะมีระดับหนึ่ง ถึงแม้ว่า จะเพิ่ม H ให้มากขึ้น ไปอีกแต่ B จะ ไม่เปลี่ยนแปลงจุดที่ B ไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีกนี้ เรียกว่าจุดอิ่มตัวของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของสารนั้น และค่า μ ที่มีขนาดสูงที่สุดของสารใดๆ จะสามารถหาจากการลากเส้นตรงไปสัมผัสกับเส้น โค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของสารชนิดนั้น ซึ่ง ณ จุดสัมผัสระหว่างเส้นตรงที่ลากจากจุดเริ่มต้นของเส้น โค้งและสัมผัสกับเส้น โค้ง ทำ

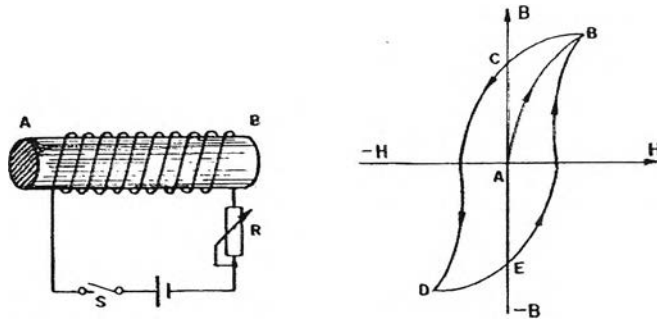
ให้อ่านค่า B กับ H ได้ และนำค่า B และ H ที่อ่านได้ในแต่ละจุดนั้นไปแทนค่าในสมการดังนี้ จาก B

$$= \mu_r \mu_0 H \quad \text{ดังนั้น ค่า } \mu_r \text{ คือ } \frac{B}{\mu_0 H}$$



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มขาบได้กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก [3]

เมื่อใช้แกนเหล็กในการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง B-H จะเห็นว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นตามเส้นโค้งของการเกิดอำนาจแม่เหล็กตามเส้น AB จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวของเส้นโค้ง แล้วถ้าทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กหมดไปโดยการลดกระแสไฟฟ้าที่ล้นน้อยจนกระทั่งกระแสเป็นศูนย์ ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงแต่ไม่ซำรอยเส้นโค้งเดิม โดยที่กระแสเป็นศูนย์แล้วค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะยังไม่เป็นศูนย์แต่จะเข้าไปตามเส้นโค้ง BC ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (residual magnetism) ดังรูปที่ 4.10 และถ้าต้องการทำให้ค่านี้หมดไป ต้องทำการเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าใหม่ และวัดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะได้เส้นโค้งดังเส้น CD เมื่อถึงจุด D อันเป็นจุดอิ่มตัวในอีกทิศทางหนึ่งของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และถ้าลดปริมาณของกระแสไฟฟาลงเส้นโค้งจะป็นไปตามแนวของเส้น DE และถ้าเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสใหม่และค่อยๆเพิ่มกระแสไฟฟ้าอีกเส้นโค้งจะเป็นเส้น EB ซึ่งจะได้เป็นเส้นโค้งปิด BCDEB เส้นโค้งดังกล่าวเรียกว่า เส้นโค้งฮิสเตอรีซิส (Hysteresis Curve) เส้นโค้งฮิสเตอรีซิสมีความสำคัญในการออกแบบหรือจัดหาสารมาทำแกนแม่เหล็ก และพื้นที่เส้นโค้งฮิสเตอรีซิสจะบอกถึงปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปในหนึ่งไซเคิลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ทำแกนแม่เหล็ก ซึ่งพลังงานดังกล่าวจะสูญเสียไปมากเมื่อเส้นโค้งนี้กว้างๆ



รูปที่ 4.10 แสดงเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส [3]

จากสิ่งที่ได้อธิบายมาเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยในการตัดสินใจที่จะเลือกชนิดของเหล็ก เพื่อใช้ทำเป็นแกนเหล็กของชุดขดลวดทองแดง ก็จะเลือกเป็นเหล็กอ่อนหรือเหล็กหล่อ เพราะมีความซึมซาบของแม่เหล็กได้สูง และมีอำนาจในการกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ปานกลาง

4.2.6 แรงดันแม่เหล็ก (Magnetomotive Force , m.m.f.)

เป็นแหล่งที่ทำหน้าที่ส่งเส้นแรงแม่เหล็กให้เคลื่อนที่ผ่านไปในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งคล้ายกับแรงดันไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งส่งกำลังดันให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปในโหลด หรือวงจรต่างๆ โดยแรงดันแม่เหล็กนั้นมีหน่วยเป็น แอมแปร์เทอน (A-T) และใช้สัญลักษณ์ F_m แทน สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned} F_m &= \text{m.m.f.} \\ &= NI \end{aligned} \quad (4.4)$$

โดยที่ F_m = แรงดันแม่เหล็ก (แอมแปร์เทอน, A-T)

I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด (แอมแปร์, A)

N = จำนวนรอบของขดลวด

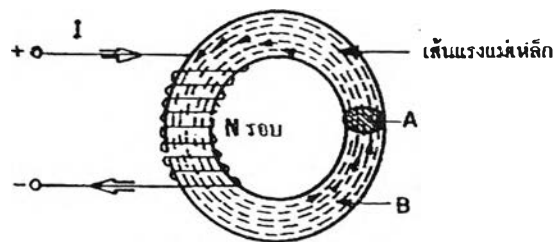
4.2.7 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity)

แรงดันแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวของวงจรแม่เหล็ก จากรูปที่ 4.11 เป็นวงจรแม่เหล็กที่มีเส้นแรงแม่เหล็กสม่ำเสมอ และมีค่าของแรงดันแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวคงที่ตลอดแนวของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น แสดงว่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าคงที่ตลอดแนวของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นด้วย

ซึ่งความเข้มของสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned}
 H &= \frac{F_m}{l} \\
 &= \frac{IN}{l}
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

โดยที่ H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (แอมแปร์ต่อเมตร, A/m.)
 l = ความยาวของวงจรแม่เหล็ก (เมตร, m.)



รูปที่ 4.11 แสดงวงจรแม่เหล็กของขดลวดที่มีกระแสไหลผ่าน [3]

4.2.8 ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance or Magnetic Resistance)

ความต้านทานที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็กซึ่งอาจจะเป็นอากาศ หรือวัสดุอะไรก็ได้ที่อยู่ในบริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กส่งอำนาจไปถึงซึ่งจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ ความต้านทานนี้จะต้านทานการส่งเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจากแหล่งกำเนิดให้มีค่าลดลง และค่านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของแกนเหล็กที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านไปเพื่อให้ครบวงจรของมัน และจะเป็นสัดส่วนผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก ความต้านทานแม่เหล็กเป็นการแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่มีการต้านต่อการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งคล้ายกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ความต้านทานแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned}
 R_m &= \frac{\text{m.m.f.}}{\phi} \\
 &= \frac{IN}{\phi}
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

หรือ

$$R_m = \frac{l}{\mu A}$$

$$= \frac{l}{\phi \mu_0 \mu_r} \quad (4.7)$$

โดยที่ R_m = ความต้านทานแม่เหล็ก (แอมแปร์เทอนต่อเวเบอร์, A-T/Wb.)

m.m.f. = แรงดันแม่เหล็ก (แอมแปร์เทอน, A-T)

ϕ = เส้นแรงแม่เหล็ก หรือฟลักซ์แม่เหล็ก (เวเบอร์, Wb)

μ = ค่าความซึมซาบได้

μ_0 = ค่าความซึมซาบได้ของอากาศ = $4\pi \times 10^{-7}$ เวเบอร์/แอมแปร์-เมตร

μ_r = ค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (relative permeability) ของสารอื่นๆ

= 1 สำหรับอากาศ

4.2.9 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำ

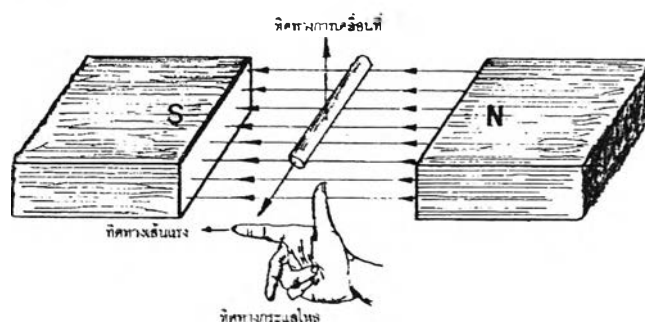
ฟาราเดย์ได้สรุปผลจากการทดลองเป็นกฎของการเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ 2 ข้อ คือ

(1.) เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงต่อตัวนำข้อมทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้นที่ตัวนำนั้น หรือตัวนำเคลื่อนที่ตัดกับสนามแม่เหล็ก ก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำนั้นเช่นเดียวกัน

(2.) ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น เท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น

4.2.10 กฎมือขวาของเฟลมมิง (Fleming's Right Hand Rule)

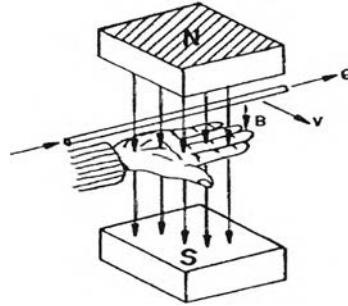
ทิศทางของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำ ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กและทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำ สามารถหาได้โดยใช้กฎมือขวาของเฟลมมิง แสดงดังรูปที่ 4.12 ทำโดยกางนิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้และนิ้วกลางของมือขวาให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยนิ้วหัวแม่มือชี้ทิศทางเคลื่อนที่ของตัวนำ นิ้วชี้ชี้ไปในทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ ส่วนนิ้วกลางจะชี้ทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำนั้นๆ



รูปที่ 4.12 การใช้กฎมือขวาของเฟลมมิง [3]

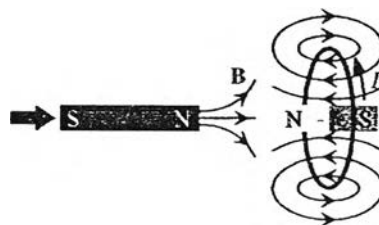
4.2.11 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law)

ใช้แสดงทิศทางของแรงไหลของกระแสไฟฟ้า ทำได้โดยการแบมือขวาให้ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งเข้าหาด้านหลังของฝ่ามือ นิ้วทั้งสี่ชี้ทิศทางของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ส่วนนิ้วหัวแม่มือชี้ทิศทางของการเคลื่อนที่ของตัวนำ แสดงดังรูปที่ 4.13



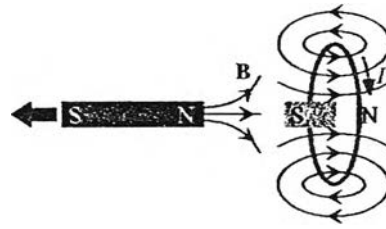
รูปที่ 4.13 การหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าโดยใช้กฎของเลนซ์ [5]

นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้าย่อมไหลสวนทางกับกระแสที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กนั้น ถ้าพิจารณาในรูปที่ 4.14 ในขณะที่ผลักขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กเข้าไปในขดลวดในเวลาเดียวกันกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดเนื่องจากการเหนี่ยวนำก็จะสร้างขั้วเหนือในทิศทางที่พยายามผลักเข้าไป แสดงว่าจะผลักขั้วเหนือเข้าไปในขดลวดได้ยากมาก และในรูปที่ 4.15 นั้น ขณะดึงขั้วเหนือออกจากขดลวด กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำในขดลวดจะสร้างขั้วได้ขึ้นในทิศทางที่ดึงเอาขั้วเหนือออกมา หมายความว่า ผลักก็ไม่เข้าหรือดึงก็ไม่ออก จากการทดสอบนี้เนื่องจากพลังงานกลที่ป้อนเข้าไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นกฎของเลนซ์จึงเปรียบเสมือนกฎของการเปลี่ยนพลังงาน และพลังงานนี้ก็จะมีทิศทางต้านกันเสมอ หรือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของกระแสไฟฟ้าไหลนั้นจะมีทิศทางต้านกับพลังงานที่พยายามกระทำให้เกิดกระแสนั้นๆ และค่าของพลังงานที่เกิดขึ้นย่อมเท่ากัน



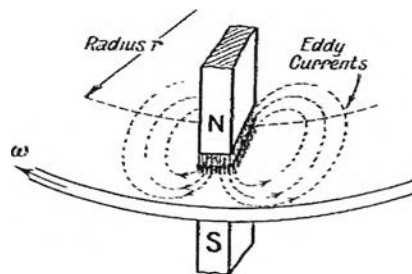
รูปที่ 4.14 การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้วเหนือ

เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ [6]



รูปที่ 4.15 การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้วได้
เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ [6]

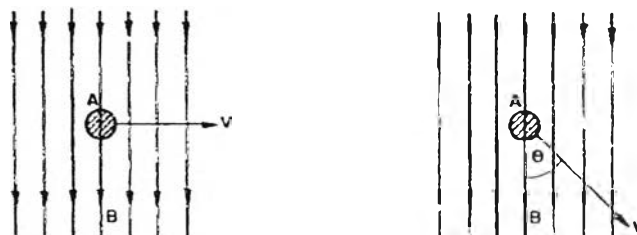
จากหลักการดังกล่าว ถ้าพิจารณาเป็นการเคลื่อนที่แบบหมุนตัดสนามแม่เหล็กที่ตั้งที่ของแผ่นตัวนำจะทำให้เกิดกระแสหมุนวนหรือ แรงต้านการหมุน บนแผ่นตัวนำนั้นดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ทิศทางการเกิดกระแสหมุนวนในแผ่นจานหมุน [7]

4.2.12 การเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า (Voltage Induction)

พิจารณาเป็นการเหนี่ยวนำแบบพลวัต (Dynamically Induced) คือ สนามแม่เหล็กจะวางตัวอยู่นิ่งๆ แต่อาศัยตัวนำเคลื่อนที่ตัดผ่าน จากรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การเคลื่อนที่ของตัวนำแบบตั้งฉากและทำมุมกับสนามแม่เหล็ก [6]

ถ้าให้ A เป็นตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น B เวเบอร์ต่อตารางเมตร และตามแนวลูกศรของตัวนำ A แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ตัดตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก สมมติให้ l เป็นความยาวของตัวนำ A และเคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง dx เมตร ในเวลา dt วินาที ดังนั้นพื้นที่ที่ตัวนำทั้งหมดตัดผ่านมีค่า ldx ตารางเมตร แต่ในหนึ่งตารางเมตรมีเส้นแรงแม่เหล็ก B เวเบอร์ ดังนั้น เส้นแรงแม่เหล็กที่ตัวนำเคลื่อนที่ตัด = ldx×B เวเบอร์

$$\text{เส้นแรงแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลง} = Bldx \quad \text{เวเบอร์}$$

$$\text{เวลาที่ใช้ในขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง} = dt \quad \text{วินาที}$$

จากกฎของฟาราเดย์ที่ว่า เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงต่อตัวนำย่อมทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำนั้น ซึ่งเป็นการเหนี่ยวนำแบบพลวัต มีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการเหนี่ยวนำต่อเวลา ดังนี้

$$\text{e.m.f.} = \frac{Bldx}{dt}$$

แต่เนื่องจาก dx/dt = อัตราการเปลี่ยนแปลงของระยะทางต่อเวลา หรือความเร็ว แทนด้วย v

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{e.m.f.} = Blv \quad (4.9)$$

แต่ถ้าตัวนำ A เคลื่อนที่ไม่เป็นมุมฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กแล้วการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.17 จะได้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวนำโดยการแตกความเร็ว v ให้ไปตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กจะได้เป็น vsinθ ดังนั้นจากสมการที่ 4.9 จะเปลี่ยนได้ดังนี้

$$\text{e.m.f.} = Blvsin\theta \quad (4.10)$$

โดยที่ e.m.f. = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (โวลต์, V)

B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์ต่อตารางเมตร, Wb/m.²)

l = ความยาวของตัวนำในส่วนของที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก (เมตร, m.)

v = ความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวนำ (เมตรต่อวินาที, m/s²)

θ = มุมที่ตัวนำเคลื่อนที่กระทำกับเส้นแรงแม่เหล็ก (องศา, °)

4.2.13 ค่าความต้านทานในส่วนที่เกิดกระแสหมุนวนในแผ่นตัวนำ [7]

ค่าความต้านทานที่แผ่นตัวนำที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กเหนี่ยวนำหน้าตัดเป็นวงกลมจะหาจากสมการ ดังนี้

$$R = \frac{bp}{dt} \quad (4.11)$$

โดยที่ R = ค่าความต้านทานในส่วนของกระแสหมุนวน (โอห์ม, Ω)
 b = ความยาวตามแนวรัศมีของขั้วแม่เหล็ก (เมตร, m.)
 d = ความกว้างของขั้วแม่เหล็ก (เมตร, m.)
 p = สภาพความต้านทานของแผ่นตัวนำ (โอห์ม-เมตร, $\Omega\cdot m.$)
 t = ความหนาของแผ่นตัวนำ (เมตร, m.)

4.2.14 แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Torque)

แผ่นตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านและอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงกระทำบนแผ่นตัวนำนั้นเป็นไปตามสมการ ดังนี้

$$F = Bli \quad (4.12)$$

โดยที่ F = แรงกระทำบนแผ่นตัวนำ (นิวตัน, N)
 B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์ต่อตารางเมตร, $Wb/m.^2$)
 l = ความยาวของตัวนำในส่วนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก (เมตร, m.)
 i = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำ (แอมแปร์, A)

ถ้ากำหนดให้ r เป็นระยะทางจากจุดศูนย์กลางแผ่นตัวนำถึงจุดศูนย์กลางของขั้วแม่เหล็ก

$$\text{ดังนั้น} \quad T = Bli r \quad (4.13)$$

โดยที่ T = แรงบิดบนแผ่นตัวนำ (นิวตัน-เมตร, N-m.)
 B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์ต่อตารางเมตร, $Wb/m.^2$)
 l = ความยาวของตัวนำในส่วนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก (เมตร, m.)
 r = ระยะรัศมีจากจุดศูนย์กลางแผ่นตัวนำถึงจุดศูนย์กลางของขั้วแม่เหล็ก (เมตร .m.)
 i = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำ (แอมแปร์, A)

4.2.15 กระแสหมุนวน (Eddy Current)

กระแสหมุนวนเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่วัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในวัตถุตัวนำ นั้นๆอันเนื่องมาจากระบบจะเกิดการครบวงจร กระแสหมุนวนจะไหลผ่านความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของ พลังงานความร้อน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้น จะมีค่า i^2R ซึ่งนำเอาหลักการนี้มาตัดแปลงเพื่อประยุกต์เข้ากับเครื่องโคนาโมมิเตอร์ โดยใช้การต่อส่วนร่วมเพลลาของเครื่องจักรหรือเครื่องยนต์ที่ทำการทดสอบเข้ากับแผ่นจานหมุน (rotor disk) อาจใช้เป็นสายพานหรือคัปปลิง เมื่อต่อตัวสร้างสนามแม่เหล็กให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแล้วแผ่นจานหมุน หมุนตัดสนามแม่เหล็กนั้น จะก่อให้เกิดกระแสหมุนวนขึ้นที่แผ่นจานหมุนนั้น ทำให้เกิดการดูดซับเอากำลังของเครื่องจักรที่ต้องการวัดค่าออกมาในรูปของความร้อน ซึ่งหลักการคล้ายกับการเบรกเพียงแต่ไม่มีส่วนที่สัมผัสกันเท่านั้น ทำให้สามารถวัดกำลังของเครื่องเหล่านั้นออกมาได้ โดยการวัดค่าอาจใช้การต่อเข้ากับตาชั่งสปริงเพื่อดูแรงที่กระทำและคำนวณออกมาเป็นแรงบิด และคำนวณเป็นค่ากำลังในที่สุด

4.3 ทฤษฎีทางด้านเครื่องกล (Mechanical Theory)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของเครื่องโคนาโมมิเตอร์ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ต้องรองรับ โหลดทั้งหมดที่ส่งมาจากมอเตอร์ ดังนั้นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญ ชิ้นส่วนที่กล่าวมานี้ได้แก่ การออกแบบเพลลาส่งกำลัง ,การหาค่าแรงที่กระทำกับแบริงที่จู่รองรับเพื่อไปเลือกใช้แบริงที่สามารถทนแรงกระทำนั้นๆ ได้ และการตรวจสอบความแข็งแรงของแผ่นจานหมุนที่หมุนที่ความเร็วสูง รวมไปถึงการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้รับกำลังที่ส่งมาจากมอเตอร์เพื่อวัดค่า ในที่นี้จะเลือกใช้สายพานในการส่งกำลังซึ่งเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่จะทำการศึกษาคือการเปลี่ยนค่าความเร็วของมอเตอร์ โดยเปรียบเสมือนการเพิ่ม โหลดหรือลดโหลดที่ให้กับมอเตอร์นั่นเอง ความเร็วที่จะทำการเปลี่ยนได้แก่ 600, 1,450 และ 3,000 รอบต่อนาที ดังนั้นจะกล่าวถึงหลักการที่ใช้ในการเลือกขนาดของสายพานที่ใช้ในการปรับความเร็ว

4.3.1 หลักการออกแบบเพลลาส่งกำลัง [9],[10]

เพลลา เป็นชิ้นส่วนที่ต้องรับทั้งแรงกด, แรงดึง, แรงบิด หรือแรงคัด ใดๆอย่างหนึ่งหรือทุกอย่างรวมกัน การคำนวณจึงใช้หลักของความเค้นผสมเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาตามวิธีการออกแบบเพลลาตาม โค้ดของ ASME ในกรณีที่เป็นารออกแบบเพลลาต้นที่รับแรง เนื่องจากการหมุนในแนวแกนที่คงที่

ซึ่งมีวิธีการตามลำดับ [9] ดังนี้

(4.3.1.1) ทำการเขียน Free Body Diagram เพื่อหาค่า โมเมนต์บิดและ โมเมนต์ค้ำที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่เพลานั้น โดยมีหลักดังนี้

โมเมนต์ค้ำ (M_b) พิจารณาจากแรงที่มากระทำทั้งแนวระดับและแนวตั้ง โดยดูจากแผนภูมิ โมเมนต์ค้ำด้วยการใช้วิธี Superposition

โมเมนต์บิดที่กระทำบนเพลาน (M_t) หาจากสมการ

$$M_t = \frac{P \times 1000 \times 60}{2\pi n} = \frac{9550 \times P}{n} \quad (4.14)$$

โดยที่ M_t = โมเมนต์บิด (นิวตัน-เมตร, N-m.)
 P = กำลังที่เพลาดังกล่าวต้องการส่ง (กิโลวัตต์, kW.)
 n = จำนวนรอบที่หมุน (รอบต่อนาที)

ถ้าเป็นสายพานขับ แรงบิดหาจาก $M_t = (F_1 - F_2)D/2$ (4.15)

โดยที่ F_1 = แรงดันที่ตึงของสายพาน (นิวตัน, N)
 F_2 = แรงดันที่หย่อนของสายพาน (นิวตัน, N)
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางของพูลเลย์ (เมตร, m.)

(4.3.1.2) นำค่าที่เข้าไปแทนในสมการที่ใช้หาขนาดของเพลาดัน ดังนี้

$$d^3 = \frac{16}{\pi\tau} [(K_b M_b)^2 + (K_t M_t)^2]^{1/2} \quad (4.14)$$

โดยที่ M_t = โมเมนต์บิด (นิวตัน-เมตร, N-m.)
 M_b = โมเมนต์ค้ำ (นิวตัน-เมตร, N-m.)
 τ = ค่าความเค้นเฉือนใช้งาน
 ตามโค้ดของ ASME จะระบุเอาไว้ ดังนี้ = 55 N/mm.² สำหรับเพลานที่ไม่มีร่องลิ่ม
 = 41 N/mm.² สำหรับเพลานที่มีร่องลิ่ม
 แต่ถ้ากำหนด วัสดุของเพลานที่บอกหมายเลขโลหะ หรือส่วนผสมของโลหะให้ใช้

ค่าตามนี้ = $0.3\sigma_y$ หรือ $0.18\sigma_u$ โดยดูค่า σ_y และ σ_u จากตารางคุณสมบัติของโลหะนั้น โดยจะเลือกค่าน้อยมาคำนวณ และถ้าเพลามีร่องลึ้ม ค่านี้จะใช้เพียง 75% จากที่คำนวณได้

และค่า K_b = ค่าตัวประกอบความล้าเนื่องจากโมเมนต์ค้ำค
 K_f = ค่าตัวประกอบความล้าเนื่องจากโมเมนต์บิด

โดยจะมีค่าตามลักษณะการใช้งาน [8] ดังนี้

ตาราง 4.1 ค่าตัวประกอบความล้าตามลักษณะการใช้งาน

ชนิดของแรง	K_b	K_f
เพลที่อยู่นิ่ง :		
แรงที่ค่อยๆ กระทำ	1.0	1.0
แรงที่กระทำทันที ทันใด	1.5-2.0	1.5-2.0
เพลที่หมุน :		
แรงที่ค่อยๆ กระทำ	1.5	1.0
แรงที่กระตุกอย่างเบาๆ	1.5-2.0	1.0-1.5
แรงกระตุกอย่างแรง	2.0-3.0	1.5-3.0

(4.3.1.3) ทำการแก้สมการ 4.14 จะได้ขนาดของเพลที่ใช้งาน

4.3.2 หลักการออกแบบแบริ่ง [10]

แบริ่ง เป็นชิ้นส่วนที่มีหน้าที่รองรับการเสียดสีของเครื่องจักรกลต่างๆ ที่เกิดการหมุน ช่วยทำให้ชิ้นส่วนที่หมุนไม่ต้องสัมผัสกันโดยตรงทำให้การสึกหรอน้อยลง แบริ่งแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ เจอร์นัลแบริ่ง (journal bearings) และ โรลลิ่งแบริ่ง (rolling bearings)

ในการสร้างเครื่องไคนาโมมิเตอร์เครื่องนี้ ได้มีการเลือกใช้แบริ่งเป็นแบบโรลลิ่งแบริ่ง หรือแอนติฟริกชันแบริ่ง (anti-friction bearing) ซึ่งมีข้อได้เปรียบในการใช้งานกว่าแบริ่งชนิดอื่น ดังนี้

(1.) แรงบิดเริ่มต้นของเพลที่สูงกว่า เนื่องจากแรงปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นบนลูกเหล็ก หรือ โรลเลอร์ที่หมุนได้อิสระ คือมีความเสียดทานขณะสตาร์ทน้อยจึงเหมาะสำหรับเครื่องจักรที่เดินและหยุดบ่อยครั้ง

- (2.) โรลลิ่งแบร์ริงจะมีสัญญาณบอกเหตุเมื่อเริ่มมีความผิดปกติเกิดขึ้น เช่น เริ่มจะมีเสียงดัง ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาลงได้ทันก่อนที่เครื่องจักรที่ใช้งานจะเสียหายมากขึ้น
- (3.) โรลลิ่งแบร์ริงสามารถรับแรงได้ทั้งในแนวรัศมีเพลาและแนวแกนพร้อมๆ กัน
- (4.) การหล่อลื่นของโรลลิ่งแบร์ริง จะกระทำได้ง่ายและใช้สารหล่อลื่นในปริมาณที่น้อย
- (5.) โรลลิ่งแบร์ริงสามารถรับแรงที่มากกว่าปกติได้ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ
- (6.) ใช้พื้นที่ติดตั้งในแนวแกนน้อย
- (7.) การติดตั้งจะทำได้ง่ายไม่ยุ่งยาก

ขั้นตอนในการเลือกแบร์ริงจะมีลำดับขั้นตอนดังนี้

(4.3.2.1) ทำการตั้งเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบ และเลือกชนิดของแบร์ริงที่จะใช้งาน ซึ่งในที่นี้เลือกใช้เป็น โรลลิ่งแบร์ริงแบบ radial ball bearing

(4.3.2.2) พิจารณาแรงทั้งหมดที่กระทำต่อแบร์ริงทั้งแนวรัศมี (radial load, F_r) และแนวแกน (thrust load, F_t) แต่ในการคำนวณจะใช้แรงสมมูล (equivalent load, F_e) แทนแรงกระทำทั้งสอง ซึ่งในกรณีของ radial ball bearing มุมสัมผัสกับผิวด้านใน $\alpha = 0$ ซึ่งแบ่งความสัมพันธ์ที่ใช้คำนวณออกเป็น 3 กรณี

$$\text{สำหรับ } 0 < F_t / F_r < 0.35: \quad F_e = F_r \quad (4.15)$$

$$\text{สำหรับ } 0 < F_t / F_r < 10 : \quad F_e = F_r \left[1 + 1.115 \left(\frac{F_t}{F_r} - 0.35 \right) \right] \quad (4.16)$$

$$\text{สำหรับ } F_t / F_r > 10 : \quad F_e = 1.176 F_t \quad (4.17)$$

(4.3.2.3) สำหรับ ค่า standard bearing rated capacity เป็นการทำงานภายใต้โหลดที่คงที่ โดยปราศจากโหลดแบบกระแทกแรงซึ่งในการใช้งานอาจมีกระตุกได้บ้างทำให้โหลดเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ ค่า application factor, K_a แสดงในตาราง ก.4 เป็นตัวคูณเพื่อเพิ่มค่า F_e จะได้ สมการแสดงค่าระยะเวลาการใช้งานทั้งหมดของแบร์ริง ดังนี้

$$L = K_a L_R \left(\frac{C_R}{F_e K_a} \right)^{3.33} \quad (4.18ก)$$

โดยที่ K_a = Life adjustment reliability factors แสดงในรูปที่ ก.1

โดยทั่วไปจะใช้ที่ 90 % reliability แต่การออกแบบบางอย่างอาจใช้มากกว่า

90 % reliability จึงใช้ค่านี้ช่วยปรับค่า

- L_R = อายุการใช้งานตาม rated capacity อ้างอิงจากราย ก.5 = 90×10^6 รอบ
 C_R = Rated capacity เลือกจากราย ก.5
 K_a = Application factor เลือกจากราย ก.4

หรือ ค่า L อาจหาได้จาก $L = \text{ความเร็วรอบที่ใช้งาน (รอบต่อนาที)} \times \text{Design life} \times 60$ (4.18ข)

โดยที่ Design life เลือกจากราย ก.6

(4.3.2.4) เมื่อได้ค่า L มาแล้วนำมาแทนค่าเพื่อหาค่า C_{req} ดังนี้

$$C_{req} = F_c K_a \left(\frac{L}{K_r L_R} \right)^{0.3} \quad (4.19)$$

โดยที่ C_{req} = ค่า required ของ C สำหรับการประยุกต์ใช้งาน (นิวตัน, N)

เมื่อกำหนดค่านี้ได้ก็นำประกอบในการพิจารณาเพื่อเลือกเบริงที่สามารถทำงานได้ทนทานตามแรง C_{req} นี้ โดยให้มีขนาดตามความเหมาะสมที่จะใช้งานร่วมกับชิ้นส่วนอื่น

4.3.3 หลักการออกแบบสายพาน [11]

สายพานที่เลือกใช้ จะใช้เป็นสายพานลิ้มเนื่องจากสามารถส่งกำลังได้มาก โดยจะใช้แรงดึงขั้นต่ำในสายพานน้อย เหมาะกับการใช้งานในกรณีที่ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของพูลเลย์ไม่มาก โดยมีหลักการที่ใช้ในการคำนวณ เรียงตามลำดับดังนี้

(4.3.3.1) กำหนดเงื่อนไขต่างๆ ที่จะใช้งานก่อน อาทิเช่น เวลาในการทำงาน, ลักษณะของงานที่ต้องทำ และต้องทราบชนิดของอุปกรณ์ขับ

(4.3.3.2) หาขนาดหน้าตัดของสายพานที่ใช้ จากรูปที่ จ.1 ในภาคผนวก จ โดยอาศัยสมการ $W_p \times N_s$ และความเร็วของพูลเลย์ตัวขับ (W_p คือ กำลังที่ต้องการถ่ายทอด, kW. และ N_s คือ ตัวประกอบใช้งาน จากราย ก.1) จะเลือกหน้าตัดของสายพานที่ใช้ได้

(4.3.3.3) หาอัตราทดของสายพานจากสมการ

$$m_w = \frac{n_1}{n_2} \quad (4.20)$$

โดยที่ n_1 = ความเร็วของพูลเลย์ตัวขับ (รอบต่อนาที, rpm)

n_2 = ความเร็วของพูลเลย์ตัวตาม (รอบต่อนาที, rpm)

(4.3.3.4) เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพู่เล่ย์ตัวขับ(d_p) จากตารางที่ จ.2 และใช้อัตราทศที่ได้จากข้อ 4.4.2.3 หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพู่เล่ย์ตัวตาม(D_p)

(4.3.3.5) หาระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของพู่เล่ย์ จากความสัมพันธ์ของสมการ

$$C_{\max} = 2(d_p + D_p) \text{ และ } C_{\min} = 0.7(d_p + D_p) \quad (4.21)$$

โดยลองเลือกใช้ค่าหนึ่งในช่วง C_{\min} และ C_{\max} เพื่อใช้ในการหาความยาวพิคซ์ของสายพาน

(4.3.3.6) หาความยาวพิคซ์ของสายพาน โดยประมาณจากสมการ

$$L_p = 2C + 1.57(D_p + d_p) + \frac{(D_p - d_p)^2}{4C} \quad (4.22)$$

เมื่อกำหนดค่า L_p ได้แล้วก็ดูที่ตาราง จ.3 เพื่อเลือกขนาดของสายพานใช้งาน โดยดูจากความยาวพิคซ์ที่ใกล้เคียงกับ L_p ที่คำนวณได้

(4.3.3.7) หาระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของพู่เล่ย์จริง จากสมการ

$$C = p + \sqrt{p^2 - q} \quad (4.23)$$

โดยที่ $p = 0.25 L_p - 0.393(D_p + d_p)$

$q = 0.125(D_p - d_p)^2$

(4.3.3.8) หาส่วนโค้งสัมผัส จาก $\frac{D_p - d_p}{C}$

(4.3.3.9) หาค่าตัวประกอบแก้ไขส่วนโค้งสัมผัส (N_a) จากตาราง จ.4

(4.3.3.10) หาค่าตัวประกอบแก้ไขส่วนโค้งใช้งาน (N_l) และค่าสมรรถนะในการส่งกำลังต่อเส้น (P_R) จากตาราง จ.5

(4.3.3.11) หาจำนวนเส้นของสายพานที่ต้องใช้ จากสมการ

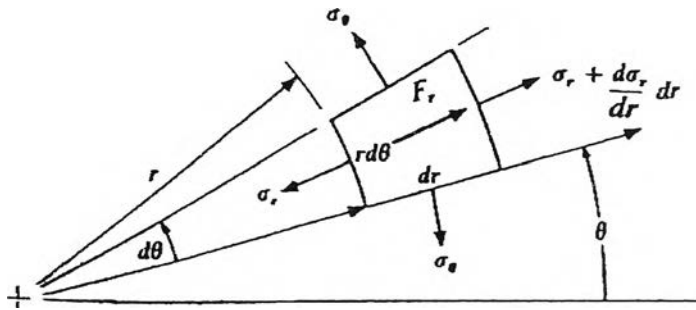
$$Z = \frac{W_p \times N_s}{P_R \times N_a \times N_l} \quad (4.24)$$

เมื่อดำเนินการตามขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดจะได้ขนาดของสายพาน, ขนาดของพู่เล่ย์ และจำนวนเส้นของสายพานที่สามารถนำไปใช้งานได้ (การคำนวณแสดงในภาคผนวก จ)

4.3.4 หลักการหาค่าความแข็งแรงของแผ่นจานหมุน [12],[13]

ในขณะที่แผ่นจานหมุน หมุนรอบแกนที่สมมาตร แรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความเค้น ซึ่งขนาดของความเค้นจะขึ้นกับความเร็วรอบของการหมุน และจะกระจายในลักษณะที่สมมาตรกับแกนหมุน ในการหาความเค้นนี้จะสมมติให้ ความเร็วรอบและความหนาแผ่นจานสม่ำเสมอ

พิจารณาชิ้นส่วน $drd\theta$ ของแผ่นจานที่มีความหนาคงที่ และหมุนรอบแกนด้วยความเร็วรอบคงที่ ω ดังรูปที่ 4.18 กำหนดให้ γ คือความหนาแน่นของมวลของวัสดุที่จัดทำแผ่นจาน ดังนั้นแรงหนีศูนย์กลางต่อหน่วยของมวล คือ $F_r = \gamma \omega^2 r$



รูปที่ 4.18 ชิ้นส่วนตัดของแผ่นจานหมุน [10]

ดังนั้น ในสถานะสมดุลผลรวมของแรงในแนวรัศมีที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน $mnrd\theta$, คือ

$$\sigma_r r d\theta + 2\sigma_\theta dr \sin \frac{d\theta}{2} - \left(\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr \right) (r + dr) d\theta - F_r r dr d\theta = 0$$

พิจารณาคัดเทอมที่มีค่าน้อยๆ ออก และหารตลอดด้วย $drd\theta$ ผลที่ได้รับคือ

$$\sigma_\theta - \sigma_r - r \frac{d\sigma_r}{dr} - F_r = 0$$

$$\sigma_\theta - \sigma_r - r \frac{d\sigma_r}{dr} - \gamma \omega^2 r = 0 \quad (4.25)$$

จากสมการ

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \mu_c^2} \left(\frac{du}{dr} + \mu_c \frac{du}{dr} \right)$$

และ
$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{1-\mu_c^2} \left(\frac{u}{r} + \mu_c \frac{du}{dr} \right)$$

แทนค่าในเทอมของ u ลงในสมการ 4.25 ผลที่ได้คือ

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} + (1-\mu_c^2) \gamma \frac{\omega^2 r}{E} = 0 \quad (4.26)$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการคือ

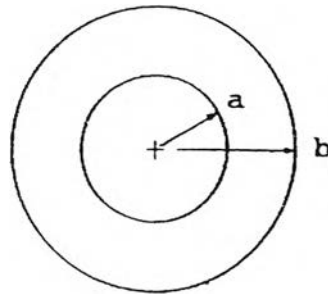
$$u = u_c + u_p = C_1 r + \frac{C_2}{r} + N \frac{r^3}{8} \quad (4.27)$$

ซึ่ง
$$N = (1-\mu_c^2) \gamma \frac{\omega^2}{E}$$

ค่าคงที่ C_1 และ C_2 หาได้จากสภาพเงื่อนไขที่ขอบของแผ่นจาน

พิจารณาแผ่นจานแบบมีรูตรงกลาง

สมมติ แผ่นจานมีรูตรงกลางและไม่มีแรงภายนอกมากระทำที่ขอบของจาน ดังรูปที่ 6.19



รูปที่ 4.19 แผ่นจานหมุนมีรูตรงกลาง[10]

ดังนั้นที่ขอบของแผ่นจานหมุน มีความเค้น σ_r และ $(\sigma_r)_{r=b} = 0$ คือ

$$(\sigma_r)_{r=a} = 0 \text{ และ } (\sigma_r)_{r=b} = 0$$

แทนค่า u จากสมการ 4.27 ลงในสมการของ σ_r ในเทอมของ C_1 และ C_2 จะได้

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu_c^2} \left[\frac{-3+\mu_c}{8} N r^2 + (1+\mu_c) C_1 - (1-\mu_c) C_2 \frac{1}{r^2} \right] \quad (4.28)$$

เนื่องจากที่ $r = a$ และ $r = b$ ความเค้น $\sigma_r = 0$ ดังนั้น

$$\frac{-3+\mu_c}{8}Na^2 + (1+\mu_c)C_1 - (1-\mu_c)C_2\frac{1}{a^2} = 0$$

และ
$$\frac{-3+\mu_c}{8}Nb^2 + (1+\mu_c)C_1 - (1-\mu_c)C_2\frac{1}{b^2} = 0 \quad (4.29)$$

ดังนั้น
$$C_1 = \frac{3+\mu_c}{8(1-\mu_c)}(a^2+b^2)N \quad \text{และ} \quad C_2 = \frac{3+\mu_c}{8(1-\mu_c)}(a^2b^2)N$$

แทนค่า C_1 และ C_2 ลงในสมการ 4.28 จะได้

$$\sigma_r = \frac{3+\mu_c}{8(1-\mu_c^2)}EN\left(a^2+b^2-r^2-\frac{a^2b^2}{r^2}\right) \quad (4.30)$$

และแทนค่า μ และค่า C_1, C_2 ลงในสมการ σ_θ จะได้

$$\sigma_\theta = \frac{3+\mu_c}{8(1-\mu_c^2)}EN\left(a^2+b^2-\frac{1+3\mu_c}{3+\mu_c}r^2-\frac{a^2b^2}{r^2}\right) \quad (4.31)$$

ให้ $\frac{a}{b} = \alpha$, $\frac{r}{b} = x$ และ $b\omega = v$ และแทนค่า N ลงในสมการ 4.30, 4.31 จะ
ได้

$$2\sigma_r = \gamma v^2 \frac{3+\mu_c}{8} \left(1 + \alpha^2 - x^2 - \frac{\alpha^2}{x^2}\right) \quad (4.32)$$

และ
$$2\sigma_\theta = \gamma v^2 \frac{3+\mu_c}{8} \left(1 + \alpha^2 - \frac{1+3\mu_c}{3+\mu_c}x^2 + \frac{\alpha^2}{x^2}\right) \quad (4.33)$$

จะเห็นว่า $2\sigma_r = 0$ ที่ผิวนอก ($x = 1$ หรือ $x = \alpha$)

และ $2\sigma_r$ มีค่าสูงสุดเมื่อ $x = \sqrt{\alpha} = \sqrt{\frac{a}{b}}$ หรือ $r = \sqrt{ab}$ ดังนั้น

$$(\sigma_r)_{\max} = \gamma v^2 \frac{3 + \mu_c}{8} (1 - \alpha)^2 \quad (4.34)$$

และ $2\sigma_\theta$ มีค่าสูงสุดที่ผิวด้านในของงาน ($x = \infty$) นั่นคือ

$$(\sigma_\theta)_{\max} = \gamma v^2 \frac{3 + \mu_c}{4} \left(1 + \frac{1 - \mu_c}{3 + \mu_c} \alpha^2\right) \quad (4.35)$$

ดังนั้น นำสมการที่ 4.34 และ 4.35 ไปใช้ในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติของวัสดุชนิดใดๆ ที่ใช้ทำแผ่นงานหมุนเพื่อดูว่าแผ่นงานหมุนนั้น จะสามารถทนสภาพที่ทำงานในขณะนั้นได้หรือเปล่า

4.4 การวัดค่าแรงบิด (Torque Measurement)

การวัดแรงบิดของงานวิจัยนี้ จะใช้การวัดระยะยืดของสปริงเป็นส่วนสำคัญ โดยมีวิธีการหาระยะยืดของสปริงแสดงอยู่ในบทที่ 6 ในส่วนของขั้นตอนการทดสอบรูปที่ 6.25 และวิธีการคำนวณเพื่อหาค่าแรงบิดที่วัดได้ แสดงได้ในภาคผนวก ข.2

จากทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมานั้น จะนำไปแสดงการคำนวณเพื่อเป็นแนวทางประกอบในการเลือกขนาดของชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องไคนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวนนี้ต่อไปในบทที่ 5