

บทที่ 2

มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric motors)

ความสำคัญของเนื้อหาวิชา (Overview)

มอเตอร์เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าพื้นฐานที่ขับเคลื่อนเครื่องจักรต่างๆ มอเตอร์จึงมีบทบาทสำคัญมากในงานอุตสาหกรรม และมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามาก ในโรงงานบางแห่งมีมอเตอร์ถึง 90% ของภาระไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งรวมถึงพัดลมอุตสาหกรรมและปั้มน้ำต่างๆก็ใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ความสูญเสียด้านพลังงานส่วนใหญ่ในภาคอุตสาหกรรมจึงสิ้นเปลืองไปกับการทำงานของมอเตอร์เหล่านี้ ดังนั้นการใช้งานมอเตอร์อย่างมีประสิทธิภาพ ย่อมทำให้เกิดความมั่นคงแก่ภาคอุตสาหกรรม ช่วยรักษาทรัพยากรพลังงาน ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการผลิตกระแสไฟฟ้าได้เป็นจำนวนมาก

วัตถุประสงค์ (Objective)

1. อธิบายหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าได้
2. อธิบายประสิทธิภาพและการสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้า
3. เปรียบเทียบราคาและค่าใช้จ่ายในการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้า
4. เปรียบเทียบการพันขลวมอเตอร์ไฟฟ้าใหม่
5. อธิบายผลการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีขนาดเหมาะสมกับภาระ
6. อธิบายผลการหลีกเลี่ยงการเดินมอเตอร์ไฟฟ้าตัวเปล่า
7. อธิบายการใช้อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าตามภาระการใช้งาน
8. อธิบายการเลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้า
9. อธิบายการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง
10. อธิบายการบำรุงรักษามอเตอร์ไฟฟ้า

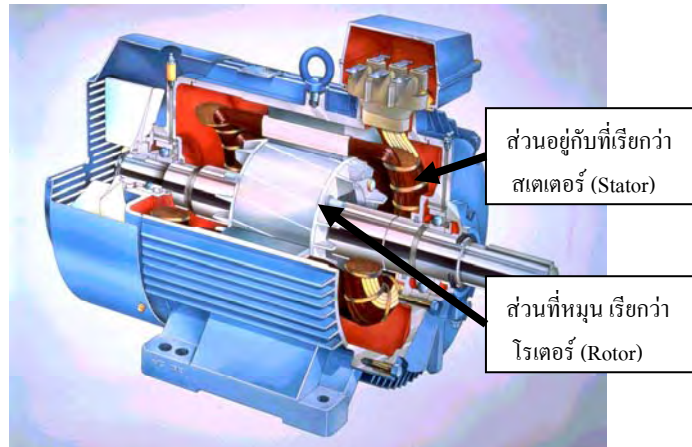
บทนำ (Introduction)

มอเตอร์ไฟฟ้าโดยปกติจะแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motors) และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motors) สำหรับในบทนี้จะไม่นับเรื่องมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากในปัจจุบันมีใช้งานเป็นส่วนน้อย และที่ใช้งานก็จะเป็นการใช้งานควบคู่กับระบบควบคุมความเร็ว ซึ่งช่วยในการประหยัดพลังงานอยู่แล้ว ดังนั้นจะกล่าวถึงเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีใช้งานอยู่มากมายและสามารถดำเนินการอนุรักษ์พลังงานได้ โดยเริ่มจากโครงสร้างหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า ประสิทธิภาพและการสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้า การเปรียบเทียบราคาและค่าใช้จ่ายในการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้าในกรณีต่างๆ เช่นการพันขลวมอเตอร์ไฟฟ้าใหม่ การใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีขนาดเหมาะสมกับภาระ การหลีกเลี่ยงการเดินมอเตอร์ไฟฟ้าตัวเปล่า การใช้อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าตามภาระการใช้งาน การเลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้า และการเลือกใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง ตลอดจนการบำรุงรักษามอเตอร์ไฟฟ้า

2.1 โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้า

2.1.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้โรงงานอุตสาหกรรมมีอยู่หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้งานมากที่สุด คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel cage rotor Induction motor) เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน แข็งแรง ราคาถูก สะดวกต่อการบำรุงรักษา และปัจจุบันสามารถปรับความเร็วรอบได้ง่ายกว่าในอดีต



รูปที่ 2.1 โครงสร้างส่วนประกอบมอเตอร์

โครงสร้างมอเตอร์

1. ส่วนอยู่กับที่ เรียกว่า สเตเตอร์ (Stator) ทำหน้าที่ยึดขดลวดที่บรรจุลงในร่องสลีต (Slot) ทำด้วยแผ่นเหล็กลามิเนต (Laminated Steel) บางๆ และมีร่องสลีตอัดเป็นแท่ง
2. ส่วนที่หมุน เรียกว่า โรเตอร์ (Rotor) จะมีแท่งตัวนำคล้ายกรงกระรอกฝังอยู่ในโรเตอร์ ที่ปลายทั้งสองของแท่งตัวนำจะถูกลัดวงจรด้วยตัวนำรูปวงแหวน แท่งตัวนำของโรเตอร์ มักมีลักษณะเฉียงเพราะจะทำให้มอเตอร์หมุนได้ราบเรียบและลดปัญหาเสียงฮัมของสนามแม่เหล็ก

การทำงานของมอเตอร์

การที่โรเตอร์หมุนได้เนื่องจากเมื่อขดลวดทองแดงที่พันอยู่กับสเตเตอร์มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating magnetic fields) หมุนรอบๆ แกนเหล็กสเตเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวดโรเตอร์ ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้จะสร้างแรงบิดที่โรเตอร์ทำให้โรเตอร์หมุนไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) ซึ่งหาได้จาก

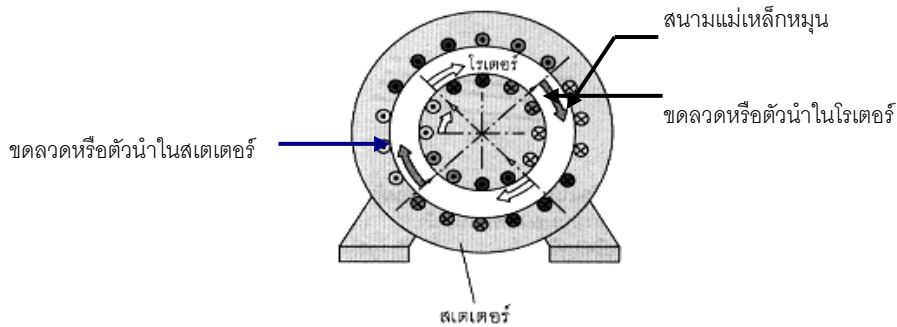
$$n_s = \frac{120 f}{P}$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ
 P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์

ในการใช้งานจริงมอเตอร์ไม่ได้หมุนที่ความเร็วซิงโครนัส แต่จะหมุนช้ากว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งผลต่างของความเร็วนี้ เรียกว่า ความเร็วไถล (Slip)

$$\text{โดย Slip, } s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

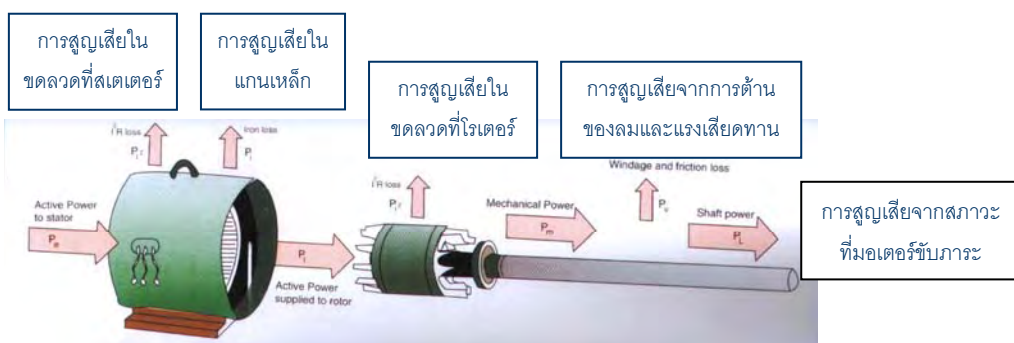
- เมื่อ s คือ ไถล (Slip)
- n_s คือ ความเร็วที่ซิงโครนัส
- n_r คือ ความเร็วของโรเตอร์



รูปที่ 2.2 การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

2.2 ประสิทธิภาพและการสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับค่าของการสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวมอเตอร์ โดยทั่วไปการสูญเสียในมอเตอร์เกิดจากการสูญเสียทางไฟฟ้า (Electrical loss) การสูญเสียจากการใช้งาน (Stray loss) ซึ่งแบ่งเป็นการสูญเสียที่มีค่าคงที่และการสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงตามภาระของมอเตอร์ ดังนี้



รูปที่ 2.3 การสูญเสียพลังงานในมอเตอร์

การสูญเสียที่มีค่าคงที่

- การสูญเสียที่แกนเหล็ก (Core loss) เกิดจากพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก (Hysteresis loss) รวมทั้งการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy loss) เรียกโดยรวมว่า “ค่าการสูญเสียขณะที่มีมอเตอร์ไม่มีภาระ” (No-load loss)
- การสูญเสียจากแรงลมและแรงเสียดทาน (Windage and Friction loss) เกิดจากแรงเสียดทานในคลัตช์ ลูกปืนและแรงต้านทานของครีบบรรยากาศที่ตัวมอเตอร์
- การสูญเสียที่สเตเตอร์ (Stator loss) จะอยู่ในรูปของความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดที่มีความต้านทานอยู่ภายใน
- การสูญเสียที่โรเตอร์ (Rotor loss) อยู่ในรูปความร้อนเช่นเดียวกับสเตเตอร์แต่เกิดที่ขดลวดในโรเตอร์

การสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงตามภาระการใช้งานของมอเตอร์

การสูญเสียจากภาระการใช้งาน เป็นการสูญเสียที่สเตเตอร์และโรเตอร์จะมีค่าการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของภาระ โดยเรียกว่า “ค่าความสูญเสียขณะที่มีมอเตอร์มีภาระ” เกิดจาก

- กระแสไหลวนในแกนเหล็กที่โรเตอร์ขณะที่มีภาระ
- กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดที่สเตเตอร์
- ค่าการสูญเสียจากค่ากระแสฮาร์มอนิกในตัวนำของโรเตอร์ขณะที่มีภาระ
- ค่าสนามแม่เหล็กรั่วไหลที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าขณะที่มีภาระ

ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์หาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพ (\%)} &= \frac{746 \times \text{แรงม้า (เอาต์พุต)}}{\text{วัตต์ (อินพุต)}} \times 100 \\ &= (\text{กำลังเอาต์พุต/กำลังอินพุต}) \times 100 \end{aligned}$$

ค่าประสิทธิภาพอาจเขียนอยู่ในรูปที่ 2.3 แสดงค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์ด้วยก็ได้ ดังสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพ (\%)} = (\text{กำลังเอาต์พุต}/(\text{กำลังเอาต์พุต}+\text{กำลังสูญเสีย})) \times 100$$

เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดควรจัดการให้มอเตอร์รับภาระที่ประมาณ 80-100% ของภาระเต็มที่ (Full-load) หรือค่าแรงม้า (Horse power) ที่บอกไว้ในป้ายชื่อ (Name plate) เป็นค่าของกำลังเอาต์พุต ส่วนค่ากำลังที่นำมาใช้จริง คือ ค่ากำลังอินพุต ปริมาณของพลังงานอินพุตที่ใช้ผลิตแรงม้าตามพิกัดนั้น จะแตกต่างกันไปสำหรับมอเตอร์แต่ละตัว มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าจะต้องการกำลังอินพุตน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพน้อยกว่าทำให้เอาต์พุตเท่ากัน

ข้อควรระวัง คือ ไม่ควรให้มอเตอร์รับภาระเกินกำลัง (Over load) เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพต่ำลงและความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้น

2.3 สมรรถนะการใช้งานและค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์

$$\begin{aligned} \text{สมรรถนะการใช้งาน} &= \frac{\text{กำลังไฟฟ้าที่วัดได้}}{\text{กำลังไฟฟ้าที่เนมเพลท}} \times 100 \\ \text{ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า} &= \frac{\text{กำลังไฟฟ้าจริง}}{\text{กำลังไฟฟ้าปรากฏ}} \\ \text{หรือ} \quad \cos \Phi &= \frac{\text{kW}}{\text{kVA}} \\ \text{kW} &= \text{kVA} \cos \Phi \\ \text{kVAr} &= \text{kVA} \sin \Phi \quad \text{หรือ} \quad \text{kW} \tan \\ \text{ตัวประกอบกำลัง} &= \frac{\text{กำลังไฟฟ้าจริง}}{\text{กำลังไฟฟ้าปรากฏ}} = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times I} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2.1 โรงงานแห่งหนึ่งติดตั้งมอเตอร์ขนาด 22 kW 380 V 50 Hz 43 A ทำหน้าที่ขับปั๊มน้ำขณะใช้งาน วัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

แรงดันไฟฟ้าวัดได้	378	V
กระแสไฟฟ้าวัดได้	42.73	A
กำลังไฟฟ้าที่วัดได้	21	kW

จงหาค่าสมรรถนะและค่าตัวประกอบกำลัง

$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \quad \text{สมรรถนะการใช้งาน} &= \frac{\text{กำลังไฟฟ้าที่วัดได้}}{\text{กำลังไฟฟ้าที่เนมเพลท}} \times 100 \\ &= \frac{21}{22} \times 100 \\ &= 95.45 \% \\ \text{ตัวประกอบกำลัง} &= \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times I} = P/S \\ &= \frac{21 \times 100}{\sqrt{3} \times 378 \times 42.73} \\ &= 0.75 \end{aligned}$$

หมายเหตุ ตัวประกอบกำลังที่ได้คือตัวประกอบกำลังขณะใช้งาน

2.4 การเปรียบเทียบราคาและค่าใช้จ่ายในการใช้งานของมอเตอร์

โดยเฉลี่ยแล้วราคาของมอเตอร์ที่ซื้อจะมีค่าประมาณ 1 ถึง 2% ของราคาค่าไฟฟ้าในการใช้งานมอเตอร์ตลอดอายุการใช้งาน (20 ปี) เช่น มอเตอร์มาตรฐานขนาด 55 kW ราคาประมาณ 90,000 บาท แต่ท่านอาจต้องจ่ายเงินสูงถึง 13 ล้านบาท เพื่อเป็นค่าไฟฟ้าตลอดอายุการใช้งาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนชั่วโมงการใช้งานต่อปี โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

1. ค่าพลังงานไฟฟ้าตลอดปี (บาท/ปี) = $(kW_{\text{ที่กัก}}/\text{eff}) \times \% \text{ภาระ} \times (\text{ชั่วโมงใช้งาน/ปี}) \times \text{อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า}$
2. ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าตลอดปี (บาท/ปี) = $kW_{\text{สูงสุดที่วัดในช่วง 15 นาทีในรอบเดือน}} \times \text{อัตราค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า} \times 12 \text{ เดือน}$
3. ค่าไฟฟ้ารวมทั้งหมด (บาท) = $(\text{ค่าพลังงานไฟฟ้าตลอดปี} + \text{ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าตลอดปี}) \times \text{อายุการใช้งาน}$

ตัวอย่างที่ 2.2 จากข้อมูลต่อไปนี้ จงคำนวณค่าใช้จ่ายในการใช้งานมอเตอร์ตลอดอายุการใช้งาน

มอเตอร์ขนาด	55	kW
(ประสิทธิภาพ 91.5 % เฉลี่ย 80 % ของภาระ)		
ราคา	90,000	บาท
ชั่วโมงการใช้งาน	4,000	ชั่วโมง/ปี
อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า	1.7034	บาท/kWh
อัตราค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด	256.07	บาท/kW

วิธีทำ

1. ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อปี = $(kW_{\text{ที่กัก}}/\text{eff}) \times \% \text{ภาระ} \times (\text{ชั่วโมงใช้งาน/ปี}) \times \text{อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า}$
 $= (55/0.915) \times 0.8 \times 4,000 \times 1.7034$
 $= 327,649 \text{ บาท/ปี}$
2. ค่าความต้องการ = $kW_{\text{สูงสุดที่วัดในช่วง 15 นาทีในรอบเดือน}} \times \text{อัตราค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า} \times 12 \text{ เดือน}$
 $= 55 \times 256.07 \times 12$
 $= 169,006 \text{ บาท/ปี}$
3. ค่าไฟฟ้ารวมทั้งหมด = $(327,649 + 169,006) \times 20 \text{ ปี}$
 $= 9,933,100 \text{ บาท}$
4. ราคาของมอเตอร์/ค่าไฟฟ้ารวมทั้งหมด = $(90,000/9,933,100) \times 100\% = 0.90\%$
 ดังนั้นราคาของมอเตอร์จะมีค่าเพียง 0.9 % ของค่าไฟฟ้ารวมทั้งหมดตลอดอายุการใช้งาน

2.5 การพันขดลวดมอเตอร์ใหม่

มอเตอร์เมื่อใช้งานไม่ถูกต้องอาจจะทำให้เกิดการไหม้ได้ ซึ่งโดยทั่วไปผู้ประกอบการมักจะนำมอเตอร์ไปพันขดลวดใหม่ แต่การพันขดลวดใหม่จะทำให้ประสิทธิภาพลดลงประมาณ 1-3% จนบางครั้งการซื้อมอเตอร์ใหม่ อาจจะประหยัดกว่าการพันใหม่เมื่อเปรียบเทียบจากระยะเวลาการใช้งานมอเตอร์ ดังนั้นถ้ามีความจำเป็นต้องพันขดลวดมอเตอร์ใหม่ ควรพิจารณาร้านหรือโรงงานที่รับพันขดลวดว่ามีมาตรฐานดีพอหรือไม่ ในขณะเดียวกันอาจเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้โดยการปรับปรุงวิธีการพัน และแกนเหล็กใหม่

ตัวอย่างที่ 2.3 โรงงานแห่งหนึ่งนำมอเตอร์ขนาด 22 kW ไปพันขดลวดใหม่เสียค่าใช้จ่าย 13,000 บาท พบว่าประสิทธิภาพลดลงเหลือ 84% ขณะที่มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงขนาด 22 kW ประสิทธิภาพ 92% ราคาตัวละ 43,000 บาท จงพิจารณาว่าควรเลือกวิธีการพันขดลวดใหม่หรือซื้อใหม่ ถ้ามอเตอร์มีภาระเฉลี่ย 80% และอัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 2.5 บาท/kWh ใช้งานวันละ 16 ชั่วโมง

วิธีทำ

กรณีพันขดลวดใหม่

$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ใช้} &= (\text{kW}_{\text{กัก}}/\text{eff}) \times (\text{ชั่วโมงใช้งาน/ปี}) \times \% \text{ภาระ} \\ &= (22/0.84) \times 16 \times 365 \times 0.8 \\ &= 122,362 \text{ kWh/ปี} \end{aligned}$$

กรณีซื้อใหม่

$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ใช้} &= (22/0.92) \times 16 \times 365 \times 0.8 \\ &= 111,722 \text{ kWh/ปี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ประหยัดได้} &= (122,362 - 111,722) \times 2.5 \\ &= 26,600 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

$$\text{ราคาของมอเตอร์ที่เพิ่มขึ้น} = 43,000 - 13,000 = 30,000 \text{ บาท}$$

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาคืนทุน} &= (30,000/26,600) \\ &= 1.12 \text{ ปี} \end{aligned}$$

ดังนั้นการซื้อมอเตอร์ใหม่น่าจะเหมาะสมกว่า

2.6 การใช้มอเตอร์ที่มีขนาดเหมาะสมกับภาระ

การใช้งานมอเตอร์ที่มีขนาดพิกัดสูงเกินไปจะทำให้มอเตอร์ทำงานที่เปอร์เซ็นต์ภาระต่ำๆ ซึ่งเป็นสภาวะการทำงานที่ไม่ดี เพราะมอเตอร์จะมีประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังต่ำลง เมื่อมองในแง่การประหยัดพลังงานแล้ว ควรจะใช้งานมอเตอร์ที่เหมาะสมกับภาระโดยประมาณ 80 - 100 % ของพิกัด ดังนั้นการวัดและตรวจสอบการใช้งานมอเตอร์ จึงมีความจำเป็นเพราะข้อมูลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อปรับเปลี่ยนขนาดของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับงาน

ตัวอย่างที่ 2.4 มอเตอร์ปั๊มน้ำขนาด 37 kW ประสิทธิภาพที่พิกัด (Full load) 90.5% ค่าตัวประกอบกำลัง 0.87 ขณะใช้งานวัดภาระทางไฟฟ้าได้ 9.9 kW ตัวประกอบกำลัง 0.54 ใช้งาน 24 ชั่วโมง/วัน โรงงานเปิดใช้งาน 300 วัน/ปี ราคาไฟฟ้าเฉลี่ย 2.5 บาท/kWh (Core loss ประมาณ 30% ของ Loss ทั้งหมด และ Copper loss ประมาณ 70% ของ Loss ทั้งหมด)

วิธีทำ ก่อนปรับปรุง

$$\begin{aligned} \text{Core loss} &= kW_{\text{พิกัด}} \times ((1/\text{eff})-1) \times \% \text{ Core loss} \\ &= 37 \times ((1/0.905)-1) \times 0.3 \\ &= 1.165 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Copper loss} &= kW_{\text{พิกัด}} \times ((1/\text{eff})-1) \times \% \text{ Copper loss} \times (kVA_{\text{ใช้งาน}} / kVA_{\text{พิกัด}})^2 \\ &= 37 \times ((1/0.905)-1) \times 0.7 \times ((9.9/0.54)/(37/0.87))^2 \\ &= 0.505 \text{ kW} \end{aligned}$$

ดังนั้น มีค่าความสูญเสียรวม 1.67 kW

หลังการปรับปรุง

เปลี่ยนมอเตอร์ปั๊มน้ำจาก 37 kW เป็น 11 kW ประสิทธิภาพที่พิกัด (full load) 89 % ตัวประกอบ กำลัง 0.84 ตัวประกอบกำลังขณะใช้งานมีค่าใกล้เคียงกับค่าตัวประกอบกำลัง (full load) ของมอเตอร์ตัวใหม่ 0.84 (Core loss ประมาณ 30% ของ Loss ทั้งหมด และ Copper loss ประมาณ 70% ของ Loss ทั้งหมด)

$$\begin{aligned} \text{Core loss} &= kW_{\text{พิกัด}} \times ((1/\text{eff})-1) \times \% \text{ Core loss} \\ &= 11 \times ((1/0.89)-1) \times 0.3 \\ &= 0.408 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Copper loss} &= kW_{\text{พิกัด}} \times ((1/\text{eff})-1) \times \% \text{ Copper loss} \times (kVA_{\text{ใช้งาน}} / kVA_{\text{พิกัด}})^2 \\ &= 11 \times ((1/0.89)-1) \times 0.7 \times ((9.9/0.84)/(11/0.84))^2 \\ &= 0.77 \text{ kW} \end{aligned}$$

ดังนั้น มีค่าความสูญเสียรวม 1.178 kW

$$\begin{aligned} \text{เงินที่ประหยัดได้} &= (1.67-1.178) \text{ kW} \times 24 \text{ (ชั่วโมง/วัน)} \times 300 \text{ (วัน/ปี)} \times 2.5 \text{ บาท/kWh} \\ &= 8,856 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

ผลการประหยัดจะมีค่ามากขึ้น หากการเปลี่ยนมอเตอร์พิจารณาประสิทธิภาพสูง แต่ราคาที่สูงตามด้วยเช่นกัน

2.7 การหลีกเลี่ยงการเดินมอเตอร์ตัวเปล่าและการใช้อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ตามภาระการใช้งาน

เนื่องจากในขณะที่มอเตอร์เดินตัวเปล่าไม่มีภาระ กำลังที่มอเตอร์ใช้จะถูกเปลี่ยนเป็นกำลังสูญเสียทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก กำลังสูญเสียในขดลวด กำลังสูญเสียเกิดจากแรงเสียดทาน และแรงต้านของพัดลมระบายอากาศ ดังนั้นไม่ควรปล่อยให้มอเตอร์เดินตัวเปล่า และการใช้อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ตามภาระการใช้งาน (Dynamic motor load control) ก็จะช่วยในการประหยัดพลังงาน ในขณะที่มอเตอร์เดินตัวเปล่าไม่มีภาระได้

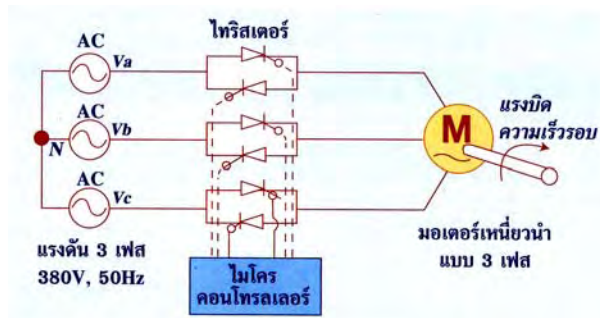
ตัวอย่างที่ 2.5 จากการสำรวจการใช้พลังงานในโรงงานแห่งหนึ่งพบว่า มีเครื่องจักรซึ่งใช้มอเตอร์ขนาด 18.7 kW เป็นตัวขับเคลื่อน วัดค่ากำลังไฟฟ้าขณะเดินเครื่องตัวเปล่า 3.71 kW เวลาในการเดินเครื่องตัวเปล่ารวมกันเฉลี่ย 3 ชั่วโมง/วัน โรงงานทำงาน 300 วัน/ปี ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 2.5 บาท/kWh ดังนั้นหากสามารถลดช่วงเวลากการเดินเครื่องตัวเปล่าได้ ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายเท่าใด

วิธีทำ เงินที่ประหยัดได้ = $kW_{ใช้งาน} \times \text{ชั่วโมงใช้งาน/ปี} \times \text{ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย}$

$$= 3.71 \times 3 \times 300 \times 2.5$$

$$= 8,347.5 \text{ บาท/ปี}$$

ปัจจุบันมีอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ตามภาระการใช้งาน (Dynamic motor load control) จะทำหน้าที่ ลดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กในขณะที่มอเตอร์ไม่มีภาระ ทำให้ค่าสูญเสียในมอเตอร์ลดลง ดังนั้นระยะเวลาที่มอเตอร์ไม่มีภาระแต่ยังคงต้องเดินมอเตอร์ไว้ จึงมีความสำคัญต่อผลการประหยัดพลังงานที่เกิดขึ้นเป็นอย่างมาก โดยปกติมอเตอร์ที่จะติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ตามภาระการใช้งาน ควรมีช่วงเวลา Unload หรือเดินเครื่องตัวเปล่าไม่ต่ำกว่า 60% ของระยะเวลาใช้งานทั้งหมด จึงจะทำให้ผลการประหยัดพลังงานเป็นที่น่าพอใจ

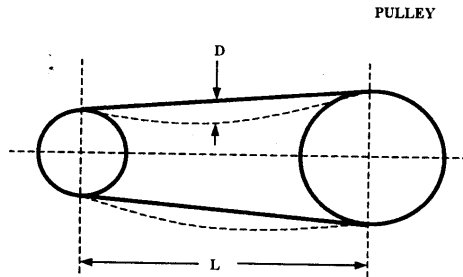


รูปที่ 2.4 วงจรการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ตามภาระการใช้งาน

การทำงานของอุปกรณ์จะประกอบด้วยไทรสเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ในการตัดต่อวงจรเพื่อปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ อุปกรณ์จะคำนวณภาระการใช้งานจริงของมอเตอร์โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลัง เมื่อภาระการใช้งานลดลง ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อสร้างแรงบิดตามภาระการใช้งานจริงสามารถลดลงได้โดยการลดขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ทำให้กระแสไฟฟ้ารวมที่จ่ายให้มอเตอร์ลดลง ส่งผลให้การสูญเสียในมอเตอร์ลดลงด้วย

2.8 การตรวจสอบปรับสายพานให้มีความตึงที่เหมาะสม

ควรมีการสำรวจและตรวจวัดการใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยสายพานภายในโรงงานว่ามีเครื่องจักรที่มีมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยสายพานแล้วมีสภาพหย่อนหรือไม่ โดยปกติการใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยสายพานนั้นก็จะเกิดการสูญเสียอยู่ระหว่าง 2-3 % แต่ถ้าสายพานหย่อนไปก็จะทำให้เกิดการสูญเสียเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นควรตรวจสอบสายพานเป็นประจำ โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การตรวจสอบปรับความตึงสายพาน

จาก $D = L / 100$

เมื่อ D คือ ระยะความหย่อนของสายพานที่เหมาะสม

L คือ ระยะความห่างของพูลี่

ถ้าให้ระยะความห่างของพูลี่ยาว 100 ซม. ก็จะได้ระยะความหย่อนของสายพานที่เหมาะสม

$$D = 100/100 = 1\text{ ซม.}$$

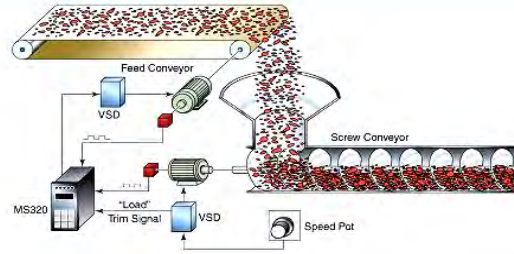
วิธีการตรวจสอบคือใช้นิ้วกดลงที่สายพาน ระยะ D จะต้องไม่ควรกว้างกว่าที่คำนวณได้

ตัวอย่างที่ 2.6 โรงงานใช้มอเตอร์ขนาด 37 kW เปิดใช้งาน 18 ชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลา 300 วันต่อปี เมื่อทางโรงงานทำการปรับสายพานให้มีความตึงที่เหมาะสม เป็นการช่วยลดการใช้พลังงานได้เท่าใด

$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ลดลง} &= \text{kW}_{\text{ที่คิด}} \times (\text{ชั่วโมงใช้งาน/ปี}) \times (\% \text{ ที่ประหยัดได้}) \\ &= 37 \times 18 \times 300 \times 3\% \text{ ที่ประหยัดได้} \\ &= 5,994 \text{ kWh/ปี} \\ \text{ค่าไฟฟ้าลดลง} &= 5,994 \text{ (kWh/ปี)} \times 2.5 \text{ (บาท/ kWh)} \\ &= 14,985 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

2.9 การเลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (Variable Speed Drive: VSD)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้เหมาะสมกับสภาวะของภาระ เป็นอุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ทำให้สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงานได้สูง



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการใช้งานอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

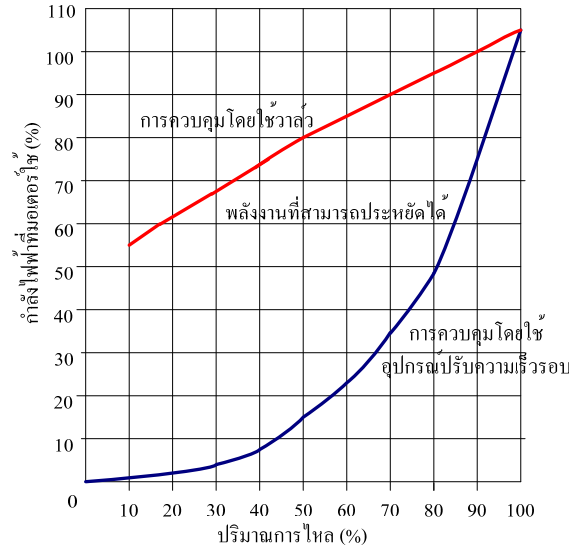
นอกจากนี้ยังสามารถใช้เครื่องควบคุมความเร็วรอบเพื่อปรับเปลี่ยนความถี่และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Voltage/frequency control: V/f) สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมความเร็วรอบให้สัมพันธ์กับความต้องการภาระของระบบ (Load demand) ได้อีกด้วย

ข้อดีของการใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

- สามารถปรับความเร็วรอบมอเตอร์ได้ ทำให้เลือกใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสมตามความต้องการของงานแต่ละประเภท
- มีการควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิด (Closed loop control) ทำให้ระบบมีการทำงานที่แม่นยำและมีเสถียรภาพอยู่ตลอดเวลา
- เป็นการเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานให้ถูกต้องตามความต้องการ เนื่องจากระบบมีความแม่นยำมากขึ้นทำให้ช่วยลดต้นทุนการผลิต
- ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องจักร และป้องกันการสูญเสียจากการทำงานของมอเตอร์ พัดลมและปั้มน้ำ
- ลดการกระชากไฟตอนเริ่มต้น ทำให้ลดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า (Demand) ลงได้
- ประหยัดพลังงาน โดยใช้พลังงานตามความจำเป็นของภาระ

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ตามความต้องการของภาระ

เมื่อก่อนนั้นการควบคุมปริมาณการไหลของปั้มน้ำ พัดลมและโบล์เวอร์ มักทำโดยให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วตามปกติแล้วควบคุมปริมาณการไหลโดยการใส่วาล์ว (Valve) หรือแดมเปอร์ (Damper) วิธีนี้ใช้อุปกรณ์ราคาถูกแต่ประสิทธิภาพต่ำจึงต้องเสียค่าใช้จ่ายแพงมาก ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้เปลี่ยนมาใช้วิธีการเปลี่ยนความเร็วรอบมอเตอร์ (Variable speed drive) ในการควบคุมปริมาณการไหลเพื่อประหยัดพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วิธีการควบคุมและกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้

ตารางที่ 2.1 กฎของปั้มน้ำ

Function	เปลี่ยนความเร็วรอบ	เปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลาง
อัตราการไหล	$Q_2 = Q_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$	$Q_2 = Q_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)$
หัวน้ำ	$h_2 = h_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$	$h_2 = h_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$
กำลังที่เพลา	$L_2 = L_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3$	$L_2 = L_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3$

ตารางที่ 2.2 กฎของพัดลม

Function	เปลี่ยนความเร็วรอบ	เปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลาง
ความจุอากาศ	$Q_2 = Q_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$	$Q_2 = Q_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)$
ความดันอากาศ	$P_2 = P_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$	$P_2 = P_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$
กำลังที่เพลา	$L_2 = L_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right)$	$L_2 = L_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3$

กำลังไฟฟ้าขาเข้าของปั้มน้ำและพัดลม : $L_M = \frac{L_2}{\eta_m}$

สัญลักษณ์ตัวห้อย 1 และ 2 แทนก่อนและหลังการควบคุมความเร็วรอบและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของใบพัดตามลำดับ

ตัวอย่างที่ 2.7 โบลว์เวอร์ถูกควบคุมความเร็วรอบโดยใช้อินเวอร์เตอร์ให้ลดลงเป็น 60% ของความเร็วเต็มพิกัด ถ้าปริมาณอากาศขณะเดินเต็มที่เป็น 3,000 m³/min ความดัน 100 Pa กำลังที่เพลา 50 kW (ประสิทธิภาพของโบลว์เวอร์เปลี่ยนจาก 80% เป็น 72%) จงคำนวณหาความจุอากาศ ความดัน และกำลังที่เพลา เมื่อลดความเร็วรอบลง และถ้าโรงงานทำงาน 16 ชั่วโมง/วัน 300 วัน/ปี จงคำนวณผลการประหยัด โดยคิดที่อัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 2.5 บาท/kWh

วิธีทำ จากสมการ

$$Q_2 = Q_1(N_2/N_1)$$

$$P_2 = P_1 (N_2/N_1)^2$$

$$L_2 = L_1(N_2/N_1)^3(\eta_1/\eta_2)$$

แทนค่า

$$Q_2 = 3,000 \times 0.6$$

$$= 1,800 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$P_2 = 100 \times (0.6)^2$$

$$= 36 \text{ Pa}$$

$$L_2 = 50 \times (0.6)^3 \times (80/72)$$

$$= 12 \text{ kW}$$

ผลของการประหยัดพลังงาน (50-12) kW = 38 kW

ดังนั้น โรงงานประหยัดเงินได้ = 38 kW × 16 ชั่วโมง/วัน × 300 วัน/ปี × 2.5 บาท/kWh
= 456,000 บาท/ปี

2.10 วิธีการอนุรักษ์พลังงานปั๊มน้ำและพัดลมอุตสาหกรรม

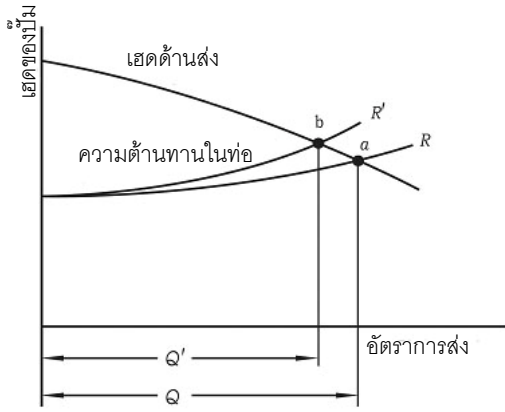
เส้นโค้งลักษณะสมบัติของปั๊มน้ำ (Pump Characteristic curve)

เส้นโค้งลักษณะสมบัติของปั๊มเป็นการแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำกับแรงดันน้ำ โดยการเดินท่อทำให้เกิดความต้านทานในท่อ ซึ่งแปรผกผันกับกำลังสองของความเร็วในการไหล ทำให้กราฟของความต้านทานในท่ออยู่ในรูปพาราโบลา

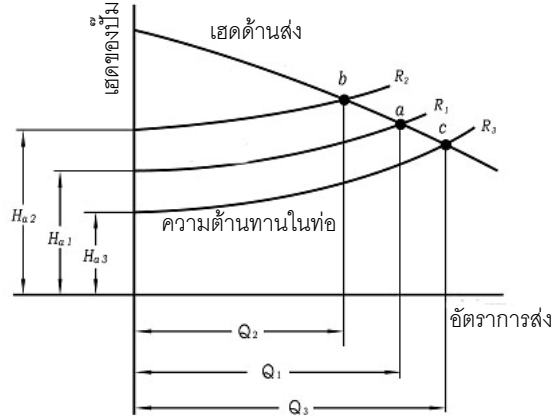
จุดทำงานของปั๊มน้ำเมื่อเส้นความต้านทานของท่อเปลี่ยน

อันเนื่องมาจากสนิมและรอยขรุขระในท่อที่ใช้งานมานานทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น เส้น Resistance curve จะเปลี่ยนจาก R ไปเป็น R' ดังรูปที่ 2.8 ดังนั้นจุดทำงานจึงเคลื่อนจาก a ไป b ทำให้ปริมาณของน้ำที่จ่ายออกลดลง ทำให้กราฟของความต้านทานภายในท่ออยู่ในรูปพาราโบลา

จากรูปที่ 2.9 ถ้าระดับน้ำในถังเปลี่ยนหรือความดันเปลี่ยน เส้นความต้านทานในท่อ จะเคลื่อนขึ้น ลงขนานกับ R₁ R₂ หรือ R₃ และจุดทำงานจะเคลื่อนไปเป็น b หรือ c ตามลำดับ ในกรณีที่เสดจริงเปลี่ยนแปลงบ่อยเนื่องจากการใช้น้ำ ตำแหน่งของจุดประสิทธิภาพสูงสุดจะพิจารณาจากช่วงการเปลี่ยนแปลงและเสดจริง



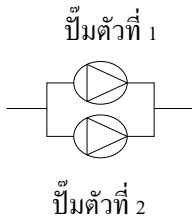
รูปที่ 2.8 จุดทำงานเมื่อเส้นความต้านทานเปลี่ยน



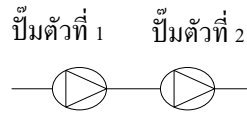
รูปที่ 2.9 จุดทำงานเมื่อเสดจริงเปลี่ยน

การติดตั้งปั๊มแบบอนุกรมและแบบขนาน

การติดตั้งปั๊มหลายตัวในระบบ เพื่อให้ทำให้ระบบมีเสดสูงขึ้นหรือมีอัตราการไหลสูงขึ้น สามารถทำได้โดยการติดตั้งปั๊มให้มีลักษณะการต่อแบบอนุกรมและแบบขนาน ในทางปฏิบัติการต่อปั๊มทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน จะต้องติดตั้งวาล์วกันไหลกลับ (Check valve) เพื่อที่จะป้องกันการไหลย้อนกลับของของไหล (Black flow) ซึ่งจะส่งผลให้ชิ้นส่วนของปั๊มได้รับความเสียหายได้ และอาจติดตั้งวาล์วควบคุมการไหล (Shutoff valve) ทางด้านท่อดูดและท่อปล่อยของระบบ เพื่อควบคุมอัตราการไหลของของไหลในระบบ

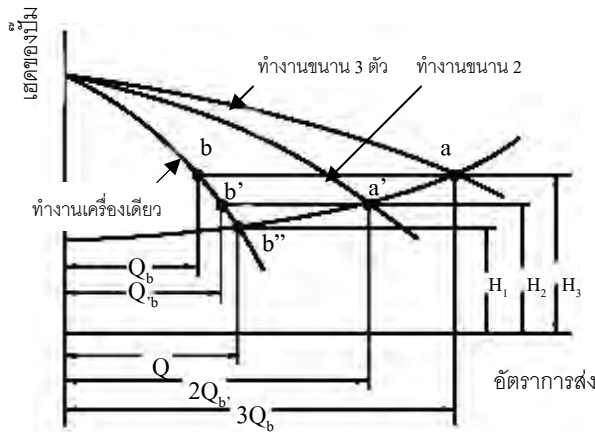


(ก) การติดตั้งแบบขนาน

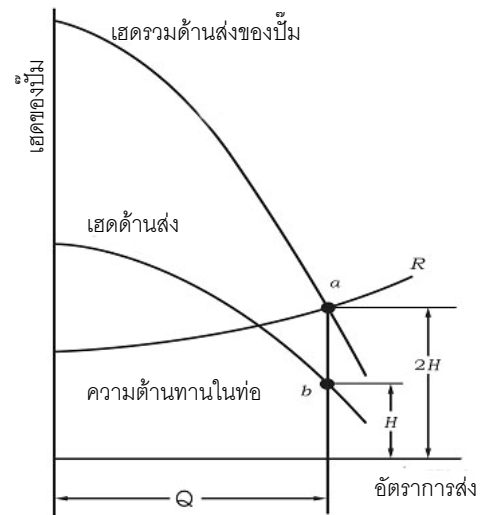


(ข) การติดตั้งแบบอนุกรม

รูปที่ 2.10 การติดตั้งปั๊มแบบขนานและแบบอนุกรม



รูปที่ 2.11 ลักษณะการเดินปั๊มแบบขนาน



รูปที่ 2.12 ลักษณะการเดินปั๊มแบบอนุกรม

การติดตั้งปั๊มแบบขนาน เมื่อปั๊มหลายตัวนำมาใช้งานร่วมกันแบบขนาน เส้นกราฟเฮดของปั๊มทั้งหมดได้จากการรวมจำนวนการจ่ายน้ำของปั๊มแต่ละตัวดังรูปที่ 2.11 ในกรณีเดินขนานและ เส้นความต้านทานในท่อคงที่ จะทำให้ได้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจาก Q เป็น $2Q_b$ และ $3Q_b$ ที่มีค่าเฮดไม่เพิ่มมากนัก จาก H_1 เป็น H_2 และ H_3 จุด b'' คือจุดทำงานของปั๊มเดี่ยว จุด a' คือ จุดทำงานของปั๊ม 2 ตัว (เทียบเท่ากับจุด b' ของปั๊มเดี่ยว) และจุด a คือ จุดทำงานของปั๊ม 3 ตัว (เทียบเท่ากับจุด b ของปั๊มเดี่ยว) ที่ความต้านทานในท่อ เดียวกัน

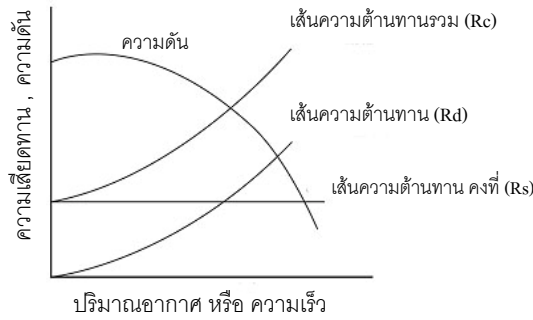
การต่อปั๊มน้ำเพื่อเดินอนุกรม จะทำให้เฮดของระบบมีค่าสูงขึ้น แต่มีอัตราการไหลของของไหลภายในระบบไม่เปลี่ยนแปลง เฮดของระบบที่เพิ่มสูงขึ้นสามารถหาได้จากผลรวมของเฮดของปั๊มแต่ละเครื่อง

แนวทางการประหยัดพลังงานของปั๊มน้ำอุตสาหกรรม

1. **เลือกใช้ชนิดที่มีประสิทธิภาพสูง** การเลือกปั๊มปกติจะเลือกตามปริมาณน้ำ แรงดันน้ำและจุดประสงค์การใช้งาน การเลือกให้ปั๊มมีประสิทธิภาพสูงที่จุดทำงานเป็นสิ่งสำคัญมาก
2. **การลดค่าแรงดันหัวน้ำของปั๊ม** การลดค่าแรงดันหัวน้ำของปั๊มลง จะทำให้กำลังที่ต้องการจากมอเตอร์น้อยลงและสามารถประหยัดพลังงานได้ วิธีการลดค่าแรงดันหัวน้ำสามารถทำได้โดย
 - พยายามลดตำแหน่งงอ โค้งงอของท่อให้เหลือน้อย
 - ท่อ วาล์วและอุปกรณ์อื่นๆ เลือกใช้ของที่มีความต้านทานน้อย
 - ทำความสะอาดใบพัด ฟิวเตอร์และส่วนประกอบอื่นๆ ของปั๊มเป็นประจำ
 - ตรวจสอบตำแหน่งที่มีการรั่วซึม เช่น จากแบริงของปั๊มหรือตามท่อน้ำแล้วทำการซ่อมให้เรียบร้อย

3. **การควบคุมปริมาณน้ำ** เท่าที่ผ่านมาการควบคุมปริมาณน้ำทำได้โดยการใส่วาล์วปรับค่าให้เหมาะสมกับภาระ ซึ่งไม่ได้ทำให้กำลังที่มอเตอร์ลดลง จึงไม่มีผลต่อการประหยัดพลังงาน แต่เมื่อใช้วิธีการควบคุมความเร็วรอบของปั๊มให้เหมาะสมกับสภาพของภาระจะทำให้กำลังที่มอเตอร์ลดลง และมีผลในการประหยัดพลังงานสูง

เส้นโค้งสมรรถนะของพัดลมและโบลั้วเวอร์



รูปที่ 2.13 เส้นโค้งความดันและความต้านทาน

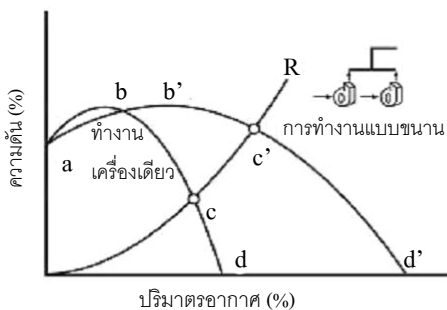
เมื่ออากาศไหลผ่านท่อหรืออุปกรณ์ นั่นคือความดันจากพัดลมต้องมากกว่าความต้านทานของท่อหรืออุปกรณ์ จากรูปที่ 2.13 ความต้านทานของระบบจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ Rd ซึ่งเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของความเร็วของอากาศ (หรือปริมาตรของอากาศเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่) และ Rs คือความต้านทานที่คงที่โดยไม่คำนึงถึงความเร็วลม อาจกล่าวได้ว่าขึ้นอยู่กับ Rd เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามในกรณีที่อากาศไหลผ่านถึงความดันหรือปล่อยน้ำจากที่สูง เช่น Aeration blower แน่นอนจะมีความต้านทาน Rs ด้วย และความต้านทานรวมจะเป็น Rc

การติดตั้งพัดลมแบบขนานและแบบอนุกรม

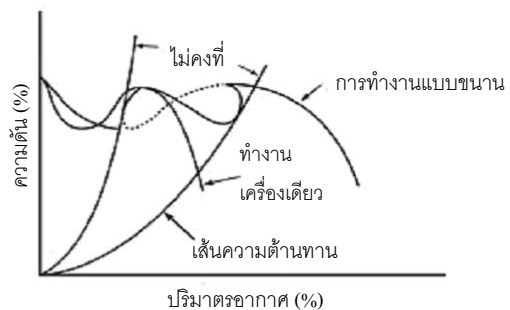
การขนาน

หากต้องการปริมาณอากาศจำนวนมากจะใช้โบลั้วเวอร์ 2 ตัว หรือมากกว่าทำงานขนานกัน ถ้าโบลั้วเวอร์ 2 ตัวที่มีการทำงานเหมือนกันมาขนานกันจะมีคุณลักษณะตามเส้นโค้ง a b' c' d' ในรูปที่ 2.14 ซึ่งจะได้ปริมาณอากาศเป็น 2 เท่าที่ความดันเดียวกัน เมื่อเทียบกับการใช้โบลั้วเวอร์ตัวเดียวตามเส้นโค้ง a b c d อย่างไรก็ตามปริมาณอากาศจริง c' ในการเดิน โบลั้วเวอร์ 2 ตัวขนานกันไม่จำเป็นจะต้องได้เป็น 2 เท่าของการเดินตัวเดียว c ถ้าความต้านทานในระบบมีค่าสูงจะมีผลน้อยเมื่อเดินแบบขนาน

โบลั้วเวอร์ (แบบหลายใบหรือแบบแเอ็กเซียลโฟล) เมื่อเดินขนาน เส้นโค้งคุณลักษณะจะเป็นหุบเขาลงไปคล้ายรูปตัว S ในรูปที่ 2.15 ปริมาตรของอากาศจะกระเพื่อมในช่วงรูปตัว S และการทำงานจะไม่คงที่



รูปที่ 2.14 เดินขนาน

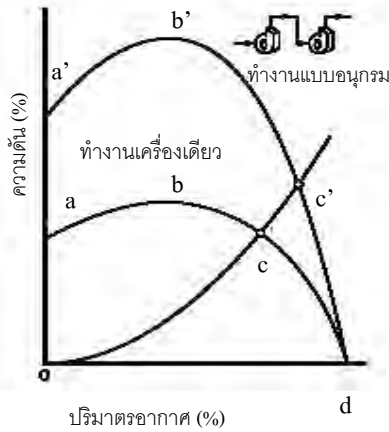


รูปที่ 2.15 คุณลักษณะรูป S

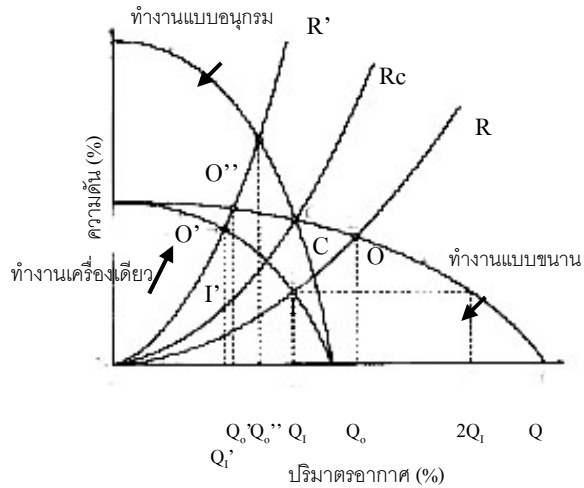
การอนุกรม

เมื่อต้องการความดันสูงๆ จะใช้โบลั้วเวอร์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปทำงานเป็นอนุกรมกัน ในกรณีโบลั้วเวอร์ 2 ตัวที่มีสมรรถนะการทำงานเหมือนกับเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะเป็นไปตามรูปที่ 2.16 เส้นโค้ง a' b' c' d จะได้รับความดันเพิ่มเป็น 2 เท่าในปริมาตรอากาศเหมือนกันกับเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะ a b c d ใน รูปที่ 2.16 ในทางปฏิบัติความดันที่ได้จะไม่เป็น 2 เท่าของโบลั้วเวอร์ที่ทำงานตัวเดียว

ในการทำงานที่เป็นอนุกรมกัน ระบบความดันทานที่ไม่สูงจะมีผลน้อยมากในการเดินอนุกรม



รูปที่ 2.16 เดินอนุกรม



รูปที่ 2.17 เปรียบเทียบการเดินพัลลม

แบบขนานและแบบ

จากรูปที่ 2.17 เป็นการนำเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะของพัลลมที่ต่อแบบอนุกรมและแบบขนานมาเปรียบเทียบ จุดตัดระหว่างเส้นความดันทาน R กับเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะ ก็คือจุดทำงาน จุด C คือจุดทำงานที่เรียกว่าเป็นจุดวิกฤต ทั้งนี้เพราะเมื่อต่อพัลลมแบบอนุกรมหรือแบบขนานแล้วจะให้ผลเท่ากัน ดังนั้นหากเส้นความดันทานมีค่าสูง (อยู่ทางด้านซ้ายของจุด C) ต่อแบบอนุกรมจะดีกว่าต่อแบบขนาน (ให้ Q มากกว่า) ในทางตรงข้าม หากเส้นความดันทานมีน้อย (อยู่ทางด้านขวาของจุด C) ต่อแบบขนานจะดีกว่า

แนวทางการประหยัดพลังงานของพัลลมอุตสาหกรรม

1. การเลือกเครื่องส่งลมที่มีประสิทธิภาพสูง โดยทั่วไปจะเลือกจากปริมาณลม Static pressure และจุดมุ่งหมายของงาน การเลือกพัลลมที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงโดยการดูจากเส้นโค้งลักษณะสมบัติ เป็นสิ่งสำคัญ
2. ลด Static pressure หรือ Total pressure static pressure ของพัลลม เป็นผลรวมของความดันทานของท่อและแฉลมเปอร์ ถ้าสามารถลด Static pressure ได้ก็จะสามารถลดปริมาณลมที่ไม่จำเป็นลงได้ ซึ่งมีผลต่อการประหยัดพลังงาน ในการลด Static pressure นั้นสามารถทำได้ดังนี้
 - แทนที่จะใช้ท่อแบบความเร็วสูงให้เปลี่ยนมาใช้ท่อแบบความเร็วขนาดกลาง และพยายามลดข้อโค้งงอให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อลดความดันทานของท่อ
 - แฉลมเปอร์และชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ ให้เลือกใช้แบบที่มีความดันทานน้อย
 - ทำความสะอาดใบพัด ฟิวเตอร์ที่ช่องลมดูดและลมเป่าออกของพัลลมเป็นประจำ
 - ตรวจตราการรั่วของอากาศตามท่อ ถ้ามีให้ทำการซ่อมแซมเสีย

3. **ควบคุมปริมาณลม** โดยทั่วไปการควบคุมปริมาณลมให้เหมาะสมกับสภาพภาระจะทำโดยใช้แอมเปอร์ ซึ่งไม่มีผลทางด้านการประหยัดพลังงานเพราะกำลังขาออกของมอเตอร์ไม่ได้ลดลง เมื่อใช้วิธีปรับความเร็วรอบของมอเตอร์พัดลมแทนทำให้กำลังขาออกของมอเตอร์ลดลงได้ จึงมีผลต่อการประหยัดพลังงาน

2.11 มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

ปัจจุบันได้มีการผลิตมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงออกสู่ตลาด โดยพยายามผลิตให้มีราคาสูงขึ้นไม่มากแต่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่า ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์เพิ่มขึ้นประมาณ 2-4% หรือสามารถลดการสูญเสียพลังงานได้ประมาณ 25-30% นอกจากจะประหยัดพลังงานแล้วมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงยังมีข้อดีอื่นๆ อีกคือเกิดความร้อนจากการทำงานน้อยกว่า อายุการใช้งานของฉนวนและลูกปืนยาวนานขึ้น การสิ้นเสียดิน น้อยกว่า มีเสียงรบกวนน้อย และค่าตัวประกอบกำลังดีขึ้น ผู้ผลิตมอเตอร์ได้มีการเปลี่ยนแปลงรายละเอียดในการออกแบบ และการเลือกใช้วัสดุ ในการผลิตที่ดีขึ้น เพิ่มค่าประสิทธิภาพให้กับมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.18

1. **ปรับปรุงคุณภาพของแกนเหล็ก** มอเตอร์ทั่วไปใช้เหล็กแผ่นที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนต่ำ (Low carbon laminated steel) สำหรับตัวแกนเหล็กที่สเตเตอร์และ โรเตอร์ ซึ่งแกนเหล็กดังกล่าวมีค่าการสูญเสียทางไฟฟ้าเทียบกับน้ำหนักประมาณ 6.6 วัตต์ต่อเหล็ก 1 กิโลกรัม แต่มอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงใช้แผ่นเหล็กซิลิกอนคุณภาพสูง (High silicon steel) ซึ่งมีค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าลดลงถึงครึ่งหนึ่ง คือ เหลือเพียงประมาณ 3.3 วัตต์ต่อเหล็ก 1 กิโลกรัม

2. **แผ่นเหล็กที่มีขนาดบางลง** การลดความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กทั้งใน สเตเตอร์ และ โรเตอร์ ช่วยลดการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลวน ซึ่งเมื่อรวมกับการปรับปรุงฉนวนระหว่าง แผ่นเหล็กแล้ว ช่วยลดค่าการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลวนได้มากยิ่งขึ้น

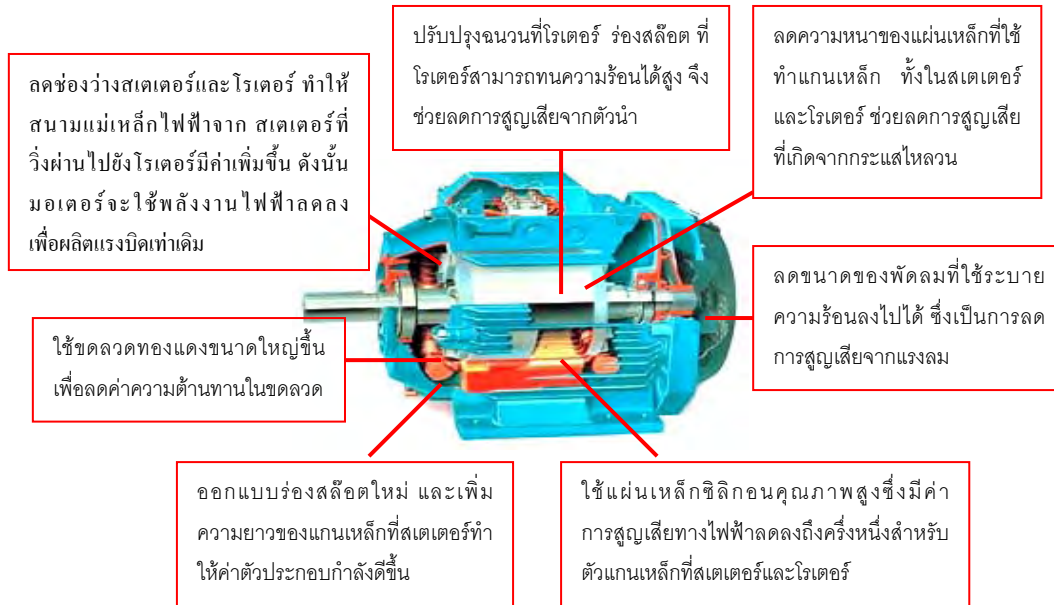
3. **เพิ่มปริมาณตัวนำ** มอเตอร์รุ่นเก่าๆ ใช้ลวดทองแดงหรือลวดอะลูมิเนียมที่มีขนาดพอดีกับกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากภาระของมอเตอร์ แต่มอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงจะใช้ขดลวดทองแดงขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลดค่าความต้านทานในขดลวด โดยขนาดของตัวนำจะใหญ่กว่าประมาณ 35-40 เปอร์เซ็นต์

4. **ปรับปรุงร่องสล็อต** เพื่อรองรับขนาดของขดลวดที่ใหญ่ขึ้น จึงมีการปรับปรุงและออกแบบร่องสล็อตใหม่ รวมทั้งเพิ่มความยาวของแกนเหล็กที่สเตเตอร์ด้วย ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังดีขึ้น

2. **ลดช่องว่างสเตเตอร์และโรเตอร์** การลดช่องว่างที่เป็นทางเดินของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสเตเตอร์ที่วิ่งผ่านไปยัง โรเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นมอเตอร์จะใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลงเพื่อผลิตแรงบิดเท่าเดิม นอกจากนี้การเพิ่มความยาวของแกนเหล็กยังเป็นการเพิ่มปริมาณสนามแม่เหล็ก เช่นเดียวกับกับการลดช่องว่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์

6. **ปรับปรุงฉนวนที่โรเตอร์** ร่องสล็อตที่โรเตอร์จะได้รับการตรวจสอบเป็นอย่างดี และเคลือบด้วยฉนวนที่สามารถทนความร้อนได้สูง จึงช่วยลดการสูญเสียจากตัวนำที่ไม่เรียบร้อยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตขณะฝังตัวนำเข้าไปในโรเตอร์ ซึ่งโดยปกติแล้วตัวนำที่อยู่ที่โรเตอร์จะถูกถอดออกแบบไว้ในลักษณะเป็นแนวเดียวกับแนวแกนของโรเตอร์เพื่อที่จะลดเสียงรบกวนและแรงบิดที่ไม่สม่ำเสมอในมอเตอร์ขนาดเล็ก

7. ออกแบบพัฒนาใหม่ มอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงมีอุณหภูมิต่ำขณะทำงานเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ธรรมดา เป็นผลให้ลดขนาดของพัฒนาที่ใช้ระบายความร้อนลงไปได้ ซึ่งเป็นการลดความสูญเสียจากแรงลมรวมทั้งลดระดับเสียงของพัฒนาในขณะทำงานด้วย



รูปที่ 2.18 การปรับปรุงส่วนต่างๆของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

ความแตกต่างในเรื่องค่าพลังงาน

ในปัจจุบันมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงจะมีราคาสูงกว่ามอเตอร์มาตรฐานประมาณ 20% ราคาที่เพิ่มขึ้นนี้ จะกลับคืนมาในรูปแบบของการประหยัดค่าพลังงาน จากการที่ประสิทธิภาพของมอเตอร์นั้นสูงขึ้น การประหยัดค่าพลังงาน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าพลังงานที่ประหยัดได้} = \text{ค่าไฟฟ้าโดยเฉลี่ย} \times \text{กิโลวัตต์ชั่วโมงที่ประหยัดได้}$$

$$\text{กิโลวัตต์ชั่วโมงที่ประหยัด} = \text{กิโลวัตต์ที่ลดลง} \times \text{ชั่วโมงการทำงานตลอดปี}$$

$$\text{กิโลวัตต์ที่ลดลง} = \text{kW}_{\text{ที่คิด}} \times \left[\frac{100}{\text{eff}_{\text{มอเตอร์มาตรฐาน}}} - \frac{100}{\text{eff}_{\text{มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง}}} \right]$$

โดย $\text{eff}_{\text{มอเตอร์มาตรฐาน}}$ คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์มาตรฐาน
 $\text{eff}_{\text{มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง}}$ คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

การคำนวณความเป็นไปได้ในการลงทุนใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง โดยทั่วไปจะใช้วิธีที่เรียกว่า “ระยะคืนทุนแบบเชิงเดียว” (Simple payback)

$$\begin{aligned} \text{ระยะคืนทุนแบบเชิงเดียว} &= \frac{\text{ราคาที่เพิ่มขึ้น} *}{\text{ค่าพลังงานที่ประหยัดได้}} \\ &= \frac{\text{ราคามอเตอร์ประสิทธิภาพสูง} - \text{ราคามอเตอร์มาตรฐาน}}{\text{ค่าพลังงานที่ประหยัดได้}} \end{aligned}$$

* ใช้เมื่อซื้อมอเตอร์ใหม่เท่านั้น

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพมอเตอร์มาตรฐานกับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

ขนาดพิกัด (แรงแม้า)	2 ขั้ว (3,000 รอบ/นาที)		4 ขั้ว (1,500 รอบ/นาที)	
	มอเตอร์ มาตรฐาน	มอเตอร์ ประสิทธิภาพสูง	มอเตอร์ มาตรฐาน	มอเตอร์ ประสิทธิภาพสูง
3	80.0	84.0	81.5	86.5
5	82.5	86.5	82.5	86.5
7.5	82.5	87.5	82.5	88.5
10	82.5	88.5	82.5	88.5
15	82.5	89.5	86.5	90.2
20	86.5	89.5	88.5	90.2
25	87.5	90.2	89.5	91.7
30	87.5	90.2	89.5	91.7
40	88.5	91.0	90.2	92.4
50	88.5	91.7	91.0	92.4
60	90.2	92.4	91.7	93.0
75	91.0	92.4	91.7	93.6
100	91.7	93.0	92.4	94.1
125	91.7	94.1	92.4	94.1
150	91.7	94.1	93.0	94.5
200	93.0	94.5	93.6	94.5
250	93.5	92.0	93.8	92.0
300	93.5	92.0	93.8	92.0
400	93.5	92.0	93.8	92.0
500	93.5	92.0	94.0	92.4

ที่มา : กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงาน” ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย

ประหยัดได้อย่างไร

การใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงจะทำให้เกิดการประหยัดได้อย่างไรนั้น มีข้อเปรียบเทียบให้เห็นได้ชัด ก็คือคิดที่ต้นทุนจากค่าพลังงานไฟฟ้า และต้นทุนจากการบำรุงรักษา

ต้นทุนที่เกิดจากค่าพลังงานไฟฟ้า เป็นตัวอย่างที่ใช้กันทั่วไปเมื่อจะแสดงให้เห็นถึงผลดีของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง และยังสามารถแสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงอย่างได้ผล ทรายบดที่ค่าไฟฟ้ายังคงเป็นส่วนประกอบสำคัญของต้นทุนที่ใช้ในการผลิตสินค้าต่างๆ

ตัวอย่างที่ 2.8 หากซื้อมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงมาใช้แทนมอเตอร์มาตรฐาน ถ้าขนาดของมอเตอร์ที่ต้องใช้นั้นเท่ากับ 45 กิโลวัตต์ เราจะประหยัดค่าพลังงานได้เท่าไร และระยะคืนทุนแบบเชิงเดียวจะมีค่าเท่าใด

ข้อมูล :

ขนาดมอเตอร์	45	kW
ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์มาตรฐาน	91.5%	(ที่ 75% ของภาระเต็มกำลัง)
ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง	93.9%	(ที่ 75% ของภาระเต็มกำลัง)
ราคาที่สูงกว่าของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง	10,000	บาท
ชั่วโมงการใช้งาน	2,000	ชั่วโมงต่อปี
ค่าไฟฟ้าโดยเฉลี่ย	2.5	บาท/kWh

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{กิโลวัตต์ที่ลดลง} &= 45 \times ((100/91.5) - (100/93.9)) \times 0.75 \\ &= 0.95 \text{ kW} \\ \text{กิโลวัตต์ที่ประหยัดได้} &= 0.95 \times 2,000 \\ &= 1,900 \text{ kWh/ปี} \\ \text{ค่าพลังงานที่ประหยัดได้} &= 1,900 \times 2.5 \\ &= 4,750 \text{ บาท/ปี} \\ \text{ค่าพลังงานที่ประหยัดได้ตลอดอายุการใช้งาน} &= 95,000 \text{ บาทในเวลา 20 ปี} \\ \text{ระยะเวลาคืนทุนแบบเชิงเดียว} &= (10,000 \text{ บาท}/4,750 \text{ บาท}) \\ &= 2.11 \text{ ปี} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2.9 พิจารณาถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น 1% เช่นจาก 94% เป็น 95% ของมอเตอร์ขนาด 500 แรงม้า ทำงานที่ 80% ของพิกัดกำลังจะทำให้มอเตอร์ใช้กำลังไฟฟ้าลดลงเท่าใด (โดยกำหนดให้ 1 แรงม้า เท่ากับ 746 W)

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ประสิทธิภาพ 94% ต้องการ} &= 0.746 \times 500 \times \frac{0.8}{0.94} = 317.45 \text{ kW} \\ \text{กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ประสิทธิภาพ 95% ต้องการ} &= 0.746 \times 500 \times \frac{0.8}{0.95} = 314.11 \text{ kW} \end{aligned}$$

ดังนั้นมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ 95% จะกินกำลังไฟฟ้าน้อยกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ 94% เป็นจำนวนเท่ากับ $317.45 - 314.11 = 3.34 \text{ kW}$

ถ้ามอเตอร์ทำงานในลักษณะที่ต่อเนื่องทุกวันๆละ 24 ชั่วโมง ตลอดปีประมาณ 8,760 ชั่วโมง ก็จะทำให้ประหยัดค่าไฟฟ้าได้จำนวนมาก แต่ถ้ามอเตอร์ทำงานในลักษณะที่ต่อเนื่องเป็นช่วงๆ ซึ่งชั่วโมง การทำงานจะลดลง เช่น ประมาณ 6,000 ชั่วโมงใน 1 ปี ผลการประหยัดก็จะลดลงตามระยะเวลาการใช้งานและคิดอัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ยที่ 2.5 บาท/kWh ก็จะสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้จากค่าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น 1 % เท่ากับ $3.34 \times 6,000 \times 2.5 = 50,100$ บาท/ปี ซึ่งในการใช้งานจริงๆ นั้น นอกจากค่าพลังงานไฟฟ้า ที่ผู้ประกอบการต้องชำระแล้วยังต้องชำระค่า ความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand) ให้กับทางการไฟฟ้าด้วย ดังนั้นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้จะมีค่า มากกว่าตัวเลขที่คำนวณได้

ตัวอย่างที่ 2.10 จากการสำรวจพบว่าโรงงานแห่งหนึ่งมีการใช้มอเตอร์ขนาด 55 kW แต่ถ้าเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ ประสิทธิภาพสูง อยากรทราบว่าการประหยัดที่ได้จะมีเท่าไร

ข้อมูล :

ขนาดพิกัดมอเตอร์	55	kW
ประสิทธิภาพมอเตอร์มาตรฐาน	91.5%	เฉลี่ย 80% ของภาระ
ประสิทธิภาพมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง	94.5%	เฉลี่ย 80% ของภาระ
ชั่วโมงใช้งานต่อปี	6,000	ชั่วโมง/ปี

การคำนวณ :

$$\begin{aligned} \text{กิโลวัตต์ชั่วโมงที่ประหยัดได้} &= 55 \times 0.8 \times ((100/91.5) - (100/94.5)) \times 6,000 \\ &= 9,161 \text{ kWh/ปี} \\ \text{ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้} &= 9,161 \times 2.5 \\ &= 22,902.5 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2.11 จากข้อมูลในตัวอย่างที่ 2.10 คำนวณหาระยะเวลาที่คืนทุนอย่างง่าย

$$\begin{aligned} \text{ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี} &= 22,902.5 \text{ บาท/ปี} \\ \text{ราคามอเตอร์ ขนาด 55 kW} &= 90,000 \text{ บาท} \\ \text{มอเตอร์มาตรฐานทั่วไป} &= 135,000 \text{ บาท} \\ \text{ราคาซื้อมอเตอร์ที่เพิ่มขึ้น} &= 135,000 - 90,000 \text{ บาท} \\ &= 45,000 \text{ บาท} \\ \text{ระยะเวลาที่คืนทุนอย่างง่าย} &= (45,000 \text{ บาท} / 22,902.5 \text{ บาท/ปี}) \\ &= 1.96 \text{ ปี} \end{aligned}$$

ต้นทุนด้านการบำรุงรักษา

โดยทั่วไปความเสียหายของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากตลับลูกปืนอันเนื่องมาจากมีอายุการใช้งานมากเกินไป มีการหล่อลื่นไม่ดี และมีฝุ่นผงเข้าไปในตลับลูกปืน ตลอดจนการติดตั้งที่ไม่ถูกต้อง แม้ว่าปัจจุบันจะมีเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบ วิเคราะห์และทำนายสภาพของตลับลูกปืน เพื่อบำรุงรักษาก่อนที่จะเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง แต่การใช้อุปกรณ์เหล่านั้นไม่ใช่การแก้ปัญหาที่ต้นเหตุของความเสียหาย

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืน ไม่ได้เกิดจากการขาดการบำรุงรักษาเพียงเท่านั้น อุณหภูมิของมอเตอร์ในขณะที่ทำงานเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อายุการใช้งานของตลับลูกปืนลดลง อุณหภูมิของมอเตอร์ในขณะที่ทำงาน เป็นผลจากอุณหภูมิภายนอกและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในตัวมอเตอร์เอง ซึ่งโดยปกติแล้วจะไม่ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิภายนอกของมอเตอร์กันเท่าไรนัก แต่การใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง จะช่วยลดการเพิ่มและสะสมของอุณหภูมิได้ดี เมื่อเทียบกับมอเตอร์มาตรฐานทั่วไป นอกจากนี้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงยังใช้ตลับลูกปืนที่มีคุณภาพสูงอีกด้วย ดังนั้นมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงจะมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำเนื่องจากมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าและ ประสิทธิภาพการใช้งานก็นานกว่า

ถึงแม้ว่าตลับลูกปืนจะเป็นสาเหตุหลักของความเสียหายของมอเตอร์ แต่องค์ประกอบอื่นๆ เช่น ความเสียหายทางกล (Mechanical damage) สภาพแวดล้อมที่มอเตอร์ติดตั้งอยู่ และการติดตั้งที่ไม่ถูกต้อง เช่น เพล่าที่ขยับ การไม่ได้ศูนย์ (Alignment) สิ่งเหล่านี้ก็เป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้มอเตอร์เสียหายได้เช่นกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงอายุการใช้งานของมอเตอร์จึงต้องนำตัวแปรอื่นๆ มาวิเคราะห์ด้วย

การพิจารณาใช้มอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง

(1) พิจารณาเลือกซื้อมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงอย่างไร

การเลือกซื้อหรือเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ให้เป็นมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ควรพิจารณาเมื่อเครื่องที่ใช้อยู่เดิมชำรุด ซึ่งพิจารณาได้ดังนี้

- หากมอเตอร์ที่มีอาการเสีย มีขนาดต่ำกว่า 10 kW ให้เปลี่ยนได้เลย
- หากมอเตอร์ที่มีอาการเสีย มีขนาดมากกว่า 10 kW สามารถไปพันขดลวดได้ใหม่ประมาณ 1-2 ครั้ง เพราะหากเกินกว่านี้ราคาซ่อมจะสูงกว่าการซื้อเครื่องใหม่
- ให้เลือกเปลี่ยนจากมอเตอร์ที่มีขนาดเล็กและมีชั่วโมงการทำงานสูง
- มอเตอร์ที่มีอายุการใช้งานเกินกว่า 15 ปี ให้เปลี่ยนได้ทันที

(2) เมื่อไรจึงจะใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

ควรพิจารณาการใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงในสถานการณ์ดังต่อไปนี้

- ควรซื้อมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงสำหรับโรงงานใหม่
 - เมื่อมีการซื้อมอเตอร์ใหม่ มักจะมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น (ซึ่งเรียกว่า Price Premium : ราคามอเตอร์ประสิทธิภาพสูง - ราคามอเตอร์มาตรฐาน) ถึงแม้ว่าจะมีค่าใช้จ่ายดังกล่าวเพิ่มเติม แต่การใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงยังคงเป็นที่น่าสนใจในการลงทุน
- ควรซื้อมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงแทนการนำมอเตอร์มาตรฐานมาพันขดลวดใหม่

- มอเตอร์ที่นำมาพันขดลวดใหม่ (ส่วนใหญ่จะเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่กว่า 10 kW) ประสิทธิภาพจะลดลงถึง 2%
- ในกรณีนี้ ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นทั้งหมดจะเท่ากับผลรวมของประสิทธิภาพที่ลดลงเนื่องจากการพันขดลวดใหม่ (มากถึง 2%) กับประสิทธิภาพที่ดีขึ้นจากประสิทธิภาพของมอเตอร์มาตรฐาน
- สำหรับกรณีนี้ ราคาที่สูงขึ้นคือราคาของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงลบด้วยค่าพันขดลวดใหม่
- การซื้อมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง เพื่อนำมาใช้เป็นมอเตอร์สำรอง
 - เมื่อจำเป็นต้องซื้อมอเตอร์สำหรับเป็นมอเตอร์สำรองเพื่อใช้แทนมอเตอร์ที่ใหม่จะเป็นโอกาสที่เหมาะสมและเป็นการคุ้มค่าที่จะเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงแทนมอเตอร์มาตรฐาน

ในแต่ละกรณีที่กล่าวมาข้างต้น ควรมีการคำนวณระยะคืนทุนเชิงเดียว เพื่อช่วยในการตัดสินใจว่าสมควรติดตั้งมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงหรือไม่

2.12 การบำรุงรักษามอเตอร์

การดูแลมอเตอร์ในขณะที่มอเตอร์ยังอยู่ในสภาพใช้งานได้จะมี 2 แนวทาง ดังนี้

1) Preventive Maintenance (PM) หรือการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ลักษณะนี้จะมีการตั้งเวลาชั่วโมงการทำงาน และแต่ละค่าของชั่วโมงจะมีลักษณะการเข้าทำ PM เช่น ตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 2.4 เป็นการป้องกันมอเตอร์จากการเกิดปัญหาได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น แต่ก็ยังมีผลเสียที่อาจเกิดขึ้นโดยทั่วไป เช่น

- แปร่งถ่านอาจจะแตกหักก่อน 2,000 ชั่วโมง ทำให้เกิดการหยุดมอเตอร์ก่อน 2,000 ชั่วโมง โดยไม่ได้วางแผนล่วงหน้า
- แปร่งถ่านยังคงใช้งานได้ และยังมีอายุที่ยังใช้งานได้ แต่ต้องถูกเปลี่ยนที่ 2,000 ชั่วโมง เมื่อถึงกำหนดเวลา
- แบร์ริงอาจจะเสียหายก่อน 10,000 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างการตั้งชั่วโมงทำงานและลักษณะการทำงาน PM

ชั่วโมงการทำงาน	ลักษณะการทำงาน PM
- ทุก 1,000	- อัดจารบี 40 gm
- ทุก 2,000	- เปลี่ยนแปร่งถ่าน
- ทุก 10,000	- เปลี่ยน Bearing
- ทุก 20,000	- ถอด ล้างทำความสะอาดและอบวานิชใหม่

จะเห็นได้ว่าลักษณะการบำรุงรักษาเชิงป้องกันไว้ก่อนยังมีผลเสียเด่นชัด 2 ประการ คือ

- เวลาหยุดมอเตอร์ (Shutdown) โดยไม่จำเป็นหรือไม่ได้วางแผนไว้ก่อน ในกรณีที่เวลาการทำ PM ยังไม่ถึง
- เสียอะไหล่ (Spare parts) โดยไม่จำเป็นในกรณีที่เวลาการทำ PM มาถึง

2) Predictive maintenance หรือการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ ซึ่งจะทำโดยการตั้งชั่วโมงการทำงานเพื่อเข้าตรวจเช็ค และจากผลการตรวจเช็คนี้จะนำไปวิเคราะห์หาค่าแนวโน้มของปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้น เพื่อหาทางป้องกันความเสียหาย หรือเวลาหยุดของมอเตอร์ สรุปคือมี 2 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดชั่วโมงทำงานเข้าตรวจเช็ค เช่น

ชั่วโมงการทำงาน	ลักษณะเข้าตรวจเช็ค
500	- อุณหภูมิเบร้ง และ Frame มอเตอร์
100	- ความสั่นสะเทือน (Vibration)

ขั้นตอนที่ 2 นำข้อมูลจากขั้นตอนที่ 1 มาเก็บข้อมูล และวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบแนวโน้ม และเทียบกับค่ามาตรฐาน เช่น

หัวข้อวิเคราะห์	ชั่วโมงการทำงาน			
	500	1,000	1,500	2,000
- อุณหภูมิเบร้งของมอเตอร์ A ด้าน Drive	60	65	68	71
- อุณหภูมิเบร้งของมอเตอร์ B	60	61	60	60

จะเห็นว่าแนวโน้มของอุณหภูมิเบร้งด้าน Drive ของมอเตอร์ A จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะที่อุณหภูมิเบร้งด้าน Drive ของมอเตอร์ B ยังคงที่อยู่ นั่นคือ ควรจะมีการหาสาเหตุการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของมอเตอร์ A ว่าเนื่องมาจากอะไร แล้ววางแผนหยุดและทำการแก้ไข ซึ่งในลักษณะการหยุดนี้ จะเกิดก่อนที่มอเตอร์จะเกิดความเสียหายมาก และเป็นลักษณะที่มีการวางแผนไว้ก่อน นั่นคือจะเกิดการสูญเสียน้อยที่สุด

ควรมีการตรวจเช็คมอเตอร์อย่างสม่ำเสมอพร้อมกับการทำ PM พื้นฐาน (เช่น การอัดจารบี) ซึ่งเรียกลักษณะดังกล่าวนี้รวมๆ ว่า Predictive maintenance ลักษณะการ PM แบบ Predictive นี้ช่วยให้ทราบประวัติของมอเตอร์ แนวโน้มของปัญหาที่จะเกิดขึ้น และการวางแผนแก้ไขระยะยาว รวมทั้งการประหยัดต้นทุนของอะไหล่ และหยุดมอเตอร์โดยไม่จำเป็น

ขั้นตอนการบำรุงรักษา

- 1) ทำ Check list ของจุดที่ควรทำการเช็คและกำหนดชั่วโมงการทำงานเข้าตรวจเช็ค
- 2) เข้าตรวจเช็คตามชั่วโมงที่กำหนด
- 3) วิเคราะห์ค่าแนวโน้มของข้อมูล
- 4) ทำการแก้ไขมอเตอร์ที่มีแนวโน้มทำงานบางอย่างไม่ได้ เช่น อุณหภูมิสูงขึ้น แล้วทำการตรวจเช็คอีกครั้ง
 1. ขณะมอเตอร์ยังใช้งานอยู่
 - ควรเติมจารบีกรณีครบรอบหรือเบร้งมีเสียงดัง
 - ตรวจสอบการระบายความร้อน มีอะไรขวางทางลมหรือการระบายอากาศหรือไม่
 2. ขณะมอเตอร์หยุดนิ่ง
 - กรณีไม่มีความเสียหายให้ทำการขันจุดต่อของไฟฟ้า และสภาพทั่วไปของเครื่องจักร
 - กรณีเสียหายต้องถอดมอเตอร์มาทำการเปิดตรวจเช็คจุดต่าง ๆ

3. การพิจารณาค่าจากการตรวจเช็คต่างๆ บางครั้งสามารถเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานได้ เช่น ค่าความสั่นสะเทือน (Vibration) ถ้าหากมีค่าสูงกว่ามาตรฐานอาจจะต้องมีการหยุดเครื่องจักร เพื่อตรวจเช็คละเอียดอีกครั้งว่ามีสาเหตุมาจากอะไร โดยสาเหตุของความสั่นสะเทือนอาจจะเนื่องมาจาก

- การตั้งศูนย์ (Alignment) ไม่ดี
- โรเตอร์ของมอเตอร์เกิดไม่สมดุล (Unbalance)
- เฟรมของมอเตอร์บิดเสียรูป
- แท่งโรเตอร์บาร์ (กรณีมอเตอร์กระแสกรอก) เกิดการแตกหัก
- ขามอเตอร์ไม่ได้ระดับ (Soft foot)

4. ในกรณีที่มอเตอร์สกปรกมาก และต้องการล้างสิ่งสกปรกออก ควรจะทำการถอด แยกชิ้นส่วนมอเตอร์ก่อน แล้วแยกล้างเป็นชิ้นส่วน เช่น Stator, Rotor อื่นๆ โดยการล้าง อาจจะใช้ น้ำสะอาด สารละลายซึ่งไม่กัดกร่อนจำพวก Solvent ต่างๆ แล้วนำชิ้นส่วนเหล่านั้นมาอบให้แห้งสนิทก่อนจะทำการประกอบใหม่
หมายเหตุ หลังจากอบแห้งแล้วอาจนำ Stator หรือ Rotor ที่มีขดลวดมาทำการจุ่มวานิช เพื่อปิดจุดแตก (Crack) ของฉนวน ซึ่งเป็นการยืดอายุของฉนวน

2.13 สรุปแนวทางการอนุรักษ์พลังงานมอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามาก การใช้มอเตอร์ให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้ามีข้อปฏิบัติ ดังนี้

- เลือกขนาดของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าบริเวณนั้นมีค่าต่ำ ขนาดของมอเตอร์ต้องเหมาะสมกับภาระจึงจะทำให้การสูญเสียที่เกิดขึ้น โดยไม่จำเป็นนั้นลดน้อยลง
- เลือกประสิทธิภาพของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับสภาวะการดำเนินงานซึ่งควรอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์การลงทุนโดยพิจารณาถึงราคาซื้อ ชั่วโมงการทำงาน ประสิทธิภาพของมอเตอร์และค่าไฟฟ้า
- ปิดมอเตอร์ทุกครั้งเมื่อไม่มีการใช้ เนื่องจากการเดินเครื่องทิ้งไว้โดยไม่มีภาระงานจะใช้พลังงานประมาณ 10-20% ของพลังงานที่ใช้ขณะที่มอเตอร์ทำงานที่ภาระเต็มกำลัง
- ควรมีการตรวจสอบการใช้งานมอเตอร์เพื่อพิจารณาใช้ตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์
- ควรมีการตรวจสอบว่ามีอุณหภูมิที่สูงผิดปกติของทั้งมอเตอร์และระบบจ่ายไฟฟ้าหรือไม่ เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น จะแสดงถึงการสูญเสียกำลังของมอเตอร์และทำให้ประสิทธิภาพลดลง
- ควรใช้การขับเคลื่อนโดยตรงเมื่อมีโอกาส เนื่องจากการขับเคลื่อนทางอ้อม (เช่น ขับเคลื่อนด้วยสายพาน) จะเกิดการสูญเสียพลังงานเป็นจำนวนมาก
- ถ้าแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ 3 เฟสไม่สมดุลย์ อาจมีการสูญเสียพลังงานจำนวนมากได้ จึงควรมีการตรวจสอบความสมดุลย์ของแรงดันไฟฟ้าเป็นประจำ
- เลือกใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงแทนมอเตอร์แบบมาตรฐานเมื่อเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่
- หลีกเลี่ยงการเริ่มเดินเครื่องและกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ขนาดใหญ่ในช่วงเวลาที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด

- ปรับปรุงและบำรุงรักษาระบบทางกลของมอเตอร์อยู่เสมอ เช่น ตรวจสอบความตึงของสายพาน อัดจาระบีและหยอดน้ำมันหล่อลื่นตามกำหนด เพื่อลดกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานหรือความฝืด
- ควรติดตั้งมอเตอร์ในบริเวณที่มีอากาศถ่ายเทได้ดี เพราะการใช้งานมอเตอร์ในที่ๆ มีอุณหภูมิสูง จะทำให้กำลังสูญเสียของมอเตอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนของขดลวดมีค่าเพิ่มขึ้น
- ตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ ถ้าหากแรงดันไฟฟ้าสูงเกินกว่าพิกัดที่บอกไว้บนป้ายเครื่อง จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กมากขึ้นกว่าพิกัด ทำให้สมรรถนะการทำงานของมอเตอร์เปลี่ยนไปและมีผลต่ออายุการใช้งานมอเตอร์
- การใช้งานมอเตอร์อย่างถูกต้อง จะใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงทำให้ต้นทุนลดลง ช่วยเพิ่มศักยภาพ การแข่งขันทางการตลาดได้ ทำให้เกิดความมั่นคงแก่อุตสาหกรรมมากขึ้น และสิ่งสำคัญนอกเหนือจากนี้ก็คือ เป็นการช่วยประหยัดพลังงาน โดยรวมของประเทศได้อีกทางหนึ่งด้วย

2.14 กิจกรรม

1. จงอธิบายหลักการทำงานเบื้องต้น ของมอเตอร์ไฟฟ้ามาพอสังเขป
2. อธิบายความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพจากการใช้งานมอเตอร์กับค่าความสูญเสียในมอเตอร์มาพอสังเขป
3. อธิบายผลที่เกิดขึ้นจากการนำมอเตอร์ไปพันขดลวดใหม่
4. จงบอกแนวทางการอนุรักษ์พลังงานมอเตอร์ไฟฟ้า อย่างน้อย 5 แนวทาง
5. จงอธิบายความแตกต่างของมอเตอร์ไฟฟ้ามาตรฐานกับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง
6. จงบอกข้อพิจารณาที่จะนำมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงมาใช้งาน อย่างน้อย 5 ข้อ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Werner Leonhard. *Control of Electrical Drives*. 3 rd Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001
- [2] กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน, สำนักคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงและการปรับความเร็วมอเตอร์.
- [3] กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, การประยุกต์ใช้พระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน. มาตรการประหยัดพลังงานมาตรฐาน มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง. พฤษภาคม, 2543.
- [4] วิชระ มิ่งวิฑิตกุล. กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงาน สำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม. ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย. พฤศจิกายน, 2544
- [5] วรวิทย์ อึ้งภากรณ์. คู่มือบำรุงรักษาตู้ลบลูกปืน เอส เค เอฟ, พฤศจิกายน 2535
- [6] ศิริพรรณ ชงชัย. การใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนอย่างมีประสิทธิภาพ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2545
- [7] ศิริพรรณ ชงชัย และ พิชัย อัยภูมิมงคล. การอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้า. : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548.
- [8] ศูนย์วิทยาการอนุรักษ์พลังงาน, กองฝึกอบรม. การใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและตัวขับเคลื่อนอย่างประหยัดพลังงาน. เอกสารเผยแพร่ แนวทางการปฏิบัติงานที่ดี หมายเลข 14. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน. สิงหาคม, 2546
- [9] ศูนย์วิทยาการอนุรักษ์พลังงาน, กองฝึกอบรม. อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ตามภาระการใช้งาน. เอกสารเผยแพร่ กรณีศึกษา 011. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน. มิถุนายน, 2547
- [10] ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย. เอกสารฝึกอบรมการจัดการอนุรักษ์พลังงานในอุตสาหกรรมโรงงานน้ำแข็ง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน.
- [11] ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย. ร่างตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบพลังงาน (ผชพ) PREs อาวุโสด้านไฟฟ้า. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน. มีนาคม, 2548
- [12] ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย. ร่างตำราฝึกอบรมการอนุรักษ์พลังงานภาคปฏิบัติ (Mini Plant) ด้านไฟฟ้า. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน. มีนาคม, 2548

ภาคผนวก

ตารางที่ 2.5 การตรวจวัดการใช้พลังงานของมอเตอร์

เครื่องจักร	ชนิดมอเตอร์ (AC/DC)	ชั่วโมง ใช้งาน ต่อวัน	พิกัดมอเตอร์ (ค่าจากเนมเพลท)			
			ขนาด มอเตอร์ (kW)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	ค่าตัว ประกอบกำลัง (PF)

เครื่องจักร	ผลจากการตรวจวัด						สมรรถนะ (%)
	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)			กำลังไฟฟ้า (kW)	ค่าตัว ประกอบกำลัง (PF)	

เครื่องจักร	การปรับปรุงแก้ไข		วิธีปรับปรุง	กำลังไฟฟ้าหลัง ปรับปรุง
	ไม่ปรับปรุง	ปรับปรุง		

$$\text{ค่าตัวประกอบกำลัง} = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times I}$$

$$\text{สมรรถนะการใช้งาน} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าที่วัดได้}}{\text{กำลังไฟฟ้าที่เนมเพรท}} \times 100$$

ตารางที่ 2.6 การบันทึกข้อมูลการใช้งานปั้มน้ำ

หมายเลข	ตำแหน่งติดตั้ง	ขนาดมอเตอร์ (kW)	กระแสไฟฟ้า (A)			แรงดันไฟฟ้า (V)	ความดัน (Psig)		การทำงาน		หมายเหตุ
			เฟส R	เฟส S	เฟส T		หน้าปั้ม	หลังปั้ม	เริ่ม	หยุด	

ตารางที่ 2.7 การบำรุงรักษาปั้มน้ำประเภทแรงเหวี่ยงชนิดเพลาอนในแนวราบ

การบำรุงรักษาปั้มน้ำ ประจำวัน 6 เดือน 1 ปี

วันที่.....เดือน.....ปี.....

ยี่ห้อเครื่องปั้มน้ำ.....รุ่น.....หมายเลขเครื่อง.....

ชื่อผู้ทำการบำรุงรักษา.....ชื่อหัวหน้าผู้ควบคุม.....

การซ่อมบำรุงรักษา	ผลการซ่อมบำรุงรักษาและ แก้ไข		หมายเหตุ
	ใช้งานได้ตามปกติ	ปรับปรุง /สาเหตุ	
<input type="checkbox"/> ตรวจสอบทุกวัน			
1. อุณหภูมิของร่อนลื่น			
2. ความดันทางท่อดูดและท่อจ่าย			
3. การรั่วจากกันรั้ว			
4. การหล่อลื่นกันรั้ว			
2. ภาระ (Load) ของเครื่องปั้มน้ำ			
6. ระดับเสียงและการสั่นสะเทือน			
7. ระดับน้ำมันหล่อลื่นที่มาหล่อเลี้ยงร่อนลื่น			
<input type="checkbox"/> ตรวจสอบทุก 6 เดือน			
1. การได้ศูนย์ระหว่างปั้มน้ำกับต้นกำลัง			
2. การเติมน้ำมันหรือไขให้กับร่อนลื่น			
<input type="checkbox"/> ตรวจสอบทุก 1 ปี			
1. การรั้วตามเพลาและการซ่อมบำรุงกันรั้ว			
2. การสึกของปลอกเพลา			
3. ช่องว่างระหว่างใบพัดและแหวนกันสึก			
4. ทดสอบและปรับแก้เกอวัดต่างๆ ที่ใช้วัดน้ำและ กระแสไฟฟ้า			
2. เปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นและไขที่ร่อนลื่น			

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างราคากลางมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

ขนาด มอเตอร์	ราคา (บาท) (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม)			ราคา (บาท) (รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม 7 %)		
	Price (Baht) @ 38 B/\$			Price (Baht) @ 38 B/\$		
Motor kW	2 โพล	4 โพล	6 โพล	2 โพล	4 โพล	6 โพล
	2 poles	4 poles	6 poles	2 poles	4 poles	6 poles
0.75	-	-	9,000	-	-	9,630
1.1	7,800	7,800	12,000	8,346	8,346	12,840
1.5	8,900	8,900	14,000	9,523	9,523	14,980
2.2	11,700	10,500	16,900	12,519	11,235	18,083
3.7	13,700	13,500	20,000	14,659	14,445	21,400
2.5	19,600	17,800	29,500	20,972	19,046	31,565
7.5	22,500	20,000	37,900	24,075	21,400	40,553
11	32,500	29,600	40,500	34,775	31,672	43,335
15	35,000	34,800	46,600	37,450	37,236	49,862
18.5	43,000	42,900	60,000	46,010	45,903	64,200
22	46,500	47,500	65,700	49,755	50,825	70,299
30	65,000	61,800	81,500	69,550	66,126	87,205
37	71,500	62,900	89,000	76,505	67,303	95,230
45	82,900	74,000	144,500	88,703	79,180	154,615
55	94,500	82,700	157,000	101,115	88,489	167,990
75	142,700	153,600	206,000	152,689	164,352	220,420
90	156,700	168,000	249,000	167,669	179,760	266,430
110	200,000	199,000	281,000	214,000	212,930	300,670