

การปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์

Efficiency Improvement of Compressor Motor

สลิลทิพย์ สิ้นธุสนธิชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

โทรศัพท์ 02-9883666 ต่อ 3305

E-mail: saliltip@mut.ac.th

Manuscript received May 31, 2020

Revised June 18, 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการออกแบบ จำลอง และจัดสร้างมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ โดยมุ่งเน้นศึกษา และพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ชนิดที่เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดคาร์ปาซิเตอร์ต่อร่วมถาวรให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยใช้โครงสร้างสเตเตอร์ และแกนโรเตอร์ของมอเตอร์ตามโครงสร้างเดิมของบริษัทผู้ผลิต การออกแบบมอเตอร์ใช้วิธีการลดค่าความสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ และความสูญเสียในแกนเหล็กสเตเตอร์โดยออกแบบมอเตอร์ที่มีคุณลักษณะแตกต่างกันหลายรูปแบบ และนำข้อมูลที่ได้ออกแบบไว้ไปจำลองคุณสมบัติ และพฤติกรรมต่าง ๆ ของมอเตอร์โดยใช้โปรแกรม CAMS หลังจากนั้นทำการจัดสร้างและทดสอบคุณสมบัติ และสมรรถนะการทำงานของมอเตอร์รวมทั้งนำข้อมูลที่ไปเปรียบเทียบกับมอเตอร์แบบดั้งเดิมของบริษัทผู้ผลิต เพื่อยืนยัน และแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ: มอเตอร์คอมเพรสเซอร์, การปรับปรุงประสิทธิภาพ, การออกแบบ จำลอง และจัดสร้าง

ABSTRACT

This paper proposes the design, simulation, and implementation of compressor motors in which the

study and development of the compressor motor efficiency as the type of Permanent Split Capacitor Motor (PSCM) are emphasized. The proposed PSCMs are based on the conventional stator and rotor structures of a manufacturer. The design is focused on the decrease of both the stator copper loss and the stator core losses. Computer Aided Motor Simulation (CAMS) program is used as a tool to calculate the proposed motors behaviors. To investigate and verify the design, after that, the motors are implemented and experimented. The given results of the designed motors are compared with the conventional ones. The proposed technique is found to be useful for efficiency improvement of the motor compressor.

Keywords: Compressor Motor, Efficiency Improvement, Design, Simulation, and Implementation

1. โครงสร้างพื้นฐานมอเตอร์คอมเพรสเซอร์

มอเตอร์คอมเพรสเซอร์ขนาดเล็กส่วนใหญ่ที่นิยมใช้โดยทั่วไปเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุต่อร่วมถาวร หรือบางครั้งมักถูกเรียกว่าคาปาซิเตอร์รัน ซึ่งประกอบด้วยขดลวดหลัก (main winding) ขดลวดช่วย (auxiliary winding) และตัวเก็บประจุต่อร่วมถาวร วงจรการต่อใช้งาน และเฟสเซอร์เป็นดังรูปที่ 1 ในการออกแบบขดลวดนั้น ขดลวดหลักใช้ตัวนำขนาดใหญ่ ค่าความต้านทานจึงน้อย ส่วนขดลวดช่วยตัวนำมีขนาดเล็กกว่าขดลวดหลัก ทำให้มีค่าความต้านทานมาก และเมื่อนำตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสมมาต่ออนุกรมกับขดลวดช่วย จะทำให้กระแสไฟฟ้าของ

ขดลวดช่วย I_{aux} มีมุมหน้าหน้าแรงดันไฟฟ้า เมื่อ δ คือมุมระหว่างกระแสไฟฟ้า I_{aux} และกระแสไฟฟ้า I_{main} เมื่อ $\delta=90^\circ$ จะทำให้มอเตอร์เกิดแรงบิดสูงสุด [1]

2. การออกแบบเพื่อลดค่าความสูญเสีย

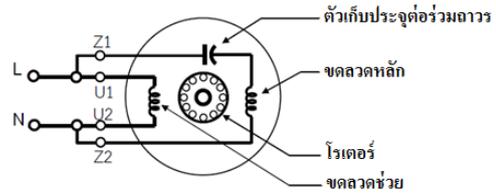
เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการใช้โครงสเตเตอร์ และแกนโรเตอร์ของมอเตอร์ตามโครงสร้างเดิมของบริษัทผู้ผลิต ดังนั้นการออกแบบมอเตอร์ใช้การลดค่าความสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ และความสูญเสียในแกนเหล็กสเตเตอร์ในรูปแบบที่มีคุณลักษณะแตกต่างกัน [2] จึงทำการศึกษ ออกแบบ จัดสร้าง และทดสอบมอเตอร์คอมเพรสเซอร์รวมทั้งหมด 5 ตัว ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ต้นแบบ (MC1) 1 ตัว และมอเตอร์ที่นำเสนอ โดยทำการปรับปรุง และจัดสร้างใหม่ 4 ตัว การปรับปรุงประสิทธิภาพมอเตอร์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1) ส่วนของแกนเหล็ก ใช้การลดความสูญเสียของแกนเหล็กโดยยังคงที่จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ เนื่องจากจำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก $\phi = BA$ เมื่อ B คือความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก และ A คือพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก ดังนั้นถ้าต้องการออกแบบเพื่อลดความสูญเสียของแกนเหล็กโดยยังรักษาให้จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

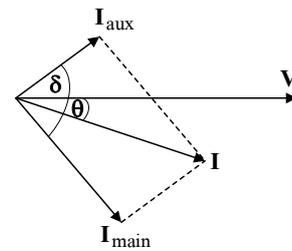
- คงที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux density) โดยเลือกชนิดแกนเหล็กที่มีค่าความสูญเสียต่อน้ำหนักลดลงเดิมที่เป็น Silicon Steel Type 50PN1300 ซึ่งมีค่าความสูญเสียแกนเหล็กเทียบกับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเป็นดังรูปที่ 2 เป็นแกนเหล็กชนิดใหม่คือ Silicon Steel Type 50PN470 ค่าความสูญเสียแกนเหล็กเทียบกับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเป็นดังแสดงในรูปที่ 3 จากรูปทั้งสองจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากัน แกนเหล็กชนิด 50PN1300 มีค่าความสูญเสียของแกนเหล็กมากกว่าประมาณเป็นสองเท่าของแกนเหล็กชนิด 50PN470 ซึ่งถ้าพิจารณาในย่านออกแบบใช้งานสามารถสรุปได้เป็นดังตารางที่ 1 และเมื่อนำแกนเหล็กทั้งสองชนิดมาทำการทดสอบโดยเรียงแกนเหล็กหนา 0.5 mm ให้มีความยาวแกนเหล็ก หรือที่เรียกว่า Stack เท่ากับ 80 mm หาค่าความสูญเสียแกนเหล็กจำนวน

3 ครั้ง. ได้ค่าความสูญเสียแกนเหล็กเฉลี่ยเป็นดังตารางที่ 2

- ลดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กลง และเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก หรือ Stack ให้มีความยาวเพิ่มขึ้นเพื่อชดเชยค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กทำให้จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่เท่ากับค่าที่บริษัทผู้ผลิตออกแบบไว้



(ก) วงจรการต่อใช้งาน



(ข) เฟสเซอร์

รูปที่ 1 มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุต่อร่วมถาวร

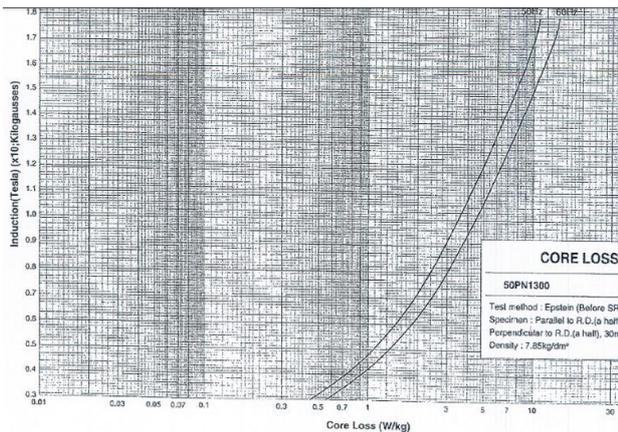
ตารางที่ 1 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

B (T)	1.55	1.6	1.65	1.7	1.73
50PN1300 (W/kg)	8.4	8.8	9.4	9.8	11
50PN470 (W/kg)	3.8	4.1	4.4	4.8	5.0

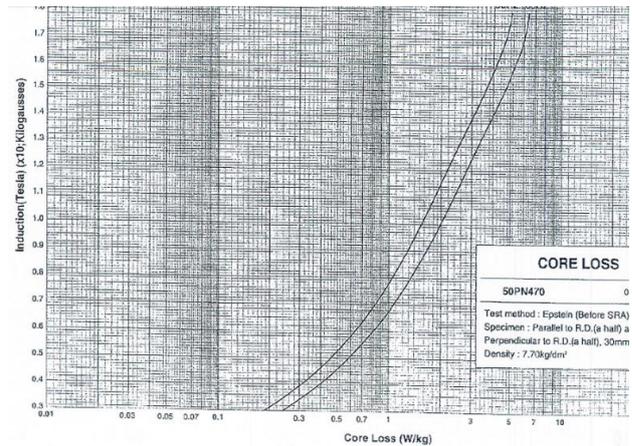
ตารางที่ 2 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ความยาว Stack 80 mm.

Silicon Steel Types	น้ำหนักเฉลี่ย (kg)	B (T)	Core Loss (W)
50PN1300	7.0513	1.733	77.56
50PN470	6.9073	1.733	34.54

- 2) ส่วนของขดลวด ใช้การเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดช่วย และขดลวดหลัก เพื่อลดค่าความสูญเสียในขดลวด และลดจำนวนรอบของการพันลง เพื่อให้สามารถนำขดลวดใส่ลงร่องสลีตของแกนเหล็กสเตเตอร์ที่มีอยู่ได้ โดยไม่ต้องเปลี่ยนรูปร่างโครงสร้างของแกนเหล็ก การลดจำนวนรอบของขดลวดส่งผลทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดมีค่าลดลงตามไปด้วย
- 3) ส่วนของขนาดตัวเก็บประจุ ใช้การปรับเปลี่ยนขนาดตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมใช้งานร่วมกับขดลวดช่วยให้มีเหมาะสมสอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยพิจารณาจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม CAMS (Computer Aided Motor Simulation) รวมทั้งเพื่อตรวจสอบ และยืนยันความถูกต้องเหมาะสมของขนาดตัวเก็บประจุ จึงมีการเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาดเท่าเดิมตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้มาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของมอเตอร์ด้วย



รูปที่ 2 ความสูญเสียของแกนเหล็ก Silicon Steel Type 50PN1300



รูปที่ 3 ความสูญเสียของแกนเหล็ก Silicon Steel Type 50PN470

3. โปรแกรมคำนวณเพื่อตรวจสอบผลการออกแบบ

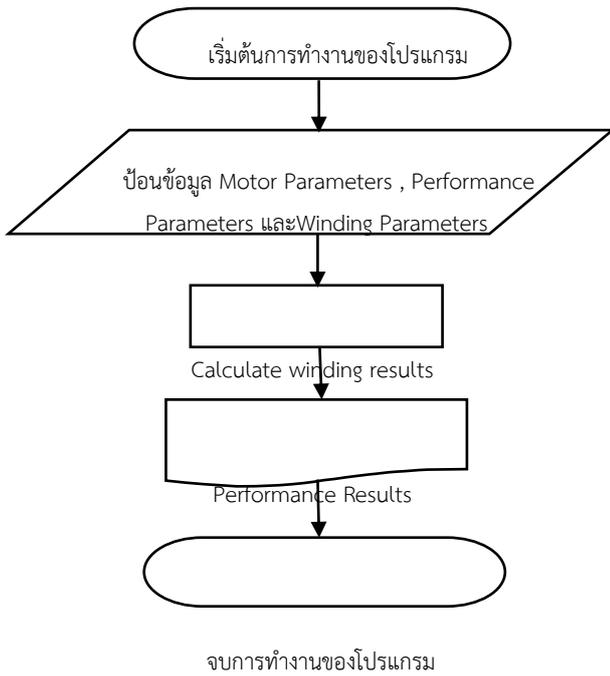
ในการคำนวณใช้โปรแกรม CAMS (Computer Aided Motor Simulation; CAMS) เวอร์ชัน 2.0 เพื่อประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ ก่อนที่จะนำคุณสมบัติต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบไปจัดสร้าง และทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ต่อไป

โปรแกรม CAMS มีลำดับขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4 และหน้าจอ

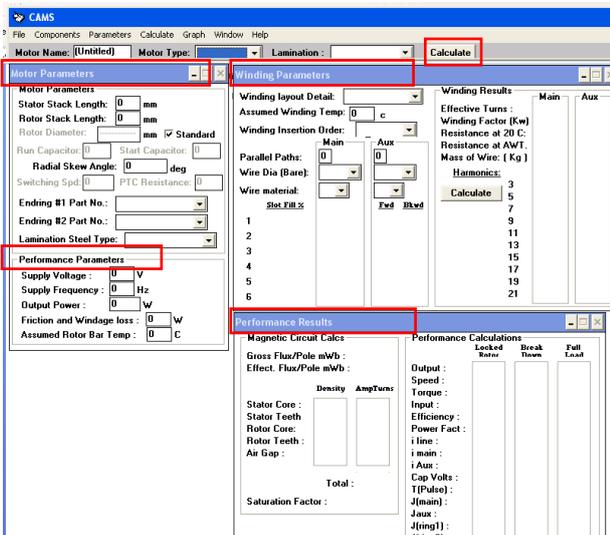
โปรแกรมเป็นดังรูปที่ 5 การป้อนข้อมูลเพื่อการออกแบบมอเตอร์ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ Motor parameters, Performance parameters และ Winding parameters แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้คือ

Motor Parameters: เป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วย

- ความยาวของสเตเตอร์ (Stator stack length (mm.)) -> มี 2 ค่าคือ 80 mm. และ 89 mm.
- ความยาวของโรเตอร์ (Rotor stack length (mm.)) -> มี 2 ค่าคือ 80 mm. และ 89 mm. (ความยาวของโรเตอร์ = ความยาวของสเตเตอร์)
- เส้นผ่าศูนย์กลางของโรเตอร์ (Rotor diameter (mm.)) -> ใช้ค่ามาตรฐาน



รูปที่ 4 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม CAMS



รูปที่ 5 หน้าจอของโปรแกรม CAMS

- ตัวเก็บประจุของขดรีน (Capacitor run) -> ไม่มี
- ตัวเก็บประจุของขดสตาร์ท (Capacitor start) -> มี 2 ขนาด คือ ขนาด 45 μF และขนาด 35 μF

- มุมองศาของร่องสลิตโรเตอร์ (Radial skew angle (deg.)) -> 0 องศา
- ความเร็วในการตัดขดลวดสตาร์ททอก (Switching speed) หรือความเร็วที่ 75% ของความเร็วเต็มพิกัด (75% of full speed)
- ค่าความต้านทานของรีเลย์ที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวดสตาร์ท (Positive Temperature Coefficient Resistance; PTC Resistance)
- ขนาดดอลูมิเนียมของ End-ring ทางด้านหัว (Endring #1 Part No.) -> ป้อนรหัส KWE637-1
- ขนาดดอลูมิเนียมของ End-ring ทางด้านท้าย (Endring #2 Part No.) -> ป้อนรหัส KWE638-1
- ชนิดของแผ่นเหล็กสเตเตอร์ และโรเตอร์ (Lamination steel type) -> ป้อนรหัสแกนเหล็ก 50PN1300

Performance Parameters: เป็นการกำหนดค่าคุณสมบัติพื้นฐานของมอเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย

- แรงดันไฟฟ้าใช้งาน (Supply voltage (V)) -> 220 V
- ความถี่ไฟฟ้าใช้งาน (Supply frequency (Hz)) -> 50 Hz
- กำลังวัตต์ทางด้านออกของมอเตอร์ (Output power (W)) -> 1760 W
- กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานของเพลารอเตอร์และแรงลมต้าน (Friction and windage losses (W)) -> 10 W
- อุณหภูมิของบาร์อลูมิเนียมในโรเตอร์ (Assumed rotor bar temperature ($^{\circ}\text{C}$)) -> 95 $^{\circ}\text{C}$

Winding Parameters: เป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของขดลวด ซึ่งประกอบด้วย

- ลักษณะการลงขดลวด และจำนวนขั้วที่ต้องการ -> 2P24slot5/4
- อุณหภูมิของขดลวด (Assumed winding temperature ($^{\circ}\text{C}$)) -> 95 $^{\circ}\text{C}$
- ขดลวดที่ต้องการลงก่อนตามลำดับ (Winding insertion order) -> Main First
- ลักษณะการต่อของขดลวดเป็นแบบไหน (เลข 1 คือการต่อแบบอนุกรม และเลข 2 คือการต่อแบบขนาน) -> 1

- เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดที่ใช้ในการพันมอเตอร์ทั้งขดหลัก และขดลวดช่วย (Wire diameter (Bare): Main, Aux.) -> สำหรับขดลวดหลักมี 2 ค่า คือ 1.290 mm. และ 1.340 mm. สำหรับขดลวดช่วยมี 2 ค่า คือ 0.900 mm. และ 0.910 mm.
- ลักษณะของขดลวดที่ใช้พันทางด้านสเตเตอร์เป็นทองแดง (Copper) หรืออลูมิเนียม (Aluminium) (Wire material: Main, Aux.) -> Cu
- ความหนาแน่นของขดลวดใน 1 ร่องสล็อต (Slots fill percentage) เนื่องจากคอมเพรสเซอร์ที่ผลิตนั้นมี 3 ขนาดซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ตระกูล ดังรูปที่ 6 ตระกูล AW ความหนาแน่นของขดลวดใน 1 ร่องสล็อตมีค่าไม่เกิน 77 % ส่วนตระกูล AE ความหนาแน่นของขดลวดใน 1 ร่องสล็อตมีค่าไม่เกิน 75 % และตระกูล AZ ความหนาแน่นของขดลวดใน 1 ร่องสล็อตมีค่าไม่เกิน 85 % ถ้ากำหนดค่ามากกว่านี้จะทำให้การพันขดลวดลงร่องสล็อตยาก เนื่องจากมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ที่ออกแบบ และจัดสร้างในงานวิจัยนี้เป็นตระกูล AW ดังนั้นจึงใช้ความหนาแน่นของขดลวดใน 1 ร่องสล็อต -> 77



(ก) ตระกูล AW (ข) ตระกูล AE (ค) ตระกูล AZ

รูปที่ 6 ประเภทคอมเพรสเซอร์แบบหุ้มปิด

ข้อมูลที่ถูกต้องทั้งหมดจะถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณค่าของ Winding results และ Performance results ดังแสดงในรูปที่ 7 Winding results ประกอบด้วยการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของขดลวด เช่น จำนวนความหนาแน่นของขดลวดต่อสล็อต (Slot Fill %), ค่าความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ 20 °C, น้ำหนักของขดลวด และขนาดของฮาโมนิกส์ที่ความถี่เลขคู่ (Harmonics Spectrum) และ Performance results ประกอบด้วยการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ รวมถึงสมรรถนะ

ของมอเตอร์ คุณสมบัติของมอเตอร์ทั้งทางไฟฟ้า และทางกล เช่น ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, กำลังไฟฟ้า, ความเร็วรอบ, แรงบิด และประสิทธิภาพ รวมทั้งสามารถแสดงรูปกราฟ แรงบิด กำลังกล ด้านออก กำลังไฟฟ้าด้านเข้า ประสิทธิภาพ และกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ตลอดย่านการทำงานดังรายละเอียดในรูปที่ 8

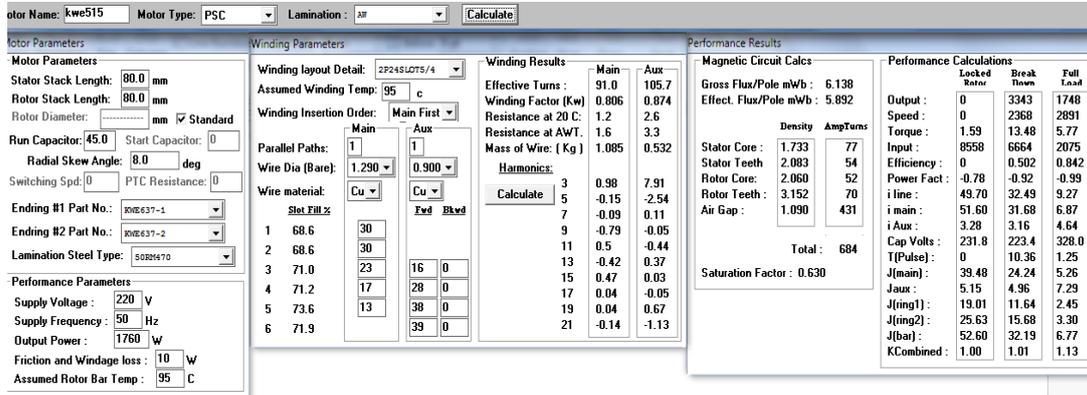
4. คุณลักษณะของมอเตอร์ทดสอบที่ทำการจัดสร้าง

มอเตอร์คอมเพรสเซอร์ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยมีทั้งหมด 5 ตัว แต่ละตัวมีคุณสมบัติ และคุณลักษณะต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

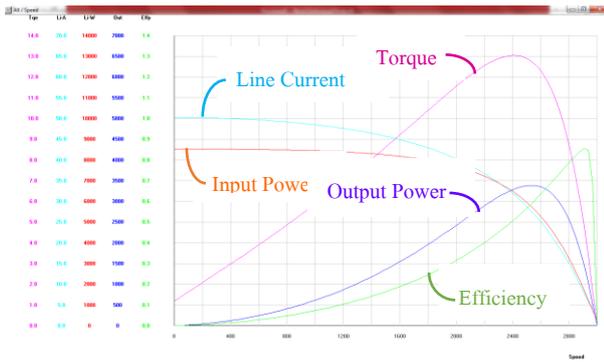
- ตัวที่ 1: มอเตอร์ต้นแบบ (MC1) เป็นมอเตอร์แบบดั้งเดิมที่ผู้ผลิตออกแบบซึ่งใช้เป็นมอเตอร์อ้างอิง สำหรับงานวิจัยนี้โครงสร้างของแกนเหล็กสเตเตอร์ของมอเตอร์เป็นชนิด Silicon Steel Type 50PN1300 ข้อมูลของขดลวดสเตเตอร์ทั้งขดลวดหลัก และขดลวดช่วยเป็นดังตารางที่ 3 ขดลวดมีรูปแบบการพันขดลวดเป็นแบบกันหอย การพันของขดลวดแต่ละชุดในแต่ละชั้นเป็นดังรูปที่ 9 คุณสมบัติต่าง ๆ ทางด้านเทคนิค (Technical specification) มีรายละเอียดเป็นดังแสดงในรูปที่ 10
- ตัวที่ 2: มอเตอร์ออกแบบใหม่ (MC2) เป็นมอเตอร์ที่มีการเปลี่ยนเฉพาชนิดของแกนเหล็กเป็นแกนเหล็กชนิดใหม่คือ Silicon Steel Type 50PN470 ส่วนประกอบอื่น ได้แก่ ความยาวแกนเหล็ก (Stack) ขนาดพื้นที่หน้าตัด จำนวนรอบของขดลวด และขนาดตัวเก็บประจุใช้แบบเดียวกันกับมอเตอร์ต้นแบบ
- ตัวที่ 3: มอเตอร์ออกแบบใหม่ (MC3) เป็นมอเตอร์ที่เปลี่ยนชนิดของแกนเหล็ก และลดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กลง เป็นผลทำให้ความยาวแกนเหล็กเพิ่มขึ้น ใช้แกนเหล็กชนิดใหม่คือ Silicon Steel Type 50PN470 และเพิ่มความยาวแกนเหล็ก จากเดิม 80 mm. เป็น 89 mm. จำนวนรอบของขดลวด และขนาดตัวเก็บประจุใช้แบบเดียวกันกับมอเตอร์ต้นแบบ
- ตัวที่ 4: มอเตอร์ออกแบบใหม่ (MC4) เป็นมอเตอร์ที่มีการเปลี่ยนชนิดของแกนเหล็ก ลดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้ความยาวแกนเหล็กเพิ่มขึ้น และลดขนาดตัวเก็บประจุ ดังนั้นมอเตอร์ MC4จึงใช้แกนเหล็กชนิดใหม่คือ Silicon Steel Type 50PN470 เพิ่มความยาวแกนเหล็ก เป็น 89 mm. และลดขนาดตัวเก็บประจุจากเดิม 45 μF เป็น 35 μF ส่วนจำนวน

รอบของขดลวดใช้แบบเดียวกันกับมอเตอร์ต้นแบบ ใน

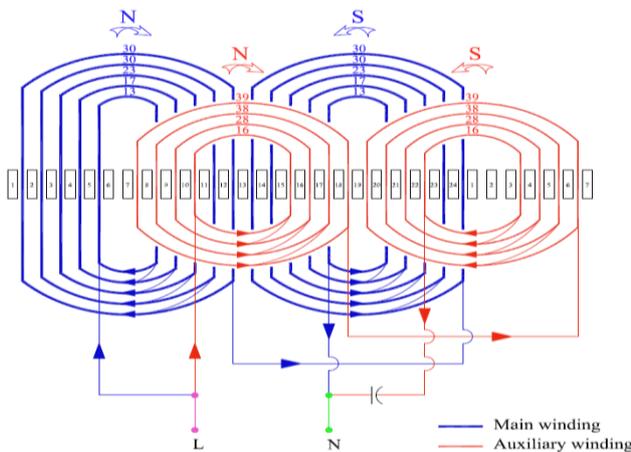
- ตัวที่ 5: มอเตอร์ออกแบบใหม่ (MC5) เป็นมอเตอร์นำเสนอกำหนดใช้ การออกแบบที่ลดทั้งความสูญเสียในแกนเหล็ก และความสูญเสีย



รูปที่ 7 การป้อนข้อมูล และผลคำนวณ Winding results และ Performance results ของมอเตอร์



รูปที่ 8 สมรรถนะของมอเตอร์ตลอดช่วงการทำงาน



รูปที่ 9 Winding Diagram ของมอเตอร์ต้นแบบ

ตารางที่ 3 ข้อมูลของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ต้นแบบ MC1

ขดลวด	Diameter (mm)	น้ำหนัก (kg)	ความยาว (m)	ความต้านทาน (Ω)	จำนวนรอบต่อคอล์ย(รอบ)
Main	1.29	1.15	96.2	1.2948	226
Auxiliary	0.9	0.563	97.45	2.6945	242

ขดลวดสเตเตอร์ โดยทำการเปลี่ยนชนิดของแกนเหล็ก ลดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กทำให้ความยาวแกนเหล็กเพิ่มขึ้น โดยใช้แกนเหล็กชนิดใหม่คือ Silicon Steel Type 50PN470 เพิ่มความยาวแกนเหล็กจากเดิม 80 mm. เป็น 89 mm. เปลี่ยนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและจำนวนรอบของขดลวดหลักจากเดิม 1.29 mm. ที่ 226 รอบ เป็น 1.34 mm. ที่ 220 รอบ และเปลี่ยนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและจำนวนรอบของขดลวดช่วยจากเดิม 0.9 mm. ที่ 242 รอบ เป็น 0.91 mm. ที่ 236 รอบ การใช้ขดลวดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ขึ้น ลดจำนวนรอบการพันขดลวดลงทั้งของขดลวดหลัก และขดลวดช่วย เป็นผลทำให้ค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดลดลง แต่ยังคงใช้ตัวเก็บประจุขนาดเท่าเดิมคือ 45 μF ซึ่งเป็นขนาดเดียวกันกับมอเตอร์ต้นแบบ ข้อมูลรายละเอียดของขดลวดหลัก และขดลวดช่วยเป็นดังตารางที่ 4 ลักษณะของขดลวดที่พันแบบกันหอยของแต่ละชุดในแต่ละชั้นมีรูปแบบการพันเป็นดังรูปที่ 11 [4]

เนื่องด้วยในระบบฐานข้อมูลของโปรแกรม CAMS มีข้อมูลต่าง ๆ ของแกนเหล็กชนิด 50PN1300 แต่ไม่มีข้อมูลของแกนเหล็กชนิดใหม่คือ 50PN470 ดังนั้นจึงทำการจำลองคุณสมบัติ และสมรรถนะการทำงานของมอเตอร์ MC3-MC5 ตามที่ได้ออกแบบ และนำเสนอโดยใช้คุณสมบัติ

ตารางที่ 4 ข้อมูลของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ MC5

ขดลวด	Diameter (mm)	น้ำหนัก (kg)	ความยาว (m)	ความต้านทาน (Ω)	จำนวนรอบต่อคอยล์(รอบ)
Main	1.34	1.28	95.1	1.1788	220
Auxiliary	0.91	0.6	96.25	2.6063	236

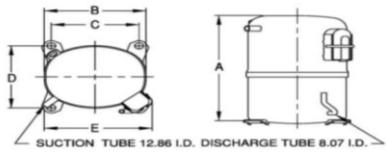
ของแกนเหล็กชนิด 50PN1300 ได้ผลการคำนวณจากโปรแกรม CAMSเป็นดังตารางที่ 5 ขั้นตอนการคำนวณ และรายละเอียดการทำงานของโปรแกรม รวมทั้งผลการคำนวณอย่างละเอียดเป็นดังเอกสารอ้างอิง [5] หลังจากนั้น เพื่อพิสูจน์ และยืนยันคุณสมบัติ และสมรรถนะของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ที่ได้ออกแบบไว้ จึงทำการจัดสร้างมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ MC1 ซึ่งเป็นมอเตอร์ต้นแบบเป็นลำดับแรก แกนเหล็กสเตเตอร์ และโรเตอร์เป็นชนิด Silicon Steel Type 50PN1300 ลักษณะของแผ่นลามีเนทมีรูปร่าง และจำนวนสล๊อตเป็นดังแสดงในรูปที่ 12 โดยรูปที่ 12 (ก) เป็นแกนเหล็กสเตเตอร์ และรูปที่ 12 (ข) เป็นแกนเหล็กโรเตอร์ โครงสร้างของโรเตอร์ และสเตเตอร์ของมอเตอร์ต้นแบบที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 10 คุณลักษณะต่าง ๆ ทางด้านเทคนิค

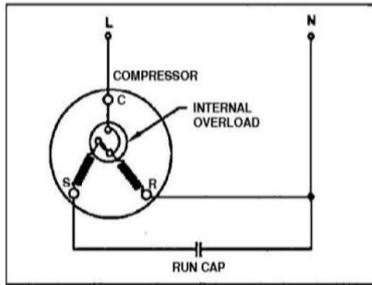
แล้วเป็นดังแสดงในรูปที่ 13 ในการพันขดลวดหลัก และขดลวดช่วยที่ใช้การพันแบบกันหอยนั้น ขดลวดแต่ละชุดที่นำมาลงในร่องสล๊อตมีลักษณะเป็นดังแสดงในรูปที่ 14 โดยในรูปเป็นขดลวดสำหรับมอเตอร์ MC1 หลังจากนั้นจัดสร้างมอเตอร์ MC2 ซึ่งใช้แกนเหล็กชนิดใหม่ Silicon Steel Type 50PN470 เมื่อนำสเตเตอร์ของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ MC1 และ MC2 มาเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 15 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อพิจารณาโครงสร้างทางกายภาพของสเตเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสองมีความคล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างที่ใช้ในการจัดสร้างมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีความยาว 2 ขนาด คือ 80 mm. (สำหรับมอเตอร์ MC1 และ MC2) และ 89 mm. (สำหรับมอเตอร์ MC3, MC4 และ MC5) ดังนั้นเมื่อนำโครงสร้างของสเตเตอร์ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด หรือ Stack ที่แตกต่างกัน 2 ขนาดมาเปรียบเทียบกัน ได้รูปร่างทางกายภาพของสเตเตอร์เป็นดังรูปที่ 16 ลักษณะโครงสร้างภายในเมื่อประกอบเป็นคอมเพรสเซอร์เรียบร้อยแล้วเป็นดังรูปที่ 17

5. ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผล

มอเตอร์คอมเพรสเซอร์ทั้งหมดถูกนำมาทดสอบการทำงานจริงในระบบการทำความเย็นโดยใช้เครื่องทดสอบมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ซึ่งมีลักษณะ

PRINCIPAL DIMENSIONS - mm		Electrical : 220 - 240 V / 50 Hz. 1 Phase					
		Nominal Performance					
<table border="1"> <tr> <td>A: 324</td> <td>B: 223</td> <td>C: 191</td> <td>D: 191</td> <td>E: 239</td> </tr> </table>		A: 324	B: 223	C: 191	D: 191	E: 239	Capacity
A: 324	B: 223	C: 191	D: 191	E: 239			
		5,972 Watts					
		20,375 BTU/Hr					
		Input Power					
		2,077 Watts					
		Lock Rotor Amps					
		51.3 Amps					
		Rated Load Amps					
		9.81 Amps					
		COP					
		2.88 Watts/Watts					
		EER					
		9.81 BTU/W-Hr					
		Testing Conditions					
		Condensing Temperature					
		54.4 °c (129.9 °F)					
		Evaporating Temperature					
		7.2 °c (45.0 °F)					
		Liquid Temperature					
		46.1 °c (115.0 °F)					
		Return Gas Temperature					
		35.0 °c (95.0 °F)					
		Ambient Temperature					
		35.0 °c (95.0 °F)					
		Application					
		Evaporating Temp. Range					
		HBP , A/C @ 0.00 °c to 13.00 °c (32.0 °F to 55.4 °F)					
		Refrigerant					
		R22					
		Compressor Cooling					
		Fan					
		Compressor and Motor Data					
		Compressor Type					
		Reciprocating					
		Displacement					
		43.10 cc.					

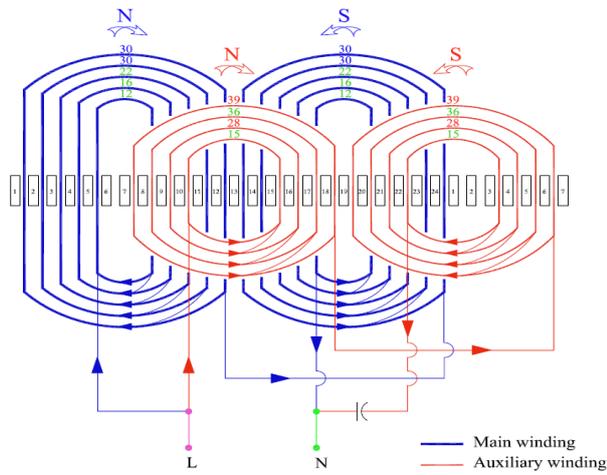
SCHMATIC WIRING DIAGRAM P.S.C.



รูปที่ 10 คุณสมบัติต่าง ๆ ทางด้านเทคนิค

ตารางที่ 5 ข้อมูลการออกแบบ และผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม CAMS และใช้แกนเหล็ก Silicon Steel Types 50PN1300

มอเตอร์	Stack (mm)	Main Winding		Auxiliary Winding		Capacitor (µF)	Input (W)	Output (W)	Efficiency (%)
		Diameter (mm)	Turns	Diameter (mm)	Turns				
MC1	80	1.29	226	0.9	242	45	2,075	1,760	84.2
MC3	89	1.29	226	0.9	242	45	2,078	1,760	84.3
MC4	89	1.29	226	0.9	242	35	2,070	1,760	84.7
MC5	89	1.34	220	0.91	236	45	2,064	1,760	84.8



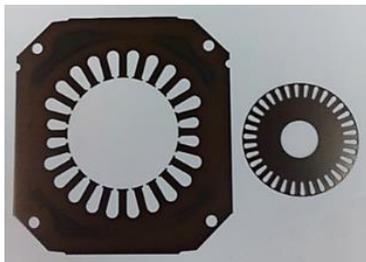
รูปที่ 11 Winding Diagram ของมอเตอร์ MC5



(ก) ขดลวดหลัก

(ข) ขดลวดช่วย

รูปที่ 14 การพันขดลวดขดลวดหลัก และขดลวดช่วยเป็นแบบกันหอย



(ก) สเตเตอร์

(ข) โรเตอร์

รูปที่ 12 โครงสร้างแผ่นลามิเนตของแกนเหล็กของโรเตอร์ และ สเตเตอร์



รูปที่ 15 สเตเตอร์ ของมอเตอร์ MC1 และ MC2



รูปที่ 13 โครงสร้างของโรเตอร์ และสเตเตอร์ของมอเตอร์ต้นแบบ



(ก) Stack 80 mm.



(ข) Stack 89 mm.

รูปที่ 16 ความยาวแกนเหล็กสเตเตอร์ที่จัดสร้างขึ้น



รูปที่ 17 ลักษณะโครงสร้างภายในของคอมเพรสเซอร์ก่อนนำไปทดสอบ

เป็นดังรูปที่ 18 การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers) [6] มอเตอร์คอมเพรสเซอร์ทุกตัวถูกทดสอบภายใต้เงื่อนไขเดียวกันคือ จ่ายแรงดันไฟฟ้า 220 V ความถี่ไฟ 50 Hz พิกัดกำลังเอาท์พุท 1760 W เนื่องจากมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ที่ออกแบบ และจัดสร้างในงานวิจัยนี้ เป็นคอมเพรสเซอร์ชนิด AW และจัดอยู่ในประเภท High Back Pressure ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้สารทำความเย็นชนิด R22 ซึ่งเป็นสารทำความเย็นที่ในปัจจุบันเป็นที่นิยมนำมาใช้สำหรับระบบทำความเย็น ข้อมูลสำหรับการควบคุมอุณหภูมิ และการควบคุมความดันของสารทำความเย็น ของระบบทำความเย็นมีค่าต่าง ๆ เป็นดัง

รายละเอียดในตารางที่ 6 ในกรณีถ้าต้องการใช้สารทำความเย็นชนิด

อื่นเพื่อทำการทดสอบสามารถทำได้ โดยตั้งค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ให้เป็นไปตามที่กำหนดในตาราง ข้อสรุปการออกแบบ และผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ทั้งหมดมีข้อมูลเป็นดังรายละเอียดในตารางที่ 7 ส่วนข้อมูลผลการทดสอบทางด้านไฟฟ้า และทางด้านการทำงานทำความเย็นของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ในสถานะคงตัวมีรายละเอียดเป็นดังตารางที่ 8 จากข้อมูลทั้งหมดจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้า และความถี่ไฟป้อนเข้าเท่ากัน

- MC1 เป็นคอมเพรสเซอร์ต้นแบบ ที่มีประสิทธิภาพการทำความเย็น เท่ากับ 9.81
- MC2 เป็นคอมเพรสเซอร์ที่ออกแบบมอเตอร์ใหม่ โดยใช้แกนเหล็กสเตเตอร์ที่มีค่าการสูญเสียที่แกนเหล็กน้อยกว่าแกนเหล็กต้นแบบ จากผลการทดสอบพบว่า ค่า Input Power มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ MC1 และประสิทธิภาพการทำความเย็นเพิ่มขึ้นจาก 9.81 เป็น 9.83
- MC3 เป็นคอมเพรสเซอร์ที่ออกแบบมอเตอร์ใหม่ โดยลดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กลง ด้วยวิธีการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กโดยการเพิ่มความยาวของมอเตอร์เป็น 89 mm. จากผลการทดสอบพบว่า ค่า Input Power มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับ MC1 และประสิทธิภาพการทำความเย็นเพิ่มขึ้นจาก 9.81 เป็น 9.93



(ก) ด้านข้าง

(ข) ด้านหลัง

(ค) ด้านหน้า

รูปที่ 18 เครื่องทดสอบการทำงานของคอมเพรสเซอร์

ตารางที่ 6 การทดสอบมอเตอร์คอมเพรสเซอร์แบบ High Back Pressure

REFRIGERRANT OF TYPE	R-290	R-22	R-123	R-134a	R-404A	R-407C	R-401A	R-410A	R-600a	
EVAPORATOR TEMP.	45 °F (7.2 °C)									
SUCTION PRESSURE	PSIG	70.6	76.06	13"Hg	40.05	94.21	70.72	41.55	130.11	14.45
	PSIA	85.31	90.76	6.52	54.75	108.91	85.42	56.25	144.81	29.15
CONDENSER TEMP.	130 °F (54.4 °C)									
HEAR PRESSURE	PSIG	258.7	269.9	20.55	198.7	355.64	340.74	221.21	477.92	95.9
	PSIA	273.4	311.6	35.25	213.4	370.34	355.44	235.91	492.62	110.6
AMBIEN TEMP.	95 °F (35.0 C)									
GAS OUT OF CAL TEMP.	95 °F (35.0 C)									
RETURN GAS TEMP.	95 °F (35.0 C)									
LIQUID TEMP.	115 °F (46.1 C)									
VOLTAGE	Vr									

ตารางที่ 7 การออกแบบ และผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์

Serial	MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	
Silicon Steel Types	50PN1300	50PN470	50PN470	50PN470	50PN470	
Stack (mm)	80	80	89	89	89	
Main Winding	Diameter(mm)	1.29	1.29	1.29	1.29	1.34
	Turns	226	226	226	226	220
Auxiliary Winding	Diameter(mm)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.91
	Turns	242	242	242	242	236
Capacitor (µF)	45	45	45	35	45	
RLA(A)	9.84	9.74	9.38	9.67	9.34	
Input (W)	2,077	2,068	2,050	2,099	2,043	
Cooling (BTU)	20,375	20,331	20,346	19,960	20,482	
EER	9.81	9.83	9.93	9.51	10.03	

ตารางที่ 8 ข้อมูลผลการทดสอบทางไฟฟ้า และทางด้านการทำงานทำความเย็นของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์

Serial	MC1	MC2	MC3	MC4	MC5
Voltage(V)	220.67	220.1	220.34	220.56	220.93
Frequency(Hz)	49.98	49.98	49.98	49.98	49.98
RLA(A)	9.84	9.74	9.38	9.67	9.34
Power Input (W)	2,077	2,068	2,050	2,099	2,043
PF	0.96	0.97	0.99	0.98	0.99
Speed(RPM)	2,898	2,894	2,885	2,869	2,893
Cooling (BTU)	20,375	20,331	20,346	19,960	20,482
EER	9.81	9.83	9.93	9.51	10.03

- MC4 เป็นคอมเพรสเซอร์ที่ออกแบบมอเตอร์ใหม่ ที่ลดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกล และลดขนาด Capacitor ที่ต่ออนุกรมกับขดลวด Auxiliary จากผลการทดสอบพบว่ามอเตอร์มีกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ความเร็วลดลง และแรงบิดเริ่มหมุน (Torque start) ของมอเตอร์น้อยลง ทำให้ Input Power มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับ MC1 และประสิทธิภาพการทำความเย็นลดลงจาก 9.81 เป็น 9.51
- MC5 เป็นคอมเพรสเซอร์ที่มีการออกแบบพัฒนาจากคอมเพรสเซอร์ MC3 โดยการเพิ่ม Break Down Torque ของมอเตอร์ MC3 ให้มีค่าใกล้เคียงกับมอเตอร์ MC1 โดยการเพิ่มขนาดตัวนำของขดลวด Main และขดลวด Auxiliary และลดจำนวนรอบของขดลวด Main และขดลวด Auxiliary จากผลการทดสอบพบว่า Input Power มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับ MC1 โดยในมอเตอร์ทั้ง 5 ตัว มอเตอร์ MC5 ใช้กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตมีค่าน้อยที่สุดคือ 2,043 W เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ MC1 ซึ่งเป็นมอเตอร์ต้นแบบใช้กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตมีค่า 2,077 W จะเห็นว่าใช้กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตน้อยกว่าเท่ากับ 34 W คิดเป็นประมาณ 1.63% และมีค่าประสิทธิภาพการทำความเย็นซึ่งเป็นค่าทางด้านเอาท์พุทมากที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากมอเตอร์ MC1 ซึ่งมีค่า EER เท่ากับ 9.81 เป็น 10.03 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2.24% จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าด้วยแนวคิดที่นำเสนอสำหรับการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์นั้น มอเตอร์ MC5 สามารถนำมาใช้งานได้จริง และมีประสิทธิภาพที่สูงที่สุด

6. สรุป

จากการออกแบบ และจำลองผลโดยใช้โปรแกรม CAMS พบว่าการออกแบบโดยลดความสูญเสียในขดลวด และความสูญเสียในแกนเหล็กสเตเตอร์ โดยใช้ตัวเก็บประจุต่อร่วมถาวรขนาดเท่าเดิม และใช้แผ่นแกนเหล็กสเตเตอร์รูปแบบเดิม สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ได้ และเมื่อจัดสร้างมอเตอร์คอมเพรสเซอร์โดยจัดสร้างแบบดั้งเดิมตามที่บริษัทผู้ผลิตออกแบบ และแบบที่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพให้มีค่าสูงขึ้น 4 รูปแบบ พบว่าวิธีการออกแบบโดยลดค่าความสูญเสียทั้งในแกนเหล็ก และในขดลวดสเตเตอร์ โดยยังคงขนาดตัวเก็บประจุให้มีค่าเท่าเดิม มีผลทำให้มอเตอร์มีคุณสมบัติดีขึ้นทั้งในแง่ของประสิทธิภาพมอเตอร์สูงขึ้น Break

Down Torque เพิ่มขึ้น ความสามารถในการทำความเย็นมากขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอย่างเป็นรูปธรรม เนื่องจากเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์โดยใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทางบริษัทผู้ผลิตมีอยู่ ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มโอกาสในการแข่งขันทางการตลาดได้มากขึ้น รวมทั้งสามารถนำเป็นความรู้ที่ได้นำเสนอไปประยุกต์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพอุปกรณ์ทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัท กุลธรเคอปปี้ ที่เอื้อเฟื้อวัสดุ และสถานที่ในการดำเนินการ และจัดทำงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ คุณวัชรจารเมือง คุณธนวรรณ แต่งพร คุณนิรันดร์ ทองมา และคุณพีระพล นุ่นดวง ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการต่าง ๆ ในทุก ๆ ด้าน เป็นอย่างดียิ่ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Cyril George Veinott, Joseph E. Martin, "Fractional and subfractional horsepower electric motors: available types, basic operating principles, selection, and maintenance", McGraw-Hill, Feb 1, 1986.
- [2] Deshpande, M.V. "Design and Testing of Electrical Machines", (1nd ed.). (U.S.A.): Wheeler Publishing, หน้า 53-55, 1983.
- [3] สลิลทิพย์ สิ้นธุสนธิชาติ, "การออกแบบและจำลองการทำงานเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพมอเตอร์คอมเพรสเซอร์" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42 เดอะกรีนเนอรี่ รีสอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา บทความ PW04, vol.1 หน้า 33-36 พ.ศ. 2562
- [4] คาร์ล วิลกินสัน, "เทคนิคการพันมอเตอร์ขนาดเล็ก". แปลโดย เสนอนิลรัตน์นิศา, ประสิทธิ์ ต้นติบุตร, พิชิต สุขเจริญพงษ์. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: เอช-เอน ซิเอดียูเคชั่น, หน้า 12-22, 2526
- [5] "การออกแบบและจัดสร้างมอเตอร์คอมเพรสเซอร์" วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ปีการศึกษา 2558
- [6] ASHRAE Application Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 1999.



สลิลทิพย์ สิ้นธุสนธิชาติ จบการศึกษาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร และได้รับตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า