

การเพิ่มสมรรถนะแรงบิดของโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์ สวิตซ์ฟลักซ์ด้วยการออกแบบใช้ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด MODELING AND OPTIMAL CONFIGURATION DESIGN OF FLUX-BARRIER FOR TORQUE IMPROVEMENT OF ROTOR FLUX SWITCHING PERMANENT MAGNET MACHINE

นายชัยณัฐพล นิสยันต์

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2565

การเพิ่มสมรรถนะแรงบิดของโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์ สวิตซ์ฟลักซ์ด้วยการออกแบบใช้ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด

นายชัยณัฐพล นิสยันต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2565

## MODELING AND OPTIMAL CONFIGURATION DESIGN OF FLUX-BARRIER FOR TORQUE IMPROVEMENT OF ROTOR FLUX SWITCHING PERMANENT MAGNET MACHINE

MR. CHAINATTAPOL NISSAYAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY

2022



# ใบรับรองวิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

**ชื่อวิทยานิพนธ์:** การเพิ่มสมรรถนะแรงบิดของโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด โรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ด้วยการออกแบบใช้ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด

ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์: นายชัยณัฐพล นิสยันต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์:

รศ. ดร. ชลธี โพธิ์ทอง	ประธานกรรมการ
ผศ. ดร. จงกฤษฏิ์ จงอุดมการณ์	กรรมการ
รศ. ดร. พิรัสม์ คุณกิตติ	กรรมการ
ศ. ดร. อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์:

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิรัสม์ คุณกิตติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ศาสตราจารย์ ดร. อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร)

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติไชย ฟักศรี)

(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชพล สันติวรากร) คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

ชัยณัชพล นิสยันต์. 2565. การเพิ่มสมรรถนะแรงปิดของโครงสร้างเครื่องจักรกบไฟฟ้าแม่เหล็ก ถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ด้วยการออกแบบใช้ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด.

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: รศ. ดร. พิรัสม์ คุณกิตติ, ศ. ดร. อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร

#### บทคัดย่อ

้งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด โรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ (Rotor Flux-switching permanent magnet, RPM-FS) เนื่องจากโครงสร้างนี้ มีความหนาแน่นของซ่องว่างอากาศ ความหนาแน่นกำลังและความหนาแน่นแรงบิดสูง และ ้ประสิทธิภาพที่สูงภายใต้การทำงานที่กำหนด ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานในระบบขับเคลื่อน โดยตรงของ ยานพาหนะไฟฟ้า (electric vehicle, EV) และ ยานพาหนะแบบไฮบริดจ์ (electric hybrid vehicle, HEV) โดยโครงสร้างต้นแบบในงานวิจัยนี้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคตัวกั้นเส้นแรง แม่เหล็ก (Magnetic flux barrier) ซึ่งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กนี้ถูกออกแบบตัวแปร และปรับปรุง รูปแบบผ่านวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface method, RSM) โดยพารามิเตอร์เอาต์พุตของ ้เครื่องจักรกลไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้า แรงบิดคอกกิ้ง ความหนาแน่นฟลักซ์ ของช่องว่างอากาศ การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก แรงบิดเฉลี่ย แรงบิดกระเพื่อม กำลังไฟฟ้า เอาต์พุต ค่าความสูญเสียต่างๆ และประสิทธิภาพ ถูกจำลองผ่านทางโมเดล 2 มิติด้วยระเบียบวิธี ้ไฟในต์เอเลเมนต์ ผลการจำลองพบว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ที่ออกแบบมีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงขึ้น 2.4% แม้ว่าแรงบิดคอกกิ้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยจะเห็น ้ได้ชัดว่า การติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กสามารถทำให้การรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กลดลง การปรับปรุงความสามารถในการอิ่มตัวของแม่เหล็ก ตลอดจนการปรับปรุงฮาร์โมนิกที่ดีขึ้นของความ หนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่างอากาศที่ส่งผลต่อแรงบิด เป็นผลให้พบว่าโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ ้ออกแบบมีค่าแรงบิดสูงขึ้นถึง 6% จากโครงสร้างต้นแบบ นอกจากนี้ การติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ้ยังมีส่วนสำคัญที่ช่วยลดค่าความสูญเสียกระแสไหลวนของแม่เหล็กถาวรได้ถึง 10% เนื่องจากการ ้รั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กในโรเตอร์ลดลง ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างต้นแบบ ประสิทธิภาพ โดยรวมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ออกแบบมีค่าในการทำงานสูงสุดที่ 90.8% ซึ่งเพิ่มขึ้น 1.02 เท่า ดังนั้นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ออกแบบจึงสามารถใช้งานได้ในแอพพลิเคชั่น EV และ HEV

Chainattapol Nissayan. 2022. Modeling and Optimal Configuration Design of Flux-Barrier for Torque Improvement of Rotor Flux Swirching Permanent Magner Machine. Master of Engineering Thesis in Electrical Engineering, Graduate School, Khon Kaen University.

Thesis Advisors:Assoc. Prof. Dr. Pirat Khunkitti,Prof. Dr. Apirat Siritaratiwat

#### ABSTRACT

This paper proposes to improve the torque capability of the Rotor Fluxswitching permanent magnet (RPM-FS) machine, which is a promising candidate for electric vehicle (EV) and hybrid electric vehicle (HEV) applications due to high air-gap flux density, high power density, high torque density and high efficiency under rated operation, by using the magnetic flux barrier design. The response surface optimization method was used to design and optimize the topology of flux barriers. The output characteristics of this structure including electromotive force (EMF), cogging torque, airgap flux density, magnetic flux distribution, torque average, torque ripple, output power, losses and efficiency were evaluated through the 2-D finite element method. The 2-D finite element analysis shows that the proposed RPM-FS machine has a higher 2.4% electromotive force than the conventional structure, with only a slight increase in cogging torque. Notably, an insertion of flux barriers could yield a reduction of magnetic flux leakage, an improvement of magnetic saturation capability, as well as enhancement of working harmonics of the air-gap flux density. As a result, the proposed structure can improve 6% higher torque than the conventional structure. In addition, the installation of a magnetic flux barrier is also important to reduce the permanent magnet eddy current loss by 10% due to the magnetic flux leakage in the rotor is reduced. Therefore, when compared to the conventional structure, the efficiency of the proposed structure indicated a higher efficiency of 90.8%, an increase of 1.02 times. Hence, the RPM-FS machine proposed in this work is capable of being used in EV and HEV applications.

งานวิทยานิพนธ์นี้มอบส่วนดีให้บุพการีและคณาจารย์

### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบผลสำเร็จได้เพราะได้รับความช่วยเหลือและการให้คำปรึกษา จากคณะอาจารย์ที่ปรึกษา ได้แก่ รศ. ดร. พิรัสม์ คุณกิตติ และ ศ. ดร. อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร ซึ่งได้ให้ คำแนะนำในทุกขั้นตอนในการศึกษารายวิชาวิทยานิพนธ์ การวางแผนการศึกษาทั้งหลักสูตร กระบวน การศึกษาทดลอง การตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย รวมทั้งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ และเปิดโอกาสให้ได้นำเสนอผลงานตลอดจนการเขียน รายงานทางวิชาการเพื่อนำเสนอผลงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ ขอขอบคุณคณะอาจารย์ประจำ วิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่นทุกท่าน ที่ได้ให้การสั่งสอนรายวิชาที่เป็นทั้งพื้นฐาน ในการศึกษา ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ และการทำงานวิจัย ทางวิศวกรรม ขอขอบคุณ ท่านประธานกรรมการสอบรายงานวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาอันมีค่า เพื่อมาให้คำแนะนำและแนวคิดในการปรับปรุงแก้ไข ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้ให้ทุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้าในครั้งนี้ ขอขอบคุณ รศ. ดร. พิรัสม์ คุณกิตติ และ ศ. ดร. อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร ที่ให้การช่วยเหลือทางด้าน การประสานงานกับบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น และให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอด มา ขอขอบคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง มิตรสหายทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคอยเป็นกำลังใจ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายผลอันจะเป็นประโยชน์ ความดีงามทั้งปวงที่เกิดขึ้นจากการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแด่ บิดา มารดา อาจารย์ที่เคารพยิ่ง และทุกท่านที่มิได้กล่าวถึงที่มีส่วนช่วยเหลือในงานวิจัยนี้ ให้ประสบผลสำเร็จได้ หากมีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้ด้วยความขอบคุณยิ่ง

ชัยณัฐพล นิสยันต์

## สารบัญ

			หน้า
บทคัดย่ะ	อภาษา	โทย	ก
บทคัดย่อ	อภาษา	อังกฤษ	ข
คำอุทิศ			ค
กิตติกรร	มประก	าศ	ঀ
สารบัญต	การาง		જ
สารบัญม	าาพ		ଶ
บทที่ 1	บทน้	ו	1
	1.1	หลักการและเหตุผล	1
	1.2	วัตถุประสงค์	2
	1.3	วิธีการดำเนินการ	3
	1.4	ขอบเขตและข้อจำกัดงานวิจัย	3
	1.5	สถานที่ทำการวิจัย	3
	1.6	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2	ทฤษ	ฏีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
	2.1	เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร	4
	2.2	เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์	7
	2.3	การวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิด	11
		สวิตซ์ฟลักซ์	
	2.4	ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก	17
	2.5	ทฤษฎีวิธีพื้นผิวตอบสนอง	24
	2.6	ทฤษฎีไฟล์ไนท์เอเลเมนต์	27
บทที่ 3	วิธีกา	รดำเนินงานวิจัย	32
	3.1	การจำลองการทำงานโครงสร้างต้นแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดโรเตอร์	32
		สวิตซ์ฟลักซ์	
	3.2	วิธีการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์	36
		สวิตซ์ฟลักซ์ ด้วยวิธีการออกแบบติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก	

# สารบัญ (ต่อ)

			หน้า
	3.3	การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของโครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่	40
		ออกแบบบนเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด	
	3.4	การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของโครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่	40
		ออกแบบบนเงื่อนไขที่มีโหลด	
บทที่ 4	ผลกา	รจำลองและการอภิปรายผล	44
	4.1	ผลการจำลองการทำงานโครงสร้างต้นแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้า	44
		ชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์	
	4.2	ผลการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์	46
		สวิตซ์ฟลักซ์ ด้วยวิธีการออกแบบติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก	
	4.3	ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของโครงสร้างต้นแบบและโครงสร้าง	49
		ที่ออกแบบบนเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด	
	4.4	ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของโครงสร้างต้นแบบและโครงสร้าง	51
		ที่ออกแบบบนเงื่อนไขที่มีโหลด	
บทที่ 5	สรุปผ	ลและข้อเสนอแนะ	57
	5.1	สรุปผล	57
	5.2	ข้อเสนอแนะ	57
บรรณานุ	กรม		58
การเผยแ	พร่ผลง	านวิทยานิพนธ์	65
ประวัติผู้เ	เขียน		66

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1	เปรียบเทียบ Torque/Volume โครงสร้างต้นแบบกับโครงสร้างอื่นๆ	33
ตารางที่ 2	ค่าตัวแปรโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์	35
	ฟลักซ์ต้นแบบ	
ตารางที่ 3	ช่วงของตัวแปรการออกแบบของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก	38
ตารางที่ 4	ค่าตัวแปรโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์	39
	ฟลักซ์ที่ออกแบบ	
ตารางที่ 5	เปรียบเทียบค่าความสูญเสียต่างๆ และประสิทธิภาพ	46
ตารางที่ 6	ผลเปรียบเทียบการจำลองเอาต์พุตต่างๆ ของโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้า	55
	ต้นแบบและโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ออกแบบ	

## สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1	การติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ (a) ติดตั้งบนพื้นผิว (b) ติดตั้งในพื้นผิว	5
	(c) ติดตั้งในรัศมีภายใน (d) ติดตั้งในเส้นรอบวงภายใน	
ภาพที่ 2	การติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่สเตเตอร์ (a) ติดตั้งโครงภายนอกเป็นเชิงเส้น	6
	(b) ติดตั้งโครงภายนอกเป็นแนวโค้ง (c) ติดตั้งบนพื้นผิวของขั้ว	
	(d) ติดตั้งภายในขั้ว	
ภาพที่ 3	เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรอยู่ที่สเตเตอร์ (a) แบบฟลักซ์	7
	พลิกกลับ (b) แบบดับบลี้-ซาเลี่ยน (c) แบบสวิตซ์ฟลักซ์	
ภาพที่ 4	หลักการเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์	8
ภาพที่ 5	เทคนิคการพัฒนาโครงสร้าง SFPM (a) E-core (b) C-core	9
	(c) V-shaped (d) Multi-tooth	
ภาพที่ 6	เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์	10
ภาพที่ 7	เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ	11
ภาพที่ 8	การออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กโดยพัฒนาจากแบบ R-type และ	18
	J-type	
ภาพที่ 9	การออกแบบหาค่าที่เหมาะสมของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก	18
ภาพที่ 10	การออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) รูปร่างซับซ้อนสูง	19
	(b) รูปร่างซับซ้อนปานกลาง (c) รูปร่างซับซ้อนน้อย	
ภาพที่ 11	การออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กรูปแบบไม่สมมาตร	20
ภาพที่ 12	การออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) V type (b) 2-V type	20
	(c) $ abla$ type	
ภาพที่ 13	การออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) รูปทรงสามเหลี่ยม	21
	(b) รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (c) รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูเพิ่มเติมด้วย	
	สามเหลี่ยม (d) รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูเพิ่มเติมด้วยชั้นตรง	
ภาพที่ 14	การออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) Conventional (b) Alternate	22
ภาพที่ 15	การกำหนดความแตกต่างเครื่องจักรกล (a) นำโรเตอร์หลังเหล็กออกโดย	23
	สมบูรณ์ (Yokeless) (b) ติดตั้งตัวกั้นที่แกน d (d slit) (c) ติดตั้ง	
	ตัวกั้นที่แกน q (q slit)	

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
การติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) ติดตั้งที่โครงของโรเตอร์ (b) ติดตั้งที่	23
ขั้วของโรเตอร์	
การติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) ติดตั้งที่โครงของโรเตอร์ (b) ติดตั้งที่	24
ขั้วของโรเตอร์	
ตัวอย่างพื้นผิวตอบสนองรูปแบบสามมิติ	25
การออกแบบส่วนประสมกลาง	26
การออกแบบบ็อกซ์-เบนเคน	27
รูปแบบของเอลิเมนต์ในระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์	29
การลู่เข้าหาผลลัพธ์	29
การแสดงผลข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ (a) การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก	31
(b) ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	
โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์	34
ต้นแบบ	
ตัวแปรโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์	34
ต้นแบบ	
การออกแบบรูปแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กติดตั้งที่สเตเตอร์ หรือโรเตอร์	36
(a) รูปแบบแนวนอนที่สเตเตอร์ (Shape 1) (b) รูปแบบตัว T ที่สเตเตอร์	
(Shape 2) (c) รูปแบบสามเหลี่ยมที่สเตเตอร์ (Shape 3) (d) รูปแบบตัว L	
ที่โรเตอร์ (Shape 4) (e) รูปแบบแนวตั้งเอียงตามองศาที่โรเตอร์ (Shape 5)	
ตัวแปรของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก	38
โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์	44
(a) งานวิจัยที่ถูกเสนอ (b) แบบจำลองผ่านโปรแกรม	
ผลการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบกับ	45
แบบจำลอง	
ผลการเปรียบเทียบแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด	45
โรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ (a) งานวิจัยที่ถูกเสนอ (b) แบบจำลองผ่านโปรแกรม	
	การติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) ติดตั้งที่โครงของโรเตอร์ (b) ติดตั้งที่ ชั้วของโรเตอร์ การติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) ติดตั้งที่โครงของโรเตอร์ (b) ติดตั้งที่ ชั้วของโรเตอร์ ตัวอย่างพื้นผิวตอบสนองรูปแบบสามมิติ การออกแบบข่องน่านระสมกลาง การออกแบบบีอกซ์-เบนเคน รูปแบบของเอลิเมนต์ในระเบียบวิธีการไฟในต์เอลิเมนต์ การสู่เข้าหาผลลัพธ์ การแสดงผลข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ (a) การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก (b) ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ตันแบบ การออกแบบรูปแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ตันแบบ การออกแบบรูปแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์ หรือโรเตอร์ (a) รูปแบบแนวนอนที่สเตเตอร์ (Shape 1) (b) รูปแบบตัว T ที่สเตเตอร์ (shape 2) (c) รูปแบบสามเหลี่ยมที่สเตเตอร์ (Shape 3) (d) รูปแบบตัว L ที่โรเตอร์ (Shape 4) (e) รูปแบบแนวตั้งเอียงตามองศาทิโรเตอร์ สวิตซ์ฟลักซ์ (a) งานวิจัยที่ถูกเสนอ (b) แบบจำลองผ่านโปรแกรม ผลการเปรียบเทียบแรงเบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ (a) งานวิจัยที่ถูกเสนอ (b) แบบจำลองผ่านโปรแกรม ผลการเปรียบเทียบแรงเองเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด โรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ (a) งานวิจัยที่ถูกเสนอ (b) แบบจำลองผ่านโปรแกรม

## สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 31	ผลการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กรูปแบบ	46
	ต่างๆ	
ภาพที่ 32	ผลการเปรียบเทียบแรงบิดของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กรูปแบบต่างๆ	47
ภาพที่ 33	พื้นผิวตอบสนองสามมิติ	48
ภาพที่ 34	พื้นผิวตอบสนองสองมิติ	49
ภาพที่ 35	ผลการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบและที่	50
	ออกแบบ (a) รูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (b) สเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า	
ภาพที่ 36	ผลการเปรียบเทียบแรงบิดเริ่มต้นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบและ	51
	ที่ออกแบบ	
ภาพที่ 37	ผลการเปรียบเทียบความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่างอากาศของเครื่องจักรกล	52
	ไฟฟ้าต้นแบบและที่ออกแบบ (a) รูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (b) สเปกตรัม	
	ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า	
ภาพที่ 38	ผลการเปรียบเทียบการกระจายเส้นแรงแม่เหล็ก (a) เครื่องจักรกลไฟฟ้า	53
	ต้นแบบ (b) เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ออกแบบ	
ภาพที่ 39	ผลการเปรียบเทียบแรงบิดเฉลี่ยและแรงบิดกระเพื่อมของเครื่องจักรกล	54
	ไฟฟ้าต้นแบบและที่ออกแบบ	

#### 1.1 หลักการและเหตุผล

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญสำหรับทุกประเทศทั่วโลก เนื่องจากมีความต้องการ ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดต่างๆในภาคอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้มีการ เพิ่มขึ้นของมลพิษและการขาดแคลนพลังงานจากเครื่องจักรกลที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ยานพาหนะไฟฟ้า (electric vehicle, EV), ยานพาหนะแบบไฮบริดจ์ (electric hybrid vehicle, HEV), กังหันลม, โดรน และเครื่องบินไฟฟ้า ดังนั้นการพัฒนาเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรในงานวิจัยให้ มีค่าความสูญเสียต่างๆภายในโครงสร้างลดลง และสามารถทำให้เครื่องจักรกลมีประสิทธิภาพสูงขึ้น จึงเป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยลดมลพิษและการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าใน อนาคตได้

้ปัจจุบันเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดที่ได้รับการวิจัยอย่างแพร่หลาย คือเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ถูก พัฒนามาจากเครื่องกลแม่เหล็กถาวร (permanent magnet machine) เนื่องจากเครื่องกลดังกล่าว มีความหนาแน่นของแรงบิดและพลังงานสูง เป็นปัจจัยหนึ่งในการผลิตพลังงานด้วยแม่เหล็กถาวร และ ไม่มีการกระตุ้นสนามแม่เหล็กจากขดลวด ทำให้การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดทองแดงต่ำลง ้ส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น เครื่องกลแม่เหล็กถาวร ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในยานพาหนะ ไฟฟ้า ยานพาหนะแบบไฮบริดจ์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยเครื่องจักรกลไฟฟ้า แม่เหล็กถาวรสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งการติดตั้งของแม่เหล็กได้แก่ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรสเตเตอร์ (Stator permanent magnet, SPM) และเครื่องจักรกล ไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรโรเตอร์ (Rotor permanent magnet, RPM) โดยเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ SPM สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามตำแหน่งของแม่เหล็กที่ถูกติดตั้งภายในโครงสร้างได้แก่ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรแบบฟลักซ์พลิกกลับ (flux-reversal permanent magnet machine, FRPM) เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรแบบสวิตซ์ฟลักซ์ (switched flux permanent magnet machine, SFPM) และเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรแบบดับบลี้-ซาเลี่ยน (doubly salient permanent magnet machine, DSPM) ในปัจจุบันนั้นเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร แบบสวิตซ์ฟลักซ์ได้รับความนิยมในการประยุกต์ในการใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้ในเซอโวร์มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ และยานพาหนะไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ชนิดสวิตซ์ฟลักซ์ ยังคงได้รับผลกระทบจากการใช้ปริมาณแม่เหล็กในจำนวนมาก และใช้แม่เหล็กอย่าง ไม่เต็มประสิทธิภาพทำให้มีการสูญเสียของโครงสร้างสูง โดยเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์ฟลักซ์

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามตำแหน่งของแม่เหล็กที่ถูกติดตั้งภายในโครงสร้างได้แก่ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสเตเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ (SPM-FS) และเครื่องจักรกลไฟฟ้า แม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ (RPM-FS) เครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิดสเตเตอร์สวิตซ์ ฟลักซ์ เป็นเครื่องจักรกลที่มีแม่เหล็กถาวรติดตั้งอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างขั้วของสเตเตอร์ และโรเตอร์ของ เครื่องจักรไม่มีส่วนประกอบที่ยึดติดและทำหน้าที่เป็นเพียงเส้นทางสำหรับการไหลเวียนของฟลักซ์ แม่เหล็ก จึงมีความเรียบง่ายและทนทาน ดังนั้นเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสเตเตอร์สวิตซ์ ฟลักซ์จึงใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือการใช้งานความเร็วต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสเตเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ มีข้อเสียคือการสูญเสียทองแดงที่สูงและ ้ความอิ่มตัวของแม่เหล็กต่ำที่ขั้วสเตเตอร์ เนื่องจากมีพื้นที่ของขั้วสเตเตอร์ที่เล็ก ดังนั้นจึงมีการเสนอ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของเครื่องจักรกล ้ไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสเตเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ โดยการเปลี่ยนตำแหน่งแม่เหล็กถาวรไปติดตั้งที่โรเตอร์ ซึ่งส่งผลให้ความอิ่มตัวของแม่เหล็กของขั้วสเตเตอร์จะลดลง และความสามารถในการโอเวอร์โหลด ได้รับการปรับปรุง ด้วยเหตุนี้เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ จึงมักมีความ หนาแน่นของช่องว่างอากาศ ความหนาแน่นกำลังและความหนาแน่นแรงบิดสูง และประสิทธิภาพที่สูง กว่าภายใต้การทำงานที่กำหนด ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งาน EV และ HEV โดยเฉพาะสำหรับระบบ ขับเคลื่อนโดยตรง อย่างไรก็ตาม เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ยังคงมี การสูญเสียภายในโครงสร้างสูง ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนั้น คณะผู้วิจัยพบว่าวิธีหนึ่ง ที่กำลังได้รับความนิยมในการปรับปรุงสมรรถนะของโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าคือการใช้ตัวกั้นเส้น แรงแม่เหล็ก (Magnetic flux barrier) ในโครงสร้าง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมรรถนะแบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้า แม่เหล็กถาวรชนิด RPM-FS โดยการเพิ่มแรงบิด และลดค่าความสูญเสียภายในโครงสร้างด้วยการ ออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กให้มีค่าที่เหมาะสมผ่านวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) โดยโครงสร้างที่จะใช้ศึกษาในโครงการนี้จะเป็นโครงสร้างที่มีความน่าสนใจ ในการนำไปประยุกต์ใช้ในยานพาหนะไฟฟ้า และยานพาหนะแบบไฮบริดจ์ โดยในการจำลองและ การวิเคราะห์แบบจำลองจะทำด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ (Finite Element Method)

### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์

 1.2.2 เพื่อเพิ่มสมรรถนะด้านแรงบิดและลดค่าความสูญเสียของแบบจำลองเครื่องจักรกล ไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ด้วยการใช้ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งออกแบบให้ เหมาะสมกับโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้า

#### 1.3 วิธีการดำเนินการ

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์,
 ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก และการหาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้

1.3.2 ออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กติดตั้งภายในโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิด แม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ซึ่งหาค่าตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุดผ่านวิธีพื้นผิว ตอบสนอง และจำลองด้วยวิธีการเชิงตัวเลขไฟในต์เอเลเมนต์ในโปรแกรม Ansys Maxwell

1.3.3 วิเคราะห์ผลการจำลองการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด โรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ในการทำงาน 2 เงื่อนไขคือเงื่อนไขที่ไม่มีโหลดและ เงื่อนไขที่มีโหลด ประกอบไปด้วย EMF, Cogging torque, ความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่างอากาศ (Air-gap flux density), การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux distribution), แรงบิด เฉลี่ย (Average torque), แรงบิดกระเพื่อม (Torque ripple), กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (Output power), ค่าความสูญเสียต่างๆ (Losses) และประสิทธิภาพ (Efficiency)

1.3.4 สรุปผล

1.3.5 จัดทำบทความและวิทยานิพนธ์

#### 1.4 ขอบเขตและข้อจำกัดงานวิจัย

1.4.1 ออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กติดตั้งภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด โรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์

1.4.2 ปรับปรุงสมรรถนะของแบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์ สวิตซ์ฟลักซ์ของต้นแบบ โดยการปรับค่าตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด

1.4.3 ทำการวิจัยด้วยการจำลอง (simulation) โดยใช้หลักการ Finite Element
 Method ด้วยโปรแกรม Ansys Maxwell

### 1.5 สถานที่ทำการวิจัย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้แบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์

1.6.2 ได้รูปแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux barrier) ที่มีความเหมาะสมกับ โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์

1.6.3 ได้เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่มีแรงบิดสูงขึ้น และ ค่าความสูญเสียน้อยลง จากการใช้ Magnetic flux barrier

### บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบไปด้วย เครื่องจักรกล ไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์ การวิเคราะห์ค่าเอาต์พุต ของเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์ ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ทฤษฎีวิธีพื้นผิวตอบสนอง และทฤษฎีไฟล์ไนท์เอเลเมนต์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร

ในปัจจุบันเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet machines) เป็นหนึ่งใน ้เครื่องจักรกลที่นิยมนำไปประยุกต์งานในการขับเคลื่อนด้วยความเร็วต่ำและมีประสิทธิภาพที่สูง [1, 2] ้เครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรเป็นเครื่องจักรกลที่ได้รับการวิจัยอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจาก ้สามารถผลิตความหนาแน่นของแรงบิดได้สูงจากประสิทธิภาพของแม่เหล็กถาวร นอกจากนี้ ้เครื่องจักรกลชนิดนี้ไม่มีการสูญเสียที่ขดลวดทองแดงเนื่องจากไม่มีการกระตุ้นสนามแม่เหล็กด้วยการ ้จ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งหลักการทำงานของเครื่องกลแม่เหล็กถาวร คือ แม่เหล็กถาวรที่ติดตั้งภายใน ้โครงสร้างจะผลิตฟลักซ์แม่เหล็กขึ้น ส่งผลให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กจำนวนมาก เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลง ของฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านขดลวดอาเมเจอร์จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวด อาเมเจอร์ ฟลักซ์แม่เหล็กจะไหลจากขั้วสเตเตอร์หนึ่งไปอีกขั้วสเตเตอร์หนึ่ง โดยไหลผ่านช่องว่าง อากาศไปที่ขั้วของโรเตอร์ ซึ่งเมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านแต่ละขั้วของโรเตอร์ จะเกิดอำนาจแม่เหล็ก ้ที่จะไปทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กถาวรของสเตเตอร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นตามทิศ ทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วสเตเตอร์หนึ่งไปอีกขั้วสเตเตอร์หนึ่ง ส่งผลให้โรเตอร์หมุนตาม ทิศทางการไหลของฟลักซ์แม่เหล็กด้วยความเร็วซิงโครนัส ซึ่งงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องจักรกลแม่เหล็ก ถาวรปัจจุบันมีโครงสร้างหลักๆ สองโครงสร้างคือเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรที่ติดตั้งอยู่ที่โรเตอร์ (rotor-permanent magnet machine, RPM) และเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรที่ติดตั้งอยู่ที่สเตเตอร์ (stator-permanent magnet machine, SPM) เครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรที่ติดตั้งอยู่ที่โรเตอร์ (rotor-permanent magnet machine, RPM) เป็นเครื่องจักรกลที่มีแม่เหล็กถาวรติดตั้งอยู่ที่โรเตอร์ ้และขดลวดอาเมเจอร์ติดตั้งอยู่ที่สเตเตอร์ โดยทั่วไปจะมีความหนาแน่นของแรงบิดสูง ความหนาแน่น ของกำลังสูง ประสิทธิภาพสูง และช่วงความเร็วที่กว้างมาก [3-5] รูปที่ 1 เป็นภาพตัวอย่างการติดตั้ง แม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ แบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ ติดตั้งบนพื้นผิว (surface mounted) ติดตั้งใน พื้นผิว (inset) ติดตั้งในรัศมีภายใน (radial interior) ติดตั้งในเส้นรอบวงภายใน (circumferential interior)



**ภาพที่ 1** การติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ (a) ติดตั้งบนพื้นผิว (b) ติดตั้งในพื้นผิว (c) ติดตั้งในรัศมี ภายใน (d) ติดตั้งในเส้นรอบวงภายใน [1]

เครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรที่ติดตั้งอยู่ที่สเตเตอร์ (stator-permanent magnet machine, SPM) ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลที่มีแม่เหล็กถาวรและขดลวดอาเมเจอร์ติดตั้งที่สเตเตอร์ ทำให้ที่โรเตอร์ไม่มี ขดลวด และแม่เหล็กถาวรติดตั้งอยู่จึงส่งผลให้หมุนได้อย่างอิสระ และใช้แรงบิดเริ่มต้นน้อย ทำให้ เครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรสเตเตอร์มีเหมาะสมกับการใช้ในที่ที่ต้องการความเร็วสูงในการเริ่มหมุน [6, 7] แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเครื่องจักรกลชนิดนี้มีฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านแม่เหล็กถาวรจำนวน มาก และไม่สามารถระบายความร้อนได้ดีมากนัก จึงส่งผลให้เครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรที่ติดตั้ง ที่สเตเตอร์มีข้อเสียในเรื่องของความสูญเสียภายในโครงสร้างสูง ภาพที่ 2 เป็นภาพตัวอย่างการติดตั้ง แม่เหล็กถาวรที่สเตเตอร์ แบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ ติดตั้งโครงภายนอกเป็นเชิงเส้น (Yoke linear magnet) ติดตั้งโครงภายนอกเป็นแนวโค้ง (Yoke curved magnet) ติดตั้งบนพื้นผิวของขั้ว (Tooth surface magnet) ติดตั้งภายในขั้ว (Tooth interior magnet)



**ภาพที่ 2** การติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่สเตเตอร์ (a) ติดตั้งโครงภายนอกเป็นเชิงเส้น (b) ติดตั้งโครง ภายนอกเป็นแนวโค้ง (c) ติดตั้งบนพื้นผิวของขั้ว (d) ติดตั้งภายในขั้ว [3]

โดยเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ SPM สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามตำแหน่งของแม่เหล็ก ที่ถูกติดตั้งภายในโครงสร้างได้แก่ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรแบบฟลักซ์พลิกกลับ (flux-reversal permanent magnet machine, FRPM) เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรแบบดับบ ลี้-ซาเลี่ยน (doubly salient permanent magnet machine, DSPM) และเครื่องจักรกลไฟฟ้า แม่เหล็กถาวรแบบสวิตซ์ฟลักซ์ (switched flux permanent magnet machine, SFPM) ดังแสดง ในภาพที่ 3 [8, 9, 10, 11, 12]



**ภาพที่ 3** เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรอยู่ที่สเตเตอร์ (a) แบบฟลักซ์พลิกกลับ (b) แบบ ดับบลี้-ซาเลี่ยน (c) แบบสวิตซ์ฟลักซ์ [12]

จากภาพที่ 3(a) จะสังเกตได้ว่า เครื่องกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรแบบฟลักซ์พลิกกลับ จะมีการ ติดตั้งแม่เหล็กถาวรอยู่ปลายของขั้วสเตเตอร์เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของพลังงานในโครงสร้างและ ้งยายพื้นที่ในการพันขดลวด แต่โครงสร้างนี้จะส่งผลให้แม่เหล็กถาวรเสื่อมภาพจากความร้อนอย่าง รวดเร็ว เนื่องจากมีจำนวนฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านแม่เหล็กถาวรมากจนเกินไปและไม่สามารถระบาย ความร้อนได้ดีมากนัก ในภาพที่ 3(b) เครื่องกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรแบบดับบลี้-ซาเลี่ยนมีการติดตั้ง แม่เหล็กถาวรอยู่ในส่วนหลังของโครงสร้างสเตเตอร์ ทั้งนี้เพื่อลดโอกาสในการเสื่อมสภาพของแม่เหล็ก ถาวร จากความร้อนเมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงาน แต่จะส่งผลให้โครงสร้างชนิดนี้มีความหนาแน่น ของพลังงานต่ำ อย่างไรก็ตาม เครื่องกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรแบบสวิตซ์ฟลักซ์ ถูกแสดงในภาพที่ 3(c) ้นั้นเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่มีแม่เหล็กถาวรติดตั้งอยู่ตรงกลางระหว่างชิ้นส่วนของสเตเตอร์โดยขั้วของ แม่เหล็กที่อยู่ชิดกันจะมีขั้วที่ตรงกันข้าม โดยมีโรเตอร์เป็นเหมือนสะพานในการเปิดและปิดเส้นทาง การเคลื่อนที่ของฟลักซ์ ส่งผลให้มีความหนาแน่นของพลังงานภายในโครงสร้างสูงมากกว่าโครงสร้าง ้อื่นๆ ดังนั้นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้จึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างมากในการนำไปพัฒนาต่อ เนื่องจาก ้เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้มีความหนาแน่นของกำลังและแรงบิดสูง อีกทั้งยังเป็นโครงสร้างที่เรียบง่าย และทนทาน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็ก ถาวรแบบสวิตซ์ฟลักซ์ ถึงแม้ว่าเครื่องจักรกลชนิดนี้จะมีจุดด้อยคือมีการใช้จำนวนแม่เหล็กมาก และมี พื้นที่สำหรับการพันขดลวดต่ำ [3]

### 2.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์

เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์ และหลักการทำงานของสวิตซ์ฟลักซ์ ถูกเสนอเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1955 [13] โดยหลักการทำงานถูกที่แสดงในภาพที่ 4 พบว่าแม่เหล็ก ถาวรจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น ทำให้โรเตอร์เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นตามทิศทางการไหลของ เส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วสเตเตอร์หนึ่งไปอีกขั้วสเตเตอร์หนึ่ง ส่งผลให้โรเตอร์หมุนตามทิศทางการไหล ของฟลักซ์เชื่อมโยงด้วยความเร็วซิงโครนัส เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่ 180 องศาทางไฟฟ้า ฟลักซ์เชื่อมโยง ที่ผ่านขั้วสเตเตอร์จะกลับทิศแต่จะมีขนาดของฟลักซ์เท่าเดิม ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศทางคงที่ ในแม่เหล็กถาวร เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่ไปตำแหน่งต่างๆ เส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของ โรเตอร์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งปริมาณและทิศทางของฟลักซ์เชื่อมโยงในขดลวด และทำให้ เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (back-EMF) ซึ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์ สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสเตเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ (SPM-FS) และเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ (RPM-FS)



**ภาพที่ 4** หลักการเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์ [19]

เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสเตเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ประกอบด้วย แม่เหล็กถาวร ติดตั้งตรงกลางระหว่างขั้วของสเตเตอร์ ในขณะที่โรเตอร์ของเครื่อง SPM-FS ไม่มีส่วนประกอบติดอยู่ และทำหน้าที่เป็นเพียงเส้นทางสำหรับการไหลของสนามแม่เหล็กเท่านั้น โครงสร้างนี้จึงเรียบง่ายและ ทนทาน ดังนั้นเครื่องจักรกลนี้จึงใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือการใช้งานความเร็ว ต่ำ [8, 10, 11] ในช่วง ค.ศ. 2000 โครงสร้างแบบคลาสสิกของเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิด สเตเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์แบบสามเฟส 12-stator-slot / 10-rotor-slot ถูกนำเสนอ [14] หลังจากนั้นได้ มีการศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับรูปแบบต่างๆ เกี่ยวกับการพัฒนาโครงสร้างและวิธีการควบคุมเพิ่มขึ้น อย่างมาก โดยการพัฒนาโครงสร้างนั้นมุ่งเน้นไปที่การลดจำนวนการใช้แม่เหล็กและขยายพื้นที่การพัน ขดลวดให้มากขึ้น เช่นโครงสร้าง E-core, C-core, V-shaped และ Multi-tooth ดังที่ถูกแสดงใน ภาพที่ 5



**ภาพที่ 5** เทคนิคการพัฒนาโครงสร้าง SFPM (a) E-core (b) C-core (c) V-shaped (d) Multi-tooth [8, 15]

ในปี ค.ศ. 2010 [16] ได้มีการเสนอโครงสร้าง E-core SFPM machine เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และแรงบิดในโครงสร้าง ผลการวิจัยพบว่า E-core SFPM machine สามารถลดจำนวนแม่เหล็กลงได้ ครึ่งหนึ่งจากเครื่องจักรกลต้นแบบในขณะที่ทำงานได้ผลใกล้เคียงกัน จากนั้น V-shaped SFPM machine ถูกนำเสนอในปี ค.ศ. 2013 [15] ผลพบว่าโครงสร้างนี้สามารถเพิ่มแรงบิดและเพิ่ม ประสิทธิภาพการทำงานของแม่เหล็กถาวรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบได้ ในปี ค.ศ. 2016 [17] เทคนิคมัลติเฟสแบบ 6 เฟส ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้าง E-core และ C-core SFPM machine เพื่อลดการรบกวนกันระหว่างเฟส และทดสอบการควบคุมเครื่องกลแบบไฮบริดจ์ ในปี ค.ศ. 2017 [18] การพัฒนาต่อจากโครงสร้าง 6/17 V-shaped SFPM machine ถูกนำเสนอด้วยการปรับปรุง โครงสร้าง 2 แบบ เพื่อพัฒนาแรงบิดต่อหน่วยของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในเร็วๆนี้ ปี ค.ศ. 2017 [11] ได้มี การเสนอเทคนิคมัลติเฟสแบบ 12 เฟส เข้ากับโครงสร้างพื้นฐาน โดย L.shao ผลการวิจัยพบว่า โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า SFPM แบบ 12 เฟสนั้นสามารถเพิ่มความหนาแน่นของพลังงานและ ยังสามารถทำงานภายใต้ความล้มเหลวของบางเฟสภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสเตเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ใน งานวิจัยเหล่านี้ยังมีการใช้จำนวนแม่เหล็กที่สิ้นเปลือง อีกทั้งมีพื้นที่สำหรับการพันขดลวดต่ำส่งผล ให้เกิดความสูญเสียทองแดงสูง และมีความอิ่มตัวของแม่เหล็กต่ำในขั้วสเตเตอร์เนื่องจากมีพื้นที่ ขั้วสเตเตอร์เล็ก ดังนั้นจึงมีการเสนอเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ดังที่ถูก แสดงในรูปที่ 6 เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของเครื่อง SPM-FS โดยการย้ายแม่เหล็กถาวรไปที่โรเตอร์ จึงทำให้ความอิ่มตัวของแม่เหล็กที่ขั้วสเตเตอร์ลดลง และความสามารถในการโอเวอร์โหลดดีขึ้น [19, 20, 21] ด้วยเหตุนี้ เครื่อง RPM-FS จึงมีความหนาแน่นของช่องว่างอากาศ ความหนาแน่นของ กำลัง แรงบิด และประสิทธิภาพที่สูงกว่าภายใต้พิกัดที่กำหนด ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานใน EV และ HEV โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับระบบขับเคลื่อนโดยตรง จากการทบทวนงานวิจัยในปัจจุบันการ พัฒนาเครื่อง RPM-FS ได้รับความสนใจจากการวิจัยเป็นอย่างมาก โดยมีรายละเอียดดังนี้



**ภาพที่ 6** เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ [19]

ในงานวิจัยที่ [21] ได้มีการเปรียบเทียบเครื่องจักรกล 24/10 RPM-FS machine กับเครื่อง 12/10 SPM-FS machine ภายใต้การออกแบบโดยรวมที่เหมือนกัน แสดงให้เห็นว่าโครงสร้าง เครื่องจักรกล RPM-FS มีประสิทธิภาพเหนือกว่าเครื่องจักรกล SPM-FS อย่างชัดเจนในเรื่องของ ความสามารถของแรงบิด แรงบิดกระเพื่อม ความอิ่มตัว และมีช่วงความเร็วที่ดีกว่า ในงานวิจัยต่อมา [22] มีการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียกระแสไหลวนในแม่เหล็ก โดยใช้หลักการทำงานมอดูเลต ผลพบว่าค่าความสูญเสียกระแสไหลวนในแม่เหล็กของเครื่อง RPM-FS ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญต่อ อัตราส่วนกำลังขับของเครื่อง SPM-FS ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่อง RPM-FS นี้มีแรงบิดและความ หนาแน่นของกำลังที่สูงขึ้น และยังมีแรงบิดกระเพื่อมที่ต่ำ ในปี ค.ศ. 2019 [23] มีการวิเคราะห์เพื่อ กำหนดขั้วสเตเตอร์ที่เหมาะสม และการรวมคู่ของขั้วโรเตอร์ของเครื่อง RPM-FS ผลพบว่าการรวมขั้ว ที่เหมาะสมตามที่กำหนดโดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร และสัมประสิทธิ์การพันขดลวด (wingding factor) สามารถทำให้แรงบิดมีค่าสูงขึ้น และมีช่วงการควบคุมความเร็วที่กว้างขึ้น และเมื่อ เร็วๆ นี้ fault-tolerant RPM-FS [24] ซึ่งอ้างอิงจากแม่เหล็กถาวรเสริมที่อยู่ในขั้วโรเตอร์ได้รับการ เสนอเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของฟลักซ์ช่องว่างอากาศ พบว่าโครงสร้างเครื่องนี้สามารถปรับปรุง แรงบิดเอาต์พุตและประสิทธิภาพของโครงสร้างแบบเดิมได้ ในงานวิจัยที่ [25] มีการเสนอเครื่อง RPM-FS ใหม่สำหรับการใช้งาน EV และ HEV ซึ่งจากการงานวิจัยได้รับการพิสูจน์แล้วว่าโครงสร้างนี้ มีความหนาแน่นของแรงบิดสูงมาก และเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการใช้งาน EV และ HEV อย่างไรก็ตาม โครงสร้างเครื่อง RPM-FS ใหม่นี้ยังคงมีการสูญเสียภายในโครงสร้าง ดังนั้นเราจึงมุ่งมั่น ที่จะนำเสนอการปรับปรุงเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มสมรรถนะของแรงบิดและลดค่าความสูญเสียภายใน โครงสร้างต้นแบบนี้ โดยโครงสร้างต้นแบบถูกแสดงในภาพที่ 7



**ภาพที่ 7** เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ

### 2.3 การวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์

โดยในหัวข้อนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด สวิตซ์ฟลักซ์ขณะทำงานในเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด (No-load condition) และขณะทำงานในเงื่อนไขที่มี โหลด (On-load condition) ซึ่งพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาวิเคราะห์การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีโหลด ได้แก่ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force, EMF) และแรงบิดคอกกิ้ง (Cogging torque) ต่อมาพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาวิเคราะห์การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าภายใต้ เงื่อนไขที่มีโหลด ได้แก่ ความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่างอากาศ (Air-gap flux density) การกระจาย ของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux distribution) แรงบิดเฉลี่ย (Average torque) แรงบิด กระเพื่อม (Torque ripple) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (Output power) ค่าความสูญเสียต่างๆ (Losses) และประสิทธิภาพ (Efficiency) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.3.1 การวิเคราะห์ค่าเอาต์พุตของเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์บน เงื่อนไขที่ไม่มีโหลด

โดยในหัวข้อนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าขณะทำงาน ในเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์ ได้แก่ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force, EMF) และแรงบิดคอกกิ้ง (Cogging torque, *T<sub>cog</sub>*) โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

**แรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force,** *EMF***)** เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่บ่ง บอกถึงระดับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเงื่อนไขไม่มีโหลด [26] เมื่อ โรเตอร์เปลี่ยนตำแหน่ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเทียบกับเวลา จึงทำให้เกิด แรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น ค่าของ EMF จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงของ เส้นแรงแม่เหล็กเทียบกับเวลา ซึ่งถูกเรียกว่า กฎของฟาราเดย์ ดังสมการต่อไปนี้

$$\overline{EMF} = -N\frac{d\phi}{dt} \tag{1}$$

เมื่อ  $\overline{EMF}$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage) N คือ จำนวนรอบของขดลวด  $\phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านขดลวด

เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กตามกฎของ ฟาราเดย์ ขั้วของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำจะทำให้เกิดกระแสขึ้น ซึ่งสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำ แรงเคลื่อนไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ภายในขดลวด และทำหน้าที่รักษาเส้นแรงแม่เหล็กในโครงสร้างให้คงที่ เสมอ ซึ่งเครื่องหมายลบจะแสดงถึงทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำที่ไหลในวงจรทำให้เกิด สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต้นกำเนิด เรียกว่า สมการของเลนซ์ (Lenz's law)

**แรงบิดคอกกิ้ง (Cogging torque,**  $T_{cog}$ ) คือแรงบิดเริ่มต้นของเครื่องจักรกล ไฟฟ้าที่ยังไม่มีการจ่ายกระแสให้กับโหลด กล่าวคือเป็นแรงบิดเริ่มต้นระหว่างแม่เหล็กถาวรที่รวมอยู่ กับสเตเตอร์ [27] กับโรเตอร์ที่เป็นขั้วยื่นในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์เพียง อย่างเดียว ซึ่งค่าของแรงบิดคอกกิ้งนี้จะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงพลังงานในช่องว่างอากาศเทียบกับ ตำแหน่งของโรเตอร์ทางกลที่เปลี่ยนไป ซึ่งแรงบิดคอกกิ้งนี้เป็นส่วนประกอบที่ไม่ต้องการสำหรับการ เริ่มเดินเครื่องทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า จึงมักต้องการให้แรงบิดนี้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งมีความสัมพันธ์ ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์ ตามสมการดังต่อไปนี้

$$T_{cog}(\theta) = -\frac{dW_{airgap}}{d\theta_{mech}}$$
(2)

เมื่อ

 $T_{cog}$ คือ แรงบิดคอกกิ้ง (Newton/meter) $W_{airgap}$ คือ พลังงานในช่องว่างอากาศ $heta_{mech}$ คือ ตำแหน่งของโรเตอร์ทางกล

### 2.3.2 การวิเคราะห์ค่าเอาต์พุตของเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์บน เงื่อนไขที่มีโหลด

โดยในหัวข้อนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าขณะทำงาน ในเงื่อนไขที่มีโหลด ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์ ได้แก่ ความหนาแน่นฟ ลักซ์ของช่องว่างอากาศ (Air-gap flux density) การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux distribution) แรงบิดเฉลี่ย (Average torque) แรงบิดกระเพื่อม (Torque ripple) กำลังไฟฟ้า เอาต์พุต (Output power) ค่าความสูญเสียต่างๆ (Losses) และประสิทธิภาพ (Efficiency) โดยมี รายละเอียดดังต่อไปนี้

ความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่างอากาศ (Air-gap flux density,  $ar{B}$ ) คือ จำนวนของฟลักซ์ที่แรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำเคลื่อนที่ผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ของช่องว่างอากาศ ซึ่งการ วิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์ จะประกอบไปด้วยความเข้มสนามแม่เหล็ก (Intensity,  $ar{H}$ ) กับ ความเป็นสนามแม่เหล็ก (Magnetization,  $ar{M}$ ) ดังสมการที่ 3

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \tag{3}$$

เมื่อ  $ar{B}$  คือ ความหนาแน่นฟลักซ์ (Tesla)

 $\mu_0$  คือ ความซึมซาบได้ของวัสดุ (Henries/meter)

- *H* คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Ampere/meter)
- $ar{M}$  คือ ความเป็นสนามแม่เหล็ก (Ampere/meter)

ซึ่งในช่องว่างอากาศความเป็นสนามแม่เหล็กจะมีค่าต่ำมากๆ จนใกล้เคียงเท่ากับ 0 และมีค่าความซึมซาบของวัสดุในอากาศเท่ากับ 4πx10<sup>-7</sup> ดังนั้นการคำนวนความหนาแน่นฟลักซ์ของ ช่องว่างอากาศ จึงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \tag{4}$$

การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux distribution,  $\phi$ ) โดยทั่วไป แล้ว สนามแม่เหล็กเมื่อมีการจ่ายกระแสหรือเกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร จะทำ ให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ของขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดความหนาแน่นขึ้นในพื้นที่ของ ขดลวดที่เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจึงมีความสัมพันธ์กันระหว่างความ หนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กและพื้นที่ของขดลวด ดังสมการต่อไปนี้

$$\phi = \overline{B}A \tag{5}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ของขดลวด

เมื่อโรเตอร์เปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามเวลา ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ ของขดลวด สนามแม่เหล็กก็จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น

แรงบิดเฉลี่ย (Average torque, *T<sub>avg</sub>*) และแรงบิดกระเพื่อม (Torque ripple, *T<sub>ripple</sub>*) แรงบิดเฉลี่ยในมอเตอร์จะเกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ ให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น ทำให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ในการหมุนด้วยความเร็วของเครื่องจักรกลซึ่ง หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ดังนั้นจึงมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_{avg} = \frac{60E_b I_a}{2\pi N_s} \tag{6}$$

เมื่อ  $E_{b}$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (Voltage)

 $I_a$ คือ กระแสในขดลวดอาเมเจอร์ (Ampere)

 $N_{s}$  คือ ความเร็วซิงโครนัส (Round/minute)

ซึ่งแรงบิดนี้จะมีค่าไม่คงที่ หรือเกิดการกระเพื่อมขึ้นลง ซึ่งถูกเรียกว่าแรงบิด กระเพื่อม (*T<sub>ripple</sub>*) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการสั่นและเสียง ซึ่งเป็นสิ่งที่จะก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ ดังนั้นการที่แรงบิดกระเพื่อมมีค่าที่ต่ำจึงจะดีต่อRetrieved เครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งการเปรียบเทียบค่าแรงบิดกระเพื่อม มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดเฉลี่ย (T<sub>ave</sub>) กับแรงบิดสูงสุด  $(T_{max})$  และแรงบิดต่ำสุด  $(T_{min})$ 

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \times 100$$
(7)

กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (Output power, Pout) โดยทั่วไปเครื่องจักรกลไฟฟ้า ้ค่า Output power ก็คือกำลังไฟฟ้าทางกลในมอเตอร์ที่นำไปขับเคลื่อนโหลดต่อ หรือกำลังไฟฟ้า เอาต์พุตในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้ โดยงานวิจัยนี้การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะ เปรียบเทียบในรูปแบบการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งเกิดจากการจ่ายกระแสให้โหลดทำให้เกิดแรงบิดขึ้น ที่มอเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วของเครื่อง ซึ่งมีความเร็วรอบเป็นซิงโครนัสใน 1 รอบต่อ ้นาที ดังนั้นความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของมอเตอร์จึงมีสมการดังนี้

$$P_{out} = \frac{2\pi N_s T_{avg}}{60} \tag{8}$$

**ค่าความสูญเสียต่างๆ (Losses)** ซึ่งโดยทั่วไปเครื่องจักรกลไฟฟ้าส่วนใหญ่ ้จะประกอบไปด้วยขดลวดอาเมเจอร์และขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งเมื่อเกิดการเหนี่ยวนาไฟฟ้าขึ้น ภายในเครื่องจักรกล และเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านค่าความต้านทานของขดลวด จะส่งผลให้เกิดความ ้ร้อนขึ้นที่ขดลวด ซึ่งเราเรียกว่าเป็นการสูญเสียภายในขดลวด (Copper loss) สามารถเขียน ความสัมพันธ์ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{copper} = I^2 R \tag{9}$$

เมื่อ คือ การสูญเสียภายในขดลวด (Watts)  $P_{c}$ Ι

คือ กระแสไฟฟ้า (Amperes)

คือ ความต้านทาน (Ohms) R

นอกจากนี้เครื่องจักรกลยังประกอบไปด้วยแกนเหล็กเพื่อประกอบเป็นวงจรแม่เหล็กใช้ในการ เปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งแกนเหล็กสามารถนาไฟฟ้าได้ และสามารถเหนี่ยวนาให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า และกระแสไหลในแกน จากการเปลี่ยนแปลงการไหลของฟลักซ์แม่แหล็กในแกน ซึ่งการเปลี่ยนแปลง ฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนสุดท้ายจะเกิดความร้อนขึ้น ทาให้เกิดเป็นการสูญเสียภายในแกน (Core loss) ซึ่งการสูญเสียในแกนเหล็กจะประกอบไปด้วยการสูญเสีย Hysteresis และการสูญเสียกระแส ไหลวน ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_c = P_h + P_e \tag{10}$$

เมื่อ  $P_c$  คือ การสูญเสียในแกนเหล็ก (Watts)

 $P_h$  คือ การสูญเสีย Hysteresis (Watts)

 $P_e$ คือ การสูญเสียกระแสไหลวน (Watts)

การสูญเสีย Hysteresis คือ การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นให้เกิดสนามแม่เหล็กโดย กระแสไฟฟ้าขนาดไม่คงที่ จะทาให้เกิดความร้อนภายในแกน ซึ่งเป็นการสูญเสียกาลังไฟฟ้าเมื่อความ ร้อนนั้นไม่ได้ใช้งาน จึงเป็นการสูญเสียในแกนที่เรียกว่า Hysteresis loss ซึ่งมีความสัมพันธ์ตาม สมการดังต่อไปนี้

$$P_h = K_h B_{\max}^2 f \tag{11}$$

เมื่อ

การสูญเสียกระแสไหลวน คือ การที่ฟลักซ์แม่เหล็กไหลในแกนเหล็กและเปลี่ยนแปลงขนาด ตามเวลา การเปลี่ยนแปลงนี้จะเหนี่ยวนาให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในแกนเหล็ก และเมื่อแกนเหล็กนา ไฟฟ้าจะทาให้เกิดการครบวงจรไฟฟ้า และเกิดกระแสไฟฟ้าไหลวน (eddy current) เมื่อกระแส ไหลวนเกิดขึ้นที่แกนเหล็กจะทาให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งจะทาให้เกิดเป็นการสูญเสียภายในแกนเหล็ก เรียกว่า การสูญเสียกระแสไหลวน (eddy current loss) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_e = K_e B_{\rm max}^2 f^2 \tag{12}$$

เมื่อ

f

 $P_e$ คือ การสูญเสียกระแสไหลวน (Watts)

 $K_e$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Eddy current

B<sub>max</sub> คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (Tesla)

คือ ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz)

ประสิทธิภาพ (Efficiency) โดยประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร นั้นสามารถวัดจากกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกับกำลังไฟฟ้าอินพุต ซึ่งกำลังไฟฟ้าอินพุตที่ป้อนให้กับ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรจะประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสกับกระแส และยังมีกำลัง บางส่วนที่สูญเสียไปได้แก่ การสูญเสียภายในขดลวด การสูญเสียภายในแกน และการสูญเสียกระแส ไหลวนในแม่เหล็กถาวร ดังนั้นการหาประสิทธิภาพ (Efficiency, **η**) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็ก ถาวรที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและกำลังไฟฟ้าอินพุต จึงสามารถนำมาเขียนสมการ ได้ดังต่อไปนี้

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \tag{13}$$

ซึ่งค่าของกำลังไฟฟ้าอินพุตสามารถคำนวณได้จาก

$$P_{in} = 3VI\cos\theta = P_{out} + Losses \tag{14}$$

เมื่อ V คือ แรงดันไฟฟ้า (V<sub>rms</sub>) I คือ กระแสไฟฟ้า (A<sub>rms</sub>)  $\cos heta$  คือ เพาเวอร์แฟกเตอร์

### 2.4 ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนั้น พบว่าวิธีหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมในการเพิ่ม สมรรถนะ และลดค่าความสูญเสียภายในโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรคือการใช้ตัวกั้น เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux barrier) ในโครงสร้าง ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux barriers) มีการติดตั้งหลักๆ คือ ติดตั้งที่โรเตอร์ และติดตั้งที่สเตเตอร์ซึ่งสามารถเพิ่มแรงบิดและลด แรงบิดกระเพื่อมได้ โดยทั่วไปตัวกั้นเส้นแรงจะอยู่ที่ปลายทั้งสอง ของแม่เหล็กเพื่อปรับสนามแม่เหล็ก รอบๆขั้วของโรเตอร์ นอกจากสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ตัวกั้นเส้นแรง แม่เหล็กยังสามารถติดตั้งเพื่อลดค่าความสูญเสียภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้

ในปี ค.ศ. 2009 [28] ได้มีงานวิจัยออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 8 มาใช้ ในเครื่องจักรกล synchronous reluctance machine ซึ่งจากการออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่ เหมาะสมสามารถทำให้แรงบิดกระเพื่อมลดน้อยลงได้



**ภาพที่ 8** การออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กโดยพัฒนาจากแบบ R-type และ J-type [28]

ต่อมาในปี ค.ศ. 2010 [29] ได้มีการออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กมาใช้กับมอเตอร์แม่เหล็ก ถาวรชนิด Interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) ดังแสดงในภาพที่ 9 เพื่อลดแรงบิดกระเพื่อมและแรงบิดขณะเริ่มหมุนให้น้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของแรงบิดดีขึ้นได้



**ภาพที่ 9** การออกแบบหาค่าที่เหมาะสมของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก [29]



**ภาพที่ 9** การออกแบบหาค่าที่เหมาะสมของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก [29] (ต่อ)

ในปี ค.ศ. 2014 ได้มีการออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กมาใช้กับมอเตอร์แม่เหล็กถาวรชนิด Interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) ซึ่งทำการออกแบบตัวกั้นเส้นแรง แม่เหล็ก 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปร่างซับซ้อนสูง รูปร่างซับซ้อนปานกลาง และรูปร่างซับซ้อนน้อย ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพลักษณะทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ให้ดี ขึ้นได้ [30]



**ภาพที่ 10** การออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) รูปร่างซับซ้อนสูง (b) รูปร่างซับซ้อนปานกลาง (c) รูปร่างซับซ้อนน้อย [30]

ต่อมางานวิจัยในปี ค.ศ. 2014 [31] ได้เสนอการออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กมาใช้กับ มอเตอร์ชนิด interior permanent magnet synchronous motor โดยออกแบบตัวกั้นเส้นแรง แม่เหล็กให้มีขนาดไม่สมมาตร ดังแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งสามารถลดแรงบิดกระเพื่อมและแรงบิดขณะ เริ่มหมุนได้ดีขึ้น



**ภาพที่ 11** การออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กรูปแบบไม่สมมาตร [31]

ในปี ค.ศ. 2014 [32] ได้มีการออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กมาใช้กับมอเตอร์ Multilayer interior permanent-magnet synchronous motor โดยนำตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กมาติดตั้งที่ โรเตอร์ของมอเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 12 ซึ่งส่งผลให้สามารถลดค่าความสูญเสียของโรเตอร์ อีกทั้ง สามารถลดแรงบิดกระเพื่อมและแรงบิดคอกกิ้งให้น้อยลงได้



**ภาพที่ 12** การออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) V type (b) 2-V type (c) ∇ type [32]

ต่อมาในปี ค.ศ. 2015 ได้มีการออกแบบนำตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กมาใช้กับเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวร ชนิด Interior permanent magnet synchronous machine (IPMSM) ซึ่งทำการออกแบบตัวกั้น เส้นแรงแม่เหล็ก 4 รูปแบบได้แก่ รูปทรงสามเหลี่ยม รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู เพิ่มเติมด้วยสามเหลี่ยม และรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูเพิ่มเติมด้วยชั้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 13 เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของแรงบิดให้ดีขึ้น โดยการออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กให้เหมาะสมกับ เครื่องจักรกลชนิดนี้ เพื่อลด Cogging torque, แรงบิดกระเพื่อม และเพิ่มค่าเฉลี่ยของแรงบิด [33]



**ภาพที่ 13** การออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) รูปทรงสามเหลี่ยม (b) รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (c) รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูเพิ่มเติมด้วยสามเหลี่ยม (d) รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูเพิ่มเติม ด้วยชั้นตรง [33] ในปี ค.ศ. 2016 ได้มีงานวิจัยการออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กมาใช้กับเครื่องจักรกล แม่เหล็กถาวรชนิด Spoke-type interior permanent magnet machine (IPM) โดยกำหนดความ แตกต่างของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก 2 แบบ ได้แก่ Conventional และ Alternate ดังแสดงในภาพที่ 14 ซึ่งจะต่างกันที่ความกว้างของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งจากการออกแบบตัวกั้นแม่เหล็กนี้สามารถ ช่วยให้เครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรมีฟลักซ์ที่รั่วไหลลดน้อยลงได้ [34] และในปีเดียวกันได้มีงานวิจัย การนำตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กมาใช้กับเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิด Fractional-Slot Concentrated-Winding Synchronous โดยกำหนดความแตกต่างของเครื่องจักรกล 3 แบบ ได้แก่ นำโรเตอร์หลังเหล็กออกโดยสมบูรณ์ (Yokeless) ติดตั้งตัวกั้นที่แกน d (d slit) และติดตั้งตัวกั้นที่แกน q (q slit) ดังแสดงในภาพที่ 15 ซึ่งสามารถลดค่าความสูญเสียของโครงสร้างเครื่องกลไฟฟ้าให้ เครื่องกลมีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ [35]



ภาพที่ 14 การออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) Conventional (b) Alternate [34]


**ภาพที่ 15** การกำหนดความแตกต่างเครื่องจักรกล (a) นำโรเตอร์หลังเหล็กออกโดยสมบูรณ์ (Yokeless) (b) ติดตั้งตัวกั้นที่แกน d (d slit) (c) ติดตั้งตัวกั้นที่แกน q (q slit) [35]

ในปี ค.ศ. 2017 และปี ค.ศ. 2019 ได้มีงานวิจัยการนำตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กมาใช้กับ เครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรแบบสวิตซ์ฟลักซ์ โดยนำตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กติดตั้งที่โครงและขั้ว ของโรเตอร์ จากภาพที่ 16 และภาพที่ 17 เป็นภาพตัวอย่างการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กของ เครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรแบบสวิตซ์ฟลักซ์ ซึ่งการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กในเครื่องจักรกลแบบ ต่างๆ มีผลสำคัญที่ช่วยลดค่าความสูญเสียและอาจส่งผลต่อแรงบิดเล็กน้อย แต่ทำให้เครื่องจักรกลมี ประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ จะพบว่าตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กมีผลลดค่าความสูญเสียอย่างมีนัยสำคัญและลด แรงบิดกระเพื่อมให้มีขนาดเล็กลงจากต้นแบบของเครื่องจักรกล และยังส่งผลให้แรงบิดลดลงเพียง เล็กน้อย [36, 37]



**ภาพที่ 16** การติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) ติดตั้งที่โครงของโรเตอร์ (b) ติดตั้งที่ขั้วของโรเตอร์ [36]



**ภาพที่ 17** การติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (a) ติดตั้งที่โครงของโรเตอร์ (b) ติดตั้งที่ขั้วของโรเตอร์ [37]

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นเทคนิคที่ดีในการปรับปรุงประสิทธิภาพของ เครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งสามารถเพิ่มแรงบิดเอาต์พุตและลดค่าความสูญเสียภายในโครงสร้าง เครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยการปรับการไหลเวียนของเส้นแรงแม่เหล็ก [41-45] ปรับปรุงประสิทธิภาพของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรได้หลากหลาย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ลดการสูญเสียของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัส (PM synchronous machine, PMSM) [32, 35] และเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์ (Flux-switching permanent magnet machine, FSPM) [36, 37] สามารถปรับปรุงแรงบิดและประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส แม่เหล็กถาวรภายใน (Interior permanent magnet synchronous machine, IPMSM) [30, 33, 40] และเครื่องจักรกลไฟฟ้า PMSM [28, 29, 30, 31, 34]

### 2.5 ทฤษฎีวิธีพื้นผิวตอบสนอง

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวกับการออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก มีการใช้วิธีการ หลายอย่างในการออกแบบรูปร่างตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก เช่น วิธีการพื้นผิวตอบสนอง หรือการเพิ่ม ประสิทธิภาพด้วยวิธีการออกแบบโดยตรง [28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 46, 47] ซึ่งพบว่าวิธีการพื้นผิวตอบสนองนั้นเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาตัวแปรที่ต้องการออกแบบ ในระดับที่ไม่ซับซ้อนเกินไป ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบที่ ไม่ซับซ้อน [48, 49, 50, 51, 52]

โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) เป็นวิธีการทาง คณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาซึ่งผลตอบสนองที่ สนใจขึ้นอยู่กับผลจากตัวแปรต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือค่าที่ดีที่สุดของตัวแปรนั้น โดยจะ แสดงผลพื้นผิวตอบสนองในรูปแบบสามมิติ (Surface plot) หรือพล็อตเป็นเส้นโครงร่างสองมิติ (Contour plot) ของพื้นผิวตอบสนอง โดยจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองและ ค่าของตัวแปรอิสระ ซึ่งขั้นตอนแรกต้องใช้ค่าประมาณแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นตัวประกอบ สำหรับแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Y กับค่าของตัวแปรอิสระที่คาดการณ์ ดังสมการที่ 15 ซึ่งผลที่ ได้ของพื้นผิวตอบสนองจะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่าของตัวแปรอิสระ และอาจมีส่วนโค้ง ภายในผลของพื้นผิวตอบสนอง ดังในภาพที่ 18 ที่แสดงให้เห็นตัวอย่างพื้นผิวตอบสนองรูปแบบ สามมิติ (Surface plot) ที่มีส่วนโค้งภายในพื้นผิว

$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum_{k=1}^{K} \beta_k X_k + \sum_{k=1}^{K} \beta_k X_k^2 + \sum_{j < k} \sum \beta_{jk} X_k X_j$$
(15)

เมื่อ ^

- $\stackrel{\wedge}{Y}$  คือ การตอบสนองที่คาดการณ์ $oldsymbol{eta}_{0}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่
- 0. แถ แ เยท การยุ แกแข เป
- $eta_{\mathsf{k}}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นตรง
- $eta_{\mathsf{ik}}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งประเมินจากการตอบสนอง
- X<sub>k</sub> คือ ค่าพารามิเตอร์อินพุตเชิงเส้นตรง
- X<sub>j</sub> คือ ค่าพารามิเตอร์อินพุตกำลังสอง



**ภาพที่ 18** ตัวอย่างพื้นผิวตอบสนองรูปแบบสามมิติ (Surface plot)

ปัญหาของพื้นผิวตอบสนองส่วนใหญ่จะใช้การจำลองแบบกำลังหนึ่งหรือกำลังสอง เพื่อกำหนดการหาผลตอบสนอง แต่ผลของการจำลองแบบกำลังหนึ่งหรือกำลังสองไม่สามารถใช้ใน การประมาณค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดที่มีต่อพื้นผิวตอบสนองได้ ยิ่งถ้าพื้นผิวที่ต้องการมี ช่วงที่กว้างมากขึ้น อาจจะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดในผลที่ได้จากพื้นผิวตอบสนองได้ ดังนั้นการ ออกแบบพื้นผิวตอบสนองจึงมีหลายวิธีใช้เพื่อค้นหาผลของค่าพื้นผิวตอบสนองที่ดีที่สุด โดยวิธีที่นิยม ใช้ในการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง เช่น การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) และการออกแบบบ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken Design, BBD)

การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) เป็นการออกแบบที่ นิยมเพื่อหาพื้นผิวตอบสนองที่เหมาะสม โดยหลักการออกแบบส่วนประสมกลาง คือ การขยายการ ออกแบบแฟกทอเรียล 2<sup>k</sup> เสริมด้วยการเพิ่มจำนวนจุดทดลองที่จุดศูนย์กลาง การออกแบบนี้ทำให้ สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่จำเป็นเพื่อให้พอดีกับแบบจำลอง ซึ่งหลักการทำงานของ ผลตอบสนองที่กำหนดการออกแบบส่วนประสมกลาง ประกอบด้วยการออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป กำลังสอง 2<sup>2</sup> เสริมด้วยการทำงานผ่านพื้นผิวสองสามรอบที่จุดศูนย์กลาง และการผ่านพื้นผิวที่จุด (-1,0), (1,0) (0,-1) และ (0,1) จุดเหล่านี้เรียกว่าจุดแกนหรือจุดดาว ซึ่งระยะทางจากจุดศูนย์กลางของ การออกแบบจะกำหนดด้วยค่า  $\alpha$  ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกช่วงระดับปัจจัยของตัวแปรค่าต่ำ (Low) และค่า สูง (High) ซึ่งระบุเป็นค่าเฉพาะ ตัวอย่างเช่น มี  $\alpha = 1$  สามารถสังเกตได้ว่าเมื่อ  $\alpha$ >1 ตัวแปรแต่ละ ปัจจัยจะทำงานที่ห้าระดับ (- $\alpha$ , -1, 0, 1 และ  $\alpha$ ) ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 การออกแบบส่วนประสมกลาง

การออกแบบบ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken Design, BBD) เป็นการออกแบบหาพื้นผิว ตอบสนองโดยการออกแบบสามระดับ ซึ่งเกิดจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2<sup>k</sup> กับการ ออกแบบบล็อกที่ไม่สมบูรณ์ เพื่อมีความเหมาะสมกับแบบจำลองและการตอบสนอง ซึ่งผลจากการ ออกแบบนี้มีประสิทธิภาพทางด้านจำนวนการรันค่าที่ต้องการ เนื่องจากการออกแบบนี้เป็นการ ออกแบบรูปทรงกลมที่จุดทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี 2 และไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอด ของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดกำจัดบนและล่างของแต่ตัวแปรเอาไว้ ซึ่งจะทำให้เกิดประโยชน์มาก เมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์เป็นการรวมปัจจัยระดับ (Factor-level combination) ที่มีข้อจำกัด ทางด้านกายภาพของกระบวนการ ภาพที่ 20 แสดงตัวอย่างการออกแบบบ็อกซ์-เบนเคนลูกบาศก์ที่ สร้างขึ้นจากขีดกำจัดบน (Factor +1) และล่าง (Factor -1)



**ภาพที่ 20** การออกแบบบ็อกซ์-เบนเคน

### 2.6 ทฤษฎีไฟล์ไนท์เอเลเมนต์

ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method, FEM) เป็นระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขที่ ใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมและฟิสิกส์คณิตศาสตร์ (mathematical physics) รูปแบบของ ปัญหาส่วนใหญ่ ประกอบไปด้วย การวิเคราะห์โครงสร้าง (structural analysis) การถ่ายเทความร้อน (heat transfer) รวมไปถึงศักยภาพทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการแก้ไขปัญหา แบบจำลอง โครงสร้างจะถูกแบ่งออกด้วยวิธีตาข่าย (mesh generation) เป็นชิ้นส่วน แต่ละชิ้นส่วนจะถูกเรียกว่า เอลิเมนต์ (element) และถูกแก้ไขปัญหาด้วยสมการอนุพันธ์ (differential equation) และสมการ ปริพันธ์ (integral equation) ขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหา นอกจากนี้ปัจจัยที่สำคัญสำหรับการแก้ไข ้ปัญหาด้วยวีธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ แบ่งออกเป็น รูปแบบ ขนาด และจำนวนของเอลิเมนต์ ซึ่งระเบียบ ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมและแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดขึ้น โดยอาศัยการแก้ปัญหาระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ้ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลลัพท์โดยประมาณของปัญหาที่กำหนดขึ้นมาผ่านคอมพิวเตอร์ ้ ปัจจุบันการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอเลเมนต์เข้ามามีบทบาทในการศึกษาเชิงวิศวกรรมมาก ขึ้น มีการประยุกต์ใช้ในหลายสาขาวิชา โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์เป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัยทำให้ การขึ้นรูปแบบจำลองทำได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และเป็นโครงสร้างที่เสมือนความจริง ส่งผลให้การ ้คำนวณแม่นยำมากขึ้น [53] การทดลองได้ไม่จำกัดครั้ง การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ได้สะดวก เป็นไปตามคุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุที่นำมาศึกษา ซึ่งสามารถศึกษาพฤติกรรมของวัสดุที่มีลักษณะ ทางกายภาพแตกต่างกัน ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งวิเคราะห์ได้หลากหลายรูปแบบเช่น ความ ้เค้น ความเครียด การถ่ายเทความร้อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาในการสร้างแบบจำลองหรือ สถานการณ์จริง และช่วยลดค่าใช้จ่ายในงานวิจัยลงได้ แม้ว่า ระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ จะมีข้อดี หลากหลายประการ แต่ผู้ที่ศึกษาควรตระหนักไว้ว่าควรมีการทดสอบอื่นๆเพื่อช่วยยืนยันผลจากการ ้วิเคราะห์เพิ่มเติมเช่นกัน โดยข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์นั้นคือ การสร้างแบบจำลองที่มีความซับซ้อน ต้องอาศัยความชำนาญและประสบการณ์ของผู้ศึกษาให้มากพอ และอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณควรมีประสิทธิภาพที่สูงมากพอ โดยแบบจำลองที่ได้อาจจะไม่ เหมือนสภาวะจริงอย่างสมบูรณ์ ซึ่งความคลาดเคลื่อนในการสร้างแบบจำลองเป็นเหตุผลที่สำคัญที่ทำ ให้เกิดผลการศึกษาที่แตกต่างไปจากความเป็นจริง เนื่องจากการกำหนดขอบเขตในการศึกษาอาจจะ ไม่ครอบคลุมสภาวะความเป็นจริงได้ทั้งหมด จึงควรมีการทดสอบอื่นๆเข้ามาประกอบเพื่อยืนยันผล การศึกษาร่วมด้วยอยู่เสมอ [54, 55]

รูปแบบของเอลิเมนต์ จะขึ้นอยู่กับปัญหาทางด้านกายภาพและรูปทรงของโครงสร้าง โดย ปกติแล้วรูปทรงที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ เป็นรูป แบบ สามเหลี่ยม (3 ขอบ และ 2 หรือ 6 จุด) และแบบสี่เหลี่ยม (4 ขอบ และ 4 หรือ 8 จุด) ดังแสดงใน ภาพที่ 21 จำนวนขอบและจำนวนจุดของแต่ละรูปแบบมีผลต่อความแม่นยำในการแก้ไขปัญหา ขนาด และจำนวนของเอลิเมนต์ ถ้าเอลิเมนต์มีขนาดเล็กจะมีความแม่นยำในการคำนวนเพิ่มขึ้น แต่จะ เสียเวลาในการคำนวนมากขึ้นไปด้วยเช่นกัน ขนาดของเอลิเมนต์จะเกี่ยวข้องกับตำแหน่งและจำนวน ของเอลิเมนต์ของแต่ละปัญหาโครงสร้าง เช่น ถ้าเอลิเมนต์มีขนาดเล็กส่งผลต่อจำนวนที่มากขึ้นและ ตำแหน่งการคำนวนที่เปลี่ยนไป ภาพที่ 22 แสดงการลู่เข้าหาผลลัพธ์ที่แม่นยำด้วยการเพิ่มจำนวนของ เอลิเมนต์ให้มากขึ้น [26, 56]



**ภาพที่ 21** รูปแบบของเอลิเมนต์ในระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [56]



ภาพที่ 22 การลู่เข้าหาผลลัพธ์ (the convergence in results) [56]

องค์ประกอบพื้นฐานการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ที่สำคัญ ประกอบไปด้วย แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ ค่าเฉพาะของวัสดุที่ต้องการศึกษา เงื่อนไขขอบเขตและพลังงานจาก ภายนอกระบบที่มากระทำ โดยจะแบ่งขั้นตอนออกมาเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ ประกอบด้วย ระยะก่อน ประมวลข้อมูล (pre-processing phase) ระยะประมวลข้อมูล (solution phase) และระยะหลัง ประมวลข้อมูล (post-processing phase) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ระยะก่อนประมวลข้อมูล (pre-processing phase) เป็นขั้นตอนเตรียมแบบจำลองก่อนเข้าสู่ ขั้นตอนประมวลผลเป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลต่อความถูกต้องแม่นยำในการวิเคราะห์ แบบจำลองที่ดี ควรมีความเหมือนหรือใกล้เคียงภาวะจริงมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ผลลัพธ์มีความใกล้เคียงกับ สภาพความเป็นจริงมากที่สุด แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์เป็นได้ ทั้งแบบสองมิติหรือสามมิติขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา ซึ่งแบบจำลอง 3 มิติ (3D) จะให้ผลลัพธ์ ที่แม่นยำมากกว่าแบบจำลอง 2 มิติ (2D) เนื่องจากแบบจำลอง 3D นั้นมีกระบวนการขึ้นรูปที่ซับซ้อน มากกว่า และเทคโนโลยีขั้นสูง การสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิ เมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญได้แก่ การขึ้นรูปแบบจำลอง การแบ่งเอลิเมนต์ การขึ้นรูปแบบจำลอง (model simulation) โดยการวาดแบบจำลองด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์ เช่น Solid Works, COMSOL, Ansys maxwell และ Ansys electronics เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เทคนิค การถ่ายภาพหรือกราดผิว (scan) วัตถุต้นแบบ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนขึ้น รูปแบบจำลองเก็บในรูปแบบดิจิทัลที่เรียก ว่า DICOM (digital Imaging and communications in medicine) และจะถูกนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรมต่างๆที่ได้ยกตัวอย่างมา เพื่อสร้างแบบจำลอง สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

การแบ่งเอลิเมนต์ (meshing model) ขั้นตอนแก้ปัญหาด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ ขั้นสูง (discretization) ในการแบ่งรูปร่าง (meshing geometry) ขอบเขตของปัญหาที่มีความ ซับซ้อนออกเป็น ชิ้นส่วนย่อยเรียกว่าเอลิเมนต์ (element) ที่มีขนาดเล็กลง เพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อ การคำนวณ โดยแต่ละ element จะมีคุณสมบัติ เฉพาะตัวทางกายภาพ เช่น ความหนา ความ หนาแน่น เป็นต้น เป็นไปตามชนิดของวัสดุที่ต้องการศึกษา element ที่ถูกแบ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ ฟังก์ชัน การประมาณภายใน (interpolation functions) ที่แตกต่างกัน ไปขึ้นกับรูปร่าง ขอบเขต จำนวนจุดต่อ element ที่อยู่ชิดกัน การใช้จุดต่อร่วมกันโดยมีขอบที่เป็นขอบเขตเชื่อมต่อกันระหว่าง จุดต่อของเอลิเมนต์ นอกจากจุดต่ออยู่บริเวณมุมของเอลิเมนต์ แล้วยังอยู่บนขอบที่เชื่อมต่อกัน ระหว่างจุดต่อสองจุด เรียกว่าจุดต่อกลาง (midside node) การเพิ่มจำนวนจุดต่อบนแบบจำลองจะ ช่วยให้การวิเคราะห์ผลมีความแม่นยำมากขึ้น

ระยะประมวลข้อมูล (solution phase) โดยนำระบบคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ทางงาน วิศวกรรม (computer aided engineering; CAE) ช่วยประมวลผลจากสมการรวมระบบ ของแต่ละ เอลิเมนต์ที่เกิดขึ้น เพื่อให้ได้ค่าผลเฉลี่ยโดยประมาณ ซึ่งความแม่นยำที่ได้ขึ้นกับการกำหนดขนาด รูปร่าง จำนวนของเอลิเมนต์ และการสมมติรูปแบบของฟังก์ชันภายในโดยประมาณ ถ้ากำหนดค่า ดังกล่าวได้ใกล้เคียงกับความจริงมาก ผลเฉลี่ยที่ได้ก็จะแม่นยำมากขึ้น โดยการแปลผลข้อมูลจากการ วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (interpretation) ผลลัพธ์ที่ได้จะขึ้นกับข้อมูลของ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ ป้อนเข้าสู่โปรแกรมเพื่อให้ประมวลผลได้ตามต้องการ ซึ่งการคำนวณเชิง วิศวกรรมจะพิจารณาองค์ประกอบโครงสร้าง วัสดุเป็นเชิงสามมิติ โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 แนวแกน ได้แก่ แกน x แกน y และแกน z

ระยะหลังประมวลข้อมูล (post-processing phase) เป็นระยะการแสดงผลข้อมูลด้วย คอมพิวเตอร์ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบ เช่น กราฟฟิก (graphical output) การแสดงผลเป็นแถบสี (color-coded map) รูปแบบการกระจายความเค้น ความเครียด การแสดงเส้นทางของฟลักซ์ หรือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ดังแสดงภาพที่ 23(a) แสดงแนวโน้มรูปแบบการกระจายของเส้น แรงแม่เหล็ก และภาพที่ 23(b) แสดงความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กตามแถบสี



(a)



**ภาพที่ 23** การแสดงผลข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ (a) การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก (b) ความ หนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

# บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ซึ่งต้องการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็ก ถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เหมาะสำหรับการใช้งาน EV และ HEV โดยเฉพาะสำหรับระบบขับเคลื่อนโดยตรง เนื่องจากเครื่องจักรกลชนิดนี้มีข้อดีคือ ความหนาแน่นของ ช่องว่างอากาศ ความหนาแน่นกำลังและความหนาแน่นแรงบิดสูง และประสิทธิภาพที่สูงภายใต้การ ทำงานที่กำหนด ความสามารถในการทำงานขณะโอเวอร์โหลดสูง โดยวิธีการเพิ่มสมรรถนะของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ในงานวิจัยนี้มีหัวข้อการดำเนินงานวิจัยดังนี้ 1. การจำลองการทำงานโครงสร้างต้นแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ 2. วิธีการ ปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ด้วยวิธีการออกแบบติดตั้ง ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก 3. การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของโครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่ออกแบบ บนเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด 4. การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของโครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่ออกแบบ บนเงื่อนไขที่มีมิโหลด โดยแต่ละขั้นตอนการวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.1 การจำลองการทำงานโครงสร้างต้นแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์

เครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบในงานนี้คือ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ ฟลักซ์ ซึ่งถูกนำเสนอโดย Su et al. [25] ซึ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้านี้ถูกเลือกมาเป็นโครงสร้างต้นแบบ เนื่องจากเมื่อเทียบกับโครงสร้างอื่นๆ ในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างต้นแบบนี้มีค่า Torque/ Volume ที่สูงเป็นอันดับต้นๆ และเหมาะกับการทำงานในระบบการขับเคลื่อนโดยตรงของ EV และ HEV เนื่องจากเครื่องจักรกลต้นแบบนี้มีความหนาแน่นของช่องว่างอากาศ ความหนาแน่นกำลังและ ความหนาแน่นแรงบิดสูง และประสิทธิภาพที่สูงภายใต้การทำงานที่กำหนด ความสามารถในการ ทำงานขณะโอเวอร์โหลดสูง

Paper title	Torque/Volume
	(Nm/mm³)
A New Flux-Concentrating Rotor of Permanent Magnet Motor for	108614.616
Electric Vehicle Application [57]	
A Novel Interior Permanent Magnet Machine with Magnet Axis	94316.39
Shifted Effect for Electric Vehicle Applications [58]	
Analysis and evaluation of novel rotor permanent magnet	89389.153
flux-switching machine for EV and HEV applications [25]	
A Novel Asymmetric Interior Permanent Magnet Machine for	82136.209
Electric Vehicles [59]	
A Novel Double-Sided Offset Stator Axial-Flux Permanent	54474.489
Magnet Motor for Electric Vehicles [60]	
Analysis of a Hybrid Permanent Magnet Variable-Flux Machine	42441.318
for Electric Vehicle Tractions Considering Magnetizing and	
Demagnetizing Current [61]	
Performance analysis of asymmetrical less rare earth permanent	30825.339
magnet motor for electric vehicle [62]	
A Stepwise Optimal Design Applied to an Interior Permanent	29362.934
Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Traction	
Applications [63]	
Design of a 35kW Permanent Magnet Synchronous Motor for	29210.827
Electric Vehicle Equipped with Non-Uniform Air Gap Rotor [64]	
Design of Outer-Rotor Permanent-Magnet-Assisted Synchronous	5499.004
Reluctance Motor for Electric Vehicles [65]	

a .	a	a		5	ิย	v	ູ	5	ົ	a	
ตารางที่ 1	เปรียบ	แทยบ	Torque/Volume	เคร	งสราง	งตนเ	แบบกเ	J٦	ารงสรา	งอิ	นๆ

จากนั้นจะต้องตรวจสอบค่าความถูกต้องของพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลต้นแบบที่สร้างขึ้น จากแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ (Finite Element Method) ผ่าน โปรแกรม Ansys Maxwell โดยเทียบกับค่าที่แสดงในบทวิจัยต้นแบบ จากภาพที่ 24 แสดงโครงสร้าง เครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบ ซึ่งโครงสร้างจะประกอบไปด้วยจำนวนขั้วสเตเตอร์ 24 ขั้ว จำนวนขั้ว โรเตอร์ 10 ขั้ว จำนวนแม่เหล็กถาวร 10 ชิ้น และวัสดุที่ไม่เหนี่ยวนำแม่เหล็ก 1 ชิ้น ซึ่งแกนของ สเตเตอร์จะเป็นแบบขั้วยื่น และมีการพันขดลวดอาเมเจอร์แบบรวมตัว (Concentrated armature winding) พันรอบๆส่วนของขั้วสเตเตอร์ ต่อมาในขึ้นส่วนของโรเตอร์จะมีการติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ กึ่งกลางเท่ากับจำนวนขั้วของโรเตอร์ และมีวัสดุไม่เหนี่ยวนำแม่เหล็ก ซึ่งแม่เหล็กถาวรจะมีการติดตั้ง ให้มีขั้วในทิศทางเดียวกันทั้งหมด เนื่องจากเครื่องจักรกลชนิดนี้เมื่อวางแม่เหล็กถาวรให้ขั้วมีทิศทาง ตรงกันข้ามจะทำให้การใช้ประโยชน์ของแม่เหล็กถาวรใช้ได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และทำให้ แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีความเสถียรน้อยลง โดยตัวแปรโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบถูกแสดงใน ภาพที่ 25 และค่าตัวแปรถูกแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบถูกแสดงใน มาพที่ 25 และค่าตัวแปรถูกแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบนี้ จะมีการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ได้แก่ แรงเคลื่อนไฟฟ้า แรงบิด ค่าความสูญเสียต่างๆ และประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่แสดงในบทความวิจัย ต้นแบบ



### ภาพที่ 24 โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ



**ภาพที่ 25** ตัวแปรโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ

Parameters	Conventional structure
Number of stator pole	24
Number of rotor pole	10
Rated current (A, rms)	200
Rated speed (rpm)	1200
Stack length (mm)	83.56
Stator outer diameter, D <sub>so</sub> (mm)	269
Stator inner diameter, D <sub>si</sub> (mm)	193.68
Stator tooth arc, $oldsymbol{eta}_{ ext{st}}$ (degree)	8.1
Air-gap length, g (mm)	0.73
Rotor outer diameter, <i>D</i> <sub>ro</sub> (mm)	192.22
Rotor inner diameter, D <sub>ri</sub> (mm)	124.94
Rotor tooth thickness, $w_{\rm rt}$ (mm)	10.03
Rotor tooth arc, $oldsymbol{eta}_{rt}$ (degree)	8.1
Rotor slot arc, $m{eta}_{ m rs}$ (degree)	9.0
PM thickness, w <sub>pm</sub> (mm)	12.89
PM height, h <sub>pm</sub> (mm)	31.64
Iron type	M19_29G
PM type	N36Z_20
Number of turns per phase	72

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ

อย่างไรก็ตาม เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ยังคงมีการสูญเสีย ภายในโครงสร้างสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการในการปรับปรุงประสิทธิภาพของแรงบิดและ ลดค่าความสูญเสียภายในโครงสร้าง โดยวิธีที่กำลังได้รับความนิยมในการปรับปรุงสมรรถนะของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยการลดค่าความสูญเสียของโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้า และสามารถเพิ่ม ประสิทธิภาพของแรงบิดได้คือการใช้ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux barrier) ติดตั้งใน โครงสร้างต้นแบบ โดยการออกแบบมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ประสิทธิภาพแรงบิดของเครื่องจักรกล ไฟฟ้าพัฒนาขึ้น และสามารถลดค่าความสูญเสียภายในโครงสร้างได้ โดยจะออกแบบตัวแปรของตัวกั้น เส้นแรงแม่เหล็กดังนี้ ความยาวของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ความหนาของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก และ ้องศาความเอียงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่าแรงบิดที่สูงที่สุด โดยผ่านวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

## 3.2 วิธีการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ด้วยวิธีการออกแบบติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก

โดยในหัวข้อนี้นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบ ด้วยวิธีการ ออกแบบติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กในรูปแบบต่างๆ ซึ่งจากการออกแบบในงานวิจัยนี้ได้ทำการ ทดลองติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์ หรือโรเตอร์เพื่อตรวจสอบว่าการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรง แม่เหล็กที่สเตเตอร์ หรือโรเตอร์มีผลต่อพารามิเตอร์ต่างๆภายในโครงสร้างอย่างไรบ้าง โดยมีการ ออกแบบดังนี้ จากภาพที่ 26 แสดงการออกแบบติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์ หรือโรเตอร์ ในรูปแบบต่างๆ ประกอบไปด้วย รูปแบบแนวนอนที่สเตเตอร์ (Shape 1), รูปแบบตัว T ที่สเตเตอร์ (Shape 2), รูปแบบสามเหลี่ยมที่สเตเตอร์ (Shape 3), รูปแบบตัว L ที่โรเตอร์ (Shape 4) และ รูปแบบแนวตั้งเอียงตามองศาที่โรเตอร์ (Shape 5)



- **ภาพที่ 26** การออกแบบรูปแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กติดตั้งที่สเตเตอร์ หรือโรเตอร์
  - (a) รูปแบบแนวนอนที่สเตเตอร์ (Shape 1) (b) รูปแบบตัว T ที่สเตเตอร์ (Shape 2)
  - (c) รูปแบบสามเหลี่ยมที่สเตเตอร์ (Shape 3) (d) รูปแบบตัว L ที่โรเตอร์ (Shape 4)
  - (e) รูปแบบแนวตั้งเอียงตามองศาที่โรเตอร์ (Shape 5)



ภาพที่ 26 การออกแบบรูปแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กติดตั้งที่สเตเตอร์ หรือโรเตอร์
 (a) รูปแบบแนวนอนที่สเตเตอร์ (Shape 1) (b) รูปแบบตัว T ที่สเตเตอร์ (Shape 2)
 (c) รูปแบบสามเหลี่ยมที่สเตเตอร์ (Shape 3) (d) รูปแบบตัว L ที่โรเตอร์ (Shape 4)
 (e) รูปแบบแนวตั้งเอียงตามองศาที่โรเตอร์ (Shape 5) (ต่อ)

ซึ่งจากการทดลองติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก พบว่าการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่ขั้ว ของโรเตอร์จะส่งผลต่อพารามิเตอร์ต่างๆภายในโครงสร้างมากที่สุด ดังนั้นจึงทำการออกแบบตัวแปร ของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กติดตั้งที่ขั้วของโรเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 27 แสดงการออกแบบติดตั้งตัวกั้น เส้นแรงแม่เหล็กที่ปลายของแม่เหล็กถาวรตามเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของขั้วโรเตอร์ โดยตัวแปร ของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กประกอบไปด้วย ความสูงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (*h*<sub>fb</sub>) ความหนาของตัว กั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (*w*<sub>fb</sub>) และองศาความเอียงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (*θ*<sub>fb</sub>) โดยรูปทรงของตัวกั้น เส้นแรงแม่เหล็กได้รับการออกแบบและปรับให้เหมาะสมโดยการปรับพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต ซึ่งการออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กใด้รับการออกแบบและปรับให้เหมาะสมจะใช้วิธีการออกแบบผ่านวิธีพื้นผิวตอบสนอง เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากโครงสร้างของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบยังสามารถปรับปรุงสมรรถนะให้ดีขึ้นได้ โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของ แรงบิด และสามารถลดค่าความสูญเสียภายในโครงสร้างได้ ดังนั้นตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เสนอนั้น คาดว่าจะปรับปรุงประสิทธิภาพของแรงบิด และลดค่าความสูญเสียภายในโครงสร้างเครื่องจักรกลได้ โดยการเพิ่มความหนาแน่นของฟลักซ์ที่ส่งผ่านจากโรเตอร์ไปยังสเตเตอร์ ลดการรั่วของฟลักซ์ และ ปรับปรุงฮาร์โมนิกที่ส่งผลต่อแรงบิดให้ดีขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กมาประยุกต์ กับเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

ซึ่งตามที่ระบุไว้ก่อนหน้านี้ พารามิเตอร์การออกแบบของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก จะได้รับการ ปรับให้เหมาะสมโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มแรงบิดให้มีค่าสูงสุด โดย ระเบียบวิธีพื้นผิวตอบสนอง เป็นเทคนิคในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองและค่าของ แบบจำลองโดยกำหนดวิธีแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์และสถิติที่เหมาะสมที่สุด การแสดงออกของการ ตอบสนองที่สอดคล้องกัน สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 15



ภาพที่ 27 ตัวแปรของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก

a .	۱ e	و	, ž	ิย	। d
ตารางที่ 3	ช่วงของตัวแบ	รการออกแบบของต์	วกั	นเส้นแร	เงแม่เหล็ก

Design variables	Range
Flux barrier thickness, <i>w</i> <sub>fb</sub> (mm)	0.75 – 5
Flux barrier height, <i>h</i> <sub>fb</sub> (mm)	7.5 – 22.5
Flux barrier angle, $ heta_{ m fb}$ (degree)	20 - 30

ช่วงของตัวแปรการออกแบบของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดถูกแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งจะ กำหนดตามเงื่อนไขที่ไม่ให้ปลายของรูปทรงตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กยาวจนเกินขอบเขตของขั้วโรเตอร์ โดยจำกัดให้ปลายของรูปร่างตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กต้องห่างจากขอบของขั้วโรเตอร์ 1 มิลลิเมตร เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องจักรกลมีความทนทานในระหว่างการผลิต แรงบิดเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ พื้นผิวตอบสนองได้รับการตรวจสอบเพื่อเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดของรูปทรงตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่ ให้แรงบิดมีค่าสูงสุด ซึ่งจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตัวแปรโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ออกแบบ ถูกแสดงในตารางที่ 4

Parameters	Proposed structure
Number of stator pole	24
Number of rotor pole	10
Rated current (A, rms)	200
Rated speed (rpm)	1200
Stack length (mm)	83.56
Stator outer diameter, D <sub>so</sub> (mm)	269
Stator inner diameter, D <sub>si</sub> (mm)	193.68
Stator tooth arc, $oldsymbol{eta}_{ ext{st}}$ (degree)	8.1
Air-gap length, g (mm)	0.73
Rotor outer diameter, <i>D</i> <sub>ro</sub> (mm)	192.22
Rotor inner diameter, <i>D</i> <sub>ri</sub> (mm)	124.94
Rotor tooth thickness, $w_{\rm rt}$ (mm)	10.03
Rotor tooth arc, $eta_{ m rt}$ (degree)	8.1
Rotor slot arc, $oldsymbol{eta}_{rs}$ (degree)	9.0
PM thickness, w <sub>pm</sub> (mm)	12.89
PM height, <i>h</i> <sub>pm</sub> (mm)	31.64
Flux barrier thickness, <i>w</i> <sub>fb</sub> (mm)	4.88
Flux barrier height, $h_{ m fb}$ (mm)	21.89
Flux barrier angle, $ heta_{ ext{fb}}$ (deg)	28.14
Iron type	M19_29G
PM type	N36Z_20
Number of turns per phase	72

**ตารางที่ 4** ค่าตัวแปรโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ออกแบบ

จากนั้นจึงวิเคราะห์ค่าเอาต์พุตต่างๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ ฟลักซ์โครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่ออกแบบใน 2 เงื่อนไข คือ 1. เงื่อนไขที่ไม่มีโหลด ได้แก่ แรงเคลื่อนไฟฟ้า และแรงบิดเริ่มต้น 2. เงื่อนไขที่มีโหลด ได้แก่ ความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่าง อากาศ การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า แรงบิดกระเพื่อม กำลังไฟฟ้า ค่าความ สูญเสียต่างๆ และประสิทธิภาพ โดยในการจำลองและการวิเคราะห์แบบจำลองจะทำด้วยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอเลเมนต์ (Finite Element Method)

## 3.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของโครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่ออกแบบบนเงื่อนไข ที่ไม่มีโหลด

โดยในหัวข้อนี้กล่าวถึงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าขณะทำงานใน เงื่อนไขที่ไม่มีโหลด ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์โครงสร้างต้นแบบ และโครงสร้างที่ออกแบบ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบได้แก่ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Back-EMF) และแรงบิดเริ่มต้น (Cogging torque) โดยพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกเปรียบเทียบการทำงานของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีโหลด (No-load condition) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 3.3.1 การวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้า

Back-EMF เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่บ่งบอกถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใน มอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างขดลวดอาเมเจอร์กับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวด สนามหรือสนามแม่เหล็กถาวร ในทางทฤษฏีค่า EMF ได้มาจากผลของการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ เชื่อมโยงเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของเวลา ซึ่งเมื่อขนาดของ EMF เปลี่ยนแปลงตามเวลา กราฟ Back-EMF ของโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดสวิตซ์ฟลักซ์จะมีแนวโน้มที่จะเป็น รูปคลื่นไซน์ธรรมชาติเนื่องจากเครื่องจักรกลมีฟลักซ์เชื่อมโยงภายในโครงสร้างที่ดี ซึ่งเป็นหนึ่งในข้อดี ของโครงสร้างเครื่องจักรกลนี้ โดยกราฟ Back-EMF ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์ สวิตซ์ฟลักซ์ที่ถูกออกแบบด้วยการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเปรียบเทียบกับ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ เพื่อวิเคราะห์ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้าบนเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด

### 3.3.2 การวิเคราะห์แรงบิดเริ่มต้น

Cogging torque คือพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงแรงบิดเริ่มต้นระหว่างแม่เหล็กถาวร ภายในโครงสร้างของสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานในช่องว่างอากาศ ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์เทียบกับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโรเตอร์ โดยกราฟ cogging torque ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ถูกออกแบบด้วยการติดตั้งตัว กั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเปรียบเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด โรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรงบิดเริ่มต้นที่เริ่มทำงานในเครื่องจักรกลไฟฟ้าบน เงื่อนไขที่ไม่มีโหลด

## 3.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของโครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่ออกแบบบนเงื่อนไข ที่มีโหลด

โดยในหัวข้อนี้กล่าวถึงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าขณะทำงานใน เงื่อนไขที่มีโหลด ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์โครงสร้างต้นแบบและ โครงสร้างที่ออกแบบ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบได้แก่ ความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่าง อากาศ (Air-gap flux density) การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux distribution) แรงบิดเฉลี่ย (Average torque) แรงบิดกระเพื่อม (Torque ripple) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (Output power) ค่าความสูญเสียต่างๆ (Losses) และประสิทธิภาพ (Efficiency) โดยพารามิเตอร์เหล่านี้จะ ถูกเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขมีโหลด (On-load condition) ที่กระแสโหลด 200 A และความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.4.1 การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่างอากาศ

ความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่างอากาศ คือ พารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงปริมาณของฟ ลักซ์ที่ไหลผ่านช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ โดยการเปรียบเทียบความหนาแน่นฟลักซ์ ของช่องว่างภายในโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ถูกออกแบบ ด้วยการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเปรียบเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้า แม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ เพื่อวิเคราะห์หาความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่าง อากาศในเครื่องจักรกลไฟฟ้าบนเงื่อนไขที่มีโหลด

### 3.4.2 การวิเคราะห์การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก

โดยปกติแม่เหล็กถาวรจะผลิตฟลักซ์แม่เหล็กขึ้น จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน ช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ และอาจทำให้เกิดฟลักซ์รั่วไหลออกจากโครงสร้างด้วย ซึ่งจากโครงสร้างเครื่องจักรกลนี้เส้นแรงแม่เหล็กจะไหลออกจากขั้วโรเตอร์หนึ่งไปอีกขั้วโรเตอร์หนึ่ง โดยไหลผ่านช่องว่างอากาศไปที่ขั้วของสเตเตอร์ ส่งผลให้โรเตอร์หมุนตามทิศทางการไหลของเส้นแรง แม่เหล็กด้วยความเร็วซิงโครนัส โดยการเปรียบเทียบการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กภายใน โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ถูกออกแบบด้วยการติดตั้งตัวกั้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเปรียบเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์ สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กและวิเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็ก ที่รั่วออกจากโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าบนเงื่อนไขที่มีโหลด

### 3.4.3 การวิเคราะห์แรงบิดและแรงบิดกระเพื่อม

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเมื่อมีการทำงานบนเงื่อนไขที่มีโหลดนั้นจะเกิดแรงที่ทำให้เกิด การหมุน เรียกว่า แรงบิดเฉลี่ย (Average torque) ซึ่งแรงบิดนี้จะมีค่าไม่คงที่ หรือเกิดการกระเพื่อม ขึ้นลง ซึ่งถูกเรียกว่าแรงบิดกระเพื่อมเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการสั่นและเสียง ซึ่งเป็นสิ่งที่จะก่อให้เกิดการ เสื่อมสภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ ดังนั้นการที่แรงบิดกระเพื่อมมีค่าที่ต่ำจึงจะดีต่อเครื่องจักรกล ไฟฟ้า ซึ่งการเปรียบเทียบค่าแรงบิดกระเพื่อม มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดเฉลี่ย (Average torque) กับแรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุด โดยการเปรียบเทียบแรงบิดเฉลี่ย และแรงบิดกระเพื่อม ภายในโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ถูกออกแบบด้วยการ ติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเปรียบเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร ชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ เพื่อเปรียบเทียบค่าแรงบิดเฉลี่ย และวิเคราะห์หาค่าแรงบิดกระเพื่อม ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าของทั้งสองโครงสร้าง เมื่อทำงานบนเงื่อนไขที่มีโหลด

## 3.4.4 การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

ค่า Output power คือกำลังไฟฟ้าทางกลในมอเตอร์ที่นำไปขับเคลื่อนโหลดต่อ หรือกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้การเปรียบเทียบ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะเปรียบเทียบในรูปแบบการทำงานของมอเตอร์ โดยค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ถูกออกแบบด้วยการติดตั้งตัวกั้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเปรียบเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์ สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ เมื่อทำงานบนเงื่อนไขที่มีโหลด

### 3.4.5 การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียภายในโครงสร้าง

โดยทั่วไปเครื่องจักรกลไฟฟ้าส่วนใหญ่ จะประกอบไปด้วยขดลวดอาเมเจอร์และ ขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งเมื่อเกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้นภายในเครื่องจักรกล และเกิดกระแสไฟฟ้า ไหลผ่านค่าความต้านทานของขดลวด จะส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวด ซึ่งเราเรียกว่าเป็นการ สูญเสียภายในขดลวด (Copper loss)

นอกจากนี้เครื่องจักรกลยังประกอบไปด้วยแกนเหล็ก ซึ่งแกนเหล็กสามารถนำไฟฟ้า ได้และสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไหลในแกน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ แม่เหล็กภายในแกนสุดท้ายจะเกิดความร้อนขึ้น ทำให้เกิดเป็นการสูญเสียภายในแกน (Core loss) ซึ่งการสูญเสียในแกนเหล็กจะประกอบไปด้วยการสูญเสีย Hysteresis และการสูญเสียกระแสไหลวน การสูญเสียฮิสเตอร์เรซิส (Hysteresis loss) คือ การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้น ให้เกิดสนามแม่เหล็กโดยกระแสไฟฟ้าขนาดไม่คงที่ จะทำให้เกิดความร้อนภายในแกน ซึ่งเป็นการ สูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อความร้อนนั้นไม่ได้ใช้งาน

การสูญเสียกระแสไหลวน (Eddy current loss) คือ การที่ฟลักซ์แม่เหล็กไหลใน แกนเหล็กและเปลี่ยนแปลงขนาดตามเวลา การเปลี่ยนแปลงนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าใน แกนเหล็ก และเมื่อแกนเหล็กนำไฟฟ้าจะทำให้เกิดการครบวงจรไฟฟ้า และเกิดกระแสไฟฟ้าไหลวน (eddy current) เมื่อกระแสไหลวนเกิดขึ้นที่แกนเหล็กจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดเป็น การสูญเสียภายในแกนเหล็ก

โดยค่าความสูญเสียต่างๆภายในโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด โรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ถูกออกแบบด้วยการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุดจะถูก เปรียบเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ เมื่อทำงานบน เงื่อนไขที่มีโหลด

### 3.4.6 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

ค่าประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Efficiency) คืออัตราส่วนระหว่าง กำลังไฟฟ้าอินพุตกับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่บ่งบอกถึงความสามารถในการทำงาน ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดย ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรในงานวิจัยนี้มี ความสัมพันธ์กับ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (Output power) ค่าความสูญเสียในขดลวด (Copper loss) ค่าความสูญเสียในแกน (Core loss) และค่าความสูญเสียกระแสไหลวนที่แม่เหล็กถาวร (PM eddy current loss) โดยการหาค่าประสิทธิภาพของโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์ สวิตซ์ฟลักซ์ที่ถูกออกแบบด้วยการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด จะถูกคำนวณและ เปรียบเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ

# บทที่ 4 ผลการจำลองและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองทั้งหมดของงานวิจัย ประกอบไปด้วย 1. ผลการจำลองการ ทำงานโครงสร้างต้นแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ 2. ผลการปรับปรุงสมรรถนะ ของเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ด้วยวิธีการออกแบบติดตั้งตัวกั้นเส้นแรง แม่เหล็ก 3. ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของโครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่ออกแบบบนเงื่อนไข ที่ไม่มีโหลด และ 4. ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของโครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่ออกแบบ บนเงื่อนไขที่มีโหลด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 4.1 ผลการจำลองการทำงานโครงสร้างต้นแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์

ซึ่งในหัวข้อนี้จะเป็นผลการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของตัวต้นแบบโดยการจำลอง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ (Finite Element Method) ผ่านโปรแกรม Ansys Maxwell เปรียบเทียบพารามิเตอร์กับงานวิจัยที่ถูกเสนอ จากภาพที่ 28 เปรียบเทียบแบบจำลองในงานวิจัย ที่ถูกเสนอ กับแบบจำลองผ่านโปรแกรม Ansys Maxwell เพื่อให้การทำงานของโปรแกรมจำลอง สามารถจำลองค่าของพารามิเตอร์ให้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยมากที่สุด จึงจะสามารถนำแบบจำลอง ไปพัฒนาต่อไปได้ ซึ่งผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ได้แก่ แรงเคลื่อนไฟฟ้า แรงบิด ค่าความสูญเสีย ต่างๆ และประสิทธิภาพมีตัวอย่างดังนี้



**ภาพที่ 28** โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ (a) งานวิจัยที่ ถูกเสนอ [25] (b) แบบจำลองผ่านโปรแกรม

จากภาพที่ 29 แสดงการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร ชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ กับแบบจำลองผ่านโปรแกรม Ansys Maxwell จะพบว่าการจำลอง ของโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ถูกนำเสนอนำเสนอ โดยมีค่าประมาณ 170 โวลต์



**ภาพที่ 29** ผลการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบกับแบบจำลอง

จากภาพที่ 30 แสดงการเปรียบเทียบแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด โรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ กับแบบจำลองผ่านโปรแกรม Ansys Maxwell โดยภาพที่ 22(a) โครงสร้างต้นแบบที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัยนี้คือโครงสร้าง RPM-FS (เส้นสีดำ) และจากภาพที่ 22(b) จะพบว่าจากการจำลองของโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับโครงสร้างของงานวิจัยที่ถูกนำเสนอ โดยมี ค่าประมาณ 420 นิวตันเมตร



**ภาพที่ 30** ผลการเปรียบเทียบแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ (a) งานวิจัยที่ถูกเสนอ [25] (b) แบบจำลองผ่านโปรแกรม

Parameters	บทวิจัยที่ถูกเสนอ [25]	แบบจำลอง
Copper loss (W)	4405	4809.9
Core loss (W)	256.6	242.53
Eddy current (W)	712	761.89
Efficiency (%)	89.3	90.1

**ตารางที่ 5** เปรียบเทียบค่าความสูญเสียต่างๆ และประสิทธิภาพ

ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่แสดงในบทความ วิจัยต้นแบบ พบว่าการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบนี้ มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยต้นแบบ ดังนั้นจึงสามารถนำแบบจำลองไปปรับปรุงสมรรถนะต่อไปได้

# 4.2 ผลการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องจักรกลแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ด้วยวิธีการออกแบบติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก

ในหัวข้อนี้จะเป็นผลการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบ ด้วยวิธีการ ออกแบบติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กรูปแบบต่างๆติดตั้งที่สเตเตอร์ หรือโรเตอร์ ประกอบไปด้วย รูปแบบแนวนอนที่สเตเตอร์ (Shape 1), รูปแบบตัว T ที่สเตเตอร์ (Shape 2), รูปแบบสามเหลี่ยมที่ สเตเตอร์ (Shape 3), รูปแบบตัว L ที่โรเตอร์ (Shape 4) และรูปแบบแนวตั้งเอียงตามองศาที่โรเตอร์ (Shape 5) โดยทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์แรงเคลื่อนไฟฟ้า และแรงบิด ดังแสดงในภาพที่ 31 และภาพที่ 32



ภาพที่ 31 ผลการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กรูปแบบต่างๆ



**ภาพที่ 32** ผลการเปรียบเทียบแรงบิดของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กรูปแบบต่างๆ

จากภาพที่ 31 พบว่าตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กทุกรูปแบบให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน และจากภาพที่ 32 จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่โรเตอร์จะสามารถปรับปรุง แรงบิดได้ดีกว่าติดตั้งที่สเตเตอร์ เนื่องจากตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่โรเตอร์สามารถควบคุมการไหล ของฟลักซ์แม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรที่ติดตั้งที่โรเตอร์ได้ดีกว่า ทำให้ความหนาแน่นของแรงบิดมีค่าสูง กว่าการติดตั้งที่สเตเตอร์ ซึ่งทำให้พบว่าตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กรูปแบบตัว L ที่โรเตอร์ และรูปแบบ แนวตั้งเอียงตามองศาที่โรเตอร์นั้นสามารถปรับปรุงแรงบิดให้มีค่าสูงกว่าทุกรูปแบบ แต่เนื่องจากการ คำนึงถึงการสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก จะพบว่ารูปแบบแนวตั้งเอียง ตามองศามีความเหมาะสมในการสร้างมากกว่ารูปแบบตัว L เนื่องจากตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กรูปแบบ ตัว L มีความใกล้ขอบของขั้วโรเตอร์มากเกินไปจึงอาจส่งผลให้เครื่องจักรกลมีความแข็งแรงน้อยลง ด้งนั้นจึงพบว่าการออกแบบติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กรูปแบบแนวตั้งเอียงตามองศาสามารถ ปรับปรุงสมรรถนะของโครงสร้างต้นแบบได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวกั้น ้เส้นแรงแม่เหล็กแนวตั้งเอียงตามองศา ประกอบไปด้วย ความสูงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก (h<sub>fb</sub>) ความหนาของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $w_{
m fb}$ ) และองศาความเอียงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $m{ heta}_{
m fb}$ ) จากนั้นจึงออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กให้เหมาะสมโดยใช้การออกแบบผ่านวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยออกแบบช่วงของความสูงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กให้มีค่าตั้งแต่ 7.5 ถึง 22.5 มิลลิเมตร ความ ้หนาของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กให้มีค่าตั้งแต่ 0.75 ถึง 5 มิลลิเมตร และองศาความเอียงของตัวกั้นเส้น แรงแม่เหล็กให้มีค่าตั้งแต่ 20 ถึง 30 องศา เพื่อให้ได้ค่าแรงบิดเฉลี่ยสูงสุด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะไม่มี การเปลี่ยนแปลงใดๆกับค่าของโครงสร้างต้นแบบ และค่าเอาต์พุตทั้งหมดของโครงสร้างต้นแบบ [25] ภาพที่ 33 แสดงผลของพื้นผิวตอบสนองสามมิติ และรูปที่ 34 แสดงผลของพื้นผิวตอบสนองสองมิติ ้จากการปรับค่าพารามิเตอร์ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กผ่านวิธีพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าที่มีผล ้สูงสุดต่อประสิทธิภาพของแรงบิดเฉลี่ย คือ องศาความเอียงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อค่าความ

หนาของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก และค่าความสูงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การแปรผันของความหนาของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก และความสูงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่ค่า ้องศาความเอียงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำ จะส่งผลให้มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของแรงบิดเฉลี่ย ้ต่ำกว่าการแปรผันที่ค่าองศาความเอียงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กสูง ดังนั้นเมื่อเพิ่มองศาความเอียง ของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก จะส่งผลให้แรงบิดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ประมาณ 28 องศา หลังจากนั้นแรงบิดเฉลี่ยจะเริ่มคงที่เมื่อค่าองศาความเอียงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กสูงขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มความหนาของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก พบว่าแรงบิดเฉลี่ยได้รับการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ และแรงบิดเฉลี่ยก็สามารถเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มค่าของความสูงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก โดยจะจำกัด ให้ปลายของรูปร่างตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กต้องห่างจากขอบของขั้วโรเตอร์ 1 มิลลิเมตร ซึ่งบ่งบอกว่า ้ค่าความหนาของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก และความสูงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก จะส่งผลต่อแรงบิด เฉลี่ยเมื่อค่าทั้งสองมีค่าที่สูง ดังนั้นจากผลของวิธีพื้นผิวตอบสนอง จะได้รูปทรงที่เหมาะสมของตัวกั้น ้เส้นแรงแม่เหล็กที่ความหนาของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 4.88 มิลลิเมตร ความสูงของตัวกั้น ้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 21.89 มิลลิเมตร และองศาความเอียงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่า ้เท่ากับ 28.14 องศา ส่งผลให้โครงสร้างที่มีการออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุดนี้ สามารถสร้างแรงบิดเฉลี่ยได้สูงถึง 450 นิวตันเมตร ซึ่งมากกว่าแรงบิดที่เกิดจากโครงสร้าง เครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบ



**ภาพที่ 33** พื้นผิวตอบสนองสามมิติ



**ภาพที่ 34** พื้นผิวตอบสนองสองมิติ

## 4.3 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของโครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่ออกแบบบนเงื่อนไข ที่ไม่มีโหลด

ต่อมาในหัวข้อนี้กล่าวถึงผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าขณะทำงาน ในเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์โครงสร้างต้นแบบ และโครงสร้างที่ออกแบบ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบได้แก่ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Back-EMF) และแรงบิดเริ่มต้น (Cogging torque) โดยพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกเปรียบเทียบการทำงานของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีโหลด (No-load condition) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้า

ภาพที่ 35 แสดงผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้า บนเงื่อนไขที่ไม่มีโหลดของโครงสร้าง เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ถูกออกแบบ และโครงสร้างเครื่องจักรกล ไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ โดยรูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้า ถูกแสดงในภาพที่ 35(a) สามารถสังเกตได้ว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าของโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด โรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ถูกออกแบบด้วยการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุดนั้นสามารถ ปรับปรุงสมรรถนะของโครงสร้างต้นแบบให้ดีขึ้นได้ประมาณ 2.4% โดยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ โครงสร้างที่ถูกออกแบบ และโครงสร้างต้นแบบมีค่าเท่ากับ 175 V และ 170 V ตามลำดับ ดังนั้นการ ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ สามารถบ่งบอกได้ว่าสมรรถนะของแรงบิดเฉลี่ยสามารถ ดีขึ้นได้เช่นกัน และสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ถูกแสดงในภาพที่ 35(b) จากการวิเคราะห์ สเปกตรัมพบว่าโครงสร้างที่ถูกออกแบบมีค่า THD ที่ 7.77% ซึ่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากโครงสร้าง ต้นแบบ (6.16%)



**ภาพที่ 35** ผลการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบและที่ออกแบบ (a) รูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (b) สเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า

### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์แรงบิดเริ่มต้น

ภาพที่ 36 แสดงรูปคลื่นแรงบิดเริ่มต้น บนเงื่อนไขที่ไม่มีโหลดของโครงสร้าง เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ถูกออกแบบ และโครงสร้างเครื่องจักรกล ไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ สามารถสังเกตได้ว่า โครงสร้างที่ออกแบบ มีค่าแรงบิดเริ่มต้นที่สูงกว่าโครงสร้างต้นแบบเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีค่า Peak to peak เพิ่มขึ้นจาก 1.86 เป็น 2.18 นิวตันเมตร แม้ว่าค่าแรงบิดเริ่มต้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่โครงสร้างที่ออกแบบก็สามารถ สร้างแรงบิดเฉลี่ยได้สูงขึ้น เนื่องจากโครงสร้างที่ออกแบบมีการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก จึงทำให้ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้นในตัวของโรเตอร์



ภาพที่ 36 ผลการเปรียบเทียบแรงบิดเริ่มต้นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบและที่ออกแบบ

## 4.4 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของโครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่ออกแบบบนเงื่อนไข ที่มีโหลด

โดยในหัวข้อนี้กล่าวถึงผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าขณะทำงานใน เงื่อนไขที่มีโหลดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์โครงสร้างต้นแบบและ โครงสร้างที่ออกแบบ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบได้แก่ ความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่าง อากาศ (Air-gap flux density) การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux distribution) แรงบิดเฉลี่ย (Average torque) แรงบิดกระเพื่อม (Torque ripple) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (Output power) ค่าความสูญเสียต่างๆ (Losses) และประสิทธิภาพ (Efficiency) โดยพารามิเตอร์เหล่านี้จะ ถูกเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขมีโหลด (On-load condition) ที่ กระแสโหลด 200 A และความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 4.4.1 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่างอากาศ

การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่างอากาศ บนเงื่อนไขที่มีโหลดกระแส พิกัด 200 A และมีความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที ดังแสดงในภาพที่ 37(a) แสดงรูปคลื่นความ หนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่างอากาศบนเงื่อนไขที่มีโหลดตามตำแหน่งของโรเตอร์ที่หมุน และภาพที่ 37(b) แสดงสเปกตรัมฮาร์มอนิกของความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่างอากาศ สามารถสังเกตได้ว่าการ ติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กภายในโครงสร้างต้นแบบนั้นสามารถทำให้ฮาร์โมนิกมีการเปลี่ยนแปลงได้ จากการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่างอากาศ สามารถหาฮาร์โมนิกที่มีผลต่อโครงสร้างได้ โดยคำนึงถึงจำนวนขั้วของสเตเตอร์และขั้วของโรเตอร์ สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด โรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์โครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ พบว่าฮาร์โมนิกหลักที่ ส่งผลต่อแรงบิดนั้นคือฮาร์โมนิกที่ 10, 14 และ 34 และในขณะเดียวกันฮาร์โมนิกที่ 14 และ 34 ก็มี ส่วนทำให้เกิดค่าความสูญเสียของกระแสไหลวนภายในแม่เหล็กถาวรด้วยเช่นกัน ซึ่งโครงสร้าง เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ แรงบิดเฉลี่ยในทางทฤษฎีจะถูกสร้างขึ้นโดย การทำงานร่วมกันของฮาร์โมนิกโหลดแม่เหล็กและโหลดไฟฟ้าที่มีลำดับฮาร์โมนิกเดียวกัน และ ความเร็วการหมุนในช่องว่างอากาศ ซึ่งขนาดของแรงบิดสามารถกำหนดได้โดยคำนึงถึงปริมาตรของ เครื่อง มุมฮาร์มอนิกระหว่างโหลดแม่เหล็กและโหลดไฟฟ้า และอัตราส่วนการแยก ในโครงสร้าง เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ออกแบบให้เหมาะสมที่สุดที่เสนอ พบว่า แรงบิดเฉลี่ยที่โดยฮาร์โมนิกที่ 10, 14 และ 34 สร้างขึ้นมีอัตราส่วนในการสร้างเท่ากับ 83.1%, 11.5% และ 21.4% ตามลำดับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้การเพิ่มขึ้นของฮาร์โมนิกที่ 10 จึงมีส่วนสำคัญใน การพัฒนาประสิทธิภาพของแรงบิดโดยรวม และถือได้ว่าเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักในการปรับปรุง ประสิทธิภาพแรงบิดของโครงสร้างที่ออกแบบ



**ภาพที่ 37** ผลการเปรียบเทียบความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่างอากาศของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ต้นแบบและที่ออกแบบ (a) รูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (b) สเปกตรัมของ แรงเคลื่อนไฟฟ้า

### 4.4.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก

การวิเคราะห์การกระจายเส้นแรงแม่เหล็ก บนเงื่อนไขที่มีโหลดกระแสพิกัด 200 A และมีความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที ถูกแสดงในภาพที่ 38 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายเส้น แรงแม่เหล็กของโครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่ออกแบบ สามารถสังเกตได้ว่าโครงสร้างที่ ออกแบบมีการรั่วไหลของฟลักซ์น้อยกว่าโครงสร้างต้นแบบอย่างมาก โดยเฉพาะบริเวณขั้วของโรเตอร์ นอกจากนี้ตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กยังเพิ่มความอิ่มตัวของพื้นที่โรเตอร์และยังควบคุมการไหลของเส้น แรงแม่เหล็กให้ดีขึ้น ดังนั้นการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กจึงทำให้การใช้ประโยชน์ของแม่เหล็ก ดีมากขึ้น ซึ่งอาจมีส่วนสำคัญในการปรับปรุงสมรรถนะของแรงบิด





## 4.4.3 ผลการวิเคราะห์แรงบิดเฉลี่ยและแรงบิดกระเพื่อม

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพแรงบิด บนเงื่อนไขที่มีโหลดกระแสพิกัด 200 A และมีความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที ระหว่างโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด โรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์โครงสร้างต้นแบบและโครงสร้างที่ออกแบบ ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 39 สามารถสังเกต ได้ว่าแรงบิดเฉลี่ยของโครงสร้างที่ออกแบบมีค่าสูงถึง 450 นิวตันเมตร ซึ่งสูงกว่าโครงสร้างต้นแบบ 6% ในขณะเดียวกันก็สังเกตเห็นแรงบิดกระเพื่อมของโครงสร้างที่ออกแบบที่สูงขึ้นเล็กน้อยจาก 2.9% เป็น 3.8% ของโครงสร้างต้นแบบ ดังนั้นโดยรวมโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิด โรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่เสนอนั้นมีประสิทธิภาพเหนือกว่าโครงสร้างต้นแบบอย่างชัดเจนในแง่ของ ความสามารถของแรงบิด ซึ่งการใช้แม่เหล็กที่ดีขึ้นและฮาร์โมนิกที่มีผลต่อแรงบิดมีค่าที่ดีขึ้นเป็น เหตุผลสำหรับการปรับปรุงแรงบิดนี้





### 4.4.4 ผลการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะเปรียบเทียบในรูปแบบการทำงานของ มอเตอร์ บนเงื่อนไขที่มีโหลดกระแสพิกัด 200 A และมีความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที ซึ่งค่าของ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะถูกแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ และโครงสร้าง เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ออกแบบมีค่าเท่ากับ 53340.3 W และ 56524.5 W ตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กทำให้กำลังไฟฟ้า ดีขึ้น

### 4.4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียภายในโครงสร้าง

ผลการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียต่างๆภายในโครงสร้าง ของโครงสร้าง เครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ และโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้า แม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ออกแบบ บนเงื่อนไขที่มีโหลดกระแสพิกัด 200 A และมี ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที จะถูกแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ การสูญเสียภายใน ขดลวด (Copper loss) ของทั้งสองโครงสร้างจะมีค่าเท่ากับ 4405 W เนื่องจากพื้นที่ในการพัน ขดลวด จำนวนและขนาดของขดลวดมีค่าเท่ากันทั้งสองโครงสร้าง จึงทำให้การสูญเสียภายในขดลวดมี ค่าเท่ากัน

การสูญเสียภายในแกน (Core loss) ในโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็ก ถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ต้นแบบ และโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์ สวิตซ์ฟลักซ์ที่ออกแบบมีค่าเท่ากับ 256.6 W และ 246.3 W ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างที่ ออกแบบมีการสูญเสียภายในแกนที่ต่ำกว่าโครงสร้างต้นแบบเล็กน้อยเนื่องจากการติดตั้งตัวกั้นเส้น แรงแม่เหล็กช่วยปรับปรุงการใช้ประโยชน์แม่เหล็กถาวรที่ขั้วโรเตอร์ให้ดีขึ้น ทำให้เกิดความร้อนที่โร เตอร์น้อยลง เป็นที่ชัดเจนว่าโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ที่ ออกแบบมีขนาดของแกนโรเตอร์ที่ต่ำกว่าโครงสร้างต้นแบบ เนื่องจากการติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ที่ขั้วโรเตอร์ และทำให้ฟลักซ์รั่วไหลลดลงในโครงสร้างที่ออกแบบ ซึ่งแกนของโรเตอร์จะถูกนำไปใช้ ประโยชน์ได้ดีขึ้น การสูญเสียภายในแกนจึงลดลงแม้ว่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กจะสูงขึ้น และสุดท้ายการสูญเสียกระแสไหลวนในแม่เหล็ก (PM Eddy current loss) พบว่าโครงสร้างที่ ออกแบบมีการสูญเสียกระแสไหลวนในแม่เหล็กลดลง 10% เมื่อเทียบกับโครงสร้างต้นแบบ เนื่องจาก การทำงานของฮาร์โมนิกที่ส่งผลต่อกลไกการสร้างการสูญเสียกระแสไหลวนในแม่เหล็ก ได้แก่ ฮาร์โมนิกลำดับที่ 14 และ 34 มีค่าลดลง ดังแสดงในภาพที่ 37(b)

โดยค่าความสูญเสียต่างๆภายในโครงสร้าง จะถูกนำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบ และโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ ออกแบบ

### 4.4.6 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

จากการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Efficiency) จะถูกแสดง ในตารางที่ 6 พบว่าประสิทธิภาพของโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟ ลักซ์ต้นแบบ และเครื่องจักรกลไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ ที่ออกแบบมีค่าเท่ากับ 89.3% และ 90.8% ตามลำดับ ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดว่าโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ออกแบบมี ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น 1.02 เท่าของโครงสร้างต้นแบบ

Machine's parameters	Conventional	Proposed			
	structure	structure			
Rated current (A, rms)	200				
Rated speed (rpm)	1200				
Copper loss (W)	440	5			
Core loss (W)	256.6	246.3			
Eddy current loss (W)	712	643.8			
Output torque (Nm)	424.5	450			
Output power (W)	53340.3	56524.5			
Efficiency (%)	89.3%	90.8%			

ตารางที่ 6	ผลเปรียบเทียบการจำลองเอาต์พุตต่างๆ	ของโครงสร้างเครื่	องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบและ
	โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ออกแบบ		

ซึ่งจากการการออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อปรับปรุงสมรรถนะเครื่องจักรกล ไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ โดยรูปทรงของตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กได้รับการออกแบบ ให้เหมาะสมโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง ผลพบว่าโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ออกแบบมีค่า EMF สูงขึ้น 2.4% แม้ว่าแรงบิดคอกกิ้งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และพบว่าโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้า ที่ออกแบบสามารถปรับปรุงแรงบิดให้มีค่าสูงถึง 450 นิวตันเมตร ซึ่งสูงขึ้นถึง 6% จากโครงสร้าง ต้นแบบ นอกจากนี้การออกแบบติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กยังมีส่วนสำคัญที่ช่วยลดค่าความสูญเสีย ต่างๆ ได้แก่ ลดค่าความสูญเสียภายในแกนของตัวต้นแบบจาก 256.6 W เหลือเพียง 246.3 W และ ลดค่าความสูญเสียกระแสไหลวนของแม่เหล็กถาวรจาก 712 W เหลือเพียง 643.8 W ซึ่งลดได้ถึง 10% ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างต้นแบบ ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ที่ออกแบบจึงมีค่า 90.8% ซึ่งเพิ่มขึ้น 1.02 เท่าของตัวต้นแบบ ดังนั้นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ออกแบบ จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้ในการขับเคลื่อนโดยตรงของ EV และ HEV ได้

# บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อปรับปรุงสมรรถนะเครื่องจักรกล ้ไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์สวิตซ์ฟลักซ์ โดยมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มแรงบิดและการลดค่าความ สูญเสียในโครงสร้าง โดยตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะถูกติดตั้งที่ขั้วของโรเตอร์ภายในโครงสร้างเพื่อ ้ปรับปรุงการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กและทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นสูงขึ้น โดยรูปทรงของตัวกั้น ้เส้นแรงแม่เหล็กได้รับการออกแบบให้เหมาะสมโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งจากการวิเคราะห์ ้ผ่านไฟล์ในท์เอเลเมนต์ จะวิเคราะห์พารามิเตอร์ใน 2 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขที่ไม่มีโหลด และเงื่อนไข ที่มีโหลด ซึ่งในการวิเคราะห์บนเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด พบว่าโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ออกแบบ มีค่า EMF สูงขึ้น 2.4% แม้ว่าแรงบิดคอกกิ้งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อวิเคราะห์บนเงื่อนไขที่มี ์โหลด จะพบว่าโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ออกแบบมีค่าแรงบิดสูงขึ้นถึง 6% จากโครงสร้าง ต้นแบบ จากการวิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพของแรงบิดที่ดีขึ้นเกิดจากการรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก ที่ลดลง ความสามารถในการอิ่มตัวของแม่เหล็กที่ดีขึ้น และฮาร์โมนิกความหนาแน่นฟลักซ์ของช่องว่าง อากาศที่ส่งผลต่อแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การติดตั้งตัวกั้นเส้นแรงแม่เหล็กยังมีส่วนสำคัญที่ช่วย ้ลดค่าความสูญเสียกระแสไหลวนของแม่เหล็กถาวรได้ถึง 10% เนื่องจากฟลักซ์รั่วในโรเตอร์ลดลง ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างต้นแบบ ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ออกแบบ เพิ่มขึ้น 1.02 เท่า ดังนั้นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ออกแบบจึงสามารถใช้งานได้ในแอพพลิเคชั่น EV และ HEV

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การพัฒนาและออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงจำเป็นต้องมี การสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าจริงเพื่อนำมายืนยันผลการจำลอง อย่างไรก็ตามทุนสนับสนุนงานของ วิจัยนี้ยังไม่เพียงพอต่อการสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าจริง ส่งผลให้ไม่สามารถนำมาผลการทดสอบจริง มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองได้ ในการทำงานในอนาคต พารามิเตอร์ต่างๆที่ยังไม่ถูกวิเคราะห์และ ผลการทดสอบจริงจะถูกเพิ่มเข้ามา เพื่อนำมาประกอบการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องจักรกล ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

#### บรรณานุกรม

- Chau KT, Chan CC, Liu C. Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles. IEEE Transactions on industrial electronics 2008; 55: 2246–2257.
- Belkhier Y, Shaw RN, Bures M, Islam MR, Bajaj M, Albalawi F, et al. Robust Interconnection and Damping Assignment Energy-Based Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor Using High Order Sliding Mode Approach and Nonlinear Observer. Energy Reports 2022; 8: 1731–1740.
- Cheng M, Hua W, Zhang J, Zhao W. Overview of Stator-Permanent Magnet Brushless Machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2011; 58: 5087–5101.
- Lounthavong V, Sriwannarat W, Siritaratiwat A, Khunkitti P. Optimal Stator Design of Doubly Salient Permanent Magnet Generator for Enhancing the Electromagnetic Performance. Energies 2019; 12: 3201.
- Sriwannarat W, Khunkitti P, Janon A, Siritaratiwat A. An Improvement of Magnetic Flux Linkage in Electrical Generator Using the Novel Permanent Magnet Arrangement. Acta Phys Pol A 2018; 133: 642–644.
- Sriwannarat W, Seangwong P, Lounthavong V, Khunkitti S, Siritaratiwat A, Khunkitti P. An Improvement of Output Power in Doubly Salient Permanent Magnet Generator Using Pole Configuration Adjustment. Energies 2020; 13: 4588.
- Sriwannarat W, Siritaratiwat A, Khunkitti P. Structural Design of Partitioned Stator Doubly Salient Permanent Magnet Generator for Power Output Improvement.
   Advances in Materials Science and Engineering 2019; 1: 2189761.
- Zhu ZQ, Chen JT. Advanced Flux-Switching Permanent Magnet Brushless Machines. IEEE transactions on magnetics 2010; 46: 1447–1453.
- Thomas AS, Zhu ZQ, Jewell GW. Comparison of Flux Switching and Surface Mounted Permanent Magnet Generators for High-Speed Applications. IET Electrical Systems in Transportation 2011; 1: 111–116.
- Shi Y, Jian L, Wei J, Shao Z, Li W, Chan CC. A New Perspective on the Operating Principle of Flux-Switching Permanent-Magnet Machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2015; 63: 1425–1437.
- Shao L, Hua W, Zhu ZQ, Tong M, Zhao G, Yin F, et al. Influence of Rotor-Pole Number on Electromagnetic Performance in 12-Phase Redundant Switched Flux Permanent Magnet Machines for Wind Power Generation. IEEE Transactions on Industry Applications 2017; 53: 3305–3316.
- Lehr M, Binder A. Comparison of Different Synchronous Machines with Statorside Permanent Magnets for Industrial Drive Application. The Journal of Engineering 2019; 2: 4500–4505.
- Shao L, Hua W, Zhu ZQ, Zhu X, Cheng M, Wu Z. A Novel Flux-Switching Permanent Magnet Machine With Overlapping Windings. IEEE Transactions on Energy Conversion 2017; 32: 172–183.
- Chen JT, Zhu ZQ, Iwasaki S, Deodhar RP. A Novel Hybrid-Excited Switched-Flux Brushless AC Machine for EV/HEV Applications. IEEE Transactions on Vehicular Technology 2011; 60(4): 1365-1373.
- Zhou YJ, Zhu ZQ. Torque Density and Magnet Usage Efficiency Enhancement of Sandwiched Switched Flux Permanent Magnet Machines Using V-Shaped Magnets. IEEE Transactions on Magnetics 2013; 49(7): 3834-3837.
- Chen JT, Zhu ZQ, Iwasaki S, Deodhar R. A Novel E-core Flux-switching PM Brushless AC Machine. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. ECCE 2010 – Proc. 2010; 9: 2010, 3811-3818.
- Zhang G, Hua W, Cheng M, Liao J. Design and Comparison of Two Six-Phase Hybrid-Excited Flux-Switching Machines for EV/HEV Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2016; 63(1): 481-493.
- Zhao G, Hua W. A novel flux-switching permanent magnet machine with Vshaped magnets. AIP Advances 2017; 7: 056655.
- Su P, Hua W, Wu Z, Han P, Cheng M. Analysis of the Operation Principle for Rotor-Permanent-Magnet Flux-Switching Machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2017; 65: 1062–1073.

- Su P, Hua W. Performance Comparison between Rotor Flux-Switching and Stator Flux-Switching Machines Considering Local Demagnetization. AIP Advances 2017; 7: 056641.
- Su P, Hua W, Wu Z, Chen Z, Zhang G, Cheng M. Comprehensive Comparison of Rotor Permanent Magnet and Stator Permanent Magnet Flux-Switching Machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2018; 66: 5862–5871.
- Su P, Hua W, Hu M, Chen Z, Cheng M, Wang W. Analysis of PM Eddy Current Loss in Rotor-PM and Stator-PM Flux-Switching Machines by Air-Gap Field Modulation Theory. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2019; 67: 1824–1835.
- Su P, Hua W, Hu M, Wu Z, Si J, Chen Z, et al. Analysis of Stator Slots and Rotor Pole Pairs Combinations of Rotor-Permanent Magnet Flux-Switching Machines.
   IEEE Transactions on Industrial Electronics 2019; 67: 906–918.
- Eduku S, Chen Q, Xu G, Liu G, Liao J, Zhang X. A New Fault-Tolerant Rotor
   Permanent Magnet Flux-Switching Motor. IEEE Transactions on Transportation
   Electrification 2022; 8: 3606-3617.
- Su P, Hua W, Zhang G, Chen Z, Cheng M. Analysis and Evaluation of Novel Rotor Permanent Magnet Flux-Switching Machine for EV and HEV Applications. IET Electric Power Applications 2017; 11: 1610–1618.
- 26. Kaewrawang A. **Electromagnetic field**. Khon Kaen: Faculty of Engineering Khon Kaen University; 2007.
- 27. Lu K, Omand P, Rasmussen L, Ritchie E. An Analytical Equation for Cogging Torque Calculation in Permanent Magnet Motors. Aalborg Universitet 2006;
  5: 382.
- Bianchi N, Bolognani S, Bon D, Dai Pre M. Rotor Flux-Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance and PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors. IEEE Transactions on Industry Applications 2009; 45: 921–928.
- Fang L, Kim SI, Kwon SO, Hong JP. Novel Double-Barrier Rotor Designs in Interior-PM Motor for Reducing Torque Pulsation. IEEE Transactions on Magnetics 2010; 46: 2183–2186.

- Ishikawa K, Kitagawa W, Takeshita T. Shape Optimization of Flux Barriers in IPMSM by Using Polygon Model Method with GP. Proc. - 2014 Int. Conf. Electr. Mach., 2014; 2: 1403–1408.
- Kim KC. A Novel Method for Minimization of Cogging Torque and Torque Ripple for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor. IEEE Transactions on Magnetics 2014; 50: 793–796.
- 32. Yamazaki K, Kato Y, Ikemi T, Ohki S. Reduction of Rotor Losses in Multilayer Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors by Introducing Novel Topology of Rotor Flux Barriers. **IEEE Transactions on Industry Applications** 2014; 50: 3185–3193.
- Pan Z, Yang K, Wang X. Optimal Design of Flux-Barrier to Improve Torque Performance of IPMSM for Electric Spindle. 2015 18th Int Conf Electr Mach Syst 2015; 3: 773–778.
- Ge X, Zhu ZQ, Li J, Chen J. A Spoke-Type IPM Machine with Novel Alternate Airspace Barriers and Reduction of Unipolar Leakage Flux by Step-Staggered Rotor. IEEE Transactions on Industry Applications 2016; 52: 4789–4797.
- Choi G, Jahns TM. Reduction of Eddy-Current Losses in Fractional-Slot Concentrated-Winding Synchronous PM Machines. IEEE transactions on magnetics 2016; 52: 445-458.
- Luo J, Zhao W, Ji J, Zheng J, Zhang Y, Ling Z, et al. Reduction of Eddy-Current Loss in Flux-Switching Permanent-Magnet Machines Using Rotor Magnetic Flux Barriers. IEEE Transactions on Magnetics 2017; 3: 53.
- Zhao W, Pan X, Ji J, Xu L, Zheng J. Analysis of PM Eddy Current Loss in Four-Phase Fault-Tolerant Flux-Switching Permanent-Magnet Machines by Air-Gap Magnetic Field Modulation Theory. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2019; 67: 5369–5378.
- Yang H, Li Y, Lin H, Zhu ZQ, Lyu S. Principle Investigation and Performance Comparison of Consequent-Pole Switched Flux PM Machines. IEEE Transactions on Transportation Electrification 2020; 7: 766–778.
- Li Y, Yang H, Lin H. Investigation of Torque Improvement Mechanism in Emerging Switched Flux PM Machines. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 2020; 10: 1860–1869.

- 40. Sayed E, Yang Y, Bilgin B, Bakr MH, Emadi A. A Comprehensive Review of Flux
  Barriers in Interior Permanent Magnet Synchronous Machines. IEEE Access 2019;
  7: 149168–149181.
- Sanada M, Hiramoto K, Morimoto S, Takeda Y. Torque Ripple Improvement for Synchronous Reluctance Motor Using an Asymmetric Flux Barrier Arrangement.
   IEEE Transactions on Industry Applications 2004; 40: 1076–1082.
- Barcaro M, Bianchi N, Magnussen F. Rotor Flux-Barrier Geometry Design to Reduce Stator Iron Losses in Synchronous IPM Motors under FW Operations.
   IEEE Transactions on Industry Applications 2010; 46: 1950–1958.
- 43. Yamazaki K, Kumagai M, Ikemi T, Ohki S. A Novel Rotor Design of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors to Cope with Both Maximum Torque and Iron-Loss Reduction. **IEEE Transactions on Industry Applications** 2013; 49: 2478–2486.
- 44. Zhao W, Zhao F, Lipo TA, Kwon BI. Optimal Design of a Novel V-Type Interior Permanent Magnet Motor with Assisted Barriers for the Improvement of Torque Characteristics. **IEEE Transactions on Magnetics** 2014; 50: 8104504.
- Sarani E, Vaez-Zadeh S. Line Start Permanent Magnet Motors with Double-Barrier Configuration for Magnet Conservation and Performance Improvement.
   IET Electric Power Applications 2017; 11: 1656–1663.
- Ren W, Xu Q, Li Q. Asymmetrical V-Shape Rotor Configuration of an Interior Permanent Magnet Machine for Improving Torque Characteristics. IEEE Transactions on Magnetics 2015; 51: 8113704.
- 47. Zhao W, Zhao F, Lipo TA, Kwon B. Il Optimal Design of a Novel V-Type Interior Permanent Magnet Motor with Assisted Barriers for the Improvement of Torque Characteristics. **IEEE Transactions on Magnetics** 2014; 50: 8104504.
- 48. Zhu X, Xiang Z, Zhang C, Quan L, Du Y, Gu W. Co-Reduction of Torque Ripple for Outer Rotor Flux-Switching PM Motor Using Systematic Multi-Level Design and Control Schemes. **IEEE Transactions on Industrial Electronics** 2017; 64: 1102–1112.
- Xiang Z, Quan L, Zhu X, Huang J, Fan D. Investigation of Optimal Split Ratio in Brushless Dual-Rotor Flux-Switching Permanent Magnet Machine Considering Power Allocation. IEEE Transactions on Magnetics 2018; 54: 8102104.

- 50. Park MR, Cha KS, Jung JW, Lim MS. Optimum Design of Sensorless-Oriented IPMSM Considering Torque Characteristics. **IEEE Transactions on Magnetics** 2020; 56: 7500704.
- 51. Jang H, Kim H, Liu HC, Lee HJ, Lee J. Investigation on the Torque Ripple Reduction Method of a Hybrid Electric Vehicle Motor. **Energies** 2021; 14: 1413.
- Park Y, Kim H, Jang H, Ham SH, Lee J, Jung DH. Efficiency Improvement of Permanent Magnet BLDC with Halbach Magnet Array for Drone. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 2020; 30: 5201405.
- Duangrattanaprathip N, Pimduen R, Chaiy R, Kullapop S. Basic Knowledges of Finite Element Method and Application in Implant Dentistry. The Chiang Mai Dental Journal 2018; 39(3): 29–42.
- 54. Dechaumphai P. Finite element method in engineering. 5<sup>th</sup> ed. Chulalongkorn: Chulalongkorn University Press; 2012.
- 55. Falcón–Antenucci RM, Pellizzer EP, de Carvalho PS, Goiato MC, Noritomi PY. Influence of Cusp Inclination on Stress Distribution in ImplantSupported Prostheses. A Three-Dimensional Finite Element Analysis. J Prosthodont 2010; 19(5): 381-386.
- Evgeny B. Introduction to the finite element method. Latvia: Institute of Materials and Structures Faculty of Civil Engineering Riga Technical University; 2001.
- 57. Wang J, et al. A New Flux-Concentrating Rotor of Permanent Magnet Motor for Electric Vehicle Application. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2021;
  2: 114-135.
- Yongsheng G, et al. A Novel Interior Permanent Magnet Machine with Magnet Axis Shifted Effect for Electric Vehicle Applications. World Electric Vehicle Journal 2021; 12(4): 189.
- Xiao Y, et al. A novel asymmetric interior permanent magnet machine for electric vehicles. IEEE Transactions on Energy Conversion 2021; 36(3): 2404-2415.
- 60. Wang H, et al. A Novel Double-Sided Offset Stator Axial-Flux Permanent Magnet Motor for Electric Vehicles. **World Electric Vehicle Journal** 2022; 13(3): 52.

- Hai X, et al. Analysis of a hybrid permanent magnet variable-flux machine for electric vehicle tractions considering magnetizing and demagnetizing current.
   IEEE Transactions on Industry Applications 2021; 57(6): 5983-5992.
- 62. Bingchang L, et al. Performance analysis of asymmetrical less-rare-earth permanent magnet motor for electric vehicle. IET Electrical Systems in Transportation 2022; 12(1): 36-48.
- Jae-Gil L, Dong-Kuk L. A stepwise optimal design applied to an interior permanent magnet synchronous motor for electric vehicle traction applications.
   IEEE Access 2021; 9: 115090-115099.
- Feng L, Wang X, Xing Z. Design of a 35kW Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Equipped with Non-Uniform Air Gap Rotor. IEEE Transactions on Industry Applications 2022; 1: 213-245.
- 65. Bozkurt A, Armagan B, Baba AF, Oner Y. Design of outer-rotor permanentmagnet-assisted synchronous reluctance motor for electric vehicles. **Energies** 2021; 14(13); 3739.

## การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

 Nissayan C, Seangwong P, Chamchuen S, Fernando N, Siritaratiwat A, Khunkitti P. Modeling and Optimal Configuration Design of Flux-Barrier for Torque Improvement of Rotor Flux Switching Permanent Magnet Machine. Energies 2022; 15(22); 8429.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายชัยณัฐพล นิ	สยันต์
วัน เดือน ปีเกิด	1 กุมภาพันธ์ พ.ศ	ศ. 2541
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	95 หมู่ 3 ถนนฉิ	มพลี ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
สัญชาติ	ไทย	
อีเมลล์	Chainattapol.r	n@kkumail.com
เบอร์โทรศัพท์	094-3626228	
ประวัติการศึกษา		
พ.ศ. 2559 – พ.ศ. 2563		วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
		มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
พ.ศ. 2563 – พ.	ศ. 2565	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
		มหาวิทยาลัยขอนแก่น