



การวิเคราะห์เครื่องกำเนิดพลังงานขนาดเล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การวิเคราะห์เครื่องกำเนิดพลังงานขนาดเล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การวิเคราะห์เครื่องกำเนิดพลังงานลมขนาดเล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์"

ของ ปุริม รักสุข

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

### คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤติเดช บัวใหญ่)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักรพันธ์ วงศ์กั้งแห)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุณี วัฒนวงศ์พิทักษ์)

อนุมัติ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การวิเคราะห์เครื่องกำเนิดพลังงานลมขนาดเล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
<b>ผู้วิจัย</b>	ปฐิม รักสุข
<b>ประธานที่ปรึกษา</b>	รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช
<b>กรรมการที่ปรึกษา</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัครพันธ์ วงศ์กั้งแห
<b>ประเภทสารนิพนธ์</b>	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2565
<b>คำสำคัญ</b>	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, แม่เหล็กถาวร, กังหันลม, ฟลักซ์แม่เหล็ก, ไฟไนต์เอลิเมนต์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่เหมาะสมสำหรับความเร็วลม ด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้เครื่องกำเนิดต้นแบบเป็นชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอะซิงโครนัส ขนาด 300 Watt ด้วยโรเตอร์และสเตเตอร์ที่เป็นขดลวดทองแดง การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมุ่งเน้นที่การเปลี่ยนแปลงชนิดของโรเตอร์ โดยเปลี่ยนแปลงจากโรเตอร์แบบขดลวดทองแดงมาใช้โรเตอร์แม่เหล็กถาวรซึ่งถูกนำมาใช้วิเคราะห์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีแม่เหล็กทั้งหมด 3 ขนาด มีขนาดความหนา 5 มม. ยาว 60 มม. และความกว้างแตกต่างกัน 3 ขนาด 20 มม. 25 มม. และ 30 มม.

ผลการวิเคราะห์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวรทั้ง 3 ขนาด จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยฟลักซ์แม่เหล็กรวมของแม่เหล็กทั้ง 3 ขนาด แม่เหล็กขนาด 20 มม. และ 30 มม. มีค่าเฉลี่ยฟลักซ์แม่เหล็กรวมน้อยที่สุด เท่ากับ 0.252T, 0.326T ตามลำดับ และนำแม่เหล็กที่ได้ไปทดสอบต่อไป การวิเคราะห์การเพิ่มแอร์แก๊ปของโรเตอร์ทั้ง 11 ขนาด ที่ระยะ 1 มม. – 6 มม. ค่าฟลักซ์แม่เหล็กรวมที่มีค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ 0.331T คือระยะที่ 4.5 มม. เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้สำหรับกังหันลมขนาดเล็ก และ ระดับลมในพื้นที่ไม่สูงมาก ดังนั้นค่าเฉลี่ยฟลักซ์แม่เหล็กรวมที่มีค่าน้อยจะส่งผลให้การเหนี่ยวนำระหว่างแกนเหล็กและโรเตอร์นั้นมีค่าน้อยลงส่งผลให้กังหันลมสามารถขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น

ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทำการเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดขณะต่อโหลด 1.8 k $\Omega$  ที่ความเร็วรอบสูงสุด 950 rpm ซึ่งความเร็วรอบได้จากการคำนวณขนาดลมสูงสุดในเขตพื้นที่เป้าหมาย

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องการกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบขณะต่อโหลด 100% (1.8k $\Omega$ ) เท่ากับ 46.0% เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องการกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบขณะต่อโหลด 90% (1.35k $\Omega$ ) เท่ากับ 42.14% เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องการกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบขณะต่อโหลด 80% (875 $\Omega$ ) เท่ากับ 30.14% เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องการกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบขณะต่อโหลด 70% (390 $\Omega$ ) เท่ากับ 5.67%



<b>Title</b>	ANALYSIS OF SMALL WIND GENERATOR WITH FINITE ELEMENT METHOD
<b>Author</b>	Purim Ruksuk
<b>Advisor</b>	Associate Professor Somporn Ruangsinchaiwanich, Ph.D.
<b>Co-Advisor</b>	Assistant Professor Akaraphunt Vongkunghae, Ph.D.
<b>Academic Paper</b>	M.Eng. Thesis in Electrical Engineering, Naresuan University, 2022
<b>Keywords</b>	Generator, Permanent magnet, wind turbine, Finite Element Method

### ABSTRACT

This thesis presents a performance analysis of wind generators suitable for wind speed of tall buildings by using the finite element method. The original wind generators were a 300-watt by asynchronous generator with a copper coil rotor and stator. The generator design focus on Rotor type change by changing from a copper coil rotor to a permanent magnet rotor which were used for analysis in the generators. For the size of permanent magnets are 5 mm thick, 60 mm long and for wide is 20 mm, 25 mm, and 30 mm.

Analysis results Three sizes of permanent magnet rotor modified generator based on analysis of average total magnetic flux and maximum magnetic flux. 20 mm magnet is 0.252T, 25 mm magnet is 2.033T, 30 mm. magnet is 0.326T and analysis of increasing the air gap of 11 rotor sizes at 1.mm – 6mm. The minimum magnetic flux of the generator results at 0.331T which is 4.5 mm. Due to total average magnetic flux is small value, resulting in less inductance between the iron core and the rotor caused better small wind turbine generators.

Results of original generators and generators designed using the finite element method by comparison of the power used to drive the generator at the load of 1.8 k $\Omega$  at speed 950.54 rpm. Speed is calculated from the average and

maximum speed of wind in the target area, The generators designed by finite elements require power to drives less than the original generator at 100% load ( $1.8k\Omega$ ) is 46.0%. At 90% load ( $1.35k\Omega$ ) is 42.14%. At 80% load ( $875\Omega$ ) is 30.14%. And at 70% load ( $390\Omega$ ) is 5.67%.



## ประกาศคุณูปการ

งานวิจัยเล่มนี้ สำเร็จได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัย ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นที่ปรึกษา ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำแนวทางแก้ไขปัญหาคอขวด ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤติเดช บัวใหญ่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สรวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์ ที่ได้กรุณาเป็นผู้เชี่ยวชาญให้คำแนะนำและตรวจสอบ ตลาดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ มารดา และครอบครัวของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุน ในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบ และอุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน และผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ

บุริม รักสุข



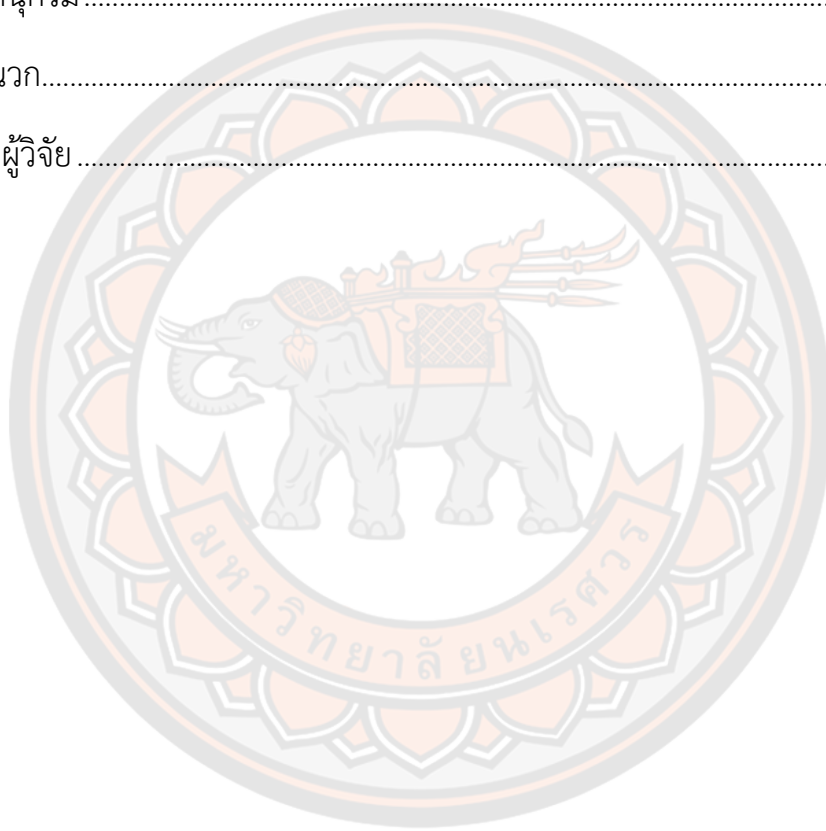
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุณูปการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	๗
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
การเกิดลม.....	4
ปัจจัยที่ทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่หรือเกิดลม.....	4
ลมมรสุม (Monsoon).....	5
ลมประจำถิ่นของประเทศไทย.....	6

การวัดลม .....	7
กังหันลม .....	15
ประเภทของกังหันลม .....	15
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอะซิงโครนัส (Asynchronous generator).....	18
แม่เหล็กถาวร .....	25
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	28
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับงานวิเคราะห์ .....	28
ประโยชน์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	30
แผนการดำเนินงานวิจัย.....	30
การศึกษาศักยภาพลมในพื้นที่เป้าหมาย .....	31
การศึกษาพารามิเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย .....	39
พารามิเตอร์โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ .....	41
พารามิเตอร์สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ .....	42
วิธีดำเนินการวิจัย .....	43
การทดสอบการออกแบบโดยการเปลี่ยนโรเตอร์เป็นโรเตอร์แม่เหล็กถาวรด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์.....	44
การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	47
การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	47
ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	49

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการ ปรับเปลี่ยนขนาดแม่เหล็กถาวร .....	51
ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการ ปรับเปลี่ยนขนาดของช่องว่างอากาศโดยใช้แม่เหล็กถาวรขนาดความกว้าง 30 มม. .....	54
เปรียบเทียบการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	70
บทที่ 4 การสร้างและทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	71
การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนโรเตอร์ใหม่ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟ ไนต์เอลิเมนต์ .....	71
ค่าพารามิเตอร์และวัสดุอุปกรณ์สำหรับนำมาสร้างโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	71
- พารามิเตอร์ของแกนเหล็กที่ต้องการนำมาสร้างโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.	71
- พารามิเตอร์ของเพลลาที่ต้องการนำมาสร้างเพลลาของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า .	73
- วัสดุอุปกรณ์สำหรับนำมาสร้างโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	74
ขั้นตอนการสร้างโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	75
ขั้นตอนในการสร้างชิ้นส่วนแกนเหล็กโรเตอร์ด้วยแผ่นลามิเนต .....	75
ขั้นตอนในการประกอบแผ่นลามิเนตเพื่อให้เป็นแกนเหล็กสมบูรณ์.....	76
ขั้นตอนในการประกอบแกนเหล็กกับเพลลาโรเตอร์.....	77
ขั้นตอนการประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	78
การทดสอบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จาก การออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	80
ผลการทดสอบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จาก การออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	81

เปรียบเทียบผลการทดสอบสมรรถภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	92
บทที่ 5 สรุป.....	98
สรุปผลการวิจัย.....	98
ข้อเสนอแนะการวิจัย.....	100
บรรณานุกรม.....	101
ภาคผนวก.....	106
ประวัติผู้วิจัย.....	111



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ตารางเทียบความเร็วลมและชนิดลมของมาตราโบฟอร์ต [3].....	9
ตาราง 2 ค่า n ตามลักษณะพื้นผิวแบบต่างๆ [3].....	12
ตาราง 3 คุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในงานเครื่องกลไฟฟ้า.....	27
ตาราง 4 แสดงรายละเอียดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง.....	40
ตาราง 5 พารามิเตอร์โรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ.....	41
ตาราง 6 พารามิเตอร์สเตเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ.....	42
ตาราง 7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเครื่องกำเนิด.....	44
ตาราง 8 ระยะต่างๆของสลีตในสเตเตอร์.....	44
ตาราง 9 การวางเรียงสายของสเตเตอร์.....	45
ตาราง 10 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และค่าฟลักซ์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าได้จากการคำนวณที่ปรับเปลี่ยนขนาดแม่เหล็กถาวร.....	66
ตาราง 11 ผลการคำนวณค่าฟลักซ์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการเพิ่มขนาดแอร์แกป.....	67
ตาราง 12 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	68
ตาราง 13 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าขณะไม่มีการขับโหลด.....	83
ตาราง 14 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้ามอเตอร์คงที่ ขณะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่โรเตอร์.....	84
ตาราง 15 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้ากระตุ้นโรเตอร์คงที่ แล้วเพิ่มแรงดันที่มอเตอร์.....	85
ตาราง 16 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x20x60 mm.....	86

ตาราง 17 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 mm.....	87
ตาราง 18 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 mm เมื่อ ต่อกับโหลด.....	88
ตาราง 19 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบเมื่อต่อกับโหลด .....	89
ตาราง 20 ผลการคำนวณกำลังขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	91



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 ภาพแสดงการเกิดลมจากอากาศที่มีการเคลื่อนที่โดยเกิดจากความแตกต่างของความดันอากาศ [1].....	4
ภาพ 2 ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ [1] .....	6
ภาพ 3 ทิศลมเรียกมุมจริงเป็นองศา [2].....	8
ภาพ 4 ตัวอย่างของการกระจายแบบ Rayleigh [6].....	13
ภาพ 5 ตัวอย่างของการกระจายแบบ Weibull สำหรับความเร็วลมเฉลี่ย, $u = 8$ m/s [6]...	14
ภาพ 6 กังหันลมแกนหมุนแนวนอน กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง [5] .....	15
ภาพ 7 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเดี่ยว [5] .....	16
ภาพ 8 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง [5] .....	17
ภาพ 9 คุณสมบัติของ Induction Machines ในโหมดการทำงานต่างๆ .....	18
ภาพ 10 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอะซิงโครนัส.....	19
ภาพ 11 (a) โครงสเตเตอร์ (b) โครงโรเตอร์.....	21
ภาพ 12 การสูญเสียและกำลังในส่วนต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	24
ภาพ 13 แสดงขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัยภาพ .....	31
ภาพ 14 กราฟความเร็วลม เดือนเมษายน 2021 .....	32
ภาพ 15 กราฟความเร็วลม เดือนพฤษภาคม 2021.....	32
ภาพ 16 กราฟความเร็วลม เดือนมิถุนายน 2021 .....	33
ภาพ 17 กราฟความเร็วลม เดือนกรกฎาคม 2021 .....	33
ภาพ 18 กราฟความเร็วลม เดือนสิงหาคม 2021 .....	34

ภาพ 19 กราฟความเร็วลม เดือนกันยายน 2021 .....	34
ภาพ 20 กราฟความเร็วลม เดือนตุลาคม 2021 .....	35
ภาพ 21 กราฟความเร็วลม เดือนพฤศจิกายน 2021 .....	35
ภาพ 22 กราฟความเร็วลม เดือนธันวาคม 2021 .....	36
ภาพ 23 กราฟความเร็วลม เดือนมกราคม 2022 .....	36
ภาพ 24 กราฟความเร็วลม เดือนกุมภาพันธ์ 2022 .....	37
ภาพ 25 กราฟความเร็วลม เดือนมีนาคม 2022 .....	37
ภาพ 26 กราฟความเร็วลม ตั้งแต่เดือนเมษายนถึงเดือนมีนาคม .....	38
ภาพ 27 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอะซิงโครนัสต้นแบบ .....	39
ภาพ 28 แสดงสเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	40
ภาพ 29 ส่วนประกอบของโรเตอร์ .....	41
ภาพ 30 ส่วนประกอบของสเตเตอร์ .....	42
ภาพ 31 โพล์ชาร์ตแสดงวิธีดำเนินการเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	43
ภาพ 32 รูปแบบสล็อตที่ใช้ในสเตเตอร์ .....	45
ภาพ 33 ประเภทการวางเรียงในสเตเตอร์ Whole-Coiled .....	46
ภาพ 34 แสดงวิธีการวางเรียงสายในสเตเตอร์ .....	46
ภาพ 35 โครงสร้างสามมิติของสเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องกำเนิด .....	49
ภาพ 36 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดแม่เหล็กกว้าง 20 mm .....	51
ภาพ 37 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดแม่เหล็กกว้าง 25 mm .....	52





ภาพ 50 กราฟเปรียบเทียบการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ปรับเปลี่ยนขนาดแม่เหล็กถาวรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	66
ภาพ 51 กราฟเปรียบเทียบการคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนขนาดของแม่เหล็กถาวร .....	67
ภาพ 52 กราฟเปรียบเทียบการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่มีการเพิ่มขนาดแอร์แกปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	69
ภาพ 53 กราฟเปรียบเทียบการคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีการเพิ่มขนาดแอร์แกป .....	69
ภาพ 54 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวมที่มีการเพิ่มขนาดแอร์แกปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	70
ภาพ 55 พารามิเตอร์ที่ต้องการนำมาสร้างแกนเหล็กโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	71
ภาพ 56 พารามิเตอร์ที่ต้องการนำมาสร้างแกนเหล็กโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	72
ภาพ 57 พารามิเตอร์ที่ต้องการนำมาสร้างแกนเหล็กโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	72
ภาพ 58 พารามิเตอร์ของเพลารอเตอร์ที่ต้องการนำมาสร้างและใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	73
ภาพ 59 ภาพแสดงแผ่นลามิเนตที่นำมาใช้สร้างแกนเหล็กและเหล็กเพล่าฟ้าที่นำมาใช้สร้างเพล่าของโรเตอร์.....	74
ภาพ 60 แสดงแม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 มม. และ 5x20x60 มม. ....	74
ภาพ 61 ขั้นตอนในการสร้างชิ้นส่วนของแกนเหล็กโรเตอร์ด้วยแผ่นลามิเนต .....	75
ภาพ 62 ขั้นตอนในการประกอบแผ่นลามิเนตเพื่อให้เป็นแกนเหล็ก.....	76
ภาพ 63 ขั้นตอนในการประกอบแกนเหล็กกับเพลารอเตอร์ .....	77
ภาพ 64 โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และโรเตอร์แบบเก่า .....	77
ภาพ 65 อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	78
ภาพ 66 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโรเตอร์แบบเก่า ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์.....	79

ภาพ 67 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโรเตอร์ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์ .....	79
ภาพ 68 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ.....	81
ภาพ 69 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์กับกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ .....	92
ภาพ 70 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์กับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	93
ภาพ 71 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าด้านนอก .....	93
ภาพ 72 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้กับความเร็วยรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	94
ภาพ 73 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เมื่อไร้การต่อโหลด .....	95
ภาพ 74 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อโหลด 100 % .....	95
ภาพ 75 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อโหลด 90 % .....	96
ภาพ 76 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อโหลด 80 % .....	96
ภาพ 77 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อโหลด 70 % .....	97

# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันหลายๆประเทศเริ่มให้ความสนใจในด้านการประหยัดพลังงานกันอย่างแพร่หลายอันเนื่องมาจากสภาวะโลกร้อน และพลังงานลม (Wind Power) เป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ที่เติบโตได้รวดเร็ว เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจึงถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้พลังงานลมสามารถแข่งขันกับพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuel) ได้ทั้งด้านศักยภาพและราคาแต่การลงทุนกับพลังงานลมมีความเสี่ยงสูงเนื่องจากค่าความเร็วของลมและกำลังลมมีความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามฤดูกาล การนำพลังงานลมมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า สิ่งสำคัญคือ การประเมินอัตราเร็วลมที่มีอยู่ในพื้นที่

การพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมที่ใช้สำหรับผลิตไฟฟ้าได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องหลายประเทศทั่วโลกให้ความสนใจอย่างมาก โดยเฉพาะในทวีปยุโรป และกังหันลมที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนมากจะนำเข้ามาจากต่างประเทศ กังหันลมได้ที่มีการพัฒนาขึ้นมานั้นจะมีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันออกไป การผลิตไฟฟ้านั้นมีอุปกรณ์สำคัญอยู่อีกอย่างคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลม ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลที่เกิดจากการหมุนของใบพัดกังหันลมเป็นพลังงานไฟฟ้า กังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศโดยส่วนมากจะใช้กับความเร็วลมที่ค่อนข้างสูง แต่ความเร็วลมในประเทศไทยอยู่ในระดับปานกลางไม่สูงมาก จึงอาจทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีทอร์กเริ่มต้นสูงในการเริ่มหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ด้วยเหตุนี้จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้เล็งเห็นและให้ความสำคัญในเรื่องดังกล่าว และจากงานวิจัยหลายชิ้นที่ได้ทำการศึกษาในเรื่องนี้โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) มาวิเคราะห์หาคำตอบแทนการทดสอบจริง ในการลดทอร์กเริ่มต้นที่สูงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มเข้ามามีบทบาทในการนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอื่นๆ เช่นงานด้านวิศวกรรมและในทางด้านวงการแพทย์ ซึ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้เป็นการนำเอาองค์ความรู้ทางด้านต่างๆไม่ว่าจะเป็นความรู้ในด้านคณิตศาสตร์ ความรู้ในวิธีเชิงตัวเลข รวมทั้งความรู้ทางด้านซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ มาประกอบเข้าด้วยกัน ทำให้สามารถช่วยทำนายปรากฏการณ์ต่างๆได้ด้วยความสะดวก หลีกเลี่ยงการลองผิดลองถูกของการออกแบบที่เคยใช้กันมาในอดีต ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดลอง และประหยัดเวลาได้อย่างมาก

## วัตถุประสงค์ของโครงการ

- นำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่มีเทอร์กเริ่มต้นต่ำลง สามารถใช้ได้กับความเร็วลมระดับปานกลาง
- สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## ความสำคัญของการวิจัย

เนื่องจากอาคารสูงของมหาวิทยาลัยนเรศวรมีอยู่มาก โดยใช้เป็นอาคารสำนักงาน อาคารอเนกประสงค์ใช้สำหรับการเรียนการสอน และที่พักของอาจารย์ และนิสิตภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งส่วนมากอาคารสูงชั้นตึ้นฟ้าจะมีพื้นที่ใช้สอยขนาดเล็ก ที่สามารถติดตั้งกังหันลมขนาดเล็กได้ เช่น อาคารของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สามารถติดตั้งกังหันลมขนาดเล็กได้ และอาคารอาคารเองก็มีความสูงถึง 6 ชั้น ดังนั้น กังหันลมสามารถรับลมที่มีลมที่ต่ำกว่าติดตั้งไว้ที่พื้น เพราะความเร็วลมกับความสูงที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมมีผลอย่างมากและในความเป็นจริงลมชั้นบนจะมีขนาดลมที่ดีและสม่ำเสมอมากกว่า

ในงานวิจัยนี้จะทำการรวบรวมค่าของลมในเขตพื้นที่พิษณุโลก ซึ่งขนาดของลมแต่ละวันจะไม่เท่ากัน และทิศทางของลมก็จะมีทิศทางในแต่ละวันก็ไม่เหมือนกัน เป็นปัญหาในการเลือกใช้ ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเพื่อให้ความเหมาะสมกับขนาดและทิศทางของลมในพื้นที่ที่กำลังศึกษา พื้นที่แต่ละจังหวัดขนาดความเร็วลมก็อาจจะไม่เท่ากันเพราะบางพื้นที่ อยู่ติดทะเลและบางพื้นที่อยู่แถบๆช่องเขาก็จะมีความเร็วลมที่สูง พื้นที่ราบจะมีความเร็วลมปานกลางและลมค่อนข้างไม่ผันผวนมากนัก ในเขตพื้นที่ที่กำลังศึกษาถ้ามีขนาดลมระดับปานกลางหรือดี

การผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมจะมีอุปกรณ์สำคัญคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดอยู่มากมายซึ่งจะต้องเลือกขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เหมาะสมกับกังหันลม ถ้าเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ตัวใหญ่เกินไป กังหันลมอาจไม่สามารถขับโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดได้หรืออาจขับโรเตอร์เริ่มต้นได้ช้า และถ้าเลือกเครื่องกำเนิดที่มีขนาดเล็กเกินไป อาจส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นการเลือกใช้ขนาดและชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาใช้ในพื้นที่ที่กำลังศึกษาจึงมีความสำคัญมาก

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มเข้ามามีบทบาทในการนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอื่นๆ โดยเฉพาะงานด้านวิศวกรรม ซึ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้เป็นการนำเอาองค์ความรู้ทางด้านต่างๆ มาประกอบเข้าด้วยกัน ทำให้สามารถช่วยทำนายปรากฏการณ์ต่างๆ ได้ด้วยความสะดวก หลีกเลียงการลองผิดลองถูกของการออกแบบที่เคยใช้กันมาก อย่างเช่นออกแบบโมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะใช้ใน

การศึกษาสามารถออกแบบหลายๆโมเดลแล้วเอามาจำลองการทำงานได้ และด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงสามารถประหยัดต้นทุนการศึกษาออกแบบของอุปกรณ์ต่างๆได้

### ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดทอร์กเริ่มต้นที่ต่ำลง โดยการจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ได้ทำการวิเคราะห์แล้วว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดทอร์ก เริ่มต้นที่ต่ำลง

### นิยามศัพท์เฉพาะ

-

### สมมุติฐานของการวิจัย

สร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีขนาดเหมาะสมกับขนาดความเร็วลมระดับปานกลาง และในความเร็วลมระดับปานกลางนั้นความสามารถในการเริ่มเดินเครื่องเกิดไฟฟ้านั้นค่อนข้างต่ำ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการลดทอร์กเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้ทำการวิเคราะห์แล้วว่าสามารถใช้งานกับลมระดับปานกลางได้

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

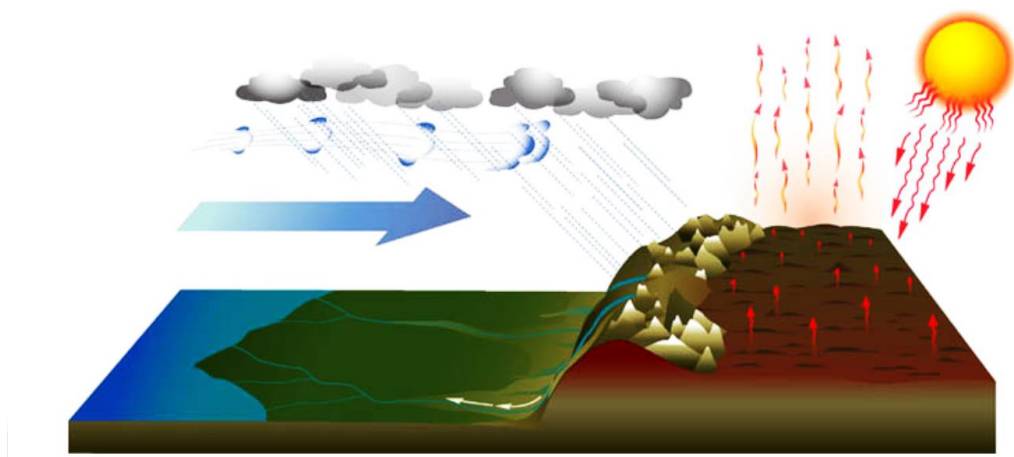
ได้องค์ความรู้สำหรับการออกแบบพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและเหมาะสมกับการใช้งานจริงสำหรับลมระดับกลาง และได้องค์ความรู้สำหรับการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการออกแบบวิเคราะห์และจำลองความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็กภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### การเกิดลม

ลมเกิดจากอากาศที่มีการเคลื่อนที่โดยเกิดจากความแตกต่างของความดันอากาศหรือความร้อนสองจุดบนผิวโลกโดยลมจะพัดจากบริเวณที่มีความดันอากาศสูงไปยังบริเวณความดันอากาศต่ำ



ภาพ 1 ภาพแสดงการเกิดลมจากอากาศที่มีการเคลื่อนที่โดยเกิดจากความแตกต่างของความดันอากาศ [1]

#### ปัจจัยที่ทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่หรือเกิดลม

การเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบที่มีการหมุนกล่าวคือ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ทำให้ความดันอากาศแตกต่างกันนั้นคือเกิด Pressure Gradient (การเปลี่ยนแปลงของความดันอากาศตามระยะ) (ความดันก็คือแรงต่อพื้นที่) โดยสรุปแล้ว เมื่อมี Pressure Gradient ก็จะมีแรงลัพธ์ (Net Force, Pressure Gradient Force) และก็เป็นไปตามกฎข้อสองของนิวตัน นั่นคือ มวล (อากาศ) มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ( $F=ma$ ) การเคลื่อนที่ของอากาศใน Frame ที่กำลังหมุน (โลกกำลังหมุนรอบตัวเอง) ก็จะได้รับอิทธิพลเนื่องจากการ หมุนของโลกตลอดเวลาในระหว่างที่มีการเคลื่อนที่ (ยกเว้นเคลื่อนที่ที่ ศูนย์สูตร) ทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแรงลัพธ์ (Pressure Gradient Force) ถูกเบี่ยงเบนไปจากเดิม เช่น ถ้าอากาศเคลื่อนที่ในซีกโลกเหนือจะถูกอิทธิพลดังกล่าว (ซึ่งต่อมาเราเรียกว่า แรงโคริโอลิส, แรงเนื่องจากการหมุนของโลก, เป็นแรงปรากฏ) กระทำทำให้ทิศทาง เบี่ยงเบนจากแนวเดิมไปทางขวา (เบนไปทางซ้ายสำหรับซีกโลกใต้) ดังนั้นบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำ (ความดัน อากาศต่ำ) ซึ่งเรานิยมเรียกว่าบริเวณห่อมความกดอากาศต่ำ (ความดันอากาศเฉลี่ยที่ระดับน้ำทะเลปกติมีค่าประมาณ 1,013.15 มิลลิบาร์)

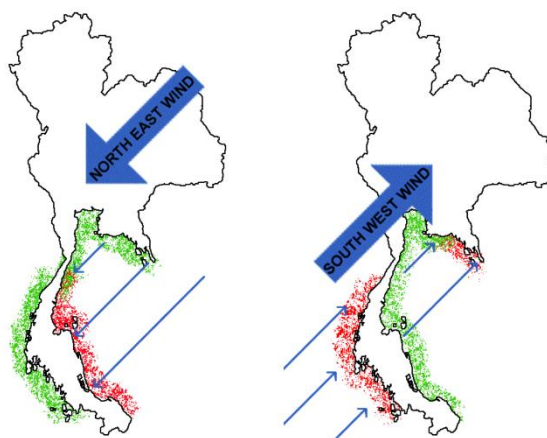
## ลมมรสุม (Monsoon)

เป็นการหมุนเวียนส่วนหนึ่งของลมที่พัดตามฤดูกาล คือลมประจำฤดู มีทิศทางและสม่ำเสมอ คำว่า "มรสุม" หรือ Monsoon มาจากคำว่า Mausim ในภาษาอาหรับ แปลว่า ฤดูกาล (Season) [1]

หลักของการเกิดลมมรสุมก็เป็นเช่นเดียวกับหลักของการเกิดลมบกลมทะเล หรือ ลมภูเขา และลมหุบเขา ซึ่งเกิดขึ้นจากความแตกต่างกันของอุณหภูมิระหว่างบริเวณสองแห่ง แต่ทว่า ระบบของการเกิดลมมรสุมปกคลุมบริเวณกว้างใหญ่กว่ามาก ซึ่งอาจจะกว้างยาวนานนับเป็นพันๆ กิโลเมตรได้ ความแตกต่างของอุณหภูมินี้ เป็นเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างของความกดอากาศ คือ ในฤดูหนาว อุณหภูมิของทวีป จะเย็นกว่าอุณหภูมิของมหาสมุทร ความกดอากาศตามบริเวณแผ่นดิน จึงสูงกว่า ความกดตามบริเวณมหาสมุทร โดยเหตุนี้ ลมในระดับต่ำๆ จึงพัดจากทวีปไปสู่มหาสมุทร ส่วนในฤดูร้อนอุณหภูมิของทวีปจะสูงกว่า อุณหภูมิของมหาสมุทร ความกดอากาศตามบริเวณแผ่นดินจึงน้อยกว่าความกดอากาศตามบริเวณมหาสมุทร โดยเหตุนี้ ลมในระดับต่ำจะพัดจากมหาสมุทรไปสู่ทวีป การพัดของลมในฤดูหนึ่งๆ นี้ เรียกว่า "ลมมรสุม"

อิทธิพลของมรสุมมีมากที่สุดในทวีปเอเชีย บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ณ บริเวณประเทศอินเดีย ปากีสถาน ไทย และแหลมอินโดจีน ในระหว่างฤดูหนาวผืนแผ่นดินใหญ่ของทวีปเอเชียจะถูกปกคลุมด้วยอากาศเย็น และมีความกดอากาศสูง ตั้งแต่ผิวพื้นไปจนถึงสูง ส่วนตามบริเวณมหาสมุทรอินเดียจะมีความกดอากาศต่ำ ในลักษณะนี้ จะมีลมพัดจากระบบความกดอากาศสูง ไปสู่ระบบความกดอากาศต่ำ ระบบของลมในบริเวณนี้มักจะพัดจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ สู่อีสาน ตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งเรียกกัน ว่า "ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ" (Northeast Monsoon) กระแสลมนี้ค่อนข้างเย็น และมีความชื้นน้อย จึงมีฝนได้เพียงตามบริเวณชายฝั่งเท่านั้น เช่น ตามฝั่งอินโดจีน ส่วนบริเวณลึกเข้าไปในแผ่นดิน เช่น ตอนบนของประเทศไทย ฝนจะตกเป็นจำนวนน้อยมาก ฤดูนี้เรียกว่า ฤดูหนาว อยู่ในระหว่างเดือนพฤศจิกายน ถึงเดือนกุมภาพันธ์ ส่วนในฤดูร้อน ตั้งต้นจากเดือนมีนาคม ถึงเดือนตุลาคม อุณหภูมิบนผืนแผ่นดินใหญ่ของประเทศจีนจะร้อนกว่า และมีความกดอากาศน้อยกว่าอากาศตามบริเวณพื้นมหาสมุทรอินเดีย ในลักษณะ นี้ลมจะพัดจากมหาสมุทรอินเดียไปสู่แผ่นดินใหญ่ ลมนี้มักจะพัดจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ ไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ เรียกว่า "ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้" (Southwest Monsoon) ลมชนิดนี้ค่อนข้างชื้น และพัดหอบไอน้ำไปได้เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะลมมรสุมที่พัดผ่านประเทศไทยตอนบนขึ้นไป จะทำให้ฝนตกชุก ตั้งแต่กลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม จึงอาจเรียกว่า เป็นฤดูฝนได้





ภาพ 2 ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ [1]

"ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ" (Northeast Monsoon) เป็นลมที่พัดมาจากประเทศจีน พาอากาศแห้งและเย็น ลงมาปกคลุมตอนเหนือ ถึงตอนกลาง ของประเทศไทย แล้วหอบเอาความชื้นในอ่าวไทย ไปตกในแถบภาคใต้ฝั่งอ่าวไทย

"ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้" (Southwest Monsoon) เป็นลมที่พัดจากมหาสมุทรอินเดียเข้าสู่ประเทศไทย โดยหอบเอาความชื้นจากทะเล มาปะทะแนวเขา เกิดเป็นฝนตกในแถบภาคใต้ฝั่งอันดามัน

ลมประจำถิ่นของประเทศไทย

ได้แก่ลมที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ ของช่วงปี ซึ่งมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปตามท้องถิ่นต่างๆ ของประเทศไทย

ลมว่าว / ลมข้าวเบา เป็นลมที่พัดมาจากทางทิศเหนือลงมายังลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา ลงไปทางทิศใต้ เป็นลมหนาวที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดันฤดูหนาวราวเดือนกันยายน ถึงพฤศจิกายน เป็นช่วงเวลาที่ผู้คนนิยมเล่นว่าว จึงเรียกว่าลมว่าว ส่วนสาเหตุที่เรียกว่าลมข้าวเบา เนื่องจากลมพัดผ่านมาในช่วงเวลาที่มีการเก็บเกี่ยวข้าวชนิดหนึ่งในเดือนพฤศจิกายนนั่นเอง

ลมตะเภา เป็นลมที่พัดจากอ่าวไทยไปยังที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา หรือเป็นลมที่พัดจากทิศใต้ขึ้นไปยังทิศเหนือ ในช่วงกลางฤดูร้อน โดยเฉพาะในเดือนเมษายนของทุกปี ลมตะเภาจะพัดแรงในเวลากลางวัน เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากลมทะเลพัดเข้ามาช่วยเสริม ส่วนเวลากลางคืนจะอ่อนกำลังลงเล็กน้อย เนื่องจากมีลมบกพัดต้านไว้ในบางครั้งมักมีการเข้าใจคลาดเคลื่อนว่าลมตะเภาเป็นลมว่าว เนื่องจากเดือนมีนาคม และเดือนเมษายนที่ลมตะเภาพัดผ่าน ผู้คนมักนิยมเล่นว่าวเช่นกัน

ลมสลาตัน / ลมเพชรหึง เป็นลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ มักเกิดในช่วงต้นของการเปลี่ยนฤดูกาล ช่วงเวลาดังกล่าวมักจะเกิดพายุฝน หรือลมแรง ในบางครั้งเรียกว่าลมเพชรหึง ซึ่งเป็นลมพายุใหญ่ มีชื่อเรียกต่างๆ กันไปในแต่ละท้องถิ่น

ลมวงว / นาคเล่นน้ำ เป็นลักษณะของลมพายุหมุนที่เกิดจากการหมุนเวียนของอากาศภายในเมฆฝน ในบางครั้งเราอาจเห็นเมฆซึ่งมีลักษณะคล้ายวงยาวลงมาจากฐานเมฆฝน สำหรับประเทศไทยพบลมชนิดนี้เกิดขึ้นในทะเล

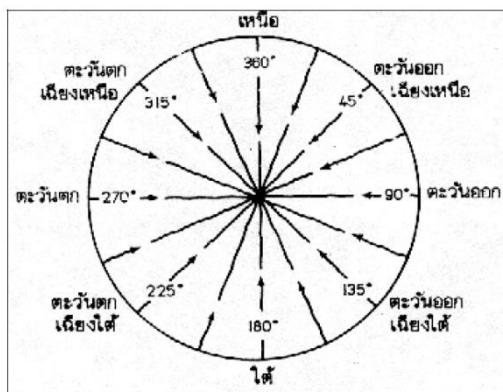
ลมบ้าหมู เป็นลมที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ มีทิศทางพัดหมุนวนเข้มนาฬิกา มักเกิดบริเวณอากาศร้อนจัด ทำให้อากาศลอยตัวสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดการไหลเข้ามาแทนที่ของอากาศ เกิดมากในฤดูร้อน อากาศร้อนจัด

### การวัดลม

การวัดลมมีค่าที่ต้องการวัด 2 ค่า คือการวัดทิศทางลม และวัดความเร็วลม

1. ทิศลมอาจเรียกชื่อตามทิศต่างๆ ของเข็มทิศ หรือเรียกเป็นองศาจากทิศเหนือ ปัจจุบัน

การวัดทิศทางลมนิยมวัดตามเข็มทิศ และวัดเป็นองศา ถ้าวัดทิศทางด้วยเข็มทิศเข็มทิศจะถูกแบ่งออกเป็น ทิศใหญ่ๆ 4 ทิศคือทิศเหนือทิศใต้ทิศตะวันออกทิศตะวันตก ซึ่งทิศทั้ง 4 ทิศ เมื่อ แบ่งย่อยอีกจะเป็น 8 ทิศ โดยจะเพิ่มทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ทิศตะวันออกเฉียงใต้ ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ และทิศตะวันตกเฉียงใต้ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งจาก 8 ทิศ ให้ย่อยเป็น 16 ทิศ หรือ 32 ทิศ ได้อีก แต่การรายงานทิศทางนั้น มักนิยมรายงานจำนวนทิศเพียง 8 หรือ 16 ทิศเท่านั้นส่วนการวัดทิศทางที่บอกมุมจริงของลมเป็นองศาในลักษณะที่เวียนไปตามเข้มนาฬิกา ใช้สเกลจาก 0 องศา ไปจนถึง 360 องศา โดย ลมทิศ 0 องศา หรือ 360 องศา เป็นทิศเหนือ, ลมทิศ 45 องศา เป็นทิศตะวันออกเฉียงเหนือ, ลมทิศ 90 องศา เป็นทิศตะวันออก, ลมทิศ 135 องศา เป็นทิศตะวันออกเฉียงใต้, ลมทิศ 180 องศา เป็นทิศใต้, ลมทิศ 225 องศา เป็นทิศตะวันตกเฉียงใต้, ลมทิศ 270 องศา เป็นทิศตะวันตก และลมทิศ 315 องศา เป็นทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (รูปที่ 9) [2]



ภาพ 3 ทิศลมเรียกมุมจริงเป็นองศา [2]

2. ความเร็วลม คือ อัตราการเคลื่อนที่ของอากาศที่มีพลังงานจลน์ ทำให้เกิดแรงกระทำ ต่อวัตถุใด ๆ ที่ปะทะลมได้ และแรงในรูปความดันเป็นสัดส่วนกับความเร็วลมยกกำลัง 2 ดังอธิบายในรูปสมการเป็น

$$p = 0.5\rho u^2 \quad (1)$$

เมื่อ  $p$  = ความดันที่เกิดจากการกระทำของลม  
 $u$  = ความเร็วลม  
 $\rho$  = ค่าความหนาแน่นของอากาศ

ด้วยเหตุที่มีแรงเกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของลม ทำให้สามารถหาความเร็วลมได้ โดยที่ไม่ต้องอาศัยเครื่องมือใด ๆ แต่ใช้การสังเกตจากปรากฏการณ์ของวัตถุที่อยู่รอบตัว ดังนั้นเพื่อใช้งานตามวัตถุประสงค์ดังกล่าวจึงได้มีการกำหนดมาตราความเร็วลมขึ้น เรียกว่ามาตราโบฟอร์ต (Beaufort Scale) โดยพลเรือเอก เซอร์ฟรานซิส โบฟอร์ต (Admiral Sir Francis Beaufort) ชาวอังกฤษ เป็นผู้คิดขึ้นใช้สำหรับตรวจลมในทะเล ต่อมาได้ถูกดัดแปลงนำมาใช้ทั้งบนบกและในทะเล มาตราโบฟอร์ต จะใช้การสังเกตจากสิ่งกีดขวางไม่ว่าบนบกหรือในทะเล ได้แก่ ใบไม้ กิ่งไม้ สายโทร เลข สายโทรศัพท์ ธง สิ่งปรักหักพังต่าง ๆ และคลื่นในทะเล เกณฑ์ที่ใช้กำหนดความเร็วลม ได้มา จากการสังเกตกำลังลมเหนือพื้นดินและในทะเล มาตราโบฟอร์ต เริ่มต้นจากมาตรา 0 ไปจนถึง มาตรา 17 ตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นคือ ที่มาตรา 0 จะเป็นเขตลมสงบ ไปจนถึงมาตรา 17 ที่ลมมี กำลังแรงจัดเป็นพายุเฮอริเคน ปัจจุบันมาตราโบฟอร์ตถูกนำมาใช้น้อยลง โดยเฉพาะสถานีบนบก เนื่องจากมีการใช้เครื่องมือวัดลมมากขึ้น ตารางที่ 1 เป็นตารางเทียบความเร็วลมและชนิดลม ตามมาตราโบฟอร์ต และปรากฏการณ์ธรรมชาติเหนือพื้นดิน

ตาราง 1 ตารางเทียบความเร็วลมและชนิดลมของมาตราโบฟอร์ต [3]

มาตรา โบฟอร์ต	ความเร็วลม		ชนิดลม	ปรากฏการณ์ธรรมชาติเหนือพื้นดิน
	นอต	กม./ชม.		
0	1	1.6	ลมสงบ	ลมสงบ คิว้นลอยขึ้นตรง
1	1-3	1.6-4.8	ลมเบา	ทิศทางลมสังเกตได้จากควันที่ลอย แต่ไม่ใช่จากศรลม
2	4-6	6.4-8.6	ลมอ่อน	รู้สึกมีลมปะทะหน้า ใบไม้เคลื่อนไหว ศรลมเริ่มหันทิศทางไปตามลม
3	7-10	12.8-19.2	ลมเฉื่อย	ใบไม้และกิ่งไม้เล็ก ๆ เคลื่อนไหว ตลอดเวลา ชงเคลื่อนออกตามลม
4	11-16	20.8-28.8	ลมปานกลาง	ฝุ่นฟุ้ง กระจาดขปลิว กิ่งไม้เล็ก ๆ โยก
5	17-21	30.4-38.4	ลมกระโชก	ต้นไม้เล็ก ๆ เริ่มโยก แห่ล่งน้ำบนบก เช่น แม่น้ำลำคลอง หนองบึงเป็น ระลอก
6	22-27	40.0-49.6	ลมแรง	กิ่งไม้ใหญ่โยก สายโทรเลขตั้งหือ ๆ ไม่สะดวกที่จะใช้ร่ม
7	28-33	51.2-60.8	พายุปาน กลาง	ต้นไม้โยก เดินต้านลมไม่สะดวก
8	34-40	62.4-73.6	พายุกระโชก	กิ่งไม้หัก เดินไปข้างหน้าไม่สะดวก
9	41-47	75.2-86.4	พายุแรง	สิ่งก่อสร้างเสียหายเล็กน้อย
10	48-55	88.0-100.8	พายุจัด	ต้นไม้ถอนราก สิ่งก่อสร้างเสียหาย มาก
11	56-63	102.4-115.2	พายุจัด	สิ่งก่อสร้างเสียหายเป็นบริเวณกว้าง
12	64-71	116.8-131.2	เฮอริเคน	สิ่งก่อสร้างเสียหายหนัก
13	72-80	132.8-147.3	เฮอริเคน	
14	81-89	148.8-164.8	เฮอริเคน	
15	90-99	166.4-182.4	เฮอริเคน	
16	100-108	184.0-200.0	เฮอริเคน	
17	109-118	201.6-217.6	เฮอริเคน	

การคำนวณพลังงานและกำลังลม

การคำนวณพลังงานและกำลังลมที่ได้ สามารถใช้สมการทางคณิตศาสตร์ต่อไปนี้ในการคำนวณและวิเคราะห์ศักยภาพ กำลังลมทั้งหมด (P) ที่ไหลผ่านพื้นที่ตั้งฉากคำนวณจาก [3]

$$P = \frac{KE}{t} = 0.5\rho Au^3 \quad (2)$$

เมื่อ P เป็น กำลังลมทั้งหมด (W)  
 KE เป็น พลังงานจลน์ (J)  
 t เป็น เวลา (s)  
 $\rho$  เป็น ความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{kg/m}^3$ )  
 u เป็น ความเร็วลม (m/s)  
 A เป็น พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางลม ( $\text{m}^2$ )

กำลังลมทั้งหมดที่ได้ต่อหน่วยพื้นที่คำนวณจาก

$$\frac{P}{A} = 0.5\rho u^3 \quad (3)$$

ค่าความหนาแน่นของอากาศ คำนวณได้จากค่าความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ ขณะทำการตรวจวัดความเร็วลม คำนวณได้จาก

$$\rho = 1.2929\left(\frac{p}{760}\right) \frac{273}{(273+T)} \quad (4)$$

$$\rho = 0.464\left(\frac{p}{273+T}\right) \quad (5)$$

เมื่อ p เป็น ความดันบรรยากาศ (mm-Hg)  
 T เป็น อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )

ความหนาแน่นของอากาศมีค่าเปลี่ยนแปลงตามระดับความสูง เนื่องจากอุณหภูมิของ อากาศ ที่ความสูงต่างกันมีค่าไม่เท่ากัน อุณหภูมิของบรรยากาศที่ระดับความสูงต่างๆ สามารถ คำนวณได้จาก

$$T = T_0 - 0.00651y \quad (6)$$

เมื่อ  $T_0$  เป็น อุณหภูมิบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล  
 $y$  เป็น ระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (m)

ดังนั้นความหนาแน่นของอากาศที่ระดับความสูงใด ๆ เหนือระดับน้ำทะเลคำนวณได้จาก

$$\rho = 0.464 \frac{p}{273 + (T_0 - 0.00651y)} \quad (7)$$

ความหนาแน่นอากาศมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบกำลังลมที่ได้คือ  $1.225 \text{ kg/m}^3$  ที่ อุณหภูมิ  $15^\circ\text{C}$  เมื่อทราบค่าความเร็วลมที่ตรวจวัดได้ สามารถคำนวณหา กำลังลมเฉลี่ยในช่วงเวลา ต่าง ๆ ของเดือน ช่วงฤดูกาล หรือในแต่ละปีได้จาก

$$\frac{P_{avg}}{A} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{AN} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 0.5 \rho_i u_i^3 \quad (8)$$

เมื่อ  $N$  เป็น จำนวนข้อมูลที่ทำการตรวจวัด

โดยทั่วไป กำลังลมจะเพิ่มขึ้นตามระดับความสูงเหนือพื้นดิน เนื่องจากความฝืดเรียกว่า wind shear ความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงเหนือพื้นดินประมาณได้จากสมการ (8)

$$\frac{u}{u_0} = \left[ \frac{H}{H_0} \right]^n \quad (9)$$

เมื่อ  $u_0$  เป็น ค่าความเร็วลมที่วัดได้ที่ความสูง  $H_0$   
 $H$  เป็น ระดับความสูงที่ต้องการประมาณค่าความเร็วลม  $u$   
 $N$  เป็น สัมประสิทธิ์ยกกำลัง

สมการ (8) สามารถเขียนอยู่ในรูปของการคำนวณกำลังลมได้ดังสมการ (9)

$$\frac{P}{P_0} = \left[ \frac{H}{H_0} \right]^{3n} \quad (10)$$

ค่า n ในสมการ (8) ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นที่ที่ลมพัดผ่าน โดยมากจะใช้ค่า 1/6 ถึง 1/7 หรือใช้ค่าจากตารางที่ 2

**ตาราง 2** ค่า n ตามลักษณะพื้นผิวแบบต่างๆ [3]

ground cover	n
smooth surface ocean, sand	.10
low grass or fallow ground	.16
high grass or low row crops	.18
tall row crops or low woods	.20
high woods with many tree suburbs, small towns	.30

ลักษณะของความขรุขระของพื้นผิว (surface roughness) ที่มีผลต่อ wind shear และใช้ในการคำนวณความเร็วลมที่ระดับสูงเหนือตำแหน่งที่ตรวจวัด

ลักษณะข้อมูลความเร็วลมจะแสดงในรูป density function ซึ่งใช้ในการอธิบายลักษณะในรูปเส้นกราฟความถี่ของความเร็วลม โดยที่ Weibull และ Rayleigh function เป็นฟังก์ชันที่นิยมใช้กันมากที่สุด ซึ่ง Rayleigh เป็นการกระจายแบบ 1 พารามิเตอร์ และเป็น subset ของ Weibull ที่เป็นการกระจายแบบ 2 พารามิเตอร์ ทำให้ Weibull สามารถใช้งานได้ครอบคลุมกว่า แต่บางกรณีที่ต้องการใช้งานอย่างง่าย ก็สามารถใช้ Rayleigh ได้ ซึ่งเพียงแต่ทราบค่าความเร็วลมเฉลี่ย, u

probability density function และ cumulative distribution สำหรับ Rayleigh distribution เขียนได้ดังสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ

$$f(u) = \frac{\pi}{2} \left( \frac{u}{\bar{u}^2} \right) \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{u}{\bar{u}} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$F(u) = 1 - \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{u}{\bar{u}} \right)^2 \right] \quad (12)$$

ลักษณะของการกระจายของความเร็วลม ที่ทำการตรวจวัดในช่วงเวลาหนึ่งเดือนหรือหนึ่งปี เป็นข้อมูลทางสถิติที่นิยมแสดงในรูปการกระจายแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution) ดังนี้

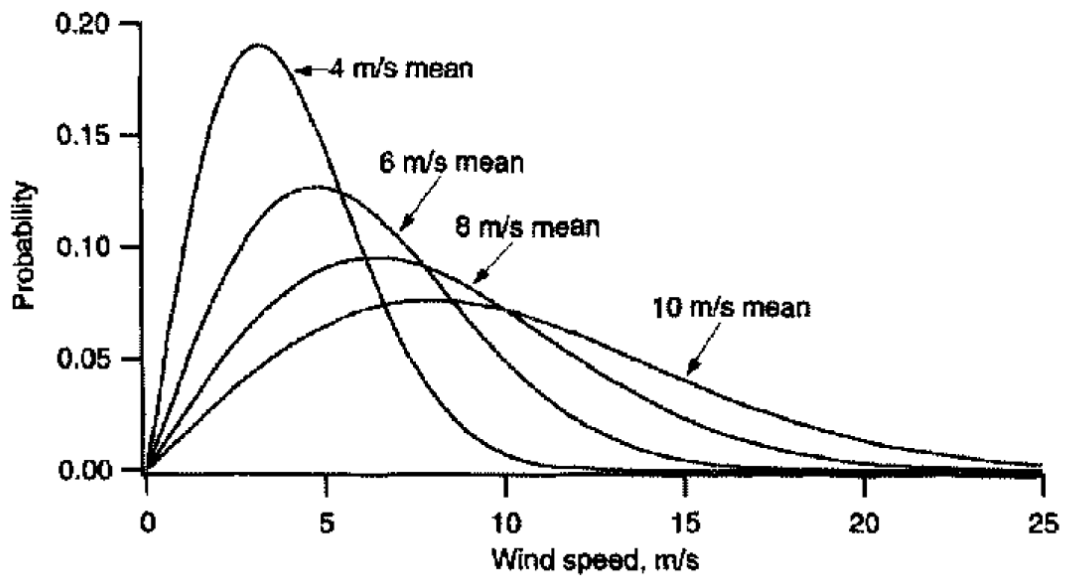
$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right\} \quad (13)$$

$$k > 0, u > 1, A > 1$$

โดยที่  $f(u)$  เป็น ฟังก์ชันความหนาแน่นของการกระจาย

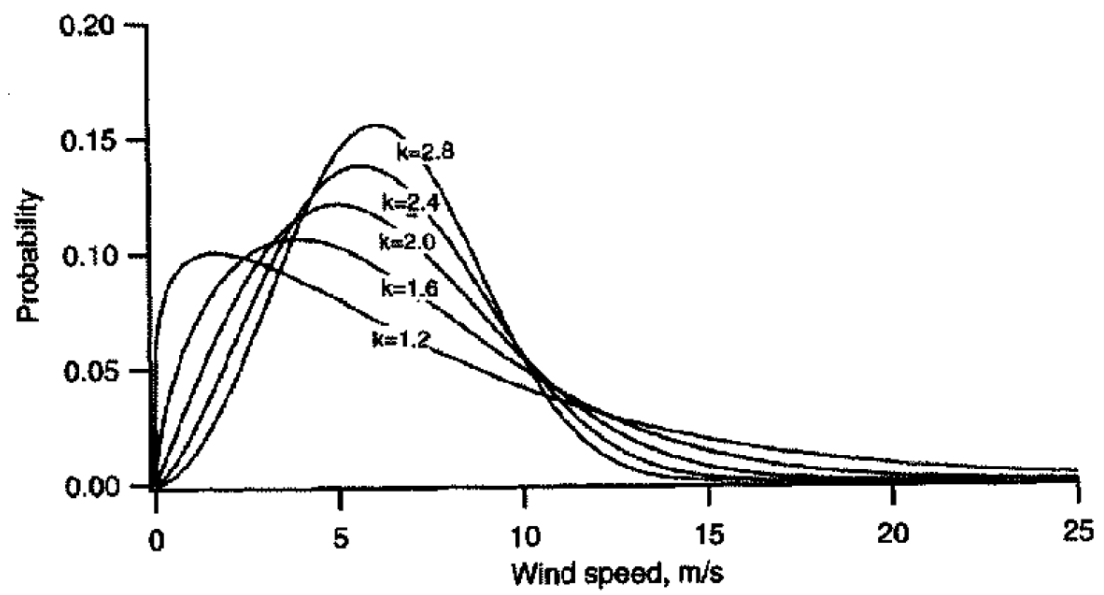
$k$  เป็น Weibull's shape parameter

$A$  เป็น Weibull's scale parameter

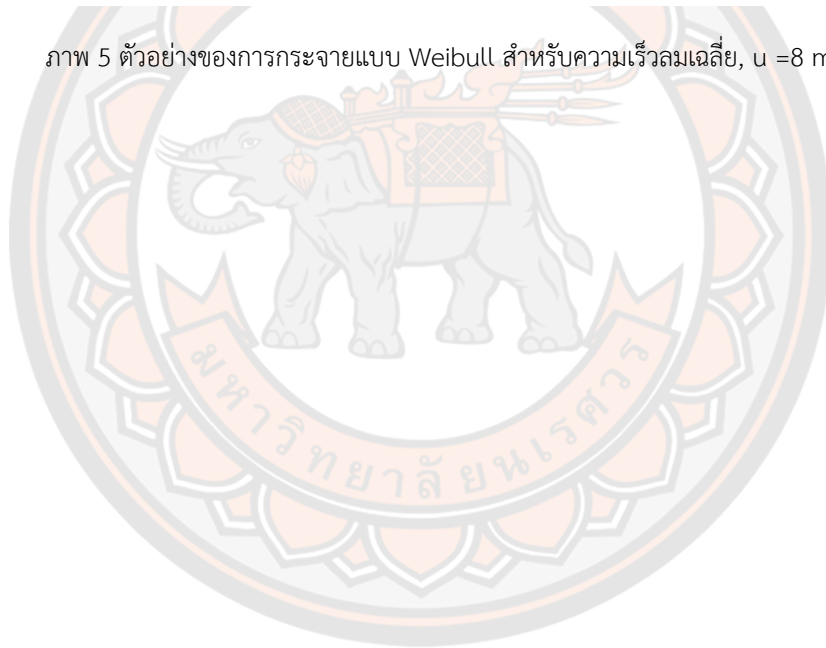


ภาพ 4 ตัวอย่างของการกระจายแบบ Rayleigh [6]





ภาพ 5 ตัวอย่างของการกระจายแบบ Weibull สำหรับความเร็วลมเฉลี่ย,  $u = 8$  m/s [6]



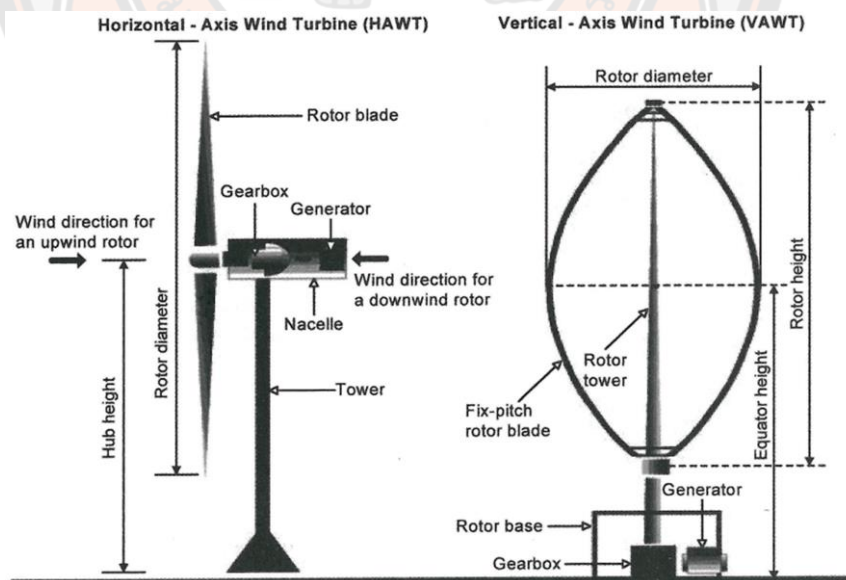
## กังหันลม

ประเภทของกังหันลม

กังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า โดยทั่วไปกังหันลมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามแกนหมุนของกังหันลม ได้แก่ กังหันลมแกนหมุนแนวตั้งและกังหันลมแกนหมุนแนวนอนซึ่งทั้งสองชนิดจะประกอบด้วยอุปกรณ์ในการทำงานผลิตไฟฟ้าที่คล้ายกัน เช่น ชุดใบพัดชุดห้องเกียร์ทดกำลัง ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และชุดเสาโดยจะมีความแตกต่างกันตรงการวางชุดแกนหมุนใบพัด

กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง (Vertical axis wind turbine, VAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ ซึ่งทำให้สามารถรับลมในแนวราบได้ทุกทิศทาง มีเพียง 2 แบบ คือ กังหันลม แดร์เรียส (Darrieus) ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในประเทศฝรั่งเศส และกังหัน ลมซาโวเนียส (Savonius) ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในประเทศฟินแลนด์ ซึ่งการ พัฒนาจึงอยู่ในวงจำกัดและมีความไม่ต่อเนื่องปัจจุบันมีการใช้งานกังหันลมแบบแกนตั้งน้อย

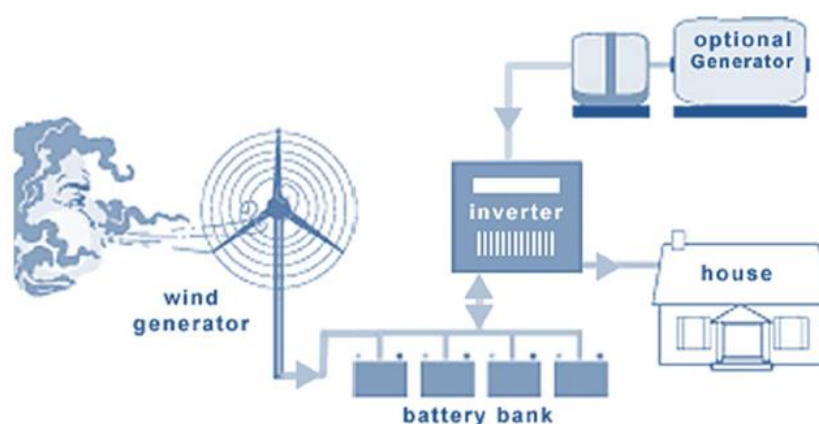
กังหันลมแกนหมุนแนวนอน (Horizontal axis wind turbine, HAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของลมโดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉาก รับแรงลม ทำหน้าที่รับแรงลมที่เคลื่อนตัวมากระทบทำให้เกิดการหมุนของใบพัดโดยกังหันลมชนิดแกนหมุนแนวนอนแบบสามใบพัดซึ่งมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องเป็นกังหันลมที่ได้รับความนิยมใช้งานในเชิงพาณิชย์มากที่สุด



ภาพ 6 กังหันลมแกนหมุนแนวนอน กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง [5]

รูปแบบของระบบการติดตั้งใช้งานกังหันลมผลิตไฟฟ้า แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ระบบการติดตั้งแบบเดี่ยว (Stand Alone System) และระบบการติดตั้งแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง (Grid Connected System) โดยระบบการเชื่อมต่อทั้งสองแบบ จะมีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน รวมทั้งยังมีข้อจำกัดและปัจจัยอื่นๆ อีกหลายประการในการพิจารณา ดังนั้นก่อนการตัดสินใจ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาอย่างรอบคอบในการเลือกระบบของการติดตั้งให้เหมาะสม [5]

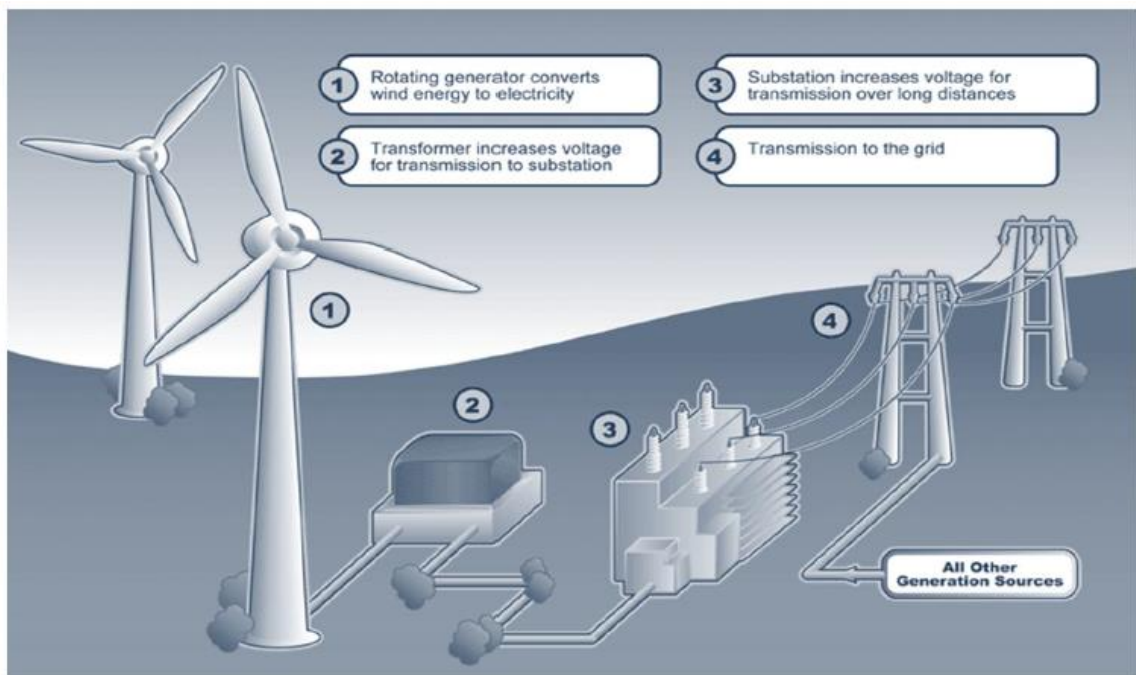
1. ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเดี่ยว ระบบนี้เหมาะสำหรับการติดตั้งใช้งานในที่ที่ห่างไกลชุมชนหรือพื้นที่ที่ห่างไกลจากสายส่งหลัก เช่น บนเกาะหรือชนบทห่างไกลที่ระบบสายส่ง เข้าไปไม่ถึง และไม่คุ้มค่ากับการติดตั้งระบบสายส่งเข้าไปสู่พื้นที่ที่ต้องการใช้งานโดยในระบบ การติดตั้งแบบเดี่ยวนั้นจะต้องใช้ชุดเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับเป็นที่เก็บพลังงาน (Battery Bank) ซึ่งอาจเป็นระบบการผลิตไฟฟ้าแรงดันตั้งแต่ 12-48 โวลต์ แล้วเก็บพลังงานที่ได้เข้า ชุดแบตเตอรี่โดยจะต้องทำงานที่สัมพันธ์กันกับระบบควบคุมการทำงานของกังหันลม (Wind Turbine Controller) อย่างเหมาะสมเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้เป็นไป ตามความต้องการที่ความเร็วลมต่างกันออกไป นอกจากนี้ระบบควบคุมการทำงานของกังหัน ลมยังมีระบบป้องกันตัวเอง (Self-Protection) ซึ่งอาจจะมีการทำงานคู่กันระหว่างระบบ ทางกลและระบบทางไฟฟ้าเพื่อไม่ให้ความเร็วลมของกังหันลมมากเกินไปกว่าที่ออกแบบไว้ การใช้ไฟฟ้าในระบบงานแบบเดี่ยวนี้อาจใช้ได้ทั้งระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) โดยในกรณีที่ต้องการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ จำเป็นจะต้องมี Inverter เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC/AC) โดยที่ Inverter และ แบตเตอรี่ในแต่ละรุ่นจะมีคุณลักษณะและการทำงานที่แตกต่างกัน ดังนั้นจำเป็นต้องมีการ คำนวณภาระทางไฟฟ้าที่จะใช้งานเพื่อการคัดเลือก Inverter ให้เหมาะสมเช่นกัน



ภาพ 7 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเดี่ยว [5]

2. ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง การติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในระบบนี้ส่วนใหญ่เป็นการติดตั้งใช้งานในกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งจะทำการเชื่อมต่อ กับระบบ

สายส่งไฟฟ้าโดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องมีชุดเก็บพลังงานหรือแบตเตอรี่ (Battery Bank) โดยชุดแปลงไฟฟ้า (Inverter) ของระบบนี้จะมีราคาสูงกว่าชุดแปลงไฟฟ้า ทั่วไป เนื่องจากมีระบบควบคุมที่ซับซ้อนและต้องสามารถเชื่อมต่อเข้าระบบสายส่งได้ (Grid Tie Transfer) นอกจากนั้นชุดแปลงไฟฟ้าของระบบนี้ยังมีหน้าที่สำคัญที่จะต้อง ควบคุมแรงดันหรือความถี่ทางไฟฟ้าให้เหมาะสมและสามารถป้องกันกระแสไฟฟ้าขนานไปกับ ไฟฟ้าจากสายส่งหลักได้

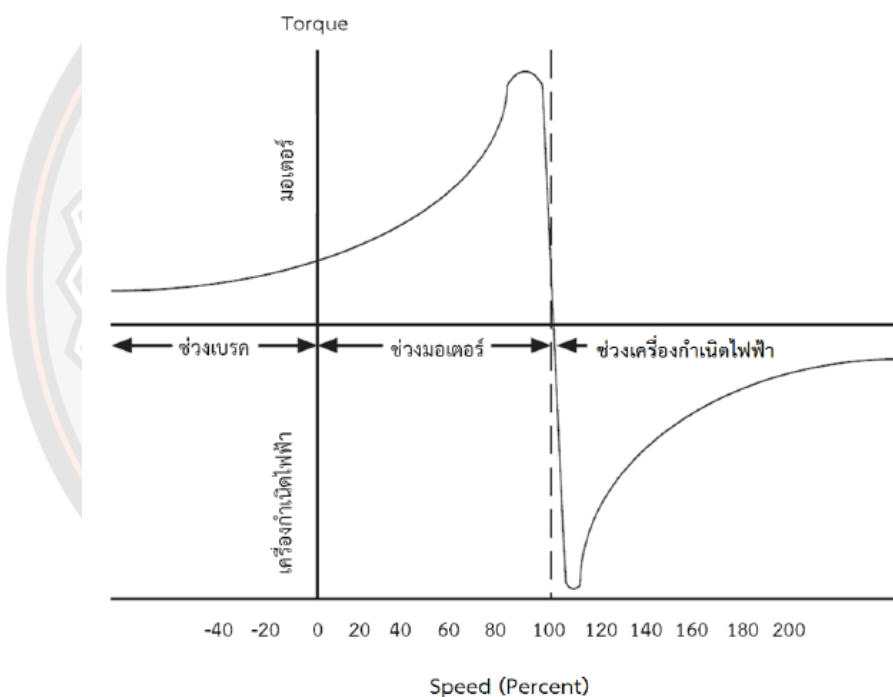


ภาพ 8 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง [5]

### เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอะซิงโครนัส (Asynchronous generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นที่รู้จักกันว่า เครื่องกำเนิดแบบอะซิงโครนัส. เครื่องเหนี่ยวนำบางครั้งใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เริ่มแรกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเครื่องจะเริ่มต้นเป็นมอเตอร์ ในช่วงเริ่มต้นเครื่องจะดึงโวลต์แอมเพอร์ที่มีปฏิกิริยาล้าหลังจากแหล่งจ่าย ความเร็วของเครื่องเพิ่มขึ้นสูงกว่าความเร็วแบบซิงโครนัส ความเร็วจะเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกับสนามหมุนที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์

เครื่องเหนี่ยวนำจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและจะเริ่มผลิตแรงบิดที่สร้างขึ้น แรงบิดที่สร้างขึ้นจะตรงข้ามกับทิศทางของการหมุนของโรเตอร์ ที่เงื่อนไขนี้สลิปเป็นลบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเริ่มส่งพลังงานไปยังแหล่งจ่ายไฟ



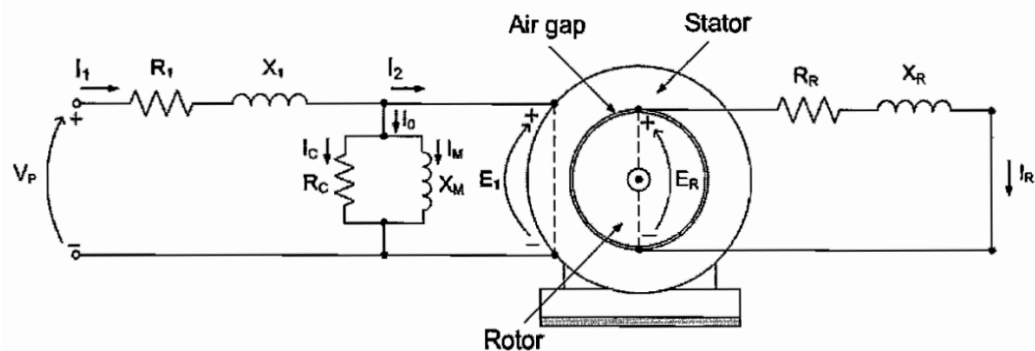
ภาพ 9 คุณสมบัติของ Induction Machines ในโหมดการทำงานต่างๆ

ผลลัพธ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

- ขนาดของสลิป
- ความเร็วของโรเตอร์หรือความเร็วของมอเตอร์ขับเคลื่อนเหนือความเร็วซิงโครนัสในทิศทางเดียวกัน
- การหมุนของมอเตอร์เมื่อทำงานเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่ได้ขับเคลื่อนด้วยตนเองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำเป็นต้องกระตุ้นสเตเตอร์หรือโรเตอร์ ด้วยแหล่งกำเนิดภายนอกเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน คือที่แรงดันไฟฟ้าและความถี่และเครื่องทำให้ทำงานเหนือความเร็วแบบซิงโครนัส เนื่องจากความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นแตกต่างจากความเร็วแบบซิงโครนัสจึงเป็นที่รู้จักในฐานะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอะซิงโครนัส

วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอะซิงโครนัส



ภาพ 10 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอะซิงโครนัส

ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (14)$$

$f_e$  = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า (Hz)

$n_m$  = ความเร็วทางกลของโรเตอร์, รอบต่อวินาที (rpm)

$P$  = จำนวนขั้ว

แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ  $E_A$

$$E_A = 4.44 N_c \Phi f_e \quad (15)$$

$E_A$  = แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (V)

$N_c$  = จำนวนรอบการพันขดลวด (turn)

$\Phi$  = ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็ก (Wb)

โดยทั่วไปขนาดของ permanent magnet asynchronous generators ถูกกำหนดเป็น  $D^2L$  โดยที่  $L$  = ความยาวแกน และ  $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาดส่วนใหญ่ถูกกำหนดโดยการไหลของไฟฟ้าเฉพาะ (ac) และไหลแม่เหล็กเฉพาะ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยสมการต่อไปนี้ [7]

$$D^2L = \frac{S}{1.11\pi^2 B_g a c k_w n_s 10^{-3}} \quad (16)$$

S = Apparent power (KVA)

P = Output power (KW)

$K_w$  = Winding factor

$n_s$  = Rotation per second (rpm)

$\cos\phi$  = Power factor

สำหรับเครื่องจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก ค่าไฟฟ้ากระแสสลับจะอยู่ในช่วง 10,000 – 40,000 A/m ค่าไฟฟ้ากระแสสลับสูงส่งผลให้สูญเสียทองแดงมากขึ้น สำหรับ PMSG ความเร็วต่ำ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าเพื่อรองรับจำนวนเสาที่เพิ่มขึ้น ค่าเริ่มต้นทั้งหมดของสมการข้างต้นคือ P (75% eff) = 160 W,  $n_s = 6.25$  rpm,  $B_g = 0.9$  T,  $a c = 16,000$  A / m และ  $\cos\phi = 0.85$

ทางเลือกของจำนวนช่องและเสานั้นได้มาจากการอ้างอิงจำนวนหนึ่งที่มีการรวมช่องและเสาที่เป็นไปได้หลายอย่าง [7] การเลือกข้อจะขึ้นอยู่กับความถี่ในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องการ  $f = 50$  Hz ที่ความเร็ว 375 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$N_p = \frac{120f}{n} \quad (17)$$

$N_p$  = Pole number

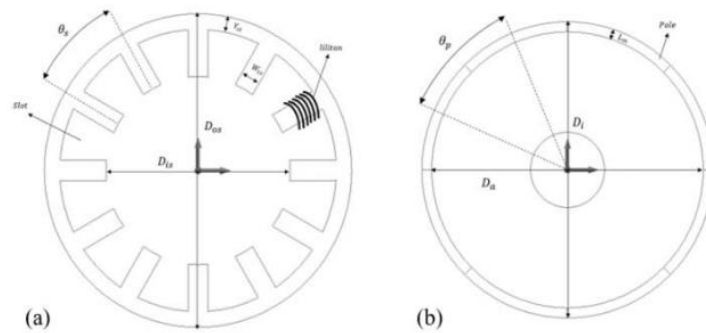
$N_s$  = Slot number

$f$  = Frequency (Hz)

$n$  = Rotation speed(rpm)

ขนาดสเตเตอร์และโรเตอร์

ขนาดของสเตเตอร์และโรเตอร์สัมพันธ์กันเพื่อให้ทำการคำนวณพร้อมกัน ขนาดของสเตเตอร์และโรเตอร์อ้างอิงจากรูปที่ 15 [7]



ภาพ 11 (a) โครงสแตเตอร์ (b) โครงโรเตอร์

แต่ส่วนของสแตเตอร์และแกนโรเตอร์สามารถคำนวณได้ด้วยสมการต่อไปนี้ [7]

1. Degree of slot,  $\theta_s$

$$\theta_s = \frac{(2.\pi)}{N_s} \quad (18)$$

2. Degree of pole,  $\theta_p$

$$\theta_p = \frac{(2.\pi)}{N_p} \quad (19)$$

3. Effective core length,  $L_i$ (m)

$$L_i = L \cdot K_{stack} \quad (20)$$

4. Stator pole pitch,  $\tau_r$  (m)

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{N_p} \quad (21)$$

5. Rotor pole pitch,  $\tau_p$  (m)

$$\tau_r = \tau_p \cdot 0,75 \quad (22)$$

6. Rotor pole area,  $A_{pr}$  (m<sup>2</sup>)

$$A_{pr} = \tau_r \cdot L_i \quad (23)$$

7. stator teeth width,  $W_{ts}$  (m)

$$W_{ts} = \frac{N_p \cdot B_g \cdot A_{pr}}{N_s \cdot L_i \cdot B_{ts}} \quad (24)$$



8. Magnetic flux value,  $\Phi$  (Wb)

$$\Phi = B_g \cdot S_m \quad (25)$$

9. Rotor diameter,  $D_r$

$$D_r = D - 2 \cdot l_g \quad (26)$$

การคำนวณทางคณิตศาสตร์ของขดลวดสเตเตอร์ประกอบด้วยจำนวนรอบและขนาดของรูสลิตในแกนสเตเตอร์เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุต 26 โวลต์ สามารถคำนวณได้ด้วยสมการต่อไปนี้

Number of turn each stator teeth,  $n_c$

$$n_c = \frac{E_{ph}}{4,44 \cdot f \cdot K_w \cdot \phi \cdot \frac{N_s}{N_\phi}} \quad (27)$$

$E_{ph}$  = Induction interphase voltage (volt)

$n_c$  = Number of turn each stator teeth

$f$  = Generator frequency (Hz)

$K_w$  = Winding factor

$N_s$  = Number of slots

$N_\phi$  = Number of phases

$\phi$  = Flux magnetic in airgap (Wb)

ฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux) คือปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กหรือจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งจากขั้วหนึ่งไปยังขั้วหนึ่ง ของแท่งแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (Weber, Wb) สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\phi = B_m A \quad (28)$$

$\phi$  = ฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb)

$B_m$  = ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

$A$  = พื้นที่ที่ตัดตั้งฉาก ( $m^2$ )

แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้านเกิดจากการที่ขดลวดตัวนำหมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$E_b = k_1 \Phi N \quad (29)$$

$E_b$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้าน (volt)

$k_1$  = ค่าคงที่ของเครื่องกำเนิด

$N$  = จำนวนรอบ (rpm)

แทนค่าฟลักซ์แม่เหล็กใน (29) จะได้

$$E_b = k_1 B_m A N \quad (30)$$

แรงบิด (torque) โมเมนต์แรงที่กระทำให้เกิดการหมุนหรือ การบิดรอบแกนหนึ่ง สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$T = \frac{9.55 E_b I_a}{N} \quad (31)$$

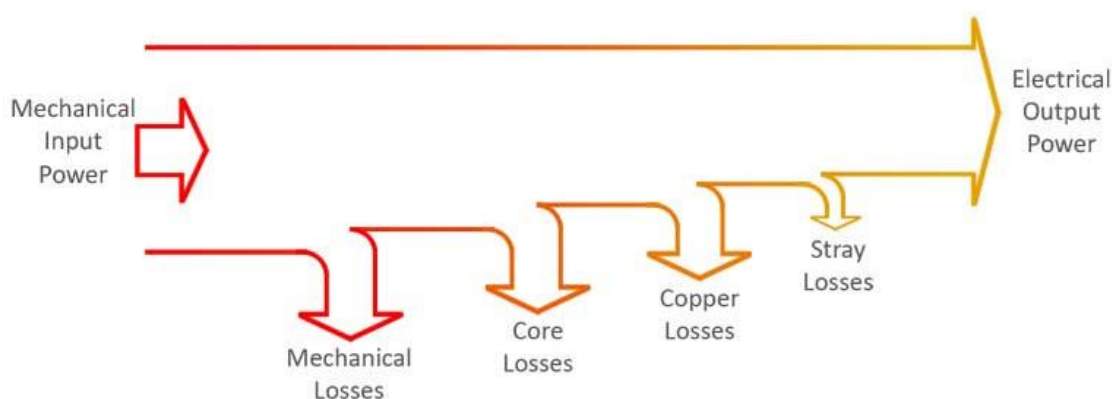
$T$  = แรงบิด (N.m)

$I_a$  = กระแสอาร์เมเจอร์

แทนค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้านใน (31) จะได้

$$T = \frac{9.55 k_1 B_m A N I_a}{N} \quad (32)$$

กำลังสูญเสียรวมของเครื่องกำเนิด ประกอบด้วย 3 ส่วน แสดงดังภาพที่ 12 ส่วนที่ 1 การสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Losses) เป็นกำลังสูญเสียในรูปของความร้อน เนื่องจากกระแสไหลผ่านค่าความต้านทานของขดลวดทองแดง การสูญเสียนี้จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับกระแสไหลผ่านขดลวดยกกำลังสองและค่าความต้านทานของขดลวด ส่วนที่ 2 การสูญเสียทางแกนเหล็ก (Core Losses) การสูญเสียส่วนใหญ่เกิดขึ้น ในแกนเหล็กอาร์เมเจอร์เมื่ออาร์เมเจอร์หมุนแกนเหล็กจะเคลื่อนผ่านขั้วเหนือแลฟขั้วใต้ของขั้วแม่เหล็ก ทำให้สนามแม่เหล็กที่ผ่านแกนเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิสและกระแสไหลวน และส่วนที่ 3 การสูญเสียทางกล (Mechanical Losses) ประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากการเสียดสีหรือความฝืด (Friction Loss) ของตลับลูกปืนและบริเวณแปลงถ่านกับคอมมิวเตเตอร์ และการสูญเสียเนื่องจากแรงต้านลม คือการสูญเสียที่เกิดจากการหมุนปะทะลมของตัวอาร์เมเจอร์และใบพัดสำหรับระบายความร้อน การสูญเสียสเตรย์ (Stray losses) คือผลรวมของการสูญเสียทางแม่เหล็กและการสูญเสียทางกล เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การสูญเสียเนื่องจากการหมุน (rotational losses) โดยปกติจะมีค่าคงที่



ภาพ 12 การสูญเสียและกำลังในส่วนต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

## แม่เหล็กถาวร

แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) คือ แม่เหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กตลอดไป ถ้าได้รับอำนาจแม่เหล็กด้วยวิธีที่ถูกต้อง ซึ่งแม่เหล็กถาวรนี้จะทำมาจากโลหะแข็งผสมเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ เหล็กผสมนิเกิล และโคบอลต์ผสมนิเกิลและอลูมิเนียม เป็นต้น

### 1. แม่เหล็กถาวรชนิดเซรามิก หรือเฟอร์ไรต์ (Ceramic Magnet or Ferrite Magnet)

ในปี 1952 แม่เหล็กถูกสร้างขึ้นจากเซรามิกเป็นครั้งแรก ด้วยการผลิตแม่เหล็กจาก เซรามิก วิศวกรจึงสามารถสร้างแม่เหล็กให้เป็นรูปทรงใดก็ได้ตามต้องการ การทำแม่เหล็กเซรามิกจาก ส่วนผสมที่สร้างขึ้นอย่างประณีต สามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่ทรงพลังกว่าที่เป็นธรรมชาติได้ แม่เหล็กเซรามิกมีราคาถูกกว่าและมีประสิทธิภาพมากกว่าและได้รับความนิยมอย่างรวดเร็ว แม่เหล็ก เซรามิก เรียกอีกอย่างว่าแม่เหล็กเซรามิกแข็งหรือแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ พวกเขาทำจากสตรอนเทียมหรือ แบเรียมเฟอร์ไรต์

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของแม่เหล็กถาวรชนิดเซรามิก หรือเฟอร์ไรต์ มี ดังต่อไปนี้

#### ข้อดี

- อนุกรมการทำงานสูงปานกลาง - ความต้านทานสูงเป็นพิเศษต่อการถูกล้างอำนาจแม่เหล็ก
- ราคาถูก

#### ข้อด้อย

- แรงแม่เหล็กค่อนข้างต่ำ

### 2. แม่เหล็กถาวรชนิดซามาเรียมโคบอลต์ (Samarium Cobalt Magnet, SmCo Magnet)

แม่เหล็กถาวรชนิดโคบอลต์ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการใช้งานสำหรับอุตสาหกรรม การทหาร การบินและอวกาศ ทางทะเล และยานยนต์ แม่เหล็กชนิดซามาเรียมโคบอลต์ มีความ ทนทานต่อการ กัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันโดยไม่จำเป็นต้องเคลือบพิเศษ ซึ่งรวมถึงความ ทนทานต่อการกัด กร่อนของน้ำเค็ม ทำให้แม่เหล็กชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้งานในทะเลและนอก ชายฝั่ง นอกจากนี้ แม่เหล็กซามาเรียมโคบอลต์ ยังคงรักษาประสิทธิภาพแม่เหล็กที่แข็งแกร่งแม้ที่ อุณหภูมิสูงถึง 350 °C

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของแม่เหล็กถาวรชนิดซามาเรียมโคบอลต์ มีดังต่อไปนี้

#### ข้อดี

- แรงแม่เหล็กระดับปานกลาง
- ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี - อุณหภูมิการทำงานสูงปานกลาง
- ความต้านทานสูงเป็นพิเศษต่อการถูกล้างอำนาจแม่เหล็ก

#### ข้อด้อย

- ราคาแพง

### 3. แม่เหล็กชนิดนีโอไดเมียม (Neodymium Magnet)

แม่เหล็กชนิดนีโอไดเมียม ค้นพบในปี 2525 โดยเจนเนอรัล มอเตอร์ส เป็นแม่เหล็ก ถาวรที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กที่สุดในเชิงพาณิชย์ ได้มาจากการพัฒนาวัสดุแม่เหล็กถาวรหายาก ของโลก เรียกว่า "ราชาแม่เหล็ก" เนื่องจากมีฟังก์ชันแม่เหล็กที่ยอดเยี่ยม แม่เหล็กชนิดนีโอไดเมียม มีธาตุหายากจำนวนมาก ได้แก่ Nd, Fe และ B ซึ่งแข็งและเปราะ ทำให้พื้นผิวถูกกัดเซาะได้ง่ายจากการ เกิดออกซิเดชัน แต่แม่เหล็กนีโอไดเมียมจึงต้องเคลือบแม่เหล็กด้วย NiCuNi เพื่อการป้องกัน ใน ปัจจุบันนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่และเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ มอเตอร์ เซนเซอร์ โทรศัพท์มือถือ และฮาร์ดไดรฟ์ของคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของแม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียม มีดังต่อไปนี้

#### ข้อดี

- แรงแม่เหล็กสูง
- ความต้านทานสูงเป็นพิเศษต่อการถูกล้างอำนาจแม่เหล็ก
- กำลังสูงเมื่อเทียบกับปริมาตร

#### ข้อด้อย

- อุณหภูมิการทำงานไม่สูงมาก
- ทนต่อการกัดกร่อนได้ไม่ดี

#### 4. แม่เหล็กชนิดอัลนิโก (Alnico Magnet)

แม่เหล็กชนิดอัลนิโก มีส่วนประกอบพื้นฐานคือ นิกเกิล, โคบอลต์, อลูมิเนียม และเหล็ก มีคุณสมบัติทนการกัดกร่อน และมีเสถียรภาพสูง มีความแข็งแต่เปราะ แต่สามารถผลิตรูปแบบที่ซับซ้อนได้ ซึ่งวัสดุดิบแม่เหล็กชนิดอื่นไม่สามารถทำได้ มีลักษณะพิเศษ คือ มีค่าพลังงานจำเพาะ และการผันแปรของอุณหภูมิแม่เหล็กต่ำ สามารถใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง ใช้กันอย่างแพร่หลายในมอเตอร์, มิเตอร์, แม่เหล็กเครื่องคัดแยก, ลำโพง, ระบบการจับยึด, ฯลฯ

โดยสรุป ข้อดีและข้อด้อยของแม่เหล็กถาวรชนิดอัลนิโก มีดังต่อไปนี้

##### ข้อดี

- อุณหภูมิการทำงานที่สูง
- ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี
- งานใช้งานระยะยาวมีความเสถียร

##### ข้อด้อย

- ความต้านทานต่ำต่อการล้างอำนาจแม่เหล็ก
- ราคาแพง

**ตาราง 3** คุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในงานเครื่องกลไฟฟ้า

Quantity	NdFeB	SMCO	Ferrite	Alnico
Remanence, $B_r$ (T)	1.08-1.49	0.87-1.19	0.20-0.46	0.55-1.37
Intrinsic Coercivity, $H_{ci}$ (kA/m)	876-2710	1350-2400	140-405	38-151
Relative Permeability, $\mu_r$	1.0-1.1	1.0-1.1	1.05-1.2	1.3-6.2
Energy Product, $BH_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	220-430	143-251	6.4-41.8	10.7-83.6
Density, $D$ (kg/dm <sup>3</sup> )	7.4-75	8.2-8.5	4.9-5.1	6.8-7.3
Electrical resistivity (nΩm)	12-16	50-60 or 530-900	$10^7 - 10^{11}$	470-750
Curie Temperature, $T_c$ (°C)	310	720-820	450	800
Maximum Operation Temperature, $T_{max}$ (°C)	150	250-350	300	500

## วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite Element Method) เป็นกระบวนการเชิงตัวเลขเพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณ สำหรับปัญหาที่ประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบหลัก คือ สมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขขอบเขต และรูปร่างของปัญหา เนื่องจากปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ รวมทั้งศาสตร์อื่นๆ มักถูกรวมด้วยองค์ประกอบทั้ง 3 นี้ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกประยุกต์นำมาใช้แก้ปัญหาได้หลากหลายทำให้นิยมใช้กันโดยแพร่หลายก่อให้เกิดซอฟต์แวร์ตามขึ้นมาเป็นจำนวนมากเช่นกัน

แนวความคิดหลักของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ จากนั้นจึงสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ จากสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับเอลิเมนต์เหล่านั้น ก่อนนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกอย่างมารวมกัน เพื่อก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตลงบนระบบสมการใหญ่เพื่อแก้ปัญหาผลลัพธ์

### วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับงานวิเคราะห์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) คือ การจำลองที่หลากหลายของปรากฏการณ์ทางกายภาพที่กำหนดโดยใช้เทคนิคตัวเลข วิศวกรหลายคนใช้มันเพื่อลดจำนวนของต้นแบบและการทดลองทางกายภาพและวิเคราะห์ส่วนประกอบในขั้นตอนการออกแบบเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้น

การกำหนดการแก้ปัญหาโดยประมาณโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดเมนหรือพื้นที่พื้นผิวของรูปทรงเรขาคณิตของมอเตอร์บนระนาบ x-y จะถูกตรวจสอบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับคาร์ทีเซียน 2 มิติเชิงเส้นสามารถแสดงได้ในสมการเชิงอนุพันธ์ลำดับที่สอง [11] เป็น:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - i\omega\sigma A = -J_0 \quad (33)$$

โดยที่  $A$  คือ เวกเตอร์แม่เหล็ก,  $\mu$  คือ การซึมซาบของแม่เหล็ก,  $\sigma$  คือ การนำไฟฟ้า,  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม,  $J_0$  คือ ความหนาแน่นกระแสจากแหล่งจ่ายไฟภายนอก และ  $i$  คือ ส่วนจินตภาพ

### ประโยชน์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปัจจุบันวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปใช้วิเคราะห์งานหลากหลายชนิดเป็นจำนวนมากจนกลายเป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับกันทั่วโลก ส่งผลให้ซอฟต์แวร์ที่จำหน่ายกันในราคาสูง ซึ่งงานต่าง ๆ ที่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์ได้ ประกอบไปด้วย

1. วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถยนต์ เครื่องบิน รถไฟ เรือ อาคารสูง สะพาน ไปถึงงานขนาดเล็ก เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ มอเตอร์ แก้ว วัสดุ และภาชนะต่าง ๆ
2. การวิเคราะห์การสั่นไหวของเสาไฟฟ้าแรงสูงและป้ายทางด่วนจากแรงลม การยุบตัวของโครงสร้างรถยนต์ขณะเกิดการชน ความเค้นจากอุณหภูมิสูงของกังหันใบพัดเทอร์ไบน์
3. การวิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านบ้านและอาคารในเมืองขนาดใหญ่ การหมุนเวียนของอากาศภายในอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน การทำนายสภาวะอากาศการเคลื่อนตัวของอากาศเย็นผ่านทวีป ทิศทางการไหลท่วมของน้ำเมื่อเกิดอุทกภัย
4. การวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับเสาส่งสัญญาณทางอากาศ ทรานซิสเตอร์ มอเตอร์ และสายไฟฟ้าแรงสูง
5. การวิเคราะห์การไหลในเส้นเลือดตามร่างกายและหัวใจ ไปจนถึงอุปกรณ์ทางการแพทย์ กระดูกข้อต่อเทียม เท้าเทียม รากฟันเทียม





## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

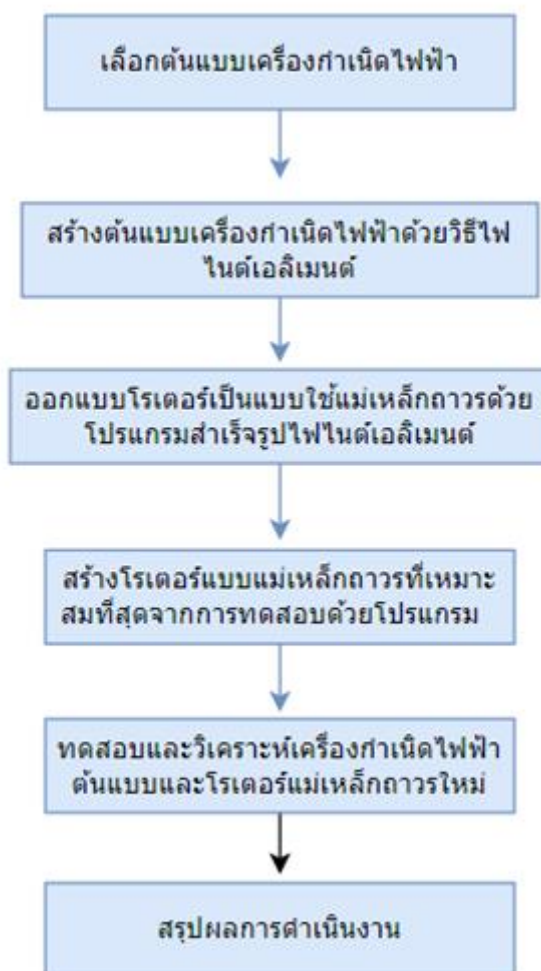
#### แผนการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินงานวิจัยโดยมีขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงานวิจัย (Research Methodology) 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 เลือกต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมกับความเร็วลมในพื้นที่เป้าหมาย

ส่วนที่ 2 ออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใหม่ โดยจะมีการเน้นการออกแบบและปรับเปลี่ยนทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเปลี่ยนมาใช้โรเตอร์เป็นแบบใช้แม่เหล็กถาวร ที่สามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาที่ถูก โดยมีโปรแกรมในการออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อให้ได้ขนาดของโรเตอร์ ขนาดแอร์แก่ภายในโรเตอร์ และการจัดวางของแม่เหล็กถาวรที่มีความเหมาะสมกับสเตเตอร์และมีประสิทธิภาพ ด้วยการออกแบบโรเตอร์โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมที่สุด

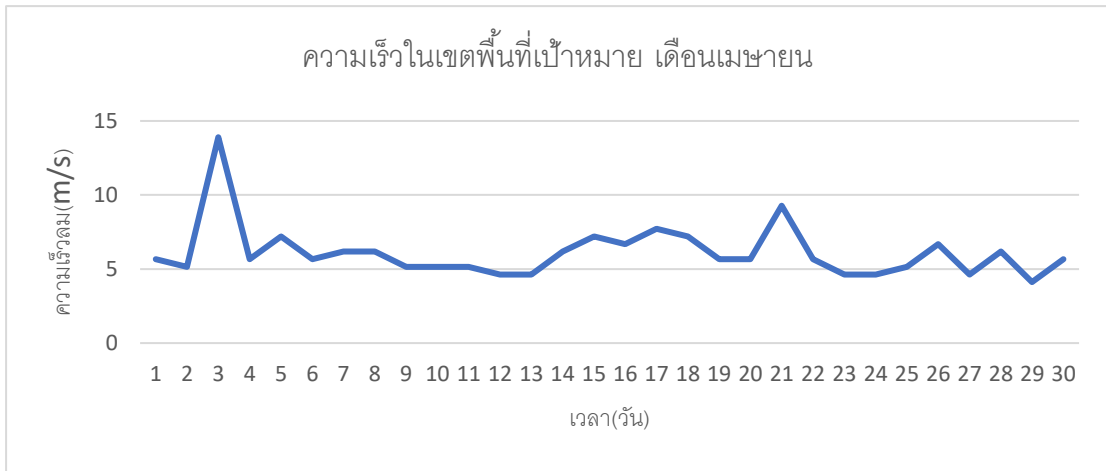
ส่วนที่ 3 ศึกษาเปรียบเทียบการทดสอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอะซิงโครนัสต้นแบบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรปรับปรุง



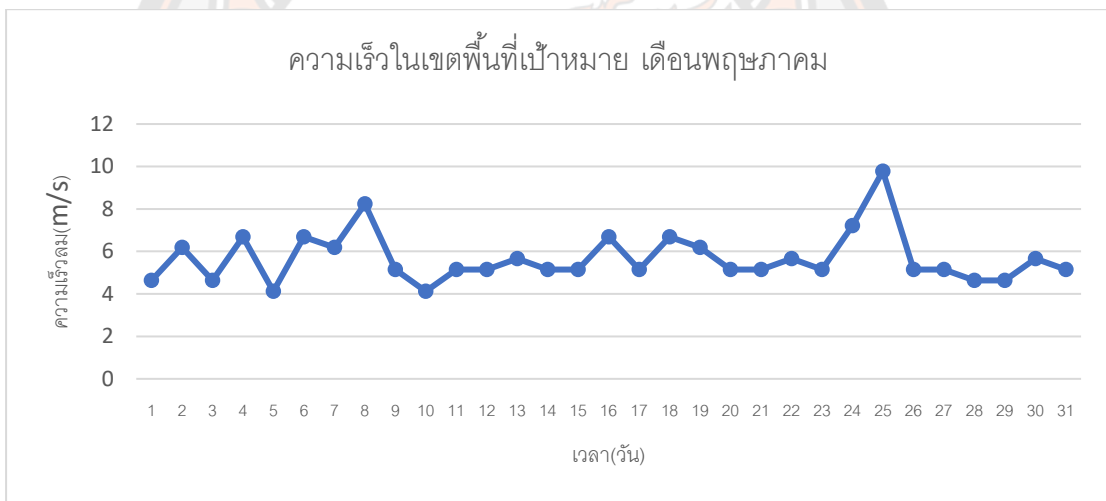
ภาพ 13 แสดงขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัยภาพ

### การศึกษาศักยภาพลมในพื้นที่เป้าหมาย

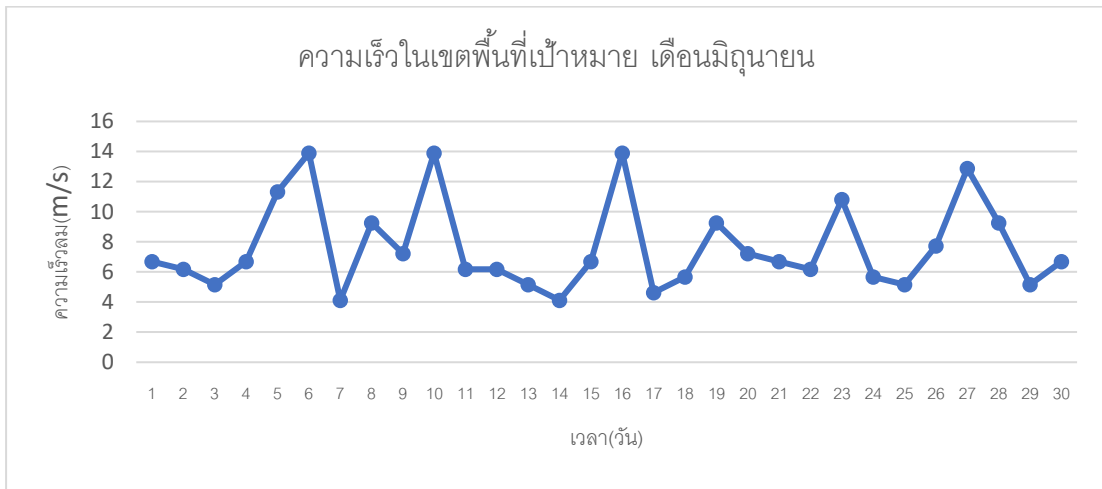
โดยการเก็บรวบรวมบันทึกค่าความเร็วลมในพื้นที่ ตลาระยะเวลา 1 ปี เพื่อศึกษาลมเบื้องต้นแต่ละประเภท โดยความเร็วลมที่ได้รวบรวม ตั้งแต่ เมษายน 2021 ถึง มีนาคม 2022 แสดงดังภาพที่ 14 ถึง ภาพที่ 25



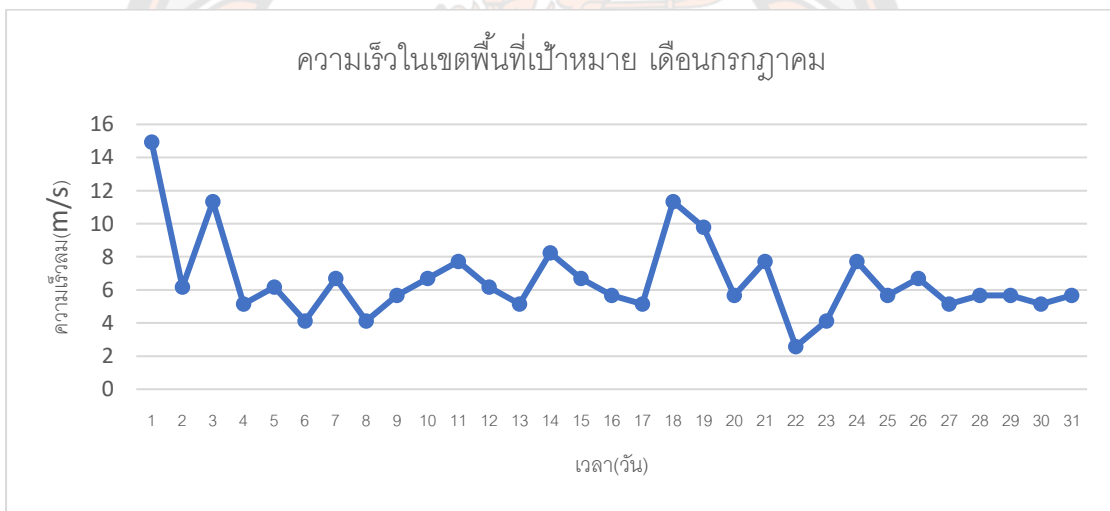
ภาพ 14 กราฟความเร็วลม เดือนเมษายน 2021



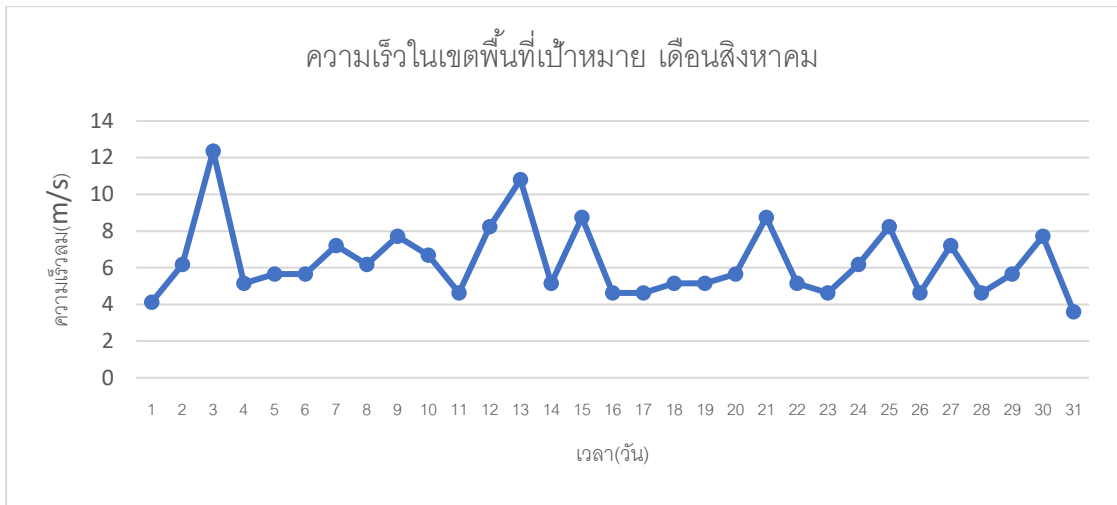
ภาพ 15 กราฟความเร็วลม เดือนพฤษภาคม 2021



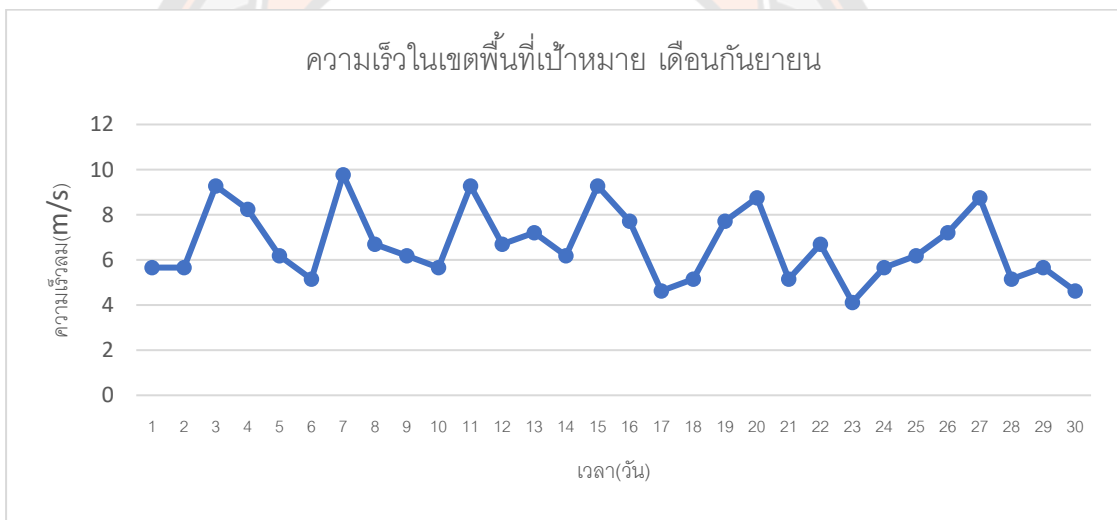
ภาพ 16 กราฟความเร็วลม เดือนมิถุนายน 2021



ภาพ 17 กราฟความเร็วลม เดือนกรกฎาคม 2021



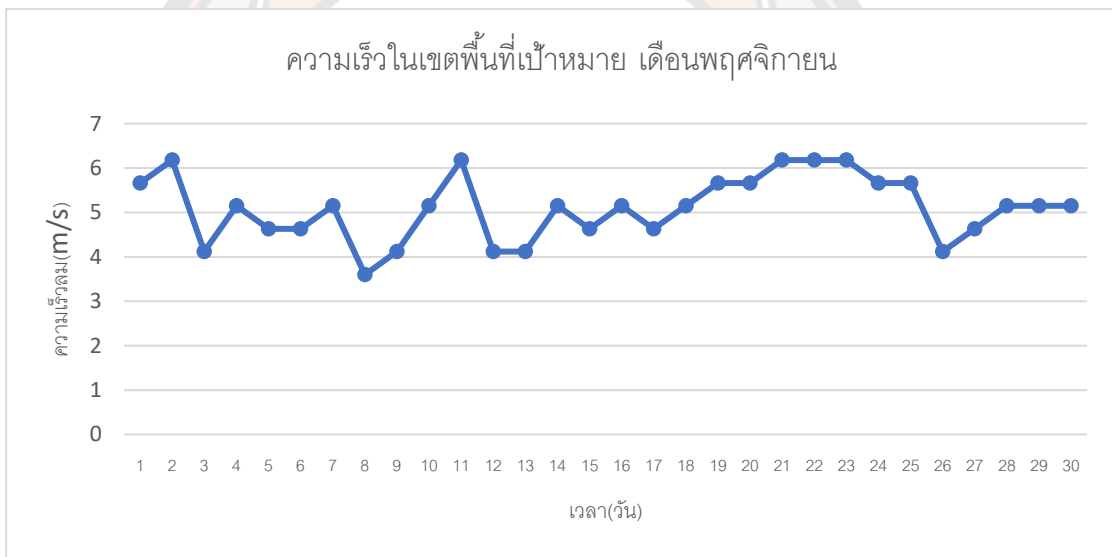
ภาพ 18 กราฟความเร็วลม เดือนสิงหาคม 2021



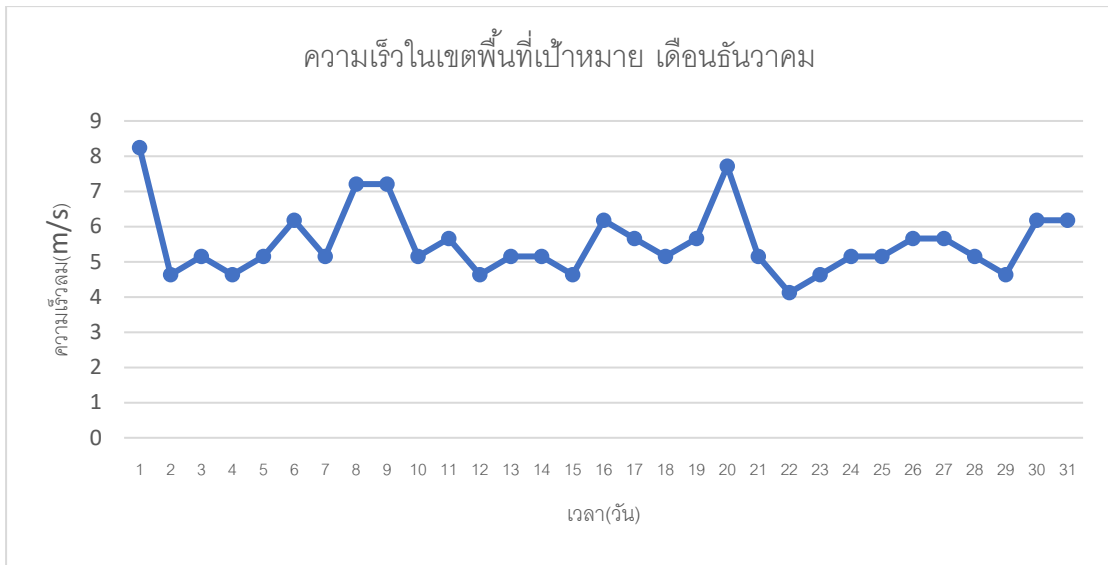
ภาพ 19 กราฟความเร็วลม เดือนกันยายน 2021



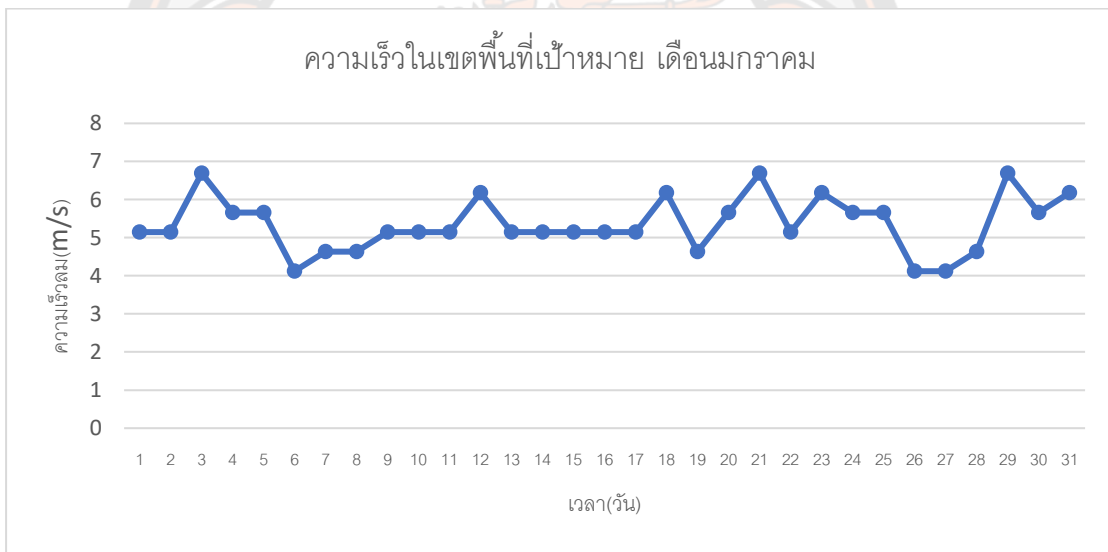
ภาพ 20 กราฟความเร็วลม เดือนตุลาคม 2021



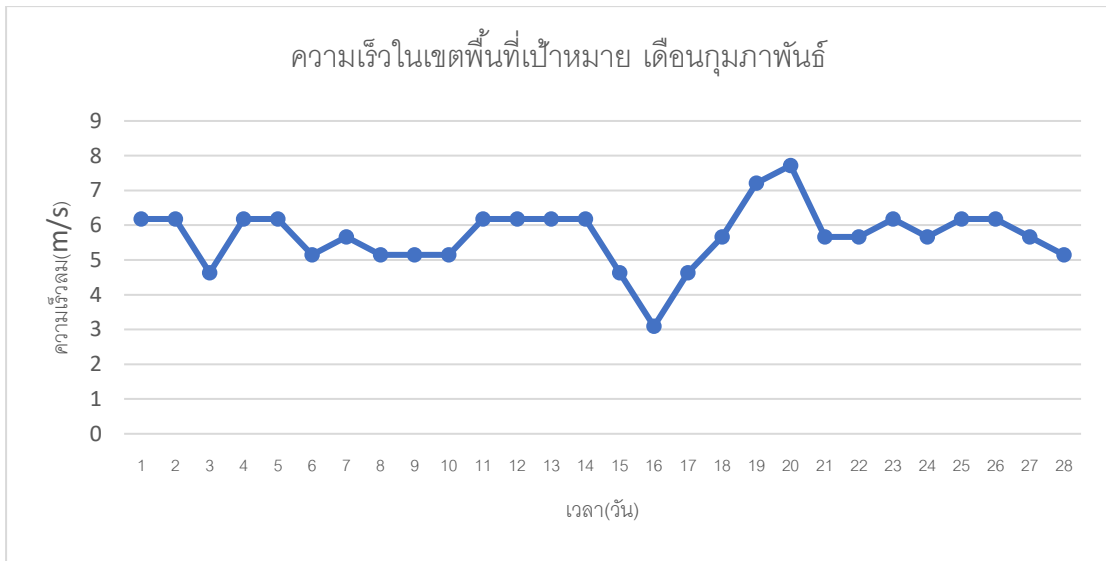
ภาพ 21 กราฟความเร็วลม เดือนพฤศจิกายน 2021



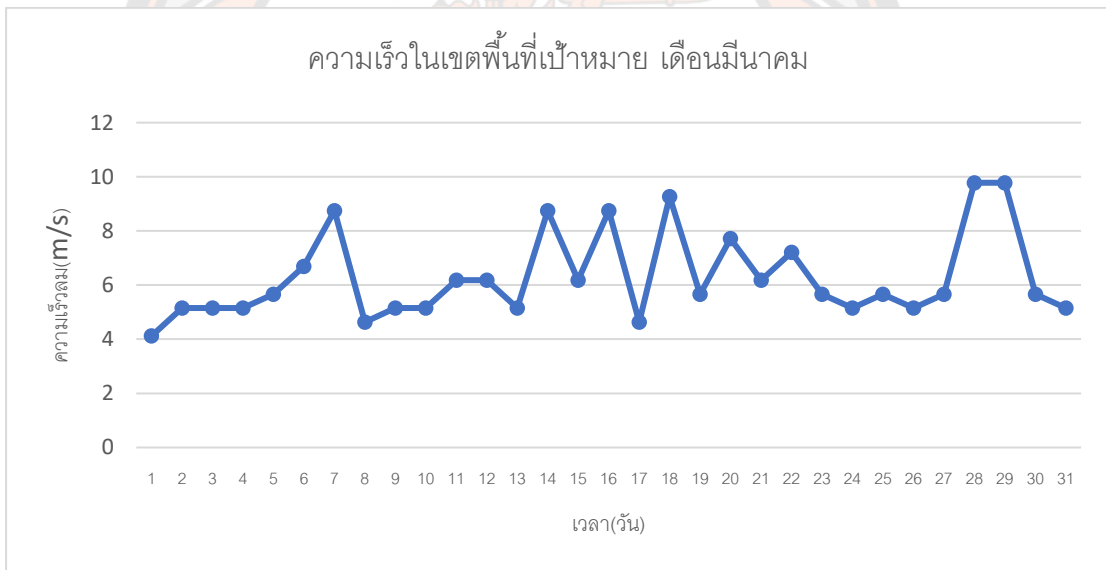
ภาพ 22 กราฟความเร็วลม เดือนธันวาคม 2021



ภาพ 23 กราฟความเร็วลม เดือนมกราคม 2022

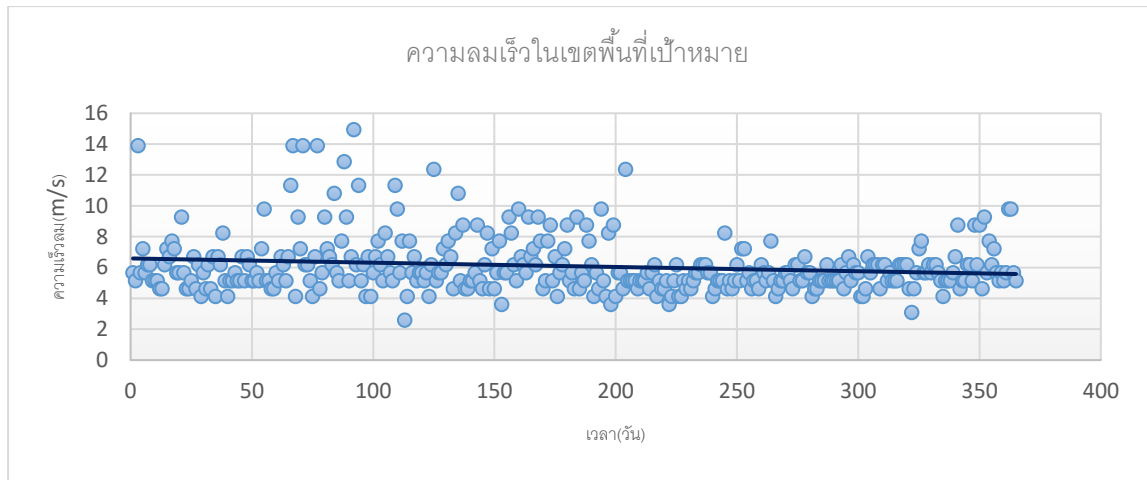


ภาพ 24 กราฟความเร็วลม เดือนกุมภาพันธ์ 2022



ภาพ 25 กราฟความเร็วลม เดือนมีนาคม 2022





ภาพ 26 กราฟความเร็วลม ตั้งแต่เดือนเมษายนถึงเดือนมีนาคม

จากกราฟความเร็วลมทั้งหมดจะสามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยลมต่อปี ได้จากสูตร

$$\begin{aligned} \text{สูตร} \quad \bar{X} &= \frac{\sum fx}{n} \\ &= \frac{2,220.37}{365} = 6.08 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (29)$$

ความเร็วลมเฉลี่ยต่อปี 6.08 m/s

จากความเร็วลมที่ 6.08 m/s นำมาใช้คำนวณประมาณหาความเร็วรอบของกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จากสูตร

จากความเร็วลมเฉลี่ยของลมทั้งหมด

$$\begin{aligned} \text{สูตร} \quad N(\text{rpm}) &= \frac{60}{2\pi \times r} \times v(\text{m/s}) \\ &= \frac{60}{2\pi \times 0.15} \times 6.08 \\ &= 387.28 \text{ rpm} \end{aligned} \quad (30)$$

จากความเร็วลมสูงสุดของลมทั้งหมด

$$\begin{aligned}
 \text{สูตร} \quad N_{(rpm)} &= \frac{60}{2\pi \times r} \times v_{(m/s)} \\
 &= \frac{60}{2\pi \times 0.15} \times 14.93 \\
 &= 950.54 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

จากการคำนวณความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกังหันลมด้วยความเร็วลมในเขตพื้นที่เป้าหมายที่ความเร็วลมเฉลี่ยของลมทั้งหมดจะมีความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ที่ 387.28 rpm และด้วยความเร็วลมสูงสุดของลมทั้งหมดจะมีความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ที่ 950.54 rpm

#### การศึกษาพารามิเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอะซิงโครนัส 3 เฟส โรเตอร์เป็นแบบขดลวด ขนาด 0.3 kVA เครื่องกำเนิดใช้แรงดันอยู่ที่ 230/400 V มีพิกัดกระแส 0.74/0.43 A ที่ความถี่ 50 Hz ความเร็วรอบ 1,500 rpm

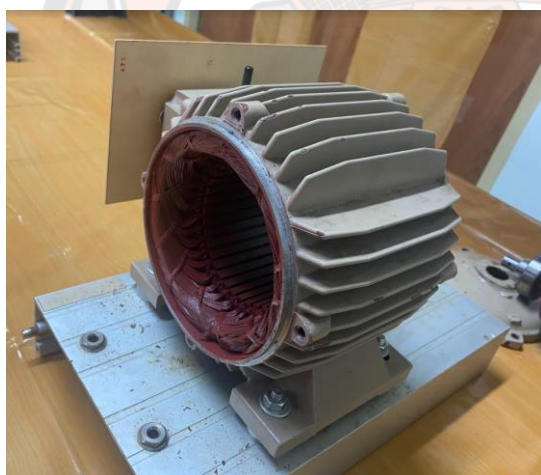


ภาพ 27 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอะซิงโครนัสต้นแบบ

ตาราง 4 แสดงรายละเอียดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	value	unit
พิกัดแรงดันไฟฟ้า	230/400	V
พิกัดกระแส	0.74/0.43	A
พิกัดกำลังไฟฟ้า	0.3	kVA
ความถี่	50	Hz
Power Factor	Cos 0.8	
ความเร็วรอบ	1,500	rpm

ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 28 ประกอบด้วย ส่วนโรเตอร์ที่มีอาร์เมเจอร์ จำนวน 24 ร่อง สเตเตอร์มีการพันขดลวด จำนวน 36 ร่อง และฝาครอบ



(ก)



(ข)

ภาพ 28 แสดงสเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อ (ก) สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(ข) โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

### พารามิเตอร์โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ

การหาค่าพารามิเตอร์ของโรเตอร์โดยการถอดชิ้นส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นพิจารณาในส่วนของโรเตอร์ แสดงดังภาพที่ 29 โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้แสดงตารางที่ 5



ภาพ 29 ส่วนประกอบของโรเตอร์

ตาราง 5 พารามิเตอร์โรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ

พารามิเตอร์	value	unit
จำนวนสล็อตโรเตอร์	24	Slots
ขนาดขดลวด	0.4	mm
ความยาวโรเตอร์	60	mm
ความกว้างโรเตอร์	88	mm
ความกว้างเพลลา	25	mm
ความยาวเพลลา	217	mm

### พารามิเตอร์สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ

การหาค่าพารามิเตอร์ของสเตเตอร์โดยการวัดชิ้นส่วนเครื่องกำเนิด จากนั้นพิจารณานส่วน  
ของสเตเตอร์แสดงดังภาพที่ 30 ได้แก่ โครงสเตเตอร์และขดลวดทองแดง โดยค่าพารามิเตอร์ที่แสดง  
ตารางที่ 6



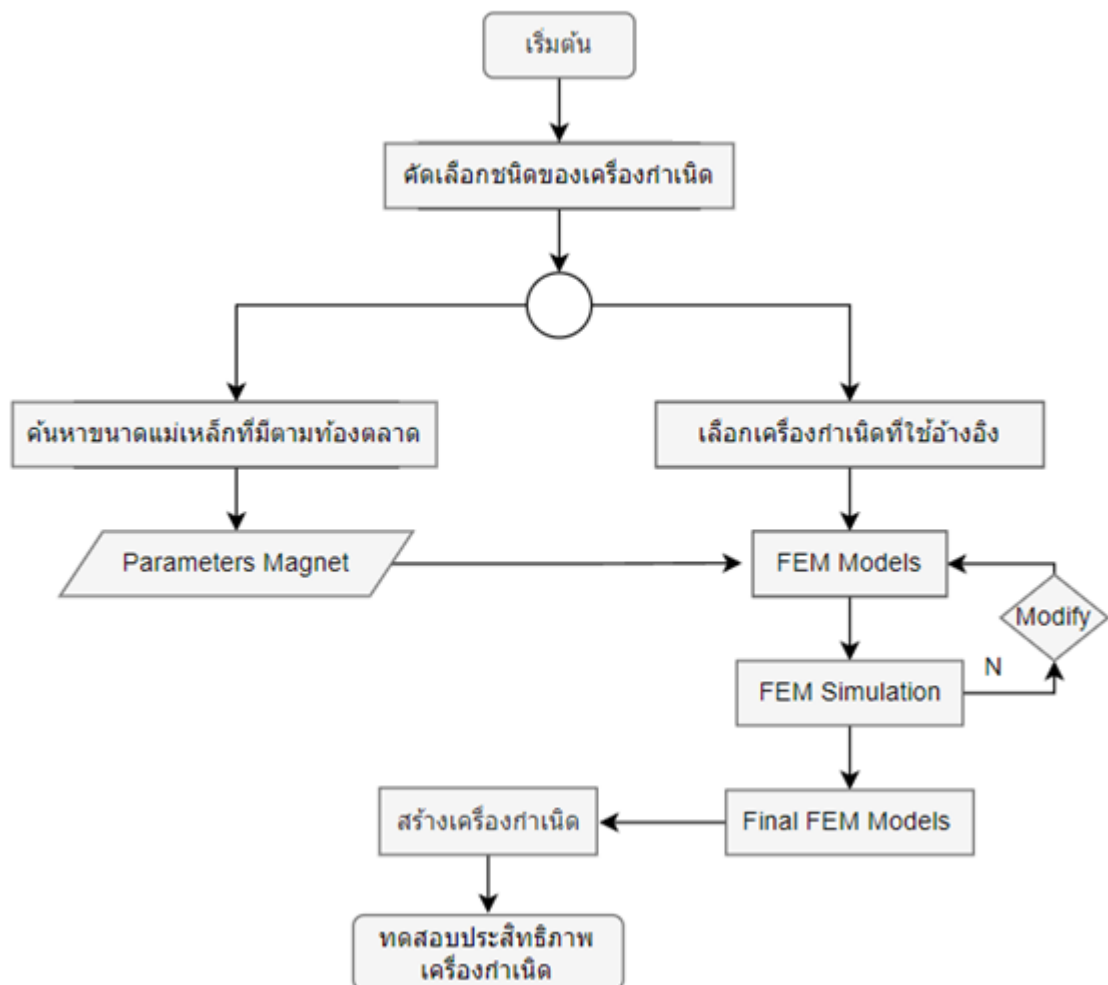
ภาพ 30 ส่วนประกอบของสเตเตอร์

ตาราง 6 พารามิเตอร์สเตเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ

พารามิเตอร์	value	unit
จำนวนสล็อตstator	36	Slots
ขนาดขดลวด	0.4	mm
จำนวนขดลวด	50	Slots per slot
ความยาวสเตเตอร์	60	mm
ความกว้างสเตเตอร์	134	mm

## วิธีดำเนินการวิจัย

เริ่มด้วยการสำรวจพื้นที่เป้าหมายและทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับลมในพื้นที่เป้าหมาย จากนั้นเริ่มทำการประเมินขนาดของพื้นที่ที่เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน การเข้าถึงพื้นที่ได้ง่าย และเริ่มรวบรวมเก็บข้อมูลของศักยภาพพลังงานลมเป็นระยะเวลาต่อเนื่องอย่างน้อย 12 เดือน เมื่อสำรวจศักยภาพพลังงานลมมาได้เรียบร้อยแล้วจากความเร็วลมที่ได้มานั้นจะสามารถประมาณขนาดความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดได้ และมาวิเคราะห์การจำลองของเครื่องกำเนิดเพื่อหาค่าขนาดของแม่เหล็กขนาดต่างๆมาวิเคราะห์จนได้ เครื่องกำเนิดที่เหมาะสมที่สุด มาสร้างเครื่องกำเนิดที่ต้องใช้งาน และ ทดสอบประสิทธิภาพ



ภาพ 31 โฟลว์ชาร์ตแสดงวิธีดำเนินการเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

### การทดสอบการออกแบบโดยการเปลี่ยนโรเตอร์เป็นโรเตอร์แม่เหล็กถาวรด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการออกแบบโรเตอร์นั้นจะมีการออกแบบด้วยโปรแกรม Ansys โดยโปรแกรมจะใช้ในการออกแบบหาระยะการจัดวางของแม่เหล็กถาวรภายในโรเตอร์และช่องว่างแอร์แก๊ปให้เหมาะสมมากที่สุด โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมสำเร็จรูป ด้วยโปรแกรม Ansys โดยจะทดสอบการ เพิ่ม-ลด ขนาดแม่เหล็กถาวรและทดสอบและการเพิ่มแอร์แก๊ปของช่องแม่เหล็กถาวรเพิ่มหาขนาดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด

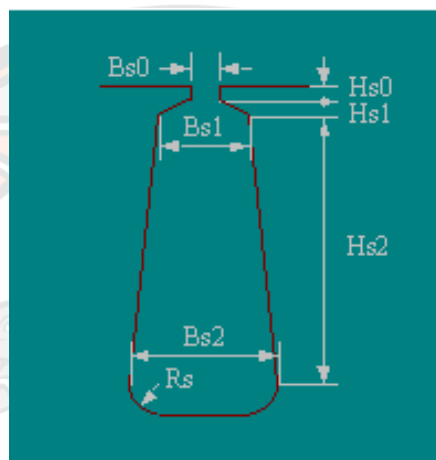
**ตาราง 7** พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเครื่องกำเนิด

พารามิเตอร์	Value	unit
Outer Diameter Stator	134	mm
Inner Diameter Stator	90	mm
Length Stator	60	mm
Stacking Factor	0.95	
Number of slots	36	slot
Conductors per slot	50	
Coil Pitch	8	
Outer Diameter Rotor	88	mm
Inner Diameter Rotor	25	mm
Length Rotor	60	mm
Magnet Width	30	mm
Magnet Thickness	5	mm
Rated Output	300	W
Rated Voltage	220	V
Rated Speed	1,500	rpm

**ตาราง 8** ระยะต่างๆของสล็อตในสเตเตอร์

พารามิเตอร์	Value	unit
Hs0	1	mm
Hs1	0.3	mm

พารามิเตอร์	Value	unit
Hs2	13	mm
Bs0	2	mm
Bs1	6	mm
Bs2	7	mm
Rs	0.2	mm



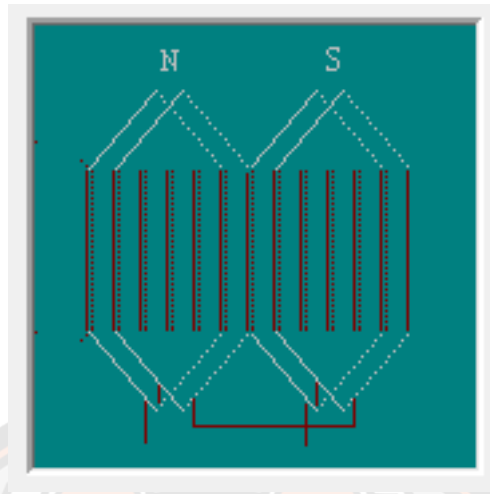
ภาพ 32 รูปแบบสล๊อตที่ใช้ในสเตเตอร์

**ตาราง 9** การวางเรียงสายของสเตเตอร์

	Phase	Turns	In Slot	Out Slot
Coil1	A	50	1T	6B
Coil2	A	50	2T	7B
Coil3	A	50	3T	8B
Coil4	-C	50	4T	9B
Coil5	-C	50	5T	10B
Coil6	-C	50	6T	11B
Coil7	B	50	7T	12B
Coil8	B	50	8T	13B
Coil9	B	50	9T	14B

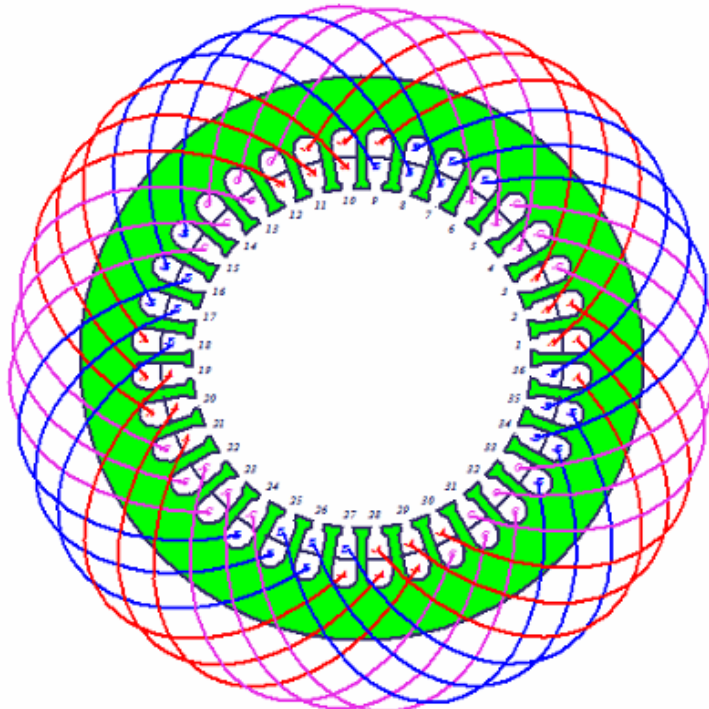


ประเภทการวางเรียงใช้แบบ Whole-Coiled



ภาพ 33 ประเภทการวางเรียงในสเตเตอร์ Whole-Coiled

จากการใช้ประเภทการวางเรียงเป็น Whole-Coiled และมีวิธีการวางเรียงในตารางที่ 9 สามารถแสดงการวางเรียงได้ดังรูป



ภาพ 34 แสดงวิธีการวางเรียงสายในสเตเตอร์

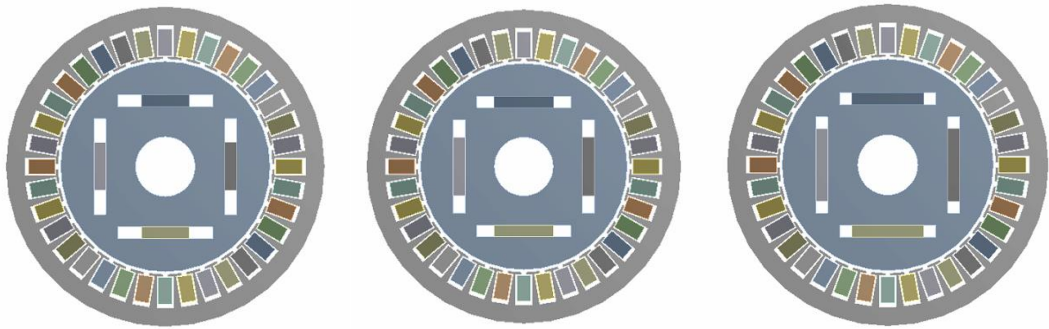
## การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการที่ได้ออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาแล้ว ลำดับต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบมาทั้งหมดนั้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS เนื่องจากผลของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สูงขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งส่งผลต่อสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สูงขึ้นตามไปด้วย

การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS ดังนี้

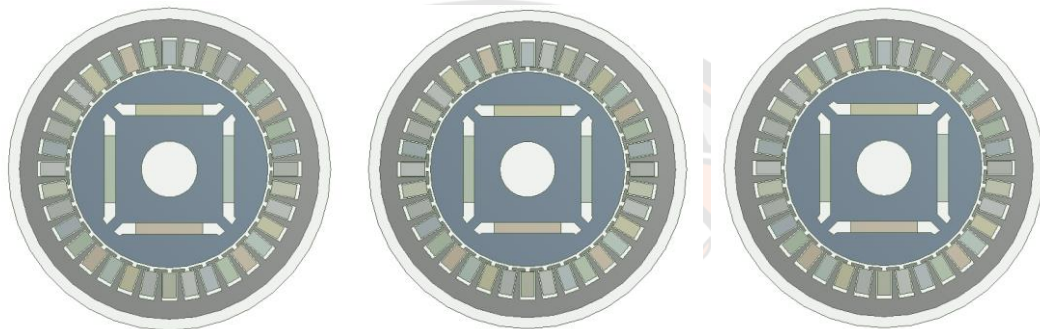
- สร้างโมเดล 3 มิติ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อเป็นการกำหนดรูปร่างและขนาดของแม่เหล็กถาวร และช่องว่างแอร์แกป
- กำหนดค่าพารามิเตอร์ของวัสดุของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนี้
  1. โครงสแตเตอร์ ใช้ข้อมูล (Engineering Data) ของโปรแกรม คือ Structural Steel
  2. แกนเหล็กโรเตอร์ ใช้ข้อมูล (Engineering Data) ของโปรแกรม คือ 1018 Steel
  3. แม่เหล็กถาวร ใช้ข้อมูลจริงของแม่เหล็กถาวรชนิดโบรอนเหล็กนีโอติเมียม NdFeB
  4. ตัวนำขดลวด ใช้ข้อมูลของโปรแกรม คือ Copper Alloy
  5. อากาศ ใช้ข้อมูล (Engineering Data) ของโปรแกรม คือ Air
- กำหนดพื้นที่เอลิเมนต์ย่อยๆ ของวัสดุ
- กำหนดทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร
- ทำการวิเคราะห์ผลของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ของเครื่องกำเนิดทั้งหมด



(1)

(2)

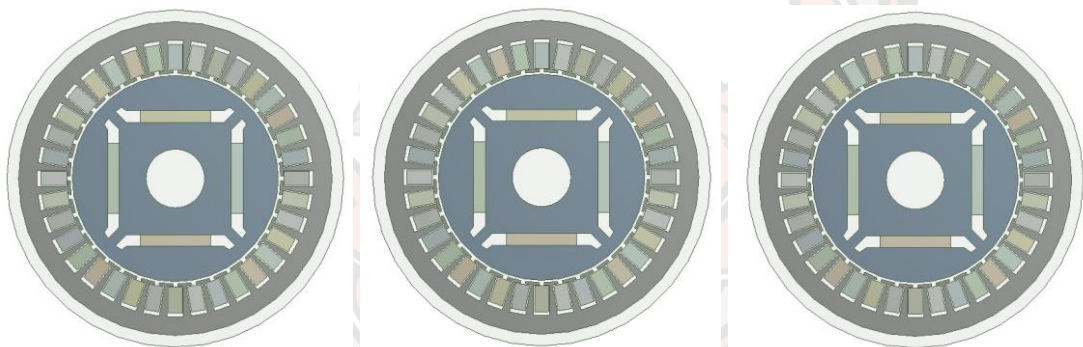
(3)



(4)

(5)

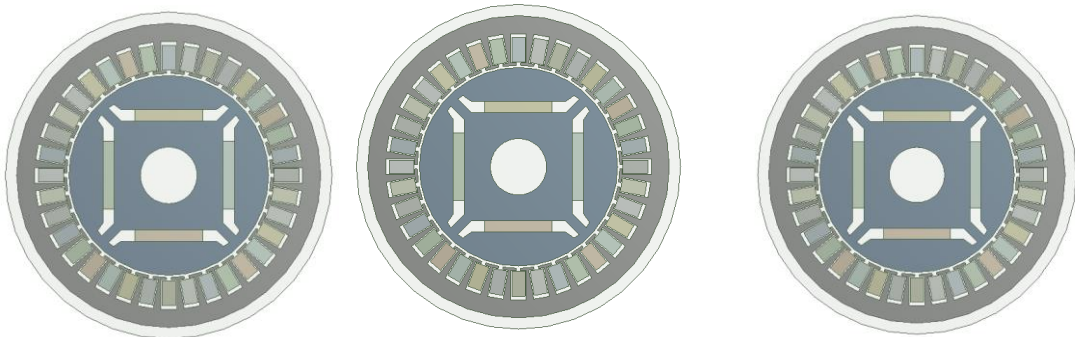
(6)



(7)

(8)

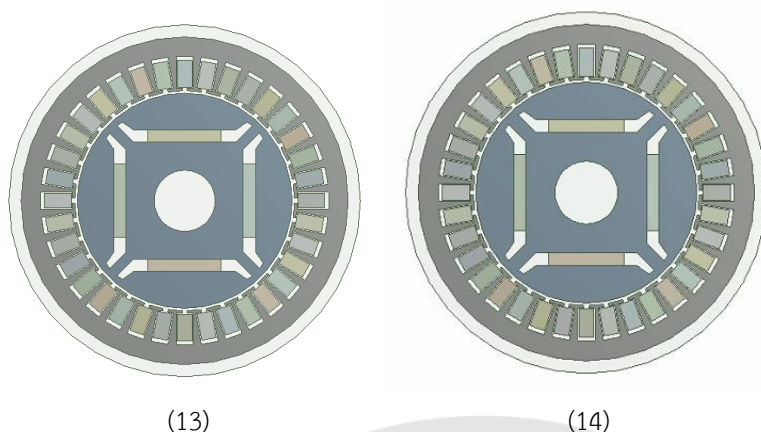
(9)



(10)

(11)

(12)



(13)

(14)

ภาพ 35 โครงสร้างสามมิติของสเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องกำเนิด

- เมื่อ (1) โรเตอร์ใช้แม่เหล็กกว้าง 20 mm (2) โรเตอร์ใช้แม่เหล็กกว้าง 25 mm  
 (3) โรเตอร์ใช้แม่เหล็กกว้าง 30 mm (4) เพิ่มแอร์แกปยาว 1 mm (5) เพิ่มแอร์แกปยาว 1.5 mm  
 (6) เพิ่มแอร์แกปยาว 2 mm (7) เพิ่มแอร์แกปยาว 2.5 mm (8) เพิ่มแอร์แกปยาว 3 mm  
 (9) เพิ่มแอร์แกปยาว 3.5 mm (10) เพิ่มแอร์แกปยาว 4 mm (11) เพิ่มแอร์แกปยาว 4.5 mm  
 (12) เพิ่มแอร์แกปยาว 5 mm (13) เพิ่มแอร์แกปยาว 5.5 mm (14) เพิ่มแอร์แกปยาว 6 mm

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ผลความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS โดยกำหนดเงื่อนไขการวิเคราะห์ด้วยการปรับเพิ่มลดขนาดของแม่เหล็กถาวรและการเพิ่มขึ้นของขนาดแอร์แกปภายในโรเตอร์ ซึ่งผลการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด พบว่า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่โรเตอร์ใช้แม่เหล็กกว้าง 20 mm มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 2.0854 T แสดงดังภาพที่ 36 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 0.252 T

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่โรเตอร์ใช้แม่เหล็กกว้าง 25 mm มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 2.7411 T แสดงดังภาพที่ 37 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 0.341 T

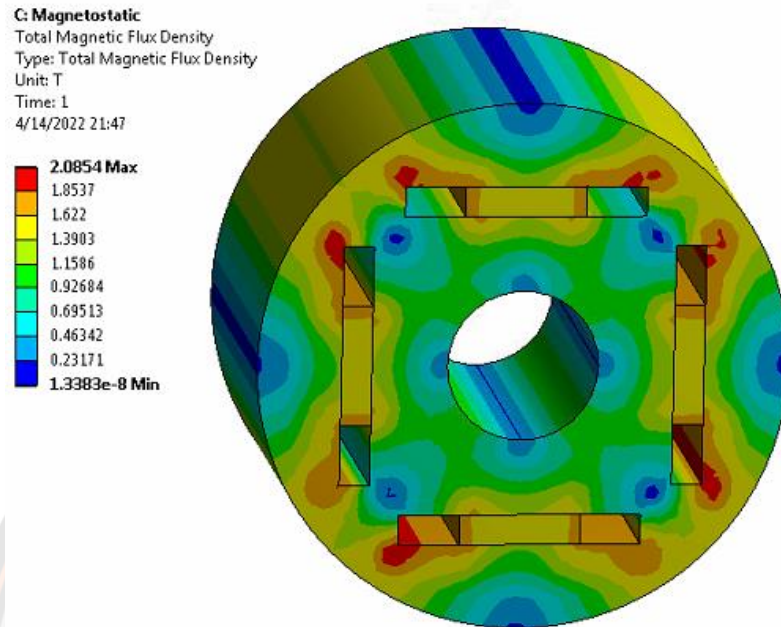
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่โรเตอร์ใช้แม่เหล็กกว้าง 30 mm มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 3.1636 T แสดงดังภาพที่ 38 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 0.326 T

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่โรเตอร์เพิ่มแอร์แกปยาว 1 mm มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 3.3707 T แสดงดังภาพที่ 39 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 0.355 T

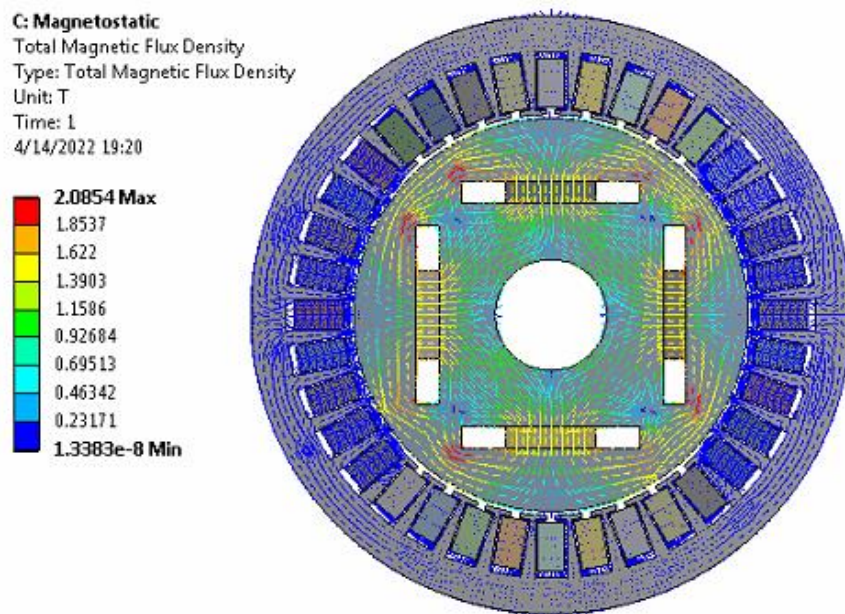
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่โรเตอร์เพิ่มแอร์แกปยาว 1.5 mm มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 3.5581 T แสดงดังภาพที่ 40 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 0.377 T



ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการปรับเปลี่ยนขนาดแม่เหล็กถาวร



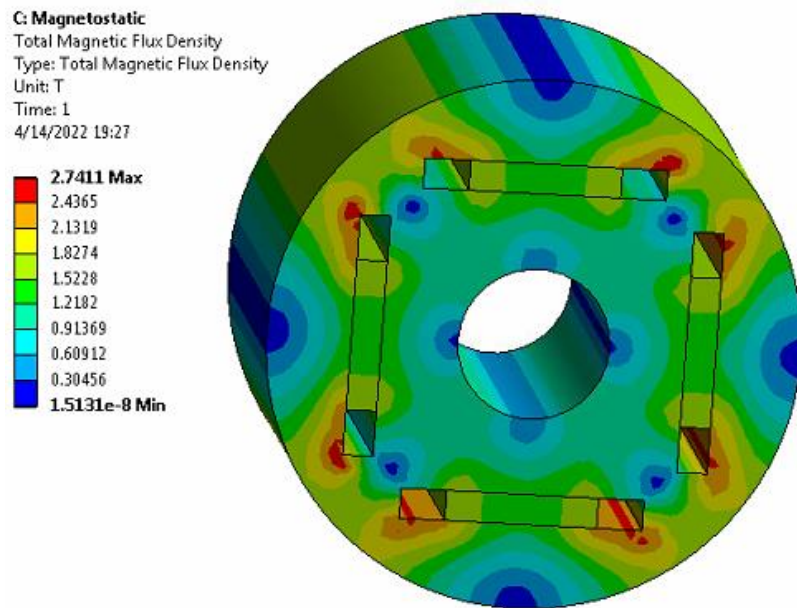
(ก)



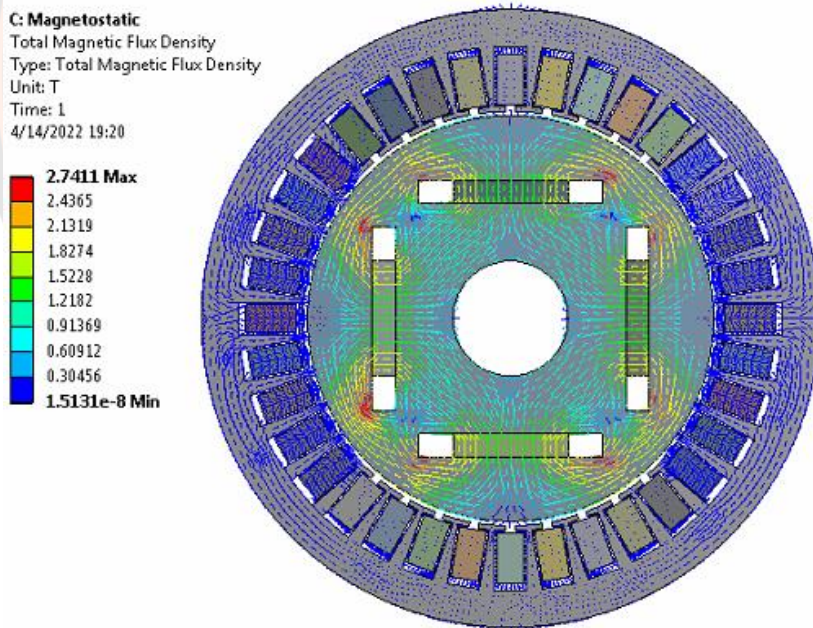
(ข)

ภาพ 36 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดแม่เหล็กกว้าง 20 mm

เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก



(ก)



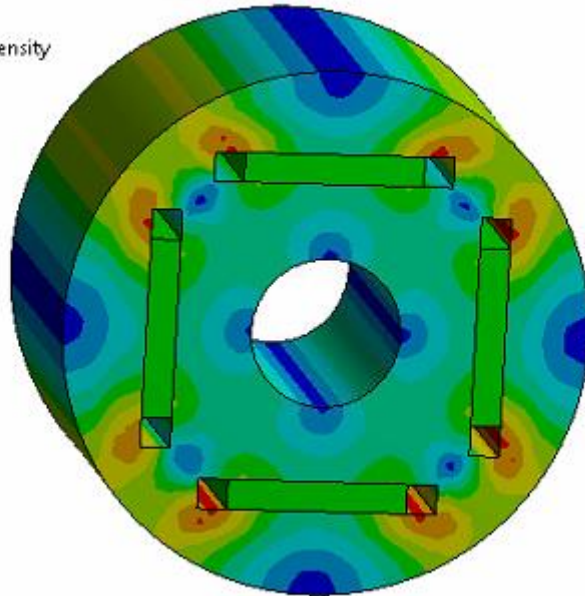
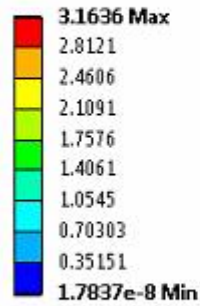
(ข)

ภาพ 37 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดแม่เหล็กกว้าง 25 mm

เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก

**C: Magnetostatic**

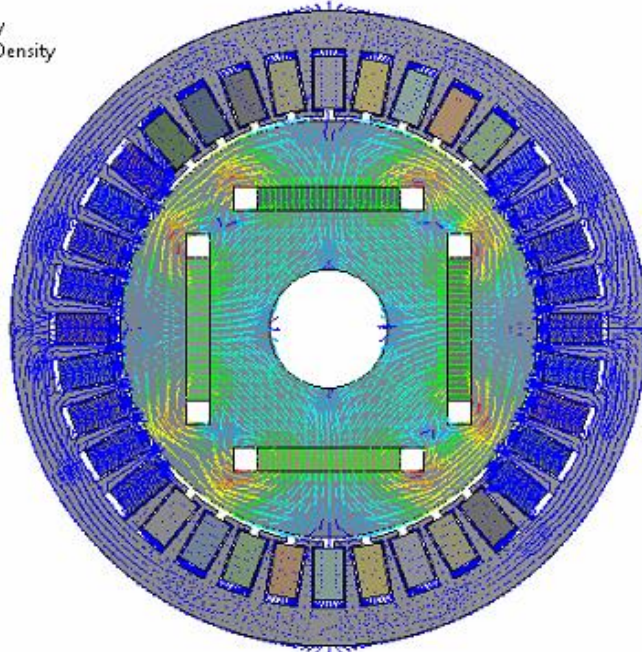
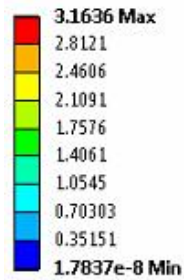
Total Magnetic Flux Density  
 Type: Total Magnetic Flux Density  
 Unit: T  
 Time: 1  
 4/14/2022 19:29



(ก)

**C: Magnetostatic**

Total Magnetic Flux Density  
 Type: Total Magnetic Flux Density  
 Unit: T  
 Time: 1  
 4/14/2022 19:27



(ข)

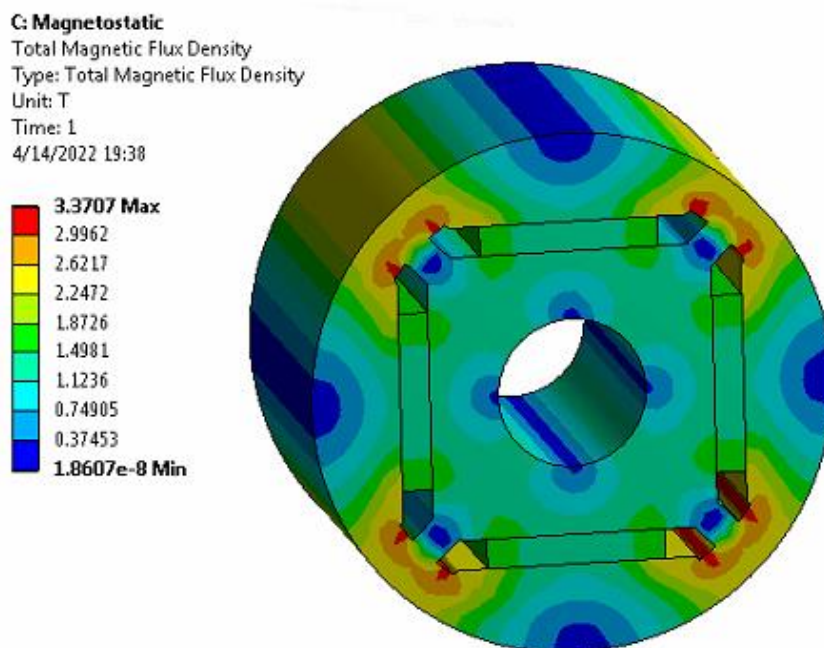
ภาพ 38 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดแม่เหล็กกว้าง 30 mm

เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก

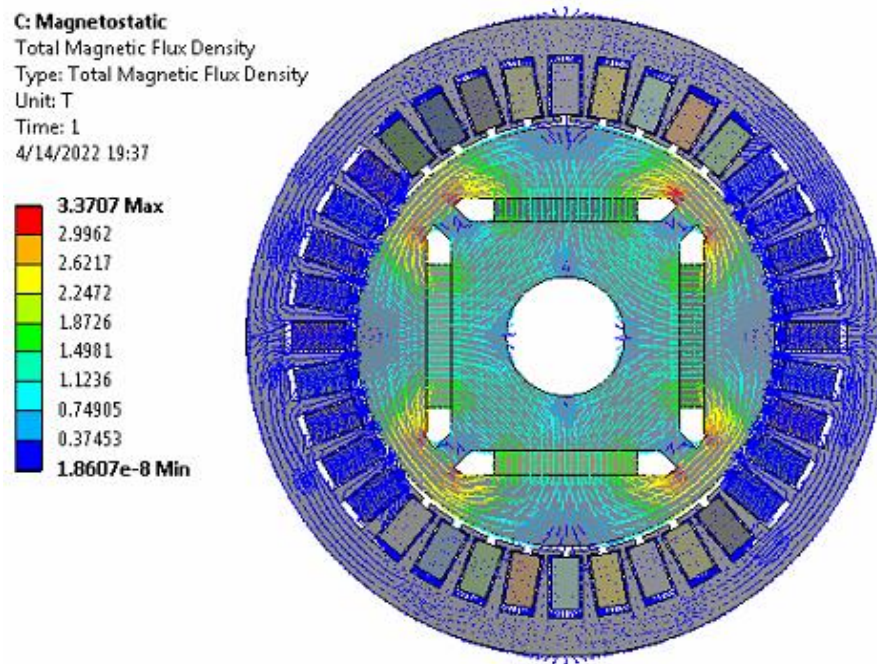


การวิเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรที่พัฒนาขึ้นมาทั้ง 3 ขนาด ซึ่งจะมีขนาดความยาว 60 มม. และหนา 5 มม. และมีความกว้างแตกต่างกันคือ 20 มม. 25 มม. 30 มม. แสดงดังภาพที่ 36 ถึง 38 จากการวิเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมากขึ้นเมื่อแม่เหล็กถาวรมีขนาดความกว้างเพิ่มขึ้น ดังนั้น แม่เหล็กถาวรที่มีความกว้าง 30 มม. จึงมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมากที่สุด และฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 3 นั้น มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดอยู่บริเวณโรเตอร์อยู่ระหว่างระยะห่างของแม่เหล็กถาวรขั้วเหนือ และขั้วใต้ ที่อยู่บริเวณใกล้กัน โดยฟลักซ์แม่เหล็กจะวิ่งจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ของแม่เหล็กถาวร และเมื่อแม่เหล็กมีขนาดความกว้างเพิ่มขึ้นจึงทำให้ระยะห่างของแม่เหล็กถาวรมีระยะสั้นลงจึงทำให้แม่เหล็กที่มีความกว้าง 30 มม. มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมากที่สุด

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการปรับเปลี่ยนขนาดของช่องว่างอากาศโดยใช้แม่เหล็กถาวรขนาดความกว้าง 30 มม.



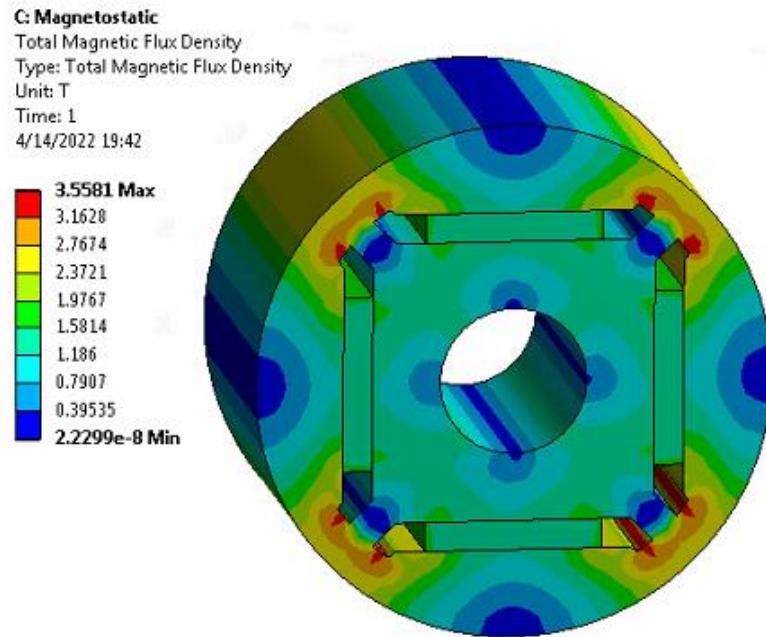
(ก)



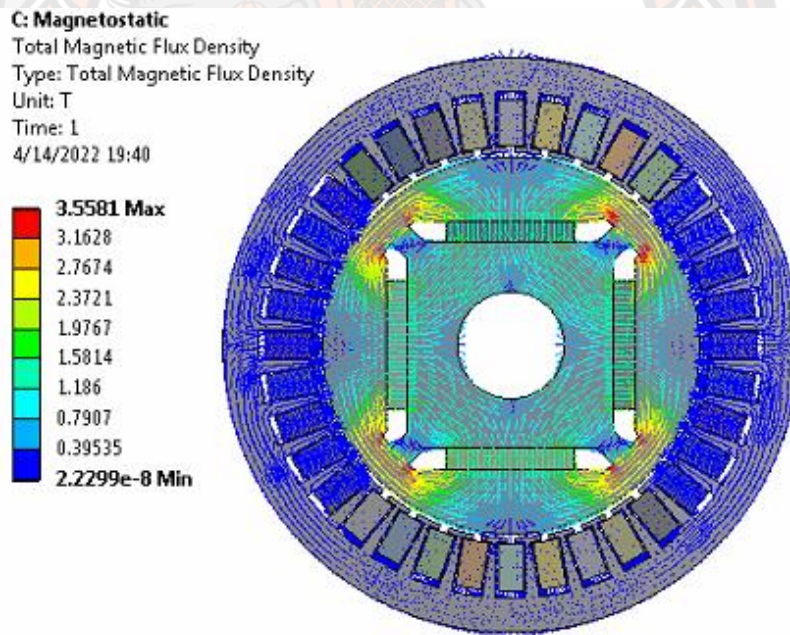
(ข)

ภาพ 39 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดที่เพิ่มขนาดแอร์แกป 1 มม.

เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก



(ก)

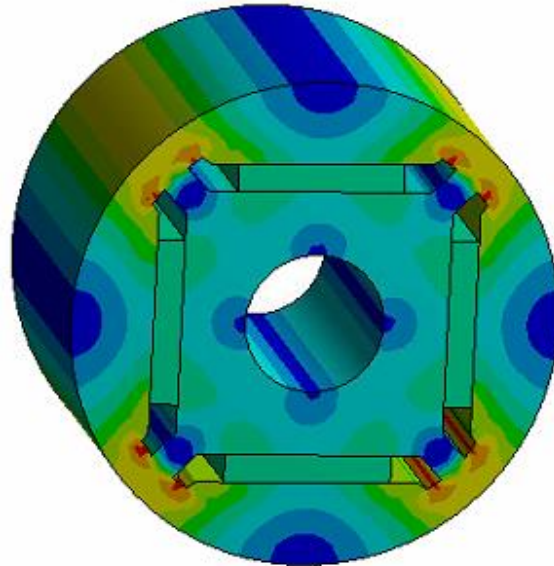
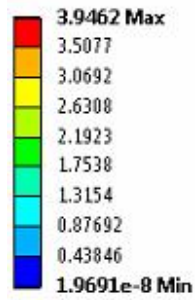


(ข)

ภาพ 40 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดที่เพิ่มขนาดแอร์แกป 1.5 มม.

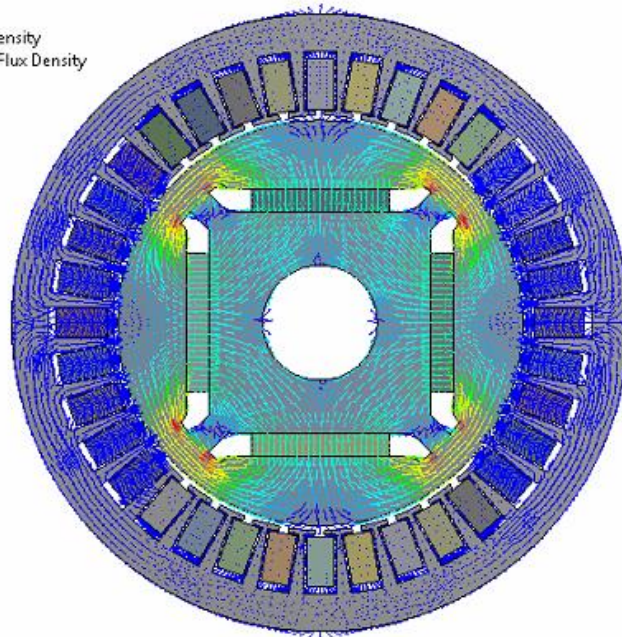
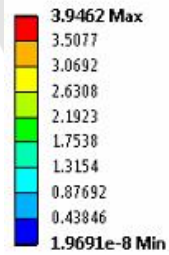
เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก

**C: Magnetostatic**  
 Total Magnetic Flux Density  
 Type: Total Magnetic Flux Density  
 Unit: T  
 Time: 1  
 4/14/2022 19:47



(ก)

**C: Magnetostatic**  
 Total Magnetic Flux Density  
 Type: Total Magnetic Flux Density  
 Unit: T  
 Time: 1  
 4/14/2022 19:46



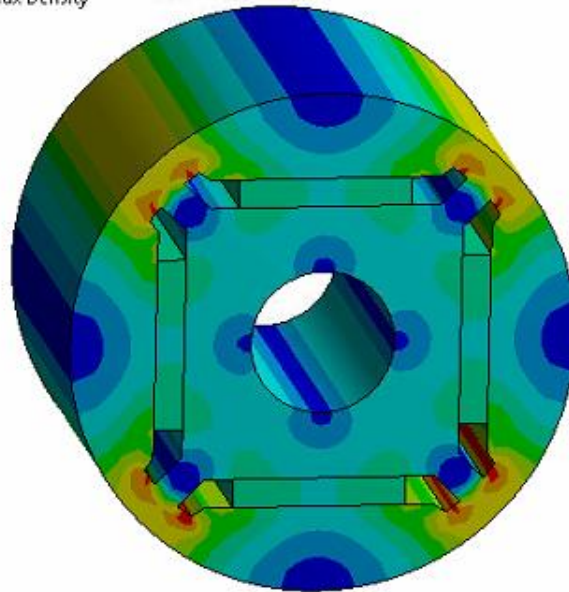
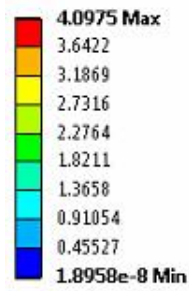
(ข)

ภาพ 41 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดที่เพิ่มขนาดแอร์แกป 2 มม.

เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก

**C: Magnetostatic**

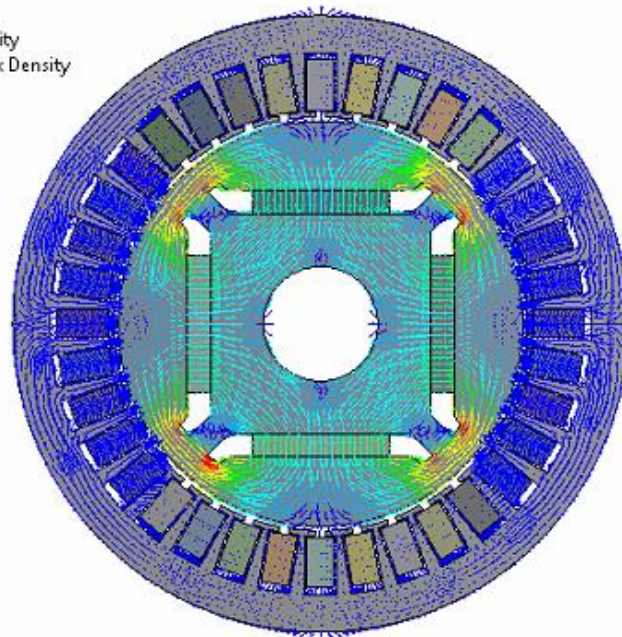
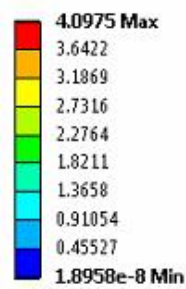
Total Magnetic Flux Density  
 Type: Total Magnetic Flux Density  
 Unit: T  
 Time: 1  
 4/14/2022 19:49



(ก)

**C: Magnetostatic**

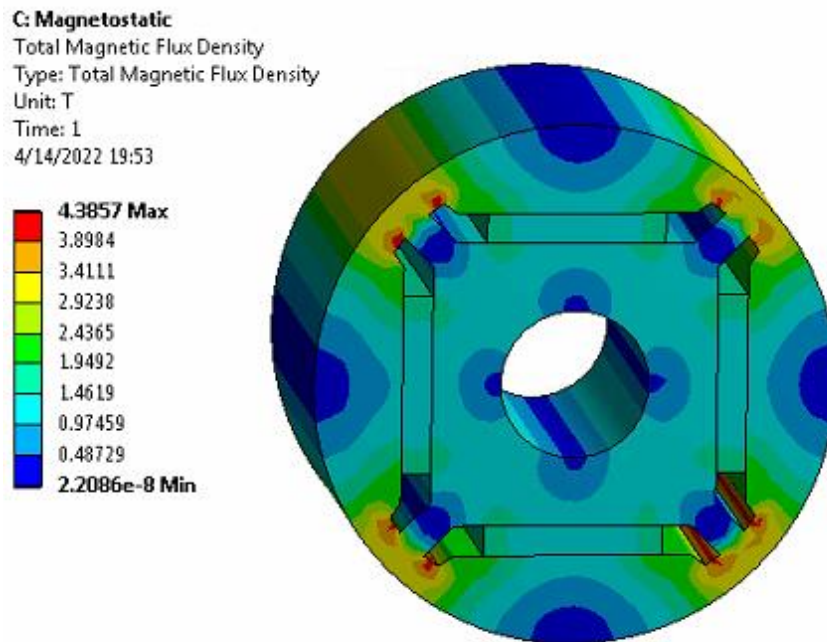
Total Magnetic Flux Density  
 Type: Total Magnetic Flux Density  
 Unit: T  
 Time: 1  
 4/14/2022 19:48



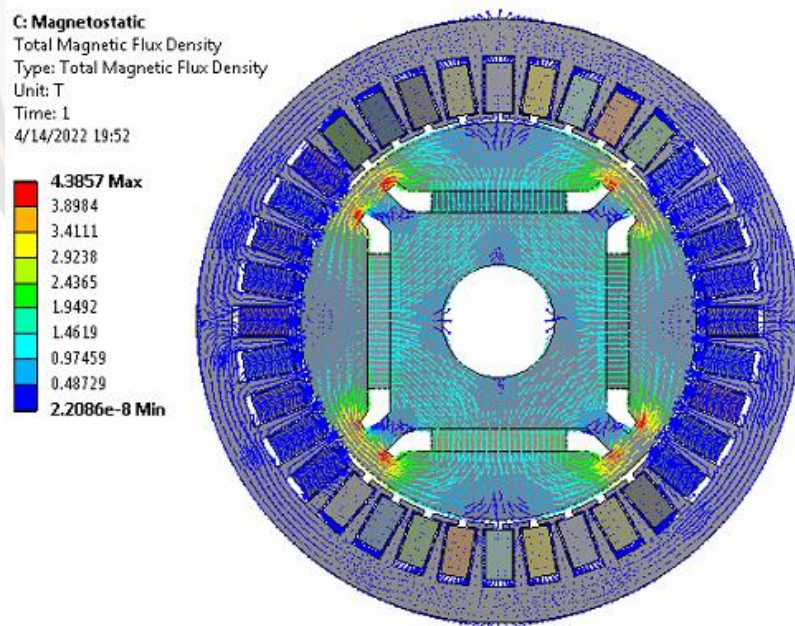
(ข)

ภาพ 42 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดที่เพิ่มขนาดแอร์แกป 2.5 มม

เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก



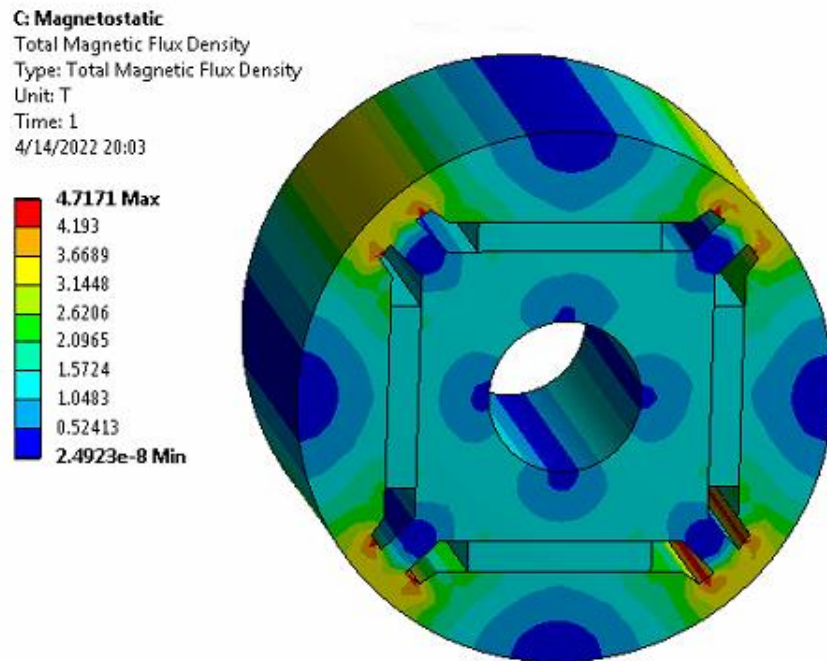
(ก)



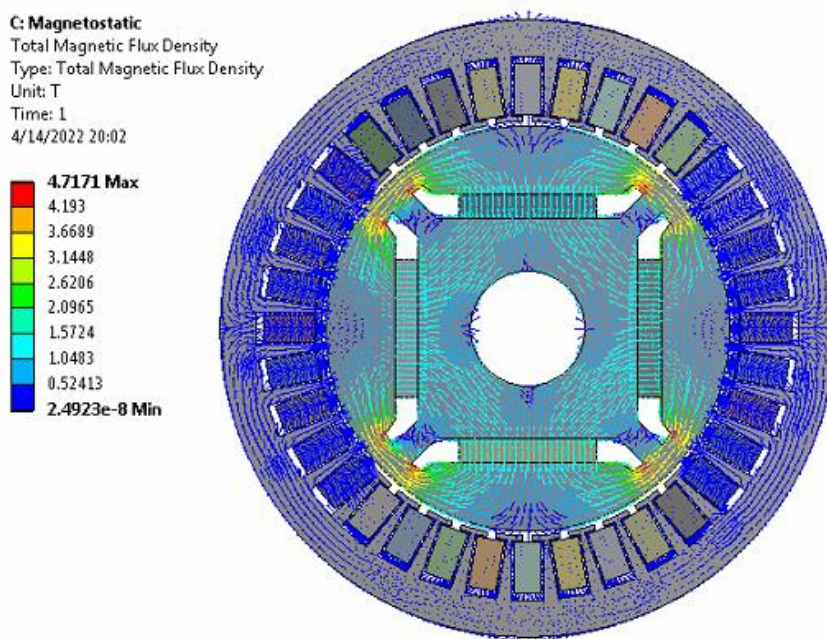
(ข)

ภาพ 43 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดที่เพิ่มขนาดแอร์แกป 3 มม.

เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก



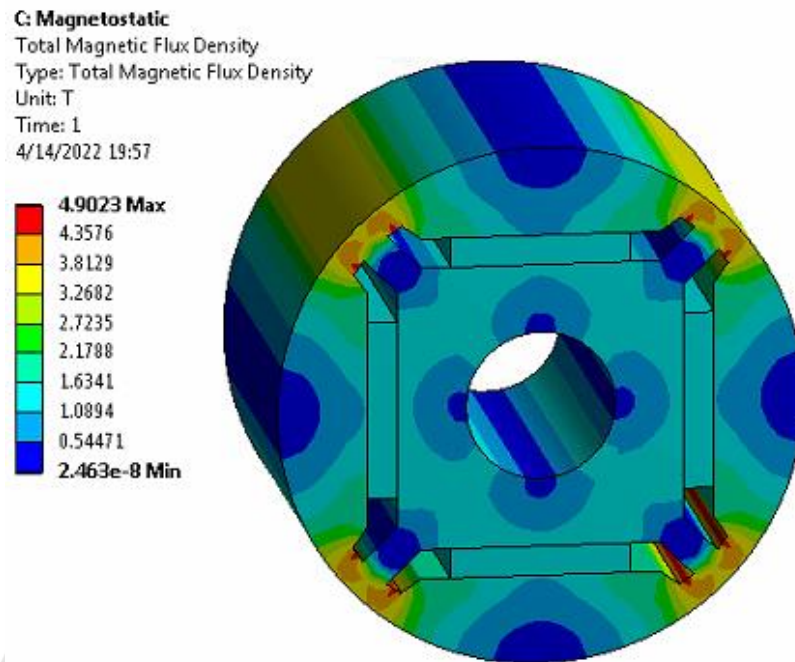
(ก)



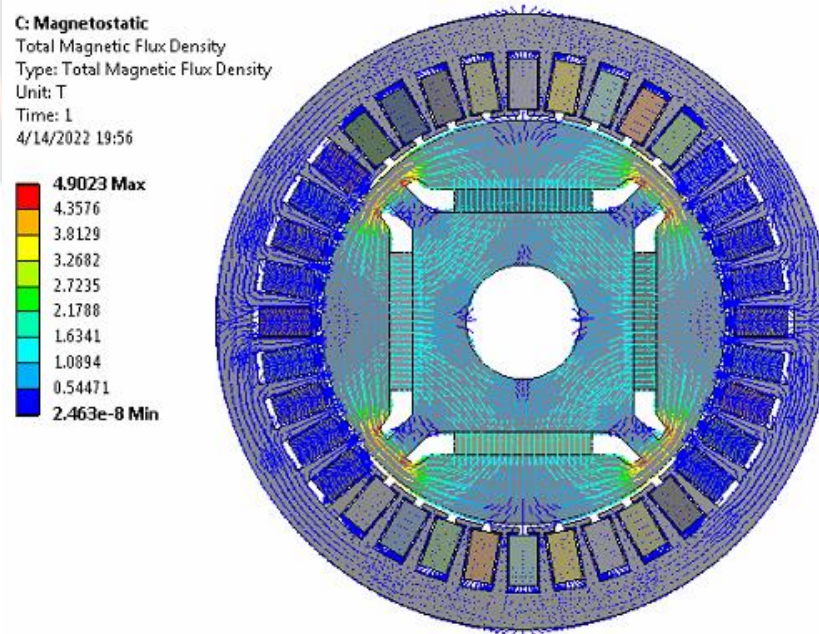
(ข)

ภาพ 44 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดที่เพิ่มขนาดแอร์แกป 3.5 มม.

เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก



(ก)

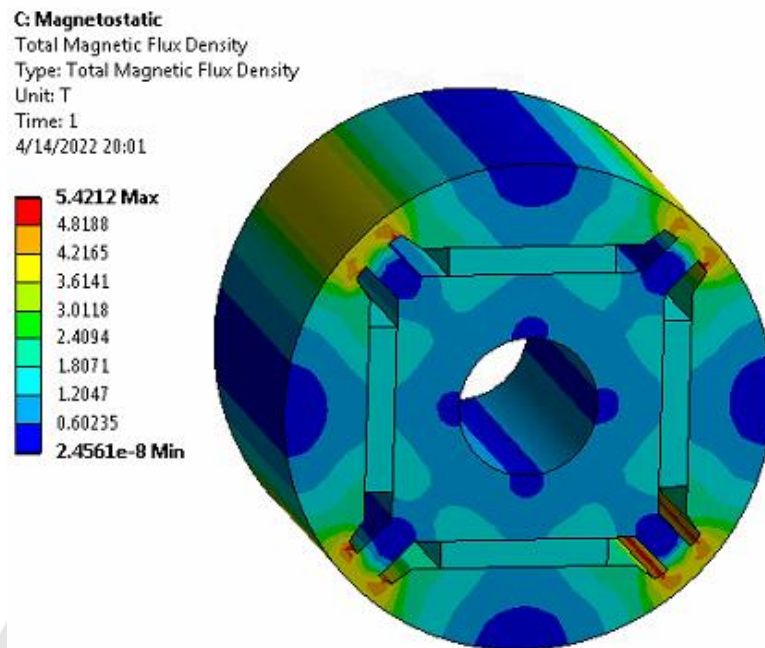


(ข)

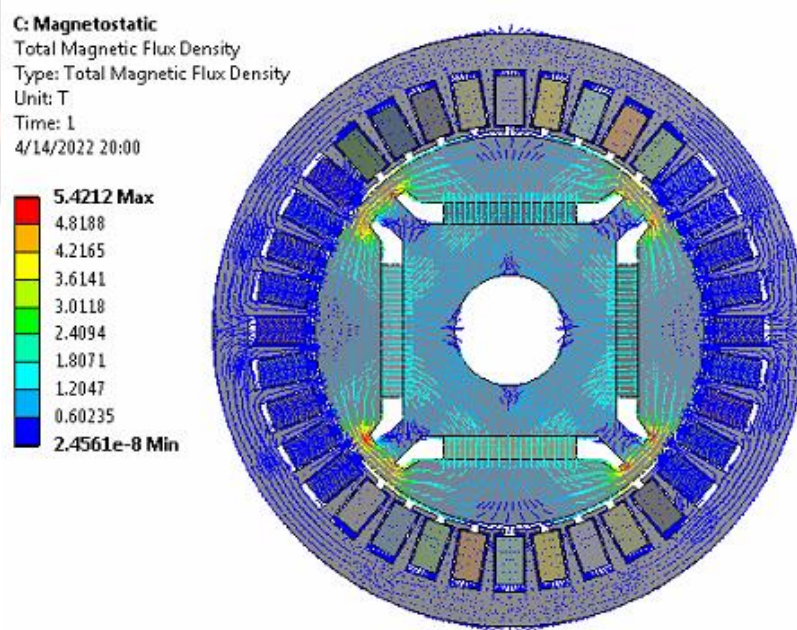
ภาพ 45 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดที่เพิ่มขนาดแอร์แกป 4 มม.

เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก





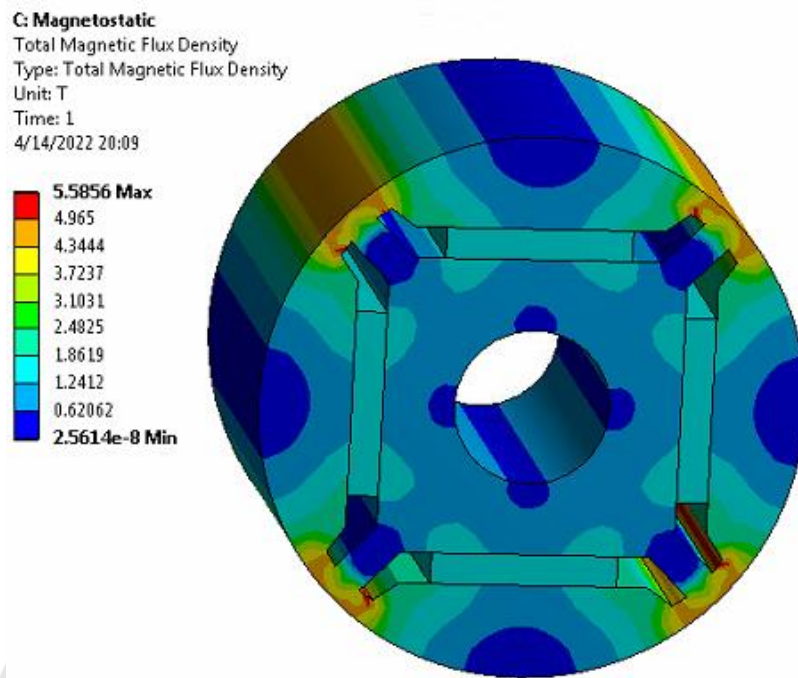
(ก)



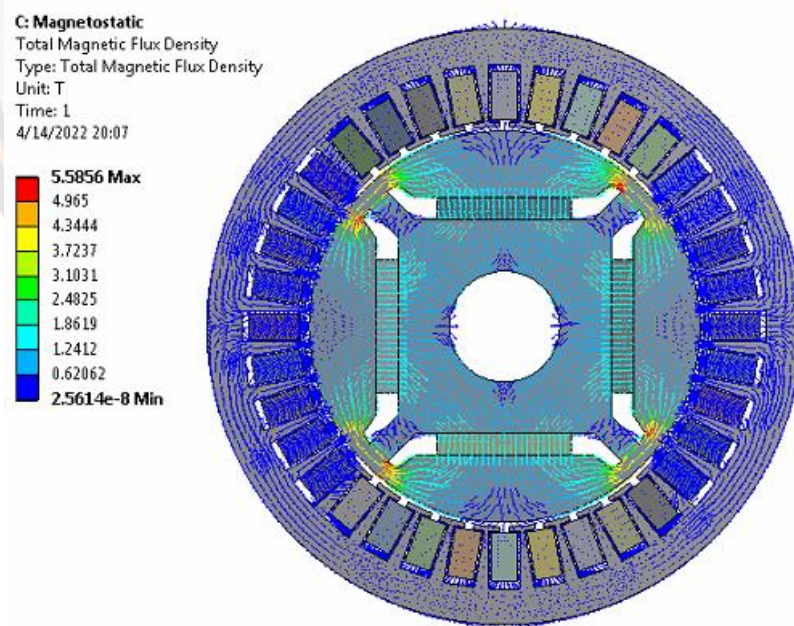
(ข)

ภาพ 46 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดที่เพิ่มขนาดแอร์แกป 4.5 มม.

เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก



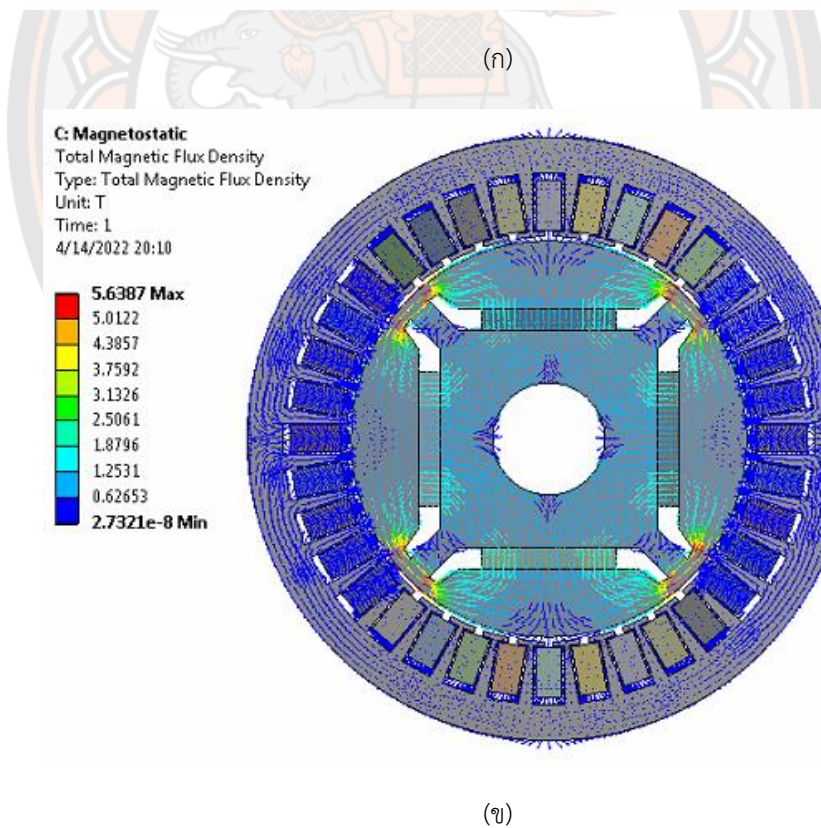
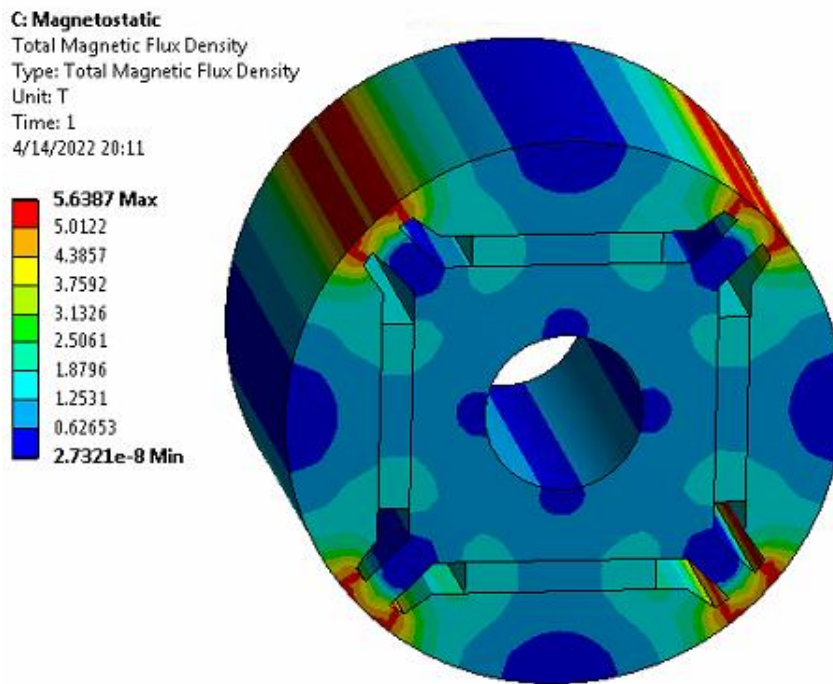
(ก)



(ข)

ภาพ 47 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดที่เพิ่มขนาดแอร์แกป 5 มม.

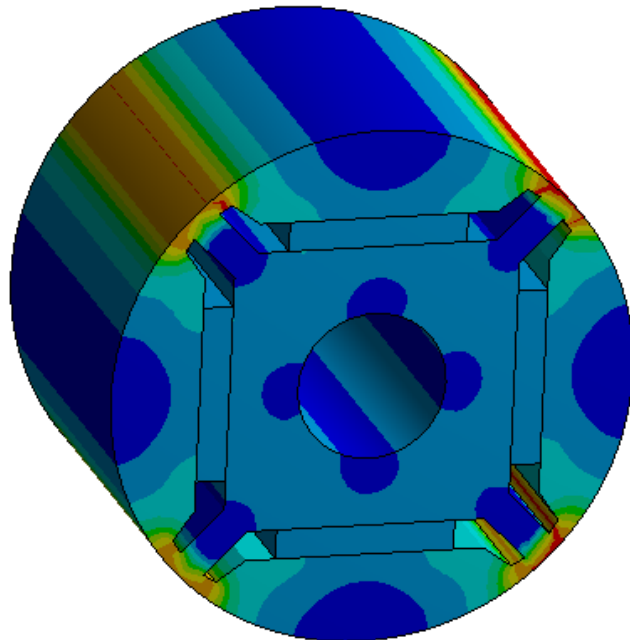
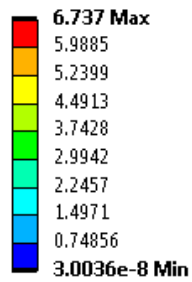
เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก



ภาพ 48 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดที่เพิ่มขนาดแอร์แกป 5.5 มม.

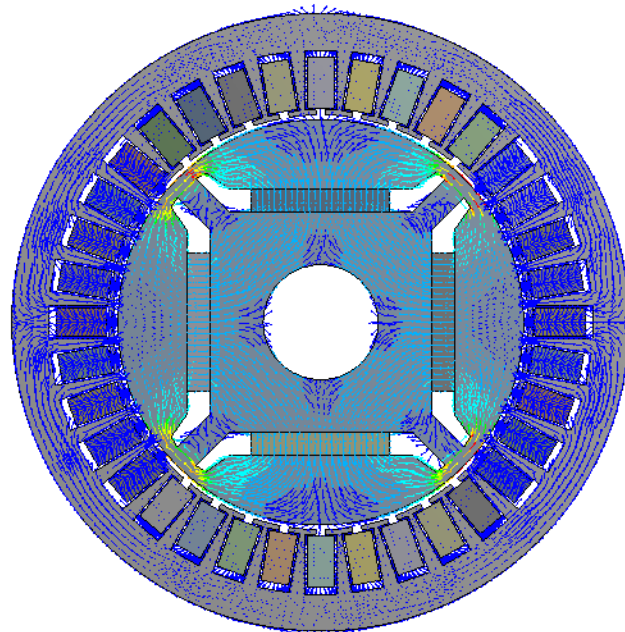
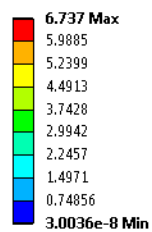
เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก

**C: Magnetostatic**  
 Total Magnetic Flux Density  
 Type: Total Magnetic Flux Density  
 Unit: T  
 Time: 1  
 7/5/2022 11:58



(ก)

**C: Magnetostatic**  
 Total Magnetic Flux Density  
 Type: Total Magnetic Flux Density  
 Unit: T  
 Time: 1  
 7/5/2022 11:55



(ข)

ภาพ 49 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดที่เพิ่มขนาดแอร์แกป 6 มม.

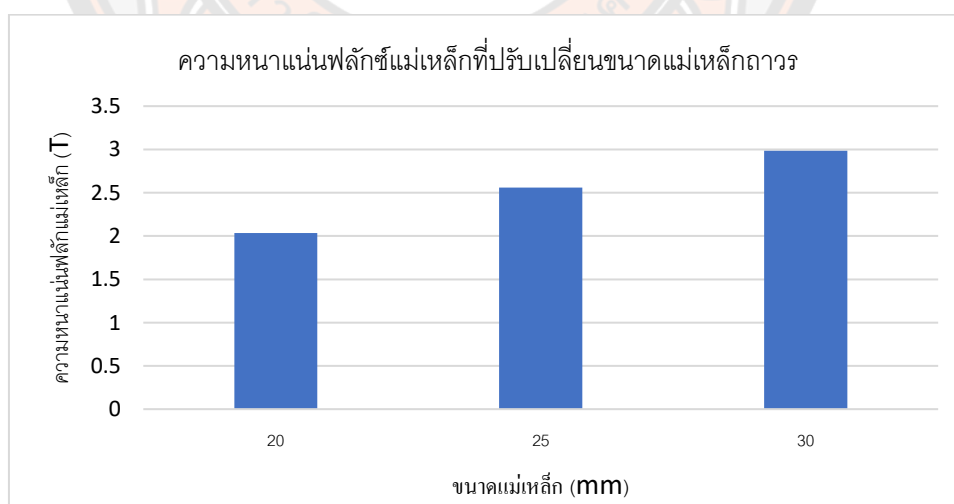
เมื่อ (ก) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ (ข) ทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก

การวิเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรที่พัฒนาและออกแบบการเพิ่มช่องว่างอากาศขึ้นมาทั้ง 11 ขนาด ซึ่งการเพิ่มขนาดช่องว่างอากาศนั้นจะมีระยะอยู่ที่ 1 – 6 มม. แสดงดังภาพที่ 38 ถึง 49 จากการวิเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมากขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดความยาวของช่องว่างอากาศ

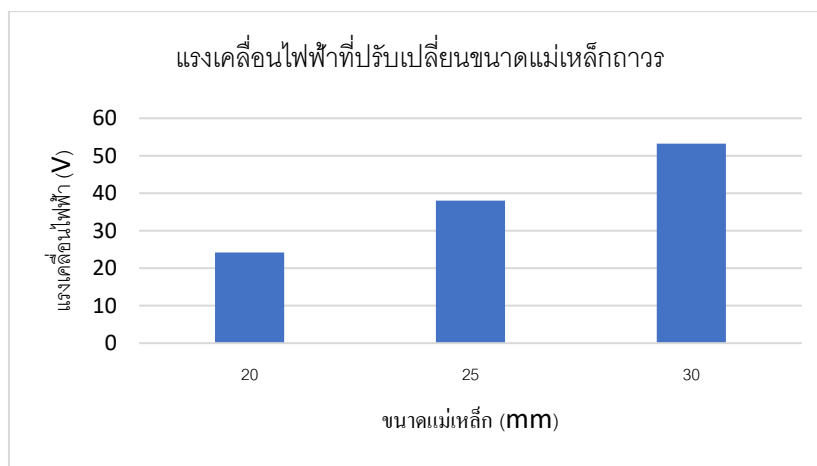
การวิเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของเครื่องกำเนิดที่ได้ทำการออกแบบ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

**ตาราง 10** ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และค่าฟลักซ์แรงเคลื่อนไฟฟ้าได้จากการคำนวณที่ปรับเปลี่ยนขนาดแม่เหล็กถาวร

ขนาดแม่เหล็ก (mm)	$B_m(T)$	$B_{total}(T)$	N(turn)	Flux(mwb)	Kp	Kd	Kw	Ea(V)
20	2.033	0.252	50	2.440	0.93	0.96	0.89	24.183
25	2.560	0.341	50	3.841	0.93	0.96	0.89	38.060
30	2.984	0.326	50	5.373	0.93	0.96	0.89	53.245



ภาพ 50 กราฟเปรียบเทียบการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ปรับเปลี่ยนขนาดแม่เหล็กถาวรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพ 51 กราฟเปรียบเทียบการคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนขนาดของแม่เหล็กถาวร

การวิเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรที่พัฒนาขึ้นมาทั้ง 3 ขนาด ซึ่งจะมีขนาดความยาว 60 มม. และหนา 5 มม. และมีความกว้างแตกต่างกันคือ 20 มม. 25 มม. 30 มม. แสดงดังภาพที่ 50 จากการวิเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมากขึ้นเมื่อแม่เหล็กถาวรมีขนาดความกว้างเพิ่มขึ้น ดังนั้น แม่เหล็กถาวรที่มีความกว้าง 30 มม. จึงมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมากที่สุด และฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 3 นั้น มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดอยู่บริเวณโรเตอร์ อยู่ระหว่างระยะห่างของแม่เหล็กถาวรขั้วเหนือและใต้ ที่อยู่บริเวณใกล้กัน โดยฟลักซ์แม่เหล็กจะวิ่งจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ของแม่เหล็กถาวร และเมื่อแม่เหล็กมีขนาดความกว้างเพิ่มขึ้นจึงทำให้ระยะห่างของแม่เหล็กถาวรมีระยะสั้นลงจึงทำให้แม่เหล็กที่มีความกว้าง 30 มม. มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมากที่สุด

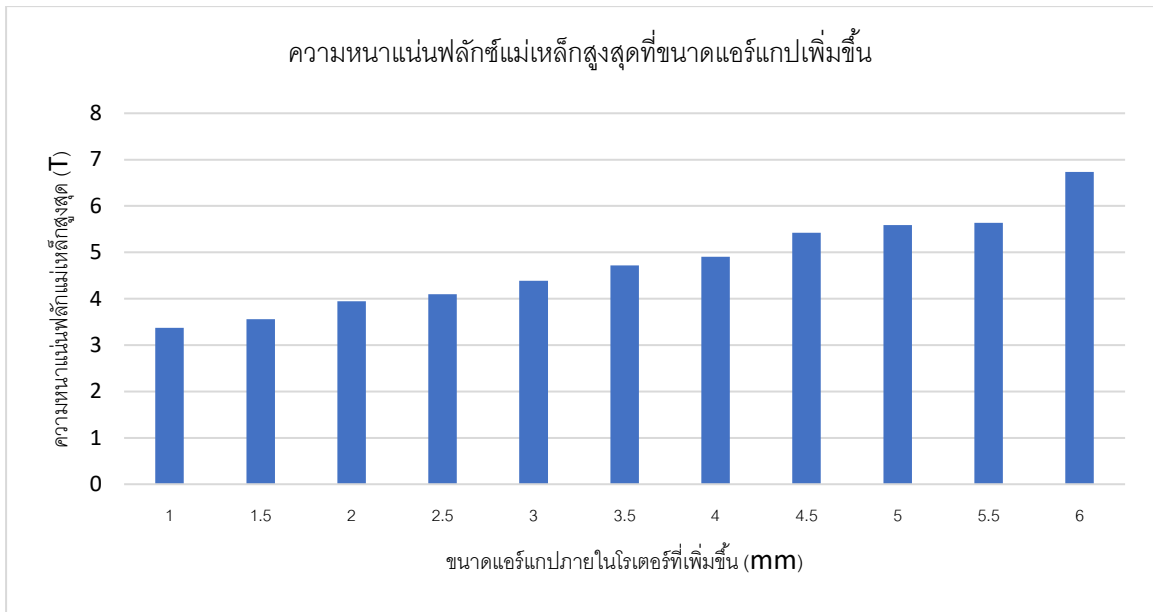
ตาราง 11 ผลการคำนวณค่าฟลักซ์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการเพิ่มขนาดแอร์แกป

ระยะที่เพิ่มขึ้น(mm)	Bm(T)	N(รอบ)	Flux(mwb)	Kp	Kd	Kw	Ea(V)
1	3.370	50	6.067	0.93	0.96	0.89	60.127
1.5	3.558	50	6.405	0.93	0.96	0.89	63.469
2	3.946	50	7.103	0.93	0.96	0.89	70.392
2.5	4.097	50	7.376	0.93	0.96	0.89	73.091
3	4.385	50	7.894	0.93	0.96	0.89	78.232
3.5	4.717	50	8.491	0.93	0.96	0.89	84.144
4	4.902	50	8.824	0.93	0.96	0.89	87.447

ระยะที่เพิ่มขึ้น(mm)	Bm(T)	N(รอบ)	Flux(mwb)	Kp	Kd	Kw	Ea(V)
4.5	5.421	50	9.758	0.93	0.96	0.893	96.704
5	5.585	50	10.054	0.93	0.96	0.893	99.636
5.5	5.638	50	10.150	0.93	0.96	0.893	100.583
6	6.737	50	12.127	0.93	0.96	0.893	120.175

ตาราง 12 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระยะที่เพิ่มขึ้น	$B_{max}$ (T)	$B_{Total}$ (T)	$B_{TR}$ (T)	$B_{TS}$ (mT)
1	3.370	0.355	1.482	5.42
1.5	3.558	0.377	1.501	5.63
2	3.946	0.39	1.507	5.85
2.5	4.097	0.381	1.503	6.12
3	4.385	0.378	1.523	6.4
3.5	4.717	0.357	1.490	6.72
4	4.902	0.365	1.513	7.48
4.5	5.421	0.333	1.474	7.48
5	5.585	0.331	1.440	7.8
5.5	5.638	0.339	1.465	8.52
6	6.737	0.343	1.378	9.34

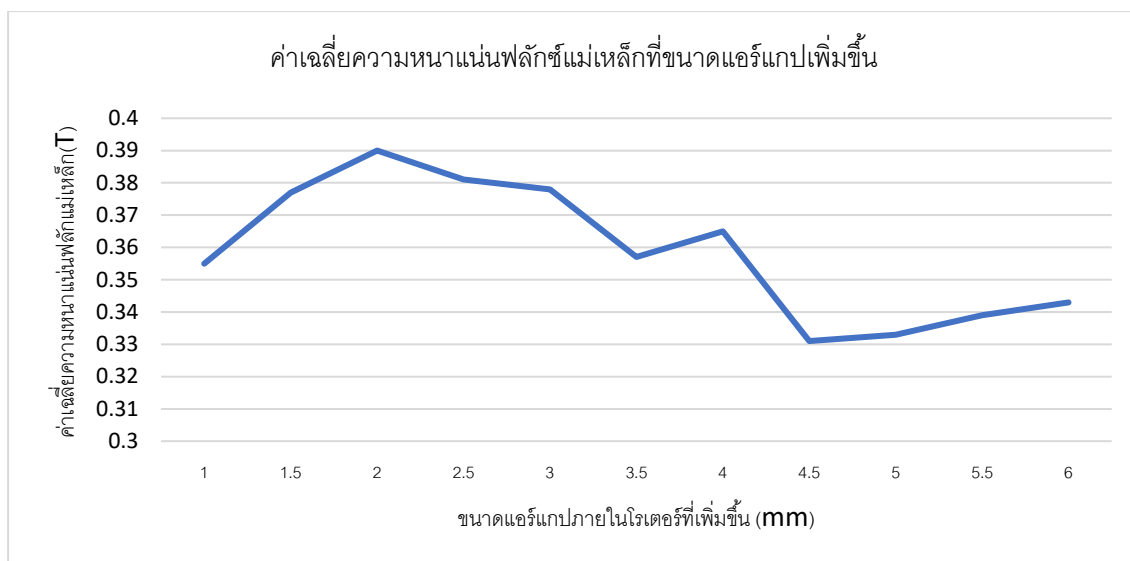


ภาพ 52 กราฟเปรียบเทียบการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่มีการเพิ่มขนาดแอร์แกปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพ 53 กราฟเปรียบเทียบการคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีการเพิ่มขนาดแอร์แกป





ภาพ 54 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวมที่มีการเพิ่มขนาดแอร์แกปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิ

จากสมการที่ (32) 
$$T = \frac{9.55 k_1 B_m AN I_a}{N}$$
 เเมนต์

จากสูตรค่าฟลักซ์แม่เหล็ก ( $B_m$ ) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะส่งผลโดยตรงต่อค่าทอร์กเริ่มต้น ( $T$ ) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อค่าฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ทอร์กการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น แอร์แกปที่ขนาด 4.5 มม. มีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่น้อยที่สุด จึงเลือกแอร์แกปที่ระยะ 4.5 มม. นำไปใช้ในการทดสอบต่อไป

#### เปรียบเทียบการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์การเปรียบเทียบความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นมาทั้ง 11 ตัว พบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาดความกว้าง 30 มม. เมื่อขนาดช่องว่างอากาศมีความยาวขึ้นค่าฟลักซ์สูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากทางเดินของเส้นฟลักซ์แม่เหล็กมีขนาดแคบลงจึงทำให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กมีความเข้มข้นไปด้วย แต่เนื่องด้วยฟลักซ์แม่เหล็กรวมมีผลโดยตรงต่อความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็กรวมสูงขึ้นค่าความเหนี่ยวนำต่อแกนเหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่อความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวม แอร์แกปที่ขนาด 4.5 มม. มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวมน้อยที่สุด คือ 0.331 T ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดความยาวแอร์แกปที่ 4.5 มม. มาใช้สร้างแกนเหล็กโรเตอร์แม่เหล็กถาวร และทดสอบสมรรถภาพ

## บทที่ 4

### การสร้างและทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

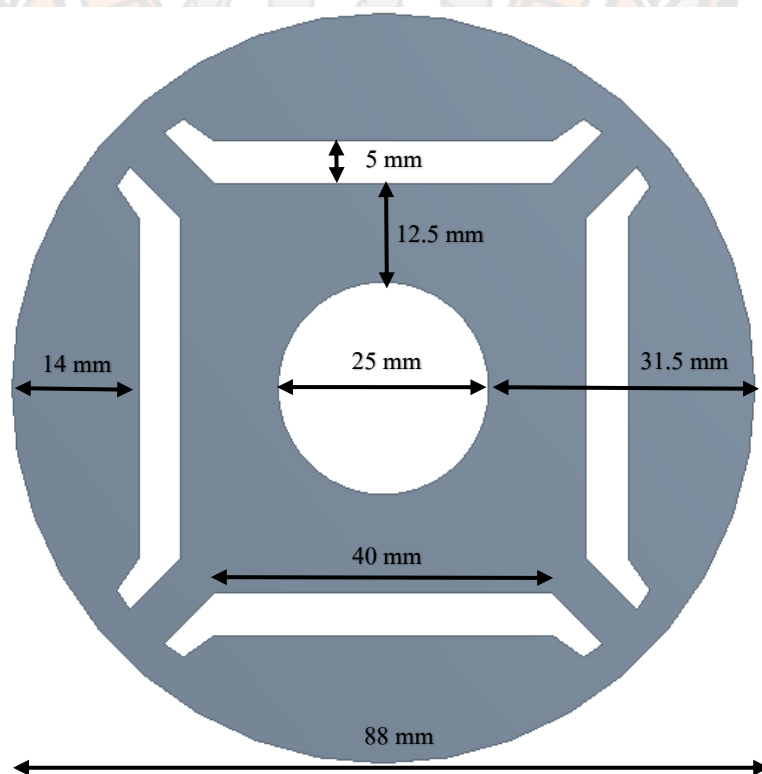
ในบทความนี้กล่าวถึงขั้นตอนการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการปรับเปลี่ยนขนาดแม่เหล็กและขนาดแอร์แกปภายในโรเตอร์ และทำการทดสอบสมรรถภาพด้วยการใช้มอเตอร์ในการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า กระแสไฟฟ้าด้านเข้า กำลังไฟฟ้าด้านเข้า ความถี่ และความเร็วยรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

**การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนโรเตอร์ใหม่ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**

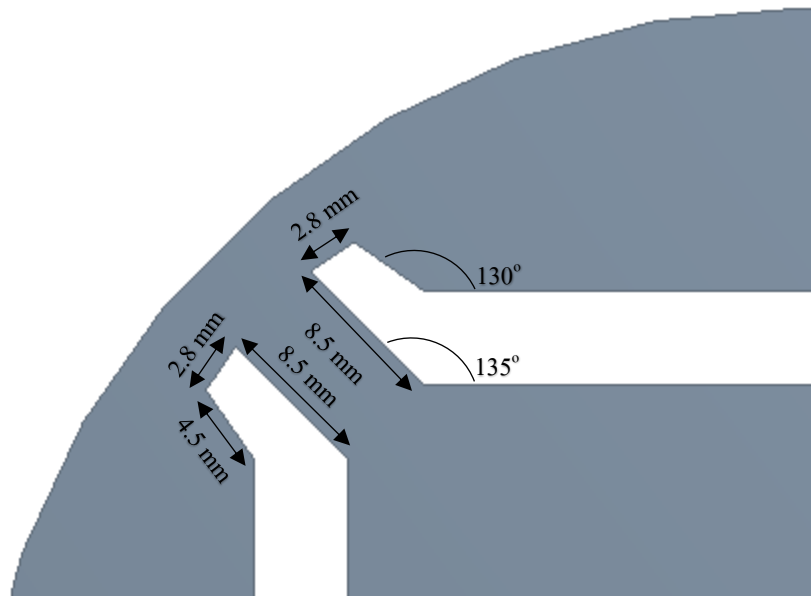
เมื่อได้ทำการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ปรับเปลี่ยนโรเตอร์ใหม่ โดยการทดสอบค่าของฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการออกแบบทั้งการปรับเปลี่ยนขนาดแม่เหล็กและขนาดแอร์แกปภายในโรเตอร์ จึงได้ค่าพารามิเตอร์โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมมาใช้สร้างและทดสอบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในด้านต่างๆ

**ค่าพารามิเตอร์และวัสดุอุปกรณ์สำหรับนำมาสร้างโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า**

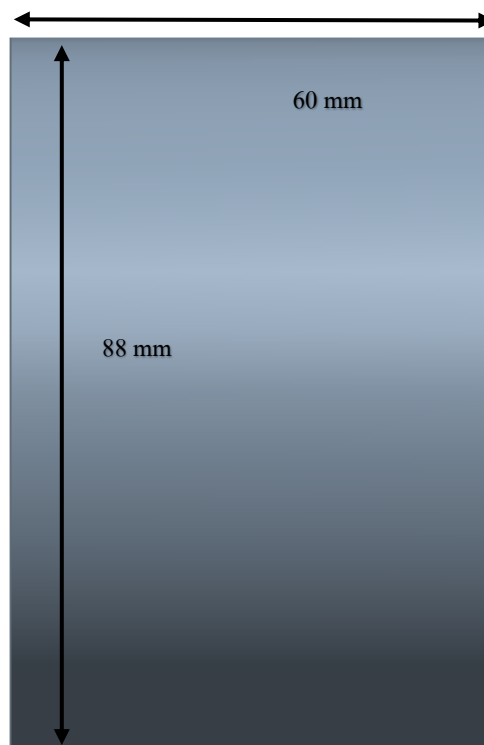
- พารามิเตอร์ของแกนเหล็กที่ต้องการนำมาสร้างโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ภาพ 55 พารามิเตอร์ที่ต้องการนำมาสร้างแกนเหล็กโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

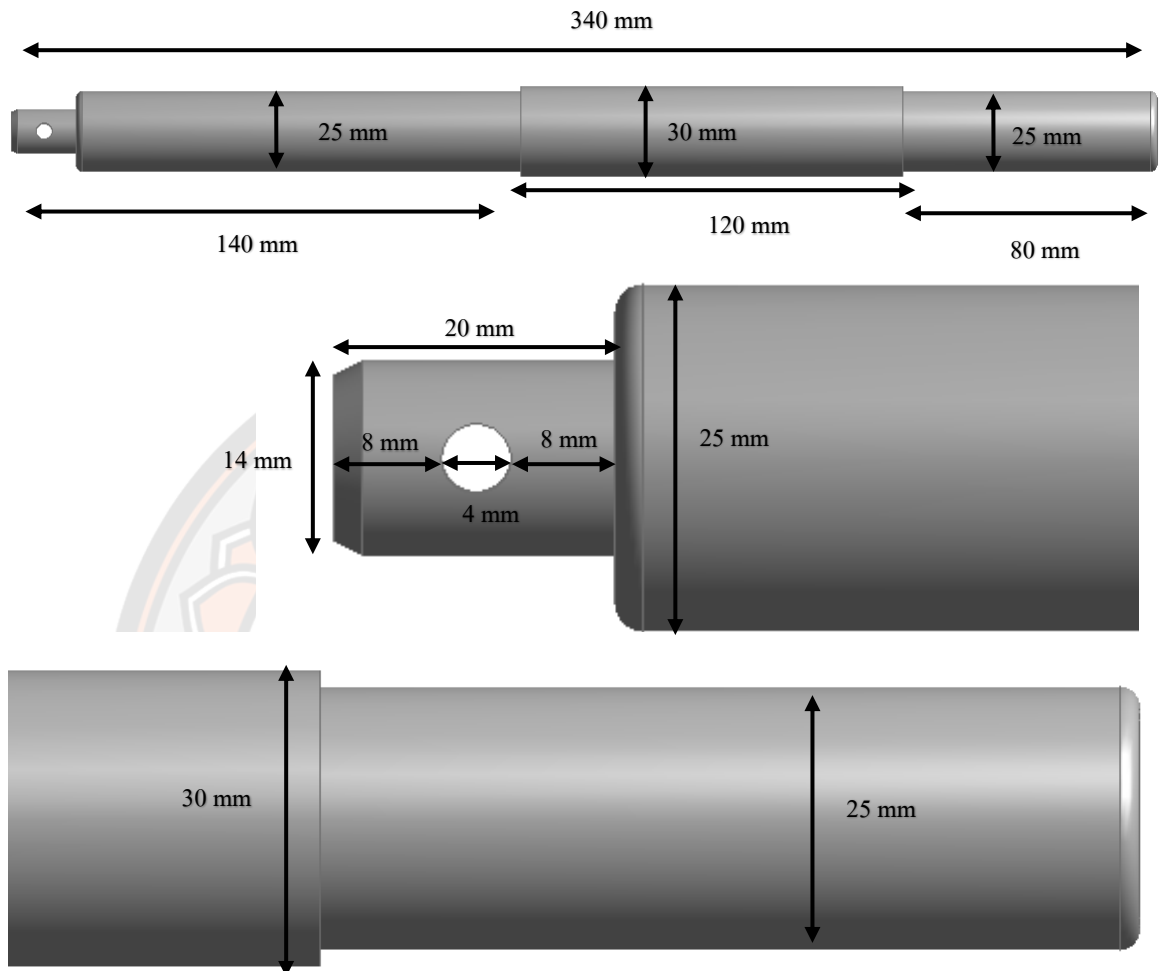


ภาพ 56 พารามิเตอร์ที่ต้องการนำมาสร้างแกนเหล็กโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ภาพ 57 พารามิเตอร์ที่ต้องการนำมาสร้างแกนเหล็กโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- พารามิเตอร์ของเพลลาที่ต้องการนำมาสร้างเพลลาของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ภาพ 58 พารามิเตอร์ของเพลลาโรเตอร์ที่ต้องการนำมาสร้างและใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- วัสดุอุปกรณ์สำหรับนำมาสร้างโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการสร้างโรเตอร์ที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวัสดุหลักสำหรับนำมาสร้างโรเตอร์นั้นมีด้วยกัน 3 อย่าง 1. แผ่นลามีเนต โดยจะใช้นำมารวมกันหลายแผ่นเพื่อนำมาใช้สร้างเป็นแกนเหล็กของโรเตอร์ตามระยะและขนาดดังภาพที่ 59(ก) 2. เหล็กเพลลาฟ้า โดยจะนำเหล็กมากลึงตามระยะและขนาดของเพลลาโรเตอร์ด้วยเครื่องกลึงเหล็กดังภาพที่ 59(ข) 3. แม่เหล็กถาวร โดยจะมีขนาด 5x20x60 มม. และ 5x30x60 มม. แสดงดังภาพที่ 60



(ก)



(ข)

ภาพ 59 ภาพแสดงแผ่นลามีเนตที่นำมาใช้สร้างแกนเหล็กและเหล็กเพลลาฟ้าที่นำมาใช้สร้างเพลลาของโรเตอร์

เมื่อ (ก) แผ่นลามีเนตที่นำมาใช้สร้างแกนเหล็กโรเตอร์ (ข) เหล็กเพลลาฟ้าที่นำมาใช้สร้างเพลลาของโรเตอร์



(ก)

(ข)

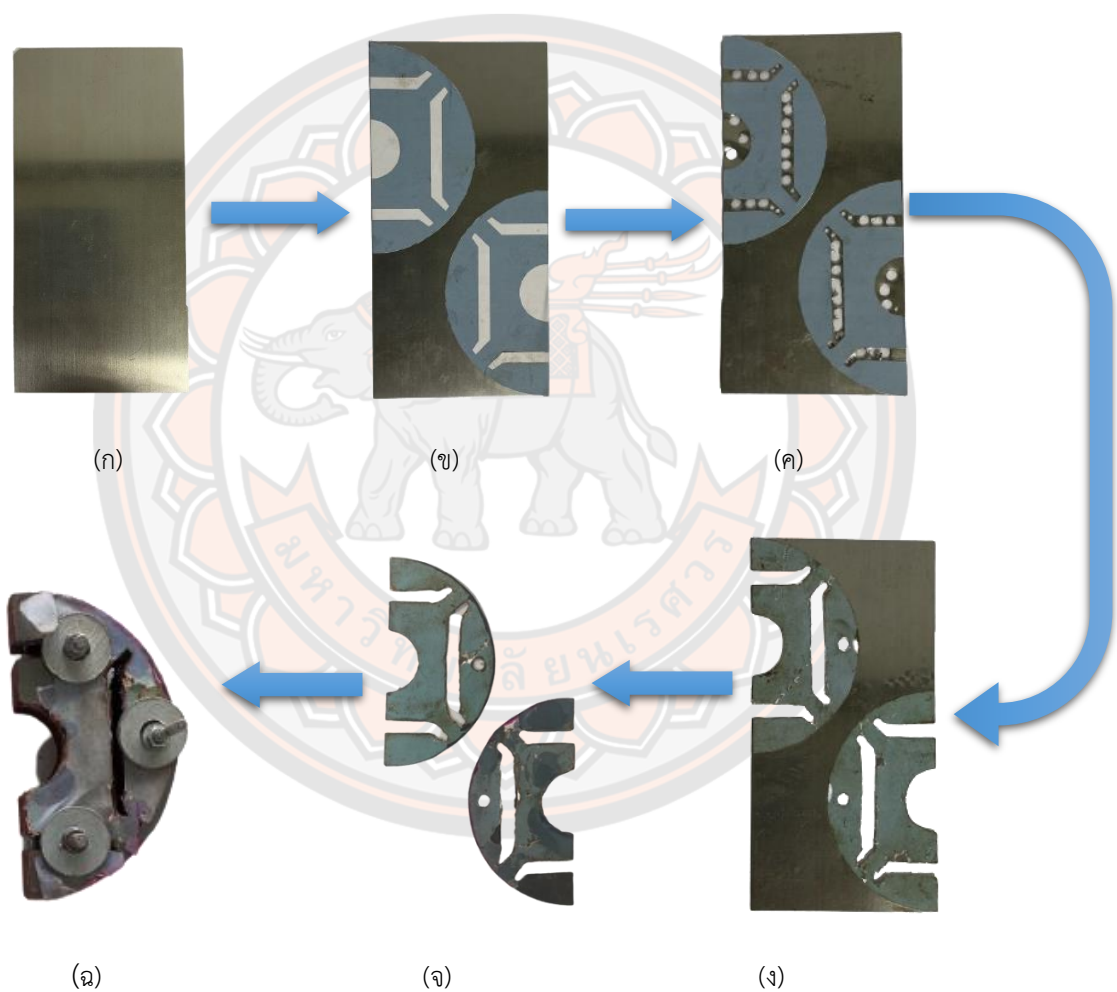
ภาพ 60 แสดงแม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 มม. และ 5x20x60 มม.

เมื่อ (ก) แม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 (ข) แม่เหล็กถาวรขนาด 5x20x60

## ขั้นตอนการสร้างโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟโนเอลิเมนต์

ขั้นตอนในการสร้างชิ้นส่วนแกนเหล็กโรเตอร์ด้วยแผ่นลามิเนต

ในขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนแกนเหล็กโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะนำแผ่นลามิเนตแต่ละแผ่นมาตัดและกัดออกตามระยะและขนาดรูปทรงครึ่งวงกลมของโรเตอร์ที่ออกแบบด้วยวิธีไฟโนเอลิเมนต์ เมื่อได้แผ่นลามิเนตครึ่งวงกลมแต่ละแผ่นนำมาารวมกันและยึดแผ่นลามิเนตแต่ละแผ่นด้วยน็อต ดังภาพที่ 61

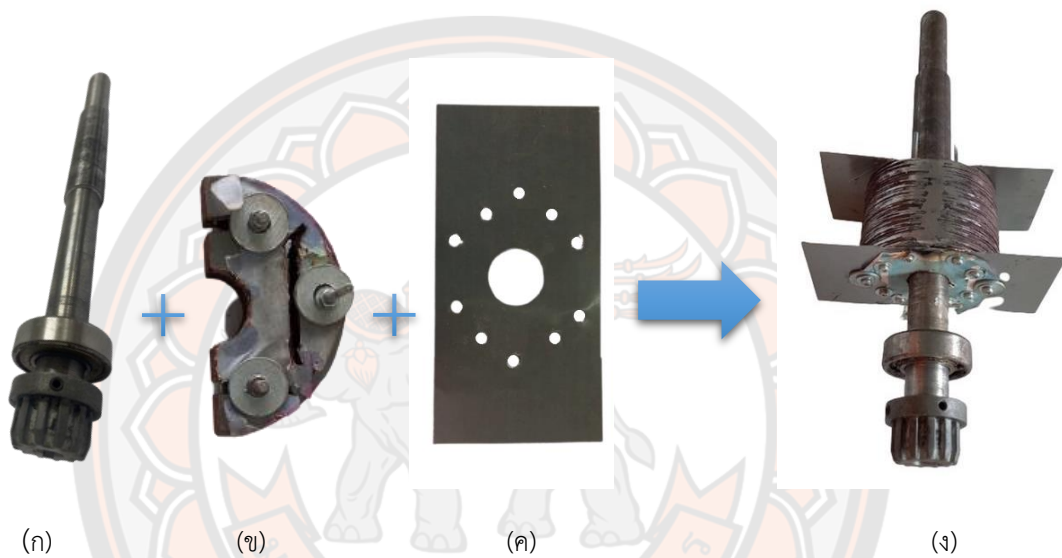


ภาพ 61 ขั้นตอนในการสร้างชิ้นส่วนของแกนเหล็กโรเตอร์ด้วยแผ่นลามิเนต

- เมื่อ (ก) แผ่นลามิเนต (ข) แผ่นลามิเนตที่ตัดแบบโรเตอร์  
 (ค) แผ่นลามิเนตที่เจาะนาร่องที่ช่องว่างอากาศ (ง) แผ่นลามิเนตที่ทำการกัดช่องว่างอากาศเสร็จ  
 (จ) แผ่นลามิเนตครึ่งวงกลม (ฉ) แผ่นลามิเนตที่ยึดติดกัน

ขั้นตอนในการประกอบแผ่นลามิเนตเพื่อให้เป็นแกนเหล็กสมบูรณ์

ในขั้นตอนการประกอบแผ่นลามิเนตให้เป็นแกนเหล็กโดยนำเพลารอเตอร์ที่ทำการสร้างขึ้นและแผ่นลามิเนตสำหรับยึดมาใช้ยึดและประกอบแผ่นลามิเนตของชิ้นส่วนแกนเหล็กที่ทำการสร้างไว้แล้วนำชิ้นส่วนทั้งหมดนำมาประกอบรวมกันและเริ่มทำการเชื่อมแผ่นลามิเนตชิ้นส่วนแกนเหล็กทั้งหมดเข้าด้วยกัน ดังภาพที่ 62

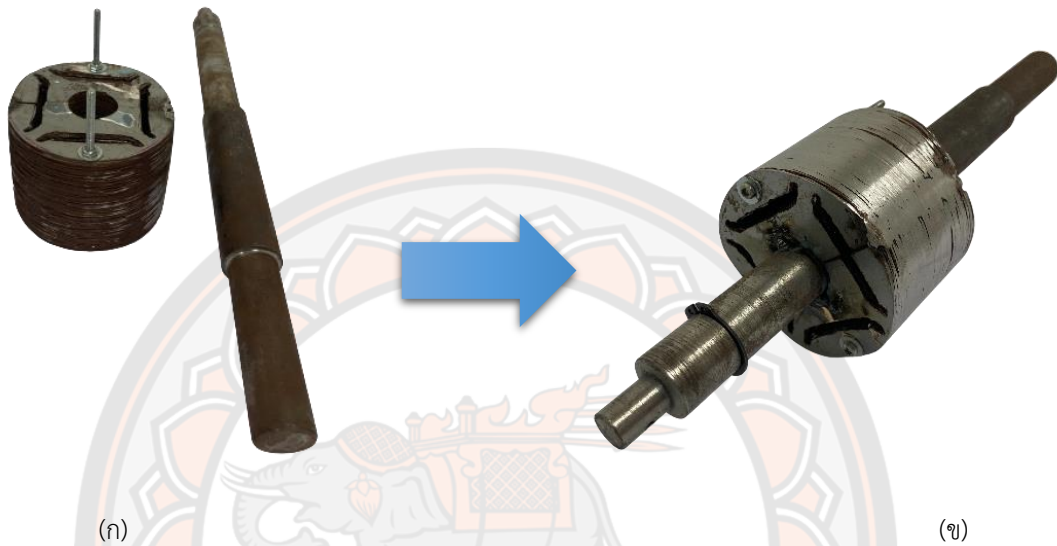


ภาพ 62 ขั้นตอนในการประกอบแผ่นลามิเนตเพื่อให้เป็นแกนเหล็ก

เมื่อ (ก) เพลารอเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ข) แผ่นลามิเนตที่ยึดติดกัน  
(ค) แบบแผ่นยึดของแผ่นลามิเนต (ง) เชื่อมแผ่นลามิเนตครึ่งวงกลมพร้อมมีแผ่นยึด

### ขั้นตอนในการประกอบแกนเหล็กกับเพลารอเตอร์

ในขั้นตอนการประกอบแกนเหล็กกับเพลารอเตอร์โดยนำแกนเหล็กและเพลารอเตอร์ที่ได้จากการสร้างขึ้นดังภาพที่ 63(ก) มาทำการเชื่อมแกนเหล็กและเพลารอเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ยึดติดกัน ดังภาพที่ 63(ข)



ภาพ 63 ขั้นตอนในการประกอบแกนเหล็กกับเพลารอเตอร์



ภาพ 64 โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และโรเตอร์แบบเก่า





ภาพ 65 อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

#### ขั้นตอนการประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ขั้นตอนการประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโรเตอร์แบบเก่า และโรเตอร์ที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. นำฝาครอบด้านหลังที่มีแปลงถ่านใส่เข้ากับสเตเตอร์และขั้วนี้้อต
2. นำโรเตอร์ประกอบเข้าไปในสเตเตอร์ซึ่งจะมีช่องทางฝาครอบด้านหลังที่สามารถใส่โรเตอร์เข้าไปได้พอดี
3. ประกอบชุดฝาครอบหน้าและพัดลมระบายความร้อนและฝาครอบพัดลมและขั้วนี้้อต



ภาพ 66 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโรเตอร์แบบเก่า ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์



ภาพ 67 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโรเตอร์ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

## การทดสอบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

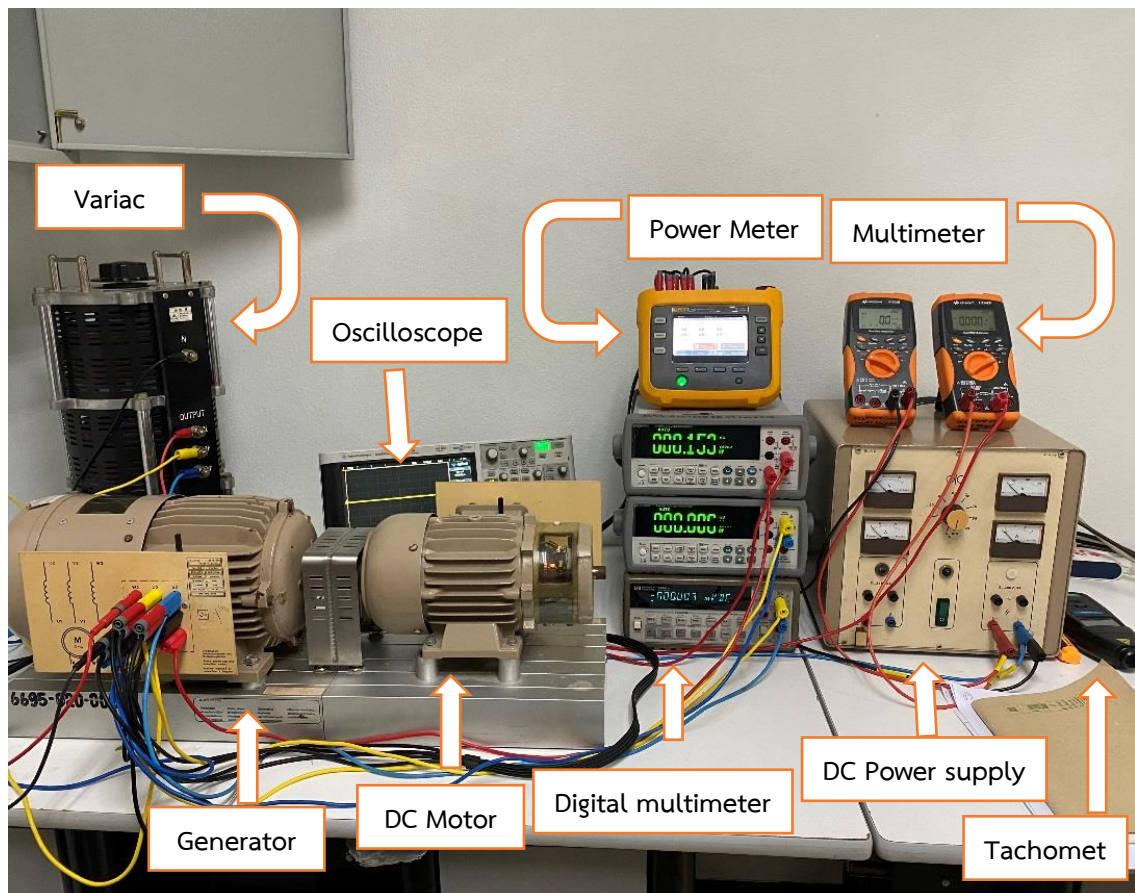
การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้แก่ ความเร็วรอบ ความถี่ แรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าด้านเข้า แรงดันไฟฟ้าด้านออก เป็นต้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

แสดงการติดตั้งเครื่องมือและเครื่องวัดการทดสอบสมรรถภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการดังภาพที่ 68

ประกอบด้วย

1. Variac หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ชนิดแกนหมุน
2. DC Power Supply คือ แหล่งจ่ายไฟตรง ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current) ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current)
3. Power Meter คือ เครื่องมือวัด ที่ใช้วัดและแสดงค่าเป็นพารามิเตอร์และปริมาณพลังงานไฟฟ้า
4. Multimeter รุ่น u1242b คือ เครื่องมือวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้า
5. Oscilloscope คือ เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า ได้ทั้งแรงดันของไฟฟ้าความถี่และเฟสของสัญญาณ
6. Bench-Top Digital multimeter คือ เครื่องมือวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้า แบบตั้งโต๊ะ
7. Tachometer DT2236B คือ เครื่องวัดความเร็วรอบ
8. DC Motor (Direct current motor) คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่หมุนเพื่อสร้างพลังงานกล



ภาพ 68 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการทดสอบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 6 การทดสอบ

- การทดสอบที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์มีค่าคงที่
- การทดสอบที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่กระตุ้นเครื่องกำเนิดมีค่าคงที่
- การทดสอบที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างขึ้นด้วยแม่เหล็ก 20x5x60 มม.
- การทดสอบที่ 4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างขึ้นด้วยแม่เหล็ก 30x5x60 มม.
- การทดสอบที่ 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างขึ้นด้วยแม่เหล็ก 30x5x60 มม. ต่อโหลด
- การทดสอบที่ 6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ ต่อโหลด

การทดสอบที่ 1 เริ่มจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มอเตอร์คงที่ 43 Volt (แรงดันที่ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็ว 1,500 รอบ ขณะเครื่องกำเนิดยังไม่กระตุ้น) ซึ่งระหว่างการทดสอบจะปรับแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไปกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย Variac โดยการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะปรับค่าแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเพิ่มขึ้น และทำการวัดค่า กระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์, กระแสที่จ่ายให้กับโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้าด้านนอก, , ความถี่และความเร็วรอบ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 14

การทดสอบที่ 2 เริ่มจากการจ่ายแรงดันกระตุ้นที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสที่ 33.33 Volt (แรงดันที่กระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานได้ตามสเปค 1,500RPM 230V ) ซึ่งระหว่างการทดสอบจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มอเตอร์ ด้วย DC Power Supply และทำการวัดค่า กระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์, กระแสที่จ่ายให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้าด้านนอก, ความถี่และความเร็วรอบ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 15

การทดสอบที่ 3 เริ่มจากการใช้โรเตอร์แม่เหล็กถาวรขนาด 5x20x60 มม. มาใช้ทำการทดสอบ ซึ่งระหว่างการทดสอบจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มอเตอร์ ด้วย DC Power Supply และทำการวัดค่า กระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์, แรงดันไฟฟ้าด้านนอก, ความถี่และความเร็วรอบ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 16

การทดสอบที่ 4 เริ่มจากการใช้โรเตอร์แม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 มม. มาใช้ทำการทดสอบ ซึ่งระหว่างการทดสอบจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มอเตอร์ ด้วย DC Power Supply และทำการวัดค่า กระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์, แรงดันไฟฟ้าด้านนอก, ความถี่และความเร็วรอบ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 17

การทดสอบที่ 5 เริ่มจากการใช้โรเตอร์แม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 มม. มาใช้ทำการทดสอบ ซึ่งระหว่างการทดสอบจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มอเตอร์ ด้วย DC Power Supply ที่ได้ ความเร็วรอบ 300 ถึง 1,500 รอบ และทำการต่อกับโหลด 1,800 โอห์ม ที่ 70 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และทำการวัดค่า แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์, แรงดันไฟฟ้าด้านนอก, ความถี่ โดยผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 18

การทดสอบที่ 6 เริ่มจากการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบมาใช้ทำการทดสอบ ซึ่งระหว่างการทดสอบจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มอเตอร์ขนาดเท่ากับการทดสอบที่5 และปรับแรงดันโรเตอร์ให้ได้ความเร็วรอบที่ 300 ถึง 1,500 รอบ จากนั้นทำการต่อกับโหลด 1,800 โอห์ม ที่ 70 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และทำการวัดค่า แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์,แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโรเตอร์ แรงดันไฟฟ้าด้านนอก, ความถี่ โดยผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่

ตาราง 13 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าขณะไม่มีการขับโหลด

DC Motor		
$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	N (rpm)
0	0	0
5	0.305	0
10	0.337	351
15	0.34	742
20	0.343	1080
25	0.351	1488
30	0.356	1845
35	0.36	2204
40	0.364	2542
45	0.374	2863
50	0.383	3181
55	0.395	3480
60	0.403	3862
65	0.406	4200
70	0.408	4750

**ตาราง 14** ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้ามอเตอร์คงที่ ขณะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่โรเตอร์

Motor		Rotor		Out put		
$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$V_{AC}$ (V)	$I_{AC}$ (A)	$V_{L-L}$ (V)	f (Hz)	N (rpm)
43	0.63	2.3	0	15.4	101	1500
43	0.63	5	0.074	32.4	100	1473
43	0.63	10	0.124	65.2	99.4	1460
43	0.63	15	0.174	99.5	98.5	1443
43	0.64	20	0.215	130.5	98	1430
43	0.65	25	0.259	164.5	97.6	1405
43	0.65	30	0.304	197.3	97	1385
43	0.66	35	0.342	227.3	96.4	1368
43	0.67	40	0.39	259.1	95.7	1349
43	0.68	45	0.429	287.5	95.1	1329
43	0.69	50	0.475	317.7	94.6	1305
43	0.7	55	0.522	346.3	93.7	1273
43	0.71	60	0.57	375	92.3	1260
43	0.72	65	0.622	404	91.4	1236
43	0.73	70	0.669	431.2	90.9	1214

จากการทดสอบสมรรถภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพบว่าเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสไปกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พบว่าแรงดันต้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แรงดันไฟฟ้าต้านออกสูงสุดที่ 431.2 Volt มีความถี่และความเร็วรอบ 90.9 Hz , 1214 rpm

**ตาราง 15** ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้ากระตุ้นโรเตอร์คงที่ แล้วเพิ่มแรงดันที่มอเตอร์

Rotor		Motor		Out put		
$V_{AC}$ (V)	$I_{AC}$ (A)	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$V_{L-L}$ (V)	f (Hz)	N (rpm)
33.3	0.331	0	0	105	50	0
33.3	0.336	5	0.347	113	50	0
33.3	0.333	10	0.543	120	50.9	95
33.3	0.332	15	0.559	136.2	58	305
33.3	0.332	20	0.573	153	64.7	525
33.3	0.332	25	0.588	168.7	71.6	733
33.3	0.332	30	0.6	184.6	77.6	938
33.3	0.332	35	0.614	198.1	83.7	1115
33.3	0.331	40	0.632	213.2	89.8	1320
33.3	0.332	45	0.644	226	95.8	1490
33.3	0.332	50	0.665	239.6	102.4	1650
33.3	0.33	55	0.676	250.5	107.8	1810
33.3	0.33	60	0.692	263.3	112.8	1979
33.3	0.329	65	0.703	275.6	118.3	2140
33.3	0.329	70	0.717	285.8	123.1	2280

จากการทดสอบสมรรถภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพบว่าเมื่อจ่ายแรงดันกระตุ้นสามเฟสคงที่ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มอเตอร์ พบว่าแรงดันไฟฟ้านี้ออกสูงสุดที่ 285.8 Volt ความถี่และความเร็วรอบสูงสุดที่ 123.1 Hz , 2280 rpm



ตาราง 16 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x20x60 mm

Motor		Out put		
V <sub>DC</sub> (V)	I <sub>DC</sub> (A)	V <sub>L-L</sub> (V)	f (Hz)	N (rpm)
0	0	0	0	0
5	0.327	0	0	0
10	0.402	4.1	8.83	247.6
15	0.424	8.8	18.27	515.2
20	0.443	13.3	27.7	800
25	0.457	17.88	37.08	1035
30	0.466	22.23	46.4	1343
35	0.476	26.67	55.68	1606
40	0.479	31	65.65	1880
45	0.485	36	75	2177
50	0.508	38.47	80	2296
55	0.54	40.2	85	2440
60	0.553	43.4	90	2550
65	0.576	45.1	94.9	2830
70	0.59	49	99.9	2970

จากการทดสอบสมรรถภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มอเตอร์ พบว่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกสูงสุดที่ 49 Volt ความถี่และความเร็วรอบสูงสุดที่ 99.9 Hz , 2970 rpm

ตาราง 17 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 mm

Motor		Out put		
$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (A)	$V_{L-L}$ (V)	f (Hz)	N (rpm)
0	0	0	0	0
5	0.322	0	0	0
10	0.42	11	8	236
15	0.44	23.8	17.5	505
20	0.452	37.5	27.2	788
25	0.458	50.9	36.9	1027
30	0.469	63.5	46.3	1333
35	0.473	76.5	55.75	1602
40	0.48	89.16	64.8	1873
45	0.491	100.2	73.1	2130
50	0.511	109	78.8	2280
55	0.522	120	85	2540
60	0.546	124	90.1	2695
65	0.575	130.4	95	2830
70	0.585	141.5	100	2980

จากการทดสอบสมรรถภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มอเตอร์ พบว่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกสูงสุดที่ 141.5 Volt ความถี่และความเร็วรอบสูงสุดที่ 100 Hz , 2980 rpm

ตาราง 18 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 mm เมื่อต่อกับโหลด

	N(rpm)	Motor		Out Put Load	
		V <sub>DC</sub> (V)	I <sub>DC</sub> (A)	V <sub>out</sub> (V)	f (Hz)
No load	300	10.36	0.415	15.5	11.5
	500	15.06	0.435	24.8	18
	700	19	0.449	35.5	25.4
	900	22.9	0.457	45.4	32
	1100	26.7	0.46	54.7	39
	1300	30.3	0.471	63.4	46
	1500	33.7	0.467	72	50
load 100% (1,800Ω)	300	12	0.425	15	11.15
	500	16	0.445	24.2	18
	700	20.4	0.465	34.4	25.4
	900	24.3	0.48	43.5	32.3
	1100	28.4	0.5	52.8	39
	1300	33	0.51	62.5	46.5
	1500	37	0.52	70.7	50
load 90% (1,350Ω)	300	12.8	0.435	15.9	12
	500	16.3	0.455	24.6	18.3
	700	19.8	0.475	32.6	24.3
	900	24.7	0.49	43.1	32.2
	1100	29.7	0.51	53.6	40
	1300	33	0.52	61.2	45
	1500	36.6	0.52	68.3	50
load 80% (875Ω)	300	13	0.44	15.7	12.1
	500	17	0.47	24.5	18.9
	700	21	0.49	32.5	24.9
	900	26.7	0.521	42.3	32.2
	1100	31.2	0.537	50.7	38.65
	1300	35	0.55	58.2	44.38

	1500	39	0.56	66.8	50
load 70% (390Ω)	300	13.9	0.48	14.1	11.34
	500	19.9	0.53	24.2	19.33
	700	23.7	0.56	30.3	24.4
	900	29.8	0.6	40.9	33.7
	1100	36.2	0.62	47.1	39
	1300	40	0.63	51.5	44
	1500	45.5	0.65	57.7	50

ตาราง 19 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบเมื่อเทียบกับโหลด

	N(rpm)	Motor		Rotor		Out Put Load	
		V <sub>DC</sub> (V)	I <sub>DC</sub> (A)	V <sub>AC</sub> (V)	I <sub>AC</sub> (A)	V <sub>out</sub> (V)	f (Hz)
No load	300	11.8	0.558	4.1	0.06	15.5	100
	500	20.1	0.575	5.68	0.085	24.8	60
	700	25	0.597	7.35	0.102	35.5	67
	900	30.4	0.61	8.43	0.114	45.4	73.8
	1100	35	0.623	9.28	0.125	54.7	81.3
	1300	40.46	0.639	10.63	0.13	64	87.1
	1500	45.4	0.655	10.6	0.135	72	93.5
load 100% (1,800Ω)	300	11.78	0.56	4.16	0.065	13.6	100
	500	20.1	0.578	5.6	0.089	22.3	60
	700	25	0.603	7.2	0.11	31.4	67
	900	30.4	0.619	8.3	0.127	40.12	74
	1100	35	0.633	9.2	0.14	49	81.5
	1300	40.3	0.651	10.48	0.153	57	87.1
	1500	45.6	0.668	10.3	0.16	62	93.1
load 90% (1,350Ω)	300	11.78	0.56	4.14	0.066	13.2	100
	500	20.1	0.581	5.5	0.092	21.5	60
	700	25	0.604	7.2	0.116	30.5	67
	900	30.35	0.623	8.25	0.134	38.7	73.8

	1100	35	0.637	9.19	0.15	47.2	80.4
	1300	40.3	0.655	10.45	0.165	55.3	87.3
	1500	45.6	0.672	10.2	0.173	59	93.7
load 80% (875Ω)	300	11.78	0.56	4.1	0.07	12.4	100
	500	20.1	0.58	5.5	0.1	20.34	60
	700	25	0.607	7.11	0.13	28.4	66.9
	900	30.35	0.626	8.24	0.152	36.5	73.9
	1100	34.8	0.64	9.13	0.174	44.7	81.3
	1300	40.3	0.662	10.36	0.198	51.4	86.9
	1500	45.6	0.68	10.1	0.208	55.1	93.7
load 70% (390Ω)	300	11.7	0.56	4	0.089	10.8	100
	500	20.1	0.589	5.35	0.133	17.18	60
	700	25	0.614	7	0.173	24.6	67
	900	30.26	0.636	8.08	0.213	31.5	74
	1100	34.7	0.654	9.04	0.255	38.7	80.5
	1300	40.13	0.673	10.2	0.289	44.3	87
	1500	45.6	0.695	10	0.324	45	93.7

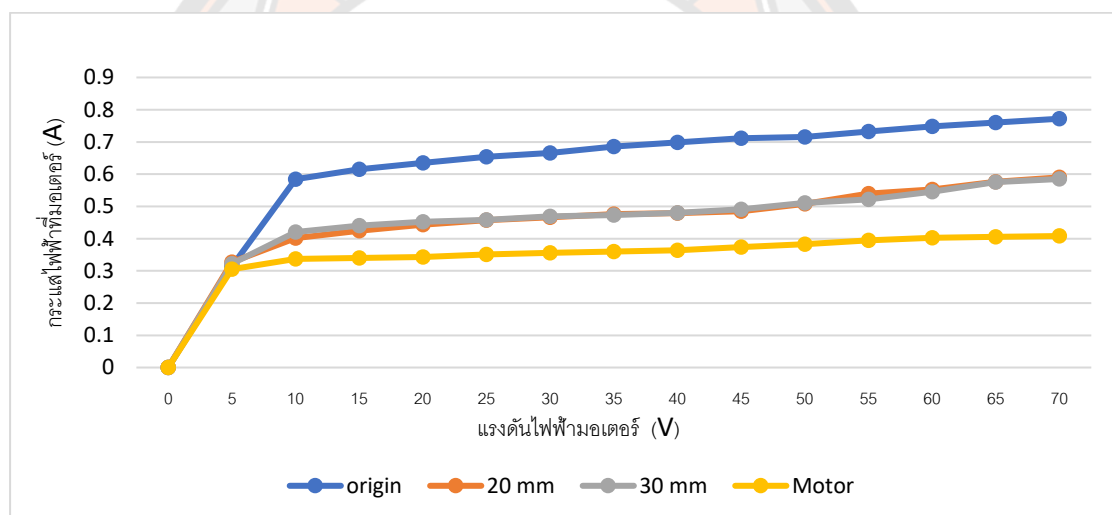
ดังนั้นจากการทดสอบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งความเร็วรอบ ความถี่ แรงเคลื่อนไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า สามารถนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ได้ดังตารางที่ 20

**ตาราง 20** ผลการคำนวณกำลังขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

N (rpm)	$P_M$ (W)									
	No Load		Load 100 % (1,800 $\Omega$ )		Load 90 % (1,350 $\Omega$ )		Load 80 % (875 $\Omega$ )		Load 70 % (390 $\Omega$ )	
	original	New	original	New	original	New	original	New	original	New
300	6.58	4.29	6.59	5.1	6.59	5.56	6.59	5.72	6.55	6.672
500	11.55	6.55	11.61	7.12	11.67	7.41	11.65	7.99	11.83	10.54
700	14.92	8.53	15.07	9.48	15.1	9.40	15.17	10.29	15.35	13.27
900	18.54	10.46	18.81	11.66	18.90	12.10	18.99	13.91	19.24	17.88
1100	21.80	12.28	22.15	14.2	22.29	15.14	22.27	16.75	22.69	22.44
1300	25.85	14.27	26.23	16.83	26.39	17.16	26.67	19.25	27.00	25.2
1500	29.73	15.73	30.46	19.03	30.64	19.24	31.00	21.84	31.69	29.57

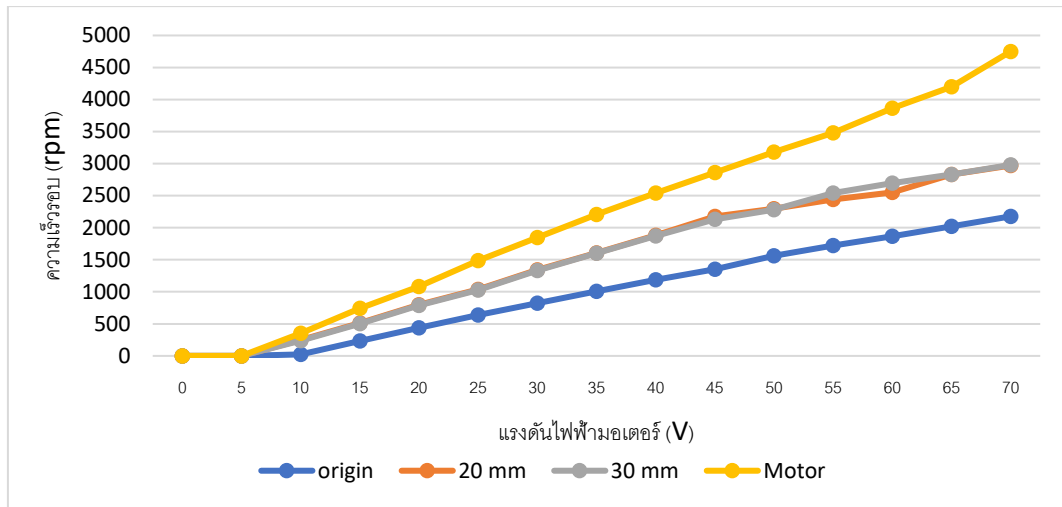
## เปรียบเทียบผลการทดสอบสมรรถภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ผลการเปรียบเทียบดังภาพที่ 69 โดยกำหนด ให้กราฟเส้น สีน้ำเงินเป็นผลการทดสอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ สีส้มเป็นผลการทดสอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x20x60 มม. สีเทาเป็นผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 มม. และสีเหลืองเป็นผลการทดสอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



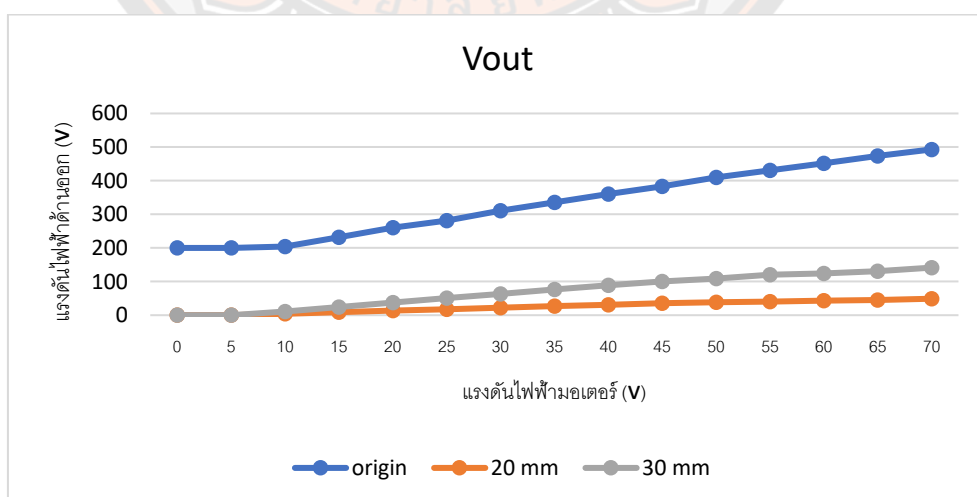
ภาพ 69 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์กับกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์

ภาพแสดงกราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง พบว่าการเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของกับมอเตอร์ที่ขับเครื่องกำเนิดทั้ง 3 แบบ อยู่ นั้น มอเตอร์ไฟฟ้าจะใช้กระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบใช้กระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อนสูงสุด 0.772 A ที่ 70 V เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x20x60 มม. ใช้กระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อนสูงสุด 0.59 A ที่ 70 V เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 มม. ใช้กระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อนสูงสุด 0.585 A ที่ 70 V ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบใช้กระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อนมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร 5x20x60 มม. และ 5x30x60 มม. เท่ากับ 26.72 , 27.56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพ 70 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์กับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

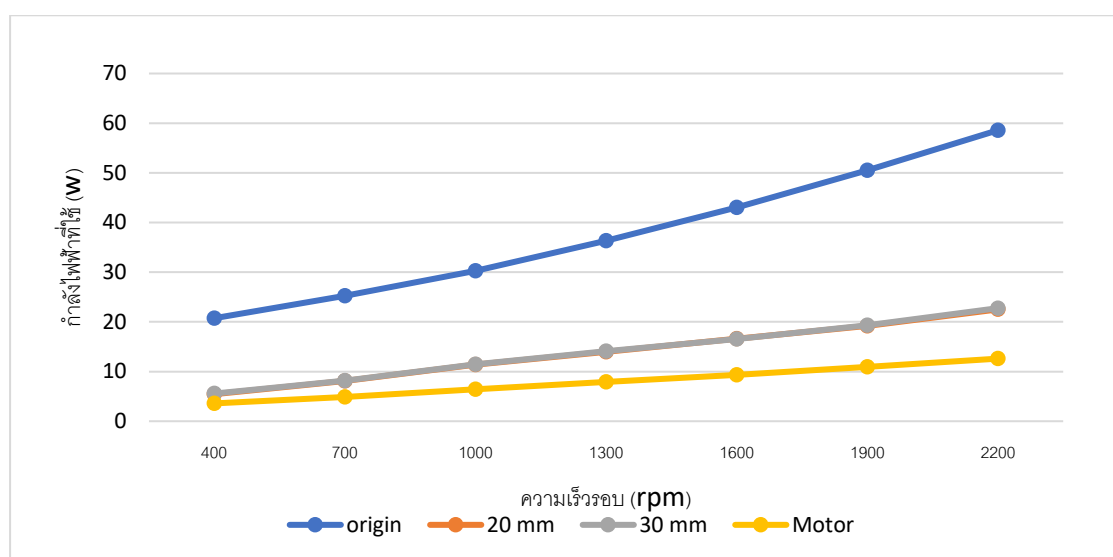
ภาพแสดงการเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พบว่าการเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนกำเนิดทั้ง 3 แบบ ที่แรงดัน 70 V มอเตอร์ขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบมีความเร็วรอบ 2,177 rpm เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x20x60 มม. มีความเร็วรอบ 2970 rpm และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 มม. มีความเร็วรอบ 2980 rpm ดังนั้นที่แรงดันเท่ากันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบจะมีความเร็วรอบที่น้อยกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรขนาด 5x20x60 มม. และ 5x30x60 มม. เท่ากับ 30.81 , 31.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพ 71 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าด้านออก

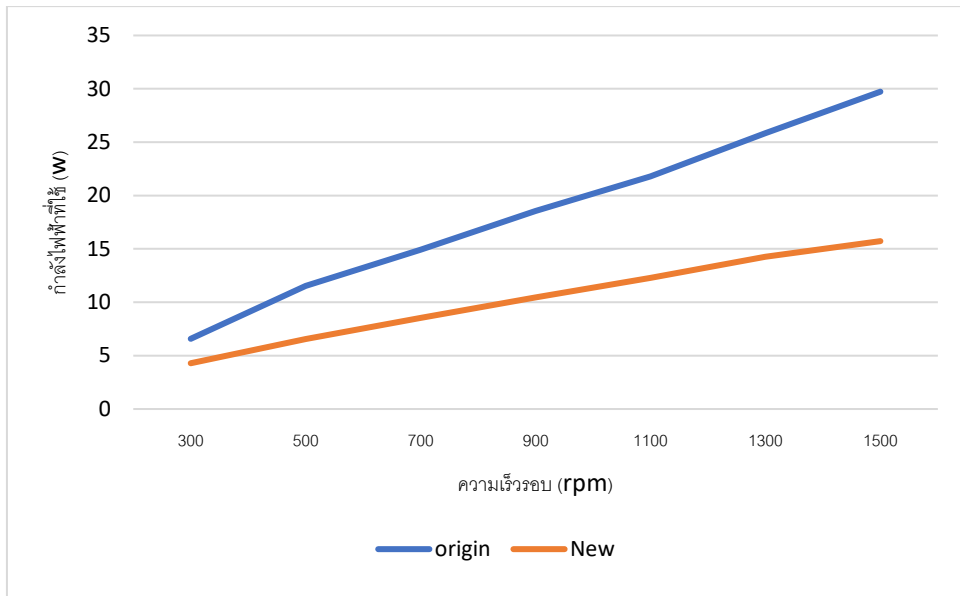


ภาพแสดงการเปรียบเทียบการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกของเครื่องกำเนิด พบว่าการเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดทั้ง 3 แบบ แรงดันไฟฟ้าทางด้านเครื่องกำเนิดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ที่แรงดันมอเตอร์ 70 V มอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบได้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 493 V เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x20x60 มม. ได้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 49 V และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 มม. ได้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 141.5 V

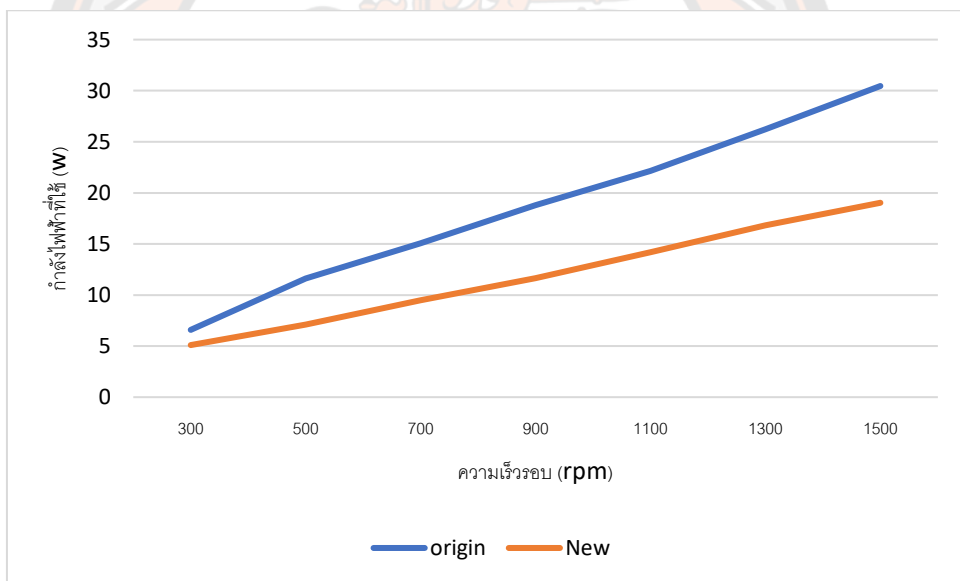


ภาพ 72 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้กับความเร็วยรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

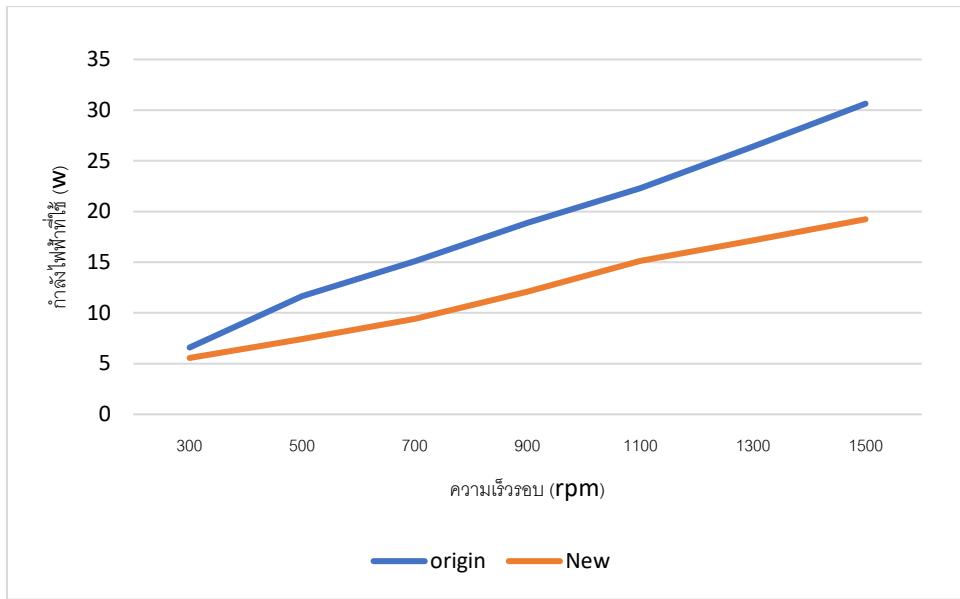
ภาพแสดงการเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้กับความเร็วยรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พบว่าเมื่อความเร็วยรอบของเครื่องกำเนิดเพิ่มขึ้น ความต้องการกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดทั้ง 3 แบบ มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วยรอบ 2200 rpm เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ มีความต้องการกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อน 58.57 W เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x20x60 มม. มีความต้องการกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อน 22.51 W เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 5x30x60 มม. มีความต้องการกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อน 22.76 W ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ที่มีความเร็วยรอบเท่ากัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ มีความต้องการกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรขนาด 5x20x60 มม. และ 5x30x60 มม.



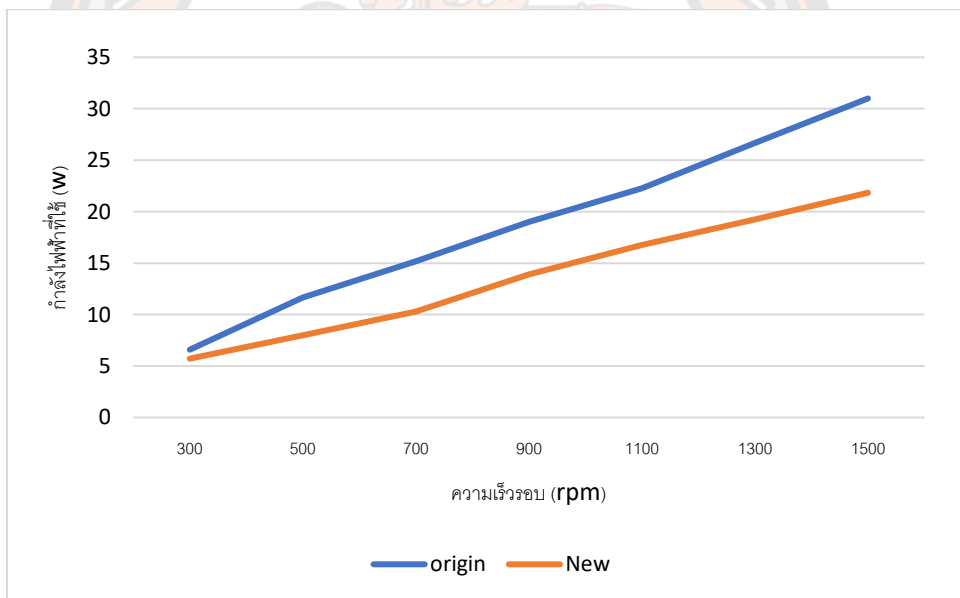
ภาพ 73 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เมื่อไร้การต่อโหลด



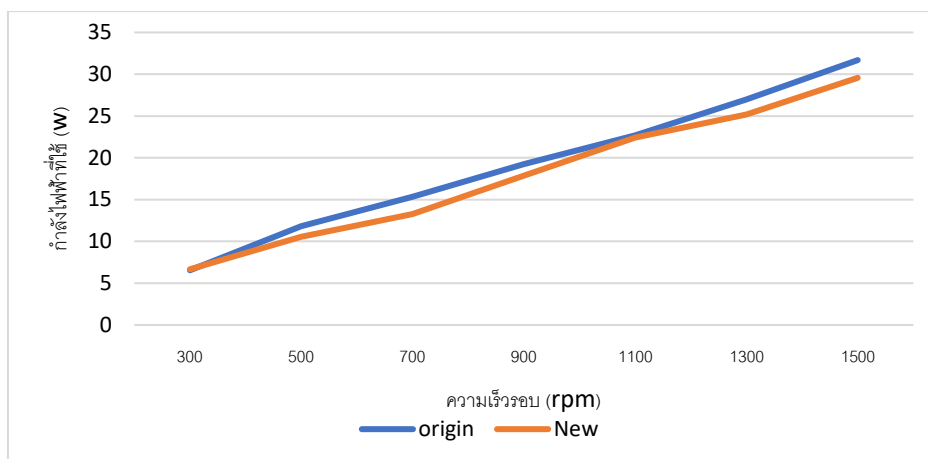
ภาพ 74 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อโหลด 100 %



ภาพ 75 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อโหลด 90 %



ภาพ 76 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อโหลด 80 %



ภาพ 77 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อโหลด 70 %

จากภาพที่ 73 ถึง 77 เป็นภาพแสดงการเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระดับแรงดันใกล้เคียงกันทั้งขณะมีโหลดและไม่มีโหลด และจากความเร็วลมในเขตพื้นที่เป้าหมายที่ได้ทำการเก็บรวบรวมมาเป็นระยะเวลา 12 เดือน ความเร็วเฉลี่ยของลมทั้งหมดจะได้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ที่ 387.28 rpm จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งขณะมีโหลดและไม่มีโหลด ที่ขณะไม่มีโหลดมีกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อน 8.74 w และ 5.27 w ตามลำดับ ขณะมีโหลดที่ 100% มีกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อน 8.78 w และ 5.98 w ตามลำดับ ขณะมีโหลดที่ 90% มีกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อน 8.80 w และ 6.36 w ตามลำดับ ขณะมีโหลดที่ 80% มีกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อน 8.80 w และ 6.71 w ตามลำดับ ขณะมีโหลดที่ 70% มีกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อน 8.85 w และ 8.36 w ตามลำดับ ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบมีกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขณะไม่ต่อโหลด และต่อโหลด ที่ความเร็วรอบ 387.28 rpm และความเร็วสูงสุดของลมทั้งหมดจะได้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ที่ 950.54 rpm ที่ขณะไม่มีโหลดมีกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อน 19.36 w และ 10.92 w ตามลำดับ ขณะมีโหลดที่ 100% มีกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อน 19.65 w และ 12.30 w ตามลำดับ ขณะมีโหลดที่ 90% มีกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อน 19.75 w และ 12.87 w ตามลำดับ ขณะมีโหลดที่ 80% มีกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อน 19.81 w และ 14.62 w ตามลำดับ ขณะมีโหลดที่ 70% มีกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อน 20.11 w และ 19.0 w ตามลำดับ ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบมีกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขณะไม่ต่อโหลด และต่อโหลด ที่ความเร็วรอบ 950.54 rpm

## บทที่ 5

### สรุป

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์สมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันลมขนาดเล็กที่มีความเหมาะสมกับความเร็วลมระดับปานกลาง ด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อออกแบบพัฒนาและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีความสามารถความเหมาะสมกับขนาดความเร็วลมที่ได้ทำการศึกษา โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สร้างแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อออกแบบโครงสร้างเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทำให้ช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายก่อนการสร้างจริง จากนั้นทำการทดสอบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

### สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามผลการวิจัยที่ได้ศึกษาได้แก่ ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการทดสอบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จากการสร้างด้วยออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม ANSYS 16 ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 14 ตัว ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้าง ช่องว่างอากาศที่เพิ่มขึ้น และแม่เหล็กถาวรนีโอไดเมียมที่มีขนาด ความยาว 60 มม. ความหนา 5 มม. โดยปรับเปลี่ยนจำนวนความกว้าง 3 ขนาด ตั้งแต่ความกว้าง 20 มม. 25 มม. 30 มม. จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกออกแบบขึ้นด้วยการใช้แม่เหล็กถาวรที่มีขนาดความกว้างมากขึ้นนั้นจะมีแนวโน้มค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมีค่าสูงตามไปด้วย แต่เนื่องด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะนำไปใช้กับกังหันลมขนาดเล็กและเพื่อที่จะใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกังหันลมขนาดเล็กได้อย่างเหมาะสมนั้นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของลมในเขตพื้นที่เป้าหมายเนื่องด้วยค่าความเร็วลมในเขตพื้นที่เป้าหมายนั้นมีปริมาณลมไม่สูงมาก จากการเก็บค่าความเร็วลมในแต่ละวันตลอดเป็นระยะเวลาครบ 1 ปี จะได้ความเร็วลมเฉลี่ยในเขตพื้นที่พิษณุโลก 6.08 m/s และความเร็วลมสูงสุดที่ 14.93 m/s ซึ่งเป็นลมที่มีขนาดปานกลางไม่สูงมาก ดังนั้นการเลือกใช้ขนาดแม่เหล็กถาวรเพื่อนำมาใช้สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะพิจารณาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเพียงอย่างเดียวไม่ได้เพื่อให้กังหันลมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพพร้อมกับขนาดของลมในเขตพื้นที่เป้าหมาย ต้องคำนึงถึงค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวมนั้น

มีการเหนี่ยวนำไปที่ขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์และค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กยังสามารถเหนี่ยวนำที่แกนเหล็กส่งผลให้การหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าช้าลงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องมีกำลังขับเคลื่อนมากกว่าเดิม เพราะมีทอร์ระหว่างแม่เหล็กถาวรและแกนเหล็กมากขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้แม่เหล็กถาวรนีโอไดเมียมมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวม 20 มม. มีขนาด 0.252 T, 30 มม. มีขนาด 0.326 T, 25 มม. มีขนาด 0.341 T นอกจากการเลือกออกแบบการใช้ขนาดแม่เหล็กถาวรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ยังสามารถออกแบบการปรับเปลี่ยนโครงสร้างช่องว่างอากาศภายในโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยปรับเปลี่ยนความยาวของช่องว่างอากาศทั้งหมด 11 ขนาด ตั้งแต่ความยาว 1 มม., 1.5 มม., 2 มม., 2.5 มม., 3 มม., 3.5 มม., 4 มม., 4.5 มม., 5 มม., 5.5 มม., 6 มม. จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกออกแบบให้มีความยาวของช่องว่างอากาศมากขึ้นนั้น จะมีแนวโน้มค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมีค่าสูงตามไปด้วย แต่เนื่องด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องใช้งานร่วมกับกังหันลมขนาดเล็กและลมขนาดปานกลางจึงต้องคำนึงถึงค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวมที่ส่งผลต่อการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนช่องว่างอากาศทั้ง 11 ขนาด จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนช่องว่างอากาศให้มีความยาว 4.5 มม. จะมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวมน้อยที่สุด 0.331 T และมีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดค่อนข้างสูง 5.421 T จึงสรุปได้ว่า การเลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นด้วยการปรับเปลี่ยนขนาดช่องว่างอากาศและปรับเปลี่ยนขนาดของแม่เหล็กถาวรควรเลือกใช้พารามิเตอร์หรือวัสดุที่ส่งผลทำให้ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าน้อย เพื่อให้การขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดด้วยกังหันลมขนาดเล็กและขนาดลมปานกลางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการทดสอบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในห้องปฏิบัติการ เมื่อได้ทำการออกแบบและสร้างโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นตามพารามิเตอร์ที่ออกแบบและเลือกใช้ขนาดแม่เหล็กถาวรที่ทำการวิเคราะห์แล้วว่ามีความเหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ร่วมกับกังหันลมขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขนาด 5x20x60 มม. 5x30x60 มม. และเพื่อเปรียบเทียบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้แม่เหล็กถาวรทั้ง 2 ขนาด โดยจะทำการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้แก่ ความเร็วรอบ ระดับแรงดันด้านออก ระดับแรงดันด้านเข้า กระแสไฟฟ้าด้านเข้า เป็นต้น โดยใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ เครื่องวัดความเร็วรอบ โหลดความต้านทานปรับค่าได้ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับปรับค่าได้ เป็นต้น จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วย

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะได้ ทดสอบด้านระดับแรงดันด้านนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบสามารถสร้างแรงดันด้านนอกได้มากกว่าเพราะภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบนั้นด้านสเตเตอร์และด้านโรเตอร์นั้นเป็นขดลวดจึงเกิดเป็นวงจรแปลงแรงดันขึ้น ทำให้แรงดันเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบนั้นมีค่าสูง เพราะฉะนั้นการทดสอบระดับแรงดันด้านนอกจึงจำเป็นต้องกำหนดเป็นค่าคงที่เพื่อเปรียบเทียบศักยภาพกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยที่ความเร็วรอบที่นำมาใช้เปรียบเทียบนั้นมาจากการคำนวณของขนาดลมเฉลี่ยและขนาดลมสูงสุดในเขตพื้นที่เป้าหมายมีขนาด 387 rpm และ 950 rpm กำลังไฟฟ้านำเข้าของเครื่องกำเนิด ขณะต่อโหลดที่ 100% (1,800Ω) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องการกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบที่ความเร็วลมเฉลี่ยและความเร็วลมสูงสุด 37.94% และ 46.0% ขณะต่อโหลดที่ 90% (1,350Ω) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องการกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบที่ความเร็วลมเฉลี่ยและความเร็วลมสูงสุด 32.19% และ 42.14% ขณะต่อโหลดที่ 80% (875Ω) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องการกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบที่ความเร็วลมเฉลี่ยและความเร็วลมสูงสุด 26.95% และ 30.14% ขณะต่อโหลดที่ 70% (390Ω) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องการกำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบที่ความเร็วลมเฉลี่ยและความเร็วลมสูงสุด 5.69% และ 5.67% ดังนั้นจากกำลังไฟฟ้านำเข้าที่ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่ากำลังไฟฟ้าน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความเหมาะสมมากกว่าที่จะนำไปใช้งานร่วมกับกังหันลมขนาดเล็กที่มีระดับความเร็วลมไม่สูงมาก

### ข้อเสนอแนะการวิจัย

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้พัฒนาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วลมระดับปานกลางที่ได้ศึกษา จากผลการทดสอบพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พัฒนาและออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความเหมาะสมกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบทั้งความเร็วเฉลี่ย 6.08 m/s และความเร็วสูงสุด 14.93 m/s

การดำเนินงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เป็นแนวทางการพัฒนาโครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทต่างๆ ได้ เช่น วัสดุและขนาดของโรเตอร์ ขนาดแม่เหล็กถาวร และการเลือกใช้ระยะช่องว่างอากาศภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น และการดำเนินงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เป็นแนวทางการวิเคราะห์การประมาณระดับแรงดันไฟฟ้าด้านนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

# บรรณานุกรม





## บรรณานุกรม

- [ 1 ] Rayong Marine Fisheries Research and Development Center. ลม พายุ และมรสุม. เข้าถึงได้จาก [https://www.fisheries.go.th/mf-emdec/mainweb/km\\_html/km\\_wind.html](https://www.fisheries.go.th/mf-emdec/mainweb/km_html/km_wind.html)
- [ 2 ] thai Marine Meteorological Center. ลม . เข้าถึงได้จาก <http://www.marine.tmd.go.th/thai/windhtml/windhtml.html>
- [ 3 ] Chana Chancham, Narit Klompong, Warrapong Puangkaew and Jompob Waewsak. An Analysis of Wind Potential at Huasai in Nakhon Si Thammarat Province. เข้าถึงได้จาก. [https://www.researchgate.net/publication/289401445\\_An\\_analysis\\_of\\_wind\\_potential\\_at\\_Huasai\\_in\\_Nakhon\\_Si\\_Thammarat\\_province](https://www.researchgate.net/publication/289401445_An_analysis_of_wind_potential_at_Huasai_in_Nakhon_Si_Thammarat_province)
- [ 4 ] มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. A Study of Wind Resource Micrositing เข้าถึงได้จาก. <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/>
- [ 5 ] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทนไฟฟ้าพลังงานลม. เข้าถึงได้จาก. [https://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=774&](https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=774&)
- [ 6 ] มนตรี เลื่องชวนนท์, และ กิจจา ศรีทองกุล. การออกแบบกังหันลมแนวแกนตั้งสำหรับความเร็วลมต่ำในประเทศไทย. เข้าถึงได้จาก. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/ThaiJPhys/article/view/240877>
- [ 7 ] Faqih, M. R., Sutedjo, S., & Wahjono, E. (2019). Design and Fabrication of a Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator. 2019 International Electronics Symposium (IES). doi:10.1109/elecsym.2019.8901620
- [ 8 ] Babl, A., Dajaku, G., & Gerling, D. (2020). Two New Rotor Designs with Reduced Amount of Rare-Earth Magnet Material for a Permanent Magnet Wind Generator for a 4MW Application. 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). doi:10.1109/icem49940.2020.9270874

- [9] David G. Dorrell, Design Requirements for Brushless Permanent Magnet Generators for Use in Small Renewable Energy Systems, 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)10-13 May 2015, Coeur d'Alene, ID, USA
- [10] G.I. Oosthuizen and P.J. Randewijk, Design of an Ironless Double-Rotor Radial Flux Permanent Magnet Machine, 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)10-13 May 2015, Coeur d'Alene, ID, USA
- [11] Gros, J., Sincero, G. C. R. and Viarouge, P. (2009). Design method for brush permanent magnet dc motors. In 009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (pp. 1625-1632). Miami, FL, USA: Institute of Electrical and Electronic Engineering. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075421
- [12] Fang, H., & Wang, D. (2017). A Novel Design Method of Permanent Magnet Synchronous Generator From Perspective of Permanent Magnet Material Saving. IEEE Transactions on Energy Conversion, 32(1), 48–54. doi:10.1109/tec.2016.2621133
- [13] He, C., & Wu, T. (2019). Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 3(1), 94–100. doi:10.30941/cestems.2019.00013
- [14] M.A. Dranca, M. Chirca, S. Breban, D. Fodorean. (2021). Comparative Design Analysis of Two Modular Permanent Magnet Synchronous Generators. 2021 7th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering. doi: 10.1109/ISEEE53383.2021.9628402

- [15] Dong-Ho Kim, Kwang Soo Kim, In-Jun Yang, Ju Lee; Won-Ho Kim. (2021) . IEEE Access , 152819 – 152828. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3127556
- [16] Rastogi, S., Kumar, R. R., & Singh, S. K. (2016). Design, analysis and optimization of permanent magnet synchronous generator. 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). doi:10.1109/pedes.2016.7914417
- [17] Kumar, R. R., Kumari, A., Dutta, S., & Kandali, A. B. (2020). Design and Comparative Analysis of Halbach array and Surface mounted magnetic pole Dual rotor De-Coupled Stator Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind power Application. 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). doi:10.1109/pedes49360.2020.93798
- [18] Peng, J., Jiang, Z., Xu, T., Chen, T., Lou, J., & Huang, L. (2019). Design of High Performance Surface-Inserted Permanent Magnet Synchronous Generator. 2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). doi:10.1109/cyber46603.2019.90667
- [19] Rostislav Huzlik, Cestmir Ondrusek, Norbert Palsovcics. (2016). Design of permanent magnet generators for small hydro power plant. 2016 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), 07-09 December 2016
- [20] Laksar, J., Raab, Z., & Pechanek, R. (2020). Design of Permanent Magnet Synchronous Generator for a Wide Speed Range. 2020 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME). doi:10.1109/me49197.2020.9286605

- [21] Virlan, B., Munteanu, A., Livadaru, L., Simion, A., & Nacu, I. (2017). Pole magnets segmentation effect on permanent magnet synchronous generators. 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN). doi:10.1109/sielmen.2017.8123318
- [22] Dr.Budhapon Sawetsakulanond, Nuttapong Praprut, (2016), Analysis of A 750 W Grid Connected Wind Induction Generator, KKU Res J (GS) 16 (3) : July-September 2016
- [23] แม่เหล็กถาวร. สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2564, จาก <https://www.eeeguide.com/application-of-permanent-magnet-motor/>



## ภาคผนวก

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการวิจัย ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (Variac)



2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)



3. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)



4. โหลดความต้านทาน (Load Resistance)



5. มัลติมิเตอร์แบบพกพา (Multimeter)



6. มัลติมิเตอร์แบบตั้งโต๊ะ (Bench-Top Digital multimeter)



7. พาวเวอร์มิเตอร์ (Power Meter)



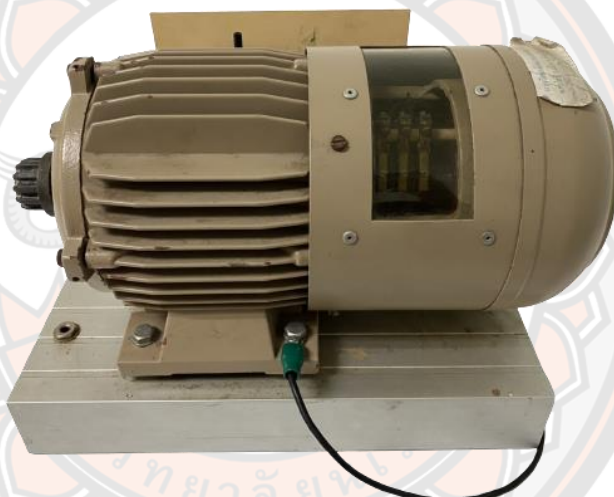
8. เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer)



9. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)



10. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบ



11. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบและสร้างใหม่





## 12. ห้องทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

