

## เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนแบบแม่เหล็กถาวรสำหรับกังหันลมชาโวเนียส

โชคชัย ศรีบัณฑิต<sup>1\*</sup>, อาทิตย์ เกลี้ยงเกลา<sup>1</sup> และบัญชา หิรัญสิงห์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

\*hirunsing@yahoo.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนแบบแม่เหล็กถาวรสำหรับกังหันลมชาโวเนียส ซึ่งมีข้อดีคือโครงสร้างไม่สลับซับซ้อน ต้นทุนต่ำ ง่ายต่อการสร้าง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่มีแปรงถ่านทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา โครงสร้างของกังหันลมประกอบด้วย โครงยึดกังหัน แกนหมุน และแผ่นใบพัดที่ทำจากถังพลาสติก ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วย ชุดสเตเตอร์ทำจากขดลวดจำนวน 9 ชุด แต่ละขดพันด้วยขดลวด SWG เบอร์ 18 พันจำนวน 60 รอบ และชุดโรเตอร์จำนวน 2 แผ่น แต่ละแผ่นมีแม่เหล็กแรงสูงชนิดนีโอไดเมียมเคลือบนิกเกิลที่มีความเข้มข้นแม่เหล็กสูงจำนวน 18 แห่ง วางขั้วเหนือขั้วใต้สลับกัน การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือเมื่อแผ่นโรเตอร์ทั้งสองหมุน ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นและมีทิศทางตัดกับขดลวดสเตเตอร์ ทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ขั้วสเตเตอร์ต่อแบบสตาร์ จากการทดลองเครื่องต้นแบบ เมื่อทดลองขณะไม่มีโหลดที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ได้แรงดันเฟส A, B และ C เท่ากับ 91.9, 79.7 และ 84.2 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเรียงกระแส 3 เฟส ได้เท่ากับ 133.2 โวลต์ และขณะต่อโหลดที่โหลดพิคก 120 วัตต์ กำลังไฟฟ้ารวมทั้ง 3 เฟส 119.17 วัตต์ เมื่อต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแส 3 เฟส แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 68.80 โวลต์ นอกจากนั้นยังทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกังหันลมชาโวเนียสที่ความเร็วต่ำ ขณะต่อโหลดที่โหลด 120 วัตต์ ทดสอบที่ความเร็วรอบ 20, 40 และ 60 รอบต่อนาที ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 12.8, 20.4 และ 31.6 โวลต์ ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ได้กำลังงานไฟฟ้าที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ต่อไป

**คำสำคัญ:** เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกน กังหันลมชาโวเนียส พลังงานหมุนเวียน



## Axial Flux Permanent Magnet Generator for Savonius Wind Turbine

Chokchai Sribundit<sup>1\*</sup>, Athit Kliangkloa<sup>1</sup> and Bancha Hiransing<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of electronics engineering, Faculty of science and technology,  
Nakhon pathom rajabhat university

<sup>2</sup>Department of electrical engineering, Faculty of science and technology,  
Nakhon pathom rajabhat university

\*hiransing@yahoo.com

### Abstract

This paper present the axial flux permanent magnet generator for savonius wind turbine with structure is sample, not complicate and low cost. The generator is brushless to be no maintenance. The savonius wind turbine consist of frame, shaft, rotor and blade plastic tank. The generator consist of stator 9 coil with SWG#18 with 60 turns per coil and 2 rotor with plates which are magnetic neodymium nickel-coated type and magnetic field intensity is high 18 pcs with alternated north-south. The generator produce three phase alternating current at Y-stator winding. The experimental results at no-load speed 500 rpm produced phase voltage A, B and C equal to 91.9, 79.7 and 84.2 Vrms respectively and dc voltage 133.2 Vdc from three phase rectifier. The results at load 120 watt produced three phase power equal to 119.17 watt and dc voltage 68.8 Vdc. Besides, The experimental results at low speed 20, 40 and 60 rpm produced dc voltage equal to 12.8, 20.4 and 31.6 Vdc respectively. The results obtained from prototype have electric power energy to the future applications.

**Keywords:** Axial Flux Permanent Magnet Generator, Savonius Wind Turbine, Renewable Energy

### 1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตประจำวัน ซึ่งในปัจจุบันพลังงานที่ใช้อยู่ได้มาจากโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำตามเขื่อนต่าง ๆ โรงไฟฟ้าถ่านหิน และโรงไฟฟ้าขนาดเล็กตามภูมิภาคต่าง ๆ เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานขยะ และโรงไฟฟ้าชีวมวล เป็นต้น การใช้พลังงานทดแทนจึงเป็นอีกทางเลือกในการผลิตพลังงานไฟฟ้าไว้ใช้ในครัวเรือน โดยได้มาจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานลม ด้วยเหตุผลนี้คณะผู้วิจัยจึงออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนกับกังหันลมซาโวเนียสเพื่อใช้ใช้ในครัวเรือนและชุมชน

กังหันลมสามารถจำแนกได้หลายประเภทเช่น จำแนกตามจำนวนใบพัด จำแนกตามทิศทางการรับลม จำแนกตามหลักอากาศพลศาสตร์ และจำแนกตามแนวแกนหมุนหรือแกนของการหมุน (Axis of Rotation) เป็นต้น โดยกังหันลมจำแนกตามจำนวนใบพัดเช่น ใบพัดเดี่ยว (Single Bladed) ใบพัดคู่ (Double Bladed) ใบพัดสามใบ (Three Bladed) หรือหลายใบพัด (Multi Bladed) จำแนกตามทิศทางการรับลมเช่น หันหน้ารับลม (Upwind) หรือหันหลังรับลม (Downwind) จำแนกตามหลักอากาศพลศาสตร์เช่น กังหันลมที่อาศัยแรงยก (Lift Force) หรือกังหันลมที่อาศัยแรงต้าน (Drag Force) ส่วนกังหันลมที่

จำแนกได้โดยอาศัยแนวแกนหมุนหรือแกนของการหมุนจำแนกได้ 2 แบบคือ กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine: HAWT) และกังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine: VAWT) [1] โดยบทความวิจัยนี้นำเสนอกังหันลมเซโวเนียสซึ่งเป็นกังลมแนวแกนตั้งที่มีข้อดีคือง่ายต่อการสร้าง ชุมชนสามารถสร้างเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้เอง วัสดุหาได้ตามท้องถิ่นตลอดทั่วไปได้ติดตั้งได้ในพื้นที่ไม่สูงมากนัก เหมาะกับงานที่ต้องการอัตราเร็วลมรอบต่ำ ๆ แต่แรงบิดสูง เป็นต้น

## 2. ทฤษฎีเบื้องต้น

### 2.1 พลังงานลม

พลังงานจลน์ (Kinetic Energy) จัดเป็นพลังงานกล (Mechanical Energy) ชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุกำลังเคลื่อนที่ เช่น การไหลของกระแส น้ำ การบินของนก และการเคลื่อนที่ของรถยนต์ เป็นต้น ดังนั้นพลังงานลมจึงเป็นพลังงานจลน์ชนิดหนึ่ง และสามารถคำนวณหาพลังงานจลน์ที่เกิดจากพลังงานลมได้ดังสมการที่ 1

$$P_w = \frac{1}{2} mV^2 \quad (1)$$

โดยที่  $m$  หมายถึงมวลของของไหล มีหน่วยเป็นกิโลกรัม และ  $V$  หมายถึงความเร็วของลมที่พัดผ่าน มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

โดยปริมาณมวลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันสามารถหาได้จากนิยามความหนาแน่นพื้นฐานที่แปรผันตามมวลต่อปริมาตรดังสมการที่ 2

$$\rho = \frac{m}{AV} \quad (2)$$

ดังนั้นมวลของของไหลคือ

$$m = \rho AV \quad (3)$$

โดยที่  $\rho$  หมายถึงความหนาแน่นของอากาศ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.225 \text{ kg/m}^3$  และ  $A$  หมายถึงพื้นที่หน้าตัดของจุดสังเกต มีหน่วยเป็นตารางเมตร

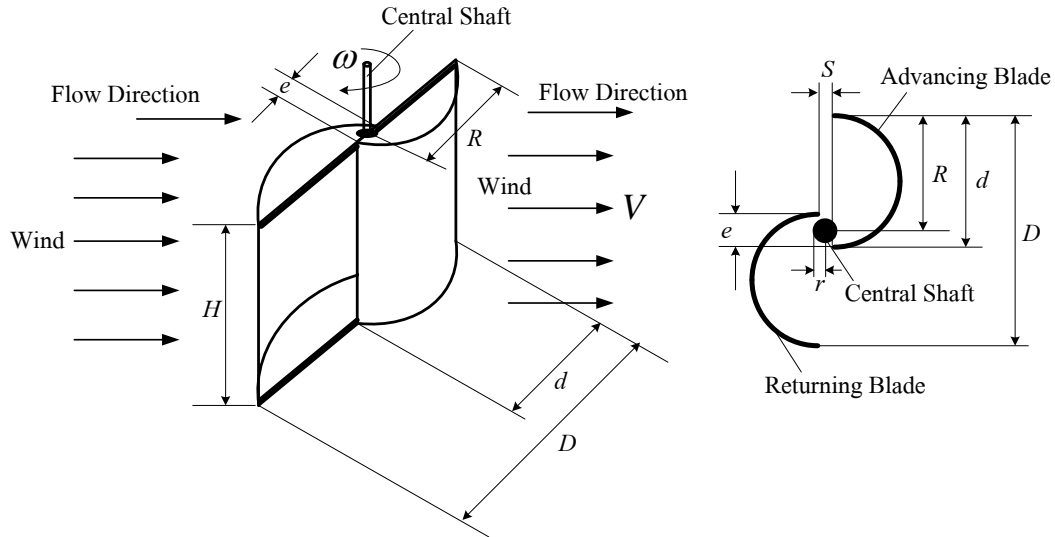
เมื่อแทนสมการที่ 3 ลงในสมการที่ 1 ทำให้ได้พลังงานจลน์ที่ได้จากพลังงานลมเป็น ดังสมการที่ 4

$$P_w = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (4)$$

โดยที่  $P_w$  หมายถึงพลังงานจลน์ที่ได้จากพลังงานลม มีหน่วยเป็นวัตต์

### 2.2 กังหันลมซาโวเนียส

กังหันลมซาโวเนียสเป็นกังหันลมแนวแกนตั้งที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยวิศวกรชาวเยอรมันชื่อ ซิกการ์ด โจฮานเนส ซาโวเนียส (Sigurd Johannes Savonius) [2] ประกอบด้วย ใบที่มีรูปทรงครึ่งทรงกระบอกที่วางตัวเป็นรูปตัวเอส (S) ส่วนนูนและส่วนเว้าของครึ่งทรงกระบอกของกังหันลมชนิดนี้จะหันหน้ารับลม กังหันลมชนิดนี้เป็นกังหันลมที่ทำงานโดยอาศัยแรงต้าน (Drag Force) ทำให้มีสัมประสิทธิ์กำลังค่อนข้างต่ำ แต่มีข้อดีคือง่ายต่อการสร้างเช่น การใช้ถังน้ำมัน 200 ลิตร ตัดแบ่งครึ่งตามยาวแล้วนำมาประกอบกันก็จะมีรูปทรงคล้ายกับกังหันลมชนิดดังกล่าว กังหันลมชนิดนี้เหมาะกับการประยุกต์กับงานที่ต้องการอัตราเร็วลมรอบต่ำ ๆ แต่ทอร์กสูง ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ทิศทางลมและหลักการหมุนของกังหันลมชาโวเนียส

กังหันลมชาโวเนียสเป็นกังหันที่ใช้หลักการของแรงปะทะของอากาศเป็นแนวคิดหลัก ดังนั้นลักษณะและรายละเอียดการทำงานจึงขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ 4 ประการคือ ความเร็วลม ความกว้างของใบพัด ความสูงของใบกังหันและฐานติดตั้งกังหัน จากลักษณะและรายละเอียดดังกล่าวสามารถหาพลังงานที่ได้ของชุดกังหัน [2], [4]-[6] โดยพิจารณาโครงสร้างของกังหันลมจากภาพที่ 1 พื้นที่หน้าตัดของกังหันลมได้ดังสมการที่ 5

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5)$$

โดยที่  $D$  หมายถึงความกว้างของใบกังหัน มีหน่วยเป็นเมตร,  $\pi$  หมายถึงค่าคงที่มีค่าเท่ากับ  $22/7$

แทนสมการที่ 5 ลงในสมการที่ 4 ทำให้ได้พลังงานลมเฉลี่ยที่ผ่านใบกังหันดังสมการที่ 6

$$P_w = \frac{\rho \pi D^2 V^3}{8} \quad (6)$$

ส่วนในการวิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลม มีพารามิเตอร์หลายตัวที่ต้องนำมาพิจารณาเช่น อัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด (Tip Speed Ratio: TSR) สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient) และสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque Coefficient) เป็นต้น ดังนั้นอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัดสามารถหาได้จากอัตราส่วนของความเร็วโรเตอร์ต่อความเร็วลมที่ไหลผ่านกังหัน ดังสมการที่ 7

$$TSR = \frac{V_{rotor}}{V} = \frac{\omega R}{V} \quad (7)$$

โดยที่  $TSR$  หมายถึงอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด,  $V_{rotor}$  หมายถึงความเร็วโรเตอร์ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที,  $\omega$  หมายถึงความเร็วเชิงมุม มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที,  $R$  หมายถึงรัศมีใบกังหัน มีหน่วยเป็นเมตร

สัมประสิทธิ์กำลังสามารถหาได้จากอัตราส่วนกำลังของกังหันลมต่อกำลังจากพลังงานลม ดังจากสมการที่ 8

$$C_p = \frac{P_{sh}}{P_w} \quad (8)$$

เมื่อกำลังของกังหันลมมีค่าเท่ากับ  $P_{sh} = T_{sh} \times \omega$  ดังนั้นสมการที่ 8 เขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 9

$$C_p = \frac{T_{sh} \times \omega}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (9)$$

โดยที่  $C_p$  หมายถึงสัมประสิทธิ์กำลัง (power coefficient),  $T_{sh}$  หมายถึงแรงบิดที่ปลายเพลลา (Shaft Torque) มีหน่วยเป็นนิวตัน-เมตร,  $\omega$  หมายถึงความเร็วเชิงมุม มีค่าเท่ากับ  $2\pi N / 60$

นอกจากนั้นสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque Coefficient) หาได้จากอัตราส่วนแรงบิดรอบแกนเพลลาของกังหันลมต่อแรงบิดที่ได้จากพลังงานลม ดังจากสมการที่ 10

$$C_r = \frac{T_{turbine}}{T_w} \quad (10)$$

เมื่อ  $T_{turbine} = F \times r$  สมการที่ 10 เขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 11

$$C_r = \frac{F \times r}{\frac{1}{2} \rho A V^2 R} \quad (11)$$

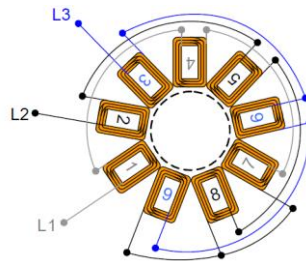
โดยที่  $F$  หมายถึงแรงที่กระทำต่อวัตถุ มีหน่วยเป็นนิวตัน,  $r$  หมายถึงรัศมีของแกนหมุนของกังหัน มีหน่วยเป็นเมตร,  $T_{turbine}$  หมายถึงแรงบิดที่เกิดขึ้นที่แกนหมุนกังหัน มีหน่วยเป็นนิวตัน-เมตร

### 2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีแปรงถ่าน สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ แบบแผ่นจานเดี่ยว (Single Disc) และแบบหลายแผ่นจาน (Multi Disc) ในกรณีของแบบแผ่นจานเดี่ยวสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างเป็น แบบด้านเดียว (Single Side) แบบด้านคู่ (Double Side) [3] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนมีส่วนประกอบสำคัญคือ

#### 2.3.1 สเตเตอร์

สเตเตอร์เป็นส่วนอยู่กับที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ประกอบด้วยขดลวดตัวนำ 9 ขุดนำมาวางเรียงกันในองศาที่เท่ากัน แล้วนำไปหล่อขึ้นรูปด้วยเรซินเมื่อนำปลายสายของขดลวดทั้ง 9 ขุดมาต่อกันแบบสตาร์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส



#### ภาพที่ 2 สเตเตอร์

การคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนเพลลาซึ่งขดลวดตัวนำต่อแบบสตาร์ดังสมการที่ 12

$$V_{avg} = 2nAB \left( \frac{rpm}{60} \right) \quad (12)$$

จากสมการที่ 12 สามารถคำนวณหาจำนวนรอบได้ดังสมการที่ 13

$$n = \frac{30V_{avg}}{AB(rpm)} \quad (13)$$

โดยที่  $V_{avg}$  หมายถึงแรงดันเฉลี่ยมีหน่วยเป็นโวลต์,  $n$  หมายถึงจำนวนรอบของขดลวด  $\times$  จำนวนขดลวด,  $A$  หมายถึงพื้นที่หน้าตัดสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นตารางเมตร,  $B$  หมายถึงความหนาแน่นของเส้นแรงสนามแม่เหล็กหรือความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา,  $rpm$  หมายถึง จำนวนรอบการหมุน มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที

นอกจากนี้สามารถหาขนาดขดลวดตัวนำจากพิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จากสมการที่ 14

$$P = V_{avg} I \quad (14)$$

โดยที่  $I$  หมายถึงกระแสที่ไหลในขดลวด มีหน่วยเป็นแอมแปร์ และ  $P$  พิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์

โดยขนาดของชุดสเตเตอร์สามารถคำนวณได้จากขนาดความกว้างของขดลวดคูณด้วยจำนวนขดลวด แล้วคำนวณหาระยะของแผ่นสเตเตอร์จากสมการที่ 15

$$R_{stator} = \frac{X \times Coil}{2\pi} \quad (15)$$

โดยที่  $R_{stator}$  หมายถึงความยาวรัศมีสเตเตอร์ มีหน่วยเป็นเมตร,  $X$  หมายถึงขนาดความกว้างขดลวด มีหน่วยเป็นเมตรและ  $Coil$  หมายถึงจำนวนขดลวดในสเตเตอร์

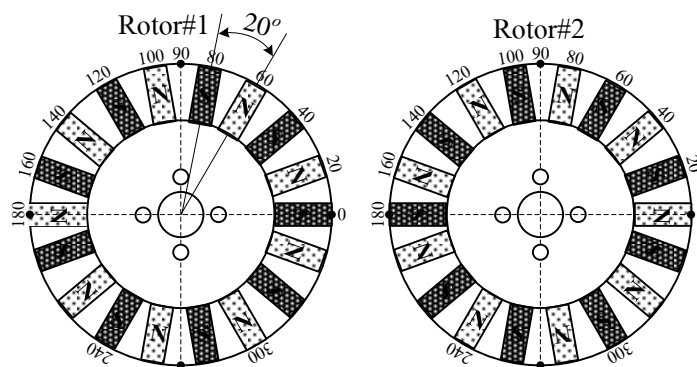
### 2.3.2 โรเตอร์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนมีโรเตอร์หลายแบบเช่น โรเตอร์แผ่นหมุนเดียว โรเตอร์สองแผ่นหมุนและโรเตอร์แบบหลายแผ่นหมุน โดยในงานวิจัยนี้ใช้โรเตอร์แบบสองแผ่นหมุน โดยที่แผ่นเหล็กสองแผ่นจะมีการติดแม่เหล็กถาวรสลับขั้วเหนือขั้วใต้กัน โดยระยะห่างของแท่งแม่เหล็กถาวรแต่แท่งวางห่างกันเป็นมุมดังสมการที่ 16

$$\theta = \frac{360^\circ}{k} \quad (16)$$

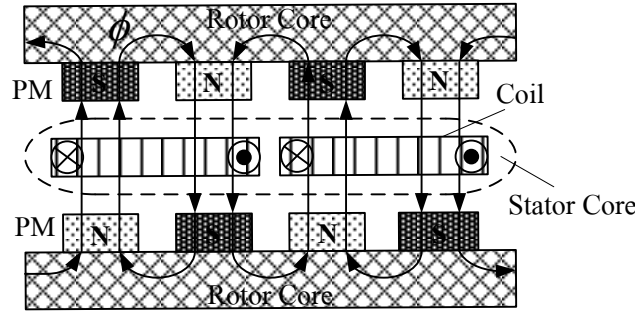
โดยที่  $\theta$  หมายถึงระยะห่างการวางแท่งแม่เหล็กถาวร มีหน่วยเป็นองศา,  $k$  หมายถึงจำนวนแท่งแม่เหล็กถาวร

ส่วนขนาดแผ่นโรเตอร์ต้องมีขนาดเท่ากับขนาดของแผ่นสเตเตอร์ โดยคำนวณขนาดได้ดังสมการที่ 15 โครงสร้างของโรเตอร์แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โรเตอร์

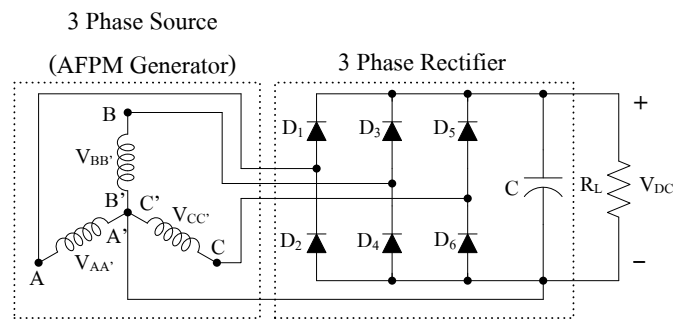
ดังนั้นทิศทางทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนจะพุ่งออกจากแท่งแม่เหล็กขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ ผ่านช่องว่างอากาศและขดลวดในสเตเตอร์สลับกันไปมา [2] แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกน

#### 2.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยทั่วไปมีทั้งแบบควบคุมเฟสไม่ได้และควบคุมเฟสได้ [8] ในบทความวิจัยนี้จะใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่ควบคุมเฟสไม่ได้ในการแปลงกำลังงานไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกน เนื่องจากเป็นวงจรที่ง่ายในการสร้างและให้กำลังไฟฟ้าสูง วงจรแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

ดังนั้นในการที่จะนำพลังงานไฟฟ้าด้านออกที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงไปใช้งานนั้น จำเป็นต้องหาค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรโดย แรงดันเฉลี่ยด้านออกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 17

$$V_{o(avg)} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{m(t)} dt \quad (17)$$

เมื่อ  $V_{o(avg)}$  หมายถึงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ยด้านออก มีหน่วยเป็นโวลต์,  $V_{m(t)}$  หมายถึงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่ายที่เป็นฟังก์ชันคาบในหนึ่งคาบเวลา มีหน่วยเป็นโวลต์

จากสมการที่ 17 เมื่อทำการแก้สมการ ทำให้ได้ปริมาณแรงดันเฉลี่ยด้านออกมีค่าดังสมการที่ 18

$$V_{o(avg)} = 0.955V_{m,L-L} \quad (18)$$

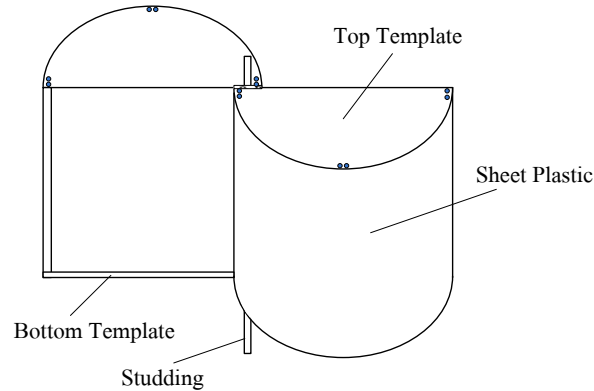
โดยที่  $V_{m,L-L}$  หมายถึงแรงดันไฟฟ้าค้ำยอดระหว่างสาย (Line to Line Peak Voltage) มีหน่วยเป็นโวลต์

### 3. หลักการออกแบบ

การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนแบบแม่เหล็กถาวรกับกังหันลมชาโวเนียสในบทความนี้ ประกอบด้วย การออกแบบกังหันลมชาโวเนียส เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนและวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ไดโอด

### 3.1 การออกแบบกังหันลมซาโวนีเยส

การออกแบบกังหันลมซาโวนีเยสในงานวิจัยชิ้นนี้มีรายละเอียดดังหัวข้อ 2.2 ขนาดที่ออกแบบดังภาพที่ 6 กล่าวคือ ใช้ถังน้ำขนาด 200 ลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร ความสูง 0.9 เมตร ผ่าครึ่งแล้วนำมาประกบกันและมีโครงสร้างยึดให้แข็งแรง ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 6 กังหันลมซาโวนีเยสที่ออกแบบ



ภาพที่ 7 กังหันลมซาโวนีเยสที่สร้างขึ้น

### 3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนแบบแม่เหล็กถาวรที่สร้างขึ้นแสดงดังภาพที่ 10 โดยชุดสเตเตอร์ กำหนดค่า  $V_{avg}$  เท่ากับ 50 โวลต์ ความเร็วรอบ เท่ากับ 500 รอบต่อนาที พื้นที่หน้าตัดสนามแม่เหล็ก A เท่ากับ 0.23 ตารางเมตรและความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B เท่ากับ 1.2 เทสลา แทนค่าลงในสมการที่ 12 เลือกใช้ลวดทองแดงอาบน้ำยาชนิด SWG เบอร์ 18 พันรอบแกนอากาศ จำนวน 60 รอบต่อขดลวด มีขดลวดตัวนำทั้งหมด จำนวน 9 ขด ซึ่ง 1 เฟส ใช้ขดลวดตัวนำจำนวน 3 ขด วางเป็นกลุ่มจำนวน 3 กลุ่ม หล่อด้วยน้ำยาเรซินเพื่อให้ติดเป็นแผ่น ดังภาพที่ 8

ส่วนโรเตอร์ทำจากแผ่นเหล็กวงกลมจำนวน 2 แผ่น ติดแท่งแม่เหล็กแรงดันสูงชนิด neodymium-iron-boron (N41) เคลือบ Nickel สลับซี่เนื้อและซี่ไม้ โดยแท่งแม่เหล็กแรงดันสูงมีขนาดกว้าง 2.5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร ความเข้มของสนามแม่เหล็ก 1.2 เทสลา จำนวน 18 ขั้วแม่เหล็ก แสดงดังภาพที่ 9





ภาพที่ 8 แผ่นสเตเตอร์ที่สร้างขึ้น



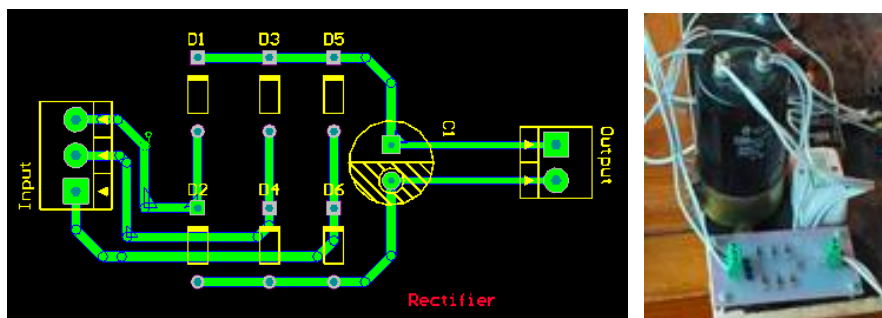
ภาพที่ 9 แผ่นโรเตอร์ที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนแบบแม่เหล็กถาวรที่สร้างขึ้น

### 3.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

การแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงในบทความวิจัยนี้จะใช้วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์ไดโอด ซึ่งเป็นวงจรที่ไม่สามารถปรับมุมเฟสได้ ลักษณะการต่อวงจรคือนำปลายสายจากชุดสเตเตอร์มาเข้าวงจรเรียงกระแส 3 เฟสโดยใช้ไดโอดเบอร์ 1N4002 เป็นตัวบังคับทิศทางของกระแส แสดงดังรูปที่ 11



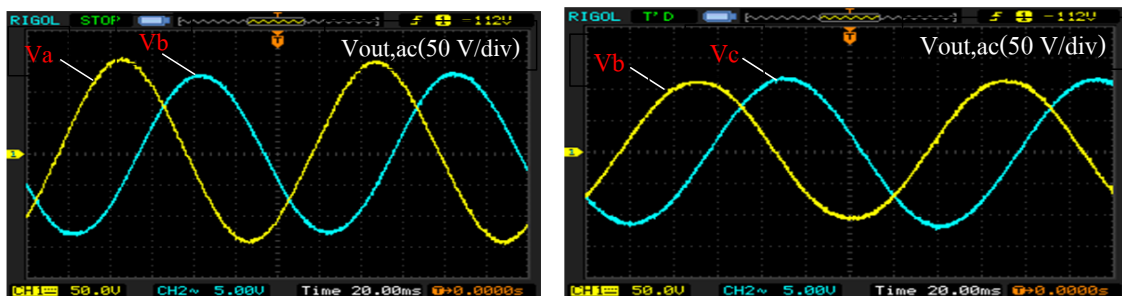
ภาพที่ 11 ลายวงจรพิมพ์และแผงวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่สร้างขึ้น

#### 4. การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดสอบเครื่องต้นแบบในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยเครื่องต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนแบบแม่เหล็กถาวรสำหรับกังหันลมชาโวเนียสแสดงดังภาพที่ 12 จากการทดลองเครื่องต้นแบบขณะไม่มีโหลดความเร็วรอบที่ออกแบบ 500 รอบต่อนาที ทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านออกที่เฟส A, B และ C ประมาณ 80 ถึง 90 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ดังภาพที่ 13 ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออก ขณะไม่มีโหลดที่วัดได้ที่ความเร็วรอบจาก 300 ถึง 500 รอบต่อนาที แสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 12 เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 13 รูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับด้านออกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเฟส A, B และ C ขณะไม่มีโหลด

ตารางที่ 1 ผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไม่มีโหลด

ความเร็ว (rpm)	$V_{\text{phase.a}} (V_P)$	$V_{\text{phase.b}} (V_P)$	$V_{\text{phase.c}} (V_P)$	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ )
300	56	47	52.3	80.9
350	66	58	62	97.4
400	70	62	65	101.6
450	81.5	71.5	75.4	117
500	91.9	79.7	84.2	133.2

ตารางที่ 2 แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสและกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ค่า ( $V_p$ ) ที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะมีโหลด 120 วัตต์

ความเร็ว (rpm)	$V_{\text{phase,a}}$ (V)	$I_{\text{phase,a}}$ (A)	$V_{\text{phase,b}}$ (V)	$I_{\text{phase,b}}$ (A)	$V_{\text{phase,c}}$ (V)	$I_{\text{phase,c}}$ (A)	กำลังไฟฟ้า $V_{3\text{phase}}$ (V)
300	57.6	0.64	52.9	0.62	53	0.16	51.05
350	60.1	0.69	55.7	0.69	57	0.17	65.86
400	67.2	0.78	61.4	0.76	63.3	0.19	79.49
450	77.4	0.82	70.6	0.80	72.8	0.20	98.74
500	87.5	0.86	77.8	0.84	82.1	0.21	119.17

ตารางที่ 3 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกำลังไฟฟ้าที่ออกจากวงจรเรียงกระแส 3 เฟส ขณะมีโหลด 120 วัตต์

ความเร็ว (rpm)	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง		กำลังไฟฟ้า $P_{\text{out,dc}}$ (W)
	$V_{\text{out,dc}}$ (V)	$I_{\text{out,dc}}$ (A)	
300	67	1.42	95.14
350	76	1.54	117.81
400	85	1.73	147.05
450	98.3	1.82	178.91
500	112.8	1.91	215.45

ตารางที่ 4 ผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกังหันลมชาโวเนียสขณะมีโหลด 120 วัตต์

ความเร็ว (rpm)	$V_{\text{phase,a}}$	$V_{\text{phase,b}}$	$V_{\text{phase,c}}$	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{\text{dc}}$ )
20	8.7	7.9	9.4	12.8
40	14.2	13.9	15.2	20.4
60	21.8	20.2	20.8	31.6

จากการทดสอบเครื่องต้นแบบขณะมีโหลดโดยใช้โหลดไฟขนาดพิกัด 120 วัตต์ ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงค่าจาก 300 ถึง 500 รอบต่อนาที ทำให้ได้ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส ดังตารางที่ 2 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ได้กำลังไฟฟ้ารวม 119.17 วัตต์ ส่วนตารางที่ 3 ทำการแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 215.45 โวลต์ และตารางที่ 4 เป็นการทดลองเครื่องต้นแบบที่ความเร็วต่ำที่ใกล้เคียงกับพลังงานลมในประเทศไทย ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน ตลอดจนวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบต่อไป

## 5. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนกับกังหันลมชาโวเนียส ซึ่งโครงสร้างง่าย ไม่สลับซับซ้อน ต้นทุนต่ำ ง่ายต่อการผลิต นอกจากนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังไม่มีแปรงถ่านทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา โครงสร้างของกังหันลมประกอบด้วย โครงยึดกังหัน แกนหมุน และแผ่นใบพัดที่ทำจากถังพลาสติก ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วย ชุดสเตเตอร์ทำจากขดลวดจำนวน 9 ขด ซึ่งแต่ละขดพันด้วยขดลวด SWG เบอร์ 18 พันจำนวน 60



รอบ และแผ่นโรเตอร์จำนวน 2 แผ่น ซึ่งแต่ละแผ่นมีแม่เหล็กแรงสูงชนิดนีโอดีเมียมเคลือบนิเกิลที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงติดอยู่จำนวน 18 แท่ง วางขั้วเหนือขั้วใต้สลับกัน การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือเมื่อแผ่นโรเตอร์ทั้งสองหมุน ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นและมีทิศทางตัดกับขดลวดสเตเตอร์ ทำให้สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ขั้วสเตเตอร์จากการทดสอบพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตามทฤษฎี โดยผลการทดลองขณะไม่มีโหลด ความเร็วรอบ 500 รอบ ได้แรงดันเฟส A, B และ C เท่ากับ 91.9, 79.7 และ 84.2 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแส 3 เฟส แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 133.2 โวลต์ และขณะต่อโหลดที่โหลดพิกัด 120 วัตต์ ความเร็วรอบ 500 รอบ ได้แรงดันเฟส A, B และ C เท่ากับ 87.5, 77.8 และ 82.1 โวลต์ ตามลำดับ กำลังไฟฟ้ารวมทั้ง 3 เฟส 119.17 วัตต์ เมื่อต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแส 3 เฟส แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 68.80 โวลต์ ทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกังหันลมซาโวเนียสที่ความเร็วต่ำขณะต่อโหลดที่โหลดพิกัด 120 วัตต์ ทดสอบที่ความเร็วรอบ 20, 40 และ 60 รอบ ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 12.8, 20.4 และ 31.6 โวลต์ ตามลำดับ ทำให้ได้กำลังงานไฟฟ้าในระดับที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยภายใต้โครงการวิจัยบูรณาการนักศึกษาและอาจารย์เพื่อพัฒนานวัตกรรมเชิงสร้างสรรค์และผลิตภัณฑ์ Thailand 4.0

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jompob Waewsak. (2558). Wind Energy Technology. *ChulaPress*. (In Thai)
- [2] Puchong Charoenprasopsuk. (2015). Prototype of a Vertical-Axis-Low-Speed Wind Turbine using a Hybrid Concept between Savonius and Giromill Wind Turbines. *A Thesis Submitted Master of Engineering in Electrical Engineering*, Faculty of Engineering, KMITL. (In Thai)
- [3] Punyaphat Phumiphak. An Axial Flux Permanent-Magnet Brushless Generator for Wind Power. *Electrical Power Engineering*, Faculty of Engineering, MUT. (In Thai)
- [4] J. Ramarajan and S. Jayavel. (2022). Performance Improvement in Savonius Wind Turbine by Modification of Blade Shape. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 15(1), 99-107.
- [5] Antoni Simanjutak and Latuhorte Wattimury. (2021). Savonius Turbine Analysis for Ocean Current Power Plant Using a Computational Fluid Dynamics Approach. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 10(10), 147-151.
- [6] João Vicente Akwa, Horácio Antonio Vielmo and Adriane Prisco Petry. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 16, 3054-3064.
- [7] Natalia Radwan-Pragłowska, Tomasz Węgiel and Dariusz Borkowski. (2020). Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies 2020*, 13(13), 1-28.
- [8] Muhammad H. Rashid. (2004). Power Electronics: Circuits, Devices and Application. *Prentice Hall*, 3<sup>rd</sup> edition.