

## การศึกษาเชิงตัวเลขค่าสมรรถนะเชิงสถิติของกังหันลมซาโวเนียสเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนาร่องแบบ แผ่นโค้งโดยใช้โปรแกรม OpenFOAM

### A Numerical Study of Static Performance of Savonius Wind Turbine with Curved Guide Vanes Using OpenFOAM

เจษฎาภรณ์ ปรียาดุก<sup>1\*</sup>, ชาคริต สุวรรณจรัส<sup>1</sup>, วีรชัย ชัยวรพฤษ<sup>2</sup> และ กันต์ธกรณ์ เขาทอง<sup>3</sup>  
Jetsadaporn Priyadumkol<sup>1\*</sup>, Chakrit Suvanjumrat<sup>1</sup>, Weerachai Chaiworapuek<sup>2</sup> and Kunthakorn Khaothong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Khamphengsean, Kasetsart University

\*Corresponding author email: jetsadaporn.pri@mahidol.edu

(Received: March 19, 2020, Revised: October 22, 2020, Accepted: November 10, 2020)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการไหลของกังหันลมซาโวเนียส ที่ตำแหน่งของใบพัด 0°, 30°, 60°, 90°, 120° และ 150° ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ OpenFOAM พิจารณาในรูปแบบสองมิติ โดยเทียบผลการจำลองกับการทดลองจริงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ เท่ากับ  $4.32 \times 10^5$  โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อจำลองการไหลของอากาศ พิจารณาค่าความดันและความเร็วของอากาศที่ใบพัดตำแหน่งต่างๆ นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพกังหันลมเมื่อมีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่องแบบแผ่นโค้ง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเชิงสถิติมีค่าสูงขึ้นที่ตำแหน่ง 0°, 30°, 60°, 120° และ 150° เมื่อเทียบกับกังหันลมที่ไม่มีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง อย่างไรก็ตาม ที่ตำแหน่งใบพัด 90° เป็นตำแหน่งที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดลดลง โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้จะเป็นตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อพัฒนากังหันลมให้มีประสิทธิภาพต่อไป

**คำสำคัญ:** กังหันลมแบบซาโวเนียส, ประสิทธิภาพ, ช่องทางไหลนาร่อง, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, OpenFOAM

#### Abstract

This paper studies the flow over Savonius wind turbine at the angle of turbine blade of 0°, 30°, 60°, 90°, 120° and 150°. The study was using the commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) program, OpenFOAM, and conducted in a 2D domain. The numerical and experimental results were compared for validation at the Reynolds number of  $4.32 \times 10^5$ . The propose is to numerically simulate the behavior of airflow though turbine blade including pressure contour and velocity streamline. Moreover, the present study is to show the effect of the Savonius wind turbine with curved guide vanes on the performance. The results show that the turbine with the curved guide vanes has a higher torque coefficient compared to conventional rotors at the 0°, 30°, 60°, 120° and 150° positions except 90°. Those obtained results will be used as parameters to design for improvement the performance of Savonius wind turbine.

**Keywords:** Savonius wind turbine, Performance, Guide vane, Computational Fluid Dynamics, OpenFOAM

## 1. บทนำ

กังหันลมแบบซาโวนีเยสเป็นกังหันลมแนวตั้ง รูปร่างของใบพัดมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S) หลักการทำงานของกังหันลมชนิดนี้คือ บริเวณด้านหน้าของใบพัดมีลักษณะเว้าโค้งทำหน้าที่รับลม ขณะที่บริเวณด้านหลังใบพัดมีลักษณะโค้งคว่ำทำให้มีการต้านลม เมื่ออากาศไหลผ่านใบพัดจะเกิดแรงดันทำให้ใบพัดหมุน ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงต้านอากาศ นอกจากนั้นจุดเด่นของกังหันลมชนิดนี้ยังสามารถรับลมได้ทุกทิศทางซึ่งต่างจากกังหันลมแนวอนที่รับลมได้ทิศเดียว, มีความเร็วรอบของกังหันลมต่ำแต่ให้แรงบิดสูง และมีระดับเสียงขณะใช้งานต่ำ ปัจจุบันนิยมนำไปใช้ในเชิงการเกษตรเพราะสามารถสร้างได้ง่ายและรวดเร็ว อย่างไรก็ตามกังหันแบบลมซาโวนีเยสมีประสิทธิภาพกำลังเพียง 15 % (The Renewable Energy Website, 2017) ทำให้ไม่เป็นที่นิยมเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพกำลังของกังหันลมในอุดมคติที่ทำได้สูงสุดคือ 59 % (Watson, 2017) จึงมีความพยายามเพิ่มประสิทธิภาพกำลังในหลายวิธี เช่น การปรับเปลี่ยนรูปร่างใบพัดกังหัน หรือการติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้สูงขึ้น เป็นต้น (Roy & Saha, 2013)

การติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง หรือ Guide vane เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพกำลังของกังหันลม โดยช่องทางไหลนาร่องเป็นอุปกรณ์สำหรับเบี่ยงเบนทิศทางของอากาศก่อนเข้าไปยังใบพัดกังหันลม (Altan et al., 2008; Mohamed et al., 2011; Altan & Atilgan, 2010) ปี 2008 Altan et al. (2008) ได้ทำการทดลองติดตั้งช่องทางไหลนาร่องแบบแผ่นเรียบตรงกับกังหันลมซาโวนีเยสรูปร่างพื้นฐาน (Conventional rotor) จำนวน 2 แผ่น ที่ความยาว 45 เซนติเมตร และ 52 เซนติเมตร มุมของช่องทางไหลนาร่องที่ถูกวิเคราะห์คือ 30° ถึง 60° และที่ 0° ถึง 30° ต่อมาในปี 2010 Altan and Atilgan (2010) ได้หาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเมื่อมีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง ที่ตำแหน่งใบพัด 0°, 45°, 60° และ 90° ปี 2011 Mohamed et al. (2011) Roy and Saha (2013) ได้ศึกษาช่องทางไหลนาร่องแบบเรียบโดยจำลองการหมุนของกังหันโดยใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อหาค่าระยะห่างของช่องทางไหลนาร่องกับแนวแกนกังหันลมในระบบพิกัด x และ y อย่างไรก็ตามจากการตรวจเอกสารพบว่าได้มีการศึกษาสมรรถนะของกังหันลมแบบซาโวนีเยสที่มีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่องแบบแผ่นตรงเพื่อรับลมเพียงทิศทางเดียวเท่านั้น ดังนั้นถ้ามีการศึกษาสมรรถนะของกังหันลมแบบซาโวนีเยสที่มีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่องรูปร่างอื่นที่สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง จะสามารถนำไปสู่การออกแบบโครงสร้างของช่องทางไหลนาร่องและ

ใบพัดของกังหันลมแบบซาโวนีเยสให้มีสมรรถนะและประสิทธิภาพทางด้านอากาศพลศาสตร์สูงขึ้นได้

การศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแบบซาโวนีเยสในรูปแบบ 2 มิติ เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย (Mohamed et al., 2011; Hayashi et al., 2005; Wang et al., 2012; Menet & Rezende, 2013; Blackwell et al., 1977; Kacprzak et al., 2013; Chaiworapuek & Saengswarn, 2015) โดยลักษณะการจำลองการไหลของอากาศผ่านใบพัดกังหัน แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ เชิงสถิตยศาสตร์ (Static) และเชิงพลศาสตร์ (Dynamic) โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในเชิงสถิตยศาสตร์ เป็นการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient,  $C_T$ ) เทียบกับตำแหน่งใบพัดขณะหมุนใน 1 รอบที่มุมต่าง ๆ ขณะที่การวิเคราะห์ในเชิงพลศาสตร์ เป็นการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient,  $C_p$ ) เทียบกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัดเทียบกับความเร็วลม (Tip speed ratio, TSR)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา การจำลองการไหลของอากาศผ่านกังหันลมซาโวนีเยสโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป มีการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนและแบบจำลองขอบเขตลักษณะแตกต่างกันไป ในปี 2011 Mohamed et al. (2011) ได้เลือกใช้แบบจำลองขอบเขตสี่เหลี่ยม (square domain) เปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- $\omega$  SST, standard k- $\epsilon$  และ k- $\epsilon$  realizable โดยสอบเทียบผลกับการทดลองของ Hayashi et al. (2005) ซึ่งใช้โปรแกรม ANSYS-Fluent พบว่าสัมประสิทธิ์กำลัง ( $C_p$ ) ของแบบจำลองความปั่นป่วน k- $\epsilon$  realizable ใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด ต่อมา ปี 2012 Wang et al. (2012) วิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของใบพัดกังหันลมแนวตั้งเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วลม โดยเลือกใช้แบบจำลองขอบเขตโค้ง (Semi cycle domain) ร่วมกับ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- $\epsilon$  realizable โดยใช้ โปรแกรม Fluent พบว่าการเพิ่มความเร็วลมทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient,  $C_t$ ) มีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามลมหมุนวนด้านหลังใบพัดก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นกัน ต่อมา ปี 2013 Manet and Rezende (2013) ได้ศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมซาโวนีเยสแบบทั่วไป โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน k- $\omega$  SST เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองขอบเขตสี่เหลี่ยมและแบบจำลองขอบเขตโค้ง รวมถึงสอบเทียบผลการจำลองกับการทดลองของ Blackwell et al. (1977) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเชิงสถิตย ( $C_T$ ) ของแบบจำลองขอบเขตโค้งมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองจริง ในปีเดียวกัน Kacprzak et al. (2013)

เลือกใช้แบบจำลองขอบเขตสี่เหลี่ยมและแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\omega$  SST โดยใช้โปรแกรม ANSYS-CFX พบว่าเมื่อปรับรูปร่างของใบพัดให้มีลักษณะเป็นครึ่งทรงรี ส่งผลให้สัมประสิทธิ์กำลัง ( $C_p$ ) ของกังหันมีค่าสูงกว่าใบพัดรูปร่างปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบพัดระหว่าง 0.2-0.4. ปี 2015 Chaiworapuek and Saengswang (2015) ได้ศึกษากังหันลมแบบซาโวเนียสแบบสถิตย์โดยใช้โปรแกรม Fluent เลือกใช้แบบจำลองขอบเขตสี่เหลี่ยม โดยสอบเทียบผลกับการทดลองจริง (Blackwell et al., 1977) เปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  RNG, standard  $k-\epsilon$  และ  $k-\epsilon$  realizable พบว่า standard  $k-\epsilon$  ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด ( $C_t$ ) ใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด

จากผลการศึกษาที่ผ่านมา พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีความสามารถในการทำนายลักษณะการไหลของของไหลผ่านกังหันลมได้อย่างแม่นยำ (Roy & Saha, 2013) เมื่อมีแบบจำลองทางด้านคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมแล้วจะทำให้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือช่วยออกแบบกังหันลมที่มีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำสูงโดยที่ไม่ต้องสร้างชิ้นงานมาทดสอบจริง (Anderson, 1995; Versteeg & Malalasekera, 1995) โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ OpenFOAM ซึ่งเป็นฟรีแวร์ (freeware) ถูกพัฒนาด้วยภาษา C++ ซึ่งผู้ใช้งานสามารถนำไปใช้และพัฒนาโค้ด (code) ภายใต้โครงสร้างโปรแกรมได้อย่างอิสระและมีความยืดหยุ่น (OpenCFD, 2011)

งานวิจัยนี้สนใจศึกษากังหันลมซาโวเนียสเชิงสถิตย์ศาสตร์ในรูปแบบ 2 มิติเพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด ที่ตำแหน่งใบพัด  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  และ  $150^\circ$  โดยกำหนดให้ของไหลอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady), อัดตัวไม่ได้ (Incompressible) และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume) เพื่อแก้ระบบสมการด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ OpenFOAM โดยพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขอบเขตสี่เหลี่ยม (Square domain) และขอบเขตโค้ง (Semi cycle domain) รวมถึงพิจารณาแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\omega$  SST และ standard  $k-\epsilon$  ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดจะถูกสอบเทียบความแม่นยำกับการทดลองจริง (Blackwell et al., 1977) ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) เท่ากับ  $4.32 \times 10^5$  แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมจะถูกนำไปใช้ทำนายการไหลของอากาศผ่านกังหันลมซาโวเนียสเมื่อติดตั้งโครงสร้างช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง พฤติกรรมการไหลของอากาศและค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดจะถูกวิเคราะห์เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบปรับปรุงประสิทธิภาพสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมซาโวเนียสต่อไป

## 2. สมการที่เกี่ยวข้อง

การคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) ได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อประมาณพจน์ความเค้นเรย์โนลด์ การประมาณค่าของพจน์ความเค้นเรย์โนลด์ของแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วนจำเป็นต้องใช้สมการส่งผ่าน (Transport Equation) แบบจำลองสองสมการ (Two Equation Model) เป็นแบบจำลองที่มีสมการการส่งผ่านจำนวน 2 สมการ [16] ในงานวิจัยนี้ซอฟต์แวร์ OpenFOAM มีการจำลองสองสมการ คือแบบจำลอง Standard  $k-\epsilon$  และแบบจำลอง  $k-\omega$  SST

### 2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$

แบบจำลองนี้เป็นรูปแบบพื้นฐานที่สุดของแบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\epsilon$  ถูกนำเสนอโดย Launder และ Spalding [17] เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมเนื่องจากให้ความแม่นยำสูงแต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และสามารถประยุกต์ใช้ในงานประยุกต์ทางด้านวิศวกรรมของไหลได้หลากหลาย แบบจำลอง  $k-\epsilon$  เป็นแบบจำลองความปั่นป่วน 2 สมการ ประกอบด้วย สมการการเคลื่อนที่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $k$ ) และสมการการเคลื่อนที่ของอัตราการลดลงของความปั่นป่วน ( $\epsilon$ ) ดังสมการที่ (1-4) (Loksupapui boon & Suvanjumrat, 2020; Suvanjumrat, 2018)

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div} \left( \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \cdot k \right) + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \bar{U}) = \text{div} \left( \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \cdot \epsilon \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

$$S_{ij} = \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

โดยที่ ค่าคงที่ต่างๆ ประกอบด้วย  $\sigma_k, \sigma_\epsilon, C_1, C_2$  และ  $C_\mu$  มีค่าคือ 1.00, 1.30, 1.44, 1.92 และ 0.09 ตามลำดับ

### 2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST

Menter (1993) นำเสนอ  $k-\omega$  Shear Stress Transport ได้จากการพัฒนาจากแบบจำลองของ Wilcox (1994) โดยแบบจำลอง  $k-\omega$  เป็นแบบจำลองความปั่นป่วน 2 สมการ ประกอบด้วย สมการการเคลื่อนที่ของพลังงานจลน์ของความ

ปั่นป่วน ( $k$ ) และสมการการเคลื่อนที่ของอัตราการผลิตของความปั่นป่วน ( $\omega$ ) ดังสมการที่ (5-7) (Loksupapuilboon & Suvanjumrat, 2020)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \delta_{ij} - \beta^* \rho k \omega \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega \bar{U}) = \text{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + 2 \frac{\rho}{\omega \sigma_\omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} + \gamma \left( 2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta \rho \omega^2 \quad (6)$$

โดย

$$\mu_t = \frac{a_1 \rho k}{\max(a_1 \omega, \sqrt{2S_{ij} S_{ij}} F_2)} \quad (7)$$

โดยที่ ค่าคงที่ต่าง ๆ ประกอบด้วย  $\sigma_k$ ,  $\beta^*$ ,  $\sigma_\omega$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$  and  $\sigma_\omega$  มีค่าคือ 1.0, 0.09, 2.0, 0.44, 0.083 และ 1.17 ตามลำดับ

### 2.3 การทำนายค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด

ผลเบื้องต้นที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของของไหลด้วยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณคือ การกระจายความเร็ว, การกระจายความดัน และ ลักษณะการไหลของของไหล ซึ่งจะส่งผลให้สามารถคำนวณตัวแปรอื่นได้ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient,  $C_T$ ) ดังแสดงในสมการที่ 8 โดยค่าแรงที่ใช้ในการสร้างแรงบิดถูกคำนวณจากค่าความดันที่กระทำกับใบพัด

$$C_T = \frac{T_S}{0.5 \rho U^2 R A} \quad (8)$$

เมื่อ  $T_S$  คือแรงบิดของใบพัดกังหันลมได้ถูกเฉลี่ยและนำมาใช้ในการคำนวณ ขณะที่  $U$  คือความเร็วลมเริ่มต้น  $A$  คือพื้นที่ฉายของใบพัดกังหันลม และ  $R$  คือรัศมีของใบพัดกังหันลม

### 2.4 ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Squared Error : RMSE) เป็นวิธีที่การวัดค่าความคลาดเคลื่อนแบบมาตรฐาน ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังสมการที่ 9 ในการวัดค่าความแม่นยำจากวิธีการนี้ ยิ่งค่า RMSE ที่ได้มีค่าน้อย แสดงว่าโมเดลที่ได้จะมีความแม่นยำมาก

$$RMSE = \sqrt{\frac{(a_1 - y_1)^2 + \dots + (a_n - y_n)^2}{n}} \quad (9)$$

โดยที่ RMSE คือค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย,  $n$  คือจำนวนข้อมูลที่ใช้,  $a$  คือค่าการทดลองจริง และ  $y$  คือค่าที่ได้จากการทำนาย

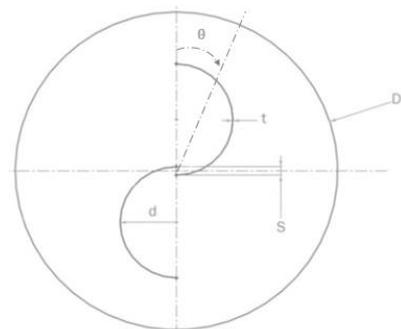
### 3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ระบบสมการถูกแก้ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume) โดยใช้โปรแกรม OpenFOAM กำหนดให้ของไหลอยู่ในสถานะคงที่และอัดตัวไม่ได้ โดเมนของปัญหาถูกแบ่งออกเป็นเซลล์เล็ก ๆ จำนวนมากและเก็บค่าตัวแปรต่าง ๆ ไว้ที่จุดศูนย์กลางของเซลล์ (Cell center) ดังนั้นค่าที่ขอบของแต่ละเซลล์จะถูกหาโดยการ Interpolation การคำนวณถูกกำหนดให้ลู่ออกเมื่อค่าความต่างกันของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณค่าความเร็วและความดันที่ 0.00001 มีการคำนวณที่ใช้ scheme แบบ second order upwind และในส่วนของ การกระจาย (Diffusion terms) กำหนดเป็น Central difference ในการคำนวณ มีการกำหนดส่วนของการคำนวณ pressure-velocity coupling เป็น SIMPLE discretization algorithm เพื่อให้เหมาะสมกับการไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา

### 4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 4.1 ขนาดและรูปร่างกังหัน

งานวิจัยนี้ได้สอบเทียบผลศึกษากับการทดลองจริงของ Blackwell et al. (1977) ที่อัตราส่วน  $s/d$  คือ 0.15 ซึ่งมีรูปร่างแบบจำลองใบพัดดังแสดงในรูปที่ 1 โดยได้ศึกษาการไหลของอากาศผ่านใบพัดที่หยุดนิ่ง ซึ่งใบพัดทำมุมกับแนวตั้ง ( $\theta$ ) ที่  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  และ  $150^\circ$  กำหนดให้อากาศมีความเร็ว 7 เมตรต่อวินาที และใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ OpenFOAM ในการจำลองการไหล ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของกังหันลมได้แสดงในตารางที่ 1



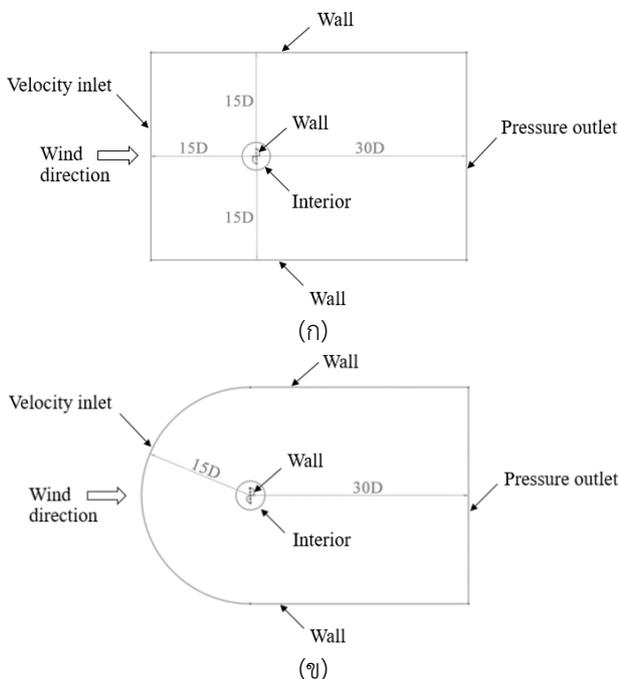
รูปที่ 1 กังหันลมแบบซาโวเนียสที่ตำแหน่ง  $\theta = 0^\circ$

ตารางที่ 1 ขนาดใบพัดของกังหันลมแบบซาโวนเนียส

รายละเอียด	ขนาด(มิลลิเมตร)
เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด, D	1000
เส้นผ่านศูนย์กลางของโค้งใบพัด, d	525
ความหนาของใบพัด, t	1
ระยะเยื้องของใบพัด, s	78.8
ความสูงของใบพัด, H	1000

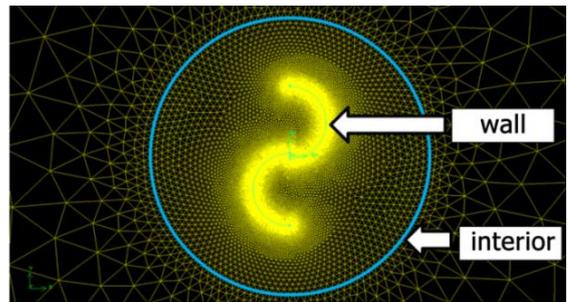
#### 4.2 โดเมนและเงื่อนไขขอบ

การกำหนดโดเมนดังแสดงในรูปที่ 2 ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางใบพัดถึงขอบด้านซ้าย ขอบด้านบนและขอบด้านล่าง มีระยะเท่ากับ 15D และระยะห่างจากจุดศูนย์กลางถึงทางออกด้านหลัง มีระยะเท่ากับ 30D ในแบบจำลองที่มีขอบเขตสี่เหลี่ยม (Square Domain) ขณะที่ระยะรัศมีจากจุดศูนย์กลางใบพัดถึงขอบด้านบน ด้านซ้าย และด้านขวา มีค่าเท่ากับ 15D และระยะห่างจากจุดศูนย์กลางถึงทางออกด้านหลัง มีระยะเท่ากับ 30D ในแบบจำลองที่มีขอบเขตโค้ง (Semi cycle Domain) (Shaheen et al., 2015; Mohamed, 2011)



รูปที่ 2 แบบจำลองรูปร่าง (ก) ขอบเขตสี่เหลี่ยม (Square domain) (ข) ขอบเขตโค้ง (Semi cycle domain)

การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต (boundary condition) ของแบบจำลองที่เป็นสี่เหลี่ยมและเส้นโค้ง โดยขอบเขตด้านซ้ายนั้นกำหนดให้เป็น Velocity inlet ซึ่งกำหนดให้มีความเร็วลมเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที, ขอบเขตด้านบนและด้านล่างกำหนดให้เป็น Wall, ขอบเขตทางออกกำหนดให้เป็น Pressure outlet มีค่าเท่ากับ 0 ปาสคาล ซึ่งเท่ากับความดันบรรยากาศ ขณะที่การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต (boundary condition) ของบริเวณใบพัด โดยใบพัดของกังหันลมนั้นกำหนดให้เป็นผนัง (Wall) มีสถานะไม่ลื่นไถล (No slip) และวงกลมด้านนอกกังหันกำหนดขอบเขตให้เป็น Interior เพื่อแสดงถึงอากาศสามารถไหลผ่านกังหันและเพื่อแบ่งแยกช่วงการสร้างกริด ทำให้การสร้างกริดภายในวงกลมบริเวณใกล้ใบพัดมีความละเอียดสูง ขณะที่กริดภายนอกวงกลมที่ห่างไกลจากใบพัดมีความละเอียดต่ำกว่า สำหรับกริดที่ใช้ในการคำนวณเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม (Triangular elements) ดังแสดงในรูปที่ 3

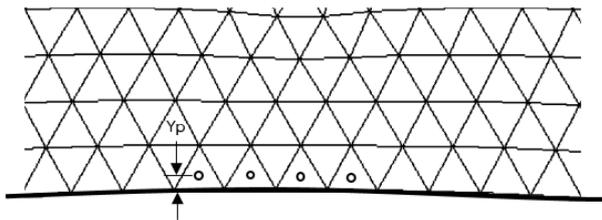


รูปที่ 3 การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบของใบพัด

โดยบริเวณผิวของใบพัดกังหันได้สร้างกริด ซึ่งกำหนดให้ค่า  $y^+$  ที่ผิวกังหันให้มีค่าน้อยกว่า 11.63 (Versteeg & Malalasekera, 2007) เพื่อให้ชั้นขีตผิวมีการไหลแบบราบเรียบ โดยค่าเฉลี่ยของ  $y^+$  ที่ผิวกังหันนี้คือ 10 ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยสมการที่ 10 แสดงการคำนวณการกำหนดชั้นของการไหลชิดกับผนัง ( $y^+$ )

$$y^+ = \frac{y_p}{\nu} \sqrt{\frac{T_w}{\rho}} \quad (10)$$

โดยที่  $y_p$  คือระยะห่างจากผนังของจุดข้อมูลภายในเซลล์ซึ่งติดกับผิวกังหัน,  $\nu$  คือ ความหนืดพลวัต (dynamic viscosity),  $T_w$  คือความเค้นเฉือนของผนัง (wall shear stress),  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล (fluid density) (Suvanjumrat, 2017)

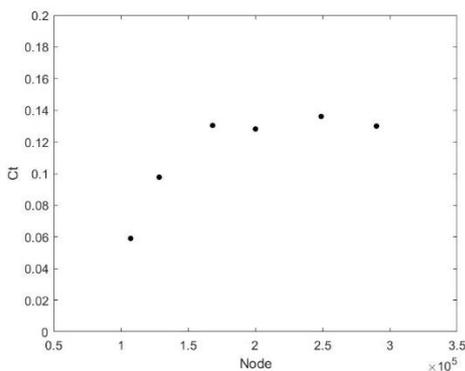


รูปที่ 4 ตาข่ายข้อมูลบริเวณผิวใบพัดกังหันลม

#### 4.3 การตรวจสอบผลกระทบของความหนาแน่นของกริด (Grid independence check)

สำหรับกริดที่ใช้ในการคำนวณนี้ ได้มีการหาจำนวนจุดข้อมูล (Node) ที่เหมาะสม เพื่อพิจารณาการอิสระโดยได้สร้างตาข่ายข้อมูลให้หยาบขึ้น เพื่อให้มีจุดคำนวณน้อยลง ทำให้การจำลองการไหลสามารถทำได้เร็วขึ้นและแม่นยำที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบโดยพิจารณาการไหลของอากาศที่ตำแหน่งใบพัด 30 องศา กำหนดให้ค่าเฉลี่ย  $y^+$  เท่ากับ 10 และเพิ่มจำนวนจุดข้อมูลภายในวงกลม (ด้านนอกกังหัน) ให้มีความหนาแน่นมากขึ้นโดยทดสอบที่จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด 5 ค่า คือ 107,224 128,444 168,136 200,000 และ 248,878 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด ( $C_T$ ) มีค่าเท่ากับ 0.059, 0.0977, 0.1304, 0.1282 และ 0.1361 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5

จากการศึกษาพบว่าผลการคำนวณในกรณีที่จุดข้อมูลเท่ากับ 168,136 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดต่างจากจำนวนจุดข้อมูลที่มากขึ้นคือที่ 200,000 และ 248,878 ประมาณ 3 % โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีแนวโน้มคงที่และใกล้เคียงกันเมื่อจุดข้อมูลมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่ากริดที่มีค่าน้อยที่สุด คือ 168,136 ในการวิเคราะห์ผลต่อไป

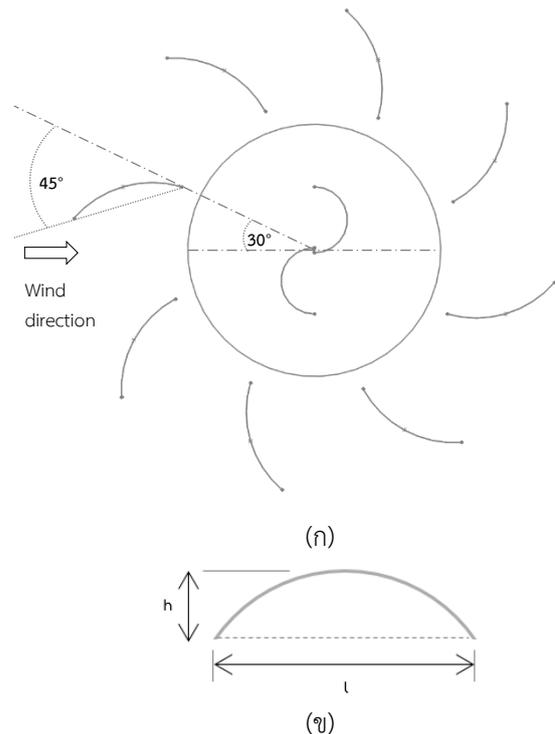


รูปที่ 5 การหาจำนวนจุดข้อมูลที่เหมาะสม

#### 4.4 การศึกษาผลกระทบจากช่องทางไหลนําร่องแบบแผ่นโค้ง

งานวิจัยในส่วนนี้ ศึกษากังหันลมชาโวเนียสเมื่อมีการติดตั้งโครงสร้างของช่องการไหลนําร่องแบบแผ่นโค้ง มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร จำนวน 4 คู่ (Chong et al.,

2012) โดยมีตำแหน่งของแต่ละแผ่นสมมาตรกันซึ่งติดตั้งโดยรอบใบพัดกังหันลมแบบชาโวเนียส ดังแสดงในรูปที่ 6 ช่องการไหลนําร่องแบบแผ่นโค้งทำหน้าที่จัดระเบียบการไหลของอากาศก่อนเข้าพื้นที่หมุนของใบพัดกังหันลม โดยกำหนดให้ทิศทางการกระแสลมหลักต่อการติดตั้งช่องการไหลนําร่อง มีค่าเท่ากับ  $30^\circ$  และมุมเอียงของช่องทางไหลนําร่องแบบแผ่นโค้งมีค่าเท่ากับ  $45^\circ$  โดยช่องทางไหลนําร่องแต่ละแผ่นมีความยาว 2000 มิลลิเมตร และมีความสูง 333.33 มิลลิเมตร คิดเป็นอัตราส่วนแผ่นโค้ง (L/h) เท่ากับ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างช่องทางไหลนําร่องแบบแผ่นโค้งติดตั้งโดยรอบกังหันลมชาโวเนียสที่ตำแหน่ง  $0^\circ$

## 5. ผลการจำลองและวิเคราะห์ผล

### 5.1 การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วน

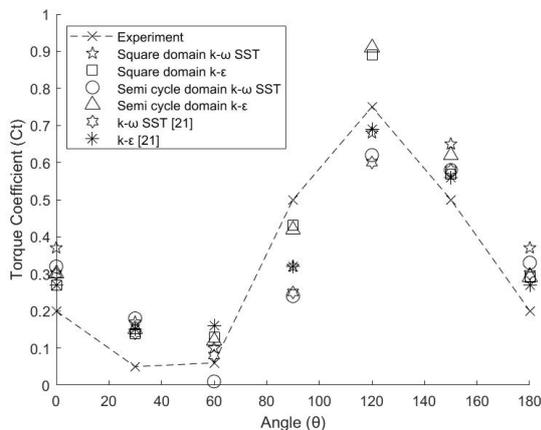
ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient,  $C_t$ ) ของกังหันลมที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม OpenFOAM ถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Blackwell et al. (1977) ที่ตำแหน่งของใบพัดขณะหมุนโดยทำมุมกับแนวตั้ง  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  และ  $150^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมของแบบจำลองความปั่นป่วน standard k- $\epsilon$  และ k- $\omega$  SST ที่มีรูปร่างขอบเขตสี่เหลี่ยม (Square domain) และขอบเขตโค้ง (Semi cycle domain) มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมที่ได้จากการ

คำนวณเชิงตัวเลขมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง (Blackwell et al., 1977) และแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการจำลองของ (Shaheen et al., 2015)

รูปที่ 7 เมื่อพิจารณาในตำแหน่ง 0°, 30°, 60° และ 150° การทำนายผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงกว่าการทดลองจริง ตารางที่ 3 แสดงค่า RMSE ซึ่งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง พบว่าเมื่อพิจารณาที่แบบจำลอง standard k- $\epsilon$  และ แบบจำลอง k- $\omega$  SST ผลของโดเมนขอบเขตสี่เหลี่ยมมีค่า RMSE น้อยกว่าขอบเขตโค้ง ขณะที่ถ้าพิจารณาที่โดเมนขอบเขตสี่เหลี่ยม และขอบเขตโค้ง ผลของแบบจำลอง standard k- $\epsilon$  มีค่า RMSE น้อยกว่าแบบจำลอง k- $\omega$  SST จากผลที่ได้ แบบจำลอง standard k- $\epsilon$  ขอบเขตสี่เหลี่ยม มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากที่สุด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 90° และ 120° ค่า RMSE ที่ตำแหน่ง 90° และ 120° แบบจำลอง standard k- $\epsilon$  ขอบเขตสี่เหลี่ยม มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากกว่าแบบจำลองอื่นเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบจำลอง standard k- $\epsilon$  ขอบเขตสี่เหลี่ยม ในการวิเคราะห์และอธิบายกังหันลมแบบซาโวนีเยสเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้งต่อไป

ตารางที่ 3 ค่า RMSE ที่ได้จากการจำลอง

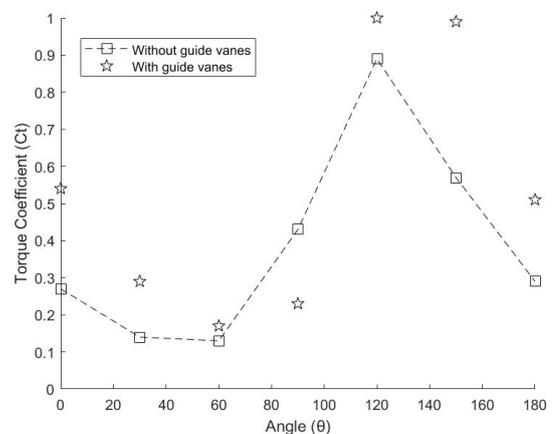
Domain	Turbulence model	RMSE	RMSE at 90° and 120°
Square	k $\omega$ SST	0.148	0.091
	k epsilon	0.096	0.070
Semi cycle	k $\omega$ SST	0.156	0.127
	k epsilon	0.113	0.078



รูปที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของแบบจำลองแบบต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง (Blackwell et al., 1977)

## 5.2 การเปรียบเทียบกังหันลมซาโวนีเยสที่มีและไม่มีติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง

รูปที่ 8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมแบบซาโวนีเยสเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง และค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบพัดของกังหันลมแบบไม่มีติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง โดยใช้แบบจำลอง standard k- $\epsilon$  ขอบเขตสี่เหลี่ยม จากการวิเคราะห์ข้อมูลการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง ที่ตำแหน่ง 0°, 30°, 60°, 120°, 150° และ 180° สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดให้กับกังหันลมได้ ขณะที่ที่ตำแหน่ง 90° ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเชิงสถิติมีค่าลดลง



รูปที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมแบบซาโวนีเยสเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง

ผลของกังหันที่มีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง และกังหันที่ไม่มีติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์การกระจายความดัน ลักษณะการไหลของอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด ดังต่อไปนี้

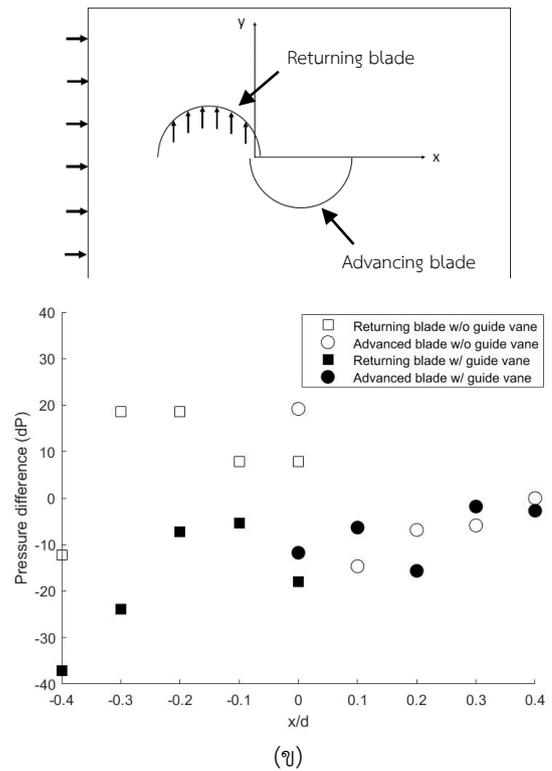
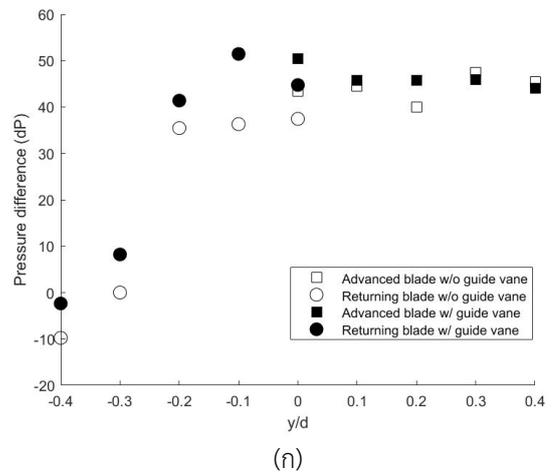
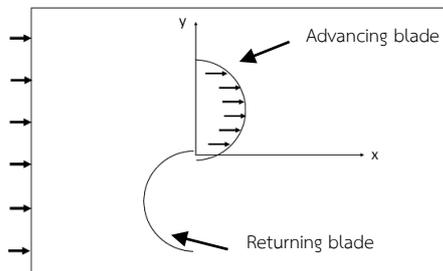
### 5.2.1 ผลต่างความดันบริเวณผิวใบพัด ตำแหน่ง 0° และ 90°

รูปที่ 9 แสดงถึงการเปรียบเทียบการกระจายความดันที่บริเวณผิวใบพัดตลอดความยาวของใบพัดในรูปของผลต่างความดัน (Pressure difference) เมื่อไม่มีติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง และมีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง ที่ตำแหน่ง 0° และ 90° โดยที่ตำแหน่ง 0° เป็นตำแหน่งที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง ขณะที่ตำแหน่ง 90° เป็นตำแหน่งที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าลดลงเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง

รูปที่ 9(ก) แสดงทิศทางการไหลของอากาศเมื่อกังหันอยู่ที่ตำแหน่ง 0° และค่าผลต่างความดันบริเวณด้านเว้าและด้านนูนพิจารณาตลอดความยาวตามแนวทิศทางตั้งฉากการไหลหลัก

โดยพบว่าใบพัดด้านหน้า (Advancing blade) ซึ่งอยู่ในตำแหน่งรับลมจากกระแสลมหลักมีค่าผลต่างความดัน (dP) ค่อนข้างคงที่ตลอดความยาวใบพัด เมื่อติดตั้งและไม่ติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบโค้ง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 40-50 Pa ขณะที่ใบพัดหมุนกลับ (Returning blade) ช่วงใกล้แกนหมุนมีค่าผลต่างความดันสูงกว่าด้านปลายใบพัด และผลต่างความดันของใบพัดเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบโค้ง มีค่าสูงกว่าเมื่อไม่มีช่องทางไหลนำร่องในทุกตำแหน่ง โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 9 Pa จากผลดังกล่าวเมื่อพิจารณาผลรวมของค่าผลต่างความดันที่ผิวกึ่งหน้าของใบพัดด้านหน้าและใบพัดหมุนกลับที่มีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง มีค่ามากกว่ากึ่งหน้าที่ไม่ได้ติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง ส่งผลให้แรงบิดที่เกิดขึ้นมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดจึงเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 9(ข) แสดงทิศทางการไหลของอากาศเมื่อกึ่งหน้าอยู่ที่ตำแหน่ง 90° และค่าผลต่างความดันบริเวณด้านเว้าและด้านนูนของใบพัด พิจารณาตลอดความยาวตามแนวทิศทางการไหลหลัก พบว่าใบพัดหมุนกลับ (Returning blade) ค่าผลต่างความดันของใบพัดเมื่อมีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องมีค่าน้อยกว่าการไม่ติดตั้งช่องทางในทุกตำแหน่ง โดยมีค่าน้อยลงประมาณ 26 Pa โดยบริเวณปลายใบพัดมีค่าผลต่างความดันน้อยที่สุด ขณะที่ใบพัดด้านหน้า (Advancing blade) ผลต่างความดันของกึ่งหน้าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ที่ระยะ  $x/d$  ระหว่าง 0.1 ถึง 0.4 เมื่อติดตั้งและไม่ติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง และเมื่อพิจารณาระยะ  $x/d$  เท่ากับ 0 ที่ใบพัดด้านหน้าและหมุนกลับพบว่า การติดตั้งช่องทางไหลนำร่องทำให้ผลต่างความดันลดลง จากรูปที่ 9(ข) พบว่า ผลรวมของค่าผลต่างความดันที่ผิวกึ่งหน้าของใบพัดด้านหน้าและใบพัดหมุนกลับที่มีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง มีค่าน้อยกว่ากึ่งหน้าที่ไม่ได้ติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง ส่งผลให้แรงบิดที่เกิดขึ้นน้อยลง ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องจึงมีค่าลดลง



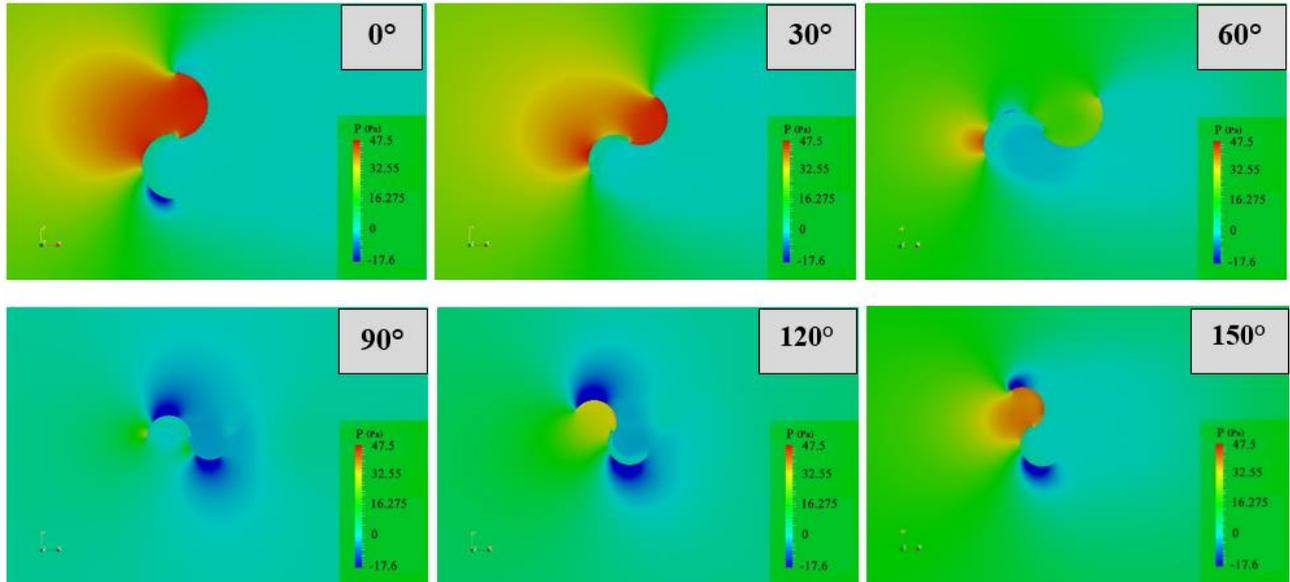
รูปที่ 9 การกระจายความดัน (Pressure distributions) ที่ผิวใบพัด (ก) ตำแหน่ง 0° (ข) ตำแหน่ง 90°

## 5.2.2 การกระจายความดัน

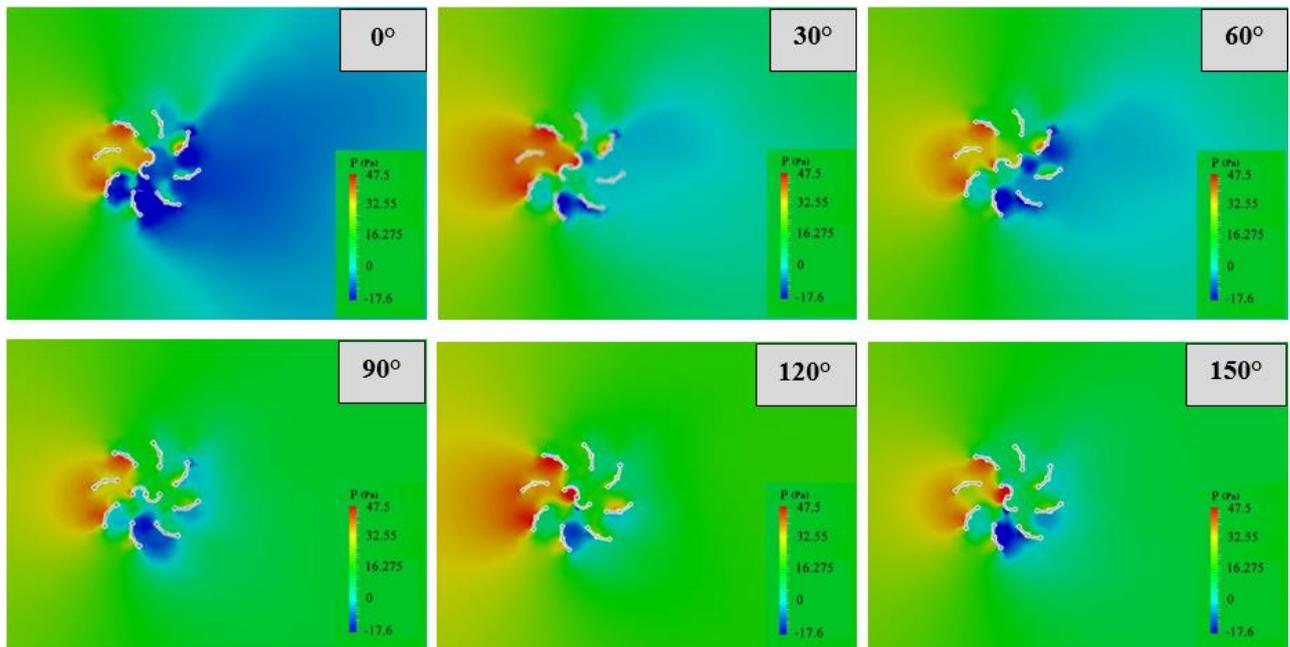
รูปที่ 10 แสดงผลการกระจายความดัน (Pressure contour) ของอากาศ เมื่อกึ่งหน้าลมไม่มีและมีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง ที่ตำแหน่งของใบพัดทำมุมกับแนวตั้ง คือ 0°, 30°, 60°, 90°, 120° และ 150° ตามลำดับ โดยแสดงค่าความดันอากาศอยู่ในช่วงระหว่าง 47.5 ปาสคาล ถึง -17.6 ปาสคาล

ที่ตำแหน่งใบพัด  $0^\circ$  และ  $30^\circ$  ความดันบริเวณด้านเว้าของใบพัดด้านหน้า (Advanced blade) และตำแหน่ง  $120^\circ$  และ  $150^\circ$  ความดันบริเวณด้านเว้าของใบพัดหมุนกลับ (Returning blade) เกิดความดันสูงเป็นบริเวณกว้าง ขณะที่ตำแหน่งใบพัด  $60^\circ$  และ  $90^\circ$  ความดันบริเวณด้านนูนของใบพัดหมุนกลับ อากาศไหลปะทะทำให้เกิดความดันสูงเป็นบริเวณแคบ

เมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องพบว่าบริเวณด้านหน้าของช่องทางไหลนำร่องก่อนเข้ากังหันเกิดความดันสูงเป็นบริเวณกว้าง ขณะที่เมื่ออากาศไหลผ่านกังหันลมและเข้าสู่ช่องทางไหลนำร่องด้านหลังเกิดความดันต่ำ ที่ตำแหน่ง  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  เมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องค่าความดันบริเวณด้านเว้าของใบพัดด้านหน้ามีค่าสูงกว่าเมื่อไม่ติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง



(ก)



(ข)

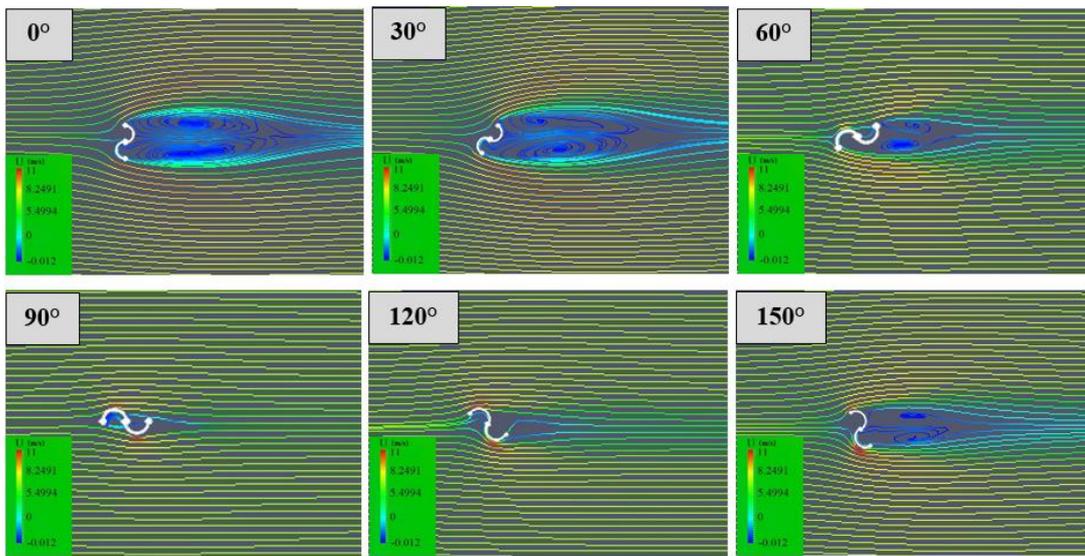
รูปที่ 10 การกระจายความดันของอากาศเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งใบพัด ต่าง ๆ (ก) ไม่ติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง (ข) ติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง

### 5.2.3 ลักษณะการไหลของอากาศ

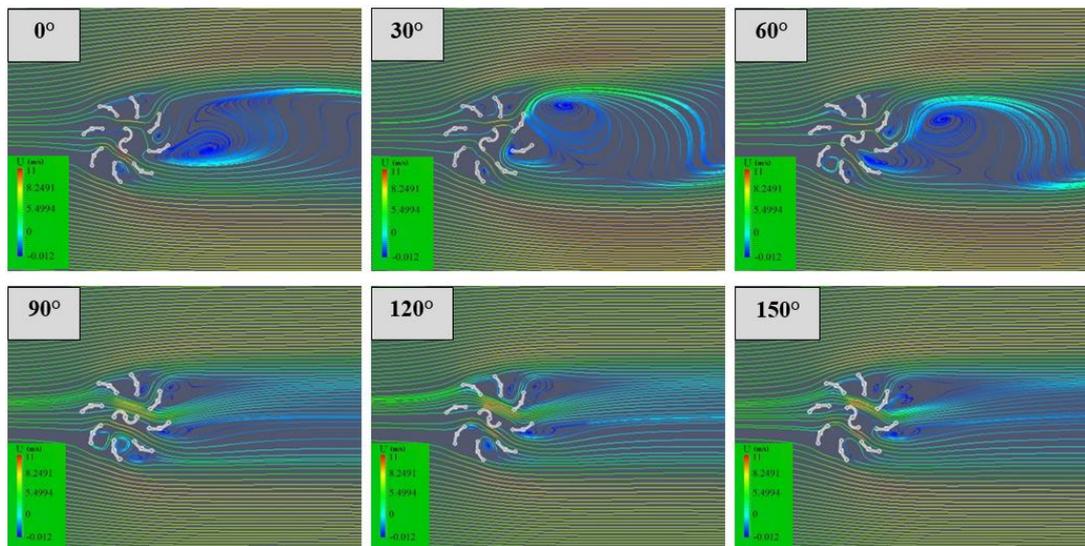
รูปที่ 11 แสดงเส้นกระแสการไหลในรูปแบบความเร็ว (Velocity streamline) ของอากาศ เมื่อกึ่งหันลมไม่มีและมีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่องแบบแผ่นโค้ง ที่ตำแหน่งของใบพัด ทำมุมกับแนวตั้งคือ  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  และ  $150^\circ$  ตามลำดับ โดยแสดงค่าความเร็วอากาศอยู่ในช่วงระหว่าง 11 เมตรต่อวินาที ถึง  $-0.012$  เมตรต่อวินาที

รูปที่ 11(ก) ที่ตำแหน่ง  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  และ  $150^\circ$  ความเร็วสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณขอบนอกของใบพัด ซึ่งมีค่ามากกว่า

ความเร็วลมหลักอยู่  $1.57$  เท่า ขณะที่ตำแหน่ง  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  และ  $150^\circ$  พบว่ามีการไหลวนของอากาศบริเวณด้านหลังใบพัด มีลักษณะเป็นโพรงอากาศ (Separation bubble) ซึ่งเป็นบริเวณที่อากาศโดยรอบไม่สามารถไหลเข้าไปได้ แต่เมื่อมีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง ดังแสดงในรูปที่ 11(ข) พบว่าโพรงอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยไหลวนบริเวณด้านหลังช่องทางไหลนาร่องที่ตำแหน่ง  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  และ  $60^\circ$  โพรงอากาศที่เกิดด้านหลังช่องทางไหลนาร่องแสดงให้เห็นว่า ช่องทางไหลนาร่องสามารถจัดระเบียบการไหลของอากาศใหม่



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 ลักษณะการไหลของอากาศเมื่อพิจารณาค่าความเร็วที่ไหลผ่านตำแหน่งใบพัดต่าง ๆ (ก) ไม่ติดตั้งช่องทางไหลนาร่องแบบแผ่นโค้ง (ข) ติดตั้งช่องทางไหลนาร่องแบบแผ่นโค้ง

## 5.2.4 ความสัมพันธ์ความดัน การไหลและ Ct

เมื่ออากาศไหลเข้าปะทะกับผิวใบพัดความเร็วของอากาศจะลดลงใกล้เคียง 0 เมตรต่อวินาที เป็นจุดหยุดนิ่ง หรือ Stagnation point ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนจากพลังงานจลน์ของอากาศเป็นแรงดันกระทำกับใบพัดทำให้มีความดันสูง

เมื่อไม่มีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง พบว่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าใกล้เคียงกันที่ตำแหน่ง  $0^\circ$  และ  $30^\circ$  โดยอากาศไหลเข้าปะทะบริเวณด้านเว้าของใบพัดด้านหน้าทำให้เกิดความดันสูง ขณะที่ด้านหลังใบพัดมีลมหมุนวนส่งผลให้ใบพัดไม่สามารถสร้างแรงบิดได้อย่างเต็มที่เนื่องจากลมหมุนวนด้านหลังด้านการหมุน ที่ตำแหน่ง  $60^\circ$  อากาศไหลเข้าปะทะบริเวณด้านเว้าของใบพัดด้านหน้ามีแต่ความดันไม่สูงเมื่อเทียบกับตำแหน่ง  $0^\circ$  และ  $30^\circ$  ขณะที่ด้านหลังใบพัดมีอากาศหมุนวนเล็กน้อยทำให้เกิดแรงต้าน ส่งผลให้ที่ตำแหน่งนี้ไม่สามารถสร้างแรงบิดได้อย่างเต็มที่ สัมประสิทธิ์แรงบิดจึงต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าสูงที่สุดเมื่อกังหันอยู่ที่ตำแหน่ง  $120^\circ$  อากาศไหลเข้าบริเวณด้านเว้าของใบพัดหมุนกลับ ทำให้เกิดความดันค่อนข้างสูง ขณะเดียวกันบริเวณด้านหลังใบพัดไม่มีลมหมุนวนเกิดขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงบิดสูงที่สุด

เมื่อมีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง ที่ตำแหน่ง  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  และ  $60^\circ$  พบว่ามีโพรงอากาศขนาดใหญ่ไหลวนบริเวณด้านหลังช่องทางไหลนาร่อง โดยช่องทางไหลนาร่องได้กั้นลมที่หมุนวนนี้ไม่ให้ส่งผลต่อสร้างแรงบิดของใบพัด จึงทำให้สัมประสิทธิ์แรงบิดเพิ่มขึ้น ที่ตำแหน่ง  $120^\circ$  และ  $150^\circ$  ปรากฏโพรงอากาศขนาดเล็กที่ด้านในและด้านหลังของช่องทางไหลนาร่องเช่นเดียวกัน โดยองศาของใบพัดทั้งสองตำแหน่งสามารถรับลมได้ดี ทำให้แรงต้านที่เกิดจากโพรงอากาศด้านหลังส่งผลน้อยต่อใบพัด ค่าแรงบิดของตำแหน่งนี้จึงเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง  $150^\circ$  มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ขณะที่เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $90^\circ$  ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าลดลง พบว่าเกิดโพรงอากาศที่ช่องทางไหลนาร่องบริเวณใกล้ใบพัดในหลายตำแหน่ง พฤติกรรมการไหลของอากาศลักษณะนี้ส่งผลให้พื้นที่บริเวณนั้นมีค่าความดันต่ำ ทำให้ใบพัดไม่สามารถสร้างแรงบิดได้อย่างเต็มที่เนื่องจากเกิดลมหมุนวนด้านการหมุนของใบพัด ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดลดลงต่ำกว่ากังหันลมแบบไม่ติดช่องทางไหลนาร่อง

## 6. สรุปผลการศึกษา

การจำลองการไหลของอากาศผ่านกังหันลมซาโวนีเยสแบบ 2 ใบพัด ถูกคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ OpenFOAM ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเขียนด้วยภาษา C++ และไม่มีค่าลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์ ได้ถูกนำมาสอบเทียบกับการทดลองจริง [10] เพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเชิงสถิติ ของใบพัดเมื่อทำมุมกับแนวตั้งที่  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  และ  $150^\circ$  โดยเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard k- $\epsilon$  ขอบเขตสี่เหลี่ยมในวิเคราะห์การไหลของอากาศเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนาร่องแบบแผ่นโค้ง ผลการเปรียบเทียบการไหลของอากาศที่มีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่องและไม่มีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง พบว่าการติดตั้งช่องทางไหลนาร่องแบบแผ่นโค้งสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเชิงสถิติให้สูงขึ้นได้เมื่อเทียบกับกังหันลมแบบไม่มีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง ที่ตำแหน่ง  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  และ  $150^\circ$  อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่งใบพัด  $90^\circ$  เป็นตำแหน่งเดียวที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดลดลง จากพฤติกรรมการไหลของอากาศเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนาร่องแบบโค้งพบว่า การติดตั้งช่องทางไหลนาร่องช่วยจัดระเบียบการไหลของอากาศได้ดีขึ้นโดยลมหมุนวนบริเวณด้านหลังใบพัด ย้ายไปปรากฏที่บริเวณด้านหลังช่องทางไหลนาร่องแทน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่โพรงอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าและด้านเว้าของช่องทางไหลนาร่องที่บริเวณใกล้ใบพัดด้านรับลม มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดลดลง ดังนั้นการออกแบบช่องทางไหลนาร่องแบบโค้งที่เหมาะสม จะช่วยลดปริมาณโพรงอากาศ โดยเฉพาะในตำแหน่งใบพัด  $90^\circ$  ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งข้อมูลนี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient, Cp) เพื่อใช้ในการปรับปรุงและการออกแบบช่องทางไหลนาร่องให้มีประสิทธิภาพต่อไป

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายสรวิศ ดลบันดาลโชค และนายอรรถพันธ์ เม่งช่วย ที่ช่วยเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยครั้งนี้

## 8. เอกสารอ้างอิง

- Altan, B. D., & Atilgan, M. (2010). The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors. *Renewable Energy*, 35, 821-829.
- Altan, B. D., Atilgan, M., & Ozdamar, A. (2008). An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32, 1673-1678.
- Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics: The basics with applications*. McGrawHill Book.
- Blackwell, B. F., Sheldahl, R. E., & Feltz, L. V. (1977). *Wind tunnel performance data for two- and three-bucket Savonius rotors*. Sandia Report SAND 76-0131.
- Chaiworapuek, W., & Saengswarn, S. (2015). Prediction of Static Performance of Savonius Wind Turbine under the Variation of Wind Velocities. *Kasetsart engineering journal*, 94(28), 1-10.
- Chong, W. T., Poh, S. C., Fazlizan, A., & Pan, K.C. (2012). Vertical axis wind turbine with omni-directional guide vane for urban high-rise buildings. *Journal of Central South University*, 19, 727-732.
- Hayashi, T., Li, Y., & Hara, Y. (2005). Wind tunnel tests on a different phase three-stage Savonius rotor. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 48(1), 9-16.
- Kacprzak, K., Liskiewicz, G., & Sobczak, K. (2013). Numerical investigation of conventional and modified Savonius wind turbines. *Renewable Energy*, 60, 578 – 585.
- Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1972). *Lectures in Mathematical models of turbulence*. Academic Press.
- Loksupapui boon, K., & Suvanjumrat, C. (2020). Validation of Wall Functions for Two- Equation Turbulence Models of OpenFOAM. *The Engineering Institute of Thailand under H. M. The King's Patronage*, 31(2), 105-117.
- Menet, J. L., & Rezende, T. D. (2013). *Static and dynamic study of a conventional Savonius rotor using a numerical simulation* [Paper presentation]. 21è Congrès Français de Mécanique (CFM), Bordeaux, France.
- Menter, F. R. (1993). *Zonal two equations  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows*. AIAA-93-2906.
- Mohamed, M. H. (2011). *Design optimization of Savonius and wells turbines* [ Doctoral dissertation] . Otto von Guericke University of Magdeburg. <https://d-nb.info/1011710889/34>
- Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., & Thevenin, D. (2011). Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade. *Energy Conversion and Management*, 52, 236 - 242.
- OpenCFD. (2011, August 8). *OpenFOAM foundation*. <http://www.openfoam.com>
- Roy, S., & Saha, U. K. (2013) Review on the numerical investigations into the design and development of Savonius wind rotors. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 24(2013), 73-83.
- Shaheen, M., El-Sayed, M., & Abdallah, S. (2015). Numerical study of two- bucket Savonius wind turbine cluster. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 137, 78-89.
- Suwanjumrat, C. (2017). Comparison of Turbulence Models for Flow Past NACA0015 Airfoil using OpenFOAM. *Engineering Journal*, 21(3), 207-221.

- Suvanjumrat, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics of finite volume method*. Mahidol University Press.
- The Renewable Energy Website (2017, September 9). *Savonius Wind Turbines*. <http://www.reuk.co.uk>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *Implementation of boundary conditions, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2nd ed.). Pearson Education Limited.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. John Wiley and Sons.
- Wang, H., Wang, J., Yao, J., Yuan, W., & Cao, L. (2012). Analysis on the aerodynamic performance of vertical axis wind turbine subjected to the change of wind velocity. *Procedia Engineering*, 31, 213-219.
- Watson, D. (2017, September 8). *Wind Turbines and the Energy in Wind*. <http://www.ftexploring.com>
- Wilcox, D. C. (1994). Turbulence energy equation models, in *Turbulence Modelling for CFD* (2nd ed.). ECW Industries.