



แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรูปร่างใบพัดที่มีผลต่อสมรรถนะ
ของกังหันลมชาโวเนียสโดยใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

นายวัชรินทร์ วงศ์ประไพโรจน์

โครงการการศึกษาวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 2556

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรูปร่างใบพัดที่มีผลต่อสมรรถนะ
ของกังหันลมชาโวเนียสโดยใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

นายวัชรินทร์ วงศ์ประไพโรจน์ วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล)

โครงการการศึกษาวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบโครงการการศึกษาวิจัย

..... ประธานกรรมการสอบโครงการการศึกษาวิจัย
(รศ. ดร.ณัฐ กาษยปนนันท์)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการการศึกษาวิจัย
(รศ. ดร.อภิชาติ เทอดโยธิน)

..... กรรมการ
(ผศ. ดร.ธนิต สวัสดิ์เสวี)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อโครงการการศึกษาวิจัย	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรูปร่างใบพัดที่มีผลต่อสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียสโดยใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นายวัชรินทร์ วงศ์ประไพโรจน์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร.อภิชาติ เทอดโยธิน
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สายวิชา	เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน
สาขาวิชา	เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษารูปร่างของใบพัด ที่มีผลต่อสมรรถนะของกังหันลมของกังหันลมชาโวเนียส โดยใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล แบบจำลองของรูปร่างใบพัดได้ถูกสร้างขึ้น 5 รูปร่าง โดยกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 0.33 m ความสูง 0.23 m การศึกษาสมรรถนะของกังหันลมแบ่งเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของกังหันลมกับมุมปะทะของอากาศกับใบพัดที่มุม 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 องศาที่มุมหยุดนิ่ง ในส่วนที่สองทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดและค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ค่า 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1 ขณะกังหันลมหมุน ผลการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของแบบจำลองรูปร่างใบพัดที่ 4 มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 0.72 ที่มุมปะทะของอากาศกับใบพัด 60° ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่ามากที่สุดคือ 0.44 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 0.3 และค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมมากที่สุดคือ 0.195 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 0.7 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหลสามารถนำไปใช้ศึกษาสมรรถนะของรูปร่างใบพัดของกังหันลมชาโวเนียสได้ และสามารถปรับปรุงให้รูปร่างใบพัดให้กังหันลมชาโวเนียสมีสมรรถนะที่ดีขึ้นได้ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: การคำนวณพลศาสตร์ของไหล/กังหันลมชาโวเนียส/สมรรถนะกังหันลม

Research Study Title	Mathematical Modeling of Wind Turbine Blade Shape Effect on Savonius Rotor Performance via Computational Fluid Dynamics Technique
Credits	6
Candidate	Mr. Watcharin Wongpaphairoj
Research Study Advisor	Assoc. Prof. Dr. Apichit Therdyothin
Program	Master of Engineering
Field of Study	Energy Management Technology
Department	Energy Management Technology
Faculty	School of Energy, Environment and materials
Academic Year	2013

Abstract

The purpose of this study was to study about shape of blade that be effected to the ability of wind turbine of Savonius via computational of fluid dynamics. The Modeling of blade shape was created in 5 shapes by determining the blade diameter as 0.33 m, 0.23 in height. The performance of wind turbine can be divided into 2 parts. The first part is to study the turbine static torque coefficient with the angle of blade in the degree of 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 while the turbine stopped, and the second part is to study the torque coefficient and the wind power coefficient with the tip speed ratio as 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1 while the turbine swirling. The result of this study shown forth model of the maximum turbine static torque coefficient as 0.72 at the angle of blade in the degree of 60, the maximum torque coefficient as 0.44 at tip of speed 0.3, and the maximum wind power coefficient as 0.195 at tip speed ratio 0.7. Consequently, computational fluid dynamics technique can be used to study the performance of blade shape of Savonius, and it can be improved the blade shape to develop for the better performance in the future, expectedly.

Keywords: Computational Fluid Dynamics/Savonius Wind Turbine/ Performance of Wind Turbine

กิตติกรรมประกาศ

โครงการการศึกษาวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ. ดร.อภิชาติ เทอดโยธิน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการการศึกษาวิจัยและให้คำแนะนำในเรื่องต่างๆ ขอขอบพระคุณ รศ. ดร.ณัฐ กาศปนันทน์ และ ผศ. ดร. ธนิต สวัสดิ์เสวี ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ด้านการคำนวณพลศาสตร์ของไหล และกรุณาชี้แนะตรวจแก้ไขโครงการการศึกษาวิจัยนี้ อันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัย อีกทั้งเป็นกรรมกรสอบโครงการการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัยน้อมกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่ส่งเสริม ให้กำลังใจในการศึกษางานวิจัย และให้แรงบันดาลใจในการทำการศึกษาวิจัยนี้ รวมทั้งให้คำแนะนำถึงการใช้ชีวิตในการเป็นนักศึกษามาตลอดทั้งชีวิต พร้อมทั้งเป็นอาจารย์ที่ดีในการใช้ชีวิตจริง และขอบคุณเพื่อนๆ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ฎ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฏ

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พลังงานจากลม	3
2.1.1 การวัดทิศทางและความเร็วลม	4
2.1.2 เทคโนโลยีพลังงานลม	4
2.1.3 ชนิดของกังหันลม	5
2.2 ทฤษฎีพลังงานลม	8
2.2.1 แรงและโมเมนต์การไหล	10
2.2.2 สมการการไหลอย่างต่อเนื่อง	11
2.2.3 ทฤษฎีของ Rankine-Froude	11
2.2.4 สัมประสิทธิ์เบ็ตซ์	14
2.3 การศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียส	15

2.3.1	ลักษณะใบพัดของกังหันลมชาโวเนียส	16
2.3.2	อากาศพลศาสตร์ที่กระทำต่อกังหันลมชาโวเนียส	17
2.3.3	สมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียส	19
2.4	ทฤษฎีการไหลชั้นขอบเขต	21
2.5	ทฤษฎีแบบจำลองพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid dynamic)	22
2.5.1	สมการอนุรักษ์เชิงมวล (Conservation of mass)	23
2.5.2	สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum Equation)	23
2.6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลแบบปั่นป่วน	26
2.7	แบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับปัญหาด้านอากาศพลศาสตร์	29
2.8	ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method)	32
2.9	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
3.	ระเบียบวิธีในการวิจัย	42
3.1	การออกแบบใบพัดของกังหันลมชาโวเนียส	42
3.2	การสร้างแบบจำลองการไหลโดยใช้วิธีวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหล	49
3.2.1	ข้อสมมติฐานของแบบจำลอง	50
3.2.2	การกำหนดขนาดขอบเขตของแบบจำลอง	50
3.2.3	การสร้างเมช (Mesh)	55
3.2.4	การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น	57
3.2.5	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	57
3.3	การวิเคราะห์ค่าแรงบิดที่กระทำต่อใบพัดขณะหยุดนิ่งกับมุมปะทะต่างๆ	59
3.4	การวิเคราะห์ค่าของสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม	60
3.5	การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลม	61
3.6	สรุปผลการศึกษา	61
3.7	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	61
4.	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	62
4.1	การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของกังลม	62
4.2	ผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดที่มุมองศาต่างๆของกังหันลม	68
4.2.1	ผลจากแรงบิดที่มุมองศาต่างๆ ของกังหันลมแบบที่ 1	69

หน้า

4.2.2	ผลจากแรงบิดที่มุมองศาต่างๆ ของกึ่งหันลมแบบที่ 2	74
4.2.3	ผลจากแรงบิดที่มุมองศาต่างๆ ของกึ่งหันลมแบบที่ 3	78
4.2.4	ผลจากแรงบิดที่มุมองศาต่างๆ ของกึ่งหันลมแบบที่ 4	82
4.2.5	ผลจากแรงบิดที่มุมองศาต่างๆ ของกึ่งหันลมแบบที่ 5	86
4.3	ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ความเร็วปลายใบต่างๆ	92
4.3.1	ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ความเร็วปลายใบต่างๆ ของกึ่งหันลมแบบที่ 1	92
4.3.2	ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ความเร็วปลายใบต่างๆ ของกึ่งหันลมแบบที่ 2	94
4.3.3	ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ความเร็วปลายใบต่างๆ ของกึ่งหันลมแบบที่ 3	95
4.3.4	ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ความเร็วปลายใบต่างๆ ของกึ่งหันลมแบบที่ 4	97
4.3.5	ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ความเร็วปลายใบต่างๆ ของกึ่งหันลมแบบที่ 5	98
4.4	กรณีการศึกษาเพิ่มเติม	100
5.	สรุปและข้อเสนอแนะ	105
5.1	สรุปผลการศึกษา	105
5.2	ข้อเสนอแนะ	106
	เอกสารอ้างอิง	107
	ภาคผนวก	111
ก.	ตัวอย่างการคำนวณ	111
	ประวัติผู้วิจัย	114

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ลักษณะการทำงานของกังหันลมแต่ละชนิด	7
3.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสำหรับวัตถุรูปทรงต่างๆ	49
3.2 ค่าตัวแปรเริ่มต้นที่ใช้ในการวิจัย	57
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตกับมุมปะทะของใบกังหันเทียบกับค่าการทดลองจริง	65
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบเทียบกับค่าการทดลองจริง	66
4.3 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบเทียบกับค่าการทดลองจริง	67
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตกับมุมปะทะของใบกังหันแบบที่ 1	69
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตกับมุมปะทะของใบกังหันแบบที่ 2	74
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตกับมุมปะทะของใบกังหันแบบที่ 3	78
4.7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตกับมุมปะทะของใบกังหันแบบที่ 4	82
4.8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตกับมุมปะทะของใบกังหันแบบที่ 5	86
4.9 ค่าสัมประสิทธิ์กับอัตราความเร็วปลายใบกังหันแบบที่ 1	92
4.10 ค่าสัมประสิทธิ์กับอัตราความเร็วปลายใบกังหันแบบที่ 2	94
4.11 ค่าสัมประสิทธิ์กับอัตราความเร็วปลายใบกังหันแบบที่ 3	95
4.12 ค่าสัมประสิทธิ์กับอัตราความเร็วปลายใบกังหันแบบที่ 4	97
4.13 ค่าสัมประสิทธิ์กับอัตราความเร็วปลายใบกังหันแบบที่ 5	98
4.14 ค่าสัมประสิทธิ์ของรูปแบบใบแบบที่ 4 (ปรับปรุง)	104
ก.1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ	111

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 การไหลเวียนมวลอากาศของโลกในทางทฤษฎี	3
2.2 เครื่องมือวัดทิศทางและความเร็วลม	4
2.3 ชนิดของกังหันลมแบ่งตามแนวแกนหมุน	5
2.4 กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง (Vertical Axis Turbine, VAWT)	6
2.5 กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Turbine, HAWT)	6
2.6 แสดงความเร็วลม (U) เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด	9
2.7 แบบจำลองการไหลผ่าน Actuator disk	11
2.8 กังหันลมชาโวเนียส	15
2.9 ลักษณะรูปร่างภายนอกของใบพัด	16
2.10 แผนภาพอธิบายโครงสร้างของกังหันลม	16
2.11 แรงที่กระทำบนใบกังหัน	18
2.12 ภาพแสดงตัวแปรหลักของกังหันลมชาโวเนียส	19
2.13 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันแต่ละชนิด	21
2.14 การวางตัวของ Staggered grid	33
2.15 การวางตัวของปริมาตรควบคุม $p-cell$	33
2.16 การวางตัวของปริมาตรควบคุม $u-cell$	33
2.17 การวางตัวของปริมาตรควบคุม $v-cell$	34
3.1 แผนภาพอธิบายโครงสร้างของกังหันลม	42
3.2 แบบใบกังหันลมแบบที่ 1	44
3.3 แบบใบกังหันลมแบบที่ 2	45
3.4 แบบใบกังหันลมแบบที่ 3	46
3.5 แบบใบกังหันลมแบบที่ 4	47
3.6 แบบใบกังหันลมแบบที่ 5	48
3.7 ขนาดของพื้นที่ขอบเขตการทดลองชั้นนอก	51
3.8 กำหนดขอบเขตชั้นนอก	52
3.9 ขนาดของพื้นที่ขอบเขตการทดลองชั้นใน	53
3.10 กำหนดขอบเขตชั้นใน	54

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป	หน้า
3.11 รูปแบบจำลองในรูปแบบ 3 มิติ	55
3.12 ลักษณะรูปทรงของกริดแบบ Tetrahedron	56
3.13 การเมฆของโดเมนที่ใช้ในการศึกษา	56
3.14 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง (ภาพด้านข้าง)	58
3.15 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง (3 มิติ)	59
3.16 มุมปะทะของอากาศและกังหันลมที่องศาต่างๆ	60
3.17 ขั้นตอนการดำเนินงาน	61
4.1 ใบกังหันลมแบบที่ 1	63
4.2 มุมปะทะของอากาศและกังหันลมที่องศาต่างๆ	63
4.3 จำนวนเมฆที่ใช้ในการทดลอง	64
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบที่ 1	65
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของใบกังหันลมแบบที่ 1	66
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของใบกังหันลมแบบที่ 1	67
4.7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบที่ 1	70
4.8 ตำแหน่งการที่วิเคราะห์ภาพการกระจายตัวของความดันและการไหลด้านข้าง	71
4.9 ตำแหน่งการที่วิเคราะห์ภาพการกระจายตัวของความดันและการไหล 3 มิติ	71
4.10 ลักษณะการกระจายตัวของความดันบริเวณกังหันลมแบบที่ 1	72
4.11 ลักษณะการไหลของอากาศบริเวณกังหันลมแบบที่ 1	73
4.12 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบที่ 2	75
4.13 ลักษณะการกระจายตัวของความดันบริเวณกังหันลมแบบที่ 2	76
4.14 ลักษณะการไหลของอากาศบริเวณกังหันลมแบบที่ 2	77
4.15 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบที่ 3	79
4.16 ลักษณะการกระจายตัวของความดันบริเวณกังหันลมแบบที่ 3	80
4.17 ลักษณะการไหลของอากาศบริเวณกังหันลมแบบที่ 3	81
4.18 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบที่ 4	83
4.19 ลักษณะการกระจายตัวของความดันบริเวณกังหันลมแบบที่ 4	84
4.20 ลักษณะการไหลของอากาศบริเวณกังหันลมแบบที่ 4	85
4.21 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบที่ 5	87

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป	หน้า
4.22 ลักษณะการกระจายตัวของความดันบริเวณกึ่งหันลมแบบที่ 5	88
4.23 ลักษณะการไหลของอากาศบริเวณกึ่งหันลมแบบที่ 5	89
4.24 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบต่างๆ	90
4.25 ลักษณะการไหลของอากาศผ่านใบกังหัน	91
4.26 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบกังหันลมแบบที่ 1	93
4.27 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานใบกังหันลมแบบที่ 1	93
4.28 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบกังหันลมแบบที่ 2	94
4.29 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานใบกังหันลมแบบที่ 2	95
4.30 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบกังหันลมแบบที่ 3	96
4.31 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานใบกังหันลมแบบที่ 3	96
4.32 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบกังหันลมแบบที่ 4	97
4.33 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานใบกังหันลมแบบที่ 4	98
4.34 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบกังหันลมแบบที่ 5	99
4.35 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานใบกังหันลมแบบที่ 5	99
4.36 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบกังหันลม	100
4.37 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมของใบกังหันลม	100
4.38 สัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบที่ 4 ที่ความเร็วต่างๆ	101
4.39 สัมประสิทธิ์กำลังงานลมเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วลมของแบบใบที่ 4	102
4.40 กำลังงานลมที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนความเร็วลมของแบบใบที่ 4	102
4.41 ตำแหน่งการปรับเปลี่ยนระยะของกังหันลมแบบที่ 4	103

รายการสัญลักษณ์

A_D	=	พื้นที่หน้าตัดของดิสก์
A_S	=	พื้นที่ทำงานของใบกังหัน
C_D	=	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
C_m	=	สัมประสิทธิ์แรงบิด
C_{ms}	=	สัมประสิทธิ์แรงบิดสถิต
C_P	=	สัมประสิทธิ์กำลังงาน
d	=	รัศมี Rotor
E	=	พลังงานจลน์
f	=	ความถี่ของการหมุน
F	=	แรง
F_D	=	แรงต้าน
g	=	แรงโน้มถ่วง
M	=	โมเมนต์บิด
$\dot{m}_d$	=	อัตราการไหลของลมผ่านแผ่นดิสก์
n	=	ความเร็วรอบ
P	=	กำลังงานที่ได้จากกังหันลม
P_w	=	กำลังลม
P_u	=	ความดันดันกระแส ของ Actuator disk
P_d	=	ความดันท้ายกระแส ของ Actuator disk
P_∞	=	ความดันสถิตย์ของของไหล
T	=	แรงบิด
T_M	=	แรงบิดขับเคลื่อน
T_D	=	แรงบิดต้านการขับเคลื่อน
t	=	เวลา
Re	=	ตัวเลขเรย์โนลด์
u	=	ความเร็วในแนวแกน x
U	=	ความเร็วลมก่อนเข้าสู่ใบพัด
U_d	=	ความเร็วในแนวแกนที่เกิดขึ้นในใบกังหัน

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

v	=	ความเร็วในแนวแกน y
V_1	=	ความเร็วลม ณ ตำแหน่งที่เกิดคลื่นท้าย
θ	=	มุมบิดของกังหันลม
μ	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด
v	=	มุมบิดของกังหันลม
σ	=	มุมบิดของกังหันลม
τ	=	มุมบิดของกังหันลม
λ	=	Tip speed ratio
ω	=	ความเร็วเชิงมุม

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

°C	=	Degree Celsius
CFD	=	Computational Fluid Dynamics
Exp	=	Experiment
m	=	Meter
kg	=	Kilogram
°C	=	degree Celsius
K	=	Kelvin
kg/m ³	=	Kilogram per cubic meter
kg/s	=	Kilogram per second
kW	=	Kilowatt
m ²	=	Square meter
m ³	=	Cubic meter
m/s	=	Meter per Second
m/s ²	=	Meter per Square Second
m ³ /s	=	Cubic meter per second
OR	=	Overlab ratio
SST	=	Shear Stress Transport
s	=	Second
W	=	Watt

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

พลังงานลมคือหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย และสามารถลดการพึ่งพาการใช้พลังงานฟอสซิลได้ หลายๆประเทศที่กำลังพัฒนาและพัฒนาแล้วได้ให้ความสำคัญของแหล่งพลังงานลมเพื่อนำมาผลิตเป็นไฟฟ้าเป็นอย่างมาก พร้อมทั้งได้พัฒนาเทคโนโลยีด้านกังหันลมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลม และหาพื้นที่ๆมีศักยภาพในการผลิตพลังงานเพิ่มขึ้น จากรายงานของสภาพพลังงานลมโลกปี ค.ศ. 2012 [1] พบว่าประเทศที่นำพลังงานลมมาใช้ผลิตไฟฟ้ามีมากกว่า 70 ประเทศ และสามารถผลิตไฟฟ้าจากลมได้ 44.8 GW และยังมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยในปี ค.ศ. 2017 ได้มีการคาดการณ์ไว้ว่าสามารถผลิตไฟฟ้าจากลมได้ถึง 61.2 GW

ในปัจจุบันมีหลายพื้นที่ที่มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าไม่สูงมากหรือระบบสายส่งไฟฟ้าเข้าไม่ถึง เช่น พื้นที่ทุรกันดาร หมู่บ้านชนบท รวมถึงบ้านที่พักอาศัย การนำพลังงานลมมาใช้ผลิตไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม กังหันลมชาโวเนียสเป็นกังหันลมแกนตั้ง ที่มีการนำมาใช้ในพื้นที่เหล่านั้น ข้อดีของกังหันลมชาโวเนียสคือ สามารถเริ่มทำงานได้ที่ความเร็วลมต่ำ สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง ติดตั้งบนพื้นดินได้ ให้แรงบิดเริ่มต้นสูง มีรูปทรงและการออกแบบที่ไม่ยุ่งยาก แต่มีข้อเสียคือ มีประสิทธิภาพกังหันลมต่ำเมื่อเทียบกับกังหันลมชนิดอื่นๆ [2]

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้กำหนดวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาลักษณะใบพัดของกังหันลมชาโวเนียส และวิเคราะห์สมรรถนะของใบพัดแต่ละแบบ โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamic, CFD) ในการวิเคราะห์หาสมรรถนะ เพราะในปัจจุบันการใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลกับการออกแบบกังหันลมนั้นมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และผลจากการวิจัยต่างๆ ได้ตรวจสอบความถูกต้องของค่าต่างๆ ที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรมเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองจริง พบว่าค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อย [3] การใช้โปรแกรม CFD สามารถลดระยะเวลาในการทดลองและค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างมาก เมื่อเทียบกับการสร้างเครื่องมือนำไปทดลอง และทำการทดลองจริง นอกจากนี้รูปแบบของใบพัดที่ใช้ในโปรแกรมจำลองของไหลสามารถนำมาพัฒนาหรือหารูปแบบที่เหมาะสมได้ เพื่อสามารถนำไปสร้างและใช้งานจริงต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบรูปร่างใบพัดของกังหันลมชาโวเนียส
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมรรถนะทางทฤษฎีของกังหันแบบชาโวเนียสที่มีรูปร่างใบพัดแตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ทำการออกแบบใบพัดของกังหันลมชาโวเนียส 5 แบบ
- 1.3.2 ศึกษาแรงบิดที่กระทำต่อใบพัดขณะหยุดนิ่งกับมุมปะทะที่ 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180
- 1.3.3 ศึกษาความสัมพันธ์แรงบิดกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันที่ 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1
- 1.3.4 ศึกษาความสัมพันธ์กำลังงานลมกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันที่ 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

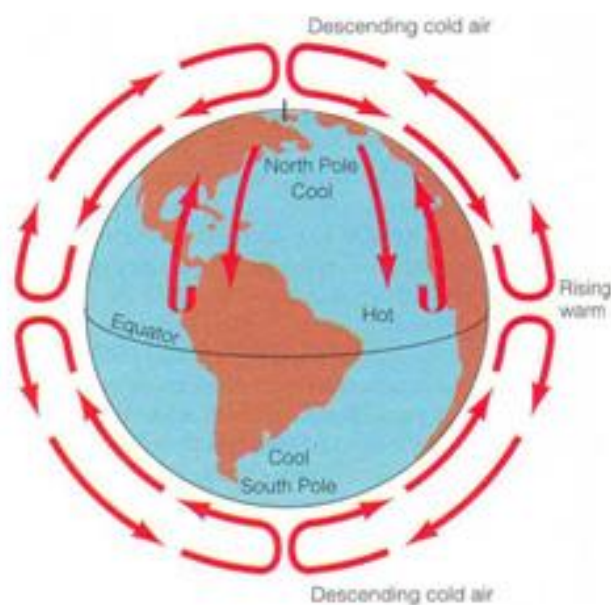
- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงวิธีออกแบบและการทำงานของกังหันชาโวเนียส
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงการใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหลในการหาค่าสมรรถนะต่างๆ
- 1.4.3 ทำให้ทราบถึงวิธีการหาค่าสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียส
- 1.4.4 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการรูปร่างของใบพัดที่เหมาะสมต่อไปในอนาคต

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาถึงรูปร่างและสมรรถนะของกังลม เพื่อให้เกิดความเข้าใจและความถูกต้องของงานวิจัย จึงมีความสำคัญที่จะต้องศึกษาทฤษฎีต่างๆที่มีความเกี่ยวข้องและเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ประกอบกับการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เกิดองค์ประกอบของความรู้ และนำไปใช้เป็นแนวความคิดในการทำงานวิจัยต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 พลังงานจากลม [4]

พลังงานลม คือ มวลของอากาศที่มีการเคลื่อนไหวดตลอดเวลา ซึ่งการเคลื่อนไหวนของอากาศเกิดขึ้นได้เนื่องจากอิทธิพลของแสงอาทิตย์ โดยปกติบริเวณเส้นศูนย์สูตรจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณขั้วโลก จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้อากาศร้อนจากบริเวณเส้นศูนย์สูตรลอยตัวขึ้น และอากาศเย็นบริเวณขั้วโลกจะเคลื่อนที่ในแนวราบเข้ามาแทนที่ จึงก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลอากาศขึ้น การเรียกชื่อลมนั้นจะเรียกตามทิศที่ลมนั้นๆ พัดมา เช่น ลมใต้ จะเป็นลมที่พัดมาจากทิศใต้ และลมเหนือจะเป็นลมที่พัดมาจากทิศเหนือ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การไหลเวียนมวลอากาศของโลกในทางทฤษฎี [4]

2.1.1 การวัดทิศทางและความเร็วของลม [5]

ลม คือการเคลื่อนไหวยของมวลอากาศ ถ้าลมแรงก็หมายถึงว่ามวลของอากาศเคลื่อนตัวไปมาก การวัดลมจำต้องวัดทั้งทิศทางของลมและความเร็วของลม สำหรับการวัดทิศทางของลมนั้นเราใช้ศรลม (Wind vane) ส่วนการวัดความเร็วของลมเราใช้เครื่องมือที่ เรียกว่า อะนิมอมิเตอร์ (Anemometer) ซึ่งมีหลายชนิด แต่ส่วนมากใช้แบบใบพัดหรือกังหัน หรือใช้แบบถ้วยกลมสามใบและมีก้านสามก้านต่อมารวมกันที่แกนกลาง จากแกนกลางจะมีแกนต่อลงมายังเบื้องล่าง เมื่อกังหันหมุนจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะ ทำให้เข็มที่หน้าปัดชี้แสดงความเร็วของลมคล้ายๆ กับหน้าปัดที่บอกความเร็วของรถยนต์ นอกจากนี้ เครื่องวัดลมชนิดดังกล่าวแล้ว ยังมีเครื่องบันทึกความเร็วและทิศทางของลมอยู่ตลอดเวลาด้วย เครื่องบันทึกลมนี้เรียกว่า อะนิมोगราฟ (Anemograph) ซึ่งสามารถบันทึกความเร็วและทิศทางของลมได้ตามที่เราต้องการ



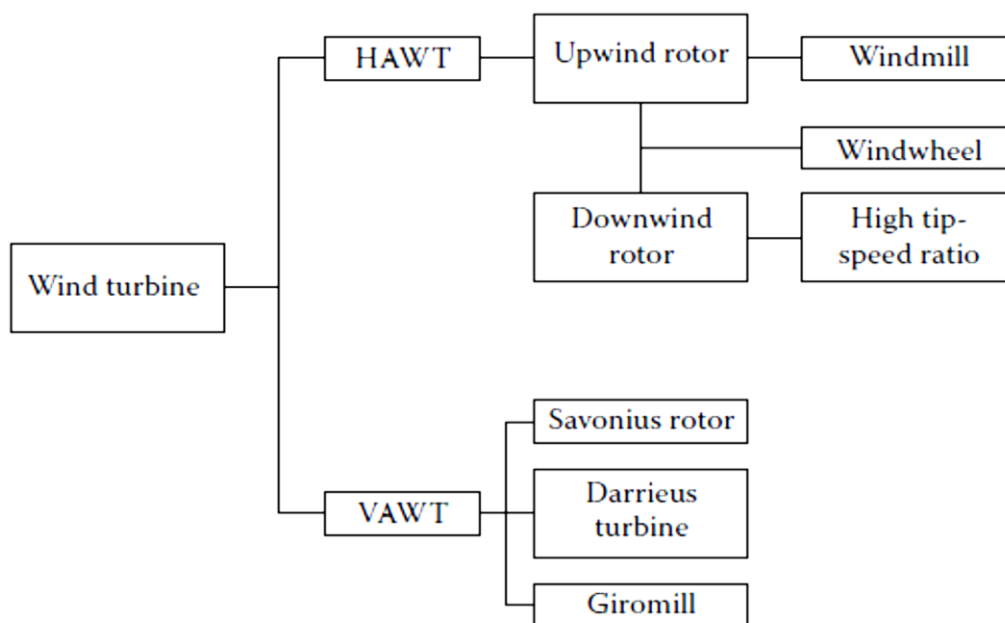
รูปที่ 2.2 เครื่องวัดทิศทางและความเร็วลม [6]

2.1.2 เทคโนโลยีพลังงานลม [7]

ลมเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาแปรรูปและใช้งานได้ พลังงานจลน์จากลมนั้นสามารถแปรรูปเป็นกำลังงานกลได้โดยการใช้กังหันลม เมื่อมวลอากาศเคลื่อนที่ผ่านใบกังหันจะทำให้ใบพัดของกังหันหมุนและได้เป็นกำลังงานกลออกมา การนำประโยชน์ของพลังงานลมมาใช้นั้นเกิดขึ้นมานานหลายปี เช่น ใช้เป็นเครื่องสีข้าว เครื่องปั้มน้ำ ฯลฯ ในปัจจุบันมีการใช้กังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย และได้มีการพัฒนากังหันลมหลากหลายรูปแบบมากขึ้น

2.1.3 ชนิดของกังหันลม

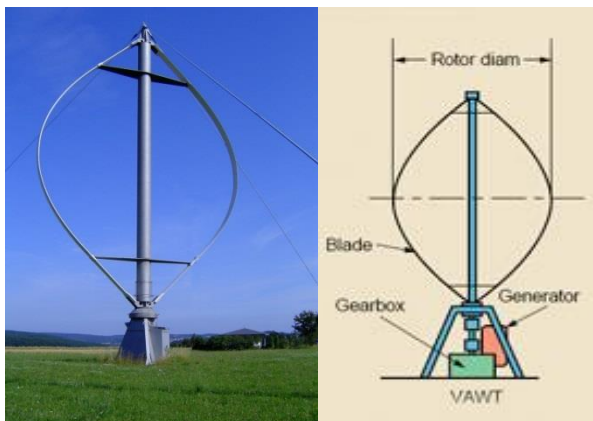
กังหันลม (Wind Turbine) คือ ชุดเครื่องจักรกลชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นกำลังงานกล และนำกำลังงานกลมาใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าได้ การออกแบบของกังหันลมนั้นขึ้นกับสภาพการใช้งาน พื้นที่ และความเร็วลมในพื้นที่นั้น โดยทั่วไปกังหันลมสามารถจำแนกออกเป็น 2 ชนิด โดยแบ่งตามลักษณะแนวแกนหมุนของกังหัน ได้แก่



รูปที่ 2.3 ชนิดของกังหันลมแบ่งตามแนวแกนหมุน [7]

2.1.3.1 กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Turbine, VAWT)

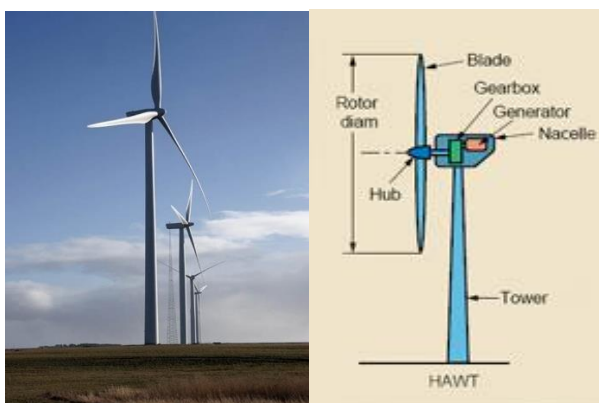
กังหันลมแนวแกนตั้ง เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมและพื้นที่ในแนวราบ มีข้อดีคือ รับลมได้ทุกทิศทาง เริ่มทำงานได้ที่ความเร็วลมต่ำ ใช้ชิ้นส่วนในการประกอบน้อย บำรุงรักษาง่าย แต่มีข้อด้อยคือมีประสิทธิภาพกำลังงานลมต่ำ



รูปที่ 2.4 กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง (Vertical Axis Turbine, VAWT) [8]

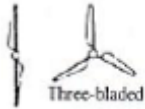
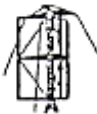
2.1.3.2 กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Turbine, HAWT)

กังหันลมแนวแกนนอน เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ โดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากกับแรงลม มีข้อดีคือ มีความเร็วรอบสูง ให้ความเร็วรอบและแรงบิดคงที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อด้อยคือ บำรุงรักษายาก มีช่วงการทำงานที่ความเร็วลมสูง ใบกังหันต้องติดตั้งที่สูง



รูปที่ 2.5 กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Turbine, HAWT) [8]

ตารางที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของกังหันลมแต่ละชนิด [9]

ชนิดของกังหัน	การใช้งาน	ความเร็วรอบ	ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานลม	แรงบิด
Propeller (HAWT) 	ผลิตไฟฟ้า	สูง	0.42	ต่ำ
Darrieus (VAWT) 	ผลิตไฟฟ้า	สูง	0.40	ต่ำ
Giromill (VAWT) 	ผลิตไฟฟ้า ปั้มน้ำ	ปานกลาง	0.45	ปานกลาง
Chalk Multi-blade (HAWT) 	ผลิตไฟฟ้า ปั้มน้ำ	ปานกลาง	0.35	ปานกลาง
Sail wing (HAWT) 	ผลิตไฟฟ้า ปั้มน้ำ	ปานกลาง	0.35	ปานกลาง
Fan-type (HAWT) 	ผลิตไฟฟ้า ปั้มน้ำ	ต่ำ	0.30	สูง
Savonius (VAWT) 	ผลิตไฟฟ้า ปั้มน้ำ	ต่ำ	0.15	สูง
Dutch-type(HAWT) 	เครื่องบด	ต่ำ	0.17	สูง

2.2 ทฤษฎีพลังงานลม

พลังงานลมเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) [10] ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ เมื่อพิจารณาในรูปของสมการโดยพิจารณาว่ามวล (m) มีหน่วยเป็น kg ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (U) มีหน่วยเป็น m/s จะก่อให้เกิดพลังงานจลน์ (E) ดังสมการที่ 2.1

$$E = \frac{1}{2}mU^2 \quad (2.1)$$

เมื่อ E คือ พลังงานจลน์ (Joule)
 m คือ มวลอากาศ (kg)
 U คือ ความเร็วของอากาศ (m/s)

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอากาศมีหน่วยเป็นมวลต่อหน่วยเวลา ถ้าเราแทนค่าลงในสมการที่ 1 จะทำให้ลมในรูปของพลังงานจลน์เปลี่ยนเป็นกำลังงานลม P ดังสมการที่ 2.2

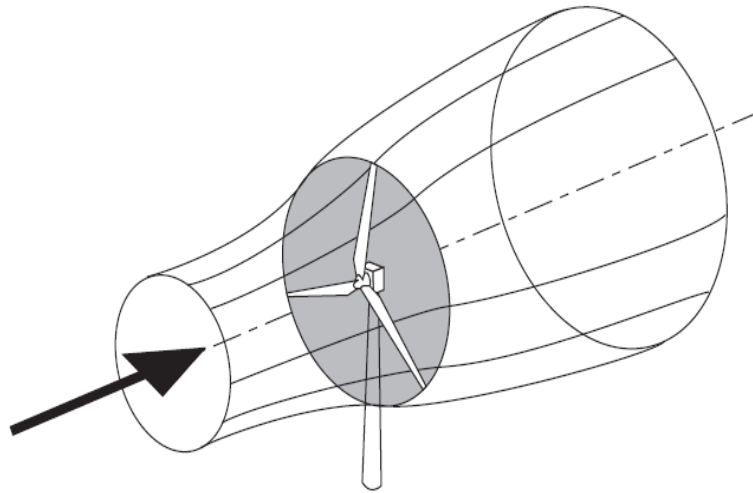
$$P_w = \frac{1}{2}\dot{m}U^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ P_w คือ กำลังงานลม (Watt)
 $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของมวลต่อเวลา (kg/s)

ถ้าลมเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัด A ดังรูปที่ 2.6 เราสามารถเขียนอัตราการไหลของอากาศเชิงมวลต่อเวลา ($\dot{m}$) ดังสมการที่ 2.3

$$\dot{m} = \rho UA \quad (2.3)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m³)
 A คือ พื้นที่หน้าตัด



รูปที่ 2.6 ความเร็วลม (U) เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด [10]

แทนค่าสมการที่ 2.3 ลงในสมการที่ 2.2 จะได้กำลังลม P_w ซึ่งเป็นพลังงานจลน์ เมื่อกระแสลมมีความหนาแน่นและความเร็วลม U พัดผ่านพื้นที่หน้าตัด A ต่อหน่วยเวลา ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (2.4)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนกำลังลมต่อพื้นที่หน้าตัดจะได้สมการที่ 2.5

$$\frac{P_w}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (2.5)$$

กังหันลมจะสามารถนำกำลังงานลม ที่มีอยู่ในกระแสลมมาใช้ประโยชน์ได้เป็นเพียงบางส่วนเท่านั้น เนื่องจากเกิดการสูญเสียพลังงานจากสาเหตุต่างๆ ในระบบขึ้น กำหนดให้ C_p เป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลม (Power Coefficient) ซึ่งจะเป็นสัดส่วนของกำลังงานที่กังหันลมจะสามารถแปลงหรือนำมาใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นกำลังงานที่จะได้จากกังหันลมคือ

$$P_w = \frac{1}{2} C_p \rho A U^3 \quad (2.6)$$

เมื่อ C_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลม

2.2.1 แรงและโมเมนตัมการไหล

อัตราเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงเส้น (Linear momentum) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่กระทำกับวัตถุ นั้น การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงเส้นนั้น จะต้องอยู่ในทิศทางที่แรงกระทำซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า [8]

$$F = ma \quad (2.7)$$

เมื่อ F คือ แรงที่กระทำต่อวัตถุ (N)
 a คือ ความเร่ง (m/s^2)

$$F = \frac{mdV}{dt} \quad (2.8)$$

เมื่อ V คือ ความเร็ว (m/s)

ดังนั้น

$$Fdt = mdV \quad (2.9)$$

ในกรณีที่ของไหลและปริมาตรเป็นแบบคงที่จะสามารถอินทิเกรตในขอบเขตที่ต้องการหาได้เป็น

$$F = \dot{m}(U - V_1) \quad (2.10)$$

$$F = \rho AV(U - V_1) \quad (2.11)$$

เมื่อ	F	คือ	แรงดันที่กระทำวัตถุ (N)
	$\dot{m}$	คือ	อัตราการไหลของของไหล (kg/s)
	U	คือ	ความเร็วลมที่กระแสน้ำ (m/s)
	V	คือ	ความเร็วลมที่วัตถุ (m/s)
	V_1	คือ	ความเร็วลม ณ ตำแหน่งที่เกิดคลื่นท้าย (wake) (m/s)
	A	คือ	พื้นที่ของวัตถุ (m^2)

2.2.2 สมการการไหลอย่างต่อเนื่อง

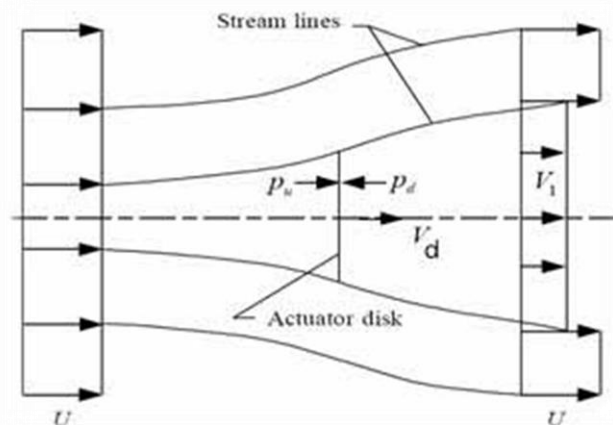
สมการการไหลอย่างต่อเนื่อง (Equation of continuity) จะถูกใช้เมื่อมีการไหลผ่านพื้นที่ที่ต้องการวิเคราะห์ โดยมวลของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลง ตามหลักการของกฎทรงมวล (Conservation of mass) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\rho A_1 U = \rho A V = \rho A_2 V_1 \quad (2.12)$$

2.2.3 ทฤษฎีของ Rankine-Froude

ทฤษฎีของ Rankine-Froude [11] ได้อธิบายทฤษฎีโมเมนตัมการไหลของอากาศใน Axial Fan ว่าเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนใบพัด และความเร็วในการไหลของอากาศ ซึ่งต่อมา Froude ได้ปรับปรุงทฤษฎีดังกล่าวให้มีความเหมาะสม จึงทำให้สามารถทำนายประสิทธิภาพของใบพัดได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น ทฤษฎีโมเมนตัมการไหลของอากาศในแนวแกน จะต้องอยู่ภายใต้สมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. การไหลที่ไม่เกิดการอัดตัว (Incompressible flow)
2. ความดันสถิตบริเวณด้านหน้าและด้านหลังใบพัด ไม่มีผลกระทบต่อการไหลของอากาศ
3. ไม่เกิดความสูญเสียจากแรงเสียดทานของใบพัด
4. การไหลของอากาศมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอด
5. แรงที่กระทำตลอดแนวพื้นที่ของใบพัดมีการกระจายแรงแบบ Uniform
6. ไม่มีความดันย้อนกลับในขณะที่ใบพัดหมุน



รูปที่ 2.7 แบบจำลองการไหลผ่าน Actuator disk [11]

แบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์ในรูปแบบที่ง่ายที่สุดสำหรับกังหันลม คือ แบบจำลอง Actuator disk ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งนิยามให้โรเตอร์ของกังหันลมเป็น disk เอกพันธ์ กระแสลมที่ไหลผ่าน Actuator disk จะถูกต้านและเกิดการล้นออกด้านข้าง จึงเป็นเหตุให้เส้นกระแสถูกเหนี่ยวให้มีลักษณะดังรูปที่ 2.7 ทฤษฎีนี้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Rankine ในปี ค.ศ. 1895 โดยนำทฤษฎี Axial momentum กำหนดการไหลของกระแสลมที่ไหลผ่านกังหันลม เพื่อที่จะอธิบายลักษณะความเร็วต้นกระแส (Upstream) หรือความเร็วลมก่อนเข้ากังหัน และ ท้ายกระแส (Down stream) หรือความเร็วหลังออกจากกังหันลม ว่าเป็นแบบเอกรูป (Uniform) ให้ความเร็วลมที่กระแสอิสระ (Free-stream) มีค่าเป็น U ความเร็วลมจะลดลงเมื่อไหลผ่านใบกังหัน เมื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลด้วยสมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน ภายใต้สมมติฐานดังกล่าว ทำให้สามารถหาแรงขับเคลื่อนกังหันลม (Thrust force) ได้จาก 2 หลักการ

1. จากหลักการของโมเมนตัมสมการที่ 2.11 สามารถนำมาวิเคราะห์เป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$F_T = \dot{m}_d(U - V_1) = \rho A_D V_d(U - V_1) \quad (2.13)$$

เมื่อ	F_T	คือ แรงตั้งฉากที่กระทำบนแผ่นดิสก์ (N)
	$\dot{m}_d$	คือ อัตราการไหลของลมผ่านแผ่นดิสก์ (kg/s)
	U	คือ ความเร็วลมที่กระแสอิสระ (m/s)
	V_d	คือ ความเร็วลมที่แผ่นดิสก์ (m/s)
	V_1	คือ ความเร็วลม ณ ตำแหน่งที่เกิดคลื่นท้าย (wake) (m/s)
	A_D	คือ พื้นที่ของแผ่นดิสก์ (m ²)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m ³)

2. หลักการหาความสัมพันธ์ของแรงและความดัน โดยพิจารณาความดันตกระหว่าง Actuator disk เมื่อพิจารณาแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับ Actuator disk จะได้

$$F_T = A_D(P_u - P_d) \quad (2.14)$$

เมื่อ	P_u	คือ ความดันที่ต้นกระแส (N/m ²)
	P_d	คือ ความดันท้ายกระแสของ Actuator disk (N/m ²)

จากรูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของ Stream tube ของกระแสที่ไหลผ่าน Actuator disk แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือต้นกระแสน้ำ และ ท้ายกระแสน้ำ เมื่อนำสมการจากทฤษฎีเบอร์นูลลี (Bernoulli Equation) มาใช้หาค่าความดันที่กระทำกับแผ่นดิสก์ทั้งสองด้าน ส่วนแรกวิเคราะห์ความดันที่ต้นกระแสน้ำ เริ่มพิจารณาตั้งแต่กระแสน้ำอิสระ (Free-stream) จนถึงด้านต้นลมของแผ่นดิสก์ ในส่วนที่ 2 วิเคราะห์ความดันท้ายกระแสน้ำ เริ่มพิจารณาตั้งแต่ด้านท้ายลมของแผ่นดิสก์จนถึงบริเวณคลื่นท้ายอย่างไกล (Far-wake) คลื่นท้ายคือ บริเวณในส่วนท้ายกระแสน้ำ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ คลื่นท้ายอย่างใกล้ (Near-wake) และ คลื่นท้ายอย่างไกล ซึ่งคลื่นท้ายอย่างใกล้ คือ บริเวณตั้งแต่ด้านหลังของ Actuator disk ห่างออกไปเป็นระยะเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนหมุน ซึ่งบริเวณนี้จะได้รับผลกระทบเนื่องจากการหมุนของส่วนหมุนเป็นอย่างมาก และ คลื่นท้ายอย่างไกล คือ ส่วนที่อยู่ถัดจากคลื่นท้ายอย่างใกล้ไปทางท้ายกระแสน้ำ

ส่วนที่ 1 : ต้นกระแสน้ำถึงด้านต้นลมของ Actuator disk

$$P_{\infty} + \frac{1}{2} \rho U^2 = P_u + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.15)$$

ส่วนที่ 2 : ด้านท้ายลมของ Actuator disk ถึงคลื่นท้ายอย่างไกล

$$P_{\infty} + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_d + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.16)$$

นำสมการ 2.15 – 2.16 จะได้สมการ

$$P_u - P_d = \frac{1}{2} \rho (U^2 - V_1^2) \quad (2.17)$$

จากนั้นแทนค่าสมการ 2.17 ลงในสมการ 2.14 ได้

$$F_T = \frac{1}{2} \rho A_D (U^2 - V_1^2) \quad (2.18)$$

เมื่อนำสมการ 2.18 รวมกับสมการ 2.13 จะได้

$$V_d = \frac{1}{2} (U + V_1) \quad (2.19)$$

2.2.4 สัมประสิทธิ์เบ็ตซ์

เบ็ตซ์ (Betz) [10] ได้เสนอแนวทางการหาค่าสูงสุดของการเก็บกำลังงานจากกระแสลมให้ได้จากกระแสลม โดยพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของความเร็วลม V และ U ถ้ากำหนดให้ a อัตราส่วนระหว่างความเร็วลมที่ลดลง (V) กับความเร็วลมก่อนเข้าสู่ใบพัด (U) นั่นคือ $a = V/U$

ดังนั้น

$$V_d = U - V = U - aU \quad (2.20)$$

$$V_d = U(1 - a) \quad (2.21)$$

แทนค่าในสมการที่ 2.21 ลงในสมการที่ 2.19 เพื่อหาค่าความเร็วลมด้านนอกจากใบพัด จะได้

$$V_1 = U(1 - 2a) \quad (2.22)$$

ดังนั้นกำลังงานที่เกิดจากการหมุนของใบพัดจะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของมวลอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ใบพัดต่อหน่วยเวลา จะหาได้จากสมการ

$$P = \frac{1}{2} \dot{m}(U^2 - V_1^2) \quad (2.23)$$

เมื่อพิจารณาที่ Actuator disk

$$P = \frac{1}{2} [\rho A V_d (U^2 - V_1^2)] \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.21 และ 2.22 รวมกับสมการที่ 2.24 จะได้กำลังงานของกังหันลมมีค่าเท่ากับ

$$P = \frac{1}{2} [4a(1 - a)^2 \rho A U^3] \quad (2.25)$$

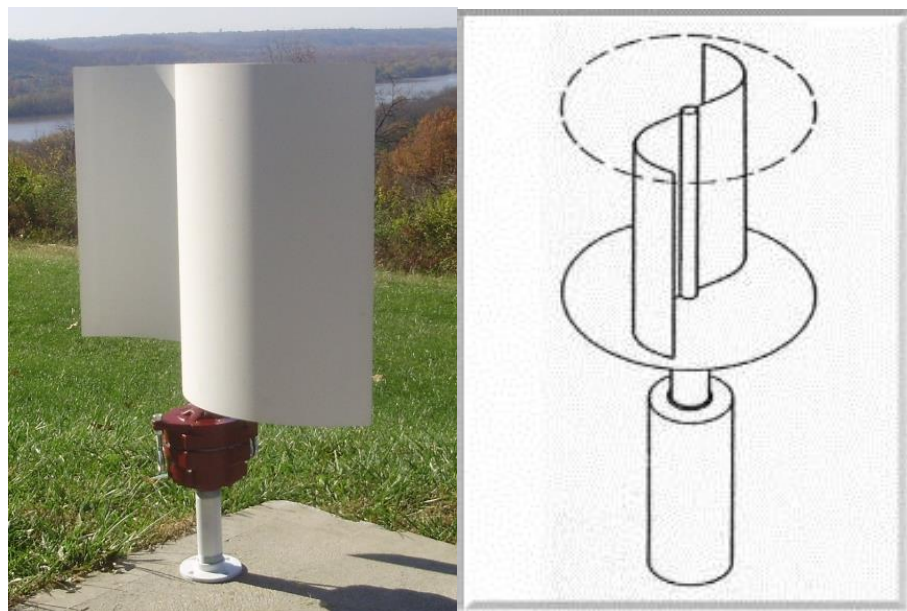
ค่า P จะมีค่าสูงสุดก็ต่อเมื่อ $dP/da = 0$ และจุดนี้พบว่าค่า $a = 1/3$ นั่นคือกำลังงานสูงสุดที่ใบพัดของกังหันลมจะเก็บได้คือ

$$P = \left(\frac{16}{27}\right)\left(\frac{1}{2}\right)\rho AU^3 \quad (2.26)$$

จะพบว่าในทางทฤษฎีกำลังงานสูงสุดที่กังหันลมจะผลิตได้คือตัวเลข $16/27$ หรือประมาณ 59% ก็คือค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด ($C_{p_{max}}$) หรือเรียกว่า Betz Coefficient

2.3 การศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียส [12]

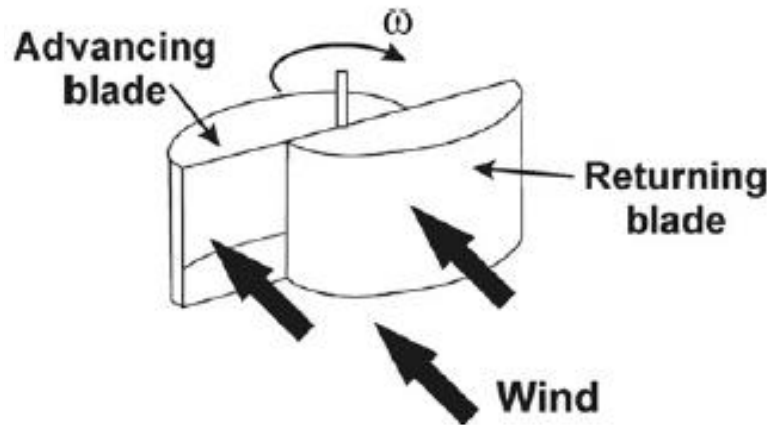
กังหันลมชาโวเนียสเป็นกังหันลมชนิดแกนหมุนแนวตั้งเกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1920 และเป็นกังหันลมที่ขับเคลื่อนโดยแรงต้านอากาศ กังหันลมชาโวเนียสเป็นกังหันลมที่มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับกังหันลมชนิดอื่นๆ แต่ข้อดีของกังหันลมชนิดนี้คือ มีการออกแบบไม่ยุ่งยาก แข็งแรง ให้แรงบิดเริ่มต้นสูง รับลมได้ทุกทิศทาง และมีช่วงการทำงานที่กว้าง กังหันลมชาโวเนียสเป็นที่รู้จักในพื้นที่ที่มีความต้องการพลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก และพื้นที่ที่ห่างไกลจากระบบสายส่งไฟฟ้า ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมเพื่อใช้ในพื้นที่ดังกล่าว รวมไปถึงพื้นที่ที่มีความเร็วลมต่ำ และได้มีการพัฒนาไปใช้ร่วมกับที่พักอาศัยเพื่อผลิตไฟฟ้าใช้งานด้วยตัวเอง ดังนั้นกังหันลมชาโวเนียสจึงกลับมาเป็นที่สนใจอีกครั้ง เพื่อพัฒนาสมรรถนะให้ดีขึ้น



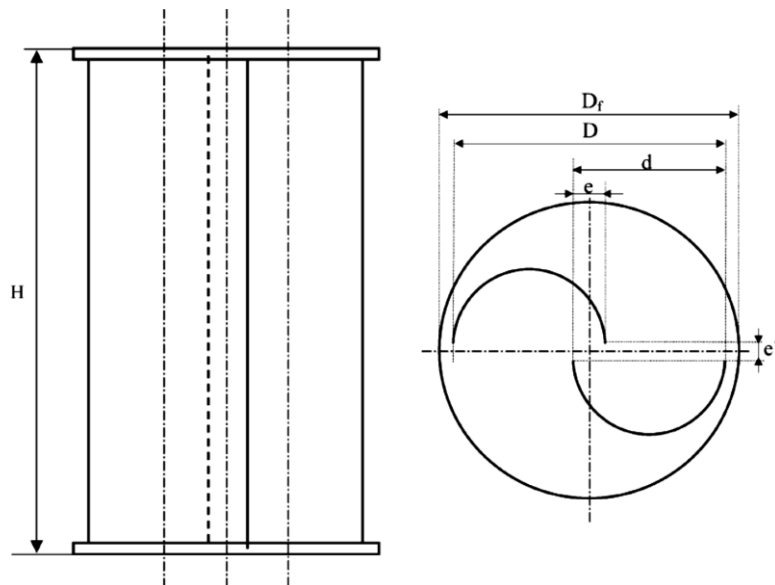
รูปที่ 2.8 กังหันลมชาโวเนียส

2.3.1 ลักษณะใบพัดของกังหันลมชาโวเนียส [13]

โดยทั่วไปกังหันลมชาโวเนียสจะมีรูปร่างที่สมมาตรกัน หรือเรียกรูปร่างของกันหมุนชนิดนี้ว่า รูปร่างตัว S (S-Shape) โดยพื้นส่วนรับลมและทำให้กังหันลมหมุนจะเรียกว่า พื้นในส่วนโค้งใน (Concave) หรือเรียกว่า Advancing blade และพื้นส่วนรับลมและทำให้เกิดการต้านการหมุนจะเรียกว่า พื้นในส่วนโค้งนอก (Convex) หรือเรียกว่า Returning blade



รูปที่ 2.9 ลักษณะรูปร่างภายนอกของใบพัด [13]



รูปที่ 2.10 แผนภาพอธิบายโครงสร้างของกังหันลม [14]

พื้นที่ของกังหันหรือพื้นที่รับลม (Rotor Area) คือ

$$A = DH \quad (2.27)$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกังหัน (m)

H คือ ความสูงของกังหัน (m)

อัตราส่วนส่วนที่ใบกังหันซ้อนทับกัน (Overlap ratio) คือ

$$OR = \frac{e}{d} \quad (2.28)$$

เมื่อ e คือ ระยะที่กังหันซ้อนทับกัน (m)

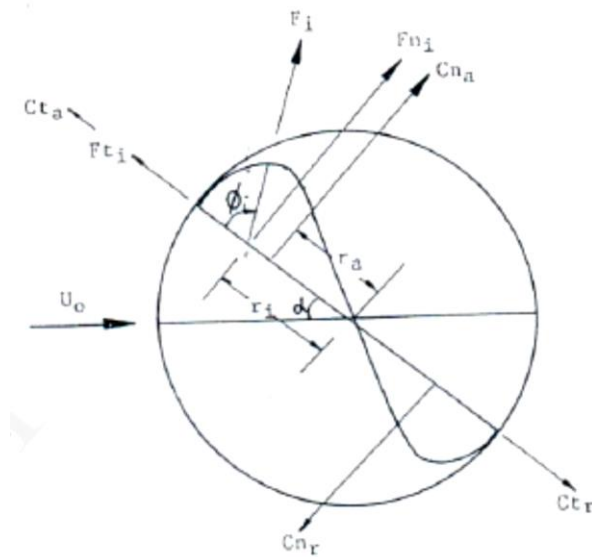
d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (m)

อัตราส่วนความสูงกับเส้นผ่านศูนย์กลางกังหันลม (Aspect ratio) คือ

$$\alpha = \frac{H}{D} \quad (2.29)$$

2.3.2 อากาศพลศาสตร์ที่กระทำต่อกังหันลมชาโวเนียส [15]

อากาศพลศาสตร์จะเป็นการพิจารณาแรงที่กระทำบนใบกังหันในลักษณะสองมิติ โดยแบ่งใบกังหันเป็นส่วนๆ ตามความยาวของรัศมี แล้วคำนวณค่าแรงต่างๆที่กระทำกับกังหันลม เช่น แรงดูดในแนวสัมผัส (Tangential drag force) และแรงดูดในแนวตั้งฉาก (Normal drag force) โดยแรงดูดในแต่ละมุมที่กังหันปะทะกับลมจะมีขนาดไม่เท่ากัน และสามารถนำแรงดูดในแนวตั้งฉากมาหาแรงบิดเริ่มต้นขณะกังหันลมหยุดนิ่งที่มุมปะทะของกังหันลมนั้นๆ ได้



รูปที่ 2.11 แรงที่กระทำบนใบกังหัน [15]

แรงดูดในแนวแกนสัมผัส (Tangential drag force, F_t) สามารถเขียนเป็นสมการคือ

$$F_t = \Delta P_i \Delta S_i \sin \phi_i \quad (2.30)$$

เมื่อ ΔP_i คือ ความดันที่ด้านโค้งนอกและโค้งใน ณ ตำแหน่ง i
 ΔS_i คือ ระยะของเส้นโค้งแต่ละส่วน ณ ตำแหน่ง i
 ϕ_i คือ มุมที่แรงกระทำกับกังหัน ณ ตำแหน่ง i

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดูดในแนวแกนสัมผัส (Tangential drag coefficient, C_t) คือ

$$C_t = \frac{F_{t_i}}{\frac{1}{2} \rho U^2 R} \quad (2.31)$$

แรงดูดในแนวตั้งฉาก (Normal drag force, F_n) สามารถเขียนเป็นสมการคือ

$$F_n = \Delta P_i \Delta S_i \cos \phi_i \quad (2.32)$$

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดูดในแนวตั้งฉาก (Normal drag coefficient, C_n) คือ

$$C_n = \frac{F_{n_i}}{\frac{1}{2} \rho U^2 R} \quad (2.33)$$

แรงบิดของกังหันลมที่กระทำต่อเพลาลม (Torque, T) คือ

$$T_i = F_{n_i} r_i \quad (2.34)$$

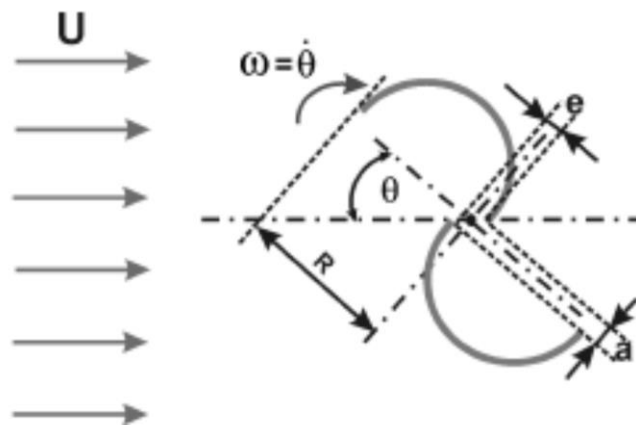
เมื่อ F_{n_i} คือ แรงตั้งฉาก (N)

T_{i_i} คือ แรงบิดที่ตำแหน่งต่างๆของใบกังหัน (N.m)

r_i คือ รัศมีของกังหันลมที่ตำแหน่งต่างๆของใบกังหัน (m)

2.3.3 สมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียส [13]

สมรรถนะของกังหันลมแบ่งออก 2 ประเภท คือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลม (Power Coefficient, C_p) และค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด (Torque Coefficient, C_m) โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์จะขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนความเร็วปลายของกังหันลม (Tip speed ratio, TSR) การออกแบบใบพัดแต่ละแบบจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้แตกต่างกัน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



รูปที่ 2.12 ภาพแสดงตัวแปรหลักของกังหันลมชาโวเนียส [13]

ความเร็วเชิงมุมของกังหันลม (Angular velocity, ω) ความเร็วของกันหันที่หมุนรอบแกนหมุน

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (2.35)$$

เมื่อ N คือ ความเร็วรอบของกังหันลม (RPM)

ω คือ ความเร็วเชิงมุมของกังหันลม (Rad/s)

อัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลม (Tip speed ratio, TSR) คืออัตราส่วนของความเร็วปลายใบกังหันต่อความเร็วลมต้นทางหรือกระแสลมอิสระ (U) ที่ไม่มีการรบกวนความเร็วจากกังหันลม และโรเตอร์ กังหันมีรัศมี d (R) หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม (ω) ทำให้กังหันเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงเส้น (ωd) สามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$\lambda = \frac{\text{speed of rotor tip}}{\text{wind speed}} = \frac{\omega d}{U} \quad (2.36)$$

เมื่อ d คือ รัศมีของกังหัน (m)

U คือ ความเร็วลมเข้า (m/s)

ω คือ ความเร็วเชิงมุมของใบกังหัน (Rad/s)

ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient, C_m)

$$C_m = \frac{T}{\rho H d^2 U^2} \quad (2.37)$$

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลม (Power Coefficient, C_p)

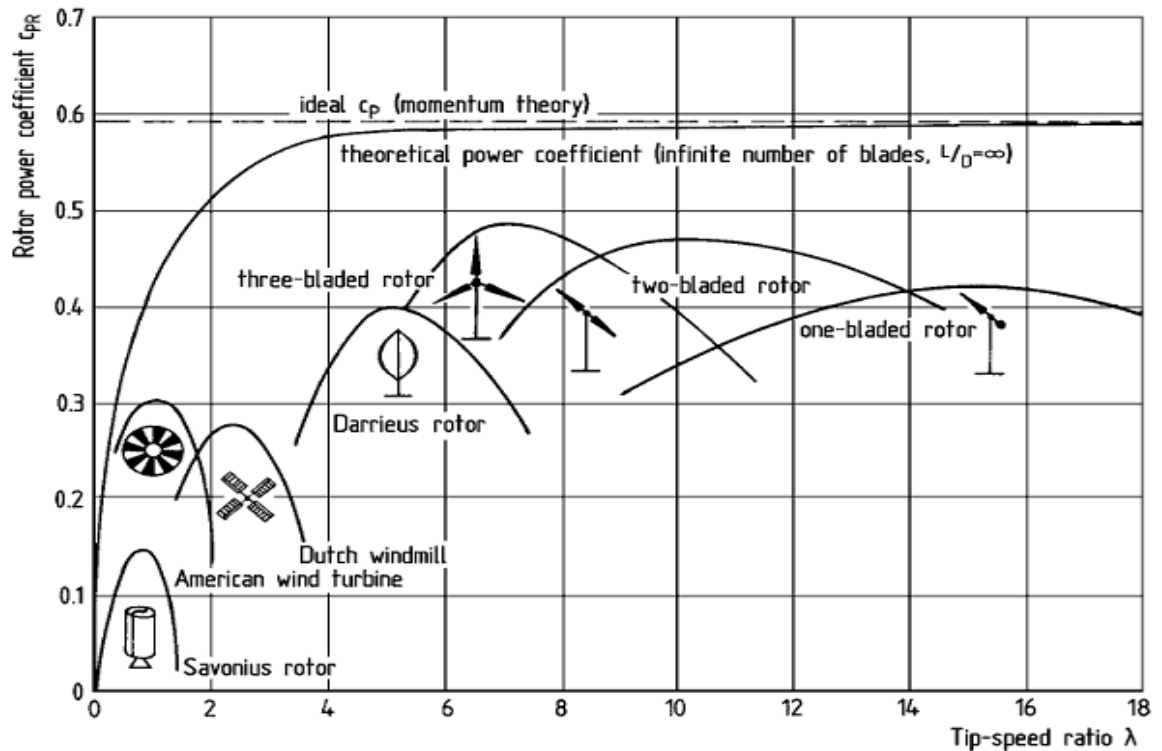
$$C_p = \frac{P}{\rho d H U^3} \quad (2.38)$$

หรือ

$$C_p = \frac{T \omega}{\rho d H U^3} \quad (2.39)$$

$$C_p = C_m \lambda \quad (2.40)$$

กังหันลมชาโวเนียสแบบเดิมจะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลม (Power Coefficient, C_p) อยู่ที่ 0.15 ในช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบ 0 – 1.5



รูปที่ 2.13 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันแต่ละชนิด [16]

2.4 ทฤษฎีการไหลชั้นขอบเขต

ลูกวิก แพรนด์เทิล (Ludwig Prandtl) นักอากาศพลศาสตร์ ชาวเยอรมัน เป็นผู้คิดค้นทฤษฎีชั้นขอบเขต ในปี 1904 ซึ่งก่อนที่แพรนด์เทิล จะค้นพบนั้น ทฤษฎีการไหลได้แบ่งเป็น 2 แนวทางกว้างๆ คือ ทฤษฎีของออยเลอร์ (Euler) ซึ่งกล่าวถึงการไหลที่ไม่มี ความหนืดมาเกี่ยวข้อง (Inviscid Flow) ซึ่งค่อนข้าง ขัดแย้งกับทฤษฎีของนาเวียร์และสโตกส์ ในหลายๆ กรณี ถึงแม้ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับการ ไหลซึ่งมีความหนืดได้ถูก นาเวียร์ (Navier) และ สโตกส์ (Stokes) คิดขึ้นมาในปี ค.ศ. 1827 และ ค.ศ. 1845 ตามลำดับ แต่เนื่องจากความสลับซับซ้อนเชิงคณิตศาสตร์ของสมการ ทำให้การคำนวณสำหรับการ ไหลชนิดเป็นไปไม่ได้ขณะนั้น จนกระทั่ง แพรนด์เทิล ได้เสนอทฤษฎีชั้นขอบเขต ซึ่งแบ่งการ ไหลเป็น 2 ชั้น คือ ชั้นที่อยู่บริเวณพื้นผิวของวัตถุและชั้นที่อยู่นอกเหนือออกไป ชั้นที่ติดกับพื้นผิวนี้มี ลักษณะเป็นชั้นซึ่งบางมากและส่งผลของความหนืดของการไหลมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งชั้นนี้ก็คือ ชั้นขอบเขตนั่นเอง ส่วนชั้นที่อยู่นอกเหนือออกไปเป็นชั้นการไหลแบบไม่มีความหนืด ทฤษฎีและการ

ทดลองซึ่งได้ขาดหายไป ยิ่งไปกว่านั้นทฤษฎีชั้นขอบเขตทำให้เราสามารถแก้ปัญหาการไหลหนืดซึ่งไม่สามารถแก้ปัญหาการไหลหนืดซึ่งไม่สามารถแก้ได้โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ ในการไหลทั้งหมด ดังนั้นทฤษฎีชั้นขอบเขตจึงเป็นจุดเริ่มต้นของกลศาสตร์ของไหลยุคใหม่ การไหลโดยทั่วไปส่วนใหญ่จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนโดยการรบกวนที่ก่อให้เกิดความปั่นป่วนนี้อาจเริ่มจากการไหลในกระแสดิสcreteหรือสภาพที่ขรุขระของพื้นผิว การไหลจะกลายเป็นแบบปั่นป่วนหรือไม่ขึ้นอยู่กับว่าการรบกวนนี้ขยายตัวขึ้นหรือเบาบางลงในทิศทางการไหลซึ่งการไหลในช่วงเริ่มต้นมีความเร็วสม่ำเสมอ ชั้นขอบเขตที่เกิดขึ้นจึงเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) หลังจากนั้นจะเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลง (Transition) และกลายเป็นชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วน (Turbulent) ในที่สุดชั้นขอบเขตนั้นทั้งแรงหนืด (Viscous Force) และแรงเฉื่อย (Inertia Force) มีความเป็นสำคัญเป็นอย่างมาก ดังนั้นค่าเรย์โนลด์ (อัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงหนืด) จึงใช้ในการวิเคราะห์ความยาวคุณลักษณะ (Characteristic Length) ที่ใช้ในการหาค่าเรย์โนลด์ คือความยาวในทิศทางการไหลหรือความหนาของชั้นขอบเขต ในการไหลจริงนั้น ชั้นต่างๆ ไม่ได้แบ่งแยกให้ชัดเจนเหมือนกับที่บรรยายแต่จะต่อเนื่องกันไป จากบริเวณหนึ่งไปสู่อีกบริเวณหนึ่งและถึงแม้ว่าชั้นขอบเขตในการไหลนั้นจะบางมากแต่มีบทบาทเป็นอย่างมากในกลศาสตร์ของไหลตัวอย่างเช่น แรงต้านของการไหลต่อเรือหรือขีปนาวุธหรือประสิทธิภาพของการไหลของอากาศเข้าสู่เครื่องยนต์เทอร์โบเจต เป็นต้น ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นขอบเขตที่เกิดขึ้น

2.5 ทฤษฎีแบบจำลองพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid dynamic) [17]

การวิเคราะห์ปัญหาในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลนั้น ความเข้าใจในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ของการไหลนับว่าเป็นหัวใจสำคัญ ซึ่งระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้อธิบายถึงความเป็นจริงของการไหลซึ่งต้องเกิดการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจและคุ้นเคยกับระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ก่อน โดยไม่มองเพียงแค่ในแง่ของสมการคณิตศาสตร์ แต่จำเป็นต้องเข้าใจถึงความหมายทางกายภาพของพจน์ต่างๆ ในสมการเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปขึ้นกับองค์ประกอบหลัก 3 อย่างคือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา และลักษณะรูปร่างของปัญหาสำหรับการแก้ปัญหาพลศาสตร์ของไหลด้วยการคำนวณ สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลจะเป็นตัวอธิบายถึงความเป็นจริงของการไหลซึ่งต้องเกิดจากสมการอนุรักษ์มวลและอนุรักษ์โมเมนตัม ซึ่งสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยทั้งระบบที่ใช้ในการคำนวณกลศาสตร์ของไหล สามารถอธิบายได้ด้วยระบบสมการ นาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes) อันประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์มวลและโมเมนตัม ดังนี้

2.5.1 สมการอนุรักษ์เชิงมวล (Conservation of mass)

สมการเชิงอนุพันธ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง เป็นสมการพื้นฐานของความเป็นจริงสมการแรกของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล โดยบ่งบอกว่ามวลนั้นไม่สูญหายไป เมื่อพิจารณาการไหลผ่านปริมาตรควบคุม ซึ่งสามารถเขียนเป็นรูปแบบได้ดังนี้

อัตราของมวล ไหลเข้า	-	อัตราของมวล ไหลออก	=	อัตราการสะสมของ มวล
------------------------	---	-----------------------	---	------------------------

จากสมการดังกล่าว สามารถเขียนสมการการไหลต่อเนื่องได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (2.41)$$

เมื่อ x, y, z แทนแกนต่างๆในพิกัดฉาก

x, y, z แทนความเร็วตามแนวแกนพิกัดฉาก x, y, z ตามลำดับ

ρ แทนความหนาแน่นของระบบ

2.5.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum Equation)

เมื่อพิจารณาปริมาตรเล็กๆ ซึ่งเคลื่อนตัวไปตามการไหลและมีแรงกระทำบนผิวหน้าต่างๆ ของปริมาตรควบคุม จะได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมในปริมาตรควบคุมเทียบกับเวลามีค่าเท่ากับผลบวกของแรงทั้งหมดที่กระทำบนปริมาตรควบคุมนั้น ซึ่งแรงที่กระทำบนปริมาตรควบคุมนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Body force เป็นแรงเนื่องจากน้ำหนัก และ Surface force เป็นแรงเนื่องจากการกระจายตัวของความดันและแรงเนื่องจากการกระจายของความเค้น จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันได้กล่าวไว้ว่า มวลของวัตถุคูณด้วยอัตราเร่งจะเท่ากับผลบวกของแรงภายนอกทั้งหมดกระทำบนวัตถุ ในทิศทางเดียวกับความเร่ง สามารถเขียนรูปแบบได้ดังนี้

อัตราโมเมนตัม ไหลเข้า	-	อัตราโมเมนตัม ไหลออก	+	ผลรวมของแรงที่ กระทำกับปริมาตร	=	อัตราการสะสมของ โมเมนตัม
--------------------------	---	-------------------------	---	-----------------------------------	---	-----------------------------

จากสมมูลโมเมนตัมจะได้สมการในแกน x, y, z ดังต่อไปนี้

X-component

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho v u}{\partial y} + \frac{\partial \rho w u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2.43)$$

Y-component

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho w v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (2.44)$$

Z-component

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho w u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v w}{\partial y} + \frac{\partial \rho w^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2.45)$$

เมื่อ	P	คือ ความดัน
	τ	คือ ความเค้นเฉือน
	f_x, f_y, f_z	คือ แรงภายนอกที่กระทำบนทุกๆ จุดในระบบต่อหน่วยมวล (Body Force) ในทิศทางตามแนวพิกัดฉาก

ของไหลในระบบเป็นแบบนิวโทเนียน (Newtonian Fluid) ที่ซึ่งแรงเฉือน (Shear Force) ต่อพื้นที่หรือความดันเฉือนเป็นสัดส่วนกับ (Gradient) ของความเร็ว ดังนั้นจึงสามารถอธิบายค่าของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในทิศทางต่างๆ ได้ในรูปแบบของความแตกต่างของความเร็วและคุณสมบัติของการไหลดังสมการนี้

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.46)$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.47)$$

$$\tau_{zz} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v}) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.48)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.49)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.50)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.51)$$

เมื่อ μ คือ ความหนืดของการไหลในระบบ
 λ คือ สัมประสิทธิ์อันดับที่สองของความหนืด (Second Viscosity Coefficient)
กำหนดให้

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad (2.52)$$

กำหนดให้แรงที่กระทำบนทุกๆจุดในระนาบต่อมวล (Body Forces) มีค่าเฉพาะในแนวแกนพิกัด y เท่านั้น

$$f_x = 0 \quad (2.53a)$$

$$f_y = \rho g \quad (2.53b)$$

$$f_z = 0 \quad (2.53c)$$

เมื่อ g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก มีทิศทางสวนกับแกน y

ในการวิเคราะห์จะกำหนดให้การไหลเป็นแบบคงที่ (Steady State) ค่าความหนาแน่นของของไหลในระบบและความหนืดของไหลในระบบมีค่าคงที่ โดยอุณหภูมิในระบบคงที่ ดังนั้นสามารถรวมเข้ากับสมการอนุรักษ์ข้างต้น และแสดงในรูปแบบใหม่ดังนี้
สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (2.54)$$

สมการอนุพันธ์โมเมนตัม

X-component

$$\rho \left(\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.55)$$

Y-component

$$\rho \left(\frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.56)$$

Z-component

$$\rho \left(\frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial wu}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g \quad (2.57)$$

2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลแบบปั่นป่วน

สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) จะทำให้เกิดการผสมกันหรือการเคลื่อนที่คล้ายวงน้ำวน (Eddy Motion) ในสายหลักของการไหล การเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในระบบจะมีการเคลื่อนที่ไปมาเมื่อเทียบกับเวลา สมการอนุพันธ์ที่ใช้จึงจะต้องขึ้นกับเวลา (Time Dependent Form) ดังนั้นเมื่อจะทำการพิจารณาพฤติกรรมการไหลของอากาศเหนือระบบระบายอากาศที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจึงต้องทำการเปลี่ยนสมการ (2.54) ถึง (2.57) ให้อยู่ในรูปของความเร็วเฉลี่ย (Time Average) โดยทำการกำหนดให้ค่าความเร็วที่ตำแหน่งหนึ่งๆ (Instantaneous Velocity), (u, v, w) มีค่าเท่ากับผลรวมของความเร็วเฉลี่ย (Time Smooth Velocity), $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$ กับค่าของความเร็วที่แปรผันไปจากความเร็วเฉลี่ย (Fluctuation Velocity), (u', v', w') ดังนี้

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.58a)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (2.58b)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (2.58c)$$

เช่นเดียวกับความดันและอุณหภูมิ

$$P = \bar{P} + P' \quad (2.59)$$

เมื่อ $\bar{u}$ คำนวณได้จาก

$$\bar{u} = \frac{1}{t_0} \int_t^{t+t_0} u dt \quad (2.60)$$

และ $\bar{v}, \bar{w}, \bar{P}$ สามารถคำนวณได้จากสมการในรูปแบบเดียวกับสมการ 2.60 เมื่อแทนค่าต่างๆเหล่านี้ลงในสมการ (2.54) ถึง (2.57) ประกอบกับความเร็วเฉลี่ยมีได้ทั้งค่าที่เป็นบวกและค่าที่เป็นลบจึงทำให้ค่าเฉลี่ยของความเร็วที่แปรผันไปจากความเร็วเฉลี่ยมีค่าเท่ากับศูนย์ดังสมการ

$$\bar{u}' = \frac{1}{t_0} \int_t^{t+t_0} u' dt = 0 \quad (2.61)$$

เช่นเดียวกันกับ $\bar{v}', \bar{w}', \bar{P}'$ ดังนั้นจะได้สมการอนุรักษ์ที่อยู่ในรูปของเวลาเฉลี่ย ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (2.62)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

X-component

$$\left(\frac{\partial \rho \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v} \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w} \bar{u}}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \rho \overline{u' u'}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \overline{v' u'}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \overline{w' u'}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} \quad (2.63)$$

Y-component

$$\left(\frac{\partial \rho \bar{u} \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w} \bar{v}}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \rho \bar{u}' \bar{v}'}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v}' \bar{v}'}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w}' \bar{v}'}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} \quad (2.64)$$

Z-component

$$\left(\frac{\partial \rho \bar{u} \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v} \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w}^2}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \rho \bar{u}' \bar{w}'}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v}' \bar{w}'}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w}' \bar{w}'}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} + \rho g \quad (2.65)$$

พบว่าสมการ (2.62) ถึง (2.65) จะมีรูปแบบเหมือนกับสมการอนุพันธ์โมเมนต์ ในสมการ (2.54) ถึง (2.57) ตามลำดับ เพียงแต่มีเทอม $\rho \bar{u}' \bar{u}'$, $\rho \bar{u}' \bar{v}'$, เพิ่มขึ้นมา โดยปกติจะเรียกเทอมเหล่านี้ว่า ความเค้นเรย์โนลด์ส์ (Reynold Stress) (Bird, Stewart and Lightfoot, 1960) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากหน่วยของเทอมดังกล่าวจะสามารถให้นิยามได้ใหม่นี้

$$\bar{\tau}_{xx}^{(t)} = \rho \bar{u}' \bar{u}' \quad (2.66a)$$

$$\bar{\tau}_{xy}^{(t)} = \rho \bar{u}' \bar{v}' \quad (2.66b)$$

เพื่อที่จะทำให้สมการ (2.62) ถึง (2.65) สามารถที่จะใช้ในการคำนวณหาค่าในรูปแบบของความเร็ว จำเป็นต้องทราบค่า $\bar{\tau}_{xx}^{(t)}$, $\bar{\tau}_{xy}^{(t)}$, ฯลฯ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้สมการ Boussinesq's Eddy Viscosity (1977) ในการประมาณค่าแรงเค้นเรย์โนลด์ส์ (Reynolds Stress), $\bar{\tau}^{(t)}$ ให้อยู่ในรูปแบบของความเร็วได้ดังนี้

$$\bar{\tau}_{xy}^{(t)} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (2.67)$$

เมื่อ μ_t คือ ความหนืดของการไหลกรณีที่ไหลแบบปั่นป่วน (Eddy Viscosity) ซึ่งไม่ใช่สมบัติทางกายภาพของของไหลแต่เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งทิศทางและลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นเมื่อค่า $\bar{\tau}^{(t)}$ ต่างๆ ในลักษณะเดียวกับสมการ 3.66 จะได้สมการอนุพันธ์โมเมนต์ของการไหลแบบปั่นป่วนอยู่ในรูปแบบดังนี้

X-component

$$\left(\frac{\partial \rho \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v} \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w} \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} + \mu_t \nabla^2 \bar{u} \quad (2.63)$$

Y-component

$$\left(\frac{\partial \rho \bar{u} \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w} \bar{v}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} + \mu_t \nabla^2 \bar{v} \quad (2.64)$$

Z-component

$$\left(\frac{\partial \rho \bar{u} \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v} \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w}^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} + \mu_t \nabla^2 \bar{w} + \rho g \quad (2.65)$$

ในการแก้สมการโมเมนตัมของระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อใช้ประมาณค่าความหนืดในสถานะที่ของไหลมีการไหลแบบปั่นป่วนหรือค่า μ_t ที่เพิ่มขึ้นมาในสมการ

2.7 แบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับปัญหาด้านอากาศพลศาสตร์

ในปัจจุบันไม่มีแบบจำลองความปั่นป่วนที่สามารถอธิบายปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนได้ถูกต้องทุกปัญหา การเลือกใช้แบบจำลองใดมาอธิบายปัญหาที่ศึกษาต่างๆ นั้นต้องพิจารณาถึงลักษณะทางกายภาพของปัญหาที่จะพิจารณา สำหรับการการศึกษาด้านอากาศพลศาสตร์ เช่น การไหลผ่านปีกเครื่องบิน กังหันลม ซึ่งรูปร่างที่ซับซ้อนนั้นจะทำให้พฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนต่างกัน แบบจำลอง Shear Stress Transport (SST) [28] โดย Menter (1993, 1994) ได้รวมเอาข้อดีของแบบจำลอง 2 แบบเข้าด้วยกัน โดยการให้น้ำหนัก (Weighting) ของค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองไม่เท่ากันและมีการกำหนดขีดจำกัดของการเกิดของ Eddy Viscosity ของการไหลแบบ Strained flow ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แบบจำลองทั้งสองแบบจะแบบส่วนกันใช้ โดยใช้แบบจำลอง $k-\omega$ บริเวณใกล้ผิวผนัง และใช้แบบจำลอง $k-\varepsilon$ (ที่ถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบของ $k-\omega$) ที่ไกลขอบของชั้นขีดผิวรวมไปถึงส่วนที่ถัดออกไป การสับเปลี่ยนการจำลองสามารถทำได้โดยใช้ Blending function ปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของแบบจำลอง นอกจากนี้แบบจำลองแบบ SST ได้ทำการปรับปรุงค่า Eddy

viscosity โดยการบังคับค่า Turbulent shear stress ให้มีขอบเขต การปรับปรุงนี้ทำให้การทำนายการไหลที่มี Adverse pressure gradient อย่างรุนแรงได้ดีขึ้น เพื่อที่จะทำการรวมแบบจำลอง $k-\varepsilon$ กับ $k-\omega$ เข้าด้วยกัน โดยความแตกต่างจากแบบจำลอง $k-\omega$ แบบเดิม คือการเพิ่มเทอม Cross-diffusion เข้าไปในสมการ ω ค่าคงที่ของแบบจำลอง $k-\omega$ เดิมจะถูกคูณด้วยฟังก์ชัน F_1 และทำการปรับเปลี่ยนไปยังแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ด้วยฟังก์ชัน $(1-F_1)$ สมการที่เกี่ยวข้องกันแต่ละแบบจำลองจะถูกรวมเข้าด้วยกันค่าฟังก์ชัน F_1 ถูกออกแบบให้มีค่าเป็น 1 ที่บริเวณใกล้ผนังและเป็น 0 เมื่อไกลออกจากผนัง

โดยทั่วไปแบบจำลอง $k-\varepsilon$ กับ $k-\omega$ ทั้งสองแบบจะแก้ปัญหการไหลแบบแยกตัวได้ต่ำกว่าค่าที่เป็นจริง โดยจุดการเกิดการไหลแยกเกิดช้ากว่าความเป็นจริง ซึ่งเป็นข้อด้อยที่รุนแรงสำหรับงานทางด้านอากาศยานศาสตร์ เหตุผลของข้อด้อยนี้เนื่องจาก แบบจำลองทั้ง 2 แบบ ไม่ได้มีกลไกของการส่งผ่าน Turbulent shear stress ดังนั้นการปรับปรุงทำได้โดยการใช้วิธีการทางพีชคณิต ด้วยการจำลองการส่งผ่าน Turbulent shear stress ดังกล่าวให้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ดังนั้นในแบบจำลอง SST ได้มีการปรับปรุงค่าฟังก์ชันการคำนวณค่า Eddy Viscosity เพื่อปรับปรุงการทำนายการไหลแบบแยกตัวด้วย Blending Function F_2 ดังนี้

$$\mu_t = \min \left[\frac{\rho k}{\omega}; \frac{a_1 \rho k}{SF_2} \right] \quad (2.66)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.67)$$

เมื่อ $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ คือ Strain rate โดยที่

$$F_2 = \tanh \left\{ \left(\max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.9\omega y}; \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \right) \right\} \quad (2.68)$$

สมการ Transport ของ $k-\omega$ SST เป็นดังนี้

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = P_k - D_k \quad (2.69)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \omega - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] = \alpha \rho \frac{P_k}{\mu_t} - D_\omega + 2(1 - F_2) CD_{k\omega} \quad (2.70)$$

เมื่อ

$$P_k = \min \left[\mu_t S^2; 10 \rho \beta^* k \omega \right] \quad (2.71)$$

$$D_k = \rho \beta^* k \omega \quad (2.72)$$

$$D_\omega = \beta \rho \omega^2 \quad (2.73)$$

ค่าฟังก์ชัน F_1 ถูกออกแบบเพื่อผสมค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองของ $k-\omega$ ตั้งแต่ในส่วนที่เป็นชั้นขีดผิวกับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ (ที่ได้รับการปรับเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ $k-\omega$) ในส่วนที่เป็น Free-shear layer และ ส่วน Free-stream ฟังก์ชันนี้มีค่าเป็น 1 ที่ผิว มีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อถัดออกมาในส่วนที่เป็นชั้นขีดผิว และมีค่าเข้าสู่ 0 ที่ขอบของชั้นขีดผิว ค่าฟังก์ชันการผสม F_1 นิยามดังนี้

$$F_1 = \tanh \left\{ \left(\min \left[\max \left[\frac{\sqrt{k}}{0.9 \omega y}; \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right]; \frac{4 \rho \omega_2 k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right)^4 \right\} \quad (2.74)$$

เมื่อ

$$CD_{k\omega} = \max \left[\frac{2 \rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20} \right] \quad (2.75)$$

ซึ่งค่า $CD_{k\omega}$ คือ Cross-diffusion ในสมการ $k-\omega$ สำหรับค่าคงที่ของแบบจำลอง SST เป็นดังนี้

$$a_1 = 0.31, k = 0.41, \beta^* = \frac{9}{100}$$

สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง β γ σ_k และ σ_ω แสดงให้อยู่ในรูปของตัวแปรทั่วไป ϕ และถูกกำหนดโดยการผสมของตัวแปรของแบบจำลอง $k-\omega$ ตั้งแต่ (ϕ_1) กับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ที่ได้รับการปรับเปลี่ยนแล้ว (ϕ_2)

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad \text{เมื่อ} \quad \phi = \{\sigma_k, \sigma_\omega, \beta, \alpha\} \quad (2.76)$$

ค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองด้านในมีค่าดังนี้ $\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075, \alpha_1 = 0.553$

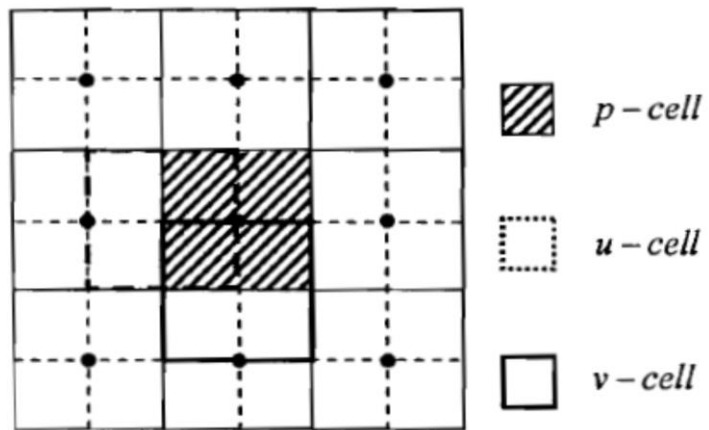
สัมประสิทธิ์แบบจำลองด้านนอกมีค่าดังนี้ $\sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828, \alpha_2 = 0.440$

2.8 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method)

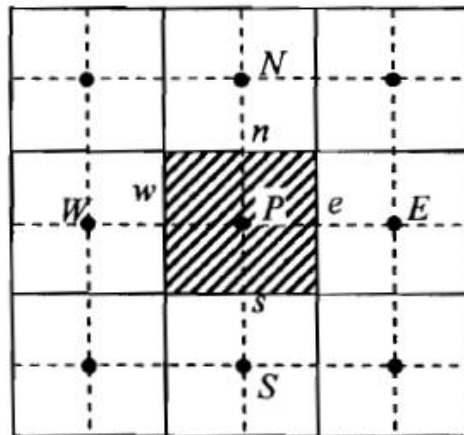
ระเบียบวิธีการไฟไนต์วอลุ่มเป็นวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่กำหนดซึ่งในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน สามารถอธิบายด้วยสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นการวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Analysis) จึงเข้ามามีบทบาทในการหาผลเฉลยโดยประมาณ โดยอาศัยการกระจายพจน์ต่างๆ เพื่อประมาณสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยสมการพีชคณิต (System of Algebraic Equation) ซึ่งสามารถหาผลเฉลยของระบบสมการได้ด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในการหาผลเฉลยโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ระบบสมการที่ใช้แก้หาผลเฉลย คือสมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยเป็นสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหล สร้างขึ้นบนหลักการที่สอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์ ได้แก่ กฎการอนุรักษ์มวล กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม ซึ่งผลเฉลยการไหลที่ได้นั้นไม่สอดคล้องกับกับสมการอนุรักษ์และเพื่อให้ค่าที่ได้จากสมการนี้มีความสอดคล้องกัน จึงจำเป็นต้องใช้ขั้นตอนที่เรียกว่า SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) ซึ่งพัฒนาโดย Patankar and Spalding (1972) ขั้นตอนวิธีนี้เป็นขั้นตอนการแก้ปัญหาสนามการไหล โดยการสมมติค่าความดันและความเร็วในขอบเขตของปัญหาที่สนใจ แล้วคำนวณหาค่าความเร็วจากความเร็วและความดันสมมติ เพื่อที่จะนำค่าความเร็วที่คำนวณความดันที่ถูกต้อง ซึ่งค่า Pressure-correction ที่ได้นี้จะถูกนำกลับมาหาค่าความเร็วและทำซ้ำตามขั้นตอนดังกล่าวจนกระทั่งผลเฉลยเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งวิธีนี้เป็นการช่วยให้ค่าความเร็วและความดันมีความสัมพันธ์เป็นไปตามการอนุรักษ์โมเมนตัมและการอนุรักษ์มวล โดยวิธีแบบกริดเยื้องกัน (Staggered Grid)

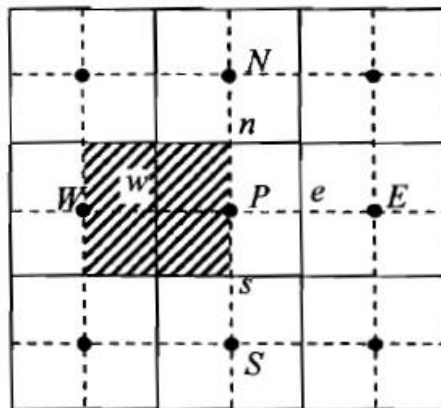
กริดแบบเยื้องกันเป็นการแบ่งกริดเพื่อใช้กริดของความเร็วอยู่ระหว่างจุดต่อของตัวแปรสเกลาร์ ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับสมการความดันต่อเนื่องและแก้ปัญหาการกริด Checker-board effect อันจะก่อให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งการวางกริดของสเกลาร์ (ในที่นี้คือความดัน p) และความเร็ว u และ v แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 และปริมาตรควบคุมของ p, u และ v แสดงได้ดังรูปที่ 2.17 ถึง 2.19



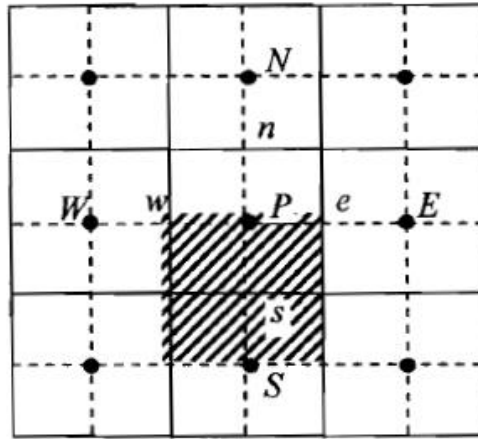
รูปที่ 2.14 การวางตัวของ Staggered grid



รูปที่ 2.15 การวางตัวของปริมาตรควบคุม $p-cell$



รูปที่ 2.16 การวางตัวของปริมาตรควบคุม $u-cell$



รูปที่ 2.17 การวางตัวของปริมาตรควบคุม v-cell

จากสมการ โมเมนตัมในการแนวแกน x

$$\frac{\partial \rho u u}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \left[\frac{\partial}{\partial x} \mu \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left[\frac{\partial u}{\partial y} \right] \right] \quad (2.77)$$

และสมการ โมเมนตัมในการแนวแกน y

$$\frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v v}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \left[\frac{\partial}{\partial x} \mu \left[\frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right] \right] + (\rho - \rho_0)g \quad (2.78)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ 2.74 และ 2.75 ตลอดปริมาตรควบคุมในรูปที่ และ จะได้สมการ ดิสครีไทซ์ (Discretized Equation) ดังสมการที่ 2.79 และ 2.80

ในแนวแกน x

$$a_p u_p = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + S_u V + (p_w - p_p) A \quad (2.79)$$

ในแนวแกน y

$$a_p v_p = \sum_{nb} a_{nb} v_{nb} + S_v V + (p_s - p_p) A \quad (2.80)$$

โดยที่

$$\sum_{nb} a_{nb} u_{nb} = a_N u_N + a_S u_S + a_E u_E + a_W u_W \quad (2.81)$$

$$\sum_{nb} a_{nb} v_{nb} = a_N v_N + a_S v_S + a_E v_E + a_W v_W \quad (2.82)$$

สามารถจัดสมการอนุรักษ์มวลให้อยู่ในรูปของสมการผลต่างความดันเพื่อใช้แก้ไขค่าความดันและความเร็วในสนามการไหล โดยเริ่มจากกำหนดค่าต่อไปนี้

$$p = p^* + p' \quad (2.83)$$

$$u = u^* + u' \quad (2.84)$$

$$v = v^* + v' \quad (2.85)$$

เมื่อ	p, u, v	คือ ความดันและความเร็วที่ถูกต้อง
	p^*, u^*, v^*	คือ ความดันที่กำหนดขึ้น (Guessed Pressure) และความเร็วที่คำนวณจาก p^*
	p', u', v'	คือ ความดันแก้ไข (Pressure Correction) และค่าความเร็วแก้ไข (Velocity Correction)

โดยที่ความเร็ว u^* และ v^* สามารถคำนวณได้จากสมการโมเมนตัมที่มีลักษณะเช่นเดียวกับสมการ 2.79 และ 2.80 ซึ่งจะได้สมการดิฟเฟอเรนเชียลของความเร็วทั้งสองเป็น

$$a_w u_w^* = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}^* + S_u V + (p_w^* - p_p^*) A_w \quad (2.86)$$

$$a_s v_s^* = \sum_{nb} a_{nb} v_{nb}^* + S_v V + (p_s^* - p_p^*) A_s \quad (2.87)$$

นำสมการ 2.83 ถึง 2.85 แทนในสมการ 2.79 และ 2.80 แล้วลบด้วยสมการ 2.86 และ 2.87 ตามลำดับ

$$a_w u'_w = \sum_{nb} a_{nb} u'_{nb} + (p'_w - p'_p) A_w \quad (2.88)$$

$$a_s v'_s = \sum_{nb} a_{nb} v'_{nb} + (p'_s - p'_p) A_s \quad (2.89)$$

โดยที่กำหนดให้ $\sum_{nb} a_{nb} u'_{nb}$ และ $\sum_{nb} a_{nb} v'_{nb}$ มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อการไหลสอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวล จะได้สมการของค่าความเร็วแก้ไขของ u_w เป็น

$$a_w u'_w = (p'_w - p'_p) A_w$$

หรือ

$$u_w = d_w (p'_w - p'_p) \quad (2.90)$$

เมื่อ

$$d_w = \frac{A_w}{a_w}$$

ดังนั้น

$$u_w = u_w^* + d_w (p'_w - p'_p) \quad (2.91)$$

โดยพิจารณาแบบเดียวกันสำหรับ u_e จะได้

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_e - p'_p) \quad (2.92)$$

และสำหรับสมการความเร็วแก้ไขของ v_s

$$a_s v'_s = (p'_s - p'_p) A_s$$

$$v'_s = d_s (p'_s - p'_p) \quad (2.93)$$

เมื่อ $d_s = \frac{A_s}{a_s}$

ดังนั้น

$$v_s = v_s^* + d_s (p'_s - p'_p) \quad (2.94)$$

และจะได้

$$v_n = v_n^* + d_n (p'_n - p'_p) \quad (2.95)$$

จากสมการอนุรักษ์มวลที่เขียนในรูปสมการเชิงอนุพันธ์

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0$$

อินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมได้เป็น

$$\int_{\Delta V} \left[\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} \right] dV = 0$$

หรือ

$$(\rho u A)_e - (\rho u A)_w + (\rho u A)_n - (\rho u A)_s = 0 \quad (2.96)$$

เมื่อแทนค่าความเร็วจากสมการ (2.92), (2.93), (2.95) และ (2.96) จะได้สมการของความดันแก้ไขดังต่อไปนี้

$$a_p P'_p = a_N P'_N + a_S P'_S + a_E P'_E + a_W P'_W + b \quad (2.97)$$

เมื่อ $a_N = \rho d_n A_n$, $a_S = \rho d_s A_s$, $a_E = \rho d_e A_e$, $a_W = \rho d_w A_w$

$$b = (\rho u^* A)_e - (\rho u^* A)_w + (\rho u^* A)_n - (\rho u^* A)_s$$

ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอน Simple Algorithm ได้ดังนี้

1. เริ่มต้นสมมติค่าของ p^*, u^*, v^*
2. คำนวณค่า u^*, v^* สมการ 2.86 และ 2.87
3. นำค่า u^*, v^* ที่คำนวณได้แทนในสมการ 2.97
4. คำนวณค่า p' จากสมการ 2.97 แล้วนำมาแทนใน 2.783 จากนั้นจึงนำค่า p ที่คำนวณได้กำหนดให้เป็น p^* ค่าใหม่
5. คำนวณค่า u, v จากสมการ 2.91, 2.92, 2.46, 2.47, 2.48 โดยใช้ค่า p' จากขั้นตอนที่ 4 จากนั้นจึงกำหนดค่า b ค่าใหม่
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 จนกระทั่ง p^*, u^*, v^* มีค่าคู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง โดยตรวจสอบจากการเข้าใกล้ศูนย์ของพจน์ b ในสมการ (2.97) ซึ่งแสดงว่าค่า p^*, u^*, v^* ที่คำนวณได้สอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวล

2.9 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการรวบรวมงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ พบว่าได้มีการศึกษาถึงสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียสและกังหันลมแนวตั้งชนิดอื่นๆ พร้อมทั้งวิธีการจำลองของไหลผ่านกังหันลมมากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

Mahmoud และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาและทดลองกังหันลมชาโวเนียสที่มีรูปร่างต่างกัน โดยทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพดังนี้คือ จำนวนใบกังหัน แผ่นปิดใบพัดด้านบนและด้านล่าง และจำนวนชั้นของกังหันลม จากการทดลองพบว่าจำนวนใบพัดสองใบจะให้ประสิทธิภาพดีกว่า 3 และ 4 ใบ กังหันลมที่มีแผ่นปิดใบพัดด้านบนและด้านล่างตัวกังหันจะให้ประสิทธิภาพดีกว่ากังหันลมที่ไม่มีแผ่นปิด กังหันลมชาโวเนียสสองชั้นจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับกังหันลมชั้นเดียว จากการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพนั้นได้ทำการวัดค่าแรงบิดคงที่ของกังหันลมที่ความเร็วแตกต่างกันและได้สรุปเปรียบเทียบผลทั้งหมดลงในงานวิจัย

Saba และคณะ [19] ได้ใช้อุโมงค์ลมเพื่อทำการทดสอบสมรรถนะทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมชาโวเนียสในกรณีที่ใช้ใบพัดสองใบและสามใบ โดยทดสอบร่วมกับกังหันลมที่เป็นแบบชั้นเดียวจนถึงสามชั้น พร้อมทั้งทำการทดสอบลักษณะใบของกังหันที่เป็นเดิมและแบบปิดใบและนำไปใช้ในแบบชั้นแต่ละชั้น โดยให้พื้นที่กวาดลมมีค่าเท่ากัน (Project area) จากการทดลองเพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดพบว่า ที่รูปแบบกังหันลมสองชั้นแบบสองใบพร้อมด้วยการปิดใบกังหันจะให้ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานมากที่สุดคือ 0.31

Zhou และ Rempfer [20] ได้ใช้โปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การหมุนทิศทางของความเร็วลม และแรงดันที่กระจายตัวรอบกังหัน โดยรูปร่างที่ทำการวิเคราะห์คือ กังหันลมชาโวเนียสรูปแบบเดิมและกังหันลมชาโวเนียสรูปแบบใหม่ การใช้โปรแกรมจำลองได้กำหนดใช้ Star-CCM+ และการเคลื่อนไหวยของกังหันได้ใช้เทคนิคการเคลื่อนกริด จากการทดลองพบว่ากังหันลมรูปแบบใหม่ให้ค่าแรงบิดและสัมประสิทธิ์กำลังงานที่ดีกว่ากังหันลมรูปแบบเดิม และสามารถดูทิศทางการไหล และความดันที่กระจายตัวผ่านโปรแกรมจำลองได้เช่นกัน

Hayashi และคณะ [21] ได้ใช้อุโมงค์ทดสอบสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียส โดยทำการวิเคราะห์รูปแบบใบสองรูปแบบ คือ กังหันลมชาโวเนียสแบบเดิมและกังหันลมชาโวเนียสแบบสามชั้น โดยกำหนดใบกังหันสองใบที่ความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ในการทดลองได้ทำการวัดค่าแรงบิดขณะกังหันลมหยุดนิ่งที่มุมต่างๆ และแรงบิดที่ความเร็วรอบต่างกัน ผลจากการทดลองพบว่า

(1) แรงบิดขณะกัณฑ์ล้มหยุดนิ่งที่มุมของกัณฑ์ต่างๆ กัณฑ์ล้มซาโวเนียสแบบสามชั้นจะให้ค่าแรงบิดเป็นบวกทุกมุมของกัณฑ์และจะให้แรงบิดที่คงที่มากกว่ากัณฑ์ล้มแบบเดิม (2) ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานสูงสุดของกัณฑ์ล้มแบบสามชั้นจะมีค่าเพียง 75% ของกัณฑ์ล้มแบบชั้นเดียว (3) ค่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงบิดที่อัตราส่วนความเร็วปลายต่างๆ พบว่า กัณฑ์ล้มแบบสามชั้นมีค่าการเปลี่ยนน้อยและต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อความเร็วปลายมากขึ้น ในขณะที่กัณฑ์ล้มแบบเดิมมีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด ที่พุ่งขึ้นก่อนลดลงตามความเร็วปลายที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ทราบว่ากัณฑ์ล้มซาโวเนียสแบบสามชั้นจะให้แรงบิดที่ราบเรียบและคงที่กว่าแบบเดิม

Altan และ Atilgan [22] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบของการเพิ่มสมรรถนะของกัณฑ์ล้มซาโวเนียส โดยอุปกรณ์ที่ใช้เพิ่มสมรรถนะคือแผ่นบังคับทิศทางลมเข้าสู่กัณฑ์ ในการทดลองครั้งนี้มีตัวแปรที่ใช้คือ ความยาวของแผ่นบังคับทิศทางลมและมุมทางเข้าของแผ่นบังคับทิศทาง จากผลการทดลองพบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองมีความใกล้เคียงกันและผลจากตัวแปรในการทดลองที่ให้สมรรถนะดีที่สุดคือ แผ่นบังคับทิศทางลมที่มีความยาวสูงสุดกับมุมทางเข้า $\beta=15^\circ$ $\alpha=45^\circ$ โดยให้แรงบิดเริ่มต้นสูงสุดที่ 2.2 N.m

Mohamed และคณะ [13] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความเหมาะสมของอุปกรณ์ป้องกันลม ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของกัณฑ์ โดยในการทดลองมีตัวแปรหลักคือตำแหน่งของแผ่นป้องกันลมด้านใบหมุนกลับและมุมของแผ่นป้องกันลม และทำการวิเคราะห์ร่วมกับจำนวนใบพัดของกัณฑ์ ผลจากการทดลองพบว่าที่ระยะและมุมของแผ่นป้องกันลมที่เหมาะสมจะให้ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานเพิ่มขึ้น 27.5% สำหรับใบพัดสองใบและเพิ่มขึ้น 32% สำหรับใบพัดสามใบ และเมื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเริ่มต้นพบว่าค่าสูงขึ้นจากการติดอุปกรณ์เสริม และส่งผลให้กัณฑ์ล้มสามารถเริ่มต้นทำงานได้ดีขึ้น

จารุวรรณ และ ทวิช [23] ได้ทำการประเมินศักยภาพของ CFD ในการไหลผ่านกัณฑ์ล้มแนวตั้ง โดยจำลองเชิงตัวเลขของการไหลผ่านกัณฑ์ล้มด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์การไหล กัณฑ์ล้มที่ใช้ในการจำลองคือกัณฑ์ล้มแนวตั้งขนาดเล็กแบบแรงยก การจำลองตัวเลขกระทำโดยใช้วิธีปริมาตรจำกัดใน 3 มิติ แบบไร้โครงสร้างประกอบด้วยเทคนิคการเลื่อนกริด (Sliding mesh technique) ในการหาผลเฉลยของสมการอนุกรมมวลและโมเมนตัม ผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎี โดยค่าแรงบิดมีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วสัมพัทธ์และมุมปะทะที่เข้าสู่หน้าตัดกัณฑ์ ผลเฉลยจากการคำนวณสามารถนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกัณฑ์ได้ การศึกษาการไหลผ่านกัณฑ์โดยใช้เทคนิคการเลื่อนกริดและทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Sandia National Laboratories ถือว่าประสบผลสำเร็จในเบื้องต้นและสรุปได้ว่าโปรแกรมมีศักยภาพเพียงพอที่จะใช้ใน

การทำนายของไหลผ่านกังหันลมแกนตั้ง ซึ่งสามารถใช้ในการช่วยออกแบบและพัฒนาประสิทธิภาพของกังหันได้ต่อไป

ชโลธร และ ทวิช [24] ได้ทำการนำเสนอการจำลองของไหลที่สภาวะคงตัวผ่านกังหันลมแกนนอนที่ไม่มีการบิดใบกังหัน ด้วยโปรแกรม CFD เพื่อทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม การจำลองการไหลทำโดยหาผลเฉลยของสมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัม ด้วยวิธีปริมาตรจำกัดใน 3 มิติ โดยใช้วิธีการของความเร็วมัธยัสถ์ที่ให้กังหันอยู่กับที่เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงหมุนไป ในการศึกษา 2 กรณีหลักคือ การไหลแบบไม่คิดความหนืด และการไหลแบบคิดความหนืด (โดยทำการคำนวณร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon) และใช้วิธีการปรับกริดแบบละเอียดเฉพาะที่ เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์กับการทดลองกังหันลมของ National Renewable Lab พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้สามารถนำวิธีการจำลองของไหลไปใช้ในการออกแบบกังหันลมต่อไปในอนาคตได้

เกียรติจักร [10] ได้ทำการประยุกต์ใช้ทฤษฎีส่วนของใบกังหันและทฤษฎีโมเมนตัมแบบลำการไหลแบบเดี่ยว วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลมแนวตั้งชนิด 3 ใบโดยเปรียบเทียบการใช้แผนอากาศแบบ NACA 0012, NACA 0015, NACA 0018 ผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานลมของแผนอากาศแบบ NACA 0012 มีค่าสัมประสิทธิ์พลังงานมากกว่าแบบแผนอากาศชนิดอื่นๆ โดยคิดวิเคราะห์ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 4 ดังนั้นจึงสามารถนำแบบแผนอากาศมาสร้างใบกังหันเพื่อใช้จริงต่อไปได้

จารุวรรณ และ ทวิช [25] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการหมุนด้วยตัวเองของกังหันลมแกนตั้งแบบไม่บิดใบและแบบบิดใบ โดยพิจารณาผลกระทบของจำนวนใบร่วมด้วย การวิเคราะห์ทำได้โดยหาความสัมพันธ์ของทิศทางความเร็วลมกับตำแหน่งของใบกังหัน และเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านจากข้อมูลการทดลองหลังจากนั้นนำไปคำนวณหาแรงบิดเริ่มต้น ผลการทดลองพบว่ากังหันลมแบบไม่บิดใบแสดงให้เห็นถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงในแนวสัมผัสของใบกังหันเป็นลบที่มุมหันประมาณ 15° ถึง 50° และที่มุม 310° ถึง 345° การเพิ่มจำนวนใบกังหันจะทำให้กังหันลมมีแรงบิดเริ่มต้นสูงขึ้น และมีแรงบิดสม่ำเสมอในทุกๆ มุมของกังหันลม ส่วนใบกังหันแบบบิดเกลียวให้ค่าแรงบิดเริ่มต้นคงที่และไม่มีมุมใดแสดงผลเป็นลบ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการบิดใบสามารถแก้ปัญหาการเริ่มต้นหมุนและแรงบิดไม่สม่ำเสมอได้ของกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งได้

พรเทพ [26] ได้ทำการศึกษาการออกแบบและทดสอบสมรรถนะของกังหันลมชนิดแกนหมุนแนวตั้งในช่วงอัตราความเร็วลม 2.5 - 6 เมตร/วินาที ที่เหมาะกับการใช้งานในภูมิภาคของประเทศไทย

แบบจำลองกังหันลมแกนตั้งที่สร้างขึ้นโดยใช้แพนอากาศ Lenz II มีความยาวคอร์ด 20 เซนติเมตร ใบกังหันยาว 21.4 เซนติเมตร จำนวน 2, 3, 4 ใบพัด โดยทดสอบกับอุโมงค์ลมและคำนวณหาประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดนี้ ผลการทดลองพบว่าแบบแพนอากาศ Lenz II จำนวน 4 ใบ จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ที่ระดับความเร็วลม 6 เมตร/วินาที

เจนวิทย์ [27] ได้ศึกษาประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมประเภทแกนหมุนตามแนวนอน โดยการปรับปรุงรูปร่างของใบพัดและติดตั้ง Gurney flap ที่บริเวณชายหลังของใบพัด โดยใช้วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยเริ่มต้นการวิเคราะห์ผลแบบ 2 มิติจากรูปร่างหน้าตัดของใบพัดต้นแบบและใบพัดที่ปรับปรุงรูปร่างและติดตั้ง Gurney flap ที่ขนาดความสูง 1-4% เทียบกับความยาวคอร์ด ที่มุมปะทะต่าง ๆ กัน เพื่อวิเคราะห์หาขนาดความสูงที่เหมาะสม นำไปสู่การคำนวณแบบ 3 มิติเพื่อทำนายคุณลักษณะการไหลของกระแสอากาศและเปรียบเทียบประสิทธิภาพกำลังงาน ที่เกิดขึ้นของกังหันลมทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงรูปร่างและติดตั้ง Gurney flap โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Periodic ร่วมกับวิธีแกนหมุนอ้างอิง (Moving Reference Frame) และใช้ชุดสมการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\omega$ SST ในการคำนวณระบบสมการ ณ สถานะการไหลของกระแสมคังที่และไม่เกิดการอัดตัว ในช่วงของอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด (Tip Speed Ratio) จาก 0.82 ถึง 9.00 เมื่อกำหนดความเร็วของกระแสมคังที่ 8 เมตรต่อวินาที จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความสูงของ Gurney flap ในช่วง 1-3% เทียบกับความยาวคอร์ด สามารถเพิ่มแรงยกได้มากขึ้น ขณะที่แรงต้านเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่งผลให้ใบพัดสามารถสร้างประสิทธิภาพกำลังงานได้มากขึ้นในช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัดมากกว่า 4.91

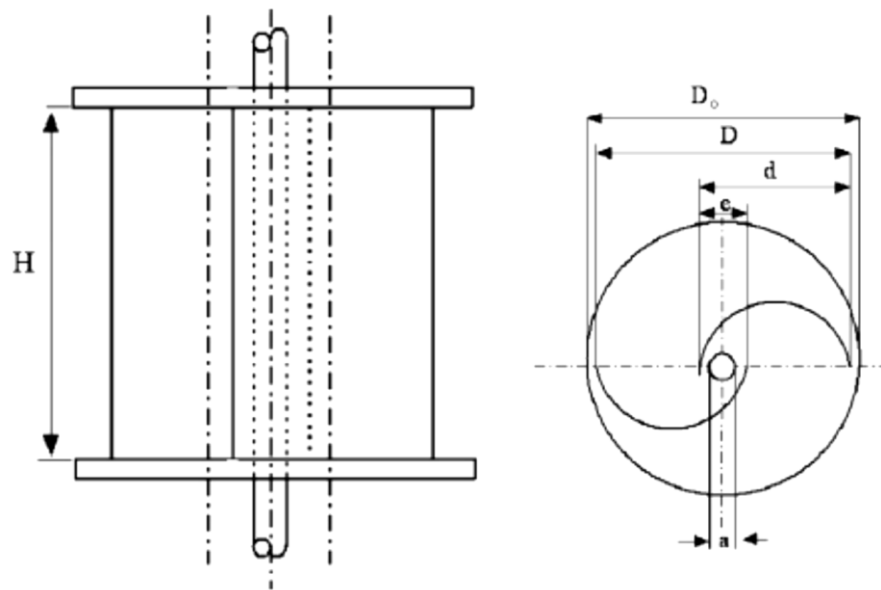
จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลมชาโวเนียส ได้แก่ อัตราความสูงของกังหันและความกว้างของกังหัน จำนวนชั้นของกังหัน จำนวนใบ และช่องว่างระหว่างกังหันลม จากปัจจัยดังกล่าว ผู้วิจัยสามารถนำมาสร้างเป็นกังหันลมต้นแบบเพื่อคำนวณและทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานได้ ซึ่งในต่างประเทศได้มีการคำนวณโดยใช้โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล CFD ร่วมกัน และทดสอบค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งผลจากการทดลองพบที่มีความใกล้เคียงกัน สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันจะทำการศึกษาและทดสอบผ่านอุโมงค์ลมและการคำนวณทางคณิตศาสตร์เป็นจำนวนมาก ซึ่งหากเราทำการศึกษาโดยนำวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล CFD ที่ได้จากงานวิจัยมาประยุกต์ใช้ จะทำให้สามารถลดระยะเวลาและต้นทุนที่ใช้ในการทดลองได้ ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรูปร่างใบพัดที่มีผลต่อสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียสโดยใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล เพื่อให้ได้ทราบถึงวิธีและการหาค่าสมรรถนะของกังหันลมผ่านโปรแกรม CFD ที่เหมาะสม และเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 3 ระเบียบวิธีในการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษารูปแบบของกังหันลมและการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมทั้งสมมติฐานของแบบจำลองที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาประยุกต์กับแบบจำลองการไหลของอากาศผ่านกังหันลมโซวเนียส จากนั้นกำหนดรูปร่างของใบพัดเพื่อใช้เป็นตัวแปรเบื้องต้น เงื่อนไขขอบเขต และทำการจำลองของไหลของอากาศผ่านตัวกังหันลม โดยวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของกังหันที่มีรูปร่างใบพัดต่างกัน สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังนี้

3.1 การออกแบบใบพัดของกังหันลมโซวเนียส

การออกแบบกังหันลมโซวเนียสแบบรูปแบบทั่วไปใบของกังหันจะมีรูปร่างที่สมมาตรกัน หรือเรียกรูปร่างของกันหันลมชนิดนี้ว่า รูปร่างตัว S (S-Shape) โดยพื้นส่วนรับลมและทำให้กังหันลมหมุนจะเรียกว่า พื้นในส่วนโค้งใน (Concave) หรือเรียกว่า Advancing blade และพื้นส่วนรับลมและทำให้เกิดการต้านการหมุนจะเรียกว่า พื้นในส่วนโค้งนอก (Convex) หรือเรียกว่า Returning blade โดยการออกแบบกังหันลมชนิดจะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนภาพอธิบายโครงสร้างของกังหันลม

พื้นที่ของกังหันหรือพื้นที่รับลม (Rotor Area) คือ

$$A = DH \quad (3.1)$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกังหัน (m)

H คือ ความสูงของกังหัน (m)

อัตราส่วนส่วนที่ใบกังหันซ้อนทับกัน (Overlap ratio) คือ

$$OR = \frac{e}{d} \quad (3.2)$$

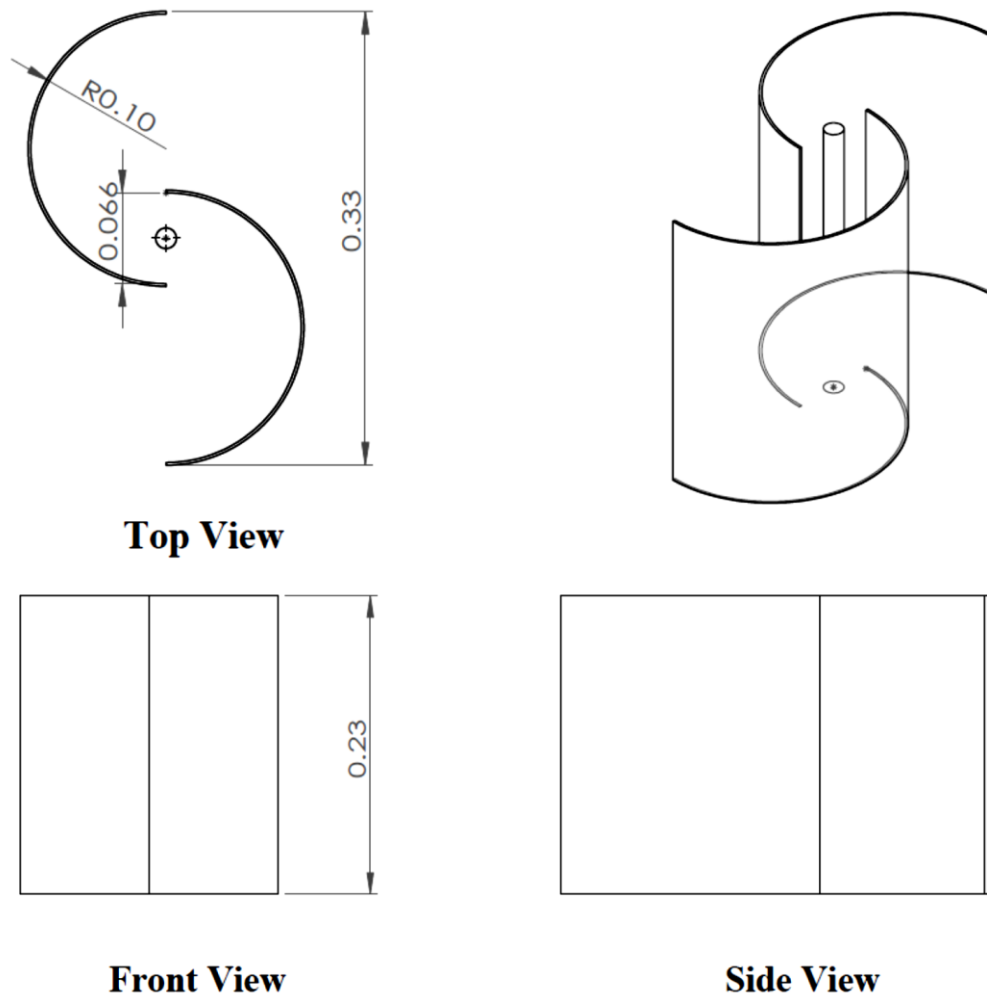
เมื่อ e คือ ระยะที่กังหันซ้อนทับกัน (m)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (m)

อัตราส่วนความสูงกับเส้นผ่านศูนย์กลางกังหันลม (Aspect ratio) คือ

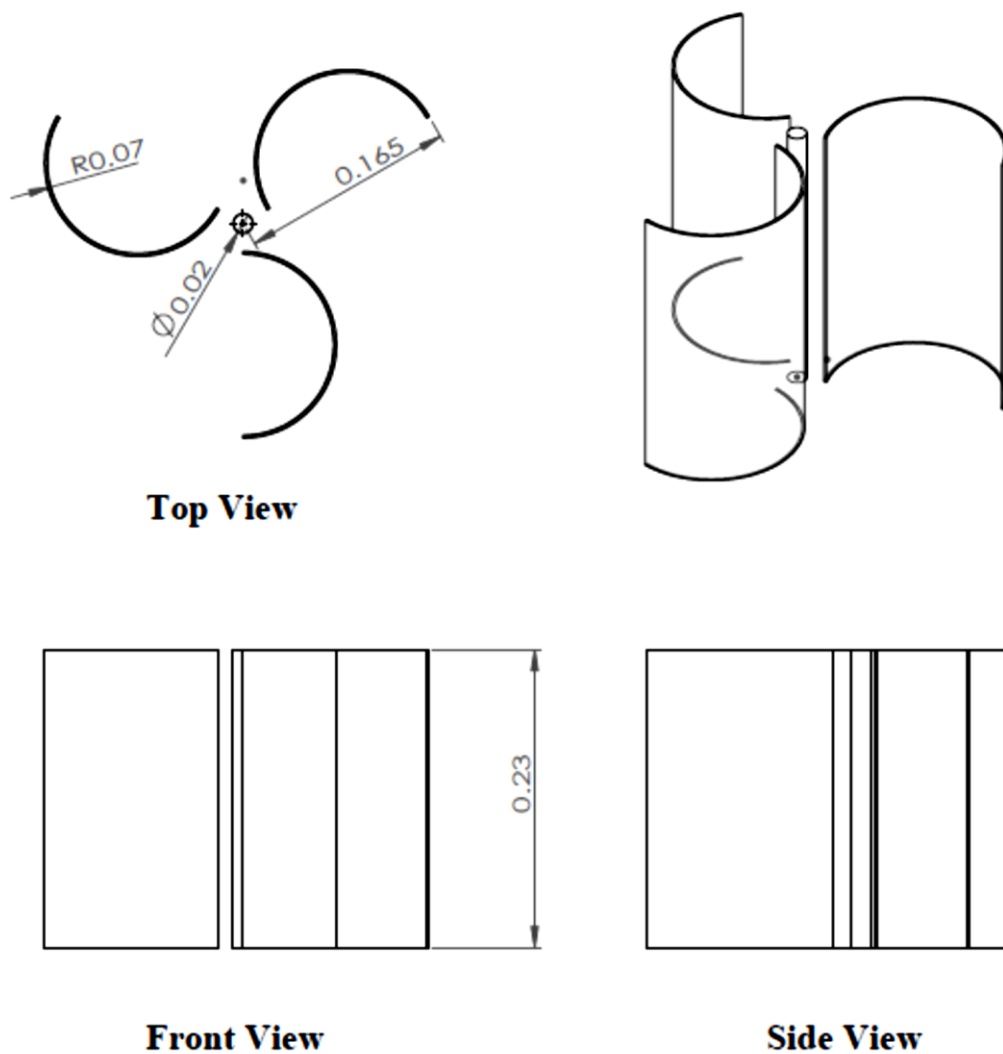
$$\alpha = \frac{H}{D} \quad (3.3)$$

ในการทดลองเราจะทำการเปลี่ยนรูปร่างของกังหันลมให้มีลักษณะแตกต่างกัน โดยแต่ละแบบจะกำหนดให้พื้นที่รับลม (Rotor Area) มีขนาดเท่ากัน และทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอื่นๆ เพื่อวิเคราะห์หาสมรรถนะของรูปแบบใบต่างๆ 5 รูปแบบ โดยใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล เนื่องจากกังหันลมชาโวเนียสแบบเดิมมีสมรรถนะต่ำและแม้ว่าสามารถจะรับกระแสลมได้ทุกทิศทาง แต่ไม่สามารถทำให้กังหันลมนั้นหมุนได้ทุกทิศทาง มีเพียงแค่บางมุมที่ลมเข้ามาปะทะกับกังหันลมเท่านั้นที่สามารถทำให้กังหันลมชนิดนี้หมุนได้ ดังนั้นการออกแบบใบกังหันลมแต่ละแบบ จะใช้ข้อเสียเหล่านี้เป็นเป้าหมายหลักในการออกแบบใบกังหันลมแต่ละแบบ



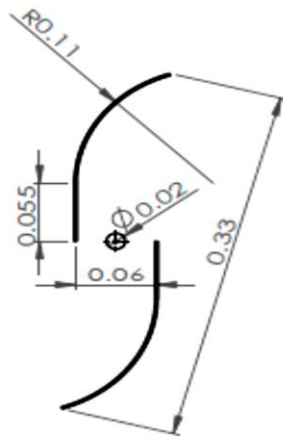
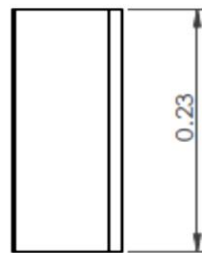
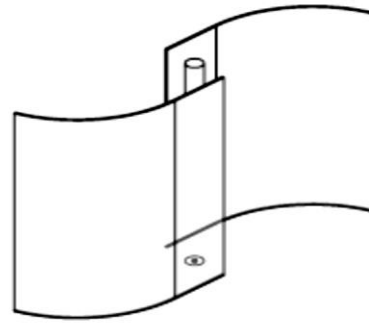
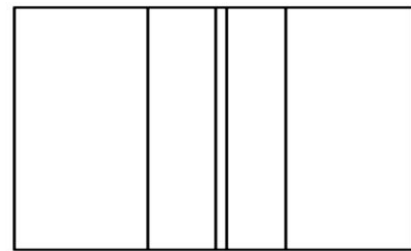
รูปที่ 3.2 แบบใบก้างหันลมแบบที่ 1

รูปใบแบบก้างหันลมแบบที่ 1 จะเป็นรูปแบบทั่วไปของกันหันลมชาโวเนียส ซึ่งจะมีรูปทรงเป็นรูปตัว S และมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงอยู่ที่ 0.33, 0.23 เมตร ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดและภาพโดยรวมดังรูปที่ 3.2 แบบที่ 1 จะมีรูปทรงใกล้เคียงกับแบบเดิมมากที่สุด ดังนั้นแบบใบก้างหันลมแบบที่ 1 จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้วิเคราะห์สมรรถนะที่ได้จากการทดลองจริงกับสมรรถนะที่ได้จากการใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเพื่อดูความแม่นยำ และใช้เป็นแนวทางในการออกแบบใบก้างหันลมแบบที่เหลือ รวมทั้งใช้เปรียบเทียบค่าสมรรถนะกับแบบใบก้างหันลมแบบอื่นๆ

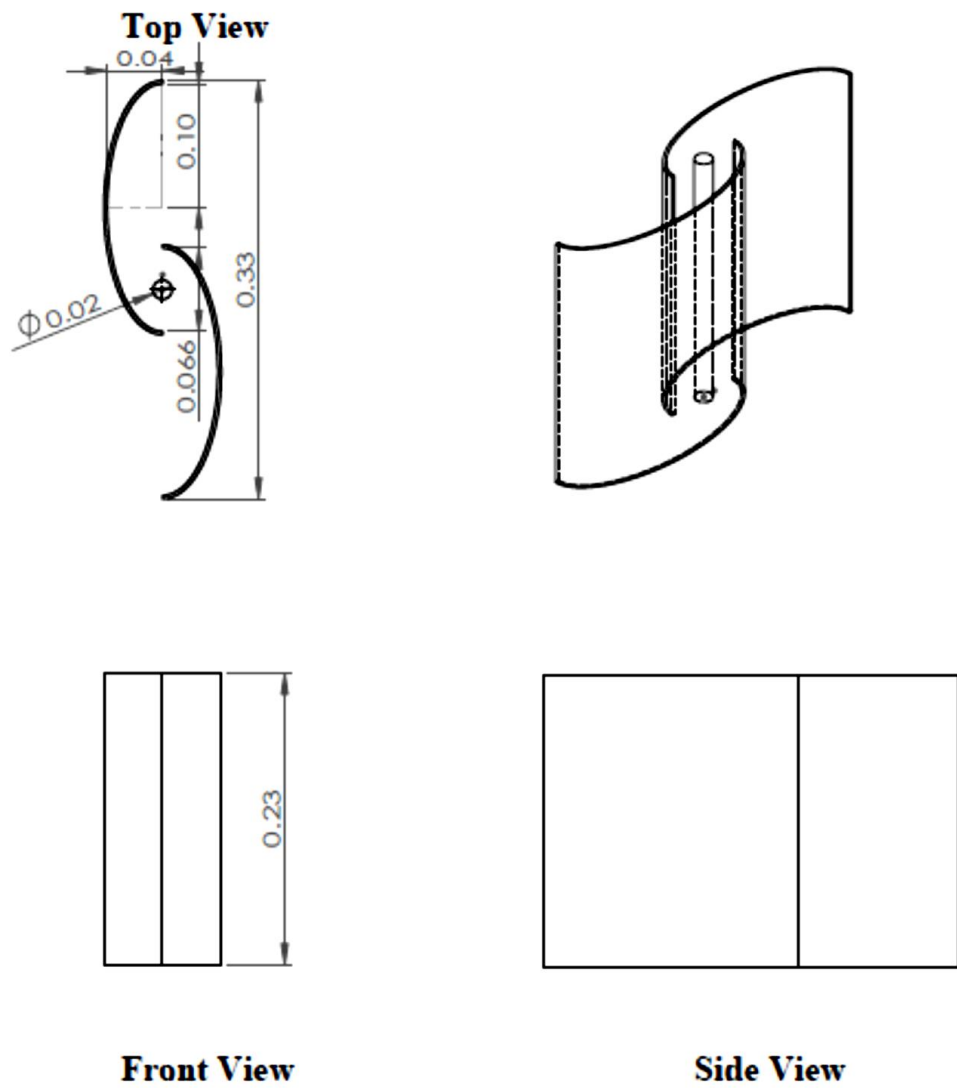


รูปที่ 3.3 แบบใบกังหันลมแบบที่ 2

รูปใบแบบกังหันลมแบบที่ 2 จะเป็นรูปแบบใบพัด 3 ใบ ซึ่งแต่ละใบจะมีการทำมุมที่ 120 องศาเท่ากัน และมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงอยู่ที่ 0.33, 0.23 เมตร ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดและภาพโดยรวมดังรูปที่ 3.3 รูปแบบใบที่ 2 มีแนวทางการออกแบบเพื่อพัฒนาการหมุน เมื่อลมเข้ามาปะทะที่มุมต่างๆ โดยการเพิ่มจำนวนใบเพิ่มขึ้นเป็น 3 ใบเพื่อเพิ่มมุมปะทะของอากาศกับใบให้มากขึ้น

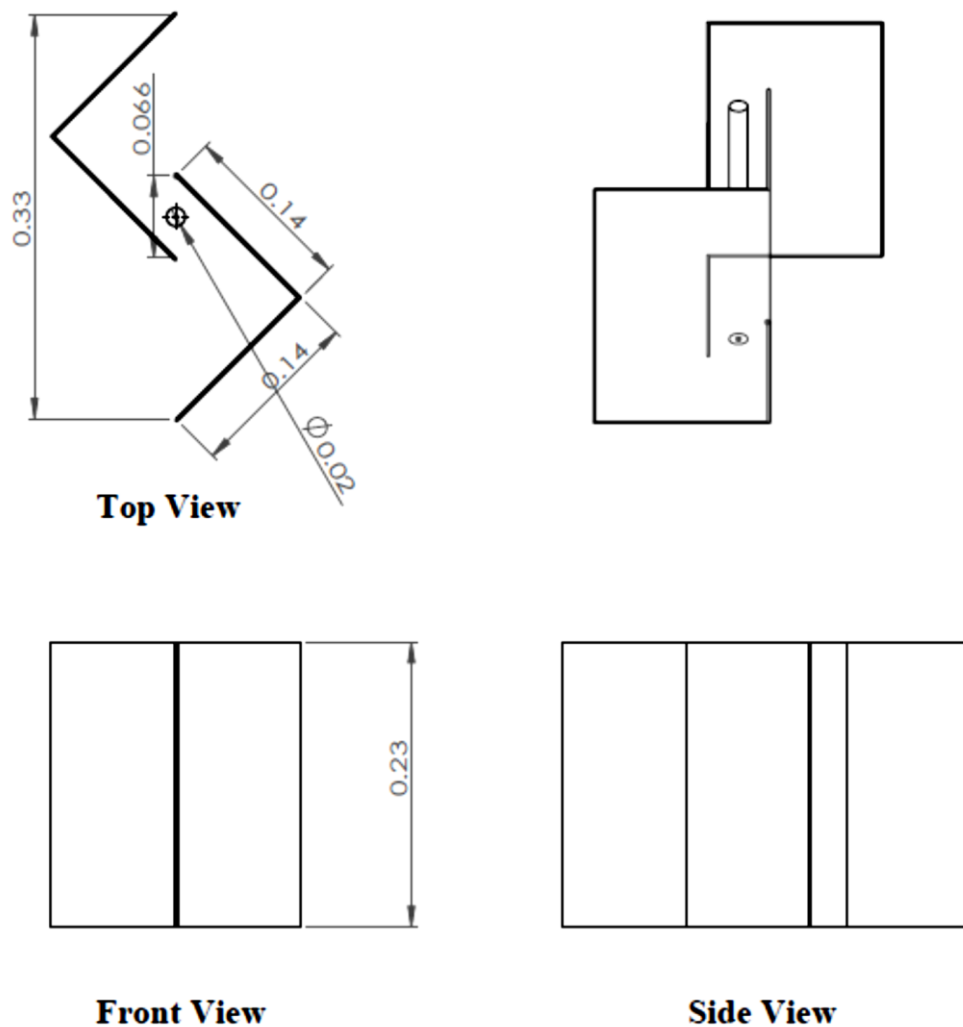
**Top View****Front View****Side View****รูปที่ 3.4** แบบใบกึ่งหันลมแบบที่ 3

รูปใบแบบกึ่งหันลมแบบที่ 3 จะเป็นรูปแบบใบพัด 2 ใบ ซึ่งแต่ละใบจะมีลักษณะโค้งเข้าหากัน และมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงอยู่ที่ 0.33, 0.23 เมตร ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดและภาพโดยรวมดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 แบบใบกังหันลมแบบที่ 4

รูปใบแบบกังหันลมแบบที่ 4 จะเป็นรูปแบบใบพัด 2 ใบ ซึ่งแต่ละใบจะมีลักษณะเป็นครึ่งหนึ่งของวงรี และมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงอยู่ที่ 0.33, 0.23 เมตร ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดและภาพโดยรวมดังรูปที่ 3.4

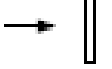


รูปที่ 3.6 แบบใบกังหันลมแบบที่ 5

รูปใบแบบกังหันลมแบบที่ 5 จะเป็นรูปแบบใบพัด 2 ใบ ซึ่งแต่ละใบจะมีลักษณะเป็นครึ่งหนึ่งของสามเหลี่ยม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงอยู่ที่ 0.33, 0.23 เมตร ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดและภาพโดยรวมดังรูปที่ 3.5

เนื่องจากกังหันลมชาโวเนียสเป็นกังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง และหมุนด้วยแรงหน่วง (Drag force) กล่าวคือกังหันลมชาโวเนียสสามารถหมุนได้เพราะแรงหน่วงนั่นเอง ดังนั้นกังหันลมแบบที่ 3-5 มีแนวคิดมาจากรูปแบบใบแบบเดิม แต่ได้มีการพัฒนารูปร่างให้มีค่าแรงหน่วงเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วงของวัตถุรูปทรงต่างๆ ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วงสำหรับวัตถุรูปทรงต่างๆ [29]

รูปร่างวัตถุ	ค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วง
แผ่นเรียบ 	2.0
ท่อตัดผ่าครึ่ง 	2.3
สามเหลี่ยมด้านเท่า 	2.0

ดังนั้นรูปแบบใบแบบที่ 3 ได้มีแนวคิดมาจากรูปแบบแผ่นเรียบที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วง 2.0 รูปแบบใบที่ 4 มีแนวคิดมาจากรูปแบบท่อตัดผ่าครึ่งที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วง 2.3 และรูปแบบใบที่ 5 มีแนวคิดมาจากรูปแบบใบสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วงที่ 2.0 รูปแบบทั้ง 3 แบบ จึงเป็นแนวคิดเบื้องต้นเพื่อออกแบบให้กังหันลมชาโวเนียมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น แต่เนื่องจากรูปแบบใบทั้งหมดเป็นเพียงการสมมุติฐาน โดยรูปแบบใบทั้งหมดต้องคิดถึงสภาวะการหมุนขณะทำงานด้วย ดังนั้น เราจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเพื่อวิเคราะห์ถึงสมรรถนะจริง และปรับปรุงรูปแบบใหม่ได้

3.2 การสร้างแบบจำลองการไหลโดยใช้วิธีวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหล

ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านกังหันลมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยชุดสมการอนุรักษ์ (Conservation Equations) ซึ่งจะประกอบด้วย สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equations) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equations) นอกจากนี้ยังต้องใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Model) อธิบายสภาวะการไหลของของไหลในระบบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งจะมีรายละเอียดของสมการต่างๆ ดังต่อไปนี้

สมการต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3.4)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \rho(\nabla \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{f}_i \quad (3.5)$$

ในกรณีที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่ไหลผ่านใบกังหันลม สมการของแบบจำลอง Shear Stress Transport (SST) จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการความต่อเนื่อง และสมการโมเมนตัมเพื่อใช้ในการคำนวณทางอากาศพลศาสตร์ตามทฤษฎีในบทที่ 2

การคำนวณค่าการกระจายของความเร็วภายในขอบเขตที่ตำแหน่งต่างๆ วิธีการไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume Method) จะถูกนำมาใช้โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการคิดการไหลเป็น 3 มิติ โดยขั้นแรกจะแบ่งพื้นที่ของปัญหาออกเป็นพื้นที่ย่อยๆ ก่อน ซึ่งเรียกว่า Grid Generation จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงสมการของระบบให้อยู่ในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับแต่ละจุดต่อบนกริด ซึ่งจุดต่อและด้านของปริมาตรควบคุมที่ปรากฏบนเส้นกริดในพื้นที่นี้จะต้องนำมาพิจารณาว่าจะใดควรเป็นจุดต่อของความเร็ว จุดควรเป็นจุดต่อของความดันหรือความหนาแน่น จึงใช้วิธีกริดเลื่อนมาช่วยในการแก้ปัญหาให้ง่ายขึ้น จากความยุ่งยากของสมการไม่เชิงเส้นและไม่มีสมการใดสามารถแก้ปัญหาเพื่อหาผลเฉลยของความดันได้โดยตรง ซึ่งพจน์ของความดันนี้แฝงอยู่ในรูปของสมการโมเมนตัมและเกี่ยวข้องกับกระบวนการหาผลเฉลยของความเร็วในสมการ ดังนั้นการแก้ปัญหาเพื่อหาผลเฉลยของระบบสมการจึงจำเป็นต้องใช้ขั้นตอนวิธี SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.2.1 ข้อสมมติฐานของแบบจำลอง

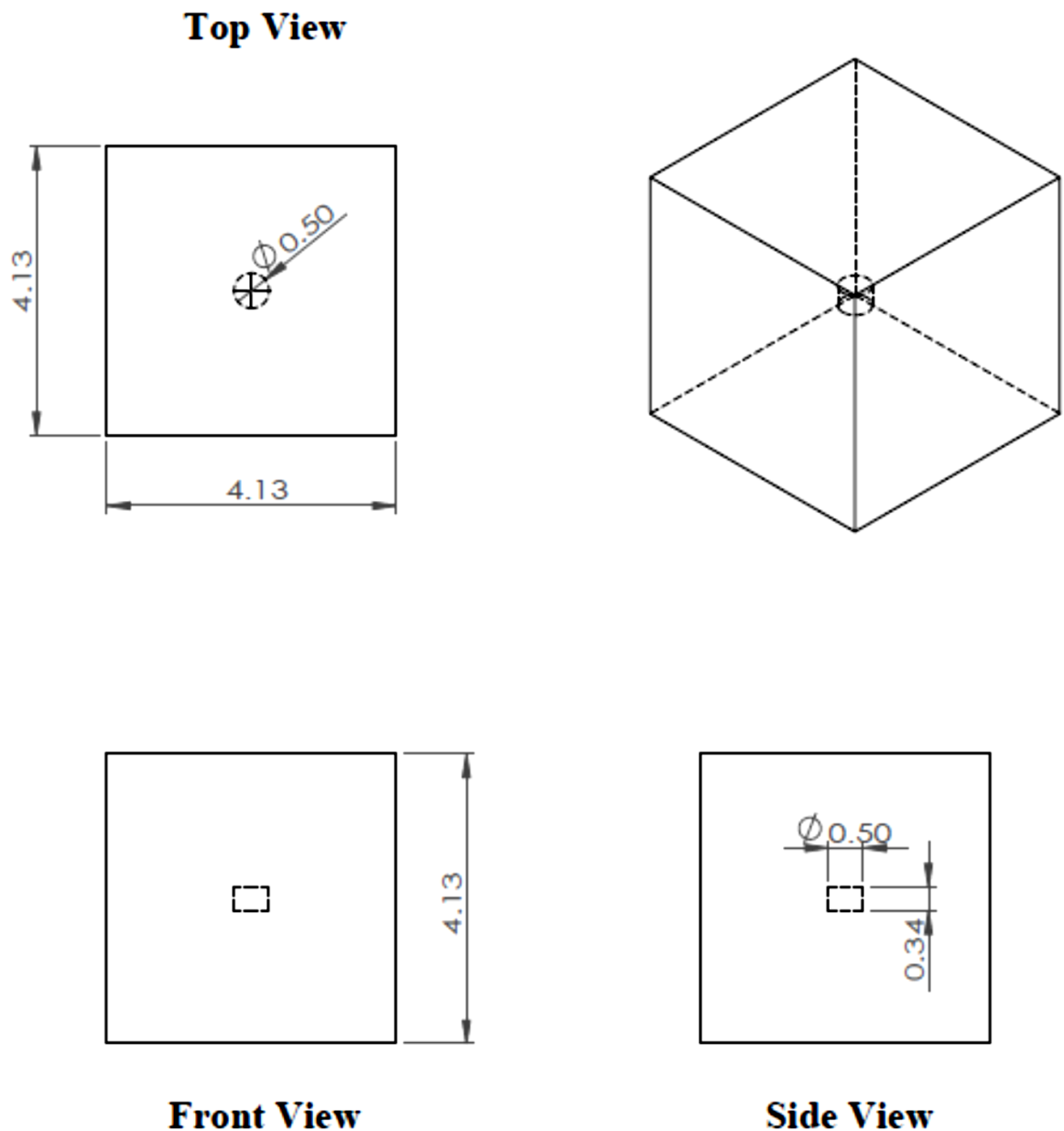
สำหรับข้อสมมติฐานและการกำหนดตัวแปรที่ใช้กับแบบจำลองในงานวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

- 1) ของไหลที่ใช้ในการวิจัยเป็นอากาศที่อุณหภูมิคงที่ 25°C ที่ความดัน 1 atm
- 2) การไหลสภาวะคงที่ (Steady State)
- 3) การไหลเป็นแบบไม่อัดตัว (Incompressible flow)
- 4) ไม่มีผลกระทบเนื่องจากพลังงานความร้อนมาเกี่ยวข้อง
- 5) ความเร็วเริ่มต้นคงที่ตลอดพื้นที่หน้าตัดทดลอง

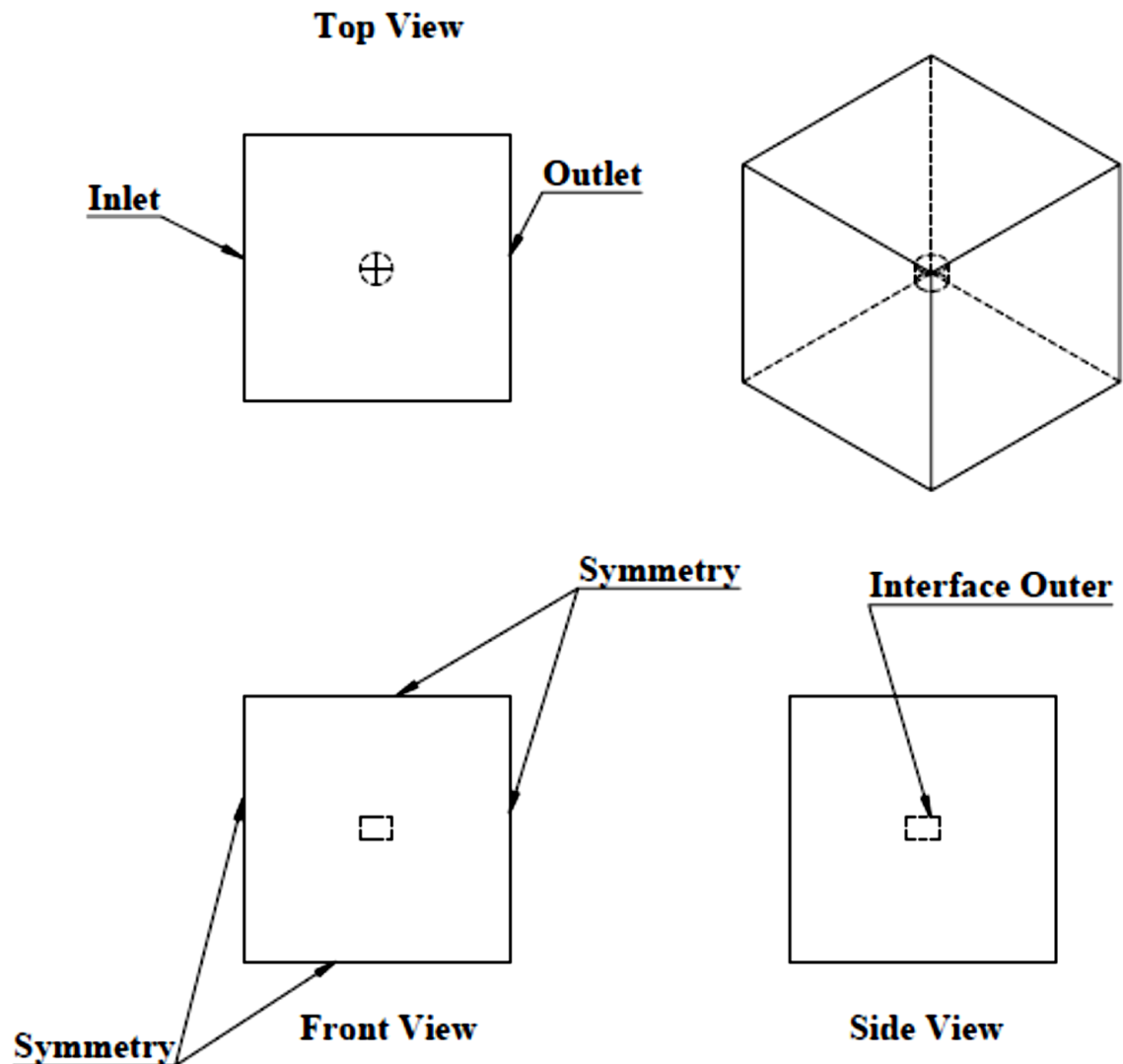
3.2.2 การกำหนดขนาดขอบเขตของแบบจำลอง

ในการวิจัยนี้ใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหลแบบ 3 มิติ โดยการสร้างพื้นที่จำลองการไหล 2 พื้นที่ ประกอบด้วย พื้นจำลองชั้นนอก และพื้นจำลองชั้นในที่บรรจุใบกังหันลมไว้ การแบ่งพื้นที่เป็น 2 พื้นที่ เพราะกังหันลมที่ต้องการศึกษาต้องหมุนด้วยความเร็วรอบต่างๆ ดังนั้นพื้นที่ชั้นในจึงสามารถที่จะหมุนได้ รวมทั้งสามารถหามุมปะทะที่องศาต่างได้ โดยรายละเอียดและรูปแบบของพื้นที่ทั้ง 2 ส่วนมีดังต่อไปนี้

1) พื้นที่ของขอบเขตการทดลองชั้นนอก มีขนาด $4.3 \times 4.3 \times 4.3$ m ดังรูปที่ 3.7 โดยพื้นที่รอบนอกมีหน้าที่เป็นตัวกำหนดตำแหน่งของไหลทางเข้า (Inlet) เพื่อกำหนดความเร็วลมที่ต้องการวิเคราะห์ และทางออก (Outlet) และผนังโดยรอบ (Symmetry) โดยปริมาตรด้านในได้ถูกกำหนดเป็นของไหล นั่นคืออากาศนั่นเอง ดังรูปที่ 3.8



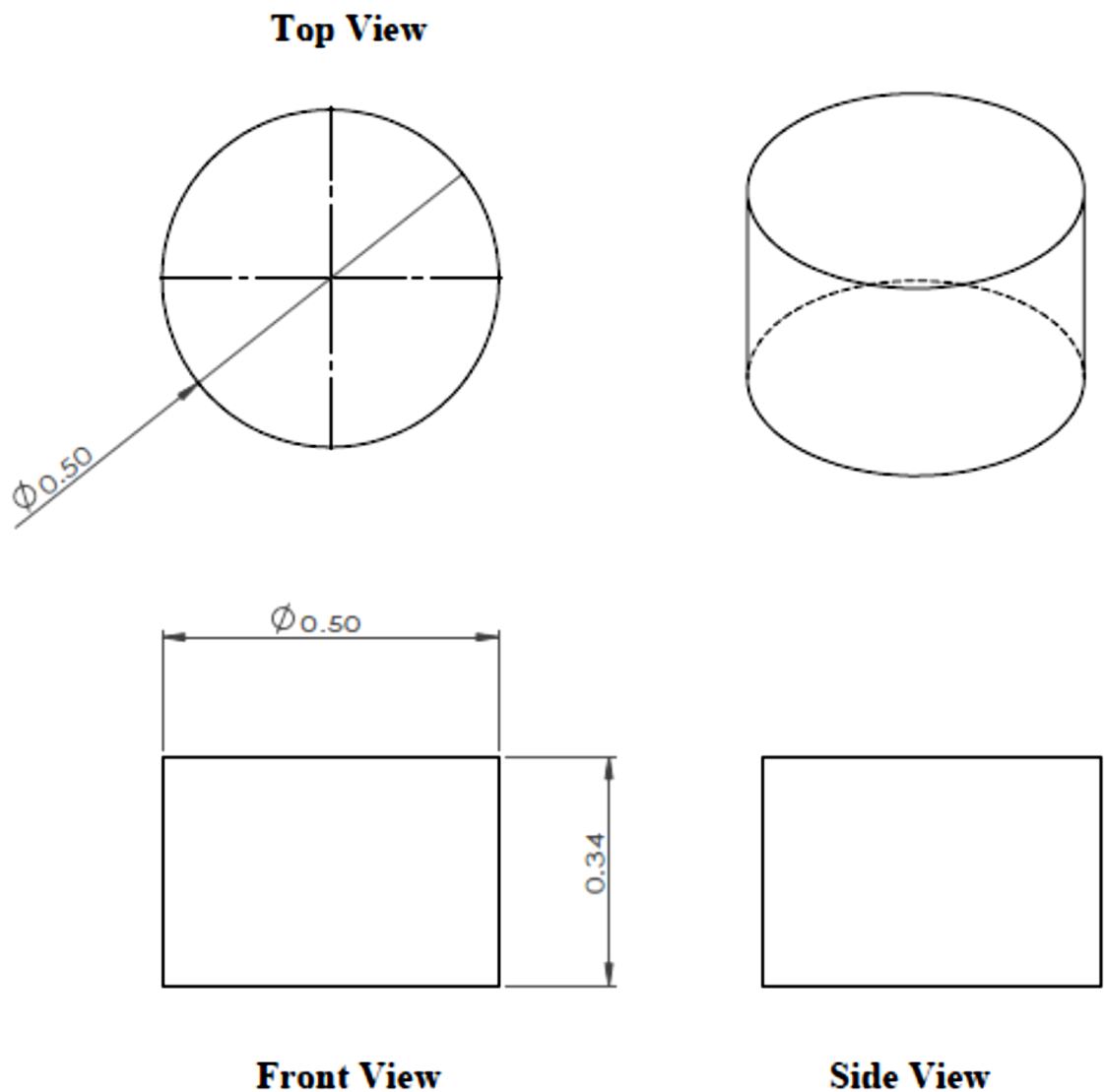
รูปที่ 3.7 ขนาดของพื้นที่ขอบเขตการทดลองชั้นนอก



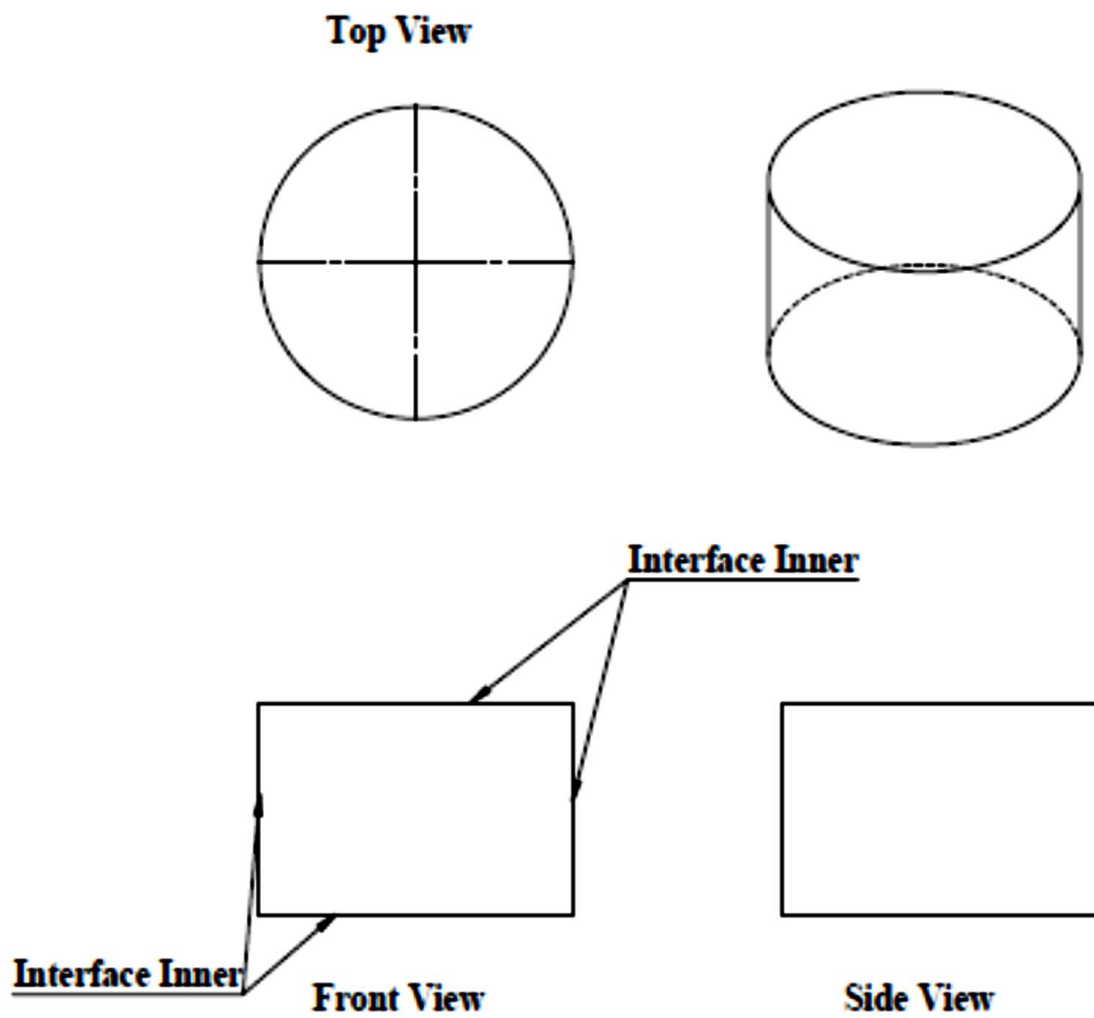
รูปที่ 3.8 กำหนดขอบเขตชั้นนอก

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของพื้นที่ ที่ต้องการวิเคราะห์จะส่งผลให้การผลที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ดังนั้นที่พื้นผิวทางเข้าจะถูกกำหนดเป็น Velocity inlet เราจะต้องกำหนดเป็นความเร็วลม เพราะเป็นตัวแปรที่เราทราบค่าและมีผลต่อการทดลอง บริเวณผิวรอบๆ ได้ถูกกำหนดเป็น Symmetry เพื่อทำให้พื้นที่รอบข้างไม่ส่งผลกระทบกับตัวแปรอื่น เช่น ความเร็วลมที่บริเวณนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง และพื้นที่ผิวทางออกจะถูกกำหนดเป็น Pressure Gauge เนื่องจากในการศึกษาที่ไม่ทราบค่าความเร็วลมที่ทางออก จะต้องกำหนด Pressure Gauge เป็นศูนย์ และที่ช่องว่างด้านในจะถูกกำหนดเป็น Interface ซึ่งจะเป็นพื้นผิวเชื่อมต่อกับขอบเขตด้านใน

2) พื้นที่ขอบเขตชั้นในดังรูปที่ 3.9 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 m สูง 0.34 m มีหน้าที่เป็นตัวกำหนดการหมุนของกังหัน เพื่อให้สามารถปรับความเร็วรอบของกังหันให้เหมาะสมกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบได้ ตำแหน่งนี้จะเป็นบริเวณที่กังหันลมบรรจุอยู่ด้านใน การกำหนด Interface จะทำให้รับสภาวะจากพื้นที่ขอบเขตด้านนอกทั้งหมด ความดันและความเร็วบริเวณกังหันลมจะสามารถตรวจเช็คได้ ตำแหน่งการกำหนดเงื่อนไขของระบบดังรูปที่ 3.10

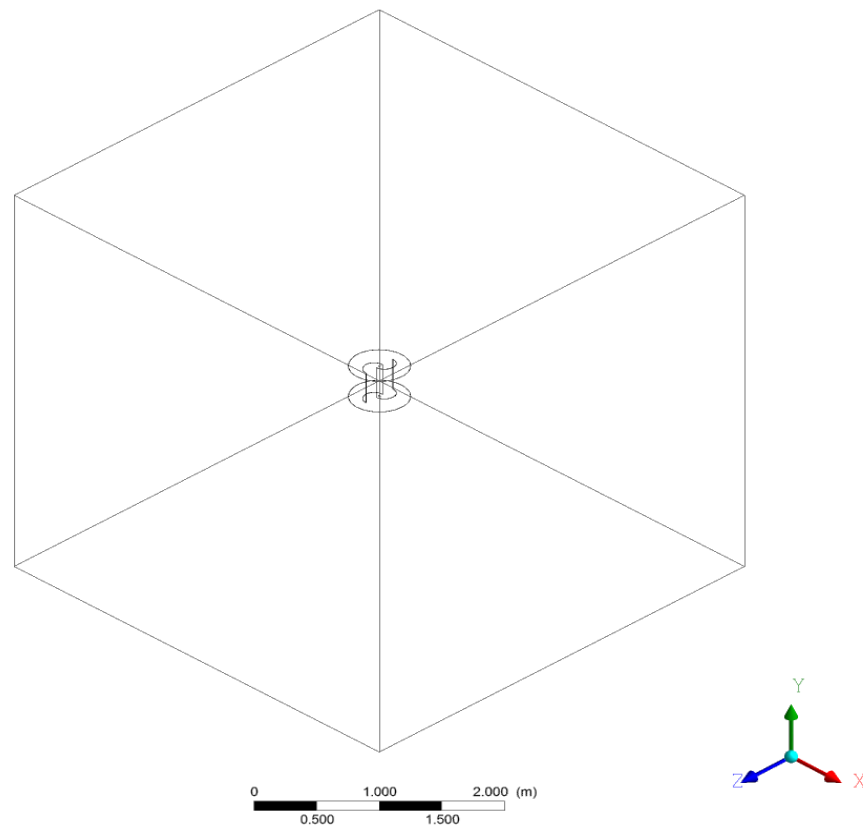


รูปที่ 3.9 ขนาดของพื้นที่ขอบเขตการทดลองชั้นใน



รูปที่ 3.10 กำหนดขอบเขตชั้นใน

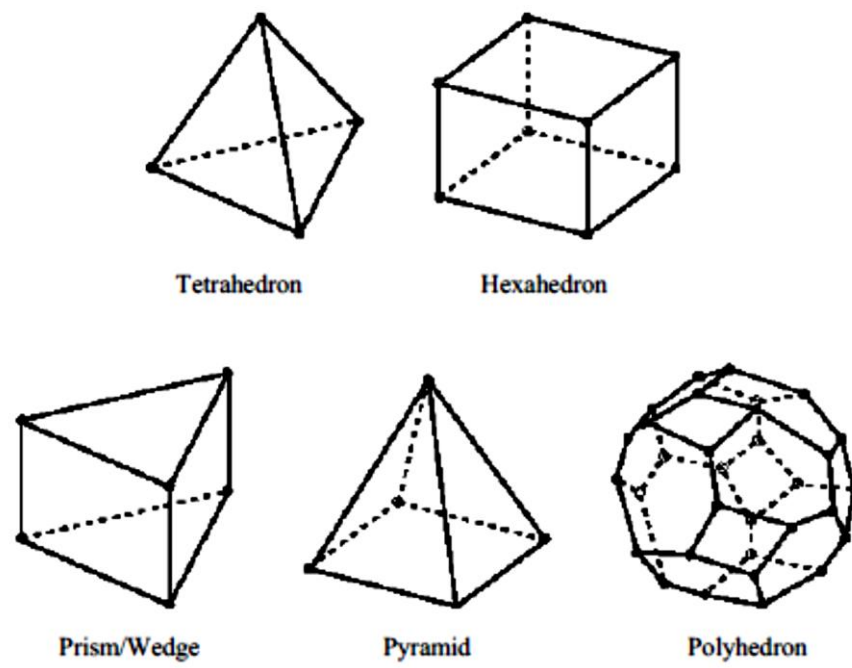
เมื่อประกอบทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกันตามรูปที่ 3.11 เราจะเห็นว่าก้นหลุมบรรจุอยู่ด้านในของพื้นที่ขอบเขตชั้นในโดยมีทิศทางดังรูป



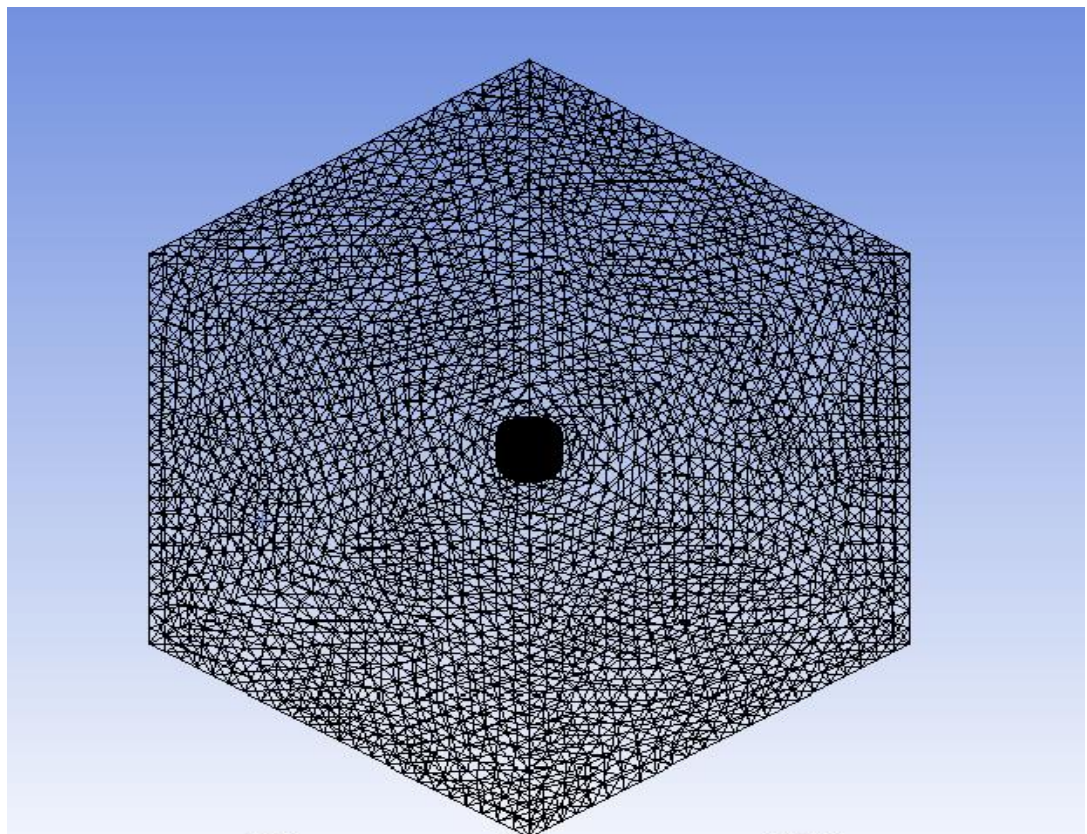
รูปที่ 3.11 รูปแบบจำลองในรูปแบบ 3 มิติ

3.2.3 การสร้างเมช (Mesh)

การคำนวณพลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่มนั้น จะต้องทำการแบ่งพื้นที่ในโดเมนออกเป็นปริมาตรเล็กๆ ซึ่งเรียกว่าการเมช (Mesh) เมชที่ใช้ในการจำลองเป็นแบบไร้โครงสร้าง (Unstructured Mesh) มีรูปร่างเป็นรูปสามเหลี่ยมเล็กๆ (Tetrahedron) ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งใช้สำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนจะสามารถสร้างขึ้นได้ง่ายกว่าเทคนิคอื่นๆ รูปแบบของเมชแต่ละเมชจะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อกันซึ่งเรียกว่าโนด (Node) ดังรูป 3.13 ซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณค่าผลลัพธ์ของการไหลอันได้แก่ ความเร็ว ความดัน หลังจากนั้นจึงทำการกำหนดชนิดและคุณสมบัติของไหล และเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณต่อไป



รูปที่ 3.12 ลักษณะรูปทรงของกริดแบบ Tetrahedron



รูปที่ 3.13 การเมฆของโดเมนที่ใช้ในการศึกษา

3.2.4 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น

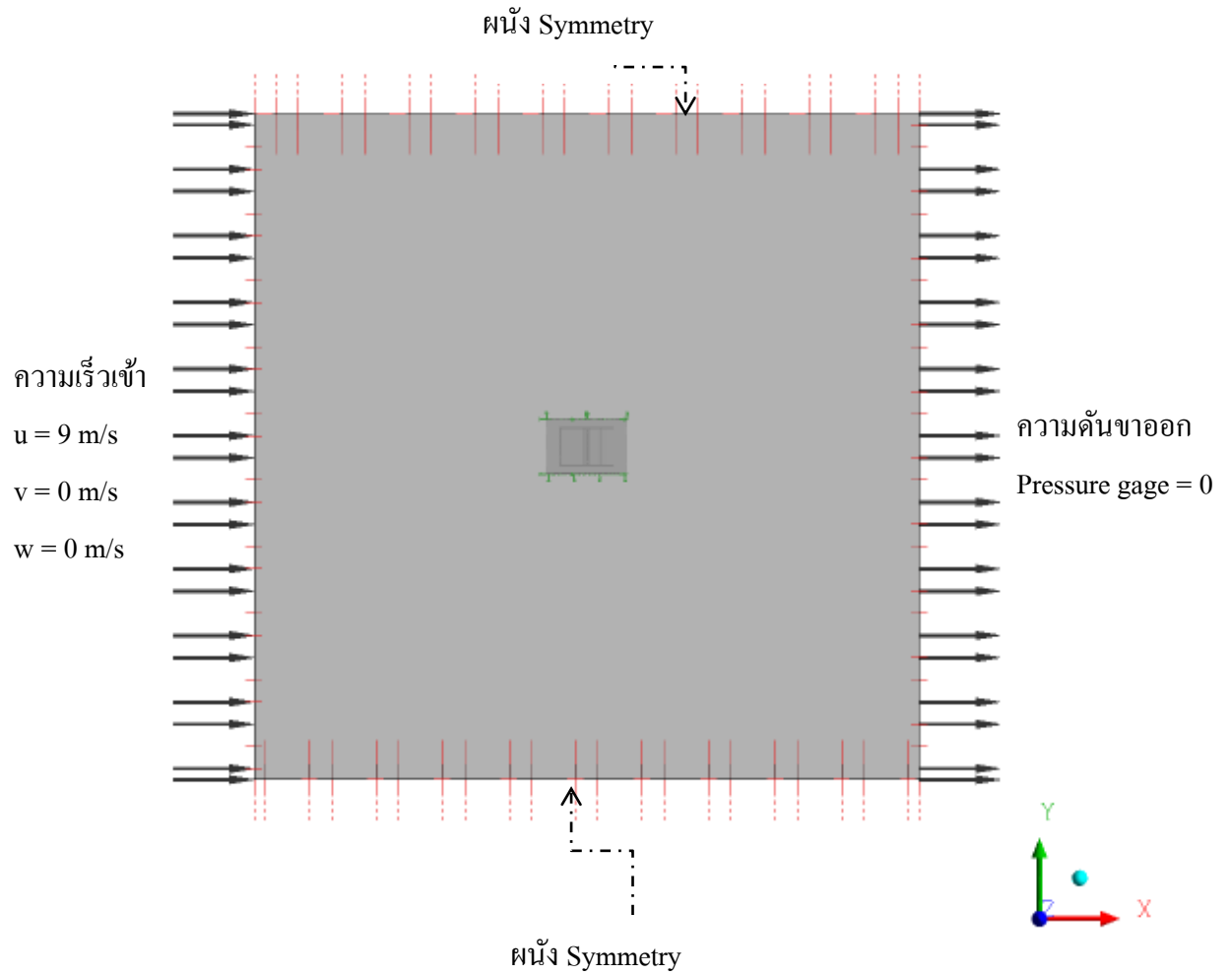
การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นคือเงื่อนไขที่กำหนดให้ในตอนเริ่มต้นก่อนที่จะทำการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณ คือ ความเร็วในแนวแกน x, y และ z ซึ่งในการจำลองการไหลในงานวิจัย ผู้ทำวิจัยได้กำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการจำลองดังนี้

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรเริ่มต้นที่ใช้ในการวิจัย

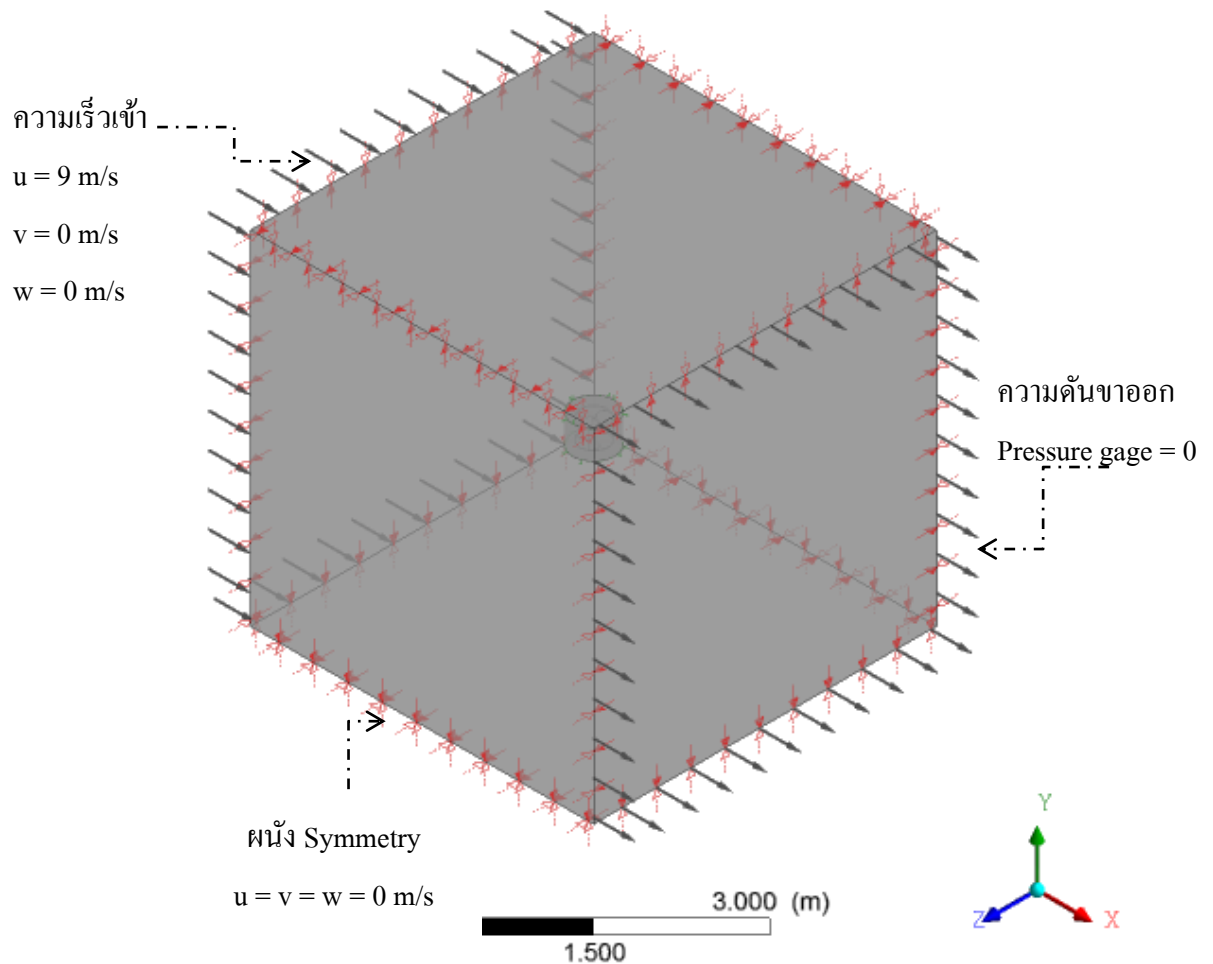
ตัวแปร	ค่าตัวแปร
ความเร็วลม x	9 m/s
ความเร็วลม y	0 m/s
ความเร็วลม z	0 m/s
อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (TSR)	0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1
อุณหภูมิคงที่	25 °C
ความดันคงที่	1 atm
แบบจำลองปั่นป่วน	SST

3.2.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้สำหรับการวิจัยจะเป็นการกำหนดตำแหน่งหน้าที่ต่างๆ ในขอบเขตที่สร้างขึ้นทั้งหมด เริ่มต้นคือกำหนดทางเข้าของอากาศ Velocity Inlet เป็นตัวกำหนดความเร็วที่ใช้ในงานวิจัย กำหนดให้อากาศไหลออกสู่ภายนอกนอกมีเงื่อนไขขอบเขตเป็น Pressure Outlet (Pressure Gage = 0) ซึ่งเหมาะสมกับสภาวะขอบเขตที่ไม่ทราบความเร็ว พื้นที่ผนังโดยรอบเป็นแบบ Symmetry โดยจะไม่ส่งผลกระทบต่อกรไหลของอากาศ และพื้นที่เชื่อมต่อระหว่างชั้นขอบเขตนอกและในกำหนดเป็น Interface เพื่อให้ขอบเขตนอกและในเชื่อมต่อกันได้ โดยเงื่อนไขขอบเขตทั้งหมดเป็นดังต่อไปนี้



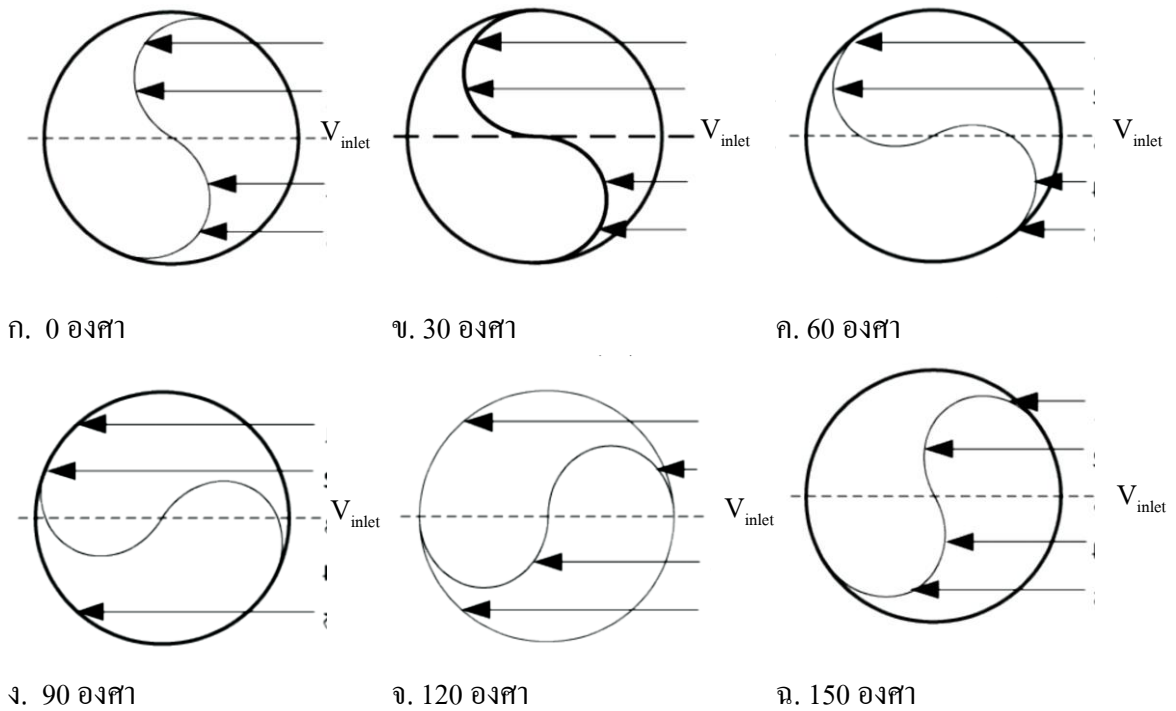
รูปที่ 3.14 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง (ภาพด้านข้าง)



รูปที่ 3.15 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง (3 มิติ)

3.3 การวิเคราะห์ค่าแรงบิดที่กระทำต่อใบพัดขณะหยุดนิ่งกับมุมปะทะต่างๆ

การวิเคราะห์ผลของแรงบิดที่กระทำกับกังหันลมขณะหยุดนิ่ง โดยวิเคราะห์ที่มุมปะทะของอากาศ 0, 30, 60, 90, 120, 150 องศา เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากแรงบิดที่กระทำต่อกังหันแต่ละช่วงมุมปะทะของอากาศ ผลที่ได้จะสามารถวิเคราะห์หาการหมุนด้วยตัวเอง (Self Starting) ของรูปแบบกังหันแต่ละแบบโดยสามารถคำนวณดังสมการที่ (3.8)



รูปที่ 3.16 มุมปะทะของอากาศและกังหันลมที่องศาต่างๆ

ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Static Torque coefficient, C_{ms})

$$C_{ms} = \frac{T}{(\rho H d^2 U^2)} \quad (3.8)$$

3.4 การวิเคราะห์ค่าของสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม

การวิเคราะห์ผลของแรงบิดที่กระทำกับกังหันลมขณะกังหันลมทำงาน จะทำการพิจารณาถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราความเร็วปลายใบของกังหันลม (Tip Speed Ratio) โดยกำหนดให้ค่าของอัตราส่วนความเร็วปลายใบมีค่า 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3 ตามลำดับ ผลที่ได้จะสามารถวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมรูปแบบนั้นๆ โดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด ดังสมการที่ 3.9 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Static Torque coefficient, C_m)

$$C_m = \frac{T}{(\rho H d^2 U^2)} \quad (3.9)$$

3.5 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลม

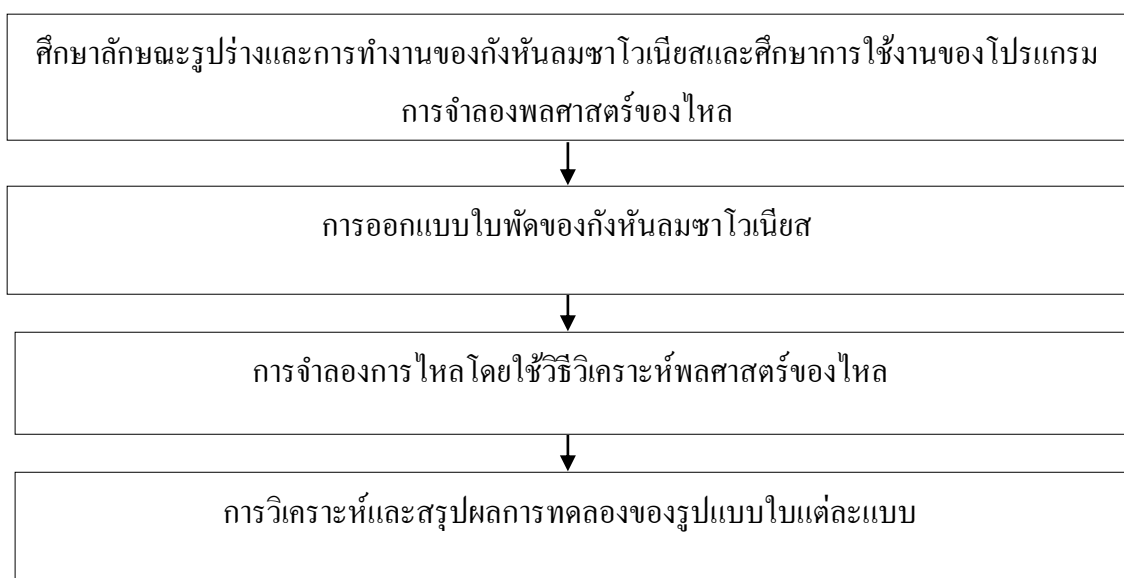
การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลม จะทำการพิจารณาถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราความเร็วปลายใบของกังหันลม (Tip Speed Ratio) โดยกำหนดให้ค่าของอัตราส่วนความเร็วปลายใบมีค่า 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3 ตามลำดับ ผลที่ได้จะสามารถวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลมรูปแบบนั้นๆ โดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลม ดังสมการที่ 3.10 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Power coefficient, C_p)

$$C_p = \frac{T\omega}{\left(\frac{1}{2}\rho H D U^3\right)} \quad (3.10)$$

3.6 สรุปผลการศึกษา

เมื่อทำการศึกษารูปแบบใบกังหันลมแต่ละแบบ และคำนวณหาสมรรถนะทั้งหมดแล้ว จะทำให้ทราบถึงรูปแบบใบที่เหมาะสมที่นำมาใช้ในงานวิจัย และสามารถนำวิธีที่ศึกษาไปพัฒนารูปแบบกังหันลมที่เหมาะสมและมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ดีขึ้นต่อไปในอนาคต

3.7 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



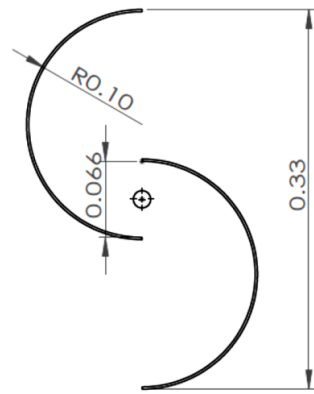
รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

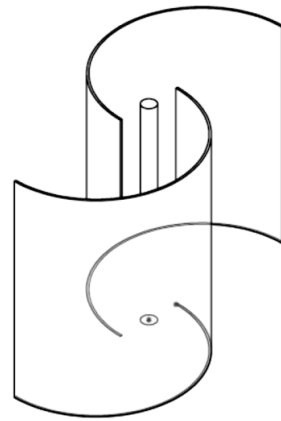
ในงานวิจัยนี้แบ่งการวิเคราะห์ผลออกเป็น 2 หัวข้อ หัวข้อแรกจะทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตที่มุมองศาต่างๆ ของกังหันลม เพื่อวิเคราะห์หาการเริ่มหมุนด้วยตัวเองที่มุมปะทะต่าง หัวข้อที่สองจะทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดและค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมโดยพิจารณาถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราความเร็วปลายใบของกังหันลม ค่าที่ได้จากการทดลองทั้งหมดได้จากการสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศที่กระทำต่อรูปแบบใบกังหันลมแต่ละชนิด ซึ่งนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ซึ่งค่าและผลที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

4.1 การทดสอบแบบจำลองเพื่อหาค่าสมรรถนะของกังลม

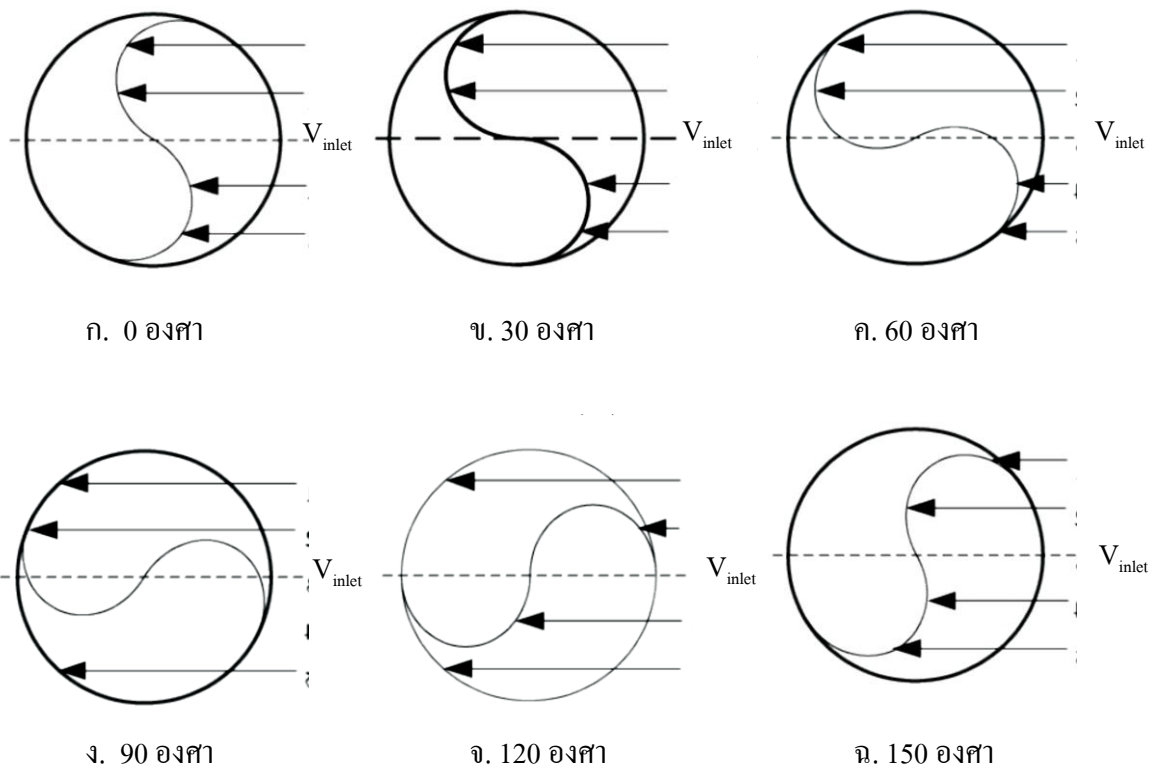
ในงานการวิจัยนี้ต้องการที่จะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของกังลมในรูปแบบใบกังหันต่างๆ โดยในการวิจัยได้ใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเก็บค่าแรงบิดของใบกังหันลมแต่ละแบบ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของกังหันลมใน 2 กรณีคือ กรณีแรกคือการเก็บค่าแรงบิดของใบกังหันขณะใบกังหันหยุดนิ่งที่มุมปะทะของอากาศในมุมต่างๆ ในกรณีที่สองคือการเก็บค่าแรงบิดของใบกังหันลมขณะกังหันลมหมุน และในการทดลองจะกำหนดให้ตัวแปรต้นในการวิเคราะห์ให้เหมือนกัน ดังนี้คือ ค่าความเร็วลมเข้า 9 เมตรต่อวินาที ความสูงของใบกังหัน 0.23 เมตร เส้นรอบวงของกังหันลม 0.33 เมตร ช่องว่างระหว่างใบกังหัน 0.06 เมตร และแบบจำลองความปั่นป่วนคือ SST การตรวจสอบ mesh independent ดังรูปที่ 4.1 เพื่อหาผลเฉลยที่แม่นยำ ผลที่ได้จากการคำนวณพลศาสตร์ของไหลของใบพัดแบบที่ 1 ได้นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง เพราะมีตัวแปรต้นเท่ากัน เพื่อดูความแม่นยำที่ได้จากการคำนวณพลศาสตร์ของไหล โดยรูปแบบใบและค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีค่า ดังนี้



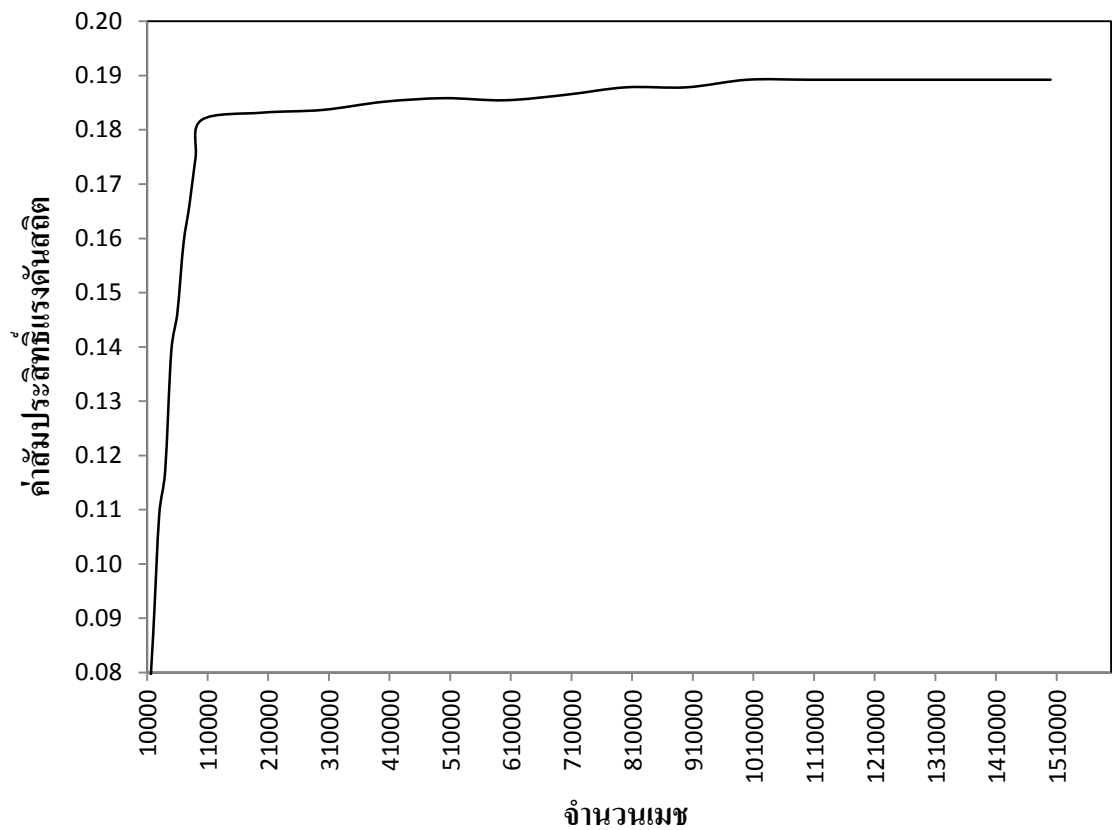
Top View



รูปที่ 4.1 ไขกังหันลมแบบที่ 1



รูปที่ 4.2 มุมปะทะของอากาศและกังหันลมที่องศาต่างๆ



รูปที่ 4.3 จำนวนเมชที่ใช้ในการทดลอง

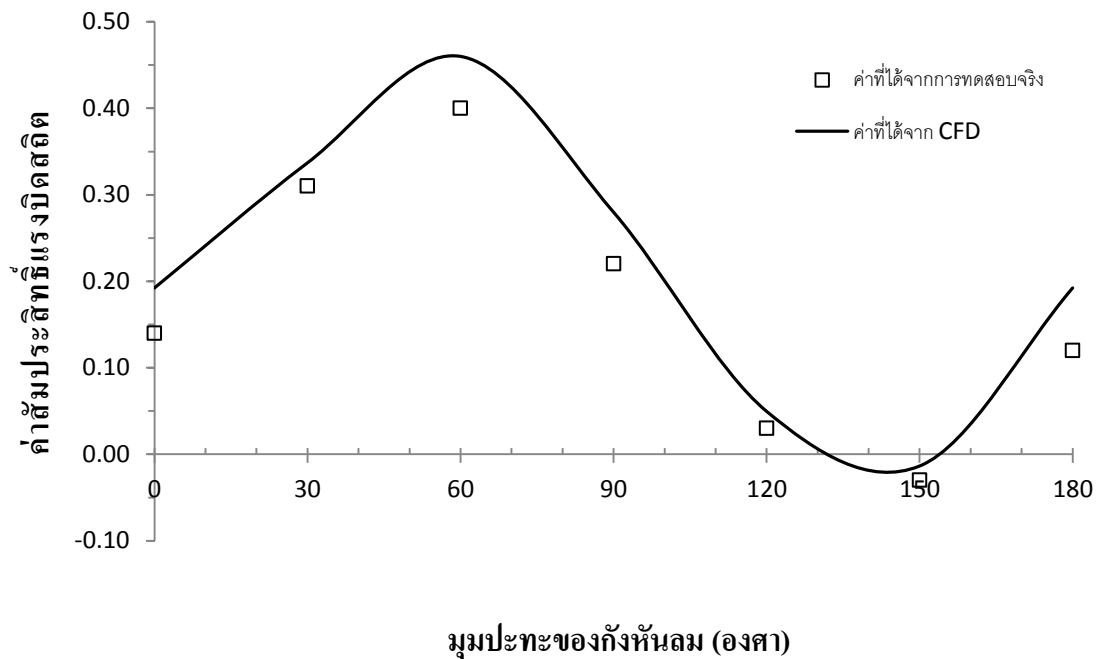
จากรูปที่ 4.3 การเพิ่มจำนวนเมชให้มากขึ้นในช่วงเมช 10,000 ไปจนถึง 1,500,000 จะถูกทดสอบด้วยแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยใช้กั้นหั่นแบบที่ 1 เป็นตัวทดสอบ จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันสถิตมีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีค่าคงที่ที่ 0.19 เมื่อจำนวนเมชเพิ่มขึ้นจนมีจำนวนเมชอยู่ที่ 600,000 – 1,500,000 ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้จำนวนเมชประมาณ 1,100,000 เพื่อความถูกต้องของข้อมูล และใช้เป็นจำนวนเมชต้นแบบเพื่อนำไปใช้ในแบบใบที่เหลือ

การทดสอบแบบจำลอง จะใช้ความเร็วลม 9 m/s และใช้แบบจำลองปั่นป่วน SST ในการทดสอบ เริ่มต้นทดสอบจากมุมปะทะที่ 0 องศา รูปที่ 4.1 และเปลี่ยนแปลงมุมปะทะจนไปถึงมุม 180 องศา เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์แรงดันสถิตในแต่ละช่วง ค่าที่ได้จะมีค่าดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตกับมุมปะทะของใบกังหันเทียบกับค่าการทดลองจริง

ค่ามุมปะทะของใบกังหัน (องศา)	ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิต (CFD)	ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิต (การทดสอบจริง)
0	0.19	0.14
30	0.34	0.31
60	0.46	0.40
90	0.28	0.22
120	0.05	0.03
150	-0.01	-0.03
180	0.19	0.12

ผลที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิต (CFD) จะอยู่ในตารางที่ 4.4 และวิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวกที่ ก.1.1

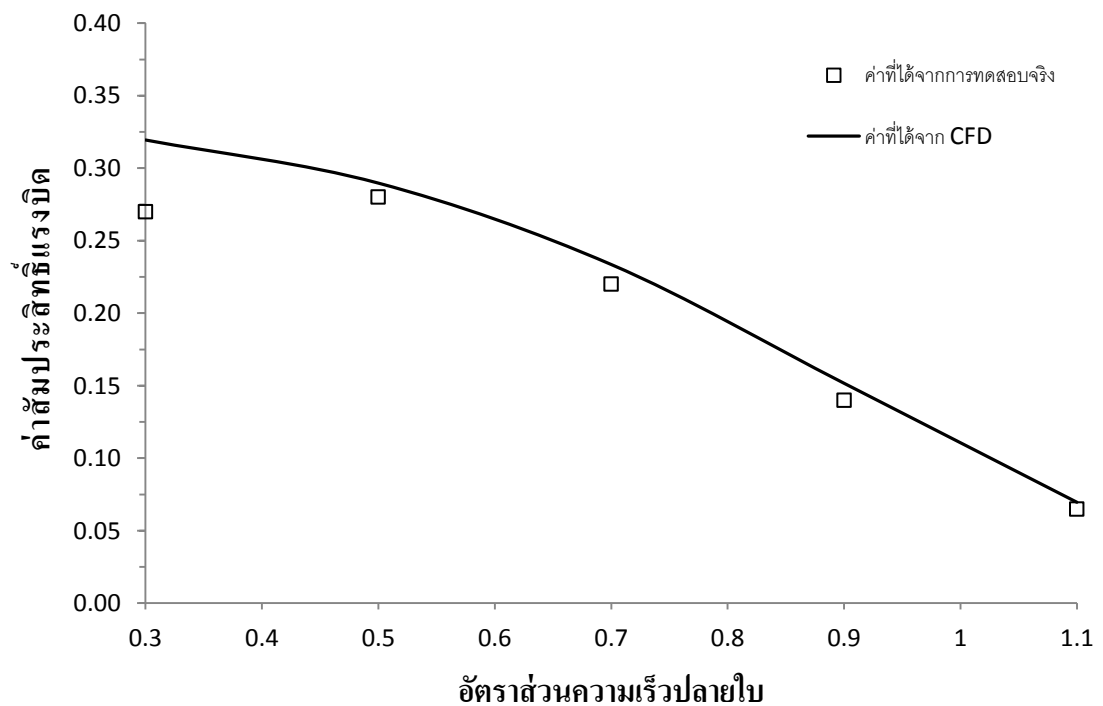


รูปที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบที่ 1

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบ

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ	ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (CFD)	ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (การทดสอบจริง)
0.3	0.32	0.27
0.5	0.29	0.28
0.7	0.23	0.22
0.9	0.15	0.14
1.1	0.07	0.065

ผลที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด จะอยู่ในตารางที่ 4.9 และวิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวกที่ ก.1.2

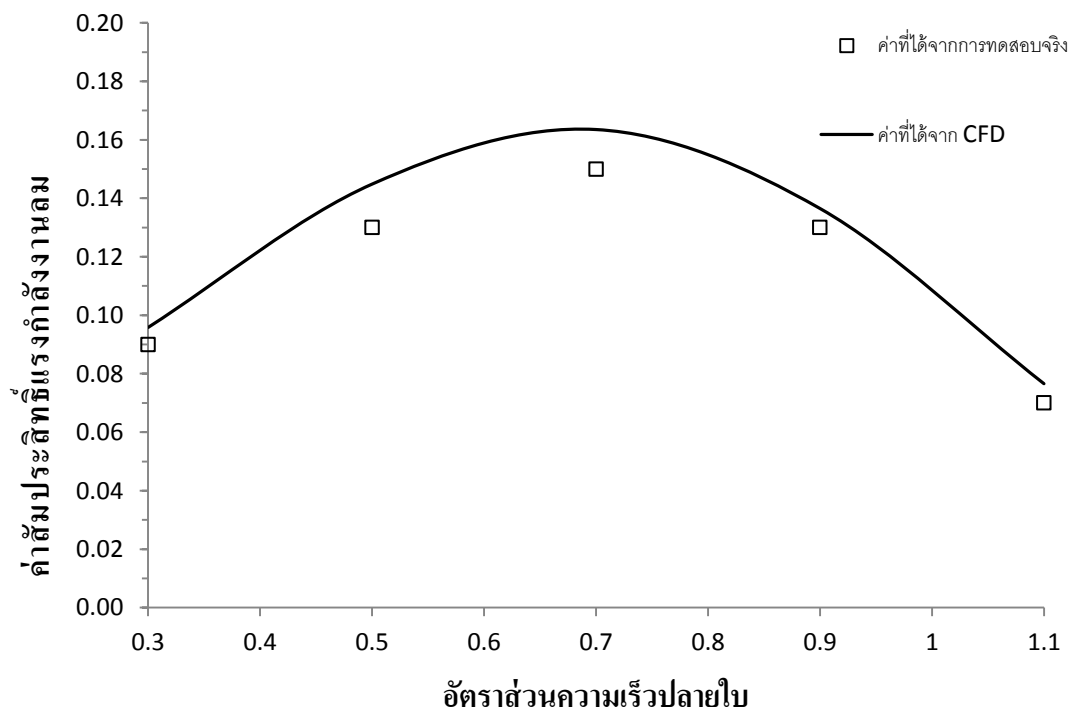


รูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของใบกังหันลมแบบที่ 1

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบกังหันเทียบกับค่าการทดลองจริง

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ	ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (CFD)	ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (การทดสอบจริง)
0.3	0.10	0.09
0.5	0.14	0.13
0.7	0.16	0.15
0.9	0.14	0.13
1.1	0.08	0.07

ผลที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด จะอยู่ในตารางที่ 4.9 และวิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวกที่ ก.1.3



รูปที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของใบกังหันลมแบบที่ 1

แบบจำลองทั้ง 3 แบบที่ได้จากการทดสอบนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 3 ค่า มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง [21] โดยเมื่อวิเคราะห์ถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตดังตารางที่ 4.1 พบว่าค่าที่ได้มีค่ามากกว่าผลจากการทดสอบจริงเล็กน้อย และค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตที่กระทำต่อไปไปถึงหันทันมีค่าไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมด เมื่อพิจารณามุมปะทะของกันหันลมพบว่าที่มุมปะทะ 60 องศา มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตจากการจำลองมากที่สุดที่ 0.46 และ 0.40 เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบจริง และช่วงที่มุมปะทะที่ 130 จนถึง 150 องศา เป็นช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตจากแบบจำลองเป็นลบที่ -0.01 และ -0.03 เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบ ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดสอบจริงทั้งหมดสามารถดูได้จากรูปที่ 4.5 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดและค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่างๆ พบว่าที่ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำจะทำให้ค่าที่ได้จากการจำลองมีความแตกต่างกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง โดยที่อัตราส่วนปลายใบ 0.3 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตจากแบบจำลอง 0.32 และค่าที่ได้จากการทดสอบจริงมีค่า 0.27 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนปลายใบจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น ดังรูปที่ 4.5, 4.6 และค่าของข้อมูล ดังตารางที่ 4.2, 4.3 การทดสอบแบบจำลองครั้งนี้ต้องการทดสอบเพื่อหาคุณภาพของแบบจำลอง ดังนั้นแบบจำลองขนาด $4.3 \times 4.3 \times 4.3$ m และจำนวนเมชที่ใช้ 1,100,000 เมช ขอบเขตที่กำหนดให้กับแบบจำลอง พร้อมทั้งแบบจำลองปั่นป่วน SST มีความแม่นยำและจะถูกนำไปใช้กับรูปแบบใบอื่นที่จำลองในงานวิจัยนี้

4.2 ผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดที่มุมองศาต่างๆของกันหันลม

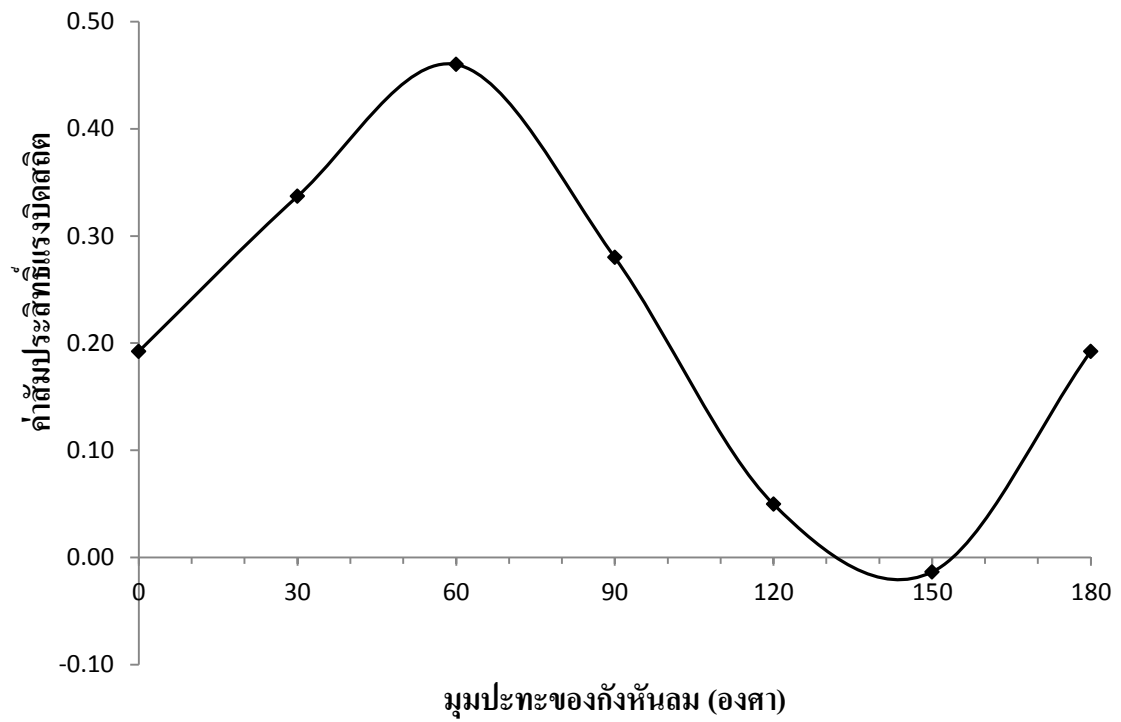
การวิจัยผลในหัวข้อนี้ต้องพิจารณาถึงมุมปะทะของอากาศ โดยมุมที่ใช้ในการอ้างอิงจะกำหนดตามรูปที่ 4.2 และหมุนในแนวแกน z โดยในการทดลองได้เก็บค่าที่มุมปะทะของแบบใบกันหันลมแต่ละแบบเริ่มต้นจากมุมปะทะที่ 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 ขณะที่ใบพัดหยุดนิ่งเพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตที่มุมปะทะอากาศของใบพัดที่องศาต่างๆ เพราะในความเป็นจริงมวลอากาศสามารถเข้ามาได้ทุกทิศทาง ดังนั้นจำเป็นต้องทราบว่าที่มุมปะทะต่างๆนั้นสามารถทำให้กันหันลมหมุนได้หรือไม่ และค่าที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเท่าไร โดยผลการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 ผลจากแรงบิดที่มุมองศาต่างๆ ของกัณฑ์ลมแบบที่ 1

จากการจำลองการไหลของอากาศผ่านกัณฑ์ลมรูปแบบใบแบบที่ 1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตที่มุมปะทะของอากาศที่ 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 องศา มีค่าที่ได้ดังตารางที่ 4.4 และเมื่อสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ค่ามุมของอากาศที่ปะทะกับกัณฑ์ลมกับค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตดังรูปที่ 4.7 จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากมุมปะทะ 0 – 60 องศา และจะลดลงจากมุมปะทะ 60-130 จนค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตเป็นลบจากมุม 130 – 150 องศา และมีเพิ่มจนกลับสู่จุดเริ่มต้นที่มุมปะทะ 180 องศาหรือ 0 องศา เราสามารถดูลักษณะของความดันที่กระจายบริเวณใบกัณฑ์และทิศทางการไหลดังที่รูปที่ 4.10 และทิศทางการไหลของอากาศได้ดังรูปที่ 4.11 ดังนั้นสมรรถนะด้านค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของกัณฑ์ลมรูปแบบใบแบบที่ 1 นั้นสามารถบอกได้ว่ารูปแบบใบแบบที่ 1 มีข้อเสียอยู่ที่มุมปะทะของอากาศอยู่ที่มุม 130-150 และมุมปะทะ 310-330 องศา ซึ่งจะทำให้เมื่อมีลมเข้ามาปะทะกัณฑ์ลมที่มุมนี้กัณฑ์ลมจะไม่สามารถหมุนได้ แต่จุดเด่นของกัณฑ์ลมแบบที่ 1 จะมีจุดเด่นอยู่ที่ค่าสัมประสิทธิ์ที่สูงถึง 0.46 ที่มุม 60 องศา

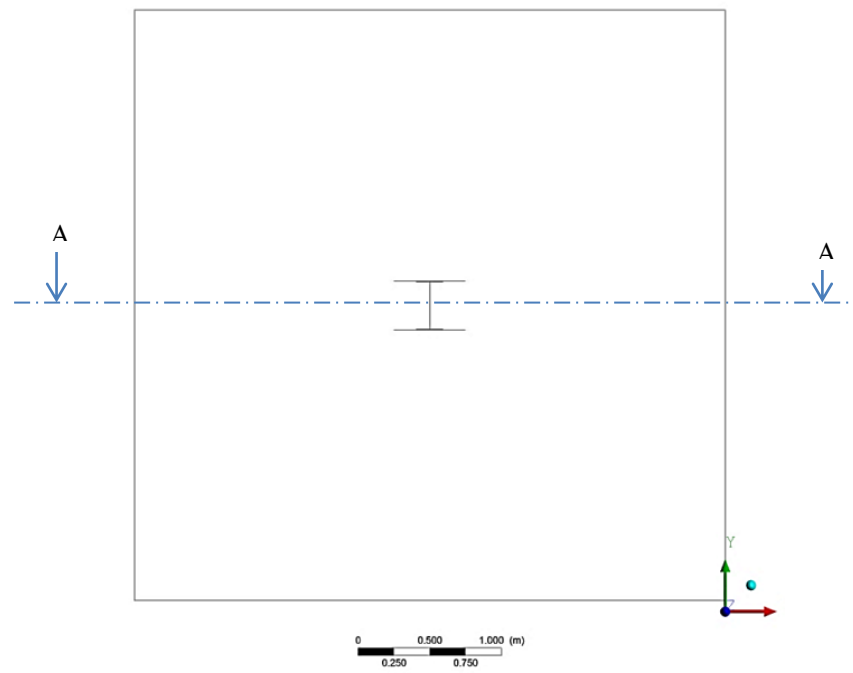
ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตกับมุมปะทะของใบกัณฑ์แบบที่ 1

ค่ามุมปะทะของ ใบกัณฑ์ (องศา)	พื้นที่รับอากาศ (m ²)	ค่าแรงบิดที่ได้จาก งานวิจัย (N.m)	ค่าแรงบิดที่ได้จาก ทฤษฎี (N.m)	ค่าสัมประสิทธิ์ แรงบิดสถิต
0	0.0759	0.1156	0.601	0.19
30	0.0759	0.2025	0.601	0.34
60	0.0759	0.2765	0.601	0.46
90	0.0759	0.1682	0.601	0.28
120	0.0759	0.0298	0.601	0.05
150	0.0759	-0.0081	0.601	-0.01
180	0.0759	0.1156	0.601	0.19

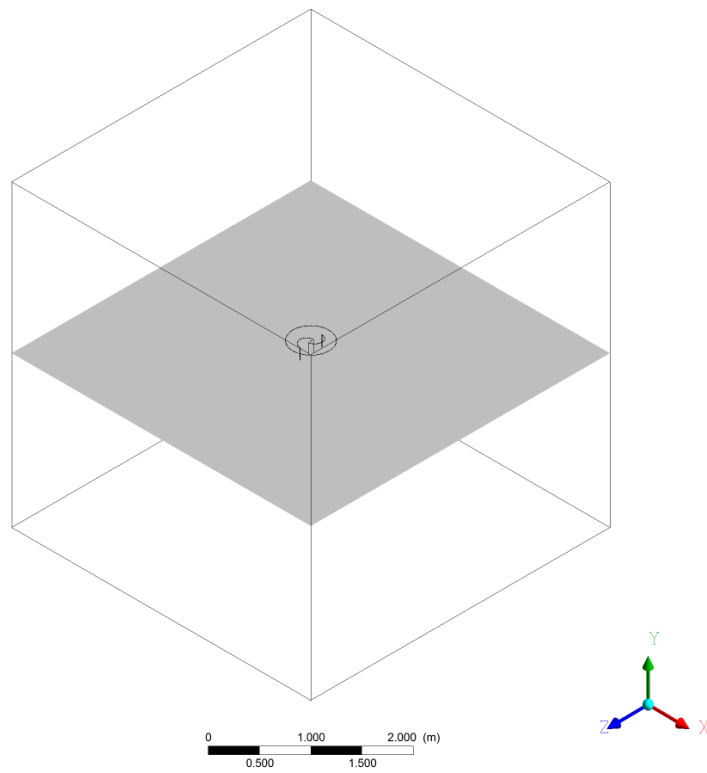


รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบก้านเหวแบบที่ 1

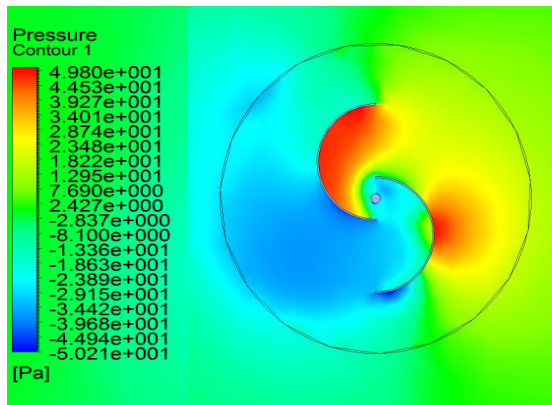
จากรูปที่ 4.10 เป็นภาพที่ได้จากภาพตัดครึ่งของพื้นที่ในการจำลองของใบก้านเหวเพื่อให้เห็นถึงลักษณะถึงภาพต่างๆ ทั้งการกระจายตัวของความดันบริเวณใบ และการไหลผ่านใบก้านเหวรูปแบบใบต่างๆ ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



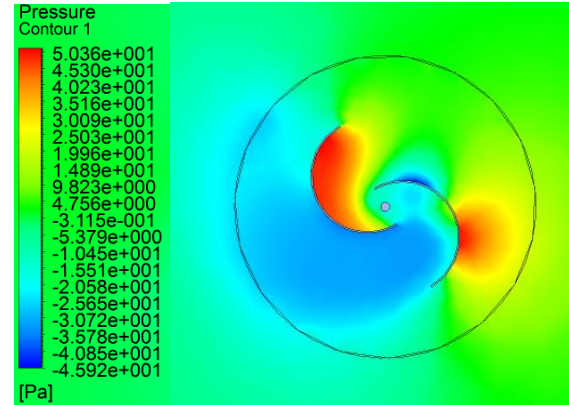
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งการที่วิเคราะห์ภาพการกระจายตัวของความดันและการไหลด้านข้าง



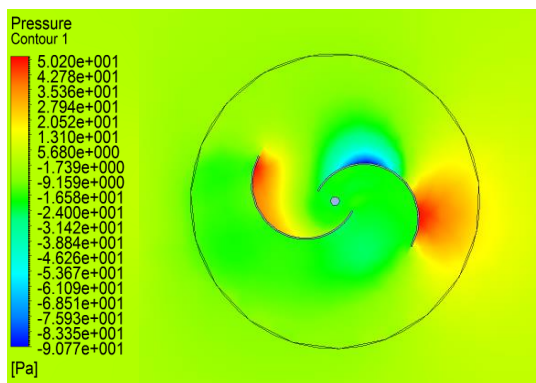
รูปที่ 4.9 ตำแหน่งการที่วิเคราะห์ภาพการกระจายตัวของความดันและการไหล 3 มิติ



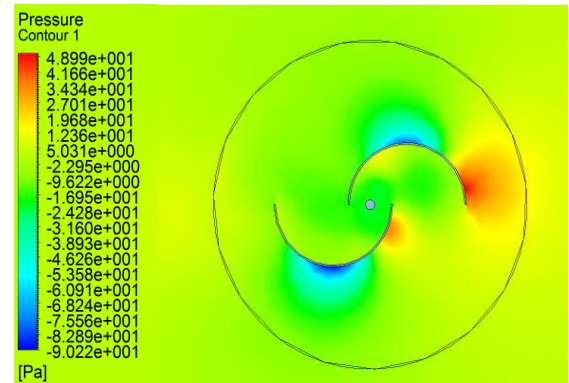
ก. 0 องศา



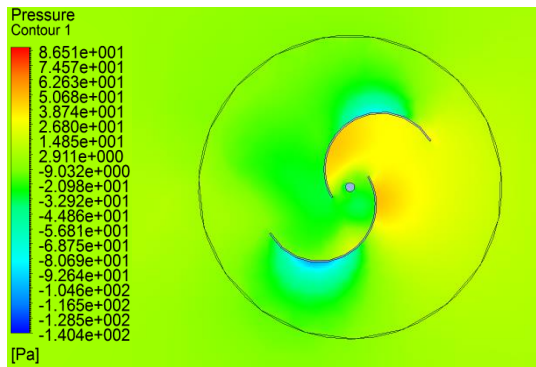
ข. 30 องศา



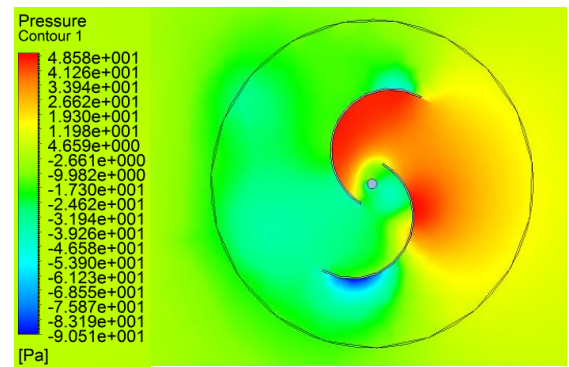
ค. 60 องศา



ง. 90 องศา

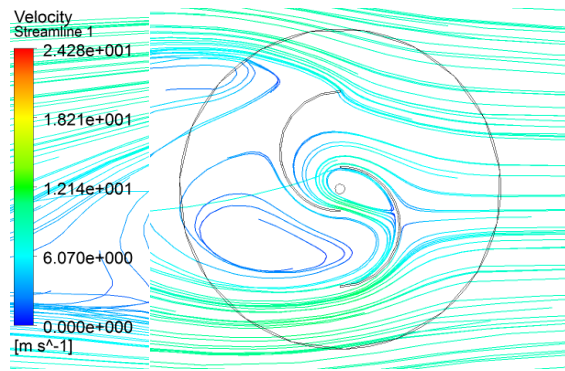


จ. 120 องศา

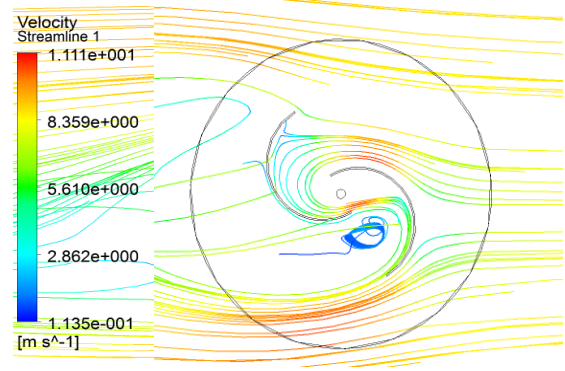


ฉ. 150 องศา

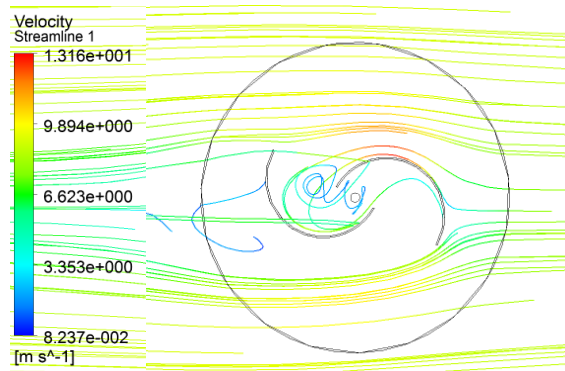
รูปที่ 4.10 ลักษณะการกระจายตัวของความดันบริเวณกังหันลมแบบที่ 1



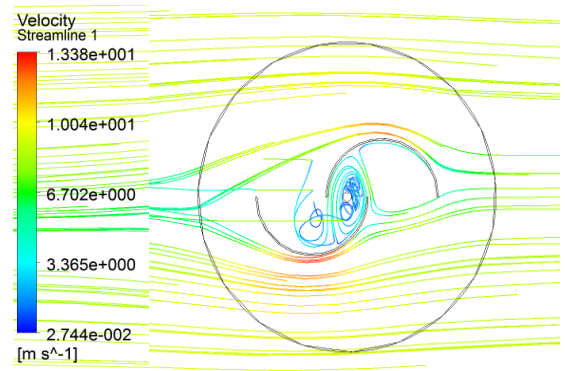
ก. 0 องศา



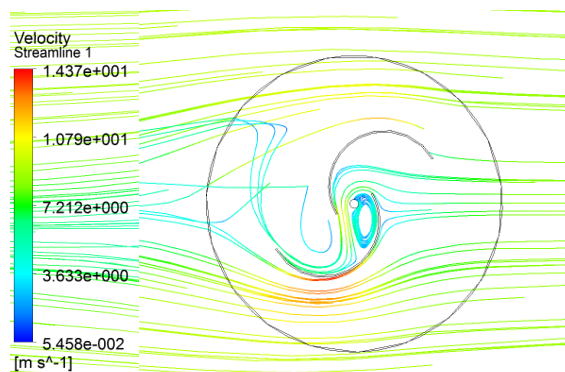
ข. 30 องศา



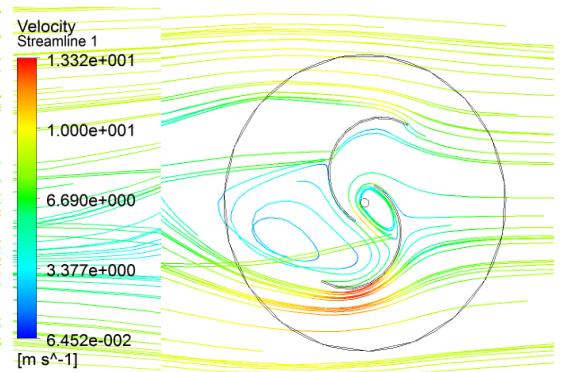
ค. 60 องศา



ง. 90 องศา



จ. 120 องศา



ฉ. 150 องศา

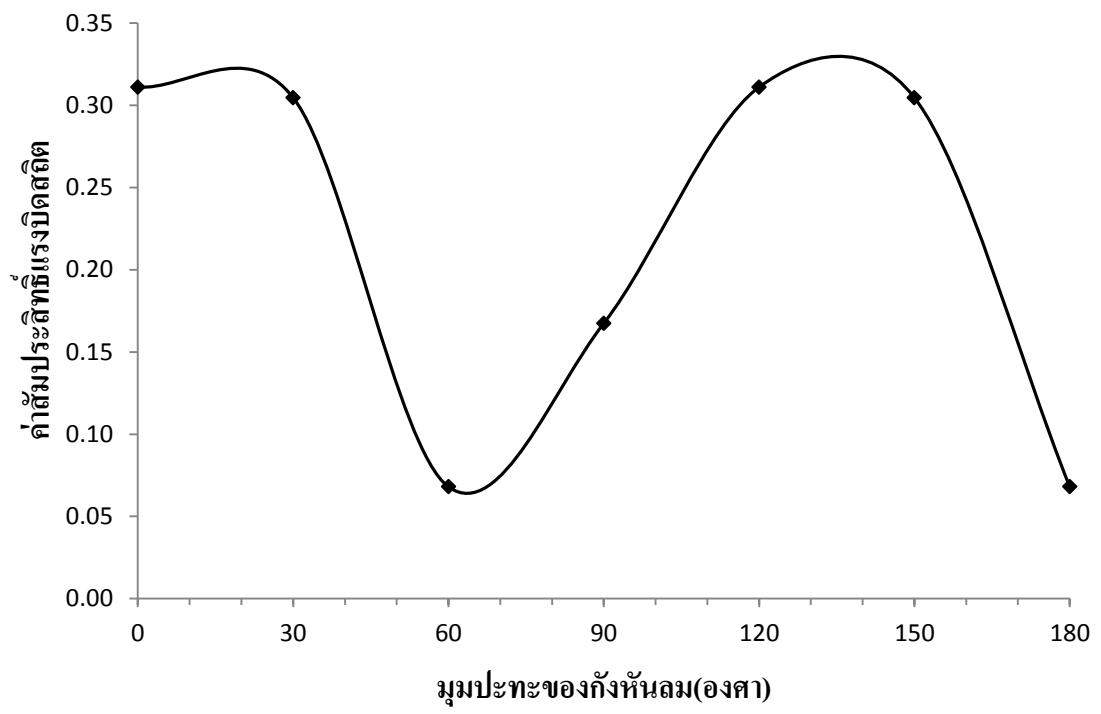
รูปที่ 4.11 ลักษณะการไหลของอากาศบริเวณกังหันลมแบบที่ 1

4.2.2 ผลจากแรงบิดที่มุมองศาต่างๆ ของกึ่งหั่นลมแบบที่ 2

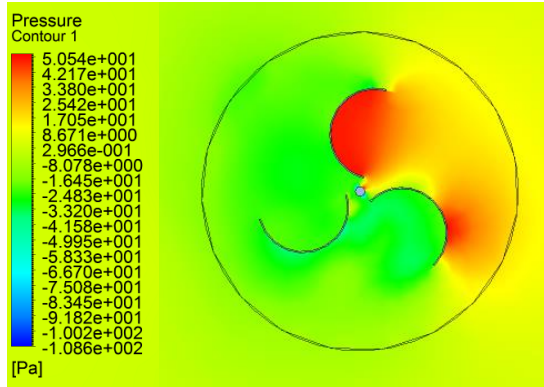
จากการจำลองการไหลของอากาศผ่านกึ่งหั่นลมรูปแบบใบแบบที่ 2 ซึ่งการออกแบบกึ่งหั่นลมแบบที่ 2 นั้นมีแนวคิดมาจากการพัฒนาจากกึ่งหั่นลมแบบที่ 1 ซึ่งต้องการให้สามารถหมุนได้ที่มุมปะทะองศาต่างๆ ทุกมุม จากการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตที่มุมปะทะของอากาศที่ 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 องศา มีค่าที่ได้ดังตารางที่ 4.5 และเมื่อสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ค่ามุมของอากาศที่ปะทะกับกึ่งหั่นกับค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตดังรูปที่ 4.12 จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากมุมปะทะ 0 – 30 องศา และจะลดลงจากมุมปะทะ 30-60 และมีเพิ่มจนกลับสู่จุดเริ่มต้นที่มุมปะทะ 180 องศาหรือ 0 องศา เราสามารถดูลักษณะของความดันที่กระจายบริเวณใบกึ่งหั่นและทิศทางการไหลดังที่รูปที่ 4.13 และทิศทางการไหลของอากาศได้ดังรูปที่ 4.14 ดังนั้นสมรรถนะด้านค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของกึ่งหั่นลมรูปแบบใบแบบที่ 2 นั้นสามารถบอกได้ว่ารูปแบบใบแบบที่ 2 มีข้อเสียอยู่ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตอยู่ที่ค่าต่ำกว่าแบบที่ 1 โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตมากที่สุดอยู่ที่ 0.31 แต่จุดเด่นของกึ่งหั่นลมแบบที่ 2 จะมีจุดเด่นอยู่ที่สามารถหมุนได้เองมุมปะทะทุกองศา ซึ่งเป็นการปรับปรุงข้อเสียของกึ่งหั่นลมชนิดนี้ได้ดี

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตกับมุมปะทะของใบกึ่งหั่น

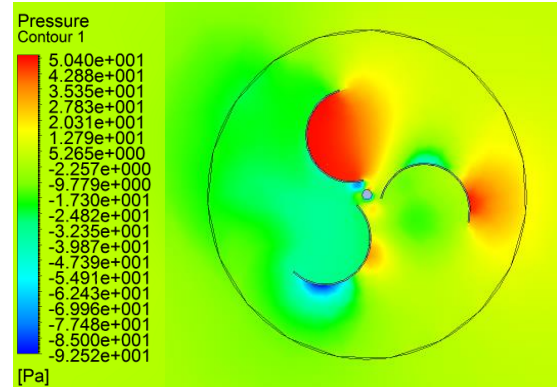
ค่ามุมปะทะของ ใบกึ่งหั่น (องศา)	พื้นที่รับอากาศ (m^2)	ค่าแรงบิดที่ได้จาก งานวิจัย (N.m)	ค่าแรงบิดที่ได้จาก ทฤษฎี (N.m)	ค่าสัมประสิทธิ์ แรงบิดสถิต
0	0.0759	0.1870	0.601	0.31
30	0.0759	0.1831	0.601	0.30
60	0.0759	0.0409	0.601	0.07
90	0.0759	0.1006	0.601	0.17
120	0.0759	0.1870	0.601	0.31



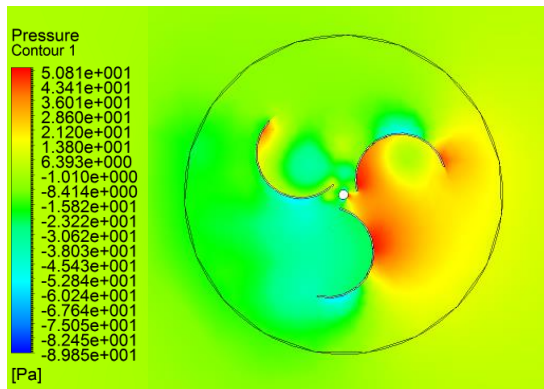
รูปที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบที่ 2



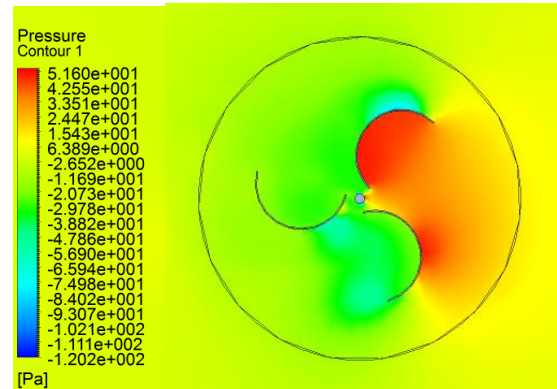
ก. 0 องศา



ข. 30 องศา

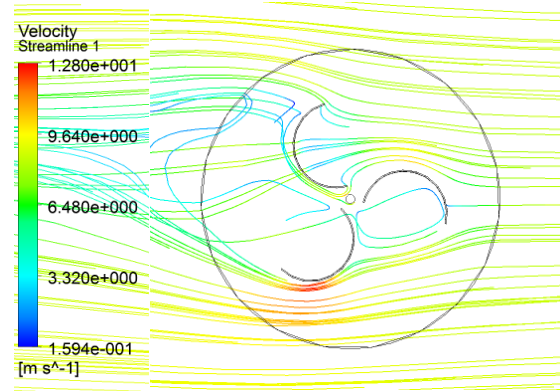
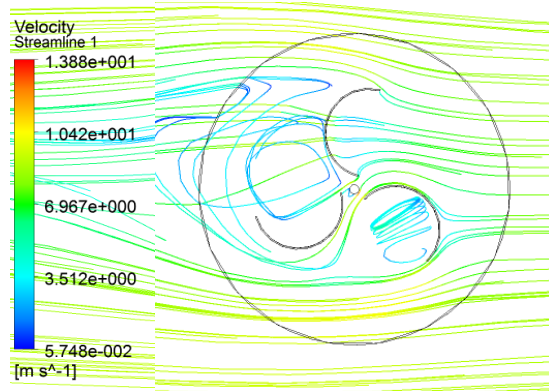


ค. 60 องศา



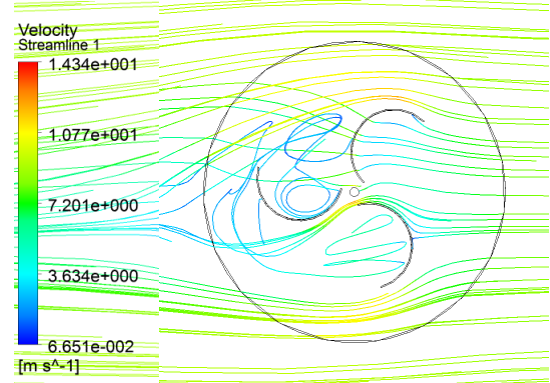
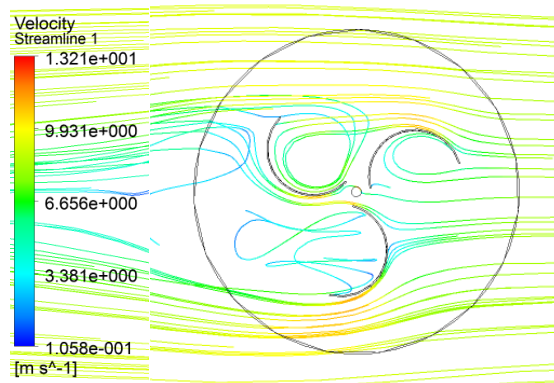
ง. 90 องศา

รูปที่ 4.13 ลักษณะการกระจายตัวของความดันบริเวณกังหันลมแบบที่ 2



ก. 0 องศา

ข. 30 องศา



ค. 60 องศา

ง. 90 องศา

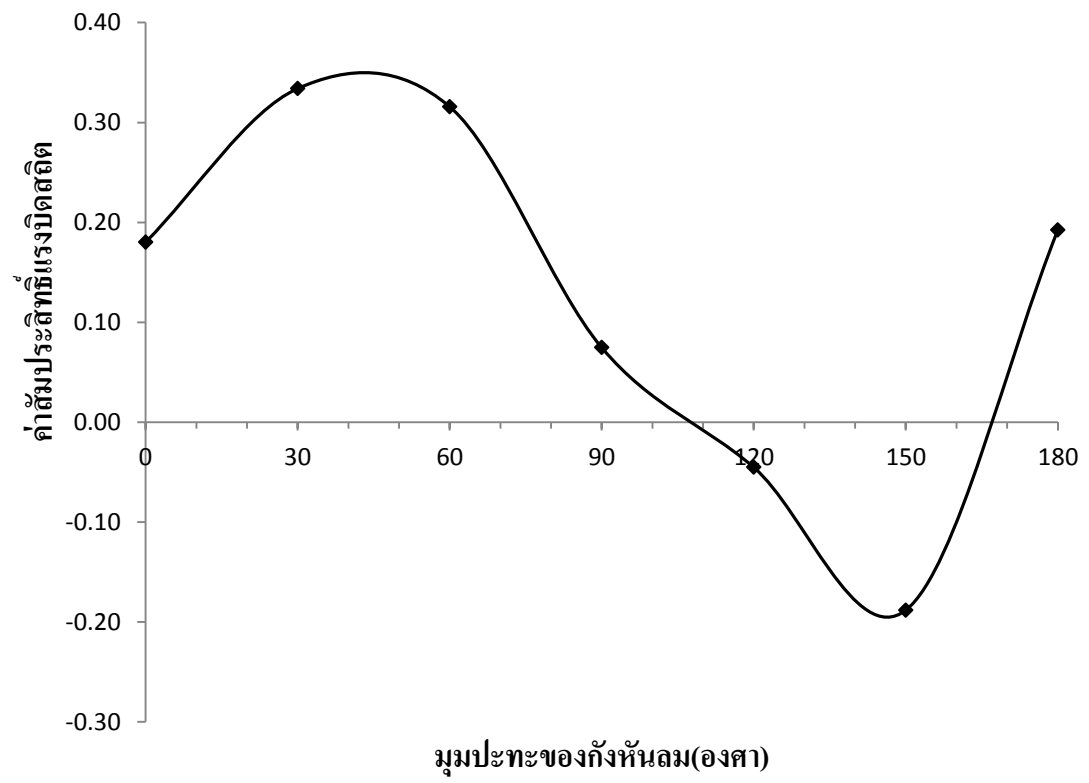
รูปที่ 4.14 ลักษณะการไหลของอากาศบริเวณกังหันลมแบบที่ 2

4.2.3 ผลจากแรงบิดที่มุมองศาต่างๆ ของกัณฑ์ลมแบบที่ 3

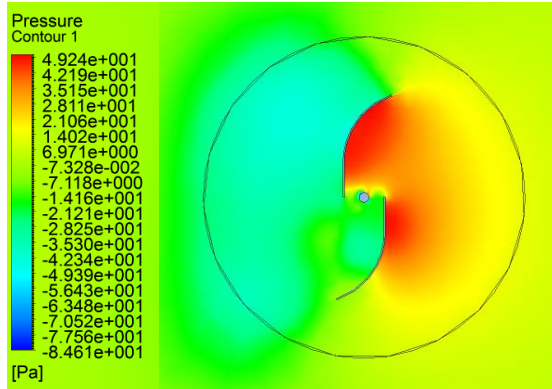
จากการจำลองการไหลของอากาศผ่านกัณฑ์ลมรูปแบบไบแบบที่ 3 ซึ่งมีแนวคิดมาจากการต้องการพัฒนาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตให้มากขึ้น โดยปรับปรุงรูปแบบให้มีค่าแรงหน่วงให้มากขึ้น จากการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตที่มุมปะทะของอากาศที่ 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 องศา มีค่าที่ได้ดังตารางที่ 4.6 และเมื่อสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ค่ามุมของอากาศที่ปะทะกับกัณฑ์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตดังรูปที่ 4.15 จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากมุมปะทะ 0 – 30 องศา และจะลดลงจากมุมปะทะ 60-110 จนค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตเป็นลบจากมุม 110 – 170 องศา และมีค่าเพิ่มจนกลับสู่จุดเริ่มต้นที่มุมปะทะ 180 องศาหรือ 0 องศา เราสามารถดูลักษณะของความดันที่กระจายบริเวณไบกัณฑ์และทิศทางการไหลดังที่รูปที่ 4.16 และทิศทางการไหลของอากาศได้ดังรูปที่ 4.17 ดังนั้นสมรรถนะด้านค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของกัณฑ์ลมรูปแบบไบแบบที่ 3 นั้นสามารถบอกได้ว่ารูปแบบไบแบบที่ 3 มีข้อเสียอยู่ที่มุมปะทะของอากาศอยู่ที่มุม 110-170 และมุมปะทะ 290-350 องศา ซึ่งจะทำให้เมื่อมีลมเข้ามาปะทะกัณฑ์ลมที่มุมนี้กัณฑ์ลมจะไม่สามารถหมุนได้ แต่จุดเด่นของกัณฑ์ลมแบบที่ 3 จะมีจุดเด่นอยู่ที่ค่าสัมประสิทธิ์ที่สูงถึง 0.33 ที่มุม 30 องศา

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตกับมุมปะทะของไบกัณฑ์

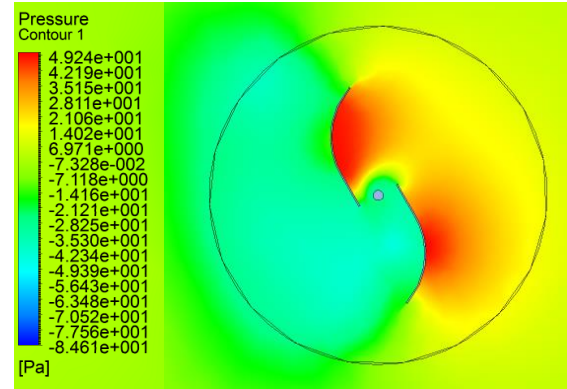
ค่ามุมปะทะของไบกัณฑ์ (องศา)	พื้นที่รับอากาศ (m ²)	ค่าแรงบิดที่ได้จากงานวิจัย (N.m)	ค่าแรงบิดที่ได้จากทฤษฎี (N.m)	ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิต
0	0.0759	0.1083	0.601	0.18
30	0.0759	0.2007	0.601	0.33
60	0.0759	0.1898	0.601	0.32
90	0.0759	0.0449	0.601	0.07
120	0.0759	-0.0271	0.601	-0.05
150	0.0759	-0.1131	0.601	-0.19
180	0.0759	0.1156	0.601	0.19



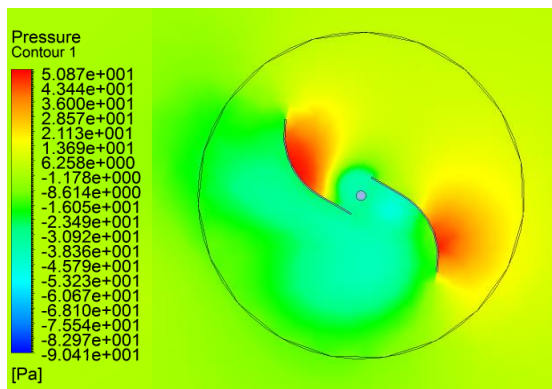
รูปที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบที่ 3



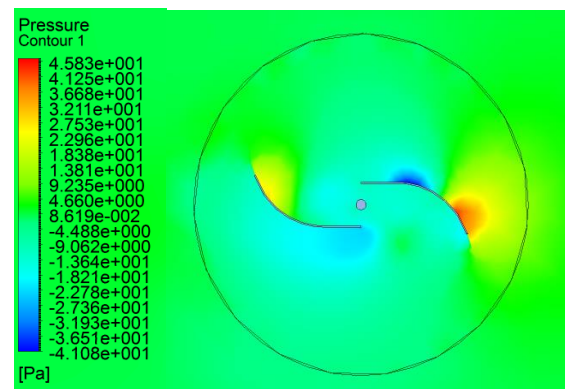
ก. 0 องศา



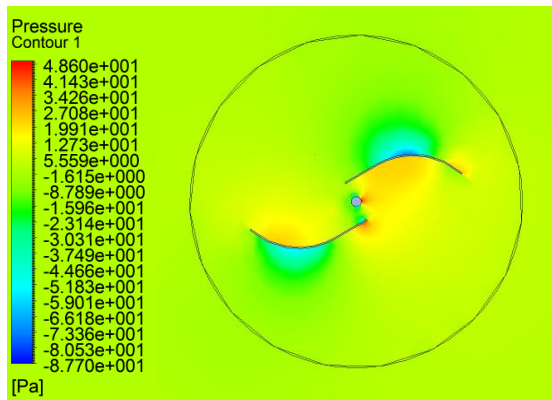
ข. 30 องศา



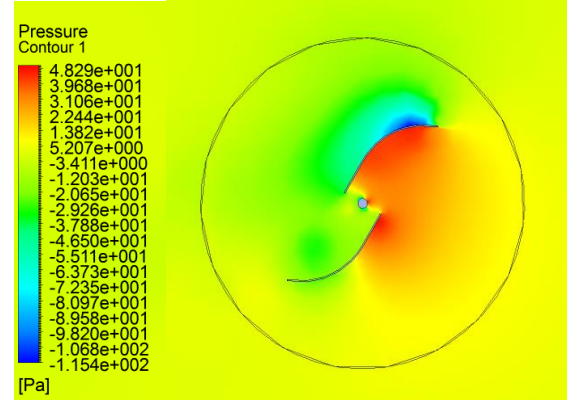
ค. 60 องศา



ง. 90 องศา

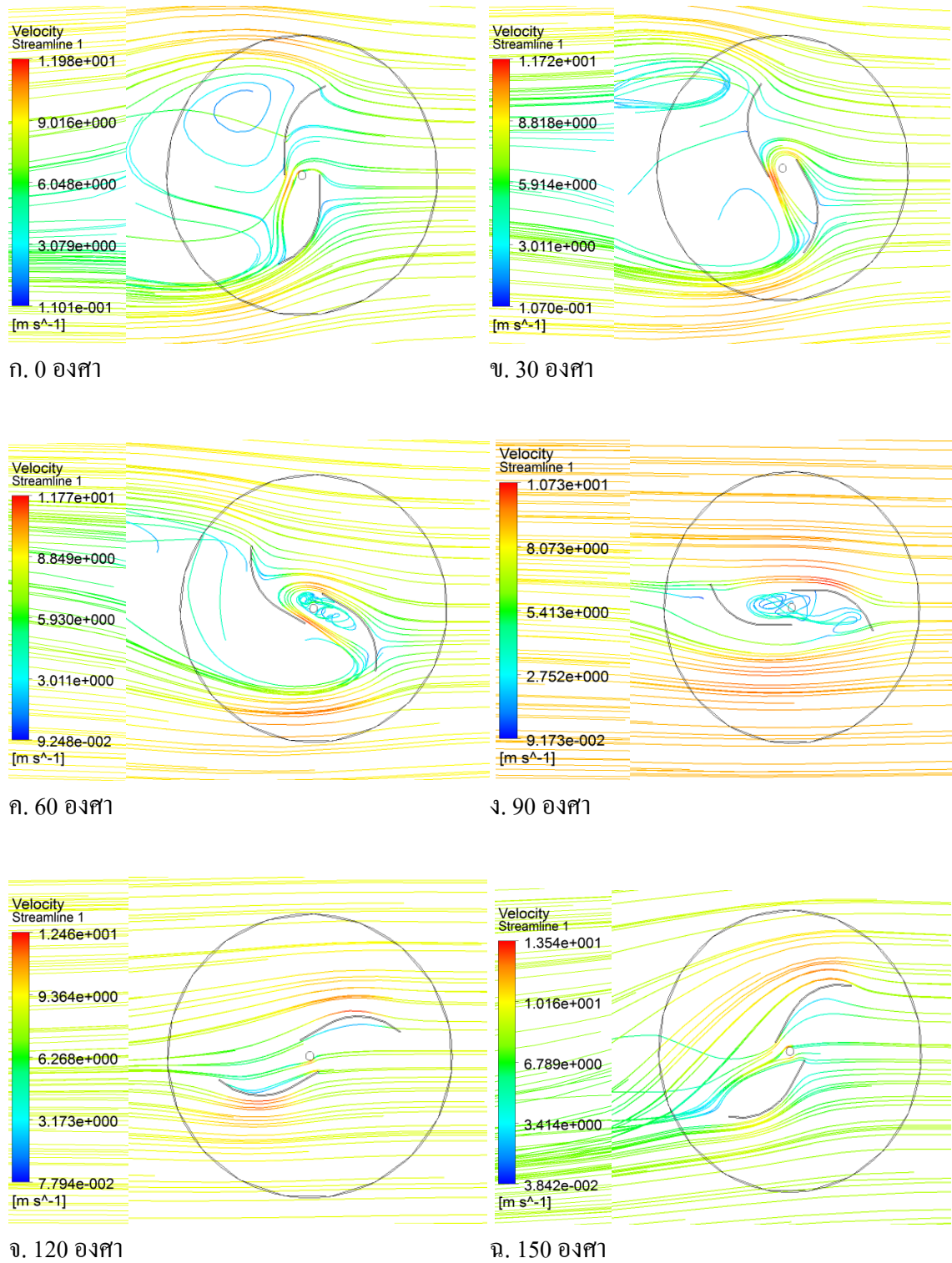


จ. 120 องศา



ฉ. 150 องศา

รูปที่ 4.16 ลักษณะการกระจายตัวของความดันบริเวณกังหันลมแบบที่ 3



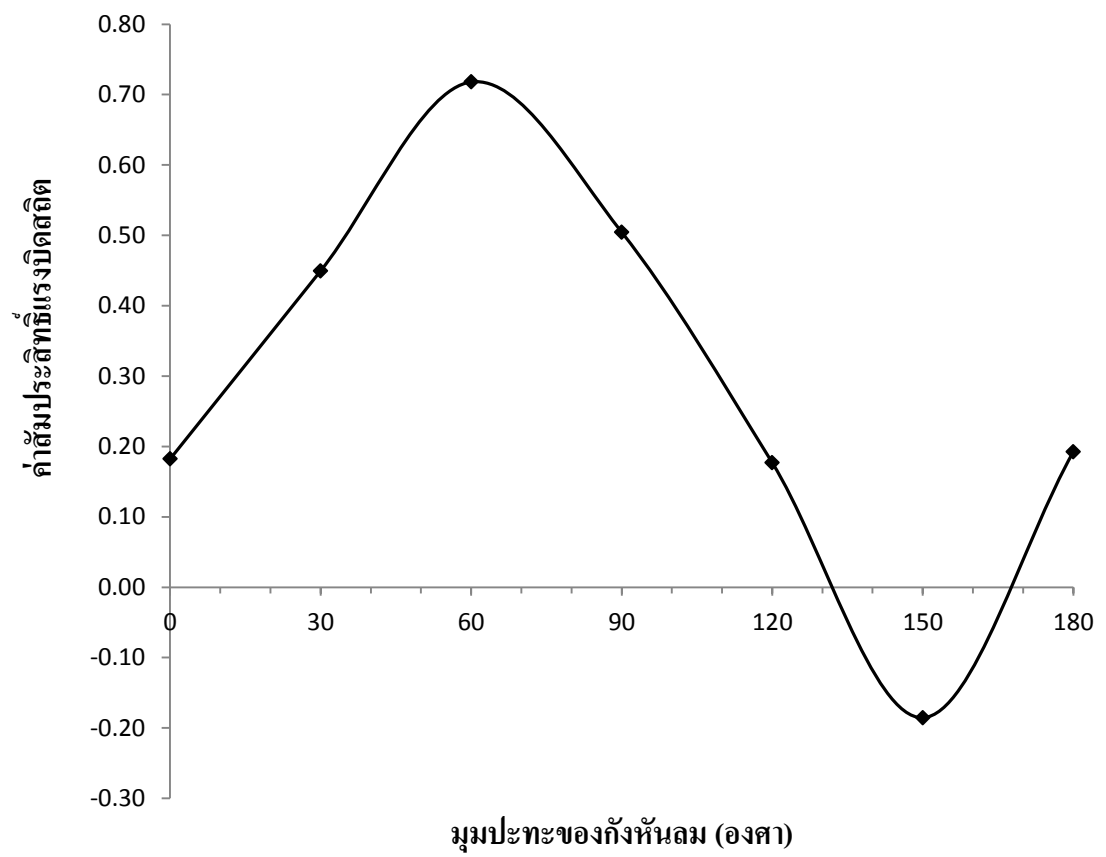
รูปที่ 4.17 ลักษณะการไหลของอากาศบริเวณกั้นลมแบบที่ 3

4.2.4 ผลจากแรงบิดที่มุมองศาต่างๆ ของกัณฑ์ลมแบบที่ 4

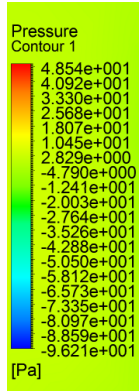
จากการจำลองการไหลของอากาศผ่านกัณฑ์ลมรูปแบบใบแบบที่ 4 ซึ่งมีแนวคิดมาจากการต้องการพัฒนาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตให้มากขึ้น โดยปรับปรุงรูปแบบให้มีค่าแรงหน่วงให้มากขึ้นเช่นกันกับแบบที่ 3 จากการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตที่มุมปะทะของอากาศที่ 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 องศา มีค่าที่ได้ดังตารางที่ 4.7 และเมื่อสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์หาค่ามุมของอากาศที่ปะทะกับกัณฑ์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตดังรูปที่ 4.18 จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากมุมปะทะ 0 – 60 องศา และจะลดลงจากมุมปะทะ 60-130 จนค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตเป็นลบจากมุม 130 – 170 องศา และมีค่าเพิ่มจนกลับสู่จุดเริ่มต้นที่มุมปะทะ 180 องศาหรือ 0 องศา เราสามารถดูลักษณะของความดันที่กระจายบริเวณใบกัณฑ์และทิศทางการไหลดังที่รูปที่ 4.19 และทิศทางการไหลของอากาศได้ดังรูปที่ 4.20 ดังนั้นสมรรถนะด้านค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของกัณฑ์ลมรูปแบบใบแบบที่ 4 นั้นสามารถบอกได้ว่ารูปแบบใบแบบที่ 4 มีข้อเสียอยู่ที่มุมปะทะของอากาศอยู่ที่มุม 130-170 และมุมปะทะ 310-350 องศา ซึ่งจะทำให้เมื่อมีลมเข้ามาปะทะกัณฑ์ลมที่มุมนี้กัณฑ์ลมจะไม่สามารถหมุนได้ แต่จุดเด่นของกัณฑ์ลมแบบที่ 4 จะมีจุดเด่นอยู่ที่ค่าสัมประสิทธิ์ที่สูงถึง 0.72 ที่มุม 60 องศา

ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตกับมุมปะทะของใบกัณฑ์

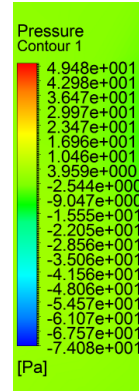
ค่ามุมปะทะของใบกัณฑ์ (องศา)	พื้นที่รับอากาศ (m ²)	ค่าแรงบิดที่ได้จากงานวิจัย (N.m)	ค่าแรงบิดที่ได้จากทฤษฎี (N.m)	ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิต
0	0.0759	0.1095	0.601	0.18
30	0.0759	0.2702	0.601	0.45
60	0.0759	0.4315	0.601	0.72
90	0.0759	0.3032	0.601	0.50
120	0.0759	0.1064	0.601	0.18
150	0.0759	-0.1114	0.601	-0.19
180	0.0759	0.1156	0.601	0.19



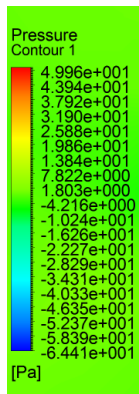
รูปที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบที่ 4



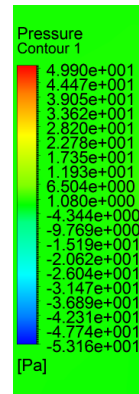
ก. 0 องศา



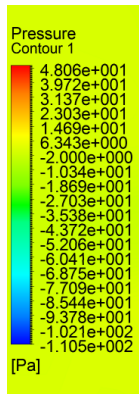
ข. 30 องศา



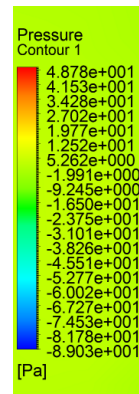
ค. 60 องศา



ง. 90 องศา

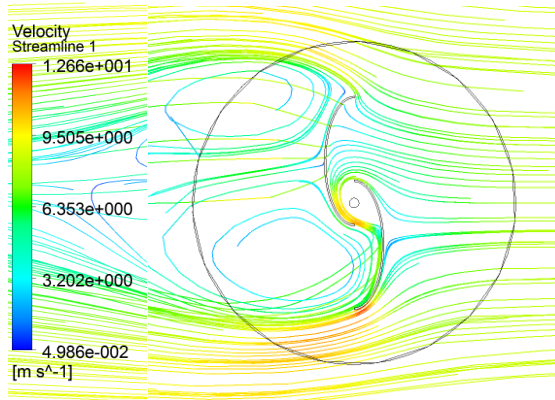


จ. 120 องศา

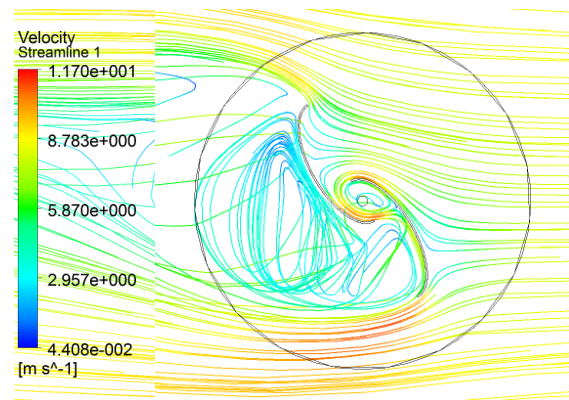


ฉ. 150 องศา

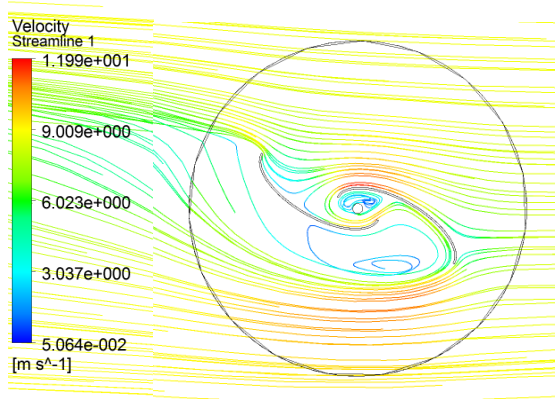
รูปที่ 4.19 ลักษณะการกระจายตัวของความดันบริเวณกังหันลมแบบที่ 4



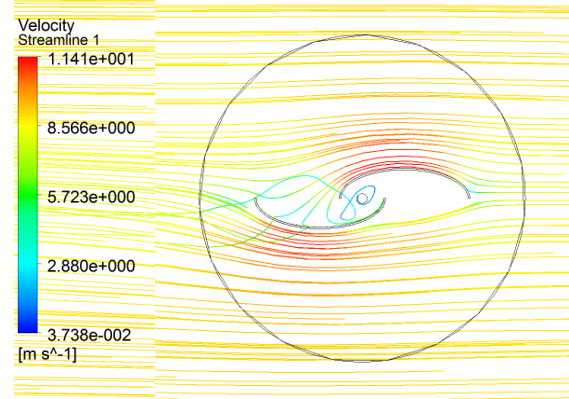
ก. 0 องศา



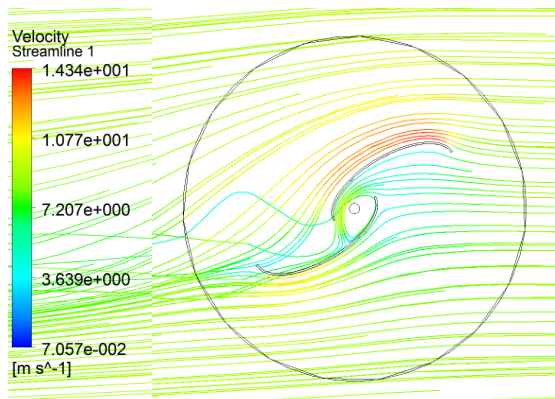
ข. 30 องศา



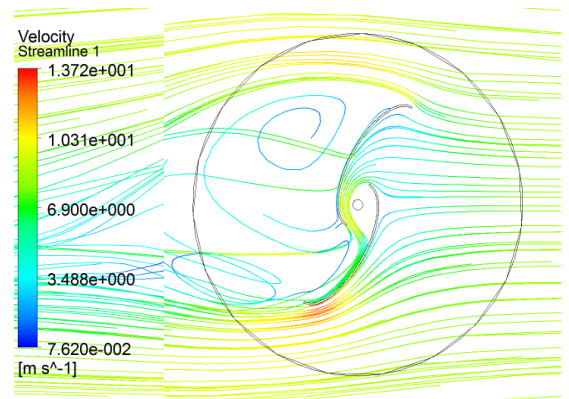
ค. 60 องศา



ง. 90 องศา



จ. 120 องศา



ฉ. 150 องศา

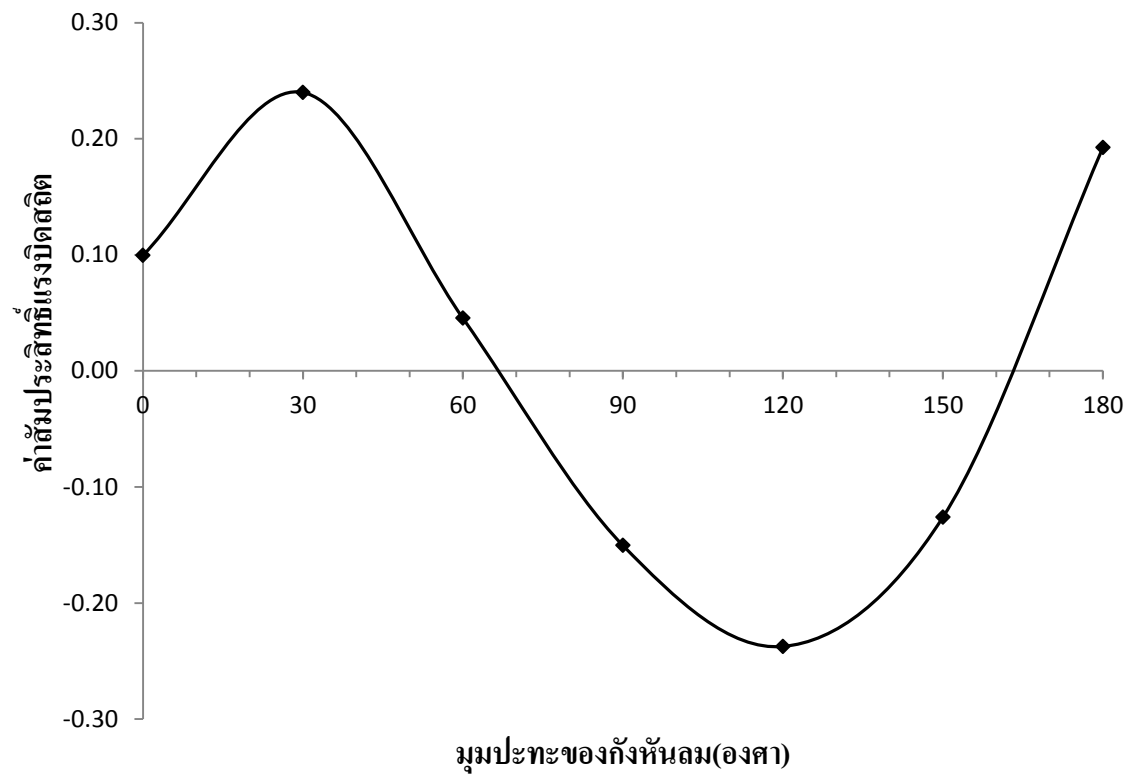
รูปที่ 4.20 ลักษณะการไหลของอากาศบริเวณก้นหุ้มแบบที่ 4

4.2.5 ผลจากแรงบิดที่มุมองศาต่างๆ ของกัณฑ์ลมแบบที่ 5

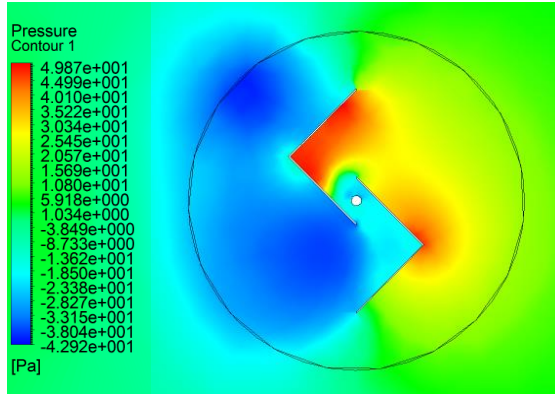
จากการจำลองการไหลของอากาศผ่านกัณฑ์ลมรูปแบบใบแบบที่ 5 ซึ่งมีแนวคิดมาจากการต้องการพัฒนาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตให้มากขึ้น โดยปรับปรุงรูปแบบให้มีค่าแรงท่วงให้มากขึ้น จากการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตมุมปะทะของอากาศที่ 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 องศา มีค่าที่ได้ดังตารางที่ 4.8 และเมื่อสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ค่ามุมของอากาศที่ปะทะกับกัณฑ์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตดังรูปที่ 4.21 จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากมุมปะทะ 0 – 30 องศา และจะลดลงจากมุมปะทะ 30-70 จนค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตเป็นลบจากมุม 70 – 160 องศา และมีค่าเพิ่มจนกลับสู่จุดเริ่มต้นที่มุมปะทะ 180 องศาหรือ 0 องศา เราสามารถดูลักษณะของความดันที่กระจายบริเวณใบกัณฑ์และทิศทางการไหลดังที่รูปที่ 4.22 และทิศทางการไหลของอากาศได้ดังรูปที่ 4.23 ดังนั้นสมรรถนะด้านค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของกัณฑ์ลมรูปแบบใบแบบที่ 5 นั้นสามารถบอกได้ว่ารูปแบบใบแบบที่ 5 มีข้อเสียอยู่ที่มุมปะทะของอากาศอยู่ที่มุม 70-160 และมุมปะทะ 290-340 องศา ซึ่งจะทำให้เมื่อมีลมเข้ามาปะทะกัณฑ์ลมที่มุมนี้กัณฑ์ลมจะไม่สามารถหมุนได้ แต่จุดเด่นของกัณฑ์ลมแบบที่ 5 จะมีจุดเด่นอยู่ที่ค่าสัมประสิทธิ์ที่ 0.24 ที่มุม 30 องศา แต่ยังมีค่าน้อยกว่าแบบที่ 2

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตกับมุมปะทะของใบกัณฑ์

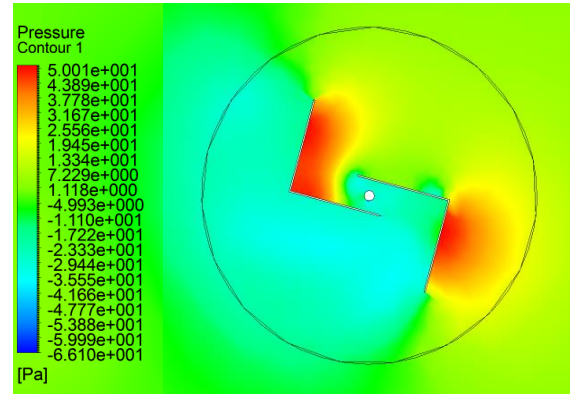
ค่ามุมปะทะของ ใบกัณฑ์ (องศา)	พื้นที่รับอากาศ (m ²)	ค่าแรงบิดที่ได้จาก งานวิจัย (N.m)	ค่าแรงบิดที่ได้จาก ทฤษฎี (N.m)	ค่าสัมประสิทธิ์ แรงบิดสถิต
0	0.0759	0.0598	0.601	0.10
30	0.0759	0.1442	0.601	0.24
60	0.0759	0.0273	0.601	0.05
90	0.0759	-0.0904	0.601	-0.15
120	0.0759	-0.1427	0.601	-0.24
150	0.0759	-0.0758	0.601	-0.13
180	0.0759	0.1156	0.601	0.19



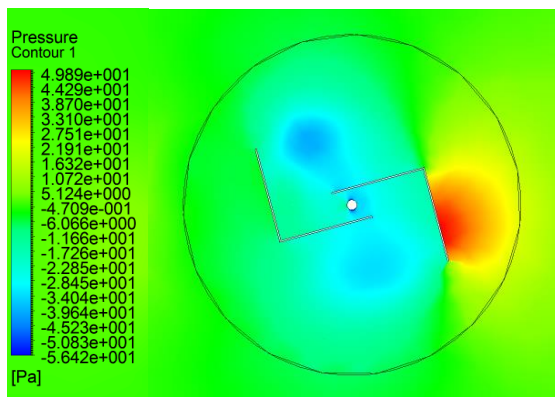
รูปที่ 4.21 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบที่ 5



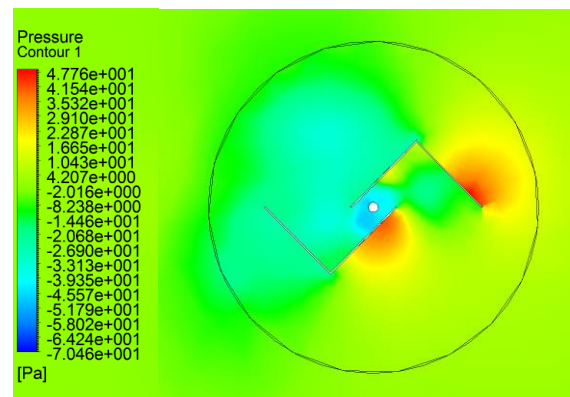
ก. 0 องศา



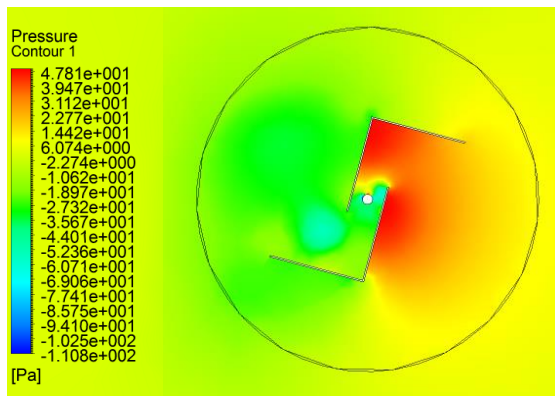
ข. 30 องศา



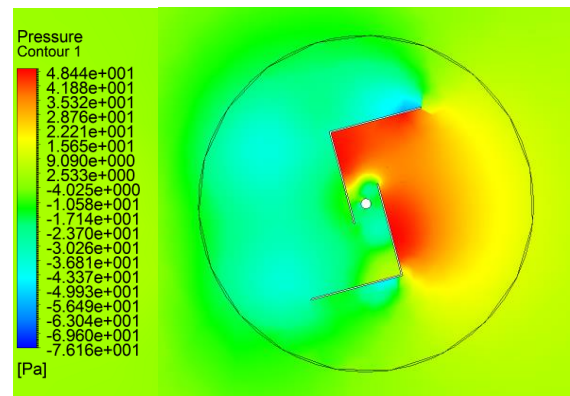
ค. 60 องศา



ง. 90 องศา

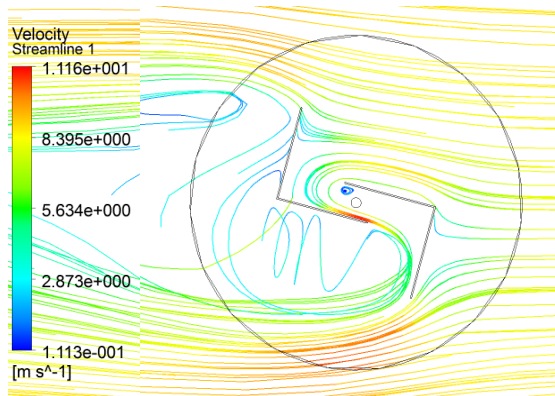


จ. 120 องศา

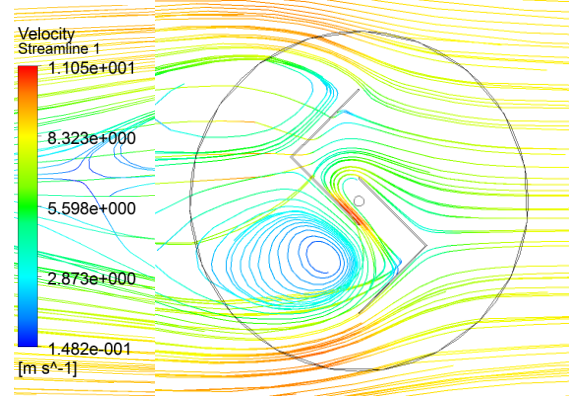


ฉ. 150 องศา

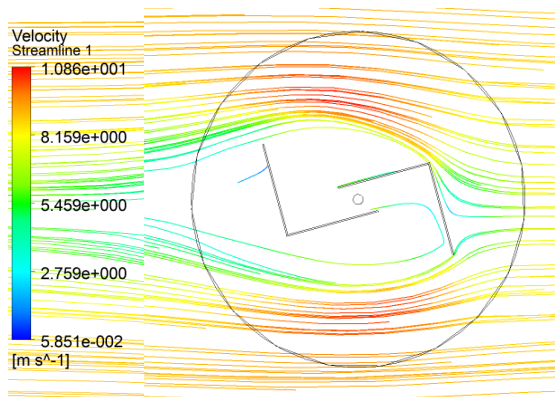
รูปที่ 4.22 ลักษณะการกระจายตัวของความดันบริเวณกังหันลมแบบที่ 5



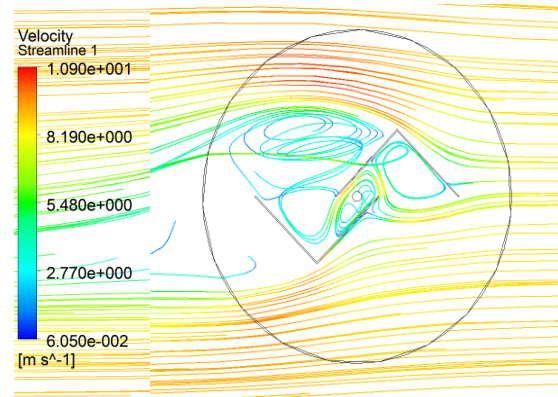
ก. 0 องศา



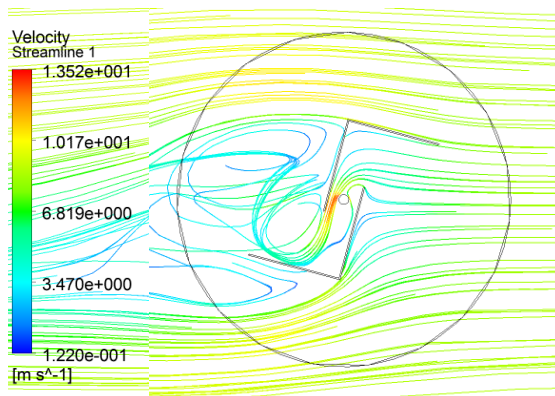
ข. 30 องศา



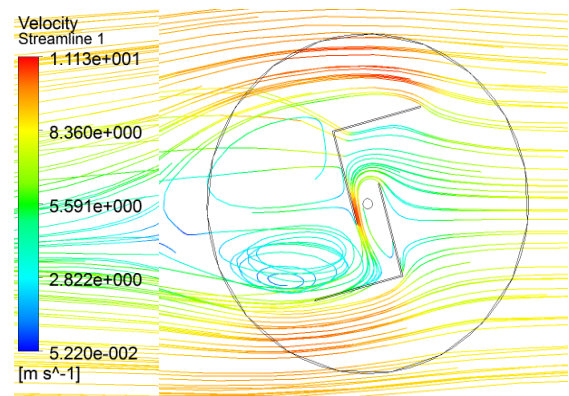
ค. 60 องศา



ง. 90 องศา

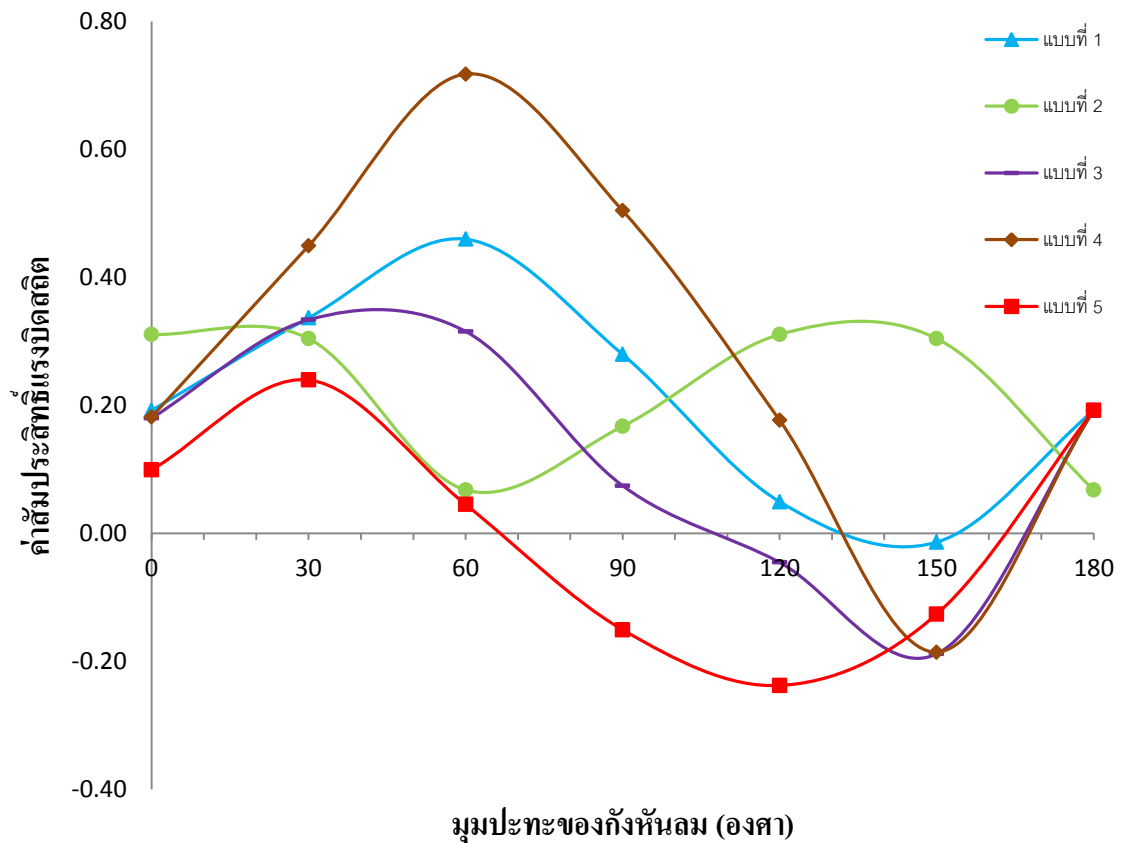


จ. 120 องศา



ฉ. 150 องศา

รูปที่ 4.23 ลักษณะการไหลของอากาศบริเวณกังหันลมแบบที่ 5



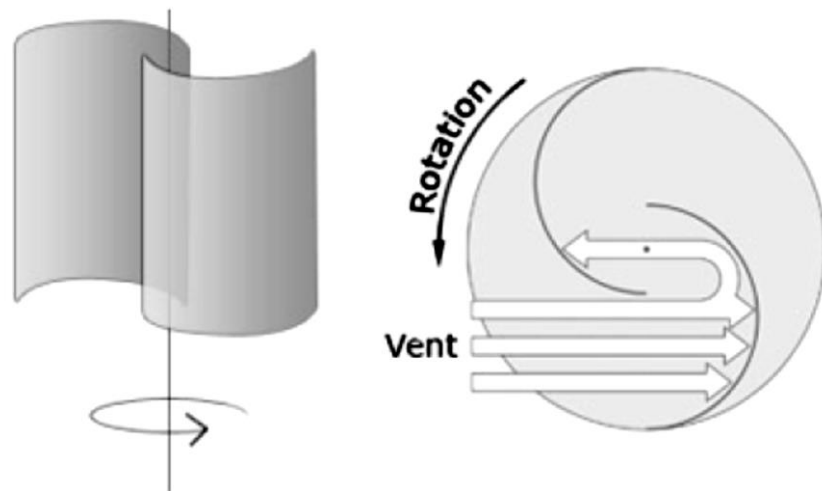
รูปที่ 4.24 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของใบกังหันลมแบบต่างๆ

จากกราฟรวมค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตดังรูปที่ 4.24 ของใบรูปแบบต่างๆ มีค่าที่มุมปะทะแตกต่างกันออกไป จากการใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล ทำให้เราทราบถึงลักษณะของความดันและลักษณะการไหลผ่านใบกังหันของรูปแบบใบแต่ละแบบ เมื่อวิเคราะห์ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจะเห็นว่าเมื่ออากาศไหลผ่านผิวของใบกังหันลมจะเกิดความดันและแรงเฉือนที่ผิวของใบขึ้น โคนความดันที่จะส่งผลให้เกิดแรงหน่วงจะขึ้นกับทิศที่ลมเข้ามาปะทะใบกังหัน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับแรงหน่วงในทิศการไหลที่กระทำต่อใบกังหัน โดยแรงที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความสัมพันธ์และทำให้เกิดแรงบิดสถิตขึ้น จากสมการ

$$T = T_M + T_D \quad (4.1)$$

เมื่อ T คือ แรงบิดสุทธิ (N.m)
 T_M คือ แรงบิดขับเคลื่อนการหมุน (N.m)
 T_D คือ แรงบิดต้านการเคลื่อนที่ (N.m)

เมื่อมีแรงมากระทำกับพื้นที่ของใบกังหันทั้งหมดจะทำให้เกิดแรงบิดขึ้น โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นจะมี 2 แบบคือ แรงบิดที่ทำให้กังหันลมหมุนและแรงบิดที่ทำให้เกิดการต้านการหมุน และเมื่อแรงบิดสุทธิเป็นบวกจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ถูกต้องขึ้น ซึ่งจากจากรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าหลักการการทำงานของกังหันลมชนิดนี้ทำงานอย่างไร ดังนั้นเมื่อเรารู้ลักษณะของความดันที่กระทำที่บริเวณใบกังหันลมและการไหลของอากาศจะทำให้ทราบถึงลักษณะการทำงานของใบต่างๆ ได้โดยค่าแรงบิดการหมุนที่มากกว่าค่าแรงบิดการต้านการหมุนมากเท่าไร ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดที่ได้ก็จะมีค่ามากขึ้นตาม เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมาวิเคราะห์ที่มุมอากาศปะทะใบกังหัน ค่าที่ได้นั้นสามารถบอกได้ว่ากังหันลมชนิดนั้นจะสามารถเริ่มการหมุนได้เมื่อทิศทางของลมเข้ามาปะทะใบกังหันที่มุมปะทะเท่าไร จากกราฟรูปแบบใบทั้งหมดจะเห็นได้ว่ารูปแบบใบทั้งหมดจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตเพิ่มขึ้นและลดลงในช่วงปะทะแต่ละมุม



รูปที่ 4.25 ลักษณะการไหลของอากาศผ่านใบกังหัน

เมื่อพิจารณาถึงการออกแบบใบกังหันที่ใช้ในการวิจัยทั้งหมดพบว่า รูปแบบใบที่ 2 นั้นมีความสามารถหมุนได้ด้วยตัวเองดีที่สุด เพราะทุกมุมปะทะไม่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตช่วงใดเป็นลบ และจะเห็นได้ว่าการที่เพิ่มจำนวนใบเข้ามาทำให้ช่วงมุมปะทะที่ค่าสัมประสิทธิ์ลดลงจนเข้าช่วงติดลบของแบบใบแบบที่ 1 นั้นได้ถูกทดแทนด้วยใบที่เพิ่มเข้ามา และเมื่อวิเคราะห์ถึงรูปแบบใบที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ดีที่สุดคือรูปแบบใบแบบที่ 4 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์มีค่ามากกว่ากังหันลมแบบใบแบบที่ 1 ซึ่งเป็นผลจากรูปร่างใบแบบที่ 4 ได้ให้แรงทวนมากที่สุดนั่นเอง ส่วนแบบใบกังหันแบบที่ 3 และแบบที่ 5 นั้น ให้ค่าสัมประสิทธิ์น้อยกว่าแบบที่ 1 เนื่องจากไม่สามารถให้แรงบิดที่มากกว่าเดิม

4.3 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ความเร็วปลายใบต่างๆ

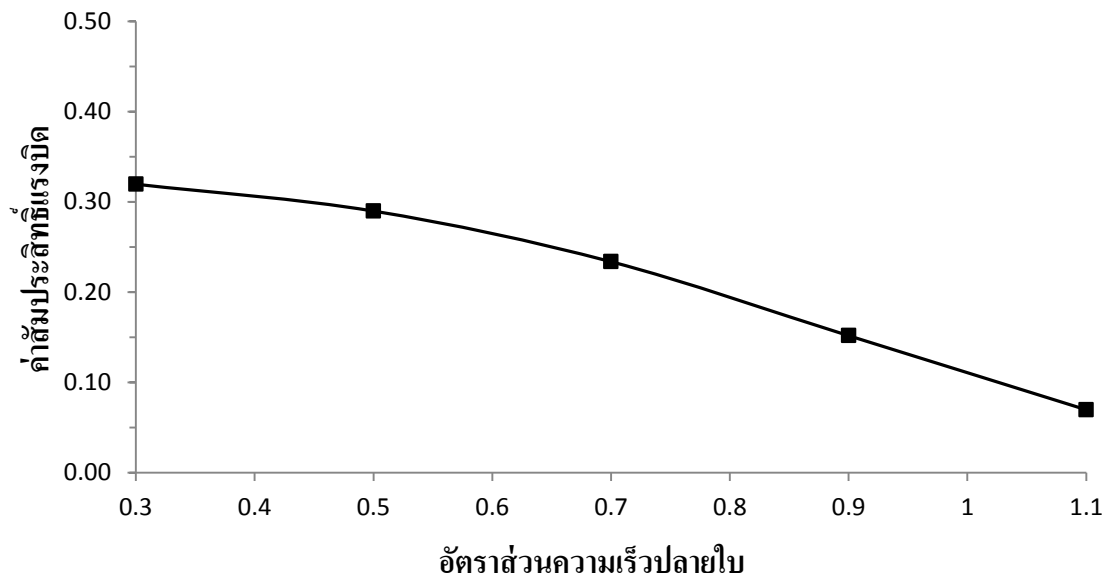
การวิจัยผลในหัวข้อนี้ต้องพิจารณาถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราความเร็วปลายใบของกังหันลม โดยในการทดลองได้เก็บค่าที่ความเร็วปลายใบที่ค่า 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1 ที่ความเร็วลม 9 เมตรต่อวินาที เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดซึ่งจะแตกต่างกับค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิต เพราะแรงบิดที่เกิดขึ้นจะคิดค่าแรงบิดเฉลี่ยของการหมุนครบ 1 รอบ และค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลม ซึ่งจะสามารถบอกได้ว่าใบกังหันลมแต่ละแบบสามารถเปลี่ยนกำลังงานลมมาเป็นกำลังงานกลได้ดีมากน้อยขนาดไหน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดจะแปรตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบ โดยที่ความเร็วปลายใบมากขึ้นจะส่งผลให้กังหันลมหมุนเร็วมากขึ้น โดยมีรายละเอียดของค่าสัมประสิทธิ์ดังนี้

4.3.1 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ความเร็วปลายใบต่างๆ ของกังหันลมแบบที่ 1

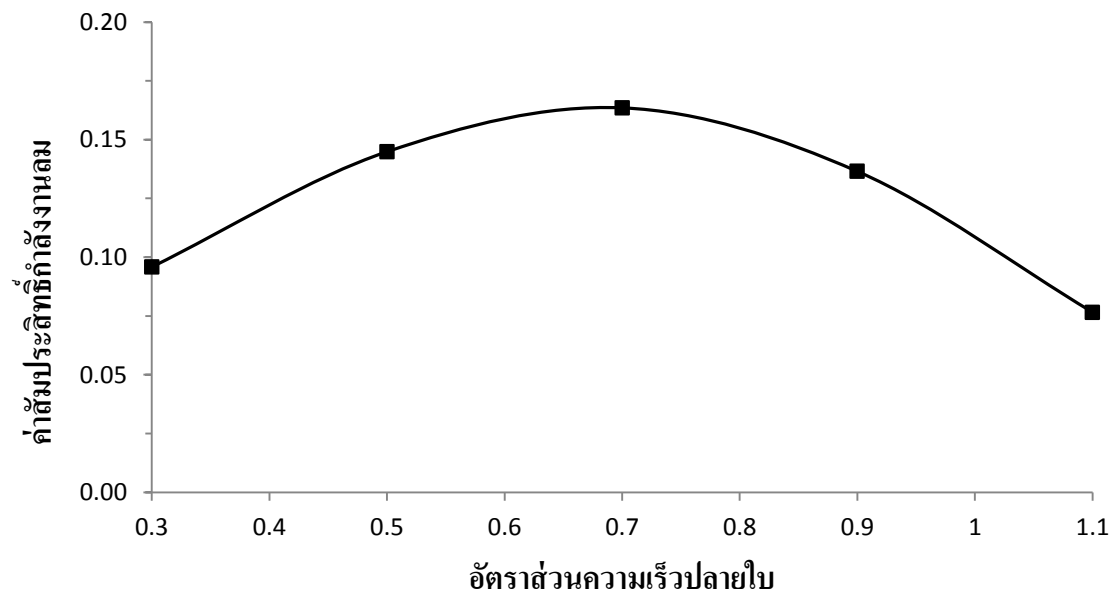
การจำลองแบบกังหันลมขณะกังหันลมหมุนของรูปแบบใบแบบที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงสุดอยู่ที่ 0.319 โดยมีอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 0.3 และมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมสูงสุดอยู่ที่ 0.145 โดยมีอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 0.7 ดังค่าในตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบค่าหนึ่งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดและค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมค่าหนึ่งเสมอ โดยค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่เหมาะสมจะทำให้กังหันลมมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมดีที่สุด จากรูปที่ 4.26 และ 4.27 จะเห็นช่วงที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์กับอัตราความเร็วปลายใบกังหัน

อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ	ค่าแรงบิด (N.m)	กำลังงานกล (Watt)	ค่าสัมประสิทธิ์ แรงบิด	ค่าสัมประสิทธิ์ กำลังงานลม
0.3	0.1920	3.1418	0.319	0.096
0.5	0.1741	4.7489	0.290	0.145
0.7	0.1404	5.3605	0.234	0.164
0.9	0.0912	4.4752	0.152	0.137
1.1	0.0418	2.5108	0.070	0.077



รูปที่ 4.26 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบกึ่งหันลมแบบที่ 1



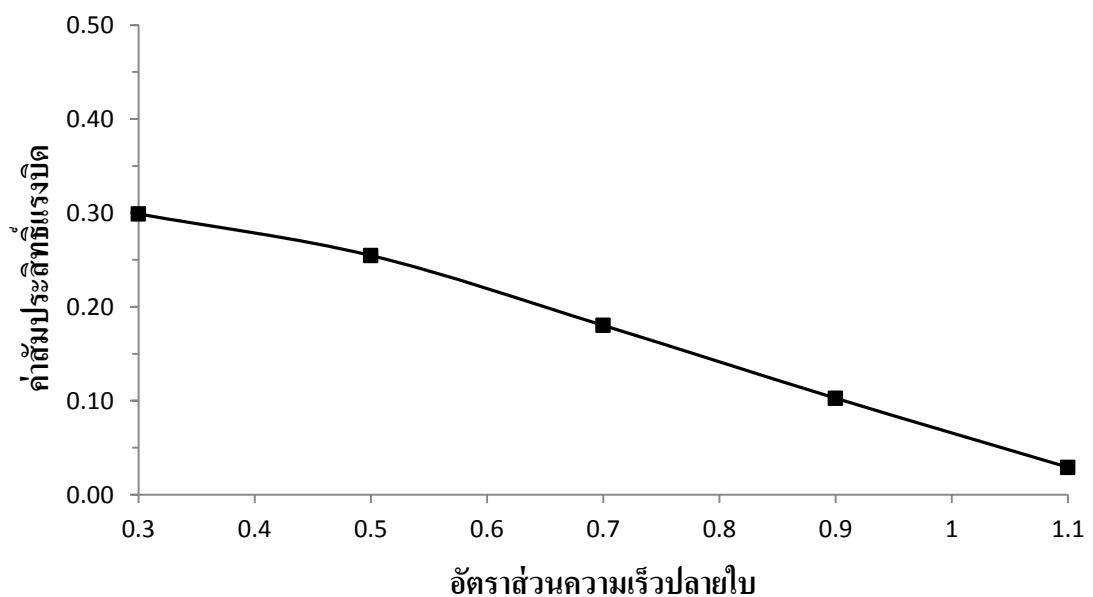
รูปที่ 4.27 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานใบกึ่งหันลมแบบที่ 1

4.3.2 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ความเร็วปลายใบต่างๆ ของกังหันลมแบบที่ 2

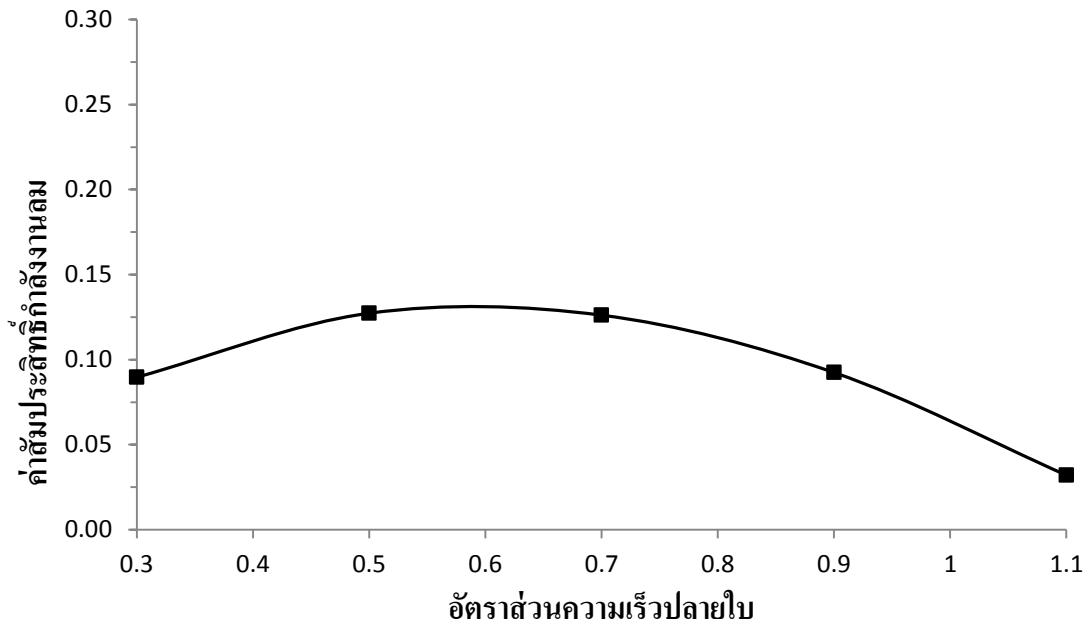
การจำลองแบบกังหันลมขณะกังหันลมหมุนของรูปแบบใบแบบที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงสุดอยู่ที่ 0.299 โดยมีอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 0.3 และมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมสูงสุดอยู่ที่ 0.127 โดยมีอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 0.5 ดังค่าในตารางที่ 4.10 กังหันลมรูปแบบใบแบบที่ 2 นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตน้อยกว่าแบบที่ 1 โดยค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่เหมาะสมจะทำให้กังหันลมมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมดีที่สุด จากรูปที่ 4.28 และ 4.29 จะเห็นช่วงที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์กับอัตราความเร็วปลายใบกังหัน

อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ	ค่าแรงบิด (N.m)	กำลังงานกล (Watt)	ค่าสัมประสิทธิ์ แรงบิด	ค่าสัมประสิทธิ์ กำลังงานลม
0.3	0.1797	2.9398	0.299	0.090
0.5	0.1530	4.1735	0.255	0.127
0.7	0.1083	4.1360	0.180	0.126
0.9	0.0617	3.0309	0.103	0.092
1.1	0.0175	1.0511	0.029	0.032



รูปที่ 4.28 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบกังหันลมแบบที่ 2



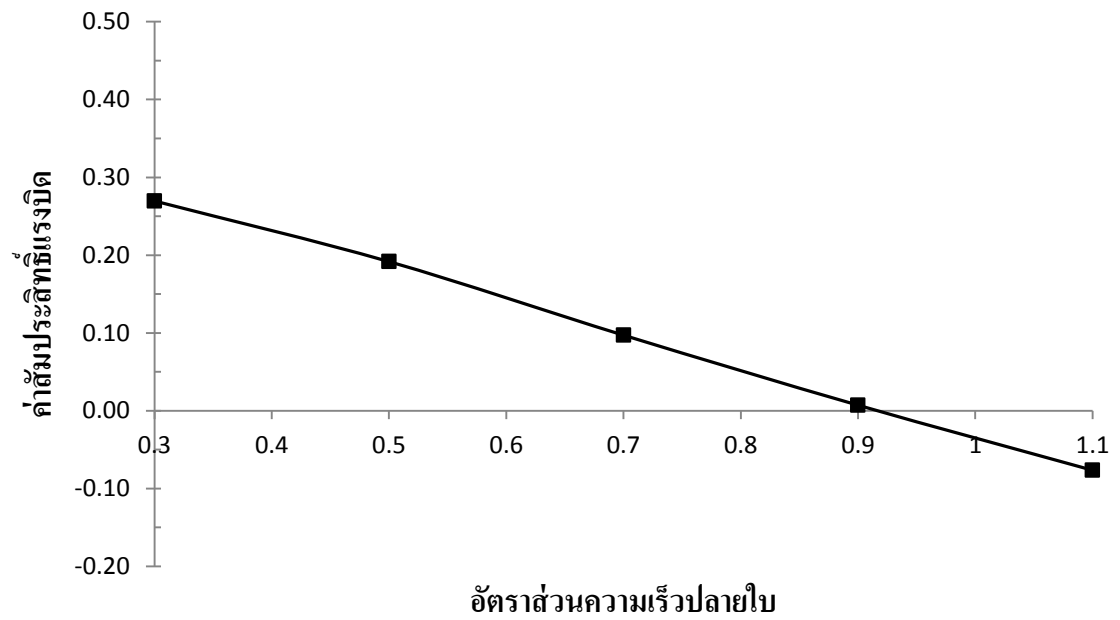
รูปที่ 4.29 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานใบกังหันลมแบบที่ 2

4.3.3 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ความเร็วปลายใบต่างๆ ของกังหันลมแบบที่ 3

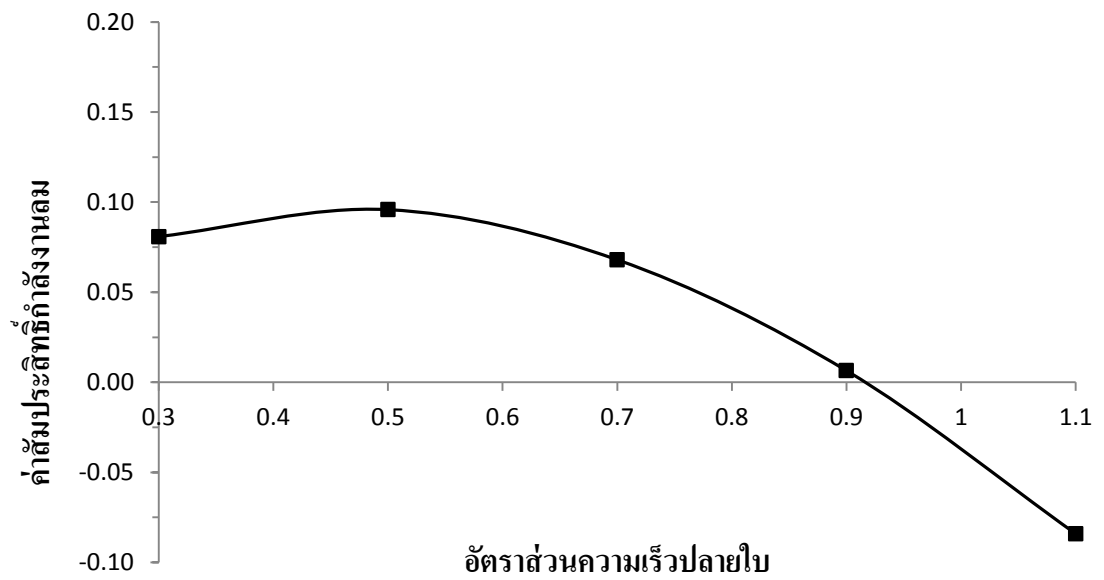
การจำลองแบบกังหันลมขณะกังหันลมหมุนของรูปแบบใบแบบที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงสุดอยู่ที่ 0.270 โดยมีอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 0.3 และมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมสูงสุดอยู่ที่ 0.096 โดยมีอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 0.5 ดังค่าในตารางที่ 4.11 กังหันลมรูปแบบใบแบบที่ 3 นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตน้อยกว่าแบบที่ 1 และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมากที่สุดใกล้เคียงกับแบบที่ 2 เมื่อวิเคราะห์ค่าจากกราฟดังรูปที่ 4.30 และ 4.31 จะพบว่ากังหันลมแบบที่ 3 นั้นสามารถทำงานได้ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุดที่ 0.9 ซึ่งค่าหลังจากนั้นหมายความว่ากังหันลมชนิดนี้ไม่สามารถทำงานได้

ตารางที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์กับอัตราความเร็วปลายใบกังหัน

อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ	ค่าแรงบิด (N.m)	กำลังงานกล (Watt)	ค่าสัมประสิทธิ์ แรงบิด	ค่าสัมประสิทธิ์ กำลังงานลม
0.3	0.1620	2.6514	0.270	0.081
0.5	0.1152	3.1419	0.192	0.096
0.7	0.0584	2.2293	0.097	0.068
0.9	0.0043	0.2117	0.007	0.006
1.1	-0.0460	-2.7573	-0.076	-0.084



รูปที่ 4.30 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบกังหันลมแบบที่ 3



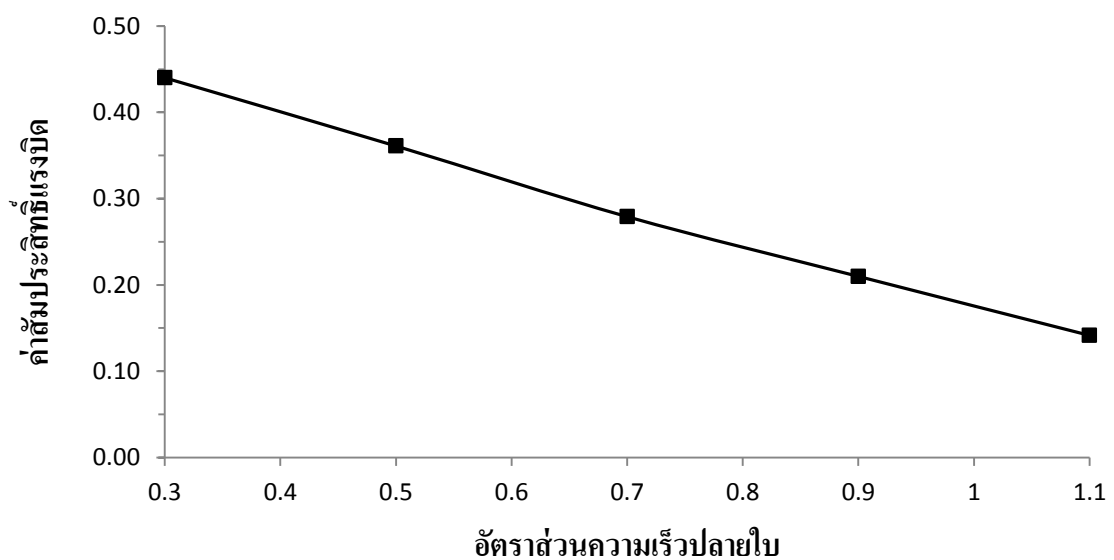
รูปที่ 4.31 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานใบกังหันลมแบบที่ 3

4.3.4 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ความเร็วปลายใบต่างๆ ของกังหันลมแบบที่ 4

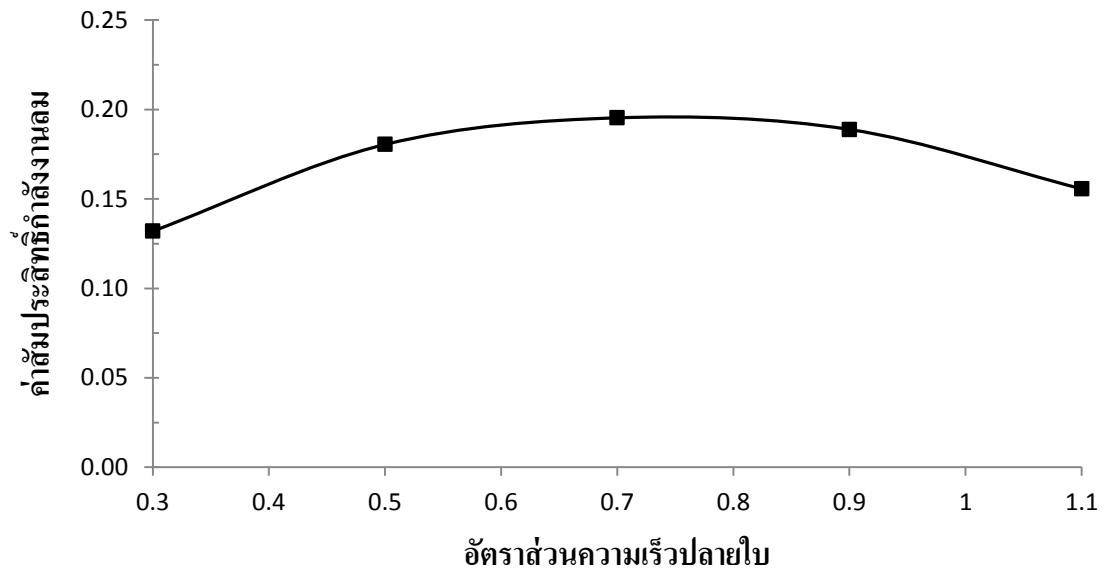
การจำลองแบบกังหันลมขณะกังหันลมหมุนของรูปแบบใบแบบที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงสุดอยู่ที่ 0.440 โดยมีอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 0.3 และมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมสูงสุดอยู่ที่ 0.195 โดยมีอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 0.7 ดังค่าในตารางที่ 4.12 กังหันลมรูปแบบใบแบบที่ 4 นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตดีที่สุดในรูปแบบใบทั้งหมด ดังนั้นเราจะเห็นว่ารูปแบบใบที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ดีก็จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมดีที่สุดด้วยเช่นกัน โดยค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่เหมาะสมจะทำให้กังหันลมมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมดีที่สุด จากรูปที่ 4.32 และ 4.33 จะเห็นช่วงที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์กับอัตราความเร็วปลายใบกังหัน

อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ	ค่าแรงบิด (N.m)	กำลังงานกล (Watt)	ค่าสัมประสิทธิ์ แรงบิด	ค่าสัมประสิทธิ์ กำลังงานลม
0.3	0.2644	4.3270	0.440	0.132
0.5	0.2169	5.9162	0.361	0.180
0.7	0.1677	6.4044	0.279	0.195
0.9	0.1261	6.1917	0.210	0.189
1.1	0.0851	5.1030	0.142	0.156



รูปที่ 4.32 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบกังหันลมแบบที่ 4



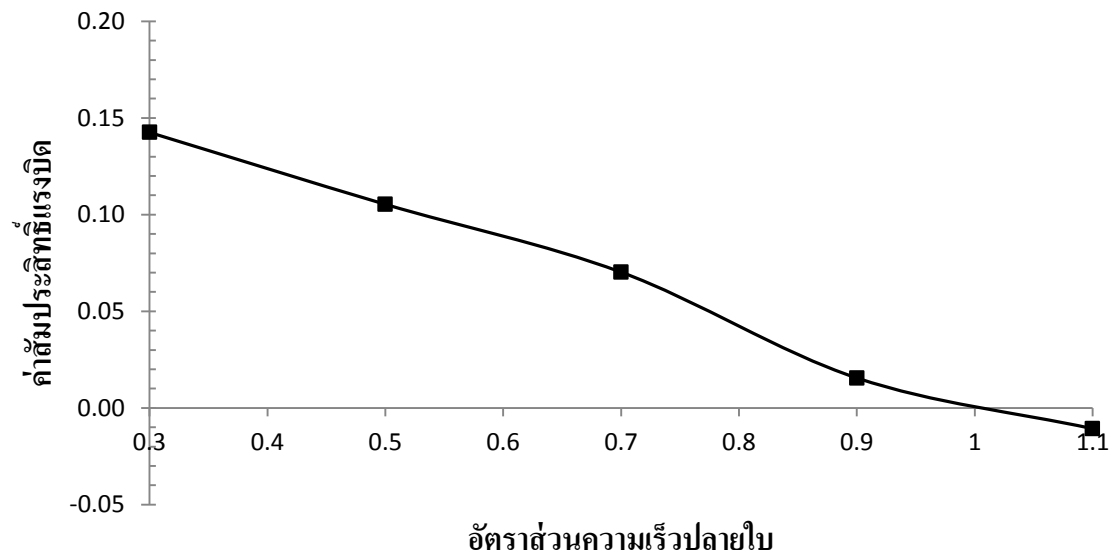
รูปที่ 4.33 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานใบกังหันลมแบบที่ 4

4.3.5 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ความเร็วปลายใบต่างๆ ของกังหันลมแบบที่ 5

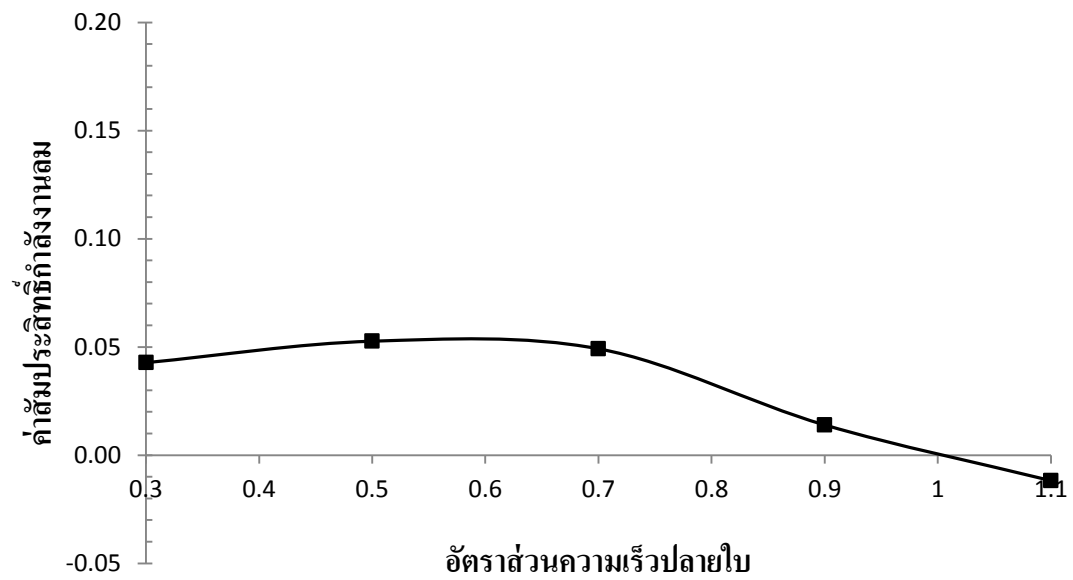
การจำลองแบบกังหันลมขณะกังหันลมหมุนของรูปแบบใบแบบที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงสุดอยู่ที่ 0.143 โดยมีอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 0.3 และมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมสูงสุดอยู่ที่ 0.53 โดยมีอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 0.5 ดังค่าในตารางที่ 4.13 กังหันลมรูปแบบใบแบบที่ 5 นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิติน้อยที่สุดในแบบใบกังหันลมทุกแบบ โดยค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่เหมาะสมจะทำให้กังหันลมมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมดีที่สุด จากรูปที่ 4.34 และ 4.35 จะเห็นช่วงที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์กับอัตราความเร็วปลายใบกังหัน

อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ	ค่าแรงบิด (N.m)	กำลังงานกล (Watt)	ค่าสัมประสิทธิ์ แรงบิด	ค่าสัมประสิทธิ์ กำลังงานลม
0.3	0.0857	1.4016	0.143	0.043
0.5	0.0633	1.7265	0.105	0.053
0.7	0.0422	1.6120	0.070	0.049
0.9	0.0093	0.4577	0.016	0.014
1.1	-0.0064	-0.3862	-0.011	-0.012

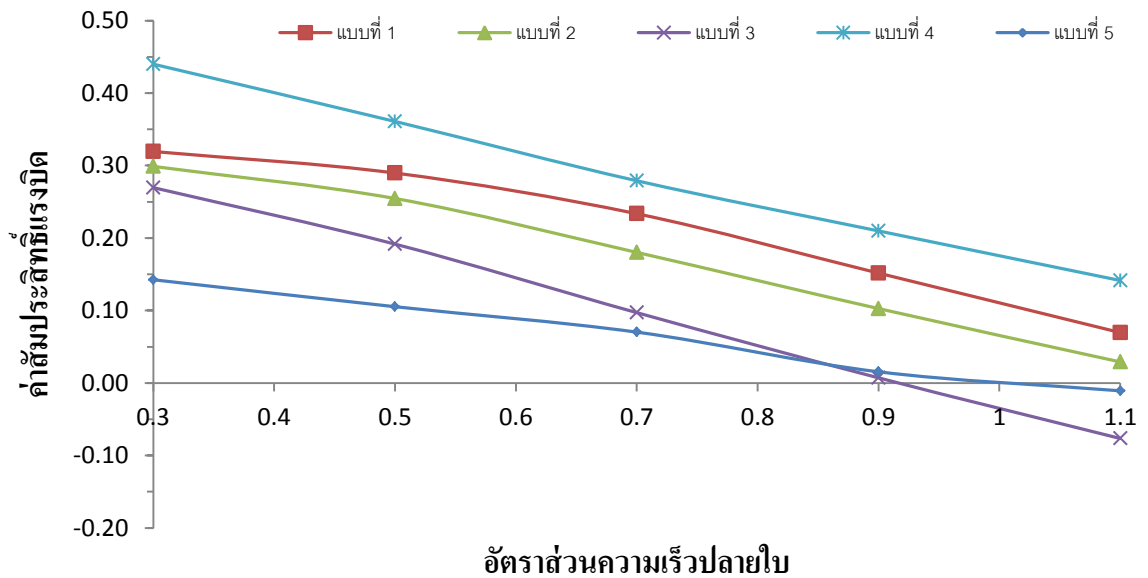


รูปที่ 4.34 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบกังหันลมแบบที่ 5

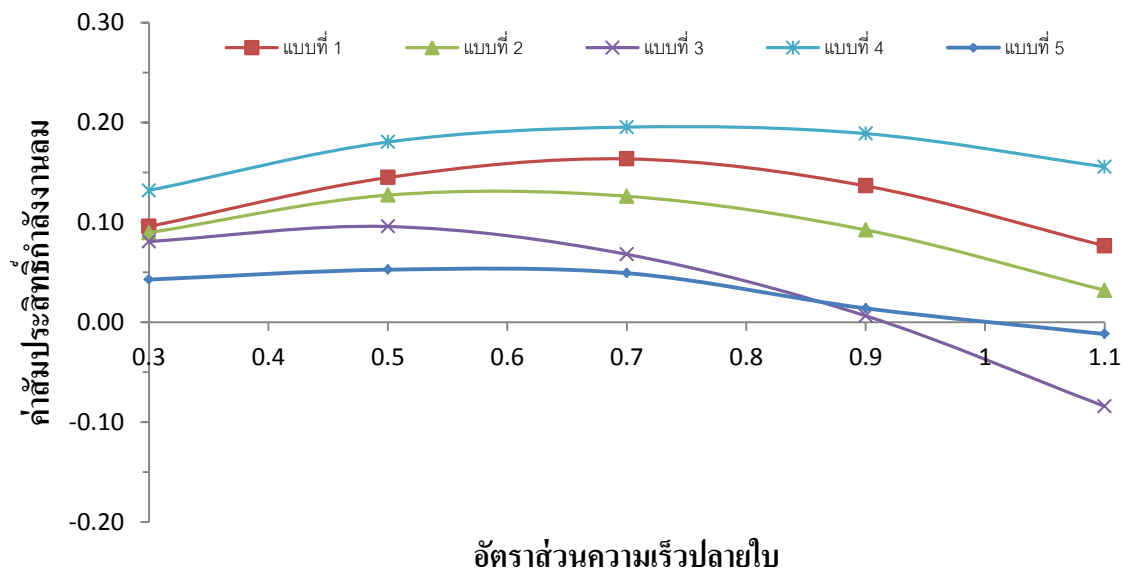


รูปที่ 4.35 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานใบกังหันลมแบบที่ 5

ผลจากการจำลองการไหลผ่านใบกังหันแต่ละแบบโดยใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของรูปที่ 4.36 และ 4.37 นั้นได้ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่แตกต่างกัน ซึ่งอัตราส่วนความเร็วปลายใบนั้นได้ออกถึงความเร็วในการหมุนของกังหันลมนั้น ยิ่งค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบเพิ่มขึ้นค่าเร็วในการหมุนก็จะเพิ่มตาม โดยอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1 โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีดังนี้

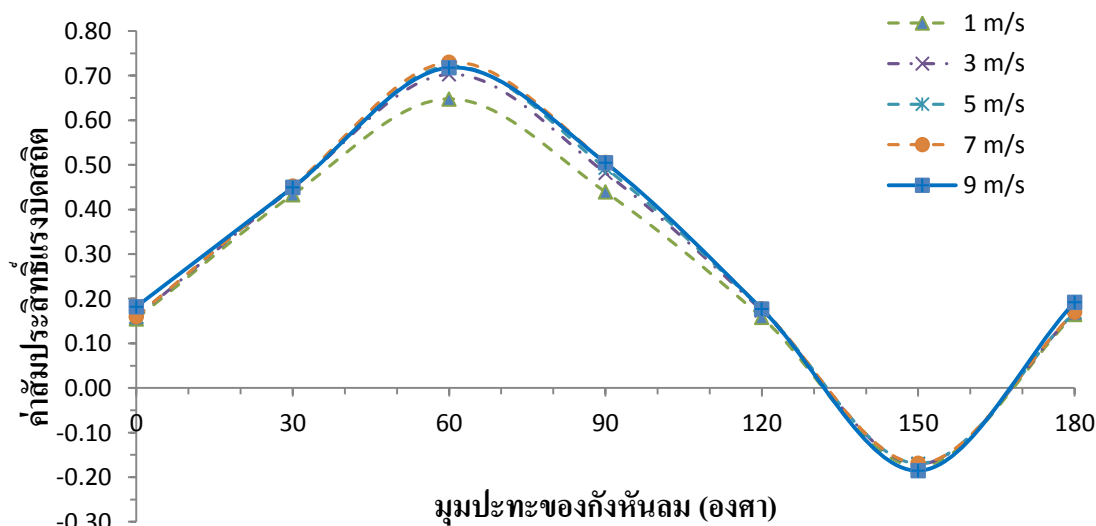


รูปที่ 4.36 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบกังหันลม



รูปที่ 4.37 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมของใบกังหันลม

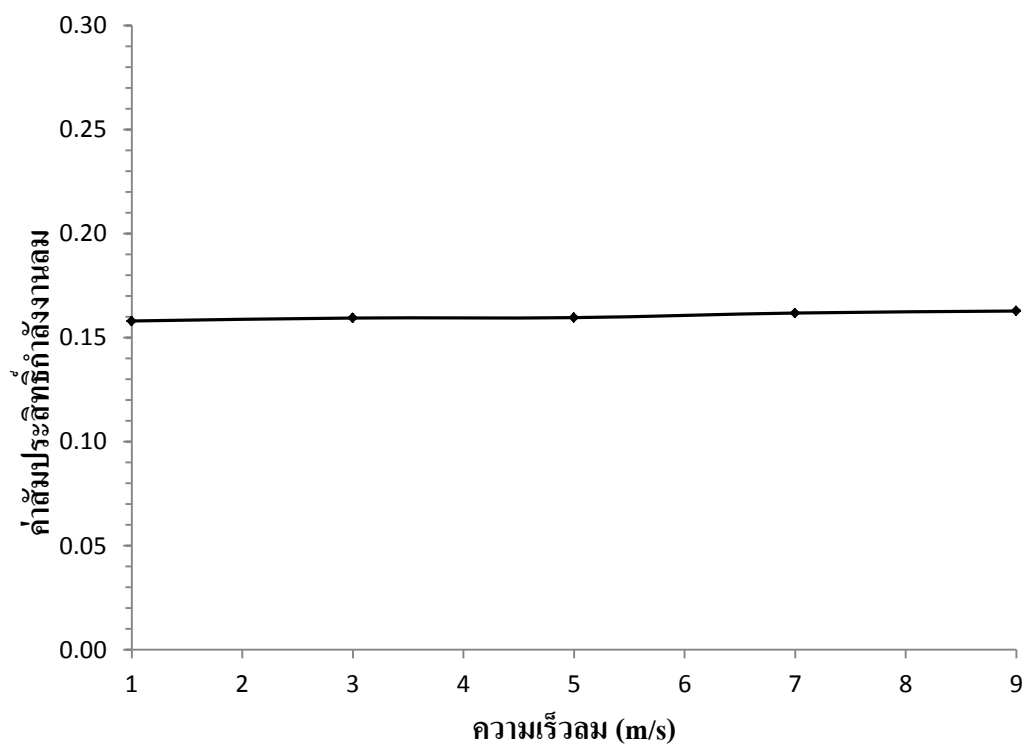
จากกราฟค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด และค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลม จะลดลงตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ เนื่องจากเมื่อกังหันมีความเร็วรอบมากขึ้น การหมุนของกันหันลมจะเป็นตัวด้านอากาศทำให้อากาศแยกตัว และส่งผลให้แรงหมุนที่กระทำกับใบกังหันมีค่าลดลง จึงให้แรงบิดที่ได้ลดลง ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่าที่ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่เหมาะสมค่าหนึ่งจะทำให้กังหันลมเปลี่ยนกำลังงานลมมาเป็นกำลังงานกลได้มากที่สุด และที่ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบนั้นจะบอกถึงค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานกลมากที่สุดนั่นเอง ในงานวิจัยครั้งนี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมดีที่สุดนั้นคือ 0.195 ซึ่งเป็นแบบใบแบบที่ 4 และพบว่าค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ส่งผลให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานกลมากที่สุดคือค่า 0.7 และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยใบกังหันลมแบบที่ 4 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมได้มากที่สุดค่าที่ได้คือ 0.195 ตามด้วยใบกังหันลมแบบที่ 1 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมที่ 0.164 และใบกังหันลมแบบที่ 2, 3, 5 มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมมากที่สุด 0.127, 0.096, 0.053 ตามลำดับ ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่ารูปร่างของใบพัดที่ต่างกันจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของกันแตกต่างกันออกไป และรูปแบบใบแบบที่ 4 ของกังหันลมชาโวเนียสยังให้ค่าสัมประสิทธิ์ดีที่สุด



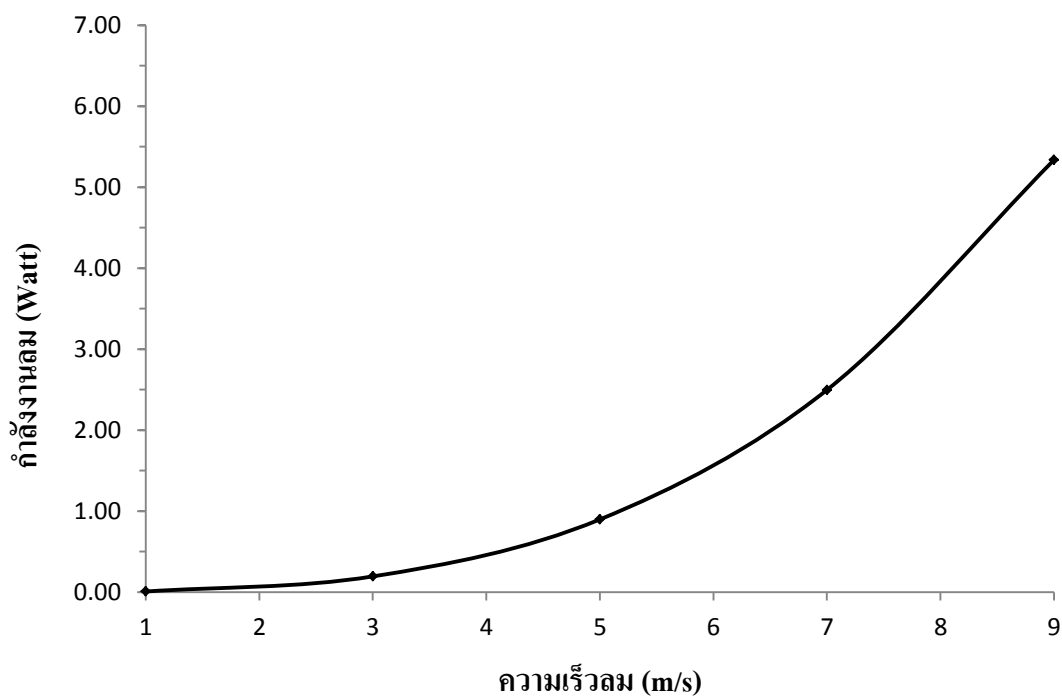
รูปที่ 4.38 สัมประสิทธิ์แรงบิดของใบกังหันลมแบบที่ 4 ที่ความเร็วต่างๆ

เมื่อนำแบบกังหันลมแบบที่ 4 มาวิเคราะห์ถึงความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.38 โดยการวิเคราะห์ได้วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดที่มุมปะทะต่างๆ เพราะกังหันลมแบบที่ 4 นั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดที่ดีที่สุด ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนความเร็วลมเป็น 1, 3, 5, 7, 9 เมตรต่อวินาที พบว่าช่วงความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงนั้นมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเพียงเล็กน้อย และเมื่อวิเคราะห์ถึงค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมดังรูปที่ 4.39 โดยทดสอบที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 0.7 เพราะเป็น

ช่วงที่กั้นลมแบบที่ 4 ให้ค่าประสิทธิภาพกำลังงานลมมากที่ พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในช่วง 1, 3, 5, 7, 9 เมตรต่อวินาที นั้นมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.39 สัมประสิทธิ์กำลังงานลมเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วลมของแบบใบที่ 4

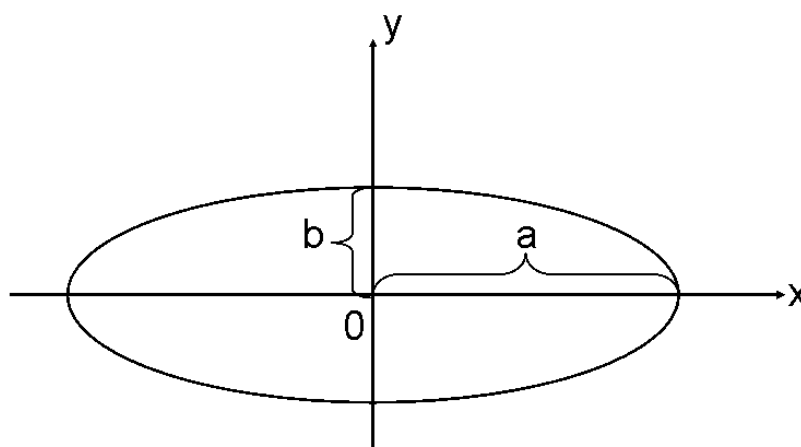


รูปที่ 4.40 กำลังงานลมที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนความเร็วลมของแบบใบที่ 4

จากการศึกษาได้ทำการศึกษาค่ากำลังงานลมที่ผลิตได้จริงเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วลม โดยค่าที่ใช้คำนวณคิดจากขนาครูปรางที่ไข่ออกแบบในงานวิจัยนี้และใช้ค่าประสิทธิภาพ 19.5% เป็นการศึกษาคำนวณ พบว่าเมื่อความเร็วลมที่ 1, 3, 5, 7, 9 เมตรต่อวินาที จะส่งผลให้ค่ากำลังงานลมเพิ่มขึ้นเป็น 0.0085, 0.2323, 1.0768, 2.9955, 6.4044 วัตต์ ซึ่งตัวแปรหลักในการเปลี่ยนแปลงกำลังงานลมจะมีผลจากค่าความเร็วลมเป็นหลัก ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากังหันลมชาโวเนียสแบบใบที่ 4 จะสามารถให้ค่าประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อความเร็วของลมลดลง จึงทำให้เห็นได้ชัดว่ากังหันลมชนิดสามารถหมุนได้ที่ความเร็วลมแค่ 1 เมตรต่อวินาทีและยังสามารถทำงานได้ในช่วงความเร็วลมกว้าง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กำลังงานลมที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที จะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมถึง 19%

4.5 กรณีการศึกษาเพิ่มเติม

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของใบกังหันลม 5 แบบ ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัย พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตของแบบใบที่ 4 มีค่ามากที่สุด และค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมใกล้เคียงกับรูปแบบใบแบบที่ 1 (ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมมากที่สุด) ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงรูปแบบใบกังหันลมแบบที่ 4 ซึ่งเป็นรูปแบบวงรี โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนระยะ b ดังรูปที่ 4.36 และเลือกทดสอบที่ความเร็วปลายใบ 0.7 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมของใบที่ปรับระยะใหม่ และค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมที่ได้จากการปรับระยะมีค่าตามตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.41 ตำแหน่งการปรับระยะของกังหันลมแบบที่ 4

ตารางที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์ของรูปแบบใบแบบที่ 4 (ปรับปรุง)

รูปแบบใบ	ระยะ a (m)	ระยะ b (m)	ค่าสัมประสิทธิ์ แรงบิด	ค่าสัมประสิทธิ์ กำลังงานลม
แบบที่ 4 (เดิม)	0.10	0.04	0.279	0.195
แบบที่ 4 (ใหม่)	0.10	0.02	0.160	0.112
แบบที่ 4 (ใหม่)	0.10	0.06	0.274	0.192
แบบที่ 4 (ใหม่)	0.10	0.08	0.235	0.164

จากตารางที่ 4.14 แสดงว่าค่าที่ได้จากการปรับเปลี่ยนระยะ b ใหม่ที่ระยะ 0.06 m มีค่าสัมประสิทธิ์อยู่ที่ 0.192 ซึ่งใกล้เคียงกับแบบที่ใช้ในการทดลองอยู่ที่ซึ่งค่าที่ได้อยู่ที่ 0.195 จะเห็นได้ว่าการใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหลสามารถลดระยะเวลาและต้นทุนได้ ซึ่งสามารถนำไปปรับปรุงให้เหมาะสมขึ้นได้ต่อไปในอนาคต

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการวิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียสโดยใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหลได้ทำการออกแบบใบกังหันลม 5 แบบ โดยวิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลมขณะกังหันลมหยุดนิ่งคือค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตที่มุมปะทะของอากาศต่างๆ และขณะกังหันลมหมุนคือค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดและค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมที่อัตราเร็วปลายใบต่างๆ ในรูปแบบใบต่างๆ

1) ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิต พบว่าใบกังหันแบบที่ 4 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตมากที่สุดคือ 0.72 ที่มุม 60 องศา และค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตต่ำสุดคือ -0.19 ที่มุม 150 องศา ดังนั้นกังหันลมแบบที่ 4 จะมีช่วงที่ลมเข้ามาปะทะที่มุม 130-165 องศาที่ไม่สามารถทำให้กังหันลมแบบที่ 4 หมุนได้ด้วยตัวเอง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบใบกังหันแบบเดิมจะเห็นได้ว่ารูปแบบใบกังหันแบบเดิมมีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตมากที่สุดเพียง 0.46 ที่มุมปะทะ 60 องศา และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตต่ำสุดที่ค่า -0.01 ที่มุมปะทะ 150 องศา และมีช่วงที่ลมเข้ามาปะทะ 130-155 ที่ไม่สามารถทำให้กังหันลมแบบเดิมหมุนได้เช่นกัน กังหันลมแบบที่ 4 จึงให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตที่ดีกว่าแบบเดิม

2) ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด พบว่าใบกังหันลมทุกแบบให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดที่ดีที่สุดที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 0.3 โดยแบบใบกังหันแบบที่ 4 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมากที่สุดอยู่ที่ 0.440 โดยมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลม พบว่าแบบกังหันลมแบบที่ 4 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมมากที่สุดที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 0.7 โดยที่ใบกังหันลมแบบที่ 4 มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมมากที่สุดอยู่ที่ 0.195 ซึ่งกังหันลมแบบเดิมจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดและค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมอยู่ที่ 0.319, 0.164 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากังหันลมแบบที่ 4 ให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ดีกว่าแบบเดิม และเมื่อนำรูปแบบใบที่ 4 มาวิเคราะห์ถึงผลจากความเร็วมวลที่เปลี่ยนพบว่าเมื่อเปลี่ยนความเร็วมวลค่าประสิทธิภาพกำลังงานลมที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นกังหันลมแบบที่ 4 จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาต่อไปในอนาคตเพราะกังหันลมแบบที่ 4 นั้นให้ค่าสมรรถนะที่สูงกว่ารูปแบบใบอื่นๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิตที่สามารถบอกได้ถึงการเริ่มหมุนได้ด้วยตัวเองของใบกังหันลม จะเห็นได้ว่ากังหันลมแบบเดิมจะมีมุมปะทะของอากาศที่ไม่สามารถทำให้หมุนได้ และเมื่อวิเคราะห์รูปแบบใบอื่นๆ จะเห็นได้ว่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์สูงและต่ำที่มุมปะทะมุมๆ หนึ่งเสมอ ดังนั้นเราสามารถพัฒนาต่อไปในอนาคตได้โดยบิดใบกังหันเพื่อให้ใบกังหันสามารถรับค่าที่มากที่สุด ในมุมปะทะต่างๆ ได้
2. เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการคำนวณทางคณิตศาสตร์ทำให้ลดเวลาและต้นทุนในการทดสอบได้ ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่ารูปร่างของใบนั้นสามารถปรับปรุงเพื่อพัฒนาค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมให้ดีขึ้นไปได้ต่อไปในอนาคตโดยสามารถนำแบบกังหันที่วิเคราะห์ในงานวิจัยไปเป็นแนวทางในการออกแบบใบกังหันลมต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

1. Global wind energy council, 2012, **Global Wind Report Annual Market Update 2012**, Global wind energy council, Brussels, Belgium, pp. 13-19.
2. Kacprzak, K., Liskiewicz, G., and Sobczak, K., 2013, "Numerical Investigation of Conventional and Modified Savonius Wind Turbines", **Renewable Energy**, Vol. 60, pp. 578-585.
3. Mohamed, M.H., Janiga, G., Pap, E., and Thévenin, D., 2011, "Optimal Blade Shape of a Modified Savonius Turbine Using an Obstacle Shielding the Returning Blade", **Energy Conversion and Management**, Vol. 52, No. 1, pp. 236-242.
4. มณฑล แก่นมณี, 2553, **วิทยาศาสตร์ทางน้ำเบื้องต้น** [Online], Available : http://www.agri.kmitl.ac.th/elearning/courseware/aquatic/6_2.html [2013, October 3].
5. Thai Marine Meteorology, 2549, **ลม** [Online], Available : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/windhtml/windhtml.html> [2013, October 3].
6. จักรกฤษณ์ ดาวไธสง, 2556, **เครื่องมือทางภูมิศาสตร์** [Online], Available : http://silced.blogspot.com/2013/09/blog-post_3823.html [2013, October 3].
7. Jha, A.R., 2011, **Wind Turbine Technology**, CRC Press, Florida, USA, pp. 32-38.
8. Machine Design, 2000, **New Guidelines Promise Reliable Wind Turbine Gearboxes** [Online], Available : <http://machinedesign.com/technologies/new-guidelines-promise-reliable-wind-turbine-gearboxes> [2013, October 5].
9. ธเนศ ไชยชนะ, 2555, **การออกแบบและพัฒนาระบบกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็ก เพลาพร้อมแกนหมุนสวนทางกันเพื่อใช้ผลิตไฟฟ้า**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

10. เกียรติจิจร สุเวทเวทิน, 2552, การออกแบบกังหันลมแนวตั้งประสิทธิภาพสูง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
11. Hunt, D.H, 1981, **Windpower A Handbook on Wind Energy Conversion System**, Van Nostrand Reinhold Company Regional Offices, New York, USA.
12. Zhou, T. and Rempfer, D., 2013, "Numerical Study of Detailed Flow Field and Performance of Savonius Wind Turbines", **Renewable Energy**, Vol. 51, pp. 373-381.
13. Mohamed, M.H., Janiga, G., Pap, E., and Thévenin, D., 2010, "Optimization of Savonius Turbines Using an Obstacle Shielding the Returning Blade", **Renewable Energy**, Vol. 35, No. 11, pp. 2618-2626.
14. Mahmoud, N.H., El-Haroun, A.A., Wahba, E., and Nasef, M.H., 2012, "An Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance", **Alexandria Engineering Journal**, Vol. 51, No. 1, pp. 19-25.
15. Hossain, R, 2013, "A Study of Aerodynamics Characteristics Of S-Shape Savonius Rotor With Different Number of Blades", **International Journal of Engineering Research & Technology**, Vol. 2, No. 6, pp.1406-1411.
16. Lopez, M., Vannier, J.C., 2009, "Stand-Alone Wind Energy Conversion System With Maximum Power Transfer Control", **Ingeniare. Rev. chil. Ing.**, Vol.17, No. 3, pp. 329-336.
17. อภิชาติ ธรรมอักษร, 2551, การจำลองระบบระบายอากาศชนิดไหลในแนวตั้งอย่างสม่ำเสมอสำหรับอาคารที่มีฝุ่นฟุ้งโดยเทคนิคคำนวณพลศาสตร์ของไหล, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

18. Mahmoud, N.H., El-Haroun, A.A., Wahba, E., and Nasef, M.H., 2012, "An Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance", **Alexandria Engineering Journal**, Vol. 51, No. 1, pp. 19-25.
19. Saha, U.K., Thotla, S., and Maity, D., 2008, "Optimum Design Configuration of Savonius Rotor through Wind Tunnel Experiments", **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 96, No. 8–9, pp. 1359-1375.
20. Zhou, T. and Rempfer, D., 2013, "Numerical Study of Detailed Flow Field and Performance of Savonius Wind Turbines", **Renewable Energy**, Vol. 51, No. 0, pp. 373-381.
21. Hayashi, T., Li, Y., Hara, Y., Suzuki, K., 2005, "Wind tunnel tests on a different phase three-stage Savonius rotor", **Fluids and Thermal Engineering, JSME International Journal**, Vol. 48, No. 1, pp. 9-16.
22. Altan, B.D. and Atilgan, M., 2008, "An Experimental and Numerical Study on the Improvement of the Performance of Savonius Wind Rotor", **Energy Conversion and Management**, Vol. 49, No. 12, pp. 3425-3432.
23. จารุวรรณ ตั้งตันสกุลวงศ์และทวิช จิตรสมบุญ, 2549, “การจำลองการไหลผ่านกังหันลมแกนตั้งแบบ 3 ใบกังหัน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 2, 27-29 กรกฎาคม 2549, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา.
24. ชโลธร ธรรมแท้และทวิช จิตรสมบุญ, 2549, “การจำลองการไหลผ่านกังหันลมแกนแนวนอนด้วย CFD”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 2, 27-29 กรกฎาคม 2549, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา.
25. จารุวรรณ ตั้งตันสกุลวงศ์ และทวิช จิตรสมบุญ, 2552, “ความสามารถในการเริ่มหมุนด้วยตนเองของกังหันลมแกนตั้ง”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552, จังหวัดเชียงใหม่.

26. พรเทพ สุรมาตย์, 2555, “การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองแผนอากาศในกังหันลมเพลาตั้ง ชนิด Lenz II ในอุโมงค์ลมจำลองโดยใช้การออกแบบทดลอง” เอกสารสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ มอว. วิจัย, ครั้งที่ 6, 25-27 กรกฎาคม 2555, โรงแรมสุนีย์แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี, หน้า 326-335.
27. เจนวิทย์ คีตสินและชนินทร์ ตรงจิตภักดี, 2554, การศึกษาประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมที่ติดตั้ง Gurney Flap โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, “การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย”, ครั้งที่ 25, 19-21 ตุลาคม 2554, จังหวัดกระบี่
28. ชโลธร ธรรมแท้, 2552, กระบวนการเชิงตัวเลขที่แม่นยำเพื่อสอบเทียบการออกแบบกังหันลมเชิงทฤษฎี, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
29. มนตรี พิรุณเกษตร, 2547, กลศาสตร์ของไหล, พิมพ์ครั้งที่ 2, บริษัทวิทยพัฒน์ จำกัด, บริษัททุนพับลิชชิ่ง จำกัด, หน้า 399-400

ภาคผนวก ก.
ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ

ก.1 การคำนวณสัมประสิทธิ์

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของกังหันลม ต้องกำหนดตัวแปรต้น เพื่อใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิต ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด และค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลม ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่าดังต่อไปนี้

ตารางที่ ก.1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ

ความเร็วอากาศ (m/s)	ความหนาแน่นของ อากาศ (g/m^3)	ความสูงของ กังหันลม (m)	เส้นผ่านศูนย์กลางของ กังหันลม (m)
9	1.185	0.23	0.33

ก.1.1 การคำนวณสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิต

ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสถิต (Static Torque coefficient, C_{ms}) ค่าที่ได้นำไปแทนค่าในตารางที่ 4.1 โดยค่าแรงบิดที่ได้ดูที่ตาราง 4.4 และเลือกใช้ที่ค่ามุมปะทะ 0 องศา

$$C_{ms} = \frac{T}{\rho H d^2 U^2}$$

เมื่อ	T	คือ ค่าแรงบิด (N.m)
	H	คือ ความสูง (m)
	d	คือ รัศมีของกังหัน (m)
	U	คือ ความเร็วลม (m/s)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

จะได้ว่า

$$C_{ms} = \frac{0.1156}{1.185 \times 0.23 \times 0.165^2 \times 9^2}$$

$$C_{ms} = 0.19$$

ก.1.2 การคำนวณสัมประสิทธิ์แรงบิด

ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient, C_m) ค่าที่ได้นำไปแทนค่าในตารางที่ 4.2 โดยค่าแรงบิดที่ได้ดูที่ตาราง 4.9

$$C_m = \frac{T}{\rho H d^2 U^2}$$

เมื่อ	T	คือ ค่าแรงบิด (N.m)
	H	คือ ความสูง (m)
	d	คือ รัศมีของกังหัน (m)
	U	คือ ความเร็วลม (m/s)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

จะได้ว่า

$$C_m = \frac{0.1920}{1.185 \times 0.23 \times 0.165^2 \times 9^2}$$

$$C_m = 0.319$$

ก.1.3 การคำนวณสัมประสิทธิ์กำลังงานลม

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลม (Power coefficient, C_p) ค่าที่ได้นำไปแทนค่าในตารางที่ 4.3 โดยค่าแรงบิดที่ได้ดูที่ตาราง 4.9

ค่าอัตราเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio)

$$\lambda = \frac{\omega d}{U}$$

$$\omega = \frac{\lambda U}{d} = \frac{0.3 \times 9}{0.165} = 16.36$$

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลม (Power coefficient, C_p)

$$C_p = \frac{T\omega}{\rho d H U^3}$$

เมื่อ	T	คือ ค่าแรงบิด (N.m)
	ω	คือ ความเร็วเชิงมุมของกังหันลม (rad/sec)
	H	คือ ความสูง (m)
	d	คือ รัศมีของกังหัน (m)
	U	คือ ความเร็วลม (m/s)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

จะได้ว่า

$$C_p = \frac{0.1920 \times 16.36}{1.185 \times 0.23 \times 0.165 \times 9^3}$$

$$C_p = 0.096$$

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายวัชรินทร์ วงศ์ประไพโรจน์
วัน เดือน ปี เกิด	17 มิถุนายน 2530
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย นครศรีธรรมราช พ.ศ. 2548
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2552
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2556
ทุนศึกษาหรือทุนวิจัย	ทุนอุดหนุนสำหรับการศึกษาวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ปีงบประมาณ 2556