



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแนวตั้ง

A Study of Flow over Vertical Axis Wind Turbine

นามผู้วิจัย นายณัฐพล ลครชัย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รongศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์พงษ์ศรี พรหมบุตร, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รongศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รongศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแนวตั้ง

A Study of Flow over Vertical Axis Wind Turbine

โดย

นายณัฐพล ลกรชัย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณัฐพล ลครชัย 2555: การศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแนวตั้ง ปริญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์
ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. 102 หน้า

การไหลของอากาศผ่านกังหันลมแนวตั้งนั้นมีความซับซ้อนและเป็นแบบไม่คงตัว ซึ่งทฤษฎีอากาศพลศาสตร์เดิมที่นำมาประยุกต์ใช้ยังไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของกังหันลมแนวตั้งได้ อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันได้มีการนำคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้ในการคำนวณการไหลภายใต้สภาวะไม่คงตัว ช่วยให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของกังหันลมแนวตั้งมากยิ่งขึ้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการนำโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์การไหล (CFD) มาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมและหาประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดของกังหันลมในสภาวะต่างๆ วิธีวิศวกรรมย้อนรอยได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของกังหันลมต้นแบบเพื่อนำมาจำลองการไหลของอากาศหรือลมโดยกำหนดให้กังหันลมแนวตั้งหมุนที่ความเร็วคงที่ในสภาวะความเร็วลม 6 และ 12 เมตรต่อวินาที ในงานวิจัยได้เลือกใช้วิธี sliding mesh เพื่อที่จะจำลองการไหลในสภาวะไม่คงตัวของกังหันลมแนวตั้ง และเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon รวมถึงทำการสอบเทียบผลแบบจำลอง 2 มิติกับการทดลองแพนอากาศ NACA0012 (Kirke, 1998) จากผลการสอบเทียบพบว่า การจำลองของโปรแกรม CFD มีความแม่นยำสูงในช่วงมุมปะทะ -15 ถึง 15 องศา ค่าทอร์คที่ได้จากแบบจำลองสามารถนำไปคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานได้โดยพบว่าในช่วง Tip Speed Ratio ที่ $2.0 - 2.5$ กังหันลมแนวตั้งนี้จะมีประสิทธิภาพสูงสุด

Nuttapol Lakonchai 2012: A Study of Flow over Vertical Axis Wind Turbine. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Chawalit Kittichaikarn, Ph.D. 102 pages.

Aerodynamics of flow over Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) is inherently unsteady and beyond the limits of classical airfoil theory. However, a prediction of the unsteady flow using recent developments in computational methods is capable to increase the understanding of VAWT aerodynamics. The purpose of this paper is to analyze the VAWT's behavior and investigate the optimum operating condition for the best performance of this wind turbine using commercial computational fluid dynamics (CFD) program. A CAD model of this VAWT was created by using reverse engineering process. The simulation was performed at different constant rotational speeds on the turbine for a certain approaching wind speed to evaluate the power coefficients (C_p) as a function of a tip speed ratio (TSR). A moving mesh technology was used to investigate a change in flow field at a particular time step in two dimensional flows around wind turbine blades. The RNG k-epsilon model with standard wall function was adapted for the turbulence closure. To validate this model, it was then used to perform the analysis of air flow over the NACA0012 turbine blades. The computational lift forces agreed well with those obtained from experiments performed by Kirke (1998), for the angles of attack between -15 and 15 degree. The torque from the simulation was used to obtain the correlation between the coefficient of power (C_p) and tip speed ratio (TSR). From the result, it was found that this VAWT has maximum coefficient of power at approximately 2-2.5 tip speed ratio.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต กิตติชัยการ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาและวางแผนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบคุณ บริษัท ไทยไดนามิก มาสเตอร์ จำกัดสำหรับความร่วมมือในการทำงาน การสร้างกังหันลมต้นแบบ และขอกราบขอบพระคุณสถาบันไทย – เยอรมัน ในการจัดโครงการ สนับสนุนและจัดอบรมความรู้ในการออกแบบเครื่องจักรกล

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอบคุณเพื่อน พี่ น้องทุกท่านที่ได้มีส่วนในการให้คำแนะนำ ให้งานนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแก่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้ให้การอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมและคอยให้กำลังใจผู้วิจัยมาโดยตลอด

ณัฐพล ลกรชัย

มิถุนายน 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	45
อุปกรณ์	45
วิธีการ	47
ผลและวิจารณ์	60
สรุปและข้อเสนอแนะ	84
สรุป	84
ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	87
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	91
ภาคผนวก ข กราฟค่าเทอร์คที่ได้จากการจำลองการไหล	94
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	จุดเด่นและจุดด้อยของกังหันลมแนวนอนและกังหันลมแนวตั้ง	8
2	กังหันลมแนวตั้งแบบต่างๆ ในปัจจุบัน	14
3	รายละเอียดของกังหันลมต้นแบบ	46
4	สภาวะการไหล (Flow condition) ที่กำหนดลงไปโปรแกรมในแต่ละ TSR	58
5	ลักษณะของแผนอากาศในกรณีที่ 1	62
ตารางผนวกที่		
ก1	ทอร์คเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละ TSR ที่ความเร็วลม 6 และ 12 เมตรต่อวินาที	93

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กังหันลมแนวนอน	6
2	กังหันลมแนวตั้ง	7
3	กังหันลมแนวตั้งแบบต่างๆ (ก) กังหันลมชาโวเนียส (ข) กังหันลมดาเรียสทรงไข่ และ (ค) กังหันลมดาเรียสแบบใบตรง	9
4	(ก) กังหันลม Solwind แบบ 2 ใบ และ (ข) กังหันลม Eurowind	12
5	กังหันลมแนวตั้ง Turby Wind turbine	12
6	แผนที่ความเร็วลมเฉลี่ยของประเทศไทยที่ความสูง 100 เมตรเหนือพื้นดิน	16
7	กังหันลมแนวนอนติดตั้งที่บริเวณแหลมพรหมเทพ จ.ภูเก็ต	17
8	แสดงประสิทธิภาพ (แกนตั้ง) ของกังหันลมแบบต่างๆ เทียบกับ Tip speed ratio (แกนนอน)	21
9	แสดงความเร็วของลมต่างๆที่ไหลผ่านใบกังหันลม โดยลมที่ V_∞ เข้ามาจากด้านบนลงข้างล่าง	23
10	แสดงการเปลี่ยนแปลงของมุมปะทะ (แนวตั้ง) ในแต่ละตำแหน่งของการหมุนของใบพัด Azimuth (แนวนอน)	25
11	ไดอะแกรมแสดงแรงต่างๆ ที่เกิดบนแพนอากาศ	26
12	แสดงค่า Reynolds number ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม Tip speed Ratio ต่างๆ โดยความเร็วลมคงที่ที่ 10 เมตรต่อวินาที	29
13	แสดงเส้นแรงยก (แกนตั้ง) ที่เปลี่ยนแปลงไปจากมุมปะทะ (แกนนอน) เดิมจากอิทธิพลของ Reynolds number	30
14	แสดงค่า Reynolds number ที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพทางพลังงานของกังหันลมแนวตั้ง (แกนตั้ง) และ Tip speed ratio (แกนนอน)	30
15	แสดงการเกิด Stall แบบต่างๆ ของแพนอากาศ	31
16	(ก) การจำลองการไหล และ (ข) Schematic diagram แสดงการเกิด Dynamic stall	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
17	จำลองการเกิด Dynamic stall ที่ Tip speed ratio ตั้งแต่ 1 2 และ 3 (ก ข และ ค ตามลำดับ)	34
18	แสดงภาพการเกิด Dynamics Stall ของใบกังหันลมใบเดียวทั้งสี่ตำแหน่ง	34
19	ภาพ 2 มิติในการคำนวณของแบบจำลอง multiple streamtube	37
20	Vortex system สำหรับ single blade element	38
21	การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน	41
22	กังหันลมแนวตั้งต้นแบบกำลังผลิตกระแสไฟฟ้า 2 กิโลวัตต์	46
23	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของงานวิจัย	47
24	อุปกรณ์และวิธีการวิศวกรรมย้อนรอย	49
25	โมเดล 3 มิติที่ได้จากกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย (ก) ชุดยึดใบกังหันลม (ข) ใบกังหันลม	49
26	แสดงขั้นตอนการปรับปรุงผิวหลังจากการขั้นตอนวิศวกรรมย้อนรอย	50
27	โมเดลคอมพิวเตอร์ (CAD) ของกังหันลมแนวตั้งต้นแบบ	50
28	โดเมนและการเมชบริเวณรอบกังหันลมแนวตั้ง 2 มิติ	54
29	โดเมนกังหันลมแนวตั้งใน 3 มิติ	54
30	ขนาดของโดเมน	55
31	เงื่อนไขขอบเขตการคำนวณ	56
32	กราฟแสดงค่า Moment coefficient ที่เกิดขึ้นใน 1 รอบการหมุนที่ Time step size ต่างกัน	57
33	กราฟแสดงค่า Moment coefficient ที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบการคำนวณ	59
34	แสดงการทดลองแผนอากาศในสองแบบ model A และ model B	61
35	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมทั้งสองโมเดลการทดลอง (ก) Model A และ (ข) Model B	62
36	โดเมนการทดลองในกรณี 2	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
37	ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันที่เกิด ณ จุดต่างๆ ของแผนอากาศเทียบกับการคำนวณจากโปรแกรมที่มุมปะทะ 0 และ 10 องศา	64
38	ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันที่เกิด ณ จุดต่างๆ ของแผนอากาศเทียบกับการคำนวณจากโปรแกรมที่มุมปะทะ 15 องศา	64
39	ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกในแต่ละมุมปะทะต่างๆ ของแผนอากาศรหัส NACA0012 เทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ ที่ Reynolds number 6×10^6	65
40	ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกในแต่ละมุมปะทะต่างๆ ของแผนอากาศรหัส NACA0012 เทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ ที่ Reynolds number 3.6×10^5	66
41	ตำแหน่งใบกังหันลมทั้งสามใบในการเคลื่อนที่ (มุมอะซิมุท) 1 รอบทิศการหมุน ทวนเข็มนาฬิกา	67
42	ทอร์คใน 1 รอบการหมุน TSR 1.0, 1.5 และ 2.0 ที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที	69
43	ทอร์คใน 1 รอบการหมุน TSR 2.5, 3.0 และ 3.5 ที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที	69
44	ทอร์คใน 1 รอบการหมุน TSR 1.0, 1.5 และ 2.0 ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที	71
45	ทอร์คใน 1 รอบการหมุน TSR 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที	71
46	แสดงคอนทัวร์ความเร็ว (โดยความเร็วอยู่ในช่วง 0.06 ถึง 40.6 เมตรต่อวินาที) ขณะใบที่ 3 ของกังหันลมอยู่ที่ตำแหน่ง 45 องศาอะซิมุท	73
47	แสดงคอนทัวร์ความเร็ว ที่ใบที่ 3 ขณะอยู่ในตำแหน่งคั่นลม (TSR 1.5 ที่ 12 m/s)	73
48	แสดงคอนทัวร์ความเร็ว (โดยความเร็วอยู่ในช่วง 0.75 ถึง 43.7 เมตรต่อวินาที) ขณะใบที่ 3 ของกังหันลมอยู่ที่ตำแหน่ง 145 องศาอะซิมุท	74
49	แสดงคอนทัวร์ความเร็ว ที่ใบที่ 3 ขณะอยู่ในตำแหน่งท้ายลม (TSR 1.5 ที่ 12 m/s)	74
50	แสดงค่าทอร์คที่เกิดขึ้นในใบที่ 3 ในช่วงมุมอะซิมุทต่างๆ ตั้งแต่ 0 – 360 องศา (ที่ TSR 1.5 และความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที)	75
51	คอนทัวร์ความดัน (Pascal) ของกังหันลมแนวตั้ง (ที่ TSR 2.5 ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที)	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
52	คอนทัวร์ความดัน (Pascal) ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาทีของกังหันลมแนวตั้งที่ TSR ตั้งแต่ 1.0 (ความดันอยู่ในช่วง -700 ถึง 285 Pascal), 1.5 (ความดันอยู่ในช่วง -1,620 ถึง 459 Pascal) และ 2.0 (ความดันอยู่ในช่วง -2,450 ถึง 651 Pascal)	77
53	คอนทัวร์ความดัน (Pascal) ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาทีของกังหันลมแนวตั้งที่ TSR ตั้งแต่ 2.5 (ความดันอยู่ในช่วง -3,030 ถึง 861 Pascal), 3.0 (ความดันอยู่ในช่วง -3,490 ถึง 1,150 Pascal), 3.5 (ความดันอยู่ในช่วง -3,910 ถึง 1,500 Pascal) และ 4.0 (ความดันอยู่ในช่วง -4,310 ถึง 1,900 Pascal)	77
54	แสดง Moment coefficient ของการคำนวณที่ 2 มิติ และ 3 มิติ ที่ TSR 2.0 ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที	78
55	แสดง Moment coefficient ของการคำนวณที่ 2 มิติ และ 3 มิติ ที่ TSR 2.5 ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที	79
56	คอนทัวร์ความดัน (Pascal) ของการคำนวณ 3 มิติ ที่ TSR 2.5 ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที	80
57	แสดงคอนทัวร์ความดัน (ความดันระหว่าง -193 ถึง 83.2 Pascal) ที่เกิดขึ้นบริเวณใบกังหันลมแนวตั้ง ที่ TSR 3.0 ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที	80
58	แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (C_p) ในแต่ละ TSR ที่ความเร็วลม 6 และ 12 เมตรต่อวินาที	82
59	กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของความเร็วลม 6 และ 12 เมตรต่อวินาทีในแต่ละ TSR	83

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข1 กราฟแสดงทอร์คแต่ละใบและผลรวมที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR1 ที่ 12m/s	95
ข2 กราฟแสดงทอร์คแต่ละใบและผลรวมที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR1.5 ที่ 12m/s	95
ข3 กราฟแสดงทอร์คแต่ละใบและผลรวมที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR2 ที่ 12m/s	96
ข4 กราฟแสดงทอร์คแต่ละใบและผลรวมที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR2.5 ที่ 12m/s	96
ข5 กราฟแสดงทอร์คแต่ละใบและผลรวมที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR3 ที่ 12m/s	97
ข6 กราฟแสดงทอร์คแต่ละใบและผลรวมที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR3.5 ที่ 12m/s	97
ข7 กราฟแสดงทอร์คแต่ละใบและผลรวมที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR4 ที่ 12m/s	98
ข8 กราฟแสดงผลรวมทอร์คที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR 1 ที่ 6m/s	99
ข9 กราฟแสดงผลรวมทอร์คที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR 1.5 ที่ 6m/s	99
ข10 กราฟแสดงผลรวมทอร์คที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR 2 ที่ 6m/s	100
ข11 กราฟแสดงผลรวมทอร์คที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR 2.5 ที่ 6m/s	100
ข12 กราฟแสดงผลรวมทอร์คที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR 3 ที่ 6m/s	101
ข13 กราฟแสดงผลรวมทอร์คที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR 3.5 ที่ 6m/s	101

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าปะทะกึ่งหั่นลมแนวตั้ง
C, c	=	ความยาวคอร์ด
C_d	=	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
C_l	=	สัมประสิทธิ์แรงยก
C_p	=	ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน
$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$	=	ค่าคงที่ของ source and sink terms ของสมการ ε
C_t	=	สัมประสิทธิ์แรงแนวแกนสัมผัส
C_d	=	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
C_μ	=	constant in linear eddy viscosity models
C_n	=	สัมประสิทธิ์แรงแนวแกนตั้งฉาก
D	=	แรงต้าน
dx, dy, dz	=	อนุพันธ์ในแนวแกน X, Y, และ Z
F_D	=	แรงต้าน
F_n	=	แรงแนวแกนตั้งฉาก
F_t	=	แรงแนวแกนสัมผัส
G_k	=	พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

G_b = พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัว

k = พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

p = ความดัน

H = ความสูงของกังหันลมแนวตั้ง

N = จำนวนใบกังหันลมแนวตั้ง

P = กำลังของกังหันลม

Q = ทอร์ควมเกิดขึ้นกังหันลม

R = รัศมีกังหันลมแนวตั้ง

T = ทอร์คเฉลี่ยที่เกิดขึ้นกังหันลมแนวตั้ง

V_a = induced velocity

V_{au} = induced velocity ตื่นลม

V_{ad} = induced velocity ทำลม

V_c = ความเร็วคอรัค

V_n = ความเร็วแกนตั้งฉาก

V_w = ความเร็วลมหมุนท้าย

V_∞ = ความเร็วลมทางเข้า

W = ความเร็วสัมพัทธ์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Greek symbols

ε = การกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

α, ψ = มุมปะทะ

λ = Tip Speed Ratio

θ = มุมองศาอะซิมุท

ω = ความเร็วในการหมุน

v = ความหนืดพลวัตน์

ρ = ความหนาแน่น

คำย่อ

CFD = Computational Fluid Dynamic

CAD = Computational aided design

CAE = Computational aided engineering

HAWT = Horizontal axis wind turbine

Re = Reynolds number

TSR = Tip Speed Ratio

VAWT = Vertical axis wind turbine

การศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแนวตั้ง

A Study of Flow over Vertical Axis Wind Turbine

คำนำ

วิกฤตพลังงานเป็นปัญหาสำคัญของทั่วโลก การเร่งเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมทำให้มีการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมากและมีแนวโน้มจะเพิ่มมากขึ้นอีกในแต่ละปี โดยในปี พ.ศ. 2554 จากข้อมูลของกระทรวงพลังงาน ประเทศไทยนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเป็นมูลค่าสูงถึง 927 พันล้านบาท แต่เนื่องจากพลังงานฟอสซิลเป็นพลังงานที่มีวันหมดรัฐบาลในหลายประเทศต่างมีนโยบายส่งเสริมให้ภาคเอกชนหันมาใช้พลังงานทดแทนกันมากขึ้นในประเทศไทยเองกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงานได้ตั้งเป้าหมายให้ประเทศไทยหันมาใช้พลังงานทดแทน 25% ของการใช้พลังงานทั้งหมด ภายในปี พ.ศ. 2564 เพื่อให้ประเทศไทยมีความมั่นคงทางพลังงานมากขึ้น โดยพลังงานทดแทนมาจากหลายแหล่งสำคัญ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานขยะ พลังงานชีวมวล พลังงานน้ำ และหนึ่งในนั้นก็คือพลังงานลม

พลังงานลมเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่สะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และอีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ใช้ได้อย่างไม่มีวันหมด ในต่างประเทศพลังงานลมถูกใช้กันอย่างกว้างขวางมาตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นการใช้ทางการเกษตรกรรมเพื่อวิดน้ำหรือผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น ในประเทศสเปนมีฟาร์มลมที่ใหญ่ที่สุดในโลก ประเทศไทยเองก็มีศักยภาพเพียงพอในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม แม้ความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทยเองยังถือว่าต่ำอยู่ก็ตาม แต่ในบางพื้นที่ เช่นบริเวณช่องเขา ก็พบว่ามีความเหมาะสมสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า

โดยการใช้พลังงานลมนั้นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการนำพลังงานลมมาใช้งานได้แก่ กังหันลม โดยกังหันลมมีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในลมเป็นพลังงานกล กังหันลมแบ่งตามลักษณะของแนวแกนการหมุนของกังหันลมได้เป็นสองประเภทหลักๆ ได้แก่ กังหันลมแนวตั้ง (VAWT) และกังหันลมแนวนอน (HAWT) โดยกังหันลมที่ศึกษาในงานวิจัยจะเป็นกังหันลมชนิดแนวตั้ง โดยหลักการทำงานส่วนใหญ่ของกังหันลมทั้งสองชนิดมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันในเรื่องของการผลิตไฟฟ้า ในประเทศไทยนั้นเราจะเห็นกังหันลมแนวนอนเป็นส่วนใหญ่ และกังหันลมแนวตั้งจะพบว่าได้นำไปใช้ในเรือของการวิดน้ำเป็นส่วนมาก แต่เนื่องจากวัสดุสมัยใหม่ในปัจจุบันเทคโนโลยีของกังหันลมแนวตั้งนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าเดิม และด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายอย่างที่ดีกว่ากังหันลมแนวนอน ได้แก่ สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง ไม่ต้องการเสาขนาดใหญ่ในการติดตั้ง สามารถติดตั้งได้ในพื้นที่หลากหลายเช่นบนตึกสูง เสาไฟฟ้า ติดตั้งตามหลังคาสำนักงาน หรือพื้นที่ทุรกันดาร ข้อได้เปรียบต่างๆ เหล่านี้ทำให้นักวิจัยและผู้ใช้งานกังหันลมต่างสนใจในตัวของกังหันลมแนวตั้งมากขึ้น

กังหันลมแนวตั้งนั้นมีประวัติที่ยาวนาน ย้อนไปในคริสต์ศักราช 1980 กังหันลมแนวตั้งแบบดาเรียสเป็นกังหันลมแนวตั้งที่ได้รับการคิดค้นติดตั้งและใช้งานจริง แต่เนื่องด้วยปัญหาหลายอย่างอาทิเช่น กังหันลมไม่สามารถเริ่มหมุนเองได้ เกิดความล่าช้าในใบ มีประสิทธิภาพต่ำ ทำให้กังหันลมแนวตั้งไม่เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายเหมือนกังหันลมแนวนอนที่มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าได้ แต่ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน เช่น เทคโนโลยีของเจนเนอเรเตอร์ เทคโนโลยีของระบบควบคุม ทำให้ข้อเสียหลายอย่างของกังหันลมแนวตั้งเดิมได้ และด้วยการออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ กังหันลมแนวตั้งได้พัฒนาจากเดิมไปมาก ทั้งมีรูปร่างและการออกแบบที่ซับซ้อนโดยกังหันลมแนวตั้งแบบใหม่สามารถเริ่มหมุนได้ที่ลมความเร็วต่ำกว่า 1 เมตรต่อวินาที และเริ่มผลิตกระแสไฟฟ้าที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที

ความสนใจกังหันลมแนวตั้งในช่วงหลังมีมากขึ้นด้วยข้อได้เปรียบต่างๆ แต่เนื่องจากกังหันลมแนวตั้งเองนั้นมีเทคนิคในการผลิตและการออกแบบที่ซับซ้อน ประเทศไทยยังคงต้องพึ่งพาการนำเข้าทั้งเทคโนโลยีและอุปกรณ์จากต่างประเทศทำให้มีต้นทุนที่สูง งานวิจัยนี้จึงมุ่งหวังที่จะทดแทนการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศโดยใช้ทรัพยากรในประเทศให้มากที่สุดเพื่อลดต้นทุนการนำเข้าให้สามารถผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ รวมทั้งยังศึกษาและวิจัยการทำงาน รวมถึงพฤติกรรมของกังหันลมแนวตั้ง โดยได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ตลอดทั้งกระบวนการ ไม่ว่าจะเป็นการสร้างชิ้นงาน การวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของกังหันลมและงานผลิตขึ้นรูป ทั้งนี้เพื่อสามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลมแนวตั้งได้ก่อนการติดตั้งจริง ทั้งยังเพิ่มความเข้าใจในตัว of กังหันลมแนวตั้งเพื่อเผยแพร่ให้กับผู้ที่สนใจได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะการไหลของอากาศ หลักการทำงาน และปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกังหันลมแนวตั้ง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยตลอดกระบวนการ เช่นการสร้างโมเดลทางคอมพิวเตอร์(Computational aided Design: CAD) การวิเคราะห์การไหลของอากาศรอบใบกังหันลมแนวตั้ง (Computational Fluid Dynamics: CFD)
2. วิเคราะห์การทำงานกังหันลมแนวตั้งต้นแบบ ในสภาวะลมต่างๆ เพื่อหาช่วงการทำงานที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด และจำลองการไหลที่สภาวะลมต่ำกว่าที่ได้ออกแบบ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกังหันลมสภาวะดังกล่าว
3. ศึกษาและพัฒนากังหันลมแนวตั้งต้นแบบเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า สำหรับนำพลังงานลมซึ่งเป็นพลังงานสะอาดมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

การตรวจเอกสาร

ในส่วนนี้ จะกล่าวถึงกังหันลมแบบต่างๆ โดยเน้นไปที่กังหันลมแนวตั้ง ทั้งประวัติความเป็นมา ลักษณะ พฤติกรรม ทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์และการประยุกต์ใช้วิธีเชิงตัวเลขหรือ CFD เข้ามาวิเคราะห์กังหันลมแนวตั้ง

กังหันลม

พลังงานลมเป็นพลังงานทางธรรมชาติ โดยมนุษย์รู้จักและใช้พลังงานลมมากมายมาแล้วตั้งแต่โบราณ จากประวัติศาสตร์ย้อนไปใน 1700 ปีก่อนประวัติศาสตร์ พบหลักฐานการสร้างกังหันลมเพื่อใช้ในการวิดน้ำของชาวบาบิโลน โดยในช่วงหลายปีต่อมากังหันลมก็ถูกพัฒนา และใช้งานเพื่อวิดน้ำ การบดข้าวสาลีในการเกษตรกรรมเป็นส่วนใหญ่

ในช่วงปัจจุบัน กังหันลมได้ถูกสร้างเพื่อจุดประสงค์ในการผลิตกระแสไฟฟ้ามากขึ้น โดยหลักการของกังหันลมมีหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานจลน์ที่อยู่ในพลังงานลมเป็นพลังงานกล โดยกังหันลมนั้นมีด้วยกันมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีข้อดีข้อเสียและมีลักษณะที่ต่างกันไป ตามการออกแบบ โดยกังหันลมทั่วไปนั้นสามารถแบ่งตามแนวแกนหมุนของใบพัดได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆ ด้วยกัน

กังหันลมชนิดแนวนอน (Horizontal-axis Wind Turbine: HAWT)

กังหันลมแนวนอน จะมีเพลาลมในแนวนอนและมีใบตั้งฉากกับแนวแกนหมุน โดยกังหันลมแนวนอนจะต้องให้ด้านหน้าหันเข้าหาทิศทางของลมถึงจะทำงาน ดังนั้นกังหันลมแนวนอนขนาดเล็กจะมีหางเสือคอยปรับให้ใบกังหันหันเข้าปะทะลม ส่วนกังหันลมแนวนอนขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีเซ็นเซอร์คอยจับทิศทางลม และส่งสัญญาณให้ชุดมอเตอร์ที่อยู่ส่วนบนของกังหันลมปรับทิศทางหันหน้าเข้าสู่ลม โดยกังหันลมแนวนอนนั้นจะมีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลแต่ก็ต้องการเสาที่สูงตามขนาดของใบด้วย โดยกังหันลมแนวนอนในปัจจุบันที่พบมากที่สุดคือกังหันลมแนวนอนที่มีใบสามใบ



ภาพที่ 1 กังหันลมแนวนอน

กังหันลมชนิดแนวตั้ง (Vertical-axis Wind Turbine: VAWT)

กังหันลมแนวตั้ง เป็นกังหันลมที่มีเพลาลมในแนวตั้ง โดยใบกังหันลมแนวตั้งจะขนานไปกับแนวเพลาลม จุดเด่นของกังหันลมแนวตั้งนั้นคือสามารถที่จะรับลมได้ทุกทิศทาง ทำให้ลดความยุ่งยากและต้นทุนของระบบลงได้ กังหันลมแนวตั้งในอดีตนั้นมีข้อเสียเปรียบในเชิงพาณิชย์เมื่อเทียบกับกังหันลมแนวนอน ทำให้กังหันลมแนวตั้งไม่ได้รับการพัฒนาที่ต่อเนื่องจากนักวิจัยและผู้ผลิต แต่ในปัจจุบันด้วยความต้องการของผู้บริโภคที่หลากหลายและเทคโนโลยีที่ก้าวหน้ามากขึ้น ทำให้มีการพัฒนากังหันลมแนวตั้งให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้นกว่าแต่ก่อนมากและมีการทำงานที่โดดเด่นสามารถแข่งขันตลาดกับกังหันลมแนวนอนได้ โดยกังหันลมแนวตั้งปัจจุบันมุ่งพัฒนาไปที่กังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กและขนาดกลาง เน้นการใช้งานในเขตเมือง หรือเขตที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของลมสูง โดยได้มีการผลิตกังหันลมแนวตั้งออกมาหลายรุ่น หลายแบบ และมีหลักการทำงานที่แตกต่างกันไปตามการออกแบบ โดยจุดเด่นและจุดด้อยของกังหันลมแนวนอนและแนวตั้งในปัจจุบันแสดงในตารางที่ 1



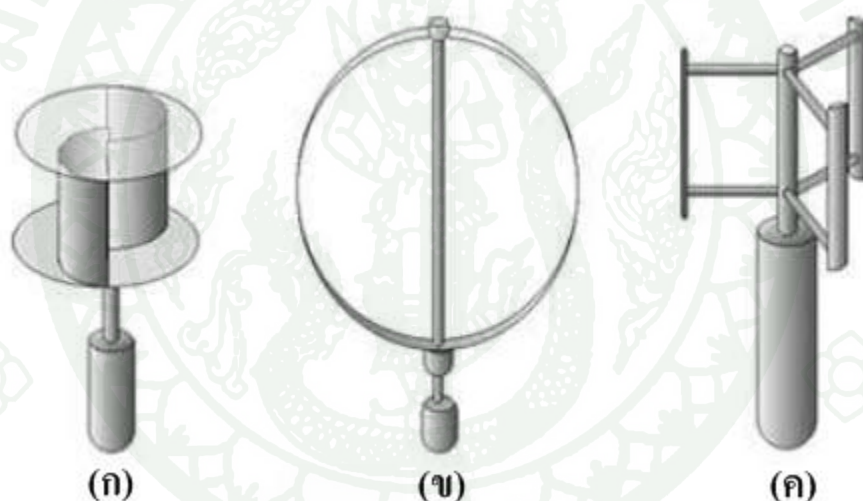
ภาพที่ 2 กังหันลมแนวตั้ง

ตารางที่ 1 จุดเด่นและจุดด้อยของกังหันลมแนวนอนและกังหันลมแนวตั้ง

จุดเด่นและจุดด้อยของกังหันลมแต่ละประเภท	
กังหันลมแนวตั้ง	กังหันลมแนวนอน
ข้อดี - สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง - การทำงานเงียบ - ใช้พื้นที่น้อยในการติดตั้ง - สามารถติดตั้งในพื้นที่หลากหลาย บนดึกสูงหรือพื้นที่ชุมชน - เริ่มหมุนที่ลมความเร็วต่ำมากได้ - สามารถทำงานเต็มที่ในความเร็วลมที่ไม่สูงมากนัก	ข้อดี - มีพื้นที่รับลมมากกว่าเมื่อมีขนาดเท่ากัน - แรงบิดรอบแกนสูง - ความเร็วรอบสูงเมื่อมีความเร็วลมเท่ากัน - ความเร็วรอบคงที่ - มีประสิทธิภาพสูง
ข้อด้อย - ลักษณะลมในแต่ละใบมีความแตกต่างกัน - มีแรงต้านจากใบที่รับลม - เกิดความล้าในใบมาก	ข้อด้อย - ต้องการเสาขนาดใหญ่เพื่อรับชุดเกียร์ และเจนเนอเรเตอร์ที่อยู่บนเสา - ต้องมีระบบควบคุมเพื่อหาทิศทางลม - มีเสียงดังในการทำงานเพราะรอบสูง

ประวัติกังหันลมแนวตั้ง

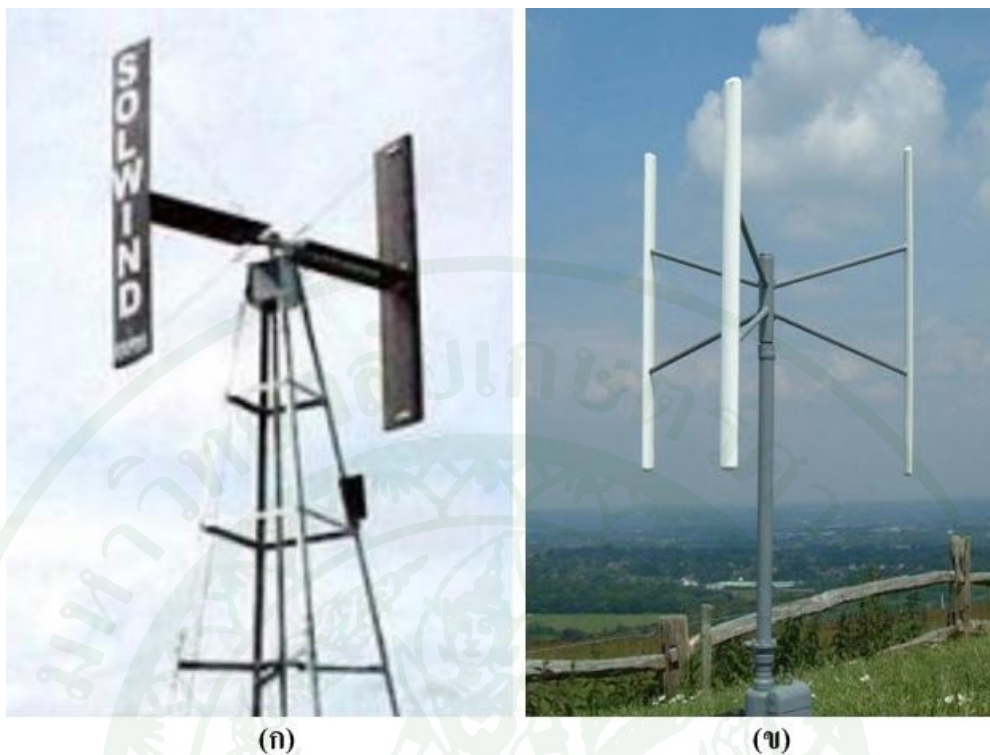
กังหันลมแนวตั้งมีมาตั้งแต่อดีต แต่เนื่องจากความนิยมในกังหันลมแนวนอนจึงไม่ได้ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเท่าที่ควร แต่ในช่วงหลังมีการพัฒนากังหันลมแนวตั้งอย่างมากเนื่องด้วยข้อได้เปรียบที่ดีกว่ากังหันลมแนวนอนในหลายๆ ด้าน รวมทั้งเทคโนโลยีที่ใช้ในการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ และการออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ ด้วยคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาจากเดิมไปมาก ทำให้การออกแบบใบกังหันทำได้อย่างซับซ้อนและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีกังหันลมแนวตั้งมากมายหลายแบบ สามารถจำแนกตามแรงขับเคลื่อนได้สองชนิดด้วยกันคือกังหันลมแนวตั้ง ชนิดแรงผลัก (ภาพที่ 3 ก) และชนิดแรงยก (ภาพที่ 3 ข และ ค)



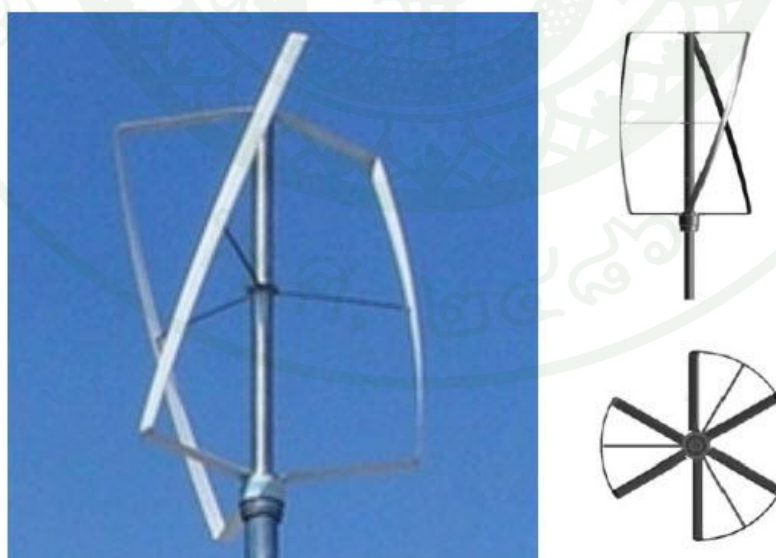
ภาพที่ 3 กังหันลมแนวตั้งแบบต่างๆ (ก) กังหันลมซาโวเนียส (ข) กังหันลมดาเรียสทรงไข่ และ (ค) กังหันลมดาเรียสแบบใบตรง

โดยกังหันลมแนวตั้งที่น่าสนใจในอดีตได้แก่ กังหัน ซาโวเนียส (Savonius) ถูกพัฒนาขึ้นในปีคริสต์ศักราช 1929 โดยวิศวกรชาวฟินแลนด์ชื่อ Savonius (1929) หลักการทำงานนั้นค่อนข้างง่าย โดยอาศัยแรงดูดหรือแรงผลัก (Drag force) ที่เกิดจากลมมาปะทะโรเตอร์ทำให้เกิดการหมุน ลักษณะของโรเตอร์มีลักษณะเป็นทรงกระบอกผ่าครึ่งสองชิ้นประกบกัน ลมจะไหลจากชิ้นหนึ่งไปสู่ชิ้นหนึ่ง ผ่านช่องที่เชื่อมตรงกลาง กระบวนการหมุนนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อไปหมุนเพลาหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ปกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์พลังงานสูงสุดของกังหันลมแนวตั้งอยู่ที่ประมาณ 30%-40% แต่กังหันลมซาโวเนียสจะอยู่ที่ประมาณ 25% เท่านั้นถือว่าต่ำกว่ามาตรฐานพอสมควร กังหันลมต่อมาได้รับการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1931 โดยวิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ George Jeans Mary Darrieus ซึ่งได้จดสิทธิบัตรที่ประเทศอเมริกาสองแบบทั้งแบบรูปไข่ และแบบใบตรง โดยกังหันลมนี้มีชื่อเรียกตามชื่อผู้สร้างคือ กังหันลมดาร์เรียส (Darrieus) หลักการทำงานของกังหันลมประเภทนี้จะอาศัยแรงยกที่เกิดจากตัวใบในการทำงาน โดยตัวใบของกังหันลมชนิดนี้ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะเหมือนปีกเครื่องบิน (aerofoil) แต่ในช่วงแรกนั้นกังหันลมดาร์เรียสมีข้อเสียหลายอย่างคือกังหันลมดาร์เรียสไม่สามารถที่จะเริ่มทำงานได้ด้วยตัวเองจำเป็นต้องให้กระแสไฟฟ้าเพื่อเริ่มหมุนก่อนถึงจะทำงานได้ อีกทั้งกังหันลมดาร์เรียสเมื่อเกิดการหมุนเร็วกังหันลมจะเกิดการสั่นมากและมีเสียงดังที่เกิดจากลมหมุนวน (wake) ทำให้ความสนใจในช่วงแรก ทั้งนักวิจัยและผู้ผลิตมุ่งไปพัฒนากังหันลมแนวนอนกันมาก แม้ในระยะต่อมาช่วงปีคริสต์ศักราช 1970-1980 ได้มีการพัฒนากังหันลมแนวตั้งโมเดลใหม่ชื่อว่า H-rotor มีรูปร่างกังหันคล้ายตัว H ซึ่งโดยรวมก็มีลักษณะคล้ายคลึงกับกังหันลมดาร์เรียสใบตรง แต่ได้รับการออกแบบโดยแก้ไขเรื่องการไม่สามารถเริ่มทำงานเองได้แล้วและยังออกแบบโดยใช้หลักการอากาศพลศาสตร์ ให้กังหันลมสามารถที่จะทำงานได้ในช่วงลมที่ต้องการและชะลอการหมุนเมื่อเกิดลมแรงหรือลมพายุ แต่ถึงกระนั้นก็เป็นเพียงกังหันลมแนวตั้งต้นแบบเท่านั้นยังไม่พบการใช้งานจริงๆ

ในช่วงต่อมาเป็นช่วงพัฒนาของกังหันลมแนวตั้ง เนื่องจากกังหันลมแนวนอนนั้นได้พัฒนา มาจนถึงจุดหนึ่งแล้วและพบถึงข้อจำกัดของกังหันลมแนวนอน เช่น กังหันลมแนวนอนไม่ เหมาะสมสำหรับบางพื้นที่ เช่นพื้นที่ที่มีสภาวะลมเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเช่นหุบเขา ช่องเขา ดึกสูง อีกทั้งกังหันลมแนวนอนต้องการเสาขนาดใหญ่และสูงตามกำลังผลิต เป็นต้น นักวิจัยและผู้ผลิตจึง เริ่มให้ความสนใจในการพัฒนากังหันลมแนวตั้งอีกครั้งเพื่อตอบโต้กับผู้ที่บริโภคที่หลากหลาย โดยในช่วงนี้กังหันลมแนวตั้งเริ่มที่จะมีเป้าหมายกับกลุ่มกังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กมี ขนาดกำลังผลิต 1.5-2.0 กิโลวัตต์ไปจนถึงขนาดกลาง 20-200 กิโลวัตต์ โดยกังหันลมแนวตั้งที่ สำคัญในช่วงนี้ได้แก่ กังหันลมแนวตั้ง พัฒนาโดยบริษัท Solwind (ภาพที่ 4 ก) ของประเทศ นิวซีแลนด์ เป็นกังหันลมที่ออกแบบให้สามารถเริ่มหมุน (start-up) ที่ลมความเร็วต่ำเพียง 1.5 m/s เริ่มผลิตกระแสไฟฟ้า (Cut-in) ที่ความเร็วลม 3.7 m/s และผลิตกระแสไฟฟ้าได้เต็มที่ที่ความเร็วลม 10 m/s โดยออกแบบให้มีการทำงานที่เงียบ และมีการใช้วัสดุคอมโพสิตมาใช้ในการผลิตใบกังหัน ลมแนวตั้ง เช่น ไฟเบอร์กลาส สแตนเลสสตีล และอลูมิเนียมน้ำหนักเบา ทำให้กังหันลมแนวตั้งมี น้ำหนักเบาแต่แข็งแรงทนทาน และง่ายต่อการควบคุม อีกทั้งยังมีการออกแบบใบกังหันลม ในขณะที่ ความเร็วลมสูงๆ ใบกังหันลมจะเริ่มเกิดการชะลอตัวเองทำให้กังหันลมไม่หมุนเร็วเกินกว่าที่ได้ ออกแบบไว้ กังหันลมแนวตั้งอีกตัวที่สำคัญคือกังหันลมตั้ง Eurowind Wind turbine (ภาพที่ 4 ข) กังหันลมแนวตั้งชนิดนี้พยายามออกแบบให้กังหันลมแนวตั้งสามารถที่จะติดตั้งในพื้นที่สูงมีสภาวะ ลมแปรปรวน เช่น บนปล่องควัน บนตึกสูงหรือพื้นที่สูง เอกลักษณะสำคัญของกังหันลมชนิดนี้คือ พยายามออกแบบกังหันลมแนวตั้งให้ง่ายต่อการบำรุงรักษาโดยใช้เงินเนอโรเตอร์แบบขับเคลื่อนและมีชุดโรเตอร์ที่หมุนเพียงชุดเดียว



ภาพที่ 4 (ก) กังหันลม Solwind แบบ 2 ใบ และ (ข) กังหันลม Eurowind



ภาพที่ 5 กังหันลมแนวตั้ง Turby Wind turbine

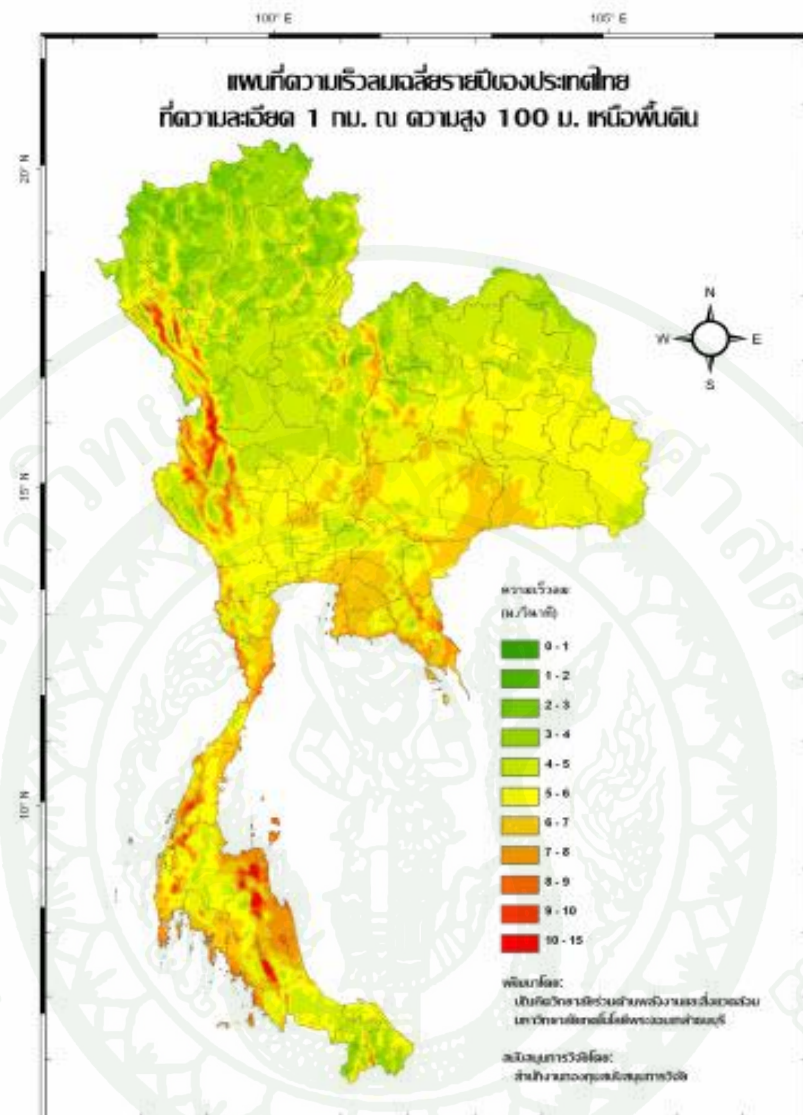
กังหันลมแนวตั้งในยุคปัจจุบันช่วงเวลา 5 ปีที่ผ่านมาคือตั้งแต่ ค.ศ. 2007 เป็นต้นมา กังหันลมแนวตั้งได้พัฒนาอย่างก้าวกระโดด โดยได้รวมข้อดีจากแบบเดิมๆ และพัฒนากังหันลมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นโดยกังหันลมแนวตั้งแบบใหม่ในปัจจุบันได้มีการนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการออกแบบ และวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ทำให้รูปร่างของกังหันลมแนวตั้งในปัจจุบันมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น กังหันลมแนวตั้งในปัจจุบันที่มีชื่อเสียงและโดดเด่นก็คือกังหันลม Turby Wind Turbine (ภาพที่ 5) ได้รับการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่ที่หลากหลาย ทั้งบริเวณชุมชนหรือตึกสูง ต้องการความสงบ ด้วยการทำงานที่เงียบมากและเป็นมิตรต่อสัตว์ปีก กังหันลม Turby เองมีลักษณะใบที่เอียงและบิดเล็กน้อยเพื่อช่วยในการรับลมได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น และช่วยลดความเค้นที่เกิดบริเวณใบในขณะที่ใบหมุน ด้วยความต้องการในปัจจุบันกังหันลมแนวตั้งส่วนใหญ่ถูกออกแบบเพื่อมุงติดตั้งในพื้นที่ชุมชนโดยเฉพาะพื้นที่ที่มีความเร็วลมต่ำและทิศทางลมเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ถือเป็นจุดเด่นสำคัญที่ปัจจุบันนักวิจัยและผู้ใช้กังหันต่างให้ความสนใจในตัวกังหันลมแนวตั้งมากยิ่งขึ้น โดยกังหันลมแนวตั้งในท้องตลาดปัจจุบันนั้นแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กังหันลมแนวตั้งแบบต่างๆ ในปัจจุบัน

รูปกังหันลม	ชื่อ	กำลังผลิต กระแสไฟฟ้า	ลักษณะใบ	ประเทศ ผู้ผลิต	จำนวนใบ
	Desmond	100 กิโลวัตต์	ใบโค้ง	แคนาดา	3
	Solwind	2-10 กิโลวัตต์	ใบตรง	นิวซีแลนด์	2
	Turby	2.5 กิโลวัตต์	ใบตรงและบิด	เนเธอร์แลนด์	3
	XCO2	6 กิโลวัตต์	ใบตรงและบิด	อังกฤษ	3
	Neuhauser	ถึง 40 กิโลวัตต์	ใบตรง	เยอรมัน	3

กัมมันตภาพในประเทศไทย

สำหรับศักยภาพลมในประเทศไทย จากข้อมูลแผนที่พลังงานลมโดยบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (2553) แสดงในภาพที่ 6 พบว่าพื้นที่ที่มีศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานลมอยู่บริเวณพื้นที่ชายฝั่งทะเลตอนใต้ ตั้งแต่ จ.ประจวบคีรีขันธ์ จนถึง จ.สงขลา บริเวณเทือกเขาบางส่วนในภาคตะวันตก พื้นที่ตอนล่างของ จ.เชียงใหม่ บริเวณรอยต่อระหว่างภาคกลางกับภาคตะวันออกเฉียงเหนือและรอยต่อระหว่างภาคตะวันออกเฉียงเหนือกับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยพื้นที่เหล่านี้มีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ประมาณ 6-7 m/s รวมทั้งลักษณะลมของประเทศไทยเองมีการเปลี่ยนทิศทางของลมอยู่ตลอดเวลา



ภาพที่ 6 แผนที่ความเร็วมเฉลี่ยของประเทศไทยที่ความสูง 100 เมตรเหนือพื้นดิน

ที่มา: บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (2553)

สำหรับกังหันลมในประเทศไทยได้มีการติดตั้งและใช้งานอยู่พอสมควร โดยกังหันลมที่เคยทำการติดตั้งในประเทศไทยแทบทั้งหมดเป็นกังหันลมแนวนอน เช่นกังหันลมแนวนอนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าที่แหลมพรหมเทพ จ.ภูเก็ต ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) แสดงในภาพที่ 7 ในปี พ.ศ. 2526-2539 เป็นการติดตั้งและทดลองใช้งานครั้งแรกที่ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเชื่อมโยงเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยในปี พ.ศ. 2539 ได้ทำการติดตั้งกังหันลมแนวนอนที่มีขนาดกำลังผลิตกระแสไฟฟ้า 150 กิโลวัตต์ รวมทั้งมีเทคโนโลยีที่น่าเชื่อถือในการผลิตกระแสไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ด้วย ในปี พ.ศ. 2547 ได้ตรวจสอบพบว่าบริเวณอ่างพักน้ำตอนบนโรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา มีศักยภาพลมที่ดีอีกแห่งหนึ่งของประเทศไทย โดยมีความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ประมาณ 5-6 เมตรต่อวินาที โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) จึงได้ติดตั้งกังหันลมขนาดกำลังผลิต 1,250 กิโลวัตต์จำนวน 2 ชุด รวมกำลังผลิต 2,500 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นกังหันลมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่เคยติดตั้งมาในประเทศไทย การติดตั้งแล้วเสร็จพร้อมทั้งเชื่อมโยงเข้าสู่ระบบการจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2552 ในช่วงต่อมารกรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้เริ่มโครงการติดตั้งกังหันลมแนวนอนที่พื้นที่ชายฝั่งอ่าวไทยด้าน อ.หัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยกังหันลมแนวนอนนี้มีกำลังผลิต 1,500 กิโลวัตต์ ติดตั้งแล้วเสร็จตั้งแต่วันที่ 8 มิ.ย.2552 สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถึงปีละ 3.4 ล้านหน่วย คิดเป็นมูลค่าประมาณ 20.7 ล้านบาท



ภาพที่ 7 กังหันลมแนวนอนติดตั้งที่บริเวณแหลมพรหมเทพ จ.ภูเก็ต

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)

จากสภาวะลมและการติดตั้งกังหันลมแนวนอนที่ผ่านมาของประเทศไทยพบว่า ประเทศไทยต้องพึ่งเทคโนโลยีจากต่างประเทศอยู่มาก โดยจำเป็นต้องนำเข้าอุปกรณ์และความรู้ในการติดตั้งจากต่างประเทศ กังหันลมที่นำเข้ามาส่วนใหญ่มีลักษณะที่ไม่เหมาะสมกับประเทศไทยเท่าที่ควร ทำให้ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตามที่กังหันลมนั้นๆ ทำได้ ดังนั้นในช่วงเวลาเดียวกันจึงมีการส่งเสริมและผลักดันให้มีการวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับกังหันลมในประเทศไทย ซึ่งแนวทางการวิจัยและพัฒนาของกังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศไทยมีสองลักษณะใหญ่ด้วยกัน หนึ่งเน้นการสำรวจหาตำแหน่งพื้นที่ที่มีศักยภาพลมสูงของประเทศไทยว่าอยู่ที่ใดและมีค่าเท่าใด เนื่องจากจุดที่มีความเร็วลมยิ่งสูง ต้นทุนก็จะยิ่งต่ำ สองวิจัยเพื่อพัฒนากังหันลมความเร็วต่ำที่เหมาะสมกับประเทศไทย โดยเน้นการใช้วัสดุภายในประเทศ เพื่อลดต้นทุน

จากสภาวะลมในประเทศไทยนั้นจะเห็นได้ว่ามีความเหมาะสมกับกังหันลมแนวตั้งอยู่มาก เนื่องจากข้อดีของกังหันลมแนวตั้งที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่ำได้ สามารถรับลมได้ทุกทิศทางและมีเสียงในการทำงานที่เงียบไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียง ไม่จำเป็นต้องติดตั้งในที่ที่ห่างไกลผู้คน แต่เนื่องจากกังหันลมแนวตั้งยังไม่เป็นที่แพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากยังขาดองค์ความรู้ต่างๆ ที่จะให้ผู้ใช้งานมีความมั่นใจได้เหมือนกังหันลมแนวนอนที่มีการใช้งานมานาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยในการวิเคราะห์พฤติกรรมต่างๆ ของกังหันลมแนวตั้งเพื่อเพิ่มความเข้าใจของผู้ที่สนใจได้มากยิ่งขึ้น

อากาศพลศาสตร์กังหันลมแนวตั้ง

กังหันลมแนวตั้งนั้นมีลักษณะอากาศพลศาสตร์ที่ซับซ้อนมากไม่ว่าจะเป็นพฤติกรรมแบบไม่คงตัว (Unsteady) การเกิดสตอลล์ (Stall) แบบต่างๆ ในช่วงของการหมุนของกังหัน โดยพฤติกรรมดังกล่าวเหล่านี้พบได้แม้แต่กังหันลมแนวตั้งที่มีลักษณะง่ายที่สุดอย่างกังหันลมคาเรียสแบบใบตรงก็ตาม ดังนั้นกังหันลมแนวตั้งส่วนใหญ่จำเป็นต้องใช้การคำนวณที่ซับซ้อนโดยคำนึงถึงลักษณะอากาศพลศาสตร์ดังกล่าวด้วย ซึ่งในช่วงเวลาที่ผ่านมามีนักวิจัยจำนวนมากพัฒนาวิธีคำนวณ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยในการคำนวณลักษณะอากาศพลศาสตร์เหล่านี้มากมาย แต่ในช่วงแรกนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมของกังหันลมอย่างง่ายก่อน

พลังงานลมและการนำมาใช้

พลังงานลม หมายถึงพลังงานที่ได้จากมวลอากาศที่เคลื่อนที่ไปบนผิวโลกตามแนวแกนด้วยความเร็วต่างๆ กัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของดวงอาทิตย์ โดยที่ผิวโลกในแต่ละส่วนนั้นรับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ไม่เท่ากัน จึงทำให้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงเกิดการลอยตัวสูงขึ้นและอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเข้ามาแทนที่ เป็นผลให้มวลอากาศเกิดการเคลื่อนที่ เรียกว่า ลม โดยพลังงานจลน์ (E_{air}) เกิดจากการเคลื่อนที่ของลมสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$E_{air} = \frac{1}{2} m_{air} V^2 \quad (1)$$

กำลังงานลม เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานลมเนื่องจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศมีหน่วยเป็น วัตต์ สามารถเขียนสมการ ดังนี้

$$P_{air} = \frac{1}{2} \dot{m}_{air} V^2 \quad (2)$$

โดยถ้ามวลอากาศเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A ใดๆ สามารถหาอัตราการไหลของมวลอากาศได้ดังต่อไปนี้

$$\dot{m}_{air} = \rho_{air} A V \quad (3)$$

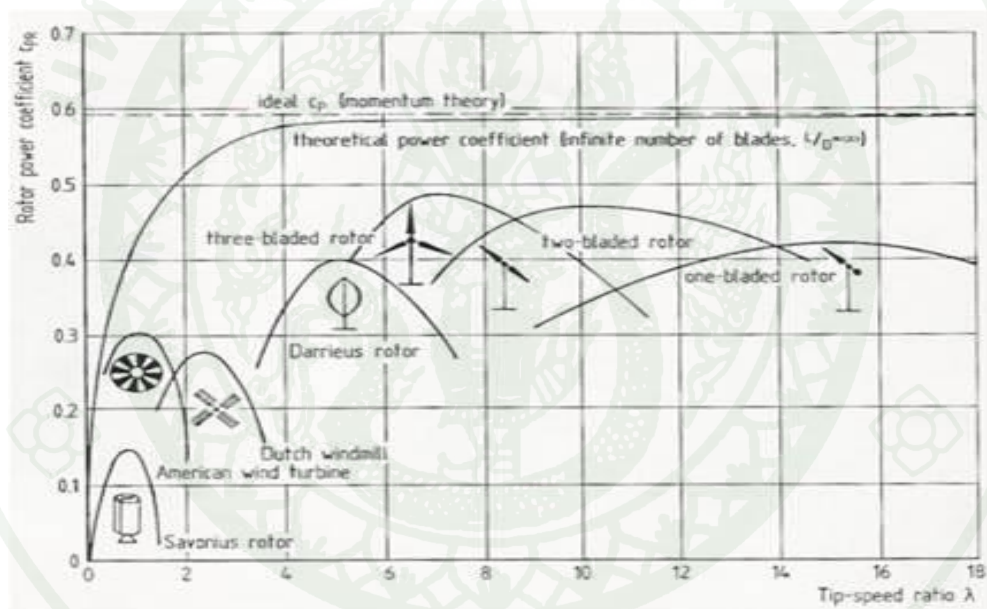
นำสมการที่ 3 แทนลงในสมการ 2 สามารถเขียนสมการกำลังงานลมใหม่ได้ดังนี้

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho_{air} A V^3 \quad (4)$$

ปกติแล้วกังหันลมทั่วไปจะมีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (C_p) ที่จะบอกว่กังหันลมตัวนั้นๆ มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานจลน์ของพลังงานลมเป็นพลังงานเชิงกลได้เท่าไร โดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ Betz (1919) ได้นำเสนอการพิสูจน์ความเป็นไปได้สูงสุดของกังหันลมใดๆ ที่จะนำพลังงานลมมาใช้ได้ และตั้งเป็นกฎเรียกว่า Betz'law โดยระบุไว้ว่ากังหันลมจะสามารถเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลได้สูงสุดไม่เกิน 59.3 เปอร์เซ็นต์ โดยกังหันลมในปัจจุบันจะใช้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานมาเปรียบเทียบความสามารถของกังหันลม ซึ่งค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสามารถหาได้จากสูตร

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (5)$$

จากภาพที่ 8 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (C_p) (แกนตั้ง) กับ Tip Speed Ratio (แกนนอน) เส้นบนสุดเป็นเส้นประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมตามทฤษฎีของ Betz limit โดยสังเกตได้ว่ากังหันลมแนวนอนส่วนใหญ่ ไม่ว่าจะเป็นกังหันลมแนวนอนแบบสามใบหรือสองใบ จะมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานอยู่ที่ประมาณ 49 เปอร์เซ็นต์ในช่วง Tip speed ratio ที่ 5-10 ส่วนกังหันลมแนวนอนแบบใบเดียวนั้นแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพที่สูง แต่กังหันลมนั้นทำงานอยู่ในช่วง Tip speed ratio มากกว่า 10 ซึ่งสูงเกินไปทำให้เกิดความไม่เสถียรมากจึงมักไม่นิยมนำกังหันลมแบบนี้มาใช้งาน ส่วนกังหันลมแนวตั้งอย่างกังหันลมดาร์เรียม จะมีค่าประสิทธิภาพที่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ในช่วง Tip speed ratio ที่น้อยกว่า ซึ่งจากกราฟจะเห็นข้อแตกต่างในการทำงานระหว่างกังหันลมแนวนอนและกังหันลมแนวตั้งได้ชัดเจน



ภาพที่ 8 แสดงประสิทธิภาพ (แกนตั้ง) ของกังหันลมแบบต่างๆ เทียบกับ Tip speed ratio (แกนนอน)

พื้นฐานอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมแนวตั้ง

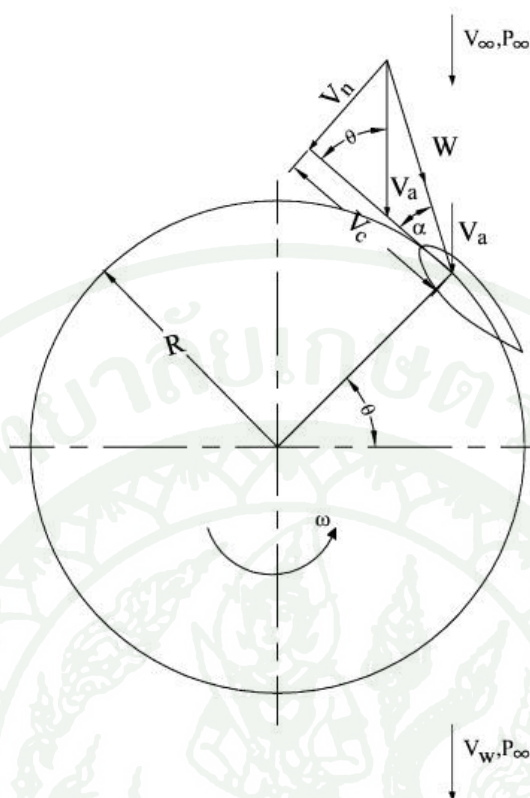
อากาศพลศาสตร์ของกังหันลมแนวตั้งนั้นจะพบว่าเมื่อเทอมไร้น้ำหนักอยู่มาก โดยที่แต่ละตัวมีความสำคัญในการอธิบายการทำงานของกังหันลมนั้นๆ โดยตัวแปรเทอมไร้น้ำหนักที่สำคัญตัวหนึ่งได้แก่ อัตราการกระตุ้นความเร็ว หรือ Tip speed ratio ใช้สัญลักษณ์แลมด้า (λ) โดยจะเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วการหมุนเชิงเส้นกับความเร็วลมทางเข้าของกังหันลมแนวตั้ง นั้นหมายความว่าถ้า Tip speed ratio มีค่ามากขึ้นกังหันลมจะหมุนเร็ว ดังสมการ

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_\infty} \quad (6)$$

จากภาพที่ 9 แสดงการทำงานของกังหันลมแนวตั้งซึ่งมองจากมุมบน โดยมีลมที่ความเร็ว V_∞ เข้ามาด้านบนและกังหันลมมีรัศมี R หมุนด้วยความเร็ว ω ทิศทวนเข็มนาฬิกา โดยปกติเราสามารถที่จะแบ่งช่วงการทำงานของกังหันลมออกได้เป็นสองช่วงใหญ่ๆ ด้วยกันคือช่วงต้นลม (Upstream) คือจากภาพที่ 9 ช่วงครึ่งบนตามทิศทางที่ลมเข้าหากังหันลม และท้ายลม (Downstream) คือช่วงครึ่งล่างของกังหันลม โดยความเร็วลมที่มาปะทะกับใบกังหันจะไม่คงที่ จะเห็นได้จากภาพที่ 9 ถ้าพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นตามแกนหมุนจะมีความเร็วคอर्डของแพนอากาศ (V_c) และความเร็วตั้งฉากของแพนอากาศ (V_n) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V_c = R\omega + V_a \cos\theta \quad (7)$$

$$V_n = V_a \sin\theta \quad (8)$$



ภาพที่ 9 แสดงความเร็วของลมต่างๆที่ไหลผ่านใบกังหันลม โดยลมที่ V_∞ เข้ามาจากด้านบนลงข้างล่าง

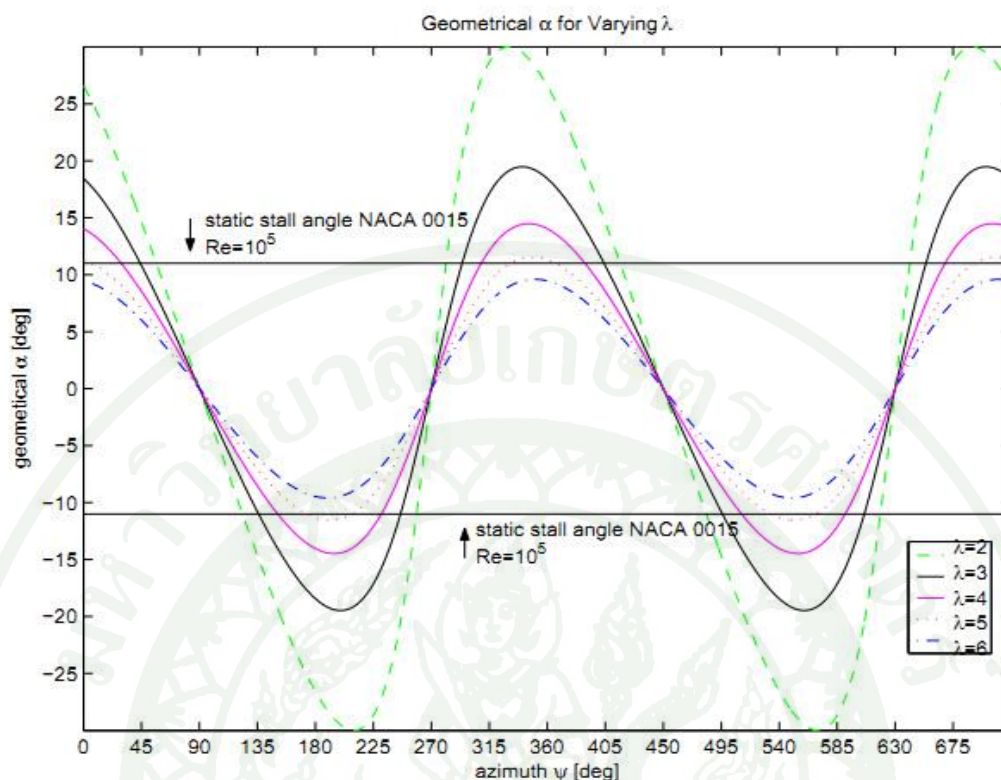
โดย V_a เป็นความเร็วตามแนวแกนหมุน (รวมกับความเร็วลมแล้ว) และจากภาพที่ 9 มุมปะทะก็คือ มุมที่อยู่ระหว่าง V_c และ V_n สามารถหาได้จากสมการ

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V_n}{V_c} \right) \quad (9)$$

แทนค่า V_c และ V_n ลงไปในสมการที่ (9) จะได้

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\sin \theta}{(R\omega / V_\infty)(V_a / V_\infty) + \cos \theta} \right] \quad (10)$$

จากสมการที่ 10 จะเห็นได้ว่ากังหันลมแนวตั้งจะมีค่ามุมปะทะที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดในแต่ละช่วงการหมุน ซึ่งจะกำหนดแต่ละช่วงการหมุนของกังหันลมเป็นมุมอะซิมุท (Azimuth) แทนด้วยสัญลักษณ์ Theta (θ) หรือบางทีก็ใช้สัญลักษณ์ Phi (ψ) ซึ่งจากภาพที่ 10 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของมุมปะทะในแต่ละช่วงของมุมอะซิมุท และในแต่ละช่วง Tip Speed Ratio ของกังหันลมแนวตั้งที่มีแผนอากาศรหัส NACA0015 จะสังเกตเห็นได้ว่าถ้า Tip Speed Ratio ต่ำหรือกังหันลมหมุนช้า จะพบว่าช่วงของมุมปะทะของใบกังหันลมจะมีค่าเปลี่ยนแปลงมาก แต่ถ้ากังหันลมหมุนเร็วมากขึ้นหรือมี Tip Speed Ratio มากขึ้นช่วงของมุมปะทะของใบกังหันลมจะแคบลง



ภาพที่ 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของมุมปะทะ (แนวตั้ง) ในแต่ละตำแหน่งของการหมุนของใบพัด Azimuth (แนวนอน)

เนื่องจากมุมปะทะของกังหันลมแนวตั้งเปลี่ยนแปลงตลอดในช่วงของการหมุน ทำให้ความเร็วลมสัมพัทธ์ที่มาปะทะกับแพนอากาศเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาไป ด้วยพิจารณาจากภาพที่ 11 ความเร็วลมสัมพัทธ์ (W) จะมีค่าเท่ากับ

$$W = \sqrt{V_c^2 + V_n^2} \quad (11)$$

แทนค่า V_c และ V_n จากสมการที่ 7 และ 8 ลงไปในสมการที่ 11 และแปลงเป็นเทอมไร้หน่วย ดังนี้

$$\frac{W}{V_\infty} = \frac{W}{V_a} \cdot \frac{V_a}{V_\infty} = \frac{V_a}{V_\infty} \sqrt{\left[\left(\frac{R\omega}{V_\infty} / \frac{V_{au}}{V_\infty} \right) + \cos\theta \right]^2 + \sin^2\theta} \quad (12)$$

จากภาพที่ 11 ในแต่ละใบกังหันลมนั้นจะมีแรงยกและแรงจุดเกิดขึ้นอยู่เสมอ ซึ่งแรงสองแรงนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่ามุมปะทะที่เกิดขึ้นและแรงลมด้วย ในทางการวิเคราะห์ของกังหันลม นั้นมักจะนิยมเปลี่ยนแรงยกกับแรงจุดเป็นแรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential force) กับ แรงในแนวตั้งฉาก (Normal force) โดยสามารถเขียนแรงอยู่ในแกนสัมผัสและแกนตั้งฉากได้ดังนี้

$$C_t = C_l \sin \alpha - C_d \cos \alpha \quad (13)$$

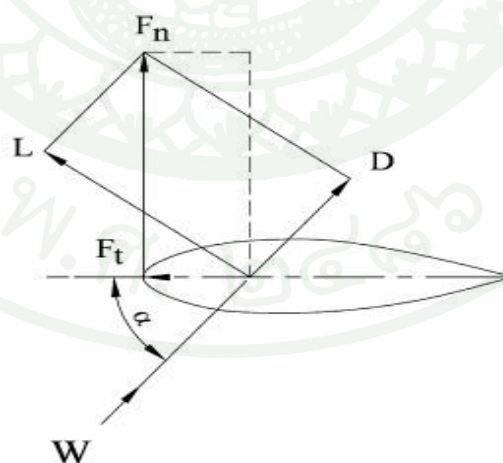
$$C_n = C_l \cos \alpha + C_d \sin \alpha \quad (14)$$

โดย C_t คือค่าสัมประสิทธิ์แรงในแนวเส้นสัมผัส และ C_n คือค่าสัมประสิทธิ์ในแนวตั้งฉากและสามารถหาแรงได้ดังสมการ

$$F_t = C_t \frac{1}{2} \rho C H W^2 \quad (15)$$

$$F_n = C_n \frac{1}{2} \rho C H W^2 \quad (16)$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่นของอากาศ C คือความยาวคอर्डของใบกังหัน และ H คือความสูงของกังหันลม



ภาพที่ 11 ไดอะแกรมแสดงแรงต่างๆ ที่เกิดบนแพนอากาศ

การคำนวณทอร์กที่เกิดขึ้นนั้นสามารถคำนวณโดยอาศัยแรงในแนวสัมผัสกับแรงในแนวตั้งฉาก จากสมการที่ 15 และ 16 ในแต่ละช่วงของการหมุนหรือแต่ละช่วงของมุมอะซิมุท ดังนั้นจะเขียนสมการหาแรงเฉลี่ยในแนวสัมผัสให้อยู่ในฟังก์ชันของมุมอะซิมุท ดังนี้

$$F_{ta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_t(\theta) d\theta \quad (17)$$

และผลรวมทอร์ก (Q) ของจำนวนใบ (N) จะหาได้จาก

$$Q = NF_{ta}R \quad (18)$$

และสามารถนำไปคำนวณหาค่ากำลังได้จาก

$$P = Q\omega \quad (19)$$

พฤติกรรมที่สำคัญของกังหันลมแนวตั้ง

นอกจากกังหันลมแนวตั้งจะมีมุมปะทะที่เปลี่ยนแปลงในช่วงการหมุนทำให้แรงยกและแรงต้านของใบกังหันลมเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอด แล้วกังหันลมแนวตั้งยังมีพฤติกรรมอื่นๆ ที่น่าสนใจอยู่อีกมากซึ่งถือเป็นเอกลักษณ์ของกังหันลมแนวตั้ง ดังต่อไปนี้

Reynolds number

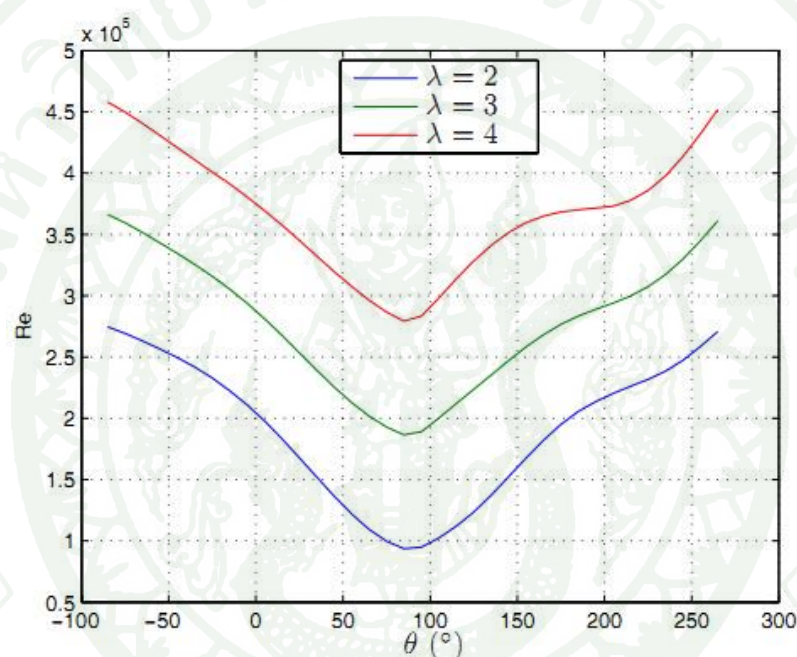
ค่า Reynolds number เป็นเทอมไร้มิติหน่วยตัวหนึ่งที่สำคัญและมีอิทธิพลกับกังหันลมแนวตั้ง โดย Reynolds number นี้จะใช้ค่าความยาวคอรัคของกังหันลมแนวตั้ง คำนวณได้จากสมการ

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu} \quad (20)$$

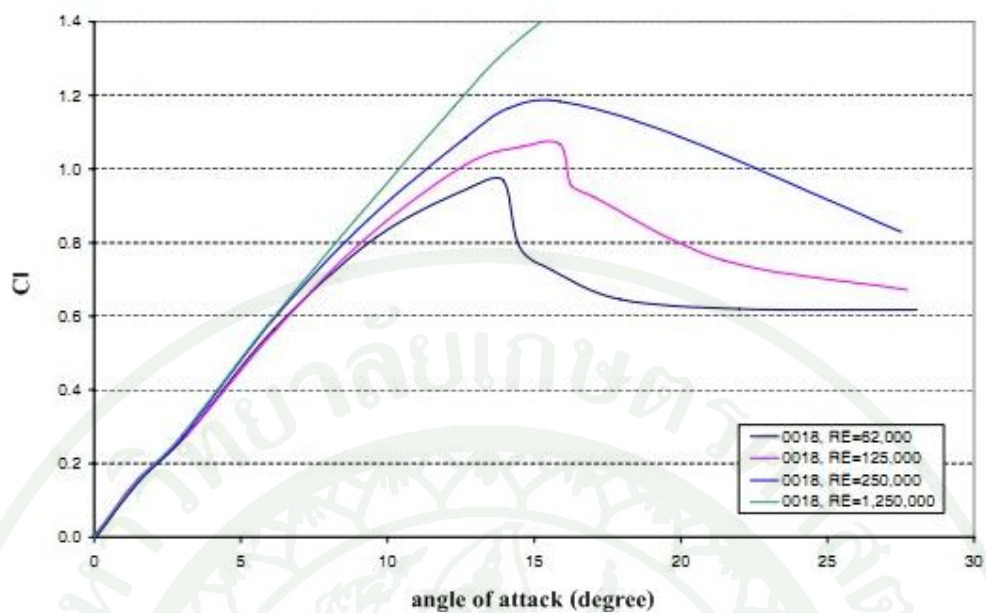
โดยที่ μ คือความหนืดสัมบูรณ์ และ c คือความยาวคอรัคของแพนอากาศ

โดยจากภาพที่ 12 จะเห็นได้ว่ากังหันลมแนวตั้งใน Tip Speed Ratio ที่ต่างกันก็จะมี Reynolds number ที่แตกต่างกันด้วย โดยอิทธิพลของ Reynolds number ต่อแพนอากาศนั้นสามารถเห็นได้ชัดจากงานวิจัยของ Jacobs and Sherman (1937) ได้ทำการวิจัยแพนอากาศรหัส NACA0018 และเปลี่ยนแปลง ค่า Reynolds number ต่างๆ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและมุมปะทะที่เกิดการ stall จะลดลงอย่างมาก ถ้าวัด Reynolds number ด้วยตามภาพที่ 13 และพบลักษณะเดียวกันนี้กับแพนอากาศรหัส NACA ที่มีลักษณะสมมาตร (NACA0010) ด้วย

ด้วยอิทธิพลของ Reynolds number กับค่าแรงยกของใบกังหันลม ทำให้มีการออกแบบการทดลองหาประสิทธิภาพของกังหันลม โดยงานของ Sheldahl (1980) ต้องการจะหาอิทธิพลของ Reynolds number ที่ส่งผลต่อกังหันลมแนวตั้ง จากภาพที่ 14 พบว่าเมื่อเพิ่ม Reynolds number จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยผลการทดลองต่อมาของ Paraschivoiu (2002) ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่า Re มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกังหันลมแนวตั้งพอสมควร

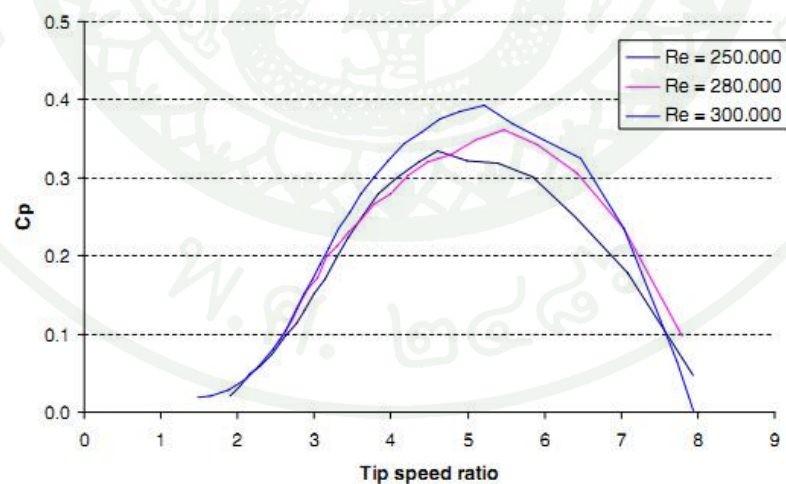


ภาพที่ 12 แสดงค่า Reynolds number ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม Tip speed Ratio ต่างๆ โดยความเร็วลมคงที่ที่ 10 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 13 แสดงเส้นแรงยก (แกนตั้ง) ที่เปลี่ยนแปลงไปจากมุมปะทะ (แกนนอน) เดิมจากอิทธิพลของ Reynolds number

ที่มา: Jacobs and Sherman (1937)

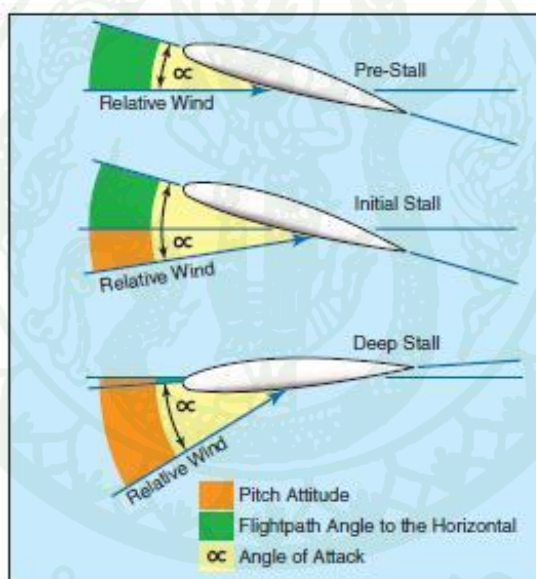


ภาพที่ 14 แสดงค่า Reynolds number ที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพทางพลังงานของกังหันลมแนวตั้ง (แกนตั้ง) และ Tip speed ratio (แกนนอน)

ที่มา: Sheldahl et al (1980)

Deep Stall

จากภาพที่ 15 เมื่อมุมปะทะของกังหันลมมีค่าเพิ่มขึ้น ลมบริเวณแพนอากาศจะเกิดการแยกไหล โดยการแยกไหลนี้จะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนท้ายของแพนอากาศ และเมื่อมีการเพิ่มมุมปะทะมากขึ้นการแยกไหลนี้จะเลื่อนเข้ามาทางด้านหน้าแพนอากาศมากยิ่งขึ้น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า Deep Stall โดย Deep Stall นี้ทำให้เกิดผลเสียต่อประสิทธิภาพของใบกังหันมาก เนื่องจากแพนอากาศในช่วงนี้จะสร้างแรงดูดสูงทำให้กังหันหมุนช้าลง โดยมุมปะทะที่จะทำให้เกิด Deep Stall นี้ขึ้นอยู่กับค่า Reynolds Numbers ในการทำงานของกังหันลมแนวตั้งที่มีช่วงการทำงานของมุมปะทะที่กว้างจำเป็นจะต้องออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยง Deep Stall นี้หรือพยายามออกแบบให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ลักษณะของการ Stall แบบต่างๆ แสดงดังภาพที่ 15



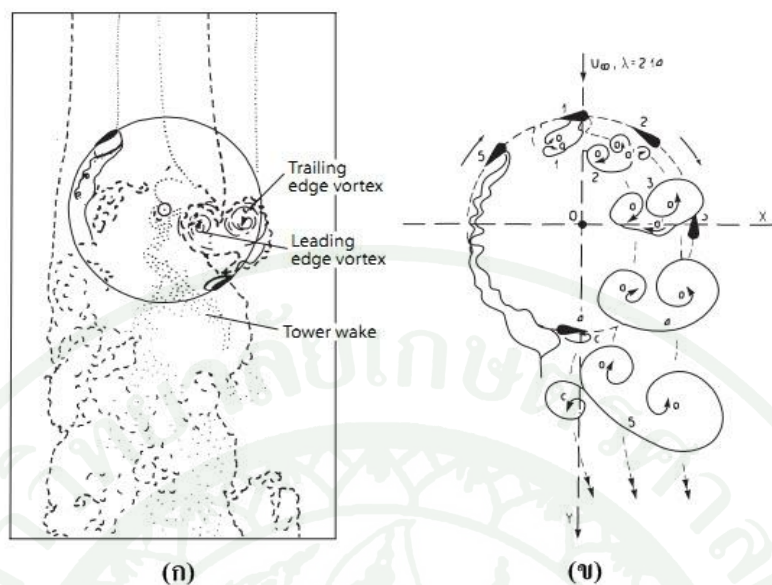
ภาพที่ 15 แสดงการเกิด Stall แบบต่างๆ ของแพนอากาศ

Dynamic Stall

Dynamic Stall เกิดจากการที่แพนอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิด Vortex (ลมหมุนวน) แยกออกจากบริเวณส่วน ห้วของแพนอากาศแล้ววนอยู่เหนือผิวที่มีความคดน้อย โดย Vortex นั้นจะมีความเร็วลมในการหมุนที่เร็วมาก และจะช่วยเพิ่มแรงยกบนแพนอากาศในระยะสั้น จนกระทั่งเคลื่อนผ่านไปสู่หางของแพนอากาศ งานวิจัยส่วนใหญ่ของ Dynamic Stall จะวิจัยอยู่ในพวกของเฮลิคอปเตอร์ เครื่องบินต่อสู้ทางอากาศ และกังหันลมแนวตั้งด้วย

กังหันลมดาเรียสเป็นกังหันลมตัวหนึ่งที่สามารถเกิด Dynamic Stall ได้ง่าย เนื่องจากการเปลี่ยนมุมปะทะของกังหันลมดาเรียสมีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะช่วงค่า Tip Speed Ratio ต่ำๆ ขณะที่ใบพัดหมุนครบหนึ่งรอบ ใบพัดในส่วนของท้ายลม (Downstream) จะได้รับอิทธิพลจากลมหมุนที่เกิดจากใบที่อยู่ส่วนต้นลม (Upstream) ดังนั้นความเข้าใจที่ดีใน Dynamic Stall นั้นมีความสำคัญต่อการทำงานและออกแบบกังหันลมแนวตั้งเป็นอย่างมาก

การแสดงผลภาพของ Dynamic Stall ครั้งแรกทำโดย Brochier (1986) โดยใช้อุโมงค์น้ำ การแสดงผลภาพการใช้ LDV และการไหลของฟองไฮโดรเจน โดยใช้กังหันลมดาเรียสสองใบทำงานที่ Reynolds number มีค่าเท่ากับ 10,000 และ Tip Speed Ratio เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 1 ถึง 8 โดยผลที่ได้ที่ Tip Speed Ratio 2.14 แสดงที่ภาพที่ 16

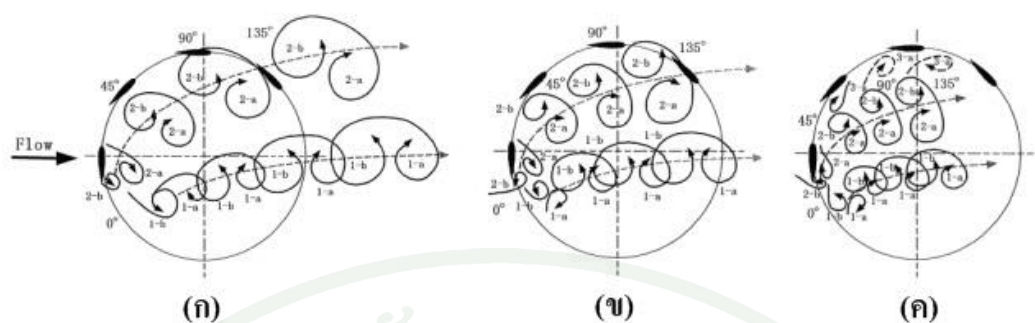


ภาพที่ 16 (ก) การจำลองการไหล และ (ข) Schematic diagram แสดงการเกิด Dynamic stall

ที่มา: Brochier (1986)

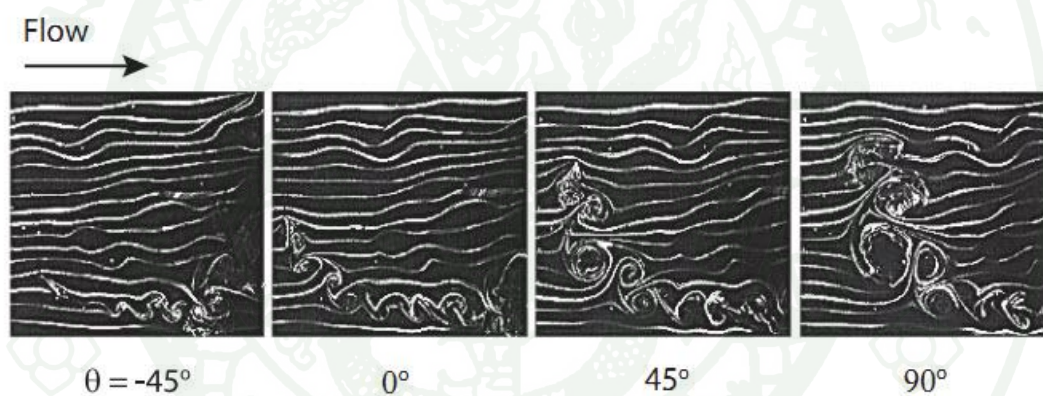
พบว่าลมหมุนวน (Vortex) จะเกิดบริเวณหน้าปะทะของแพนอากาศ และลมหมุนลูกที่สองหมุนในทิศทางตรงกันข้ามและเกิดที่ส่วนหางของแพนอากาศ จากภาพที่ 16 (ข) ลมหมุนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นลมหมุนสองวงหมุนในทิศทางตรงกันข้ามเคลื่อนที่ไปส่วนของท้ายลมแล้วปะทะกับใบที่สองของกังหันลม ปรากฏการณ์นี้ได้รับการยืนยันด้วยการทดลองของ Fujisawa and Shibuya (2001) ซึ่งทำการทดลองในอุโมงค์น้ำและใช้วิธี PIV โดยจำลองการไหลผ่านกังหันลมดาเรียส หนึ่งใบและไม่มีเสาตรงกลาง ภาพที่ 17 และ 18 แสดงการไหล ซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน โดยมีลักษณะใกล้เคียงกับแบบแรกคือมีลมหมุนเกิดขึ้นสองวง

งานของ Fujisawa and Shibuya (2001) ยังได้แสดงให้เห็นอีกว่าในช่วง Tip Speed Ratio มีค่าน้อยหรือช่วงกังหันลมเปลี่ยนแปลงมุมปะทะมาก โอกาสที่จะเกิด Dynamic Stall จะมีค่ามากตามไปด้วยจากภาพที่ 17 จะเห็นได้ว่าที่ Tip Speed Ratio 1 จะเกิดลมหมุนที่มีขนาดใหญ่และน้อยลงเรื่อยๆ ตามการเพิ่มของ Tip Speed Ratio และ Dynamic Stall จะหมดความสำคัญลงในช่วงของ Tip Speed Ratio ตั้งแต่ 4 เป็นต้นไป ถึงแม้ว่า Dynamic Stall จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลมแต่ปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นมีมากกว่า เช่น ทำให้เกิดเสียงดังในการทำงาน เกิดการสั่น และเกิดความล้าบริเวณใบ



ภาพที่ 17 จำลองการเกิด Dynamic stall ที่ Tip speed ratio ตั้งแต่ 1 2 และ 3 (ก ข และ ค ตามลำดับ)

ที่มา: Fujisawa and Shibuya (2001)



ภาพที่ 18 แสดงภาพการเกิด Dynamics Stall ของใบกังหันลมใบเดียวทั้งสี่ตำแหน่ง

ที่มา: Fujisawa and Shibuya (2001)

การประยุกต์ใช้วิธีเชิงทฤษฎีและ CFD

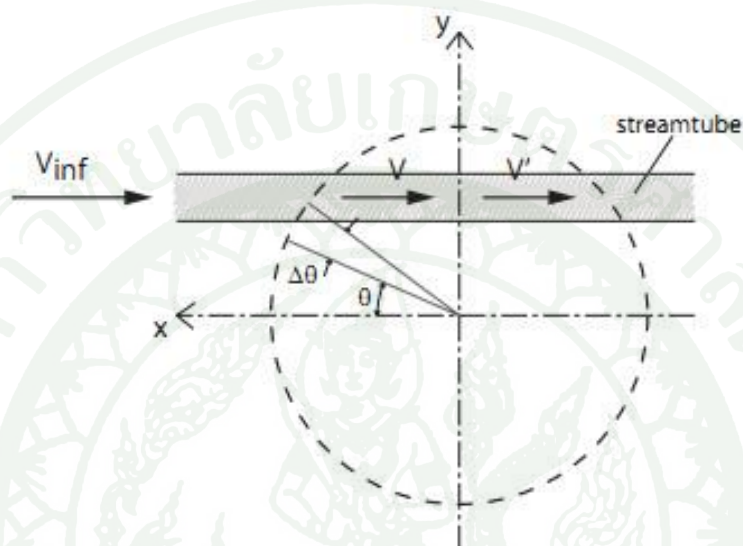
กังหันลมแนวตั้งในยุคปัจจุบันในช่วงเวลาประมาณ 5 ปีนับตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006 กังหันลมแนวตั้งได้พัฒนาอย่างก้าวกระโดด เนื่องจากความรู้ทางอากาศพลศาสตร์ได้ก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น รวมทั้งกังหันลมแนวตั้งเองก็มีการวิจัยมากขึ้น การใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบกังหันลมแนวตั้งทำให้กังหันลมแนวตั้งมีรูปร่างและพฤติกรรมที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น โดยเนื้อหาการออกแบบส่วนใหญ่แล้วยังคงเป็นความลับทางการค้า ในช่วงนี้จะอธิบายเกี่ยวกับงานวิจัยด้านกังหันลมแนวตั้งโดยการใช้ทฤษฎีและวิธีเชิงตัวเลขมาคำนวณวิเคราะห์กังหันลมแนวตั้ง โดยวิธีการจำลองการไหลของกังหันลมแนวตั้งนั้นมีด้วยกันหลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป โดยหลักๆ แล้วสามารถที่จะแยกแบบจำลองได้เป็นสามวิธีหลักๆ ด้วยกันคือ แบบจำลองโมเมนตัม แบบจำลอง Vortex และ CFD โดยในบทนี้จะกล่าวถึงสามแบบจำลองนี้พอสังเขป

แบบจำลองพื้นฐานโมเมนตัม

ทฤษฎีกังหันลมเบื้องต้นอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีโมเมนตัมพัฒนาขึ้นโดย Rankine and Froude (1878) เพื่อใช้วิเคราะห์ใบจักรเรือเดินสมุทร โดยพิจารณาให้ใบจักรเรือเป็นเหมือน Actuator Disk ต่อมามีการพัฒนาให้มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการวิเคราะห์กังหันลม โดยแรงและพลังงานได้จากการถ่ายโอนโมเมนตัม แต่ยังไม่สามารถคำนวณแรงบนโรเตอร์ได้ ต่อมา Glauert (1935) ได้พัฒนาแบบจำลองนี้ให้มีความสมจริงมากยิ่งขึ้น โดยรวมผลกระทบที่เกิดจากการหมุนวนของลม (Wake) โดยที่พลังงานที่ได้จากโรเตอร์พิจารณาจากการถ่ายโอนโมเมนตัมเชิงแกนและโมเมนตัมเชิงมุม ซึ่งแรงที่กระทำบนโรเตอร์มีเฉพาะแรงยก จากนั้น Wilson and Lissaman (1974) ได้พัฒนาต่อจากงานของ Glauert ด้วยการนำแบบจำลอง Actuator Disk รวมเข้ากับทฤษฎี Blade element ซึ่งเป็นการพิจารณาแรงยก และแรงดัดที่กระทำกับหน้าตัดแพนอากาศใน 2 มิติโดยค่าแรงทั้งสองได้จากการทดลอง ทฤษฎีนี้เรียกว่า Strip Theory (Wilson and Lissaman, 1974)

ต่อมาได้พยายามปรับแบบจำลองเพื่อนำมาใช้กับกังหันลมแนวตั้ง เรียกแบบจำลองนี้ว่า Single Streamtube เสนอโดย Templin (1974) เป็นแบบจำลองแรกและเป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุดในการคำนวณค่าต่างๆ ของกังหันลมแนวตั้ง ความเร็วการไหลผ่านกังหันลมถูกสมมุติให้มีความเร็วคงที่ และค่าแรงบนใบต่างๆ ใช้ค่าที่ได้จากการทดลองในแพนอากาศ 2 มิติ โดยต่อมาแบบจำลอง Single Streamtube ได้แยกพัฒนาออกเป็นสองแบบจำลองด้วยกัน โดยแบบจำลองแบบแรกพัฒนาโดย Strickland (1975) มีชื่อว่าแบบจำลอง Multiple Streamtubes โดยทำการเพิ่ม Streamtube ให้ครอบคลุมความเร็วลมที่เปลี่ยนไปในแต่ละตำแหน่ง ทำให้มีความแม่นยำมากขึ้นตามจำนวน Streamtube ที่ใช้ โดยแบบจำลอง Multiple Streamtubes นั้นจะให้ผลที่ดีในช่วง Tip speed ratio และ Solidity ที่ต่ำ (โดยเทอม Solidity มีค่าเท่ากับ Nc/R เทอมไร้หน่วยที่แทนค่าอัตราส่วนจำนวนความยาวคอร์ดคูณจำนวนใบเทียบกับรัศมี) แบบจำลองที่สองที่พัฒนาจาก Single Streamtubes คือ Double actuator disc theory โดยพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาแบบจำลองเดิมๆ ที่ไม่สามารถแยกได้ระหว่างช่วงต้นลมและท้ายลมของกังหันลมแนวตั้ง โดยแบบจำลองนี้จะใช้ Actuator disc สองอันวางต่อกันและแบ่งช่วงการคำนวณก็จะคำนวณช่วงต้นลมและท้ายลมได้ ในยุคต่อมาได้มีการพยายามจะรวมโมเดลทั้งสองที่พัฒนาจาก Single Streamtube นี้เข้าด้วยกัน โดยใช้ชื่อว่าแบบจำลอง Double-Multiple Streamtubes (DMS) เสนอโดย Loth and McCoy (1983) และจาก Paraschivoiu and Delclaux (1983) แบบจำลองนี้สามารถที่จะคำนวณความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไปในแกนตั้งฉากกับการไหลรวมทั้งยังสามารถคำนวณส่วนต้นลมและท้ายลมของกังหันได้อีกด้วยทำให้แบบจำลองนี้มี

ความแม่นยำพอสมควร แต่ก็ยังไม่สามารถคำนวณแผนอากาศที่มีลักษณะไม่สมมาตรได้แม่นยำเท่าที่ควรและยังพบว่าเมื่อกังหันลมมีค่า Solidity มาก แบบจำลอง DMS จะมีปัญหาในการเข้าสู่คำตอบด้วย

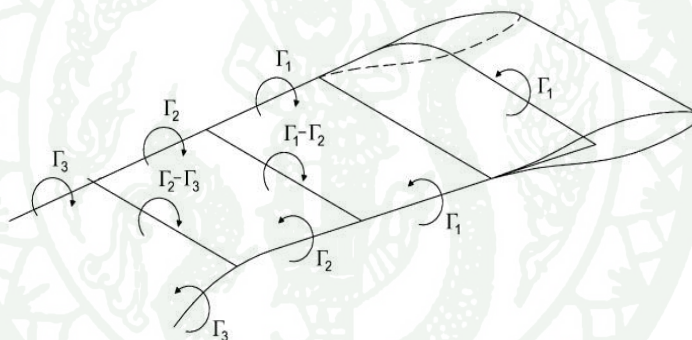


ภาพที่ 19 ภาพ 2 มิติในการคำนวณของแบบจำลอง multiple streamtube

Vortex model

แบบจำลอง Vortex เป็นหนึ่งในแบบจำลองการไหลที่มีประสิทธิภาพ โดยพื้นฐานของแบบจำลองนั้นเป็นการคำนวณโดยอาศัยเส้นแรงหมุนวนที่กระทำบนใบ โดยหลักการอย่างง่ายของแบบจำลองคือการสร้าง Vortex filament หรือ lifting line ขึ้นมาแทนที่ในแต่ละส่วนของใบ จากภาพที่ 20 และนำไปคำนวณโดยใช้ Helmholtz theorems of vorticity (Helmholtz, 1858)

Larsen (1975) เป็นคนแรกที่น่าเสนอแบบจำลอง Vortex ขึ้นมาใช้กับกังหันลมแนวตั้ง โดยใช้ Vortex System ในการคำนวณกังหันลมแนวตั้ง แต่อย่างไรก็ตามโมเดลในช่วงแรกนี้สมมุติให้มุมปะทะมีค่าน้อยเกินไปทำให้ การเกิด stall ไม่ถูกนำมาคำนวณด้วย แบบจำลอง Vortex นั้นมีข้อเสียสำคัญคือจำเป็นจะต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก



ภาพที่ 20 Vortex system สำหรับ single blade element

พลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ (CFD)

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ทฤษฎีด้านพลศาสตร์ของไหลสามารถนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ไหลของกังหันลมแนวตั้งได้ แม้ว่าจะยังต้องมีการปรับปรุงเรื่องความแม่นยำอยู่ก็ตาม แต่กระบวนการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ก็ยังให้ผลที่ดีอยู่เมื่อเทียบกับแบบจำลอง Vortex และแบบจำลองโมเมนตัม ทั้งยังสามารถที่จะคำนวณการไหลในสถานะไม่คงตัว (Unsteady) ได้อีกด้วย แต่วิธีนี้นั้นจำเป็นต้องใช้การเมชเข้ามาช่วย การเมชนี้เองมีส่วนสำคัญที่จะทำให้ผลที่ออกมานั้นมีความถูกต้องและแม่นยำ โดยจากสถานะของกังหันลมแนวตั้งเองที่เป็นการคำนวณในสถานะไม่คงตัวด้วยแล้ว จำเป็นจะต้องใช้เวลาและทรัพยากรคอมพิวเตอร์ในการคำนวณมาก

แต่เนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ก้าวหน้าไปมาก คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถหาซื้อได้ในราคาไม่แพงมาก ในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธี CFD เข้ามาวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ของกังหันลมแนวตั้งต้นแบบ 2 กิโลวัตต์ โดยในบทนี้จะอธิบายหลักการวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พอสังเขป

การไหลของของไหลถูกควบคุมโดยสมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัม ซึ่งสมการอนุพันธ์มวลในรูปของสมการอนุพันธ์โดยใช้สัญลักษณ์เชิงเวกเตอร์ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (21)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการหาผลเฉลยด้วย CFD งานวิจัยนี้ใช้หลักการสังเกตการหมุน ซึ่งตามหลักการความเร็วสัมพันธ์ทำให้มองเห็นตัวใบกังหันอยู่กับที่ ดังนั้นความสัมพันธ์กับความเร็วลมสัมพันธ์กับความเร็วลมสัมบูรณ์เป็น $U_r = U - (\Omega \times r)$ ซึ่งทำให้เกิดเทอมความเร่งขึ้นมาสองพจน์ในสมการโมเมนตัม คือความเร่งเหวี่ยง และความเร่งคอริโอลิส

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมที่ทำการหมุนแกนอ้างอิงในรูปของความเร็วสัมพันธ์ และไม่คิดแรงจากความโน้มถ่วง สามารถเขียนได้ดังนี้ (Batchelor, 1967; Greitzer, 2004)

$$\frac{\partial \rho U_r}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_r U_r) + 2\rho \Omega \times U_r + \rho \Omega \times (\Omega \times r) = \nabla \cdot \sigma_r \quad (22)$$

เมื่อ $2\rho\Omega \times U_r$ คือแรงคอริโอลิส และ $\rho\Omega \times (\Omega \times r)$ คือแรงเหวี่ยง σ_r คือเทนเซอร์ของความเค้นในของเหลวแบบนิวโตเนียน ในอีกทางหนึ่งสมการโมเมนตัมสำหรับแกนอ้างอิงหมุนสามารถเขียนอยู่ในรูปของความเร็วมุมได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_r U) + \rho(\Omega \times U) = \nabla \cdot \sigma \quad (23)$$

โดยเทอม $\rho(\Omega \times U)$ เป็นการรวมเอาแรงคอริโอลิสและแรงเหวี่ยงเข้าด้วยกัน เมื่อนำมารวมกับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยวิธี Eddy viscosity เทนเซอร์ของความเค้นจะได้

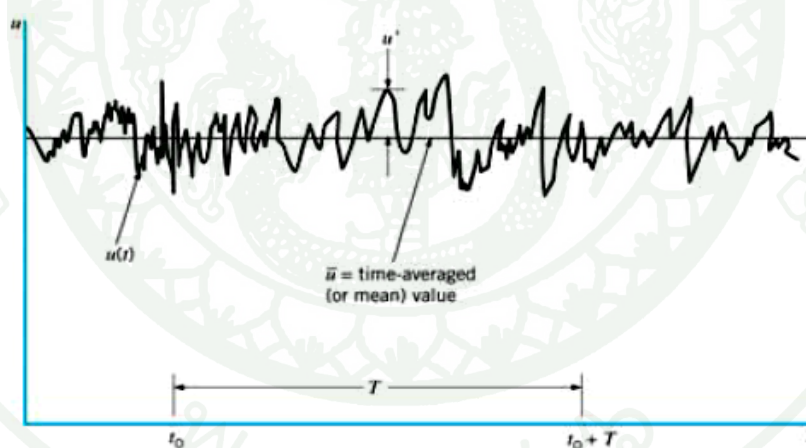
$$\sigma = -\left(P + \frac{2}{3}\mu_{eff}\nabla \cdot U\right)I + \mu_{eff}[\nabla U + (\nabla U)^T] \quad (24)$$

เมื่อ $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ โดย μ เป็นความหนืดของของไหล ส่วน μ_t เป็นความหนืดเสมือนที่ได้จากการจำลองการไหลของความปั่นป่วนที่เรียกว่า Eddy viscosity ซึ่งจะต้องคำนวณจากสมการความปั่นป่วน ซึ่งต้องพึ่งพาแบบจำลองความปั่นป่วนที่จะกล่าวในลำดับต่อไป

แบบจำลองความปั่นป่วน

การไหลที่ค่าเลข Reynolds number สูงกว่าค่า Reynolds numberวิกฤต สถานะการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งการไหลจะเปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติของของไหลอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นการแก้ปัญหการไหลแบบปั่นป่วนทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีเชิงตัวเลขจึงเป็นเรื่องยากและใช้เวลาในการคำนวณนาน ดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามจำลองความไม่เป็นระเบียบของการไหลของการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อใช้กับวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข แต่ก่อนจะกล่าวถึงแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเหล่านั้น จำเป็นต้องทราบพฤติกรรมและคุณสมบัติพื้นฐานของความปั่นป่วนในการไหลของของไหล

ความเร็วและคุณสมบัติต่างๆ ของการไหลแบบปั่นป่วนจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังภาพที่ 21 โดย $u(x, y, x, t)$ เป็นคุณสมบัติของของไหลและเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลา



ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน

ที่มา: Versteeg and Malalasekera (1995)

แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard $k - \varepsilon$ เป็นการจำลองถึงการทดลองโดย turbulent viscosity เป็นฟังก์ชันของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (turbulence kinetic energy, k) และอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (dissipation of turbulence kinetic energy, ε) โดยมีสมการ 2 สมการของ k และ ε

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (25)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (26)$$

โดย G_k คือพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ย, G_b คือพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัว, Y_m คือค่าการกดอัดได้ ซึ่งมีผลต่อความปั่นป่วนในการไหล, $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ เป็นค่าคงที่, σ_k และ σ_ε คือค่า Prandtl number ของ k และ ε ตามลำดับ แบบจำลองของค่า turbulent viscosity, μ_t คือ

$$\mu_t = \rho C_\mu (k^2 / \varepsilon) \quad (27)$$

ซึ่ง C_μ เป็นค่าคงที่ โดยทั่วไปค่าคงที่ในสมการการถ่ายเทข้างต้นจะมีค่าเป็น

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k - \varepsilon$

RNG $k - \varepsilon$ เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ประดิษฐ์จากสมการนาเวียร์-สโตกส์ที่ใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Renormalization Group (RNG) แบบจำลองนี้จะมีค่าคงที่แตกต่างจากแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ เดิมและเพิ่มทอมในสมการได้เป็น

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (28)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (29)$$

$$\text{ที่} \quad C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (30)$$

$$\text{และ} \quad \eta = S k / \varepsilon, \quad S = (2 S_{ij} S_{ij})^{1/2} \quad (31), (32)$$

ค่าคงที่ของสมการ

$$C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} = 1.68, C_\mu = 0.0845, \sigma_k = 0.7194, \sigma_\varepsilon = 0.7194, \eta_0 = 4.38 \text{ และ } \beta = 0.012$$

แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k - \varepsilon$

แบบจำลอง Realizable $k - \varepsilon$ ถูกคิดขึ้นโดยกลุ่มนักวิจัย Shih (Fluent user's guide, 2001) เป็นแบบจำลองที่แตกต่างจาก 2 แบบจำลองข้างต้น คือ การประดิษฐ์ความสัมพันธ์ eddy-viscosity โดยหาค่า C_μ จากข้อเสนอของ Reynolds สร้างสมการ ε ด้วยสมการพลศาสตร์ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k - \varepsilon$ มีสมการส่งถ่ายคือ

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \dots \\ & \dots + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (34)$$

$$\text{ที่ } C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (35), (36), (37)$$

ค่าคงที่ของสมการ

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0 \text{ และ } \sigma_\varepsilon = 1.2$$

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

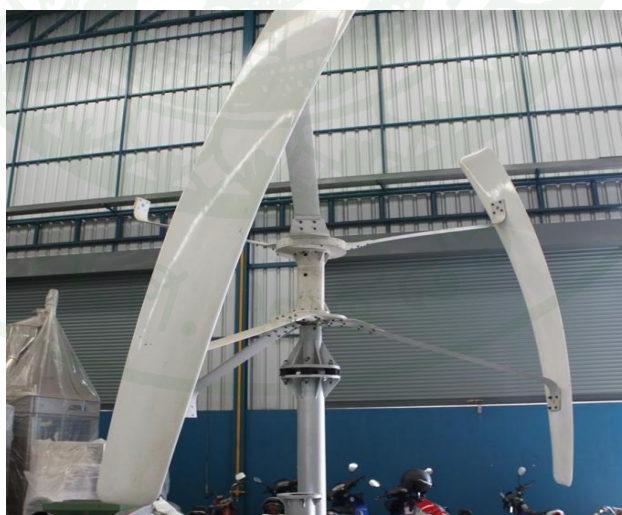
1. เครื่องวิศวกรรมย้อนรอย แบบเลเซอร์ รุ่น Laser ScanArm V3 ยี่ห้อ FARO
ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่บวกลบ 0.053 มิลลิเมตร
2. ต้นแบบกังหันลมแนวตั้งกำลังผลิตกระแสไฟฟ้า 2 กิโลวัตต์ ประกอบด้วย
 - 2.1 ใบกังหันลม 3 ใบ
 - 2.2 ก้านยึดกังหันลม 3 ชุด
 - 2.3 เสากังหันลม
 - 2.4 เจนเนอเรเตอร์
 - 2.5 ชุดควบคุมกังหันลม 1 ชุด
3. เครื่องคอมพิวเตอร์
4. โปรแกรม Ansys fluent 13 และ Gambit สำหรับการเมชและวิเคราะห์การไหลของ
กังหันลมแนวตั้ง

ภาพที่ 22 แสดงกังหันลมแนวตั้งต้นแบบขนาดกำลังผลิตกระแสไฟฟ้า 2 กิโลวัตต์ มีใบกังหันลมจำนวน 3 ใบมีระยะห่างในแต่ละใบห่างกัน 120 องศา ความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันลมอยู่ที่ 3 เมตร ขนาดคอร์ดของเพนอากาศกังหันลมยาว 0.4 เมตร มีความหนาประมาณ 0.06 เมตร โดยกังหันลมต้นแบบขนาดกำลังผลิตกระแสไฟฟ้า 2 กิโลวัตต์มีคุณสมบัติตามตารางที่ 3 โดยกังหันลมสามารถเริ่มทำงานได้ที่ความเร็วลมต่ำกว่า 1 เมตรต่อวินาที สามารถต่อเข้ากับระบบส่งจ่ายได้ หรือจะเป็นแบบ stand-alone โดยจ่ายไฟเก็บไว้ในแบตเตอรี่

โดยจะเห็นได้ว่าจากคุณสมบัติของกังหันลมแนวตั้งต้นแบบมีอัตราการที่ผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 12 เมตรต่อวินาที แต่จากสถิติความเร็วลมในพื้นที่ที่มีศักยภาพของประเทศไทยอยู่ที่ประมาณ 6-7 เมตรต่อวินาทีดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธี CFD ในการจำลองสภาวะลมต่างๆ ของกังหันลมแนวตั้งใน 2 มิติ

ตารางที่ 3 รายละเอียดของกังหันลมต้นแบบ

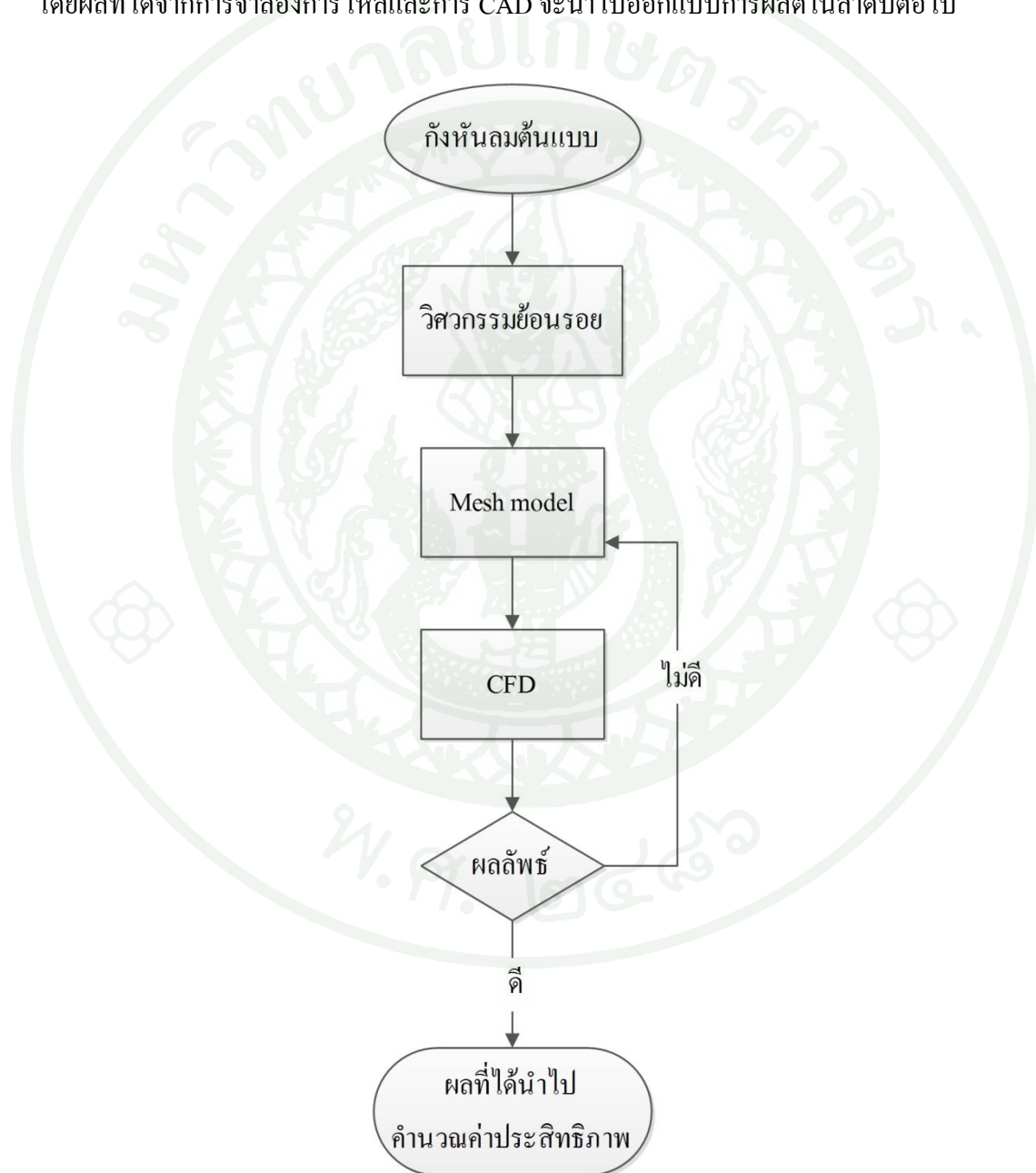
รายละเอียดของกังหันลมต้นแบบ	
กำลังผลิต	2 กิโลวัตต์
อัตราการที่ผลิตกระแสไฟฟ้า	12 เมตรต่อวินาที
เริ่มทำงาน	น้อยกว่า 1 เมตรต่อวินาที
เริ่มผลิตกระแสไฟฟ้า	2.5 เมตรต่อวินาที
รับลมได้สูงสุด	60 เมตรต่อวินาที
ความยาวใบ	3 เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันลม	3 เมตร



ภาพที่ 22 กังหันลมแนวตั้งต้นแบบกำลังผลิตกระแสไฟฟ้า 2 กิโลวัตต์

วิธีการ

จากภาพที่ 23 กระบวนการวิจัยในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็นสองส่วนหลักๆ ส่วนที่หนึ่งคือการใช้วิธีวิศวกรรมย้อนรอยในการทำโมเดลคอมพิวเตอร์เพื่อออกแบบการผลิต (CAD) และส่วนที่สองการใช้วิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ (CFD) ศึกษาพฤติกรรมของกังหันลมที่สภาวะลมต่างๆ โดยผลที่ได้จากการจำลองการไหลและการ CAD จะนำไปออกแบบการผลิตในลำดับต่อไป



ภาพที่ 23 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของงานวิจัยนี้

Computational-Aided design (CAD)

การทำโมเดลคอมพิวเตอร์นั้นสามารถช่วยให้ผู้ผลิตและนักวิจัยสามารถที่จะปรับปรุงต้นแบบได้ก่อนการผลิตจริงๆ การใช้วิธี Computational-aided design (CAD) จึงมีความสำคัญในกระบวนการผลิตสมัยใหม่อย่างยิ่ง ด้วยข้อดีดังต่อไปนี้

- ช่วยให้การวางแผนการผลิตทำได้ง่ายมากยิ่งขึ้น
- สามารถปรับปรุงต้นแบบได้ก่อนกระบวนการผลิต
- สะดวกในการวัดต่างๆ โดยไม่จำเป็นต้องถอดประกอบหลายครั้ง
- สะดวกและรวดเร็วต่อการทำงาน
- สามารถทำแบบได้ง่าย

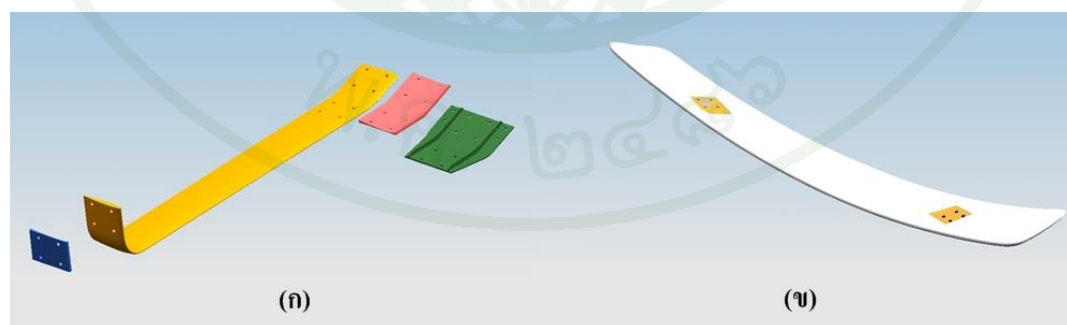
ด้วยข้อดีต่างๆ เหล่านี้ทำให้วิธีการ CAD เป็นที่นิยมมากในอุตสาหกรรม ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการ CAD มาใช้ในการทำงานด้วย เนื่องจากกังหันลมแนวตั้งนั้นมีขนาดใหญ่ ไม่สะดวกในการเคลื่อนย้ายและถอดประกอบหลายๆ ครั้ง ทำให้มีความจำเป็นจะต้องสร้างโมเดลจำลองของกังหันลมขึ้นมา เพื่อที่จะสะดวกในการวิเคราะห์ห้วง และออกแบบการผลิตในลำดับต่อไป

ด้วยเหตุความจำเป็นที่จะต้องสร้างโมเดลคอมพิวเตอร์ของกังหันลมแนวตั้ง 2 กิโลวัตต์ขึ้นมา จึงใช้วิธีวิศวกรรมย้อนรอย ระบบเลเซอร์ เพื่อสามารถวัดชิ้นงานที่ซับซ้อนแบบกังหันลมแนวตั้งได้ ตามภาพที่ 24



ภาพที่ 24 อุปกรณ์และวิธีการวิศวกรรมย้อนรอย

วิธีวิศวกรรมย้อนรอยทำเฉพาะในส่วนการหมุนของก้านหั่นลมแนวตั้ง ได้แก่ ใบพัดก้านหั่นลม และชุดก้านยึดใบ แสดงจากภาพที่ 25 จะได้โมเดล 3 มิติในคอมพิวเตอร์ โดยมีขนาดเท่ากับต้นแบบ 1:1 หลังจากได้โมเดลแล้วจำเป็นต้องทำการปรับปรุงพื้นผิวของโมเดลให้มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ห่ออากาศพลศาสตร์ โดยการปรับปรุงผิวแสดงในภาพที่ 26 ซึ่งวิศวกรรมย้อนรอยจะได้ภาพที่ 26 (ก) ผิวมีลักษณะหยาบ ทำการสร้างพื้นผิวใหม่แสดงในภาพที่ 26 (ข) ในโปรแกรมจนได้พื้นผิวที่ดีขึ้นในภาพที่ 26 (ค) หลังจากปรับปรุงผิวแล้วจะได้โมเดลก้านหั่นลมแนวตั้งทั้งหมด โดยแสดงในภาพที่ 27 เป็นการประกอบโมเดลคอมพิวเตอร์ที่ได้ทั้งหมด



ภาพที่ 25 โมเดล 3 มิติที่ได้จากกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย (ก) ชุดยึดใบก้านหั่นลม (ข) ใบก้านหั่นลม



ภาพที่ 26 แสดงขั้นตอนการปรับปรุงผิวหลังจากการขั้นตอนวิศวกรรมย้อนรอย



ภาพที่ 27 โมเดลคอมพิวเตอร์ (CAD) ของกังหันลมแนวตั้งต้นแบบ

Computational-Aided Engineering (CAE)

การนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการช่วยแก้ปัญหาทางวิศวกรรมรูปแบบต่างๆ สามารถแสดงผลออกมาเป็นภาพกราฟิกสะดวกต่อการสื่อสาร ประกอบด้วยโปรแกรมหลากหลายแบบตามแต่ปัญหาที่ทางผู้ออกแบบและวิจัยต้องการ เช่น

- วิเคราะห์ความเครียดบนส่วนประกอบ โดยใช้การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA)
- วิเคราะห์การไหลของของไหลโดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของการไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD)
- การจำลองทางกล (Mechanical event simulation, MES)
- วิเคราะห์การจำลองกระบวนการต่างๆ เช่น การหล่อ การฉีด และการปั๊มของแม่พิมพ์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การวิธีวิเคราะห์การไหลเชิงคำนวณหรือ CFD เข้ามาวิเคราะห์ลักษณะพฤติกรรมต่างๆ ของกังหันลมแนวตั้ง ในสภาวะลมที่แตกต่างกัน 2 กรณี โดยกรณีแรกคือสภาวะความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที เป็นสภาวะลมเฉลี่ยของประเทศไทย (พื้นที่ที่มีศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานลม) และกรณีที่สองคือสภาวะความเร็วลมที่กังหันลมแนวตั้งนี้ออกแบบไว้ที่ 12 m/s เพื่อจะประเมินการทำงานของกังหันลมแนวตั้งต้นแบบนี้ในประเทศไทย โดยทำการวิเคราะห์โมเดลทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติ โดย 2 มิติเป็นภาพตัดขวางของกังหันลมแนวตั้งนี้ที่กึ่งกลางใบ การวิเคราะห์ 3 มิติ เป็น โมเดล 1:1 ของกังหันลมแนวตั้ง

โดยลักษณะกระบวนการของ CFD นั้นสามารถแบ่งได้ 3 กระบวนการด้วยกัน ดังนี้

- เตรียมประมวลผล (Pre-processing): การกำหนดแบบจำลองและปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมเข้าไปในแบบจำลอง
- ขั้นตอนการวิเคราะห์แก้ปัญหา : ใช้คอมพิวเตอร์แก้ปัญหา โดยความเร็วในการคำนวณขึ้นอยู่กับความสามารถของคอมพิวเตอร์ที่ใช้
- หลังประมวลผล (Post-processing) : แสดงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือทางการมองเห็นแสดงผลออกมา โดยขั้นตอนนี้จะอยู่ในบทผลและวิจารณ์

เตรียมประมวลผล (Pre-processing)

ขั้นตอนเตรียมประมวลผลในพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณนั้น ประกอบด้วย การสร้างโดเมน การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและการกำหนดโมเดลการคำนวณ ขั้นตอนทั้งหมดจะทำได้ในโปรแกรมสองโปรแกรมด้วยกันนั่นก็คือโปรแกรม Gambit สำหรับการสร้างเมชโมเดลและโปรแกรม Ansys FLUENT 13 สำหรับการคำนวณการไหลเชิงคำนวณหรือ CFD เพื่อหาค่าทอร์คและคุณสมบัติการไหลของอากาศ ณ สภาวะต่างๆ ตามที่ได้กำหนด (Flow condition)

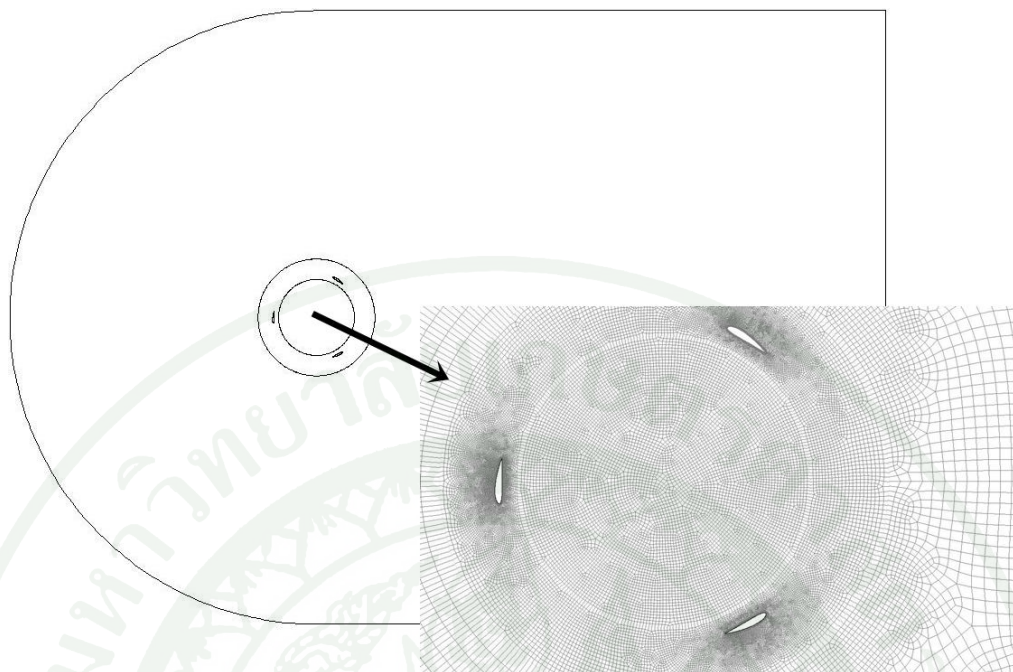
การสร้างโดเมน

เนื่องจากกังหันลมแนวตั้งมีพฤติกรรมแบบ Unsteady กื่อกังหันลมแนวตั้งจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงต่างๆ ที่เกิดบริเวณใบกังหันลม เช่น แรงยก แรงต้าน ความเร็วลมที่เกิดขึ้น มุมปะทะ เป็นต้น ทำให้กังหันลมแนวตั้งจำเป็นต้องใช้วิธีการคำนวณแบบ unsteady ด้วย ดังนั้นใน CFD จึงเลือกใช้วิธี Sliding mesh เพื่อที่จะทำให้กังหันลมแนวตั้งหมุนและคำนวณทอร์คที่ได้ในแต่ละช่วงการหมุนที่ทำการกำหนด ในโปรแกรม

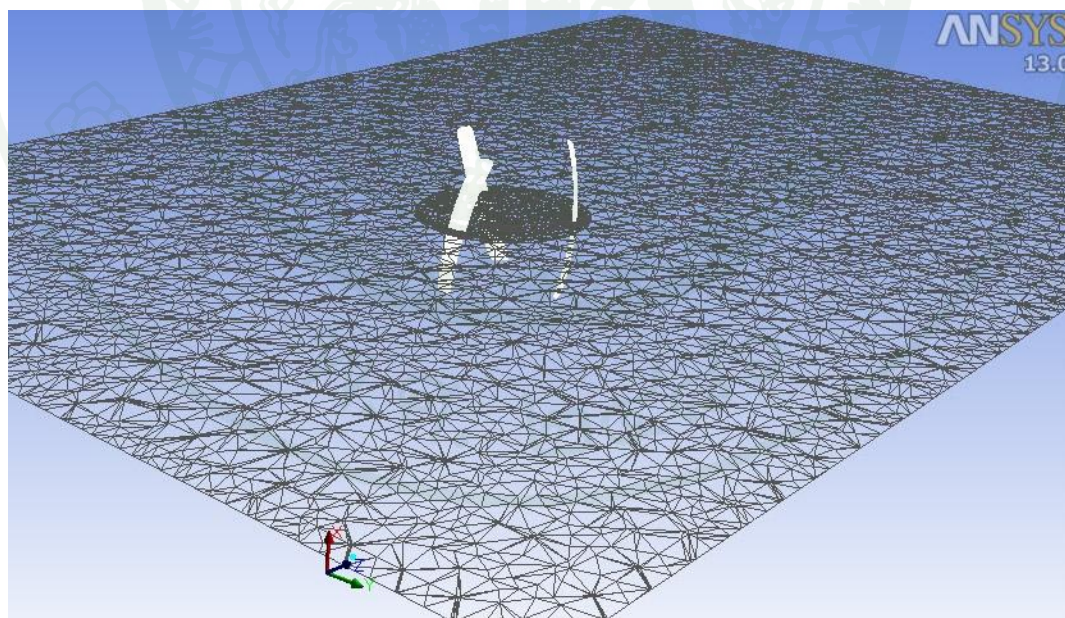
การสร้างโดเมนใช้โปรแกรม Gambit โดยใช้เทคนิควิธีการ Sliding mesh โดยวิธีการนี้จะแบ่งส่วนของโดเมนเป็น 2 ส่วนหลักด้วยกันนั้นคือ

1. ส่วนที่เคลื่อนที่ ส่วนนี้แทนส่วนของใบพัดกังหันลม และเป็นส่วนที่เราจะใช้ในการคำนวณเป็นหลัก ดังนั้นในส่วนนี้จะมีปริมาณเมชหนาแน่นกว่าบริเวณอื่นๆ โดยในส่วนนี้จะหมุนและสามารถกำหนดความเร็วในการหมุนได้ในโปรแกรม
2. ส่วนอยู่กับที่ แทนสถานะแวดล้อมของกังหันลมแนวตั้ง โดยในส่วนนี้จำเป็นต้องสร้างโดเมนให้มีขนาดใหญ่เพียงพอ ไม่ให้ส่งผลกระทบต่อส่วนเคลื่อนที่

การเมชบริเวณใบกังหันลมแนวตั้งแสดงในภาพที่ 28 และภาพที่ 29 ทั้ง 2 มิติและ 3 มิติตามลำดับ โดยการวิเคราะห์จะวิเคราะห์เฉพาะในส่วนของใบกังหันลมเท่านั้น ไม่คำนึงถึงผลของลมที่เกิดจากเสาและก้านยึดใบกังหันลมโดยการเมชจะเน้นไปที่บริเวณในส่วนของอากาศรอบใบกังหันลม เพื่อให้การคำนวณมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยใช้วิธี grid independence แล้วค่าทอร์คที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนเมช โดยใน 2 มิติมีจำนวนเมชทั้งหมด 100,720 cells ซึ่งแต่ละใบมีจำนวน nodes ใบละ 800 nodes และ 3 มิติมีจำนวนเมชทั้งหมด 1,201,350 cells



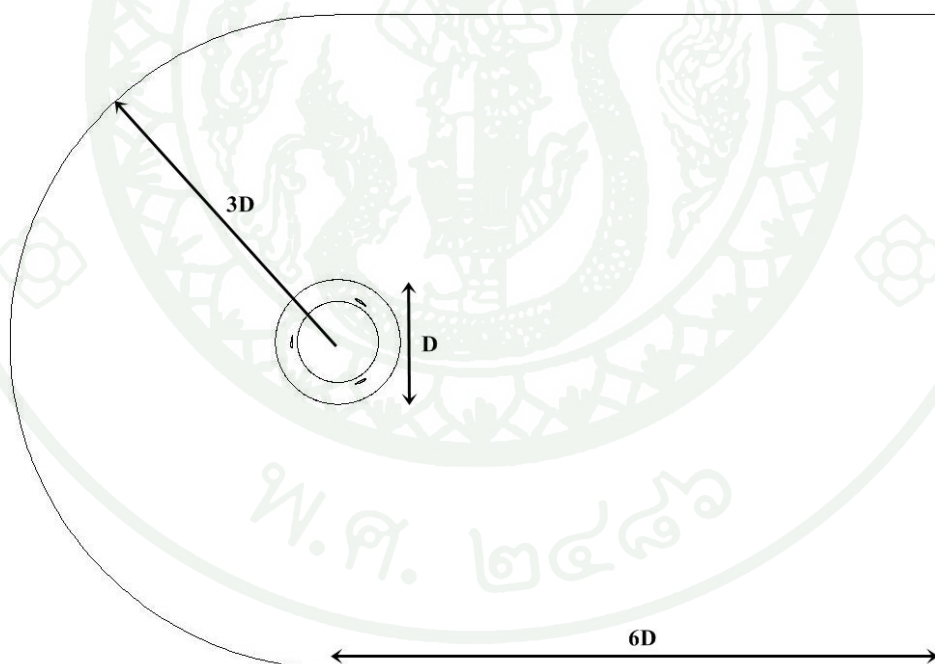
ภาพที่ 28 โดเมนและการเมชบริเวณรอบก้นหลุมแนวตั้ง 2 มิติ



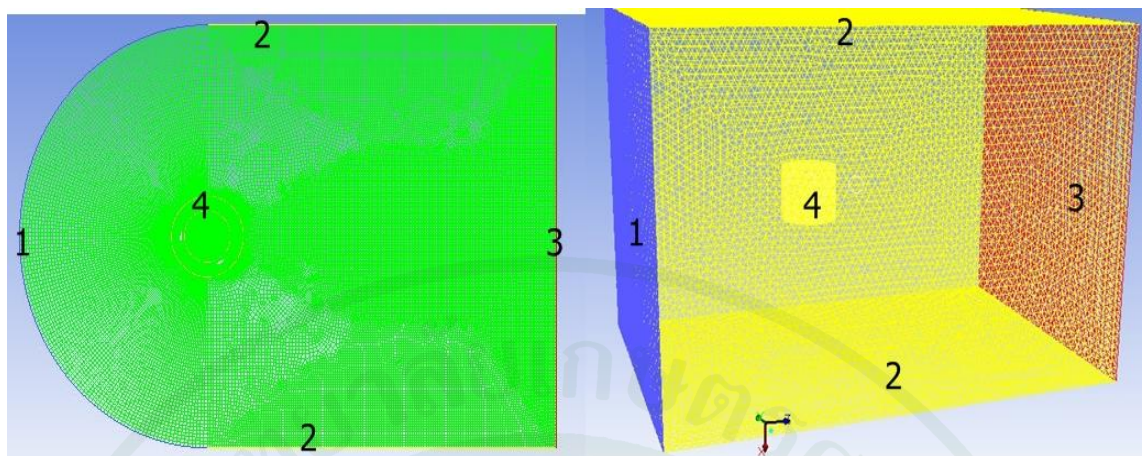
ภาพที่ 29 โดเมนก้นหลุมแนวตั้งใน 3 มิติ

ขนาดของโดเมนนั้นมีความสำคัญอย่างมาก โดยขนาดของโดเมนที่น้อยเกินไปนั้นจะส่งผลต่อโดเมนบริเวณที่เคลื่อนที่และทำให้ค่าทอร์คที่ได้มีความไม่ถูกต้อง ดังนั้นการสร้างโดเมนให้มีขนาดเพียงพอและไม่ส่งผลต่อบริเวณที่จะคำนวณจึงมีความจำเป็น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ขนาดโดเมนซึ่งอ้างอิงจากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันลม โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันลมมีขนาดเท่ากับ 3 เมตร ด้านหน้าและด้านหลังโดเมนมีระยะห่างจากศูนย์กลางของกังหันลม 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9 เมตร และด้านหลังโดเมนมีระยะ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางกังหันลมเท่ากับ 18 เมตร แสดงดังภาพที่ 30

Boundary condition กำหนดดังภาพที่ 31 โดยด้าน (1) Inlet กำหนดเป็น velocity inlet ซึ่งกำหนดให้ลมไหลเข้ามามีความเร็วลมคงที่ (2) ด้านข้างสองข้างกำหนดเป็น symmetry (3) Outlet กำหนดเป็น Pressure outlet กำหนดให้ความดันบริเวณด้านหลังมีค่าคงที่ (4) บริเวณใบกังหันลมกำหนดเป็น wall กำหนดให้ใบกังหันลมหมุนไปตามโซนโดยความเร็วสัมผัสเป็น 0



ภาพที่ 30 ขนาดของโดเมน



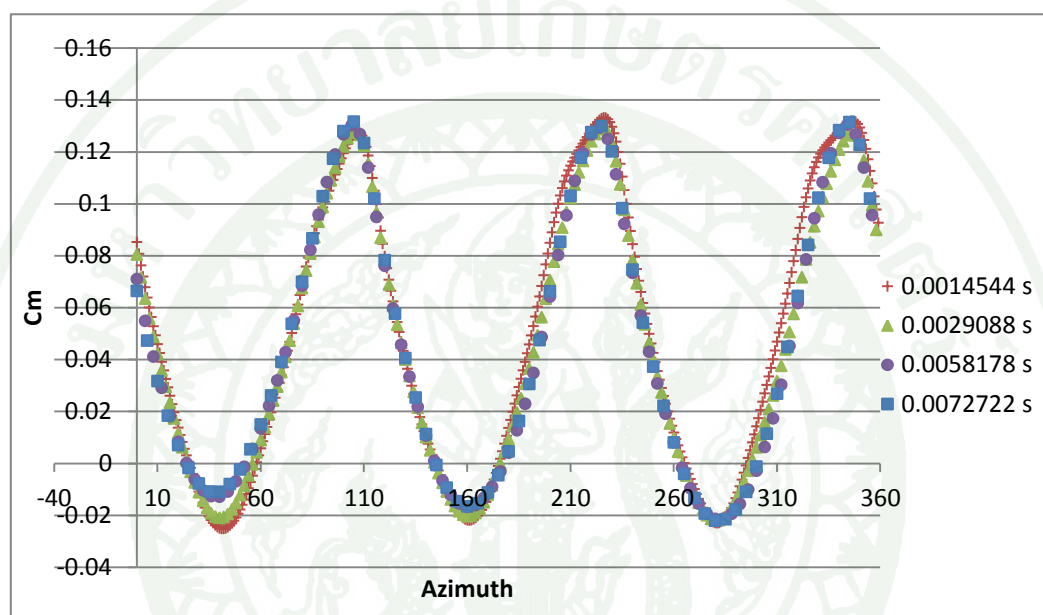
- | | |
|---------------------------|-----------------------------|
| 1. Inlet : Velocity inlet | 3. Outlet : Pressure Outlet |
| 2. Side : Symmetry | 4. กังหันลม : Wall |

ภาพที่ 31 เงื่อนไขขอบเขตการคำนวณ

Flow condition ที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้แสดงในตาราง 4 โดยกำหนดให้กังหันลมหมุนที่ความเร็วลมคงที่ โดยความเร็วลมเฉลี่ยของประเทศไทยในพื้นที่ที่มีศักยภาพมีค่าประมาณ 6 เมตรต่อวินาที และความเร็วลมที่กังหันลมต้นแบบผลิตกระแสไฟฟ้าได้ (rated wind speed) ที่ 12 เมตรต่อวินาที โดยกำหนดให้ความเร็วในการหมุนของกังหันลมมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ เพื่อให้ได้ค่า Tip Speed Ratio (TSR) ที่ต่างๆ กัน ค่า Time step size คือการกำหนดให้โปรแกรมคำนวณค่าออกมาในแต่ละ time step size โดยสามารถแปลงค่า Azimuth มีหน่วยเป็นองศา ได้จากสูตร

$$Time\ step\ size = \frac{(azimuth)\pi}{180\omega} \quad (38)$$

โดยในกราฟ (ภาพที่ 32) ได้ทำการตรวจสอบความละเอียดของค่า Time step size จากกัณฑ์ลมที่ TSR 1.5 ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที กำหนดให้ค่า time step size ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 1 องศา (1.45 millisecond) 2 องศา (2.90 millisecond) 4 องศา (5.81 millisecond) และ 5 องศา (7.27 millisecond) ผลที่ได้พบว่าที่ 2 องศาค่าทอร์กเฉลี่ยที่ได้มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว จึงเลือกใช้ค่าที่ 2 องศาในทุกการคำนวณ โดยค่า time step size ในแต่ละ TSR แสดงในตารางที่ 4

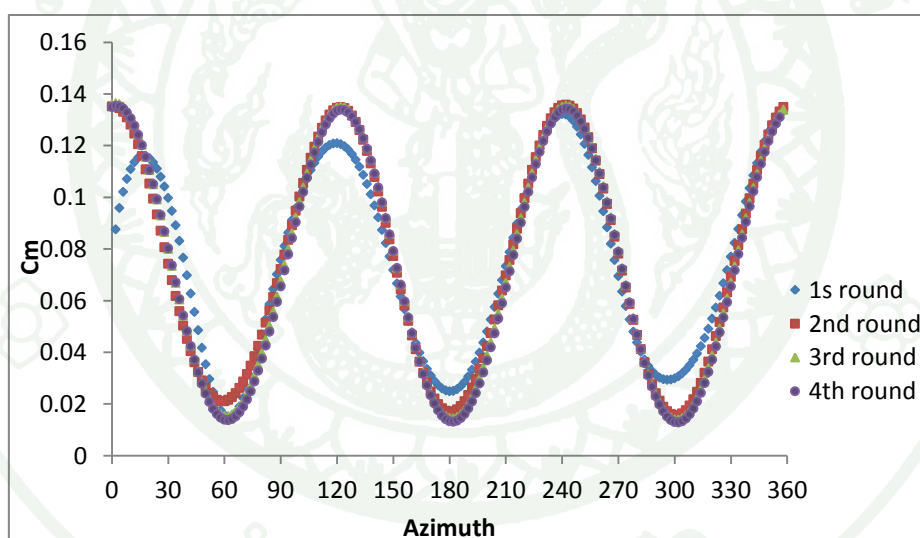


ภาพที่ 32 แสดงค่า Moment coefficient ที่เกิดขึ้นใน 1 รอบการหมุนที่ Time step size ต่างกัน

ตารางที่ 4 สภาวะการไหล (Flow condition) ที่กำหนดลงไปโปรแกรมในแต่ละ TSR

	ความเร็วลม (Inlet) 6 เมตรต่อวินาที		ความเร็วลม (Inlet) 12 เมตรต่อวินาที	
TSR	ความเร็วการหมุน (เรเดียนต่อวินาที)	Time step size (วินาที)	ความเร็วการหมุน (เรเดียนต่อวินาที)	Time step size (วินาที)
1.0	4	0.008726	8	0.0043633
1.5	6	0.0058177	12	0.00290882
2.0	8	0.0043633	16	0.00218166
2.5	10	0.0034906	20	0.001745329
3.0	12	0.0029089	24	0.00145444
3.5	14	0.00249089	28	0.00124666
4.0	-	-	32	0.00109083

วิธีการคำนวณเลือกใช้การคำนวณแบบ Unsteady แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศจะใช้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-stokes equations) และแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon โดยกำหนดให้ความหนาแน่นของอากาศคงที่ กำหนดให้ค่าน้อยสุดของการ convergence มีค่าเท่ากับ 10^{-6} และการคำนวณใช้ 120 iteration ต่อ time step การคำนวณใช้ค่าทอร์คเฉลี่ยใน 1 รอบการหมุนของกังหันลม โดย 1 รอบการหมุนของกังหันลมมีค่าเท่ากับ 180 time step โดยการคำนวณแบบ unsteady ค่าที่ได้ในช่วงแรกจะยังไม่นิ่งพอ ดังนั้นในการคำนวณจำเป็นต้องรอให้ค่าที่ได้มีความนิ่งและไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว ในงานวิจัยนี้เลือกใช้รอบในการคำนวณที่ 4 เป็นต้นไป โดยจากกราฟ (ภาพที่ 33) แสดงให้เห็นถึงค่าทอร์คในแต่ละรอบการคำนวณ ค่าที่ได้จะเริ่มใกล้เคียงกันและมีค่าไม่แตกต่างกันมากตั้งแต่รอบที่ 4 เป็นต้นไป แต่ในบางกรณีก็ต้องใช้การคำนวณมากกว่ารอบที่ 4 (พวก TSR สูงๆ 3.5 และ 4.0) ดังนั้นจะเลือกใช้ค่าทอร์คที่ได้จากการคำนวณในรอบที่ 4 เป็นต้นไป



ภาพที่ 33 กราฟแสดงค่า Moment coefficient ที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบการคำนวณ

ผลและวิจารณ์

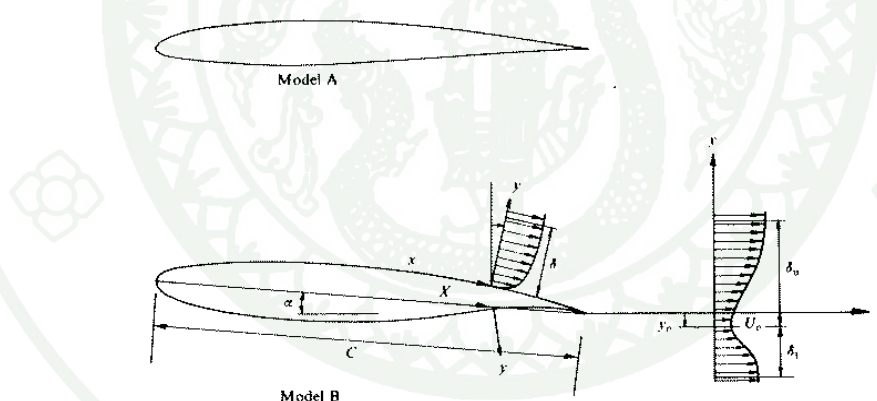
การใช้โปรแกรมวิเคราะห์การไหลโดยใช้ CFD มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องตรวจสอบผลของการจำลองการไหล โดยการตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณจะมีด้วยกันสองวิธี นั่นคือวิธีแรกคือการ Verification เป็นการทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม โดยจะทวนสอบการ input ต่างๆ ค่าที่ได้จากการคำนวณจะต้องมีความแม่นยำในแต่ละครั้งของการคำนวณ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีหลายวิธีในการทวนสอบความแม่นยำของแบบจำลอง ซึ่งได้แทรกอยู่ในบทอุปกรณและวิธีการแล้ว เช่นการทดสอบ Grid independence การตรวจค่า time step size และการตรวจสอบค่า convergence วิธีที่สองคือการ Validation คือการสอบเทียบผลการคำนวณกับการทดลอง (Experimental data) วิธีนี้มีความสำคัญเพื่อที่จะสอบเทียบว่าแบบจำลองที่กำหนดนั้นมีความถูกต้องกับความจริงเพียงใด โดยนำผลที่ได้จากวิธีการไหลเชิงคำนวณมาเทียบกับผลที่ได้จากการวัดในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้การจำลองแบบ 2 มิติจะใช้วิธีการสอบเทียบผลกับการผลการทดลองของแพนอากาศ โดยจากพฤติกรรมของกังหันลมจะเห็นได้ว่ากังหันลมแนวตั้งมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมปะทะอยู่ตลอดเวลาในช่วงของการหมุน ด้วยการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะนี้เองทำให้ค่าแรงยก แรงต้านของกังหันลมเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้การทดสอบความแม่นยำของโมเดลในการหาค่าแรงยก ในมุมปะทะต่างๆ ว่าโมเดลที่กำหนดนี้สามารถที่จะครอบคลุมการทำงานของกังหันลมได้ดีเพียงใด ส่วนแบบจำลองใน 3 มิติจำเป็นจะต้องใช้การทดสอบจากอุโมงค์ลม ซึ่งมีความจำเป็นต้องใช้อุโมงค์ลมที่มีขนาดใหญ่เพียงพอสำหรับกังหันลมต้นแบบ เพราะฉะนั้นใน 3 มิติยังไม่สามารถที่จะหาผลทดสอบที่น่าเชื่อถือพอจะมาเทียบกับผลการคำนวณได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเน้นไปที่ผลการคำนวณใน 2 มิติเป็นหลัก

การสอบเทียบ

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 กรณีด้วยกันเพื่อให้ครอบคลุมการทำงานของกังหันลมแนวตั้ง โดยในจำนวนจะเลือกโมเดลการทดสอบ (Computational model) ควบคุมปริมาณเมฆรอบแพนอากาศและลักษณะของโดเมนให้เหมือนกับการคำนวณในกังหันลมต้นแบบ โดยปริมาณ node รอบใบกังหันลมอยู่ที่ 800 node เท่ากัน

โดยในกรณี 1 เป็นการทดสอบเทียบกับการทดลองของ NAKAYAMA (1985) เป็นการทดสอบแพนอากาศแบบไม่สมมาตรมีขนาดความยาวคอรัค 24 นิ้วหรือประมาณ 610 มิลลิเมตร แสดงในภาพที่ 34 โดยแพนอากาศนี้จะมีลักษณะตามตารางที่ 5 แบ่งเป็นสองแบบคือ model A และ model B โดยในการทดสอบนี้จะทดสอบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความดันหรือ Pressure coefficient (C_p) บริเวณผิวแพนอากาศ



ภาพที่ 34 แสดงการทดลองแพนอากาศในสองแบบ model A และ model B

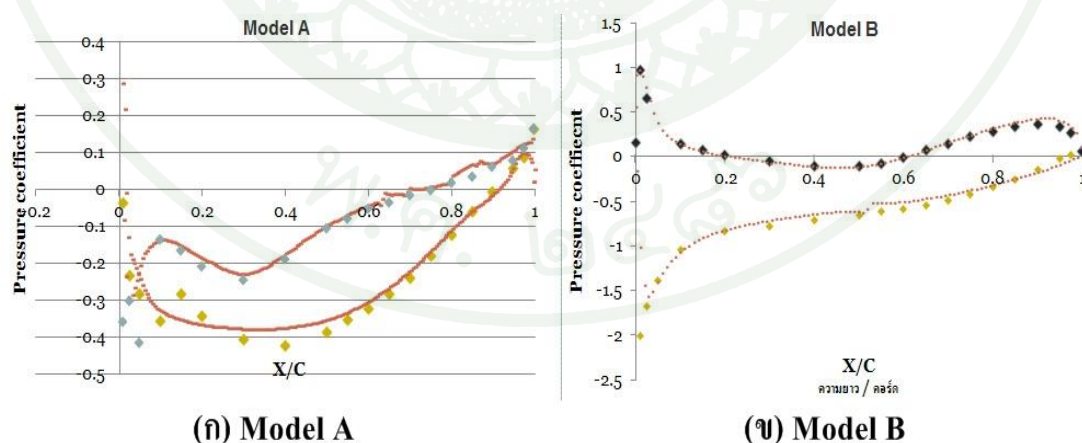
ที่มา: Nakayama (1983)

ตารางที่ 5 ลักษณะของแผนอากาศในกรณีที่ 1

	Model A	Model B
Airfoil	10% thick conventional	12% thick advanced supercritical
Including angle at trailing edge (degree)	10.18°	10.05°
Angle of attack (degree)	0°	4°
Trailing edge thickness (mm)	0.6	0.018

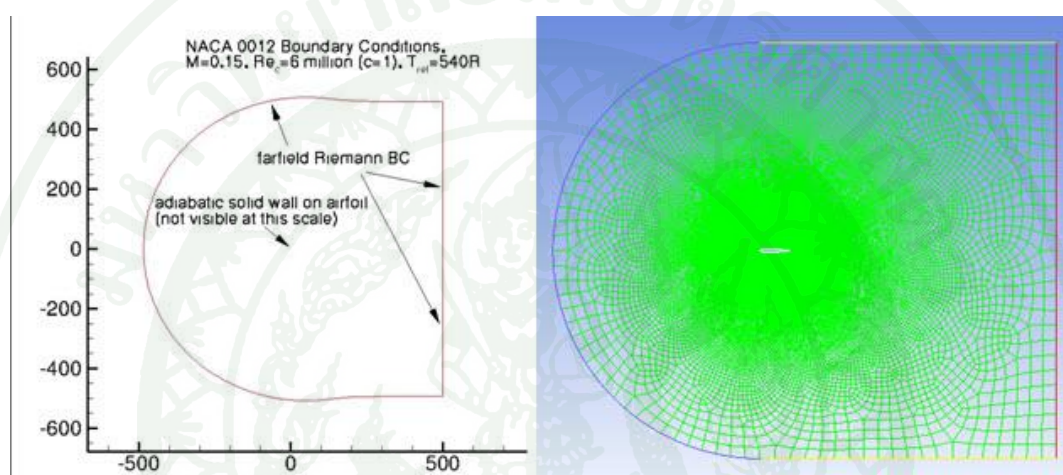
ที่มา: Nakayama (1983)

ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรมสามารถแสดงภาพที่ 35 ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงโดยใช้เส้นสีแดง และข้อมูลแสดงด้วยจุดสีส้มและฟ้า (น้ำเงิน) ผลที่ได้จากโปรแกรมเทียบกับผลการทดลองพบว่าโมเดลสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันที่เกิดขึ้นบนผิวของแผนอากาศได้แม่นยำตลอดความยาวของแผนอากาศในทั้ง 2 โมเดล ซึ่งพิสูจน์ได้ว่าแบบจำลองมีความแม่นยำในการทดสอบแผนอากาศที่มีลักษณะไม่สมมาตร



ภาพที่ 35 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมทั้งสองโมเดลการทดลอง (ก) Model A และ (ข) Model B

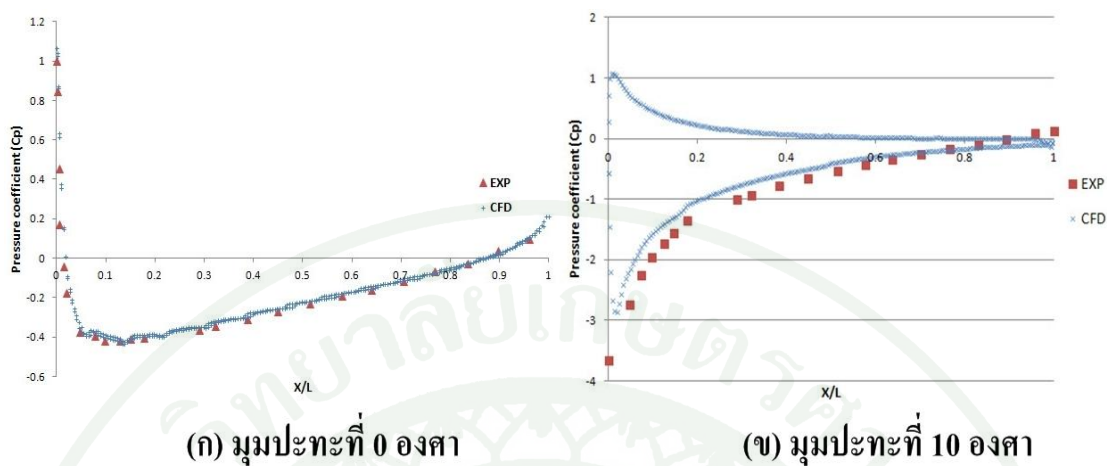
กรณีที่ 2 เป็นการทดสอบแพนอากาศรหัส NACA0012 ใน 2 มิติ ทำการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะและวัดค่าแรงยก แรงดันที่เกิดขึ้นบนผิวแพนอากาศ โดยงานวิจัยนี้เป็นของ NASA Langley Research Center มีจุดประสงค์ในการทดลองเพื่อเป็นข้อมูลในการสอบเทียบกับโมเดลคอมพิวเตอร์ต่างๆ โดยในการทดลองนี้มีค่า Reynolds number ต่อคอร์อยู่ที่ 6 ล้าน เพื่อต้องการทำการทดสอบความแม่นยำของโมเดลที่ Reynolds number สูง ให้ครอบคลุมกับการทำงานของกังหันลมแนวตั้ง ภาพที่ 36 แสดงโดเมนที่ใช้ในการคำนวณ



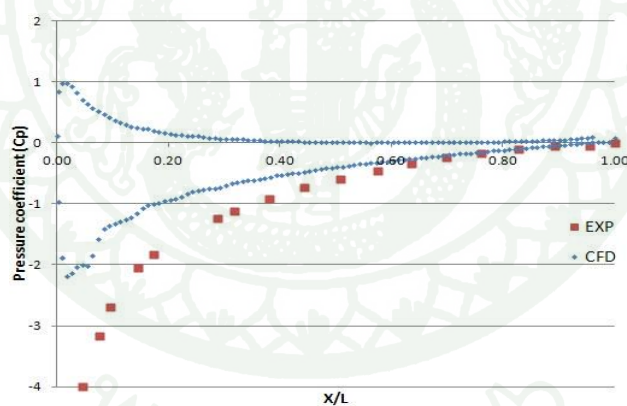
ภาพที่ 36 โดเมนการทดลองในกรณีที่ 2

ที่มา: NASA Langley Research Center (1970)

ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันที่มุมปะทะต่างๆ ที่ 0, 10 และ 15 องศาเทียบกับการทดลองของ Gregory and O'Reilly (1970) แสดงในภาพที่ 37 และ 38 โดยที่ 0 องศา (ภาพที่ 37 ก) พบว่าผลการคำนวณแรงดันที่เกิดขึ้นบริเวณแพนอากาศนั้นมีความสอดคล้องกับผลการทดลองอย่างยิ่ง ภาพที่ 37 (ข) ที่มุมปะทะ 10 องศาผลการคำนวณแรงดันมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยบริเวณขอบหน้าปีกแพนอากาศ (leading edge) และสุดท้ายที่มุมปะทะที่ 15 องศาแสดงภาพที่ 38 ผลการคำนวณแรงดันด้วยโปรแกรมเทียบกับการทดลองพบว่าที่มุมปะทะที่ 15 องศาการคำนวณด้วยโปรแกรมมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองอยู่มาก โดยคลาดเคลื่อนในช่วงส่วนบน (ความดันเป็นลบ) ของแพนอากาศจะได้ค่าความดันลบน้อยกว่าการทดลอง



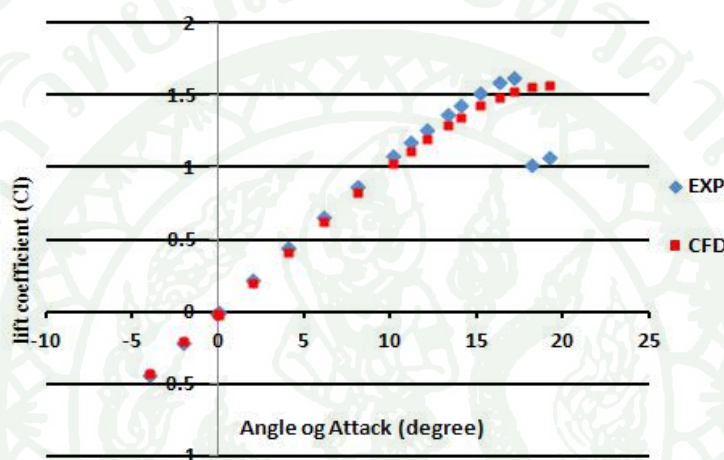
ภาพที่ 37 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันที่เกิดขึ้น จุดต่างๆ ของแผนอากาศเทียบกับการคำนวณจากโปรแกรมที่มุมปะทะ 0 และ 10 องศา



มุมปะทะ 15 องศา

ภาพที่ 38 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันที่เกิดขึ้น จุดต่างๆ ของแผนอากาศเทียบกับการคำนวณจากโปรแกรมที่มุมปะทะ 15 องศา

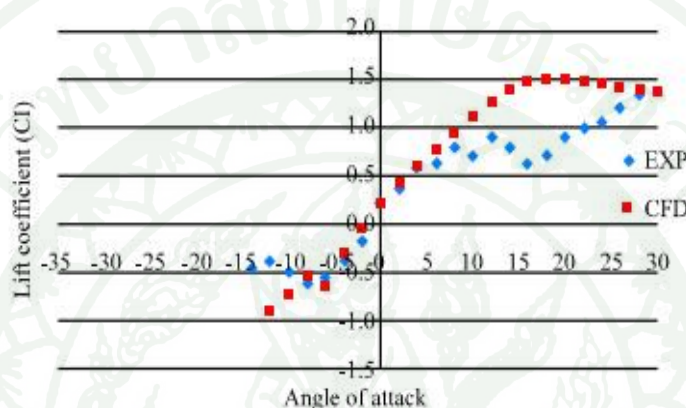
ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่มุมปะทะต่างๆ ตั้งแต่ -5 องศาจนถึง 20 องศา เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Ladson (1988) แสดงในกราฟภาพที่ 39 พบว่าโมเดลการคำนวณ มีความแม่นยำ ที่มุมปะทะประมาณ 15 องศา โมเดลการคำนวณเริ่มมีความแตกต่างจากผลการทดลอง จนกระทั่งที่ 17 องศา ในช่วงที่เกิดการ stall ของแผนอากาศ NACA0012 พบว่าแบบจำลอง ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่คลาดเคลื่อนจากผลทดลองมาก โดยแบบจำลองจะให้ค่าแรงยกที่สูงกว่าความเป็นจริง



ภาพที่ 39 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกในแต่ละมุมปะทะต่างๆ ของแผนอากาศรหัส NACA0012 เทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ ที่ Reynolds number 6×10^6

จากการสอบเทียบผลแบบจำลองกับผลการทดลองในกรณีที่ 2 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่ Reynolds number สูง แบบจำลองมีค่าความแม่นยำอยู่ในช่วงมุมปะทะที่ -5 ถึง 15 องศา โดยค่าที่ได้เริ่มมีความคลาดเคลื่อนสูงในช่วงที่เกิดการ stall

กรณีที่ 3 เป็นการทดสอบแพนอากาศรหัส NACA0012 เหมือนกับกรณีที่ 2 แต่แตกต่างกันที่ Reynolds number เท่ากับ 360,000 ดังนั้นในการทำแบบจำลองจะใช้เหมือนกับกรณีที่ 2 โดยในการทดลองนี้เป็นงานของ Sheldahl, R. E. and Klimas, P. C (1986) ผลการคำนวณที่ได้แสดงในกราฟภาพที่ 40 พบว่าที่ Reynolds number ต่ำประมาณ 360,000 นั้นแบบจำลองมีความแม่นยำน้อยลง โดยมีความแม่นยำอยู่ในช่วงมุมปะทะที่ -10 ถึง 10 องศาเท่านั้น

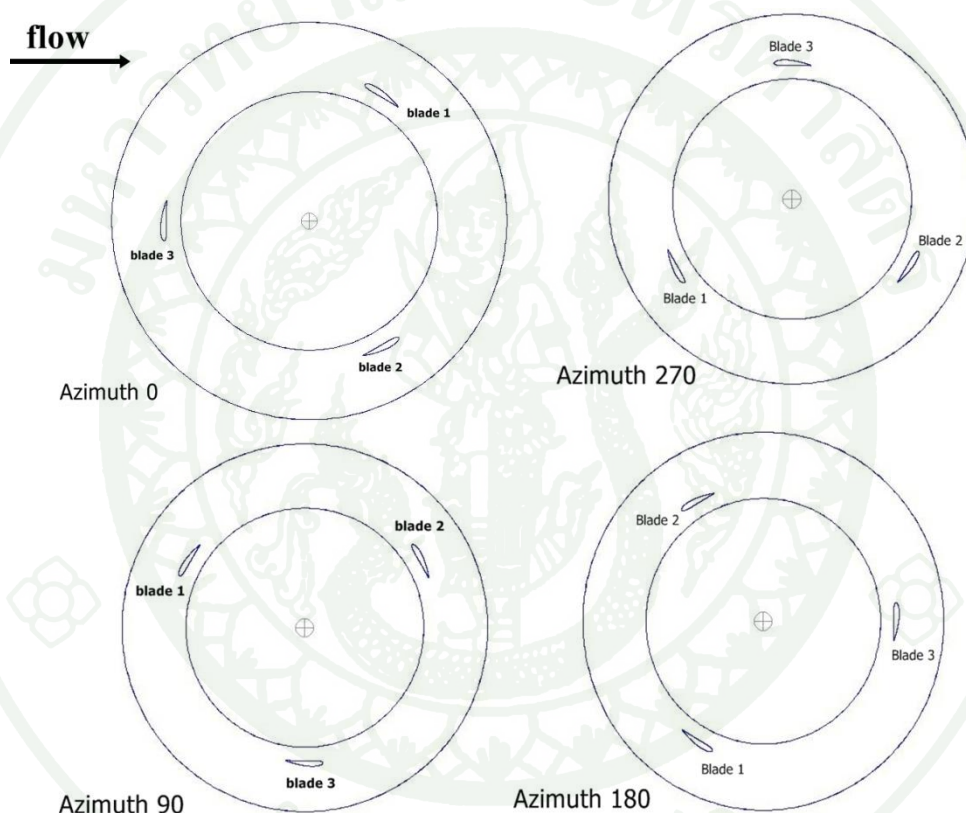


ภาพที่ 40 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกในแต่ละมุมปะทะต่างๆ ของแพนอากาศรหัส NACA0012 เทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ ที่ Reynolds number 3.6×10^5

จากการสอบเทียบ (Validation) พบว่าความแม่นยำของแบบจำลองนั้นยังจำกัดอยู่ โดยที่ Reynolds number 3.6×10^5 แบบจำลองมีความแม่นยำน้อยกว่าโดยมีอยู่ในช่วงมุมปะทะที่ -10 ถึง 10 องศา ส่วนในช่วง Reynolds number สูงที่ $3-6 \times 10^6$ แบบจำลองมีความแม่นยำอยู่ในช่วง -5 – 15 องศา เมื่อเทียบกับกังหันลมแนวตั้งพบว่าแบบจำลองสามารถที่จะคำนวณการเปลี่ยนแปลงของแรงยกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของมุมปะทะได้แม่นยำระดับหนึ่ง ซึ่งตรงกับช่วงการทำงานของกังหันลมแนวตั้ง แต่ก็มีบางส่วนที่แบบจำลองยังไม่ครอบคลุม เช่น บริเวณช่วงที่เกิดการ stall แบบจำลองจะให้ค่าแรงยกที่สูงกว่า และเกิดการ stall ที่ช้ากว่าการทดลอง ดังนั้นในแบบจำลองจึงจะมีความคลาดเคลื่อนบางส่วนที่แบบจำลองไม่สามารถคำนวณได้ตามที่ได้สอบเทียบ แต่ถึงอย่างนั้นก็ตามแบบจำลองนี้ก็ให้ผลที่น่าพอใจระดับหนึ่งในการนำมาใช้งาน

ผลงานวิจัย

การคำนวณจะให้กังหันลมแนวตั้งทำงานที่ Flow condition ที่กำหนด โดยสามารถให้โปรแกรมแสดงค่าทอร์คที่เกิดขึ้นได้โดยตรง ซึ่งจะแสดงผลตาม time step size ที่กำหนด ในงานวิจัยนี้ได้คำนวณค่าทอร์คออกมาทีละ 2 องศาละรอบ จากภาพที่ 41 แสดงการหมุนของโดเมนกังหันลมที่เคลื่อนที่และตำแหน่งของใบกังหันแต่ละใบที่มุมอะซิมุทต่างๆ ใน 2 มิติ



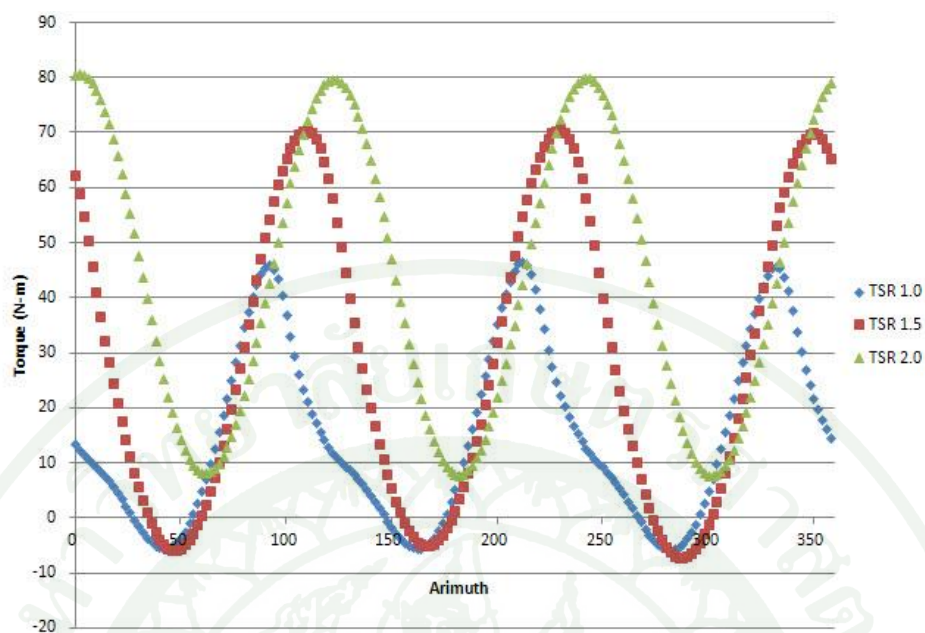
ภาพที่ 41 ตำแหน่งใบกังหันลมทั้งสามใบในการเคลื่อนที่ (มุมอะซิมุท) 1 รอบทิศการหมุนทวนเข็มนาฬิกา

การจำลองการไหลจะแบ่งออกเป็นสองสถานะด้วยกัน คือที่ลมความเร็ว 6 เมตรต่อวินาที และที่ลมความเร็ว 12 เมตรต่อวินาที ค่าทอร์คที่ได้จากแบบจำลองนั้นคำนวณจากแรงที่กระทำบนใบทั้ง 3 ใบ โดยแรงลัพธ์ในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่จะแสดงเป็นค่าบวกและทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่จะแสดงเป็นค่าลบและสามารถนำมาหาค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่อไป โดยค่าทอร์คทั้งหมดในแต่ละ TSR จะแสดงในภาคผนวก ข

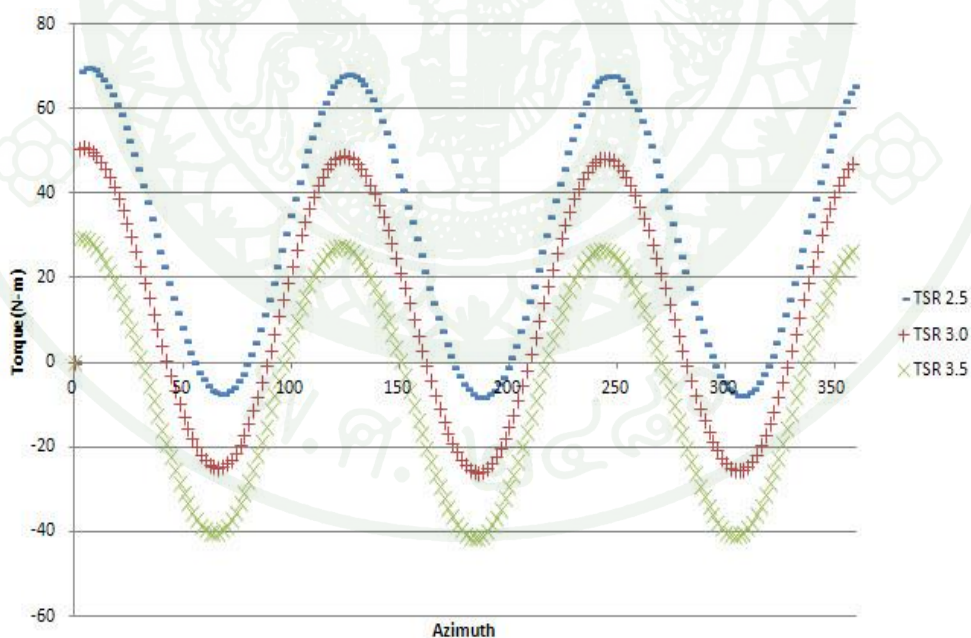
ผลความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที

ผลของการจำลองการไหลแสดงดังภาพที่ 42 และ 43 โดยค่าทอร์คของกังหันลมที่ TSR ต่างๆ ใน 1 รอบการหมุน (0 – 360 องศา) ที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที ทอร์คที่ได้เป็นค่าทอร์คที่เกิดขึ้นบนใบกังหันลมแนวตั้งทั้งสามใบรวมกัน กราฟจะมีลักษณะเป็นคลื่นขึ้นลงและมีการซ้ำรอบทุกๆ 120 องศา ตามระยะห่างของใบกังหันลมแนวตั้ง ภาพที่ 42 จะแสดงทอร์คที่เกิดขึ้นใน TSR ที่ 1.0, 1.5 และ 2.0 ค่าทอร์คที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยค่าทอร์คเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ TSR ที่ 2 ภาพที่ 43 แสดงทอร์คที่เกิดขึ้นในช่วง TSR ที่ 2.5, 3.0 และ 3.5 ช่วงนี้ค่าทอร์คจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าใกล้เคียง 0 ที่ประมาณ TSR ที่ 3.3

จากผลการคำนวณความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาทีพบว่า จะเกิดค่าทอร์คสูงสุดในช่วงระหว่าง TSR 2 - 2.5 หรือมีความเร็วในการหมุนอยู่ในช่วงระหว่าง 8 - 10 เรเดียนต่อวินาที โดยถ้า TSR มากกว่า 2.5 ค่าทอร์คที่เกิดขึ้นจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ ซึ่งเกิดจากการที่เพนอากาศของกังหันลมเกิดแรงต้านมากขึ้นและเกิดแรงยกน้อย ทำให้ค่าทอร์คที่ได้ในบางช่วงเป็นลบ (แสดงในภาพที่ 43 จะเห็นว่า TSR 3.5 บางช่วงของการหมุนจะมีค่าทอร์คเป็นลบ) ซึ่งผลเหล่านี้จะส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกังหันลมแนวตั้งนี้ด้วย ใน TSR ที่ 3.5 ทอร์คเฉลี่ยใน 1 รอบการหมุนมีค่าเป็นลบ และถ้า TSR มากกว่านี้ค่าที่ได้จะติดลบมากขึ้น ซึ่งในการคำนวณนี้ตัดค่าทอร์คที่ติดลบนี้ไม่นำมาคำนวณต่อ



ภาพที่ 42 ทอร์คใน 1 รอบการหมุน TSR 1.0, 1.5 และ 2.0 ที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที

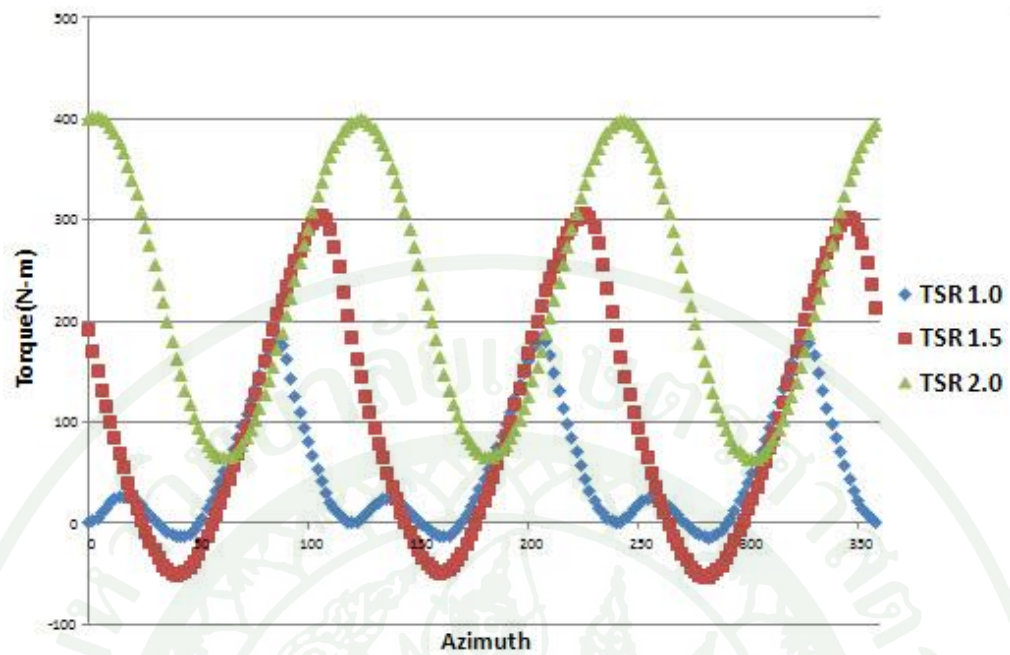


ภาพที่ 43 ทอร์คใน 1 รอบการหมุน TSR 2.5, 3.0 และ 3.5 ที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที

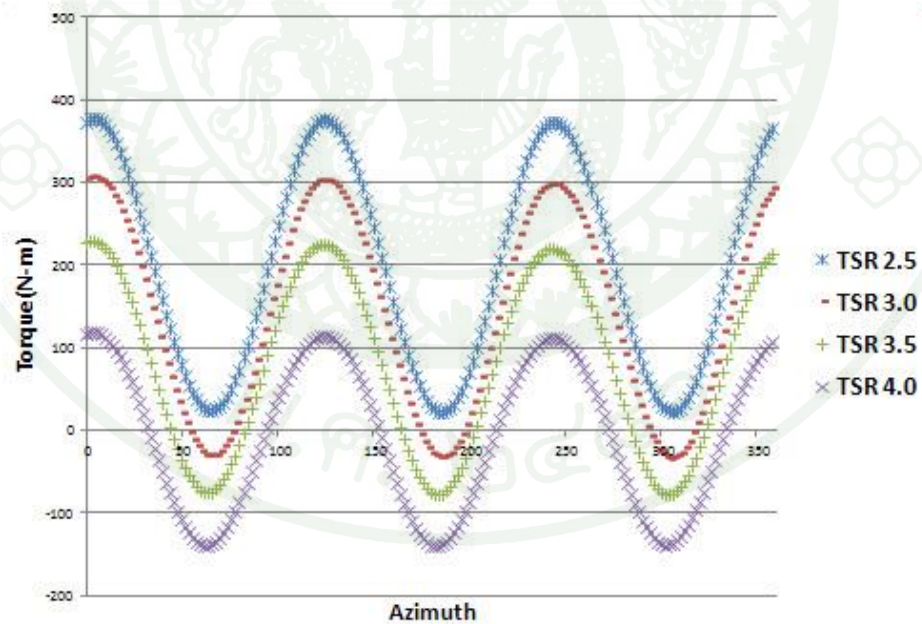
ผลความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที

ภาพที่ 44 และ 45 แสดงค่าทอร์คของกังหันลมที่ TSR ต่างๆ ใน 1 รอบการหมุน (0 – 360 องศาอะซิมุต) ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที โดยกราฟที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับผลของความเร็วลมที่ 6 เมตรต่อวินาที โดยจากภาพที่ 44 แสดงทอร์คที่ TSR 1.0 1.5 และ 2.0 พบว่าทอร์คที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงนี้จนกระทั่งถึงช่วง TSR ที่ 2.5 เป็นต้นไปค่าทอร์คที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลง (ภาพที่ 45) โดยจะเริ่มลดลงจะกระทั่งมีค่าเป็น 0 ที่ TSR ประมาณ 3.9

จากกราฟพบว่าที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที ในช่วงแรกที่กังหันลมแนวตั้งหมุนช้า ที่ TSR 1.0 ถึง 2.0 หรือช่วงความเร็วในการหมุนที่ 8 ถึง 16 เรเดียนต่อวินาที ค่าทอร์คที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะมีค่าทอร์คสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง TSR ที่ 2.0 ถึง 2.5 โดยที่ TSR มากกว่า 2.5 เป็นต้นไปค่าทอร์คที่ได้จะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเป็นศูนย์ที่ TSR ประมาณ 3.9



ภาพที่ 44 ทอร์กใน 1 รอบการหมุน TSR 1.0, 1.5 และ 2.0 ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที



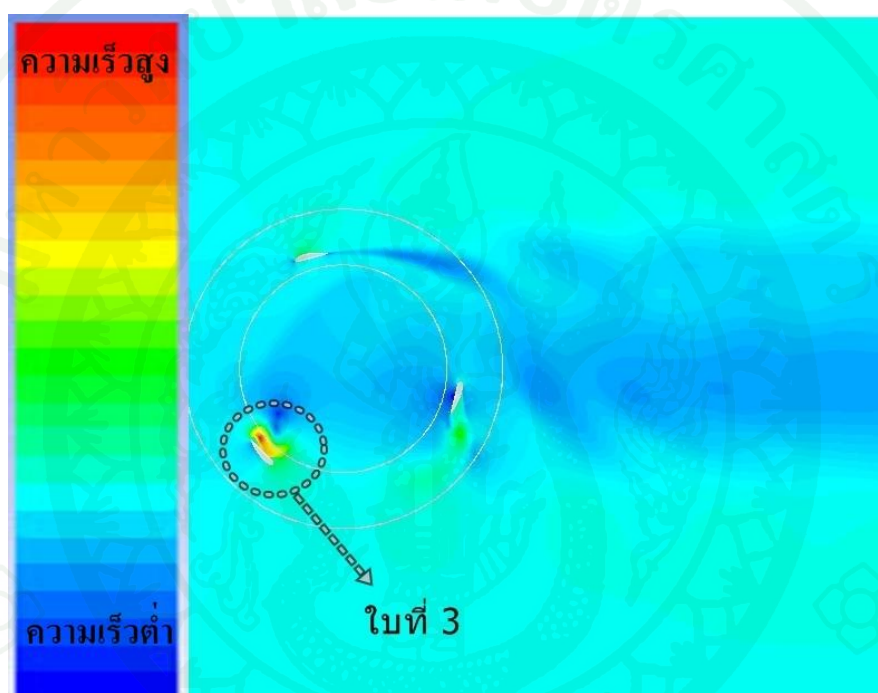
ภาพที่ 45 ทอร์กใน 1 รอบการหมุน TSR 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที

Flow visualization

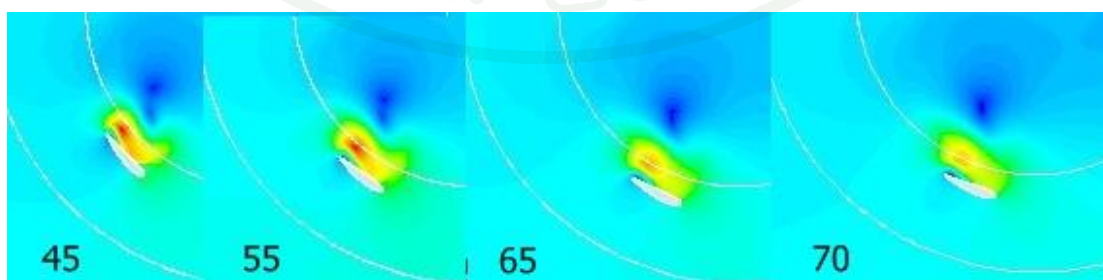
โปรแกรม Fluent นั้นมีความสามารถอย่างยิ่งในการแสดงผลการไหลออกมา โดยสามารถที่จะเลือกการแสดงผลได้หลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นแบบคอนทัวร์ (Contour) หรือเป็นแบบเวกเตอร์ (vector) โดยลักษณะการแสดงผลนั้นจะแทนด้วยระบบแถบสีที่ให้มาในภาพด้วยโดยโทนสีร้อนเช่น สีแดง สีเหลือง สีส้ม จะแทนด้วยค่ามาก โทนสีเย็น เช่น สี ฟ้า น้ำเงิน เขียว จะแทนค่าน้อย

พฤติกรรมหนึ่งที่เป็นเอกลักษณ์ของกังหันลมแนวตั้ง นั่นก็คือการเกิด Dynamic stall โดยปรากฏการณ์นี้จะพบที่ TSR ต่ำๆ ซึ่งจะเป็นลักษณะลมหมุนสองวงเกิดที่บริเวณต้นลม (Upwind side) หมุนในทิศทางตรงกันข้ามเคลื่อนที่ไปส่วนของท้ายลม (Downwind side) โดยในการจำลองการไหลด้วยโปรแกรมพบว่าเกิด Dynamic stall ขึ้นแสดงในภาพที่ 46 – 49 โดยภาพดังกล่าวเป็นกรณีตัวอย่างที่ TSR 1.5 ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที พบว่ามีลักษณะคล้ายงานของ Fujisawa and Shibuya (2001) ซึ่งพฤติกรรมเดียวกันนี้ ในแบบจำลองนี้จะพบว่าจะเกิดขึ้นในช่วงที่ TSR 1 – 1.5 ส่วนที่ TSR มากกว่านี้ลักษณะของ Dynamic stall จะไม่ชัดเท่ากับ TSR ต่ำๆ ซึ่งตรงกับลักษณะของกังหันลมแนวตั้งทั่วไป

จากภาพที่ 46 และ 47 เป็นภาพที่ใบที่ 3 ของกังหันลมอยู่ในตำแหน่ง 45 องศาอะซิมุท โดยจากทิศทางลมเข้าจากซ้ายและออกที่ขวามือของภาพที่ 46 ซึ่งใบที่ 3 จะอยู่ในช่วงต้นลม (Upwind side) ที่ตำแหน่ง 0 - 90 และ 270 - 0 องศาอะซิมุท โดยจากภาพจะแสดงคอมทัวร์ของความเร็วลมที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่าในช่วงต้นลมภาพที่ 47 ลมจะมีลักษณะเป็นวงสองวงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเริ่มก่อตัวขึ้นในช่วงต้นลมและเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ ตามใบกังหันลมสภาวะนี้จะทำให้แรงยกของกังหันลมแนวตั้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

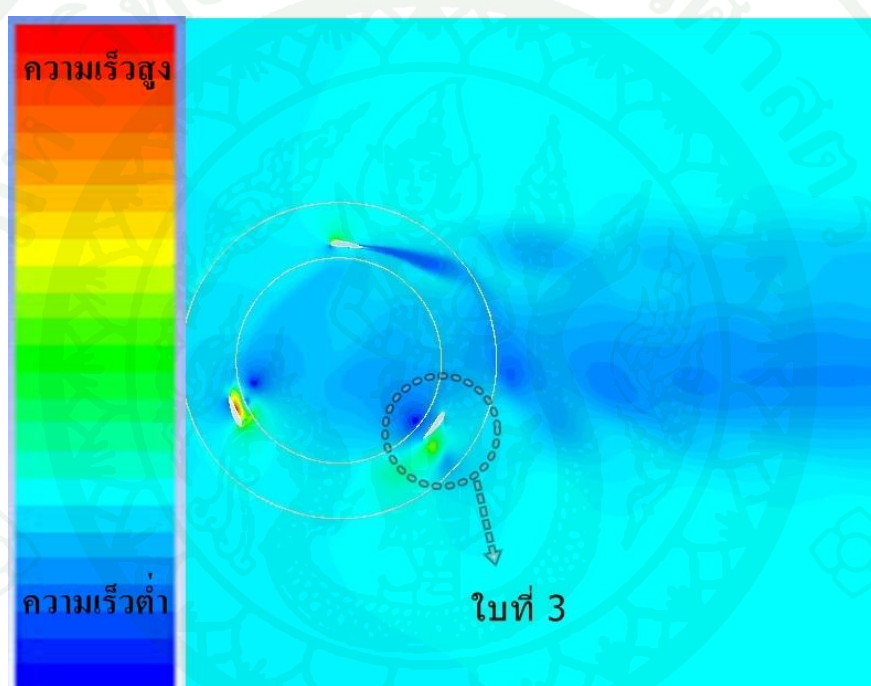


ภาพที่ 46 แสดงคอนทัวร์ความเร็ว (โดยความเร็วอยู่ในช่วง 0.06 ถึง 40.6 เมตรต่อวินาที)ขณะใบที่ 3 ของกังหันลมอยู่ที่ตำแหน่ง 45 องศาอะซิมุท

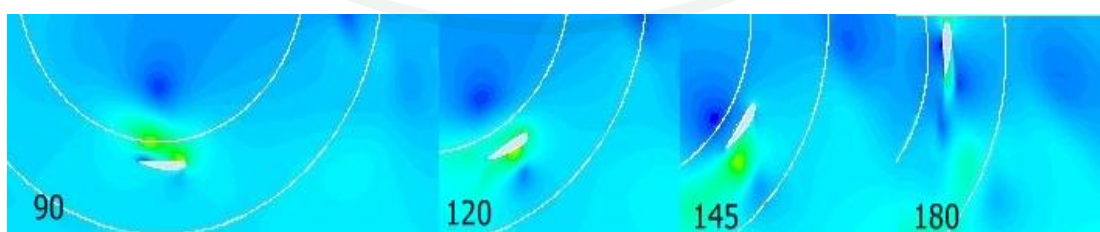


ภาพที่ 47 แสดงคอนทัวร์ความเร็ว ที่ใบที่ 3 ขณะอยู่ในตำแหน่งต้นลม (TSR 1.5 ที่ 12 m/s)

จากภาพที่ 48 และ 49 แสดงใบกังหันลมใบที่ 3 ตำแหน่งที่ 145 องศาเข็มทิศ ซึ่งในขณะนี้ กังหันลมใบที่ 3 เคลื่อนที่มาอยู่ในช่วงท้ายลม (Downwind side) โดยช่วงท้ายลมนั้นอยู่ช่วงตำแหน่ง ที่ 90 – 270 องศาเข็มทิศ โดยจากภาพที่ 49 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วมืดที่ตำแหน่งต่างๆของใบ กังหันลมที่ 3 เคลื่อนที่บริเวณท้ายลม จะเห็นได้ว่า Dynamic stall ที่เกิดขึ้นในส่วนต้นลมส่งผลมายัง ท้ายลมอย่างเห็นได้ชัด ทำให้ช่วงท้ายลมลักษณะของลมมีความปั่นป่วนอย่างมาก โดยลักษณะ ดังกล่าวนี้นำมาให้เกิดการสั่น และส่งผลให้ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นในช่วงนี้มีค่าน้อยกว่าในช่วงต้น ลม

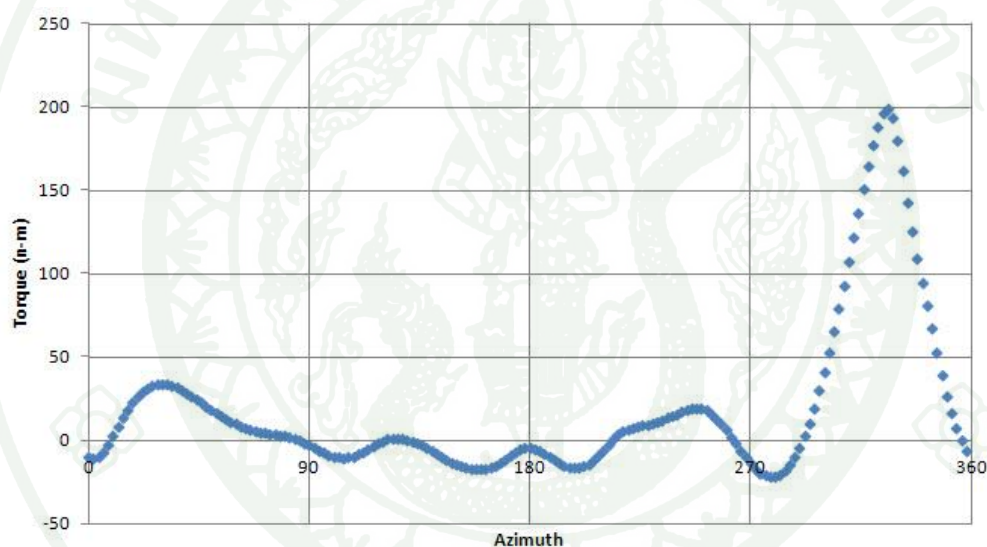


ภาพที่ 48 แสดงคอนทัวร์ความเร็ว (โดยความเร็วอยู่ในช่วง 0.75 ถึง 43.7 เมตรต่อวินาที) ขณะใบที่ 3 ของกังหันลมอยู่ที่ตำแหน่ง 145 องศาเข็มทิศ



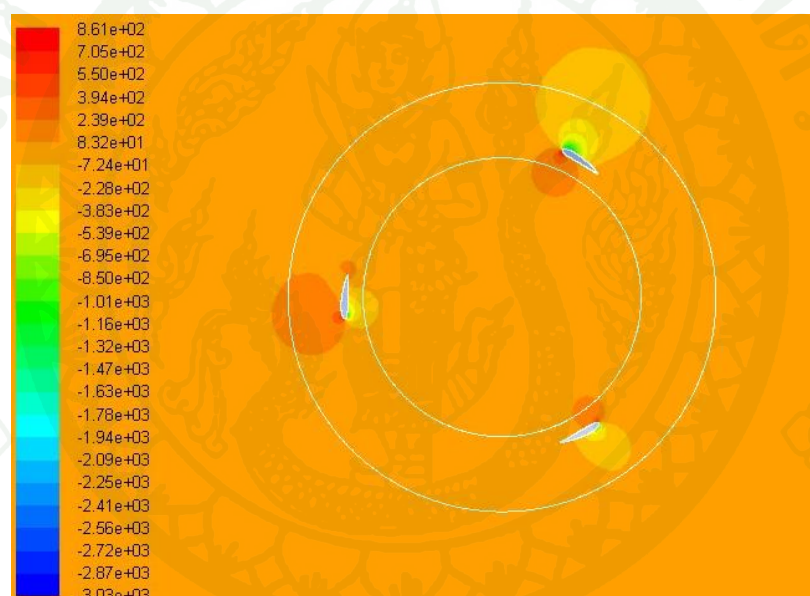
ภาพที่ 49 แสดงคอนทัวร์ความเร็ว ที่ใบที่ 3 ขณะอยู่ในตำแหน่งท้ายลม (TSR 1.5 ที่ 12 m/s)

ผลกระทบจาก Dynamic stall นั้นสามารถแสดงให้เห็นจากกราฟ (ภาพที่ 50) เป็นค่าทอร์กที่เกิดขึ้นจากใบที่ 3 ในช่วงต้นลม (0 – 90 และ 270 - 360) และท้ายลม (90 - 270) จะเห็นได้ชัดว่าในช่วงต้นลม 0 – 90 องศาจะมีทอร์กที่เกิด Dynamic stall ขึ้น ทอร์กที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจะกระทั่งเข้าสู่ช่วงท้ายลมตั้งแต่ 90 – 270 องศาจะมีทอร์กที่ได้จะมีค่าน้อยมาก เนื่องจากในช่วงนี้สภาวะลมนั้นเป็นแบบปั่นป่วน การที่ใบกังหันลมจะสามารถเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานเชิงกลย่อมจะสามารถทำได้น้อยกว่าในช่วงสภาวะปกติ ซึ่งอิทธิพลของ Dynamic stall นั้นยังส่งผลเสียอื่นๆ แก่การทำงานของกังหันลมแนวตั้งเช่น ทำให้กังหันลมแนวตั้งเกิดการสั่นและมีเสียงดังในการทำงาน ดังนั้น Dynamic stall จึงเป็นคุณลักษณะที่ต้องหลีกเลี่ยงถึงแม้ว่าจะทำให้ได้ค่าทอร์กเพิ่มมาเล็กน้อยก็ตาม



ภาพที่ 50 แสดงค่าทอร์กที่เกิดขึ้นในใบที่ 3 ในช่วงมุมอะซิมูทต่างๆ ตั้งแต่ 0 – 360 องศา (ที่ TSR 1.5 และความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที)

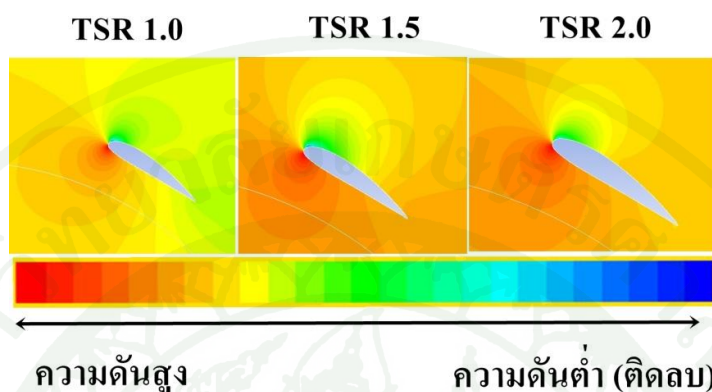
ในการหมุนของกังหันลมแนวตั้งนั้นกังหันลมแนวตั้งจะมีการเปลี่ยนมุมอยู่ตลอดเวลา ลักษณะของแพนอากาศที่ปะทะกับลมก็มีการเปลี่ยนแปลงด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะนี้เอง ส่งผลต่อแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงการหมุนหรือองศาอะซิมุท โดยจากลักษณะของพฤติกรรมของแพนอากาศนั้น การที่ลมปะทะกับกังหันลมจะทำให้ความเร็วลมที่ไหลในส่วนบนและส่วนล่างของกังหันลมต่างกัน โดยในส่วนบนจะมีความเร็วที่มากกว่าส่วนล่าง ด้วยเหตุนี้เองแรงดันของแพนอากาศทั้งสองส่วนจึงมีค่าแตกต่างกันด้วย โดยในส่วนบนแพนอากาศจะมีความดันน้อยหรือติดลบ ส่วนล่างของแพนอากาศจะมีความดันมาก จากภาพที่ 51 แสดงให้เห็นคอนทัวร์ความดันของกังหันลมที่ใบกังหันลม จะเห็นได้ว่าความดันในส่วนครึ่งบนและครึ่งล่างของกังหันลมแนวตั้งเป็นไปตามลักษณะของอากาศพลศาสตร์



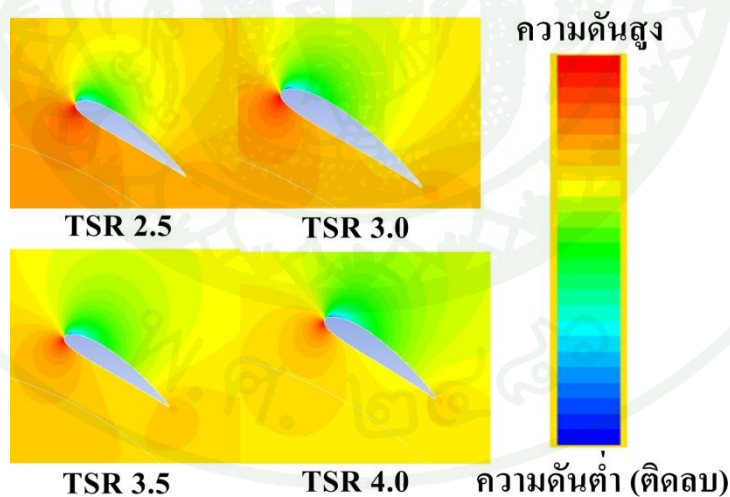
ภาพที่ 51 คอนทัวร์ความดัน (Pascal) ของกังหันลมแนวตั้ง (ที่ TSR 2.5 ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที)

ภาพที่ 52 และ 53 แสดงคอนทัวร์ความดันที่เกิดขึ้นบริเวณใบกังหันลมที่ 1 โดยใบนี้อยู่ที่ตำแหน่ง 240 องศาอะซิมุทที่ TSR ต่างๆ กัน โดยภาพที่ 52 จะแสดง TSR ที่ 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยแสดงที่ภาพ a, b และ c ตามลำดับ และภาพที่ 53 แสดงแรงดันที่เกิดขึ้นที่ TSR 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 โดยจะเห็นได้ว่าช่วงแรก TSR แรงดันติดลบโดยคอนทัวร์แสดงเป็นสีเขียว จะมีลักษณะวงที่เล็กจนกระทั่งที่ TSR มีค่ามากขึ้นบริเวณนี้จะมีความกว้างขึ้นเรื่อยๆ จนถึงที่ TSR เท่ากับ 3.5 และ 4.0 จะมีวงที่กว้างมากขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นความดันที่เปลี่ยนแปลงไปตามการหมุนที่เร็ว

มากยิ่งขึ้นของแผนอากาศ ค่าทอร์คที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีค่าน้อยตามไปด้วย เนื่องจากเกิดค่าแรงกดมากกว่าแรงยกทำให้แรงลัพธ์รวมของกังหันลมในช่วงนี้น้อยลง พบว่าที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง TSR ที่ 2.0 - 2.5 ทอร์คจะมีค่ามากที่สุดหลังจากนั้นจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ



ภาพที่ 52 คอนทัวร์ความดัน (Pascal) ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาทีของกังหันลมแนวตั้งที่ TSR ตั้งแต่ 1.0 (ความดันอยู่ในช่วง -700 ถึง 285 Pascal), 1.5 (ความดันอยู่ในช่วง -1,620 ถึง 459 Pascal) และ 2.0 (ความดันอยู่ในช่วง -2,450 ถึง 651 Pascal)

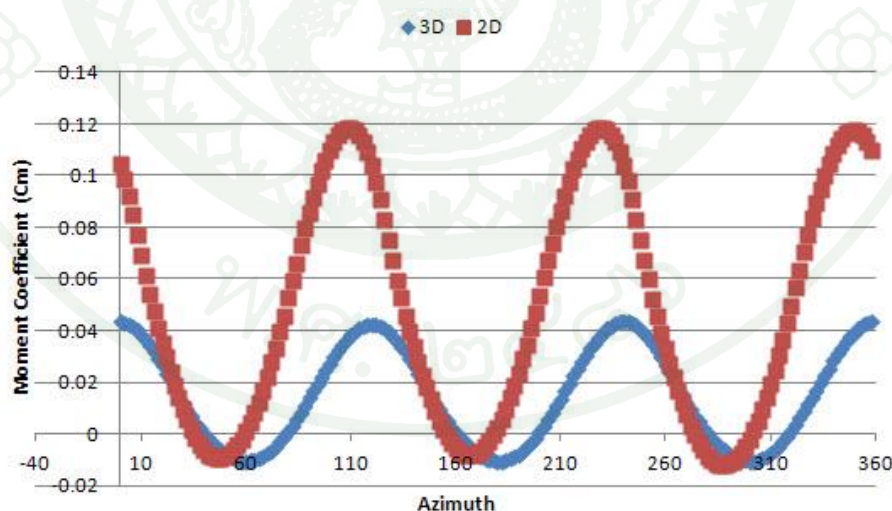


ภาพที่ 53 คอนทัวร์ความดัน (Pascal) ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาทีของกังหันลมแนวตั้งที่ TSR ตั้งแต่ 2.5 (ความดันอยู่ในช่วง -3,030 ถึง 861 Pascal), 3.0 (ความดันอยู่ในช่วง -3,490 ถึง 1,150 Pascal), 3.5 (ความดันอยู่ในช่วง -3,910 ถึง 1,500 Pascal) และ 4.0 (ความดันอยู่ในช่วง -4,310 ถึง 1,900 Pascal)

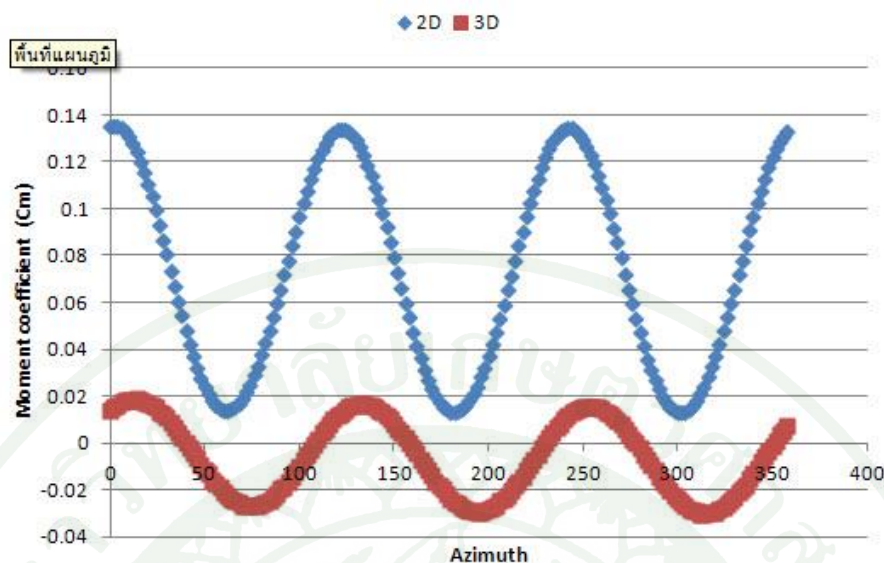
โมเดล 3 มิติ

การคำนวณใน 3 มิติ มีความซับซ้อนกว่าการคำนวณใน 2 มิติพอสมควร โดยปริมาณเมชที่ต้องใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นมากเป็น 10 เท่าจากการคำนวณใน 2 มิติ และด้วยลักษณะรูปทรงของกังหันลมแนวตั้งนั้นมีความซับซ้อน งานเมชจำเป็นจะต้องมีความละเอียดและซับซ้อนตามไปด้วย จำนวนเมชที่มากนี้ทำให้ระยะเวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเฉลี่ยแล้วการคำนวณใน 3 มิติจำเป็นจะต้องใช้การคำนวณมากกว่า 24 ชั่วโมงใน 1 กรณี

ในงานวิจัยนี้ไม่เน้นผลการคำนวณใน 3 มิติ เนื่องจากขาดผลทดลองที่จะใช้สอบเทียบ (Validation) ความแม่นยำของโมเดลคำนวณใน 3 มิติ ค่าทอร์คที่ได้แสดงเปรียบเทียบกับการคำนวณใน 2 มิติแสดงในกราฟ (ภาพที่ 54 และ 55) โดยแสดงในรูปของค่า Moment coefficient (Cm) ในแต่ละมุมอะซิมุท พบว่าค่าทอร์คที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงมีค่าเฉลี่ยที่น้อยกว่าผลของ 2 มิติในแต่ละ TSR อย่างเห็นได้ชัด ผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวมาจากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนและคุณภาพเมช ซึ่งส่งผลต่อการคำนวณทอร์คที่เกิดขึ้นบริเวณใบกังหัน

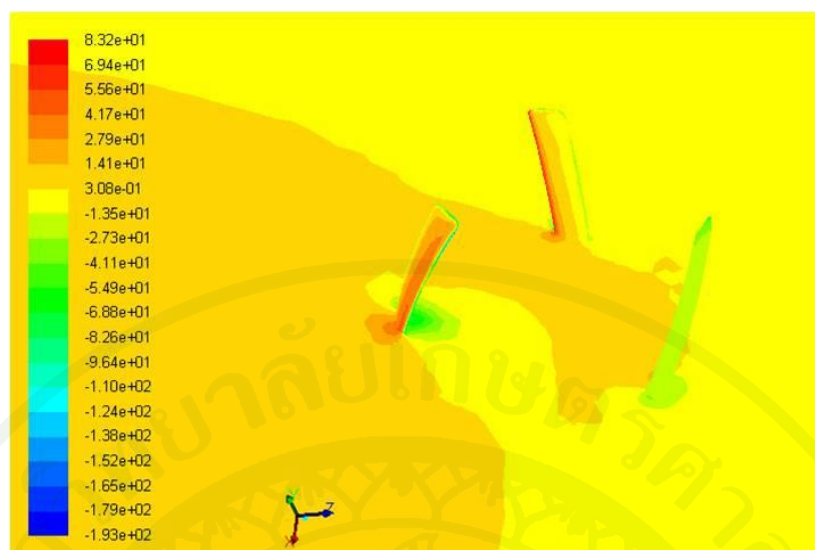


ภาพที่ 54 แสดง Moment coefficient ของการคำนวณที่ 2 มิติ และ 3 มิติ ที่ TSR 2.0 ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที

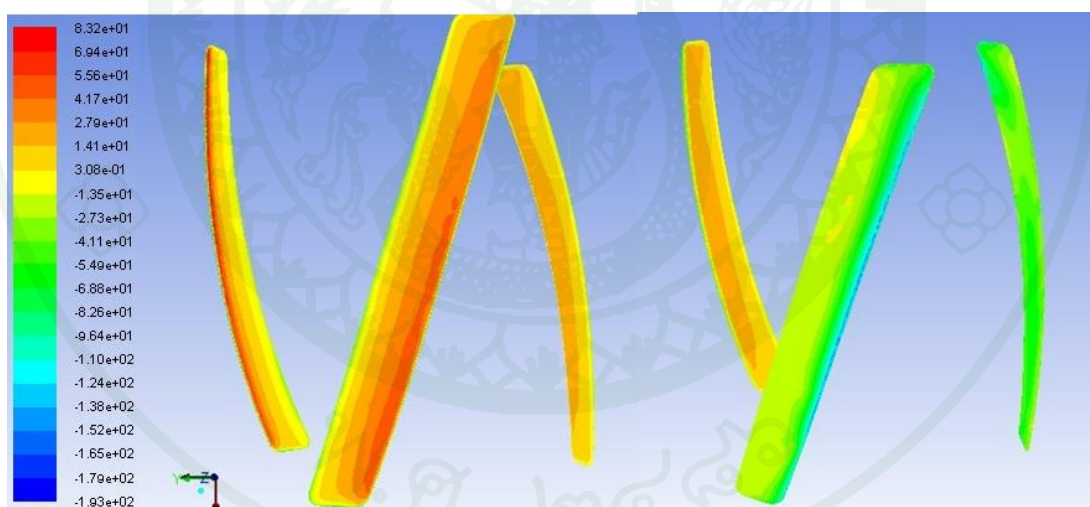


ภาพที่ 55 แสดง Moment coefficient ของการคำนวณที่ 2 มิติ และ 3 มิติ ที่ TSR 2.5 ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที

ภาพที่ 56 แสดงภาพจำลองการไหลจากโปรแกรมในแบบ 3 มิติ และภาพที่ 57 แสดงการกระจายแรงดันที่เกิดขึ้นบริเวณใบกังหันลมแนวตั้งที่ลมความเร็ว 6 เมตรต่อวินาทีและมี TSR ที่ 3 พบว่าแรงดันที่เกิดขึ้นบริเวณใบกังหันลมแนวตั้งนี้มีการกระจายแรงดันสม่ำเสมอในบริเวณใบ โดยแรงดันจะมีลักษณะเกิดขึ้นสูงและต่ำบริเวณจุดเดิมซ้ำๆ จากภาพที่ 57 ด้วยเหตุนี้เองกังหันลมแนวตั้งมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบโดยคิดความล้าที่เกิดขึ้นบริเวณใบด้วย



ภาพที่ 56 คอนทัวร์ความดัน (Pascal) ของการคำนวณ 3 มิติ ที่ TSR 2.5 ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที



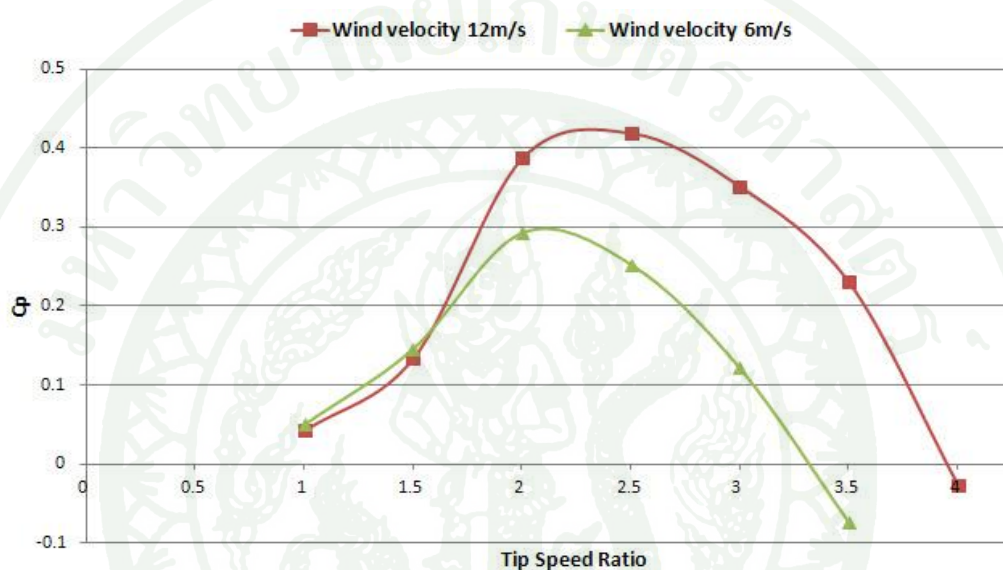
ภาพที่ 57 แสดงคอนทัวร์ความดัน (ความดันระหว่าง -193 ถึง 83.2 Pascal) ที่เกิดขึ้นบริเวณใบกังหันลมแนวตั้ง ที่ TSR 3.0 ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที

คำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

ค่าทอร์คที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงมุมอะซิมุทใน 1 รอบการหมุนจะนำมาหาค่าทอร์คเฉลี่ย แล้วนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (ตัวอย่างการคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานจะแสดงในภาคผนวก ก) โดยค่าทอร์คเฉลี่ยแสดงในภาคผนวก ก และนำมาคำนวณโดยใช้สมการ (5) โดยค่า T คือค่าทอร์คเฉลี่ยในตาราง เพื่อคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงการทำงานของกังหันลมที่ TSR ต่างๆ

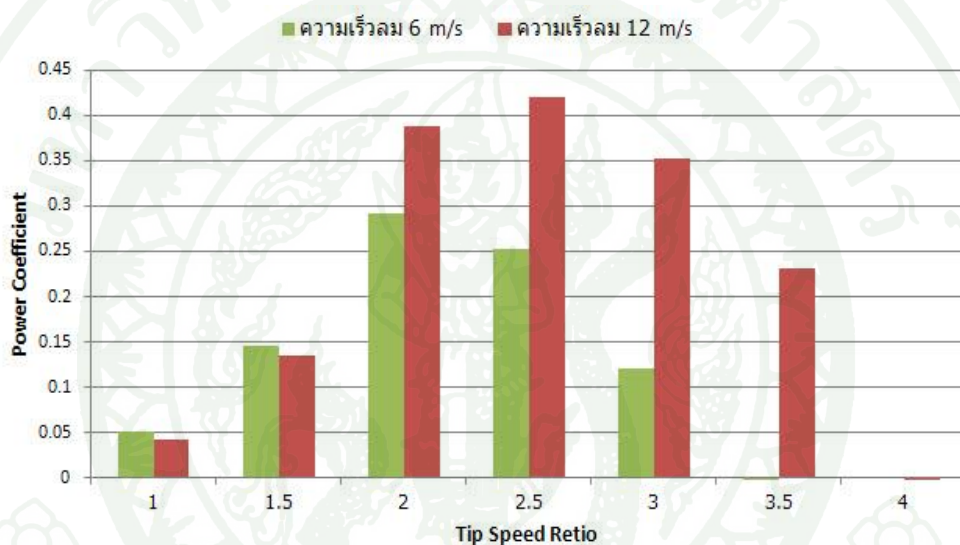
ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ได้แสดงในภาพที่ 58 ของความเร็วลมที่ 6 และ 12 เมตรต่อวินาทีมีลักษณะเส้นที่คล้ายคลึงกัน แต่ค่าประสิทธิภาพในแต่ละ TSR นั้นมีค่าต่างกันอยู่พอสมควร (รายละเอียดค่าประสิทธิภาพในแต่ละ TSR แสดงในส่วนของภาคผนวก ข) ทั้งนี้เป็นผลที่เกิดขึ้นจาก Reynolds number ที่ต่างกันส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานมีความแตกต่าง

จากภาพที่ 58 พบว่าค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (C_p) ของความเร็วลมที่ 6 และ 12 เมตรต่อวินาที มีลักษณะใกล้เคียงกันในช่วง TSR 1 ถึง 1.5 และมี C_p สูงสุด อยู่ในช่วง TSR ที่ 2.0 ถึง 2.5 เหมือนกัน ที่ TSR ตั้งแต่ 1.5 เป็นต้นไป C_p ที่ความเร็วลมทั้งสองเริ่มมีค่า C_p แตกต่างกันอย่างขึ้นในช่วง TSR มากขึ้นตั้งแต่ 2.5 เป็นต้นไป พบว่าที่ความเร็วลมทั้งสอง ค่า C_p จะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเป็น 0 ที่ TSR 3.33 และ 3.9 ที่ความเร็วลม 6 และ 12 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ



ภาพที่ 58 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (C_p) ในแต่ละ TSR ที่ความเร็วลม 6 และ 12 เมตรต่อวินาที

ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทำงานของกังหันลมแนวตั้งต้นแบบทั้งสองความเร็วลม จากความเร็วลมที่ผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันลมแนวตั้งต้นแบบมีค่าเท่ากับ 12 เมตรต่อวินาที กังหันลมแนวตั้งนี้มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 0.41 หรือประมาณ 41 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่ที่มีศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานลมมีค่าเท่ากับ 6 เมตรต่อวินาที พบว่ากังหันลมแนวตั้งนี้มีค่า C_p สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 0.30 หรือประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากภาพที่ 59 จะแสดงให้เห็นชัดเจนว่าประสิทธิภาพที่ได้ในแต่ละ TSR ที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที C_p ที่ได้มีค่าน้อยกว่า 12 เมตรต่อวินาทีอยู่มาก



ภาพที่ 59 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของความเร็วลม 6 และ 12 เมตรต่อวินาทีในแต่ละ TSR

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองกังหันลมแนวตั้งทั้งในแบบ 2 และ 3 มิติ โดยการคำนวณแบบจำลองใน 3 มิติ ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก ซึ่งเกิดจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ความละเอียดของเมช โมเดลที่ใช้ในการคำนวณ เป็นต้น รวมทั้งขาดผลการทดลองที่ใช้ในการสอบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเน้นไปที่แบบจำลองใน 2 มิติเป็นส่วนใหญ่

จากการวิเคราะห์แบบจำลองกังหันลมแนวตั้งต้นแบบที่ความเร็วลม 2 สภาวะ ทำงานที่ TSR ต่างๆ พบว่าช่วงที่กังหันลมแนวตั้งสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง TSR ที่ 2.0 ถึง 2.5 ดังนั้นในการออกแบบระบบควบคุมการทำงาน จะต้องออกแบบให้กังหันลมทำงานอยู่ในช่วงนี้ และหลังจาก TSR มากกว่า 2.5 เป็นต้นไปกังหันลมแนวตั้งต้นแบบจะมีประสิทธิภาพลดลงเรื่อยๆ

เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (C_p) ของกังหันลมแนวตั้งต้นแบบใน 2 สภาวะความเร็วลมที่ 6 และ 12 เมตรต่อวินาที โดยเปรียบเทียบที่ TSR ต่างๆ กัน ในช่วงแรกที่ TSR 1 และ 1.5 จะเห็นได้ว่าค่า C_p มีค่าใกล้เคียงกัน บริเวณนี้จากการแสดงผลการไหลจากโปรแกรมพบว่าเกิด Dynamic stall ขึ้นซึ่งช่วงนี้จะทำให้ระบบเกิดการสั่น เป็นสภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง ในช่วง TSR ตั้งแต่ 1.5 เป็นต้นไป C_p เริ่มจะมีค่าแตกต่างกันมากยิ่งขึ้น โดยค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 0.41 และ 0.30 ของความเร็วลม 12 และ 6 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพมีความแตกต่างกันอยู่ 0.11 หรือ 11 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการนำกังหันลมแนวตั้งต้นแบบนี้มาใช้ในสภาวะลมต่ำย่อมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกังหันลม

กังหันลมแนวตั้งในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานจลน์ในพลังงานลมเป็นพลังงานลมได้สูงถึง 41 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความสามารถใกล้เคียงกับกังหันลมแนวตั้งคาเรียส กังหันลมแนวนอนแบบสามใบ ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับกังหันลมโดยทั่วไป และเมื่อนำมาติดตั้งในความเร็วลมต่ำกว่าที่ได้ออกแบบ กังหันลมนี้มีประสิทธิภาพตกลงไปอยู่ที่ 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งก็ยังถือว่าสูงเมื่อเทียบกับกังหันลมแนวตั้งอื่นๆ

การแสดงผลการไหลและแรงที่เกิดขึ้น นั้นแสดงให้เห็นว่าส่วนหน้าปะทะของแพนอากาศรับแรงดันมาก อีกทั้งแรงที่เกิดขึ้นบริเวณนี้มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาซึ่งส่งผลให้เกิดความล่าช้า จำเป็นจะต้องมีการคำนวณเพื่อความล่าช้าเข้าไปด้วย

ด้วยข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทำงานของกังหันลมแนวตั้งด้วยคอมพิวเตอร์นี้ ได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่ากังหันลมแนวตั้งต้นแบบนั้นมีความจำเป็นจะต้องพัฒนาใบกังหันลมแนวตั้งให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้นในช่วงความเร็วลมต่ำ ในช่วงการหมุนที่ TSR ต่ำพบว่ากังหันลมแนวตั้งนี้ลักษณะพฤติกรรมการเกิด Dynamic stall ซึ่งจะส่งผลเสียโดยรวมต่อระบบ ดังนั้นมีความจำเป็นจะต้องออกแบบให้กังหันลมเกิดสภาวะนี้น้อยที่สุด และสุดท้ายข้อมูลเหล่านี้ยังใช้เป็นฐานในการออกแบบระบบควบคุม ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกังหันลมแนวตั้งต้นแบบนี้ที่ TSR 2.0 – 2.5 จะเป็นช่วงที่กังหันลมแนวตั้งนี้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ดังนั้นระบบควบคุมจึงต้องควบคุมให้กังหันลมทำงานในช่วงนี้ และต้องออกแบบให้กังหันลมทำงานในช่วงนี้ได้เร็วที่สุดในสภาวะลมต่างๆ

ข้อเสนอแนะ

1. ในการจำลองการไหลของกังหันลมใน 2 มิติยังมีบางช่วงที่แบบจำลองยังไม่ครอบคลุม ทั้งนี้อาจจะเกิดจากแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k-epsilon ดังนั้นควรทดลองใช้แบบจำลองอื่น เพื่อเปรียบเทียบดู
2. ในการจำลองการไหลของกังหันลมแนวตั้ง 3 มิติค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนมาก ทั้งนี้เนื่องด้วยหลายปัจจัย โดยปัจจัยสำคัญๆ คือเรื่องการเมชบริเวณรอบใบกังหันลม แนวตั้งต้นแบบมีความซับซ้อนการควบคุมเมชบริเวณใบนั้นทำได้ยาก ดังนั้นการปรับปรุงผิวใบใหม่ให้มีคุณภาพผิวที่ดีกว่านี้จึงมีความจำเป็น ซึ่งขั้นตอนนี้ต้องใช้ระยะเวลา และทรัพยากรเครื่องคอมพิวเตอร์พอสมควร
3. การจำลองการไหลแบบวิธี sliding mesh นั้นมีความจำเป็นจะต้องคำนวณหลาย iteration มากกว่าค่าที่ได้จะมีความคงที่ ส่งผลให้การคำนวณใช้เวลานาน ดังนั้นเพื่อให้ผลที่ได้มีความถูกต้องและการคำนวณเร็วขึ้นจำเป็นจะต้องใช้เทคนิคการเมชให้ละเอียดในบริเวณที่ต้องการคำนวณ ทั้งใน 2 และ 3 มิติ
4. แบบจำลอง 3 มิติยังขาดข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการสอบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรม ดังนั้นการออกแบบการทดลองเก็บค่ากังหันลมแนวตั้งจริง จึงมีความจำเป็น
5. จากข้อมูลแบบจำลองการไหล ประสิทธิภาพของกังหันลมแนวตั้งที่สภาวะความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาทีมีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะพัฒนาใบกังหันลมแนวตั้งนี้ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นในการทำงานที่ลมความเร็วต่ำต่อไป เช่นการลด solidity ของใบกังหัน การเพิ่มความเอียง เป็นต้น

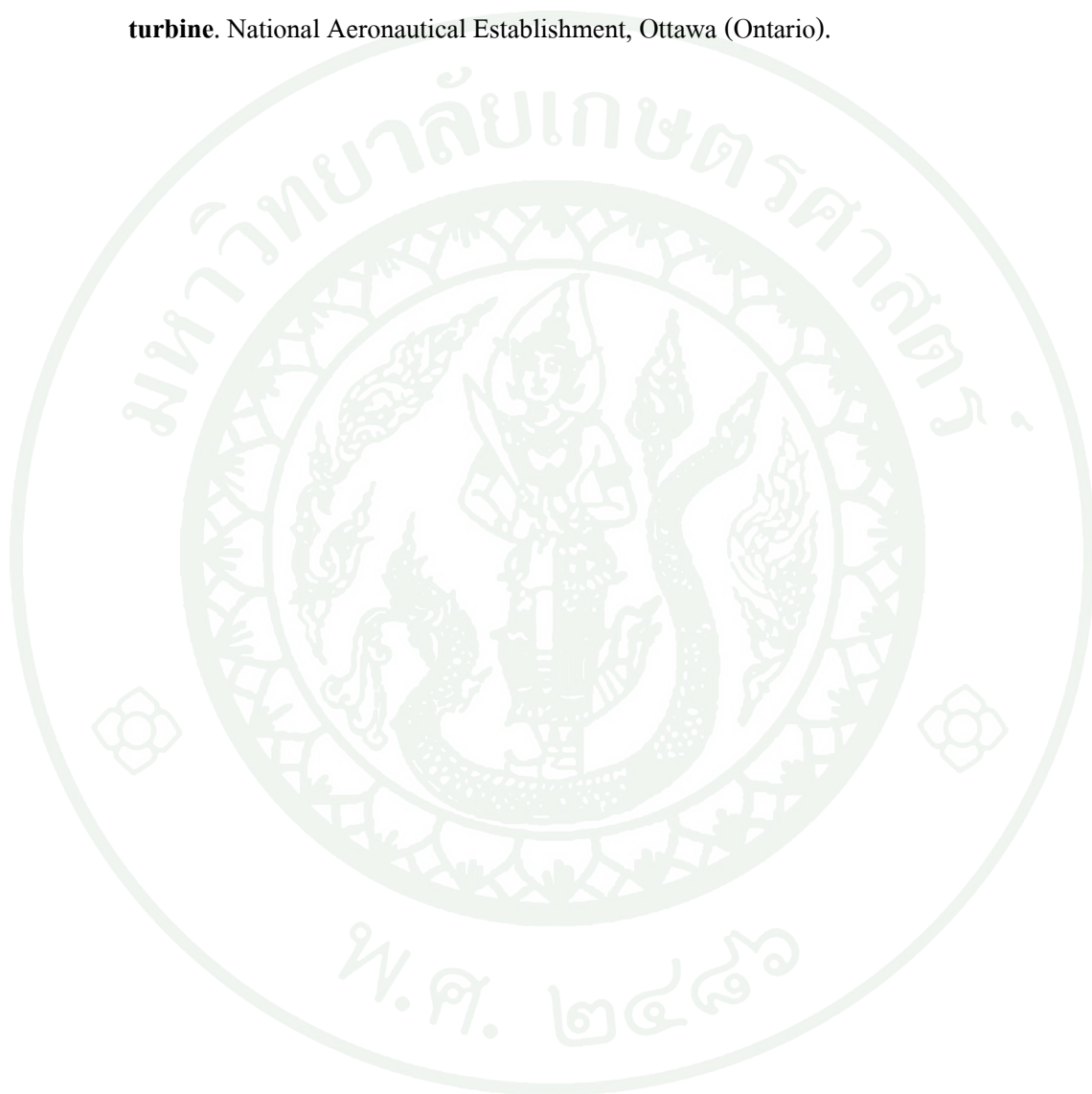
เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Ambrosio, M. and M. Medaglia. 2010. **Vertical Axis wind Turbine: History, Technology and Applications**. M.E. thesis, Hogskolan Halmstad University.
- Beri, H. and Y. Yao. 2011. Effect of camber Airfoil on self starting of Vertical Axis wind Turbine. **Journal of Environment Science and Technology** 4 (3): 302-312.
- Caldichoury, I., V. Lapoujade, H. Sourne, A. Abdelqari and F. DEL PIN. 2010. **Simulation of the flow around a Vertical Axis Wind turbine**. LS-DYNA v980.
- Carlo, E. 2008. **CFD-RANS Study of Horizontal Axis Wind Turbine**. Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Cagliari.
- Claessens. M.C. 2006. **The Design and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbines**. M.S. Thesis, Delft University of Technology.
- Dizon, K.R. 2008. **The Near Wake Structure of a Vertical Axis Wind Turbine including the development on a 3D unsteady free-wake panel method for VAWTs**. M.S. thesis, Delft University of Technology.
- Fujisawa, N. and S. Shibuya. 2001. Observations of dynamic stall on darrieus wind turbine blades. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 89 (2): 201–214.
- Grover, R.D. 1980. Intermediate Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). pp. 118-123. **Proceedings of the Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Design Technology Seminar for Industry**. 1-3 April 1980, Albuquerque, New Mexico, SANDIA national Laboratories.

- Islam, M., S. Ting and A. Fartaj. 2008. Aerodynamic models for Darriesus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 12. P. 1087-1109.
- Kireke, B.K. 1998. **Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications**. Ph.D. Thesis, Griffith University, Australia.
- Klimas, P.C. 1980. Vertical Axis Wind Turbine Aerodynamic Performance Prediction Methods. pp 215-232. **Proceedings of the Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Design Technology Seminar for Industry**. 1-3 April 1980, Albuquerque, New Mexico, SANDIA national Laboratories.
- Ladson, C. L. 1988. **Effects of Independent Variation of Mach and Reynolds Numbers on the Low-Speed Aerodynamic Characteristics of the NACA 0012 Airfoil Section**. NASA TM 4074.
- Mukinovic, M., G. Brenner and A. Rahimi. 2010. Analysis of Vertical Axis Wind Turbines. **Numerical & Experimental Fluid Mechanics VII**. NNFM 112, pp. 587-594.
- Nakayama, A. 1985. Characteristics of the flow around conventional and supercritical air foils. **J. Fluid Mech.** 160, 155.
- Reddy, G.B. 1976. **The Darrieus wind turbine: an analytical performance study**. M.E. thesis, The Graduate Faculty of Texas Tech University.
- Sheldahl, R., P. Klimas and L. Feltz. 1980. Aerodynamic performance of a 5-meter-diameter darrieus turbine with extruded aluminum naca0015 blades. **Technical Report SAND80-0179**. Sandia National Laboratories.

Sridech, W. 2007. **Wind turbine blade characteristics for optimal power production in a local wind statistic**. M.E. thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.

Templin, R.J. 1974. **Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine**. National Aeronautical Establishment, Ottawa (Ontario).







ตัวอย่างการคำนวณ

สามารถหาทอร์คเฉลี่ยได้จากโปรแกรมโดยนำค่าที่ได้ทั้งหมด 180 ค่ามาทำการเฉลี่ย จะได้ค่าทอร์คเฉลี่ยที่เกิดขึ้นใน 1 รอบการหมุนตามตารางที่ 6

ค่าทอร์คที่ได้นำมาคำนวณจากสมการที่ 5 หาค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ตัวอย่างที่ TSR 2.0 ความเร็วลม 12 m/s ความเร็วในการหมุนเท่ากับ 16 เรเดียนต่อวินาที ค่าความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.225 kg/m^3 และพื้นที่ปะทะของกังหันลมแนวตั้งกับ 9 ตารางเมตร

$$C_p = \frac{230.885(16)}{0.5(1.225)(12)^3(9)}$$

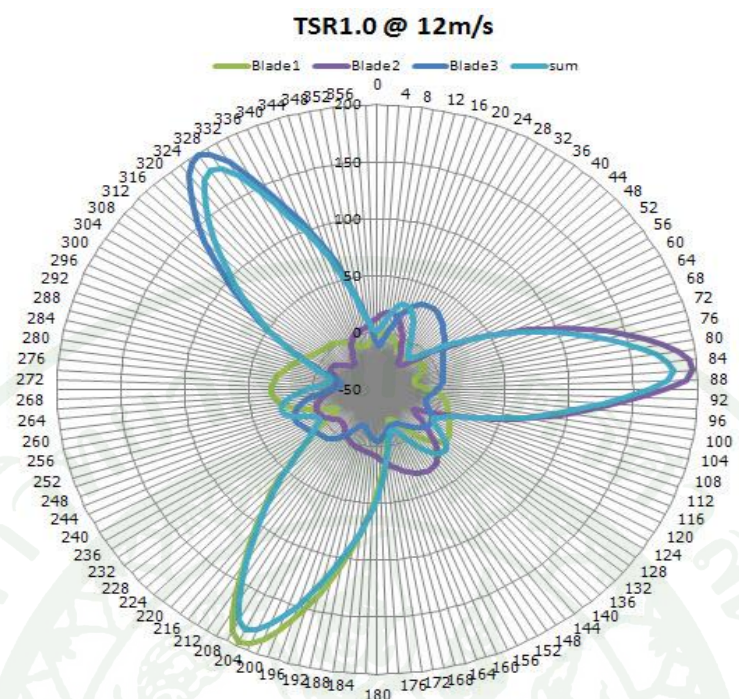
$$C_p = 0.388$$

ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ TSR 2.0 ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาทีที่มีค่าเท่ากับ 38.8 เปอร์เซ็นต์

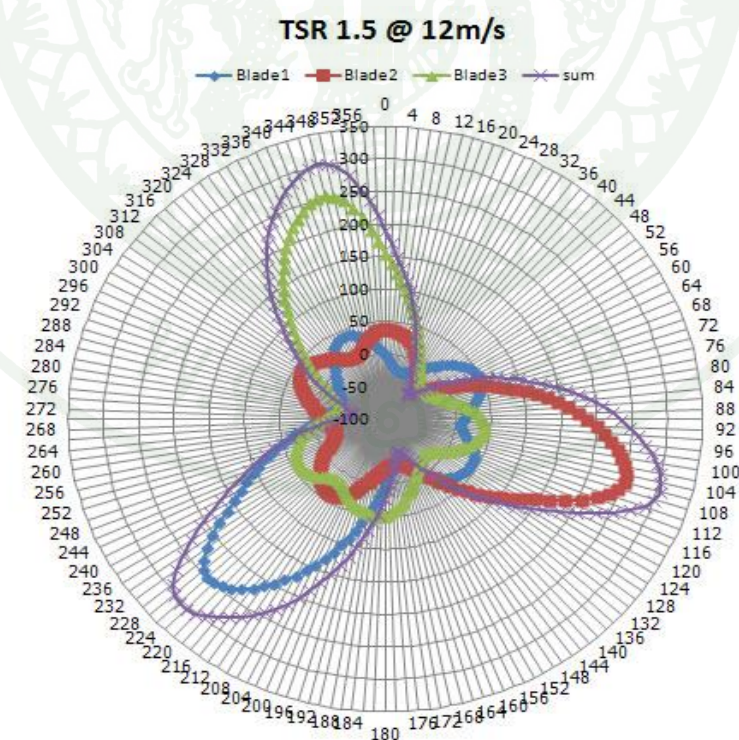
ตารางผนวกที่ ก1 ทอร์กเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละ TSR ที่ความเร็วลม 6 และ 12 เมตรต่อวินาที

TSR	ทอร์กเฉลี่ย N-m (ที่ 6 m/s)	ทอร์กเฉลี่ย N-m (ที่ 12 m/s)
1.0	15.029	50.619
1.5	29.032	106.874
2.0	43.514	230.885
2.5	30.042	199.789
3.0	12.052	139.619
3.5	-6.188	78.333
4.0	-	-7.848

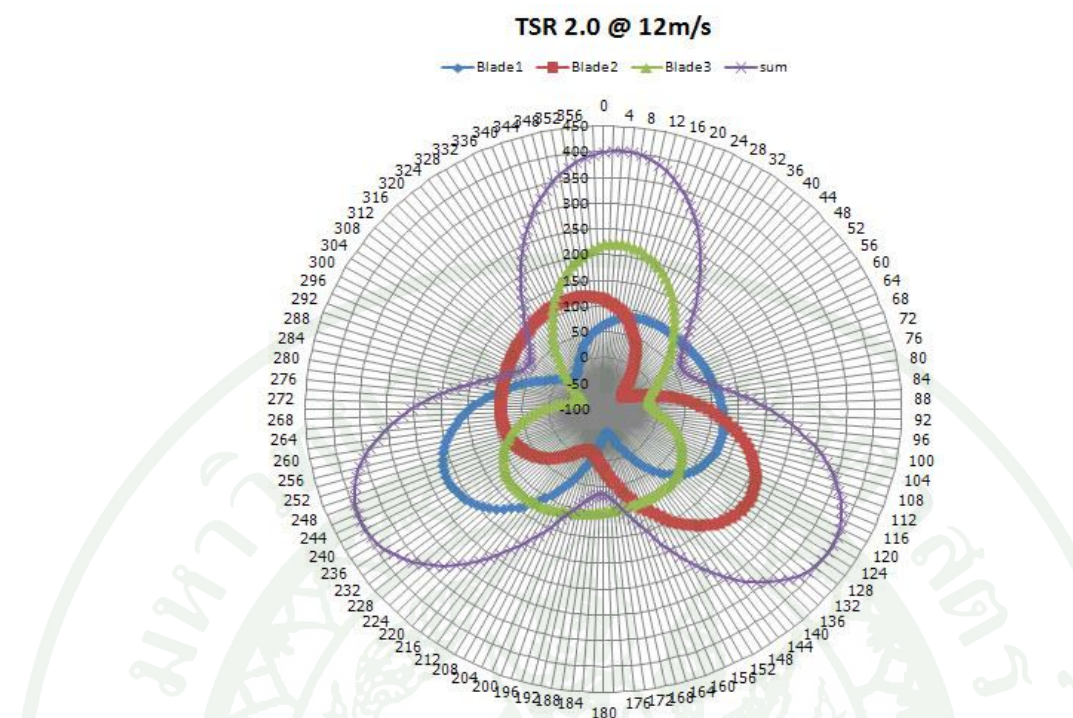




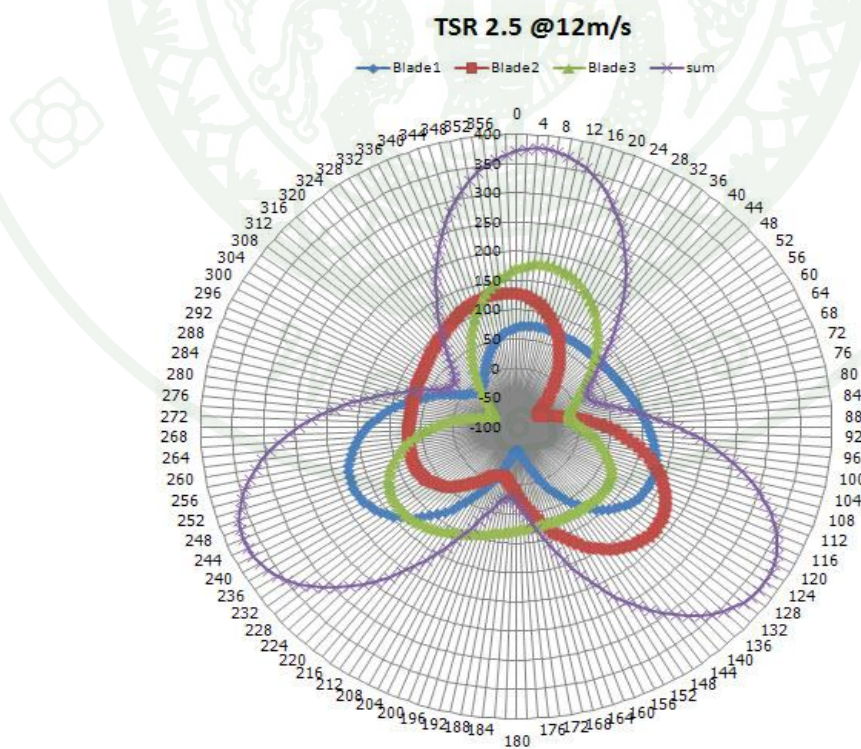
ภาพผนวกที่ ข1 กราฟแสดงทอร์กแต่ละใบและผลรวมที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR1 ที่ 12m/s



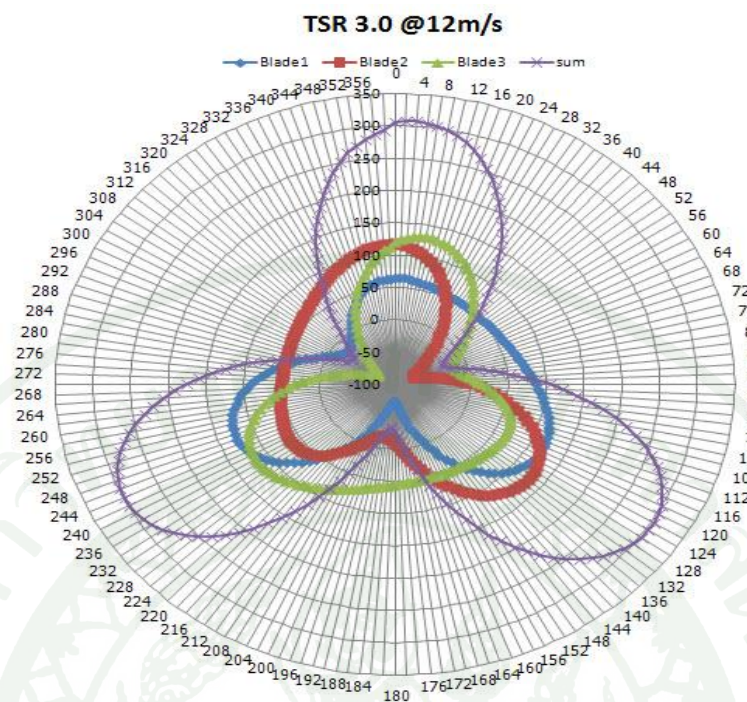
ภาพผนวกที่ ข2 กราฟแสดงทอร์กแต่ละใบและผลรวมที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR1.5 ที่ 12m/s



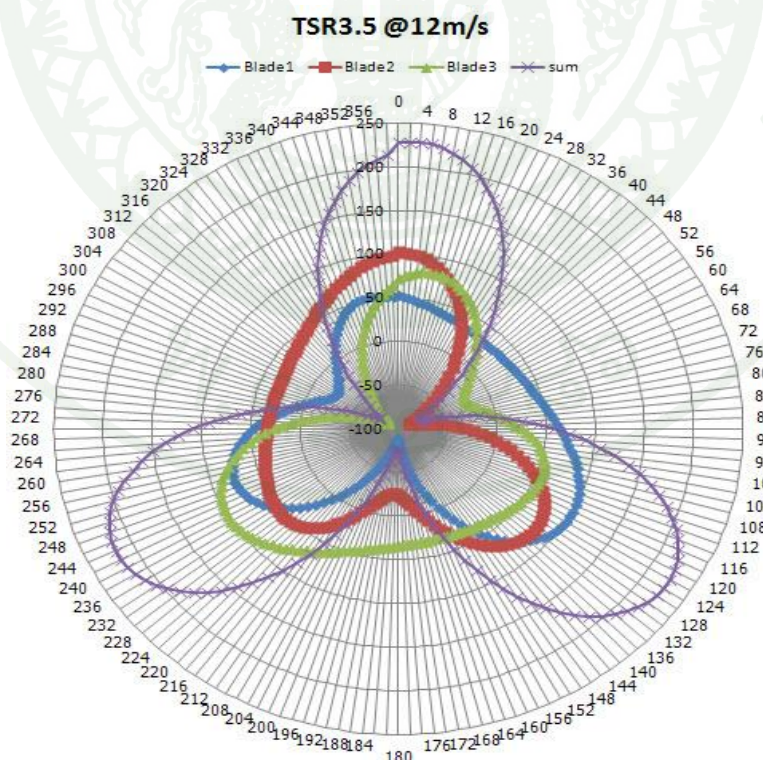
ภาพผนวกที่ ข3 กราฟแสดงทอร์กแต่ละใบและผลรวมที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR2 ที่ 12m/s



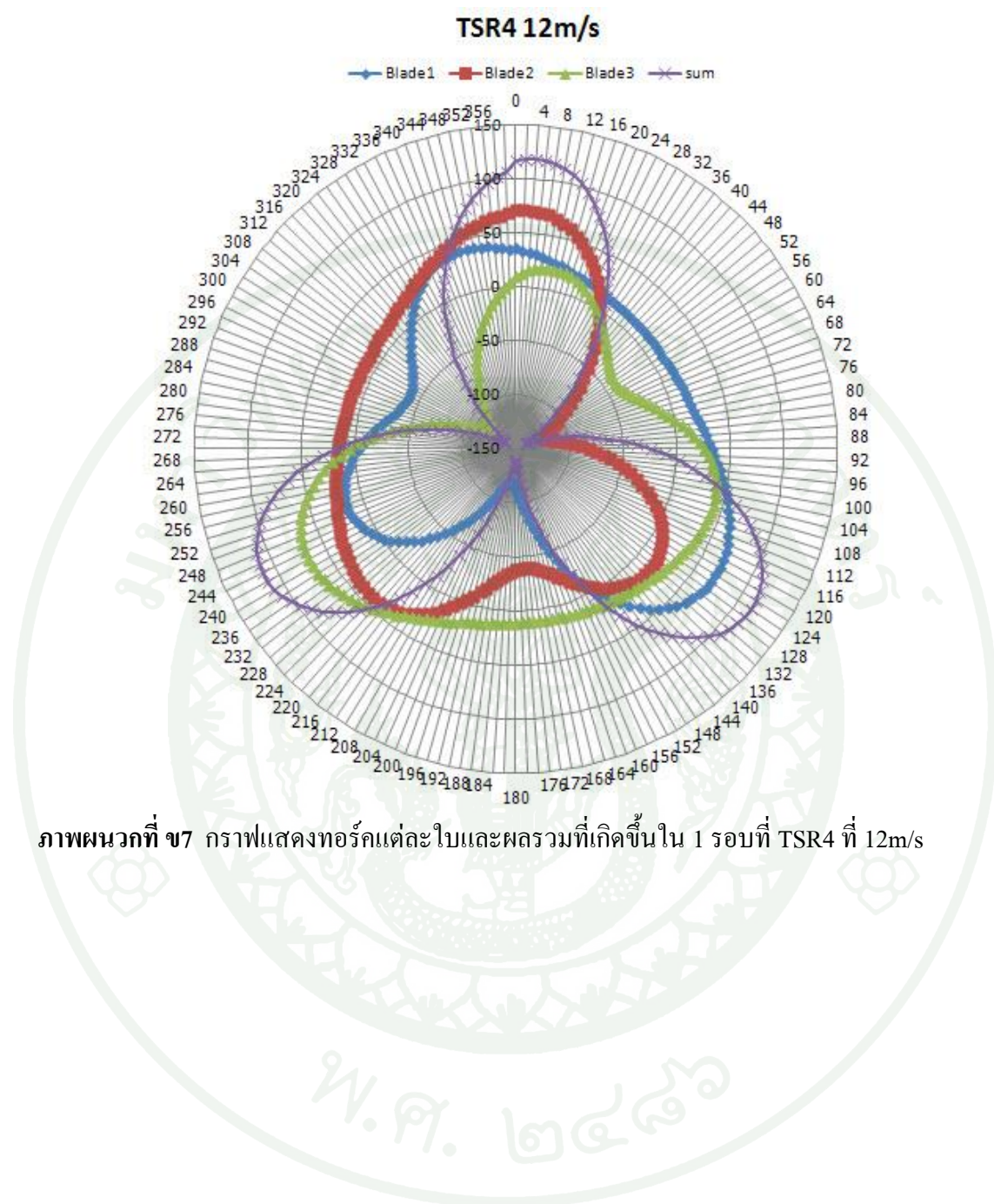
ภาพผนวกที่ ข4 กราฟแสดงทอร์กแต่ละใบและผลรวมที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR2.5 ที่ 12m/s



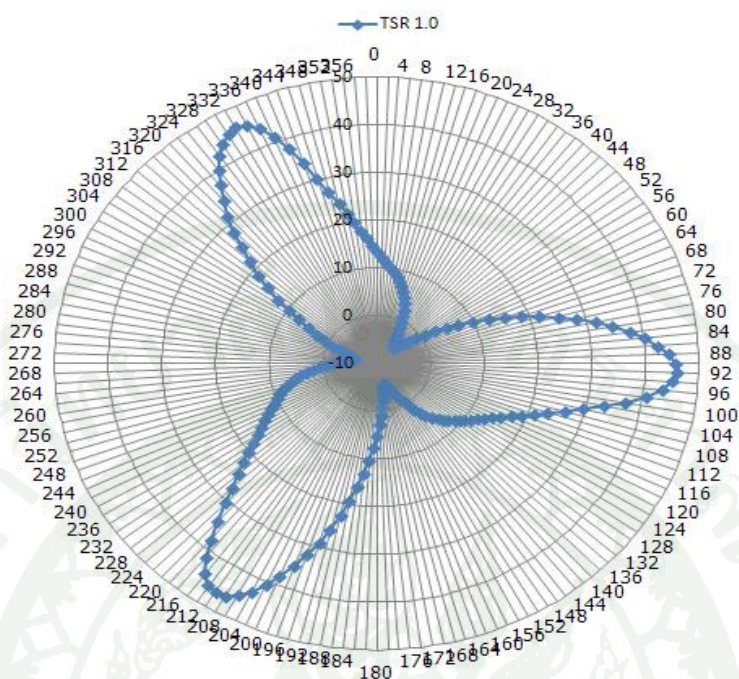
ภาพผนวกที่ ข5 กราฟแสดงทอร์กแต่ละใบและผลรวมที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR3 ที่ 12m/s



ภาพผนวกที่ ข6 กราฟแสดงทอร์กแต่ละใบและผลรวมที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR3.5 ที่ 12m/s

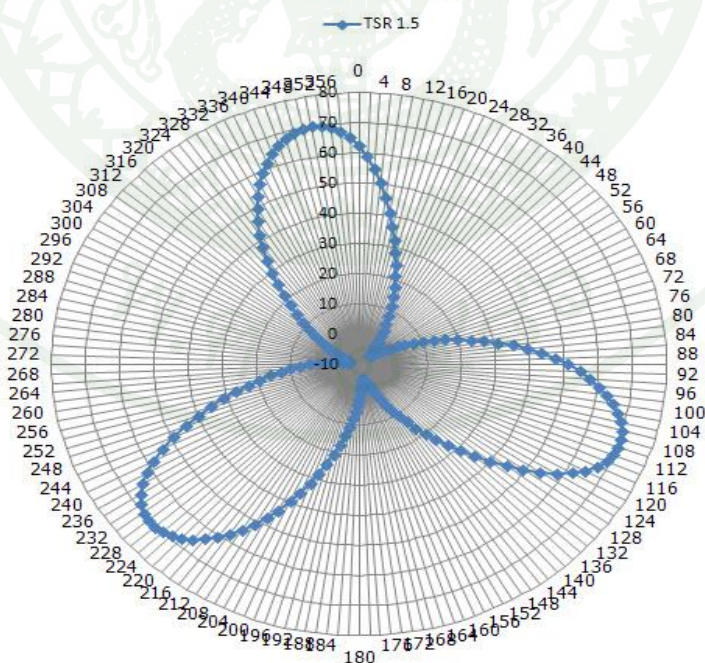


TSR 1.0 @6m/s



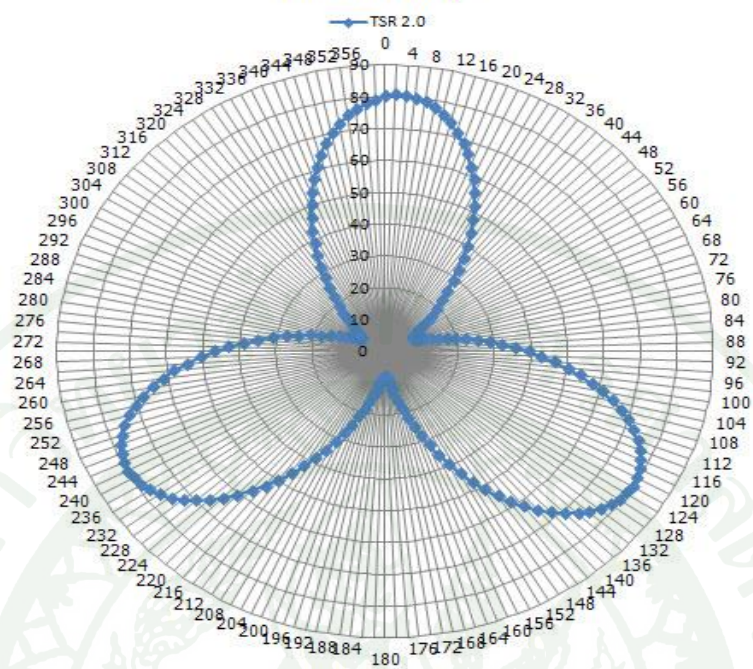
ภาพผนวกที่ ข8 กราฟแสดงผลรวมทอร์คที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR1 ที่ 6m/s

TSR 1.5 @6m/s



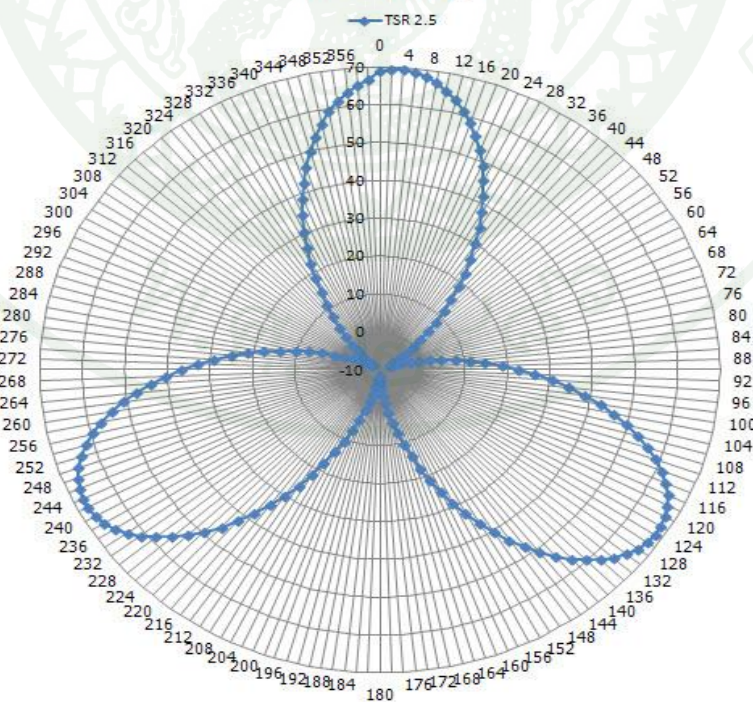
ภาพผนวกที่ ข9 กราฟแสดงผลรวมทอร์คที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR1.5 ที่ 6m/s

TSR 2.0 @6m/s



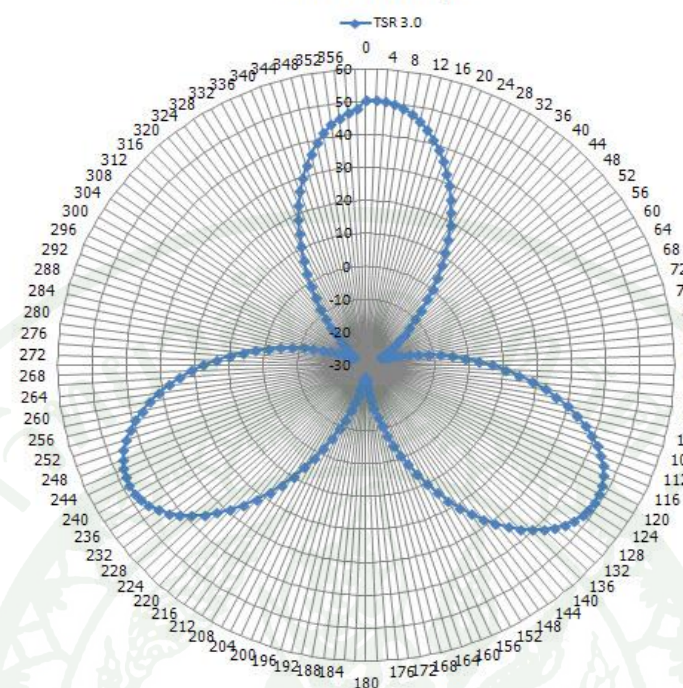
ภาพผนวกที่ ข10 กราฟแสดงผลรวมทอร์คที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR2 ที่ 6m/s

TSR 2.5@6m/s



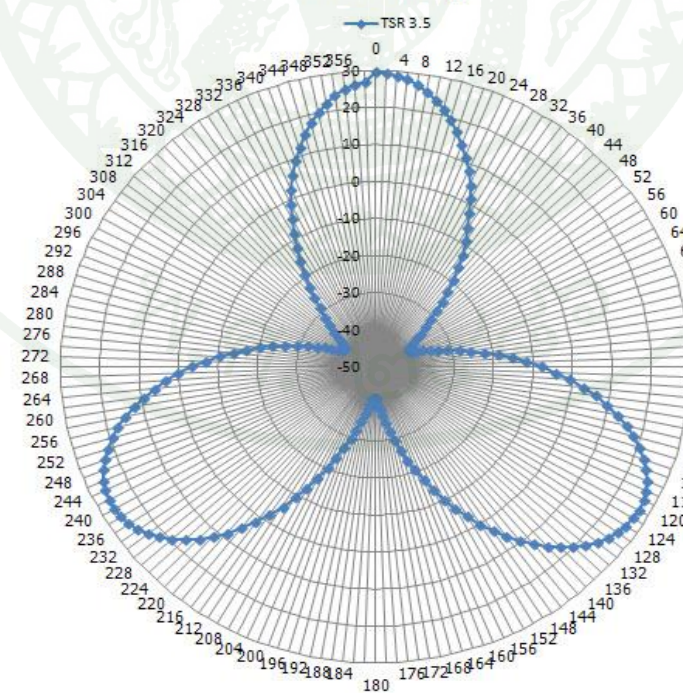
ภาพผนวกที่ ข11 กราฟแสดงผลรวมทอร์คที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR2.5 ที่ 6m/s

TSR 3.0 @6m/s



ภาพผนวกที่ ข12 กราฟแสดงผลรวมทอร์กที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR3 ที่ 6m/s

TSR 3.5 @6m/s



ภาพผนวกที่ ข13 กราฟแสดงผลรวมทอร์กที่เกิดขึ้นใน 1 รอบที่ TSR3.5 ที่ 6m/s

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายณัฐพล ลครชัย
วัน เดือน ปี ที่เกิด	11 มิถุนายน 2529
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เครื่องกลและการบิน – อวกาศ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนช่วยสอนจากบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์