

การศึกษาผลกระทบของรูปร่างปลายใบกังหันลมต่อประสิทธิภาพการทำงาน
กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์

STUDYING OF BLADE TIP EFFECTS TO 50 kW WIND TURBINE
PERFORMANCE

ชาคริต จินลอย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาผลกระทบของรูปร่างปลายใบก้านลมต่อประสิทธิภาพการ
ทำงานก้านลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์

ชาคริต จินลอย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของรูปร่างปลายใบกังหันลมต่อประสิทธิภาพการทำงานกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์
ชื่อ-นามสกุล	นายชาคริต จินลอย
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรัช ไรยนรินทร์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของใบกังหันลมที่มีปลายใบแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) และปลายใบตรง (Non-Wing- Tip Blade) ของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์ เนื่องจากต้องการหาความเหมาะสมของปลายใบกังหันลม ซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้นจากงานวิจัยเดิมพบว่าใบกังหันลมใช้รูปร่าง ROY 1235 ที่มีมุมบิดโคนใบ 8 องศา มุมบิดปลายใบ 2 องศา มีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับความเร็วลมต่ำเฉลี่ยที่ 4-5 เมตรต่อวินาที เหมาะที่จะใช้เป็นใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยและแถบเอเชีย อย่างไรก็ตามจากการศึกษายังคงพบปัญหาที่เกิดจากการหมุนตัดอากาศปลายใบกังหันลม และยังทำให้เกิดเสียงในการทำงาน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดเพิ่มประสิทธิภาพใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์พร้อมปรับปรุงให้เสียงที่เกิดจากการตัดอากาศลดน้อยลง โดยเพิ่มแพนตัดอากาศปลายใบเพื่อลดการปั่นป่วนของอากาศปลายใบ

ขั้นตอนการศึกษาวิจัย ทั้งหมดแบ่งเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้ (1) ขั้นตอนการออกแบบรูปร่างปลายใบกังหันลม (2) ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล CF-Design V.8.0 (3) ขั้นตอนการเปรียบเทียบผลเฉลยด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ (4) ขั้นตอนการทดสอบด้วยท่ออุโมงค์ลม (5) ขั้นตอนการเปรียบเทียบผลจากการทดลองจากงานวิจัยเดิมที่ใช้รูปร่างใบกังหันและตัวแปรการทดสอบเดียวกัน

ผลการวิจัยและทดสอบจากทั้งการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดสอบด้วยขนาดย่อส่วนในอุโมงค์ลม พบว่าใบกังหันลมที่ใช้รูปร่าง Air Foil รุ่น ROY 1235 ดังกล่าวเมื่อมีการเพิ่มแพนตัดอากาศปลายใบ สามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 5.25 ที่ทุกความเร็วลมเมื่อเปรียบเทียบกับใบกังหันลมชนิดเดียวกันที่ไม่มีแพนตัดอากาศ

คำสำคัญ: พลังงานลม กังหันลมผลิตไฟฟ้า แพนตัดอากาศปลายใบ

Thesis Title Studying of Blade Tip Effect to 50 kW Wind Turbine Performance
Name - Surname Mr.Chakrit Jeenloy
Program Mechanical Engineering
Thesis Advisor Assistant Professor Wirachai Roynarin, Ph.D.
Academic Year 2014

ABSTRACT

The objectives of this thesis are to study the characteristics of blade tip using wing tip and none wing tip that effects to the performance of 50 kW wind turbine. From the previous results showed that using ROY 1235 airfoil shape with 8 degree pitching angle at root and 2 degree pitching angle at blade tip exhibited high efficiency at low wind speed of 4-5 m/s which is suitable for Thailand and Asian region wind resource. Nevertheless, noise problem and high efficiency need to be improved to locate the machine appropriately in village or community with low wind speed.

The method of this study is divided into five stages. (1) The process of designing a wind turbine blade shape (2) The analysis of fluid dynamics program CF-Design V.8.0. (3) The comparison of with the aerodynamics studied results (4) Experimental study with the wind tunnel test (5) The analysis process study of previously wind turbine blade with same parameters.

The results of this research and study from CFD and wind tunnel experimental showed that at every average wind speed wind turbine blade of the ROY 1235 profile with wing tip perform higher efficiency of 5.25 percent comparing to the non-wing tip blade.

Keywords : wind power, wind turbine, airfoil wing tip

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูง จากผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.วิรัช โยชนรินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ภาณุ ประทุมทรัพย์ ดร.สถาพร ทองวิก กรรมการสอบ และ ดร.อำพล อาภาชนากร ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาได้ให้ความรู้คำปรึกษา แนวคิด ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นต่างๆ และตรวจสอบข้อบกพร่อง อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิจัย ในครั้งนี้ งานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และเสนอแนะแนวทางต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ จึงขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณบุคลากรของ ศูนย์วิจัยประยุกต์ พลังงานลม น้ำและแสงอาทิตย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และขอขอบคุณ บุคลากร บัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำวิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาปมเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และ อ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้จนประสบความสำเร็จ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้



ชาคริต จินลอย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญรูป.....	(8)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	12
1.2 วัตถุประสงค์.....	12
1.3 ขอบเขต.....	13
1.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	13
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	19
2.1 พลังงานลม.....	19
2.2 ประสิทธิภาพกังหันลม.....	24
2.3 อัตราส่วนความเร็วสูงสุด	25
2.4 การเกิดแรงของรูปร่างหยดน้ำ.....	26
2.5 กังหันลม	28
2.6 ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย.....	29
2.7 ทฤษฎีการออกแบบใบกังหันลม	30
2.8 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ	38
บทที่ 3 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย	54
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานศึกษาวิจัย	54
3.2 การออกแบบและการคำนวณกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ขั้นตอนการออกแบบและการกำหนดค่าการประมวลผลด้วยโปรแกรม CF-Design V.8.0.....	61
3.4 อุปกรณ์ทดสอบใบกึ่งหันลม	68
3.5 เครื่องมือวัด.....	71
3.6 พื้นที่ดำเนินการศึกษาวิจัย	73
บทที่ 4 ผลการวิจัย	74
4.1 ผลจากการทดลอง	74
4.2 การเปรียบเทียบผลจำลองการไหลกับการทดสอบ.....	84
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	85
5.1 ผลสรุป.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ	87
บรรณานุกรม	88
ภาคผนวก.....	90
ก ผลจำลองการไหล.....	91
ข ผลการทดสอบ.....	96
ค รายการแบบประกอบ	100
ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	108
ประวัติผู้เขียน.....	128

สารบัญรูป

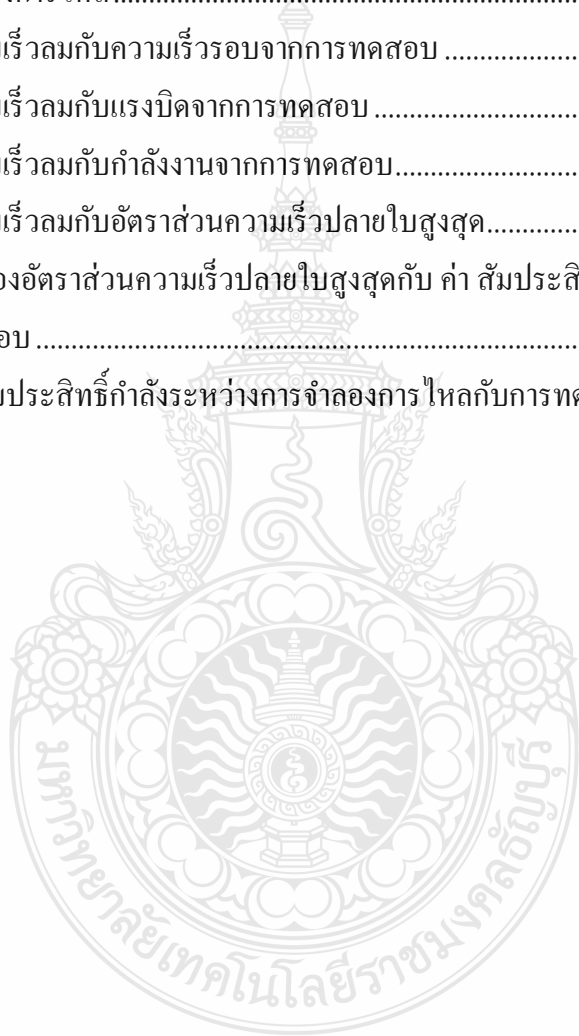
		หน้า
รูปที่ 1.1	แผนที่ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย.....	14
รูปที่ 1.2	กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์.....	15
รูปที่ 1.3	แนวคิดต้นแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์.....	16
รูปที่ 1.4	แผนภูมิขั้นตอนในการดำเนินศึกษาวิจัย.....	18
รูปที่ 2.1	ลักษณะของลมในชั้นบรรยากาศ.....	21
รูปที่ 2.2	ลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ.....	22
รูปที่ 2.3	ลักษณะสัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient) ของกังหันลมชนิดต่างๆ	25
รูปที่ 2.4	อัตราส่วนความเร็วสูงสุด (Tip Speed Ratio)	25
รูปที่ 2.5	ลักษณะการเกิดแรงยก (Lift Force) และแรงผลัก (Drag Force) - บนแผนอากาศ.....	26
รูปที่ 2.6	กังหันลมแบบแนวแกนนอน.....	28
รูปที่ 2.7	กังหันลมแบบแกนแนวตั้ง.....	28
รูปที่ 2.8	ใบกังหันลมชนิดต่างๆ.....	29
รูปที่ 2.9	ความเร็วลมตลอดปีในประเทศไทย.....	30
รูปที่ 2.10	หลักการของทฤษฎี Momentum Theory.....	31
รูปที่ 2.11	การเกิดความเร็วการหมุนของอากาศ (Wake).....	36
รูปที่ 2.12	การให้ความสำคัญของ Mesh ในการใช้ CFD.....	42
รูปที่ 2.13	หลักการทำงานโดยทั่วไปของ CFD.....	43
รูปที่ 2.14	รูปแบบกระบวนการ CF-Design.....	44
รูปที่ 2.15	ปริมาตรควบคุม.....	46
รูปที่ 2.16	ค่าความเร็ว μ ในการไหลแบบปั่นป่วน.....	47
รูปที่ 3.1	รูปแบบ Air Foil ROY 1235.....	61
รูปที่ 3.2	การออกแบบตามหลักวิศวกรรม ด้วยโปรแกรม Solid Work V.2010.....	62
รูปที่ 3.3	ภาพตัดขวางมุมบิดโคนใบ Plant 3 ทำมุม 8 องศา.....	62
รูปที่ 3.4	ภาพตัดขวางมุมบิดโคนใบ Plant 16 ทำมุม 2 องศา.....	62
รูปที่ 3.5	ใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade).....	63

สารบัญรูป(ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.6	ใบกังหันลมมีเพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing Tip Blade).....	63
รูปที่ 3.7	กำหนด Material ให้กับท่ออุโมงค์ลม	64
รูปที่ 3.8	ตั้งค่าชิ้นส่วนทำหน้าที่การหมุน โดยเลือกคำสั่ง Rotating Region.....	64
รูปที่ 3.9	กำหนดวัสดุใบกังหันลม คุณสมบัติเป็นของแข็ง	65
รูปที่ 3.10	กำหนดความเร็วลมขาเข้าและขาออก	65
รูปที่ 3.11	ตั้งค่า Mesh Size	66
รูปที่ 3.12	กระบวนการวิเคราะห์การไหลด้วยโปรแกรม CF-Design V.8.0	66
รูปที่ 3.13	การไหลของอากาศตัดผ่านปลายใบกังหันลม	67
รูปที่ 3.14	การเกิดการไหลปั่นป่วนหลังใบกังหันลม.....	67
รูปที่ 3.15	ชุดอุโมงค์ลมทดสอบใบกังหันลมขนาดเล็ก	68
รูปที่ 3.16	ชุดแหล่งกำเนิดลม.....	68
รูปที่ 3.17	ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์.....	69
รูปที่ 3.18	ชุดเสากังหันลม.....	69
รูปที่ 3.19	ตุ้มเพิ่มภาระไหลคเพลลา.....	70
รูปที่ 3.20	ใบกังหันลม มุมบิด 8/2 ปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade).....	70
รูปที่ 3.21	ใบกังหันลม มุมบิด 8/2 มีเพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade).....	70
รูปที่ 3.22	คอมพิวเตอร์ประมวลผล.....	71
รูปที่ 3.23	เครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometer)	71
รูปที่ 3.24	เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลแบบแขวน	72
รูปที่ 3.25	เครื่องมือวัดแรงบิด (Torque Tranducer).....	72
รูปที่ 3.26	ลักษณะการเชื่อมต่อชุดทดสอบและจอแสดงผล.....	73
รูปที่ 4.1	ความเร็วลมต่อความเร็วรอบจากการจำลองการไหล	74
รูปที่ 4.2	ความเร็วลมกับแรงบิดจากการจำลองการไหล.....	75
รูปที่ 4.3	ความเร็วลมกับกำลังงานจากการจำลองการไหล.....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.4	ความเร็วลมต่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุดจากการจำลองการไหล ...	77
รูปที่ 4.5	อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุดกับค่าสัมประสิทธิ์กำลังจากการ จำลองการไหล	78
รูปที่ 4.6	ความเร็วลมกับความเร็วจนรอบจากการทดสอบ	79
รูปที่ 4.7	ความเร็วลมกับแรงบิดจากการทดสอบ	80
รูปที่ 4.8	ความเร็วลมกับกำลังงานจากการทดสอบ.....	81
รูปที่ 4.9	ความเร็วลมกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด.....	82
รูปที่ 4.10	ผลของอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุดกับ ค่า สัมประสิทธิ์กำลังจากการ ทดสอบ	83
รูปที่ 4.11	ค่าสัมประสิทธิ์กำลังระหว่างกรจำลองการ ไหลกับการทดสอบ	85



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
P_a	พลังงานที่ได้จากลม	วัตต์
P_w	ค่าพลังงานที่ได้จากกังหันลม	วัตต์
ρ	ค่าความหนาแน่นของมวลอากาศอากาศ	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
A	พื้นที่กวาดของใบกังหัน	ตารางเมตร
R	รัศมีของใบกังหัน	เมตร
v	ความเร็วลม	เมตรต่อวินาที
m_{Air}	ปริมาณอากาศ	กิโลกรัม
V_∞	ความเร็วลมเริ่มที่ทางเข้า	เมตรต่อวินาที
R	รัศมีใบกังหันลม	เมตร
C_p	ประสิทธิภาพกังหันลม	-
L	แรงยก (Lift Force)	นิวตันเมตร
D	แรงผลัด(Drag Force)	นิวตันเมตร
Q	อัตราการไหลของอากาศ	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
C_D	สัมประสิทธิ์แรงหน่วง	-
C_L	สัมประสิทธิ์แรงยก	-
a	ค่าแฟกเตอร์การเหนี่ยวนำตามแนวแกน	-
E_k	พลังงานจลน์	จูล
T	แรงบิดใบกังหันลม	นิวตันเมตร
N	รอบการทำงานใบกังหันลม	รอบต่อนาที
Ω	ความเร็วเชิงมุม	เรเดียนต่อวินาที
TSR	อัตราส่วนความเร็วปลายใบกังหันลมสูงสุด	-
U	ความเร็วสัมพัทธ์	เมตรต่อวินาที

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากปัจจุบัน พลังงานเป็นปัจจัยหลักในการดำรงชีวิตของมนุษย์ จึงทำให้แหล่งพลังงานหลักอย่าง ฟอสซิลที่นำมาแปรรูปเป็นพลังงานเกือบทุกชนิดมีปริมาณลดน้อยและใกล้หมดลงทุกทีจากการใช้พลังงานอย่างฟุ่มเฟือยของมนุษย์ จึงทำให้มนุษย์ค้นคว้าแหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถนำมาใช้ได้ไม่มีวันหมด จึงทำให้พลังงานทดแทนเริ่มมีบทบาทสำคัญในการเป็นพลังงานทางเลือกและมีการตอบรับที่ดีจากประชาชน พลังงานทดแทนนั้นมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยและสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่มีการปล่อยมลพิษที่ยังคงมีดวงอาทิตย์ พลังงานลม จึงเป็นพลังงานทดแทนอีกอย่างหนึ่งที่ได้รับความนิยม เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดไม่ต้องซื้อ ทางผู้วิจัยจึงคิดที่จะพัฒนาใบกังหันลมที่มีมุมบิด โคนใบ 8 องศา มุมบิดปลายใบ 2 องศา ที่ได้มีการศึกษาวิจัยมาก่อนหน้านี้แล้วว่าเหมาะสมกับศักยภาพความเร็วลมต่ำ จากงานวิจัย “การออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า 20 กิโลวัตต์” ทางผู้วิจัยมีความสนใจเรื่องแพนดัดอากาศบริเวณปลายใบกังหันลม หากมีการเพิ่มแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ที่บริเวณปลายใบแล้วจะสามารถช่วยลดการสูญเสียพลังงานจากการหมุนวนของอากาศ บริเวณปลายใบกังหันลม (Vertex) และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้นเพียงใด ระหว่างใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศ (Wing-Tip Blade) และใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)

กังหันลมที่ได้นำมาศึกษามีกำลังการผลิตไฟฟ้า 50 กิโลวัตต์ มีพื้นที่กวาดใบ 254 ตารางเมตร ชนิดแนวแกนนอนมีข้อดีคือ สามารถเริ่มต้นทำงานเองได้ (Self-Start) โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยในการเริ่มต้นการทำงาน อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกังหันลมชนิดอื่น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบแพนดัดอากาศบริเวณปลายใบกังหันลม

1.2.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ

(Wing-Tip Blade) และปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)

1.3 ขอบเขต

1.3.1 ศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดใบกังหันลม (C_p) และอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด (TSR) ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์การไหล (CFD) ที่ความเร็วลม 2-12 เมตรต่อวินาที

1.3.2 ทดสอบการทำงานใบกังหันลมรัศมีไม่เกิน 50 เซนติเมตร โดยการย่อขนาด 1:18 เท่าของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์ด้วยชุดทดสอบใบกังหันลมที่ความเร็วลม 2-6 เมตรต่อวินาที

1.3.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบการทำงานกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์ทั้ง 2 รูปแบบ

1.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

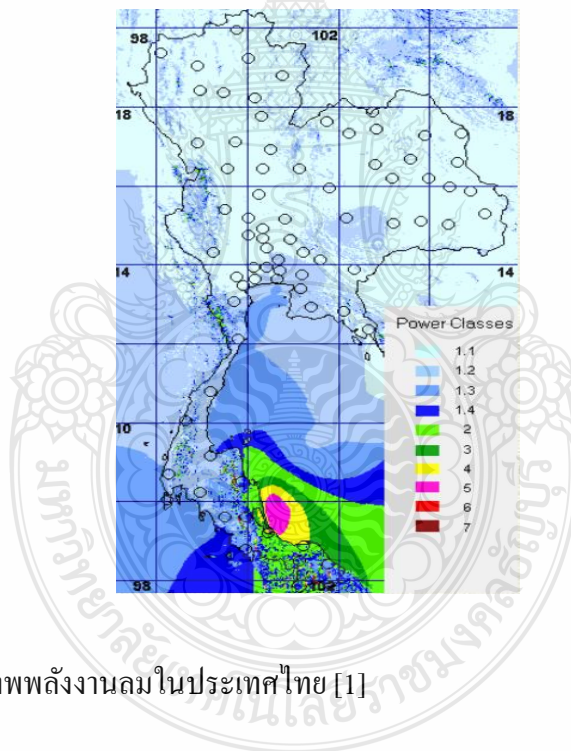
การศึกษาวิจัยเริ่มต้นจากการรวบรวมองค์ความรู้ ทบทวนวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หรือกรณีศึกษาต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ทำการคำนวณและออกแบบตามทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าซึ่งพอจะลำดับขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็นกับการออกแบบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้า เช่น ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) พลังงานจากลมนั้นเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ในการวิเคราะห์ใช้หลักการที่เรียกว่า “ ทฤษฎีโมเมนตัม ” (Momentum Theory) การเกิดขึ้นของแรงยก (Lift- Force) และแรงผลัด (Drag Force) ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์การไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CF-Design V.8.0 มาช่วยแก้ไขปัญหาทางด้านวิศวกรรมที่ซับซ้อน และเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆที่นำมาใช้ในการทดสอบ เช่น เครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometers) เครื่องมือวัดแรงบิด (Torque Transducer) เป็นต้น

1.4.2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง หรือกรณีศึกษาต่างๆด้านกังหันลมผลิตไฟฟ้า

1.4.2.1 สมชาย ภูวงศ์ไพบูลย์ บริษัท เฟลโลว์ เอ็นจิเนียร์ส คอนซัลแตนต์ จำกัด โดยการสนับสนุนจากกรมพัฒนาส่งเสริมพลังงาน เมื่อปี พ.ศ. 2544 ได้จัดทำโครงการ “แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย” ดังในรูปที่ 1.1 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปี ระดับ 3 (Class 3) หรือมีความเร็วลม 6.4 เมตรต่อวินาที ขึ้นไปที่ความสูง 50 เมตร อยู่ที่ภาคใต้บริเวณชายฝั่ง ทะเลตะวันออก เริ่มตั้งแต่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา และปัตตานี และที่อุทยานแห่งชาติดอย อินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเกิดจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือตั้งแต่เดือน พฤศจิกายนจนถึงปลายเดือนมีนาคม นอกจากนั้นยังพบว่ายังมีแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีอีกส่วนหนึ่งอยู่บริเวณเทือกเขาทางทิศตะวันตกตั้งแต่ภาคใต้ตอนบนจรดภาคเหนือตอนล่าง ในจังหวัด เพชรบุรี กาญจนบุรี ตาก ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของ มรสุมตะวันตกเฉียงใต้

ระหว่างเดือนพฤษภาคม ถึง กลางเดือน ตุลาคม แหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีได้รับอิทธิพลจาก มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และ มรสุมตะวันออกเฉียงใต้ อยู่ในบริเวณเทือกเขาในอุทยานแห่งชาติ แก่งกรุง จังหวัดสุราษฎร์ธานีอุทยานแห่งชาติเขาหลวงและใต้ร่มเย็น จังหวัดนครศรีธรรมราช ใน อุทยานแห่งชาติศรีพังงา เขาพนมเบญจาจังหวัดกระบี่ ส่วนแหล่งที่มีศักยภาพรองลงมาโดยมีกำลังลม เฉลี่ยทั้งปีระดับ 1.3 ถึง 2 (Class 1.3-Class 2) หรือมีความเร็วลม 4.4 เมตรต่อวินาที ขึ้นไปที่ความสูง 50 เมตร พบว่าอยู่ที่ภาคใต้ตอนบนบริเวณอ่าวไทยชายฝั่ง ตะวันตก ตั้งแต่จังหวัด เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร จรด จังหวัด สุราษฎร์ธานี และ บริเวณ เทือกเขาในภาคเหนือ คือ จังหวัดเชียงใหม่ และ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คือ จังหวัด เพชรบูรณ์ และ เลย ซึ่งได้รับจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และ พบว่า อยู่ที่ภาคใต้ฝั่งตะวันตก ตั้งแต่ จังหวัด พังงา ภูเก็ต กระบี่ ตรัง จรด สตูล และในอ่าวไทย ชายฝั่งตะวันออก คือ จังหวัด ระยอง ชลบุรี ซึ่งได้รับจาก อิทธิพลจาก ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้



รูปที่ 1.1 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย [1]

1.4.2.2 ดร.วิรัช โยชนรินทร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2551 ได้วิจัย “โครงการศึกษา วิจัยพัฒนา สาธิตต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิต ไฟฟ้าแนวแกนนอน ขนาด 5 กิโลวัตต์” แสดงในรูปที่ 1.2 ที่มีความเหมาะสมกับการผลิตไฟฟ้าที่มี ความเร็วลมเฉลี่ย 3-4 เมตรต่อวินาที โดยพลังงานที่ผลิตได้จากกังหันลมได้ 120 หน่วยทางไฟฟ้า เมื่อ เปรียบเทียบกับกังหัน-ลมที่นำเข้าจากต่างประเทศ ผลิตไฟฟ้าได้ 20 หน่วย จากการทดสอบ 1 เดือน

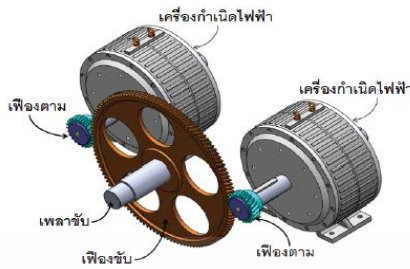
ที่ความเร็วลมและจุดติดตั้งเดียวกัน สำหรับความสำเร็จของกังหันลมแนวแกนนอนที่ผลิตในประเทศสามารถทำงานได้ดีกว่ากังหันที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยคิดประสิทธิภาพรวมอยู่ที่ 35 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่กังหันลมนำเข้าจากต่างประเทศ หากนำมาใช้งานที่ความเร็วลมต่ำ จะมีประสิทธิภาพในการทำงานเพียง 15-20 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น



รูปที่ 1.2 กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ [2]

1.4.2.3 สว่างชาติทอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี “การออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์” โดยใช้ทฤษฎี โมเมนตัม กับ การคำนวณพลศาสตร์ของไหล นำผลเฉลยจากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์การไหลด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ CF-Design V9.0 มาใช้ในการออกแบบระบบส่งกำลังให้เหมาะสมกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ การวิเคราะห์หามุมบิดปลายใบที่เหมาะสมกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า ที่มีความเร็วลมต่ำ

จากการศึกษาพบว่า มุมบิดของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ที่ดีอยู่ที่ มุมบิดโคนใบ 8 องศา และมุมบิดปลายใบ 2 องศาซึ่งจะมีค่าประสิทธิภาพสูงกว่า มุมบิดโคนใบ 8 องศาตลอดทั้งความยาวใบอยู่ 18 เปอร์เซ็นต์ จากการวิจัยจึงได้เลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10 กิโลวัตต์ 2 ตัวในการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ แสดงในรูปที่ 1.3 สำหรับพื้นที่ที่มีลมเฉลี่ย 4-5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 1.3 แนวคิดต้นแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ [3]

1.4.3 วางแผนขั้นตอนในการดำเนินการศึกษาวิจัย เพื่อสามารถเป็นแนวทางในการค้นคว้า แสดงในรูปที่ 1.4 แผนภูมิขั้นตอนในการดำเนินการศึกษาวิจัย

1.4.4 กำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบ สร้างต้นแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า เช่น การหาขนาดรูปร่างของกังหันลม ก็จะมีค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์แรงยก และแรงผลึก มุมปะทะ การหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโรเตอร์ (Rotor) ก็จะมีค่าตัวแปรด้านพลังงานไฟฟ้าค่าความหนาแน่นของอากาศ ความเร็วลม ประสิทธิภาพของกังหันลม

1.4.5 ทำการทดสอบใบกังหันลมขนาด 50 กิโลวัตต์โดยการสร้าง แบบจำลองการไหลผ่านของลมผ่านใบกังหันลมต้นแบบ โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลทาง พลศาสตร์การไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CF-Design V.8.0 มาทำการทดสอบที่ความเร็วลมตั้งแต่ 2 ถึง 12 เมตรต่อวินาที เก็บบันทึกข้อมูลการทดสอบทั้ง 2 รูปแบบ ทำการทดสอบเก็บข้อมูลโดยการนำต้นแบบ (Prototype) ใบกังหันลมแบบย่อส่วน 1 ต่อ 18 เท่าที่ได้สร้างขึ้นมาทดสอบประสิทธิภาพกังหันลม ซึ่งประกอบด้วย เครื่องกำเนิดลม สามารถสร้างความเร็วลมได้ไม่เกิน 6 เมตรต่อวินาที เครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometers) ชุดเสาจะมี คมเพื่อติดตั้งใบกังหันลม ซึ่งจะมีเฟลาเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัดแรงบิด (Torque Transducer) สามารถวัดความเร็วรอบ (Speed) แรงบิด (Torque) และกำลังงาน (Power) ทำการทดสอบตั้งแต่ความเร็วลม 2-6 เมตรต่อวินาทีและบันทึกผลเพื่อนำไปวิเคราะห์

1.4.6 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบ โดยการนำผลทางทฤษฎีหรือผลทางพลศาสตร์การไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CF-Design V.8.0 มาเปรียบเทียบกับผล ที่ได้จากการทดลองเป็นการยืนยันความแม่นยำ ผลเฉลยการจำลองการไหลของอากาศผ่านใบกังหันต้นแบบ

1.4.7 สรุปผลการวิจัย และทำรายงานเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทน เป็นต้น

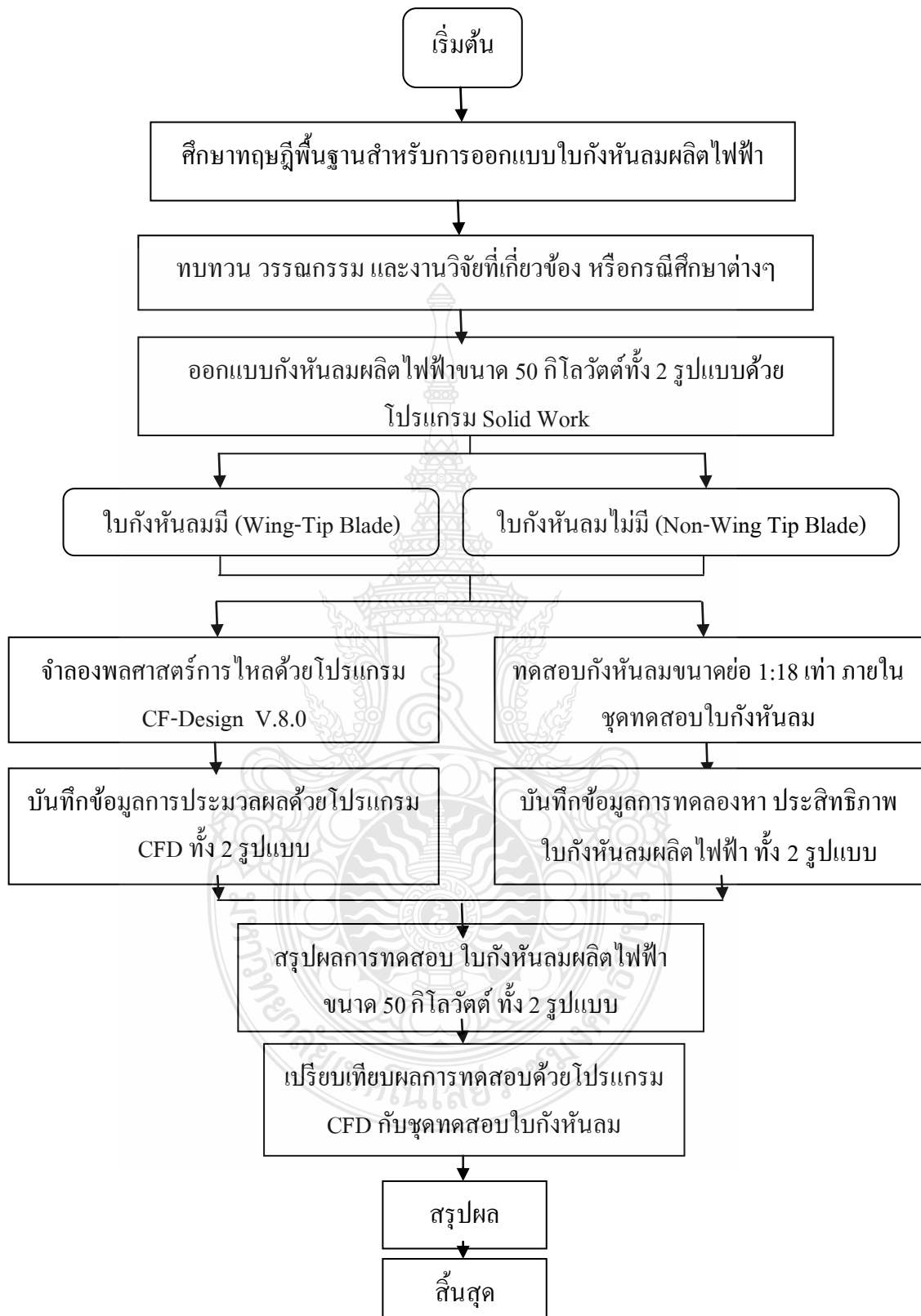
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ผลการวิเคราะห์ใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์ด้วยโปรแกรม CFD ที่ความเร็วลม 2-12 เมตรต่อวินาที

1.5.2 ได้ผลการทดสอบใบกังหันลมขนาดย่อ 1:18 เท่า ในชุดทดสอบกังหันลม ที่ความเร็วลม 2-6 เมตรต่อวินาที

1.5.3 ได้ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศ (Wing-Tip Blade) และใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)





รูปที่ 1.4 แผนภูมิขั้นตอนในการดำเนินศึกษาวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานลม (Wind Energy)

พลังงานลม (Wind Energy) คือ การเคลื่อนตัวของมวลอากาศที่มีความแตกต่างทางด้านอุณหภูมิ ความกดดันของอากาศ และแรงจากการหมุนของโลก อากาศรับความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่แผ่รังสีความร้อนมายังโลก แต่ละตำแหน่งบนพื้นโลกได้รับปริมาณความร้อนไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและความกดอากาศ บริเวณใดที่อากาศมีอุณหภูมิสูงความกดอากาศจะต่ำ อากาศบริเวณนั้นก็จะลอยตัวสูงขึ้น ส่วนบริเวณที่อากาศมีอุณหภูมิต่ำความกดอากาศจะสูงกว่าจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ การเคลื่อนที่ของมวลอากาศทำให้เกิด “ ลม ” (Wind) พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในภาคตัดขวางของโลกประมาณ 178,000 ล้านล้านวัตต์ มีเพียง 3 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้นที่ก่อให้เกิดพลังงานลม และส่วนนี้ก็ยังเป็นผลให้เกิดคลื่นในมหาสมุทรด้วย จากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศนี้ทำให้เกิดเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) รูปหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้

กังหันลมจะใช้ประโยชน์จากลมที่อยู่ใกล้ผิวโลก หรือที่เรียกว่าลมพื้นผิว หมายถึงลมที่พัดในบริเวณพื้นผิวโลกภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นผิวดิน เป็นบริเวณที่มีการคลุกเคล้าของอากาศ และมีแรงเสียดทานอันเกิดจากแรงปะทะกับสิ่งกีดขวางในระดับต่ำ แต่ที่ระดับความสูงมากกว่า 10 เมตร ขึ้นไปแรงเสียดทานจะค่อยลดลงตามลำดับความสูง ทำให้ความเร็วลมเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 จนกระทั่งที่ระดับความสูงใกล้ 1 กิโลเมตร เกือบจะไม่มีแรงเสียดทาน ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงตามความสูง และสภาพภูมิประเทศ เช่นเดียวกันกับทิศทางของลม จากประสบการณ์ที่ผ่านมาพบว่า กังหันลมจะทำงานได้ดีหรือไม่นั้น จะขึ้นอยู่กับตัวแปรสองตัวนี้ที่ความเร็วลมเท่าๆ กันแต่มีทิศทางลมที่แตกต่างกัน เมื่อพุ่งเข้าหาแกนหมุนของกังหันลมแล้วจะส่งผลต่อแรงบิดของกังหันลม คือ แรงลัพธ์ที่ออกจากกังหันลมจะแตกต่างกัน

CFD ย่อมาจาก Computational Fluid Dynamics ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอาศัยความสามารถของคอมพิวเตอร์สมัยใหม่ช่วยในการคำนวณ โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ตัวอย่างโปรแกรม CFD เช่น โปรแกรม CF-Design ซึ่งโปรแกรม CF-Design ทำให้กระบวนการออกแบบมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแบบเดิมๆที่ทำ การทดลองในอุโมงค์ลม จนทำให้ CFD จะเริ่มใช้กันโดยแพร่หลายมากขึ้นและเริ่มเข้ามามีบทบาทต่อการเรียนการศึกษาในปัจจุบัน ซึ่งพฤติกรรมการไหลของไหลสามารถอธิบายโดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการจำลองปรากฏการณ์

2.1.1 จำนวนด้วยชุดของสมการอนุรักษ์ (Conservation Equations)

1. สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equations)
2. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equations)
3. สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equations)

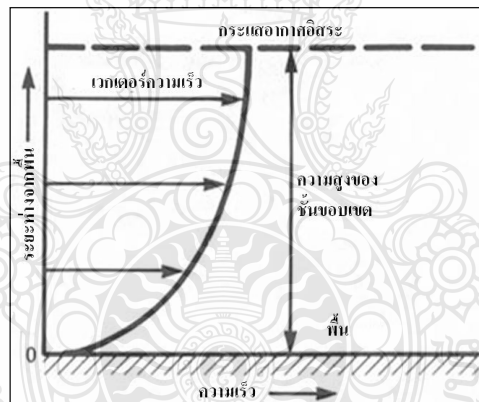
กล่าวคือ CFD เป็นสาขาวิชาหรือเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่สำหรับในประเทศไทย แต่ในต่างประเทศนั้น CFD ได้รับการพัฒนาและใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจาก CFD เป็นการนำความรู้ทางการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาทั้งทางด้าน Aerospace Engineering และ Fluid Dynamics ซึ่งในบางครั้งการทดลองในห้องปฏิบัติการไม่สามารถที่จะแก้ไขปัญหาได้ดีเนื่องจากจะต้องมีการจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์เป็นอย่างมาก แต่ CFD สามารถทำได้เพียงแต่จะต้องเข้าใจปัญหาและสมการที่จะใช้อย่างแท้จริง จึงนับได้ว่า CFD เหมาะที่จะศึกษาอย่างจริงจังในประเทศไทย โดย CFD สามารถทำให้สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำในสถานะหนึ่งๆ และสามารถทำนายภาวะของเชิงความร้อน ความเร็ว หรือ ทิศทาง ได้อย่างแม่นยำขึ้น และจะนำไปสู่การออกแบบที่ถูกต้องและประหยัดค่าใช้จ่ายในที่สุด โดยเฉพาะถ้าเป็นโครงการขนาดใหญ่ ซึ่งต้องมีการลงทุนในระบบปรับอากาศหลายร้อยหรือหลายพันล้านบาทก็จะยิ่งช่วยให้ทั้งวิศวกรและเจ้าของโครงการมั่นใจในผลการออกแบบ และช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นได้เป็นอย่างมาก

ประโยชน์ของ CFD นั้นจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันด้านวิศวกรรม เนื่องจาก CFD ช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ในการออกแบบ พัฒนา ปรับปรุง และทำให้เห็นภาพของการไหลชัดเจนขึ้นผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว ซึ่งสามารถอธิบายถึงสมการการเคลื่อนที่ของการไหลทั้งการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนได้ การประยุกต์ใช้เช่น

1. การนำ CFD มาช่วยวิศวกรปรับอากาศในงานออกแบบ
2. การนำ CFD มาช่วยวิเคราะห์การหมุนวนของอากาศ
3. การศึกษาผลกระทบเนื่องจากรูปแบบของครีบต่อการถ่ายเทความร้อน
4. การคำนวณทางด้านวิศวกรรมความร้อนด้วยโปรแกรม CFD (Computational Fluid Dynamic) สร้างความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของจำนวนระยะห่างระหว่างครีบและท่อเพื่อให้เกิดการสูญเสียความร้อน (Heat Loss)

กังหันลมที่เหมาะสมกับลักษณะลมของประเทศไทย หรือแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมที่เป็นลมแรงต่ำ มีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 5 เมตรต่อวินาที (ในยุโรปประมาณ 7 เมตรต่อวินาที) จึงต้องออกแบบกังหันลมให้เป็นกังหันลมแรงลมต่ำ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในสภาพแรงลมดังกล่าว กังหันลมต้องออกแบบมาเพื่อให้สามารถติดตั้งได้ทุกพื้นที่ในประเทศไทย สามารถทำงาน (ใบกังหันหมุน) และผลิตไฟฟ้าได้ ที่แรงลมตั้งแต่ 2.5 เมตรต่อวินาที เป็นต้นไป และออกแบบให้ใบกังหันลม (Blade) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) และชุดควบคุม (Controller) ทำงานแบบสัมพันธ์กัน เพื่อผลิตไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ

เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมาก ในการช่วยคำนวณและวิเคราะห์ผลทางด้านวิศวกรรม เพราะประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและราคาที่ถูกลงของคอมพิวเตอร์ รวมถึงความหลากหลายและการประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสมกับงานทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ จึงทำให้วิศวกรรุ่นใหม่สามารถเข้าถึงโปรแกรมประยุกต์ CF-Design V.8.0 เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจในกระบวนการวิเคราะห์ เพื่อหาผลเฉลยตามความต้องการ



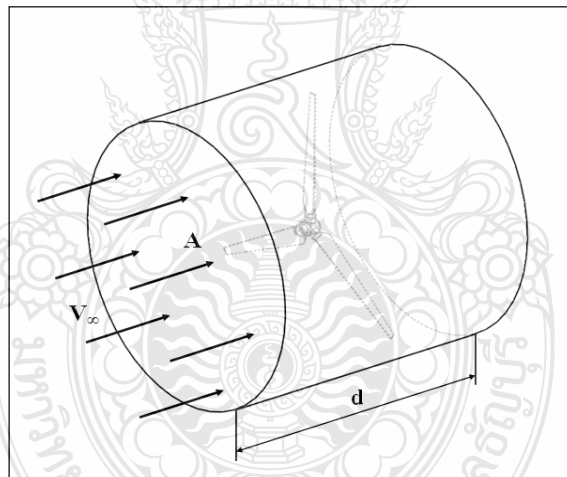
รูปที่ 2.1 ลักษณะของลมในชั้นบรรยากาศ [4]

ดังนั้นกำลังงานจากลม เป็นพลังงานจากการเคลื่อนที่ของวัตถุขึ้นอยู่กับสองตัวแปรได้แก่ มวล (m_a) และความเร็ว (V_∞) ถ้ามวลของอากาศคงที่ ดังนั้นพลังงานลมจึงแปรผันตามความเร็วของลม สามารถเขียนสมการพลังงานของลมได้ในรูปของพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ของลมที่เคลื่อนที่ไป เขียนได้ตามสมการที่ 2.1

$$E_K = \frac{1}{2} m_a V_\infty^2 \quad (2.1)$$

โดยที่ E_K = พลังงานจลน์ (J)
 m_a = มวลของอากาศ (kg)
 V_∞ = ความเร็วลม (m/s)

มวลของลมที่เคลื่อนที่ไปดังแสดงในรูปที่ 2.2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลลม ด้วยความเร็ว (V_∞) ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด (A) และเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง (d) ดังนั้น มวลของอากาศสามารถคำนวณได้จาก ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_a) คูณด้วยปริมาตร ($A \times d$)



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ

กำลังงานจากลม (Wind Power) คือ งานที่ลมทำได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา กำลังงานจากลมจึงเป็นไปตามสมการที่ 2.2

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3 \quad (2.2)$$

โดยที่ P_a = กำลังงานที่ได้จากลม (Watt)
 ρ_a = ความหนาแน่นอากาศ (kg/m^3)
 A = พื้นที่หน้าตัด (m^2)
 V_∞ = ความเร็วลม (m/s)

ดังนั้นจากสมการที่ 2.2 เห็นได้ว่ากำลังงานของลมจะมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วของลมและพื้นที่หน้าตัดที่รับลม โดยจะพิจารณาความเร็วของลมเป็นหลักเนื่องจากกำลังงานของลมนั้นแปรผันตามความเร็วลมยกกำลังสาม

กำลังงานจากกังหันลม (Power Wind Turbine) สำหรับค่ากำลังงานเฉลี่ยของกังหันลมสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3 C_p \quad (2.3)$$

โดยที่ P_w = กำลังงานที่ได้จากกังหันลม (Watt)
 ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
 A = พื้นที่กวาดของใบกังหัน (m^2)
 V_∞ = ความเร็วลมเข้าใบพัด (m/s)
 C_p = ค่าประสิทธิภาพของกังหันลม

จากสมการที่ 2.3 จะเห็นได้ว่ากำลังงานของกังหันลม จะมีการคิดค่าประสิทธิภาพของกังหันลมด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติจริงแล้วยังมีค่าความสูญเสีย (Losses) ในส่วนต่างๆ ของระบบอีกหลายส่วน เช่น ใบกังหันลม ระบบส่งกำลัง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งทำให้เมื่อมีการใช้งานจริงๆ จะมีประสิทธิภาพในการทำงานแค่ 35% เท่านั้นเอง

2.2 ประสิทธิภาพกังหันลม (Power Coefficient)

การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพกังหันลม เรียกว่าค่า C_p (Power Coefficient) โดยจะได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกำลังงานที่ได้จากกังหันลมได้ดึงเอาไว้ P_w (Power Wind Turbine) เปรียบเทียบกับกำลังงานจากลม ที่สมควรจะได้จริงจากลมที่มีการไหลอิสระ P_a (Wind Power) ถ้าวิเคราะห์ทางกลก็ คือ กำลังงาน เท่ากับ พลังงานที่ผลิตได้ต่อพลังงานที่ป้อนเข้าไปให้สู่ระบบนั่นเอง ในทางวิศวกรรมกังหันลมแล้วนั้นเราสามารถหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของใบกังหันลมได้จาก ประสิทธิภาพกังหันลม (Power Coefficient) เป็นอัตราส่วนของกำลังงานที่ได้ออกมาจากกังหันลมต่อ กำลังงานของลม หรือหมายถึงประสิทธิภาพของกังหันลมในการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกล หรือพลังงานไฟฟ้า เป็นไปตามสมการที่ 2.4

$$C_p = \frac{P_w}{P_a} = \frac{P_w}{\frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3} \quad (2.4)$$

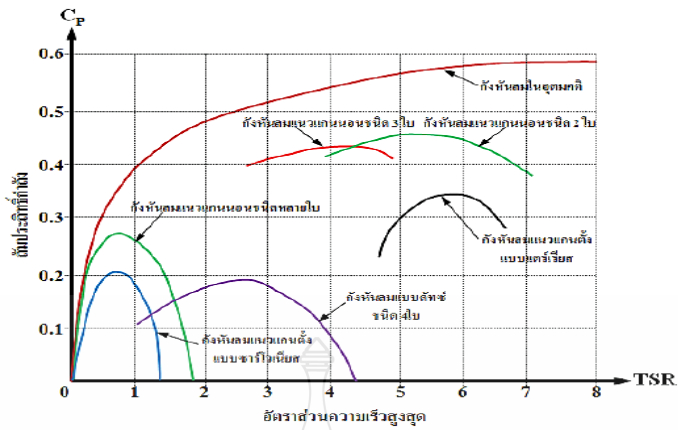
โดยที่

C_p = ประสิทธิภาพกังหันลม

P_w = กำลังงานจากกังหันลม หรือพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลม (Watt)

P_a = กำลังงานจากลม (Watt)

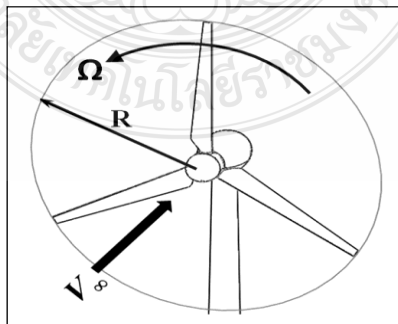
จากสมการที่ 2.4 เราจะทราบได้ว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลม ซึ่งเราเรียกว่า $C_{p_{Max}}$ นั้นจะมีค่าไม่เกิน 0.5926 หรือ 16/27 นั่น คือ ถ้าลมให้พลังงานมา 100% กังหันที่ดีที่สุดจะทำการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานทางกลได้สูงสุดไม่เกิน 59.26% เนื่องด้วยปัจจัยหลาย ๆ อย่างที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไป แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 เห็นถึงลักษณะประสิทธิภาพ (Power Coefficient) ของกังหันลมชนิดต่างๆ ว่าไม่มีกังหันลมชนิดใดที่สามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพได้ถึง 45% แต่อย่างไรก็ตามถ้าเราสามารถออกแบบชุดกังหันลมให้มีประสิทธิภาพรวม ได้ถึง 30-35% ก็ถือว่าประสบความสำเร็จเป็นอย่างสูงเนื่องจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรที่ไม่ใช้การสันดาป เหมือนกับเครื่องยนต์ความร้อน ทำให้ไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมจะเป็นพลังงานที่สะอาดและจะไม่มีวันหมดไปเหมือนพลังงานจากเชื้อเพลิงสารไฮโดรคาร์บอนที่จำเป็นต้องใช้การเผาไหม้ในการได้งานมานั่นเอง ดังนั้นการออกแบบระบบทางกลให้กับกังหันลมจึงต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับศักยภาพแหล่งลมในแต่ละพื้นที่ด้วย [5]



รูปที่ 2.3 ลักษณะสัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient) ของกังหันลมชนิดต่างๆ [6]

2.3 อัตราส่วนความเร็วสูงสุด (Tip Speed Ratio)

เป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในการหมุนที่ปลายใบกังหัน ต่อความเร็วลมที่มาปะทะใบกังหัน ในขณะที่กังหันผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงสุด โดยที่ความเร็วลมที่มาปะทะใบกังหันนั้นจะเป็นความเร็วลมที่เราต้องการเพื่อให้กังหันผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้มากที่สุดตัวอย่าง เช่น กังหันลมที่ออกแบบมา สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 10 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วลม 9.5 เมตรต่อวินาที อัตราส่วนความเร็วสูงสุดจะใช้ อักษรย่อว่า TSR หาได้จากสมการที่ 2.5 ถ้าค่า TSR มีค่าสูงโดยทั่วไปจะบอกได้ว่าใบมีประสิทธิภาพสูง แต่นั่นก็หมายถึงใบจะต้องการโครงสร้างที่แข็งแรงกว่าเดิม และมีเสียงดังมากขึ้นเวลาที่ใบทำงานส่วนค่า TSR เท่ากับ 7 นั้นเรากำหนดขึ้นมาเองเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนมากแล้วก็กำหนดไว้ประมาณ 6-8 จากรูปที่ 2.4 อัตราส่วนความเร็วปลายใบกังหันลมต่อความเร็วลม



รูปที่ 2.4 แสดงอัตราส่วนความเร็วสูงสุด (Tip Speed Ratio) [7]

$$TSR = \frac{U}{V_\infty} = \frac{\Omega R}{V_\infty} = \frac{2\pi NR}{V_\infty 60} \quad (2.5)$$

โดยที่

TSR = อัตราส่วนความเร็วสูงสุด (Tip Speed Ratio)

U = ความเร็วสัมผัส (m/s)

V_∞ = ความเร็วลมที่มาปะทะ (m/s)

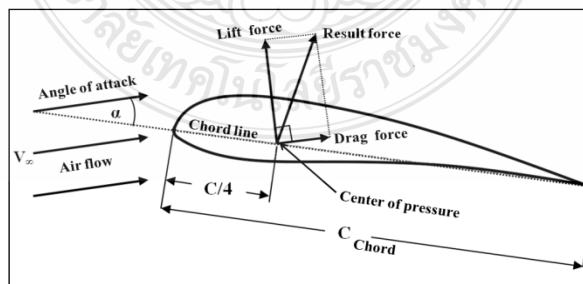
Ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

N = ความเร็วรอบของกังหันลม (rpm)

R = รัศมีของใบกังหัน (m)

2.4 การเกิดแรงของรูปร่างหยดน้ำ (Air Foil)

รูปร่างหยดน้ำ (Air Foil) จะถูกนิยามเป็นวัตถุที่มีรูปร่างเพรียวตามกระแสการไหลซึ่งออกแบบเพื่อทำให้เกิดแรงยกขึ้น วัตถุรูปร่างอื่นที่ทำให้เกิดแรงยกนอกเหนือจากรูปร่างหยดน้ำจะได้แก่ แผ่นคัตโค้ง (Hydrofoil) เมื่อรูปร่างหยดน้ำ เคลื่อนที่ผ่านของไหล หรือของไหลไหลผ่านรูปร่างหยดน้ำ ที่มุมปะทะ (Angle of Attack) ค่าหนึ่ง ของไหลจะแยกเคลื่อนที่ผ่านผิวด้านบน และด้านล่าง หากมุมปะทะมีค่าเป็นบวก และยังมีค่าไม่สูงถึงค่าที่กำหนดให้เกิดปรากฏการณ์การแยกขึ้นของไหลจะเคลื่อนที่บนผิวด้านบนของรูปร่างหยดน้ำ ด้วยความเร็วสูงกว่าผิวด้านล่างของรูปร่างหยดน้ำ ทำให้ความดันที่ผิวด้านล่าง ของรูปร่างหยดน้ำ มีค่าสูงกว่าความดันที่ผิวด้านบนของรูปร่างหยดน้ำ ผลลัพธ์ของความดันแตกต่างระหว่างผิวทั้งสองด้านของรูปร่างหยดน้ำ จะทำให้เกิดเป็นแรงกระทำต่อรูปร่างหยดน้ำ แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 จะแสดงลักษณะการเกิดขึ้นของแรงยก (Lift Force) และแรงผลักรุด (Drag Force)



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการเกิดแรงยก (Lift Force) และแรงผลักรุด (Drag Force) บนแผนอากาศ [8]

การเกิดขึ้นของแรงยก (Lift Force) หมายถึง แรงที่กระทำต่อแพนอากาศแรงดังกล่าวที่อยู่
 ในทิศที่ตั้งฉากกับการไหลของอากาศ แทนด้วยสัญลักษณ์ L การเกิดขึ้นของแรงผลึก (Drag Force)
 หมายถึง แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวทั้งสองด้านของแพนอากาศซึ่งเกิดจากความเค้นเฉือนที่ผิว และ
 แรงจากค่าความดันแตกต่างที่อยู่ในทิศที่ขนานกับการไหล แทนด้วยสัญลักษณ์ D ค่าแรงต่างดังที่
 กล่าวมาจะได้จากการทดสอบแพนอากาศดังกล่าวในอุโมงค์ลม ซึ่งมักจะแสดงค่าแรงยก และแรงผลึก
 อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงยก (Lift Coefficient) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_L และสัมประสิทธิ์แรงผลึก
 (Drag Coefficient) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_D โดยที่นิยามของค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองจะเขียนได้ดัง
 สมการที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ [8]

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho_a AV_\infty^2} \quad (2.6)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho_a AV_\infty^2} \quad (2.7)$$

โดยที่

C_L = สัมประสิทธิ์แรงยก (Lift Coefficient)

C_D = สัมประสิทธิ์แรงผลึก (Drag Coefficient)

L = แรงยก (Lift Force, N)

D = แรงผลึก (Drag Force, N)

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A = พื้นที่กวาดของใบพัด (m^2)

V_∞ = ความเร็วลมเข้าใบพัด (m/s)

2.5 กังหันลม

ชนิดของกังหันลม สามารถจำแนกชนิดของกังหันลม มี 2 วิธี คือ การจำแนกตามลักษณะการวางตัวของแกนหมุน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบแกนนอน หมายถึง กังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของกระแสลม แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 และแบบแกนตั้ง หมายถึง กังหันลมที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับทิศทางของกระแสลม และตั้งฉากกับพื้นผิวโลก แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 และจะมีกังหันลมอีกหลายชนิดแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 ซึ่งจะแล้วแต่ความเหมาะสมในการเลือกใช้งานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.6 กังหันลมแบบแนวนอน [9]

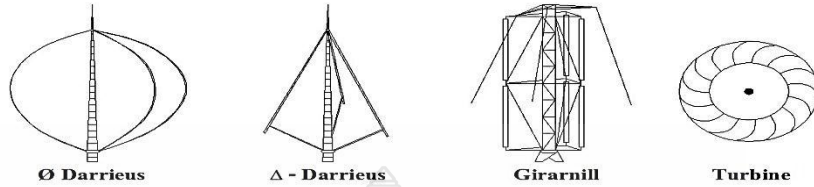


รูปที่ 2.7 กังหันลมแบบแนวตั้ง [10]

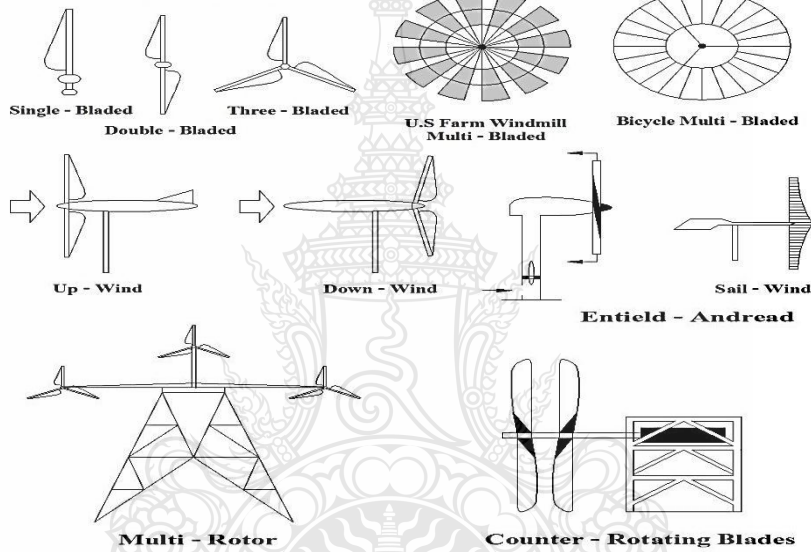
PRIMARILY DRAG-TYPE



PRIMARILY LIFT-TYPE



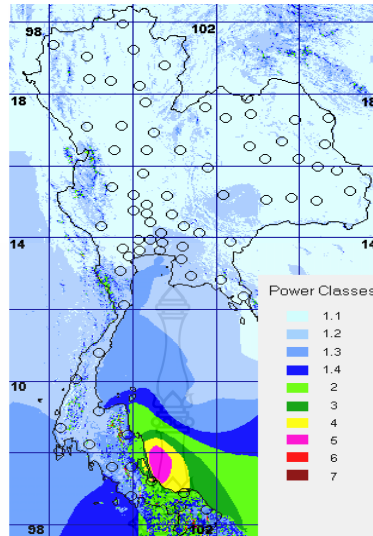
COMBINATION HORIZONTAL AXIS



รูปที่ 2.8 ใบกังหันลมชนิดต่างๆ

2.6 ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย

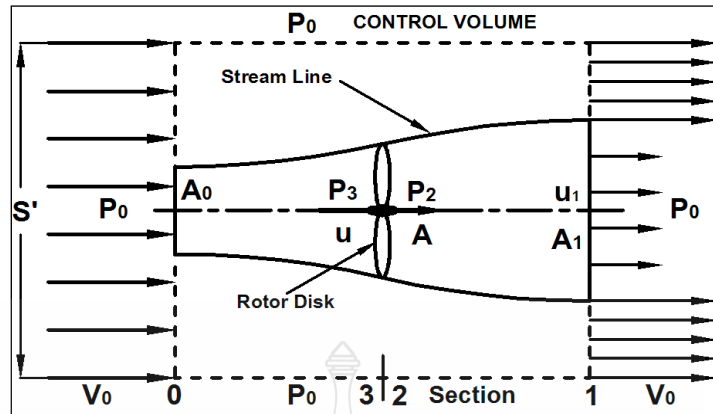
สำหรับศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย จากรายงานการศึกษาของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานและการไฟฟ้า พบว่าแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีของประเทศไทย มีศักยภาพกำลังลมเฉลี่ยทั้งปีอยู่ประมาณระดับ 1-5 (Wind Power Classes 1-5) ซึ่งเท่ากับค่าความเร็วลมประมาณ 0-6.4 เมตร/วินาที โดยบริเวณที่พบค่าความเร็วสูงสุดโดยมากอยู่บริเวณภาคใต้บริเวณชายฝั่งทะเล ตะวันออก นอกจากนี้ยังมีการสำรวจพื้นที่ที่มีศักยภาพกำลังลมเพียงพอต่างๆอย่างต่อเนื่อง เช่น บริเวณยอดเขาหรือเทือกเขาต่างๆ เป็นต้น ซึ่งศักยภาพของลมโดยรวมในประเทศไทยแสดงไว้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความเร็วลมตลอดปีในประเทศไทย [1]

2.7 ทฤษฎีการออกแบบใบกังหันลม

2.7.1. การออกแบบ โดยใช้ Momentum Theory ในการศึกษาพลังงานจากลมที่สูตการคำนวณที่จำเป็นต้องใช้โดยทั่วไป ในการนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของกังหันลม โดยใช้ทฤษฎีของหลักการที่เรียกว่า Momentum Theory โดยศึกษารายละเอียดของการวิเคราะห์ตามหลักการได้จากรูปที่ 2.10 ซึ่งในการออกแบบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้น ใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าย่อมมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการคัดเลือกขนาดต่างที่เหมาะสมต่อการทำงานของทั้งระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ซึ่งหากการออกแบบมีความผิดพลาด สูงก็ย่อมทำให้การทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าผิดพลาดและอาจเกิดการเสียหายตามมาได้



รูปที่ 2.10 หลักการของทฤษฎี Momentum theory [11]

2.7.1.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์โดยใช้หลักการของ Momentum Theory นั้น ในเบื้องต้นจะต้องทำการตั้งสมมติฐาน (Assumption) ขึ้นมาก่อน ดังนี้

1. ลมที่พัดเข้ามาวิเคราะห์จะต้องมีการไหลที่สม่ำเสมอต่อเนื่อง (Steady, Homogeneous Wind Flow)
2. ไม่มีสิ่งกีดขวางการไหลของทางเข้าและทางออกของอุโมงค์ที่ใช้ในการทดสอบ (No Obstruction to Wind Flow Either Upstream or Downstream)
3. การเคลื่อนที่ของลมไม่มีการปั่นป่วนที่ตัวใบกังหันลม (Uniform Flow Velocity at Rotor)
4. ลมที่ไหลเข้ามาวิเคราะห์ต้องคิดว่าเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Wind Flow) จึงไม่มีผลในเรื่องของอุณหภูมิ (Temperature Effect) มาเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์

วิเคราะห์รูปที่ 2.10 มีตัวแปรใดบ้างที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์กังหันลมทุก ๆ ชนิด ตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องทราบคือ S' เท่ากับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่เราใช้อยู่ในขอบเขตของการวิเคราะห์ปริมาตรทั้งหมดของระบบ (Control Volume)

ในการวิเคราะห์ทฤษฎีของ Momentum นั้นเราสมมุติว่าความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิห้องไฟปกติมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.225 kg/m^3 และจากกฎของการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuity Equation) นั้น การไหลต้องเท่ากันทั้งระบบ นั่นคือ $Q = A \cdot V$ จะได้ $V_0 A_0 = uA = u_1 A_1$ และจากกฎของเบอร์นูลลี โดยวิเคราะห์ในส่วนของความดันอย่างเดียวตั้งแต่ส่วนที่ 0 ถึงส่วนที่ 3 และจากส่วนที่ 2 ถึงส่วนที่ 1 ของรูปที่ 2.10 กล่าวถึงตัวแปรที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์กึ่งหันลมทุก ๆ ชนิด ซึ่งจะมีผลการวิเคราะห์ให้ได้ คือ

$$\frac{1}{2} \rho V_0^2 + P_0 = \frac{1}{2} \rho u^2 + P_3 \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + P_2 = \frac{1}{2} \rho u_1^2 + P_0 \quad (2.9)$$

ดังนั้นแรงผลัก (Thrust) T_a ที่เกิดขึ้นในใบกังหันจะได้

$$T_a = P \cdot A \quad (2.10)$$

นั่นคือ $A(P_3 - P_2)$

$(P_3 - P_2)$ คือ การที่พลังงานจากลมได้ถ่ายทอดให้กับแผ่นดิสก์เรียบร้อยแล้ว พลังงานก็จะถูกสะสมอยู่ในใบกังหันนั่นเอง หรือถ้าจะวิเคราะห์ส่วนของความเร็วลมก็จะได้ว่าแรงผลักที่เกิดในใบกังหันคือ

$$T_a = \frac{\rho A (V_0^2 - u_1^2)}{2} \quad (2.11)$$

สมการที่ 2.11 ได้มาจากพลังงานจลน์ของลมนั่นเองคือ $KE = \frac{1}{2} \rho AV^2$

$$Au = A_1 u_1$$

$$\text{ดังนั้น } u = \left(\frac{V_0 + u_1}{2} \right) \quad (2.12)$$

u คือ ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมดของระบบที่เรากำลังวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์นั้นเราสมมุติว่าระบบจะต้องมีการสูญเสียโดยกำหนดให้เป็นค่าที่เรียกว่า Axial Interference Factor โดยค่านี้คือค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลม ในระหว่างลมที่เข้ามาอย่างอิสระและลมที่ปะทะตัวใบกังหัน นั่นคือ $a = \frac{v}{V_0}$ และจาก $v = V_0 - u$ ดังนั้นเราแทนค่า $v = V_0 - u$ เป็นค่าของการสูญเสียจะได้

$$u = V_0(1-a) \quad (2.13)$$

ดังนั้นแทนค่าลงในสมการ 2.12 จะได้ u_1 คือ

$$u_1 = V_0(1-2a) \quad (2.14)$$

V_0	คือ ความเร็วลมทางด้านเข้าและทางด้านออกของ Control volume (m/s)
u	คือ ความเร็วลมก่อนที่จะถึงด้านหน้าของใบกังหันหรือแผ่นดิสก์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m/s)
u_1	คือ ความเร็วลมหลังจากผ่านตัวใบกังหันหรือแผ่นดิสก์ทดสอบ (m/s)
P_0	คือ ความดันบรรยากาศทั่วไป (N/m^2)
P_2	คือ ความดันของอากาศที่ไหลผ่านตัวใบกังหันแล้ว (N/m^2)
P_3	คือ ความดันของอากาศก่อนที่จะปะทะตัวใบกังหัน (N/m^2)
A	คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวใบกังหัน (m^2)
A_0	คือ พื้นที่หน้าตัดทางเข้าของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m^2)
A_1	คือ พื้นที่หน้าตัดทางออกของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m^2)
Q	คือ อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m^3/s)

ในการวิเคราะห์การทำงานของกังหันนั้นถ้าค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลมมีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือไม่มีการรบกวนของระบบ คือลมที่ทางเข้าและทางออกไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลมเลย ซึ่งเป็นไปไม่ได้และขณะเดียวกันค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลมมีค่าเท่ากับ 1 นั่นก็คือไม่มีการถ่ายเทพลังงานของลมให้แก่ใบกังหันเลย ซึ่งเราก็ไม่ต้องการในการวิเคราะห์ครั้งนี้เราสามารถกำหนดว่าพลังงานจากลมได้ถูกถ่ายเทให้กับใบกังหันต่อหน่วยเวลาใด ๆ

นั่นคือ P_w โดย

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A u V_0^2 - \frac{1}{2} \rho u_1^2 A u$$

และแทนค่า a ลงไปจะได้ว่า

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 4a(1-a)^2 \quad (2.15)$$

ในการวิเคราะห์การทำงานของกังหันลมโดยทั่ว ๆ ไปนั้น เราคิดพลังงานลมที่เกิดจากการไหลอิสระนั้น เราจะมีสูตรการคำนวณคือ P_a ผ่านพื้นที่รับลมใด ๆ จะได้ว่า

$$P_a = (\text{ปริมาตรของการไหล}) \times (\text{พลังงานจลน์ของลมต่อปริมาตรการไหล})$$

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลมนั้น ตัวแปรที่จะต้องใช้นั้นเราเรียกว่าค่า C_p (Power Coefficient) โดยจะได้จากการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่ตัวกังหันลมได้ดึงเอาไว้ P_w เปรียบเทียบกับตัวพลังงานที่สมควรจะได้จริงจากลมที่มีการไหลอิสระ P_a นั่นคือ ถ้าวิเคราะห์กันทางกลก็คือกำลังงานเท่ากับพลังงานที่ผลิตได้ต่อพลังงานที่ป้อนเข้าให้สู่ระบบนั่นเอง ในทางวิศวกรรมของพลังงานลมนั้นเราสามารถหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมได้คือ

$$C_p = \frac{P_w}{P_a} = \frac{\frac{1}{2} \rho A V_0^3 4a(1-a)^2}{\frac{1}{2} \rho A V_0^3} \quad (2.16)$$

ดังนั้นค่า

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2.17)$$

ดังนั้นถ้าเราอยากจะทำให้ออกแบบให้ดีที่สุดแล้วตัวกังหันลมสามารถมีประสิทธิภาพสูงสุดได้เท่านั้น โดยการ Differentiate สมการที่ 2.17 นั่นคือ

$C_p = 4a - 8a^2 + 4a^3$ และเมื่อทำการ Differentiate เปรียบเทียบกับค่า a แล้วเราจะได้

$$\frac{dC_p}{da} = 4 - 16a + 12a^2 = 0$$

$$12a^2 - 16a + 4 = 0$$

$$3a^2 - 4a + 1 = 0$$

ดังนั้นจะได้ว่า a คือ

$$a = \frac{4 \pm \sqrt{(-4)^2 - 4 \times 3 \times 1}}{2 \times 3}, a = \frac{4 \pm \sqrt{4}}{6}$$

นั่นคือจะได้ค่า $a = \frac{2}{3} \pm \frac{1}{3}$ สมการจะเป็นจริงได้มีค่า a แค่ 2 ค่า คือ $a = 1$ และ $a = \frac{1}{3}$

ดังนั้นถ้าเราแทนค่า $a = \frac{1}{3}$ ลงในสมการที่ 2.16 เราจะทราบได้ว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลม ซึ่งเราเรียกว่า $C_{p_{max}}$ นั้นจะมีค่าไม่เกิน 0.5926 นั่นคือถ้าลมให้พลังงานมา 100% กังหันที่ดีที่สุดจะทำการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานทางกลได้สูงสุดไม่เกิน 59.26 % เนื่องด้วยปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไป ตามประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่าง ๆ ว่าไม่มีกังหันลมชนิดใดที่สามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพได้ถึง 45% ด้วยซ้ำไปแต่อย่างไรก็ตามถ้าเราสามารถออกแบบชุดกังหันลมให้มีประสิทธิภาพรวมได้ถึง 30-35 % ก็ถือว่าประสบความสำเร็จเป็นอย่างสูงแล้วเนื่องจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรที่ไม่ใช้การสันดาปเหมือนกับเครื่องยนต์ความร้อนทำให้ไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมจะเป็นพลังงานที่สะอาดและจะไม่มียวันหมดไปเหมือนพลังงานจากเชื้อเพลิงสารไฮโดรคาร์บอนที่จำเป็นต้องใช้การเผาไหม้ในการได้งานมานั่นเอง

2.7.2 การออกแบบโดยใช้ Blade Element Theory (BET) เป็นการพิจารณาแรง ที่กระทำบนใบกังหันในลักษณะสองมิติ โดยแบ่งใบกังหันเป็นส่วน ๆ ตามความยาว (Span-Wise) แล้วคำนวณค่าคุณลักษณะต่าง ๆ เช่นแรงยก แรงจุด ที่เป็นผลของมุมปะทะ และความเร็ว ณ แต่ละส่วนของใบกังหันที่แบ่งไว้ สำหรับความเร็วในแนว Span จะไม่นำมาพิจารณาด้วย นั่นคือจะไม่นำผลในสามมิติมาพิจารณานั้นเอง

พิจารณาที่ใบกังหันในแต่ละส่วน (Blade Element) ความเร็วที่เกิดขึ้นแบ่งได้เป็นความเร็วในแนวแกน (Axial) และความเร็วในแนวสัมผัสหรือแนวการหมุน (Tangential) ความเร็วในแนวแกนที่ปรากฏที่ส่วนของใบกังหันจะมีค่าเป็น $U_d = U_o(1-a)$ และความเร็วแนวสัมผัสคือ $r\Omega + w(r)$ พจน์ $r\Omega$ คือความเร็วที่เกิดจากการหมุนของใบกังหัน และ $w(r)$ คือความเร็วการหมุนควงของอากาศ (Wake) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเกิดความเร็วการหมุนควงของอากาศ (Wake) [12]

2.7.3 การออกแบบโดยใช้ Blade Element-Momentum (BEM) Theory

เป็นการนำเอา Momentum Theory มาผสมเข้ากับ Blade Element Theory สมมุติฐานของทฤษฎี BEM คือแรงกระทำบนใบกังหันเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอากาศที่วิ่งผ่านตลอดวงแหวนที่กำหนดขึ้น นั่นคือไม่คิดผลของการไหลในแนวรัศมีไปตาม Span หรือไม่มีการถ่ายเทการไหลในแต่ละวงแหวน เงื่อนไขนี้จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อค่า a ไม่เปลี่ยนแปลงในแนวรัศมี และนำเอา BET ร่วมกับ MT $\partial T|_{BET} = \partial T|_{MT}$ และ $\partial Q|_{BET} = \partial Q|_{MT}$ จะได้ความสัมพันธ์เป็น สำหรับค่าสัมประสิทธิ์กำลัง สามารถคำนวณได้จาก

$$C_p = \frac{P}{P_{tot}} = \frac{\int_0^R \Omega dQ}{0.5 \rho \pi R^2 U^3} \quad (2.18)$$

เนื่องจากการสูญเสียที่ปลายใบ (Tip Loss) จึงต้องมีการปรับแก้ค่า C_p ในสมการที่ 2.18 โดยคูณ Tip loss Factor (F) เข้าไปซึ่ง Prandtl ได้เสนอไว้ และ Wilson ได้สรุปแรงที่เกิดสำหรับกังหันลมไว้ดังนี้

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left[-\frac{N(R-r)}{2r \sin \phi} \right] \right) \quad (2.19)$$

เมื่อกระจายสมการที่ 2.19 ออกมาใหม่จะได้ความสัมพันธ์ของ C_p เป็น

$$C_p = \frac{2}{\lambda R} \int_H^R F \frac{\sigma' \lambda_r^2 (1-a) C_L}{\sin^2 \phi} \left[\sin \phi - \frac{C_D \cos \phi}{C_L} \right] dr \quad (2.20)$$

เมื่อ $\lambda = \Omega R / U_0$ คือ Tip Speed Ratio โดย R คือรัศมีใบ ค่า H คือ รัศมีของ Hub ค่า $\sigma' = Nc / 2\pi r$ เรียกว่า Local Solidity

โดยใช้ทฤษฎี BEM นี้ทำให้สามารถคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหามุมบิดที่เหมาะสมที่หน้าตัดต่างๆ ของใบกังหันได้

2.7.4 การออกแบบโดยใช้ Strip Theory ทฤษฎีสตริป (Strip Theory) เป็นทฤษฎีที่นำค่าแรงที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีโมเมนตัมและทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันจับมาเท่ากัน และเขียนความสัมพันธ์เพื่อนำไปหาค่าแฟกเตอร์การเหนี่ยวนำตามแนวแกน ดังนั้นเมื่อนำสมการมาเท่ากันโดยละทิ้งค่าแรงหน่วยตามข้อสมมุติฐานของสมการและนำมาจัดรูปใหม่จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{a}{1-a} = \frac{BcC_L \cos \phi}{8\pi r \sin^2 \phi} \quad (2.21)$$

จากนั้นก็จะสามารถหาค่าแฟกเตอร์การเหนี่ยวนำตามแกน a ได้โดยกระบวนการทำซ้ำซึ่งจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สมมุติค่า a
2. คำนวณค่า $\phi := \phi \tan^{-1} \left[\frac{(1-a)}{r\Omega} \right]$
3. คำนวณค่า $\alpha : \alpha = \phi - \beta$
4. หาค่า C_n และ C_D จากข้อมูลอากาศพลศาสตร์ของใบกังหัน
5. คำนวณค่า C_n จากสมการ
6. คำนวณค่า a จากสมการ
7. เปรียบเทียบค่า a ที่คำนวณได้จากค่าใหม่กับค่าเก่า ถ้ามีค่าเท่ากันหรืออยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ก็จะหยุด ถ้าไม่เท่ากันก็เริ่มต้นข้อที่ 2 ใหม่จนกระทั่งได้ค่าที่ต้องการหลังจากที่ได้ค่า a ใน

แต่ละตำแหน่งของใบกังหันแล้ว ก็สามารถนำไปคำนวณค่าสมรรถนะของกังหันลมที่สนใจ อันได้แก่ ค่าแรง ทอร์สต์ ค่าแรงบิดและค่ากำลังงานทางทฤษฎีขึ้นส่วนย่อยของใบกังหันได้ โดยนำเอาค่าแรง หมุนไปคิดประกอบด้วย ค่าเหล่านั้นจะสามารถเขียนได้เป็น

$$T = B \int_{R_H}^R \frac{1}{2} \rho W^2 C_n c dr \quad (2.22)$$

$$Q = B \int_{R_H}^R \frac{1}{2} \rho W^2 C_t r c dr \quad (2.23)$$

$$P = Q\Omega = B \int_{R_H}^R \frac{1}{2} \rho W^2 \Omega C_t r c dr \quad (2.24)$$

โดยที่ค่า R คือ รัศมีของใบกังหันที่วัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายใบ r คือ ค่ารัศมีของใบ กังหัน

ค่าสมรรถนะของกังหันลมที่เป็นที่สนใจก็คือกำลังงาน ซึ่งนำมาเสนอในรูปของเทอมไร้มิติ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงาน C_p กับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio, $R\Omega/V_\infty$)

2.8 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

การใช้โปรแกรมทางด้าน CFD คือการที่นำความรู้ด้านพลศาสตร์ของไหลมารวมกับ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งสมการทางพลศาสตร์ของไหลที่นิยมนำมาใช้กัน อยู่ก็จะเป็นสมการการอนุรักษ์ ซึ่งสมการการอนุรักษ์ที่นำมาใช้กันจะมี 3 สมการคือ

1. สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)
2. สมการการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Conservation Equation)
3. สมการการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Equation)

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือช่วย แก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) คำนวณ เพื่อประมวลผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อน ซึ่งมีความยุ่งยากในการหาผลเฉลยด้วย วิธีแมนตรง หลักสำคัญในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับสมการบังคับ ซึ่งสมการ บังคับพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

2.8.1 สมการพื้นฐานสำหรับการไหล การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือช่วยแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) คำนวณเพื่อประมวลผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อนซึ่งมีความยุ่งยากในการหาผลเฉลยด้วยวิธีแม่นยำ หลักสำคัญในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับสมการบังคับ ซึ่งสมการบังคับพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบนั้นมีความสำคัญมาก ยิ่งมีการออกแบบกีดกันโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) มาใช้ ซึ่งในหลักการทางวิศวกรรมของไหลแล้วเรียกว่า Computational Fluid Dynamics (CFD) อาจเห็นคำศัพท์ใหม่ในทางวิศวกรรมที่ยังไม่รู้จักแพร่หลายมากนักในอดีต แต่ในทางวิศวกรรมในปัจจุบันแล้ว CFD จะเข้ามามีบทบาทอย่างสำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ในทางวิศวกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของปัญหาในเรื่องของกลศาสตร์ของของไหล (Fluid Mechanics) ในปัจจุบัน CFD อาจจะต้องมีการบัญญัติขึ้นมาใหม่ในทางวิศวกรรมศาสตร์ว่าหมายถึงอะไรกันแน่ เพื่อจะได้ใช้เป็นบรรทัดฐานและเป็นมาตรฐานเดียวกันแต่หลักการโดยทั่วไปของ CFD ซึ่งในที่นี้อาจจะกล่าวอ้างอิงนั้นก็คือ การใช้ข้อได้เปรียบทางด้านอุปกรณ์ทางด้านคอมพิวเตอร์ (Computer) มาคำนวณปัญหาของของไหล โดยช่วยในการประมวลผลการทำงานและวิเคราะห์การไหลของของไหล ชนิดต่างๆ หรืออาจจะเรียกง่ายๆ ว่าการวิเคราะห์ของไหลโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยใช้ Computer เข้ามาช่วยในการคำนวณ

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วโดยมีความเร็วของชุดประมวลผล (CPU Speed) แล้วยังมีหน่วยความจำ (Memory) ที่มีประสิทธิภาพสูงจึงทำให้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) และการทำงานของโปรแกรมการคำนวณของ CFD สามารถทำได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย ในปัจจุบันนั้นในการวิเคราะห์ในเรื่องของของไหลที่มีความยุ่งยากซับซ้อนอาจจะแก้ได้โดยใช้โปรแกรม หรือซอฟต์แวร์ (Software) ที่เรียกว่า CFD Package มาใช้ ทำให้แก้ปัญหาได้ง่ายขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ปัญหาด้านของไหลต่างๆ เช่น

1. ของไหลที่สามารถอัดตัวได้ หรือ Compressible Fluid ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์การไหลในระบบท่อทางต่างๆ ของระบบการทำความเย็นหรือปรับอากาศ เป็นต้น
2. ของไหลที่ไม่สามารถอัดตัวได้ หรือ Incompressible Fluid ตัวอย่างเช่น การไหลของน้ำในระบบท่อทางต่างๆ ภายในอาคาร

3. ของไหลที่มีการไหลเป็นแบบราบเรียบหรือที่เราเรียกกันว่า Laminar Flow Problems

4. ของไหลที่มีการไหลแบบปั่นป่วน หรือ Turbulent Fluid Flows เป็นต้น

ตัวอย่างข้างต้นอาจจะรวมไปถึงข้อได้เปรียบทางด้านการใช้โปรแกรม CFD ในการวิเคราะห์การไหลที่ผ่านรูปทรงที่มีความยุ่งยากซับซ้อน (Complexity of Geometry) รวมถึงการวิเคราะห์การไหลของสารเคมีชนิดต่างได้อีกด้วย

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในทางเรื่องของ CFD นั้น อาจจำแนกออกได้หลายชนิดหลักๆ อาทิเช่น สมการการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuity Equation) หรือสมการอนุรักษ์ของมวลสาร (Conservation of Mass) สมการทางคณิตศาสตร์ในเรื่องของการคำนึงถึง Momentum หรือที่รู้จักกันเป็นอย่างดีในทาง CFD ก็คือ Navier-Stokes Equations และสุดท้ายอาจจะรวมถึงสมการทางคณิตศาสตร์ในเรื่องของการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equations) สมการทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะนำมาใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ของไหลในโปรแกรม การคำนวณของ CFD โดยการจัดรูปรวมกันเป็นสมการที่เรียกว่า Non-linear Partial Differential Equations (PDE) มาใช้ในการวิเคราะห์การไหลของ ของไหลแบบต่างๆ ในทางวิศวกรรมดังกล่าวมาแล้วข้างต้น

โดยปกติแล้วในทางการวิเคราะห์การไหลของ ของไหลแบบต่างๆในทางวิศวกรรม โดยทั่วไปนั้นเราจะคิดเสียว่าการไหลนั้นจะเป็นแบบต่อเนื่องคงที่ (Linear Flow) เราจึงทำการสมการที่จะตัดตัวแปรบางอย่างออกไปได้ ซึ่งในทางความเป็นจริงแล้วของไหลต่างๆในทางวิศวกรรม โดยทั่วไปที่จริงแล้วจะมีความซับซ้อนสูงแล้วยังจะเป็นการไหลแบบไม่ราบเรียบและไม่คงที่ตลอด (Non-linear Flow) เกือบทั้งสิ้น ซึ่งนั่นก็คือ จะต้องมีการใช้การวิเคราะห์ทางตัวเลขขั้นสูง (Advanced Numerical Methods) มาใช้ในการวิเคราะห์การไหลของ ของไหลในปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจริงในทางวิศวกรรม

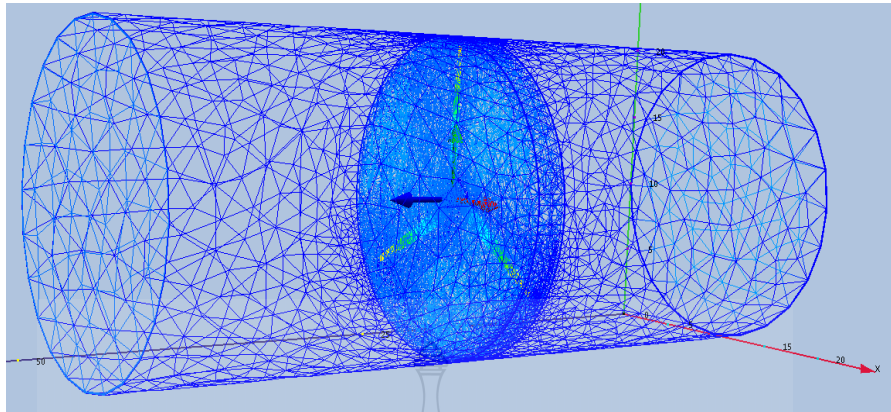
การทำงานโดยทั่วไปของการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆใน Computational Fluid Dynamics หรือ CFD นั้น คือการใช้หลักการแทนที่ (Discretization) จุดประสงค์ของการทำ เพื่อเปลี่ยนสมการที่มีความต่อเนื่องไปเป็นสมการไม่ต่อเนื่อง ไม่ว่าจะด้วยวิธีการใดก็ตามเพื่อลดความยุ่งยากของสมการ Partial Differential Equations (PDE) ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางฟิสิกส์ให้เป็นของชุดสมการทางพีชคณิต (Set of Algebraic Equation) ซึ่งอยู่ในรูปของการ บวก ลบ คูณ หาร เท่านั้น ซึ่งจะสามารถหาผลเฉลยได้สะดวกขึ้น การแก้ปัญหาดังแต่จุดเริ่มต้นของปัญหาในการไหลในทางวิศวกรรมใดๆ จนกระทั่งถึงจุดท้ายสุดของการวิเคราะห์นั่นก็คือ การหาคำตอบที่เราต้องการ ซึ่งในทางของ การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) หรือ CFD แล้วเราเรียกวิธีการนี้ว่าการ Discretization ซึ่งจะสามารถทำได้นั้นก็ต้องใช้การได้เปรียบทางด้านคอมพิวเตอร์ (Computer) เข้ามาช่วยในการคำนวณ

เท่านั้น ซึ่งเราจะได้คำตอบโดยประมาณ (Approximate Solution) เมื่อสิ้นสุดการวิเคราะห์การไหล ในปัญหาชนิดต่างๆ หลักการ Discretization Method ที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง และเป็นที่ยอมรับกันดีใน CFD นั้น แบ่งออกเป็น 2 วิธีการหลักๆ ดังนี้

1. Finite Difference Method (FDM)
2. Finite Element Method (FEM)

ในการวิจัยในครั้งนี้กล่าวถึง เฉพาะวิธีการ Finite Difference Method ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กันมากที่สุดในการวิเคราะห์ทาง CFD โดยจะเห็นได้จาก Commercial Software ทั่วไปที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน โดยส่วนหลักๆ ของวิธีการวิเคราะห์ทาง CFD ของวิธีการนี้คือการสร้าง Domain และรวมถึงการสร้างส่วนของขอบเขตจำกัด (Boundary) ของปัญหาที่จะนำมาวิเคราะห์โดยจะครอบคลุมปัญหาที่จะใช้ในการวิเคราะห์ได้โดยการใช้กริด (Grid หรือ Mesh) ที่สร้างขึ้นมาให้สามารถที่จะทำการครอบคลุมปัญหาในการไหลได้ทั้งหมด แต่ละจุดย่อยๆ ของกริด (Grid) นั้นจะถูกคำนวณและแทนที่กันไปด้วย สมการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Differential Equation เปรียบเทียบกับค่าที่เรียกว่า Finite Difference Approximation เพราะฉะนั้นค่าความแม่นยำเที่ยงตรงของคำตอบจึงขึ้นอยู่กับขนาดของกริด (Grid หรือ Mesh) ที่เราสร้างขึ้นมา

ในทางการวิเคราะห์กังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบโดยทั่วไปแล้วยังมีความละเอียดของ Mesh สูงก็จะทำให้คำตอบมีความแม่นยำสูงไปด้วย แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าอย่างนี้เสมอไป ในบางครั้งเราไม่จำเป็นต้องการคำตอบในส่วนขององค์ประกอบต่างๆ ที่ไม่จำเป็นเพราะจะทำให้เสียเวลาในการคำนวณ และไม่มีผลให้คำตอบดีขึ้นอีกด้วย ตัวอย่างแสดงใน รูปที่ 2.12 ถ้าเราต้องการทราบเรื่องด้านการไหลของแผ่น Plate อันหนึ่งในระบบท่อทางเราก็ไม่จำเป็นต้องใส่ความหนาแน่นของ Mesh ในส่วนของท่อทางแต่เราจะเน้นในส่วนที่เป็นแผ่น Plate เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามในงานที่ต้องการความละเอียดสูงและต้องการความแม่นยำสูงก็ยังคงมีการคำนึงขอบเขตการทำงานต่างๆ ที่จำเป็นต้องเรียนรู้เพิ่มเติมและในบางครั้งก็จำเป็นต้องมีการประเมินผลการทำงานของโปรแกรมที่เราใช้ด้วยว่ามีความน่าเชื่อถือแค่ไหนรวมถึงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นกับผลการทดลองในห้องทดสอบด้วยก็จะทำให้เรามีความมั่นใจได้ในเบื้องต้นว่าโปรแกรมการคำนวณมีความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง



รูปที่ 2.12 การให้ความสำคัญของ Mesh ในการใช้ CFD

อย่างไรก็ตามยังมีวิธีหลายๆ ส่วนที่จำเป็นจะต้องศึกษาเพิ่มเติมสำหรับผู้ที่จะศึกษาเรื่องของ CFD อย่างละเอียดซึ่งไม่สามารถอธิบายได้ทั้งหมดในการเสนอนี้ อย่างไรก็ตามสามารถที่จะแบ่งแยกส่วนที่สำคัญในหลักการหลายๆ ที่ใช้ในเรื่องของ การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและในส่วนของ CFD โดยใช้วิธี Finite Element Method (FEM)

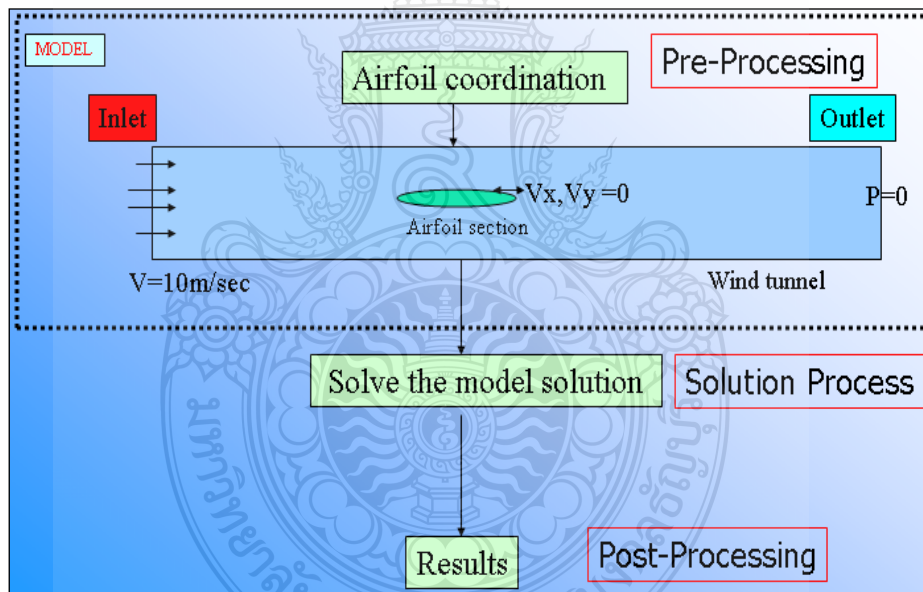
โดยปกติก็มีคำถามอยู่เสมอว่า FEM มีความแตกต่างอย่างไรกับ CFD ซึ่งผู้อ่านบทความทางด้าน CFD มาบ้างแล้วนั้น อาจทราบว่าความฉบับนี้จะขยายความเข้าใจให้มากยิ่งขึ้นโดยจะอธิบายหลักการอย่างคร่าวๆ ของ FEM และ CFD ในส่วนด้านล่างนี้ คือ มากล่าวถึง Finite Element Method (FEM) ก่อน FEM คือ การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) ซึ่งจะเป็นเพียงเครื่องมือ (Tool) ตัวหนึ่ง เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาทางวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ที่มีความสลับซับซ้อนในเชิงตัวเลขขั้นสูงหรือ (Complex Physical Problem) ซึ่งไม่สามารถแก้ไขได้โดยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ธรรมดาทั่วไป โดยส่วนใหญ่ แล้ว FEM จะใช้ในการวิเคราะห์งานทางวิศวกรรม อาทิ งานทางด้านโครงสร้างต่างๆ ไป (Structural Design) การวิเคราะห์ทางด้านการสั่นสะเทือน (Vibration Analysis) ทางด้านการถ่ายเทความร้อน (Heat- Transfer) เป็นต้น ส่วนในทาง CFD นั้นจะให้ความสำคัญสูงกว่าการวิเคราะห์ โดย FEM โดยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมที่นักวิทยาศาสตร์หรือนักวิศวกรรมศาสตร์ต้องการที่จะรู้นั้นมีความยุ่งยากมากเกินกว่าการวิเคราะห์โดย FEM ดังนั้น CFD จะขึ้นอยู่กับความสำคัญของการใช้เทคโนโลยีทางด้าน คอมพิวเตอร์ (Computer) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์มากกว่า และมีความจำเป็นอย่างสูงที่จะต้องใช้ โดยการไหลของของไหลจะถูกกำหนดขึ้นเป็นต้นแบบ (Model) ให้อยู่ในขอบเขตของการวิเคราะห์ แล้วแก้ปัญหา

ที่เกิดขึ้นโดยการใช้ชุดของการสมการคณิตศาสตร์ คือ Partial Definition Equation (PDE) หรือที่เรียกว่า Navier-Stroke Equations

อย่างไรก็ตามนี่เป็นแค่ตัวอย่างในการวิเคราะห์เท่านั้นแต่ยังมีหลายปัญหาที่เกิดขึ้นที่จำเป็นต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ต่างกันออกไป ในทางการแก้ปัญหาทางด้าน CFD นั้นไม่ว่าจะเป็นทางด้านใดหรือใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ใดๆแต่การทำงานก็มีอยู่ 4 ขั้นตอนหลัก นั่นคือ

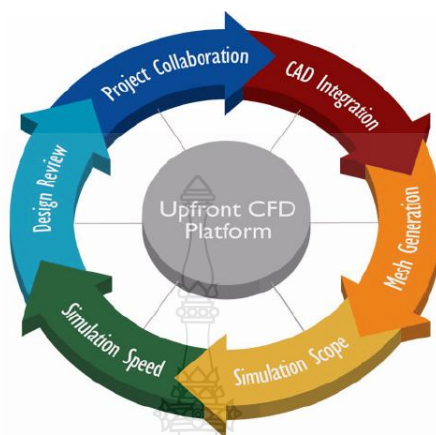
1. Preference (เลือกการทำงาน)
2. Preprocessing Process (ตั้งค่าตัวแปรต่างๆ)
3. Solution Process (ประมวลผลการคำนวณ)
4. Post Processing Process (แสดงผลการคำนวณและให้คำตอบ)

อาทิเช่นการหาค่าประสิทธิภาพของแรงยกตัว (Lift Force Coefficient) และแรงต้าน (Drag Force Coefficient) ของ Profiles ต่างๆในท่ออุโมงค์ลมแสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 หลักการทำงาน โดยทั่วไปของโปรแกรม CFD

2.8.2 การทำงานของ CF-Design V.8.0 สามารถที่จะอธิบายการทำงานตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งจะทำงานที่เป็นการวนขั้นตอนทั้งหมด 6 ขั้นตอน คือ



รูปที่ 2.14 รูปแบบกระบวนการ CF-Design [13]

1. CAD Integration คือการเขียนแบบเพื่อที่จะใช้ในการทดสอบในโปรแกรม ในรูปแบบ 2 มิติ หรือแบบ 3 มิติ จะมีชิ้นส่วนของแบบที่ทำการประกอบกันขึ้นเพื่อเป็นระบบสำหรับทดสอบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้วทำการเปลี่ยนระบบแบบที่เขียนขึ้นให้อยู่ในระบบแบบที่เป็นของ CF-Design เช่น การเขียนแบบในโปรแกรม Solid Work จะมีนามสกุล Solid Work Part Document และจะต้องทำการเปลี่ยนเป็นนามสกุล x_t File และการที่จะหา TSR ของใบกึ่งหั่นลม หรือ หาแรงบิด ที่เกิดจากใบกึ่งหั่นลม ซึ่งการทดสอบต้องสร้าง ใบกึ่งหั่นลม ท่ออุโมงค์ลม และ พื้นที่การหมุนของใบ เป็นต้น

2. Mesh Generation คือการกำหนด Mesh ให้กับระบบที่จะใช้ในการทดสอบ ซึ่ง Mesh ที่ใช้ในแต่ละส่วนของระบบอาจจะมีขนาดเท่ากัน หรือไม่เท่ากันก็ได้ แต่ส่วนมากแล้วจะให้ขนาด Mesh ที่ไม่เท่ากันในแต่ละส่วนของระบบ ซึ่งส่วนมากจะให้ชิ้นส่วนที่เราสนใจศึกษามีความละเอียดมาก ส่วนชิ้นส่วนที่เป็นองค์ประกอบของระบบที่ไม่ค่อยสำคัญจะให้ความละเอียด Mesh ที่น้อย เพราะจะทำให้การคำนวณใช้เวลานาน

CF-Design เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการทาง Finite Element Mesh ซึ่งเป็นการสร้าง Mesh ขึ้นมาจากชิ้นส่วนที่ได้ทำการเขียนแบบ 3 มิติ Mesh ที่ทำการสร้างจะเป็น Mesh ที่เป็น 3 มิติ ที่มี

รูปแบบเป็น Tetrahedral ในส่วนของ CF-Design นั้นจะมีการสร้าง Mesh เป็นแบบอัตโนมัติ แต่สามารถที่จะปรับขนาดของ Mesh ที่ทำการสร้างขึ้นได้

3. Simulation Scope คือการกำหนดค่าขอบเขตในการคำนวณ หรือ กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับระบบการคำนวณทดสอบของโปรแกรม เช่น การทดสอบหาความเร็วรอบของใบกังหันลม เราจะสร้างอุโมงค์ลมขึ้นมาให้เป็นขอบเขตที่ลมไหลผ่านเข้าตามท่ออุโมงค์เข้าปะทะใบกังหันลมที่อยู่ในท่ออุโมงค์ลม เป็นต้น CF-Design จะทำการคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ บนพื้นฐานของการเคลื่อนที่ การไหลที่เป็นแบบความร้อน และ โมเมนตัม

4. Simulation Speed คือความเร็วในการคำนวณประมวลผล กล่าวคือเนื่องจากการสร้าง Mesh ที่เป็นแบบอัตโนมัติ จะทำให้การเข้ากันได้ของ Mesh ทำได้ค่อนข้างดีและเหมาะสมกับชิ้นงานนั้นๆ ทำให้เกิดการใช้งานที่ง่ายและรวดเร็วในการประมวลผล

5. Design Review การแสดงผลที่ได้จากการคำนวณใน CF-Design นั้นจะสามารถที่จะแสดงผลเป็นแบบ Real Time กล่าวคือระหว่างที่ทำการทดสอบด้วย CF-Design นั้นสามารถที่จะแสดงผลที่กำลังเกิดขึ้นได้ เช่น แสดงการหมุนของกังหันลม แสดงความเร็วลมที่เกิดขึ้น เป็นต้น

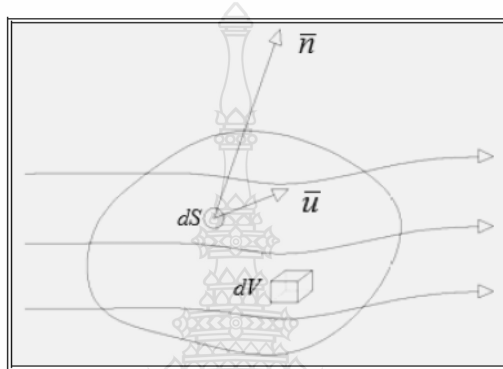
6. Design communication การที่จะให้ผลเนื่องจากการคำนวณสามารถที่จะแสดงผลด้วยรูปแบบอื่น ๆ นั้นก็สามารถที่จะทำได้ เช่น เป็นในรูปแบบภาพนิ่งหรือรูปภาพ หรือจะเป็นในรูปแบบเคลื่อนไหวหรือไฟล์วิดีโอ และสามารถที่จะทำงานร่วมกับ Excel, Word, PowerPoint ได้เลย

2.8.3 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลใน CF-Design V. 8.0 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือช่วยแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) คำนวณเพื่อประมวลผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อน ซึ่งมีความยุ่งยากในการหาผลเฉลยด้วยวิธีแมนตรง หลักสำคัญในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับสมการบังคับ ซึ่งสมการบังคับพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

สำหรับการวิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านกังหันลมผลิตไฟฟ้า จะไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะเกิดการไหล ดังนั้นจึงใช้เพียงกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น จึงขอเน้นเฉพาะกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเท่านั้น

1. กฎอนุรักษ์มวล เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมของการไหลต่อเนื่องในสนามการไหลดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะแสดงถึงการส่งถ่ายของมวลเข้าสู่ระบบและออกจากระบบที่เราสนใจ ซึ่งจะเรียกลักษณะดังกล่าวว่า ปริมาตรควบคุม จะเป็นไปตามหลักการอนุรักษ์มวลคือ

อัตราการเปลี่ยนแปลงภายในปริมาตรควบคุม = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่ไหลผ่านผิวควบคุม



รูปที่ 2.15 ปริมาตรควบคุม [3]

สามารถเขียนในรูปสมการ คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (2.25)$$

สมการ 2.25 มีชื่อเรียกว่า สมการต่อเนื่อง (Continuity Equation) เมื่อพิจารณาการไหลในท่ออุโมงค์ลมให้เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) พบว่าความหนาแน่นของอากาศคงที่ จะได้สมการความต่อเนื่องเป็นดังสมการ 2.26

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.26)$$

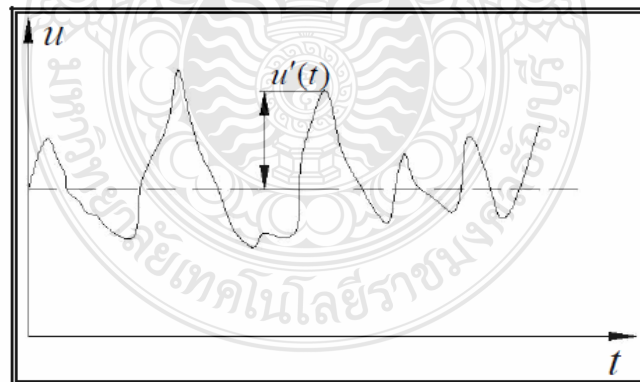
2. กฎอนุรักษ์โมเมนตัม หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเป็นการประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันและเมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมจะได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิของโมเมนตัม ปริมาตรควบคุม = แรงลัพธ์สุทธิที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิของโมเมนตัม

นัตัมของปริมาตรควบคุมเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุม กับโมเมนตัมสุทธิที่ไหลผ่านผิวควบคุม ดังสมการ

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \bar{u} dV + \iint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{S}) \quad (2.27)$$

แรงลัพธ์สุทธิที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดแรกเป็นแรงเนื่องจากสนามดึงดูด (Field Force) ซึ่งได้แก่ แรงโน้มถ่วงโลก (Body Force) และแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ชนิดที่สองเป็นแรงที่กระทำต่อผิว (Surface force) ซึ่งแบ่งออกเป็นแรงในแนวตั้งฉาก ได้แก่ ความดัน ความเค้นอัดหรือดึง แรงในแนวขนานกับผิว ได้แก่ ความเค้นเฉือน

2.8.4 การไหลแบบปั่นป่วนใน CF-Design V.8.0 การไหลแบบปั่นป่วน ค่าของตัวแปรต่างๆมีค่าไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป เช่น ความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.16 แสดงค่าของความเร็ว u ในการไหลแบบปั่นป่วนลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้มีความยุ่งยากในการคำนวณค่าตัวแปร เพื่อให้สามารถคำนวณได้ง่ายจึงสมมุติให้คุณสมบัติต่างๆ ที่พิจารณาแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนปริมาณเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลา เช่น $\bar{\mu}$ \bar{v} หรือ $\bar{\rho}$ กับส่วนที่กระเพื่อม (Fluctuation) เช่น μ' v' หรือ ρ'



รูปที่ 2.16 ค่าความเร็ว μ ในการไหลแบบปั่นป่วน

เมื่อทำการเฉลี่ยปริมาณใดๆ ในสมการควบคุมตลอดช่วงเวลาช่วงหนึ่ง ทำให้เกิดตัวแปรขึ้นมาใหม่ ส่งผลให้มีจำนวนตัวแปรไม่รู้ค่ามากกว่าจำนวนสมการที่มีอยู่ จึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Mode) เข้ามาช่วยเพื่อทำให้ปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาแบบปิด (Close Problem) ให้สามารถหาผลเฉลยได้

สมการบังคับของการไหลแบบปั่นป่วน สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ มีอนุสมการที่และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ ประกอบด้วย

1. สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.28)$$

2. สมการ นาเวียร์ - สโตคส์

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.29)$$

2.8.5 แบบจำลองความปั่นป่วน การหาผลเฉลยสมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์ - สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (RANS) ต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนมาช่วยในการคำนวณ โดยใช้หาค่าความเค้นของเรย์โนลด์ ซึ่งจะช่วยให้ไม่ต้องหาค่าของความกระเพื่อม แต่จะสนใจเฉพาะส่วนของค่าเฉลี่ยเท่านั้น สำหรับการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้น จึงจะสามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำ ใช้ระยะเวลาและหน่วยความจำน้อยที่สุด ตัวอย่าง แบบจำลองความปั่นป่วน ที่ใช้กันมีหลายแบบ เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$ แบบจำลองความปั่นป่วน RAG $k - \epsilon$ แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$ แบบจำลองความปั่นป่วน The Shear-Stress Transport (SST) $k - \omega$ แบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds Stress Model (RAM) เป็นต้น และในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองที่นำมาใช้สำหรับงานวิจัยนี้คือ แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$

2.8.6 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่นิยมใช้กับแพร่หลาย เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดย Launder and Spalding ซึ่งจะใช้สมมติฐานของบูกซีเนส (Boussinesq Hypothesis) เพื่อประมาณค่าความเค้นของเรย์โนลด์์ ดังนี้

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.30)$$

เมื่อ k คือพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy)

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.31)$$

μ_t คือค่าความหนืดของความปั่นป่วน (Turbulent Eddy Viscosity)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.32)$$

โดยที่ ε คือ อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน (Turbulent Dissipation Rate)

C_μ คือ ค่าคงที่

รูปแบบสมการที่ใช้สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ มีดังนี้

สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.33)$$

สมการของอัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.34)$$

เมื่อ σ_k และ σ_ϵ คือ Prandtl Number ของการไหลแบบปั่นป่วน k สำหรับ ϵ และตามลำดับ

G_k คือ เทอมการสร้างความปั่นป่วน (Turbulent Production)

$$G_k = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (2.35)$$

เมื่อประยุกต์ใช้สมมุติฐานของบอยสซิเนสจะได้ว่า

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (2.36)$$

เมื่อ S คือ เทนเซอร์ความเครียด (Train Tensor) หาได้จาก

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2.37)$$

และ S_{ij} คืออัตราความเครียดเฉลี่ย (Mean Stain Rate) โดย

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \quad (2.38)$$

สำหรับค่าคงที่ ในแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ ซึ่งได้มาจากการทดลองต่างๆ ได้แก่

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

การคำนวณของโปรแกรม CF-Design นั้นจะเป็นการใช้สมการทางคณิตศาสตร์แบบ Partial Differential Equation ในการคำนวณในการไหลของของไหล ซึ่งสมการที่ใช้คือสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการของเนเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) และสมการพลังงาน (Energy Equation)

Inviscid – Viscos Flow เป็นการไหลของของไหลที่มีความหนืดและแรงเฉือนที่มีค่าน้อย เรียกว่า Inviscid Flow ซึ่งการคำนวณสมการของ Inviscid Flow จะใช้ Euler Equation สมการของ Euler นี้จะเป็นส่วนหนึ่งของ Navier Stokes Equation และที่ใช้ Euler equation เพราะสมการนี้เป็นสมการที่เป็น Numerical Method และถ้าหากเพิ่มความหนืดเข้าไปในสมการนี้การคำนวณตัวโดเมน

จะเป็นพื้นที่ของวงรีหรือเป็นพื้นที่ของไฮเพอร์โบลา และถ้าหากว่าเมื่อคิดความหนืดที่ไม่เกิดการหมุนเข้าไปในสมการแล้ว เราจะสามารถทำให้สมการอยู่ในรูปของ Potential Velocity หรืออาจเรียกว่า Potential Flow จะทำให้การคำนวณมีความง่ายกว่า Euler Equation

Boundary Layer Flow ถ้าการไหลเกิดขึ้นบนผิวที่เป็น Rigid Body จะทำให้เกิดชั้นของการไหลเกิดขึ้น ซึ่งการไหลนี้จะเกิดตามผิว และเกิดแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของของไหล ค่าดังกล่าวจะมีค่ามากหรือมีค่าน้อยก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของไหล

Newtonian และ Non-Newtonian ของไหลที่เป็นแบบ Newtonian จะมีลักษณะที่แสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างแรงเฉือนของของไหล (Fluid Shear) กับแรงเครียดของของไหล (Fluid strain) ดังสมการ 2.39

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.39)$$

โดยที่ τ_{xy} คือ แรงเฉือนของของไหล
 μ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดของไหล

สำหรับของไหลที่เป็น Newtonian ค่าของความหนืดจะคงที่หรือขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสมการของแรงเฉือนจะเป็นสมการเชิงเส้น แต่ถ้าเป็น Non-Newtonian สมการของแรงเฉือนจะเป็นสมการไม่เชิงเส้นเพราะว่าค่า สัมประสิทธิ์ความหนืดของไหลจะขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด ดังสมการ 2.40

$$\tau_{xy} = \eta \frac{\partial u}{\partial y}, \eta = f\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) \quad (2.40)$$

$$\tau_{xy} = m \frac{\partial u^n}{\partial y}$$

โดยที่ m คือดัชนีความเหนียวข้น (Consistency index)
 n คือดัชนีกำลัง (Power law index)

และจะได้สมการของความหนืดดังสมการ 2.41

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{\partial V_i}{\partial X_j} \right)^p \quad (2.41)$$

เมื่อ $\mu_0 = m$, $p = n - 1$
จะได้

$$\tau_{xy} = \tau_0 + k \left(\frac{\partial u^n}{\partial y} \right)$$

และจะสามารถจัดอยู่ในรูปของความหนืดดังสมการ 2.42

$$\mu = \mu_0 + k \left(\frac{\partial V_i}{\partial X_j} \right)^p \quad (2.42)$$

โดยทั่วไปในทางวิศวกรรมการไหลของ Newtonian เช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน และไอน้ำ และการไหลแบบ Non-Newtonian เช่น พลาสติก เลือด ขาง เป็นต้น

สมการหลักที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม CF-Design คือ สมการของ Navier-Stokes หรือ สมการโมเมนตัม และกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ และจะได้สมการความต่อเนื่องดังสมการที่ 2.43

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial pu}{\partial x} + \frac{\partial pv}{\partial y} + \frac{\partial pw}{\partial z} = 0 \quad (2.43)$$

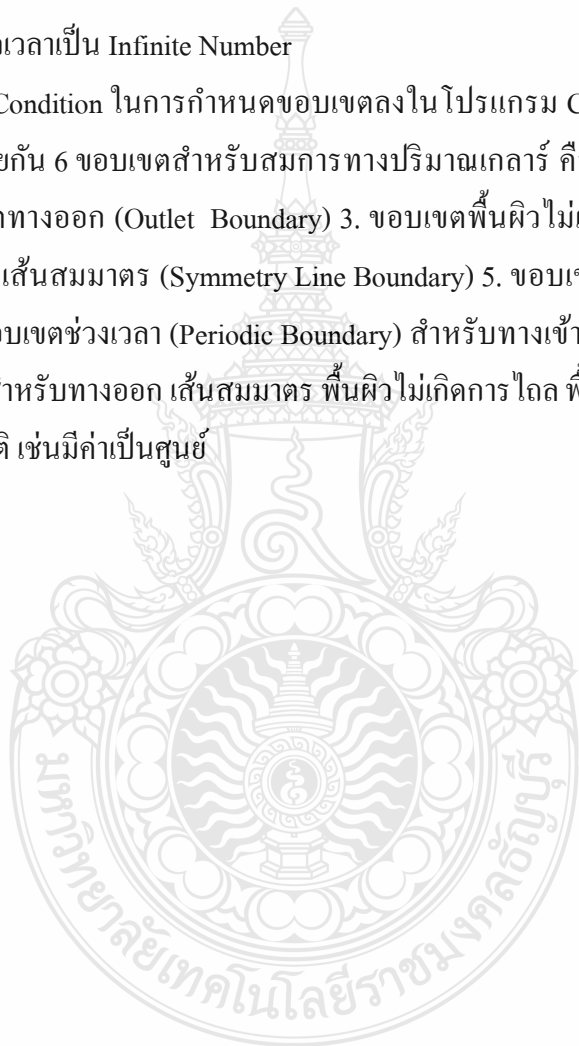
สำหรับการไหลแบบอัดตัวได้ จะสามารถใช้สมการพลังงาน สามารถเขียนในรูปของอนุกรมได้ดังสมการ

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho C_p v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho C_p w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q_v$$

สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม สมการพลังงาน จะมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าอยู่ 5 ตัวแปร คือ u, v, w, p, T_o ซึ่งการคำนวณของโปรแกรมจะอยู่บนสภาวะคงที่ และเมื่อเกิดการไหลแบบหมุนวน (Swirl) สมการที่ใช้คำนวณจะเป็นดังสมการ

การไหลแบบ Turbulent สำหรับการคำนวณการไหลแบบ 3 มิติ และขึ้นกับเวลา (Three - Dimensional and Time-Dependent Continuity Flow) จะใช้สมการของพลังงานของ Navies-Stokes และสมการพลังงานในการคำนวณ ซึ่งเป็นการใช้สมการเช่นเดียวกันกับการไหลแบบ Laminar อย่างไรก็ตามเนื่องจากเวลาเป็น Infinite Number

Boundary Condition ในการกำหนดขอบเขตลงในโปรแกรม CF-Design V. 8.0 จะมีการกำหนดขอบเขตไว้ด้วยกัน 6 ขอบเขตสำหรับสมการทางปริมาณเกลาร์ คือ 1. ขอบเขตทางเข้า (Inlet Boundary) 2. ขอบเขตทางออก (Outlet Boundary) 3. ขอบเขตพื้นผิวไม่เกิดการไถล (No-Slip Wall Boundary) 4. ขอบเขตเส้นสมมาตร (Symmetry Line Boundary) 5. ขอบเขตพื้นผิวเกิดการไถล (Slip Wall Boundary) 6. ขอบเขตช่วงเวลา (Periodic Boundary) สำหรับทางเข้านั้นควรตั้งค่าที่แน่นอนแม้กระทั่งค่าที่เป็นศูนย์ สำหรับทางออก เส้นสมมาตร พื้นผิวไม่เกิดการไถล พื้นผิวเกิดการไถล ควรตั้งค่าขอบเขตแบบธรรมชาติ เช่นมีค่าเป็นศูนย์



บทที่ 3

ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการดำเนินงานขั้นตอนการทดลอง ถึงค่าตัวแปรต่างๆที่ได้กำหนดไว้ในขอบเขตการศึกษาและได้แสดงรูปอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ทำการทดสอบ รวมถึงเครื่องมือวัดที่นำมาใช้และการจัดเก็บและบันทึกข้อมูลการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการใช้งาน โปรแกรม CF-Design V.8.0 ขั้นตอนในการทดสอบสามารถอธิบายได้โดยรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานศึกษาวิจัย

3.1.1 การศึกษาทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าเป็นการรวบรวมองค์ความรู้ต่างๆ ที่นำมาใช้ในการออกแบบ โดยอาศัยแหล่งข้อมูลค้นคว้าจากตำรางานวิจัยที่สำเร็จแล้วจากอินเทอร์เน็ต และกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการติดตั้งใช้งานในปัจจุบัน ตัวอย่างเช่นทฤษฎีของ อากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic) ของกังหันลม พลังงานที่สามารถดึงออกจากลมเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic-Energy) ในการวิเคราะห์ได้ใช้หลักการที่เรียกว่า ทฤษฎีโมเมนตัม (Momentum Theory) ทฤษฎีลิเมนต์ของใบ (Blade Element Theory) ทฤษฎีสตริป (Strip Theory) และทฤษฎีที่เกี่ยวกับรูปร่างของแพนอากาศ (Air Foil) ที่ทำให้ประสิทธิภาพดีที่สุดซึ่งในการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้ที่ความเร็วลมต่ำนั้น แพนอากาศที่เลือกใช้มีความสำคัญมากในการทำให้เกิด แรงยก (Lift Force) และ แรงผลัก (Drag Force) การศึกษาวิธีใช้งาน โปรแกรมวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์การไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CF-Design V.8.0) มาช่วยในการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมที่ซับซ้อน รวมถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่นำมาทดสอบ เช่น เครื่องมือวัด ความเร็วลม (Anemometer) เครื่องมือวัดแรงบิด (Torque Transducer) เป็นต้น

3.1.2 การทบทวนวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในการศึกษาค้นคว้าได้นำต้นแบบแพนอากาศ (Air Foil) รูปร่างหยดน้ำรุ่น ROY 1235 มาใช้ในการวิเคราะห์การหมุนตัดอากาศบริเวณปลายใบกังหันลมแนวแกนนอน

3.2 การออกแบบและการคำนวณกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์

3.2.1 ขั้นตอนการเลือกลักษณะของใบกังหันลม เลือกลักษณะของใบกังหันลม ว่าควรใช้กังหันลมชนิดใด (VAWT or HAWT) เพื่อหา Tip Speed Ratio คือการถือว่าใบกังหันหมุนทำงานประสิทธิภาพดีที่สุดที่ TSR เท่าใด กำหนดได้จากการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการ CFD หรือสร้างใบทดสอบจริงขนาดเล็กและจะได้ $X = 7$ และได้ทำการเลือกกังหันแบบ HAWT ต่อจากนั้นกำหนดกำลังสูงสุดที่ใบกังหันจะสามารถสร้างกำลังได้คือ $P_{\max} = 50 \text{ kW}$ แล้วกำหนดความเร็วลมที่กังหันลมจะสามารถสร้างกำลังสูงสุดได้คือ $v_{\text{rated}} = 9.5 \text{ m/s}$

3.2.2 คำนวณรัศมีของใบกังหันลม คำนวณรัศมีของใบกังหันลม ที่จะใช้ในการสร้างกำลังสูงสุดที่ $P_{\text{rated}} = 50 \text{ kW}$ ที่ความเร็วลม $v_{\text{rated}} = 9.5 \text{ m/s}$ หรือเรียกอีกอย่างว่า Rated Power จากสมการ

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3.1)$$

$$= \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3$$

$$r = \sqrt{\frac{2P}{\rho \pi v^3}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 50 \times 10^3}{1.225 \times \pi \times 9.5^3}}$$

$$= 5.50 \text{ m}$$

เมื่อ

P = กำลังของกังหันลมเมื่อมีประสิทธิภาพ 100% (W)

ρ = ความหนาแน่นของลม (kg/m^3)

r = รัศมีใบกังหันลม (m)

v = ความเร็วลม (m/s)

แต่ในความเป็นจริงใบกังหันลมไม่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์จากลมทั้งหมดให้เป็นพลังงานทางกล ในการหมุนกังหันลมได้ 100 % ซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดที่ใบกังหันลมจะสามารถทำได้จากทฤษฎีของ Betz คือ 0.59 แต่นั่นคือยังไม่รวมความสูญเสียต่างๆ ทั้งทางกล และทางไฟฟ้า ซึ่งทางกลจะเกิดจากแรงเสียดทานในการส่งต่อกำลังต่างๆ ส่วนทางไฟฟ้าจะเป็นความสูญเสียในวงจรควบคุมและระบบสายส่ง

กำหนดให้ประสิทธิภาพสูงสุดของใบกังหันลมคือ 0.35 และคำนวณหารัศมีของใบกังหันใหม่จะได้

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p & (3.2) \\
 &= \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 C_p \\
 r &= \sqrt{\frac{2P}{C_p \rho \pi v^3}} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \times 50 \times 10^3}{0.35 \times 1.225 \times \pi \times 9.5^3}} \\
 &= 9.30 \text{ m} \\
 &\approx 9 \text{ m}
 \end{aligned}$$

3.2.3 จำนวนรอบสูงสุด จำนวนรอบสูงสุด ที่ขณะกังหันลมผลิตกำลังสูงสุดที่

$P_{rated} = 50 \text{ kW}$ ที่ความเร็วลม $v_{rated} = 9.5 \text{ m/s}$

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{R\Omega}{v_{wind}} & (3.3) \\
 &= \frac{R \times \pi \times 2 \times N}{60 \times v_{wind}} \\
 N &= \frac{X \times 60 \times v_{wind}}{R \times 2 \times \pi} \\
 &= \frac{7 \times 60 \times 9.5}{9 \times 2 \times \pi} \\
 &= 70 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

นั่นแสดงว่า ที่ความเร็วลม 9.5 m/s กังหันลมจะหมุนที่ความเร็วรอบ 70 rpm และสามารถผลิตกำลังได้ที่ $P_{rated} = 50 \text{ kW}$

คำนวณหาแรงบิดสูงสุดในขณะที่ใบกังหันลมผลิตกำลังสูงสุด $P_{rated} = 50\text{kW}$ ที่ความเร็วลม 9.5 m/s

$$\begin{aligned}
 P &= T\Omega & (3.4) \\
 &= \frac{T \times 2 \times \pi \times N}{60} \\
 T &= \frac{60 \times P}{2 \times \pi \times N} \\
 &= \frac{60 \times 50 \times 10^3}{2 \times \pi \times 70} \\
 &= 6,821 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

นั่นแสดงว่า ที่ความเร็วลม 9.5 m/s กังหันลมจะหมุนที่ความเร็วรอบ 70 rpm และสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ที่ $P_{rated} = 50\text{kW}$ และจะมีแรงบิดสูงสุดที่ 6,821 N.m

3.2.4 คำนวณหา Cut-in ของกังหันลมที่ความเร็วลม $v = 2.5 \text{ m/s}$ เลือจุด Cut-in ของกังหันลมซึ่งจะมีผลอย่างสูงต่อการออกแบบระบบส่งกำลังและการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) และระบบวงจรควบคุม (Controller) โดยกำหนดให้ Cut in ที่ความเร็วลม $v = 2.5 \text{ m/s}$ และคำนวณหาค่ากำลังของกังหัน ความเร็วรอบของกังหัน แรงบิดของกังหัน ที่จุด Cut in จะได้

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{R\Omega}{v_{wind}} \\
 &= \frac{R \times \pi \times 2 \times N}{60 \times v_{wind}} \\
 N &= \frac{X \times 60 \times v_{wind}}{R \times 2 \times \pi} \\
 &= \frac{7 \times 60 \times 2.5}{9 \times 2 \times \pi} \\
 &= 19 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

กำลังของกังหันลมที่ได้ที่ $v = 2.5$ m/s คือ

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \\
 &= \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 C_p \\
 &= \frac{1}{2} \times 1.225 \times \pi \times 9^2 \times 2.5^3 \times 0.35 \\
 &= 850 \text{ W}
 \end{aligned}$$

คำนวณหาแรงบิดในขณะที่ใบกังหันลมผลิตกำลัง $P = 850$ W ที่ความเร็วลม 2.5 m/s ที่ความเร็วรอบ 19 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= T\Omega \\
 &= \frac{T \times 2 \pi \times N}{60} \\
 T &= \frac{60 \times P}{2 \pi \times N} \\
 &= \frac{60 \times 850}{2 \pi \times 19} \\
 &= 427 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

3.2.5 เลือกจุด Cut Out ของกังหันลม จุด Cut out ของกังหันลม จะมีผลอย่างมากต่อการออกแบบระบบส่งกำลังและการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) และระบบวงจรควบคุม (Controller) โดยกำหนดให้ Cut out ที่ความเร็วลม $v = 12$ m/s และคำนวณหาค่ากำลังของกังหัน ความเร็วรอบของกังหัน แรงบิดของกังหัน ที่จุด Cut out จะได้

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{R\Omega}{v_{wind}} \\
 &= \frac{R \times \pi \times 2 \times N}{60 \times v_{wind}} \\
 N &= \frac{X \times 60 \times v_{wind}}{R \times 2 \times \pi} \\
 &= \frac{7 \times 60 \times 12}{9 \times 2 \times \pi} \\
 &= 89 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

กำลังของกังหันลมที่ได้ที่ $v = 12 \text{ m/s}$ คือ

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \\
 &= \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 C_p \\
 &= \frac{1}{2} \times 1.225 \times \pi \times 9^2 \times 12^3 \times 0.35 \\
 &= 94,092 \text{ W}
 \end{aligned}$$

คำนวณหาแรงบิดในขณะที่ใบกังหันลมผลิตกำลัง $P = 94,092 \text{ W}$ ที่ความเร็ว ลม 12 m/s ที่ความเร็วรอบ 89 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= T\Omega \\
 &= \frac{T \times 2 \pi \times N}{60} \\
 T &= \frac{60 \times P}{2 \pi \times N} \\
 &= \frac{60 \times 94,092}{2 \pi \times 89} \\
 &= 10,095 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

จุด Cut out คือ จุดที่กังหันลมมีภาระเนื่องจากพลังงานจลน์ของลมมากเกินไป จึงต้องทำการหยุดกังหันลม เพราะอาจจะเกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ และระบบควบคุมกังหันลมได้ ซึ่งวงจรที่ใช้ควบคุมต้องทำการดึงกำลังของกังหันลมออกมาให้มากกว่ากำลังที่ $C_{p,max}$ ของกังหันลมที่ความเร็วลม 12 m/s ซึ่งจะทำให้รอบเกิดการตก ลงของกังหันที่หมุนและจะช้าลงเรื่อยๆจนหยุดในที่สุด เพื่อป้องกันการเสียหายของกังหันลม

3.2.6 การคำนวณจากความเร็วลมเฉลี่ยของเมืองไทยเนื่องจากความเร็วลมเฉลี่ยของเมืองไทยอยู่ที่ 5 m/s จึงทำการคำนวณค่าต่างๆ ที่ความเร็วลม 5 m/s ซึ่งจะได้ค่าต่างๆดังนี้

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{R\Omega}{v_{wind}} \\
 &= \frac{R \times \pi \times 2 \times N}{60 \times v_{wind}} \\
 N &= \frac{X \times 60 \times v_{wind}}{R \times 2 \times \pi} \\
 &= \frac{7 \times 60 \times 5}{9 \times 2 \times \pi} \\
 &= 37 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

กำลังของกังหันลมที่ได้ที่ $v = 5 \text{ m/s}$ คือ

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \\
 &= \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 C_p \\
 &= \frac{1}{2} \times 1.225 \times \pi \times 9^2 \times 5^3 \times 0.35 \\
 &= 6,806 \text{ W}
 \end{aligned}$$

คำนวณหาแรงบิดในขณะที่ใบกังหันลมผลิตกำลัง $P = 6,806 \text{ W}$ ที่ความเร็ว ลม 5 m/s ที่ความเร็วรอบ 37 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= T\Omega \\
 &= \frac{T \times 2 \times \pi \times N}{60} \\
 T &= \frac{60 \times P}{2 \times \pi \times N} \\
 &= \frac{60 \times 6,806}{2 \times \pi \times 37} \\
 &= 1,756 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

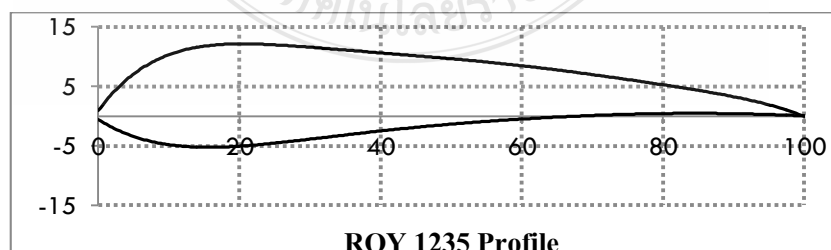
3.3 ขั้นตอนการออกแบบและการกำหนดค่าการประมวลผลด้วยโปรแกรม CF-Design V.8.0

จุดประสงค์หลักในการวิเคราะห์ ใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์ด้วยโปรแกรม พลศาสตร์การไหล เพื่อต้องการลดต้นทุนและระยะเวลาในการหาค่าผลเฉลยจากกังหันลมขนาดจริง การทราบถึงประสิทธิภาพ ความแตกต่างระหว่างใบกังหันลมมีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) และ ใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) จากการประมวลผลด้วย โปรแกรมจะเป็นแนวทางในการเปรียบเทียบผลเฉลย ด้วยโปรแกรมกับกังหันลมขนาดจริง

3.3.1 ขั้นตอนการประมวลผลด้วยโปรแกรม CF-Design V.8.0

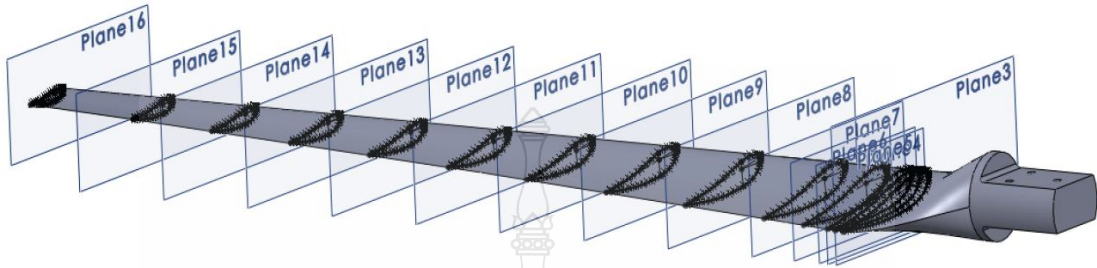
1. เลือก Air Foil รุ่น ROY 1235
2. นำรูปแบบ Air Foil ที่เลือกมาออกแบบในโปรแกรม Solid Workในรูปแบบ 3 มิติ
3. การกำหนด Material ต่างๆ เช่น กำหนดท่ออุโมงค์ลม, กำหนดรอบการหมุนของ Rotor
4. วัสดุของใบกังหันลม
5. กำหนดความเร็วลมขาเข้า
6. กำหนด Mesh Size เพื่อให้โปรแกรม CFD ประมวลผล
7. กำหนดค่า Out Put ที่ต้องการ เช่น ความเร็วลม, แรงบิดที่ออกมา
8. การเก็บข้อมูล

หลักในการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ ต้องคำนึงถึงการใช้งานตามความเหมาะสมความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละประเทศ สำหรับประเทศไทยได้มีการศึกษารูปร่างหยดน้ำ Air Foil รุ่น ROY 1235 มาใช้ที่ได้ศึกษาค้นคว้าแล้วว่าเหมาะสมกับ ศักยภาพความเร็วลมต่ำ บริเวณ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปแบบ Air Foil ROY 1235

หลักในการออกแบบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์ จะต้องศึกษามุมบิดต่างๆในแต่ละความยาวใบกังหันลม ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เพื่อให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม ด้านพลศาสตร์การไหล



รูปที่ 3.2 การออกแบบตามหลักวิศวกรรม ด้วยโปรแกรม Solid Work V.2010

การออกแบบสร้างด้านแบบใบกังหันลม (Blade) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดพลังงานกลกับเพลากังหันลมที่มีความเร็วลมต่ำ โดยการนำรูปร่างหยดน้ำรุ่น ROY 1235 มาสร้างต้นแบบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ขนาด 50 กิโลวัตต์ โดยมีมุมบิด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ รูปที่ 3.4

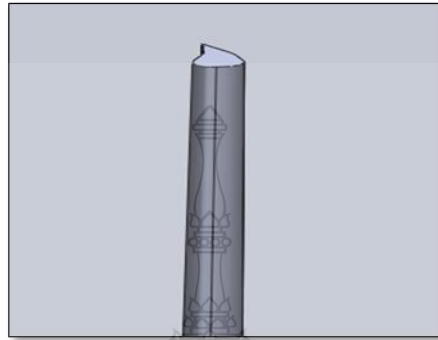


รูปที่ 3.3 ภาพตัดขวางมุมบิด โคนใบ Plant 3 ทำมุม 8 องศา



รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางมุมบิด โคนใบ Plant 16 ทำมุม 2 องศา

3.3.2 ขั้นตอนในการหาค่าผลเฉลยด้วยโปรแกรมพลศาสตร์การไหลทางคอมพิวเตอร์ CFD ในการออกแบบใบกังหันลมที่นำมาวิเคราะห์ ได้ออกแบบรูปร่างปลายใบ 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6

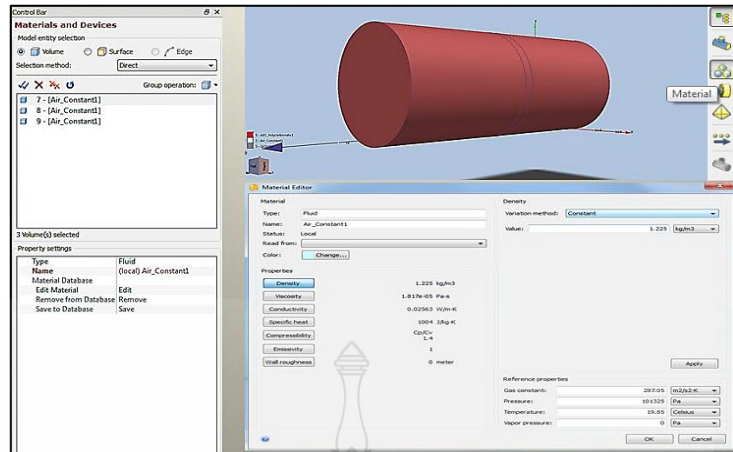


รูปที่ 3.5 ใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)



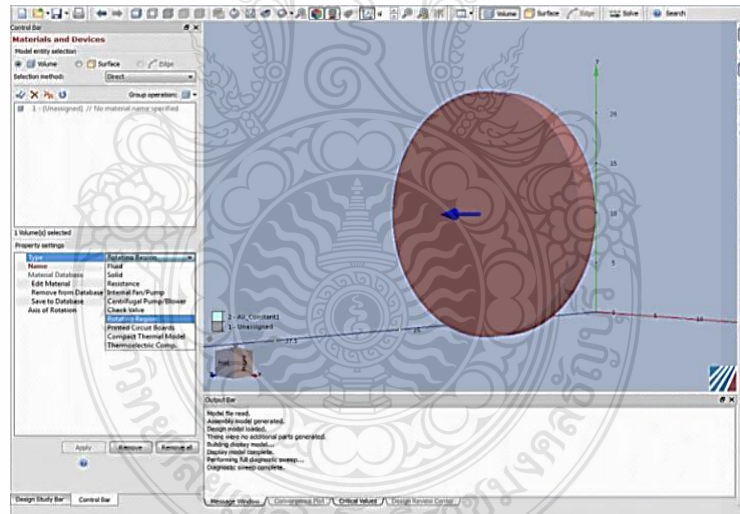
รูปที่ 3.6 ใบกังหันลมมีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing Tip Blade)

3.3.3 การตั้งค่า โปรแกรม CF-Design V .8.0 ในการทดลองจะต้องกำหนดชิ้นส่วนหลัก และหน้าที่การทำงานอย่างถูกต้อง อย่างท่ออุโมงค์ลมก่อน กำหนดชิ้นส่วนให้เป็น Air -Constant มีความหนาแน่นของอากาศ 1.225 กิโลกรัม ต่อ ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7



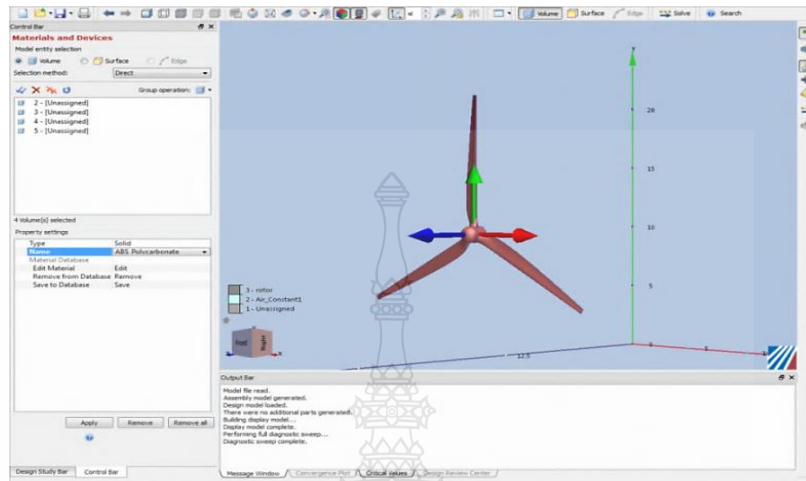
รูปที่ 3.7 กำหนด Material ให้กับท่ออุโมงค์ลม

3.3.4 การกำหนดทิศทางหมุนของใบกังหันลมในโปรแกรม CFD กำหนดชุดหมุน Rotating Region ให้หมุนในทิศทางแนวแกน -Z ทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 3.8



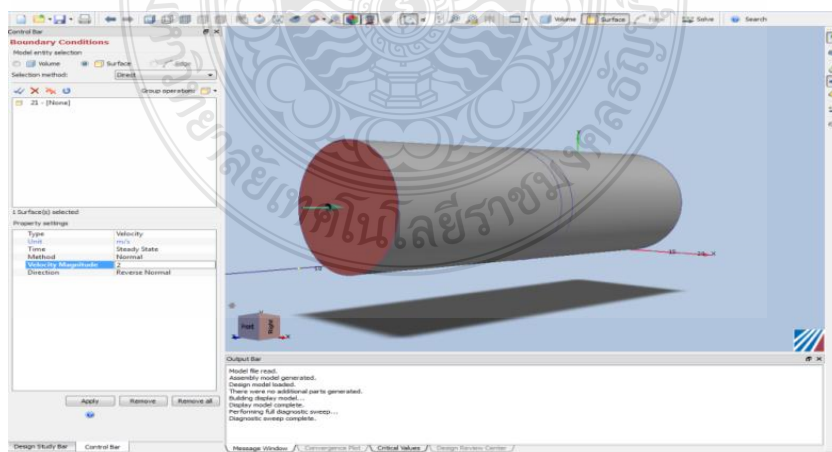
รูปที่ 3.8 ตั้งค่าชิ้นส่วนทำหน้าที่การหมุน โดยเลือกคำสั่ง Rotating Region

3.3.5 กำหนดวัสดุใบกังหันลม ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ วัสดุที่ทำใบกังหันจริงดัง
แสดงใน รูปที่ 3.9



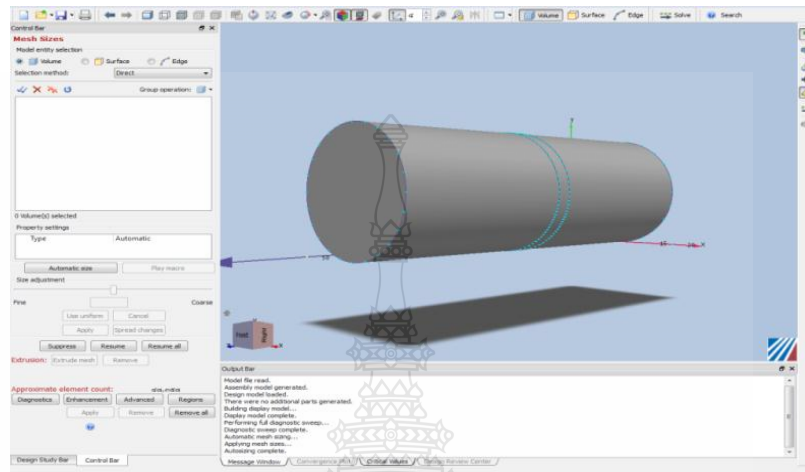
รูปที่ 3.9 กำหนดวัสดุใบกังหันลม คุณสมบัติเป็นของแข็ง

3.3.6 กำหนดทิศทางการไหลขาเข้าและขาออกของอากาศ ลักษณะการไหล เป็นแบบ
ราบเรียบ Laminar Flow ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กำหนดความเร็วลมขาเข้าและขาออก

3.3.7 กำหนดค่า Mesh Size ให้กับชิ้นส่วนทุกชิ้นในการประมวลผลด้วยโปรแกรมพลศาสตร์การไหล CFD เพื่อความแม่นยำในผลเฉลย ดังแสดงในรูปที่ 3.11

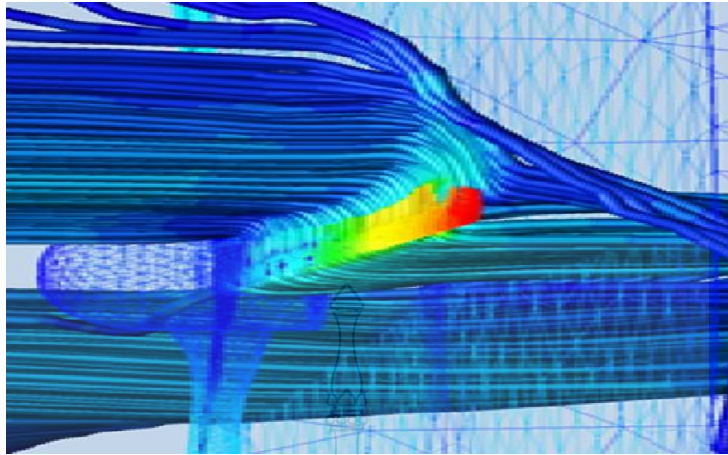


รูปที่ 3.11 ตั้งค่า Mesh Size

3.3.7 การประมวลผลด้วยโปรแกรมที่วิเคราะห์การทำงานของกังหันลมที่ความเร็วลมตั้งแต่ 2-12 เมตรต่อวินาที และการเกิดการหมุนวนของอากาศบริเวณปลายใบกังหันลม ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และในรูปที่ 3.13

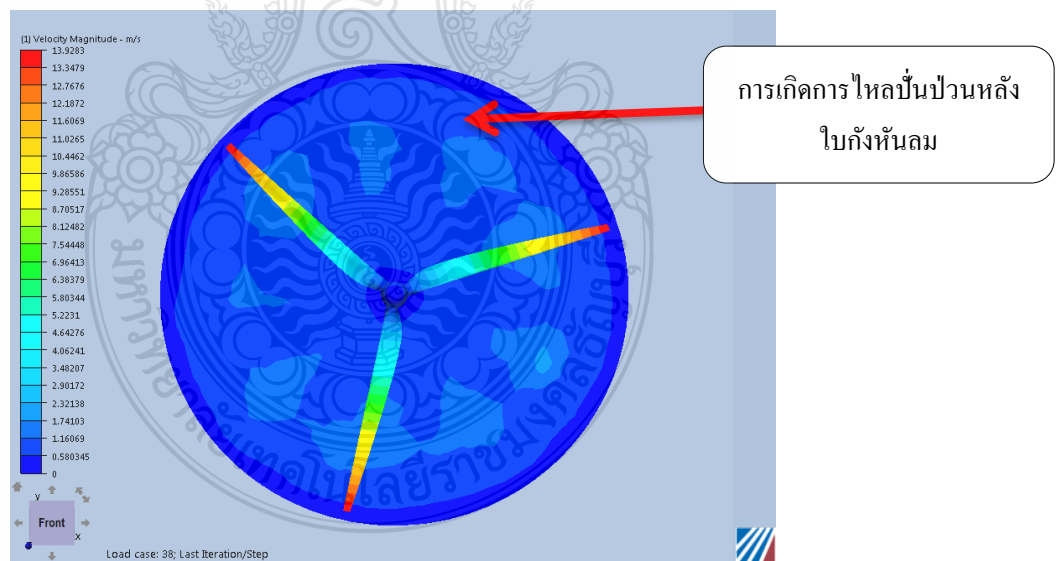


รูปที่ 3.12 กระบวนการวิเคราะห์การไหลด้วยโปรแกรม CF-Design V.8.0



รูปที่ 3.13 การไหลของอากาศตัดผ่านปลายใบกังหันลม

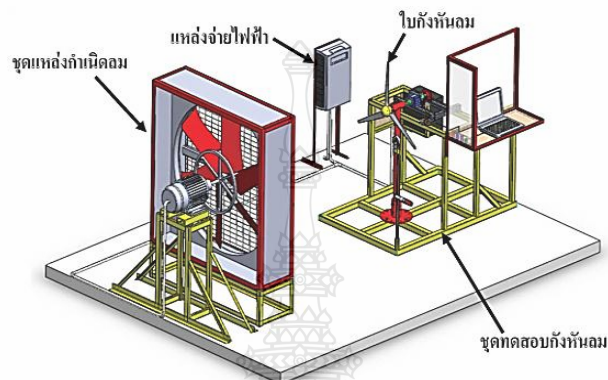
3.3.7 กระบวนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD จะแสดงให้เห็นถึงการไหลปั่นป่วนหลังใบกังหันลมในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การเกิดการไหลปั่นป่วนหลังใบกังหันลม

3.4 อุปกรณ์ทดสอบใบกังหันลม

ขั้นตอนในการทดสอบใบกังหันลมขนาดย่อ 1:18 ทำด้วยชุดอุโมงค์ลมทดสอบใบกังหันลมขนาดเล็กที่ความเร็วทดสอบ 2-6 เมตรต่อวินาที มีการจัดวางอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ชุดอุโมงค์ลมทดสอบใบกังหันลมขนาดเล็ก [3]

3.4.1 ชุดแหล่งกำเนิดลม เป็นต้นกำเนิดความเร็วลมในการทดสอบ สามารถสร้างความเร็วลมได้ตั้งแต่ 2-6 เมตรต่อวินาที ประกอบไปด้วยมอเตอร์ชนิด 3 เฟส 380/660 โวลต์ 11.8/6.8 แอมแปร์ กำลังงาน 5.5 กิโลวัตต์ (7.7 แรงม้า) ความเร็วรอบสูงสุด 1,440 รอบต่อนาที ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัดลม 1.2 เมตร มีภาคตัดใบพัดเป็นแบบแผ่นเรียบ บิดเกลียว มุมพิทโดยเฉลี่ย 26 องศา ไม่สามารถปรับมุมพิทได้ จำนวนใบพัด 6 ใบดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ชุดแหล่งกำเนิดลม

3.4.2 ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (Inverter) เพื่อสามารถควบคุมรอบการหมุนของชุดใบพัดลมดังแสดงในรูปที่ 3.17 ต้องสัมพันธ์กับชุดแหล่งกำเนิดลมที่นำมาทดสอบในรูปที่ 3.16 สามารถปรับความถี่กระแสไฟฟ้าได้ละเอียดที่สุดที่ 0.1 เฮิร์ตซ์ อย่างไรก็ตามในการควบคุมรอบทดสอบนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดความเร็วลมด้วยเพื่อให้ได้ความเร็วลมในการทดสอบตามต้องการ



รูปที่ 3.17 ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

3.4.3 ชุดเสากังหันลม (Tower) ประกอบไปด้วยเสาเหล็กขนาด 2 นิ้ว พร้อมฐานรองรับยึดติดกับโครงทดสอบ ความสูง 1 เมตรจากพื้นถึงจุดศูนย์กลางเพลลา คุมเพลลาสามารถจับยึดใบได้ตั้งแต่ 1 ใบ จนถึง 6 ใบมีเพลลาเชื่อมต่อเข้ากับชุดเครื่องมือวัดแรงบิด (Torque Transducer) โดยใช้ (Coupling) เป็นตัวเชื่อมต่อกันมีใบกังหันต้นแบบ สำหรับทดสอบแบบ 8/2 ที่มีลักษณะปลายใบที่ต่างกันเพื่อทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.18



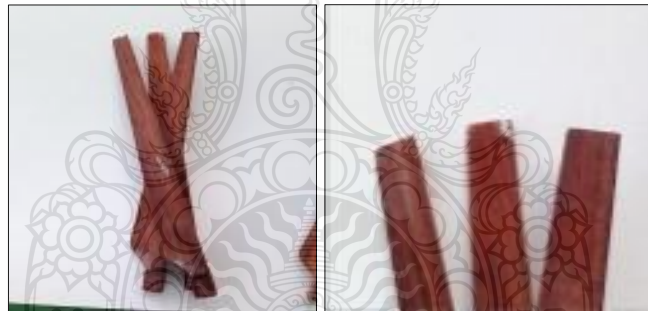
รูปที่ 3.18 ชุดเสากังหันลม

3.4.4 ต้มน้ำหนัก (Weight) เพื่อเพิ่มภาระโหลดอีกด้านหนึ่งของเครื่องวัดแรงบิดทำให้เกิดแรงบิดขึ้น มีหลายขนาด เช่น 50 กรัม จำนวน 2 แผ่น, 100 กรัม จำนวน 2 แผ่น, 200 กรัม จำนวน 2 แผ่นดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ต้มน้ำหนักเพิ่มภาระโหลดเพลลา

3.4.5 ใบกังหันลมในการทดสอบที่ได้รับการออกแบบด้วยโปรแกรม Solid Work มุมบิดโคนใบ 8 องศา มุมบิดปลายใบ 2 องศา ขนาดย่อ 1: 18 เท่าจากใบกังหันลมขนาด 50 กิโลวัตต์ ความยาวใบ 50 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.20 และรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 ใบกังหันลม มุมบิด 8/2 ปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)



รูปที่ 3.21 ใบกังหันลม มุมบิด 8/2 มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade)

3.4.6 ชุดคอมพิวเตอร์ประมวลผล ใช้สำหรับในการวิเคราะห์แบบจำลองกึ่งหั่นลมและลักษณะปลายใบกึ่งหั่นลมต้นแบบ ด้วยโปรแกรม CF-Design V.8.0 ข้อมูลทางเทคนิคชุดคอมพิวเตอร์ประมวลผล ใช้สำหรับในการวิเคราะห์แบบจำลองกึ่งหั่นลมและลักษณะปลายใบกึ่งหั่นลมต้นแบบ ด้วยโปรแกรม CF-Design V.8.0 ข้อมูลทางเทคนิคประมวลผล Quad-Core i7-3310QM Ivy Bridge Chip, การ์ดจอ 2GB NVIDIA GTX 660M, แรม 12GB of DDR3, 1,333MHz, ฮาร์ดดิสก์ 750GB ขนาดหน้าจอ 15.6 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 คอมพิวเตอร์ประมวลผล

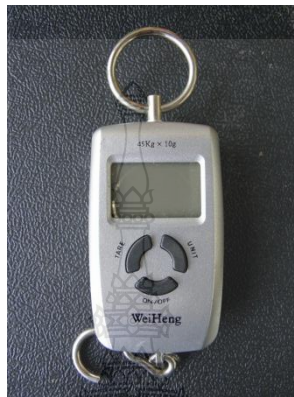
3.5 เครื่องมือวัด

3.5.1 เครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometer) เป็นอุปกรณ์วัดอัตราความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเป็นชนิดหัววัดแบบใบพัด (Van Probe) จะใช้หลักการของการนับความเร็วรอบของใบพัดที่หมุนด้วยใบพัดขนาด 60 มิลลิเมตร แต่การเลือกใช้มักเหมาะกับงานที่มีลักษณะลมปั่นป่วน (Turbulent Flows) พิกัดการวัด 0.8-30.0 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 เครื่องมือวัดความเร็วลม [14]

3.5.2 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลแบบแขวน ขนาด 10 กรัม × 45 กิโลกรัม ความละเอียดสูง พิกัดสูงสุด 45 กิโลกรัม ช่วง 0-10 กิโลกรัมความละเอียด 5กรัม ช่วง 10-45 ความละเอียด 10 กรัมใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ขนาด AAA จำนวน 3 ก้อน มีไว้สำหรับชั่งค้ำน้ำหนักก่อนที่จะนำไปถ่วงสายครัมเบรก ดังแสดงในรูปที่ 3.24



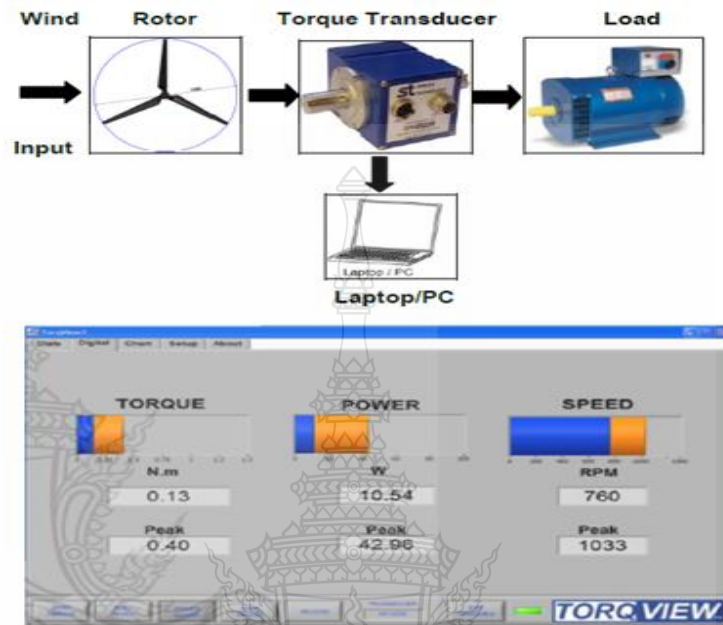
รูปที่ 3.24 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลแบบแขวน

3.5.3 เครื่องมือวัดแรงบิด (Torque Transducer) ยี่ห้อ TORQ SENSE รุ่น RWT 310/320 Series สามารถวัดแรงบิดได้ระหว่าง 0.0-1,000 นิวตันเมตร ได้สองทิศทาง การหมุนสามารถใช้งานร่วมกับเพลาหมุนด้วยความเร็วสูงสุด 30,000 รอบต่อนาที ความผิดพลาดในการวัด ± 0.25 เปอร์เซ็นต์ แสดงผลการวัดในรูปแบบดิจิทัล เชื่อมผ่านคอมพิวเตอร์ทางช่องสัญญาณ USB ทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์โปรแกรม TORQ VIEW แสดงค่าแรงบิด ความเร็วรอบ และกำลังงานบนจอประมวลผล ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 เครื่องมือวัดแรงบิด [15]

3.5.4 ลักษณะการเชื่อมต่อชุดทดสอบและจอแสดงผลของค่าพลังงาน แรงบิด และความเร็วรอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ลักษณะการเชื่อมต่อชุดทดสอบและจอแสดงผล

3.6 พื้นที่ดำเนินการศึกษาวิจัย

สถานที่ดำเนินการศึกษาวิจัย การทดลอง ทดสอบ และจัดทำข้อมูล ดำเนินการ ณ อาคารวิจัยประยุกต์พลังงาน ลม น้ำ และแสงอาทิตย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต. คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

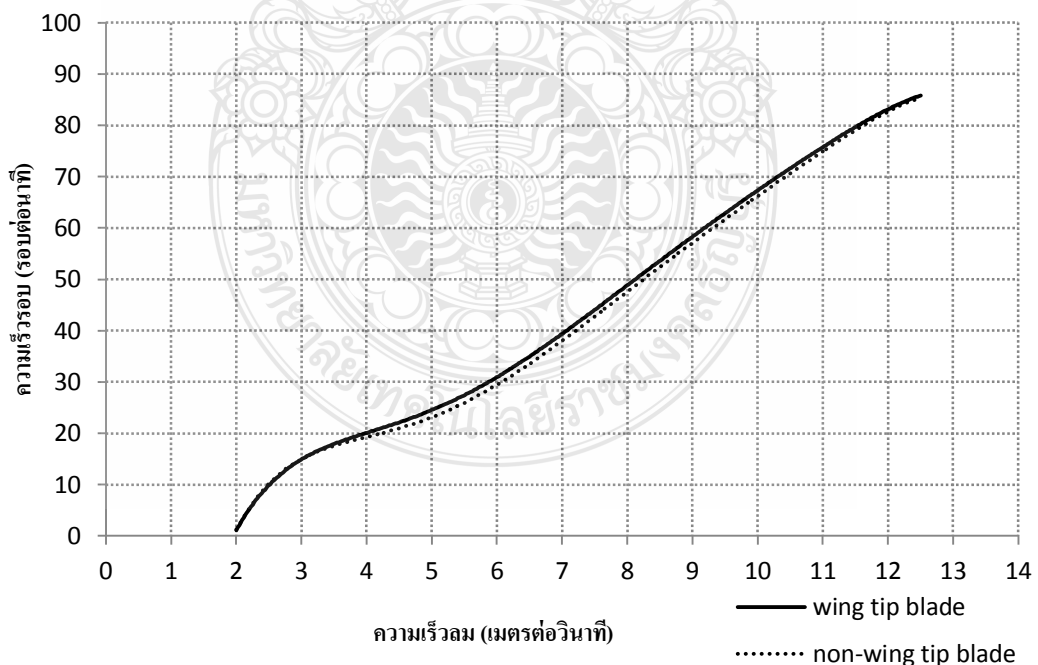
บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลจากการทดลอง

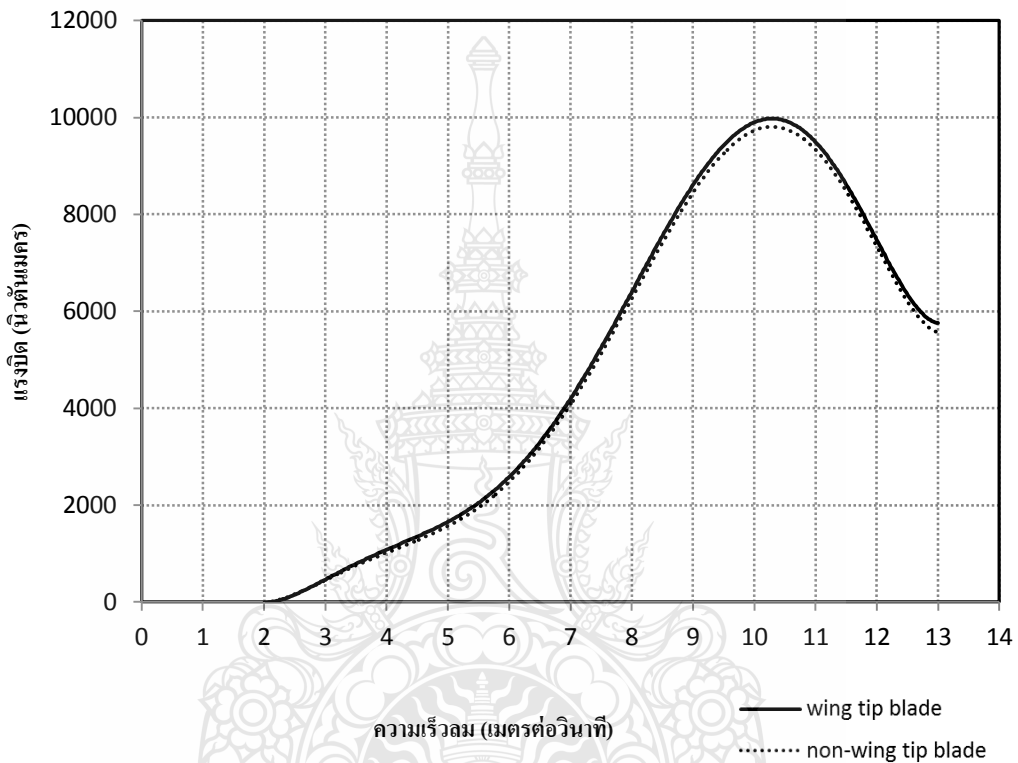
4.1.1 ในการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพใบกังหันลมด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์การไหล นั้น ใบกังหันลมได้มีการออกแบบให้มีความยาวใบ 9 เมตร มุมบิดโคนใบ 8 องศา มุมบิดปลายใบ 2 องศา มีลักษณะปลายใบแตกต่างกันคือ ใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) และใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ดังแสดงในภาคผนวก ภาพที่ ก.2 และ ก.3

ผลจากการจำลองการไหล โดยใช้โปรแกรม CF-Design V.8.0 ในการจำลองการไหลของกังหันลม ขนาด 50 กิโลวัตต์เพื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) กับใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ทำการจำลองการไหล ที่ความเร็วลมตั้งแต่ 2-12 เมตรต่อวินาทีเพื่อหาความเร็วรอบ แรงบิดและกำลังงานสูงสุดในแต่ละความเร็วลมเพื่อนำมาหาค่าประสิทธิภาพกังหันลม C_p ดังแสดงในตารางที่ ก.1



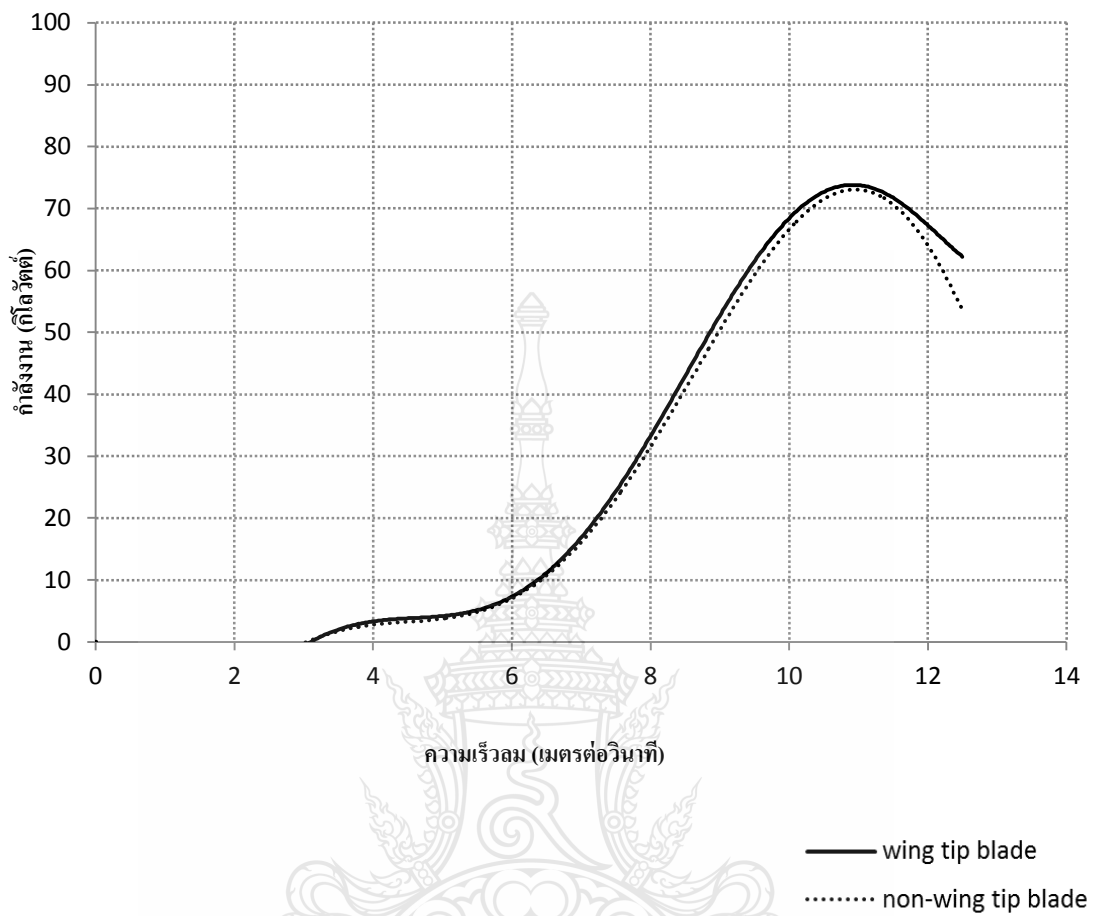
รูปที่ 4.1 ความเร็วลมต่อความเร็วรอบจากการจำลองการไหล

4.1.1.1 ผลของความเร็วมที่มีต่อความเร็วรอบ จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าใบกังหันลมที่ได้ออกแบบให้มีแพนด้าอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) มีความเร็วรอบต่อนาทีที่สูงกว่าใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) เกือบทุกช่วงความเร็วม เฉลี่ย 2.69 เปอร์เซ็นต์



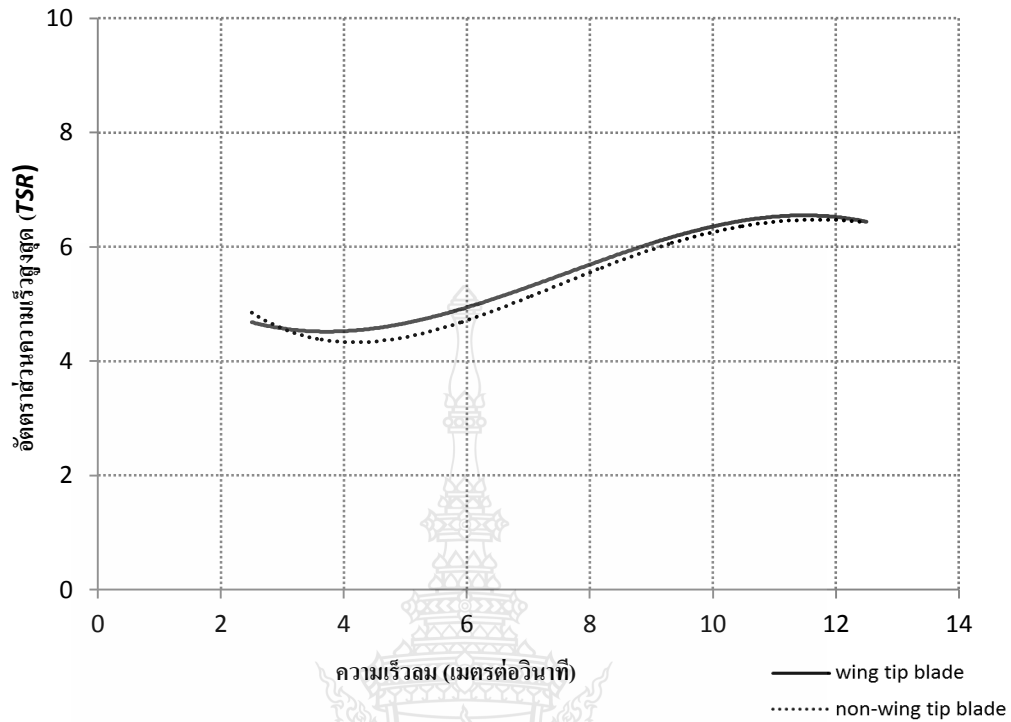
รูปที่ 4.2 ความเร็วมกับแรงบิดจากการจำลองการไหล

4.1.1.2 ผลของความเร็วมที่มีผลต่อแรงบิด จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าใบกังหันลมที่มีแพนด้าอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้แรงบิดสูงกว่าเกือบทุกช่วงความเร็วม เฉลี่ย 2.68 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.3 ความเร็วลมกับกำลังงานจากการจำลองการไหล

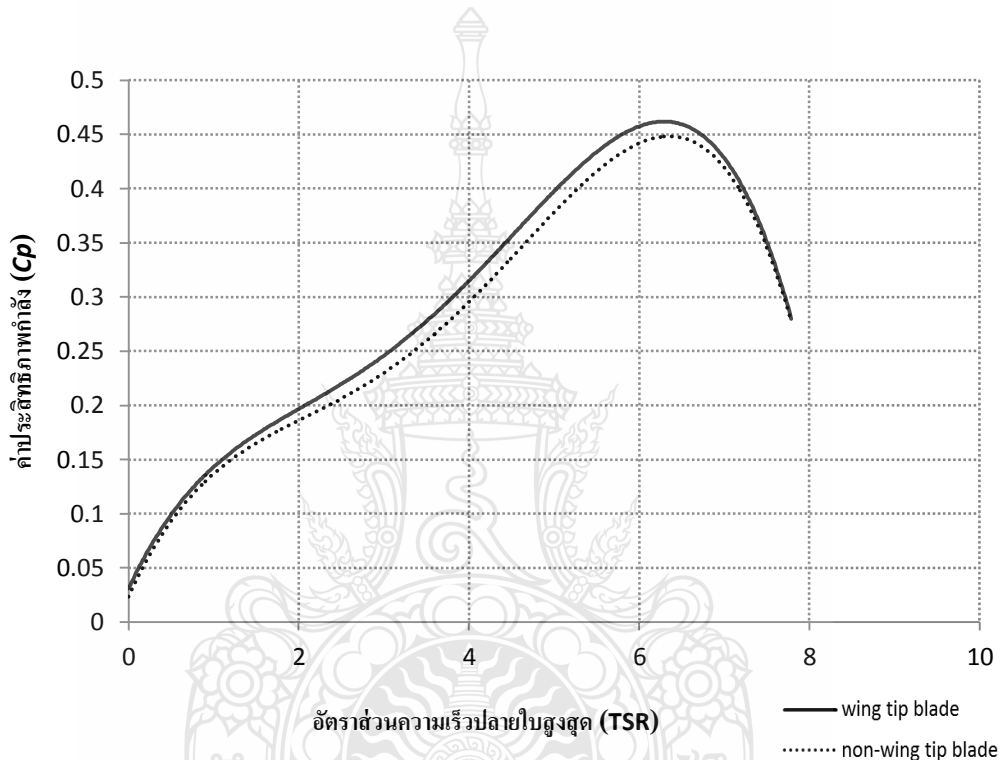
4.1.1.3 ผลของความเร็วลมที่มีต่อกำลังงาน จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์สมการพลังงาน ของกังหันลมจะแปรผันตามความเร็วรอบและแรงบิด ดังนั้นกำลังงานที่เพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงความเร็วลมมีค่าเฉลี่ย 5.85 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.4 ความเร็วลมต่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุดจากการจำลองการไหล

4.1.1.4 ผลของความเร็วลมที่มีต่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด รูปที่ 4.4 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วลมที่กังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้า 2.5 เมตรต่อวินาที ใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing- Tip Blade) ได้อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด 4.5 เท่า ส่วนใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ได้ อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด 4.9 เท่า ที่ความเร็วลมที่กังหันผลิตไฟฟ้าสูงสุด 10 เมตรต่อวินาที ใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด 6.7 เท่า ส่วนใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ได้ อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด 6.6 เท่า แสดงให้เห็นเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอัตราส่วนความเร็วสูงสุด ก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมในลักษณะคู่ขนานกันในเกือบทุกช่วงความเร็วลม เฉลี่ย 2.96 เปอร์เซนต์

เหตุผลที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุดของ ใบกึ่งหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบ โค้งงอ (Wing-Tip Blade) ต่ำกว่าใบกึ่งหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ในตอนสตาร์ท เนื่องจากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นบริเวณปลายใบกึ่งหันลม ทำให้สตาร์ทตัวเองช้ากว่าเล็กน้อย แต่ในช่วงความเร็วลมที่สูงขึ้นใบกึ่งหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบ โค้งงอ (Wing-Tip Blade) มีประสิทธิภาพสูงกว่าใบกึ่งหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ทุกความเร็วลม

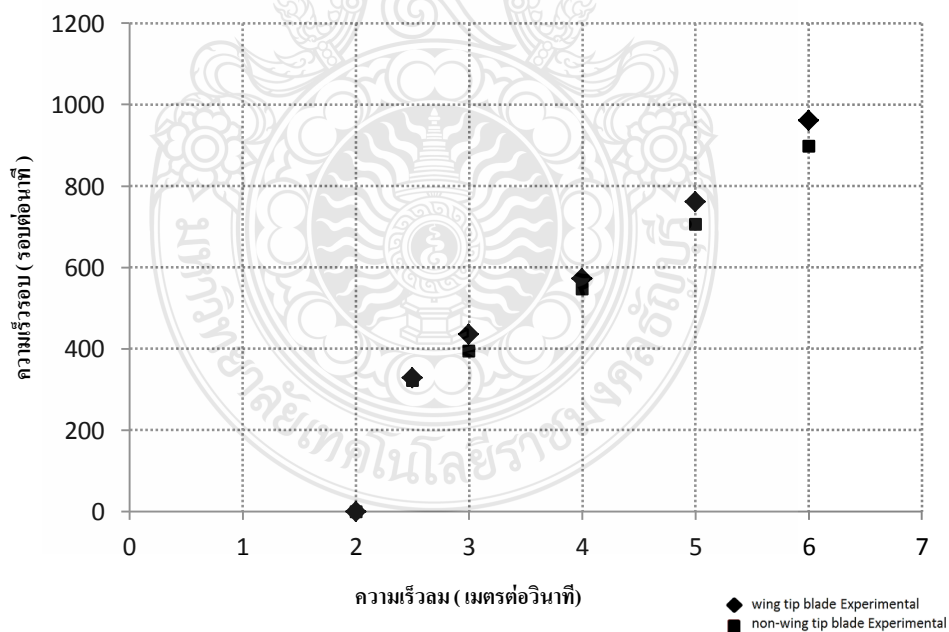


รูปที่ 4.5 อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุดกับค่าสัมประสิทธิ์กำลังจากการจำลองการไหล

4.1.1.5 ผลของอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุดที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์กำลัง รูปที่ 4.5 จากการวิเคราะห์ผลการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม CF-Design V.8.0 จะเห็นได้ว่าใบกึ่งหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบ โค้งงอ (Wing Tip Blade) ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดอยู่ที่ 0.46 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด 6.7 เท่า ส่วนใบกึ่งหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดอยู่ที่ 0.45 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด 6.6 เท่า เมื่อเปรียบเทียบใบกึ่งหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบ โค้งงอ (Wing-Tip Blade) มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงกว่าใบกึ่งหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) เฉลี่ย 5.25 เปอร์เซ็นต์

จากการทดลองสรุปได้ว่า ผลจากการทดลองการออกแบบใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing Tip Blade) ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) เฉลี่ย 5.25 เปอร์เซ็นต์ จึงเลือกใบกังหันลมที่มีประสิทธิภาพสูงดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์

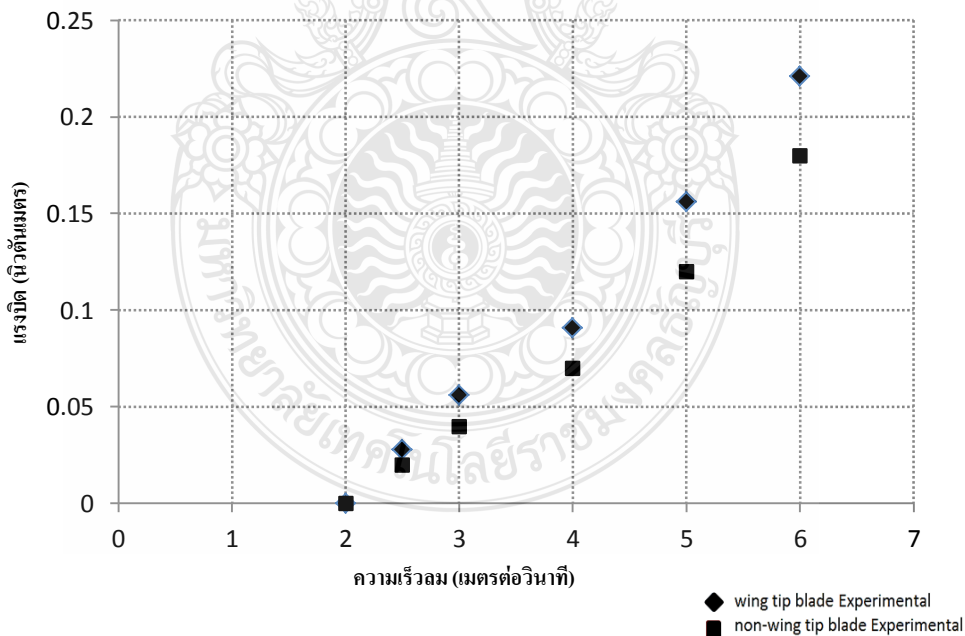
4.1.2 ผลจากการทดสอบ ในการทดสอบใช้ใบกังหันลมต้นแบบย่อส่วน 1 ต่อ 18 เท่า มุมบิดโคนใบ 8 องศา มุมบิดปลายใบ 2 องศา ตามต้นแบบใบกังหันลมขนาด 50 กิโลวัตต์ ทดสอบด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพกังหันลม ที่ความเร็วลมทดสอบ 2 ถึง 6 เมตรต่อวินาที เนื่องจากความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทยและแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปีที่ 5-6 เมตรต่อวินาที จึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมให้เสมือนกับลักษณะภูมิประเทศใบกังหันลมที่นำมาทดสอบมี 2 รูปแบบแบบที่หนึ่งใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) แบบที่สองใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องผลของการใช้โปรแกรม CF-Design V.8.0 ในการเฉลยผลจำลองการไหลของกังหันลมจึงต้องมีการทดสอบผลเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.6 ความเร็วลมกับความเร็รรอบจากการทดสอบ

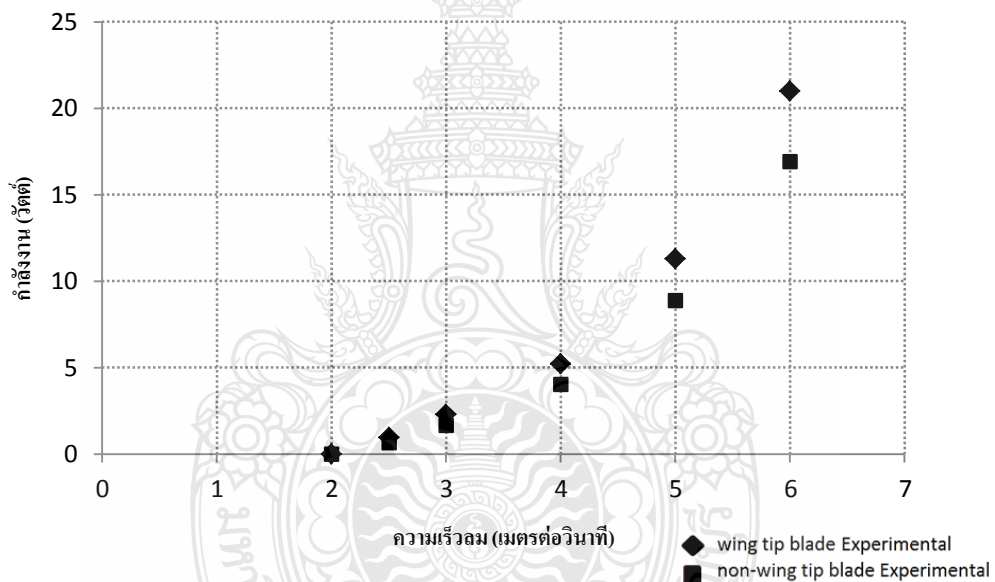
4.1.2.1 ผลของความเร็วมที่มีต่อความเร็วรอบ รูปที่ 4.6 ผลของความเร็วมที่มีผลต่อความเร็วรอบ จากผลการทดสอบพบว่าที่ความเร็วม 2 เมตรต่อวินาที กังหันลมยังไม่เริ่มต้นหมุนได้ แต่ที่ความเร็วมเอาชนะแรงบิดเริ่มต้นของกังหันลมได้ที่ความเร็วม 2.5 เมตรต่อวินาที ใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้ความเร็วรอบ 329 รอบต่อนาที ส่วนใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ได้ความเร็วรอบ 322 รอบต่อนาที และที่ความเร็วม 6 เมตรต่อวินาทีใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้ความเร็วรอบ 962 รอบต่อนาที ส่วนใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ได้ความเร็วรอบ 898 รอบต่อนาที จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ให้ความเร็วรอบสูงกว่าใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ทุกช่วงความเร็วมเฉลี่ย 5.95 เปอร์เซ็นต์

เหตุที่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากที่ความเร็วม 2 เมตรต่อวินาทีพลังงานลมยังไม่สามารถเอาชนะแรงบิดเริ่มต้นของกังหันลมได้จึงไม่เกิดการหมุน และด้วยปลายใบกังหันลมที่แตกต่างกันทำให้รอบการหมุนและการไหลตัดอากาศปลายใบ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกังหันลม จากการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม CF-Design V.8.0 เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.7 ความเร็วมกับแรงบิดจากการทดสอบ

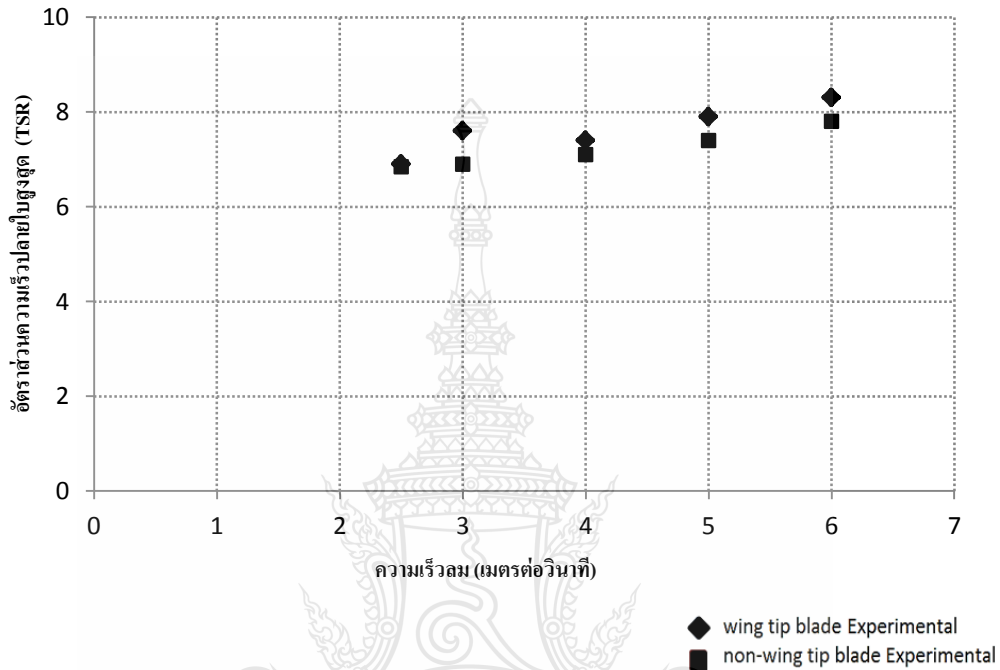
4.1.2.2 ผลของความเร็วลมที่มีต่อแรงบิด รูปที่ 4.7 ผลของความเร็วลมที่มีผลต่อแรงบิด จากผลการทดสอบ กังหันลมเริ่มต้นหมุนที่ 2.5 เมตรต่อวินาที จึงได้แรงบิดเริ่มต้นของใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้แรงบิด 0.028 นิวตันเมตร ส่วนใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ได้แรงบิด 0.02 นิวตันเมตร และที่ความเร็วลมทดสอบสูงสุด 6 เมตรต่อวินาที ใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้แรงบิด 0.221 นิวตันเมตร ส่วนใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ได้แรงบิด 0.18 นิวตันเมตร จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้แรงบิดสูงกว่าใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าในทุกๆช่วงความเร็วลมเฉลี่ย 24.35 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.8 ความเร็วลมกับกำลังงานจากการทดสอบ

4.1.2.3 ผลของความเร็วลมที่มีต่อกำลังงาน รูปที่ 4.8 ผลของความเร็วลมที่มีผลต่อกำลังงาน จากผลการทดสอบกังหันลมเริ่มต้นหมุนที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที ใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้กำลังงาน 0.94 วัตต์ ส่วนใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ได้กำลังงาน 0.67 วัตต์ และที่ความเร็วลมทดสอบสูงสุด 6 เมตรต่อวินาที ใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้กำลังงาน 21 วัตต์ ส่วนใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ได้กำลังงาน 16.92 วัตต์ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า

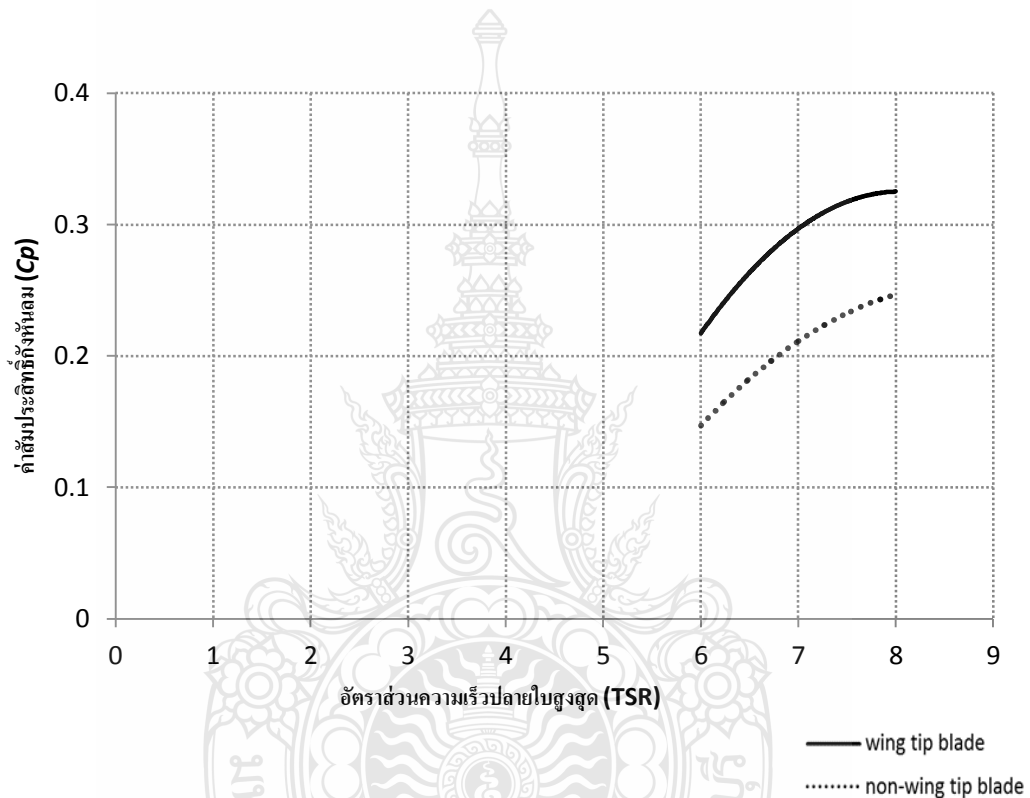
ใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้กำลังงานสูงกว่าใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าในทุกๆช่วงความเร็วลมเฉลี่ย 24.23 เปอร์เซ็นต์เซ็นต์



รูปที่ 4.9 ความเร็วลมกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด

4.1.2.4 ผลของความเร็วลมที่มีต่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด รูปที่ 4.9 ผลของการวิเคราะห์อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด (TSR) ต่อความเร็วลม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กังหันลมเริ่มต้นหมุนที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที ใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด 6.89 เท่า ส่วนใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ได้อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด 6.84 เท่า และที่ความเร็วลมทดสอบสูงสุด 6 เมตรต่อวินาที ใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด 8.3 เท่า ส่วนใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ได้อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด 7.8 เท่า แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วลมในลักษณะคู่ขนานกันในทุกๆช่วงความเร็วลม เฉลี่ย 5.28 เปอร์เซ็นต์เซ็นต์

เหตุผลที่เป็นเช่นนั้นเพราะ อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุดเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วรอบต่อความเร็วลม เมื่อรอบการหมุนเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมใบกังหันลมสามารถหมุนจนกระทั่งความเร็วลมเป็นกึ่งเท่าของลมที่เข้าปะทะกังหันลม ยังมีรอบสูงยิ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ Air Foil และการออกแบบใบกังหันลมที่มีมีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ต่อใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)



รูปที่ 4.10 ผลของอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุดกับค่าสัมประสิทธิ์กำลังจากการทดสอบ

4.1.2.5 ผลของอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์กำลัง รูปที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบในรูปแบบของตัวแปรไร้มิติของค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) กับอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด (TSR) จากการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบที่ความเร็วลม 6.0 เมตรต่อวินาที จะเห็นว่าใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดอยู่ที่ 0.33 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด 8.3 เท่า ส่วนใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดอยู่ที่ 0.25 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด 7.8 เท่า เมื่อ

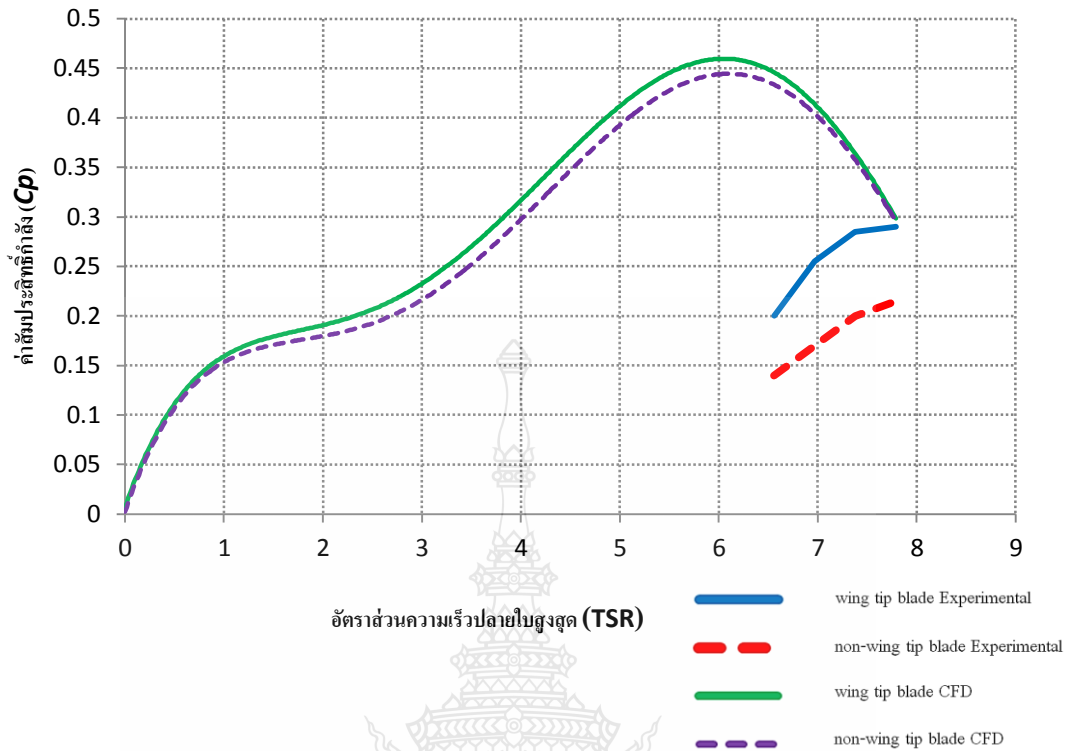
เปรียบเทียบกันแล้ว ใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงกว่า ใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) เฉลี่ย 28 เปอร์เซ็นต์

เหตุผลที่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากชุดทดสอบกังหันลมมีข้อจำกัด ที่ชุดกำเนิดความเร็วลมได้สูงสุดเพียง 6.0 เมตรต่อวินาที ดังนั้นการทดสอบจึงถูกจำกัดที่ความเร็วลมดังกล่าวจึงไม่สามารถทดสอบหาประสิทธิภาพกำลัง (C_p) และอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด (TSR) ในค่าความเร็วที่เกินจากอุโมงค์ทดสอบได้ผลที่ได้จึงเป็นการเปรียบเทียบกับผลการจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) เฉลี่ย 28 เปอร์เซ็นต์ จึงเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลเฉลยแบบจำลองการไหลของกังหันลม ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CF-Design V 8.0

4.2 การเปรียบเทียบผลจำลองการไหลกับการทดสอบ

เป็นผลจากการจำลองการไหลและการทดสอบ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลเฉลยแบบจำลองการไหลของกังหันลมที่จำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ CF-Design V 8.0 จึงได้นำเอาผลการทดสอบการทดสอบใบกังหันลมต้นแบบย่อส่วน 1:18 เท่า ที่ได้ทดสอบด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพกังหันลม นำมาเปรียบเทียบกัน ในเทอมไร้มิติอยู่ในรูปแบบสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) กับอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด (TSR)



รูปที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังระหว่างการทำงานของไหลกับการทดสอบ

จากรูปที่ 4.11 ผลจำลองการไหลด้วยโปรแกรม CF-Design V 8.0 มีลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) สอดคล้องกับการทดสอบ จะเห็นว่าใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) แตกต่างกันอยู่ที่ 18.8 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ย และใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) แตกต่างกันอยู่ที่ 41 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ย

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ผลการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม CF-Design V.8.0 กับผลการทดสอบมีความแตกต่างกันเฉลี่ยประมาณ 29.8 เปอร์เซ็นต์ กล่าวได้ คือ ผลเฉลยแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ มีทิศทางเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพไปในทางเดียวกัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 จากการศึกษาวิจัยใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์ ที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ต่อใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ด้วยโปรแกรม CF-Design V.8.0 ความเร็วลมในการทดสอบ 2-12 เมตรต่อวินาที ที่ความเร็วลมทดสอบ 10 เมตรต่อวินาที ใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ให้รอบการทำงานสูงสุดที่ 71 รอบต่อนาที แรงบิด 9,800 นิวตันเมตร กำลังงานสูงสุด 71.560 กิโลวัตต์ อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด (TSR) 6.7 เท่าและค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) 0.46 เทียบกับใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ที่ความเร็วลมสูงสุด 10 เมตรต่อวินาที ให้รอบการทำงานสูงสุดที่ 70 รอบต่อนาที ได้แรงบิด 9,700 นิวตันเมตร กำลังงานสูงสุด 71.25 กิโลวัตต์ อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด (TSR) 6.6 เท่าและค่าสัมประสิทธิ์ (C_p) 0.45 จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกังหันลมพบว่าใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าใบกังหันแบบที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) เฉลี่ย 5.25 เปอร์เซ็นต์ทุกความเร็วลม

5.1.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองการไหลของกังหันลมทั้ง 2 รูปแบบ ในรูปตัวแปรไร้มิติ ของค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) กับอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด (TSR) ผลการจำลองการไหลผ่านใบกังหันลม ให้ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดสอบใบกังหันลมขนาดย่อส่วน 1:18 เท่าจากแนวโน้มของผลการทดลองในแต่ละส่วนมีความต่างกันระหว่างผลจำลองการไหลกับการทดสอบ เฉลี่ย 29.8 เปอร์เซ็นต์

ผลสรุปของงานวิจัยนี้ จากการศึกษาวิจัยใบกังหันลมที่ใช้ Air Foil รุ่น ROY 1235 มุมบิดโคนใบ 8 องศา มุมบิดปลายใบ 2 องศา ที่นำมาทดสอบได้ขอสรุปว่า ใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ เหมาะสมที่จะนำมาผลิตและติดตั้งกับ กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์ เนื่องจากได้รับการออกแบบที่เหมาะสมกับความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทย และแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาทดลองพบว่า ใบกัณฑ์ลมที่ได้มีการศึกษาเป็นแบบ ไม่สามารถปรับมุมบิดเองได้จึงทำให้กัณฑ์ลมมีการสตาร์ทตัวเองช้า และไม่สามารถรักษารอบการทำงานที่ดีที่สุดของจุดพลังงานสูงสุดได้

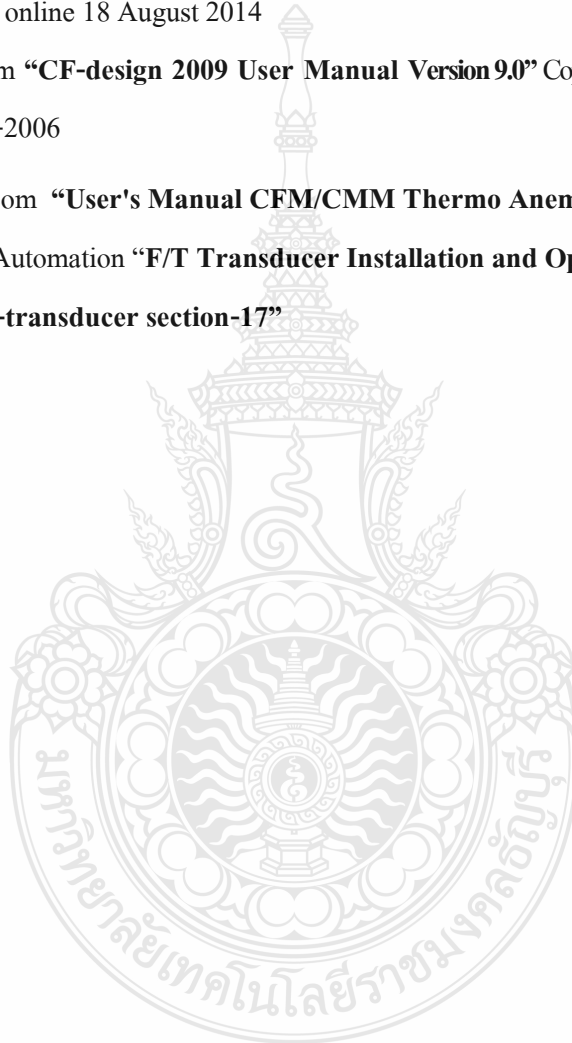
ดังนั้น หากสามารถออกแบบใบกัณฑ์ลมที่สามารถปรับมุมบิดได้ทุกความเร็วลมเพื่อหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดในความเร็วลมนั้นๆ ก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพกัณฑ์ลมได้



บรรณานุกรม

- [1] สมชาย ภูวงศ์ไพบูลย์, บริษัท เฟลโลว์ เอ็นจิเนียรส์ คอนซัลแตนต์ส์ จำกัด, “แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย” โดยการสนับสนุนจากกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน ครั้งที่ 1 จำนวน 600 เล่ม , 2544
- [2] วิรัชย์ ไรยนรินทร์. มปป. “ต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วต่ำ” เอกสารประกอบโครงการศึกษา วิจัย พัฒนา.
- [3] สว่างชาติทอง “ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพรอบการทำงานสูงสุดของใบกังหันลมผลิต ไฟฟ้า ขนาด 20 กิโลวัตต์” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 พ.ศ. 2554
- [4] นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อชิตพล ศศิธรานุวัฒน์ ‘เทคโนโลยีพลังงานลม’Naresuan University Journal, 2004, 12(2), pp 57-73.
- [5] Alex Kalmikov and Katherine Dykes, “**Wind Power Fundamentals**” MIT Wind Energy Group & Renewable Energy Projects in Action
- [6] Miguel Lopez, Jean-Claude Vannier, “**STAND-ALONE WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM WITH MAXIMUM POWER TRANSFER CONTROL**” Ingeniare. Revista chilena de ingenieria, vol. 17 No 3, 2009, pp. 329-336
- [7] M.Ragheb, “**OPTIMAL ROTOR TIP SPEED RATIO**” 3/11/2014
- [8] Emrah Kulunk, “**Aerodynamics of Wind Turbines**” New Mexico Institute of Mining and Technology USA
- [9] Ali M. Abdelsalam, K. Boopathi, S. Gomathinayagam, S.S. Hari Krishnan Kumar, Velraj Ramalingam, “**Experimental and numerical studies on the wake behavior of a horizontal axis wind turbine**” May 2014, Pages 54–65
- [10] M. Salman Siddiqui, Naveed Durrani, Imran Akhtar “**Quantification of the effects of geometric approximations on the performance of a vertical axis wind turbine**” February 2015, Pages 661–670
- [11] วิรัชย์ ไรยนรินทร์. “การออกแบบกังหันลมโดยใช้ **Momentum Theory**” วารสารวิศวกรรม. กันยายน- ตุลาคม 2547

- [12]S.L. Chernyshev^{a,b,1}, A.M. Gaifullin^{a,b}, Yu.N. Sviridenko^a **“Civil aircraft vortex wake. TsAGI’s research activities”** Central AeroHydrodynamic Institute n.a. prof. N.E. Zhukovsky (TsAGI) 1, Zhukovsky str., Zhukovsky, 140180 Moscow Region, Russia
^b Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT) 9, Institutskii per., Dolgoprudny, 141700 Moscow Region, RussiaReceived 17 June 2014, Accepted 20 June 2014, Available online 18 August 2014
- [13]www.scribd.com **“CF-design 2009 User Manual Version 9.0”** Copyright Blue Ridge Numerics, Inc. 1992-2006
- [14]www.globalw.com **“User's Manual CFM/CMM Thermo Anemometer Model AN 100”**
- [15]ATI Industrial Automation **“F/T Transducer Installation and Operation Manual Document #9620-05-transducer section-17”**



ภาคผนวก





ผลจำลองการไหลด้วยโปรแกรม CF-Design V. 8.0

ผลการทดสอบจำลองใบกังหันลมต้นแบบ ด้วยโปรแกรม CF-Design V. 8.0 โดยการนำโมเดลจำลองทั้งสองแบบ คือ ใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) และใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ไปทดสอบจำลองการไหลด้วยอุโมงค์ลมจำลองด้วยโปรแกรม CF-Design V. 8.0 ซึ่งผลข้อมูลที่ได้จากการจำลองจะได้ผลข้อมูล สอง ชนิดคือ ความเร็วรอบ (Rotating Speed) และแรงบิด (Hydraulic Torque) ในการทดสอบโมเดลจะมีอยู่สองส่วนด้วยกัน ส่วนที่หนึ่ง ทำการทดสอบในหมวดการวิเคราะห์แบบหมุนอิสระ (Free Spinning) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในหมวดนี้ คือ ความเร็วรอบ (Rotating Speed) และส่วนที่สองทำการทดสอบในหมวดของการวิเคราะห์แบบรู้ความเร็วรอบ (Known Rotational Speed) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในหมวดนี้คือ แรงบิด (Hydraulic Torque) จะทำการทดสอบเพื่อหาผลเฉลยตั้งแต่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที จนถึงความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที และจะมีการทดสอบเพื่อหาค่าความแม่นยำในการทำงานที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที (Cut in Wind Speed) และที่ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาทีซึ่งเป็นความเร็วลมที่กังหันลมให้กำลังงานสูงสุด (Rated Wind Power)

การทดสอบในหมวดของการวิเคราะห์แบบหมุนอิสระ (Free Spin) จะบันทึกผลการทดสอบ ที่ตำแหน่งแรงบิด (Hydraulic Torque) มีค่าติดลบ (-) ครั้งแรก หมายถึงแรงบิดติดลบ กังหันสามารถให้พลังงานออกมา จดบันทึกความเร็วรอบ ลงในตารางบันทึกผล

การทดสอบในหมวดของการวิเคราะห์แบบรู้ความเร็วรอบ (Known Rotational Speed) จะบันทึกผลการทดสอบที่ตำแหน่งแรงบิด (Hydraulic Torque) มีค่าติดลบ (-) มากที่สุดหลังจากที่กังหันลมหมุนที่ความเร็วรอบสูงสุดแล้ว จดบันทึกค่าแรงบิดสูงสุด ลงในตารางบันทึกผล

ตาราง ก.1 บันทึกผลจำลองด้วยโปรแกรม CF-Design V. 8.0

ความเร็ว ลม (m/s)	ใบกังหันลมที่มีเพนตัดอากาศปลายใบ โค้งงอ (Wing-Tip Blade)			ใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)		
	ความเร็ว รอบ (rpm)	แรงบิด (N.m)	กำลังงาน (kW)	ความเร็ว รอบ (rpm)	แรงบิด (N.m)	กำลังงาน (kW)
2.0	0	0	0	0	0	0
2.5	12	123	0.46	13	140	0.48
3.0	14	442	0.63	13	437	0.63
3.5	17	863	1.53	16	824	1.40
4.0	19	1,017	1.86	18	982	1.80
4.5	22	1,270	3.00	21	1,195	2.69
5.0	26	1,701	4.50	25	1,640	4.10
5.5	28	2,200	6.20	26	2,100	5.69
6.0	31	2,500	8.10	28	2,410	7.05
7.0	40	4,300	17.07	38	4,160	16.54
8.0	51	6,800	35.90	49	6,680	34.25
9.0	56	8,200	47.63	54	8,000	45.36
9.5	61	9,900	62.70	59	9,700	60.02
10	71	9,800	71.56	70	9,700	71.25
11	76	9,500	74.54	75	9,450	74.54
12	83	7,500	64.52	81	7,260	61.83

ตารางที่ ก. 2 แสดงผลวิเคราะห์อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุดจากผลจำลองการไหล

ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด (TSR)	
	ใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศปลาย ใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade)	ใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)
2.0	0	0
2.5	4.5	4.9
3.0	4.3	4.3
4.0	4.4	4.2
5.0	4.9	4.7
6.0	4.8	4.4
7.0	5.3	5.1
8.0	6.0	5.7
9.0	5.8	5.6
9.5	6.0	5.8
10.0	6.7	6.6
11.0	6.5	6.4
12.0	6.5	6.3

ตาราง ก.3 แสดงผลวิเคราะห์สัมประสิทธิ์กำลังจากผลจำลองการไหล

ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	กำลังงานลม (กิโลวัตต์)	สัมประสิทธิ์กำลัง (C_p)	
		ใบกังหันลมที่มีแพนตัด อากาศปลายใบโค้งงอ (Wing Tip Blade)	ใบกังหันลมที่มีปลายใบ ตรง (Non-Wing Tip Blade)
2.0	0	0	0
2.5	473	0.13	0.11
3.0	630	0.14	0.13
4.0	1,856	0.16	0.18
5.0	4,277	0.23	0.21
6.0	7,560	0.24	0.21
7.0	16,809	0.32	0.31
8.0	35,047	0.45	0.43
9.0	46,499	0.42	0.4
9.5	61,357	0.45	0.42
10.0	71,407	0.46	0.45
11.0	74,545	0.36	0.36
12.0	63,175	0.24	0.23



ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบใบกังหันลมต้นแบบด้วยชุดทดสอบกังหันลม

ผลการทดสอบใบกังหันลมด้วยชุดทดสอบกังหันลม ที่ทดสอบรูปร่างปลายใบกังหันลมสองลักษณะ แบบที่ 1 ใบกังหันลมที่มีมุมบิดโคนใบ 8 องศา มุมบิดปลายใบ 2 องศา ปลายใบมีแพนดัดอากาศ ปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) แบบที่ 2 ใบกังหันลมที่มีมุมบิดโคนใบ 8 องศา มุมบิดปลายใบ 2 องศา ใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ซึ่งผลการทดสอบ จะได้จากเครื่องมือวัดแรงบิด (Torque Transducer) โดยการประมวลผลด้วยโปรแกรม (TORQ-VIEW) สามารถอ่านค่าจากจอประมวลผลได้เลย จอจะแสดงผลการวัดค่าต่างๆดังนี้ ค่าแรงบิด (Torque) ความเร็วรอบ (Speed) และค่าพลังงาน (Power)

ข.1 ผลการทดสอบความเร็วลมของชุดแหล่งกำเนิดลม

ตารางที่ ข.1 บันทึกผลการทดสอบความเร็วลมของชุดแหล่งกำเนิดลม

ความเร็วรอบมอเตอร์ (รอบต่อนาที)	ช่วงความเร็วลมควบคุม (เมตรต่อวินาที)	ความเร็วลมเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)
115-125	1.8-2.2	2.0
155-165	2.3-2.7	2.5
195-205	2.8-3.2	3.0
280-290	3.8-4.2	4.0
350-360	4.8-5.2	5.0
410-420	5.8-6.2	6.0

ข.2 ผลการทดสอบใบกังหันลมต้นแบบด้วยชุดทดสอบกังหันลม

ในการทดสอบใบกังหันลมต้นแบบซึ่งได้มาจากการย่อส่วนจากขนาดจริงลงมา ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 18 เท่า ใบกังหันลมต้นแบบตัวจริงจะมี รัศมียาว 9 เมตร หลังจากย่อขนาดแล้วจะได้รัศมีใบกังหันในการทดสอบยาว 50 เซนติเมตร ขนาดสัดส่วนอื่นๆก็ถูกย่อลงมาตามส่วนเท่าๆกัน ผลการทดสอบใบกังหันลมแบบที่ 1 ใบกังหันลมที่มีมุมบิดโคนใบ 8 องศา มุมบิดปลายใบ 2 องศา ปลายใบมีแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing Tip Blade) ดูได้จากตาราง ข.2 และใบกังหันลมต้นแบบที่ 2 ใบกังหันลมที่มีมุมบิดโคนใบ 8 องศา มุมบิดปลายใบ 2 องศา ที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade) ดูได้จากตาราง ข.3 ตามลำดับ

ตาราง ข.2 บันทึกผลการทดสอบใบกังหันลม แบบที่ 1 ใบกังหันลมที่มีแพนต์อากาศปลายใบโค้งงอ (Wing Tip Blade)

ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	แรงบิด (นิวตันเมตร)	กำลังงาน (วัตต์)
2.0	0	0.000	0.00
2.5	329	0.028	0.94
3.0	436	0.056	2.30
4.0	572	0.091	5.20
5.0	761	0.156	11.3
6.0	962	0.221	21.0

ตาราง ข.3 บันทึกผลการทดสอบใบกังหันลม แบบ 2 ใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)

ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	แรงบิด (นิวตันเมตร)	กำลังงาน (วัตต์)
2.0	0	0.000	0.00
2.5	322	0.020	0.67
3.0	395	0.040	1.65
4.0	547	0.070	4.01
5.0	706	0.120	8.87
6.0	898	0.180	16.92

ผลทดสอบที่ได้สามารถดูได้จากจอประมวลผลของคอมพิวเตอร์ (Laptop/Pc) จากข้อมูลของเครื่องมือวัดแรงบิด (Torque Transducer) โดยส่งผลมาประมวลผลด้วยโปรแกรม TORQ VIEW การเก็บข้อมูลจะดูจากค่าสูงสุด (Peak) ของค่าแรงบิด (Torque) ความเร็วรอบ (Speed) และค่ากำลังงาน (Power) ของแต่ละความเร็วลม เนื่องจากชุดแหล่งกำเนิดลม สามารถสร้างความเร็วลมสูงสุดได้ 6.0 เมตรต่อวินาที จึงจำกัดขอบเขตการศึกษาที่ความเร็วลมดังกล่าว

ข.4 ผลการวิเคราะห์การทดสอบใบกังหันลมต้นแบบทั้งสองแบบด้วยชุดทดสอบกังหันลม

นำผลการทดสอบ ตารางที่ ข.2 และตาราง ข.3 มาวิเคราะห์ผลอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด (TSR) และค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ของใบกังหันลม ตารางที่ ข.4 จะแสดงผลการวิเคราะห์ผลอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด และตารางที่ ข.5 จะแสดงการวิเคราะห์ผลสัมประสิทธิ์กำลัง ตามลำดับ

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ผลอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด

ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงสุด (TSR)	
	ใบกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศปลายใบ โค้งงอ (Wing Tip Blade)	ใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)
2.0	0.00	0.00
2.5	6.89	6.84
3.0	7.60	6.89
4.0	7.40	7.10
5.0	7.90	7.40
6.0	8.30	7.80

ตารางที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง

ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	กำลังงานลม (วัตต์)	สัมประสิทธิ์กำลัง (C_p)	
		ใบกังหันลมที่มีแพนตัด อากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade)	ใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)
2.0	3.84	0.00	0.00
2.5	7.51	0.20	0.14
3.0	12.9	0.31	0.20
4.0	30.7	0.26	0.20
5.0	60.1	0.32	0.23
6.0	103	0.33	0.25

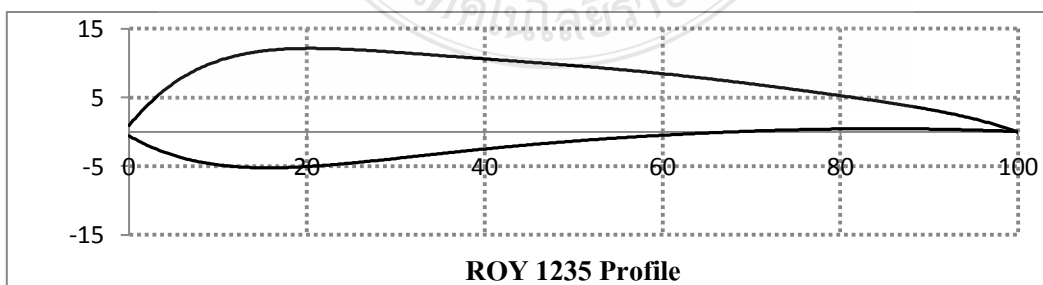
ภาคผนวก ค

รายการแบบประกอบ

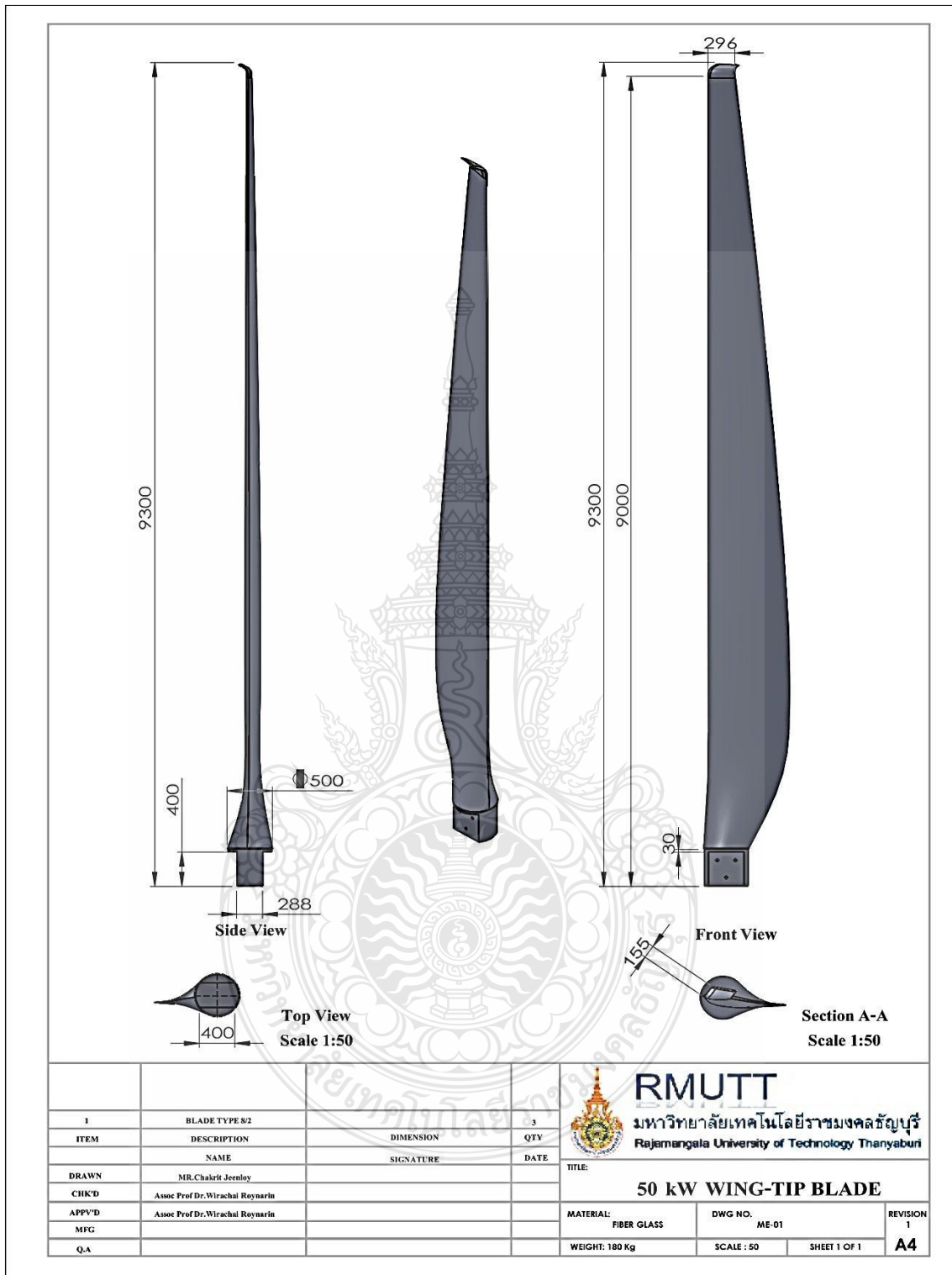


ตาราง ค.1 ฐานข้อมูล Air Foil รุ่น ROY 1235

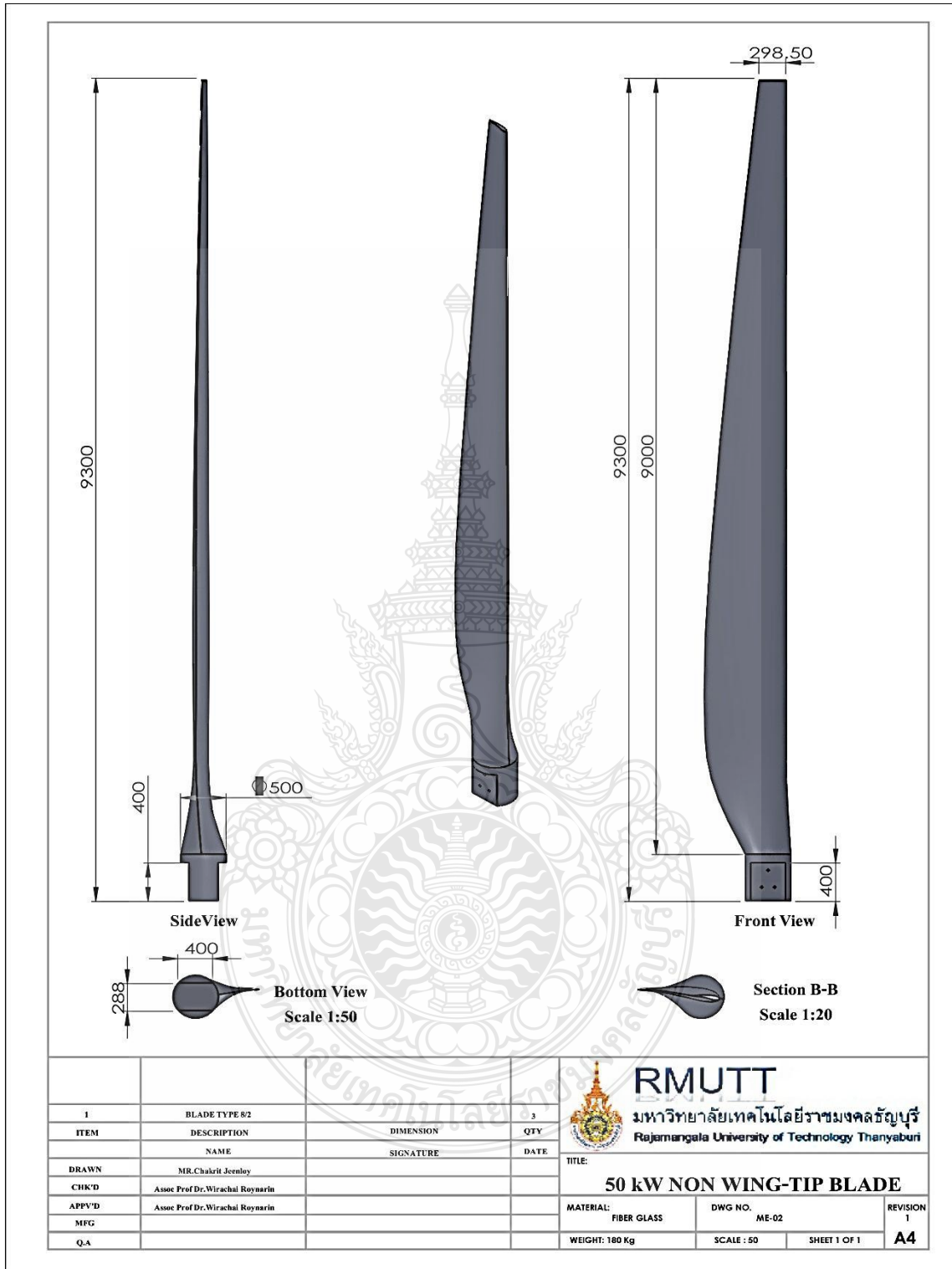
Wing chord	Upper Camber	Lower Camber
0	0	0
0.0416	0.38	-0.38
0.08	0.58	-0.55
0.16	0.92	-0.77
0.63	2.37	-1.44
1.25	3.66	-1.84
2.5	5.39	-2.44
3.75	6.6	-2.96
6.25	8.24	-3.79
12.5	10.38	-4.9
18.7	11.24	-5.05
25	12	-4.6
31.25	12	-3.81
37.5	12	-2.92
43.75	10	-2.07
50	9.5	-1.28
56.25	8	-0.6
68.75	7	-0.07
75	6.93	0.27
81.25	5.67	0.43
87.5	3	0.45
93.75	2	0.36
97	1.47	0.2
100	0	0



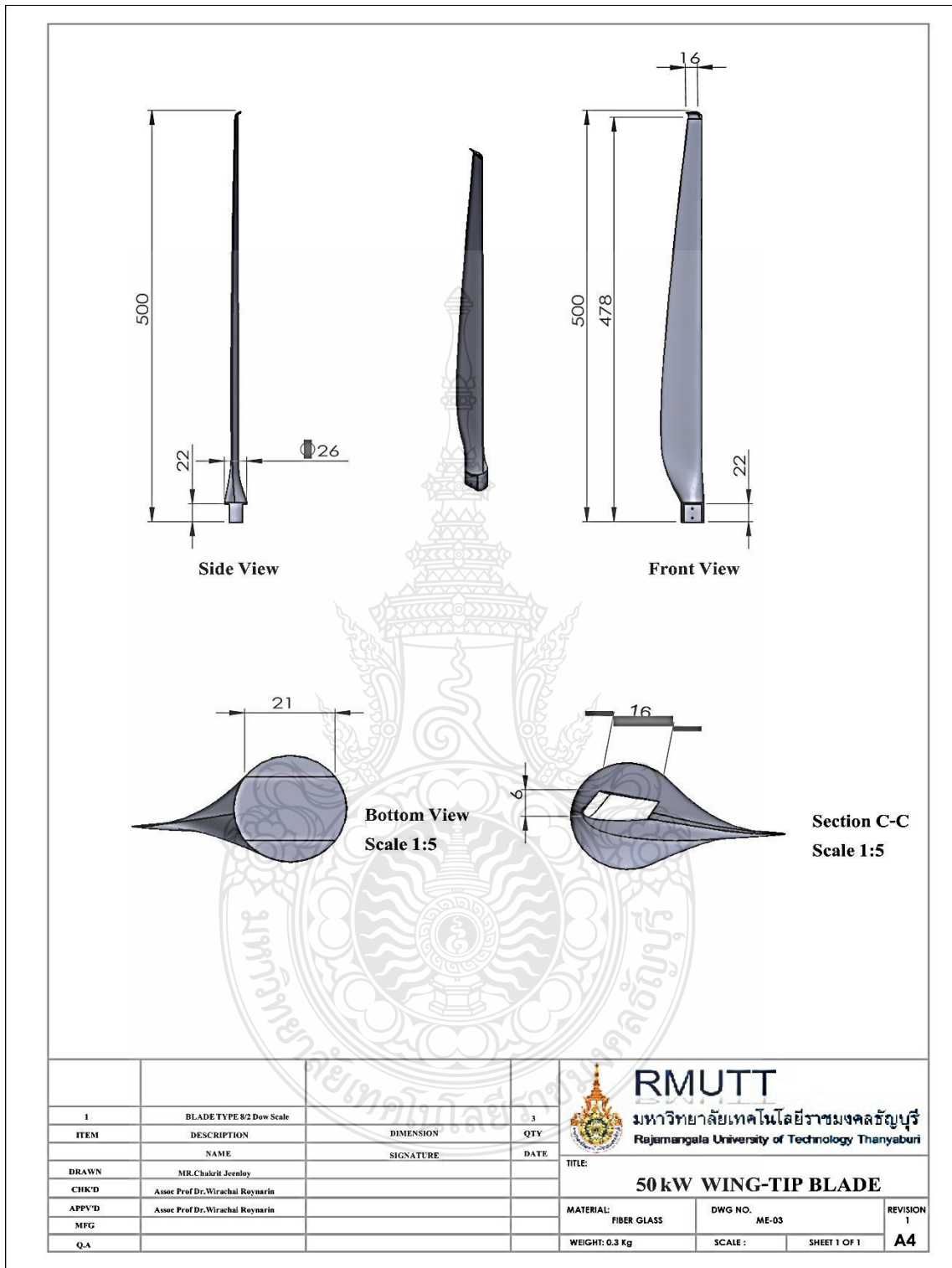
รูปที่ ค.1 Air Foil รุ่น ROY 1235



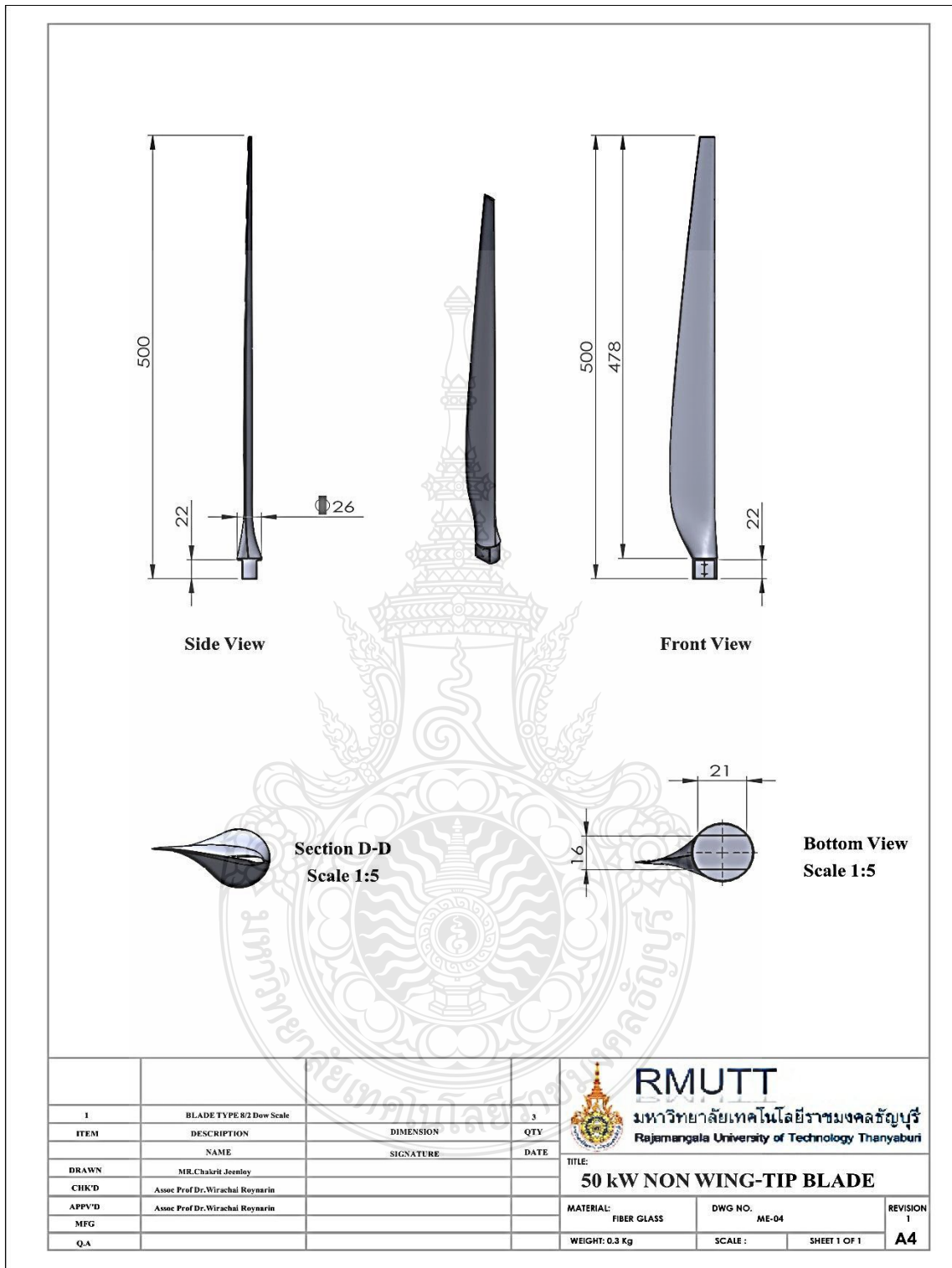
รูปที่ ค.2 ใบกังหันลมขนาด 50 กิโลวัตต์ที่มีปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade)



รูปที่ ค.3 ใบกังหันลมขนาด 50 กิโลวัตต์ที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)



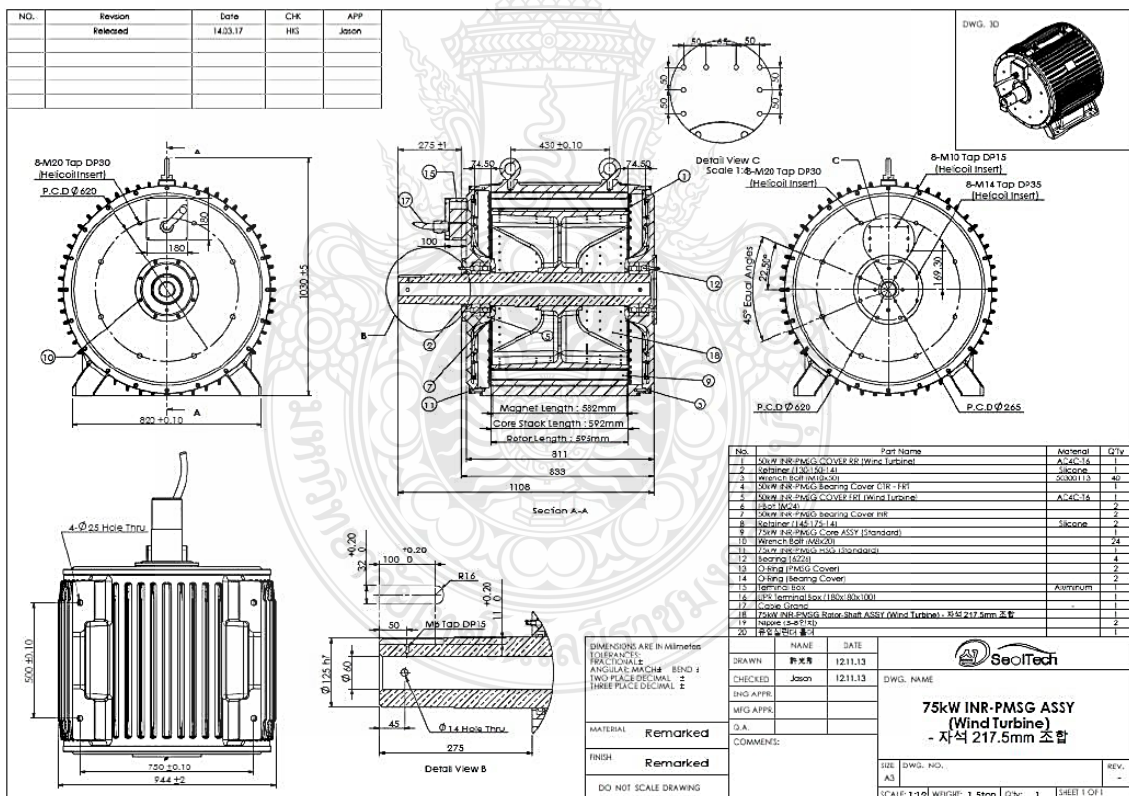
รูปที่ ค.4 ใบกังหันลมขนาดย่อ 1:18 เท่าที่มีปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade)



รูปที่ ค.5 ใบกังหันลมขนาดย่อ 1:18 เทำ ที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)

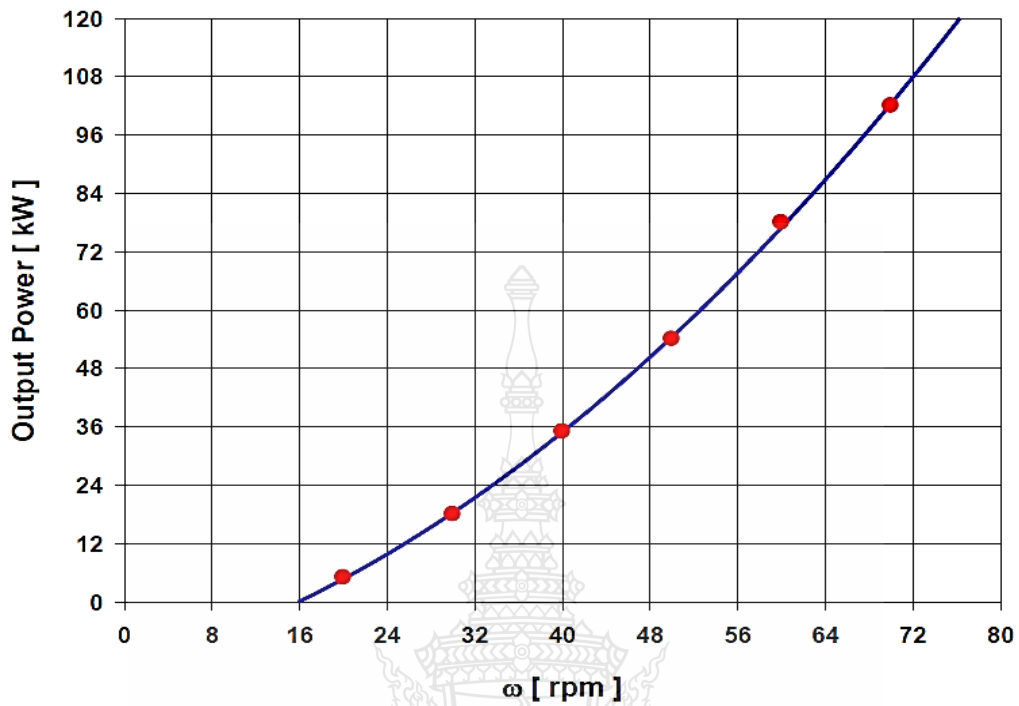


รูปที่ ค.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์



รูปที่ ค.7 แบบประกอบภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Power vs. rpm



รูปที่ ค.8 ผลความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อค่าพลังงานที่ออกมา

Model : SWEG75K-60-I

	Symbol	units	
Output power	P_o	kW	75
Rated speed	ω	rpm	60
Output Voltage	E	V	3phase, 380(L-L)
Max. Efficiency	η	%	95
Rotor			Permanent magnet
Number of Pole	-	-	48
Speed Constant	K_E	Vdc/rpm	11.5
Resistance at 20 °C(Line-Line)	R_T	Ω	0.38
Inductance (Line-Line)	L	mH	12.5
Rotor Inertia	J	Kg-m ²	23.2
Maximum Temperature	C_{Max}	°C	150
Winding			Wye
Starting Torque		Nm	< 132
Shaft Play-Axial		mm	< 0.5
Gen. Weight	W_g	Kg	1,250

Note: Frame type, Al-Housing, Bearing- NSK or NTN

รูปที่ ค.9 ข้อมูลทางเทคนิค เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์



ภาคผนวก ง

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารบัญ

บทความ	หน้า
Oral Presentation Session	
กลุ่มที่ 1 ไฟฟ้าชุมชน (CP)	
CP001 การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์และรูปแบบกำหนดการเชิงเส้นสำหรับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งโรงไฟฟ้าชีวมวล กรณีศึกษาจังหวัดสุพรรณบุรี <i>กฤษนนท์ สนธิ สุรินทร์ แห่งมงาม</i>	1
CP002 กังหันน้ำเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ <i>วรรณกร พรหมอารีย์</i>	9
CP003 การศึกษาการกลายสภาพเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของมอเตอร์เชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเพื่อการประยุกต์ใช้ผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีรีเจนเนอเรทีฟ <i>สิทธิชัย กันทะวงศ์ เอกรัตน์ นภกานต์ และบุญยั้ง ปลั่งกลาง</i>	16
CP004 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชิงเส้นชนิดสเตเตอร์คู่ โดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์ฟลัสวิทมอดูเลชัน <i>อรรรนนท์ บัวศรี วันชัย ทรัพย์สิงห์</i>	22
CP005 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อช่วยคำนวณรายการอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายสายส่งชิงอากาศ 22 kV <i>กุลเดชา อนุกุลภิมย์ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์</i>	28
CP006 การศึกษาเสถียรภาพแรงดันของระบบ PEA 22KV เชื่อมกับกังหันลมล่าตะคอง <i>ชนสิทธิ์ จันเงิน กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์</i>	34
CP007 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 5 kW <i>ชาคริต จินลอย วิรัชย์ โธณวินทร์ เดชา อินทร์โธไล้</i>	42
CP008 การประเมินด้านเทคนิคการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบเตือนภัยน้ำท่วมพื้นที่ต้นน้ำน่าน <i>ไตรรัตน์ ปะที กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์</i>	49

17.00 – 17.20	ME006 การทำเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงโททานีเยมไดออกไซด์ด้วยอิเล็กโทรไลต์กึ่งของแข็ง สุรศักดิ์ แสนทวีสุข กิตติชัย โสพันนา และ เทพกร ลีลาแต้ม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร	วันพุธที่ 19 ธันวาคม 2555	08.00 – 09.00	ลงทะเบียน
15.20 – 16.20	ลิ้งแควดล้อมเพื่อชุมชน(CE)		09.00 – 10.00	การเสวนาระหว่างชุมชนกับนักวิชาการ
15.20 – 15.40	CE001 ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ลดโลกร้อนของผู้บริโภค ในเขตเทศบาลนครพิษณุโลก บุษรารัตน์ พันธุ์รินทร์ ประพิธาร์ ธนารักษ์ และ จารุวรรณ แดงบุบผา มหาวิทยาลัยนเรศวร		10.00 – 10.20	รับประทานอาหารว่าง
15.40 – 16.00	CE002 การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมและศักยภาพชุมชนต้นแบบพลังงานทดแทน วุฒิศาสตร์ โชคเกื้อ อนุสรณ์ แสงประจักษ์ ปรีชา ศรีประภาคาร และณัฐธิดา สมพงษ์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม		10.20 – 12.00	ไฟฟ้าชุมชน 2 (CP)
16.00 – 16.20	CE003 เครื่องผลิตน้ำกลั่นแบบผสมผสานสองพลังงาน สุทธินันท์ ต้นโพธิ์ รุ่งเพชร ก่องนอก และรุ่งเรือง วัจโจสง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา		10.20 – 10.40	CP007 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 5 kW ชาคริต จินลอย วิรัชย์ โรยรินทร์ และเดชา อินทร์โธไลต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
			10.40 – 11.00	CP008 การประเมินด้านเทคนิคการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบเตือนภัยน้ำท่วมพื้นที่ต้นน้ำน่าน ไตรรัตน์ ปะทิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
			11.00 – 11.20	CP009 การศึกษากังหันลมผลิตไฟฟ้าจากชุดพัดลมระบายความร้อนของคอมพิวเตอร์ บัญญัติ นิยมवास และ เสรี ทองชุม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
			11.20 – 11.40	CP010 การศึกษากังหันน้ำผลิตไฟฟ้าในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ บัณฑิต เสรีกิจ วิรัชย์ โรยรินทร์ และเดชา อินทร์โธไลต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
			11.40 – 12.00	CP011 การวิเคราะห์เสถียรภาพสภาวะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่เชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า: กรณีจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ วชิรา เขจรสัจย์ และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กำหนดการประชุมสัมมนาวิชาการ หลังงานมหตมงานสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5 : The 5th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-5)

เวลา	วันอังคารที่ 18 ธันวาคม 2555		
17.20 – 18.00 น.	ฉันทนาการ World Green City & Eco - Product		
18.00 – 21.00 น.	งานเลี้ยงต้อนรับและพิธีมอบธง TREC วันอังคารที่ 19 ธันวาคม 2555		
08.00 – 09.00 น.	ลงทะเบียน		
09.00 -10.00 น.	การเสวนาระหว่างชุมชนกับนักวิชาการ โดย อ.สุเทพย์ จันทร์สุภา และกลุ่มเกษตรกรจังหวัดเชียงใหม่		
10.00 - 10.20 น.	รับประทานอาหารว่าง		
ห้องประชุม	ห้องประชุมหลังเต่า (โซน B)	ห้องประชุมระลอก (โซน B)	ห้องประชุม adicET (โซนB)
10.20 – 12.00 น.	ไฟฟ้าชุมชน 2 (CP)	ความร่วมมือชุมชน 2 (CT)	การประหยัดพลังงาน 2 (EC)
Paper IDs	CP007, CP008, CP009, CP010, CP011	CT006, CT007, CT008	EC007, EC008, EC009, EC010, EC011
ประธาน	รศ.ธีรพงษ์ พุทธิภูมิวิวงศ์	ผศ.ดร.อนุสรณ์ แสงประจักษ์	ดร.กาญจน์ชนม์ ภูมิจิตพิชญ์
รองประธาน	วราภรณ์ อินศิระธรรม	อ.สุจิตต์ ศรีแก้ว	ดร.ณัฐยา ตันตราพันธ์
12.00 – 13.20 น.	รับประทานอาหารกลางวัน		
13.00 – 15.00 น.	ไฟฟ้าชุมชน 3 (CP)	วัสดุศาสตร์เพื่อการพัฒนาพลังงาน 2 (ME)	นำเสนอโปสเตอร์
Paper IDs	CP012, CP013, CP014, CP015, CP016, CP017	ME007, ME008, ME009, ME010	PT001-PT010
ประธาน	ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	ดร.วิจิตต์ เศรษฐพันธ์	ดร.วิรัช โยธินันท์
รองประธาน	อ.ดิศกร ฉมया	อ.ลาวัลย์ ภาระจง	ดร.ณัฐยา ตันตราพันธ์
15.00 – 15.30 น.	รับประทานอาหารว่าง		
15.30 – 16.30 น.	พิธีปิดและมอบรางวัลบทความดีเด่น		
วันอังคารที่ 20 ธันวาคม 2555			
09.00 – 12.00 น.	ศึกษาดูงาน ณ ศูนย์ศึกษาพัฒนาห้วยฮ่องไคร้อันเนื่องมาจากพระราชดำริ		
12.00 - 13.00 น.	รับประทานอาหารกลางวัน		
13.00 – 16.00 น.	พักผ่อนตามอัธยาศัย ณ น้ำพุร้อน ลันนากันพง		

การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 5 kW Performance Testing of 5 kW Permanent Magnet Generator (PMG)

ชาคริต จินลอย, วิรัช โยชนรินทร์, เตชา อินทร์โหล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนน รังสิต-
นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอ ธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3497 โทรสาร 0-2549-3432
E-mail : wirachairoynarin@yahoo.com

CP007

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 5 kW แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Generator) ที่ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานกับกังหันลมที่มีความเร็วลมต่ำในประเทศหรือในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สาเหตุที่ต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้เนื่องจากเป็นสิ่งที่ต้องการเป็นอย่างมากในการนำไปผลิตไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้เป็นแบบแม่เหล็กถาวรที่มีรอบการทำงานต่ำเพื่อสามารถนำไปปรับใช้ในพื้นที่ภายในประเทศที่มีความเร็วลมหรือความเร็วของกระแสลม ซึ่งในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ชุดทดสอบทางความร้อนมาเป็นภาระงาน เพื่อหาประสิทธิภาพในการทำงานและวิเคราะห์ถึงการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในการทดสอบกำหนดให้รอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงสุด 350 rpm โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมรอบการทำงานของมอเตอร์ต้นกำลัง พลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามี ภาระโหลดความร้อน (Heater) ความต้านทาน รวม 20 โอห์ม เพื่อจำกัดกระแสไฟฟ้าไม่ให้เกิน 16 แอมแปร์ในการออกแบบผลการทดสอบพบว่าเมื่อเริ่มทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วรอบ 350 rpm มีอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 31 องศาเซลเซียสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 5 kW และค่อยๆลดลงในขณะที่อุณหภูมิภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นโดยพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะลดลงเฉลี่ย 11 วัตต์ ต่อนาทีและจะผลิตพลังงานออกมากองที่เมื่ออุณหภูมิเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 75 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 400 นาทีโดยจะผลิตพลังงานออกมาได้ 3.5 kW ต่อเนื่องคิดเป็นการสูญเสียทางความร้อน 30% เมื่อทำการปล่อยพลังงานสูงสุด

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, Permanent Magnet Generator , (PMG)

1. ความเป็นมา

ในปัจจุบันนี้ผู้ที่สนใจเกี่ยวกับเรื่องของพลังงานทดแทนกันมากขึ้น พลังงานลมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีผู้สนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าและถึงแม้จะมีการคิดค้นแปลงอุปกรณ์หลายชนิดมาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างเช่น นามอเตอร์ชนิด 3 เฟส มาดัดแปลงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้เองในบุคคลบางกลุ่มแต่ก็ยังไม่มียุติประสิทธิภาพเพียงพอเนื่องจากการใช้วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม ทำให้ไม่มีมาตรฐานในการนำมาใช้งานและด้วยศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยที่มีความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 4-5 เมตรต่อวินาทีนั้นซึ่งมีความเร็วลมต่ำไม่สามารถใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีอยู่ในท้องตลาดทั่วไปได้เนื่องจากเครื่องกำเนิด-

ไฟฟ้าตามท้องตลาด นั้นมีรอบการทำงานที่สูงจึงทำให้ไม่เหมาะกับกังหันลมที่มีความเร็วลมต่ำ จึงทำให้พลังงานทดแทนที่ได้จากกังหันลมหรือจากกังหันน้ำขนาดเล็กนั้นเป็นที่ต้องการนำมาใช้งานในชุมชนหรือชนบทที่ไม่มีไฟฟ้าใช้งาน จึงได้มีการทดสอบและออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถใช้กับพลังงานลมต่ำหรือกังหันน้ำที่มีรอบการทำงานต่ำเพื่อให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับพื้นที่ในชนบท ซึ่งโดยทั่วไปตามชุมชนหรือชนบทจะมีคลองและฝายน้ำขนาดเล็กที่มีเฮดของน้ำไม่สูง จึงเป็นสาเหตุหลักที่ต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่รอบการทำงานต่ำเพื่อให้เหมาะสมกับชุมชน ซึ่งถ้าหากมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารอบต่ำก็จะทำให้ไม่ต้องการหาแหล่งพลังงานลมที่มีความเร็วลมสูงหรือกระแสน้ำที่มีการเคลื่อนที่เร็วเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีรอบการทำงานต่ำจึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนในรูปแบบงานทางกล

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีของพลังงานลม

พลังงานลมนั้นเป็นพลังงานจลน์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ ที่เกิดจากการไหลของอากาศที่อุณหภูมิต่างกัน โดยในการวิเคราะห์ให้ใช้หลักการทฤษฎีโมเมนตัม

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3 C_P \quad (1)$$

โดยที่

P_w = กำลังงานที่ได้จากกังหันลม (watt)

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ @ 25 °C ~ (1.225 kg/m³)

A = พื้นที่กวาดของใบพัด (m²)

V_∞ = ความเร็วลมเข้าใบพัด (m/s)

C_P = ค่าประสิทธิภาพของกังหันลม

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลมนั้นเรียกว่าค่า C_p (Power Coefficient) โดยจะได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกำลังงานที่ได้จากกังหันลมได้ดึงเอาไว้ หรือกำลังงานที่กังหันลมผลิตได้ P_w (Wind Turbine power) เปรียบเทียบกับกำลังงานจากลมที่สมควรจะได้จริงจากลมที่มีการไหลอิสระ P_a (Air power)

$$C_p = \frac{P_w}{P_a} = \frac{P_w}{\frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3} \quad (2)$$

โดยที่

C_p = สัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลม

P_w = พลังงานที่กังหันลมผลิตได้ (watt)

P_a = พลังงานจากการเคลื่อนที่ของลม (watt)

จากสมการที่ (2) จะทราบได้ว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลม ซึ่งเราเรียกว่า CP_{max} นั้นจะมีค่าไม่เกิน 0.5926 หรือ ประมาณไม่เกิน 60% ตามทฤษฎีการวิเคราะห์ วิรัชย์ โรยรินทร์ (2551) ในรายงานการศึกษาวจัยพัฒนา สาธิต ต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ มทร.ธัญบุรี

2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

คือ อุปกรณ์ชิ้นส่วนที่ใช้สำหรับจากแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานทางไฟฟ้า ในการวิจัยครั้งนี้ได้ผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นแบบแม่เหล็กถาวรที่รอบการทำงานต่ำ (Low Speed Permanent Magnet-Generator , PMG) การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรรอบทำงานต่ำ ใช้หลักการตั้งเช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยทั่วไป โดยอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดขดลวด หรือขดลวดเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กก็จะเกิดกระแสไฟฟ้า ยังมีรอบในการหมุนมากความถี่จะยิ่งสูงและจำนวนแม่เหล็กบนโรเตอร์ยิ่งมากเท่าไร ความถี่ทางไฟฟ้าจะมากขึ้นตามรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการที่ 3

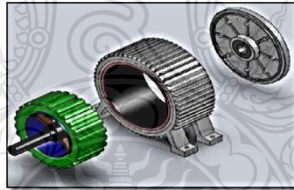
$$N = \frac{120 \times f}{P} \quad (3)$$

โดยที่

N = จำนวนรอบการหมุนของโรเตอร์ (rpm)

f = ความถี่ไฟฟ้า (Hz)

P = จำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 1 อุปกรณ์ภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 kW ประกอบด้วย โครงสเตเตอร์ (Stator frame), แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator core) ขั้วแม่เหล็กหมุน (Rotating field) , ขดลวดแดมเปอร์ (Damper winding)

2.3 การถ่ายเทความร้อน

หลักการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) นั้นเป็นการถ่ายเทความร้อนจากวัตถุหนึ่งซึ่งร้อนกว่าไปยังวัตถุหนึ่งซึ่งเย็นกว่า หรือจากที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำกว่า จะมีการถ่ายเทความร้อนได้ 2 วิธีด้วยกันที่ใช้ในการนี้ศึกษาครั้งนี้คือ

2.3.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (convection)

เป็นการถ่ายเทความร้อนจากที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยการเคลื่อนที่ของตัวกลางโดยมีสมการคือ

$$q = hA(T_s - T_f) \quad (4)$$

โดยที่

- q = อัตราความร้อนที่ถ่ายเท (W)
- h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot K^\circ$)
- A = พื้นที่ผิว (m^2)
- T_s = อุณหภูมิที่ผิว (K°)
- T_f = อุณหภูมิของไหล (K°)

2.3.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (Conduction)

เป็นการถ่ายเทความร้อนจากที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยความร้อนจะเคลื่อนที่ไปตามเนื้อวัสดุ แต่ตัวกลางการนำความร้อนไม่เกิดการเคลื่อนที่ โดยมีสมการที่นำมาหาค่าการถ่ายเทความร้อน คือ

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

โดยที่

- q = อัตราความร้อนที่ถ่ายเท (W)
- k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m \cdot K^\circ$)
- A = พื้นที่หน้าตัด (m^2)
- $\frac{dT}{dx}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (K°)

2.4 ครีระบายความร้อน (Fin)

ทำหน้าที่ระบายความร้อนโดยการเพิ่มพื้นที่ผิวของอุปกรณ์เพื่อระบายความร้อนและรักษาประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ซึ่งเหมาะสมอย่างมากในงานวิศวกรรมด้านความร้อน โดยมี สมการดังนี้

$$q_{\text{conv}} = hA_o(T_b - T_\infty) \quad (6)$$

- | | | | | |
|-------|------------|-----|--|------------|
| เมื่อ | A_o | คือ | พื้นที่ผิวทั้งหมดที่ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อน | m^2 |
| | h | คือ | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวความร้อนและของไหล | w/m^2k |
| | T_b | คือ | อุณหภูมิที่ฐานครี ระบายความร้อน | $^\circ C$ |
| | T_∞ | คือ | อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม | $^\circ C$ |

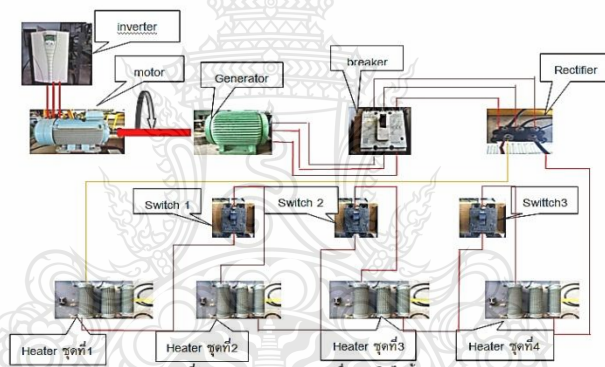
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินการวิจัย ได้ทำการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 5 kW เพื่อหาผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อผลิตกระแสไฟฟ้าที่กำลังสูงสุดคือ 5 kW โดยใช้โหลดความต้านทานทางความร้อน 20 โอห์ม ที่กระแสไฟฟ้า 16 แอมแปร์จากสมการที่ 7

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{5000}{20}} = 16 \text{ Amp}$$

(7)

ซึ่งในการต่อวงจรเพื่อนำมาเป็นโหลดทางไฟฟ้าผู้วิจัยได้ใช้ชุดความต้านทานความร้อนเพื่อเป็นภาระโหลดความต้านทานในการดำเนินการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า โดยจะต่อแยกความต้านทานในแต่ละชุดโดยใช้สวิตช์ควบคุมในแต่ละชุด ซึ่งแบ่งเป็น 4 ชุด โดยแต่ละชุดจะมีความต้านทาน 5 โอห์ม จึงเลือกใช้การต่อแบบอนุกรมกัน 4 ชุด เพื่อจะได้ความต้านทานรวม 20 โอห์ม



รูปที่ 2 การต่อวงจรชุดทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 5 kW

วิธีการทดสอบ

- 1 ในการทดสอบนั้นขั้นตอนแรกกำหนดให้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ควบคุมรอบของมอเตอร์ให้มีความเร็วเท่ากับ 350 rpm
- 2 ขั้นตอนที่ 2 เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 350 rpm มอเตอร์จะส่งกำลังงานกลเพื่อขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องกำเนิดจะหมุนด้วยความเร็ว 350 rpm ทำให้แม่เหล็กที่อยู่ในโรเตอร์หมุนตัดผ่านขดลวด เครื่องกำเนิดจะผลิตพลังงานออกมา 5 kW ที่อุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส กระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ผ่านไปยังตัวแปลงกระแสไฟฟ้า (Rectifier) ทำหน้าที่แปลงวงจรไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้เหมาะสมกับภาระโหลดทางความร้อน

- 3 ขั้นตอนเปิดสวิตช์ค่าความต้านทานทุกตัว เพื่อให้กระแสไฟฟ้าในวงจรไหลเกิน 16 แอมแปร์ซึ่งถ้าหากกระแสไฟฟ้าไหลเกินจะทำให้ขดลวดทองแดงภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขาดหรือเกิดความเสียหายได้
- 4 ขั้นตอนทำการวัดค่ากระแสไฟที่ผลิตได้จาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้เครื่องมือวัดค่าพลังงาน (Power Meter) โดยค่าทางไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อนำมาวิเคราะห์คือ (Volt AC,DC),(Amp AC,DC),และ(kW)
- 5 ขั้นตอนเริ่มทำการวัดและบันทึกค่าต่างๆ ที่ต้องการนำมาวิเคราะห์ คือ อุณหภูมิที่ตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยตรงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (V_{AC} ,3 ϕ) ความต่างศักย์ไฟฟ้าหลังจากแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC} , 1 ϕ)
- 6 ขั้นตอนสุดท้ายนำผลการทดสอบ มาวิเคราะห์ค่าต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

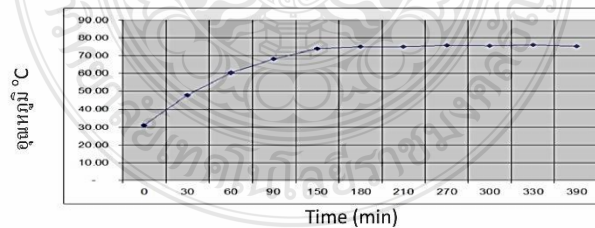
4. ผลการวิจัย

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 5 kW ด้วยชุดทดสอบทางความร้อน ได้บันทึกผลการทดสอบที่ความเร็วรอบ 350 rpm ตามช่วงเวลาที่ได้กำหนดไว้ จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 บันทึกผลการทดลอง

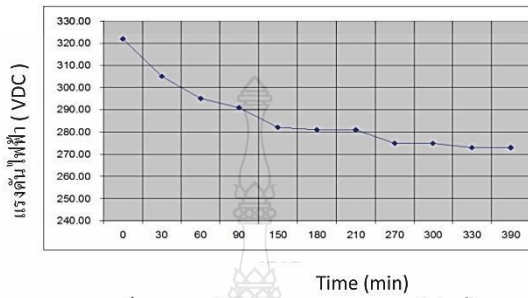
Time (min)	Temp. °C	Volt		Amp		P (kW)
		AC	DC	AC	DC	
0	31.00	238.00	322.00	12.50	15.35	5.00
30	48.00	227.00	305.00	11.63	14.31	4.40
60	60.40	220.00	295.00	11.20	13.80	4.10
90	68.00	215.00	291.00	10.90	13.57	3.90
150	74.00	210.00	282.00	10.70	13.20	3.60
180	75.00	209.00	281.00	10.60	12.90	3.60
210	75.00	208.00	281.00	10.50	12.90	3.60
270	78.00	208.00	275.00	10.50	12.60	3.45
300	75.50	206.00	275.00	10.40	12.60	3.45
330	76.20	204.00	273.00	10.30	12.39	3.40
390	75.30	204.00	273.00	10.30	12.59	3.40

และเมื่อนำผลการทดสอบมาเขียนกราฟจะได้ดัง พบว่าช่วงเวลาที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเวลาจะได้กราฟแสดงจนถึงเวลาที่อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะคงที่ ซึ่งช่วงเวลาที่เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคือช่วงเวลาประมาณ 0-150 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิจะคงที่โดยอัตราการการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะอยู่ที่ประมาณ 0.3 องศาเซลเซียสต่อนาทีดังแสดงใน รูปที่ 3

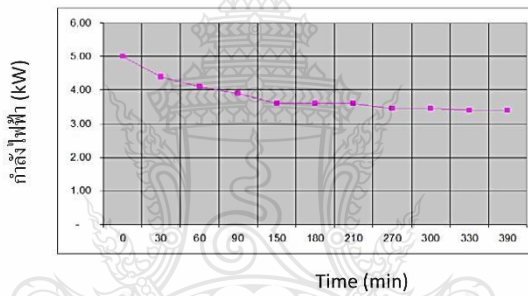


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ

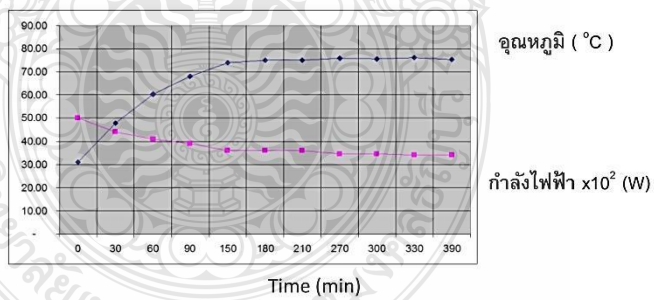
ในส่วนของคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อได้นำค่าต่างๆในการผลิตไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงแล้วนำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบได้แสดงในรูปที่ 4-6



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงเวลา

5. วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากตารางที่ 1 ได้บันทึกผลการทดสอบเพื่อนำมาเขียนกราฟแสดงดังในรูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการทดสอบที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากแม่เหล็กเมื่อวิ่งตัดผ่านขดลวดเมื่อมีภาระโหลดด้านจะทำให้เกิดความร้อนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นในการทดสอบ แรงดันไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเริ่มลดลงและจะค่อย ๆ คงที่ เป็นผลเกี่ยวเนื่องกันระหว่างอุณหภูมิกับประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและกำลังงานไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ โดยในระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นกำลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผลิตได้จะค่อย ๆ ลดลงเนื่องจากความร้อนภายในเครื่องกำเนิด รูปที่ 6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ในแต่ละช่วงเวลาซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าเมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กำลังงานที่เครื่องกำเนิดจะเริ่มลดลงและการผลิตพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะคงที่เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย 75 องศาเซลเซียส กำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเริ่มคงที่ ที่กำลังการผลิต 3.5 kw และตั้งแต่ 150 นาทีขึ้นไป เนื่องจากเป็นจุดสมดุลทางพลังงานที่ผลิตได้และการถ่ายเทความร้อนออกจากระบบจึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกระแสไฟฟ้าคงที่เพราะมีความสมดุลทางความร้อนระหว่างพลังงานที่ผลิตได้ต่อพลังงานที่ถ่ายเทออกจากระบบ

6. สรุปผล

จากผลการทดสอบหาประสิทธิภาพในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 kW พบว่าเมื่อทำการทดสอบโดยใช้ความเร็วรอบ 350 rpm ในการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ช่วงเวลากการทดสอบ 0-14 นาทีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีอุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียสและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าคงที่ได้ 5 kW ซึ่งในช่วงเวลานี้ยังไม่เกิดการสูญเสียพลังงานใดๆในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยในช่วงเวลากการทดสอบที่ 15-150 นาทีเป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยเฉลี่ย 0.3 องศาเซลเซียสทุกๆ 1 นาทีก่อนที่อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะคงที่ ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส จึงทำให้อัตราประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงเวลา 15-150 นาทีผลิตไฟฟ้าได้เฉลี่ย 4 kW ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผลิตจะลดลง 11 วัตต์ต่อนาทีหรือเกิดการสูญเสียประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเนื่องจากความร้อนในเครื่องกำเนิดลดลง 27% ของการผลิตไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเริ่มคงที่หลังจากการทดสอบผ่านไป 150 นาทีจนถึง 390 นาที ซึ่งอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะผลิตพลังงานออกมาได้ 3.5 kW โดยเฉลี่ยซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงเวลานี้ลดลงเฉลี่ย 1 วัตต์ต่อนาทีคิดเป็นการสูญเสียสูงสุด 30%

ดังนั้นในการหาประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าควรจะคำนึงถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเพราะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลง ดังนั้นในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าควรออกแบบให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบายความร้อนได้เร็วเพื่อประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานที่สมบูรณ์แบบ ซึ่งในการระบายความร้อนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องมีครีระบายความร้อน (Fin) เพื่อที่รักษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพในการผลิตพลังงาน ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร ชนิด 5 kW ควรจะอยู่ที่ 31 องศาเซลเซียส หรือไม่ควรมากกว่า 60 องศาเซลเซียสเพราะจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียประสิทธิภาพจากความร้อนมากเกินไป และจากการศึกษาทดลองในครั้งนี้สามารถนำข้อมูลการทดสอบมาปรับใช้กับการออกแบบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีรอบการทำงานต่ำและนำไปปรับใช้กับกังหันลมขนาดเล็กภายในประเทศต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินการวิจัยขอขอบพระคุณ บุคลากร เจ้าหน้าที่ อาคารวิจัยประยุกต์ พลังงานลม น้ำ และแสงอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานครั้งนี้ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้รับคำปรึกษาในเรื่องการดำเนินการวิจัย และจัดทำเป็นเอกสารเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิรัชย์ โรยรินทร์ รายงานการศึกษาวิจัยพัฒนา สาธิต ต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ มทร.ธัญบุรี(2551) เสนอ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- [2] นักัทร วังเทพินทร์,ประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ ทฤษฎี เครื่องกลทางไฟฟ้า 2 (เครื่องกลไฟฟ้า) ชิงโครนัส เครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รหัส 0421-1204,3104-2002 พิมพ์ครั้งที่ 1 มีนาคม 2554
- [3] YUNUS A CENGEL coniversity of nevada Heat Tranfer Publisher: Mcgraw-Hill (Tx); 2nd edition (November 1, 2002)



**การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ
พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6**

The 6th Thailand Renewable Energy for Community Conference

TREC-6

13-15 พฤศจิกายน 2556

ณ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

CP ไฟฟ้าชุมชน
CF เชื้อเพลิงชุมชน
CT ความร้อนชุมชน
EC การประหยัดพลังงาน
CE สิ่งแวดล้อมชุมชน



CP013

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพใบกังหันลมด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล
Comparison Efficiency Blade of Wind Turbine with a Computation Fluid Dynamics (CFD)

ชาคริต จินลอย , วิรัชย์ โยชนิธีร์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทร 0-2549-3497 โทรสาร 0-2549-3432 E-mail : chakrit_kyo@hotmail.com

บทคัดย่อ

รายงานการศึกษาวิจัยฉบับนี้ จัดทำเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของลักษณะใบกังหันลมในการผลิตพลังงาน ซึ่งกังหันลมที่นำมาวิเคราะห์มีกำลังการผลิตสูงสุด 50 kW ที่ความเร็วลม 10 m/s และเริ่มผลิตไฟฟ้า(Cut in)ที่ 2.5 m/s ในการวิเคราะห์นี้เน้นการหาประสิทธิภาพเปรียบเทียบของรูปแบบปลายใบ 2 แบบ คือ 1. ปลายใบที่ไม่มีแพนตัดอากาศ(Non Wing Tip) และ 2. มีแพนตัดอากาศ(Wing-Tip) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม CFDdesign V.10 มาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อหาค่าพลังงานที่ได้จากการนำใบกังหันลมทั้งสองแบบมาจำลองการทำงานโดยใช้ข้อมูลโมเดลที่สร้างขึ้นสำหรับแบบจำลองของโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล โดยมีข้อกำหนดความเร็วลมขาเข้าที่ 5 m/s มีอัตราส่วนความเร็วปลายใบ(X)= 6 ให้รอบการทำงานสูงสุดอยู่ที่ 32 RPM ส่วนค่าตัวแปรและเงื่อนไขการทำงานอื่นๆที่กำหนดลงในโปรแกรม CFDdesign V.10 กำหนดค่าเหมือนกันทั้งสองแบบ

จากการจำลองด้วยโปรแกรม พบว่าประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลม (Cp) ที่ไม่มีปลายใบ จะอยู่ที่ 0.24 และกังหันลมที่มีปลายใบ (Wing-Tip) จะมีค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 0.28 ซึ่งคิดเป็นความแตกต่างทางด้านประสิทธิภาพ 16.66 % จากการศึกษาเบื้องต้นด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลนี้สามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อใช้ในการสร้างต้นแบบจริงของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้ต่อไป

คำสำคัญ : กังหันลม, Wing-Tip, CFD

1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันพลังงานทดแทนเช่นพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะเป็นพลังงานที่สะอาดและไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และยังสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่สิ้นวันหมด ซึ่งพลังงานลมก็เป็นอีกหนึ่งพลังงานทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตไฟฟ้า เพราะกังหันลมที่ผลิตไฟฟ้านั้นสามารถทำงานได้ตลอดเวลา ในพื้นที่ซึ่งมีศักยภาพดีและใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเมกะวัตต์ของการติดตั้งโรงไฟฟ้าเทียบกับโรงไฟฟ้าชนิดอื่น แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาที่จะทำได้มาซึ่งกังหันลมที่ดีและใช้กับความเร็วลมต่ำในปัจจุบันยังต้องมีการพัฒนาเพื่อให้สามารถทำงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มองเห็นจุดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกังหันลม จึงได้มีแนวคิดที่จะทำการออกแบบและวิเคราะห์ส่วนของปลายใบกังหันลมโดยการเพิ่ม Wing-Tip ในบริเวณปลายใบกังหันลม เพื่อลดการการปั่นป่วนของอากาศบริเวณปลายใบกังหัน(Vertex) ในขณะที่กังหันลมทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆเพื่อเป็นการนำไปสู่การออกแบบใบกังหันที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่ำต่อไป

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษาวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์

2.1.1 เพื่อต้องการลดขั้นตอนและเวลาในการสร้างใบกังหันลมต้นแบบโดยใช้โปรแกรมทางCFDเข้ามาช่วยวิเคราะห์

2.1.2 เพื่อศึกษาค่าความแตกต่างระหว่างรูปแบบปลายใบกังหันลมทั้งสองแบบ

2.1.3 เพื่อนำข้อสรุปเป็นข้อมูลในการออกแบบกังหันลมขนาด 50 kW ให้มีประสิทธิภาพที่ดี

2.2 ขอบเขตและขั้นตอนการศึกษาวิจัย

2.2.1 ทำการสร้างแบบใบกังหันลมที่ทำการเปรียบเทียบโปรไฟล์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.2.2 ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองทางพลศาสตร์ของไหล

2.2.3 ทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพระหว่างกังหันลมที่มีแพนตัดอากาศและไม่มีแพนตัดอากาศจาก

ผลเฉลย

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีของพลังงานลม

พลังงานลมนั้นเป็นพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ เป็นการถ่ายเทพลังงานของอากาศโดยการเคลื่อนที่ที่ต่อเนื่องกัน วิเคราะห์โดยใช้หลักการทางทฤษฎีโมเมนตัม

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3 \eta \quad (1)$$

โดยที่

P_w = กำลังงานที่ได้จากกังหันลม (watt)

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ @ 25°C (1.225 kg/m³)

A = พื้นที่กวาดของใบพัด (m²)

V_∞ = ความเร็วลมเข้าใบพัด (m/s)

η = ค่าประสิทธิภาพของกังหันลม

3.2 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio)

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (TSR, X) คือค่าอัตราส่วนของความเร็วลมต่อความเร็วปลายใบ มีค่าความแตกต่างกันตามความเร็วลมและลักษณะของกังหัน เป็นค่าที่จะต้องทราบเพื่อนำไปคำนวณในการออกแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีค่า X = 6 แล้วนำค่าที่กำหนดไปคำนวณหาความเร็วรอบ (N) ได้จากสมการดังนี้

$$X = \frac{R\omega}{V} \quad (2)$$

$$N = \frac{X \times 60 \times V}{R \times 2 \times \pi} \quad (3)$$

$$N = 32 \text{ rpm}$$

โดยที่

X = อัตราส่วนความเร็วลมต่อความเร็วปลายใบ มีค่าที่กำหนดคือ 6 เท่า

R = รัศมีใบกังหัน

N = ความเร็วรอบกังหันลม (rpm)

V = ความเร็วลม (m/s)

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลมนั้นเรียกว่าค่า C_p (Power Coefficient) โดยจะได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกำลังงานที่ได้จากกังหันลมได้รับเอาไว้ หรือกำลังงานที่กังหันลมผลิตได้ P_w (Power Wind Turbine) เปรียบเทียบกับกำลังงานจากลมที่สมควรจะได้จริงจากลมที่มีการไหลอิสระ P_a (Power Air)

$$C_p = \frac{P_w}{P_a} = \frac{P_w}{\frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3} \quad (4)$$

โดยที่

C_p = สัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลม

P_w = กำลังงานจากกังหันลม (watt)

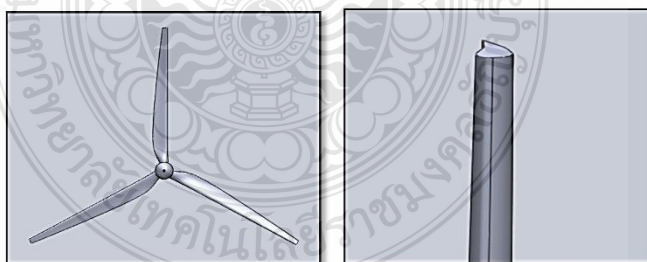
P_a = กำลังงานจากลม (watt)

จากสมการที่ (2) จะทราบได้ว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลม ซึ่งเราเรียกว่า $C_{p_{max}}$ นั้นจะมีค่าไม่เกิน 0.5926 หรือประมาณไม่เกิน 60% ของพลังงานลมที่เข้าปะทะกังหัน 100% (คิดจากความไวตรงรอบการหมุน)

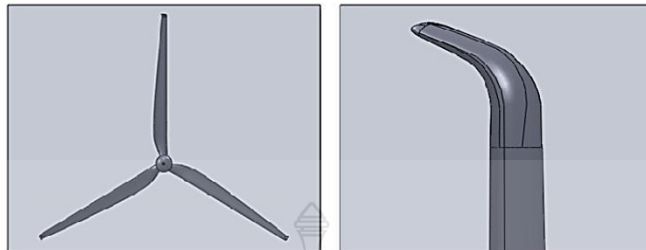
4. วิธีการดำเนินงาน

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบใบกังหันลมจำนวน 2 แบบ โดยใบกังหันลมที่ทดสอบเป็นรูปแบบที่ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 50 kW มีความยาวใบ 9 เมตร ดังรายละเอียดประกอบต่างๆในหัวข้อต่อไป

4.1 แบบจำลองกังหันลมทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 1 ใบกังหันลมที่ไม่มี Wing-Tip

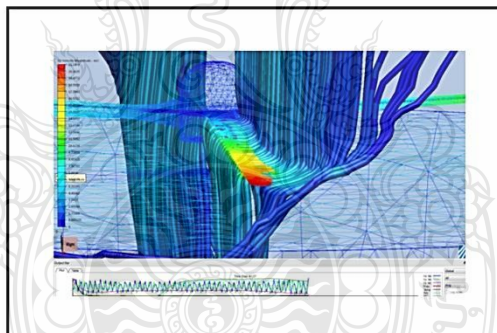


รูปที่ 2 ใบกังหันลมที่มีการติดตั้ง Wing-Tip

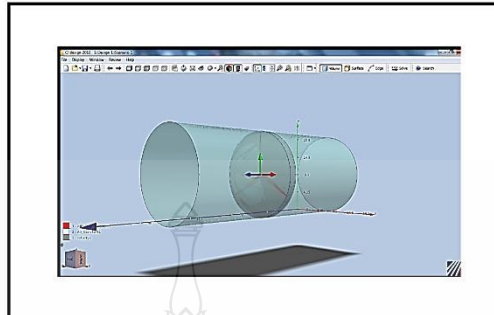
4.2 การจำลองการทำงานของกังหันลมด้วยโปรแกรม CFdesign V.10

ในการวิเคราะห์กังหันลมเบื้องต้น ได้ออกแบบลักษณะปลายใบของกังหันลมเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและนำมาประมวลผลในโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล โดยกำหนดตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการจำลองสภาวะการทำงานของกังหันลม ได้ดังนี้

- 4.2.1 เขียนแบบจำลองกังหันลมด้วยโปรแกรม Solid Work ดังในรูปที่ 1 และ รูปที่ 2
- 4.2.2 นำแบบจำลองมาทดสอบในโปรแกรม CFdesign V.10
- 4.2.3 กำหนดค่าความเร็วลมที่ 5 เมตรต่อวินาที
- 4.2.4 กำหนดค่าต่างๆที่เหมาะสมในการประมวลผลของโปรแกรม



รูปที่ 3 การใช้โปรแกรม CFdesign มาใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ 4 การวิเคราะห์การตัดอากาศของใบกังหันลมที่ความเร็วลม 5 m/s

4.3 ผลวิเคราะห์การทำงานด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล(CFD)

ผลการวิเคราะห์ของกังหันลมที่มีปลายใบแตกต่างกันทั้งสองลักษณะ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลการคำนวณจากการจำลองการทำงานของกังหันลมที่มีปลายใบตัดอากาศและไม่มีการตัดอากาศ จากการวิเคราะห์ที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกันทำให้ทราบค่าแรงบิดที่ติดลบมากที่สุด กล่าวคือเป็นการผลิตงานทางกลได้มากที่สุดจากการประมวลผลของโปรแกรม ดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 กังหันลมที่ไม่มี Wing-Tip

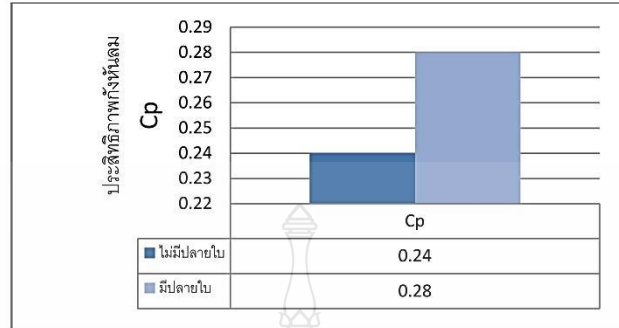
Velocity (m/s)	RPM	TSR	Torque.	CP
5	32	6	-1431	0.24

จากตารางที่ 1 กำหนดความเร็วลมขาเข้า 5 เมตรต่อวินาที กำหนดรอบการทำงาน 32 รอบต่อวินาที ใบกังหันลมสามารถหมุนขณะความเร็วลมได้ถึง 6 เท่า (TSR) ให้ค่าพลังงานที่สามารถดึงมาใช้ในความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาทีได้ Torque -1431 นิวตันเมตร ค่าประสิทธิภาพของกังหันลมที่ไม่มี Wing-Tip ทำได้ อยู่ที่ 0.24 (Cp)

ตารางที่ 2 กังหันลมที่มี Wing-Tip

Velocity (m/s)	RPM	TSR	Torque	CP
5	32	6	-1700	0.28

จากตารางที่ 2 กำหนดความเร็วลมขาเข้า 5 เมตรต่อวินาที และกำหนดรอบการทำงาน 32 รอบต่อวินาที ใบกังหันลมสามารถหมุนขณะความเร็วลมได้ถึง 6 เท่า (TSR) ให้ค่าพลังงานที่สามารถดึงมาใช้ในความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาทีได้ Torque -1700 นิวตันเมตร ค่าประสิทธิภาพของกังหันลมที่มี Wing-Tip ทำได้ อยู่ที่ 0.28 (Cp)



รูปที่ 5 ค่าประสิทธิภาพของกังหันลมทั้ง 2 แบบ

จากรูปที่ 5 อธิบายถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพระหว่างกังหันลมที่ไม่มี Wing-Tip และ กังหันลมที่มี Wing-Tip เพื่อช่วยในการหมุนตัดอากาศบริเวณปลายใบกังหันลม

5. สรุปผลวิจัย

จากการวิจัยโดยการจำลองการทำงานของกังหันลมขนาด 50 กิโลวัตต์ มีความยาวใบ 9 เมตร ด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์การไหล CFDesign V.10 กำหนดค่าความเร็วลมคงที่ในการทดสอบ 5 เมตรต่อวินาที กำหนดค่าความเร็วปลายใบต่อความเร็วลม (tip speed ratio, X) อยู่ที่ 6 เท่า ได้รับความหมุนของกังหันลมอยู่ที่ 32 รอบต่อนาที ทำการคำนวณในโปรแกรมด้วยค่าพารามิเตอร์เท่ากัน แตกต่างกันตรงรูปแบบปลายใบกังหันที่ทำการออกแบบ

จากการศึกษาเปรียบเทียบพบว่า กังหันลมแบบที่มีปลายใบตัดอากาศสามารถให้ค่าพลังงานออกมา มากกว่า กังหันลมที่ไม่มีปลายใบ ประมาณ 16.66% ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงลักษณะการออกแบบปลายใบที่มีผลต่อการผลิตพลังงานของกังหันลม ซึ่งอาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่ในปัจจุบันใบกังหันลมยุคใหม่จะมีตัวตัดอากาศที่ปลายใบ ถึงแม้จะมีความยุ่งยากในการผลิตและมีต้นทุนที่สูงกว่าแต่สามารถรับพลังงานจากลมมาผลิตพลังงานได้มากกว่า ดังนั้นข้อมูลจากการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบนี้จะได้นำมาใช้ประกอบในการออกแบบใบกังหันเพื่อสร้างต้นแบบกังหันลมที่มีประสิทธิภาพต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิรัชย์ โยชนรินทร์ “ต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ” ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2551
- [2] สว่าง ซาดิทอง “ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพรอบการทำงานสูงสุดของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 พ.ศ. 2554
- [3] Myong Hwan Sohn, “Visualization and PIV study of wing-tip vortices for three different tip Configurations” Aerospace Science and Technology 16, pp. 40–46, (2012).
- [4] Guido Huppertz, Ehab Fares, Ronald Abstiens, “Investigation of engine jet/wing-tip vortex interference Untersuchung der Interaktion von Flügelrandwirbel und Triebwerksstrahl,” Aerospace Science and Technology 8, pp. 175–183, (2004).

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชาคริต จินลอย
วัน เดือน ปีเกิด	10 เมษายน 2531
ที่อยู่	204 หมู่ 6 ตำบลนาท่อม อำเภอเมือง จังหวัดพัทลุง 93000
การศึกษา	
พ.ศ. 2552	สำเร็จการศึกษาหลักสูตร อดสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (อศ.บ.) สาขา เทคโนโลยีเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
โทรศัพท์	08-9656-1529
อีเมลล์	chakrit_kyo@hotmail.com

