

การเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนกังหันลมไทยแบบใบเสื่อดำแพน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2559

**EFFICIENCY ENHANCEMENT AND COST
REDUCTION OF THAI SAIL-WINDMILL**



Teerawat Klabklay

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2016

การเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนกังหันลมไทยแบบใบเลื่อยลำแพน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุุณบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.กীরดี สุลักษณ์)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.ทวิช จิตรสมบุรณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.ชโลธร ธรรมแท้)

กรรมการ



(ผศ. ดร.ภาณุ ประทุมทรัพย์)

กรรมการ



(อ. ดร.ชนินทร์ ตรงจิตักดี)

กรรมการ



(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธีรวัฒน์ คล้ายคล้าย : การเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนกังหันลมไทยแบบใบเลื่อยลำแพน
(EFFICIENCY ENHANCEMENT AND COST REDUCTION OF THAI SAIL-
WINDMILL) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์, 227 หน้า

กังหันลมไทยแบบใบเลื่อยลำแพน (Thai sail-windmill, TSW) นับหมื่นตัวเคยถูกใช้เป็นเวลานับพันปีเพื่อใช้สูบน้ำในการทำเกษตร ใบกังหันเมื่อปะทะลมจะมีลักษณะโค้งที่ด้านหลังใบ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดแรงยก (Lift force) แล้วแตกแรงออกไปในแนวนอนเพื่อให้เกิดเป็นแรงบิดซึ่งถือเป็นเทคโนโลยีโบราณที่ยอดเยี่ยมมาก กังหันลมนี้นี้มีประสิทธิภาพสูงพอสมควรโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10-17% ซึ่งนับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันยังไม่มีการวิจัยและการพัฒนาต่อยอดกังหันลมไทยแบบใบเลื่อยลำแพนมากนัก ทำให้กังหันลมที่เคยใช้อยู่ในอดีตเกือบทั้งหมดถูกแทนที่ด้วยเครื่องยนต์และปั๊มน้ำจากต่างประเทศ เหตุเพราะว่ากังหันลมไทยแบบใบเลื่อยลำแพนยังคงมีประสิทธิภาพต่ำและราคาแพง ปัจจุบัน (พ.ศ. 2559) พบการใช้กังหันลมไทยแบบใบเลื่อยลำแพนน้อยมากเฉพาะในจังหวัดสมุทรสงครามเท่านั้น โดยใช้สูบน้ำทำนาเกลือ แม้กังหันลมไทยแบบใบเลื่อยลำแพนจะมีจุดอ่อนดังที่กล่าวแต่ก็มีข้อดีหลายอย่าง เช่น ให้พลังงานสะอาด ไม่ก่อมลพิษทางเสียง ไม่เสี่ยงต่อการถูกลักขโมย และที่สำคัญคือมีความสวยงามและอนุรักษ์วัฒนธรรมดั้งเดิม ถ้าหากมีการวิจัยและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีราคาถูกลงอาจเกิดความนิยมได้อีกครั้ง ซึ่งยังอาจเกิดเป็นแหล่งท่องเที่ยวได้อีกทางหนึ่งด้วย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกังหันลมไทยแบบใบเลื่อยลำแพนพร้อมกับหาแนวทางการลดราคาติดตั้งไปพร้อมกัน วิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) ทฤษฎี Blade element momentum (BEM) และการทดลอง (Experiment) ผลงานวิจัยพบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพจากเดิมประมาณ 10-17% เป็น 35% นอกจากนี้ยังได้ทำการเปลี่ยนตำแหน่งการวางตัวของโรเตอร์จากเดิมแบบ Upwind ให้เป็นแบบ Downwind (ซึ่งเป็น Passive yaw control) พบว่าประสิทธิภาพลดลงเพียงเล็กน้อยแต่ราคาการติดตั้งลดลงได้มาก

TEERAWAT KLABKLAY : EFFICIENCY ENHANCEMENT AND COST
REDUCTION OF THAI SAIL-WINDMILL. THESIS ADVISOR : ASSOC.
PROF. TAWIT CHITSOMBOON, Ph.D., 227 PP.

THAI SAIL-WINDMILL/ EFFICIENCY ENHANCEMENT/ COST REDUCTION/
TOW TESTING/ CFD AND BEM ANALYSIS

Tens of thousands of Thai sail-windmills (TSW) were once widely used for pumping water for agricultural purposes in Thailand. The blades of TSW are curved towards the downwind direction. These curves are important which can produce lift force and transform it to torque later. The TSW-blade using canvas is a very good technique, which can make lift force and torque very simply and cheaply. Unfortunately the average efficiency of the original TSW had been only about 10-17%. From the past until now, there have been only a few research and development for TSW so that they are still very less competitive and have been now replaced by imported small pumping diesel power plant. For now (2016 AD.) only a few TSW survive in Thailand which are used on salt farm fields only in the Samut Songkhram Province. However, TSW still has some advantages such as giving clean energy, no noise pollution, no risk of being stolen, and they are culturally beautiful. If we could do research and development to enhance its efficiency and reduce the cost, it may come back again which does not only get a cheap and clean energy, but also it may become a new tourist attraction. The objectives of this research were to enhance the efficiency of TSW by various means namely: Computational fluid dynamics (CFD), Blade element momentum theory (BEM) and experiment. After along theoretical, numerical and experimental analyses, we found ways to increase

TSW efficiency from about 17% to about 35%. Furthermore, we changed the TSW rotor orientation from the upwind type to the downwind type (passive yaw control). It was found that the efficiency of the downwind type was slightly less than the upwind type but the cost of construction could be reduced significantly.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลือในด้านวิชาการและด้านอื่น ๆ จากบุคคลดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้ความรู้ด้านวิชาการอย่างลึกซึ้ง รวมถึงให้คำสั่งสอนในการเป็นนักศึกษาปริญญาเอกที่ดี อีกทั้งยังให้ความช่วยเหลือในด้านทุนทรัพย์เป็นอย่างมาก จนประสบความสำเร็จด้วยดี จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

อาจารย์ ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาช่วงขณะที่ผู้วิจัยกำลังศึกษาในระดับปริญญาโท เป็นผู้คอยชี้แนะแนวทางการเรียนปริญญาเอกให้ประสบความสำเร็จพร้อมให้แนวคิดและกำลังใจอยู่เสมอ จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ดร.วิกันดา ศรีเดช คุณจ้าววรรณ ตั้งต้นสกุลวงศ์ คุณชัยฤกษ์ เชื้อประสาธ คุณวิโรจน์ แบบพิมาย คุณกัมพล อรนนท์ คุณสุนทร โอบสูงาม คุณเฉลิมไชย ไชยธรรตน์ และคุณนที ฐานมัน ผู้เป็นเพื่อน-พี่-น้อง ที่เคยร่วมเรียนในระดับบัณฑิตศึกษาศาखाวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านวิชาการและเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัย และให้กำลังใจมาโดยตลอด

คุณประพนธ์ เทศปัญ เกษตรกรชาวนาเกลือ อ.เมือง จ.สมุทรสาคร เจ้าของพื้นที่นาเกลือ ผู้ให้ความรู้และให้ความอนุเคราะห์ในการสำรวจการใช้งานกังหันลมเกลือลำแพน ณ สถานที่จริง

คุณวัชรกุล ชัยทวีพรสุข คุณเกียรติศักดิ์ พานสายตา คุณสุกัญฐ์ เรือนทิพย์ คุณบุรฉกร ขุรายี คุณภูษิต คำน้อย และคุณสมจิต ไกยสวน ผู้เป็นกลุ่มนักศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คอยเป็นผู้ช่วยในการทดสอบกังหันลมจนประสบความสำเร็จด้วยดี

คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอัครวิทยา และคุณจิรายภรณ์ ศรีวิไลลักษณ์ เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไปสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ช่วยอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับงานเอกสารมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อวสันต์ คลับคล้าย คุณแม่ลำเพย แก้วไพโร ผู้เป็นบิดาและมารดา เป็นผู้มีพระคุณหาที่เปรียบไม่ได้ ตลอดจนครูอาจารย์ที่ให้ความรู้ตั้งแต่เล็กจนเติบโตใหญ่ คุณงามความดีทั้งหมดของวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงขออุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่กล่าวมา

ธีรวัฒน์ คลับคล้าย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ค
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2 ทัศนั้วรรณกรรม.....	7
2.1 ข้อมูลพื้นฐานกังหันลมเสือลำแพน.....	7
2.2 วิธีการทดสอบกังหันลม.....	9
2.3 การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานกังหันลม.....	13
2.4 การศึกษากังหันลมเชิงทฤษฎี.....	19
2.5 การประเมินสถิติลม.....	24
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	26
3.1 ประสิทธิภาพพลังงานกังหันลม.....	26
3.2 ทฤษฎี Blade element momentum (BEM).....	27
3.3 การปรับปรุงทฤษฎี BEM.....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD).....	34
3.5	การคำนวณงานรายปี.....	35
3.6	การคำนวณต้นทุนพลังงาน.....	36
4	การประเมินค่า C_l และ C_d ใบกังหันลมเสื่อลำแพนด้วย CFD.....	37
4.1	กล่าวนำ.....	37
4.2	ใบกังหันลมเสื่อลำแพน.....	38
4.3	การสร้างกริดและการคำนวณด้วย CFD.....	41
4.4	แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST.....	43
4.5	การสอบเทียบ CFD.....	45
4.6	ผลการคำนวณ C_l และ C_d ใบกังหันลมเสื่อลำแพนด้วย CFD.....	47
4.7	อภิปรายผล.....	56
4.8	สรุปผลการประเมินค่า C_l และ C_d ใบกังหันลมเสื่อลำแพนด้วย CFD.....	59
5	โปรแกรม BEM สำหรับกังหันลมเสื่อลำแพน.....	60
5.1	กล่าวนำ.....	60
5.2	การสอบเทียบโปรแกรม BEM.....	61
5.3	ข้อมูลใบกังหันลมเสื่อลำแพน.....	64
5.4	โปรแกรม BEM สำหรับกังหันลมเสื่อลำแพน.....	67
5.5	ผลการประเมินประสิทธิภาพพลังงานด้วยทฤษฎี BEM.....	67
5.6	อภิปรายผล.....	70
5.7	สรุปผลการประเมินประสิทธิภาพพลังงาน ด้วยทฤษฎี BEM.....	72
6	หุ่นจำลองและวิธีการทดลอง.....	73
6.1	หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม.....	73
6.2	หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่.....	76
6.3	วิธีการทดลอง.....	86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7 การเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุน.....	98
7.1 กังหันลมแบบ Upwind และ Downwind.....	98
7.2 การติดตั้ง Hub-fairing.....	101
7.3 มุมพิชท์ที่ดีที่สุด.....	102
7.4 ความดันใบที่ดีที่สุด.....	107
7.5 การปิดปลายใบ (Closed tip).....	113
7.6 เปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี BEM.....	116
7.7 สรุปผลการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพ และลดต้นทุน.....	121
8 การประเมินงานรายปี.....	122
8.1 กล่าวนำ.....	122
8.2 การวิเคราะห์สถิติลมแบบความเร็วลมยกกำลังหนึ่ง.....	123
8.3 การวิเคราะห์สถิติลมแบบความเร็วลมยกกำลังสาม.....	125
8.4 การประเมินงานรายปี.....	126
8.5 ผลการประเมินงานรายปี.....	128
8.6 อภิปรายและสรุปผลการประเมินงานรายปี.....	154
9 การประเมินเศรษฐศาสตร์กังหันลมเบื้องต้น.....	156
9.1 กล่าวนำ.....	156
9.2 งานรายปีกังหันลมเมื่อลำแพนขนาดจริง.....	156
9.3 ราคาการประกอบติดตั้งกังหันลม.....	161
9.4 ต้นทุนพลังงาน (Cost of energy)	163
10 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	165
10.1 กล่าวนำ.....	165
10.2 สรุปผลการวิจัย.....	165
10.3 ข้อเสนอแนะ.....	166
รายการอ้างอิง.....	167

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ข้อมูลการวัด.....	172
ภาคผนวก ข. ผลการคำนวณ C_l และ C_d ใบกังหันลมสี่ลำแพน ด้วย CFD.....	199
ภาคผนวก ค. Code ของโปรแกรม BEM เขียนด้วยโปรแกรม Matlab.....	213
ประวัติผู้เขียน.....	227



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์รูปร่าง (k) และพารามิเตอร์สเกล (c) ของจังหวัดนครราชสีมาและปราจีนบุรี.....	25
4.1 หน้าตัดใบหุ้มจำลองกังหันลมเสื่อลำแพน.....	39
5.1 ข้อมูลกังหันลม NREL Phase VI.....	61
5.2 ข้อมูลใบกังหันลมเสื่อลำแพนแบบ 6 ใบ.....	65
5.3 ข้อมูลใบกังหันลมเสื่อลำแพนแบบ 4 ใบ.....	65
8.1 คำนวณค่า k และค่า c	124
8.2 W_P และ AEP ของ Upwind-TSW จังหวัดนครราชสีมา.....	131
8.3 W_P และ AEP ของ Upwind-TSW จังหวัดปราจีนบุรี.....	134
8.4 W_P และ AEP ของ Downwind-TSW แบบ 6 ใบ จังหวัดนครราชสีมา.....	137
8.5 W_P และ AEP ของ Downwind-TSW แบบ 4 ใบ จังหวัดนครราชสีมา.....	140
8.6 W_P และ AEP ของ Downwind-TSW แบบ 6 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี.....	143
8.7 W_P และ AEP ของ Downwind-TSW แบบ 4 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี.....	146
8.8 W_P และ AEP ของ Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ จังหวัดนครราชสีมา.....	148
8.9 W_P และ AEP ของ Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ จังหวัดนครราชสีมา.....	150
8.10 W_P และ AEP ของ Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี.....	152
8.11 W_P และ AEP ของ Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี.....	154

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
9.1 W_p และ AEP ของ CTSW และ NTSW จังหวัดนครราชสีมา.....	158
9.2 W_p และ AEP ของ CTSW และ NTSW จังหวัดปราจีนบุรี.....	160
9.3 คุณลักษณะกัณฑ์ลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิมและแบบใหม่.....	161
9.4 ราคาวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งกัณฑ์ลมเสื่อลำแพน แบบดั้งเดิม (CTSW).....	162
9.5 ราคาวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งกัณฑ์ลมเสื่อลำแพน แบบใหม่ (NTSW).....	162
9.6 ต้นทุนพลังงานกัณฑ์ลมเสื่อลำแพน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 เมตร.....	164
ก.1 Upwind-TSW แบบ 6 ใบ ที่ความดันใบ 28% และมุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$	173
ก.2 Upwind-TSW แบบ 6 ใบ ที่ความดันใบ 28% และมุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$	173
ก.3 Upwind-TSW แบบ 6 ใบ ที่ความดันใบ 28% และมุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$	174
ก.4 Upwind-TSW แบบ 6 ใบ ที่ความดันใบ 28% และมุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$	174
ก.5 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ ทดสอบด้วยความเร็วลม 4.2 เมตร/วินาที.....	175
ก.6 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ ทดสอบด้วยความเร็วลม 4.2 เมตร/วินาที.....	176
ก.7 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$ ทดสอบด้วยความเร็วลม 4.2 เมตร/วินาที.....	176
ก.8 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ ทดสอบด้วยความเร็วลม 4.2 เมตร/วินาที.....	177

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.9 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ ทดสอบด้วยความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที.....	177
ก.10 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ ทดสอบด้วยความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที.....	178
ก.11 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$ ทดสอบด้วยความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที	179
ก.12 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ ทดสอบด้วยความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที.....	179
ก.13 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ ทดสอบด้วยความเร็วลม 7.0 เมตร/วินาที.....	180
ก.14 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ ทดสอบด้วยความเร็วลม 7.0 เมตร/วินาที.....	180
ก.15 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$ ทดสอบด้วยความเร็วลม 7.0 เมตร/วินาที.....	181
ก.16 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ ทดสอบด้วยความเร็วลม 7.0 เมตร/วินาที.....	181
ก.17 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$	182
ก.18 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$	182
ก.19 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$	183
ก.20 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$	183
ก.21 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$	184

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.22 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$	185
ก.23 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$	185
ก.24 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$	186
ก.25 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$	186
ก.26 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$	187
ก.27 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$	187
ก.28 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$	188
ก.29 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$	189
ก.30 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$	189
ก.31 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$	190
ก.32 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$	190
ก.33 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$	191

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.34 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$	191
ก.35 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$	191
ก.36 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$	192
ก.37 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$	193
ก.38 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$	193
ก.39 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$	194
ก.40 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$	194
ก.41 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$	195
ก.42 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$	195
ก.43 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$	196
ก.44 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ และปิดปลายใบ ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$	197
ก.45 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ และปิดปลายใบ ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$	197
ก.46 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ และปิดปลายใบ ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$	198
ก.47 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ และปิดปลายใบ ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$	198

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.1 คำสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ หน้าตัด A.....	200
ข.2 คำสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ หน้าตัด B.....	201
ข.3 คำสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ หน้าตัด C.....	203
ข.4 คำสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ หน้าตัด D.....	204
ข.5 คำสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ หน้าตัด E.....	205
ข.6 คำสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ หน้าตัด B.....	207
ข.7 คำสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ หน้าตัด C.....	208
ข.8 คำสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ หน้าตัด D.....	209
ข.9 คำสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ หน้าตัด E.....	211

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	กังหันลมไทยแบบไม้กระดาน..... 2
1.2	กังหันลมไทยแบบใบเสื่อลำแพน..... 2
1.3	การวางตัวของโรเตอร์..... 3
2.1	กังหันลมเสื่อลำแพน..... 8
2.2	กังหันลม Cretan..... 8
2.3	ส่วนประกอบของกังหันลมแบบใบเสื่อลำแพน..... 8
2.4	อุโมงค์ลม NASA Ames Research Center..... 10
2.5	การทดสอบกังหันลมแบบ Sailwing ด้วยวิธีการลากจูง ของมหาวิทยาลัยปารีส..... 11
2.6	ใบกังหันลมแบบดั้งเดิม (Original Bergy XL 1.0)..... 11
2.7	การทดสอบกังหันลมด้วยวิธีการลากจูงในงานวิจัยของ Song..... 12
2.8	การติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมแบบ Array บริเวณด้านหน้าของกังหันลม..... 13
2.9	ตำแหน่งการติดตั้งทิวฟินและเซนเซอร์บอดี..... 14
2.10	มุมมองด้านหน้าและด้านบนของการติดตั้งทิวฟิน..... 15
2.11	ผลการทดสอบทิวฟินลักษณะ A ที่จำนวน 9 ทิวฟิน 6 ทิวฟิน และ 3 ทิวฟิน..... 15
2.12	รูปแบบของ Hub-fairing..... 16
2.13	รูปแบบของ After body..... 16
2.14	ผลการทดสอบ Hub fairing แบบหยุดนิ่งและแบบหมุน โดยไม่มี After body..... 17
2.15	ผลการทดสอบ Hub fairing แบบหยุดนิ่งและแบบหมุน โดยติดตั้ง After body แบบ A1..... 17
2.16	ผลการทดสอบ Hub fairing แบบหยุดนิ่งและแบบหมุน โดยติดตั้ง After body แบบ A2..... 18

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17	กำลังงานกังหันลมที่ได้จากทฤษฎี BEM และการทดลอง..... 19
2.18	ผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงยกจากการคำนวณด้วย CFD กับการทดลอง 2 มิติ..... 21
2.19	ผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการคำนวณด้วย CFD กับการทดลอง 2 มิติ..... 21
2.20	ผลการสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_L) จาก CFD..... 22
2.21	ผลการสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) จาก CFD..... 22
2.22	สัมประสิทธิ์กำลัง (C_P) จากทฤษฎี BEM และการทดลองของ Monteiro et al. (2013)..... 23
2.23	ผลการทำนายค่าสัมประสิทธิ์กำลังกังหันลมด้วยทฤษฎี BEM..... 24
3.1	แผนภาพการเบรกเพลากังหัน..... 27
3.2	การไหลผ่าน Actuator disk แบบวงแหวน (Tubular Actuator disk)..... 28
3.3	การแบ่งเอลิเมนต์..... 29
3.4	ความเร็วและแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัด แผนอากาศของกังหันลม..... 30
3.5	สัมประสิทธิ์แรงผลักดันจากทฤษฎีและการทดลอง..... 34
4.1	ตำแหน่งการวัดข้อมูลใบกังหันลม..... 39
4.2	หน้าตัดใบหุ่นจำลองกังหันลมเพื่อสำเนา..... 40
4.3	กริดรูปแบบ C-Grid..... 42
4.4	Grid cells แบบสี่เหลี่ยม..... 42
4.5	ผลการสอบเทียบการประเมินแรงยกด้วย CFD ของแผนอากาศ NACA 4412..... 46
4.6	ผลการสอบเทียบการประเมินแรงต้านด้วย CFD ของแผนอากาศ NACA 4412..... 46
4.7	C_L , C_d และ C_L / C_d หน้าตัด A ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ..... 47
4.8	C_L , C_d และ C_L / C_d หน้าตัด B ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ..... 48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด C ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ..... 49
4.10	C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด D ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ..... 50
4.11	C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด E ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ..... 51
4.12	C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด B ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ..... 52
4.13	C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด C ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ..... 53
4.14	C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด D ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ..... 54
4.15	C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด E ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ..... 55
4.16	เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านใบกังหันหน้าตัด B ที่มุมปะทะ (α) 0 องศา..... 56
4.17	เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านใบกังหันหน้าตัด B ที่มุมปะทะ (α) 10 องศา..... 57
4.18	เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านใบกังหันหน้าตัด B ที่มุมปะทะ (α) 15 องศา..... 57
4.19	เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านใบกังหันหน้าตัด B ที่มุมปะทะ (α) 30 องศา..... 58
4.20	เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านใบกังหันหน้าตัด B ที่มุมปะทะ (α) 45 องศา..... 58
4.21	เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านใบกังหันหน้าตัด B ที่มุมปะทะ (α) 60 องศา..... 59
5.1	ความยาวคอर्डของใบกังหันลม NREL Phase VI..... 62
5.2	การบิดใบของใบกังหันลม NREL Phase VI..... 62
5.3	สัมประสิทธิ์แรงยกของแพนอากาศ S809..... 63
5.4	สัมประสิทธิ์แรงต้านของแพนอากาศ S809..... 63
5.5	ผลการสอบเทียบโปรแกรม BEM กับผลการทดลอง กังหันลม NREL Phase VI..... 64
5.6	มุมพิชใบกังหันลมสี่ลำแพนขนาด 1 เมตร แบบ 6 ใบ..... 66
5.7	มุมพิชใบกังหันลมสี่ลำแพนขนาด 1 เมตร แบบ 4 ใบ..... 66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 ผลการประเมิน C_P หุ่นจำลองแบบ 6 ใบ ด้วยทฤษฎี BEM จำลองที่ $U_0 = 4.2 \text{ m/s}$	67
5.9 ผลการประเมิน C_P หุ่นจำลองแบบ 6 ใบ ด้วยทฤษฎี BEM จำลองที่ $U_0 = 5.6 \text{ m/s}$	68
5.10 ผลการประเมิน C_P หุ่นจำลองแบบ 6 ใบ ด้วยทฤษฎี BEM จำลองที่ $U_0 = 7.0 \text{ m/s}$	68
5.11 ผลการประเมิน C_P หุ่นจำลองแบบ 4 ใบ ด้วยทฤษฎี BEM จำลองที่ $U_0 = 4.2 \text{ m/s}$	69
5.12 ผลการประเมิน C_P หุ่นจำลองแบบ 4 ใบ ด้วยทฤษฎี BEM จำลองที่ $U_0 = 5.6 \text{ m/s}$	69
5.13 ผลการประเมิน C_P หุ่นจำลองแบบ 4 ใบ ด้วยทฤษฎี BEM จำลองที่ $U_0 = 7.0 \text{ m/s}$	70
5.14 ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ความเร็วลมสัมพันธ์ ความเร็วรอบ มุมพิช และมุมปะทะ	71
6.1 กังหันลมสี่ลำแพนดั้งเดิมขนาดใหญ่	74
6.2 ระดัควัดน้ำ	74
6.3 หุ่นจำลองกังหันลมสี่ลำแพนแบบดั้งเดิม	75
6.4 การติดตั้งหุ่นจำลองกังหันลมสี่ลำแพนแบบดั้งเดิม	75
6.5 ลักษณะใบกังหันลมสี่ลำแพน	78
6.6 ความดันใบของโรเตอร์แบบ 6 ใบ	79
6.7 ความดันใบของโรเตอร์แบบ 4 ใบ	80
6.8 ความดันใบของโรเตอร์แบบ 3 ใบ	81
6.9 มุมพิชปลายใบ (β)	81
6.10 ภาพตัดขวางแพนอากาศแสดงความสัมพันธ์มุมพิช และมุมปะทะ	82
6.11 สัมประสิทธิ์ตัวคูณการสูญเสียปลายใบ	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.12	ปลายใบก้านลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม.....83
6.13	ใบก้านลมแบบปิดปลายใบของโรเตอร์แบบ 6 ใบ.....84
6.14	ใบก้านลมแบบปิดปลายใบของโรเตอร์แบบ 4 ใบ.....84
6.15	Hub-Fairing ที่ด้านหน้าโรเตอร์.....85
6.16	ก้านลมเสื่อลำแพนแบบ Downwind.....85
6.17	ระบบ Active และ passive yaw control..... 86
6.18	เครื่องวัดความเร็วลมชนิด Hot wire.....87
6.19	เครื่องวัดความเร็วลมชนิด Pitot static tube.....87
6.20	เครื่องวัดความเร็วลมชนิดใบพัด.....88
6.21	เครื่องวัดความเร็วลมชนิด Hot bulb.....88
6.22	ผลการสอบเทียบการวัดความเร็วลม ของอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ.....88
6.23	เครื่องวัดความเร็วลมแบบ Optical sensor.....89
6.24	จอแสดงผลความเร็วลมแบบดิจิทัล.....89
6.25	เครื่องมือวัดแรงบิด.....90
6.26	การทดสอบแบบ Variable speed.....91
6.27	การทดสอบแบบ Variable velocity.....91
6.28	ตำแหน่งติดตั้งหุ่นจำลองก้านลมแบบ Upwind และเครื่องมือวัด..... 92
6.29	ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดต่าง ๆ ของการทดสอบก้านลมแบบ Downwind..... 92
6.30	ถนนที่ใช้ในการทดลอง.....93
6.31	การควบคุมความเร็วของผู้ขับโดยมองจากแสดงผล..... 94
6.32	ข้อมูลการวัดตัวอย่างของความเร็วลมที่ควบคุมโดยผู้ขับรถ..... 94
6.33	ผลของความเร็วลมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพก้านลม ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ 96

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.34 ผลของความเร็วลมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพกังหันลม ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$	96
6.35 ผลของความเร็วลมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพกังหันลม ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$	97
6.36 ผลของความเร็วลมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพกังหันลม ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$	97
7.1 C_p แยกต่างระหว่างหุ่นจำลองแบบ Upwind และ Downwind สำหรับ $\beta_1 = 5^\circ$	99
7.2 C_p แยกต่างระหว่างหุ่นจำลองแบบ Upwind และ Downwind สำหรับ $\beta_2 = 10^\circ$	99
7.3 C_p แยกต่างระหว่างหุ่นจำลองแบบ Upwind และ Downwind สำหรับ $\beta_3 = 15^\circ$	100
7.4 C_p แยกต่างระหว่างหุ่นจำลองแบบ Upwind และ Downwind สำหรับ $\beta_4 = 20^\circ$	100
7.5 การเพิ่มขึ้นของ C_p จากการติดตั้ง Hub-fairing ของหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ.....	101
7.6 การเพิ่มขึ้นของ C_p จากการติดตั้ง Hub-fairing ของหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ.....	101
7.7 C_p กังหันลมเสือล่าแพนแบบ 6 ใบที่ความดันใบ 22%.....	103
7.8 C_p กังหันลมเสือล่าแพนแบบ 6 ใบที่ความดันใบ 28%.....	103
7.9 C_p กังหันลมเสือล่าแพนแบบ 6 ใบที่ความดันใบ 34%.....	104
7.10 C_p กังหันลมเสือล่าแพนแบบ 4 ใบที่ความดันใบ 22%.....	104
7.11 C_p กังหันลมเสือล่าแพนแบบ 4 ใบที่ความดันใบ 28%.....	105
7.12 C_p กังหันลมเสือล่าแพนแบบ 4 ใบที่ความดันใบ 34%.....	105
7.13 C_p กังหันลมเสือล่าแพนแบบ 3 ใบที่ความดันใบ 22%.....	106
7.14 C_p กังหันลมเสือล่าแพนแบบ 3 ใบที่ความดันใบ 28%.....	106

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1.1	เครื่องอ่านแถบสีชุดทดสอบอย่างง่ายที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์.....	4
4.1	ผลการอ่านค่าแถบสีชุดทดสอบเชื้อแบคทีเรีย Aac ที่ความเข้มข้น Healthy, 1×10^5 , 5×10^5 , 1×10^6 , 5×10^6 และ 1×10^7 CFU/mL (N=5) โดยใช้การระบุการเกิดแถบสีด้วยตาเปล่าจากผู้ทดสอบทั้งหมด 9 คน.....	53
4.2	ค่า RGB ของแถบสีที่พิมพ์ขึ้นที่มีแถบสีใกล้เคียงกับแถบสีชุดทดสอบ Aac ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	62
4.3	ค่าการสะท้อนแสงที่ลดลงที่แถบทดสอบของชุดทดสอบแบบ Multiplex.....	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.33 ประสิทธิภาพหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ จากทฤษฎี BEM.....	118
7.34 ประสิทธิภาพหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ จากทฤษฎี BEM.....	119
7.35 ประสิทธิภาพหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ จากทฤษฎี BEM.....	119
7.36 ประสิทธิภาพหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$ จากทฤษฎี BEM.....	120
7.37 ประสิทธิภาพหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ จากทฤษฎี BEM.....	120
8.1 ผลการแจกแจงความถี่ความเร็วลมแบบยกกำลังหนึ่ง จังหวัดนครราชสีมา.....	124
8.2 ผลการแจกแจงความถี่ความเร็วลมแบบยกกำลังหนึ่ง จังหวัดปราจีนบุรี.....	124
8.3 ผลการแจกแจงความถี่ความเร็วลมแบบยกกำลังสาม จังหวัดนครราชสีมา.....	125
8.4 ผลการแจกแจงความถี่ความเร็วลมแบบยกกำลังสาม จังหวัดปราจีนบุรี.....	126
8.5 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	128
8.6 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	129
8.7 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 15 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	129
8.8 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 20 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	130
8.9 งานรายกลุ่มเดือน Upwind-TSW จังหวัดนครราชสีมา.....	130
8.10 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	131
8.11 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	132
8.12 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 15 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	132

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.13 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 20 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	133
8.14 งานรายกลุ่มเดือน Upwind-TSW จังหวัดปราจีนบุรี.....	133
8.15 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	134
8.16 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	135
8.17 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 15 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	135
8.18 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 20 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	136
8.19 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW แบบ 6 ใบ จังหวัดนครราชสีมา.....	136
8.20 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	137
8.21 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	138
8.22 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 15 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	138
8.23 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 20 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	139
8.24 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW แบบ 4 ใบ จังหวัดนครราชสีมา.....	139
8.25 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	140
8.26 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	141

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.27 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 15 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	141
8.28 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 20 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	142
8.29 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW แบบ 6 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี.....	142
8.30 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	143
8.31 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	144
8.32 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 15 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	144
8.33 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 20 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	145
8.34 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW แบบ 4 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี.....	145
8.35 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	146
8.36 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	147
8.37 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ จังหวัดนครราชสีมา.....	147
8.38 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	148
8.39 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดนครราชสีมา.....	149

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.40 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ จังหวัดนครราชสีมา.....	149
8.41 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	150
8.42 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	151
8.43 งานรายกลุ่มเดือนของ Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี.....	151
8.44 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	152
8.45 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดปราจีนบุรี.....	153
8.46 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี.....	153
9.1 $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ กังหันลมแบบดั้งเดิม (CTSW) จังหวัดนครราชสีมา.....	157
9.2 $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ กังหันลมแบบใหม่ (NTSW) จังหวัดนครราชสีมา.....	157
9.3 งานรายกลุ่มเดือน CTSW และ NTSW จังหวัดนครราชสีมา.....	158
9.4 $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ กังหันลมแบบดั้งเดิม (CTSW) จังหวัดปราจีนบุรี.....	159
9.5 $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ กังหันลมแบบใหม่ (NTSW) จังหวัดปราจีนบุรี.....	159
9.6 งานรายกลุ่มเดือน CTSW และ NTSW จังหวัดนครราชสีมา.....	160

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	=	สัมประสิทธิ์เหนี่ยวนำเชิงแกน (Axial induction factor)
a'	=	สัมประสิทธิ์เหนี่ยวนำเชิงมุม (Angular induction factor)
A	=	พื้นที่ระนาบโรเตอร์ (Rotor plane area) หรือ ชื่อหน้าตัดใบกังหัน A
B	=	จำนวนใบกังหัน (Number of blade) หรือ ชื่อหน้าตัดใบกังหัน B
c	=	ความยาวคอร์ด (Chord length) หรือ พารามิเตอร์สเกล (Scale parameter) ในฟังก์ชันไวบูลล์ (Weibull function)
C	=	ชื่อหน้าตัดใบกังหัน C
C_d	=	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient)
C_l	=	สัมประสิทธิ์แรงยก (Lift coefficient)
C_n	=	สัมประสิทธิ์แรงลัพธ์ในทิศตั้งฉากกับโรเตอร์
C_P	=	สัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient)
C_t	=	สัมประสิทธิ์แรงลัพธ์ในแนวสัมผัสโรเตอร์
C_T	=	สัมประสิทธิ์แรงในแนวแกน (Thrust coefficient)
dQ	=	แรงบิด (Torque) เชิงอนุพันธ์
dr	=	ระยะเอลิเมนต์แบบอนุพันธ์ในแนวรัศมีใบกังหันลม
dT	=	แรงในแนวแกน (Thrust force) เชิงอนุพันธ์
D	=	ชื่อหน้าตัดใบกังหัน D
E	=	ชื่อหน้าตัดใบกังหัน E
F	=	สัมประสิทธิ์การสูญเสียปลายใบและ โคนใบ (Total loss factor)
F_1	=	แรงดึงในสายพานที่อ่านค่าจากสปริงสำหรับการวัดแรงบิดที่ตำแหน่ง 1 (เป็นตัวแปรที่ใช้ประกอบการอธิบายการวัดแรงบิดในรูปที่ 3.1) หรือ ฟังก์ชันการผสมตัวแปรในแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ Shear stress transport หรือ $k-\omega$ SST
F_2	=	แรงดึงในสายพานที่อ่านค่าจากสปริงสำหรับการวัดแรงบิดที่ตำแหน่ง 2 (เป็นตัวแปรที่ใช้ประกอบการอธิบายการวัดแรงบิดในรูปที่ 3.1) หรือ Blending function ในแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ Shear stress transport หรือ $k-\omega$ SST
F_{hub}	=	สัมประสิทธิ์การสูญเสียโคนใบ (Hub loss factor)
F_{tip}	=	สัมประสิทธิ์การสูญเสียปลายใบ (Tip loss factor)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\vec{g}$	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
H	=	ระยะ Hub หรือ จำนวนชั่วโมง
k	=	พารามิเตอร์รูปร่าง (Shape parameter) สำหรับฟังก์ชันไวบูลล์ (Weibull function) หรือ Turbulent kinetic energy
$\vec{\nabla}P$	=	Pressure gradient ที่ผิวปริมาตรควบคุม
$p(U)$	=	Probability density function ในฟังก์ชันไวบูลล์
P_w	=	กำลังงานลม (Wind power)
P_{tur}	=	กำลังงานกังหันลม (Wind turbine power)
Q	=	แรงบิด (Torque)
r	=	รัศมีใด ๆ ตลอดไปกังหัน (Local radius)
R	=	รัศมีโรเตอร์ (Rotor radius)
Re	=	เรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)
R_p	=	รัศมีพูลเล่ (Pulley radius)
T	=	แรงในแนวแกน (Thrust force)
U	=	ความเร็วลมใด ๆ
U_{dsg}	=	ความเร็วลมออกแบบ (Design wind velocity)
U_0	=	ความเร็วลมกระแสอิสระ (Free stream velocity)
$U_{0,a}$	=	ความเร็วลมกระแสอิสระ a (เป็นตัวแปรที่ใช้ประกอบการอธิบายเกี่ยวกับการทดสอบกังหันลมแบบ Variable velocity ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปที่ 6.27)
$U_{0,b}$	=	ความเร็วลมกระแสอิสระ b (เป็นตัวแปรที่ใช้ประกอบการอธิบายเกี่ยวกับการทดสอบกังหันลมแบบ Variable velocity ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปที่ 6.27)
U_{rel}	=	ความเร็วลมสัมพัทธ์ (Relative wind velocity)
$U_{rel,a}$	=	ความเร็วลมสัมพัทธ์ a (เป็นตัวแปรที่ใช้ประกอบการอธิบายเกี่ยวกับการทดสอบกังหันลมแบบ Variable speed และ Variable velocity ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปที่ 6.26-6.27)
$U_{rel,b}$	=	ความเร็วลมสัมพัทธ์ b (เป็นตัวแปรที่ใช้ประกอบการอธิบายเกี่ยวกับการทดสอบกังหันลมแบบ Variable speed และ Variable velocity ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปที่ 6.26-6.27)
$\vec{V}$	=	เวกเตอร์ความเร็วที่เข้า-ออกปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการอธิบายสมการ Navier-Stoke
w	=	ความเร็วของ Wake (Wake velocity)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

W_P	=	งานรายกลุ่มเดือนย่อย (Period work)
y^+	=	Distance in wall coordinate (ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ CFD)
α	=	มุมปะทะ (Angle of attack)
α_a	=	มุมปะทะ a (เป็นตัวแปรที่ใช้ประกอบการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมปะทะ มุมพิช และความเร็วรอบ ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปที่ 5.14 และรูปที่ 6.26-6.27)
α_b	=	มุมปะทะ b (เป็นตัวแปรที่ใช้ประกอบการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมปะทะ มุมพิช และความเร็วรอบ ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปที่ 5.14 และรูปที่ 6.26-6.27)
β	=	มุมพิช (Pitch angle) หรือ มุมพิชปลายใบ (Blade tip pitch angle)
β_a	=	มุมพิช a (เป็นตัวแปรที่ใช้ประกอบการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมปะทะ มุมพิช และความเร็วรอบ ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปที่ 5.14)
β_b	=	มุมพิช b (เป็นตัวแปรที่ใช้ประกอบการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมปะทะ มุมพิช และความเร็วรอบ ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปที่ 5.14)
Ω	=	ความเร็วรอบกังหันลม (Rotor speed)
Ω_a	=	ความเร็วรอบ a (เป็นตัวแปรที่ใช้ประกอบการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมปะทะ มุมพิช และความเร็วรอบ ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปที่ 5.14 และรูปที่ 6.26)
Ω_b	=	ความเร็วรอบ b (เป็นตัวแปรที่ใช้ประกอบการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมปะทะ มุมพิช และความเร็วรอบ ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปที่ 5.14 และรูปที่ 6.26)
Ω_{dsg}	=	ความเร็วรอบออกแบบ (Design rotor speed)
ω	=	ความเร็วเชิงมุม หรือ Specific dissipation
ρ	=	ความหนาแน่นอากาศ (Air density)
λ	=	อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio)
λ_r	=	Local tip speed ratio
λ_{opt}	=	อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ดีที่สุด (Optimum tip speed ratio)
σ	=	ความตันใบ (Solidity)
σ'	=	ความตันใบแบบ 1 มิติ (แบบเส้น) ในแต่ละรัศมี (Local solidity) ที่ใช้ในทฤษฎี BEM
ϕ	=	มุมความเร็วลมสัมพัทธ์ (Relative flow angle)
τ_{ij}	=	ความเค้นเฉือนและความเค้นตึงจากที่ผิวปริมาตรควบคุม
μ	=	ความหนืด (Dynamics viscosity)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

μ_t	=	ความหนืดปั่นป่วน (Turbulent viscosity)
AEP	=	งานรายปี (Annual energy production)
AOM	=	ต้นทุนการบำรุงรักษาต่อปี (Annual operation and maintenance cost)
BEM	=	Blade element momentum
BET	=	ทฤษฎี Blade element (Blade element theory)
CFD	=	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics)
COE	=	ต้นทุนพลังงาน (Cost of energy)
CTSW	=	กังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (Conventional Thai sail windmill)
Exp	=	การทดลอง (Experiment)
FCR	=	อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (Fixed charge rate)
HAWT	=	กังหันลมแนวนอน (Horizontal axis wind turbine)
IC	=	ราคาการติดตั้งกังหันลม (Initial cost of installation)
MT	=	ทฤษฎีโมเมนตัม (Momentum theory)
N/A	=	Non-available
NTSW	=	กังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ (New Thai sail windmill)
SA	=	Spalart-Allmaras turbulent model
SST	=	Shear stress transport
RPM	=	ความเร็วรอบในหน่วยรอบต่อนาที (Round per minute)
WPDF	=	Wind power density Frequency

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ประเทศไทยมีประวัติการใช้กังหันลมมาแต่โบราณ โดยมีบันทึกโดยหมอบรัดเลย์ในสมัยปลายรัชกาลที่ 3 ว่าชาวสยามได้ใช้กังหันลมเพื่อการสูบน้ำกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยใช้สูบน้ำเข้านา กังหันลมดังกล่าวนี้มีอยู่สองลักษณะคือ กังหันลมที่ใบพัดทำด้วยไม้กระดานเรียกว่า “กังหันลมไทยแบบไม้กระดาน (Thai wooden high-speed rotor type)” และกังหันลมที่ใบพัดทำด้วยเลื้อล้าแพน เรียกว่า “กังหันลมไทยแบบใบเลื้อล้าแพน (Slow-speed sail rotor type หรือ Thai sail-windmill)” ดังรูปที่ 1.1 และ 1.2 ตามลำดับ โดยกังหันลมไทยแบบไม้กระดานนั้นที่บริเวณด้านหน้าของใบจะมีลักษณะแบนราบส่วนด้านหลังจะถูกเหลาให้โค้งเพื่อทำให้เกิดแรงยก (Lift force) ตามหลักอากาศพลศาสตร์ จากนั้นแตกแรงยกไปเป็นแรงบิดเพื่อหมุนกังหันเรียกปีกกังหันชนิดนี้ว่า “ปีกกังหันแบบใช้แรงยก (Lift-type windmill)” ซึ่งเป็นหลักการเดียวกับปีกเครื่องบิน สำหรับกังหันลมไทยแบบใบเลื้อล้าแพนนั่นก็ขับเคลื่อนโดยใช้แรงยกเช่นเดียวกันแต่ใบกังหันจะทำด้วยเลื้อล้าแพนหรือผ้าใบ ซึ่งถือเป็นภูมิปัญญาที่ยอดเยียมมากที่สามารถสร้างแรงยกได้แบบง่าย ๆ จากการไหลผ่านความโค้งของใบกังหันซึ่งมีลักษณะคล้ายแคมเบอร์แอร์ฟอยล์ (Cambered airfoil) พบว่ามีประสิทธิภาพพอควร ปัจจุบันแทบจะไม่มีใครใช้กังหันลมทั้งสองแบบแล้ว เพราะการเข้ามาของเครื่องยนต์ พร้อมปั้มน้ำจากต่างประเทศซึ่งมีราคาถูกกว่าและสะดวกต่อการใช้งานมากกว่า โดยที่จุดอ่อนของกังหันลมไทยคือ มีขนาดใหญ่ ราคาก่อสร้างสูง และมีประสิทธิภาพต่ำ ปัจจุบัน (พ.ศ. 2559) ประเทศไทยมีการใช้กังหันลมอยู่หลากหลายประเภท ตั้งแต่ขนาดใหญ่จนถึงขนาดเล็ก เช่น กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ออกแบบและนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงมาก เช่น ที่ทุ่งกังหันลมขนาด 207 เมกกะวัตต์ ตำบลห้วยบง อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา หรือกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เช่น ที่ทุ่งกังหันลมขนาด 30 กิโลวัตต์ที่เกาะล้าน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีกังหันลมแบบใบเหล็กหลายใบ (Multi-bladed steel rotor) ที่ใช้ในการสูบน้ำในบ่อบาดาลซึ่งสามารถพบเห็นได้ทั่วไปในทุกภูมิภาคของประเทศไทย สำหรับการใช้งานกังหันลมไทยแบบใบเลื้อล้าแพนนั้นจะใช้คู่กับระหัดวิดน้ำซึ่งปัจจุบันใช้เพื่อสูบน้ำเข้านาเกลือเพียงอย่างเดียวและมีใช้งานอยู่จริงเฉพาะในจังหวัดสมุทรสงครามเท่านั้นแต่ก็เหลืออยู่น้อยมาก นอกจากนี้ยังมีกังหันลมแบบอื่น ๆ ที่ประชาชนทั่วไปคิดค้นทำขึ้นใช้เองในท้องถิ่น ส่วนกังหันลมไทยแบบไม้กระดานนั้นไม่พบการใช้งานแล้ว



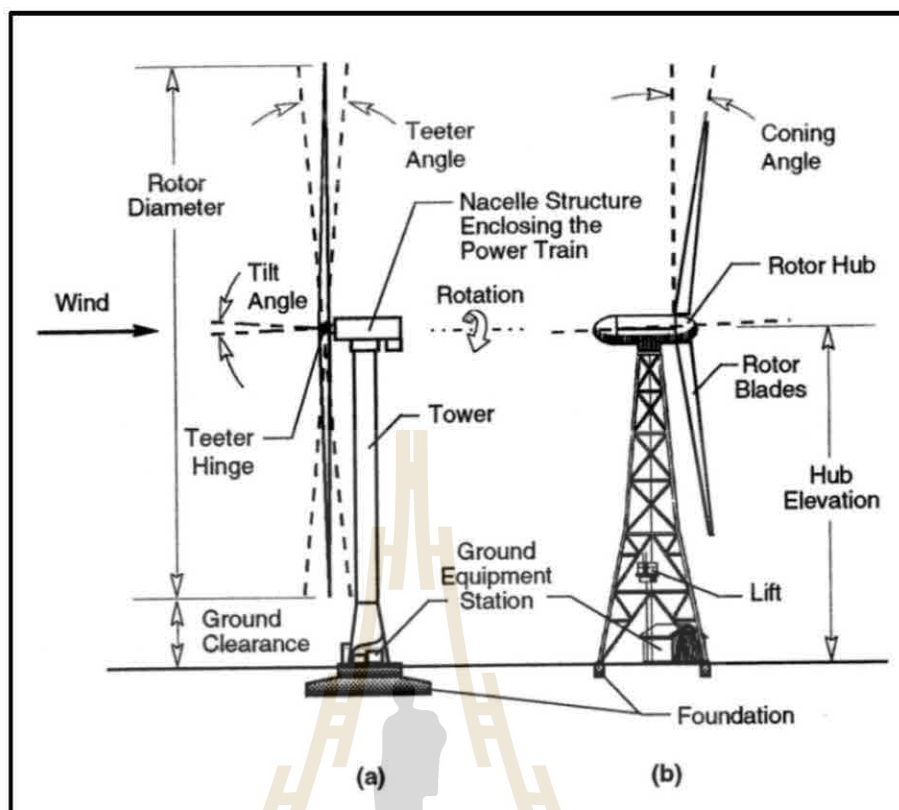
รูปที่ 1.1 กังหันลมไทยแบบไม้กระดาน



รูปที่ 1.2 กังหันลมไทยแบบใบเสื่อลำแพน

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กังหันลมไทยแบบใบเสื่อลำแพน (หลังจากนี้จะใช้ชื่อย่อว่า “กังหันลมเสื่อลำแพน” เพื่อความกระชับ) แม้จะมีจุดอ่อนมากแต่ก็มีข้อดีหลายประการเช่น ไม่ใช้เชื้อเพลิง ให้พลังงานสะอาด ไม่มีมลพิษทางเสียง ไม่เสี่ยงต่อการถูกขโมย และที่สำคัญคือมีความสวยงามแบบวัฒนธรรมดั้งเดิม ถ้าพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและราคาถูกลงได้ อาจทำให้เกิดความนิยมได้อีกครั้ง ซึ่งนอกจากจะได้พลังงานสะอาดและราคาถูกลงใช้ประโยชน์แล้วยังอาจเป็นแหล่งท่องเที่ยวได้อีกทางหนึ่ง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนากังหันลมเสื่อลำแพนเนื่องจากเป็นกังหันลมที่มีโครงสร้างเรียบง่าย วัสดุที่ใช้สามารถหาได้ตามท้องถิ่นทั่วไป จึงง่ายต่อการสร้างและเห็นว่าจะสามารถทำให้ราคาลดลงได้อีก อย่างไรก็ตามต้นทุนกังหันลมเสื่อลำแพนในปัจจุบันยังคงมีราคาแพงโดยทั่วไปมีราคาเฉลี่ยประมาณแปดหมื่นบาท ซึ่งส่วนที่มีราคาสูงสุดคือเสากังหันที่ทำจากไม้ขนาดใหญ่จำนวนสองเสา กังหันลมเสื่อลำแพนโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพต่ำประมาณ 10-17% (Thepwong, 2013) วัตถุประสงค์งานวิจัยคือต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ (เชิงพลังงาน) กังหันลมเสื่อลำแพนให้ได้มากที่สุดพร้อมกับหาแนวทางการลดราคาการติดตั้งให้ถูกลงไปพร้อมกัน โดยวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) ทฤษฎี Blade element momentum (BEM) และการทดลอง (Experiment) สำหรับแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมเสื่อลำแพนทำได้โดยวิธีการคือ การปรับค่ามุมพิช (Pitch angle) การปรับค่าความตันใบ (Solidity) การติดตั้ง Hub-fairing และการปิดปลายใบ สำหรับแนวทางการลดราคาติดตั้งทำได้โดยปรับเปลี่ยนการวางตัวโรเตอร์จากเดิมที่เป็นแบบ Upwind ให้เป็นแบบ Downwind เพื่อประโยชน์ในการเป็น Passive yaw control ซึ่งความแตกต่างของการวางตัวโรเตอร์แบบ Upwind และ Downwind แสดงดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 การวางตัวของโรเตอร์ (a) แบบ Upwind (b) แบบ Downwind (Spera, 1998)

1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมเสื่อลำแพนให้ได้มากที่สุดพร้อมกับหาแนวทางการลดราคาการติดตั้งไปพร้อมกันเพื่อนำกลับมาซึ่งการใช้งานอย่างกว้างขวางอีกครั้ง รวมถึงสร้างโปรแกรมโดยใช้ทฤษฎี BEM เพื่อประเมินประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมเสื่อลำแพน

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 การประเมินค่า C_l และ C_d ของใบกังหันลมเสื่อลำแพนจะใช้วิธีการทาง CFD โดยประเมินค่าในระบบ 2 มิติ และใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Menter's shear stress transport $k - \omega$

1.4.2 การสร้างโปรแกรมเพื่อประเมินประสิทธิภาพพลังงานหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนจะใช้ทฤษฎี BEM โดยพิจารณาในระบบ 2 มิติ พร้อมกับการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์เหนี่ยวนำเชิงแกน (a) และเพิ่มแบบจำลองการสูญเสียปลายใบและ โคนใบของ Prandtl (Moriarty et al, 2005)

1.4.3 สร้างหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์ 1.0 เมตร

1.4.4 ใบกังหันลมเสื่อลำแพนจะใช้วัสดุผ้าใบ (Canvas) แทนการใช้เสื่อลำแพน

1.4.5 เปรียบเทียบงานรายปี (Annual energy production หรือ AEP) ของหุ่นจำลองกังหันลม เสือลำแพนแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้น

1.4.6 ใช้สถิติลมจังหวัดนครราชสีมาและจังหวัดปราจีนบุรีเป็นกรณีตัวอย่างในการประเมิน งานรายปี

1.4.7 ทดลองกังหันลมด้วยวิธีการลากจูงกังหันลม (Tow testing) ด้วยรถกระบะบรรทุก (Pick-up truck)

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

จะดำเนินงานวิจัยดังนี้

1.5.1 ระเบียบวิธีวิจัย

1) สืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- กังหันลมในประเทศไทย
- กังหันลมเสือลำแพน
- ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์
- ทฤษฎี Blade element momentum (BEM)
- การปรับปรุงทฤษฎี BEM
- ทฤษฎีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)
- วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพกังหันลมเสือลำแพน
- วิธีการทดลองกังหันลม

2) ประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงทางอากาศพลศาสตร์ (C_l และ C_d) ของใบกังหันลม เสือลำแพนด้วย CFD

- สร้างหุ่นจำลองกังหันลมเสือลำแพนแบบดั้งเดิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร
- วัดค่าความโค้งของหน้าตัดใบ (Blade section profile) ที่เกิดขึ้นในรัศมีต่าง ๆ
- สร้างกริด (Grid) รอบหน้าตัดใบกังหันเพื่อใช้คำนวณด้วย CFD
- คำนวณหาค่า C_l และ C_d ด้วยโปรแกรม Ansys Fluent

3) ประเมินประสิทธิภาพพลังงานหุ่นจำลองกังหันเสือลำแพนลมด้วยทฤษฎี BEM

- วัดค่ามุมพิชและความยาวคอर्डของใบกังหันตลอดแนวรัศมี
- เขียนโปรแกรม BEM ด้วยโปรแกรม Matlab

4) แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพ

- ทดลองหาค่ามุมพิชปลายใบที่ดีที่สุด

- ทดลองปรับเปลี่ยนจำนวนใบ
- ทดลองหาค่าความดันใบที่ดีที่สุด
- ทดลองปิดปลายใบ
- ทดลองติดตั้ง Hub-fairing
- ทดลองติดตั้งระบบสายหาลม (Yaw system)

5) แนวทางการลดต้นทุนการติดตั้งกังหันลม

- ปรับเปลี่ยนการวางโรเตอร์จากเดิมแบบ Upwind ให้เป็นแบบ Downwind

6) ติดตั้งและทดลอง

- สร้างหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร
- ออกแบบและสร้างอุปกรณ์การวัดแรงบิด
- สอบเทียบเครื่องมือวัดความเร็วรอบ (Speed sensor) เครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometer) และสปริงบาลานซ์ (Spring balance) สำหรับการวัดแรงบิด
- ติดตั้งอุปกรณ์จับยึดหุ่นจำลองและเครื่องมือวัดต่าง ๆ บนรถกระบะบรรทุก (Pick-up truck) เพื่อใช้ทดสอบหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนด้วยวิธีการลากจูง (Tow testing)
- ทดลองและเก็บข้อมูลการทดลอง

7) ประเมินผล

- จัดการข้อมูลการทดลองให้อยู่ในรูปแบบสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient, C_p) เทียบต่อค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio, λ) หรือ $C_p - \lambda$ curve
- เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ของหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนที่ได้จากทฤษฎี BEM และการทดลอง
- เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ของหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิมและแบบใหม่
- ประเมินงานรายปี (Annual energy production, AEP)
- ประเมินเศรษฐศาสตร์กังหันลมเบื้องต้น

8) สรุปและข้อเสนอแนะ

- สรุปผลการวิจัยทั้งหมดและข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการวิจัยในอนาคต

1.5.2 สถานที่ทำการวิจัย

- 1) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล (School of mechanical engineering) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 2) ศูนย์วิจัยมันสำปะหลัง (Cassava research center) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 3) ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) คอมพิวเตอร์แบบ PC
- 2) โปรแกรม Ansys Fluent version 14.0
- 3) โปรแกรม MATLAB version R20011a
- 4) อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างและติดตั้งกังหันลม

4.1 เครื่องมือ

- หินเจียร์
- ตู้เชื่อมไฟฟ้า
- สว่าน
- ไฟเบอร์

4.2 Consume

- ดอกสว่าน
- ใบตัดไฟเบอร์
- ลวดเชื่อมไฟฟ้า
- ใบหินเจียร์ขนาด 4 นิ้ว
- น้ำมันเชื้อเพลิง

5) อุปกรณ์การวัด (Measuring equipment)

- 5.1 เครื่องวัดความเร็วลมแบบ Hot wire
- 5.2 เครื่องวัดความเร็วรอบแบบ Optical sensor พร้อมจอแสดงผล
- 5.3 ตาชั่งสปริงขนาด 5.0 และ 10.0 กิโลกรัม
- 6) รถกระบะบรรทุกแบบ Pick-up truck

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้กังหันลมเสื่อลำแพนที่มีประสิทธิภาพพลังงานสูงขึ้นพร้อมกับราคาที่ถูกลง
- 1.6.2 ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงทางอากาศพลศาสตร์ (C_l และ C_d) ใบกังหันลมเสื่อลำแพน
- 1.6.3 ได้โปรแกรม BEM ที่สามารถประเมินประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมเสื่อลำแพน
- 1.6.4 นำกลับมาซึ่งการใช้งานกังหันลมเสื่อลำแพนอย่างกว้างขวางในประเทศไทย

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรม

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์คือเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมเลื้อล้าแพน (Wind turbine efficiency) พร้อมกับหาแนวทางการลดราคาการติดตั้ง รวมถึงสร้างโปรแกรม BEM เพื่อทำนายประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมซึ่งเป็นการศึกษาในเชิงการทดลองและทฤษฎีไปพร้อมกัน กังหันลมที่ทำการทดลองจะถูกประเมินให้อยู่ในรูปสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient, C_p) และงานรายปี (AEP) ซึ่งต้องใช้สถิติมาร่วมวิเคราะห์ด้วย ในบทนี้จะกล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรม 5 ด้านที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย 1. ข้อมูลพื้นฐานกังหันลมเลื้อล้าแพน 2. วิธีการทดสอบกังหันลม 3. การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานกังหันลม 4. การศึกษากังหันลมเชิงทฤษฎี และ 5. การประเมินสถิติ

2.1 ข้อมูลพื้นฐานกังหันลมเลื้อล้าแพน

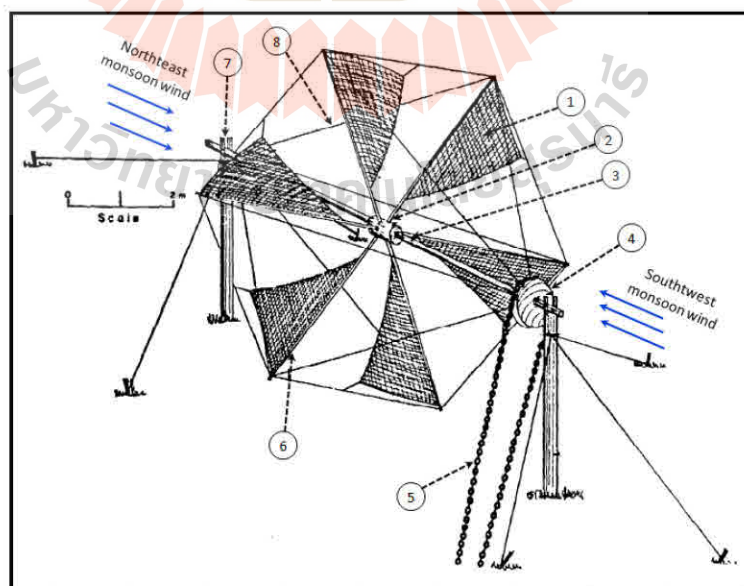
Mukhia (1981) ได้สำรวจกังหันลมที่ใช้ในประเทศไทยช่วงปี พ.ศ. 2524 พบว่า ประเทศไทยมีการใช้กังหันลมสำหรับการสูบน้ำเพื่อทำการเกษตรจำนวนมากกว่า 1,000 ตัว ในจำนวนนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ กังหันลมแบบไม้กระดาน (Thai wooden high-speed rotor type) กังหันลมเลื้อล้าแพน (Slow-speed sail rotor type หรือ Thai sail windmill) และกังหันลมแบบใบโลหะหลายใบ (Multi-bladed steel rotor type) สำหรับสองประเภทแรกมักใช้ในการสูบน้ำเข้านา (ทั้งนาข้าวและนาเกลือ) รวมถึงการทำสวนและทำไร่ สำหรับกังหันลมแบบใบโลหะหลายใบมักใช้ในการสูบน้ำจากบ่อบาดาล ส่วนกังหันลมที่มีใบลักษณะแพนอากาศ (Airfoil) ซึ่งเป็นกังหันลมสมัยใหม่ที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้ายังไม่มีการใช้งานในช่วงสมัยนั้น กังหันลมเลื้อล้าแพนที่ใช้งานจริงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6-8 เมตร ลักษณะใบกังหันมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมทำด้วยเลื้อล้าแพนมีจำนวน 6 ใบดังรูปที่ 2.1 ระบายโรเตอร์มีทิศทางที่แน่นอนตามลมมรสุม 2 ทิศทางหลักคือ ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและตะวันตกเฉียงใต้ ค่าสูงหัว (Head) ที่เหมาะต่อการใช้งานจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.2-1.5 เมตร ปัจจุบันพบว่ากังหันลมเลื้อล้าแพนใช้สำหรับสูบน้ำเข้านาเกลือเพียงอย่างเดียว ในปี พ.ศ. 2524 มีกังหันลมเลื้อล้าแพนที่ใช้งานจริงอยู่ประมาณ 200-300 ตัวในแถบจังหวัดสมุทรสงคราม สมุทรสาคร และชลบุรี กังหันลมเลื้อล้าแพนมีความคล้ายคลึงกับกังหันลมแบบผ้าใบของชาวกรีกโบราณ (Cretan windmill หรือ Greek sail rotor) ดังรูปที่ 2.2 แต่ต่างกันตรงที่กังหันลมผ้าใบของชาวกรีกจะมีระบบสายหาลม (Yaw system) แต่กังหันลมเลื้อล้าแพนไม่มี

สำหรับส่วนประกอบต่าง ๆ ของกังหันลมเสื่อลำแพนแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนี้ หมายเลข 1 คือใบกังหัน (Bamboo mat sail) หมายเลข 2 คือ ดุมโรเตอร์ (Wooden hub) หมายเลข 3 คือ เพลา (Wooden main shaft) หมายเลข 4 คือ พูลเล่ (Wooden pulley) หมายเลข 5 คือ โซ่สายพาน (Steel chain) หมายเลข 6 คือ ก้านใบ (Bamboo spar) หมายเลข 7 คือ เสากังหัน (Wooden post) และ หมายเลข 8 คือ เชือกยึดใบกังหัน (Steel guy wire)



รูปที่ 2.1 กังหันลมเสื่อลำแพน

รูปที่ 2.2 กังหันลม Cretan (Thep Wong, 2013)



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของกังหันลมเสื่อลำแพน (United Nation, 1976)

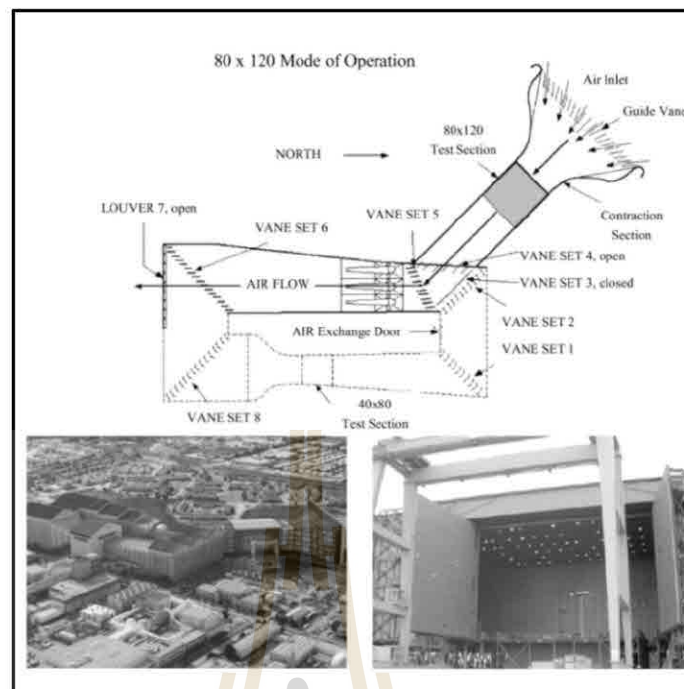
Thepwong (2013) ได้ทำการสำรวจการใช้งานกังหันลมเสื่อลำแพนในจังหวัดสมุทรสงคราม พบว่าค่าความดันใบ (Solidity) จะอยู่ในช่วง 15-60% และมุมพิชปลายใบจะอยู่ในช่วง 10-20 องศา นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมเสื่อลำแพน โดยทำเป็นหุ่นจำลอง ขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร และทดสอบโดยใช้จำนวนใบตั้งแต่ 4-12 ใบ และความดันใบ ตั้งแต่ 15-60% โดยใช้อุโมงค์ลมขนาดเล็กทดสอบที่ความเร็วลม 1.0-5.0 เมตร/วินาที สำหรับการวัด แรงบิดจะใช้วิธีการเบรกที่เพลากังหัน โดยใช้ตุ้มน้ำหนักขนาดต่าง ๆ เพื่อปรับความเร็วรอบ แล้วอ่าน ค่าแรงจากสปริงเพื่อคำนวณเป็นแรงบิดออกมา ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพพลังงานของ กังหันลมเสื่อลำแพนขนาดเล็กอยู่ในช่วงประมาณ 10-17% ซึ่งถือว่าไม่สูงนัก โดยกรณีที่ดีที่สุดคือ กังหันลมที่มีใบกังหันจำนวน 12 ใบและความดันใบเท่ากับ 50% อย่างไรก็ตามการทดลองนี้อาจยัง มีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างจากการที่ใช้พัดลมในการสร้างความเร็วลมให้ไหลผ่านตัวกังหัน ทำให้ การไหลมีลักษณะเป็นแบบเกลียวจึงทำให้กระแสลมไม่มีความสม่ำเสมอ (Non-uniform flow)

2.2 วิธีการทดสอบกังหันลม

Spera (1998) ได้กล่าวถึงวิธีการทดสอบกังหันลมว่าสามารถทำได้ 3 วิธีคือ 1) ทดสอบใน อุโมงค์ลม (Wind tunnel testing) 2) ทดสอบโดยการลากจูงกังหันลม (Tow testing) และ 3) ทดสอบ ด้วยลมธรรมชาติ (Field testing) ซึ่งแต่ละวิธีต่างก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.2.1 การทดสอบในอุโมงค์ลม (Wind tunnel testing)

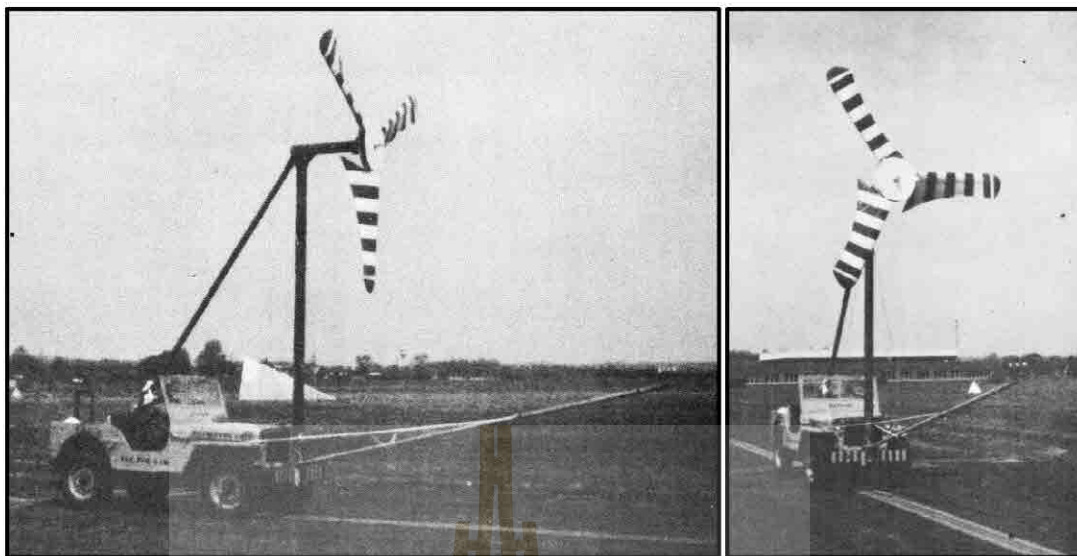
สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้าน (Lift and drag coefficient, C_l and C_d) เป็นค่าสำคัญ ในการศึกษาเรื่องกังหันลม ทั้งสองค่านี้นิยมทดลองหาโดยใช้อุโมงค์ลมซึ่งสามารถทดสอบได้ทั้งใน ระบบ 2 มิติหรือ 3 มิติ หรือแม้แต่การทดสอบหากำลังงานทางกล (Mechanical power) โดยตรงใน ระบบ 3 มิติก็ย่อมได้ วิธีการนี้ให้ผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือเพราะสามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่ต้องการได้ง่าย เช่น การควบคุมความเร็วลม การหลีกเลี่ยงกระแสลมจากสิ่งแวดล้อมที่เข้ามา รบกวน อีกทั้งการติดตั้งเครื่องมือวัดต่าง ๆ ก็สามารถทำได้โดยสะดวก อย่างไรก็ตามการทดสอบ โดยวิธีนี้มีข้อจำกัดด้านความคุ้มค่า เนื่องจากขนาดอุโมงค์ลมต้องมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของกังหัน ลมมากเพื่อหลีกเลี่ยงอิทธิพลจากผลกระทบที่ผนังขอบ (Boundary layer) ทำให้ต้องลงทุนสูง ดังนั้น อุโมงค์ลมบางแห่งจึงไม่ได้สร้างให้มีขนาดใหญ่เท่ากับกังหันลมจริง แต่อาศัยการปรับขนาดกังหันลมที่ ต้องการทดสอบให้มีขนาดเล็กลง (Scaling) แล้วทดสอบด้วยเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds numbers) ที่ใกล้เคียงกันแทน ตัวอย่างอุโมงค์ลมที่ใช้งานจริงในระดับสากล เช่น อุโมงค์ลม NASA Ames Research Center ซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 24.4 เมตร $\times$ 36.6 เมตร ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 อุโมงค์ลม NASA Ames Research Center (ชโลธร, 2552)

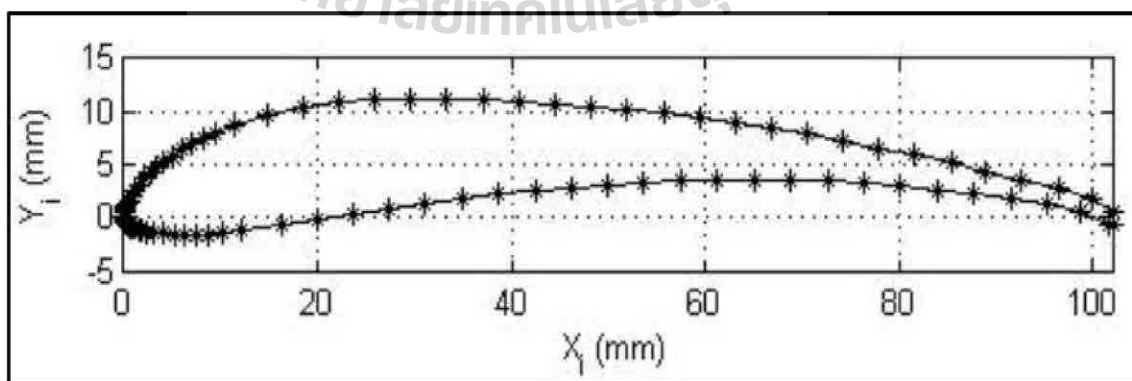
2.2.2 การทดสอบโดยการลากจูงกังหันลม (Tow testing)

การทดสอบนี้จะใช้วิธีการลากจูงกังหันลมไปสู่อากาศที่หยุดนิ่ง (Static air) ด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่งโดยอาจติดตั้งกังหันไว้บนยานพาหนะแล้วเคลื่อนที่ไป (Moving vehicle) ตัวอย่างการทดสอบด้วยวิธีนี้พบเห็นได้ทั่วไป เช่น การทดสอบกังหันลมของมหาวิทยาลัยพรินซ์ตัน (Princeton University) (Maughmer, 1976) ซึ่งทำการทดสอบกังหันลมแบบ Sailwing กล่าวคือเป็นกังหันลมที่มีใบลักษณะเป็นแผ่นอากาศแต่ทำด้วยผ้าใบ เป็นกังหันลมที่ออกแบบโดยมหาวิทยาลัยพรินซ์ตันเองดังรูปที่ 2.5 การทดลองด้วยวิธีนี้สามารถอธิบายเชิงอุปมาได้ว่า ความเร็วที่กังหันลมเคลื่อนที่ไปพร้อมกับกระแสน้ำหรือลมทุกอย่างคงที่เปรียบเสมือนว่ามีกระแสลมอิสระไหลผ่านกังหันที่หยุดนิ่งด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่งนั้นเหมือนกับการทดสอบในอุโมงค์ลมนั่นเอง การทดสอบนี้จะต้องมีการปรับขนาดกังหันลมให้เล็กลงเพื่อความสะดวกในการทดสอบ เนื่องจากการทดสอบกังหันลมขนาดจริงที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ยากเพราะต้องติดตั้งอยู่บนยานพาหนะ ปัญหาหนึ่งของการทดสอบนี้คือสิ่งรบกวนจากปัจจัยภายนอก เช่น ความเร็วลมจากสิ่งแวดล้อม (Local wind) ที่อาจรบกวนขณะทดสอบหรือแม้แต่ความลาดเอียง หรือความโค้งของถนน ที่ยานพาหนะนั้นเคลื่อนที่ไป ซึ่งมีผลต่อความสม่ำเสมอของกระแสลม (Uniform flow) เป็นต้น แต่มีข้อดีอย่างมากคือประหยัดกว่าการใช้อุโมงค์ลมหลายเท่า

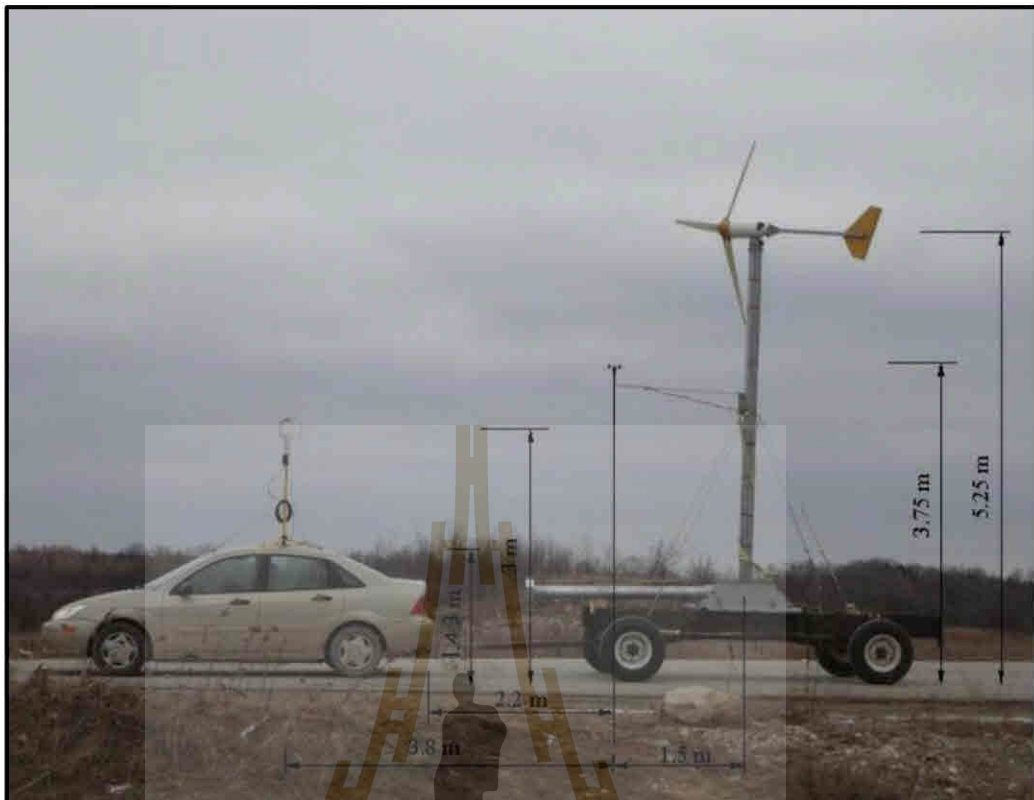


รูปที่ 2.5 การทดสอบกั้นลมด้วยวิธีการลากจูงของมหาวิทยาลัยปริงซ์ตัน (Maughmer, 1976)

Song (2012) ได้ทำการทดสอบกั้นลมแนวอนขนาดเล็ก โดยโรเตอร์ที่ใช้ทดสอบมี 2 ลักษณะคือ ใช้ใบกังหันแบบดั้งเดิม (Original Bergy XL 1.0) ดังรูปที่ 2.6 และใช้ใบกังหันลมที่ออกแบบใหม่ โดยทดสอบที่มุมพิช 3 ค่าคือ 0° , 5° และ 9° วิธีการทดสอบจะใช้วิธี Tow testing ดังรูปที่ 2.7 การวัดความเร็วลมจะใช้แอนนิโมมิเตอร์แบบถ้วย ทดสอบบนถนนที่มีความตรงยาว 300 เมตรในมหาวิทยาลัย Guelph (University of Guelph) ประเทศแคนาดา ทดสอบที่ความเร็วลม 13.6 เมตร/วินาที ความสูงจากพื้นถึงคัมโรเตอร์เท่ากับ 5.25 เมตร แอนนิโมมิเตอร์ยื่นไปด้านหน้าเสา 1.5 เมตร และอยู่สูงจากหลังคารถ 2.3 เมตร เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจาก Wake ที่หลังคารถ



รูปที่ 2.6 ใบกังหันลมแบบดั้งเดิม (Original Bergy XL 1.0) (Song, 2012)



รูปที่ 2.7 การทดสอบกังหันลมด้วยวิธีการลากจูงในงานวิจัยของ Song (2012)
มหาวิทยาลัย Guelph ประเทศแคนาดา

2.2.3. การทดสอบด้วยลมธรรมชาติ (Field testing)

การทดสอบกังหันลมด้วยลมธรรมชาตินั้นดูเหมือนว่าจะจะเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมมากที่สุดเพราะอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง แต่ความจริงแล้วมีปัญหาหลายประการ ปัญหาหนึ่งคือเรื่องของการวัดค่าต่าง ๆ และการบันทึกข้อมูล กล่าวคือข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนี้จะมีค่าแปรปรวนมาก เนื่องจากไม่สามารถควบคุมทิศทางและขนาดของความเร็วลมได้ดังที่ได้เพราะเป็นลมที่มาจากธรรมชาติ รวมถึงกระแสลมธรรมชาติที่มักไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform flow) ทำให้จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) ในหลายตำแหน่งที่บริเวณด้านหน้าของกังหันลมเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเร็วลม ดังเช่นตัวอย่างการทดสอบในรูปที่ 2.8 อีกประการหนึ่ง การบันทึกค่าข้อมูลจะต้องทำในลักษณะ Time average คือทำการวัดหลายครั้งในช่วงเวลาหนึ่งแล้วทำการเฉลี่ยค่าเพราะเนื่องจากความแปรปรวนของลมสูงนั่นเอง การทดลองด้วยวิธีนี้จึงใช้เวลานาน และข้อมูลที่ได้นั้นมีความแม่นยำน้อยกว่าวิธีการทดสอบในอุโมงค์ลม (Wind tunnel testing) และการทดสอบโดยการลากจูงกังหันลม (Tow testing)

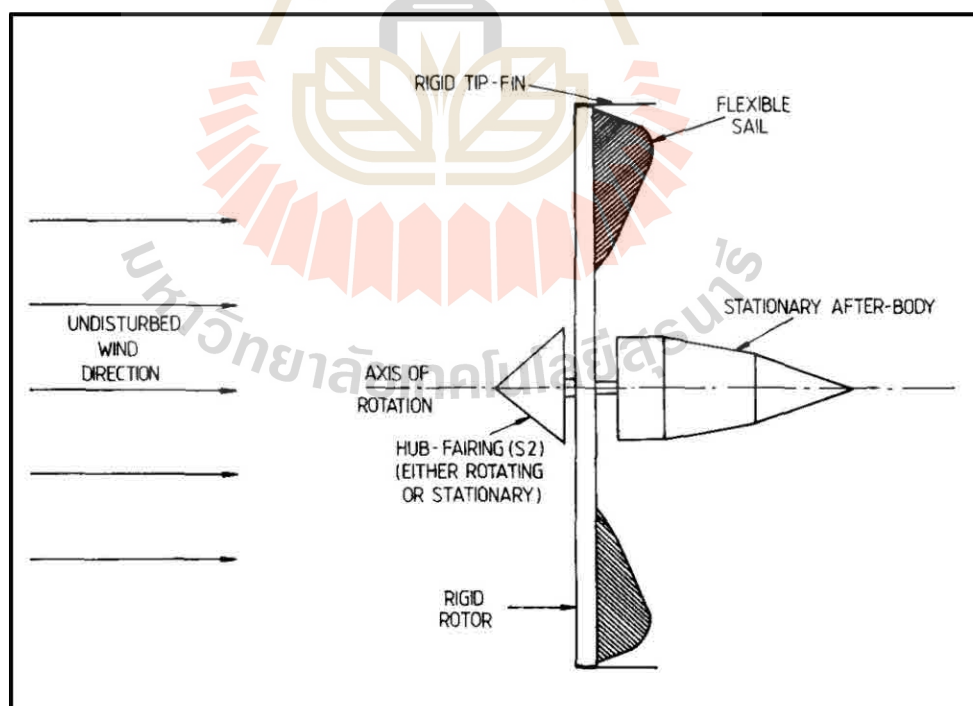


รูปที่ 2.8 การติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมแบบ Array (Spera, 1998)

2.3 การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานกังหันลม

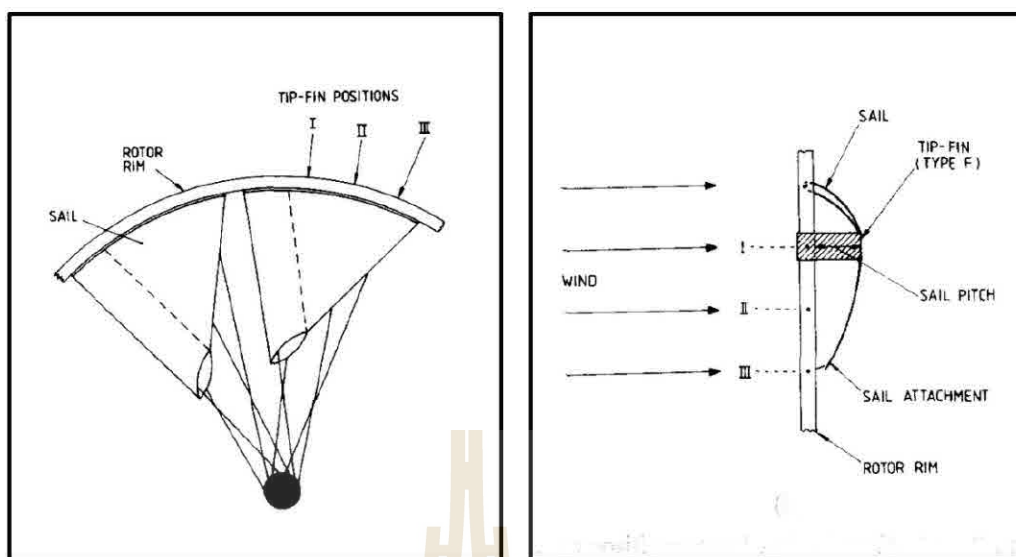
Dekker (1977) ได้ทดสอบกังหันลมชนิดฟ้าใบที่มีขนาดใบกังหันต่างกัน 3 ลักษณะคือ C-I C-II และ C-III โดยที่ลักษณะ C-I มีขนาดเล็กที่สุด รองลงมาคือลักษณะ C-II และขนาดใหญ่ที่สุดคือ C-III ในแต่ละลักษณะจะทดสอบที่ใบกังหันจำนวน 4 ใบ 6 ใบ และ 8 ใบ ตามลำดับ เพื่อดูการส่งผลต่อประสิทธิภาพพลังงานเมื่อค่าความดัน (Solidity) ของใบกังหันมีการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ในกรณีใบพัดลักษณะ C-III ซึ่งมีขนาดใหญ่ที่สุดจะทดลองบิดใบที่ปลายเพื่อลดค่าความดันของใบด้วย อีกทั้งยังทดสอบเปลี่ยนก้านใบ (Spar) ให้มีขนาดเล็กลง และทดสอบการ Coating ที่ใบกังหันเพิ่มเติม ผลการทดลองพบว่าความดันใบส่งผลต่อประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมเป็นอย่างมาก ซึ่งสามารถสรุปโดยย่อว่ากังหันที่มีจำนวนใบ 6-8 ใบ ความดันใบควรจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 40-50% สำหรับใบกังหันที่มีขนาดใหญ่ควรปรับค่าความดันลดลงโดยการบิดมุมปลายใบเล็กน้อย สำหรับกรณีของใบลักษณะ C-III ควรปรับมุมพิชไปที่ $\beta = 15^\circ$ จึงจะได้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุด หากปรับมากเกินไปประสิทธิภาพพลังงานจะลดลงเนื่องจากการเพิ่มมุมบิดที่ปลายใบทำให้มุมปะทะที่ปลายใบลดลงเป็นเหตุให้ค่า C_l / C_d ลดลง ส่วนกรณีใบกังหันที่ทำ Coating สามารถทำให้ประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากสามารถลดการรบกวนไหลความดันจากด้านความดันสูงไปสู่ด้านความดันต่ำได้มากกว่าการไม่ได้ทำ Coating

Fleming และ Probert (1982) ได้ศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมชนิดผ้าใบ (Sail wind turbine) ซึ่งเป็นกังหันลมแกนนอนโดยติดตั้งอุปกรณ์เสริมบางอย่างเข้าไปเช่น ทิปฟิน (Tip-fin) และเซนเตอร์บอดี้ (Center body) โดยเซนเตอร์บอดี้ประกอบด้วย Hub-fairing และ After body ซึ่งแสดงตำแหน่งการติดตั้งดังรูปที่ 2.9 กังหันลมต้นแบบที่ใช้ทดสอบเป็นกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.64 เมตร โรเตอร์มีจำนวน 9 ใบ ทำจากผ้า Melinex มีความหนา 125 ไมโครเมตร ทดสอบที่ความเร็วลมคงที่ 5.0 เมตร/วินาที ทิปฟินมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ (Flat plate) การติดตั้งทิปฟินจะติดตั้งแบบ 1 ใบกัณฑ์ต่อ 1 ทิปฟิน และติดตั้งได้ 3 ตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 2.10 ผลการทดสอบคือ ทิปฟินและเซนเตอร์บอดี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานให้กับกังหันลมได้สูงสุด 1.6 เท่า แสดงผลในรูปที่ 2.11 โดยที่ตำแหน่งที่ดีที่สุดในการติดตั้งคือตำแหน่งที่ 1 ทิปฟินแม้จะเป็นอุปกรณ์ง่าย ๆ ราคาถูกแต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานให้กับกังหันลมชนิดผ้าใบได้อย่างน่าพอใจ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการติดตั้งทิปฟินทำให้เกิดการดูดลมเข้าสู่โรเตอร์ได้มากขึ้น ซึ่งคล้ายกับหลักการของ Shroud นอกจากนี้ทิปฟินยังช่วยลดการสูญเสียปลายใบ (Tip loss) ได้อีกด้วย นอกจากนี้สำหรับการทำมุมของทิปฟินนอกจากจะไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมแล้วยังทำให้ลดลงอีกด้วย

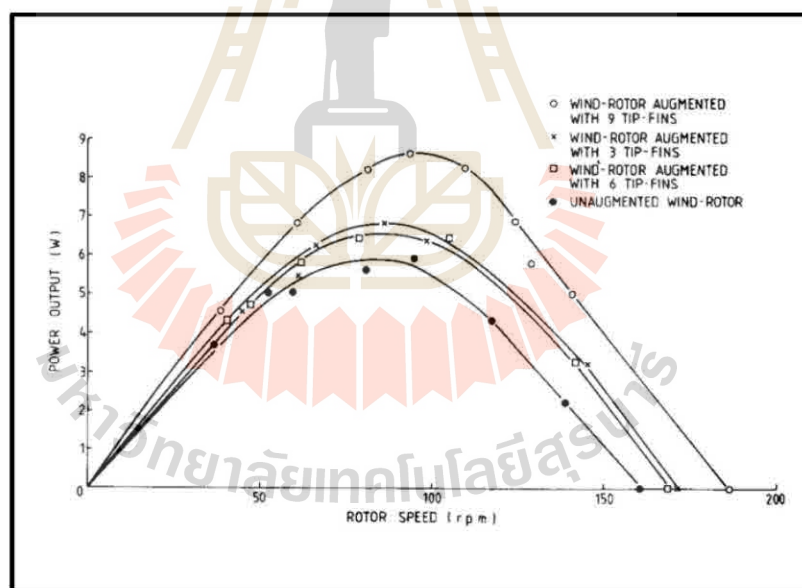


รูปที่ 2.9 ตำแหน่งการติดตั้งทิปฟิน (Tip-fin) และเซนเตอร์บอดี้ (Center body)

(Fleming และ Probert, 1982)



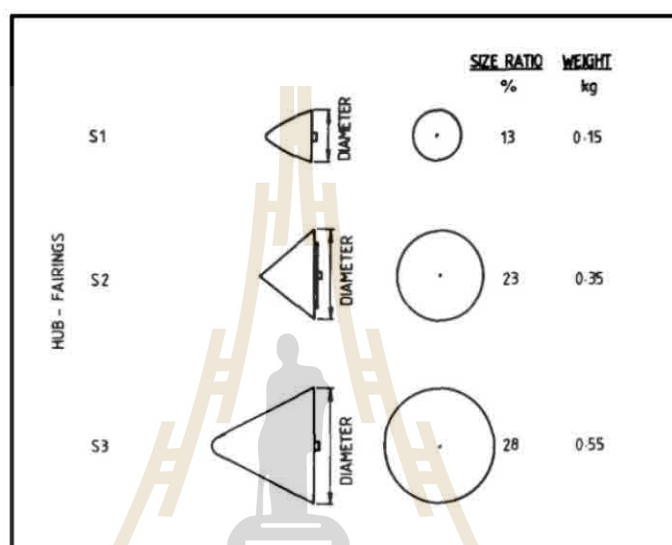
รูปที่ 2.10 มุมมองด้านหน้าและด้านบนของการติดตั้งทูปฟิน (Fleming และ Probert, 1982)



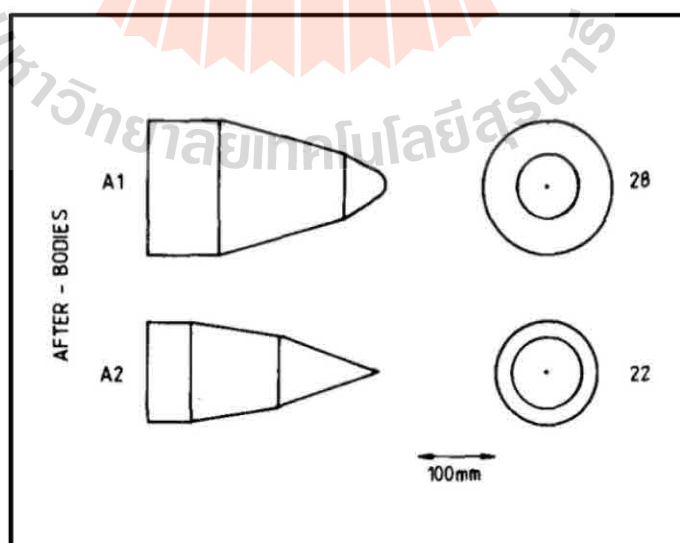
รูปที่ 2.11 ผลการทดสอบทูปฟินลักษณะ A ที่จำนวน 9 ทูปฟิน 6 ทูปฟิน และ 3 ทูปฟิน (Fleming และ Probert, 1982)

Fleming และ Probert (1983) ได้ทดสอบ Hub fairing และ After body โดยติดตั้งกับกังหันลมชนิดผ้าใบซึ่งใช้ Hub fairing จำนวน 3 รูปแบบ และใช้ After body จำนวน 2 รูปแบบ ดังรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 ตามลำดับ ทำการทดสอบเพื่อดูการส่งผลต่อประสิทธิภาพพลังงาน จากการทดสอบ

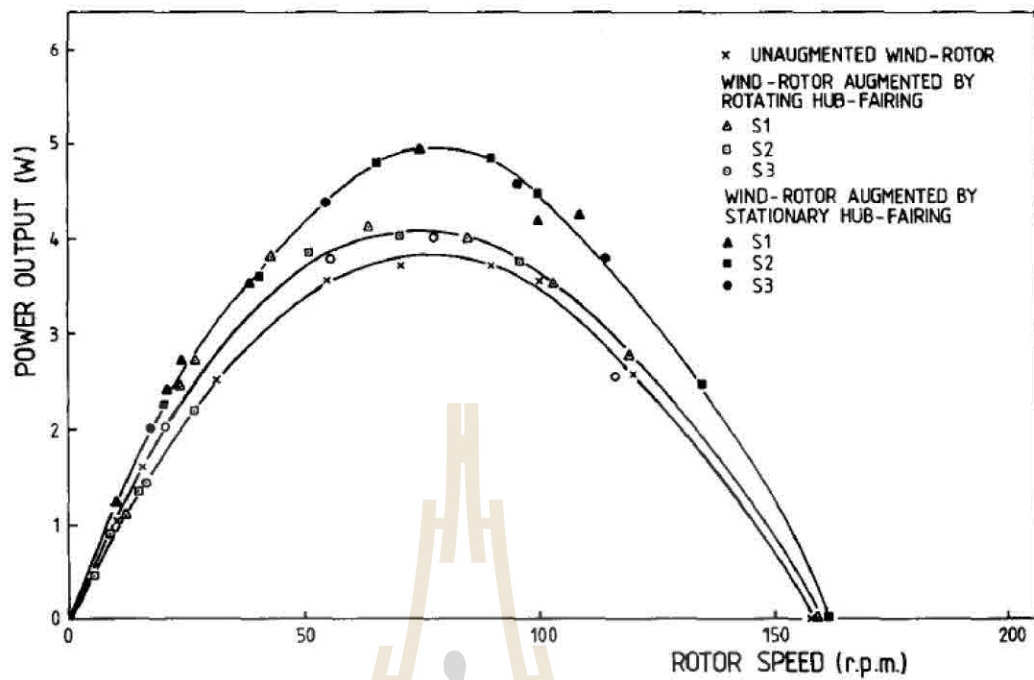
พบว่า การติดตั้ง Hub fairing จะช่วยเหนี่ยวนำอัตราการไหลมากขึ้นและลดการสูญเสียที่คูล์โรเตอร์ (Hub loss) จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานได้ ส่วนการติดตั้ง After body ส่งผลต่อประสิทธิภาพพลังงานน้อยมาก ทั้งนี้การติดตั้ง Hub fairing แบบหยุดนิ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานได้มากกว่าการติดตั้ง Hub fairing แบบหมุน โดยรูปแบบของ Hub fairing ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพพลังงานมากนัก ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 2.14-2.16



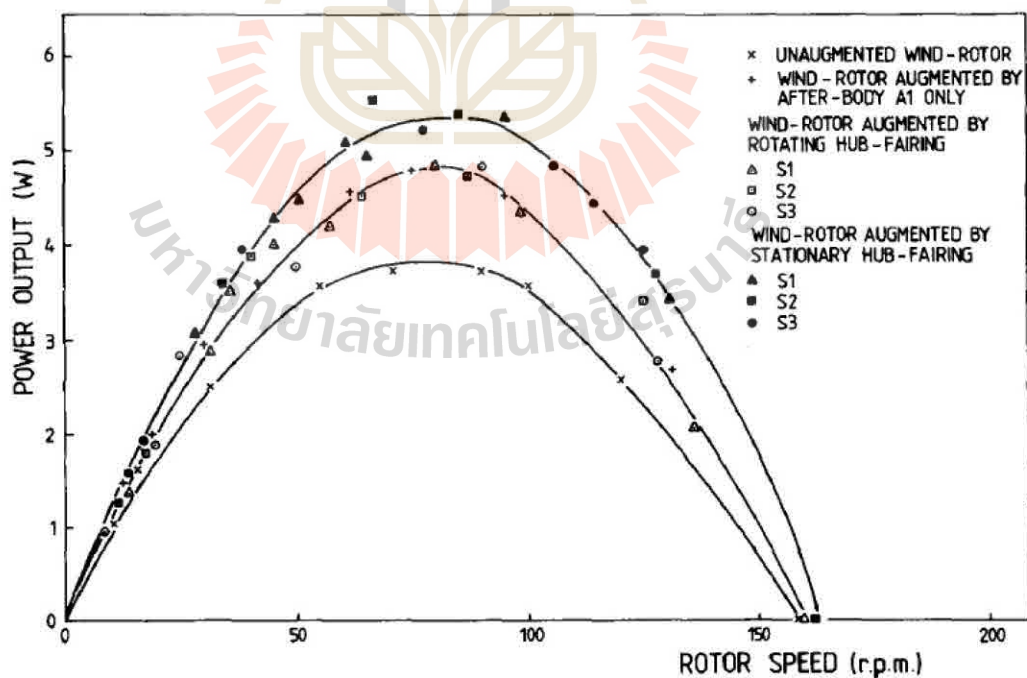
รูปที่ 2.12 รูปแบบของ Hub-fairing (Fleming และ Probert, 1983)



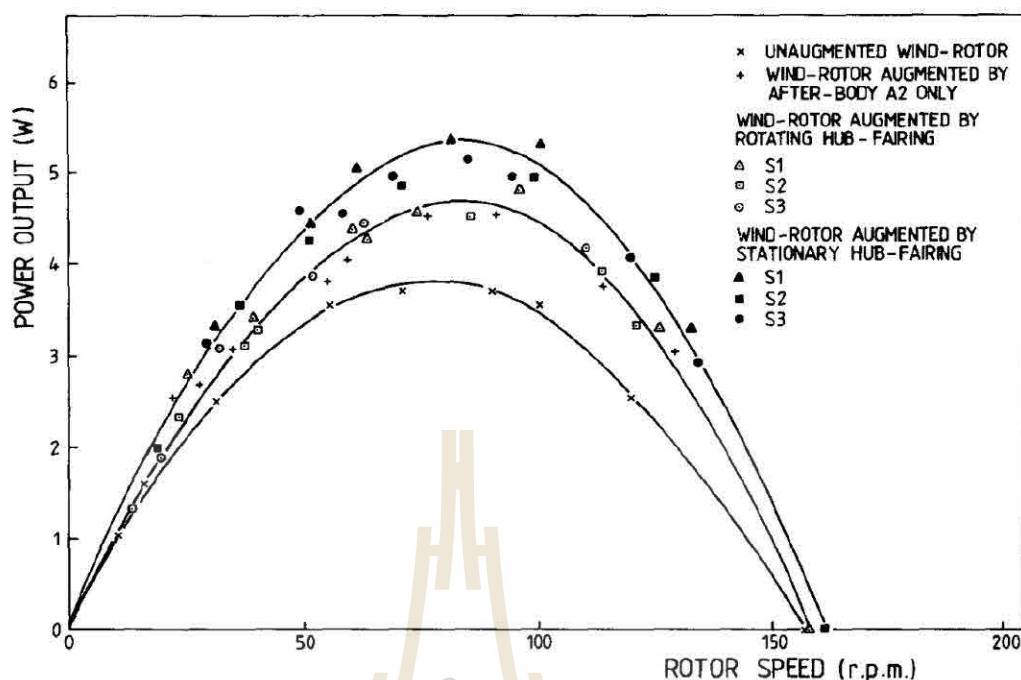
รูปที่ 2.13 รูปแบบของ After body (Fleming และ Probert, 1983)



รูปที่ 2.14 ผลการทดสอบ Hub fairing แบบหยุดนิ่งและแบบหมุนโดยไม่มี After body
(Fleming และ Probert, 1983)



รูปที่ 2.15 ผลการทดสอบ Hub fairing แบบหยุดนิ่งและแบบหมุน โดยติดตั้ง After body แบบ A1
(Fleming และ Probert, 1983)



รูปที่ 2.16 ผลการทดสอบ Hub fairing แบบหยุดนิ่งและแบบหมุน โดยติดตั้ง After body แบบ A2 (Fleming และ Probert, 1983)

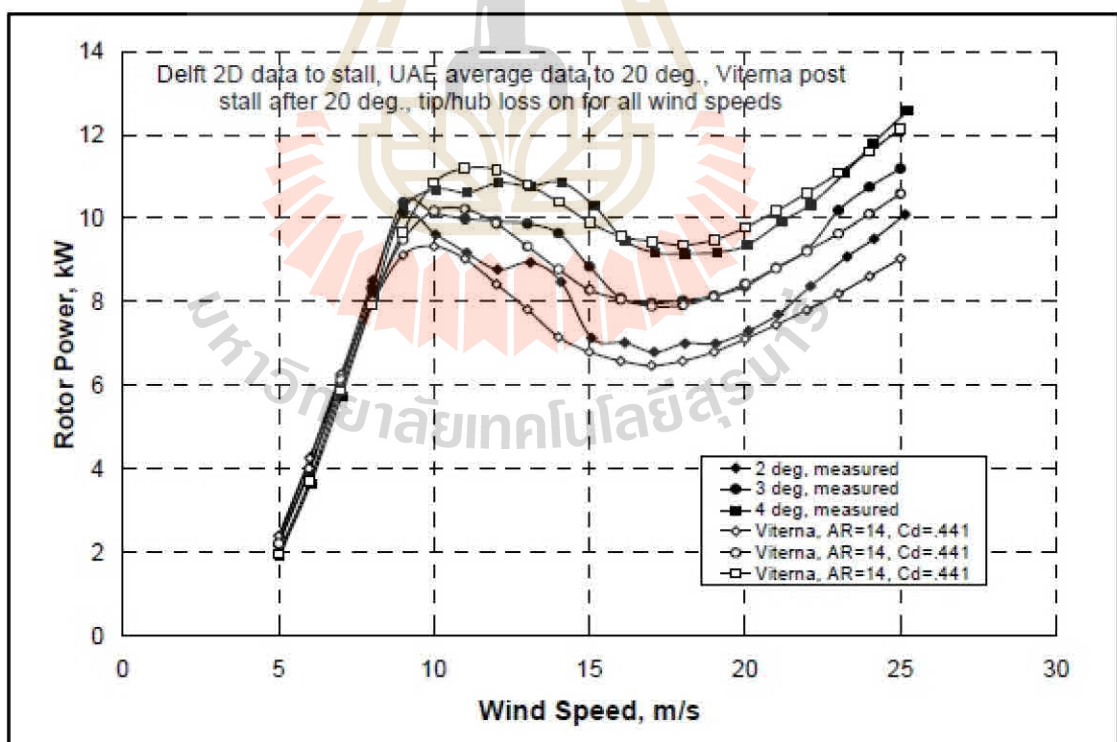
Gipe (2004) ได้อธิบายโดยย่อเกี่ยวกับระบบควบคุมการส่ายหาลม (Yaw control) ซึ่งมี 2 ลักษณะคือ Active yaw control และ Passive yaw control ระบบ Active yaw control ส่วนใหญ่มักใช้ในกังหันลมขนาดกลางและขนาดใหญ่ซึ่งควบคุมด้วยระบบควบคุม (Controller) และขับเคลื่อนด้วยฟันเฟือง (Gear) ส่วนระบบ Passive yaw control เป็นระบบที่ควบคุมการขับเคลื่อนด้วยแรงลมธรรมชาติส่วนใหญ่ใช้กับกังหันลมขนาดเล็กซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 วิธีคือ 1) การทำมุมโคน (Coning) สำหรับเฉพาะกังหันลมแบบ Downwind 2) การติดแผงหาง (Tail vanes หรือ Tail fins) สำหรับเฉพาะกังหันลมแบบ Upwind

Kim (2014) ได้กล่าวถึงปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นกับกังหันลมคือการสูญเสียพลังงานจากการเอียงศูนย์ของทิศทางความเร็วลมกับระนาบโรเตอร์ (Yaw misalignment) ทำให้ส่งผลต่อกำลังงานที่ได้จากกังหันลมลดลง ดังนั้นการมีระบบส่ายหาลม (Yaw system) จะช่วยลดปัญหาดังกล่าว เนื่องจากเป็นระบบที่ช่วยให้กังหันลมส่ายหาลมในทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งจะทำให้ได้พลังงานมากขึ้น อีกทั้งยังมีประโยชน์ของการลดภาระกรรมของเสากังหันลม (Tower) ได้อีกด้วย จากการที่แรงบิดที่บริเวณเสากังหันจะมีค่าลดลงเพราะมี Yaw bearing ดังนั้นจะเห็นว่ากังหันลมเสื่อลำแพนที่ปกติแล้วไม่มีระบบส่ายหาลม (Yaw system) จะเกิดการสูญเสียพลังงานอยู่เสมอเพราะความเร็วลมย่อมมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางตลอดเวลา ดังนั้นกังหันลมเสื่อลำแพนควรจะมีการปรับปรุงแก้ไขในจุดนี้

2.4 การศึกษากังหันลมเชิงทฤษฎี

การประเมินประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมโดยใช้ทฤษฎีนั้นเป็นวิธีที่มีประโยชน์มาก เพราะมีความประหยัดมากที่สุดเนื่องจากไม่ต้องทำการทดลองในอุโมงค์ลมซึ่งต้องใช้ต้นทุนสูง โดยทั่วไปแล้วการประเมินประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมด้วยทฤษฎีสามารถทำได้ 2 วิธีคือ ทฤษฎี BEM และวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics หรือ CFD)

Tangler and Kocurek (2005) ได้เสนอการปรับค่า C_l และ C_d ที่ได้จากการทดลองแบบ 2 มิติให้มีผลในเชิง 3 มิติ เพื่อประเมินกำลังงาน (Rotor power) กังหันลมในช่วงที่เกิดกำลังงานสูงสุด และหลังกำลังงานสูงสุดให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยใช้ทฤษฎี Blade element momentum (BEM) โดยสอบเทียบกับผลการทดลองของกังหันลม NREL Phase VI วิธีการปรับค่า C_l และ C_d คือจะใช้แบบจำลองของ Viterna and Corrigan โดยใช้ค่า $C_{l,avg}$ และ $C_{d,avg}$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่มุมปะทะ 20 องศาทำการแทนค่าในแบบจำลอง ประกอบกับเพิ่มผลของความสูญเสียที่โคนใบและปลายใบของ Prandtl รวมด้วย ผลการประเมินกำลังงานของกังหันลม (Rotor power) ด้วยวิธีนี้ปรากฏว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดีดังรูปที่ 2.17

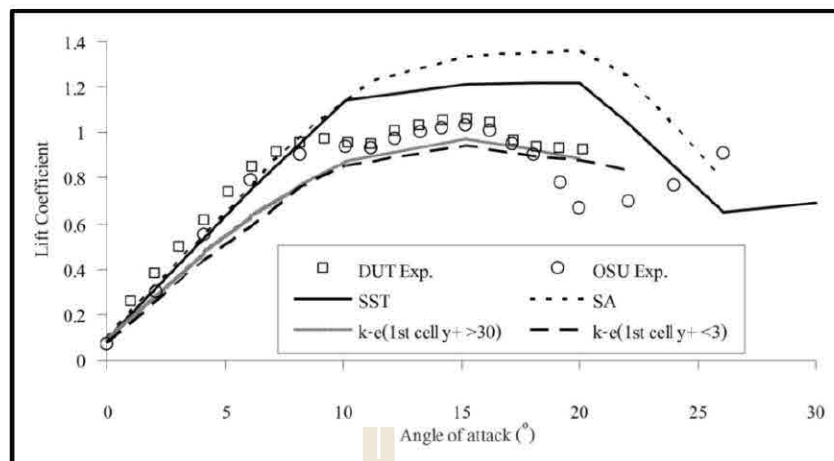


รูปที่ 2.17 กำลังงานกังหันลมที่ได้จากทฤษฎี BEM และการทดลอง (Tangler และ Kocurek, 2005)

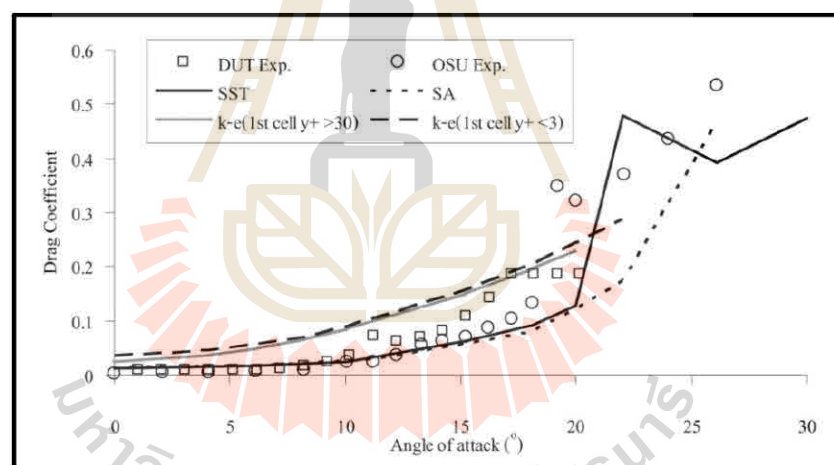
ชโลธร (2552) ได้พัฒนาโปรแกรมชื่อว่า SuWiT ซึ่งย่อมาจาก Suranaree Wind Turbine เป็นโปรแกรมที่สร้างขึ้นบนทฤษฎี BEM ร่วมกับแบบจำลองการปรับแก้ตัวแปรต่าง ๆ คือแบบจำลองการสูญเสียที่ปลายใบและโคนใบ และแบบจำลองการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์เหนี่ยวนำเชิงแกน การปรับแก้ผลของใบกั้นความยาวจำกัด และแบบจำลอง stall delay โดยสอบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองของ NREL Phase VI สำหรับข้อมูลสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านที่มุมปะทะ 35 ถึง 90 องศา ใช้การประมาณค่านอกช่วงแบบเชิงเส้น (Extrapolate) พบว่าในช่วงที่พฤติกรรมที่ยังไม่เกิดการไหลแยกหรือช่วงที่ความเร็วลมต่ำ โปรแกรม SuWiT สามารถทำนายประสิทธิภาพพลังงานกักหน้ลมได้อย่างแม่นยำ ส่วนในช่วงความเร็วลมสูงจะใช้การประมาณค่านอกช่วงแบบจำลอง Viterna and Corrigan ซึ่งใช้ข้อมูลเฉลี่ยค่าแรงยก และแรงต้านใน 3 มิติให้ผลการทำนายได้ดีที่สุด ส่วนแบบจำลอง stall delay ที่ใช้งานได้ดีคือแบบจำลองของ Snel et al.

ชโลธร (2552) ได้ศึกษาผลกระทบของโดเมนที่ส่งผลต่อคำตอบจากการคำนวณพลศาสตร์ของไหลโดยใช้โปรแกรม Fluent ในการหาผลเฉลยของสมการ Navier-Stoke โดยทำการสอบเทียบคำตอบกับข้อมูลการทดลองของกังหันลม NREL Phase II ซึ่งเป็นกังหันลม Stall-regulated ทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ 72 RPM มีรัศมีใบ 5.05 เมตร แบบ 3 ใบพัด ใช้เพนอากาศรุ่น S809 ความกว้างใบคงที่ตลอดความยาวที่ 0.457 เมตร โดยศึกษาโดเมนด้านหน้า ด้านข้างและด้านหลัง โดยกำหนด Boundary condition บริเวณด้านข้างเป็น Periodic เพื่อศึกษาใบกั้นเพียงหนึ่งใบ ผลการศึกษาพบว่า โดเมนด้านหน้าจะส่งผลต่อคำตอบมากกว่าด้านหลังและด้านข้าง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าควรกำหนดขนาดความยาวของโดเมนเมื่อวัดจากจุดศูนย์กลางของระนาบโรเตอร์ให้มีความยาวอย่างน้อยในทิศ ด้านหน้า $\times$ ด้านข้าง $\times$ ด้านหลัง เป็นอย่างน้อย $6 \times 3 \times 3$ เท่าของรัศมีใบจึงจะทำให้ขนาดของโดเมนไม่ส่งผลเสียต่อการคำนวณด้วย CFD มากนัก

ชโลธร (2552) ได้ทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วนจำลองการไหลผ่านเพนอากาศ S809 กับผลการทดลองแบบ 2 มิติของ Delft University of Technology (DUT) และ Ohio State University (OSU) ผลการทดสอบพบว่าในช่วงการไหลที่ยังไม่เกิดการไหลแยก (Separation) แบบจำลอง SA (Spalart and Allmaras) และ $k-\omega$ SST ให้ค่าแรงยกที่สอดคล้องกับการทดลองมากกว่าแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ ซึ่งให้ผลแรงยกที่ต่ำกว่าผลการทดลองมาก สำหรับแรงต้านแบบจำลอง $k-\omega$ SST และ SA ให้ค่าแรงต้านที่สอดคล้องกับผลการทดลองค่อนข้างดีโดยต่ำกว่าผลการทดลองเล็กน้อยในขณะที่แบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ ให้ค่าแรงต้านที่สูงกว่าผลการทดลองมาก ในช่วงที่มีการไหลแยกพบว่าแบบจำลอง $k-\omega$ SST และ SA ให้ผลของแรงยกที่สูงกว่าการทดลองมากซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่แม่นยำของแบบจำลองเมื่อเกิดการไหลแยก ในส่วนของแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ ให้ผลของแรงยกที่ต่ำกว่าผลการทดลองดังรูปที่ 2.18-2.19



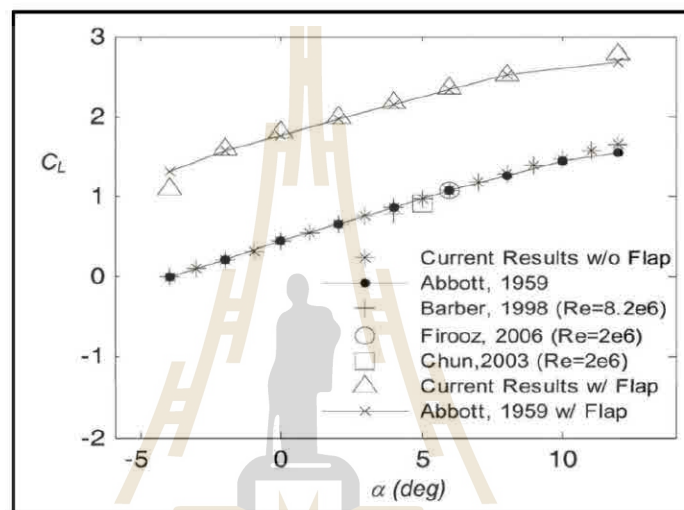
รูปที่ 2.18 ผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงยกจากการคำนวณด้วย CFD กับการทดลอง 2 มิติ (ชโลธร, 2552)



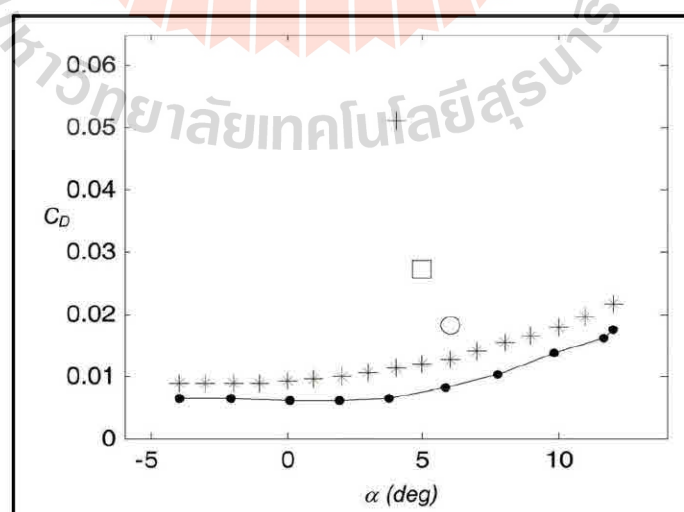
รูปที่ 2.19 ผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการคำนวณด้วย CFD กับการทดลอง 2 มิติ (ชโลธร, 2552)

Ockfen และ Matveev (2009) ได้วิเคราะห์การไหลผ่านแพนอากาศ NACA 4412 ในระบบ 2 มิติ ด้วย CFD ใน 2 รูปแบบคือ รูปแบบที่ทำการ Flap ที่บริเวณ Trailing edge และรูปแบบที่ไม่ได้ทำการ Flap ซึ่งประเมินภายใต้สภาวะคงที่ (Steady state) และพิจารณาของไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow) การจำลองเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Spalart-Allmaras (SA) เพื่อใช้ในการแก้สมการ Navier-Stokes โดยใช้โปรแกรม Ansys Fluent โดยจำลองการไหลที่เรโนลด์

นัมเบอร์ประมาณ 1×10^{-6} และได้ทำการสอบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองและเทียบกับผลในงานวิจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย สำหรับการสร้างโดเมนของการสร้างกริดมีดังนี้ บริเวณด้านหน้าของแพนอากาศจะให้ความยาวโดเมนเท่ากับ 5 เท่าของความยาวคอร์ด บริเวณด้านหลังจะให้ความยาวโดเมนเท่ากับ 12 เท่าของความยาวคอร์ด ส่วนบริเวณด้านบนและด้านล่างจะให้ความยาวโดเมนเท่ากับ 6 เท่าของความยาวคอร์ด ผลการคำนวณด้วย CFD นี้แสดงผลอยู่ในรูปสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้าน ซึ่งผลที่ได้ให้แนวโน้มที่ใกล้เคียงกับการทดลองและงานวิจัยอื่น ๆ ดังรูปที่ 2.20-2.21

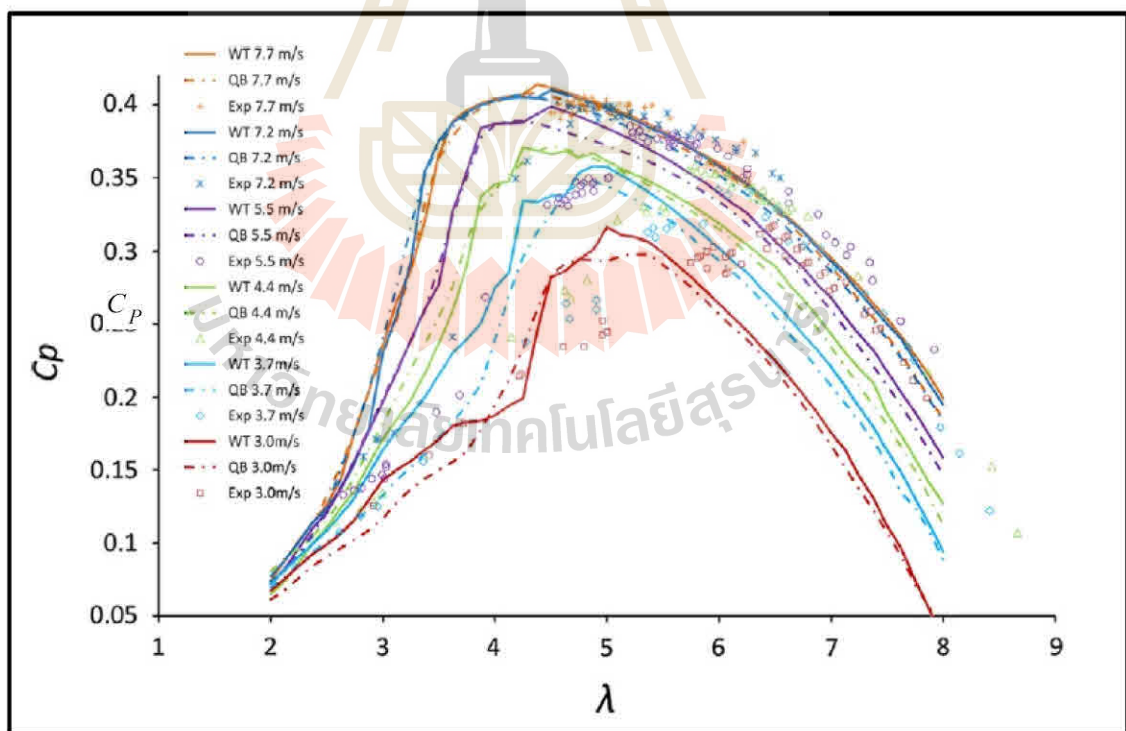


รูปที่ 2.20 ผลการสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_L) จาก CFD (Ockfen และ Matveev, 2009)



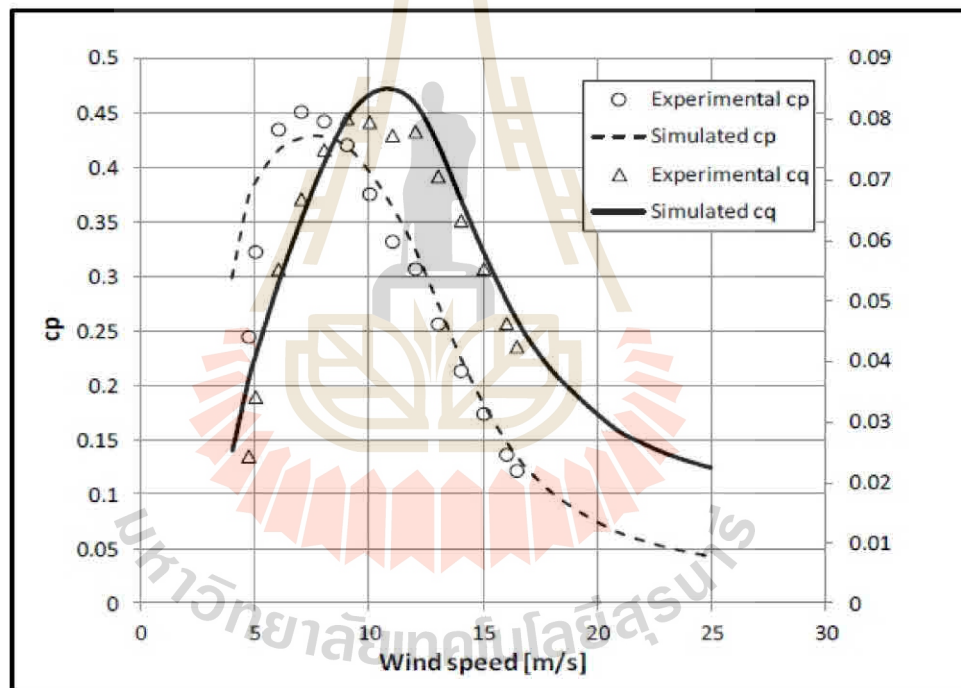
รูปที่ 2.21 ผลการสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) จาก CFD (Ockfen และ Matveev, 2009)

Monteiro et al. (2013) ได้ทำการทดสอบกังหันลมขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร โดยใช้ใบกังหันลมที่ทำจากวัสดุไม้ซึ่งเหลาให้เป็นแพนอากาศ (Airfoil) แบบ Aquila ซึ่งแพนอากาศนี้พัฒนาโดย University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC) หุ่นจำลองกังหันลมดังกล่าวมีจำนวน 3 ใบพัด ซึ่งทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลมและทดสอบที่ความเร็วลมตั้งแต่ 3.0-7.7 เมตร/วินาที นอกจากนี้ยังได้ประเมินสัมประสิทธิ์กำลังกังหันลม (Power coefficient, C_P) โดยใช้ทฤษฎี BEM ทั้งนี้ได้เพิ่มแบบจำลองการสูญเสียปลายใบและโคนใบของ Prandtl (1927) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d) รวมถึงความยาวคอร์ด (Chord length, c) หาได้จากโปรแกรม XFOIL จากนั้นทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมที่ได้จากการทดลองและทฤษฎี BEM ผลที่ได้พบว่าในย่านความเร็วลมต่ำสัมประสิทธิ์กำลังที่ประเมินด้วยทฤษฎี BEM ยังไม่สอดคล้องกับผลการทดลองมากนัก แต่เมื่อทดสอบที่ความเร็วลมสูงขึ้นโดยเฉพาะในช่วง 7.2-7.7 เมตร/วินาที พบว่าการการประเมินด้วยทฤษฎี BEM เริ่มมีความสอดคล้องกับผลการทดลองมากขึ้น ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด ($C_{P,max}$) ที่ได้จากการทดลองและทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 40% ดังที่แสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 สัมประสิทธิ์กำลัง (C_P) จากทฤษฎี BEM และการทดลองของ Monteiro et al. (2013)

Lanzafame et al. (2015) ได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อการประเมินค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) กังหันลมแกนอนด้วยทฤษฎี BEM โดยพิจารณาแรงในแนวรัศมี (Centrifugal force) และแรงในแนวสัมผัส (Coriolis force) ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้เกิดพฤติกรรม Stall delay ซึ่งค่าแรงยกใน 3 มิติ จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงยกที่ทดสอบในระบบ 2 มิติ (คือการรวมผลของการไหลแบบ 3 มิติ) จึงนำเสนอแบบจำลองเพื่อปรับค่าแรงยกมีความสัมพันธ์คือ $C_L = 2C_L|_{\alpha=45^\circ} \sin \alpha \cos \alpha$ เรียกว่า Post-stall model รวมถึงผลกระทบจาก Tip-loss โดยใช้แบบจำลองการสูญเสียปลายใบและโคนใบของ Prandtl (1927) ผลการประเมินด้วยโปรแกรม BEM ดังกล่าวเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Risø test turbine LM 8.2 ดังที่แสดงในรูปที่ 2.23 พบว่าให้ผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ใกล้เคียงผลการทดลองเป็นอย่างดี



รูปที่ 2.23 ผลการทำนายค่าสัมประสิทธิ์กำลังกังหันลมด้วยทฤษฎี BEM (Lanzafame et al., 2015)

2.5 การประเมินสถิติลม

Exell (1981) ได้ศึกษาข้อมูลทางสถิติลมที่ระยะความสูง 10 เมตรทุกภูมิภาคในประเทศไทย โดยเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 10 ปีคือในช่วง ค.ศ.1951-1961 ข้อมูลโดยสรุปจะแสดงอยู่ในรูปสมการไวบูลล์ (Weibull function) โดยค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (k) จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1.0-2.0 และค่าพารามิเตอร์สเกล (c) จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1.0-6.0 เมตรต่อวินาที ผลการศึกษาพบว่าไม่ได้มีเพียง

จังหวัดที่มีพื้นที่ติดทะเลเท่านั้นที่มีศักยภาพลมเพียงพอในการใช้กังหันลมแบบความเร็วลมต่ำ แต่ยังมีหลายพื้นที่ในประเทศไทยที่มีศักยภาพลมเพียงพอ ทั้งนี้จะแสดงตัวอย่างพอสังเขป 2 จังหวัดเท่านั้นคือจังหวัดนครราชสีมาและจังหวัดปราจีนบุรีดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์รูปร่าง (k) และพารามิเตอร์สเกล (c) ของจังหวัดนครราชสีมาและปราจีนบุรี

จังหวัด	ก.พ.-เม.ย.		พ.ค.-ก.ค.		ส.ค.-ต.ค.		พ.ย.-ม.ค.	
	k	c	k	c	k	c	k	c
นครราชสีมา	1.3	2.6	1.4	3.1	1.6	2.9	1.6	3.0
ปราจีนบุรี	2.1	4.0	2.0	3.5	2.0	3.5	2.1	4.6

วิกัندا และคณะ (2552) ได้ประเมินงานรายปีสูงสุดของกังหันลม NREL Phase VI โดยใช้สถิติลมจากสมการแจกแจงของไวบูลล์ (Weibull function) และเรย์เลย์ (Reyleigh function) โดยใช้ข้อมูลสถิติลมใน 3 จังหวัดคือ ระยอง ชลบุรี และนครศรีธรรมราช ร่วมกับการประเมินกำลังงานกังหันลมด้วยทฤษฎี BEM และเปรียบเทียบกับการวัดจริง ผลการวิเคราะห์พบว่า การประเมินงานรายปีด้วยสมการแจกแจงของไวบูลล์ให้ความแม่นยำสูงกว่าการใช้สมการของเรย์เลย์

Oner et al. (2013) ได้ประเมินความหนาแน่นกำลังงานลม (Wind power density) ในเมือง Canakkale-Intepe ประเทศตุรกี โดยใช้สมการแจกแจงความถี่ของไวบูลล์ เรย์เลย์ และการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution function) เปรียบเทียบกับข้อมูลสถิติลมจากการวัดที่ระยะความสูง 1.0 เมตร-200 เมตรในช่วงปี ค.ศ. 2009-2010 ผลที่ได้คือสมการแจกแจงความถี่ของไวบูลล์และเรย์เลย์ให้ความสอดคล้องกับผลจากการวัดเป็นอย่างดี แต่สมการแจกแจงความถี่แบบไวบูลล์จะให้ความใกล้เคียงมากที่สุด

วิกัندا (2556) ได้ทำการออกแบบกังหันลมโดยวิเคราะห์ร่วมกับสถิติลมตามฤดูกาลโดยใช้สถิติลมในรูปแบบสมการไวบูลล์ (Weibull function) ซึ่งอยู่ในรูปการแจกแจงความถี่หรือความน่าจะเป็นของความเร็วลมต่าง ๆ ในแต่ละพื้นที่ ผลลัพธ์ที่ได้คือกังหันลมผลิตงานรายปีได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับกังหันลมที่ผ่านการออกแบบโดยวิเคราะห์เพียงสถิติลมเดียวตลอดทั้งปี

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ประสิทธิภาพพลังงานกังหันลม

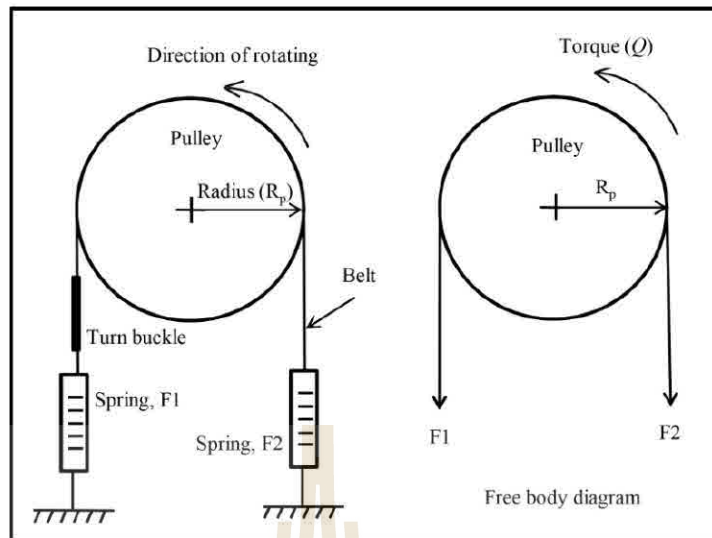
ประสิทธิภาพกังหันลม (Wind turbine efficiency) แท้จริงแล้วเป็นประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ซึ่งมักจะทำให้อยู่ในรูปสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient, C_p) โดยมีนิยามคือ กำลังงานเชิงกลที่ได้จากกังหันลม (Wind turbine power, P_{tur}) ต่อกำลังงานลมที่เข้าสู่โรเตอร์ (Wind power, P_w) ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ของกังหันลมจึงเป็นตัวแปรไร้มิติซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.1 และหากนำค่าสัมประสิทธิ์กำลังดังกล่าวนี้คูณด้วย 100% ($C_p \times 100\%$) ก็จะมีความหมายในเชิงประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมนั่นเอง

$$C_p = \frac{P_{tur}}{P_w} = \frac{Q \cdot \Omega}{0.5 \rho A U_0^3} \quad (3.1)$$

กำลังงานเชิงกลที่ได้จากกังหันลม คือ แรงบิด (Q) คูณกับความเร็worอบ (Ω) ซึ่งจากสมการที่ 3.1 จะเห็นว่ามี 3 ตัวแปรสำคัญที่ต้องวัดค่าจึงจะสามารถหาค่าประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมได้ คือ แรงบิด ความเร็worอบ และความเร็วมกระแสน้ำ (U_0) การวัดความเร็worอบและความเร็วมสามารถทำได้ไม่ยากนักโดยอาจใช้เซนเซอร์ (Speed sensor) และแอนนิโมมิเตอร์ (Anemometer) ตามลำดับ แต่สำหรับแรงบิดอาจต้องวัดค่าโดยอ้อมด้วยการเบรก (Brake) ที่เพลากังหันแล้วอ่านค่าแรงที่เกิดขึ้นจากสปริงซึ่งมีอยู่ 2 แรงด้วยกันคือ F_1 และ F_2 ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงแผนภาพ (Free body diagram) ของแรงที่เกิดขึ้นจากการเบรกที่พูลล์ (Pulley) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลสามารถหาแรงบิดได้โดยใช้กฎข้อที่ 1 ของนิวตันดังสมการที่ 3.2

$$Q = (F_2 - F_1) \cdot R_p \quad (3.2)$$

โดยที่ F_1 และ F_2 คือแรงดึงในสายพาน (Belt) ซึ่งเกิดจากการเบรกที่ตำแหน่งพูลล์ (Pulley) โดยในที่นี้จะใช้วิธีการเบรกกังหันลมด้วยการติดตั้ง Turn buckle เพื่อใช้ในการดึงค่าเพิ่ม-ลดแรงต้านที่ต้องการในการเบรกกังหันลม ส่วนค่า R_p คือรัศมีของพูลล์ (Pulley)



รูปที่ 3.1 แผนภาพการเบรกเพลากังหัน

สัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) จะแปรผันกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio, λ) ดังนั้นในการนำเสนอค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม (หรือจะประสิทธิภาพพลังงานก็ตาม) จึงมักแสดงเทียบกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบเสมอ ซึ่งนิยามของอัตราส่วนความเร็วปลายใบก็คือ สัดส่วนของความเร็วปลายใบกับความเร็วลมกระแสอิสระซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติดังสมการที่ 3.3

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R}{U_0} \quad (3.3)$$

โดยที่ Ω คือ ความเร็วรอบ (Rotor speed) R คือ รัศมีโรเตอร์ (Rotor radius) และ U_0 คือความเร็วลมกระแสอิสระ (Free stream velocity)

3.2 ทฤษฎี Blade element momentum (BEM)

การคำนวณแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนใบกังหันลมแกนนอนจะใช้พื้นฐานของทฤษฎีโมเมนตัม โดยพิจารณาการไหลผ่าน Actuator disk แบบวงแหวน (Tubular Actuator disk) จะทำให้ได้แรงตามแนวแกน (Axial force หรือ Thrust force) ของวงแหวนนั้นซึ่งเกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงเส้น (Linear momentum) รวมถึงการพิจารณาการหมุนวนของ Wake ที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลัง Actuator disk ที่พิจารณาให้เป็นวงแหวนเช่นเดียวกัน จะทำให้ได้แรงบิดซึ่งเกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงมุม อีกทฤษฎีหนึ่งที่ใช้ร่วมคือ ทฤษฎี Blade element เป็นการพิจารณา

แรงยกและแรงต้านที่กระทำกับแผ่นอากาศใน 2 มิติ การเกิดมุมความเร็วลมสัมพันธ์ มุมปะทะที่ กระแสความเร็วลมกระทำกับใบกังหัน โดยแบ่งความยาวของใบกังหันเป็นเอลิเมนต์ย่อย เมื่อนำทั้งสองทฤษฎีมาเชื่อมความสัมพันธ์กันจะเรียกว่าทฤษฎี Blade element momentum หรือ ทฤษฎี BEM ซึ่งสามารถนำไปใช้ประเมินแรงต่าง ๆ หรือประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมได้

3.2.1 Momentum theory

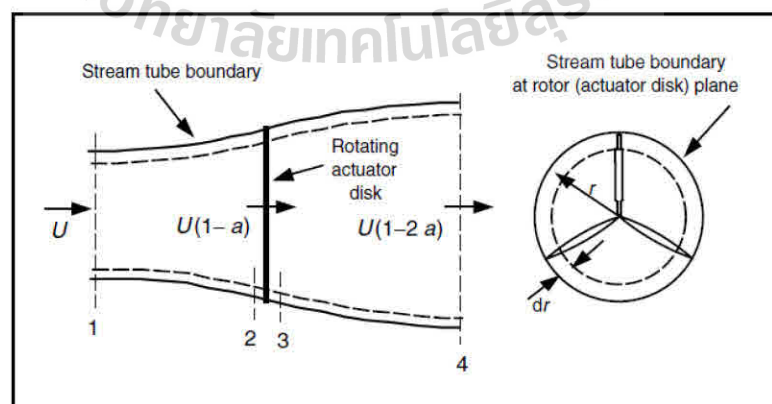
จากการวิเคราะห์สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในแนวแกนย่านวงแหวนดังรูปที่ 3.2 จะได้ แรงในแนวแกน (Thrust force) ในรูปอนุพันธ์ (Manwell et al., 2009) ดังสมการ 3.4

$$dT = 4a(1-a)\rho U_0^2 \pi r dr \quad (3.4)$$

เมื่อ a คือสัมประสิทธิ์เหนี่ยวนำเชิงแกน (Axial induction factor) ซึ่งมีนิยามคือ อัตราส่วนของ ความเร็วที่ลดลงที่ระนาบโรเตอร์ต่อความเร็วลมกระแสอิสระคือ $a = (U_0 - U_2) / U_0$ ตัวแปร r คือ รัศมีกังหัน ณ จุดใด ๆ ρ คือความหนาแน่นของอากาศ U_0 คือ ความเร็วลมกระแสอิสระ และ U_2 คือความเร็วที่ระนาบของโรเตอร์ จากการวิเคราะห์สมการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมย่านวงแหวนจะ ได้แรงบิด (Manwell et al., 2009) ดังสมการ 3.5

$$dQ = 4a'(1-a)\rho U_0 \pi r^3 \Omega dr \quad (3.5)$$

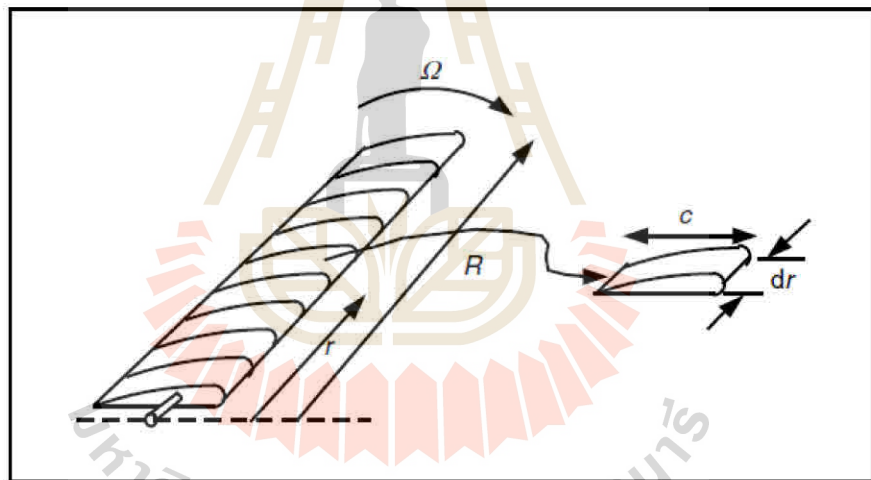
เมื่อ a' คือตัวสัมประสิทธิ์เหนี่ยวนำเชิงมุม (Angular induction factor) ซึ่งนิยามว่า $a' = w / r\Omega$ โดย w คือความเร็วของ Wake ที่ใบกังหัน และ Ω คือความเร็วเชิงมุมของใบกังหัน



รูปที่ 3.2 การไหลผ่าน Actuator disk แบบวงแหวน (Tubular Actuator disk) (Manwell et al., 2009)

3.2.2 Blade element theory

เป็นทฤษฎีที่พิจารณาแรงที่เกิดขึ้นบนใบกังหันในลักษณะสองมิติ โดยแบ่งใบกังหันออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยตามความยาวใบกังหันดังรูปที่ 3.3 แรงดังกล่าวประกอบด้วยแรงยก (Lift force) และแรงต้าน (Drag force) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบ (Rotor speed) และความเร็วลมสัมพัทธ์ (Relative wind velocity, U_{rel}) ซึ่งนำไปสู่แรงบิดและแรงในแนวแกนของเอลิเมนต์ย่อยที่พิจารณาดังรูปที่ 3.4 สำหรับความเร็วในแนวรัศมีจะยังไม่นำมาพิจารณา เมื่อพิจารณาใบกังหันในแต่ละเอลิเมนต์พบว่าความเร็วลมสัมพัทธ์ (U_{rel}) เกิดจาก 2 ความเร็วประกอบกันคือ ความเร็วในแนวแกน $U_2 = U_0(1-a)$ ซึ่งอยู่บริเวณใกล้ๆ กับระนาบโรเตอร์ และความเร็วในแนวสัมผัสหรือแนวการหมุนซึ่งมีค่าเท่ากับ $r\Omega(1+a')$ โดยที่พจน์ $r\Omega$ คือความเร็วในแนวสัมผัส และ a' คือสัมประสิทธิ์เหนี่ยวนำเชิงมุม (Angular induction factor) ดังนั้นความเร็วลมสัมพัทธ์ (U_{rel}) จึงมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.6 และจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปสมการที่ 3.7



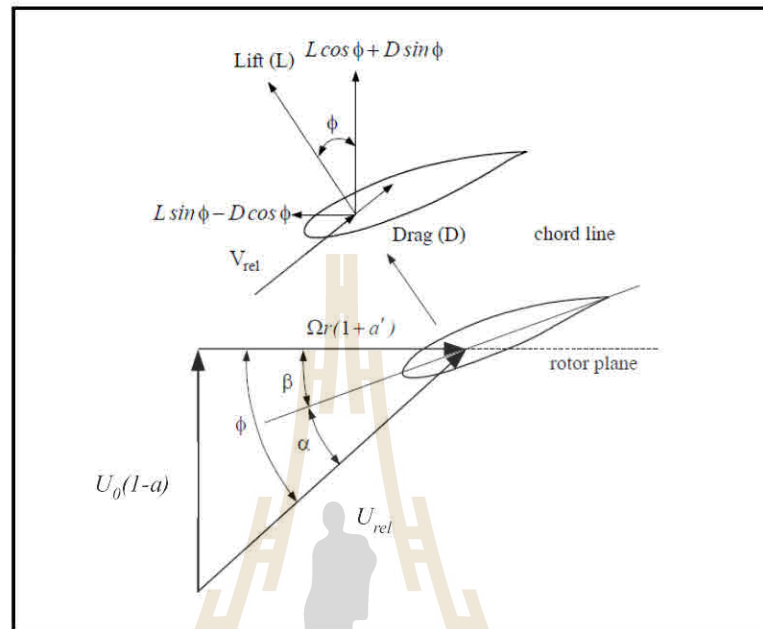
รูปที่ 3.3 การแบ่งเอลิเมนต์ (Manwell et al., 2009)

เมื่อพิจารณาลักษณะเวกเตอร์ความเร็วในรูปที่ 3.4 จะได้ว่า

$$U_{rel} = \frac{U_0(1-a)}{\sin \phi} = \frac{r\Omega(1+a')}{\cos \phi} \quad (3.6)$$

$$\tan \phi = \frac{U_0(1-a)}{r\Omega(1+a')} = \frac{(1-a)}{\lambda_r(1+a')} \quad (3.7)$$

เมื่อมุม ϕ คือมุมความเร็วลมสัมพัทธ์ (Relative flow angle) ซึ่งมีค่าเท่ากับมุมปะทะ (α) รวมกับมุมพิช (β) ดังนั้น $\phi = \alpha + \beta$ ส่วนค่า λ_r คือ Local tip speed ratio ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\Omega r / U_0$



รูปที่ 3.4 ความเร็ว และแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดแพนอากาศของกังหันลม

สำหรับแรงยก (Lift force) และแรงต้าน (Drag force) ในแต่ละเอลิเมนต์ย่อยของใบกังหันจะมีทิศทางและขนาดกับความเร็วมัถัซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

$$dL = \frac{1}{2} C_L \rho U_{rel}^2 c dr \quad (3.8)$$

$$dD = \frac{1}{2} C_D \rho U_{rel}^2 c dr \quad (3.9)$$

เมื่อ C_L และ C_D คือสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านตามลำดับ ส่วนค่า c คือความยาวคอร์ด (Chord length) และ dr คือ ความยาวเอลิเมนต์ย่อยของใบกังหัน จากสมการที่ 3.8 และ 3.9 และการแตกแรงตามเวกเตอร์ในรูปที่ 3.4 ดังนั้นหากกังหันลมมีจำนวนใบเท่ากับ B จะทำให้ได้แรงในแนวแกน และแรงบิดของแต่ละเอลิเมนต์เป็นไปตามสมการที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ

$$dT = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) c dr \quad (3.10)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) c r dr \quad (3.11)$$

3.2.3 Blade element momentum theory

เป็นการนำเอาผลของแรงใน Momentum theory และ Blade element theory มาเทียบค่ากัน $dT|_{BET} = dT|_{MT}$ และ $dQ|_{BET} = dQ|_{MT}$ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$B \frac{1}{2} \rho \left[\frac{U_0 (1-a)}{\sin \phi} \right]^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) c dr = 4a(1-a) \rho U_0^2 \pi r dr \quad (3.12)$$

$$B \frac{1}{2} \rho \left[\frac{r \Omega (1-a')}{\cos \phi} \right]^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) c r dr = 4a'(1-a) \rho U_0^3 \pi r^3 \Omega dr \quad (3.13)$$

จากสมการที่ 3.12 และ 3.13 สามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปที่สะดวกต่อการคำนวณได้ดังนี้

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma' C_n} + 1} \quad (3.14)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma' C_t} - 1} \quad (3.15)$$

เมื่อ $\sigma' = Bc / 2\pi r$ คือ Local solidity สัมประสิทธิ์ C_n คือสัมประสิทธิ์ของแรงในทิศตั้งฉากกับโรเตอร์ซึ่ง $C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi$ และสัมประสิทธิ์ C_t คือ สัมประสิทธิ์ของแรงในแนวระนาบโรเตอร์ซึ่ง $C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi$ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์กำลังสามารถคำนวณได้จาก

$$C_P = \frac{P_{tur}}{P_w} = \frac{\int_0^R \Omega dQ}{0.5 \rho \pi R^2 U_0^3} \quad (3.16)$$

กระบวนการในการหาคำตอบสามารถทำได้ด้วยวิธีการทำซ้ำ (Iteration) สมการหลักที่ใช้คำนวณมี 3 สมการด้วยกันคือ (3.7) (3.14) และ (3.15) โดยมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 3 ตัวแปรคือ ϕ a และ a' ทั้งนี้จะต้องทราบข้อมูลกั้นหุ้มประกอบด้วย มุมบิด (Twist angle) ซึ่งก็คือมุมพิช (Pitch angle) ในแต่ละเอลิเมนต์ ความยาวคอร์ด (Chord length) จำนวนใบ (B) หน้าตัดใบกั้นหุ้ม และค่า C_l และ C_d ของใบกั้นหุ้ม รวมถึงความเร็วรอบ (Ω) และความเร็วลมกระแสอิสระ (U_0) จากนั้นทำการแบ่งการคำนวณแรงต่าง ๆ ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยและทำการแก้สมการด้วยวิธีการดังนี้

- 1) เดาค่า a และ a'
- 2) คำนวณมุมความเร็วลมสัมพัทธ์ ϕ จากสมการ 3.7
- 3) คำนวณมุมปะทะ $\alpha = \phi - \beta$ และนำค่า α ไปหาค่า C_l และ C_d
- 4) หาค่า a และ a' จากสมการ 3.14 และ 3.15
- 5) กลับไปคำนวณซ้ำที่ข้อ 2 โดยใช้ค่า a และ a' ค่าใหม่ และคำนวณซ้ำไปเรื่อย ๆ

จนกว่าตัวแปรอิสระทั้งสามตัวจะลู่เข้า (Convergence)

กระบวนการคำนวณนี้สามารถนำไปเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ ทั้งนี้จะต้องมีความสัมพันธ์ของ C_l และ C_d ของแผนอากาศซึ่งเป็นฟังก์ชันของ α และ Re ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม เมื่อได้ค่า ϕ a และ a' ตลอดใบแล้วจึงทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกั้นหุ้ม (C_p) ตามสมการ 3.16 (ชโลธร, 2552)

3.3 การปรับปรุงทฤษฎี BEM

เนื่องจากทฤษฎี BEM ดังที่กล่าวไปแล้วนั้นอยู่บนพื้นฐานการพิจารณาในระบบ 2 มิติ ซึ่งต่างจากการไหลผ่านกั้นหุ้มซึ่งเป็น 3 มิติ และทฤษฎีที่สร้างขึ้นมีสมมุติฐานเชิงอุดมคติหลายประการ จึงทำให้การประเมินสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) หรือประสิทธิภาพพลังงานกั้นหุ้มยังไม่มี ความแม่นยำเพียงพอ ดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพพลังงานด้วยทฤษฎี BEM จะต้องมีการปรับแก้ไข โดยการเพิ่มตัวแปรบางอย่างร่วมเข้าไปด้วยเสมอเพื่อให้ผลการประเมินมีความแม่นยำมากขึ้น

3.3.1 การปรับแก้การสูญเสียที่ปลายใบและโคนใบ

จากใบกั้นหุ้มที่มีความยาวจำกัดดังนั้นจะเกิดการสูญเสียพลังงานที่บริเวณ โคนใบและปลายใบจากการที่กระแสนอากาศเกิดการไหลล้นจากด้านความดันสูงไปสู่ด้านความดันต่ำ ดังนั้น จะต้องมีการปรับแก้โดยการคูณสัมประสิทธิ์ F ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ที่ชดเชยการสูญเสียพลังงานที่ โคนใบและปลายใบเข้าไปในสมการ 3.10 และ 3.11 ซึ่งจะส่งผลต่อสมการ BEM ในสมการที่ 3.14 และ 3.15 ซึ่งสัมประสิทธิ์ F สามารถหาได้จากแบบจำลองหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมนั้นคือแบบจำลองของ Prandtl (1927) (ชโลธร, 2552) ซึ่งแสดงอยู่ในสมการที่ 3.17 และ 3.18 ตามลำดับ

$$F_{tip} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left[-\frac{N(R-r)}{2r \sin \phi} \right] \right) \quad (3.17)$$

$$F_{hub} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left[-\frac{N(r-R_{hub})}{2r \sin \phi} \right] \right) \quad (3.18)$$

โดยที่ค่า F_{tip} จะเท่ากับ 1 ที่โคนใบและมีค่าเท่ากับ 0 ที่ปลายใบ ส่วน F_{hub} จะตรงข้าม เมื่อคิดการสูญเสียรวมตั้งแต่โคนใบจนถึงปลายใบจะแสดงอยู่ในรูปของค่า F ซึ่งแสดงอยู่ในสมการ 3.19

$$F = F_{tip} F_{hub} \quad (3.19)$$

จากผลของการสูญเสียปลายใบและโคนใบจะทำให้สมการ 3.14 และ 3.15 เปลี่ยนแปลงไปเป็นสมการที่ 3.20 และ 3.21 ตามลำดับ

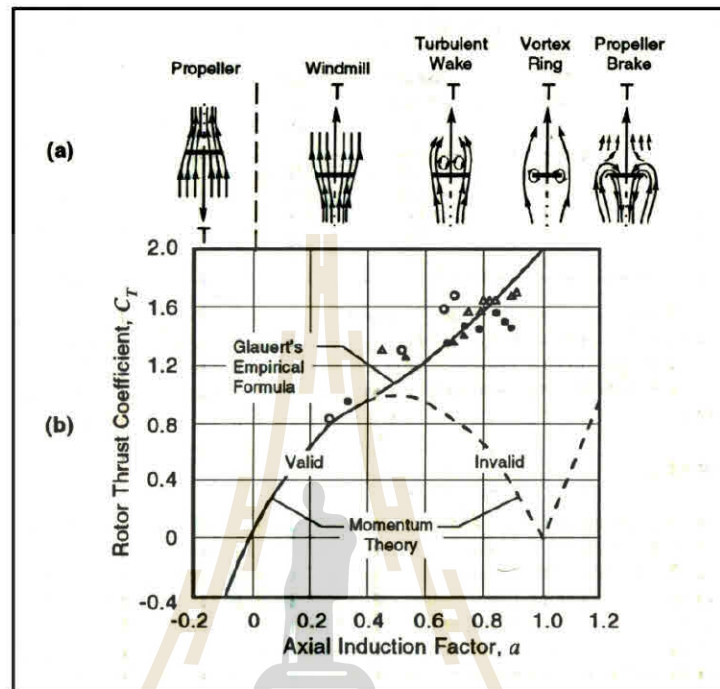
$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma' C_n} + 1} \quad (3.20)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma' C_t} - 1} \quad (3.21)$$

3.3.2 การปรับค่าสัมประสิทธิ์เหนี่ยวนำเชิงแกน

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์เหนี่ยวนำเชิงแกน (Axial induction factor, a) จากทฤษฎีโมเมนตัมไม่สอดคล้องกับผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์แรงผลัก (Trust force coefficient) เมื่อค่า a มีค่ามากกว่าประมาณ 0.4-0.5 ดังผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 3.5 ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้ค่า a ใหม่ ซึ่งมีผู้เสนอแบบจำลองการปรับค่าไว้หลายแบบจำลองด้วยกัน (บางครั้งเรียกแบบจำลองพวกนี้ว่า “Brake state model”) เช่น ความสัมพันธ์ของ Buhl (2005) ที่พัฒนาจากแบบจำลองของ Glauert (1976) (ชโลธร, 2552) ดังสมการที่ 3.22

$$a = \frac{18F - 20 - 3\sqrt{C_T(50 - 36F) + 12F(3F - 4)}}{36F - 50}; \quad a > a_c \quad (3.22)$$



รูปที่ 3.5 สัมประสิทธิ์แรงผลักดันจากทฤษฎีและการทดลอง (Spera, 1998)

3.4 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)

การคำนวณพลศาสตร์ของไหลเป็นการวิเคราะห์การไหลเชิงอนุพันธ์โดยใช้สมการควบคุมจากทฤษฎีการอนุรักษ์โมเมนตัมหรือที่นิยมเรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตก (Navier-Stokes Equations) และสมการอนุรักษ์มวลหรืออาจมีสมการอนุรักษ์พลังงานร่วมด้วยหากมีอิทธิพลด้านความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องผ่านปริมาตรควบคุม ปัจจุบันยังไม่สามารถหาผลเฉลยแบบแม่นยำตรง (Exact solution) ของสมการนี้ได้ จึงนิยมแก้ปัญหาแบบการประมาณการด้วยระบบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) เท่านั้น โดยการใช้ของคอมพิวเตอร์ ในระบบพิกัดฉาก (Rectangular coordinate system) สมการนาเวียร์-สโตก จะแสดงอยู่ในรูปสมการที่ 3.23 (ทวิช, 2553)

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V} \vec{V} = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (3.23)$$

โดยที่ $\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} \vec{v}$ คือโมเมนตัมสุทธิที่ไหลเข้า-ออกผ่านปริมาตรควบคุม $-\vec{\nabla} P$ คือ แรงดันที่ผิวปริมาตรควบคุม $\mu \nabla^2 \vec{v}$ หรือบางครั้งใช้สัญลักษณ์ τ_{ij} คือความเค้นเฉือนและความเค้นดัดงอที่ผิวปริมาตรควบคุมเป็นสมการความสัมพันธ์ในรูปเทนเซอร์ (Tensor) ซึ่งมักจะกำหนดให้เป็นการไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian) $\rho \vec{g}$ คือ แรงโน้มถ่วงซึ่งกระทำต่อมวลในปริมาตรควบคุม ส่วนสมการอนุรักษ์มวลแสดงอยู่ในสมการที่ 3.24

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (3.24)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการอนุรักษ์มวลถือเป็น 2 สมการหลักที่ควบคุมพฤติกรรมการไหล หากไม่มีอิทธิพลเรื่องความร้อนมาเกี่ยวข้องมากนัก อย่างไรก็ตามการไหลแทบทุกอย่างมักจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นนี่เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลปัจจุบันมีผู้คิดค้นพัฒนาแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence models) ไว้เป็นจำนวนมากโดยแบบจำลองที่นิยมใช้สำหรับงานด้านอากาศยานศาสตร์ เช่น Spalart-Allmaras one-equation model (SA), Wilcox $k - \omega$ model, และ Menter's shear stress transport (SST) $k - \omega$ model เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Shear stress transport (SST) $k - \omega$ ในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเพื่อหาค่า C_l และ C_d ของใบกังหันลมเสื้อลำแพน

3.5 การคำนวณงานรายปี

งานรายปี (Annual energy production, AEP) ของกังหันลมสามารถประเมินได้โดยใช้ผลการทดลองในรูปของกราฟสัมประสิทธิ์กำลัง ($C_p - \lambda$ curve) ร่วมกับสถิติลมซึ่งทำการ Normalize ให้อยู่ในรูปความถี่ (Probability density function) ทั้งนี้ฟังก์ชันไวบูลล์ (Weibull function) และฟังก์ชันเรเลย์ (Rayleigh function) เป็น 2 ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับสถิติลมที่แสดงอยู่ในรูปความถี่ซึ่งนิยมใช้ในการนำเสนอสถิติลมในปัจจุบัน สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ฟังก์ชันไวบูลล์เท่านั้นเนื่องจากมีความสอดคล้องกับสถิติลมที่ดีกว่า (วิกันดา และคณะ., 2551) ซึ่งสมการการแจกแจงความถี่ของไวบูลล์หรือเรียกย่อ ๆ ว่าฟังก์ชันไวบูลล์ (Weibull function) แสดงดังสมการที่ 3.25 (Manwell et al., 2009)

$$p(U) = (k/c)(U/c)^{k-1} \exp\left[-(U/c)^k\right] \quad (3.25)$$

โดยที่ $p(U)$ คือ Probability density function ค่า k คือพารามิเตอร์รูปร่าง (Shape parameter) และค่า c คือพารามิเตอร์สเกล (Scale parameter) ซึ่งค่า k และ c ได้จากข้อมูลทางสถิติลมที่ได้จากการวัดจากสมการที่ 3.25 จะนำไปสู่การคำนวณค่าความถี่ความหนาแน่นกำลังงานลม (Wind power density Frequency, WPDF) ต่อหน่วยพื้นที่จากสมการ 3.26 (Oner et al., 2013)

$$WPDF = p(U) \cdot \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (3.26)$$

WPDF เป็นตัวแปรที่ทำให้ทราบถึงความหนาแน่นกำลังงานลม (Power density) สูงสุดในช่วงสถิติลมที่ทำการวัด ดังนั้นจึงนิยมใช้ในการหาค่าความเร็วลมออกแบบ (Designed wind velocity) จากสมการที่ 3.25 และกราฟสัมประสิทธิ์กำลัง ($C_p - \lambda$ curve) จะนำไปสู่การคำนวณหางานรายปี (Annual energy production, AEP) ได้โดยใช้สมการที่ 3.27 (วิกิตนดา, 2556)

$$AEP = H \int_U p(U) \cdot P_{tur} dU \quad (3.27)$$

โดยที่ AEP คืองานรายปี H คือจำนวนชั่วโมงต่อปีคือ 8,760 ชั่วโมง P_{tur} คือกำลังงานเชิงกลที่ได้จากกังหันลมที่ความเร็วลม U ทั้งนี้งานรายปีอาจคำนวณโดยใช้สถิติลมเดียวซึ่งเฉลี่ยตลอดปี หรืออาจใช้สถิติลมเฉลี่ยรายกลุ่มเดือนหรือรายฤดูกาลแล้วนำผลมารวมกันก็ได้ขึ้นอยู่กับสถิติลมที่มีอยู่ โดยที่การหางานรายปีแบบแบ่งย่อยรายกลุ่มเดือนหรือฤดูกาลจะให้ผลลัพธ์ที่สูงกว่า (รวมถึงแม่นยำกว่า) การคำนวณงานรายปีโดยใช้สถิติลมรวมเฉลี่ยตลอดปี (วิกิตนดา, 2556)

3.6 การคำนวณต้นทุนพลังงาน

ต้นทุนพลังงานเป็นสัดส่วนของจำนวนเงินที่ลงทุนต่อจำนวนพลังงานที่ได้ซึ่งส่วนใหญ่จะคำนวณให้อยู่ในรูปต้นทุนพลังงานต่อปี ดังนั้นต้นทุนพลังงานกักเก็บจะขึ้นอยู่กับราคาการติดตั้งราคาการบำรุงรักษา และงานรายปีดังที่แสดงในสมการที่ 3.28 (Nelson, 2009)

$$COE = \frac{(IC \times FCR) + AOM}{AEP} \quad (3.28)$$

โดยที่ COE คือ ต้นทุนพลังงาน (Cost of energy) IC คือ ราคาการติดตั้งกังหันลม (Initial cost of installation) FCR คือ อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (Fixed charge rate) AOM คือ ต้นทุนการบำรุงรักษาต่อปี (Annual operation and maintenance cost) และ AEP คือ งานรายปี (Annual energy production)

บทที่ 4

การประเมินค่า C_l และ C_d ใบกังหันลมเสื่อลำแพนด้วย CFD

4.1 กล่าวนำ

จากจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือต้องการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมเสื่อลำแพน ซึ่งจะต้องทำการทดลองเพื่อยืนยันผลให้เห็นว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้จริง แต่ว่าก่อนที่จะทำการทดลองนั้นควรจะทำการประเมินด้วยทฤษฎีก่อนเพื่อเป็นแนวทางในการทดลองต่อไป ซึ่งจะทำให้ประหยัดเงินทุนและเวลามากกว่าทำการทดลองไปทีเดียว โดยทฤษฎีที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพพลังงานก็คือ ทฤษฎี Blade element momentum หรือ ทฤษฎี BEM นอกจากนี้จะใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ร่วมด้วยเพื่อใช้ประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงทางอากาศพลศาสตร์ (C_l และ C_d) ของใบกังหันเพราะเป็นค่าที่ต้องใช้ในการคำนวณร่วมกับทฤษฎี BEM ดังนั้นในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงการประเมินค่า C_l และ C_d ใบกังหันลมเสื่อลำแพนด้วย CFD ก่อน หลังจากนั้นจะกล่าวถึงการประเมินประสิทธิภาพกังหันลมด้วยทฤษฎี BEM ในบทที่ 5 ต่อไป

ในทางทฤษฎีการที่จะประเมินแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนใบกังหันลม หรือแม้แต่ประสิทธิภาพสามารถทำได้ 2 วิธีคือ วิธี CFD และทฤษฎี BEM สำหรับวิธี CFD สามารถคำนวณหาแรงบิด (Torque) และแรงในแนวแกน (Thrust force) ของกังหันลมได้โดยตรงในระบบ 3 มิติ แต่จะมีความยุ่งยากพอสมควรในเรื่องของการสร้างกริด (Grid) อีกทั้งการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนต่าง ๆ (Turbulence models) รวมถึงระยะเวลาในการคำนวณที่ใช้เวลานาน ในขณะที่ทฤษฎี BEM นั้นค่อนข้างง่ายกว่า เนื่องจากส่วนใหญ่เป็นการวิเคราะห์แรงในระบบ 2 มิติเท่านั้น กล่าวคือจะทำการแบ่งการคำนวณแรงต่าง ๆ ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยแล้วค่อยอินทิเกรตตลอดความยาวในภายหลัง อีกทั้งการแก้สมการก็เป็นแบบพีชคณิตจึงไม่จำเป็นต้องสร้างกริด รวมถึงไม่ต้องใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเหมือนกับวิธี CFD ดังนั้นการประเมินสิ่งต่าง ๆ ด้วยทฤษฎี BEM จึงเป็นวิธีที่นิยมมากสำหรับนักวิจัยด้านกังหันลม แต่ทั้งนี้จะต้องทราบค่า C_l และ C_d ของใบกังหันลมก่อนซึ่งถือเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการคำนวณและให้ความถูกต้องของผลที่ได้ สำหรับกังหันลมสมัยใหม่มักมีผลการทดลองนี้จากองค์กรต่าง ๆ ที่ได้จัดทำและรวบรวมไว้แล้ว จึงสามารถนำค่ามาใช้ได้ทันที เช่น กังหันลม NREL Phase VI เป็นต้น ซึ่งเป็นกังหันลมที่ได้รับความนิยมมากที่สุดจากนักวิจัยกังหันลมทั่วโลก โดยมักใช้ผลการทดลองนี้สอบเทียบกับโปรแกรมของตนเอง แต่ว่าสำหรับค่า C_l และ C_d ของใบกังหันลมเสื่อลำแพนนับเป็นสิ่งที่ไม่มีองค์กรใด ๆ ทำการทดลองไว้ ดังนั้น Contribution

ของงานวิจัยนี้ก็คือการประเมินค่า C_l และ C_d ของใบกังหันลมเสื่อลำแพนโดยใช้ CFD เพื่อใช้ในการประเมินค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) หรือประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมเสื่อลำแพนด้วยทฤษฎี BEM ต่อไป ทั้งนี้ในเบื้องต้นจะทำการประเมินใน 2 มิติเท่านั้น

4.2 ใบกังหันลมเสื่อลำแพน

การทำ CFD เพื่อหาค่า C_l และ C_d จะต้องทราบรูปร่างลักษณะหน้าตัดใบกังหันเพื่อนำมาสร้างกริด (Grid) รอบ ๆ หน้าตัดนั้นเพื่อใช้ในการคำนวณ ถ้าหากสังเกตไปที่กังหันลมสมัยใหม่จะเห็นว่ามักมีรูปร่างหน้าตัดใบกังหันที่เหมือนกันตลอดความยาวใบจะต่างก็เพียงความยาวคอร์ด (Chord length, c) และมุมพิช (Pitch angle, β) เท่านั้น โดยที่นิยามมุมพิชก็คือ มุมที่อยู่ระหว่างเส้นคอร์ด (Chord line) กับระนาบโรเตอร์ (Rotor plane) ดังรูปที่ 3.4 (ในบทที่ 3) ดังนั้นหากจะใช้ CFD ในการคำนวณหาค่า C_l และ C_d ของใบกังหันลมดังกล่าวใน 2 มิติ ก็คำนวณเพียงครั้งเดียวแล้วสามารถนำไปใช้ได้ตลอดความยาวใบได้ แต่สำหรับใบกังหันลมเสื่อลำแพนนี้นั้นมีความพิเศษกว่าตรงที่ใบกังหันมีความอ่อนตัวจึงมีการบิดตัวโดยอัตโนมัติ อีกทั้งรูปร่างหน้าตัดใบตลอดความยาวก็มีความแตกต่างกัน จากการจินตนาการอาจจะอนุมานได้ว่ารูปร่างหน้าตัดใบกังหันลมเสื่อลำแพนน่าจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเร็วลม ความเร็วรอบ และมุมพิชปลายใบ (β , รูปที่ 6.9 ในบทที่ 6) เป็นต้น จากความพิเศษนี้จะเห็นว่าการประเมินค่า C_l และ C_d ของใบกังหันลมเสื่อลำแพนจะมีความซับซ้อนมากเพราะหน้าตัดใบมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นจำเป็นต้องตั้งสมมุติฐานเพื่อแก้ปัญหาให้ได้ไปพลางก่อน (Simplification) แล้วจึงพิจารณาผลที่ได้ในภายหลัง สมมุติฐานดังกล่าวคือ การพิจารณาว่ารูปร่างหน้าตัดใบจะไม่ขึ้นกับความเร็วลม ความเร็วรอบ และมุมพิชปลายใบ เมื่อตั้งสมมุติฐานดังนี้ก็จะสามารถวัดค่าความโค้งของหน้าตัดใบที่เกิดจากการตั้งค่ามุมพิชปลายใบค่าใดค่าหนึ่งแล้วสามารถหาค่า C_l และ C_d ของหน้าตัดใบนั้นไปใช้ในกรณีมุมพิชปลายใบค่าอื่นได้ ในที่นี้จะทำการวัดความโค้งของหน้าตัดใบจากการปล่อยความเร็วลมเท่ากับ 5.6 เมตร/วินาที ไปสู่กังหันลมแล้วควบคุมไว้ไม่ให้เกิดการหมุน (ความเร็วรอบเท่ากับศูนย์) จากนั้นจึงทำการวัดความโค้งหน้าตัดใบในตำแหน่งต่าง ๆ ตลอดแนวรัศมี สำหรับข้อมูลหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนจะใช้เฉพาะโรเตอร์แบบ 4 ใบและ 6 ใบที่มีความตันใบ (Solidity) เท่ากับ 28% โดยตั้งค่ามุมพิชปลายใบเท่ากับ 10 องศาเป็นกรณีตัวอย่าง จากการวัดใน 11 ตำแหน่งตลอดแนวรัศมี (ตำแหน่ง P0-P10) ดังรูปที่ 4.1 จะได้ลักษณะความโค้งหน้าตัดใบแตกต่างกัน 5 ลักษณะซึ่งให้ชื่อว่า หน้าตัด A หน้าตัด B หน้าตัด C หน้าตัด D และหน้าตัด E ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 หลังจากนั้นจึงนำรูปร่างความโค้งของหน้าตัดใบทั้ง 5 ตำแหน่งไปสร้างกริดรอบ ๆ หน้าตัดใบกังหันเพื่อใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม Ansys Fluent ซึ่งเป็นโปรแกรมช่วยคำนวณต่อไป

ตารางที่ 4.1 หน้าตัดใบหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพน

ตำแหน่ง	โรเตอร์แบบ 6 ใบ			โรเตอร์แบบ 4 ใบ		
	r (m)	c (m)	หน้าตัด	r (m)	c (m)	หน้าตัด
P0	0.115	0.000	N/A	0.072	0.000	N/A
P1	0.155	0.025	A	0.120	0.062	A
P2	0.195	0.051	A	0.164	0.118	A
P3	0.235	0.076	A	0.208	0.175	A
P4	0.275	0.101	B	0.252	0.232	B
P5	0.315	0.127	C	0.296	0.236	C
P6	0.355	0.152	D	0.340	0.188	D
P7	0.395	0.177	E	0.384	0.141	E
P8	0.435	0.152	A	0.428	0.093	A
P9	0.475	0.076	A	0.472	0.046	A
P10	0.515	0.000	N/A	0.515	0.000	N/A



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งการวัดข้อมูลใบกังหันลม



4.3 การสร้างกริดและการคำนวณด้วย CFD

สิ่งสำคัญสำหรับการคำนวณด้วย CFD ประกอบด้วย กริดที่บริเวณใกล้ผนัง แบบจำลองความปั่นป่วน เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) และขนาดโดเมน เป็นต้น บริเวณพื้นผิวที่ติดผนัง (Wall) มีความสำคัญมากที่สุดเพราะเป็นพื้นที่ต้นเหตุของการเกิดแรงทั้งหลาย มีการไหลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงและสลับซับซ้อนอย่างมาก ดังนั้นการสร้างกริดในชั้นนี้จะต้องสร้างให้มีความละเอียดกว่าที่บริเวณอื่น โดยทั่วไประยะกริดแรกที่ห่างจากผนังควรมีค่า $y^+ < 1$ เพื่อสามารถจับพฤติกรรมของการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงได้ สำหรับชั้นที่ไกลออกไปนั้นสามารถใช้กริดที่หยาบขึ้นได้เพราะพฤติกรรมของการไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงสูงเหมือนกับบริเวณใกล้ผนัง สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนซึ่งเป็นที่นิยมสำหรับการคำนวณด้านอากาศยานพลศาสตร์ในปัจจุบันคือ Spalart-Allmaras one-equation model (SA), Wilcox $k-\omega$ model และ Menter's shear stress transport $k-\omega$ model ($k-\omega$ SST model) เป็นต้น ทั้ง 3 โมเดลนี้เหมาะกับการนำไปวิเคราะห์การไหลผ่านแพนอากาศ ทั้งนี้จะใช้แบบจำลอง $k-\omega$ SST เท่านั้นสำหรับการคำนวณ CFD ในบทนี้ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อที่ 4.4 ต่อไป ชโลธร (2552) ได้ทำการศึกษขนาดของโดเมนที่มีผลกระทบต่อการคำนวณด้วย CFD ในระบบ 3 มิติ กล่าวคือ ลักษณะรูปร่างของโดเมนจะต้องสอดคล้องกับรูปทรงของสิ่งที่ต้องการศึกษา อีกทั้งระยะโดเมนด้านหน้า ด้านหลัง และด้านข้างจะต้องยาวพอที่จะรองรับพฤติกรรมของการไหลในบริเวณนั้น ๆ ที่มีความแตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าขนาดความยาวของโดเมนด้านหน้ามีผลกระทบมากที่สุดโดยมีค่าอัตราส่วนความยาวปลายใบ (λ) เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการกำหนดขนาดโดเมนที่เหมาะสม ซึ่งอาจกล่าวสรุปโดยย่อว่าควรกำหนดความยาวของโดเมนอย่างน้อยในทิศทาง ด้านหน้า $\times$ ด้านข้าง $\times$ ด้านหลัง เป็นอย่างน้อย $6 \times 3 \times 3$ เท่าของรัศมีใบจึงจะไม่ส่งผลเสียต่อการคำนวณด้วย CFD มากนัก

ดังนั้นสำหรับในบทที่ 4 นี้ จะทำการคำนวณหาค่า C_l และ C_d ของหน้าตัดใบกังหันลมสี่ล่ำแพนด้วยวิธี CFD ในระบบ 2 มิติ จึงสรุปข้อมูลเกี่ยวกับการสร้างกริด แบบจำลองความปั่นป่วน และขนาดโดเมน รวมถึงเงื่อนไขอื่น ๆ ดังต่อไปนี้

4.3.1 ตีกริด (Grid) แบบ C-Grid ดังรูปที่ 4.3 และใช้ Grid cells แบบสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 4.4

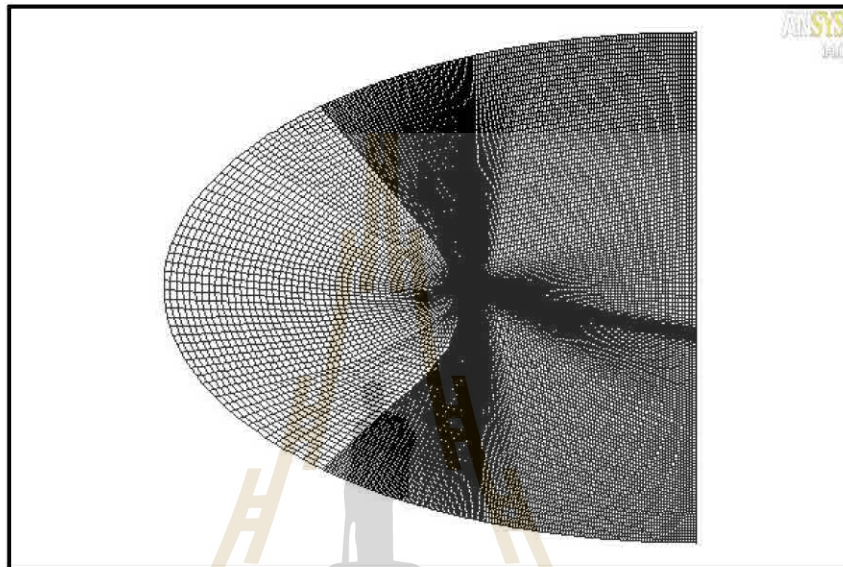
4.3.2 จำนวน Grids และ Nodes ประมาณ 20000-25000

4.3.3 อัตราการเพิ่มกริด (Growth ratio) คือ 1.2 และ $y^+ \approx 1.0$ โดยจำนวนกริดในชั้น Sublayer ประมาณ 20 กริด

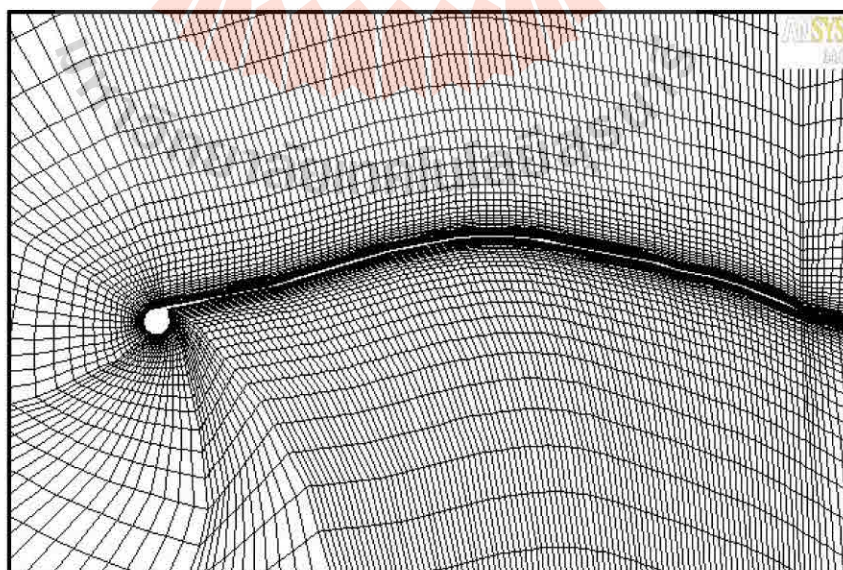
4.3.4 ระยะโดเมน 10 เท่าของความยาวคอร์ด ที่ด้านหน้า ด้านหลัง และด้านข้าง

4.3.5 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ใช้วิธี Velocity inlet และ Pressure outlet ของโปรแกรม Ansys fluent

- 4.3.6 จำลองการไหลที่เรโนลด์สจำนวน (Reynolds number) ระหว่าง 68,000-160,000
- 4.3.7 ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) แบบ $k - \omega$ SST
- 4.3.8 Turbulent intensity = 5%
- 4.3.9 ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนต่อการเข้าสู่ (Residual error) น้อยกว่า 1×10^{-6}



รูปที่ 4.3 กริดรูปแบบ C-Grid



รูปที่ 4.4 Grid cells แบบสี่เหลี่ยม

4.4 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST

แบบจำลอง $k-\omega$ Shear stress transport หรือ $k-\omega$ SST พัฒนาขึ้นโดย Menter เป็นการนำข้อเด่นของ 2 แบบจำลองมาผสมผสานกันคือแบบจำลอง $k-\omega$ ของ Wilcox และแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ซึ่งถูกจัดให้อยู่ในรูปสมการ $k-\omega$ โดยแบบจำลอง $k-\omega$ จะใช้ใน Sublayer ซึ่งอยู่ภายในชั้นซิดผิว (Boundary layer) เนื่องจากให้ผลการคำนวณที่ดีในย่านนี้แต่มีข้อด้อยคือค่อนข้างไว (Sensitive) ในย่านการไหลกระแสนิ่ง ดังนั้นในย่านนอกช่วงชั้นซิดผิวไปจนถึงย่านการไหลแบบอิสระจะให้แบบจำลอง $k-\varepsilon$ ซึ่งให้ผลการคำนวณที่ดีกว่า $k-\omega$ โดยมี Blending function เป็นตัวสลับเปลี่ยนแบบจำลองที่บริเวณเชื่อมต่อ จุดสำคัญอีกประการหนึ่งของแบบจำลอง $k-\omega$ SST คือการแก้ไขดัดแปลงฟังก์ชันความหนืดปั่นป่วน (Eddy-viscosity) เพื่อปรับปรุงการทำนายการไหลที่มี Adverse pressure gradient ที่เป็นต้นเหตุในการทำให้เกิดการไหลแยกให้มีความแม่นยำมากขึ้น

เพื่อที่จะทำการผสมผสานแบบจำลอง $k-\omega$ กับ $k-\varepsilon$ ความแตกต่างจากแบบจำลอง $k-\omega$ ดั้งเดิมคือการเพิ่มเทอม Cross diffusion เข้าไปในสมการ ω และ ค่าคงที่ของแบบจำลองที่ต่างกัน แบบจำลอง $k-\omega$ ดั้งเดิมจะถูกคูณด้วยฟังก์ชัน F_1 และทำการปรับเปลี่ยนไปยังแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ด้วยฟังก์ชัน $1-F_1$ สมการที่เกี่ยวข้องกันแต่ละแบบจำลองจะถูกรวมเข้าด้วยกัน โดยที่ค่าฟังก์ชัน F_1 ถูกออกแบบให้มีค่าเป็น 1 ที่บริเวณใกล้ผนัง และเป็นศูนย์เมื่อห่างออกไปจากผนัง

โดยทั่วไปแบบจำลองแบบ 2 สมการจะทำนายการไหลแบบแยกตัวได้ต่ำกว่าความเป็นจริง กล่าวคือจุดที่เกิดการไหลแยกจะเกิดช้ากว่าความเป็นจริงซึ่งเป็นข้อด้อยอย่างมากสำหรับงานทางด้านอากาศยานศาสตร์ เหตุผลของข้อด้อยนี้เกิดจากแบบจำลองแบบ 2 สมการไม่มีกลไกของการส่งผ่าน Turbulent shear stress ดังนั้นการปรับปรุงทำได้โดยการใช้วิธีทางพีชคณิตด้วยการจำลองการส่งผ่าน Turbulent shear stress ดังกล่าวให้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ดังนั้นในแบบจำลอง SST ได้มีการปรับปรุงค่าฟังก์ชัน Eddy viscosity เพื่อปรับปรุงการทำนายการไหลแยกด้วย Blending function F_2 ดังนี้ (ชโลธร, 2552)

$$\mu_t = \min \left[\frac{\rho k}{\omega}; \frac{a_1 \rho k}{SF_2} \right] \quad (4.1)$$

เมื่อ $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ คือ Strain rate และ $S_{ij} = \frac{1}{2}(\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i)$ โดยที่

$$F_2 = \tanh \left\{ \left(\max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}; \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \right)^2 \right\} \quad (4.2)$$

สมการการถ่ายสำหรับ Turbulent kinetic energy (k) และ Specific dissipation (ω) ของการไหลแบบปั่นป่วนแสดงดังสมการที่ 4.3 และ 4.4 (ชโลธร, 2552)

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho U_j k - (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = P_k - D_k \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho U_j \omega - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) = \alpha \rho \frac{P_k}{\mu_t} - D_\omega + 2(1 - F_1) CD_{k\omega} \quad (4.4)$$

เมื่อ

$$P_k = \min[\mu_t S^2; 10 \rho \beta^* k \omega], \quad D_k = \rho \beta^* k \omega, \quad D_\omega = \beta \rho \omega^2 \quad (4.5)$$

ค่าฟังก์ชัน F_1 ถูกออกแบบเพื่อผสมค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองของ $k-\omega$ ดั้งเดิมซึ่งใช้ในบริเวณที่เป็นชั้นขีดผิวกับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ที่ปรับเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ $k-\omega$ ซึ่งใช้ในบริเวณที่เป็น Free-shear layer และ Free stream ฟังก์ชันนี้จะให้ค่าเป็น 1 ที่ผิวและ มีค่าเข้าสู่ศูนย์ที่ขอบของชั้นขีดผิว ค่าฟังก์ชันการผสม F_1 นิยามดังนี้ (ชโลธร, 2552)

$$F_1 = \tanh \left\{ \left(\min \left[\max \left[\frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right]; \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right)^4 \right\} \quad (4.6)$$

เมื่อ

$$CD_{k\omega} = \max \left[\frac{2 \rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right] \quad (4.7)$$

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

$$a_1 = 0.31, \quad k = 0.41, \quad \beta^* = 9/100 \quad (4.8)$$

สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง β , α , σ_k และ σ_ω แสดงให้อยู่ในรูปของตัวแปรทั่วไป ϕ และถูกกำหนดโดยการผสมของตัวแปรของแบบจำลอง $k-\omega$ ดั้งเดิม (ϕ_1) กับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ที่ได้ปรับเปลี่ยนแล้ว (ϕ_2) ซึ่งฟังก์ชัน ϕ คือ

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad \text{เมื่อ } \phi = \{\sigma_k, \sigma_\omega, \beta, \alpha\} \quad (4.9)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองดั้งเดิมกำหนดเป็นดังนี้

- 1) สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองด้านใน ($k-\omega$)

$$\sigma_{k1} = 0.85 \quad \sigma_{\omega1} = 0.5 \quad \beta_1 = 0.075 \quad \text{และ} \quad \alpha_1 = 0.553 \quad (4.10)$$

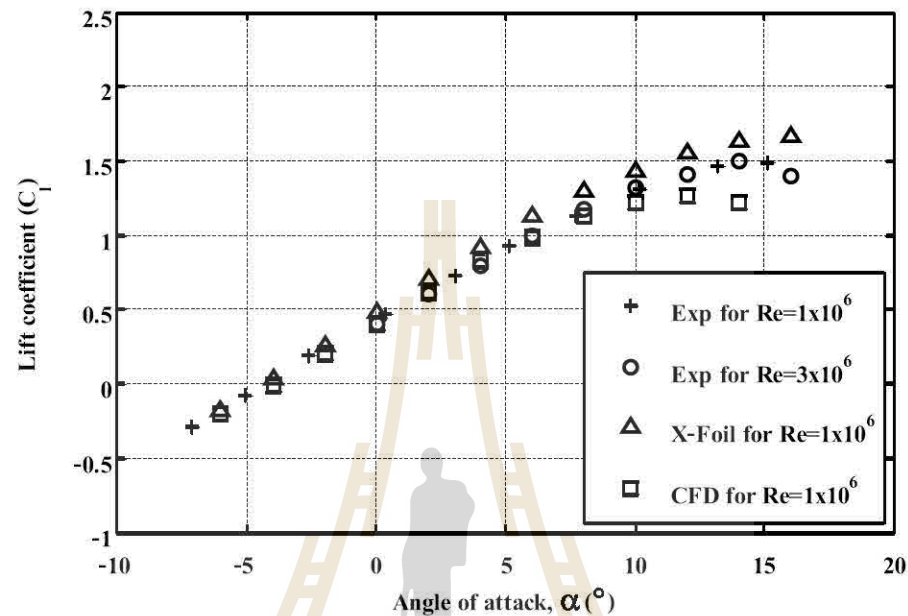
- 2) สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองด้านนอก ($k-\varepsilon$)

$$\sigma_{k2} = 1.0 \quad \sigma_{\omega2} = 0.856 \quad \beta_2 = 0.0828 \quad \text{และ} \quad \alpha_2 = 0.440 \quad (4.11)$$

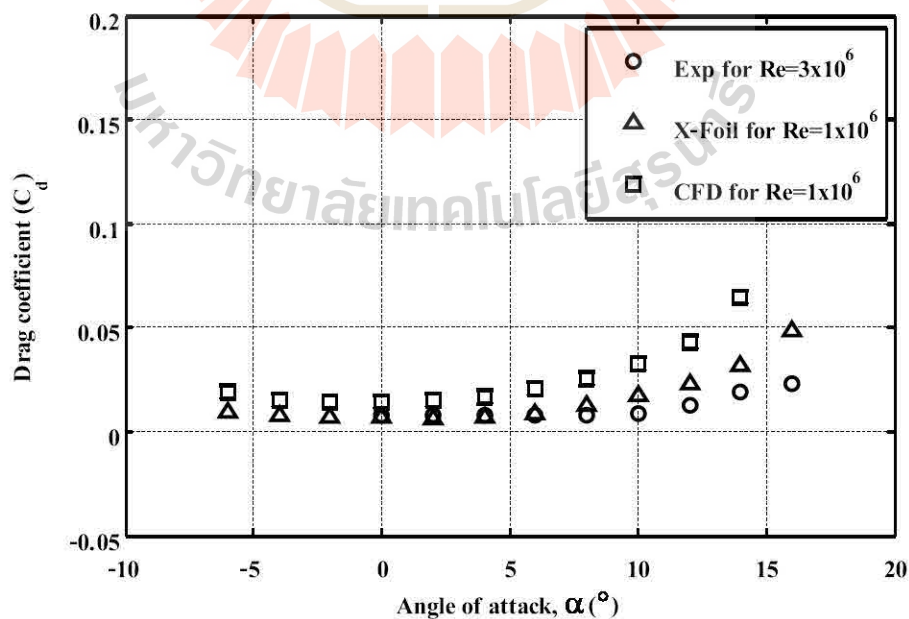
4.5 การสอบเทียบ CFD

ก่อนการประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d) ของใบกังหันลมสี่ลำแพนด้วย CFD ตามแนวทางของงานวิจัยนี้คือ ใช้วิธีการสร้างกริด การกำหนด Boundary condition และการปรับค่าต่าง ๆ ตามหัวข้อที่ 4.3 ควรจะต้องทำการสอบเทียบการทำ CFD ตามแนวทางดังกล่าวก่อนเพื่อยืนยันความถูกต้องของ CFD ทั้งนี้จะทำการสอบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านของแพนอากาศ NACA 4412 ซึ่งเป็นแพนอากาศชนิดที่มีแคมเบอร์ (Cambered airfoil) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับใบกังหันลมสี่ลำแพน ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้าน (C_l , C_d) ของแพนอากาศ NACA 4412 ที่ใช้ในการสอบเทียบได้มาจากการทดลอง (Experiment) และโปรแกรม X-foil โดยจะประเมินค่าในช่วงเรโนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) เท่ากับ $1 \times 10^6 - 3 \times 10^6$ จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยก จะเห็นว่าที่มุมปะทะ -7° ถึง 12° ซึ่งเป็นช่วงที่ยังไม่เกิดการไหลแยกจะเห็นว่า CFD ให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลอง และโปรแกรม X-foil เป็นอย่างดี แต่หลังจากที่มุมปะทะ (Angle of attack) เริ่มสูงขึ้นจนกระทั่งเกิดการไหลแยก (Separation) ทำให้ผลการประเมินด้วย CFD เริ่มเกิดความคลาดเคลื่อน (ชโลธร, 2552)

จากรูปที่ 4.6 แสดงผลการสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน จะเห็นว่าผลจากการประเมินด้วย CFD รวมถึงโปรแกรม X-foil ยังคงมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองพอสมควร โดยเฉพาะในช่วงมุมปะทะสูง อย่างไรก็ตามผลที่ได้ยังคงมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.5 ผลการสอบเทียบการประเมินแรงยกด้วย CFD ของแพนอากาศ NACA 4412



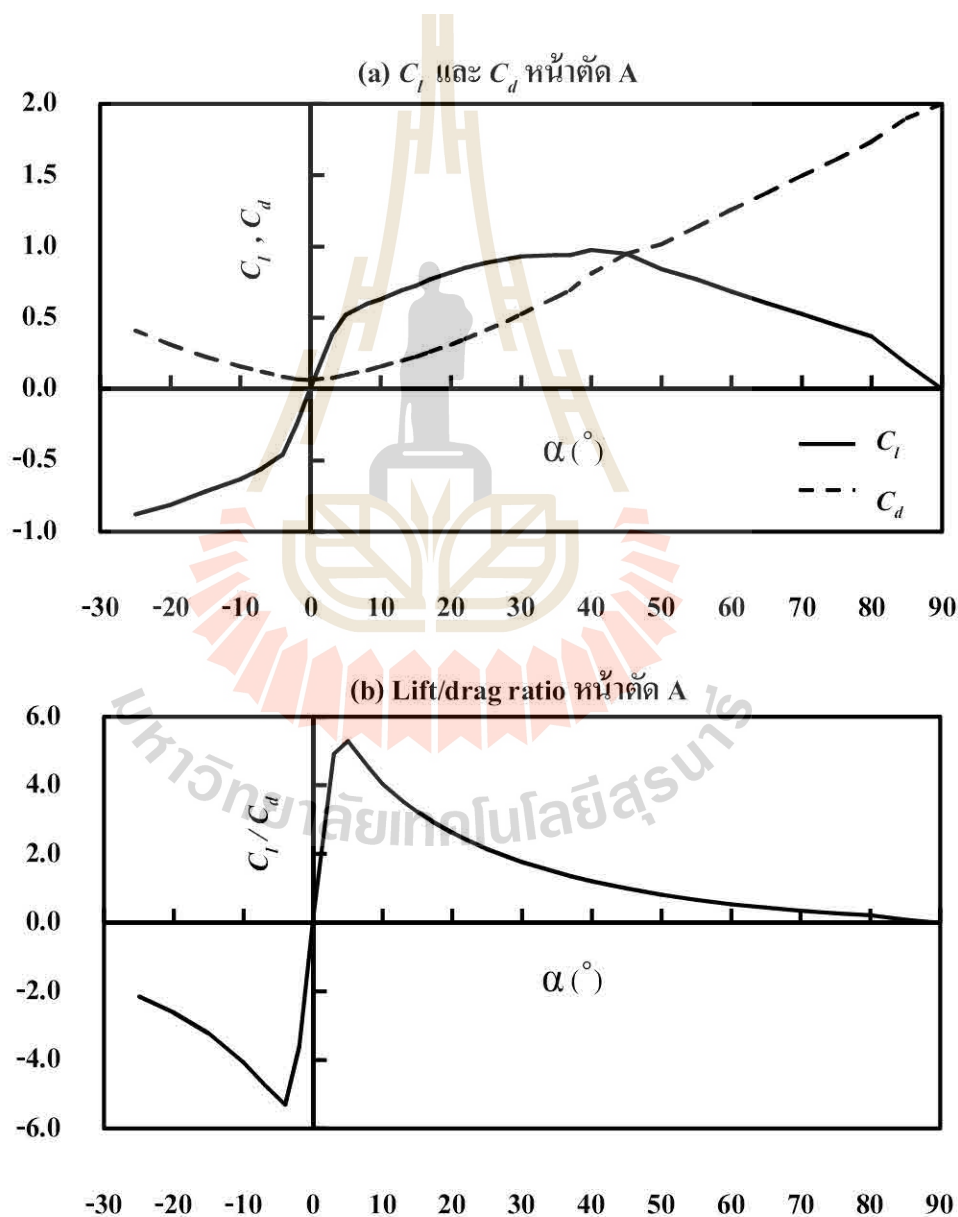
รูปที่ 4.6 ผลการสอบเทียบการประเมินแรงต้านด้วย CFD ของแพนอากาศ NACA 4412

4.6 ผลการคำนวณ C_l และ C_d ใบกังหันลมเสื่อลำแพนด้วย CFD

จากการวัดความโค้งของหน้าตัดใบหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนที่ความดันใบเท่ากับ 28% ทั้งแบบ 6 ใบและ 4 ใบจำนวน 11 ตำแหน่งตลอดแนวรัศมี ปรากฏว่าหน้าตัดใบมีความแตกต่างกัน 5 ลักษณะ (หน้าตัด A-E) ดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.2 เมื่อใช้ CFD คำนวณหาค่า C_l และ C_d ตามเงื่อนไขในหัวข้อ 4.3 โดยใช้โปรแกรม Ansys Fluent เป็นโปรแกรมช่วยคำนวณได้ผลดังนี้

4.6.1 ค่า C_l และ C_d หุ่นจำลองแบบ 6 ใบ

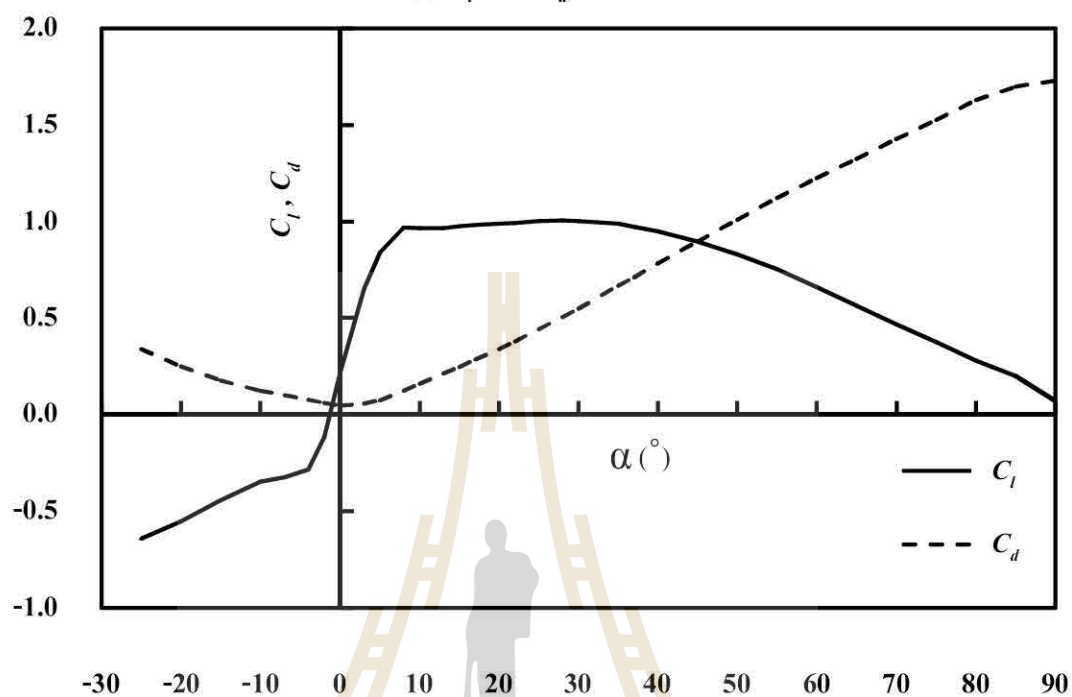
หน้าตัด A (มีรูปร่างคล้าย Flat plate)



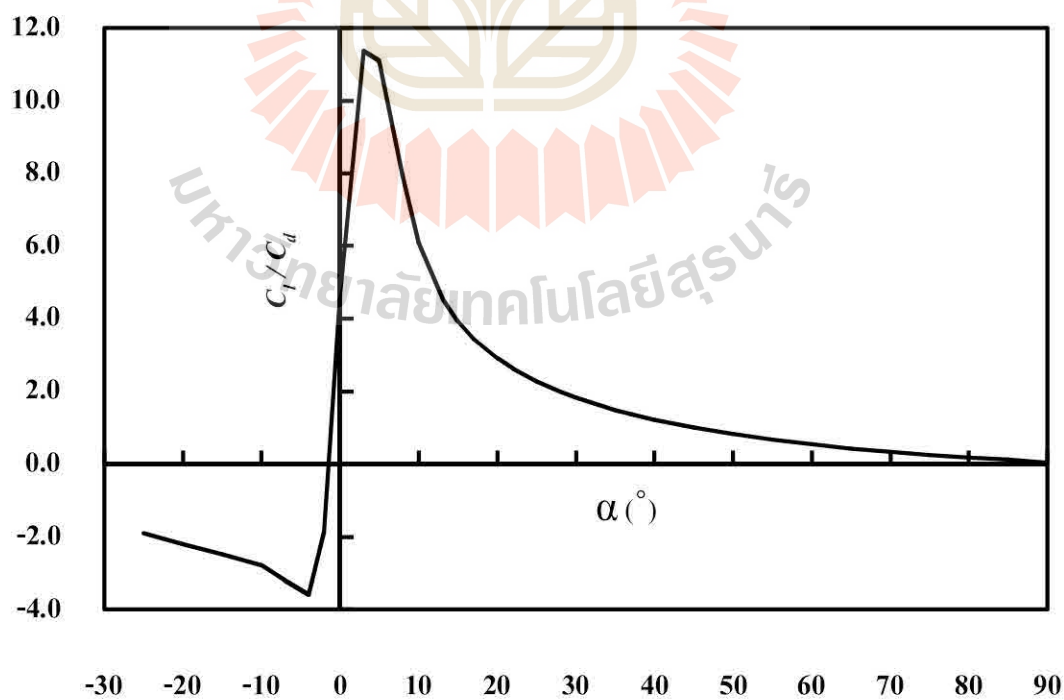
รูปที่ 4.7 C_l , C_d และ C_l / C_d หน้าตัด A ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ

หน้าตัด B

(a) C_l และ C_d หน้าตัด B

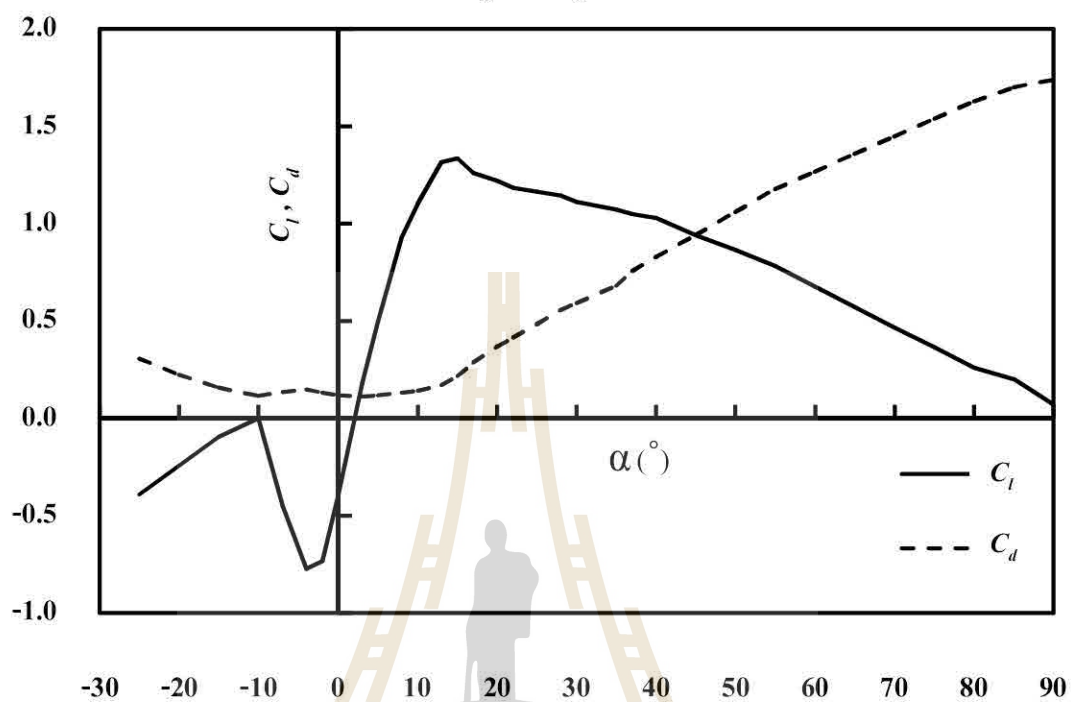


(b) Lift/drag ratio หน้าตัด B

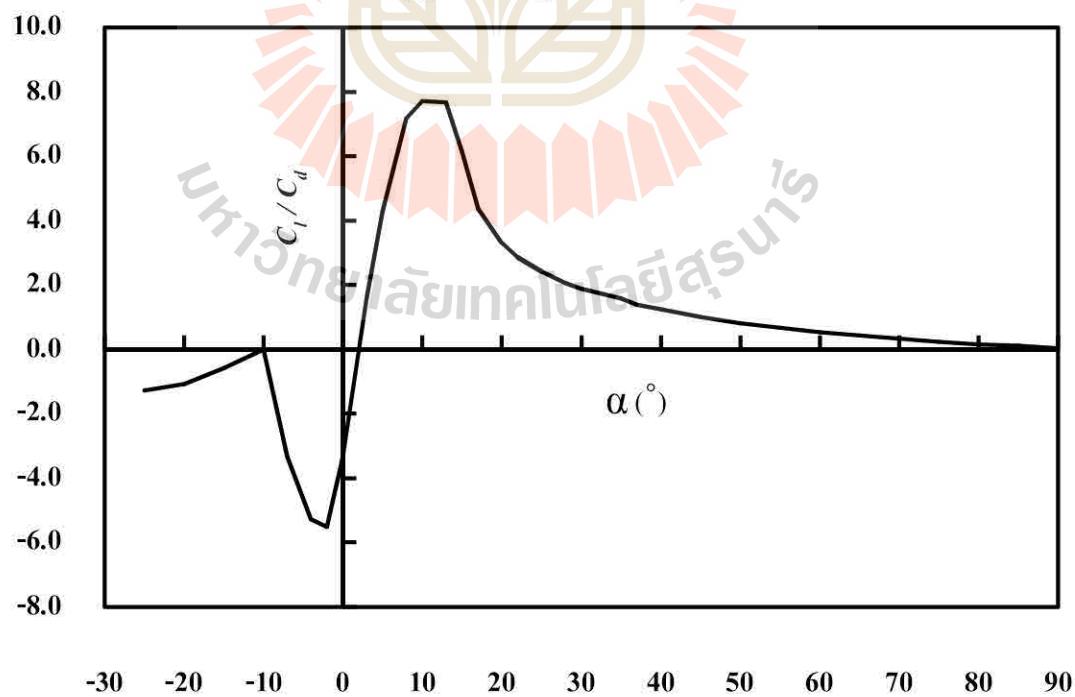


รูปที่ 4.8 C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด B ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ

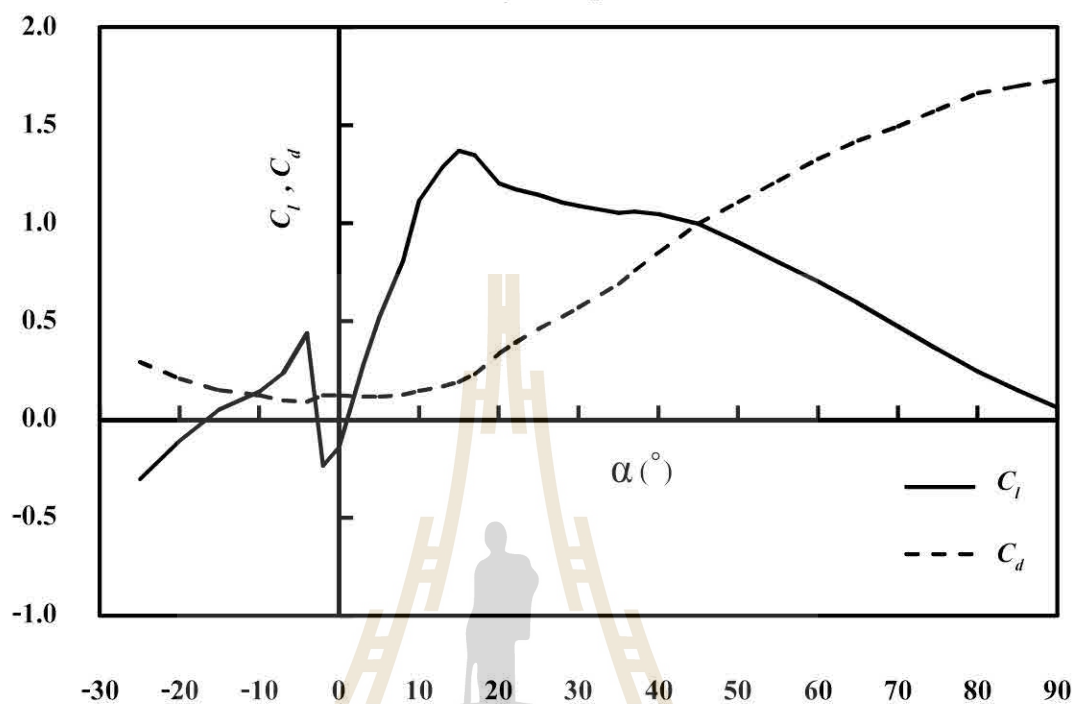
หน้าตัด C

(a) C_l และ C_d หน้าตัด C

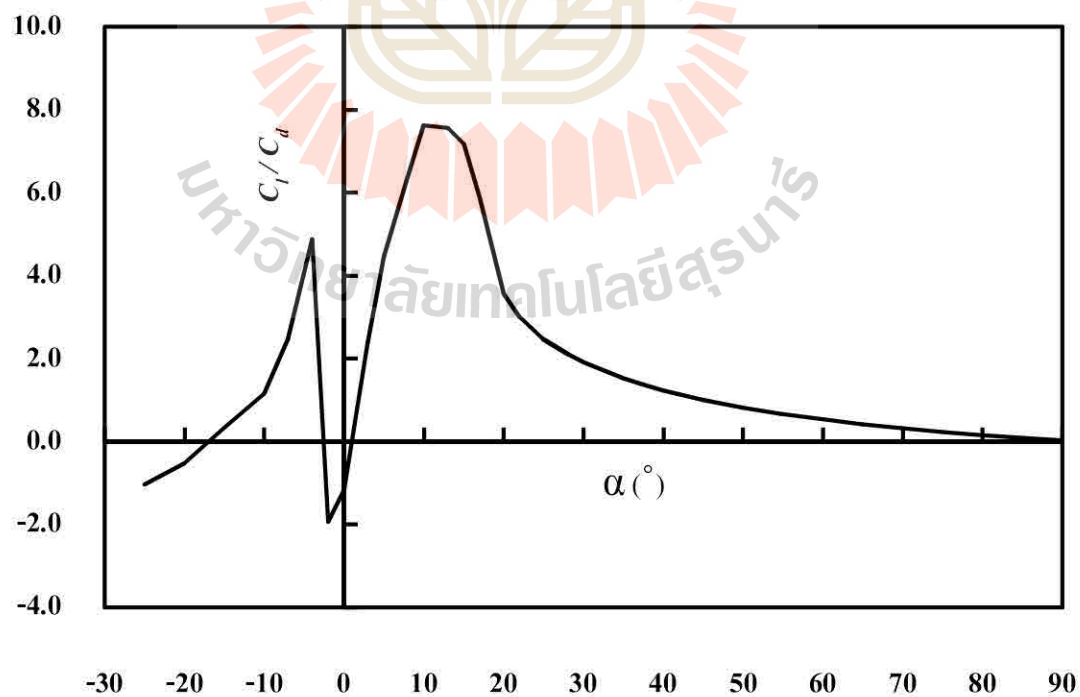
(b) Lift/drag ratio หน้าตัด C

รูปที่ 4.9 C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด C ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ

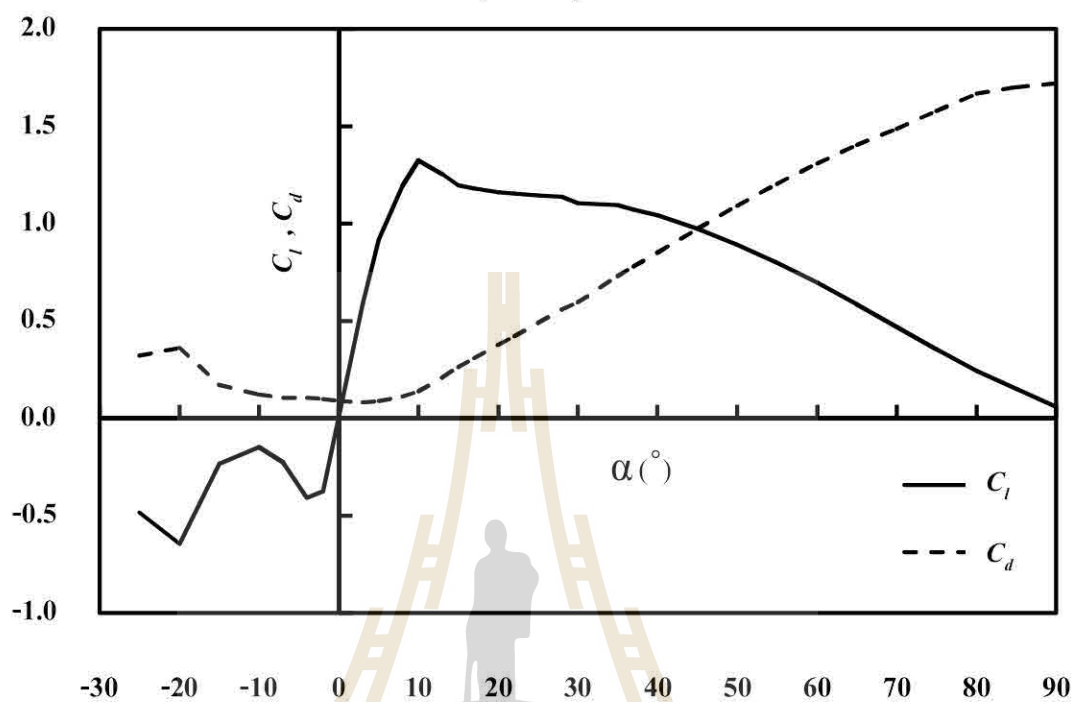
หน้าตัด D

(a) C_l และ C_d หน้าตัด D

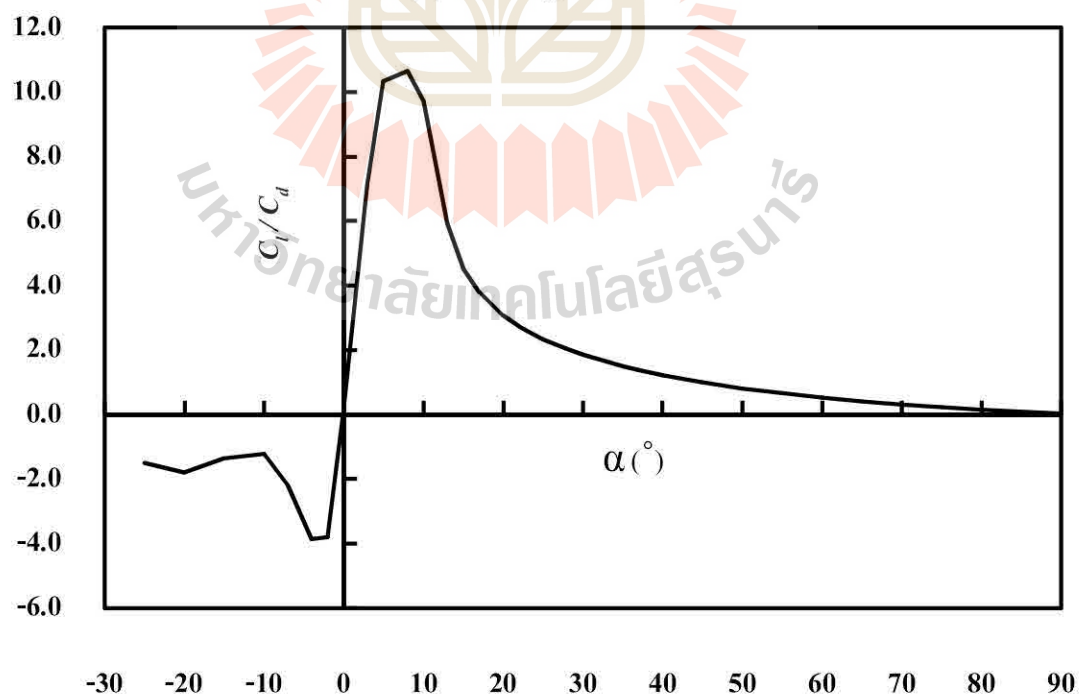
(b) Lift/drag ratio หน้าตัด D

รูปที่ 4.10 C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด D ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ

หน้าตัด E

(a) C_l และ C_d หน้าตัด E

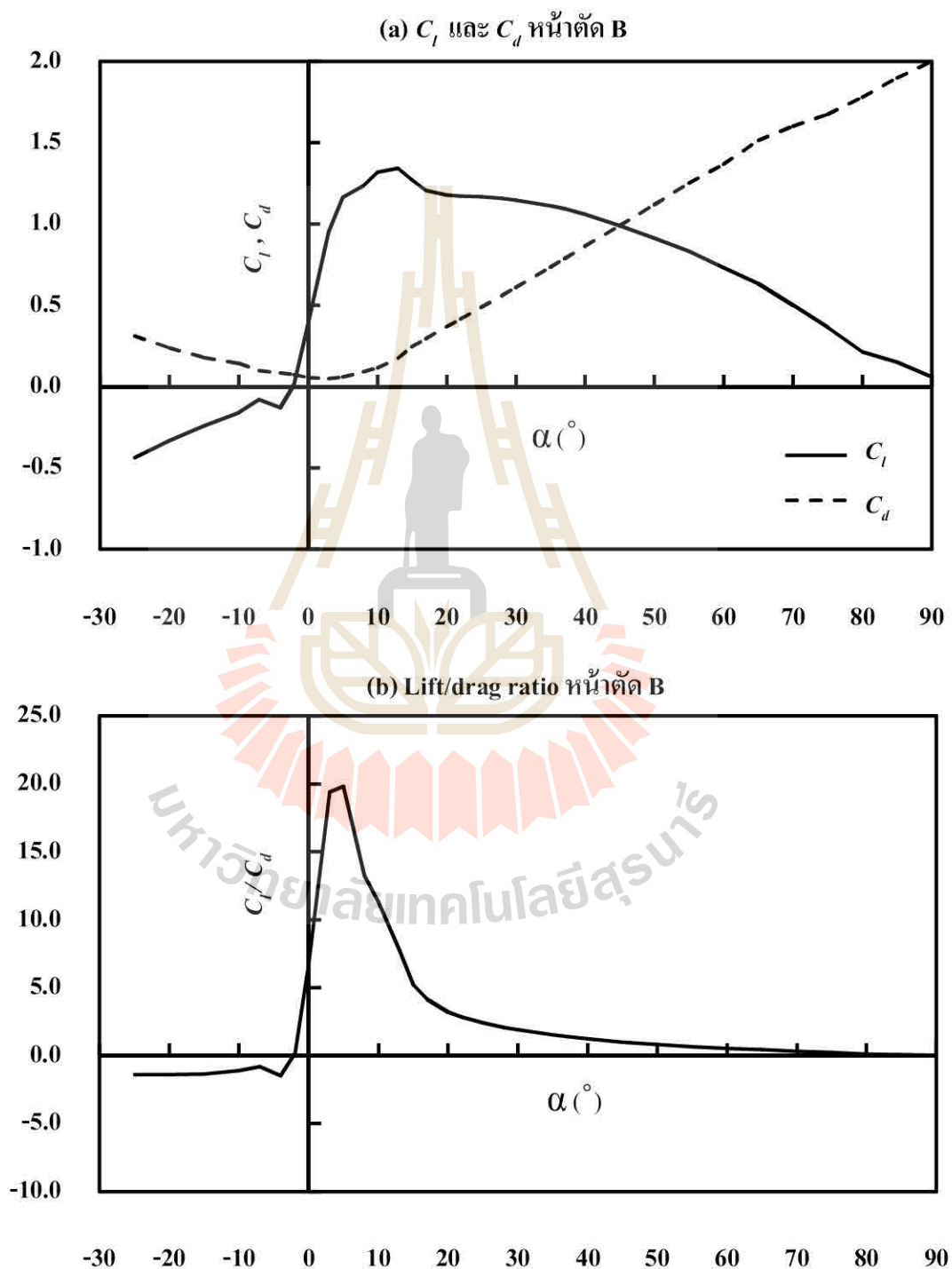
(b) Lift/drag ratio หน้าตัด E

รูปที่ 4.11 C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด E ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ

4.6.2 ค่า C_l และ C_d หุ่นจำลองแบบ 4 ใบ

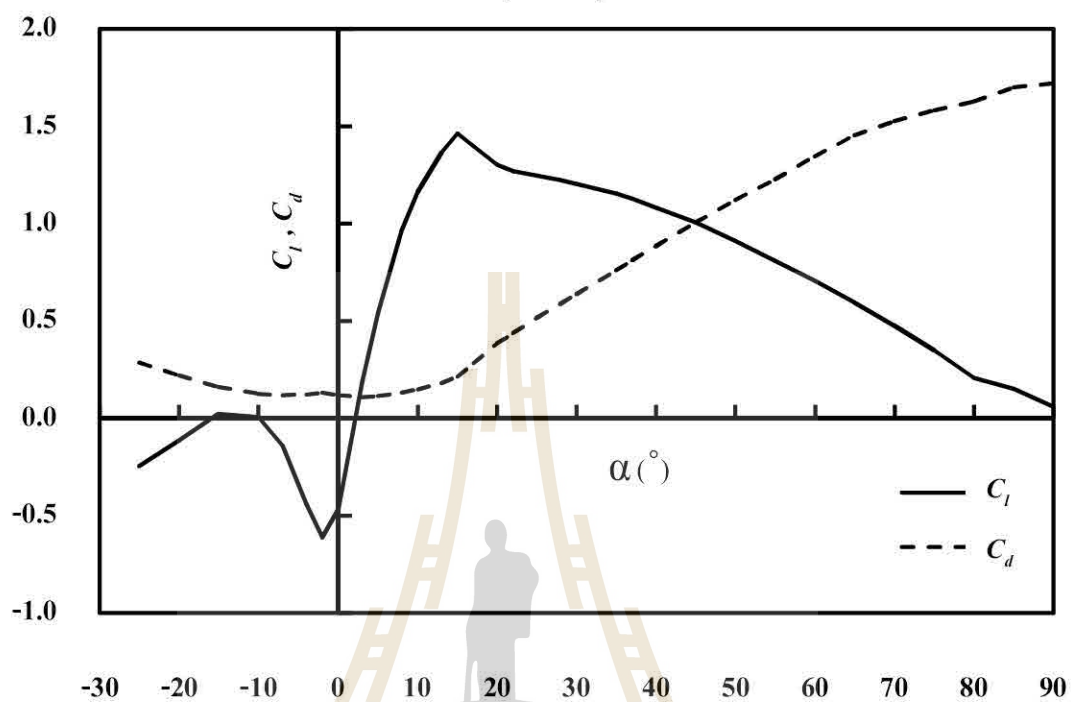
หน้าตัด A (Flat plate) ใช้ค่าเดียวกับแบบ 6 ใบ

หน้าตัด B

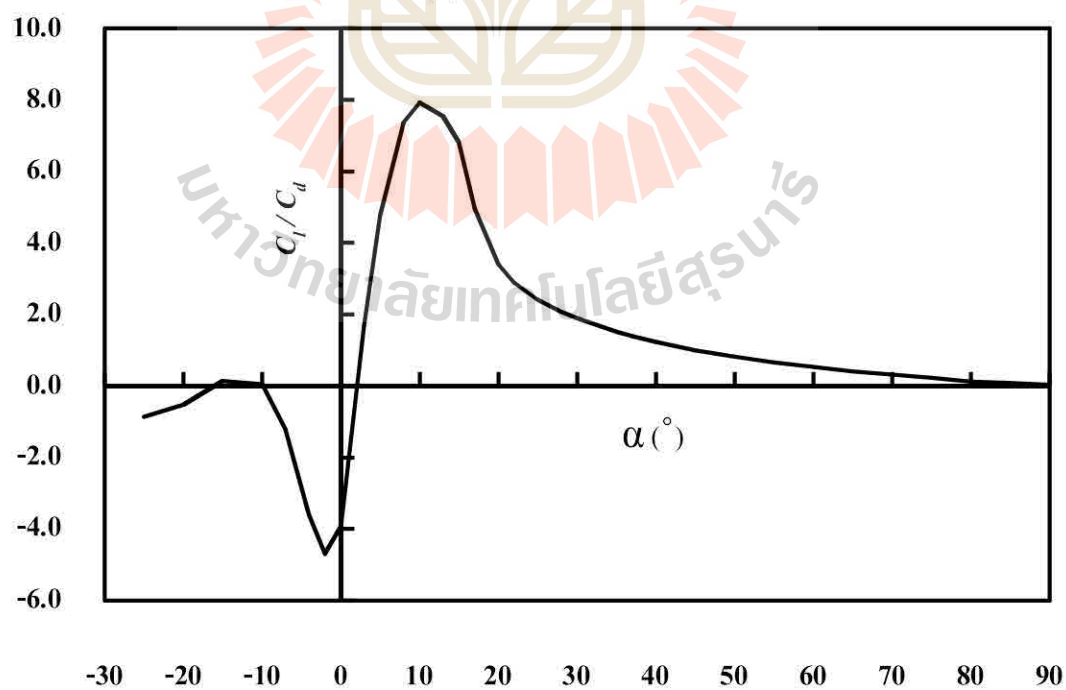


รูปที่ 4.12 C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด B ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ

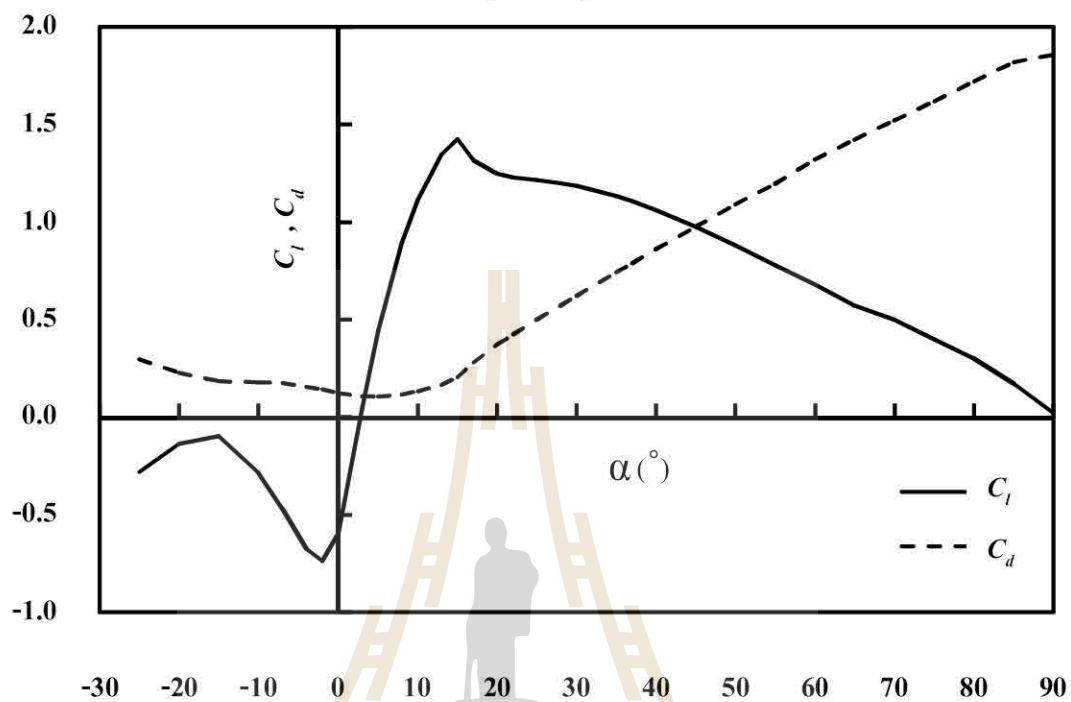
หน้าตัด C

(a) C_l และ C_d หน้าตัด C

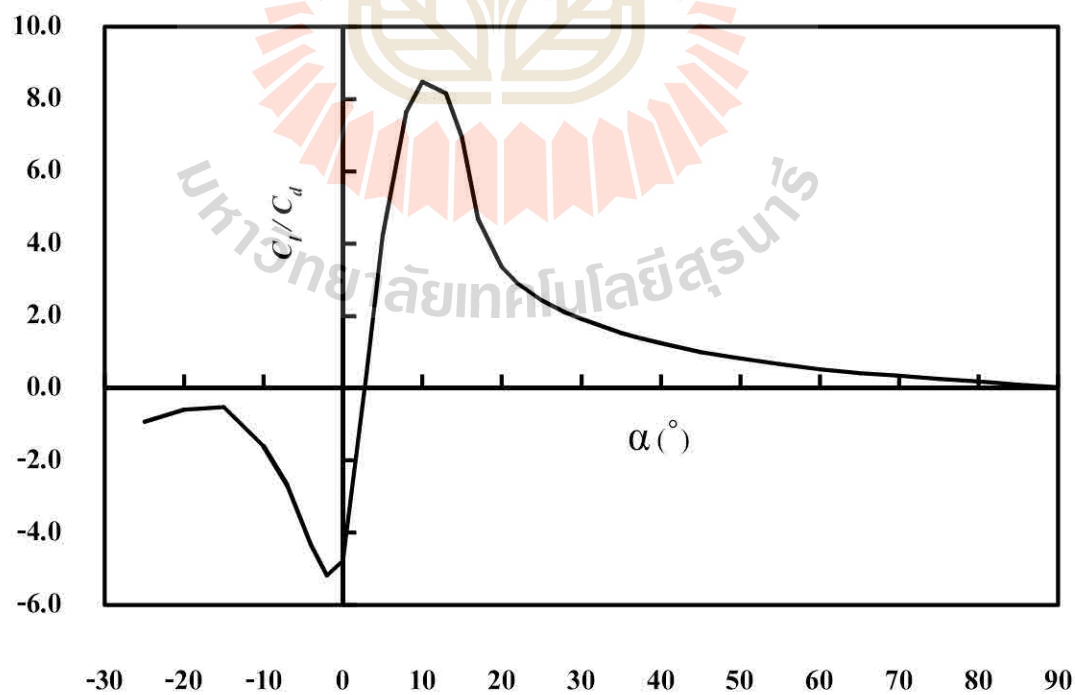
(b) Lift to/dratio หน้าตัด C

รูปที่ 4.13 C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด C ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ

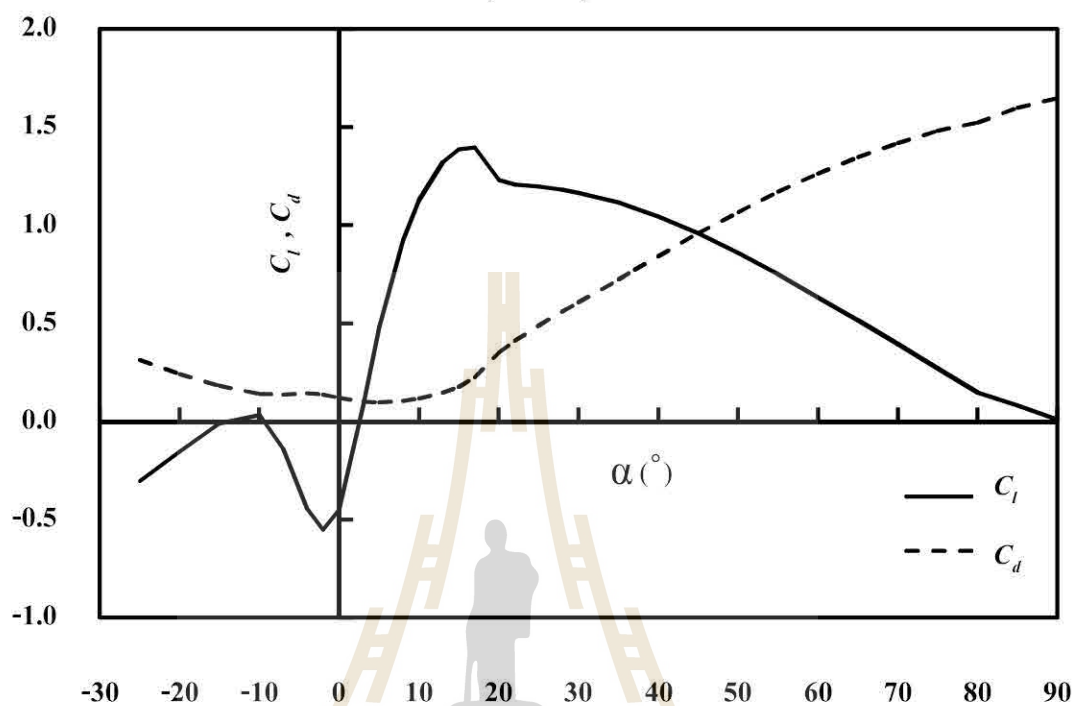
หน้าตัด D

(a) C_l และ C_d หน้าตัด D

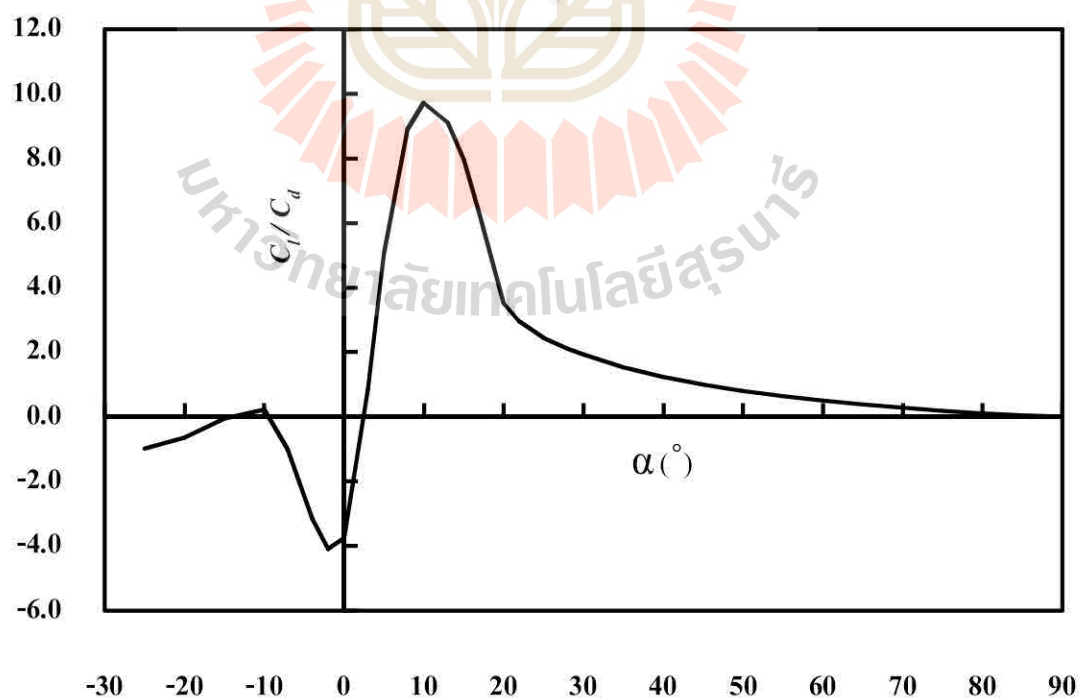
(b) Lift/drag ratio หน้าตัด D

รูปที่ 4.14 C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด D ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ

หน้าตัด E

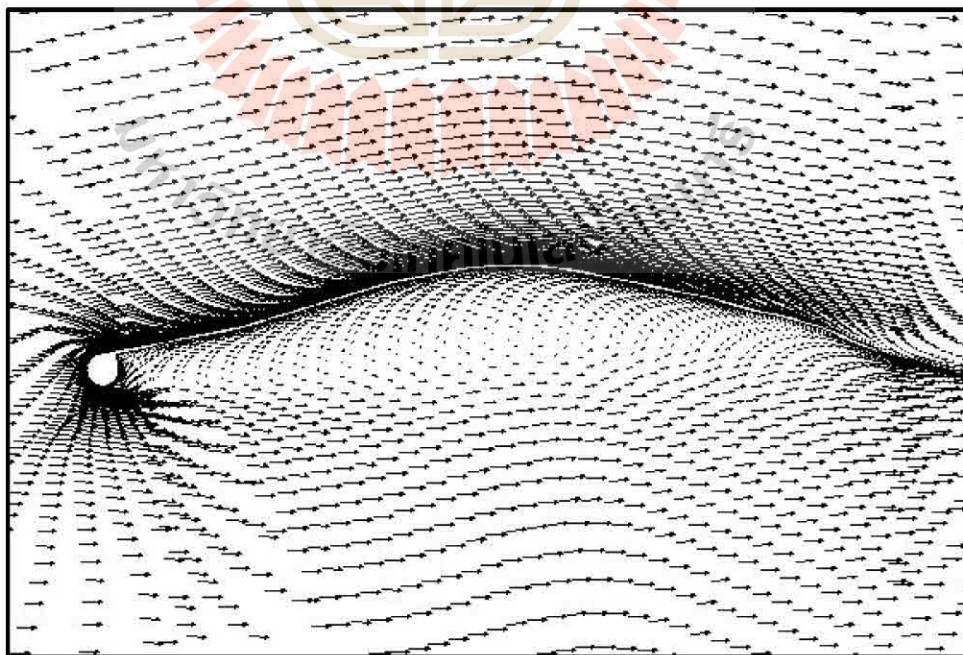
(a) C_l และ C_d หน้าตัด E

(b) Lift/drag ratio หน้าตัด E

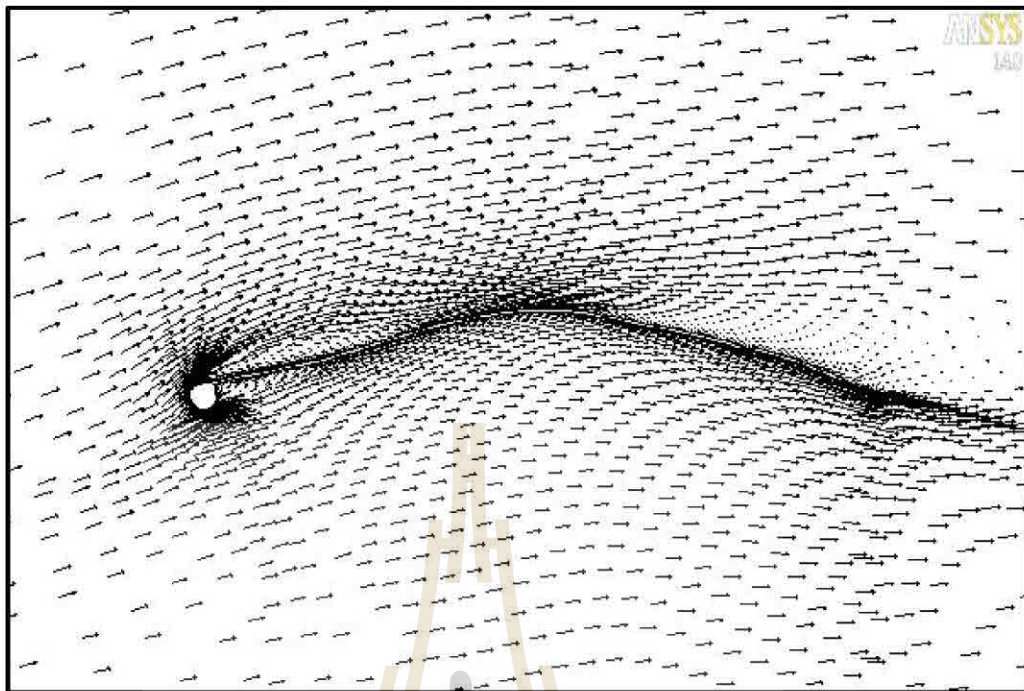
รูปที่ 4.15 C_l , C_d และ C_l/C_d หน้าตัด E ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ

4.7 อภิปรายผล

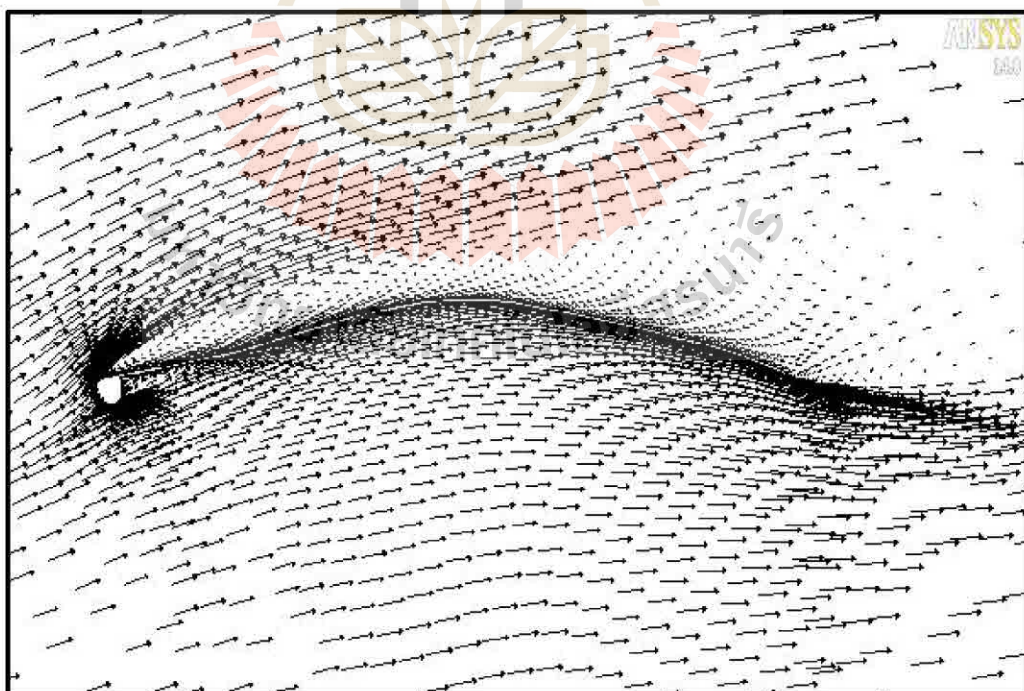
จากการทำ CFD ในหัวข้อที่ 4.6 พบว่าใบกังหันลมสี่ลำแพนหน้าตัดต่าง ๆ สามารถสร้างแรงยกได้ ดังผลลัพธ์ที่ได้นำเสนอซึ่งอยู่ในรูปของค่า C_l และ C_d รวมถึงค่าอัตราส่วนระหว่างแรงยกต่อแรงต้าน (Lift to drag ratio, C_l/C_d) ด้วย ทั้งนี้จะเห็นว่าขนาดของแรงยกและแรงต้านนั้นขึ้นอยู่กับมุมปะทะ (Angle of attack, α) และรูปร่างหน้าตัดใบ หากพิจารณาที่มุมปะทะค่าต่าง ๆ จะเห็นว่าใบกังหันลมสี่ลำแพนมีอัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้านที่ค่อย ๆ สูงขึ้นในช่วง มุมปะทะเท่ากับ 0-10 องศา และจะมีค่าสูงสุดที่ 5-10 องศาโดยประมาณ หลังจากนั้นก็จะมียาลดลงเพราะว่าเมื่อมุมปะทะสูงเกินไปจะทำให้ใบกังหันมีความทู่จนกระทั่งกระแสการไหลของอากาศที่ผ่านใบกังหันเกิดการไหลแยกและเกิด Wake ที่ด้านหลังของใบ ซึ่งเป็นต้นเหตุให้แรงยกลดต่ำลงและแรงต้านเพิ่มสูงขึ้น รูปที่ 4.16-4.18 แสดงเวกเตอร์ความเร็วที่เกิดขึ้น (จากการคำนวณด้วย CFD) ของการไหลผ่านใบกังหันหน้าตัด B (ของหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ) ที่มุมปะทะ 0 10 และ 15 องศา ตามลำดับ จะเห็นว่ากระแสการไหลของอากาศยังไม่เกิดการไหลแยกมากนักจึงทำให้อัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้านมีค่าสูง แต่เมื่อลองเพิ่มมุมปะทะเป็น 30 45 และ 60 องศา ดังรูปที่ 4.19-4.21 พบว่ากระแสการไหลอากาศจะเกิดการไหลแยกและ Wake ที่ด้านหลังใบกังหัน ซึ่งเป็นเหตุให้แรงยกลดต่ำลงและแรงต้านเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการออกแบบกังหันลมควรให้กังหันลมสามารถปฏิบัติงาน ณ มุมปะทะดีที่สุด อย่างไรก็ตามผลการคำนวณ CFD ในหัวข้อที่ 4.6 นั้น ไม่ได้ตรวจสอบการทำ Grid independence



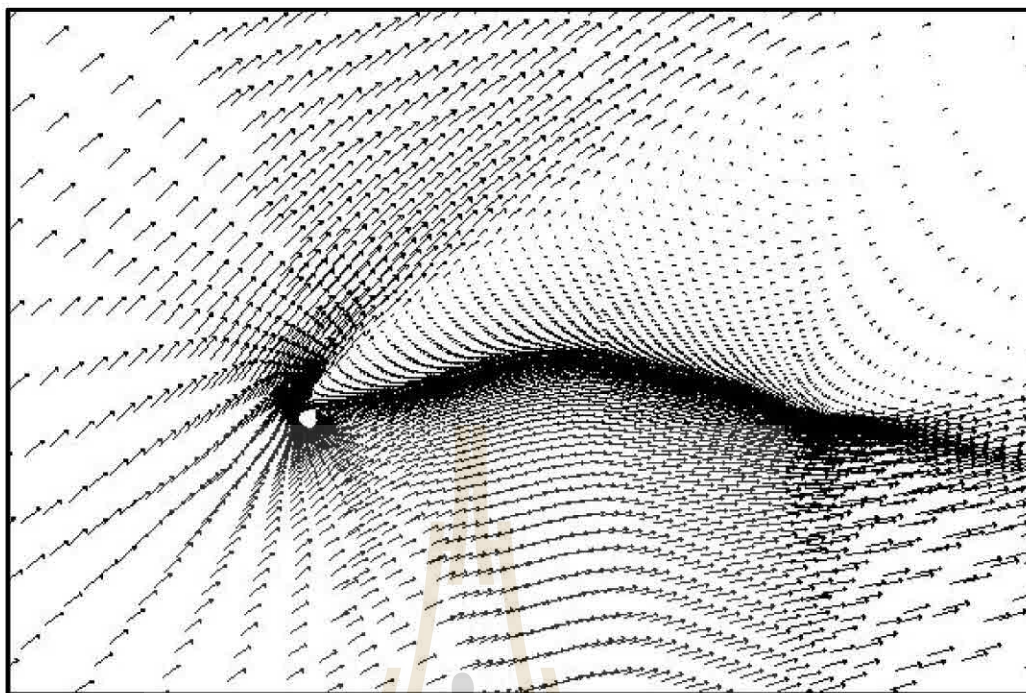
รูปที่ 4.16 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านใบกังหันหน้าตัด B ที่มุมปะทะ (α) 0 องศา



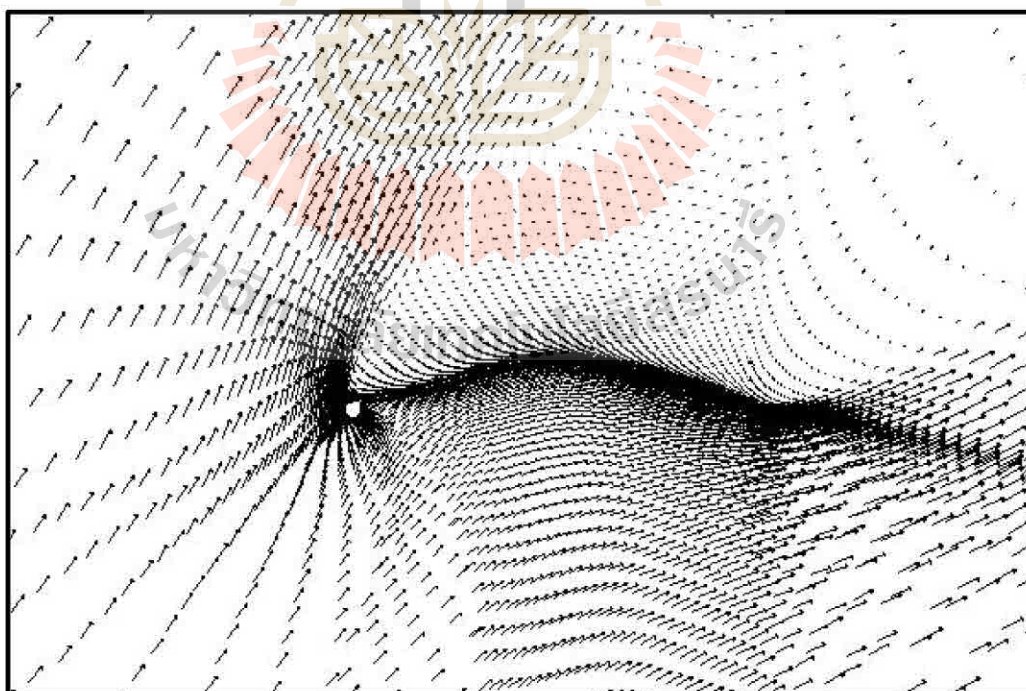
รูปที่ 4.17 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านใบกังหันน้ำตัด B ที่มุมปะทะ (α) 10 องศา



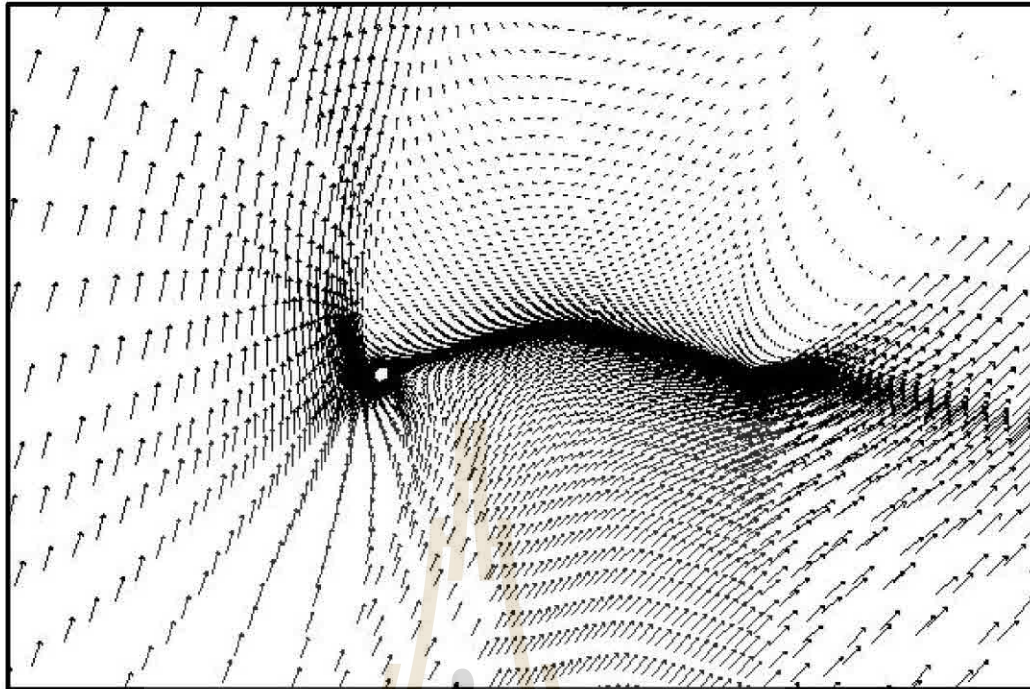
รูปที่ 4.18 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านใบกังหันน้ำตัด B ที่มุมปะทะ (α) 15 องศา



รูปที่ 4.19 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านใบกึ่งหันหน้าตัด B ที่มุมปะทะ (α) 30 องศา



รูปที่ 4.20 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านใบกึ่งหันหน้าตัด B ที่มุมปะทะ (α) 45 องศา



รูปที่ 4.21 เวกเตอร์ความเร็วของการไหลผ่านใบกังหันหน้าตัด B ที่มุมปะทะ (α) 60 องศา

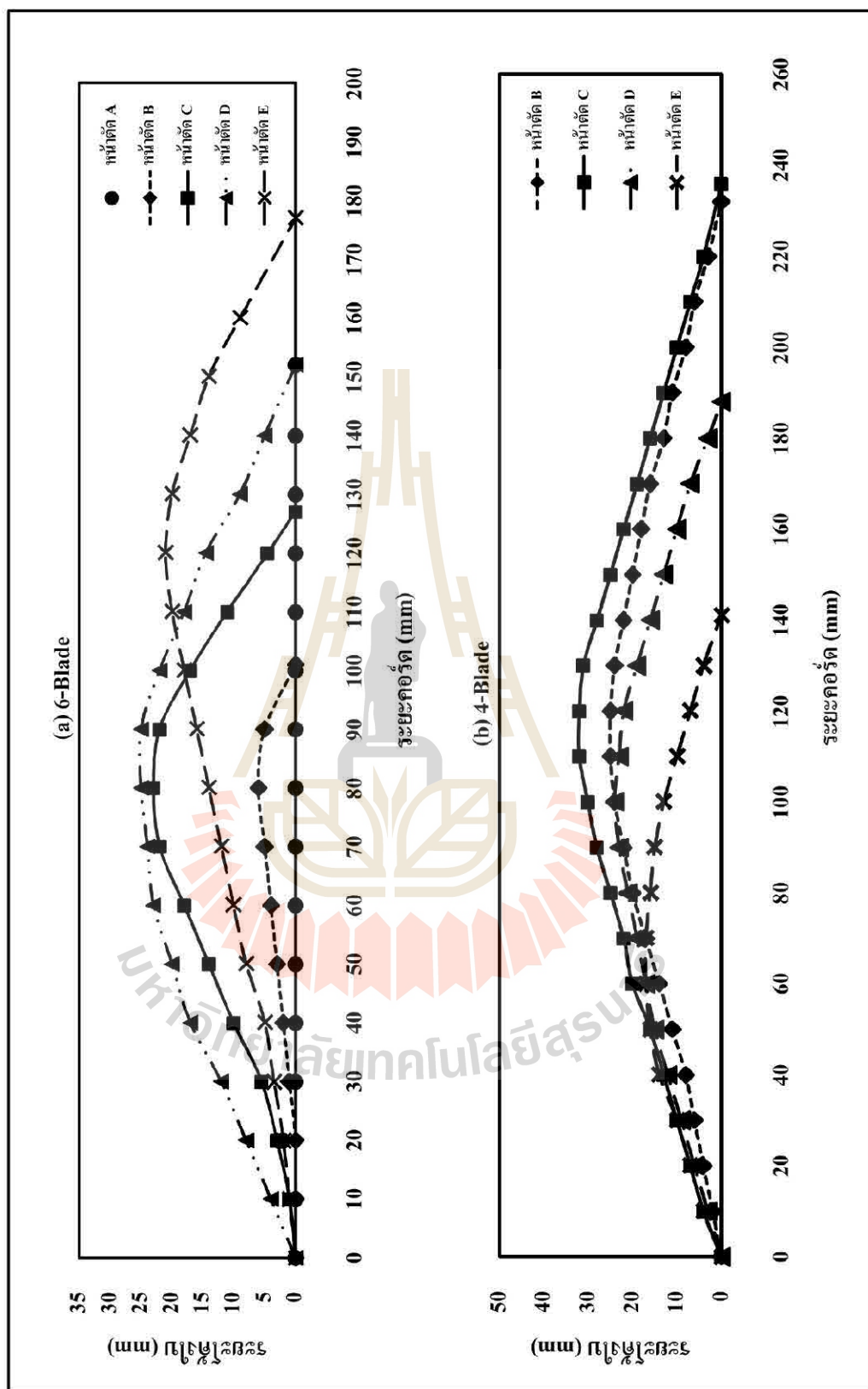
4.8 สรุปผลการประเมินค่า C_l และ C_d ใบกังหันลมเสื่อลำแพนด้วย CFD

4.8.1 ใบกังหันหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบ 6 ใบ

- หน้าตัด A มีค่า C_l/C_d สูงสุดเท่ากับ 5.30 ที่มุมปะทะเท่ากับ 5 องศา
- หน้าตัด B มีค่า C_l/C_d สูงสุดเท่ากับ 11.35 ที่มุมปะทะเท่ากับ 3 องศา
- หน้าตัด C มีค่า C_l/C_d สูงสุดเท่ากับ 7.72 ที่มุมปะทะเท่ากับ 10 องศา
- หน้าตัด D มีค่า C_l/C_d สูงสุดเท่ากับ 7.62 ที่มุมปะทะเท่ากับ 10 องศา
- หน้าตัด E มีค่า C_l/C_d สูงสุดเท่ากับ 10.65 ที่มุมปะทะเท่ากับ 8 องศา

4.8.2 ใบกังหันหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบ 4 ใบ

- หน้าตัด A เหมือนกันกับหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ เนื่องจากเป็น Flat plate เหมือนกัน
- หน้าตัด B มีค่า C_l/C_d สูงสุดเท่ากับ 19.80 ที่มุมปะทะเท่ากับ 5 องศา
- หน้าตัด C มีค่า C_l/C_d สูงสุดเท่ากับ 7.93 ที่มุมปะทะเท่ากับ 10 องศา
- หน้าตัด D มีค่า C_l/C_d สูงสุดเท่ากับ 8.46 ที่มุมปะทะเท่ากับ 10 องศา
- หน้าตัด E มีค่า C_l/C_d สูงสุดเท่ากับ 9.72 ที่มุมปะทะเท่ากับ 10 องศา



รูปที่ 4.2 หน้าตัดใบหมุนจำลองกึ่งหนึ่งลมเสื่อลำแพน

บทที่ 5

โปรแกรม BEM สำหรับกังหันลมเลื้อลำนแพน

5.1 กลำนำ

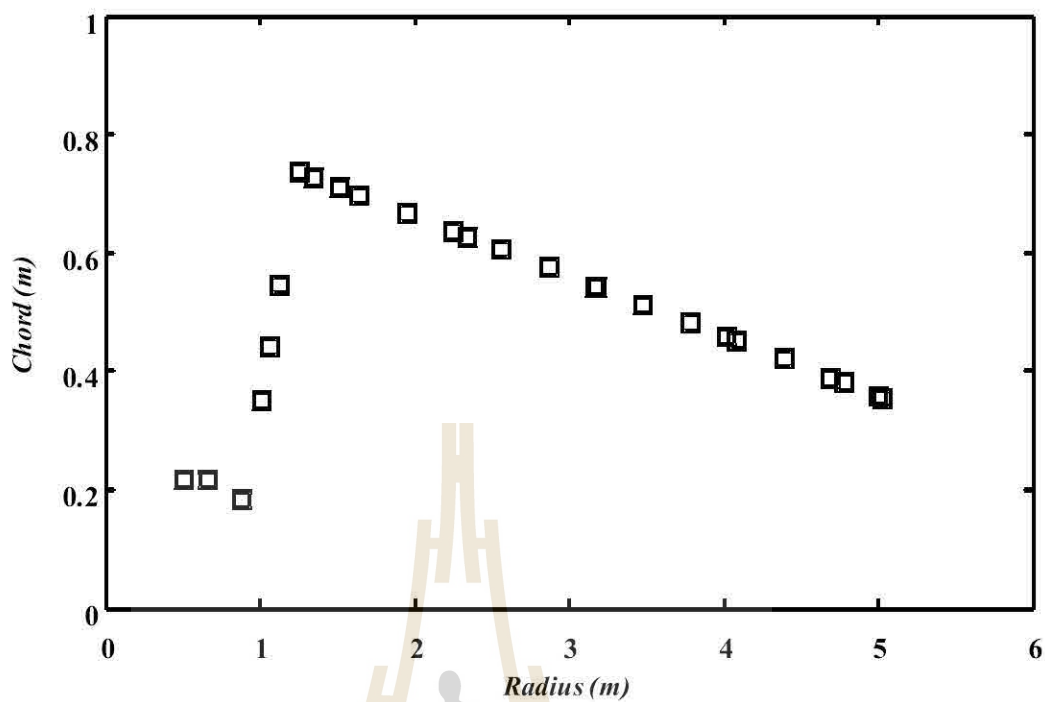
ทฤษฎี BEM มีพื้นฐานมาจาก 2 ทฤษฎีคือ ทฤษฎีโมเมนตัม (Momentum theory) ซึ่งวิเคราะห์โมเมนตัมเชิงเส้นและโมเมนตัมเชิงมุมของการไหลผ่าน Actuator disk แบบวงแหวนซึ่งพิจารณาในระบบ 2 มิติ ซึ่งจะทำได้แรงในแนวแกน (Thrust force) และแรงบิด (Torque) ของวงแหวนนั้นออกมา อีกทฤษฎีหนึ่งคือทฤษฎี Blade element เป็นทฤษฎีที่พิจารณาถึงแรงที่กระทำบนหน้าตัดใบกังหันที่พิจารณาในเอลิเมนต์ใดเอลิเมนต์หนึ่ง ซึ่งก็คือพิจารณาแรงในระบบ 2 มิตินั้นเองและจะได้แรงในแนวแกนและแรงบิดของเอลิเมนต์นั้นออกมาเช่นเดียวกัน เมื่อนำสมการจากทั้งสองทฤษฎีมาเชื่อมความสัมพันธ์กันแล้วจัดสมการใหม่ดังที่ปรากฏในสมการที่ 3.7 สมการที่ 3.14 และสมการที่ 3.15 (ในบทที่ 3) ก็คือทฤษฎี BEM นั่นเอง เนื่องจากวิธี BEM เป็นวิธีการที่ง่ายกว่าวิธี CFD ทำให้เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของกังหันลม อย่างไรก็ตามปัญหานึ่งของการใช้ทฤษฎี BEM คือค่า C_l และ C_d ของใบกังหันที่นำมาใช้คำนวณมักไม่ถูกต้องอย่างแท้จริง เนื่องจากโดยส่วนใหญ่จะเป็นค่าที่ได้จากการทดลองในระบบ 2 มิติ (คือไม่คิดอิทธิพลจากการหมุน) แต่ว่กังหันลมที่ปฏิบัติงานอยู่นั้นจะต้องมีการหมุนเกิดขึ้นเสมอ ทำให้มีผลกระทบของแรงอื่นที่เกิดจากการหมุนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเรียกว่าผลกระทบใน 3 มิติ แรงดังกล่าวนั้นก็คื Centrifugal force และ Coriolis force ด้วยเหตุนี้ทำให้ค่า C_l และ C_d ที่ทดลองในระบบ 2 มิติจึงอาจจะยังไม่ถูกต้องนักหากนำมาใช้ประเมินประสิทธิภาพกังหันลมโดยตรง ซึ่งเป็นที่เข้าใจกันว่าผลจากการหมุนนั้นเป็นเหตุให้เกิดพฤติกรรม Stall-Delay กล่าวคือทำให้ค่าแรงยกและตำแหน่งการ Stall เปลี่ยนไป อย่างไรก็ตามค่า C_l และ C_d จากการทดลองในระบบ 2 มิติยังคงสามารถนำมาใช้ประเมินประสิทธิภาพกังหันลมด้วยทฤษฎี BEM ได้โดยเพิ่มแบบจำลองพิเศษเข้าไปในโปรแกรม เช่นแบบจำลองหลังการ Stall (Post stall model) ของ Viterna and Corrigan (1981) หรือแบบจำลอง Stall-Delay ของ Snel et al. (1993) รวมถึงแบบจำลองการสูญเสียปลายใบและโคนใบของ Prandtl (1927) เป็นต้น เพื่อให้ผลการประเมินมีความแม่นยำมากขึ้น การประเมินประสิทธิภาพกังหันลมโดยใช้ทฤษฎี BEM จะต้องทราบข้อมูลใบกังหัน เช่น หน้าตัดแพนอากาศ ความยาวคอร์ด มุมพิช ความยาวใบ และจำนวนใบ รวมถึงค่า C_l และ C_d ของแพนอากาศด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้ค่า C_l และ C_d ของใบกังหันลมเลื้อลำนแพนจากการคำนวณด้วย CFD ดังที่กล่าวในบทที่ 4

5.2 การสอบเทียบโปรแกรม BEM

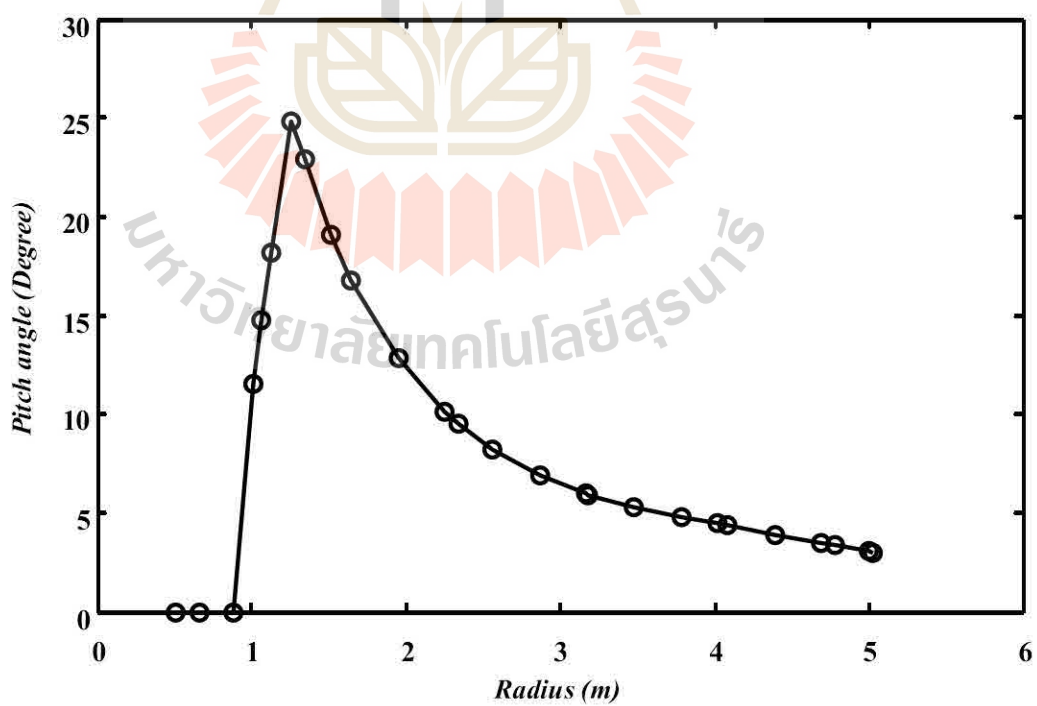
ก่อนทำการประเมินค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) หรือประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมสี่ลําแพนด้วยทฤษฎี BEM อันดับแรกจะทำการสอบเทียบโปรแกรม BEM ที่สร้างขึ้นจากทฤษฎีก่อนเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของทฤษฎี ในหัวข้อนี้จะทำการสอบเทียบโปรแกรม BEM ดังกล่าวกับผลการทดลองของกังหันลม NREL Phase VI (Tangler และ Kocurek, 2005) ซึ่งข้อมูลกังหันลม NREL Phase VI แสดงอยู่ในตารางที่ 5.1 (Hand et al., 2001) และรูปที่ 5.1-5.2 (Jonkman, 2003) สำหรับโปรแกรม BEM ที่จะทำการสอบเทียบนี้ได้เพิ่มแบบจำลองการปรับปรุงตัวแปรบางอย่างร่วมด้วย ดังนี้ 1) แบบจำลองหลังการ Stall (Post stall model) ของ Viterna และ Corrigan (1981) ซึ่งเป็นการปรับแก้ค่า C_l และ C_d ใน 2 มิติหลังการ Stall ให้มีผลใน 3 มิติเพื่อทำให้มีความถูกต้องมากขึ้น ข้อดีของแบบจำลองนี้คือสามารถประมาณค่านอกช่วงที่มุมปะทะสูงได้ 2) แบบจำลองการสูญเสียปลายใบและโคนใบของ Prandtl (1927) และ 3) การปรับค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกนของ Buhl (2005) ซึ่งผลการสอบเทียบพบว่ากำลังงานทางกล (Wind turbine power) ของ NREL Phase VI ที่ประเมินด้วยทฤษฎี BEM ให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดีเฉพาะในช่วงความเร็วลมต่ำ (6-17 เมตร/วินาที) ซึ่งเป็นช่วงที่มุมปะทะต่ำซึ่งยังไม่เกิดการไหลแยก แต่ในช่วงความเร็วลมสูง (20-25 เมตร/วินาที) ผลการประเมินด้วยโปรแกรม BEM มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองค่อนข้างมากดังที่แสดงในรูปที่ 5.5 เหตุผลของความคลาดเคลื่อนเกิดจากผลกระทบของการไหลแยกที่ทำให้ค่า C_l และ C_d มีความผิดพลาดสูง ดังนั้นจะเห็นว่าการประเมินค่ากำลังงานทางกลหรือประสิทธิภาพกังหันลมด้วยทฤษฎี BEM จะให้ความแม่นยำเฉพาะในช่วงที่มุมปะทะต่ำเท่านั้น

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลกังหันลม NREL Phase VI (Hand et al., 2001)

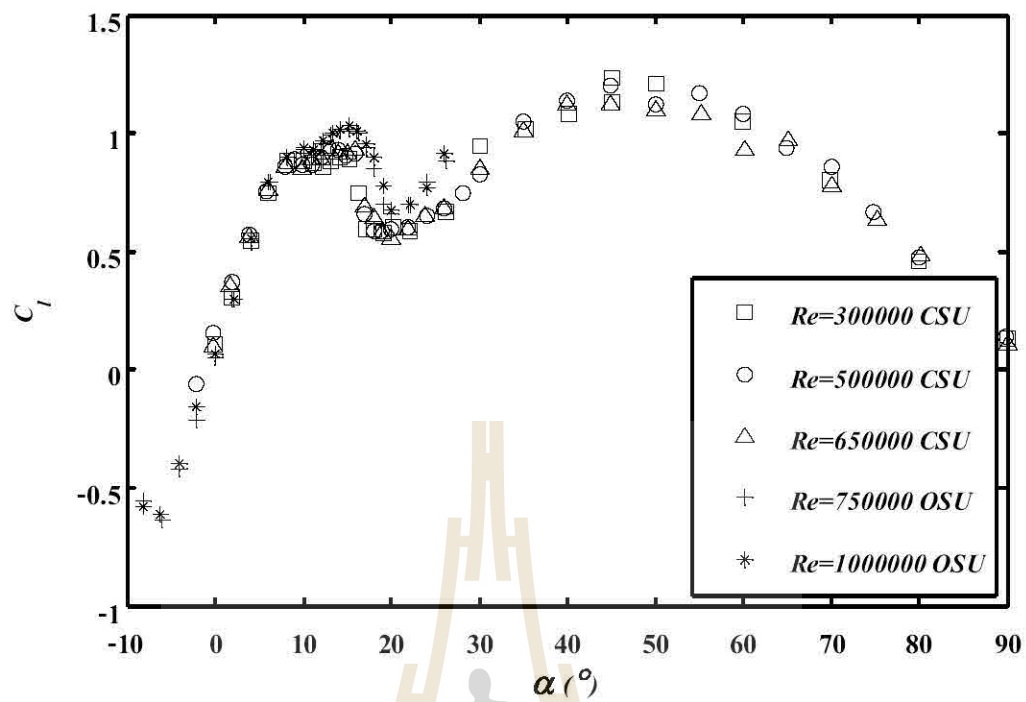
ตัวแปร	คุณลักษณะ	หน่วย
จำนวนใบ	2	ใบ
ตำแหน่งโรเตอร์	Upwind	N/A
เส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์	10.1	เมตร
หน้าตัดแพนอากาศ	S809	N/A
ความยาวคอร์ด	แสดงในรูปที่ 5.1	N/A
มุมพิช	แสดงในรูปที่ 5.2	N/A
ค่า C_l และ C_d ใน 2 มิติ	แสดงในรูปที่ 5.3-5.4	N/A
ความเร็วลมในการประเมิน	6-25	เมตร/วินาที
ความเร็วรอบ	72	RPM



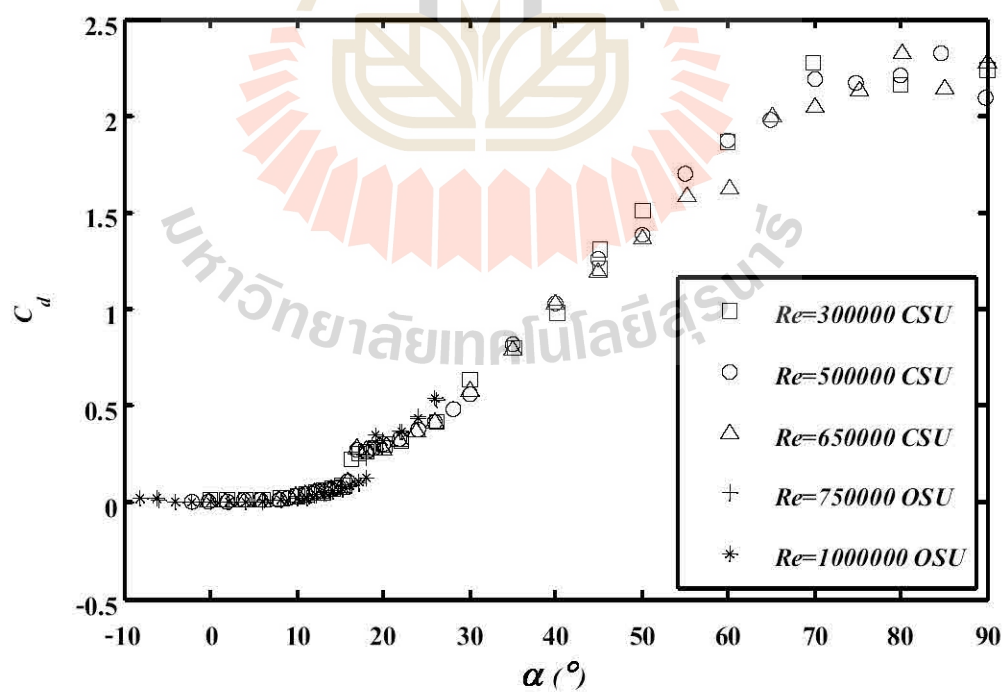
รูปที่ 5.1 ความยาวคอर्डของใบกังหันลม NREL Phase VI (Jonkman, 2003)



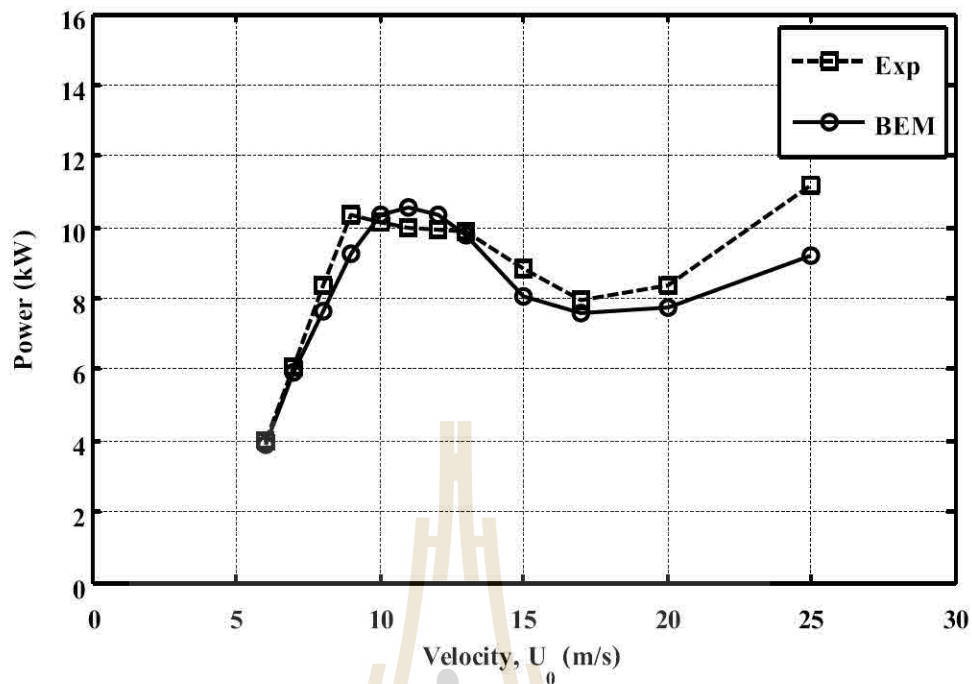
รูปที่ 5.2 การบิดใบของใบกังหันลม NREL Phase VI (Jonkman, 2003)



รูปที่ 5.3 สัมประสิทธิ์แรงยกของแพนอากาศ S809 (Jonkman, 2003)



รูปที่ 5.4 สัมประสิทธิ์แรงต้านของแพนอากาศ S809 (Jonkman, 2003)



รูปที่ 5.5 ผลการสอบเทียบโปรแกรม BEM กับผลการทดลองกังหันลม NREL Phase VI

5.3 ข้อมูลใบกังหันลมสี่ลำแพน

หุ่นจำลองกังหันลมสี่ลำแพนที่จะทำการประเมินประสิทธิภาพพลังงานด้วยทฤษฎี BEM ในบทนี้เป็นตัวเดียวกันกับหุ่นจำลองในบทที่ 4 ซึ่งได้คำนวณหาค่า C_l และ C_d ของหน้าตัดใบด้วย CFD รอไว้แล้ว (หน้าตัดใบ A-E) ซึ่งเป็นหน้าตัดใบที่เกิดจากการตั้งค่ามุมพิชปลายใบเท่ากับ 10 องศา อย่างไรก็ตามการประเมินประสิทธิภาพพลังงานหุ่นจำลองกังหันลมสี่ลำแพนครั้งนี้จะทดลองแปรผันค่ามุมพิชปลายใบค่าอื่นด้วยรวมทั้งหมด 4 มุมคือ $\beta_1 = 5^\circ$ $\beta_2 = 10^\circ$ $\beta_3 = 15^\circ$ และ $\beta_4 = 20^\circ$ เพื่อดูการส่งผลของมุมพิชปลายใบที่มีต่อประสิทธิภาพพลังงาน ในบทที่ 4 ได้พูดถึงการตั้งสมมุติฐานอันหนึ่งเพื่อที่จะทำให้ปัญหาง่ายขึ้นซึ่งก็คือ ลักษณะหน้าตัดใบจะไม่ขึ้นอยู่กับการตั้งมุมพิชปลายใบ ดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพพลังงานที่มุมพิชปลายใบค่าอื่นสามารถใช้ค่า C_l และ C_d ค่าเดียวกันนี้ได้ ข้อมูลใบกังหันของหุ่นจำลองกังหันลมบางส่วนได้นำเสนอแล้วในบทที่ 4 ซึ่งประกอบด้วย รูปร่าง (ความโค้ง) ของหน้าตัดใบ และความยาวคอร์ด ยังขาดอีกข้อมูลหนึ่งคือ มุมพิช (ที่ตำแหน่งรัศมีต่าง ๆ) การวัดค่ามุมพิชในแต่ละรัศมีจะทำการวัดค่าในทำนองเดียวกันกับการวัดค่าความโค้งหน้าตัดใบกังหันดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2 (ในบทที่ 4) (ดูรูปที่ 4.1) ดังนั้นค่ามุมพิชที่เกิดขึ้นจากการตั้งค่ามุมพิชปลายใบทั้ง 4 ค่าจะแสดงอยู่ในตารางที่ 5.2-5.3 และรูปที่ 5.6-5.7

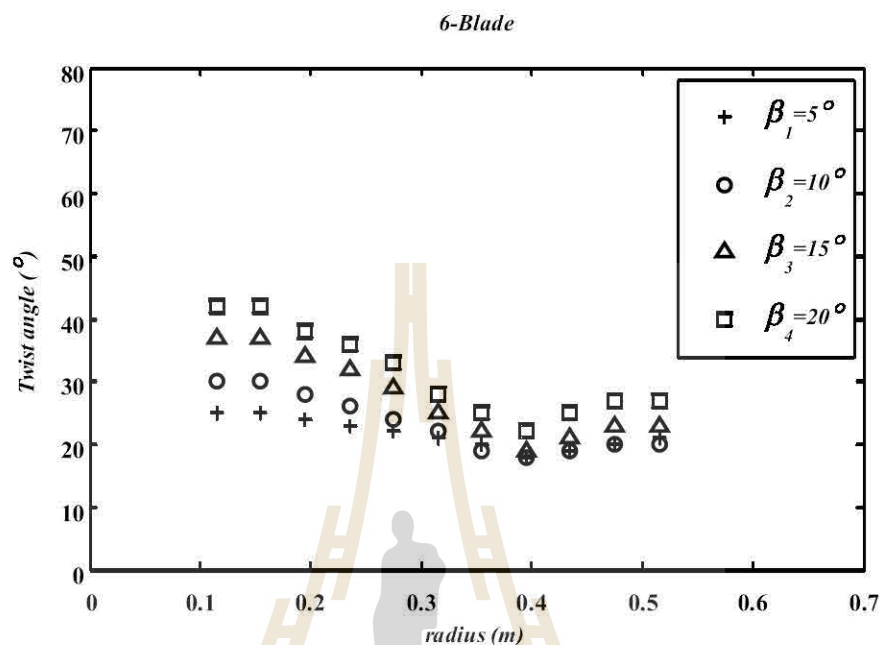
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลใบกังหันลมเกลื่อลำแพนแบบ 6 ใบ

ตำแหน่ง	r (m)	c (m)	$\beta_1 = 5^\circ$	$\beta_2 = 10^\circ$	$\beta_3 = 15^\circ$	$\beta_4 = 20^\circ$
P0	0.115	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
P1	0.155	0.025	25.0	30.0	37.0	42.0
P2	0.195	0.051	24.0	28.0	34.0	38.0
P3	0.235	0.076	23.0	26.0	32.0	36.0
P4	0.275	0.101	22.0	24.0	29.0	33.0
P5	0.315	0.127	21.0	22.0	25.0	28.0
P6	0.355	0.152	20.0	19.0	22.0	25.0
P7	0.395	0.177	18.0	18.0	19.0	22.0
P8	0.435	0.152	19.0	19.0	21.0	25.0
P9	0.475	0.076	20.0	20.0	23.0	27.0
P10	0.515	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0

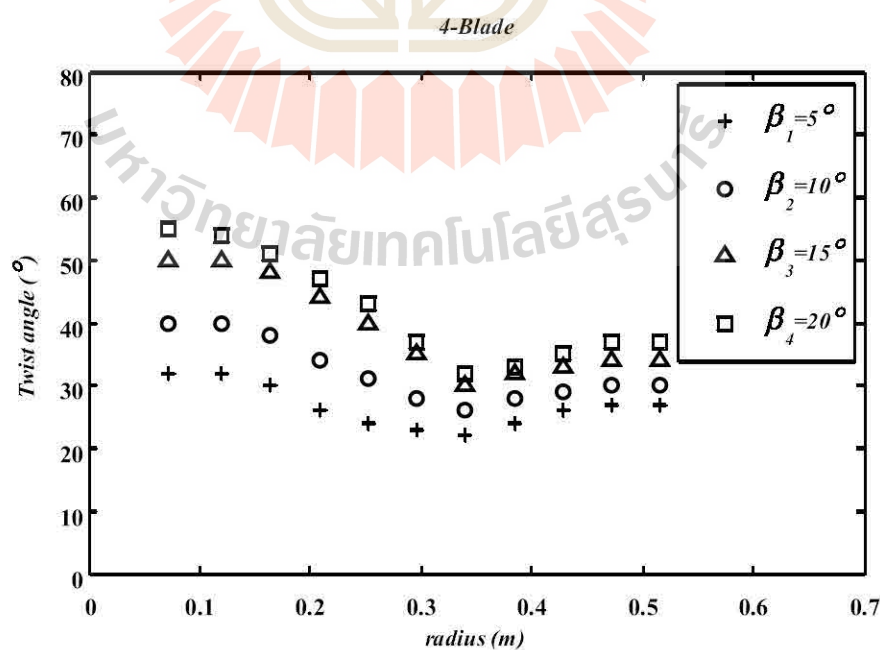
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลใบกังหันลมเกลื่อลำแพนแบบ 4 ใบ

ตำแหน่ง	r (m)	c (m)	$\beta_1 = 5^\circ$	$\beta_2 = 10^\circ$	$\beta_3 = 15^\circ$	$\beta_4 = 20^\circ$
P0	0.072	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
P1	0.120	0.062	32.0	40.0	50.0	54.0
P2	0.164	0.118	30.0	38.0	48.0	51.0
P3	0.208	0.175	26.0	34.0	44.0	47.0
P4	0.252	0.232	24.0	31.0	40.0	43.0
P5	0.296	0.236	23.0	28.0	35.0	37.0
P6	0.340	0.188	22.0	26.0	30.0	32.0
P7	0.384	0.141	24.0	28.0	32.0	33.0
P8	0.428	0.093	26.0	29.0	33.0	35.0
P9	0.472	0.046	27.0	30.0	34.0	37.0
P10	0.515	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0

รูปที่ 5.6-5.7 แสดงแนวโน้มค่ามุมพิชิตตลอดแนวรัศมีของใบกังหันลมเสื่อลำแพนแบบ 6 ใบ และ 4 ใบ ตามลำดับ โดยตั้งค่ามุมพิชิตปลายใบ 5-20 องศา (พล็อตตามข้อมูลในตารางที่ 5.1-5.2)



รูปที่ 5.6 มุมพิชิตใบกังหันลมเสื่อลำแพนขนาด 1 เมตร แบบ 6 ใบ



รูปที่ 5.7 มุมพิชิตใบกังหันลมเสื่อลำแพนขนาด 1 เมตร แบบ 4 ใบ

5.4 โปรแกรม BEM สำหรับกังหันลมเสื่อลำแพน

เมื่อเตรียมข้อมูลที่เกี่ยวข้องครบถ้วนแล้วจึงทำการเขียนโปรแกรมเพื่อแก้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_P) และประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมเสื่อลำแพนตามหลักการทฤษฎี BEM โดยการทำซ้ำ (Iteration) ด้วยโปรแกรม MATLAB Version R2011a โดยที่การสร้างโปรแกรม BEM ครั้งนี้ จะประกอบด้วยแบบจำลองย่อยและเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

5.4.1 เพิ่มผลของการสูญเสียปลายใบและโคนใบโดยใช้แบบจำลองของ Prandtl (1927)

5.4.2 ปรับปรุงค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกนด้วยแบบจำลองของ Buhl (2005)

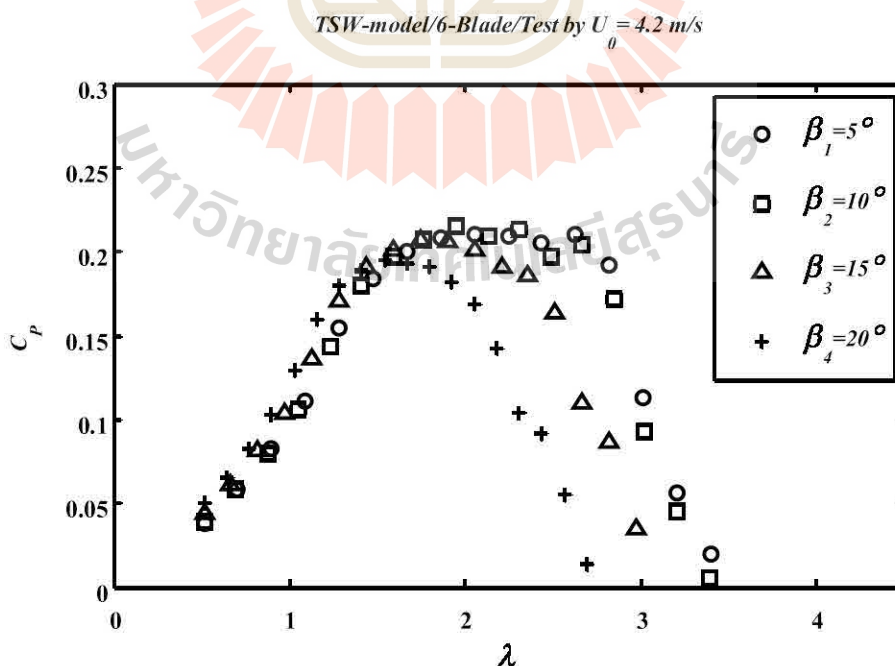
5.4.3 ในเบื้องต้นจะยังไม่คิดแรงจากอิทธิพลใน 3 มิติ (Rotational effect) ดังนั้นจึงใช้ค่า C_l และ C_d ของใบกังหันลมเสื่อลำแพนที่ประเมินหาด้วย CFD ใน 2 มิติ ที่คำนวณไว้ในบทที่ 4

5.4.4 จำลองที่ความเร็วลม 3 ค่าประกอบด้วย 4.2 5.6 และ 7.0 เมตร/วินาที

ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณจะประกอบด้วย สมการที่ (3.7) (3.20) (3.21) และสมการที่ (3.22) เมื่อทำการเขียนโปรแกรมตามหลักการทฤษฎี BEM และแบบจำลองเพิ่มเติมดังกล่าวจึงปรากฏ code ดังที่แสดงในภาคผนวก ค

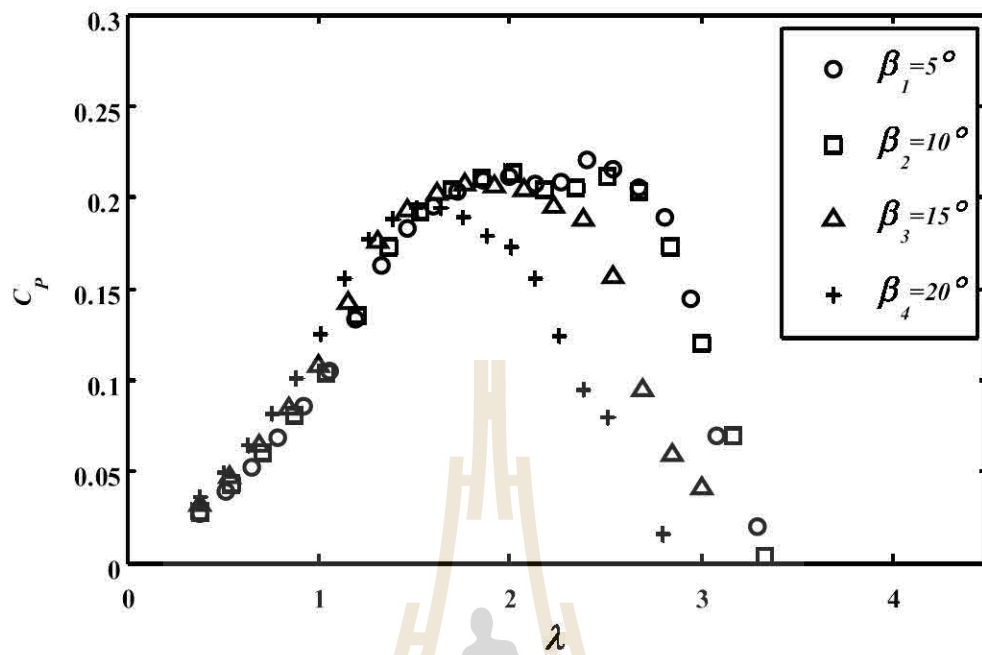
5.5 ผลการประเมินประสิทธิภาพพลังงานด้วยทฤษฎี BEM

5.5.1 ผลการประเมินสัมประสิทธิ์กำลัง (C_P) ของหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบ 6 ใบ



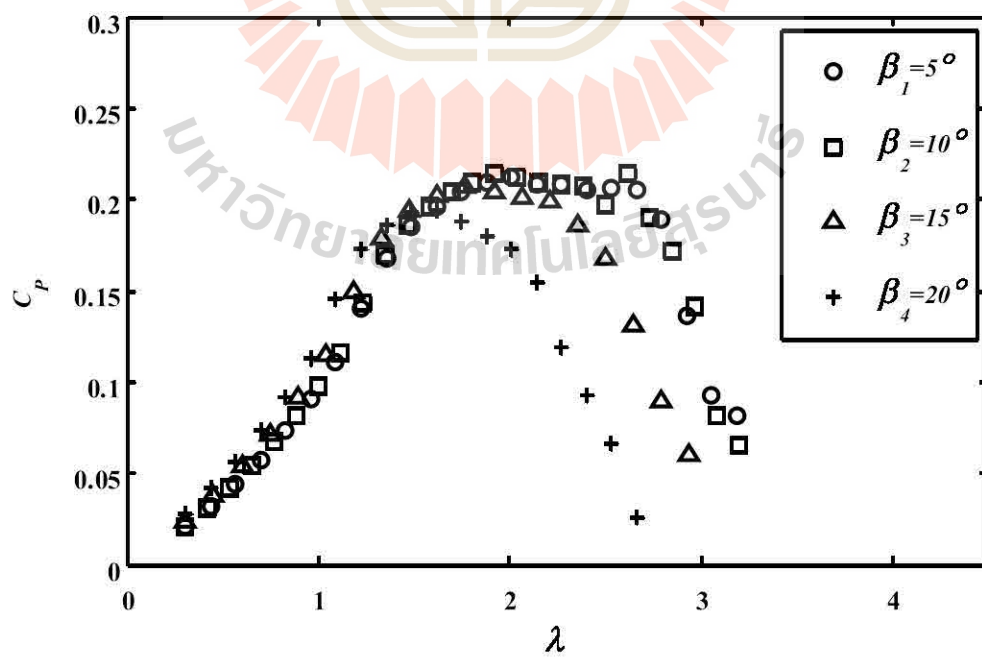
รูปที่ 5.8 ผลการประเมิน C_P หุ่นจำลองแบบ 6 ใบ ด้วยทฤษฎี BEM จำลองที่ $U_0 = 4.2 \text{ m/s}$

TSW-model/6-Blade/Test by $U_0 = 5.6 \text{ m/s}$



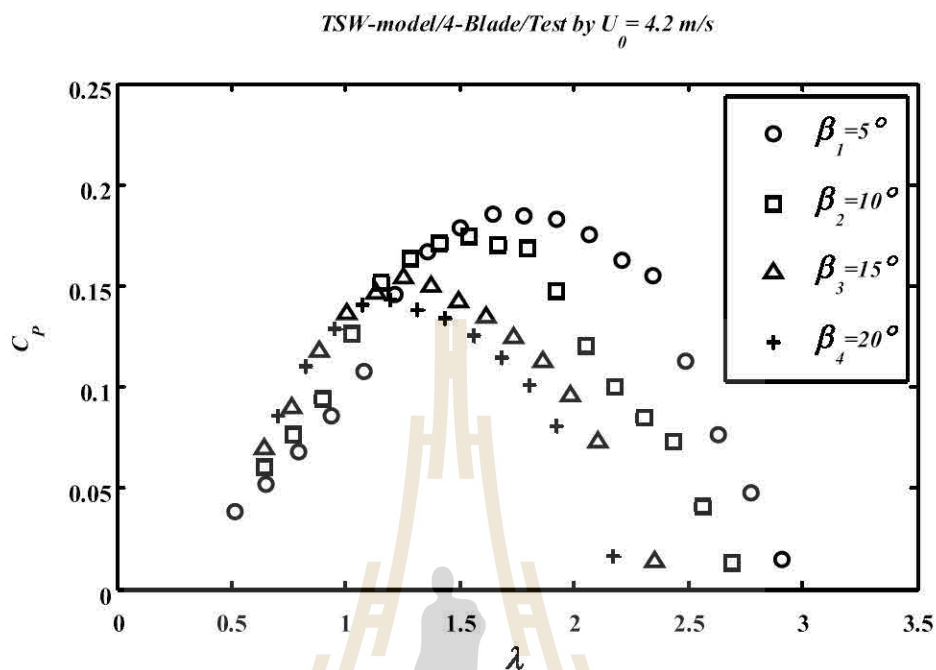
รูปที่ 5.9 ผลการประเมิน C_p หุ่นจำลองแบบ 6 ใบ ด้วยทฤษฎี BEM จำลองที่ $U_0 = 5.6 \text{ m/s}$

TSW-model/6-Blade/Test by $U_0 = 7.0 \text{ m/s}$

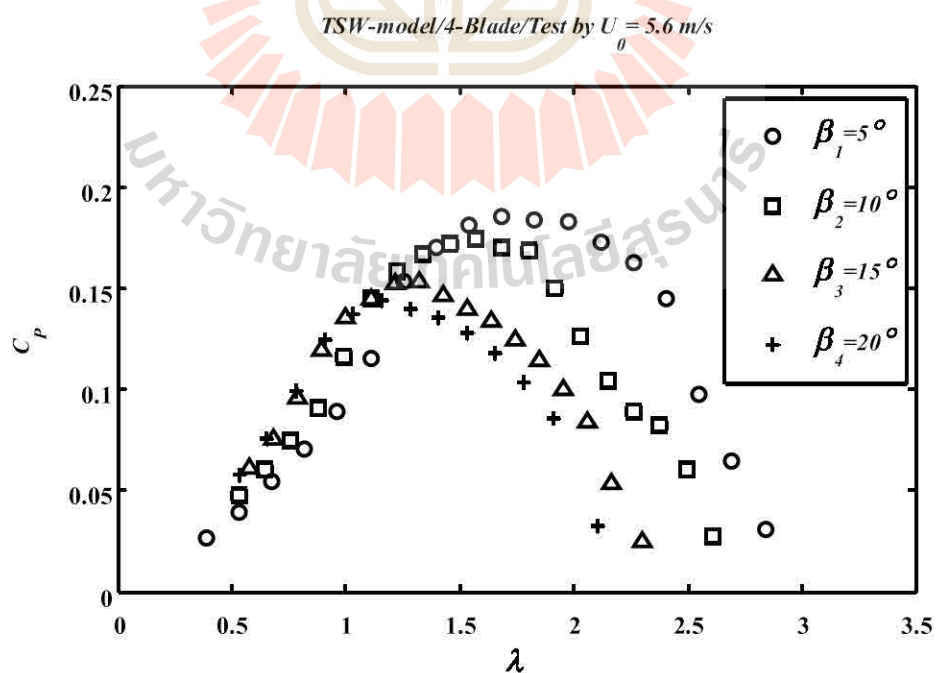


รูปที่ 5.10 ผลการประเมิน C_p หุ่นจำลองแบบ 6 ใบ ด้วยทฤษฎี BEM จำลองที่ $U_0 = 7.0 \text{ m/s}$

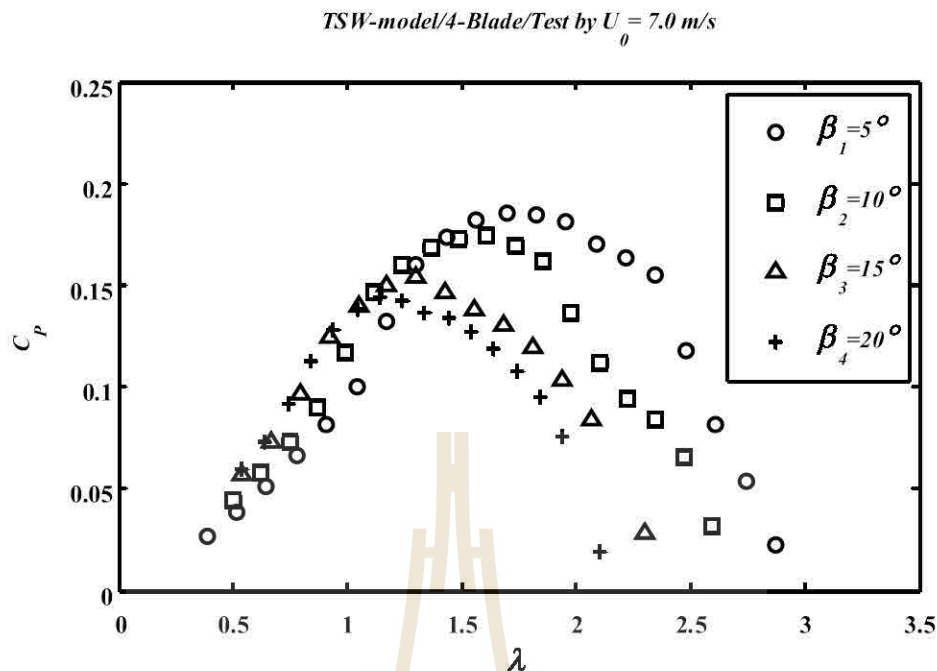
5.5.2 ผลการประเมินสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ของหุ่นจำลองกังหันลมสี่ลำแบบ 4 ใบ



รูปที่ 5.11 ผลการประเมิน C_p หุ่นจำลองแบบ 4 ใบ ด้วยทฤษฎี BEM จำลองที่ $U_0 = 4.2 \text{ m/s}$



รูปที่ 5.12 ผลการประเมิน C_p หุ่นจำลองแบบ 4 ใบ ด้วยทฤษฎี BEM จำลองที่ $U_0 = 5.6 \text{ m/s}$

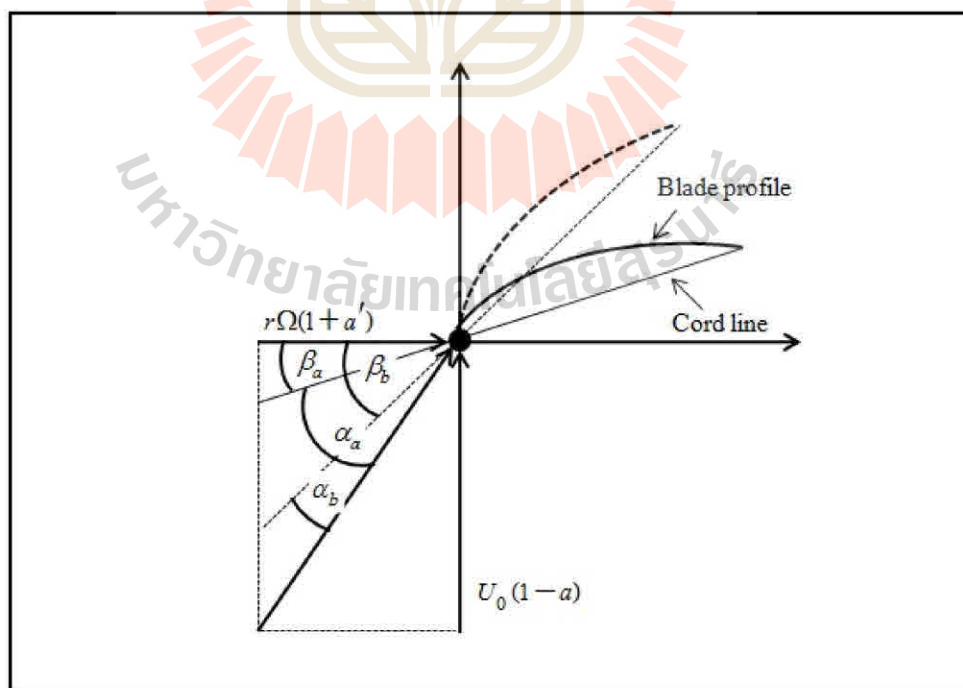


รูปที่ 5.13 ผลการประเมิน C_p หุ่นจำลองแบบ 4 ใบ ด้วยทฤษฎี BEM จำลองที่ $U_0 = 7.0 \text{ m/s}$

5.6 อภิปรายผล

จากรูปที่ 5.8-5.13 แสดงผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ของหุ่นจำลองกังหันลม เสื้อลำแพนที่มุมพิชปลายใบ 4 ค่าของโรเตอร์แบบ 6 ใบ และ 4 ใบ ด้วยทฤษฎี BEM จากการจำลอง ใช้ความเร็วลมเข้าสู่กังหันลม 3 ค่าคือ 4.2 5.6 และ 7.0 เมตร/วินาที ได้ผลดังนี้ ประการแรก พบว่า หุ่นจำลองกังหันลมเสื้อลำแพนแบบ 6 ใบให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงกว่าหุ่นจำลองแบบ 4 ใบในทุก มุมพิชปลายใบ (β) และทุกความเร็วลมทดสอบ (U_0) ประการที่สอง เมื่อทำการจำลองที่ความเร็ว ลมต่างกัน 3 ค่า พบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จะแตกต่างกันเฉพาะค่า ความเร็วรอบและแรงบิด โดยที่เมื่อจำลองใช้ความเร็วลมที่มีค่าสูงก็จะทำให้ความเร็วรอบของกังหัน ลมมีค่าสูงตามไปด้วยแต่แรงบิดจะลดลง การที่ค่าสัมประสิทธิ์กำลังไม่แตกต่างกันมากนักเป็น เพราะว่าการที่ใช้ค่า C_l และ C_d เดียวกันในการคำนวณเนื่องจากได้ตั้งสมมุติฐานว่ารูปร่างหน้าตัด ใบไม่ขึ้นกับความเร็วลมนั่นเอง แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าสัมประสิทธิ์กำลังควรจะแตกต่างกัน เล็กน้อยเพราะความแตกต่างของเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) ประการที่สาม มุมพิช ปลายใบที่ดีที่สุดของหุ่นจำลองแบบ 6 ใบจะอยู่ที่ประมาณ $\beta_1 = 5^\circ$ และ $\beta_2 = 10^\circ$ โดยส่งผลทำ ให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด ($C_{p,max}$) อยู่ที่ 0.22 หรือก็คือประสิทธิภาพพลังงานสูงสุด 22.0% (ซึ่งคำนวณจาก $C_p \times 100\%$) และมุมพิชดังกล่าวให้ช่วง Tip speed ratio (λ) ที่กว้างกว่าการใช้

มุมพิชปลายใบที่มีค่าสูง (15-20 องศา) การก้กั้นลมให้ผลลัพธ์ที่มีช่วง Tip speed ratio กว้างนั้น เป็นผลดี เพราะหมายความว่าก้กั้นลมให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงในจุดปฏิบัติงานที่กว้าง ซึ่งดีกว่า ก้กั้นลมที่มีช่วง Tip speed ratio แคบ สำหรับที่มุมพิชปลายใบที่ $\beta_3 = 15^\circ$ และ $\beta_4 = 20^\circ$ ให้ ประสิทธิภาพพลังงานต่ำกว่าเป็นเพราะว่าที่มุมพิชปลายใบดังกล่าวอาจมีค่าสูงเกินไปจนกระทั่งทำให้ค่ามุมพิชที่บริเวณอื่นตลอดแนวรัศมีใบมีค่าสูงตามไปด้วย ทำให้มุมปะทะ (Angle of attack, α) มีค่าน้อย ดังที่วิเคราะห์แบบเวกเตอร์ในรูปที่ 5.14 จะเห็นว่าหากพิจารณาที่มุมความเร็วลมสัมพัทธ์ ($\phi = \beta + \alpha$) เดียวกัน มุมพิชที่มีค่าสูงกว่า (β_b) จะให้มุมปะทะที่ต่ำกว่า (α_b) และเมื่อมุมพิชที่มี ค่าต่ำกว่า (β_a) จะให้มุมปะทะที่สูงกว่า (α_a) ดังนั้นที่มุมพิช $\beta_3 = 15^\circ$ และ $\beta_4 = 20^\circ$ อาจมีค่า สูงเกินไปทำให้มุมปะทะต่ำจึงทำให้สัดส่วนแรงยกต่อแรงต้าน (Lift to drag ratio, C_l / C_d) มีค่าต่ำ ด้วยและส่งผลให้แรงบิดมีค่าน้อยอีกต่อหนึ่ง ดังนั้นประสิทธิภาพพลังงานจึงต่ำกว่ากรณีมุมพิชปลาย ใบที่ $\beta_1 = 5^\circ$ และ $\beta_2 = 10^\circ$ ซึ่งเป็นมุมพิชปลายใบที่ทำให้เกิดมุมปะทะตลอดแนวรัศมีที่ดีที่สุด สำหรับกรณีหุ่นจำลองแบบ 4 ใบพบว่ามุมพิชปลายใบที่ดีที่สุดมีค่าประมาณ $\beta_1 = 5^\circ$ โดยให้ ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 18.6% ซึ่งต่ำกว่าหุ่นจำลองแบบ 6 ใบประมาณ 15.5% อย่างไรก็ตามนี้เป็นเพียงการประเมินประสิทธิภาพพลังงานก้กั้นลมด้วยทฤษฎี BEM เพียงอย่าง เดียวเท่านั้น ยังไม่อาจยืนยันความถูกต้องได้มากนัก ดังนั้นจะต้องทำการทดลองเปรียบเทียบต่อไป



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ความเร็วลมสัมพัทธ์ ความเร็วรอบ มุมพิช และมุมปะทะ

5.7 สรุปผลการประเมินประสิทธิภาพพลังงานด้วยทฤษฎี BEM

จากการประเมินหาประสิทธิภาพพลังงานด้วยทฤษฎี BEM ของหุ่นจำลองกังหันลมเส้นลําแพนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตรแบบ 6 ใบและ 4 ใบ เฉพาะที่ความชันใบเท่ากับ 28% โดยปรับค่ามุมพิชปลายใบ 4 ค่าคือ $\beta_1 = 5^\circ$ $\beta_2 = 10^\circ$ $\beta_3 = 15^\circ$ และ $\beta_4 = 20^\circ$ สรุปผลได้ดังนี้

5.7.1 จากการจำลองใช้ความเร็วลม 3 ค่าคือ 4.2 5.6 และ 7.0 เมตร/วินาที พบว่าทั้ง 3 ความเร็วลมให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_P) หรือประสิทธิภาพพลังงานและช่วง Tip speed ratio (λ) ไม่แตกต่างกัน ทั้งกรณีหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ และแบบ 4 ใบ

5.7.2 กรณีหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ พบว่ามุมพิชปลายใบที่ดีที่สุดคือ $\beta_1 = 5^\circ$ และ $\beta_2 = 10^\circ$ โดยให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดเท่ากับ 22.0% ($C_{P,max} = 0.220$) และมีช่วง Tip speed ratio (λ) สูงสุดเท่ากับ 3.5 ส่วนมุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ ให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุด ($C_{P,max} \times 100\%$) น้อยที่สุดคือ 19.5% ($C_{P,max} = 0.195$) และมีช่วง Tip speed ratio (λ) สูงสุดเท่ากับ 2.7

5.7.3 กรณีหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ พบว่ามุมพิชปลายใบที่ดีที่สุดคือ $\beta_1 = 5^\circ$ โดยให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดเท่ากับ 18.6% ($C_{P,max} = 0.186$) และมีช่วง Tip speed ratio (λ) สูงสุดเท่ากับ 3.0 ส่วนมุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ ให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุด ($C_{P,max} \times 100\%$) น้อยที่สุดคือ 14.4% ($C_{P,max} = 0.144$) และมีช่วง Tip speed ratio (λ) สูงสุดเท่ากับ 2.4

5.7.4 เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานระหว่างกรณีหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ และกรณีแบบ 4 ใบ พบว่าหุ่นจำลองแบบ 6 ใบให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดมากกว่ากรณีแบบ 4 ใบ มากถึง 18.27%

บทที่ 6

หุ่นจำลองและวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ให้เห็นว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานได้จริง รวมถึงวิธีการแปรผันค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมเพื่อทดลองหาค่าที่ดีที่สุด รวมถึงวิธีการทดลอง (Test method) อุปกรณ์การทดลอง (Tool) และขั้นตอนการทดลอง (Test procedure)

6.1 หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม

กังหันลมเสื่อลำแพน (TSW) เป็นกังหันลมแนวนอน (Horizontal axis wind turbine, HAWT) การวางตัวของโรเตอร์อยู่ในตำแหน่ง Upstream (หรือเรียกว่า Upwind type) และไม่มีระบบการส่ายหาลม (No yaw control) ใบกังหันทำด้วยผ้าใบซึ่งตัดเป็นรูปสามเหลี่ยม ส่วนใหญ่มีจำนวน 6 ใบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์ประมาณ 6-8 เมตร ดังรูปที่ 6.1 โดยใช้งานควบคุมกับระดัควิดน้ำ ดังรูปที่ 6.2 ใบกังหันลมเสื่อลำแพนมีลักษณะมุมพิชแบบคงที่ (Fixed pitch) ทำงานแบบ Full variable speed ใบกังหันลมมีการบิดตัวแบบอัตราบิดโดยมุมบิด (Twist angle) จะขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่พัดผ่านใบ กังหันลมเสื่อลำแพนมีการขับเคลื่อนโดยใช้แรงยก (Lift type of wind turbine) แล้วแตกแรงยกกลายเป็นแรงบิด (Torque) ในอดีตนิยมใช้ไม้ไผ่สานเป็นแผ่นคล้ายเสื่อ (Bamboo mat woven) ทำเป็นใบกังหันแต่ปัจจุบันเปลี่ยนมาใช้เป็นผ้าใบแทนเนื่องจากแผ่นเสื่อลำแพนมีอายุการใช้งานต่ำ เสากังหันมีจำนวน 2 เสาซึ่งทำจากไม้สักหรือไม้แดง และเนื่องจากไม่มีระบบการส่ายหาลมดังนั้นตัวโรเตอร์จะถูกบังคับรับลมทิศทางเดียวตามทิศทางลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือหรือไม่กี่ตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเมื่อลมเปลี่ยนทิศทางเพราะว่ามุมรับลมจะไม่ตั้งฉาก กังหันลมเสื่อลำแพนมีความตันใบ (Solidity) อยู่ในช่วง 15-60% และมุมพิชปลายใบ (β) อยู่ในช่วง 10-20 องศา และมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 10-17% (Thep Wong, 2013) ดังนั้นในการทดลองนี้จะทำการสร้างหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม คือสร้างตามรูปแบบเดิมทุกประการ เพียงแต่จะปรับขนาดลดลงจากเดิม 8 เท่าเพื่อความสะดวกต่อการทดลอง ดังนั้นหุ่นจำลองที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 1.0 เมตรเท่านั้นดังรูปที่ 6.3 และเมื่อทำการทดลองหุ่นจำลองแบบดั้งเดิมจะติดตั้งอยู่ในตำแหน่ง Upstream (Upwind type) และโรเตอร์จะไม่สามารถส่ายหาลมได้เหมือนกับกังหันลมเสื่อลำแพนขนาดใหญ่ทุกประการดังที่แสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.1 กังหันลมเลื้อกลำแพนดั้งเดิมขนาดใหญ่



รูปที่ 6.2 ระหัดวิดน้ำ



รูปที่ 6.3 หุ่นจำลองกังหันลมสี่ลำแพนแบบดั้งเดิม



รูปที่ 6.4 การติดตั้งหุ่นจำลองกังหันลมสี่ลำแพนแบบดั้งเดิม

6.2 หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่

สำหรับแนวทางการออกแบบกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่นั้น ผู้วิจัยจะใช้เค้าโครงเดิมอยู่ เพียงแต่จะเสริมหรือปรับปรุงต่อยอด (Modify) บางจุดเท่านั้นที่เห็นว่าสามารถเปลี่ยนแปลงเพื่อช่วยให้มีประสิทธิภาพพลังงานสูงขึ้นและประหยัดขึ้นกว่าเดิมได้โดยมีแนวทางดังนี้

1. เปลี่ยนลักษณะโรเตอร์เดิมซึ่งเป็นแบบ Upwind กลายมาเป็นแบบ Downwind เนื่องจากลักษณะโรเตอร์แบบ Downwind มีประโยชน์ในการช่วยให้ตัวกังหันสามารถส่ายหาลมได้ด้วยตัวเอง (Passive yaw control) ซึ่งจะประหยัดกว่าโรเตอร์แบบ Upwind ที่ต้องติดตั้งหาง (Tail fin) (Gipe, 2004) อีกทั้งสามารถลดจำนวนเสาเหลือเพียง 1 เสาเท่านั้น

2. ปรับค่าความตันใบ (Solidity) เกษตรกรที่ทำนาเกลือส่วนใหญ่มักสร้างกังหันลมเสื่อลำแพนขึ้นใช้เองโดยออกแบบจากประสบการณ์และการทำต่อ ๆ กันมา ซึ่งส่วนใหญ่ไม่ได้พิจารณาตัวแปรนี้มากนัก (สังเกตจากการใช้ค่าความตันใบอยู่ในช่วงกว้างมากคือ 15-60%) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองหาค่าความตันใบที่ดีที่สุด

3. ปรับค่ามุมพิชปลายใบ (Pitch angle, β) จากการประเมินประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมด้วยทฤษฎี BEM ในบทที่ 5 จะเห็นว่า ตัวแปรนี้ส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมเนื่องจากมุมพิชนี้จะส่งผลต่อมุมปะทะและส่งผลต่อแรงยกและแรงบิดอีกต่อหนึ่ง ความจริงแล้วใบกังหันลมเสื่อลำแพนมีลักษณะการบิดตัวแบบอัตโนมัติ กล่าวคือหากแบ่งใบกังหันลมออกเป็นเอลิเมนต์จะพบว่าค่ามุมพิชในแต่ละเอลิเมนต์มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการตั้งค่ามุมพิชปลายใบดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 5.6-5.7 (ในบทที่ 5) ดังนั้นการทดลองนี้จะทำการหาค่ามุมพิชปลายใบที่ดีที่สุด

4. ทำการปิดปลายใบกังหันซึ่งแต่เดิมใบกังหันมีลักษณะแบบเปิด (Opened blade tip) ในการทดลองนี้จะทำการปิดปลายใบ (Closed blade tip) ซึ่งสันนิษฐานว่าน่าจะเพิ่มประสิทธิภาพได้มากจากการลด Tip loss และช่วยอุ้มลมที่ปลายใบได้มากขึ้น

5. การใช้ Hub-fairing เพื่อลด Hub loss และ Wake ที่ด้านหลังโรเตอร์

6. การปรับจำนวนใบ (Blade number) ทำการทดลองโดยใช้จำนวนใบเท่ากับ 6 ใบ 4 ใบ และ 3 ใบ ดังรูปที่ 6.6-6.8 เพื่อหาจำนวนใบที่ดีที่สุด

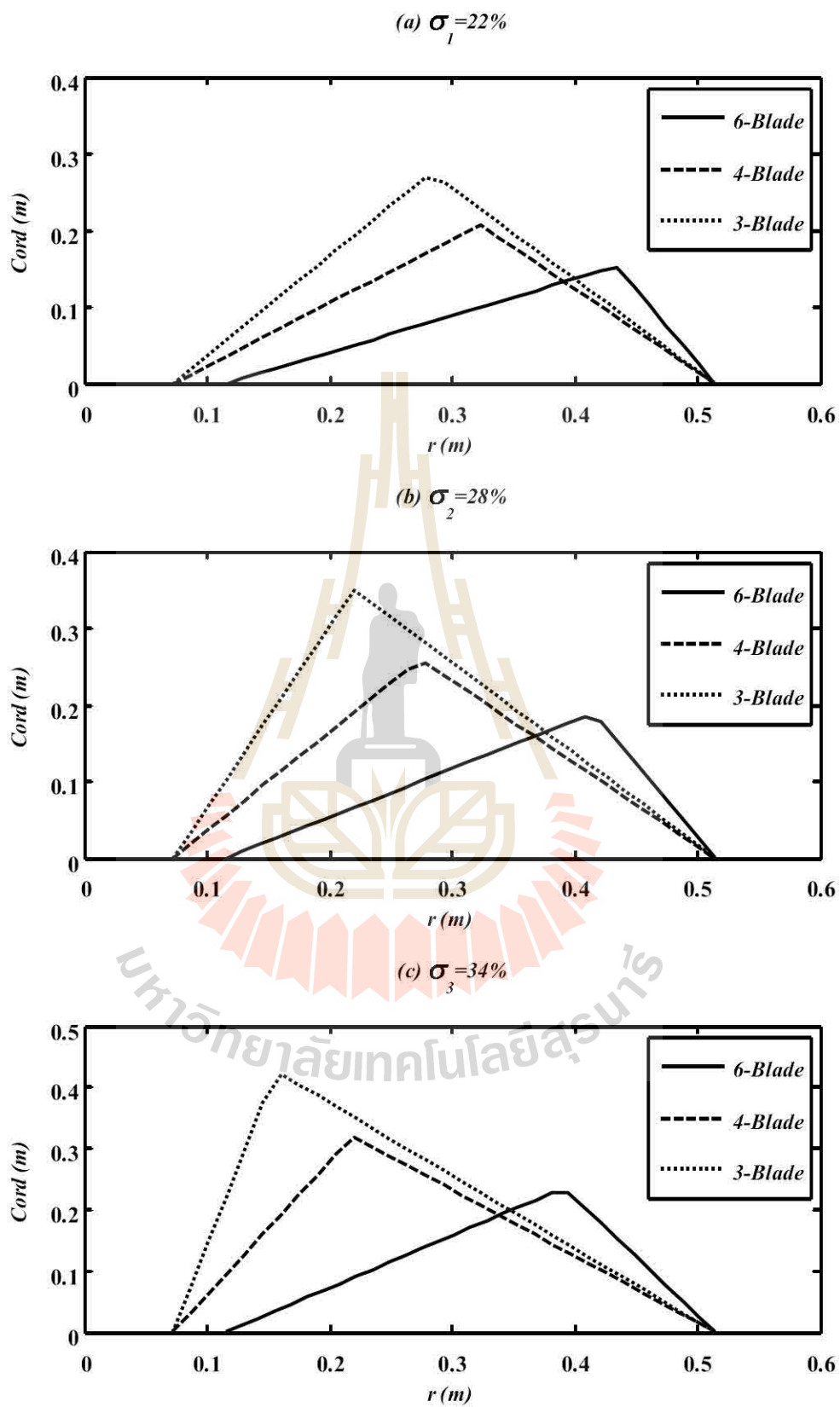
6.2.1 ความตันใบ

ความตันใบ (Solidity, σ) มีนิยามคือพื้นที่ฉายของใบกังหันหารด้วยพื้นที่ระนาบของโรเตอร์ดังนั้นจึงไม่มีหน่วย หากดูจากนิยามแล้วความหมายทางกายภาพของความตันใบก็คือความทึบของใบนั่นเอง เราสามารถจินตนาการได้ว่าหากกังหันยังมีความตันใบสูงก็จะสามารถสร้างแรงบิด (Torque) ได้สูงตามไปด้วยเพราะมีพื้นที่ใบมาก อย่างไรก็ตามเมื่อมองอีกด้านหนึ่ง ถ้าหากค่าความตันใบมีค่าสูงเกินไปก็จะทำให้การไหลของอากาศผ่านเข้าสู่ใบกังหันลมได้น้อยลงเพราะเกิด

การบังลมมากขึ้น (Axial induction factor, a สูงขึ้น) ทำให้ความเร็วลมสัมพัทธ์น้อยลง เป็นสาเหตุให้แรงบิดที่ได้ลดลง ดังนั้นจะเห็นว่าการที่ความดันใบสูงไม่ได้ให้ผลดีเสมอไป หากสังเกตกังหันลมสมัยใหม่ (Modern wind turbines) จะเห็นว่ามีความดันใบน้อยกว่ากังหันลมเสื่อลำแพนมาก ยกตัวอย่างเช่นกังหันลมในกลุ่ม NASA/DOE เช่น Mod-0 Mod-1 และ Mod-2 เป็นกังหันลมแนวนอนมีจำนวนใบเพียง 2 ใบ และมีความดันใบคือ 2.9% 4.2% และ 3.6% เท่านั้น ตามลำดับ (Spera, 1998) แต่ก็สามารถทำงานได้ดีในแง่ของการผลิตกระแสไฟฟ้า ในขณะที่กังหันลมบางประเภทมีความดันใบสูงมาก เช่น กังหันลมอเมริกัน หรือ กังหันลมแบบใบเหล็กหลายใบ (Multi-bladed steel rotor) กังหันลมจำพวกนี้มีความดันใบสูงมากอยู่ที่ประมาณ 80% (Gipe, 2004) หรือแม้แต่กังหันลมเสื่อลำแพนของไทยเองก็มีความดันใบที่ค่อนข้างสูงคือมีค่าประมาณ 15-60% (Thepwong, 2013) กังหันลมประเภทที่มีความดันใบสูงจะทำงานได้ดีในแง่ของการสูบน้ำในพื้นที่ที่มีความเร็วลมต่ำ (Gipe, 2004) เพราะต้องการแรงบิดโดยตรงจะได้ไม่ต้องทำการทอรอบอีกประการหนึ่งการที่กังหันลมใช้ค่าความดันใบสูงจะช่วยให้ Self-start ได้ดี การปรับค่าความดันใบมี 2 แนวทางคือ 1) หากพิจารณาว่าจำนวนใบคงที่การเปลี่ยนแปลงความดันใบจะขึ้นอยู่กับความยาวคอร์ดหรือเพิ่มพื้นที่ต่อ 1 ใบกังหันนั่นเอง 2) หากพิจารณาว่าความยาวคอร์ดคงที่การเปลี่ยนแปลงความดันใบก็จะขึ้นอยู่กับจำนวนใบ (Spera, 1998) สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทดลองสุ่มค่าความดันใบ 3 ลักษณะคือ ความดันใบ $\sigma_1 = 22\%$ $\sigma_2 = 28\%$ และ $\sigma_3 = 34\%$ ซึ่งเป็นค่าความดันใบที่อยู่ในช่วงปกติทั่วไปของกังหันลมเสื่อลำแพน ทำการทดสอบเพื่อดูผลของความดันใบที่มีต่อประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมและหาค่าที่ดีที่สุด จากความดันใบทั้ง 3 ค่าดังกล่าวจะนำไปสู่การกำหนดลักษณะใบกังหันได้ต่อไปซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 6.5 งานวิจัยนี้ได้สร้างหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนใน 3 รูปแบบคือ แบบ 6 ใบ 4 ใบ และ 3 ใบ ดังนั้นจากค่าความดันใบทั้ง 3 ดังกล่าวจะได้รูปร่างของใบกังหันดังรูปที่ 6.6-6.8

6.2.2 มุมพิช (Pitch angle)

ใบกังหันลมเสื่อลำแพนมีลักษณะการบิดแบบอัตราโนมิตตลอดแนวรัศมีโดยขนาดมุมจะขึ้นอยู่กับค่ามุมพิชปลายใบ แท้จริงแล้วมุมบิด (Twist angle) ก็คือมุมพิช (Pitch angle) ที่มีการเปลี่ยนไปในแต่ละเอลิเมนต์ตลอดแนวรัศมีนั่นเอง เช่น ข้อมูลมุมพิชที่ระยะรัศมีต่าง ๆ ของใบกังหันลมเสื่อลำแพนแบบ 6 ใบ และ 4 ใบในรูปที่ 5.6-5.7 (ในบทที่ 5) โดยนิยามของมุมพิช (β) ก็คือมุมที่อยู่ระหว่างเส้นคอร์ดกับระนาบโรเตอร์ดังรูปที่ 6.10 งานวิจัยนี้ต้องการศึกษามุมพิชปลายใบที่ดีที่สุด ทั้งนี้ได้ทำการสุ่มค่าออกมา 4 ค่าคือ $\beta_1 = 5^\circ$ $\beta_2 = 10^\circ$ $\beta_3 = 15^\circ$ และ $\beta_4 = 20^\circ$ เพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมและหาค่าที่ดีที่สุด การตั้งค่ามุมพิชปลายใบทำได้โดยผูกเชือกในล่อนที่ปลายใบด้านหนึ่งเข้ากับเชือกขึงตึงที่ขอบโรเตอร์ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.5 ลักษณะใบกังหันลมเพื่อลำแพน

(a) ความดันใบ $\sigma_1 = 22\%$



(b) ความดันใบ $\sigma_2 = 28\%$

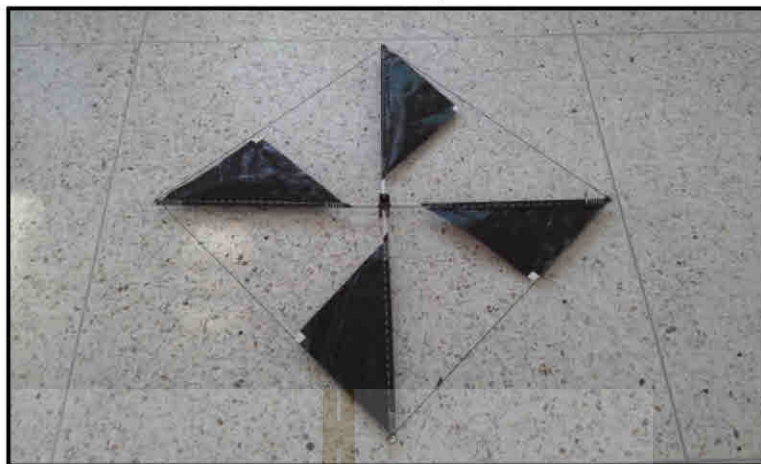


(c) ความดันใบ $\sigma_3 = 34\%$



รูปที่ 6.6 ความดันใบของโรเตอร์แบบ 6 ใบ

(a) ความดันใบ $\sigma_1 = 22\%$



(b) ความดันใบ $\sigma_2 = 28\%$



(c) ความดันใบ $\sigma_3 = 34\%$

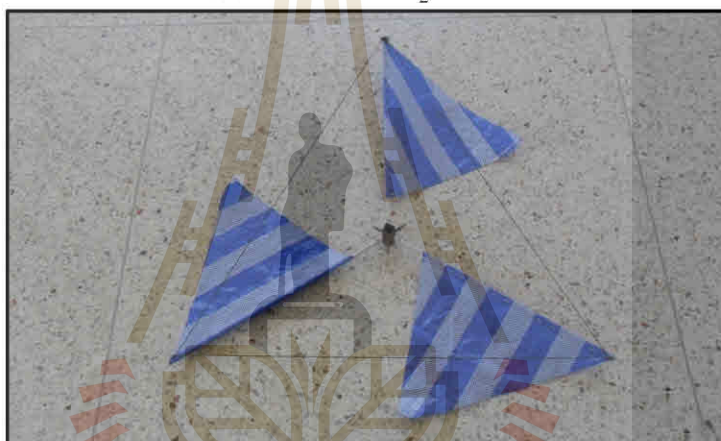


รูปที่ 6.7 ความดันใบของโรเตอร์แบบ 4 ใบ

(a) ความดัน $\sigma_1 = 22\%$



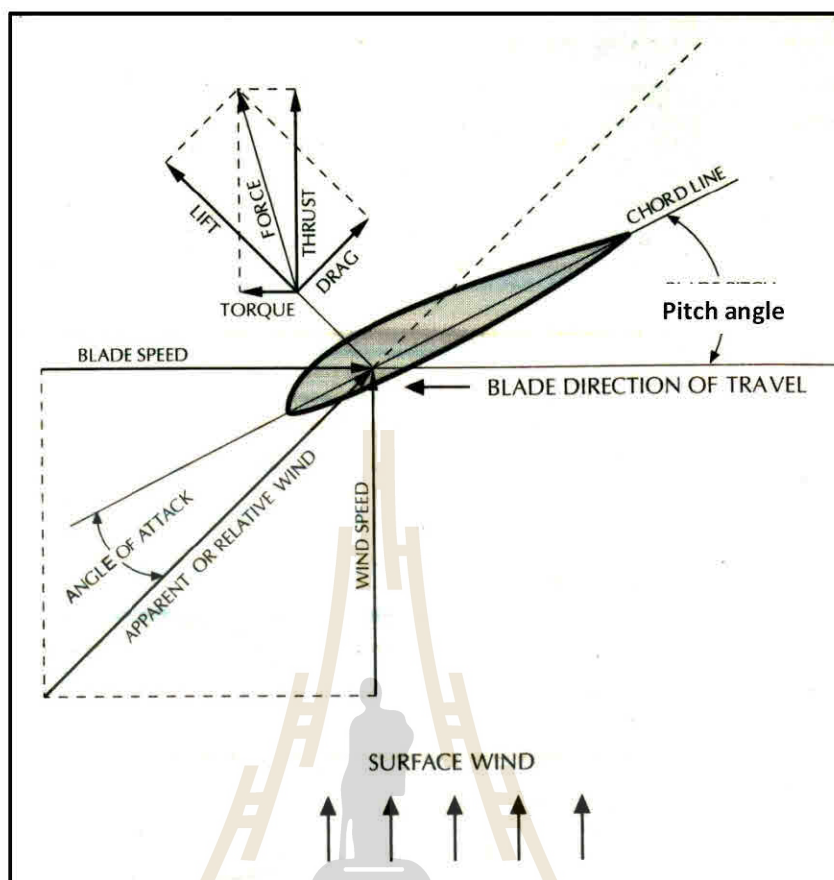
(b) ความดัน $\sigma_2 = 28\%$



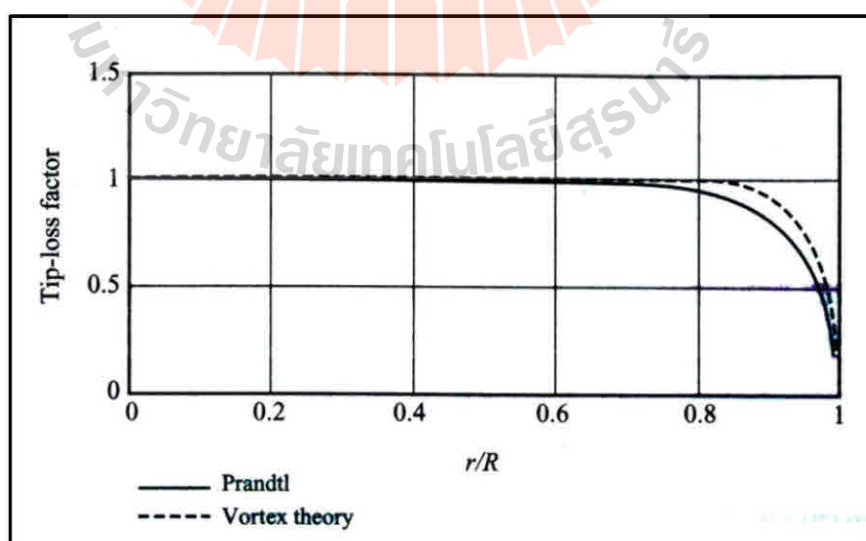
รูปที่ 6.8 ความดันของโรเตอร์แบบ 3 ใบ



รูปที่ 6.9 มุมพิชปลายใบ (β)



รูปที่ 6.10 ภาพตัดขวางเพนอากาศแสดงความสัมพันธ์มุมพิชและมุมปะทะ



รูปที่ 6.11 สัมประสิทธิ์ตัวคูณการสูญเสียปลายใบ

6.2.3 การปิดปลายใบ

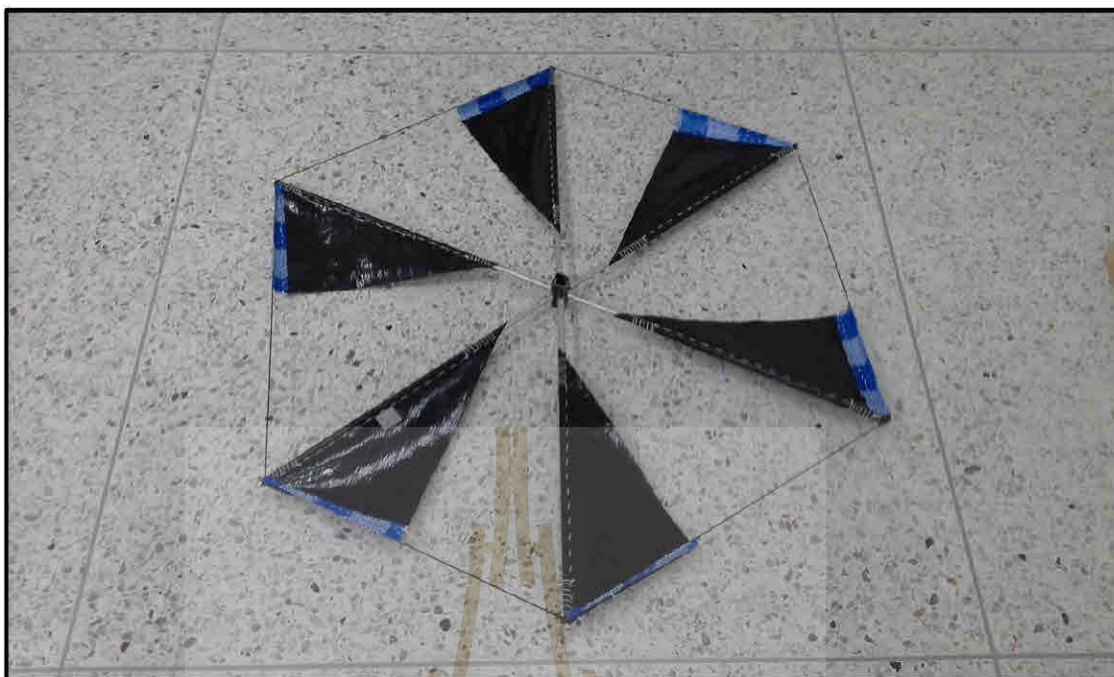
ใบกังหันลมที่มีความยาวจำกัดจะเกิดการสูญเสียพลังงานที่ปลายใบ (Tip loss) เสมอ สาเหตุเกิดจากการไหลล้นของอากาศจากด้านล่าง (ความดันสูง) ขึ้นสู่ด้านบน (ความดันต่ำ) ทำให้บริเวณปลายใบมีแรงยกลดลงจากการเกิด Induce drag ทำให้แรงบิดหรือกำลังงานลดลงด้วย Prandtl (1927) ได้นำเสนอสมการการสูญเสียปลายใบในรูปแบบสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (Factor) ดังสมการที่ 3.17 (ในบทที่ 3) (ชโลธร, 2552) เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะเห็นว่าช่วงปลายใบจะมีสัมประสิทธิ์ตัวคูณน้อยกว่า 1.0 ดังรูปที่ 6.11 แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณปลายใบมีการสูญเสียพลังงานอยู่นั่นเอง โดยปกติแล้วใบกังหันลมเสื่อลำแพนมักจะเปิดปลายออกดังรูปที่ 6.12 จึงทำให้เกิดการสูญเสียปลายใบดังที่อธิบายแล้วข้างต้น สำหรับหัวข้อนี้จะทำการปิดปลายใบเข้ากับขอบของโรเตอร์ดังรูปที่ 6.13 และรูปที่ 6.14 เพื่อลดการไหลล้นของอากาศจากด้านความดันสูงไปด้านความดันต่ำ ซึ่งสันนิษฐานว่าจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานให้กับกังหันลมได้มากพอสมควรเนื่องจากว่าที่ปลายใบของกังหันลมเสื่อลำแพนนั้นมีขนาดใหญ่กว่ากังหันลมทั่วไป จึงสันนิษฐานว่าการปิดปลายใบน่าจะช่วยลด Tip loss ได้มากและที่สำคัญน่าจะช่วยอุ้มลมที่ปลายใบมากขึ้นซึ่งทำให้เกิด Torque arm มากขึ้น

6.2.4 การติดตั้ง Hub-fairing

ที่โคนใบกังหันลมก็มีการสูญเสียพลังงานเหมือนกับที่ปลายใบซึ่งเรียกว่าการสูญเสียที่โคนใบ (Hub loss) ซึ่งมีสาเหตุเดียวกัน สมการการสูญเสียที่โคนใบแสดงดังสมการที่ 3.18 (ในบทที่ 3) (ชโลธร, 2552) เป็นสมการที่แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณโคนใบมีการสูญเสียอยู่ งานวิจัยนี้ต้องการลดการสูญเสียที่โคนใบจึงได้ทำการติดตั้ง Hub-fairing ที่ด้านหน้าโรเตอร์ดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.12 ปลายใบกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม



รูปที่ 6.13 ใบกังหันลมแบบปิดปลายใบของโรเตอร์แบบ 6 ใบ



รูปที่ 6.14 ใบกังหันลมแบบปิดปลายใบของโรเตอร์แบบ 4 ใบ



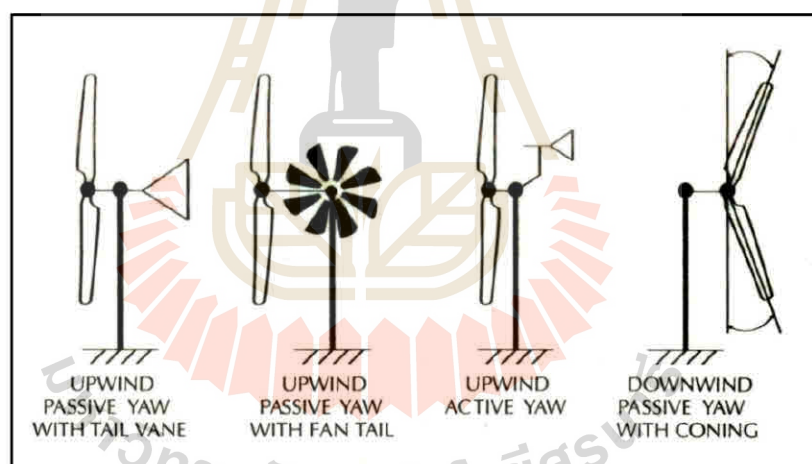
รูปที่ 6.15 Hub-Fairing ที่ด้านหน้าโรเตอร์



รูปที่ 6.16 กังหันลมเสีอลำแพนแบบ Downwind

6.2.5 การติดตั้งระบบการส่ายหาลม

ระบบส่ายหาลม (Yaw control) เป็นระบบที่ใช้สำหรับช่วยบังคับโรเตอร์ให้หมุนตามทิศทางลมที่เปลี่ยนไปซึ่งช่วยลดการสูญเสียพลังงานจากการเปลี่ยนทิศทางลม Gipe (2004) ได้อธิบายโดยย่อเกี่ยวกับระบบการส่ายหาลมว่ามีอยู่ 2 ลักษณะคือแบบ Active yaw control และ Passive yaw control โดยระบบ Active yaw control มักใช้ในกังหันลมขนาดกลางและขนาดใหญ่ควบคุมด้วยระบบควบคุม (Controller) ส่วนระบบ Passive yaw control เป็นระบบที่ควบคุมด้วยแรงลมธรรมชาติส่วนใหญ่ใช้กับกังหันลมขนาดเล็กซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้อีกเป็น 3 วิธีคือ 1) การทำมุมโคน (Coning) ซึ่งนิยมใช้กับกังหันลมแบบ Downwind 2) การติดแพนหาง (Tail vanes หรือ Tail fins) ซึ่งนิยมใช้กับกังหันลมแบบ Upwind และ 3) การติด Fan tail ที่ด้านหลังกังหันลมดังรูปที่ 6.17 สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกการติดตั้ง Passive yaw control โดยใช้กังหันลมแบบ Downwind ดังรูปที่ 6.16 เนื่องจากไม่ต้องทำแพนหางและสามารถลดจำนวนเสาซึ่งจากเดิมมี 2 เสาเหลือเพียงเสาเดียว



รูปที่ 6.17 ระบบ Active และ passive yaw control (Gipe, 2004)

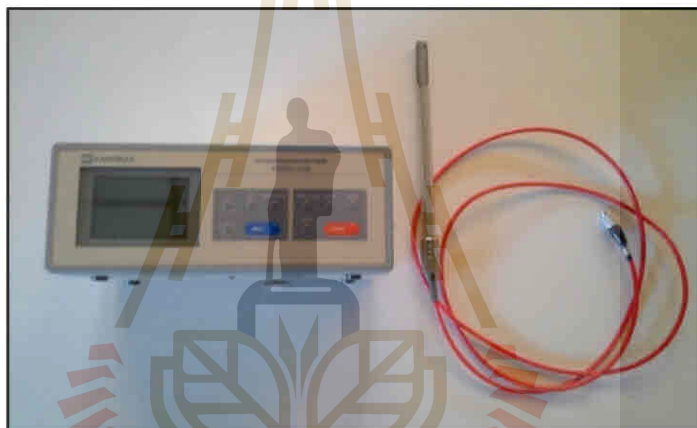
6.3 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองกังหันลมที่มีความน่าเชื่อถือและนิยมมากที่สุดคือการทดลองในอุโมงค์ลม เนื่องจากสามารถควบคุมสภาวะสิ่งแวดล้อมได้ดี แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่สามารถจัดหาอุโมงค์ลมที่มีความเหมาะสมได้จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการอื่นแทน Spera (1998) ได้กล่าวถึงวิธีการทดลองกังหันลมว่าสามารถทำได้ 3 วิธีคือ 1) ทดลองในอุโมงค์ลม (Wind tunnel testing) 2) ทดลองโดยการลากจูงกังหันลม (Tow testing) และ 3) ทดสอบด้วยลมธรรมชาติ (Field testing) จากการศึกษาพบว่าการ

ทดสอบด้วยลมธรรมชาติต้องใช้เครื่องมือวัดเป็นจำนวนมากและใช้เวลานานเนื่องจากไม่สามารถควบคุมความเร็วลมได้ และลมธรรมชาติมักไม่มีความสม่ำเสมอ (Non-uniform) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการทดสอบโดยการลากจูงกังหันลม (Tow testing)

6.3.1 อุปกรณ์การวัดที่เกี่ยวข้อง

1) เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) งานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องวัดความเร็วลมชนิด Hot wire ดังรูปที่ 6.18 ซึ่งให้ผลการวัดที่มีความแม่นยำที่ดีทั้งนี้ได้ทำการสอบเทียบกับเครื่องวัดความเร็วลมชนิดอื่นอีกจำนวน 3 ชนิดคือ ชนิด Pitot tube ชนิดใบพัด (Vane) และ ชนิด Hot bulb ดังรูปที่ 6.19-6.21 ตามลำดับ ซึ่งผลการสอบเทียบแสดงให้เห็นว่าผลการวัดของเครื่องมือวัดทั้งหมดให้ค่าที่ใกล้เคียงกันดังที่แสดงผลในรูปที่ 6.22



รูปที่ 6.18 เครื่องวัดความเร็วลมชนิด Hot wire



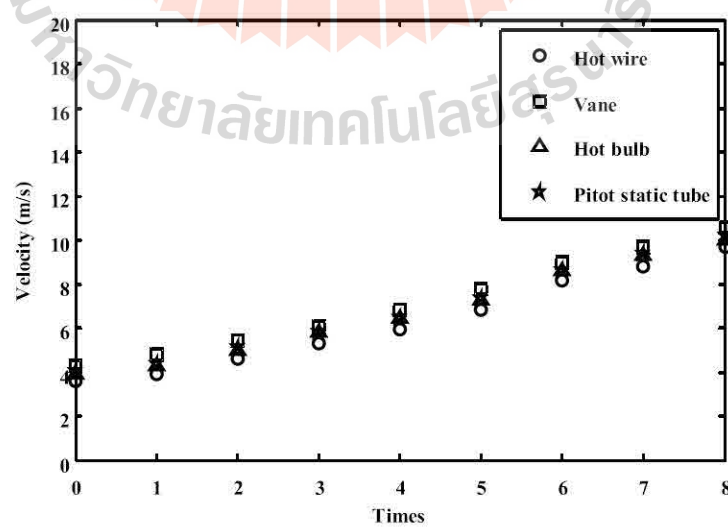
รูปที่ 6.19 เครื่องวัดความเร็วลมชนิด Pitot static tube



รูปที่ 6.20 เครื่องวัดความเร็วลมชนิดใบพัด

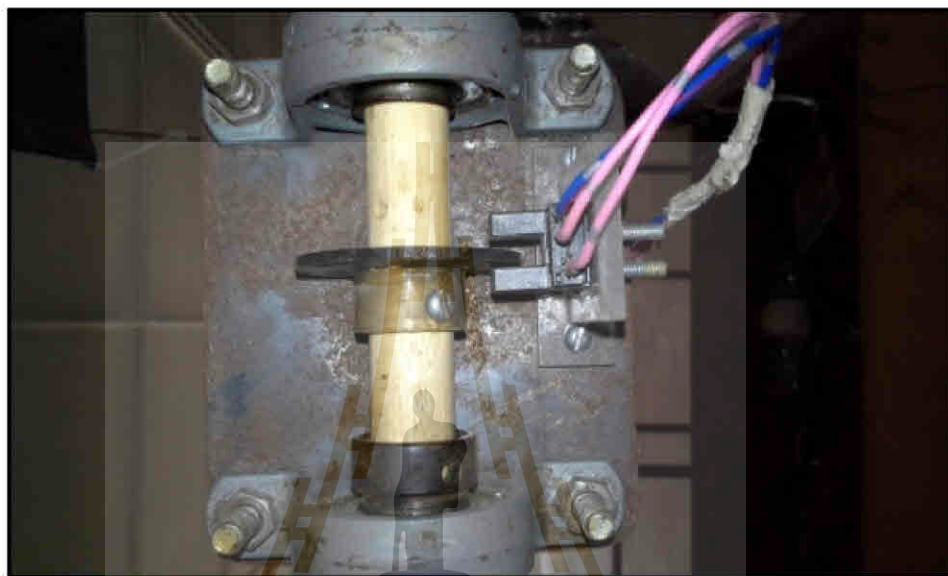


รูปที่ 6.21 เครื่องวัดความเร็วลมชนิด Hot bulb



รูปที่ 6.22 ผลการสอบเทียบการวัดความเร็วลมของอุปกรณ์ชนิดต่างๆ

2) เครื่องวัดความเร็วรอบ (Speed sensor) งานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องวัดความเร็วรอบแบบ Optical sensor ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดที่ใช้การตัดของแสงเป็นสัญญาณในการนับจำนวนรอบ ดังนั้นจะต้องติดตั้งที่มีรู่องในการตัดแสงร่วมกับตัว Optical sensor ดังรูปที่ 6.23 แล้วส่งสัญญาณแสดงผลในจอดิจิตอลดังรูปที่ 6.24 อุปกรณ์นี้ให้ผลการวัดที่มีความแม่นยำสูง

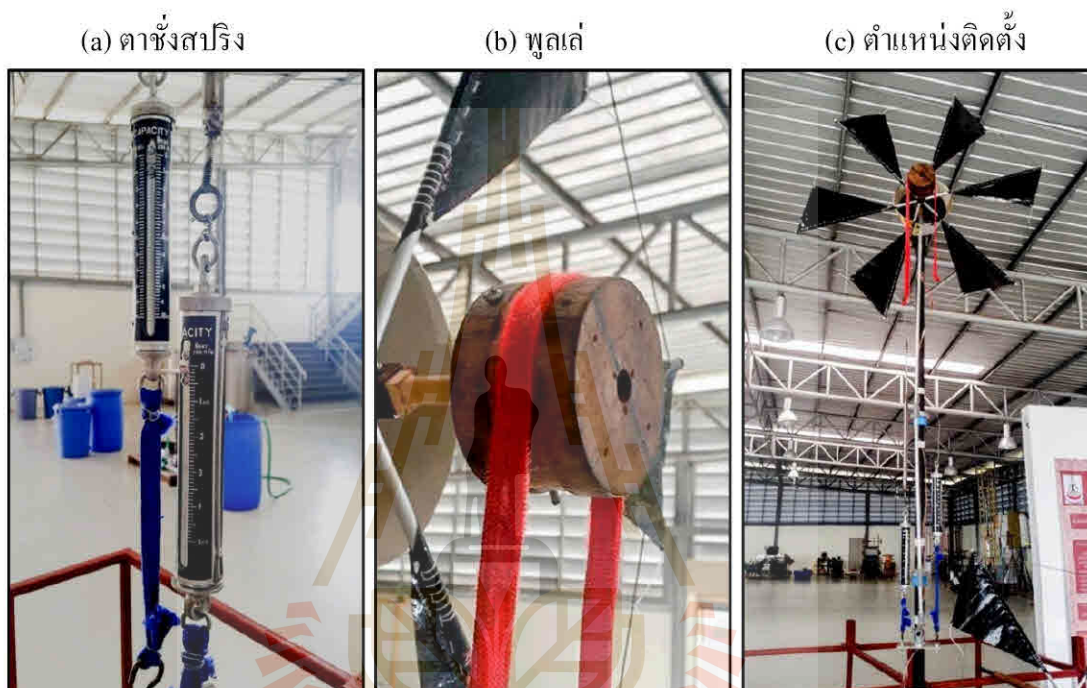


รูปที่ 6.23 เครื่องวัดความเร็วรอบ Optical sensor



รูปที่ 6.24 จอแสดงผลความเร็วรอบแบบดิจิตอล

(3) เครื่องวัดแรงบิด (Torque meter) การวัดแรงบิดจะกระทำโดยให้แรงต้านต่อเพลากังหันผ่านสายพานที่ติดตั้งกับสปริงไว้ จำนวน 2 ตัว ดังรูปที่ 6.25 จากนั้นให้แรงต้านที่พูลเลย์ (Pulley) สามารถเขียนเป็น Free body diagram ได้ดังรูปที่ 3.1 (ในบทที่ 3) การเพิ่มหรือลดแรงต้านจะใช้อุปกรณ์ Turn buckle ซึ่งเป็นเกลียวหมุนเป็นตัวกำหนดแรงต้านที่ต้องการ สุดท้ายแล้วค่าแรงที่อ่านได้จากสปริง (F_1 และ F_2) จะนำไปสู่การคำนวณหาค่าแรงบิดได้โดยใช้สมการที่ 3.2 (ในบทที่ 3)



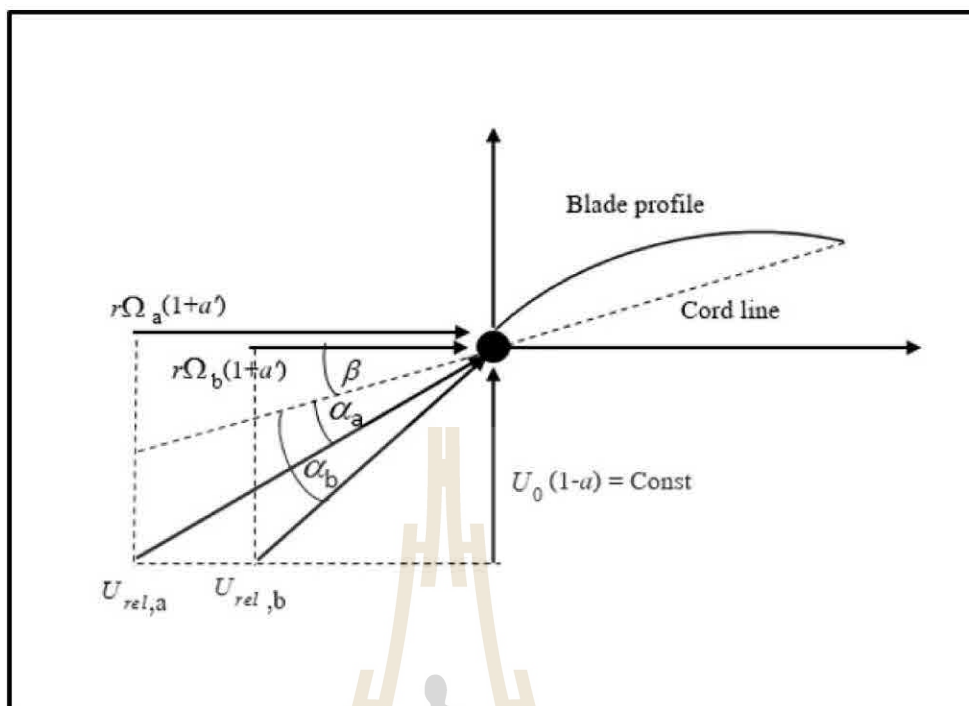
รูปที่ 6.25 เครื่องมือวัดแรงบิด

6.3.2 รูปแบบการทดสอบ

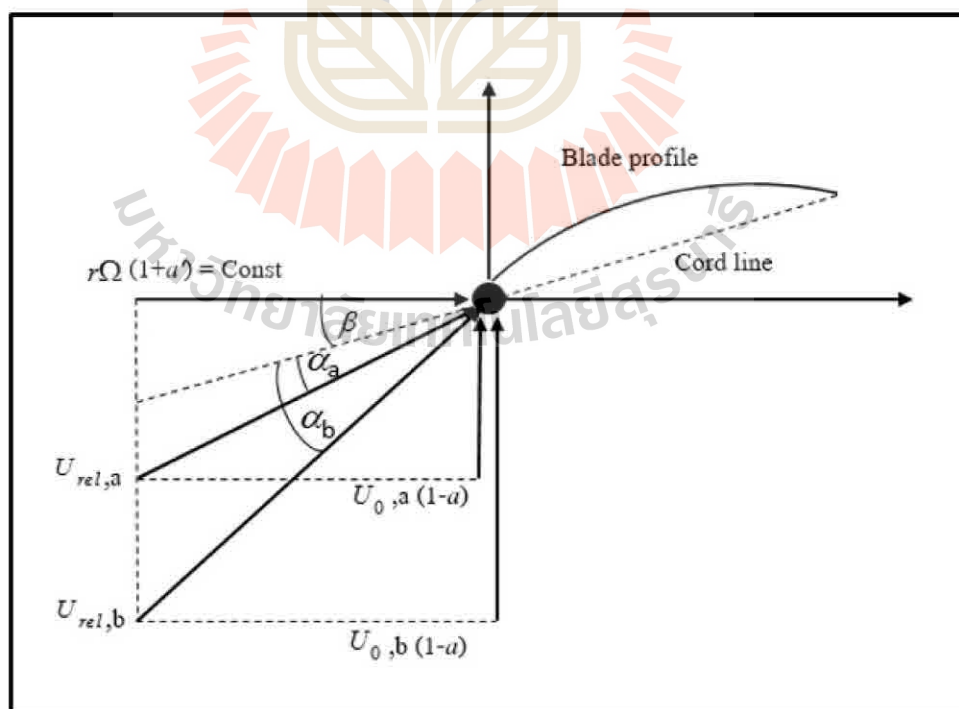
การทดสอบกังหันลมสามารถทำได้ 2 รูปแบบคือ 1) ทดสอบที่ความเร็วลมคงที่แล้วแปรผันความเร็วรอบ (Variable speed) และ 2) ทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่แล้วแปรผันความเร็วลม (Variable velocity) ดังที่แสดงเป็นเวกเตอร์ในรูปที่ 6.26 และ 6.27 ตามลำดับ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้รูปแบบ Variable speed ซึ่งวิธีการแปรผันค่าความเร็วรอบจะกระทำโดยโดยการเพิ่มหรือลดแรงต้านที่เพลากังหันลม

6.3.3 การติดตั้งหุ่นจำลองบนรถกระบะ

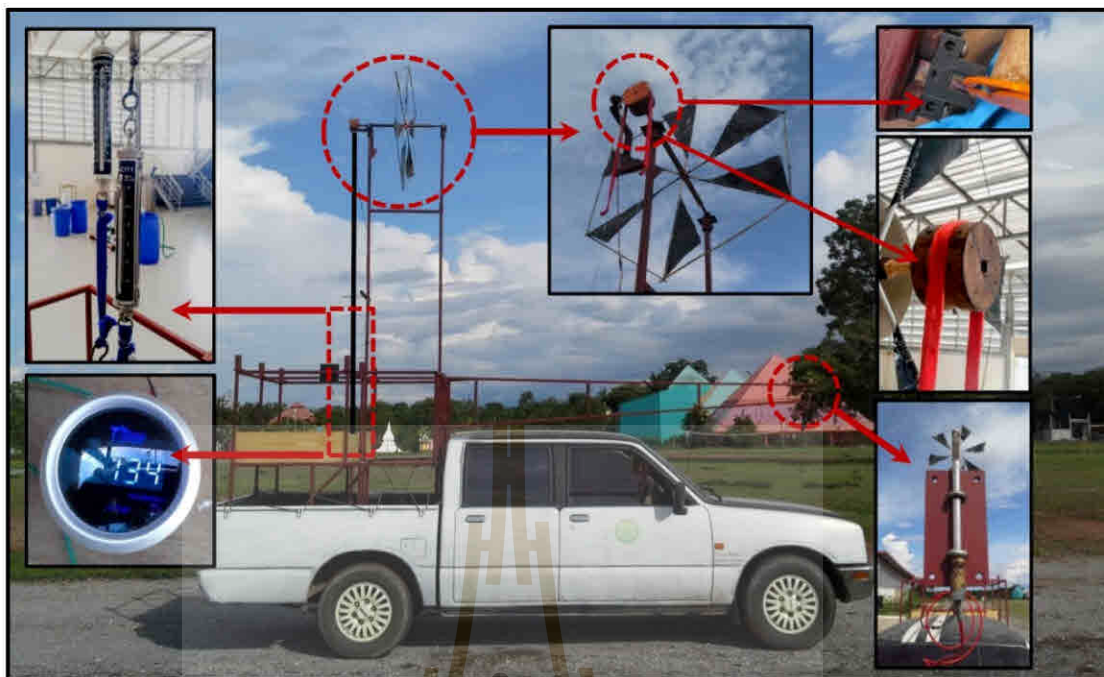
- 1) ติดตั้งโครงเหล็กเพื่อใช้จับยึดหุ่นจำลองกังหันลมบนรถกระบะ
- 2) ติดตั้งกังหันลมบนโครงเหล็กที่ระดับความสูง 3.0 เมตรจากหัวกระบะถึงจุดศูนย์กลางโรเตอร์ดังรูปที่ 6.28 เพื่อหลีกเลี่ยง Wake จากการไหลของอากาศที่หัวกระบะ



รูปที่ 6.26 การทดสอบแบบ Variable speed



รูปที่ 6.27 การทดสอบแบบ Variable velocity



รูปที่ 6.28 ตำแหน่งติดตั้งหุ่นจำลองกังหันลมแบบ Upwind และเครื่องมือวัด

(a) ตำแหน่งตาชั่งสปริง

(b) ตำแหน่ง Annemometer

(c) บริเวณด้านหลังกังหันลม



รูปที่ 6.29 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ ของการทดสอบกังหันลมแบบ Downwind

3) ติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ เช่น แอนนิโมมิเตอร์ เครื่องวัดความเร็วรอบ คาซังสปริง เป็นต้น จากรูปที่ 6.28 เป็นการติดตั้งหุ่นจำลองกังหันหันลมแบบดั้งเดิมซึ่งโรเตอร์วางตัวในลักษณะแบบ Upwind ส่วนรูปที่ 6.29 เป็นการติดตั้งหุ่นจำลองกังหันลมแบบใหม่ซึ่งโรเตอร์วางตัวในลักษณะแบบ Downwind จะเห็นว่าการติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็วลมและเครื่องมือวัดความเร็วรอบของทั้ง 2 หุ่นจำลองจะแตกต่างกันเล็กน้อย ตรงที่หุ่นจำลองกังหันลมแบบดั้งเดิมจะติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมอยู่บริเวณเหนือหลังการถโดยยื่นไปทางด้านหน้าประมาณ 3.0 เมตรจากเสากังหันและเครื่องวัดความเร็วรอบจะอยู่บริเวณด้านหลังโรเตอร์ แต่สำหรับหุ่นจำลองกังหันลมแบบใหม่เครื่องมือวัดความเร็วลมจะติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าโรเตอร์ที่ระยะห่าง 1.0 เมตรและเครื่องวัดความเร็วรอบจะติดตั้งอยู่ภายใน Hub-fairing

6.3.4 ขั้นตอนการทดสอบ

1) เลือกใช้ถนนที่มีความตรงตลอดแนวเป็นระยะยาวพอสมควร ไม่มีความลาดเอียง เพื่อให้ได้ความลำเสมอของลม และตลอดข้างทางไม่มีสิ่งกีดขวางมากนัก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ถนนในการทดลองดังรูปที่ 6.30

2) ติดตั้งหุ่นจำลองกังหันลมและเครื่องมือวัดบนรถกระบะดังที่อธิบายในหัวข้อ 6.3.3

3) ก่อนเริ่มการทดลอง ผู้ทดสอบจะต้องประเมินสภาพภูมิอากาศในขณะนั้นด้วยว่ามีกระแสลมในทิศทางต่าง ๆ จากสิ่งแวดล้อมเข้ามาบรบกวนหรือไม่ โดยตรวจสอบได้จากจอแสดงผลของเครื่องวัดความเร็วลม หากสภาพลมสงบค่าที่แสดงผลจะอ่านค่าได้เท่ากับศูนย์แต่โดยทั่วไปแล้วเป็นเรื่องยาก เนื่องจากไม่สามารถควบคุมลมจากธรรมชาติได้ 100% ดังนั้นจะยอมรับความเร็วลมที่มารบกวนได้ไม่เกิน 5% ของความเร็วที่ทดสอบ เมื่อลมสงบแล้วจึงเริ่มทำการทดลอง

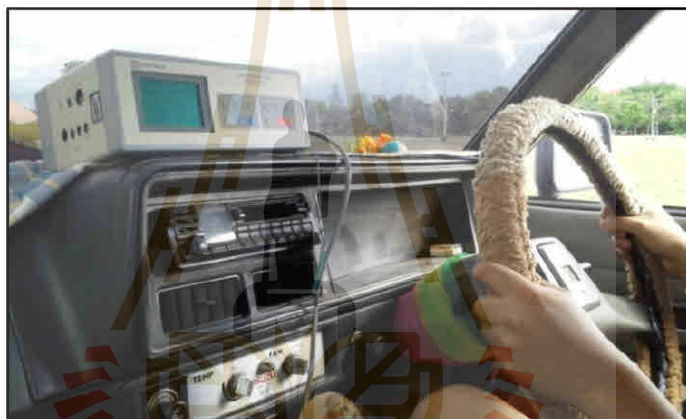


รูปที่ 6.30 ถนนที่ใช้ในการทดลอง

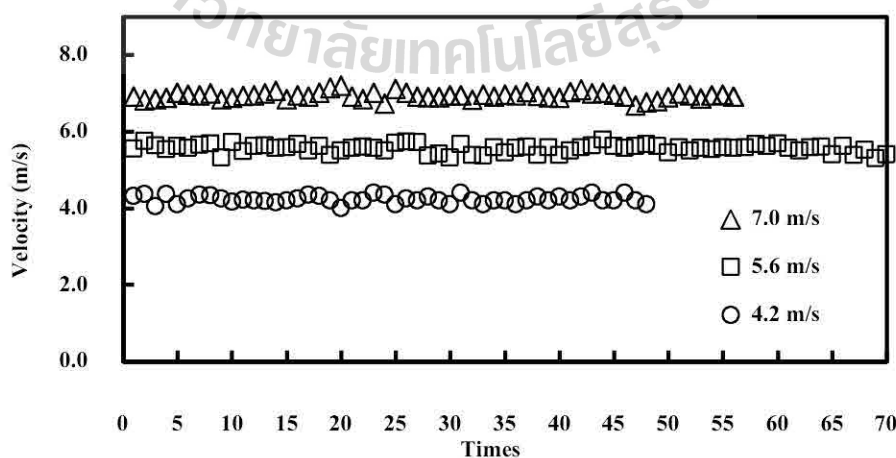
4) ขณะทดสอบผู้ขับจะต้องควบคุมความเร็วให้คงที่โดยตรวจสอบความเร็วรถที่เคลื่อนที่จากจอแสดงผลซึ่งส่งญาณมาจากเครื่องวัดความเร็วลม ผู้ขับจะสามารถทราบได้ว่าขณะที่รถเคลื่อนที่ไปนั้น มีความเร็วคงที่หรือไม่ดังรูปที่ 6.31 เมื่อผู้ขับสามารถควบคุมรถให้มีความเร็วคงที่ได้แล้วจึงเริ่มทำการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ จากการควบคุมความเร็วรถให้มีมีความเร็วคงที่สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 6.32 จะเห็นว่ามีการแกว่งตัวเล็กน้อยไม่ถึง 5% ของความเร็วทดสอบ

5) เริ่มวัดค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องและบันทึกผล ประกอบด้วย ความเร็วลม ความเร็วรอบ และแรงจากตาชั่งสปริง ทั้งนี้ในการบันทึกค่าแต่ละตัวแปร ระบบจะต้องเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว

6) ปรับความเร็วรอบให้ลดลงโดยการหมุน Turn buckle เพื่อให้แรงต้านมากขึ้น แล้ววัดค่าเหมือนในข้อ 5 ทุกประการ จนกระทั่งก้านลมหยุดหมุน เป็นเสร็จสิ้นการทดลองใน 1 กรณี



รูปที่ 6.31 การควบคุมความเร็วของผู้ขับโดยมองจากจอแสดงผล

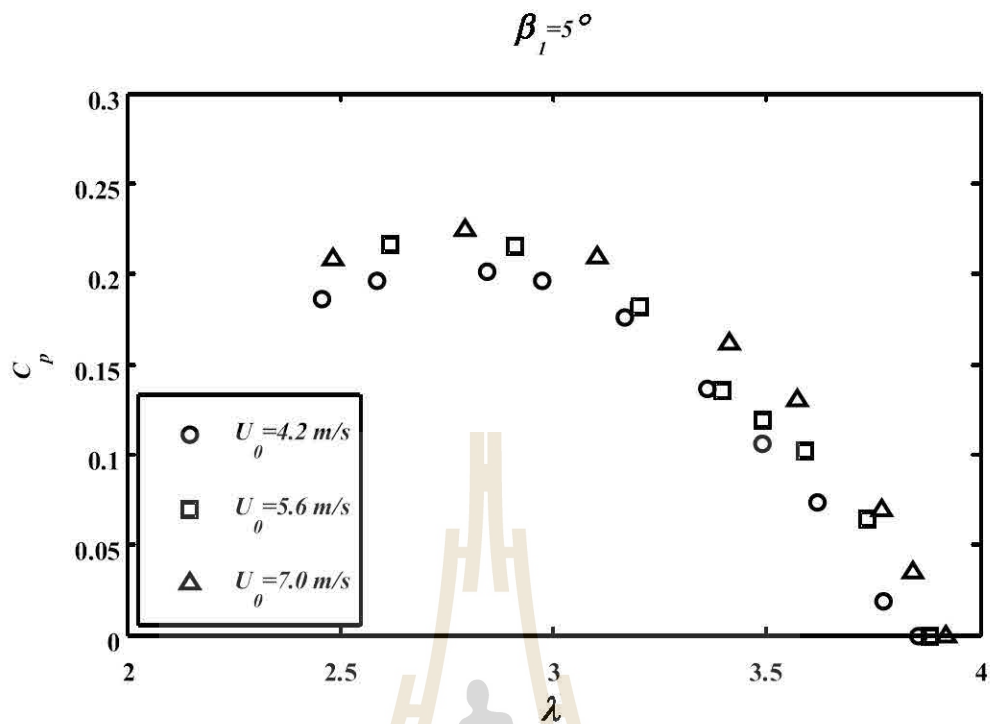


รูปที่ 6.32 ข้อมูลการวัดตัวอย่างของความเร็วลมที่ควบคุมโดยผู้ขับรถ

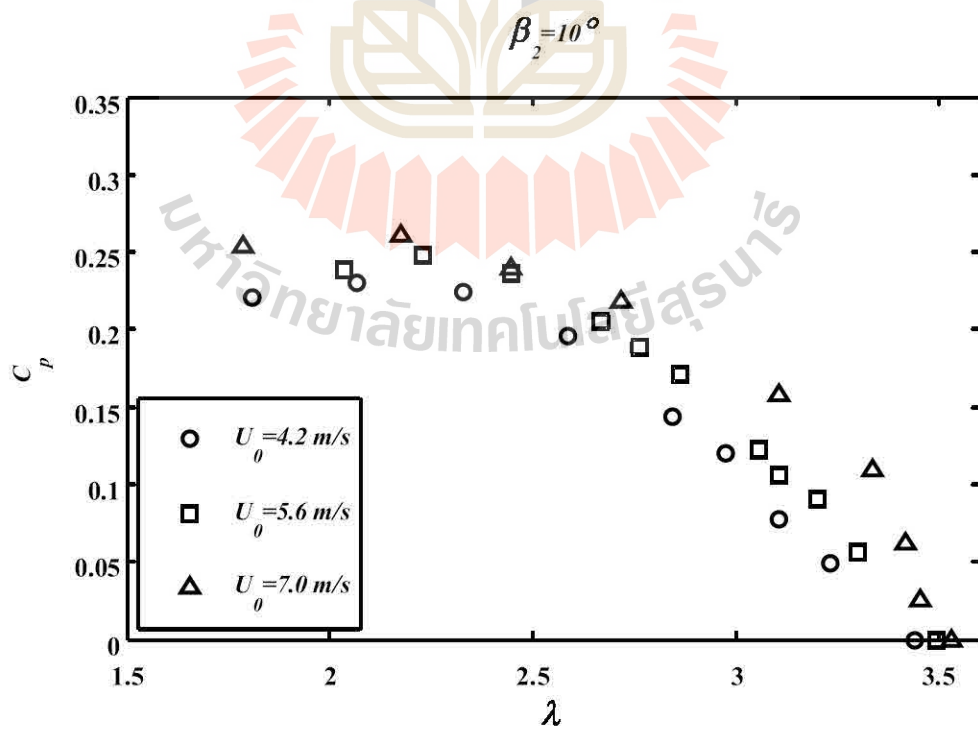
6.3.5 ความเร็วลมที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบกังหันลมขนาดเล็กเพื่อศึกษาพฤติกรรมกังหันลมขนาดใหญ่ที่มีความเหมือนกัน ดังนั้นการทดสอบกังหันลมขนาดเล็กจะต้องทดสอบที่การไหลที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) ใกล้เคียงกัน จึงจะให้ผลเทียบเคียงกันได้ สำหรับค่า Re ของกังหันลมมักเป็นค่าที่คำนวณเทียบต่อความยาวคอรัด กล่าวคือ $Re = \rho U_{rel} c / \mu$ ซึ่งค่าความหนาแน่น (ρ) และความหนืด (μ) เป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดกังหันลม รวมถึง U_{rel} เพราะโดยปกติแล้วเมื่อปรับขนาดกังหันให้เล็กลง ความเร็วรอบจะสูงขึ้น ดังนั้นค่า U_{rel} จะไม่ต่างกันมาก ดังนั้นถ้าขนาดความยาวคอรัดลดลง 8 เท่า ค่า Re ก็จะน้อยลงกว่าเดิม 8 เท่า ดังนั้นถ้าจะทดสอบที่ Re เดียวกันอาจจะต้องทดสอบที่ความเร็วลมสูงกว่าเดิมมากหรือไม่ก็ทดสอบด้วยของไหลอื่นที่มีความหนืดสูงกว่าซึ่งเป็นเรื่องไม่ง่ายนัก ดังนั้นในการทดสอบหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนนี้จะใช้ความเร็วลมทดสอบอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับความเร็วลมเดิมที่ใช้กับกังหันลมขนาดใหญ่ คืออยู่ในช่วง 4.2-7.0 เมตร/วินาที ดังนั้นค่า Re ของการทดสอบหุ่นจำลองก็จะมีค่าน้อยกว่า 8 เท่า อย่างไรก็ตามกังหันลมแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ต่างก็เป็นหุ่นจำลองขนาดเล็กด้วยกัน ดังนั้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมทั้ง 2 แบบจึงไม่มีปัญหาใด ๆ เพียงแต่ว่าประสิทธิภาพพลังงานที่ได้จากการทดลองนี้อาจจะต่ำกว่าถ้าหากเปรียบเทียบกับกังหันลมขนาดใหญ่ เนื่องจากผลของ เรโนลด์นัมเบอร์ (Re) นั้นเอง

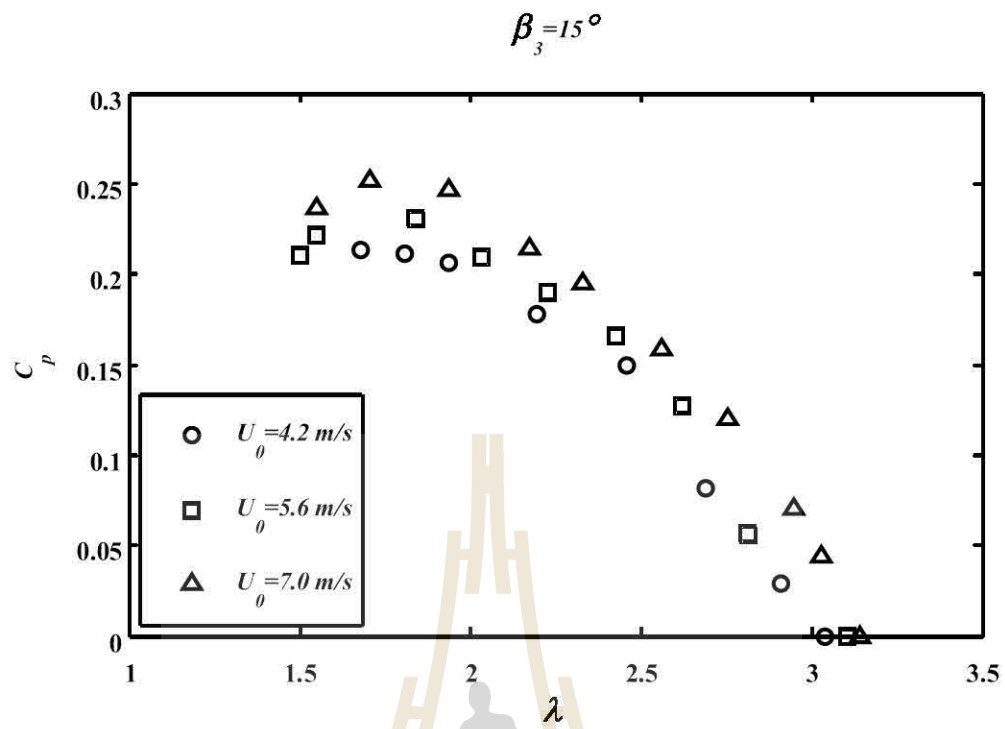
การทดลองเบื้องต้นในหัวข้อนี้เป็นการทดลองกังหันลมด้วยความเร็วลมแตกต่างกัน 3 ค่าคือ 4.2 5.6 และ 7.0 เมตร/วินาที เพื่อดูผลกระทบความเร็วลมที่มีต่อประสิทธิภาพพลังงานกังหันลม โดยทำการทดลองกับหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบ Downwind ที่มีความดันใบ $\sigma_2 = 28\%$ และทำการทดลองที่มุมพิชปลายใบ 4 ค่าคือ $\beta_1 = 5^\circ$ $\beta_2 = 10^\circ$ $\beta_3 = 15^\circ$ และ $\beta_4 = 20^\circ$ ซึ่งทดสอบแบบ Variable speed คือ กำหนดความเร็วลมคงที่แล้วทำการแปรผันความเร็วรอบ ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปที่ 6.33-6.36 จะเห็นว่าความเร็วลมทั้ง 3 ค้างกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพพลังงานต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะค่าสัมประสิทธิ์แรงทางอากาศพลศาสตร์ (C_l / C_d) เปลี่ยนไปเล็กน้อยตามค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Re) นั้นเอง ซึ่งจะเห็นว่าแตกต่างจากการประเมินด้วยทฤษฎี BEM ที่ให้ประสิทธิภาพพลังงานเท่ากันในทุกความเร็วลม ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Monteiro et al. (2013) และ Kishore et al. (2013) ดังนั้นสำหรับการทดลองในกรณีอื่นทั้งหมด จะใช้ความเร็วลมทดสอบ (หรือความเร็วที่วิ่งไป) เพียงความเร็วลมเดียวเท่านั้นคือ 5.6 เมตร/วินาที เนื่องจากเป็นค่าความเร็วลมที่ได้ค่าความถี่ความหนาแน่นกำลังงานลมสูงสุด (Maximum wind power density frequency, $WPDF_{max}$) ของจังหวัดนครราชสีมาและจังหวัดปราจีนบุรี (ดูบทที่ 8) ซึ่งเป็นจังหวัดกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้



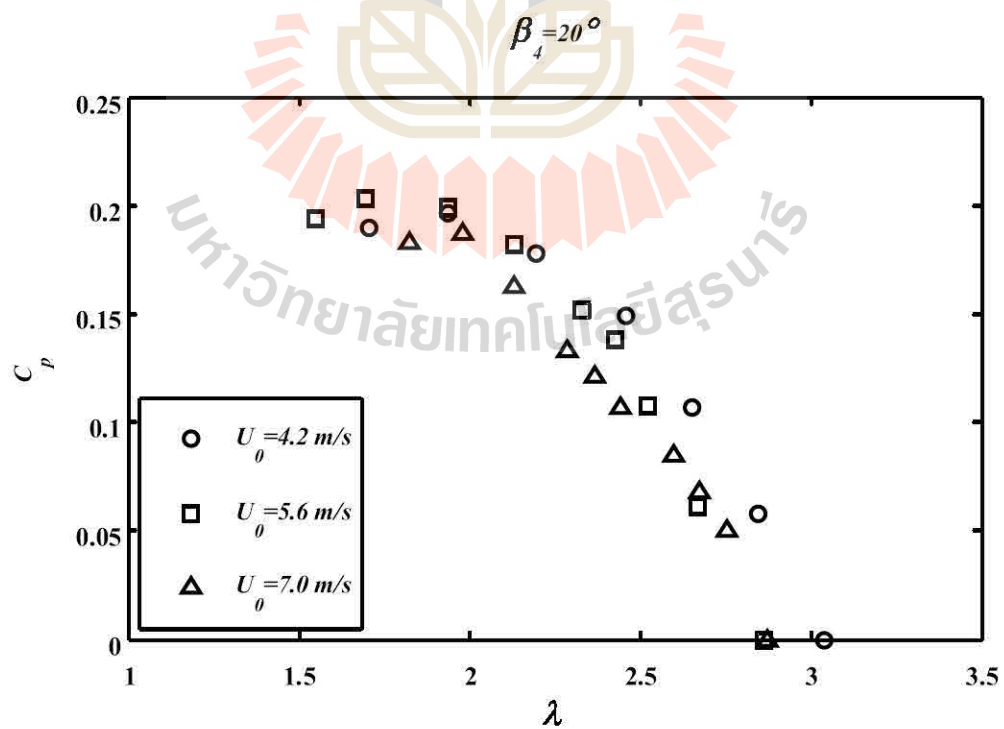
รูปที่ 6.33 ผลของความเร็วลมที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์กำลังที่มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$



รูปที่ 6.34 ผลของความเร็วลมที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์กำลังที่มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$



รูปที่ 6.35 ผลของความเร็วลมที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์กำลังที่มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$



รูปที่ 6.36 ผลของความเร็วลมที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์กำลังที่มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$

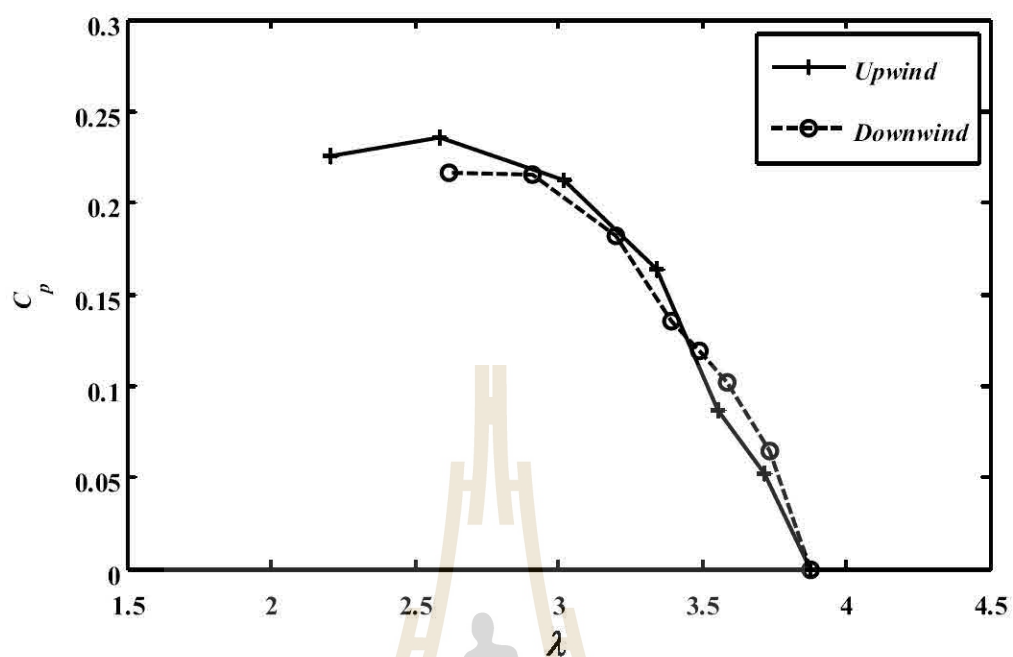
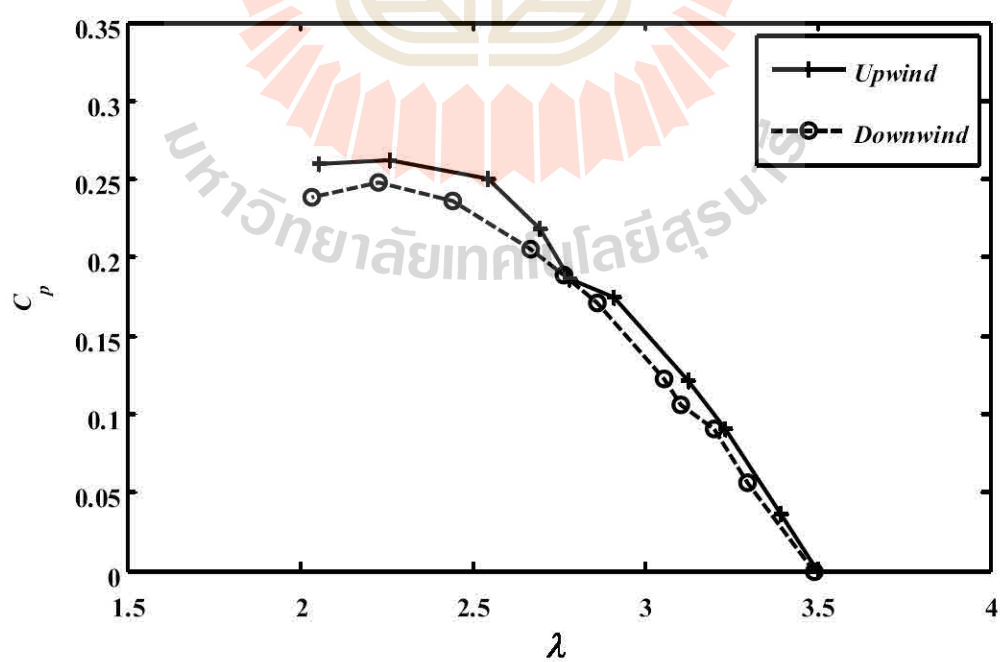
บทที่ 7

การเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุน

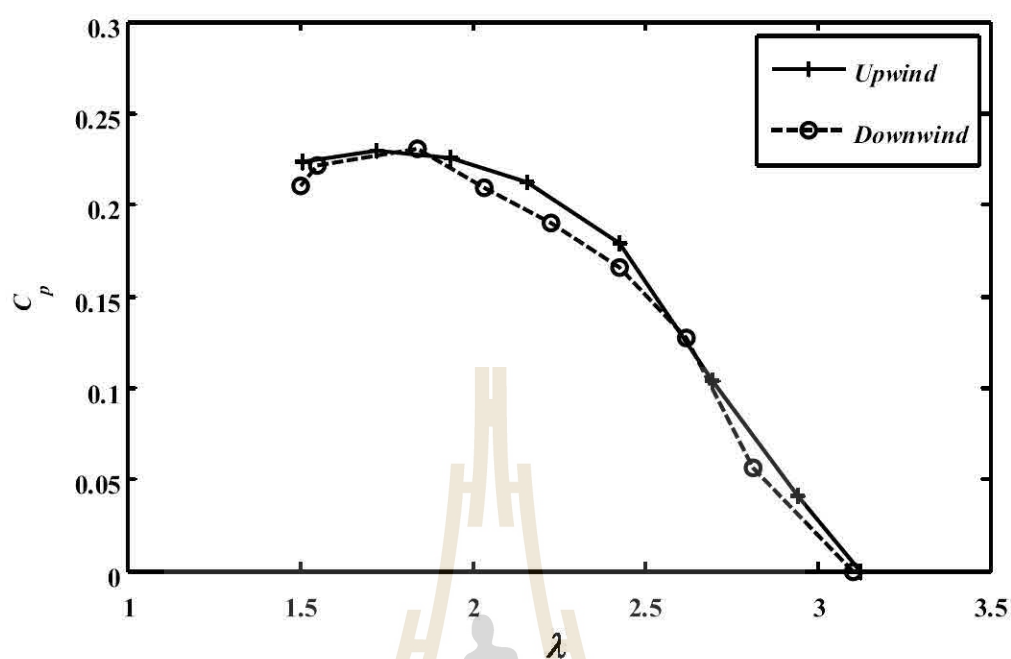
ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองของหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นตามหลักการที่ได้กล่าวในบทที่ 6 โดยทั่วไปแล้วการนำเสนอกราฟสมรรถนะกังหันลม (Performance curve) มักจะแสดงอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ (Non-dimensional curve) เช่น $C_p - \lambda$ curve $C_Q - \lambda$ curve หรือ $C_T - \lambda$ curve (Burton et al., 2011) สำหรับงานวิจัยนี้จะนำเสนอผลการทดลองในรูปแบบ $C_p - \lambda$ curve

7.1 กังหันลมแบบ Upwind และ Downwind

กังหันลมเสื่อลำแพนโดยปกติทั่วไปมักไม่มีระบบสายหาลม (Yaw system) ซึ่งเป็นจุดหนึ่งที่ทำให้สูญเสียพลังงานเมื่อกระแสลมมีการเปลี่ยนทิศทาง เพราะจะทำให้หน้าโรเตอร์ไม่ตั้งฉากกับลม ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการทดลองในหัวข้อนี้คือจะทำการทดสอบกังหันลมที่มีการวางตัวของโรเตอร์แตกต่างกัน 2 แบบคือ แบบ Upwind และแบบ Downwind เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพพลังงานที่ได้ เนื่องจากว่ากังหันลมแบบ Downwind มีข้อดีคือ ตัวโรเตอร์สามารถเป็นกลไกในการสายหาลมได้ด้วยตัวเอง (Passive yaw control) (Spera, 1998) ในขณะที่โรเตอร์แบบ Upwind จะต้องใช้แพนหาง (Tail fin) ส่วนใหญ่แล้วประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมแบบ Downwind มักจะต่ำกว่าแบบ Upwind เล็กน้อยจากการบังลมของเสาและห้องกังหัน (Nacelle) ที่อยู่บริเวณด้านหน้าโรเตอร์ จากรูปที่ 7.1-7.4 แสดงผลการทดลองของหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนทั้งสองแบบเปรียบเทียบกัน พบว่าประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมแบบ Downwind มีค่าน้อยกว่าแบบ Upwind เล็กน้อยซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีทั้งนี้เป็นเพราะว่าหุ่นจำลองแบบ Downwind มีชุดลูกปืน (Shaft bearing) ติดตั้งอยู่ที่ด้านหน้าโรเตอร์ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการบังลม อย่างไรก็ตามได้ทำการติดตั้ง Hub-fairing ครอบชุดลูกปืนดังกล่าวเพื่อลด Hub loss และ Wake ที่ด้านหน้าโรเตอร์ไว้ด้วย ผลการทดลองที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบ Downwind สามารถสายหาลมได้แม้ว่าจะไม่ได้ทำมุมโคน (Coning angle) ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้จึงสามารถสรุปได้ว่าโรเตอร์แบบ Downwind ควรนำมาประยุกต์ใช้กับกังหันลมเสื่อลำแพนมากกว่าแบบ Upwind ที่ใช้กันมาแต่เดิมเพราะนอกจากจะได้ประโยชน์จากการเป็น Passive yaw control แล้วยังประหยัดกว่าเดิมเพราะสามารถลดจำนวนเสากังหันให้เหลือเพียงเสาเดียวซึ่งกังหันลมแบบดั้งเดิมมี 2 เสา

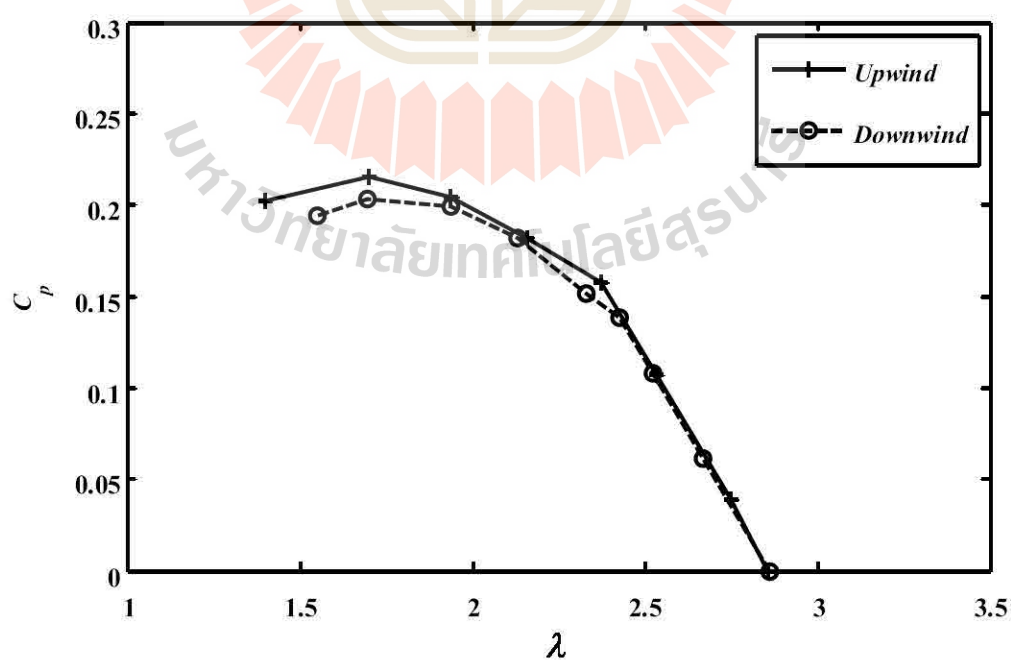
6-Blade and $\beta_1 = 5^\circ$ รูปที่ 7.1 C_p แตกต่างระหว่างหุ่นจำลองแบบ Upwind และ Downwind สำหรับ $\beta_1 = 5^\circ$ 6-Blade and $\beta_2 = 10^\circ$ รูปที่ 7.2 C_p แตกต่างระหว่างหุ่นจำลองแบบ Upwind และ Downwind สำหรับ $\beta_2 = 10^\circ$

6-Blade and $\beta_3 = 15^\circ$



รูปที่ 7.3 C_p แยกต่างระหว่างหุ่นจำลองแบบ Upwind และ Downwind สำหรับ $\beta_3 = 15^\circ$

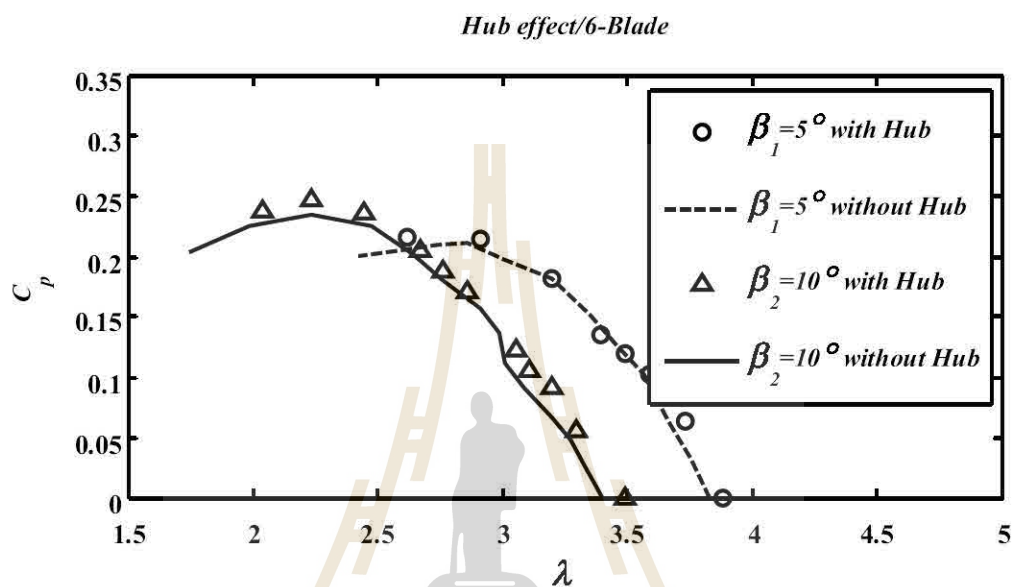
6-Blade and $\beta_4 = 20^\circ$



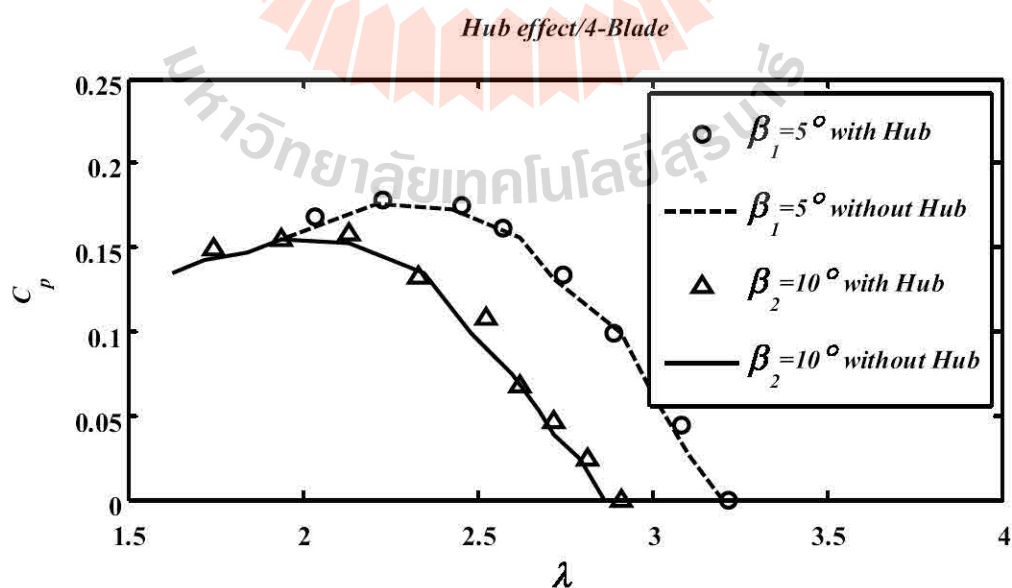
รูปที่ 7.4 C_p แยกต่างระหว่างหุ่นจำลองแบบ Upwind และ Downwind สำหรับ $\beta_4 = 20^\circ$

7.2 การติดตั้ง Hub-fairing

จากรูปที่ 7.5-7.6 เป็นผลการทดลองของหุ่นจำลองกังหันลมสี่ลำแบบ Downwind ที่ความดันใบ 28% เปรียบเทียบระหว่างกรณีติดตั้ง Hub-fairing และกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง พบว่าการติดตั้ง Hub-fairing สามารถเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานได้เล็กน้อยโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ 2.5%



รูปที่ 7.5 การเพิ่มขึ้นของ C_p จากการติดตั้ง Hub-fairing ของหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ

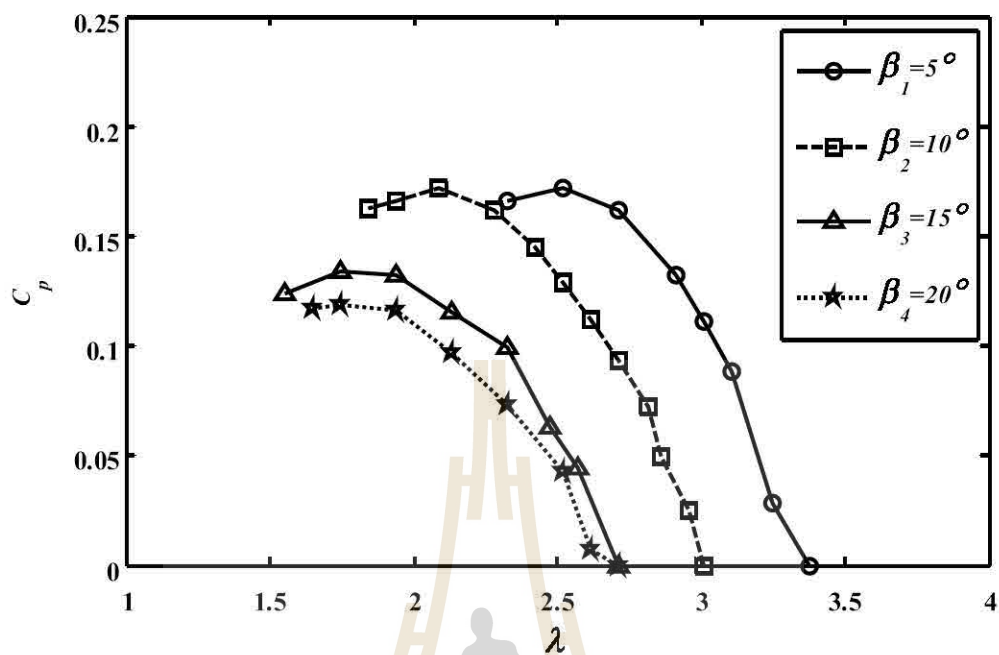


รูปที่ 7.6 การเพิ่มขึ้นของ C_p จากการติดตั้ง Hub-fairing ของหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ

7.3 มุมพิชที่ดีที่สุด

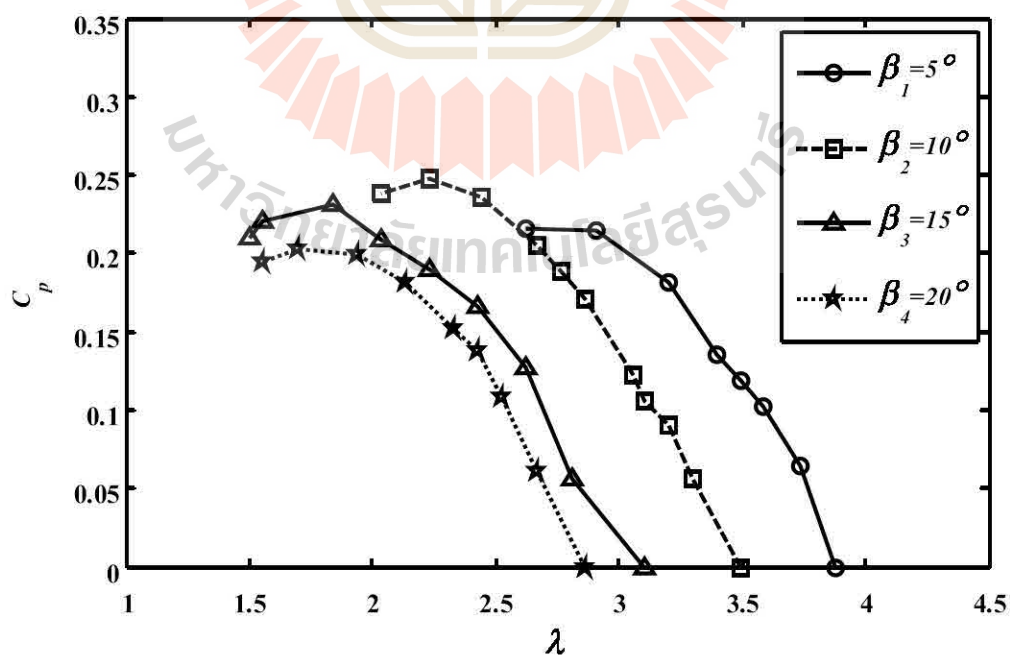
ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองเพื่อหามุมพิชปลายใบที่ดีที่สุดโดยทดลองแปรผันค่ามุมพิชปลายใบแตกต่างกัน 4 ค่าซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับการประเมินประสิทธิภาพด้วยทฤษฎี BEM ในบทที่ 5 คือ $\beta_1 = 5^\circ$ $\beta_2 = 10^\circ$ $\beta_3 = 15^\circ$ และ $\beta_4 = 20^\circ$ ทั้งนี้ได้ทดลองกับโรเตอร์ 3 แบบคือ แบบ 6 ใบ แบบ 4 ใบ และแบบ 3 ใบ ซึ่งได้ผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 7.7-7.14 กรณีแรกผลการทดลองหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ (รูปที่ 7.7-7.9) จะเห็นว่ามุมพิชปลายใบที่ให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดคือ $\beta_2 = 10^\circ$ โดยให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดประมาณ 25% รองลงมาคือ $\beta_3 = 15^\circ$ ซึ่งให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดประมาณ 23% อีกทั้งจะเห็นว่าเมื่อทำการตั้งค่ามุมพิชปลายใบให้มากขึ้นจะส่งผลให้ช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio, λ) ของกังหันลมลดลงเพราะว่าเมื่อมุมพิชมากขึ้นทำให้ต้องใช้มุมความเร็วลมสัมพัทธ์สูงขึ้นในการเริ่มต้นทำให้เกิดมุมปะทะที่ทำให้เกิดแรงยกนั่นเอง ซึ่งมุมความเร็วลมสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันต่อค่า λ ดังที่แสดงในสมการที่ 3.7 (ในบทที่ 3) อีกประการหนึ่งจะเห็นว่ากราฟที่ได้มีรูปร่างคล้ายระฆังคว่ำ หากเริ่มพิจารณาจากทางด้านขวาของกราฟ $C_p - \lambda$ curve จะเห็นว่าค่า C_p จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อ λ ลดลงเพราะการเพิ่มขึ้นของค่า Lift/drag ratio (C_l / C_d) ตามมุมปะทะที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง จนกระทั่งเมื่อถึงจุดสูงสุดของกราฟ $C_p - \lambda$ curve ค่า C_p จะค่อย ๆ ลดลงเพราะว่ามุมปะทะมีค่าสูงเกินไปจนกระทั่งทำให้เกิดการ Stall นั่นเอง (Burton et al., 2011) (ดูรูปที่ 4.16-4.21 ในบทที่ 4) ดังนั้นในกรณี 6 ใบซึ่งมุมพิชปลายใบที่ดีที่สุดมีค่าประมาณ 10 องศา เป็นเพราะว่ามุมพิชปลายใบค่านี้ส่งผลให้ใบกังหันเกิดมุมปะทะที่ดีที่สุดตลอดความยาวใบจนกระทั่งสร้างแรงบิดได้สูงสุดนั่นเอง นอกจากนี้จะเห็นว่าจุดการทดลองที่บริเวณด้านซ้ายหลังจากจุดสูงสุดของกราฟไม่มีความต่อเนื่องไปสู่ค่าศูนย์เนื่องจากการปรับความเร็วรอบโดยการเบรก เมื่อถึงบริเวณจุดใกล้ ๆ ที่เกิดการ Stall ความเร็วรอบมักจะหยุดแบบกะทันหันจึงไม่สามารถวัดค่าความเร็วรอบที่มีค่าต่ำมาก ๆ ได้ กรณีผลการทดลองหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ (รูปที่ 7.10-7.12) จะเห็นว่าประสิทธิภาพพลังงานที่ได้ต่ำกว่าหุ่นจำลองแบบ 6 ใบค่อนข้างมาก โดยประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 17% เท่านั้นและมุมพิชปลายใบที่ดีที่สุดอยู่ที่ประมาณ $\beta_1 = 5^\circ$ ซึ่งต่างกับแบบ 6 ใบ ทั้งนี้เป็นเพราะค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และแรงต้าน (C_d) ของใบกังหันลมมีความแตกต่างกันจากลักษณะหน้าตัดใบที่มีความแตกต่างกัน กรณีผลการทดลองหุ่นจำลองแบบ 3 ใบ (รูปที่ 7.13-7.14) จะเห็นว่าให้ประสิทธิภาพพลังงานน้อยที่สุดโดยให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดเพียง 13% เท่านั้น และมุมพิชปลายใบที่ดีที่สุดอยู่ที่ประมาณ $\beta_1 = 5^\circ$ เหมือนกับกรณี 4 ใบ ดังนั้นการที่จะทำให้อัตราส่วนการทำงานภายใต้จุดที่ดีที่สุด (Optimal operation point) จะต้องปรับค่ามุมพิชและความเร็วรอบให้เหมาะสมกับความเร็วลม (Burton et al., 2011) เนื่องจากทั้งสองตัวแปรนี้จะนำไปสู่การได้มุมปะทะที่ดีที่สุดและ Lift/drag ratio (C_l / C_d) สูงที่สุด

6-Blade and $\sigma_1 = 22\%$



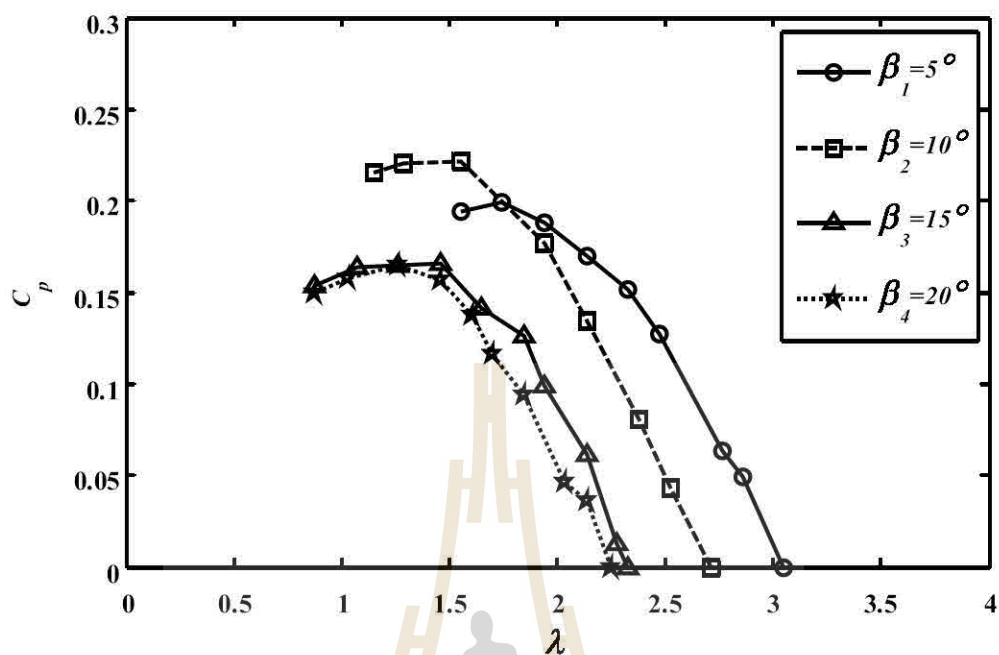
รูปที่ 7.7 C_p กังหันลมสี่ลําแพนแบบ 6 ใบที่ความดันใบ 22%

6-Blade and $\sigma_2 = 28\%$



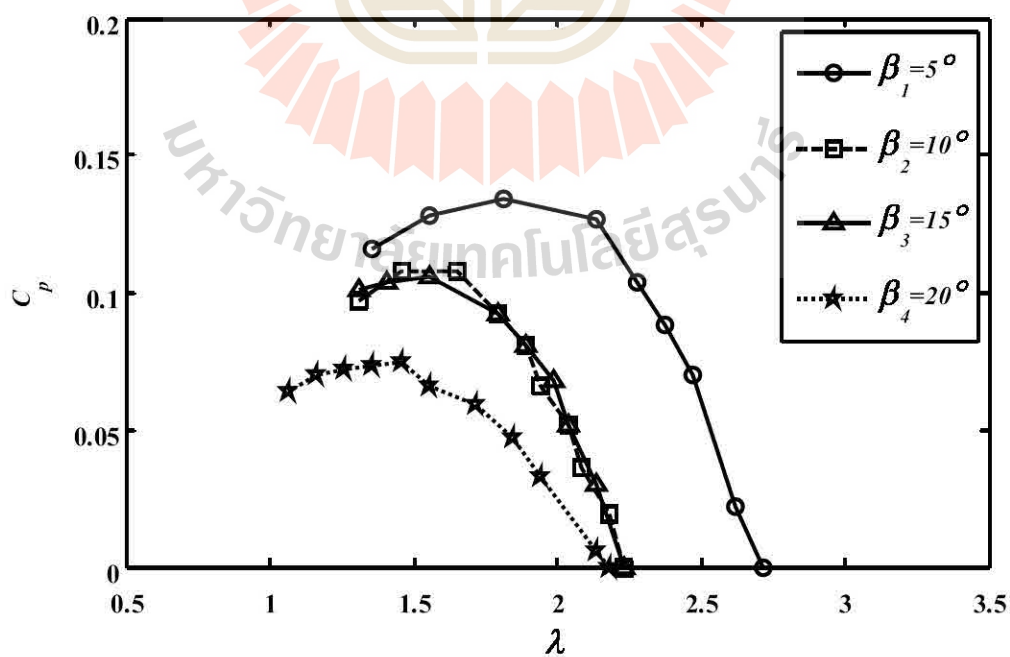
รูปที่ 7.8 C_p กังหันลมสี่ลําแพนแบบ 6 ใบที่ความดันใบ 28%

6-Blade and $\sigma_3 = 34\%$

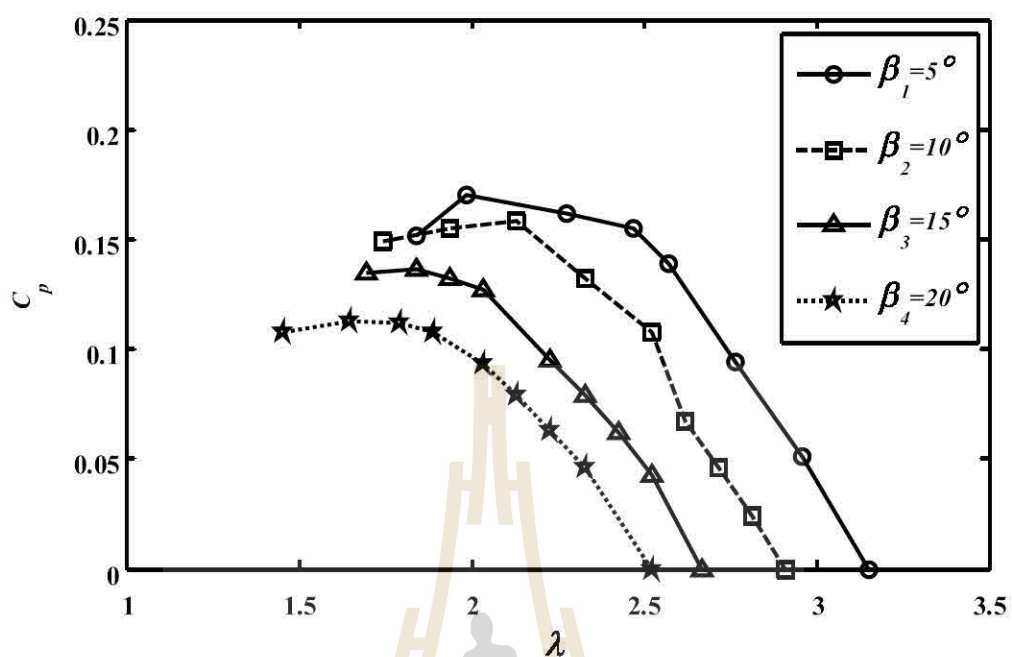
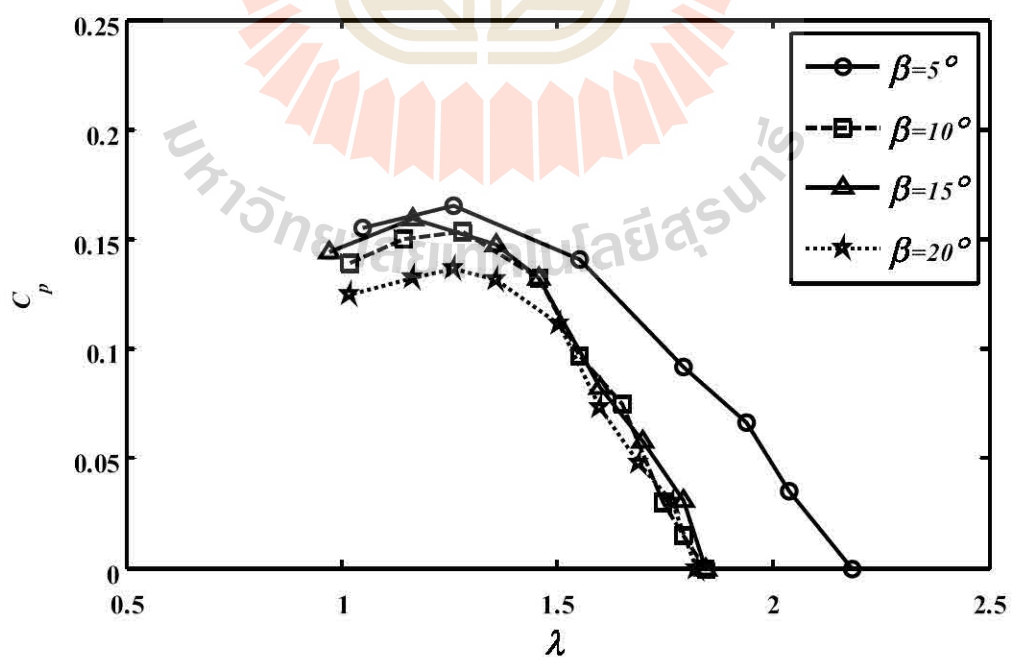


รูปที่ 7.9 C_p กังหันลมสี่ลำแพนแบบ 6 ใบที่ความดันใบ 34%

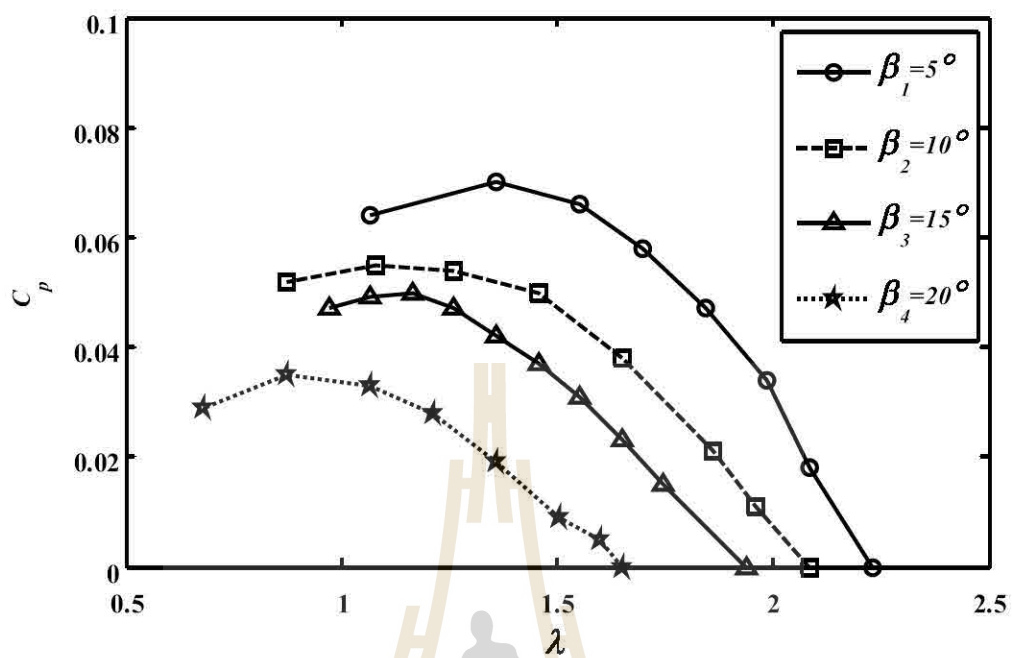
4-Blade and $\sigma_1 = 22\%$



รูปที่ 7.10 C_p กังหันลมสี่ลำแพนแบบ 4 ใบที่ความดันใบ 22%

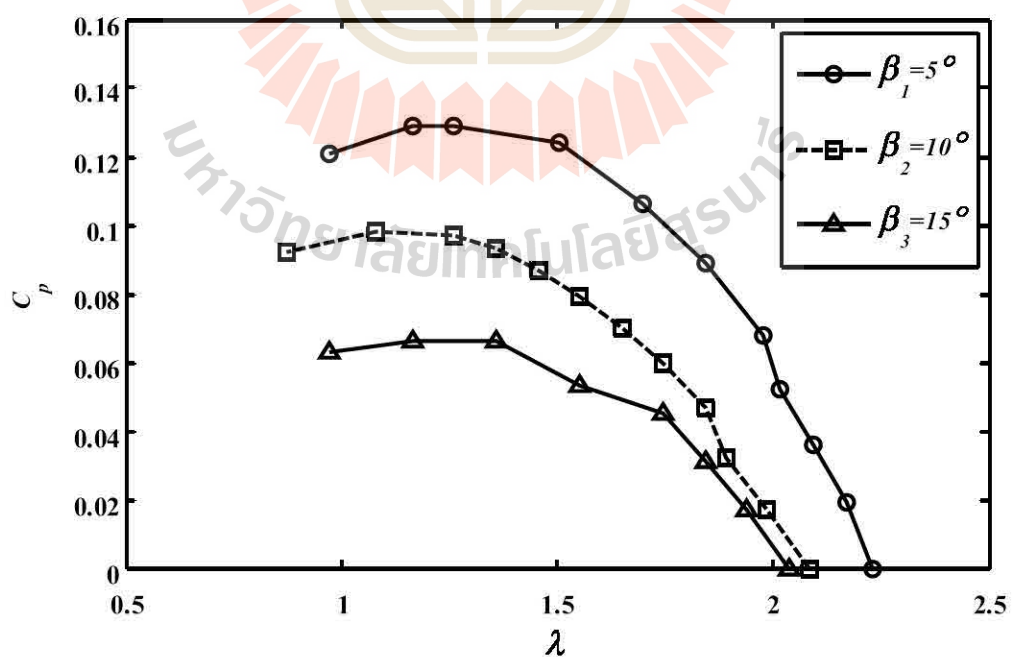
4-Blade and $\sigma_2 = 28\%$ รูปที่ 7.11 C_p กำลังหันลมเลื้อล้าแพนแบบ 4 ใบที่ความดันใบ 28%4-Blade and $\sigma_3 = 34\%$ รูปที่ 7.12 C_p กำลังหันลมเลื้อล้าแพนแบบ 4 ใบที่ความดันใบ 34%

3-Blade and $\sigma_l = 22\%$



รูปที่ 7.13 C_p กังหันลมเกลื่อลำแพนแบบ 3 ใบที่ความดันใบ 22%

3-Blade and $\sigma_2 = 28\%$



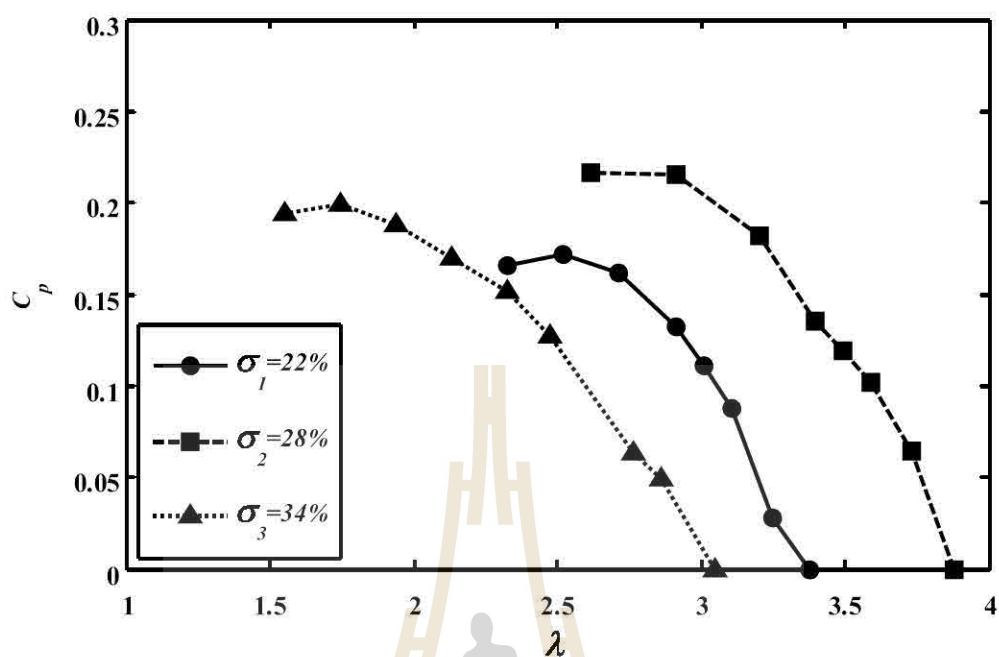
รูปที่ 7.14 C_p กังหันลมเกลื่อลำแพนแบบ 3 ใบที่ความดันใบ 28%

7.4 ความดันใบที่ดีที่สุด

ความดันใบ (Solidity) เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการออกแบบกังหันลมซึ่งส่งผลหลายด้าน เช่น แรงในแนวแกน (T) แรงบิด (Q) และสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) เป็นต้น คำนิยามของความดันใบได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 6.2.1 (ในบทที่ 6) ฉะนั้นเราสามารถอนุมานได้ไม่ยากนักว่าการเพิ่มความดันใบน่าจะส่งผลให้กังหันลมสร้างแรงบิดได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นที่เพิ่มขึ้น แต่ความจริงแล้วความดันใบที่เพิ่มขึ้นนั้นก็จะทำให้เกิดการบังลมเข้าสู่โรเตอร์มากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นเหตุให้อัตราการไหลเข้าสู่โรเตอร์น้อยลงทำให้การดูดซับพลังงานน้อยลงประสิทธิภาพก็จะลดลง แต่ถ้าความดันใบมีค่าน้อยเกินไปแม้อัตราการไหลจะมากขึ้นแต่พื้นที่ของใบจะน้อยลงทำให้สร้างแรงยกได้น้อยลงก็จะทำให้ประสิทธิภาพลดลงด้วย ดังนั้นความดันใบที่ดีที่สุดย่อมมีอยู่ในทุกประเภทของกังหันลม การที่จะทราบค่าความดันใบที่ดีที่สุดได้จะต้องทำการทดลองซึ่งเป็นจุดประสงค์ในหัวข้อนี้

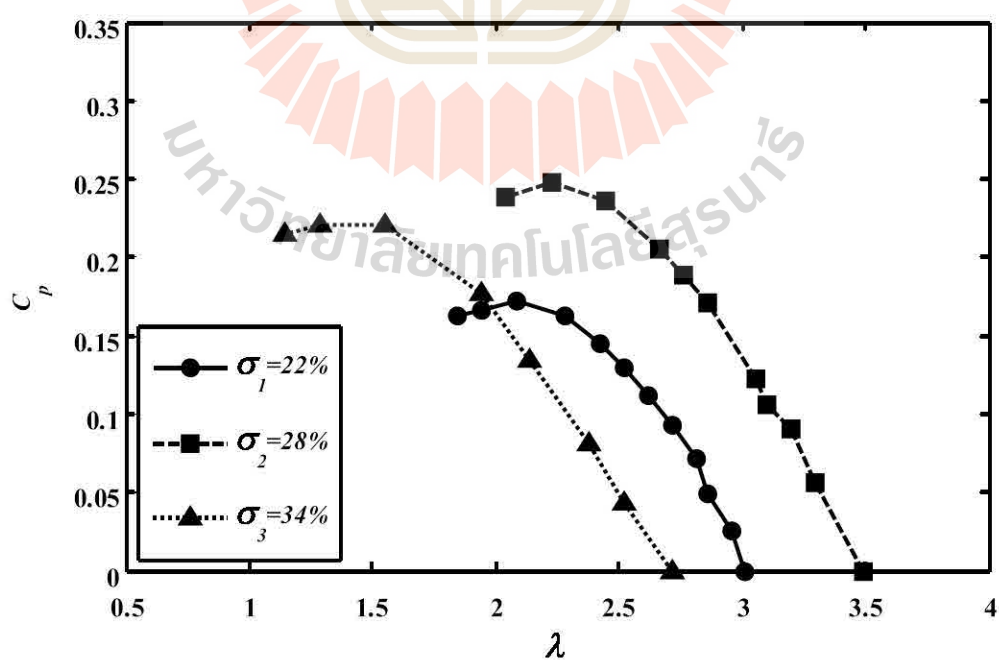
กังหันลมสมัยใหม่ (Modern wind turbine) มีความดันใบต่ำกว่ากังหันลมเสื่อลำแพนมากพอสมควร คือมักจะมีค่าประมาณ 2-15% และมีจำนวนใบเพียง 2-3 ใบเท่านั้น เพราะส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งมักจะหลีกเลี่ยงที่จะทำให้ได้แรงบิดที่สูงเกินไปแต่จะชดเชยด้วยจำนวนรอบแทน เพราะข้อจำกัดของการทดลองที่ต้องใช้เฟืองทดรอบขนาดใหญ่ซึ่งมีราคาแพง (Spera, 1998) สำหรับกังหันลมเสื่อลำแพนมักมีความดันใบสูงกว่าโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 15-60% (Thep Wong, 2013) และมีจำนวนใบมากกว่าคือประมาณ 4-8 ใบ เนื่องจากเป็นกังหันลมที่ต้องการแรงบิดโดยตรงเพราะใช้ในการสูบน้ำในพื้นที่ที่มีความเร็วลมต่ำ และช่วย Starting torque ได้ดีซึ่งคล้ายกับกังหันลมแบบอเมริกันเพียงแต่กังหันลมแบบอเมริกันจะมีจำนวนใบและความดันใบมากกว่าคือประมาณ 80% (Gipe, 2004) สำหรับการทดลองนี้ได้สุ่มค่าความดันใบจำนวน 3 ค่าประกอบด้วย $\sigma_1 = 22\%$ $\sigma_2 = 28\%$ และ $\sigma_3 = 34\%$ แล้วทำการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดโดยใช้หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพน 3 รูปแบบ คือแบบ 6 ใบ แบบ 4 ใบ และแบบ 3 ใบ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 7.15-7.25 จะเห็นว่าค่าความดันใบที่ดีที่สุดคือ $\sigma_2 = 28\%$ โดยประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดที่สามารถทำได้คือ 25% ซึ่งเป็นของหุ่นจำลองแบบ 6 ใบที่มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ ผลการทดลองที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือจะเห็นว่าความดันใบ $\sigma_2 = 28\%$ ให้ช่วง λ สูงสุดและกรณีความดันใบ $\sigma_3 = 34\%$ ให้ช่วง λ ต่ำสุดเพราะเมื่อความดันใบเพิ่มขึ้นทำให้การเหนี่ยวนำเชิงแกน (Axial induction factor, a) มีค่าเพิ่มขึ้นจากการบังลมมากขึ้นทำให้ความเร็วลมที่ด้านหน้าโรเตอร์ $U(1-a)$ มีค่าลดลง ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่มุมความเร็วลมสัมพันธ์เดิมจะทำให้ความเร็วรอบ (Ω) มีค่าลดลงด้วย จึงทำให้ค่า λ มีค่าน้อยลงตามสมการ $\lambda = \Omega R / U$ ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการอธิบายของ Burton et al. (2011) ดังนั้นข้อสรุปของการทดลองในหัวข้อนี้คือ ความดันใบที่ดีที่สุดของกังหันลมเสื่อลำแพนที่ใช้ในย่านความเร็วลมออกแบบ 5.6 เมตร/วินาที ควรใช้ความดันใบเท่ากับ 28%

6-Blade and $\beta_1 = 5^\circ$



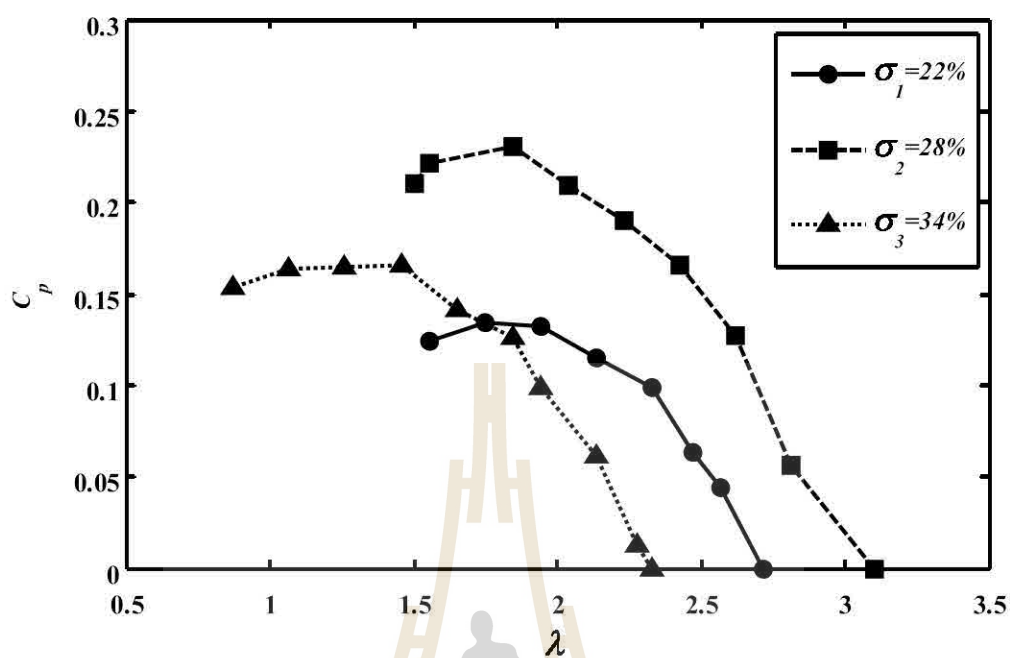
รูปที่ 7.15 ผลของความดันใบที่มีต่อ C_p กังหันลมแบบ 6 ใบที่ $\beta_1 = 5^\circ$

6-Blade and $\beta_2 = 10^\circ$



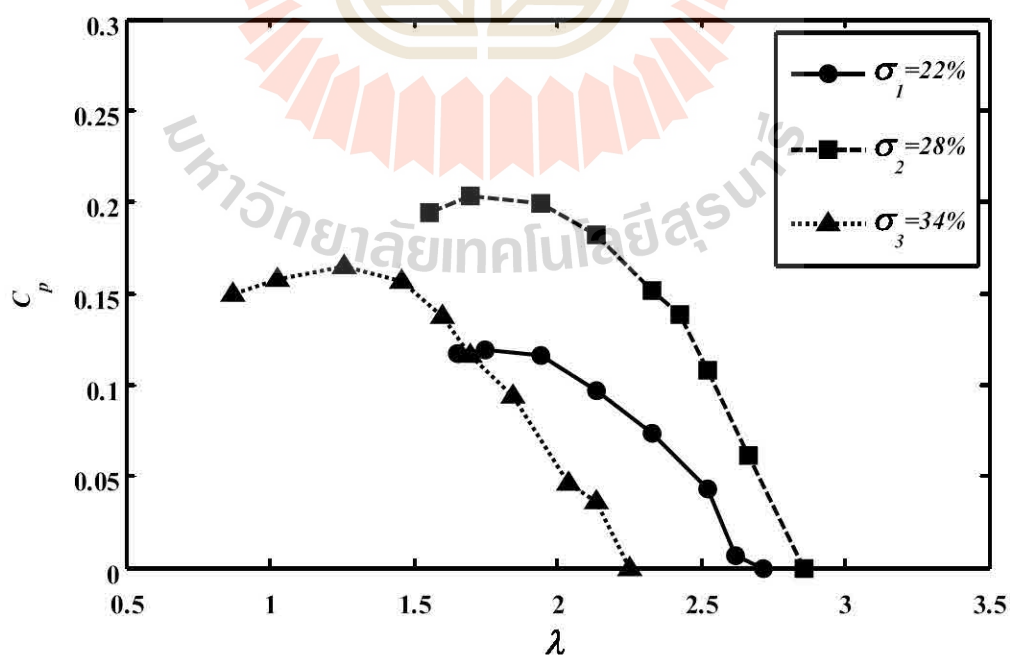
รูปที่ 7.16 ผลของความดันใบที่มีต่อ C_p กังหันลมแบบ 6 ใบที่ $\beta_2 = 10^\circ$

6-Blade and $\beta_3 = 15^\circ$



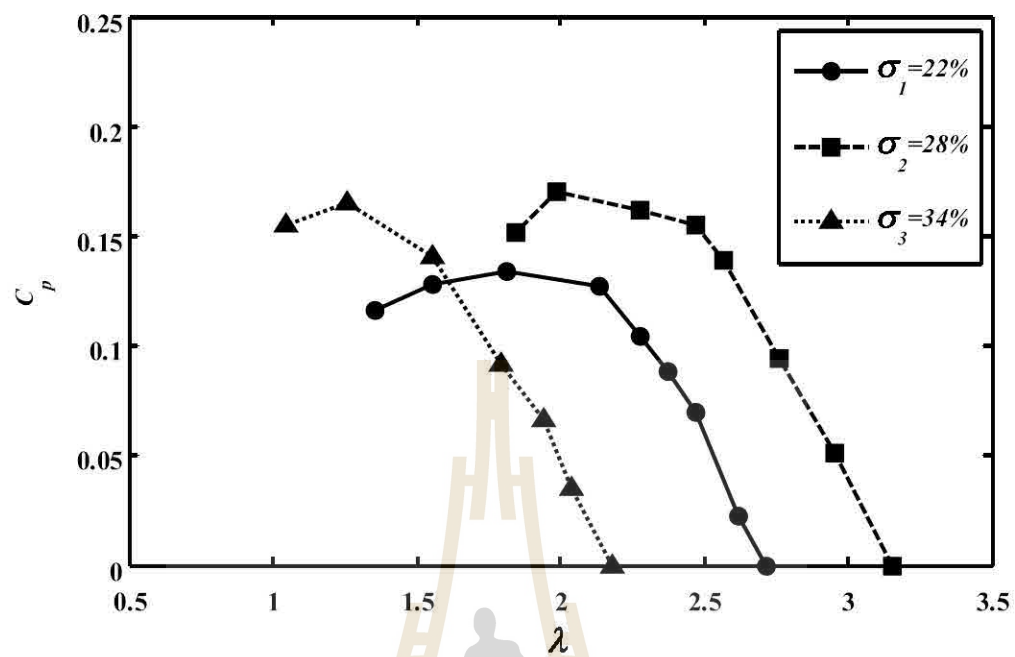
รูปที่ 7.17 ผลของความดันใบที่มีต่อ C_p กังหันลมแบบ 6 ใบที่ $\beta_3 = 15^\circ$

6-Blade and $\beta_4 = 20^\circ$



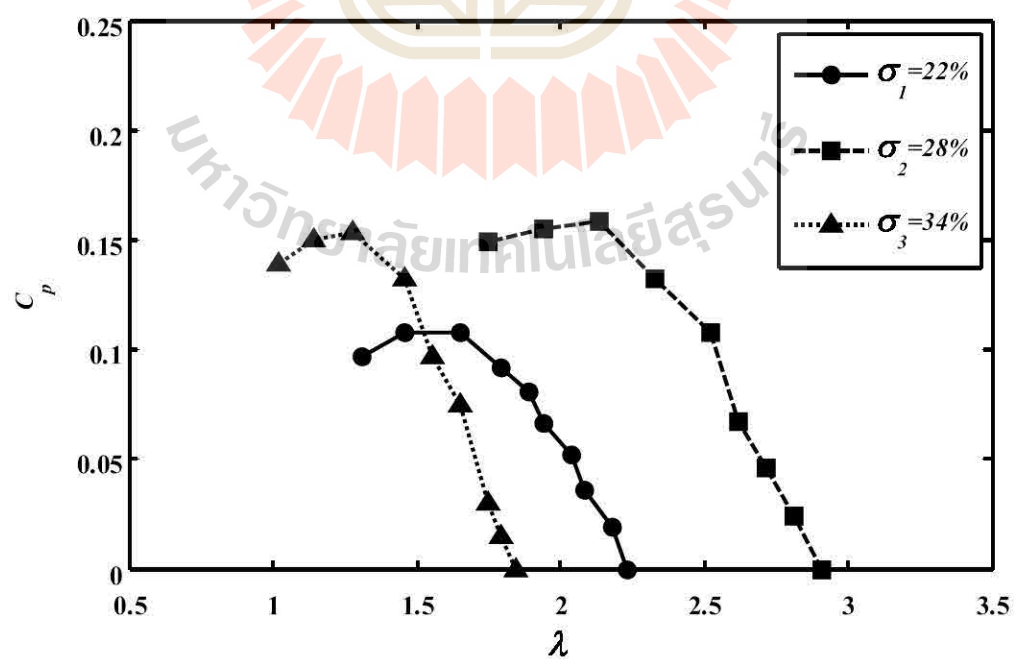
รูปที่ 7.18 ผลของความดันใบที่มีต่อ C_p กังหันลมแบบ 6 ใบที่ $\beta_4 = 20^\circ$

4-Blade and $\beta_1 = 5^\circ$



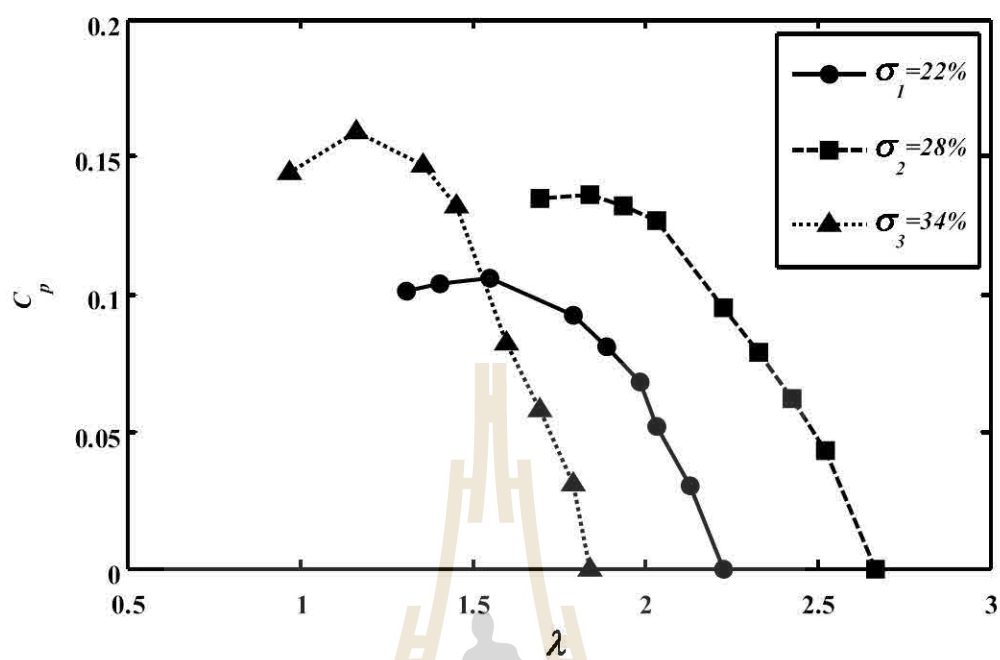
รูปที่ 7.19 ผลของความดันใบที่มีต่อ C_p กังหันลมแบบ 4 ใบที่ $\beta_1 = 5^\circ$

4-Blade and $\beta_2 = 10^\circ$



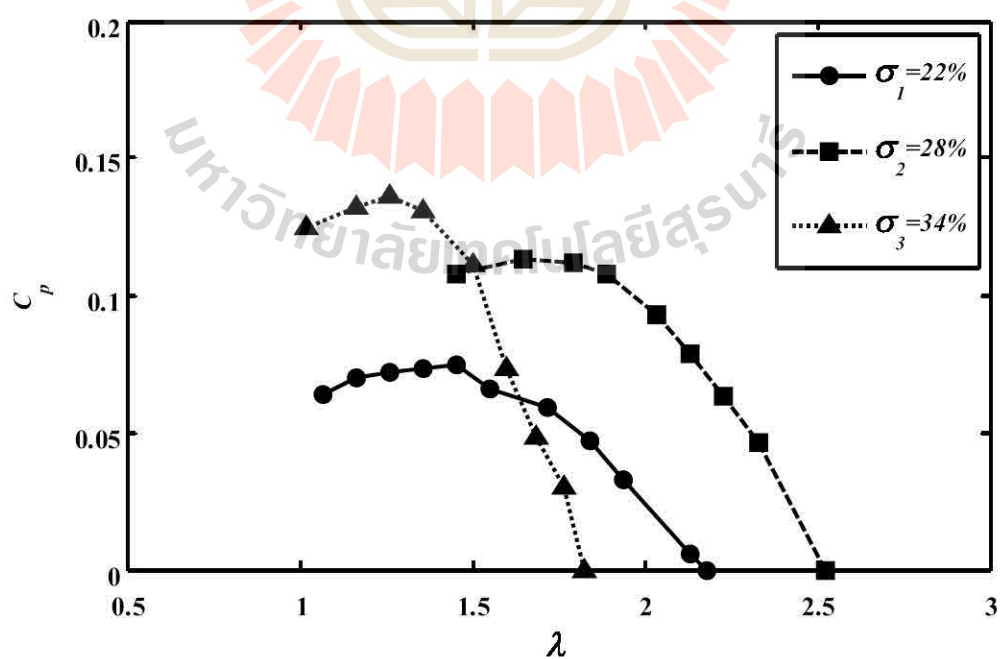
รูปที่ 7.20 ผลของความดันใบที่มีต่อ C_p กังหันลมแบบ 4 ใบที่ $\beta_2 = 10^\circ$

4-Blade and $\beta_3 = 15^\circ$



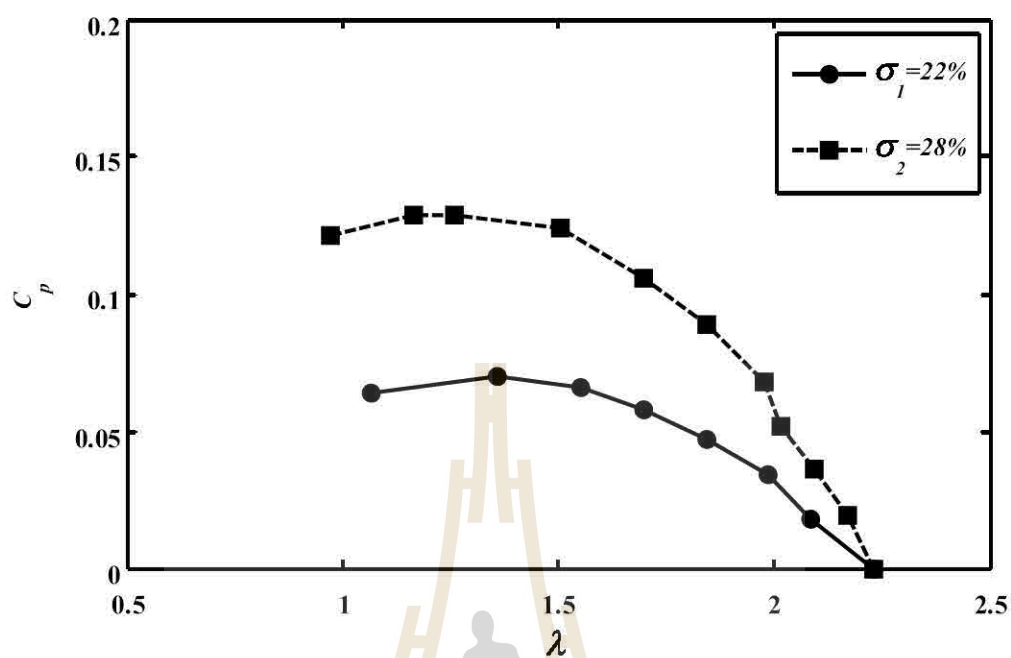
รูปที่ 7.21 ผลของความดันใบที่มีต่อ C_p กังหันลมแบบ 4 ใบที่ $\beta_3 = 15^\circ$

4-Blade and $\beta_4 = 20^\circ$



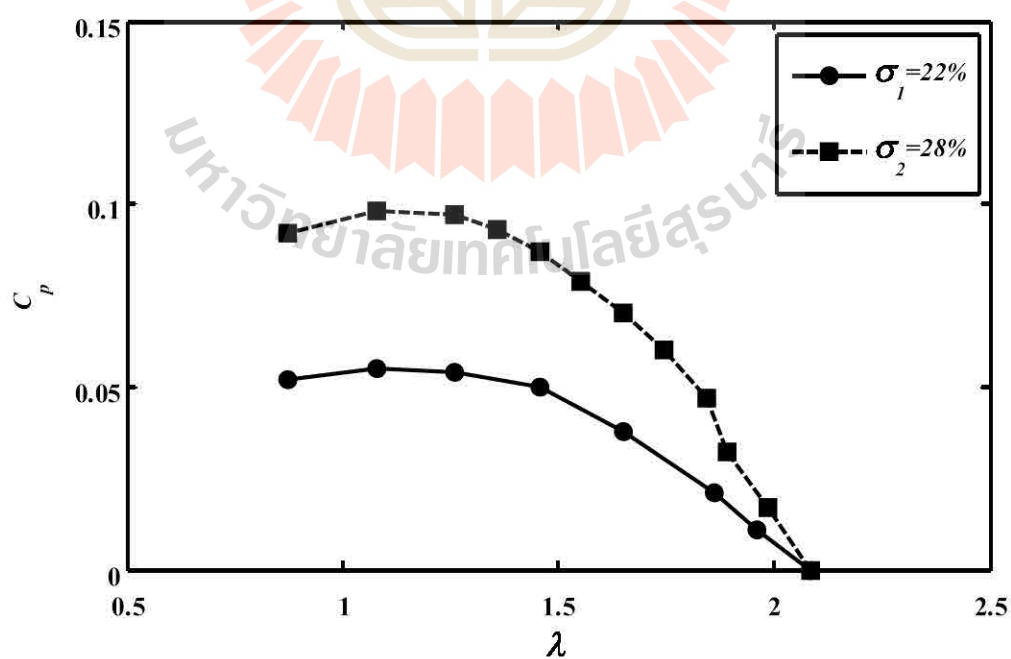
รูปที่ 7.22 ผลของความดันใบที่มีต่อ C_p กังหันลมแบบ 4 ใบที่ $\beta_4 = 20^\circ$

3-Blade and $\beta_1 = 5^\circ$

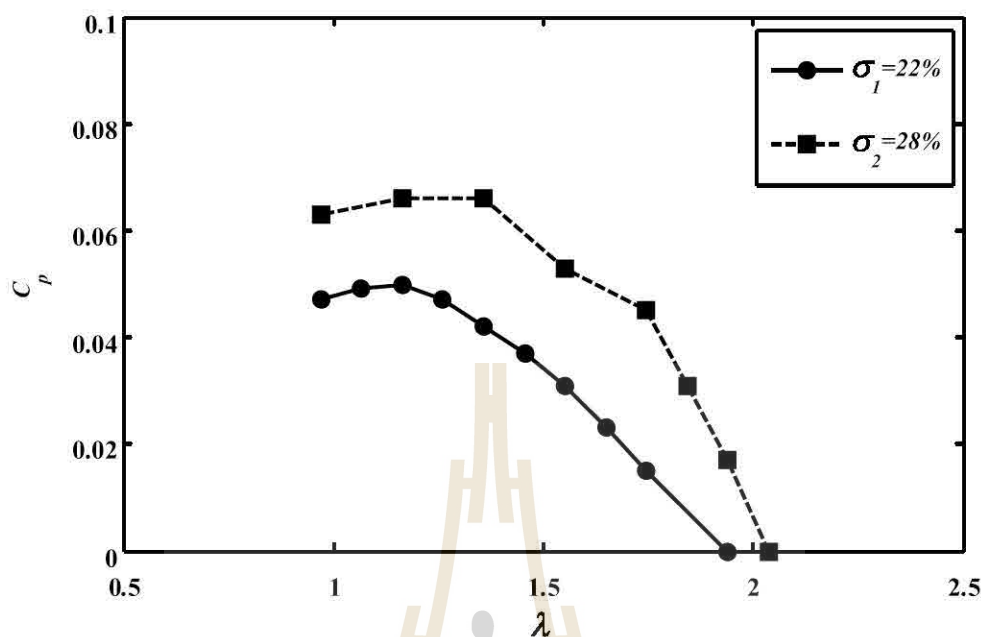


รูปที่ 7.23 ผลของความดันใบที่มีต่อ C_p กังหันลมแบบ 3 ใบที่ $\beta_1 = 5^\circ$

3-Blade and $\beta_2 = 10^\circ$

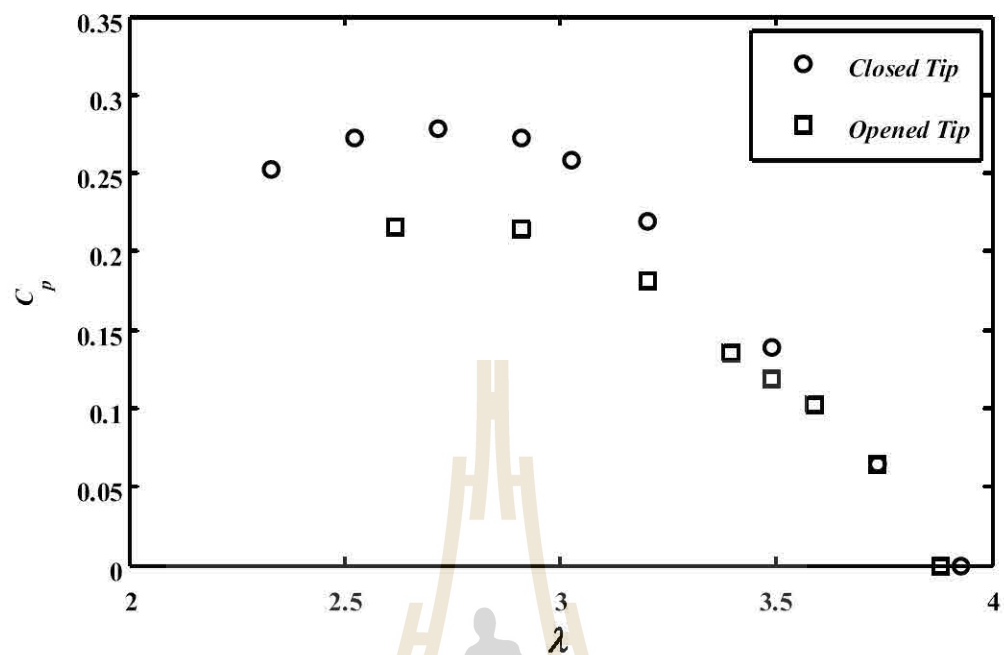
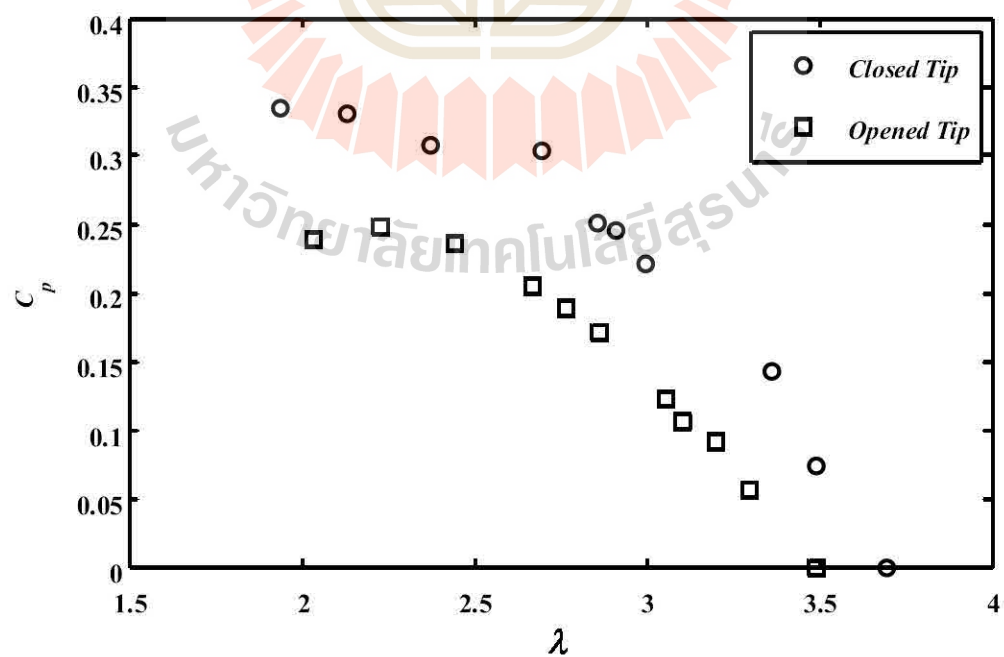


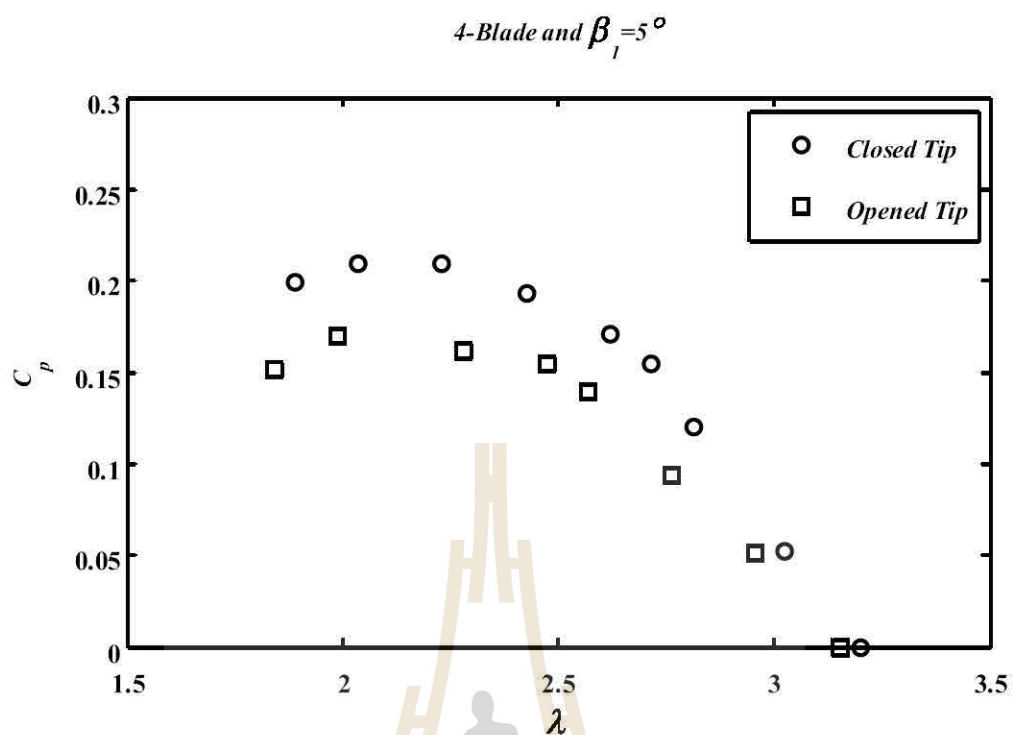
รูปที่ 7.24 ผลของความดันใบที่มีต่อ C_p กังหันลมแบบ 3 ใบที่ $\beta_2 = 10^\circ$

3-Blade and $\beta_3 = 15^\circ$ รูปที่ 7.25 ผลของความดันใบที่มีต่อ C_p กังหันลมแบบ 3 ใบที่ $\beta_3 = 15^\circ$

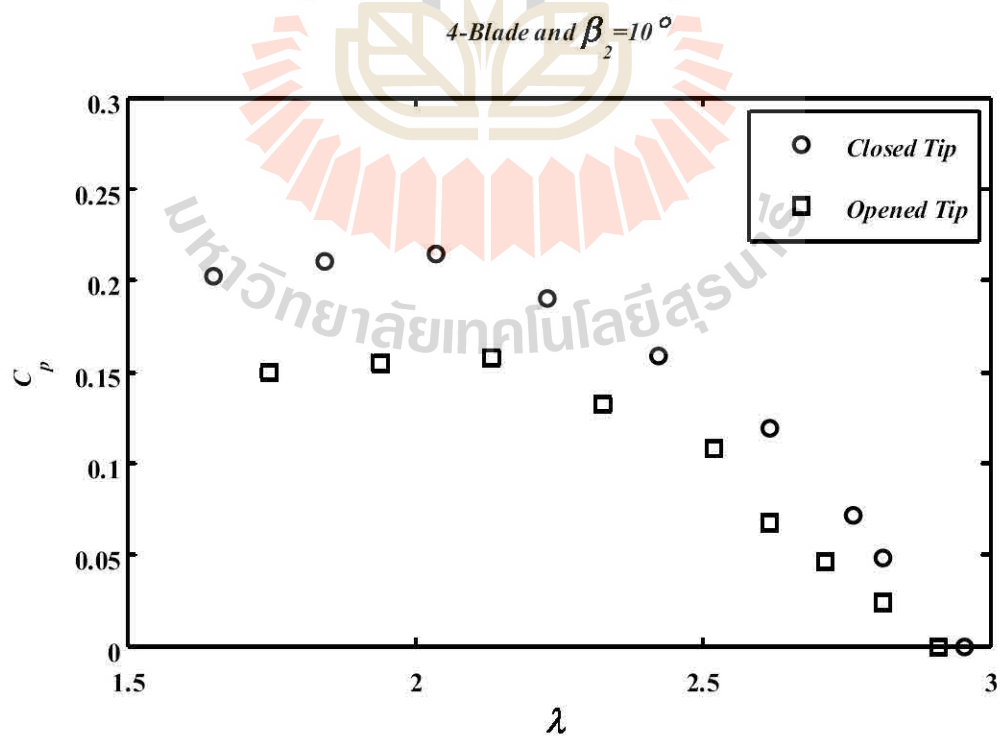
7.5 การปิดปลายใบ (Closed tip)

กังหันลมสี่ลำแบบดั้งเดิมจะมีปลายใบในลักษณะแบบเปิด (Opened blade tip) ดังรูปที่ 6.12 (ในบทที่ 6) สิ่งนี้ทำให้เกิดการสูญเสียปลายใบ (Tip loss) สูงมากเนื่องจากบริเวณปลายใบมีขนาดใหญ่และอากาศสามารถรั่วไหลได้จึงเป็นที่มาของการทดลองในหัวข้อนี้ซึ่งเป็นคำแนะนำของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (รศ.ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์) คือทำการทดลองปิดปลายใบ (Closed blade tip) โดยเย็บปลายใบเข้ากับขอบของโรเตอร์ดังรูปที่ 6.13-6.14 (ในบทที่ 6) จากรูปที่ 7.26-7.29 แสดงผลการทดลอง พบว่าการปิดปลายใบช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) หรือประสิทธิภาพได้เป็นอย่างมากดังนี้ กรณีหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ (รูปที่ 7.26-7.27) ประสิทธิภาพพลังงานเพิ่มขึ้นสูงสุดจากเดิมคิดเป็น 36.0% โดยประสิทธิภาพสูงสุดที่สามารถทำได้จากการปิดปลายใบคือ 34% ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ สำหรับกรณีแบบ 4 ใบ (รูปที่ 7.28-7.29) พบว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นสูงสุดจากเดิมคิดเป็น 29.4% โดยประสิทธิภาพสูงสุดที่สามารถทำได้จากการปิดปลายใบคือ 22% ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ ทั้งนี้สาเหตุหลักอาจเป็นเพราะว่าการปิดปลายใบช่วยลดการรั่วไหลของอากาศจากด้านความดันสูงไปสู่ด้านความต่ำทำให้ช่วยลดการสูญเสียปลายใบ (Tip loss) ได้มากขึ้น และที่สำคัญกว่าก็คือการปิดปลายใบจะช่วยอุ้มลมที่ปลายใบมากขึ้นทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงมุมมากขึ้นซึ่งเกิดที่ปลายใบจึงทำให้ผลของแรงบิด (Torque arm) มากขึ้น

6-Blade and $\beta_1 = 5^\circ$ รูปที่ 7.26 การเพิ่มขึ้นของ C_p เมื่อทำการ Closed Tip ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ ที่ $\beta_1 = 5^\circ$ 6-Blade and $\beta_2 = 10^\circ$ รูปที่ 7.27 การเพิ่มขึ้นของ C_p เมื่อทำการ Closed Tip ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ ที่ $\beta_2 = 10^\circ$



รูปที่ 7.28 การเพิ่มขึ้นของ C_p เมื่อทำการ Closed Tip ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ ที่ $\beta_1 = 5^\circ$

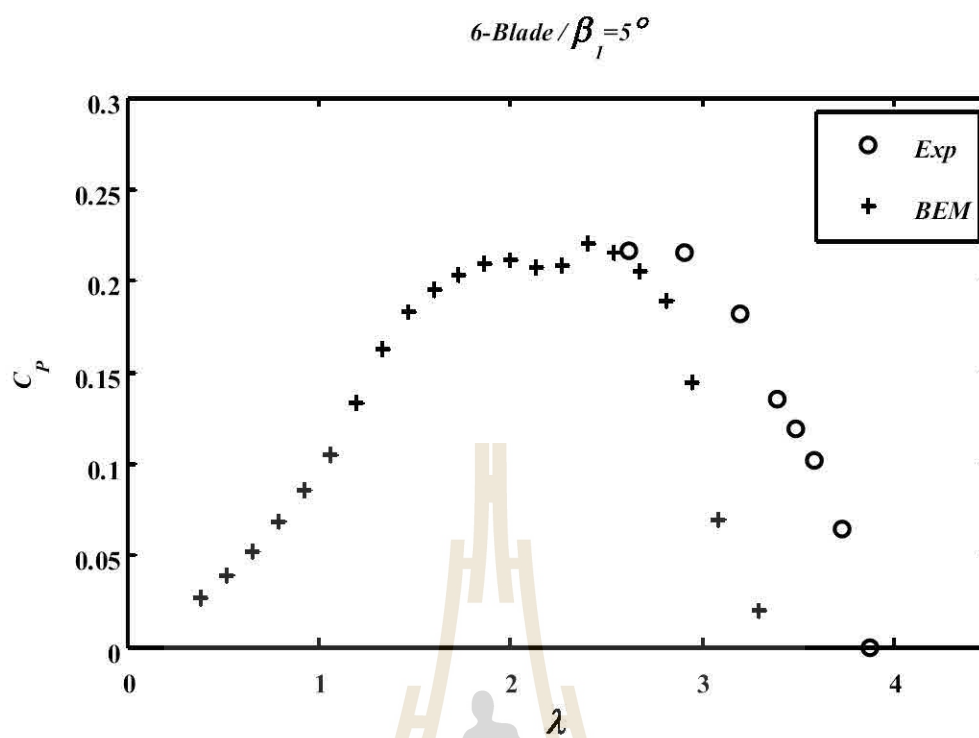


รูปที่ 7.29 การเพิ่มขึ้นของ C_p เมื่อทำการ Closed Tip ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ ที่ $\beta_2 = 10^\circ$

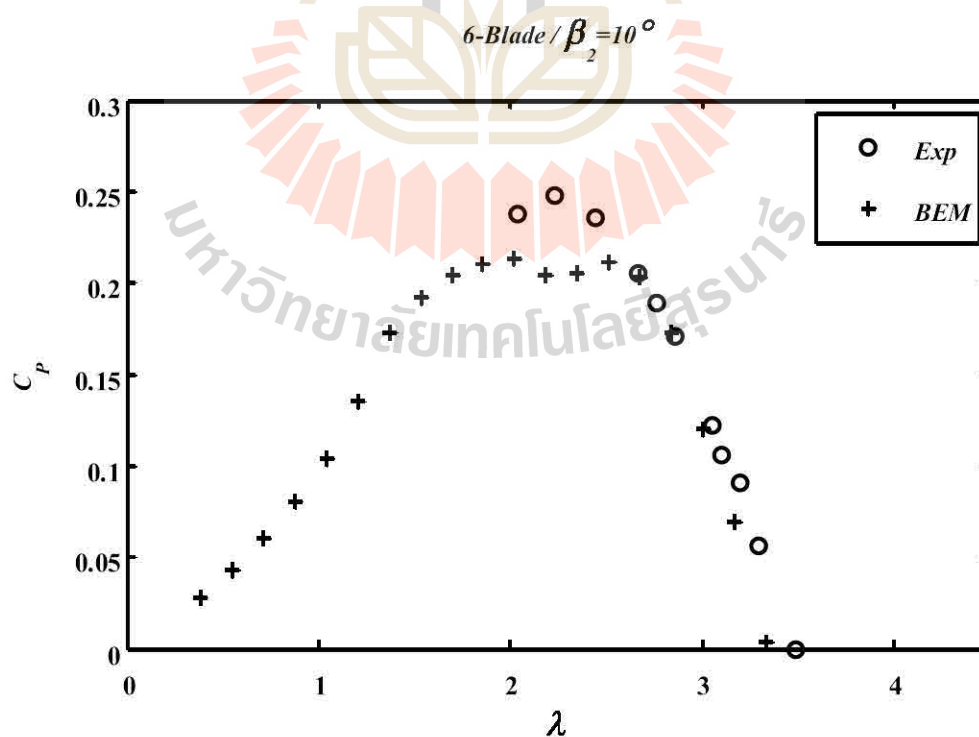
7.6 เปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี BEM

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ของหุ่นจำลองกังหันลม เสือลำแพนที่ได้จากการทดลองกับทฤษฎี BEM ที่ได้ประเมินไว้ในบทที่ 5 เพื่อความกระชับดังนั้น จะเปรียบเทียบเฉพาะหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ และ 4 ใบ ที่ความดันใบ 28% เท่านั้น และที่มุมพิชปลาย ใบ 4 ค่า คือ $\beta_1 = 5^\circ$ $\beta_2 = 10^\circ$ $\beta_3 = 15^\circ$ และ $\beta_4 = 20^\circ$ จากรูปที่ 7.30-7.33 แสดงผลการ เปรียบเทียบของหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ จะเห็นว่าในช่วงมุมปะทะต่ำ (หรือช่วง Tip speed ratio, λ สูง) ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ที่ประเมินด้วยทฤษฎี BEM ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองเป็น อย่างดี (ยกเว้นที่มุมพิชปลายใบ 5 องศา) แต่ในช่วงมุมปะทะสูงโดยตั้งแต่ช่วงก่อนเกิดการ Stall (จุดสูงสุดของกราฟ $C_p - \lambda$) เล็กน้อยจนกระทั่งหลังการ Stall ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากทฤษฎี BEM ค่อนข้างต่ำกว่าผลการทดลองพอสมควร อีกทั้งตำแหน่งของการ Stall จะเกิดขึ้นที่ λ ต่ำลง (หรือที่มุมปะทะสูงขึ้น) กว่าเดิมเล็กน้อย ซึ่งผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีพฤติกรรม Stall delay เหตุเพราะว่า ค่า C_l และ C_d ที่ได้จาก CFD เป็นเพียงค่าที่ได้จากการประเมินในระบบ 2 มิติ นั้นเอง ประเด็นสำคัญอีกประการหนึ่งคือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากทฤษฎี BEM ที่มุมพิชปลาย ใบ $\beta_3 = 15^\circ$ และ $\beta_4 = 20^\circ$ ให้ผลการประเมินที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองยกเว้นที่มุมปะทะสูง แสดงว่าผลของมุมพิชปลายใบส่งผลต่อความโค้งหน้าตัดใบกังหันไม่มากนัก แต่ว่าเมื่อนำมาใช้กับ กรณีมุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ กลับให้ผลการประเมินที่แตกต่างกับผลการทดลองเป็นอย่างมาก ตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนกระทั่งหลังการ Stall อาจมีสาเหตุมาจากกรณีมุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ ส่งผลให้ กังหันลมมีความเร็วรอบสูง จึงอาจส่งผลให้น้ำตัดใบกังหันเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญจน เป็นเหตุให้ค่า C_l และ C_d มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่ได้จากการวัดมาก

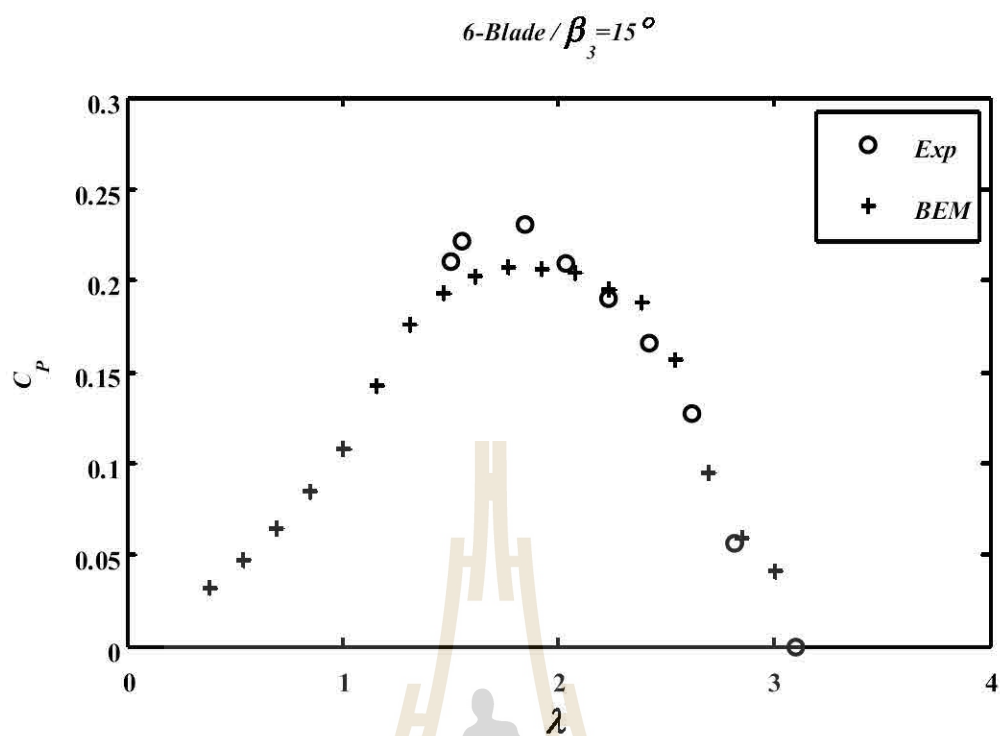
จากรูปที่ 7.34-7.37 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลังกรณีหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ พบว่าผลการประเมินด้วยทฤษฎี BEM ยังคงมีความคลาดเคลื่อนมากพอสมควรโดยในช่วงมุมปะทะ ต่ำผลการประเมินด้วยทฤษฎี BEM ต่ำกว่าการทดลองเล็กน้อยแต่ตำแหน่งการ Stall จะช้ากว่า และ เมื่อถึงที่ตำแหน่งมุมปะทะสูงคือหลังจากจุด Stall ไปแล้วผลการประเมินด้วยทฤษฎี BEM จะมีค่าสูง กว่าผลการทดลองค่อนข้างมาก ซึ่งตรงกันข้ามกับทฤษฎีพฤติกรรม Stall delay ดังที่อธิบายแล้ว ข้างต้น ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากความไม่สมจริงของ ค่า C_l และ C_d ที่ได้จาก CFD อันเนื่องมาจากการที่ใบกังหันลมเสือลำแพนมีพื้นที่ที่ใหญ่ขึ้นเพราะว่าจำนวนใบน้อยลงคือ 4 ใบในขณะที่ความดัน ใบยังคงเท่าเดิมที่ 28% จึงอาจทำให้เกิดความพลิ้วไหวและสับสนหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ ง่ายกว่ากรณี 6 ใบ จึงอาจทำให้รูปร่างหน้าตัดใบเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่แย่ง โดยเฉพาะเมื่อ กังหันลมปฏิบัติงานที่มุมปะทะสูงหรือจุดที่เกิดการ Stall ไปแล้ว จึงเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง หรือประสิทธิภาพพลังงานจากการทดลองต่ำกว่าการประเมินด้วยทฤษฎี BEM ในช่วงมุมปะทะสูง



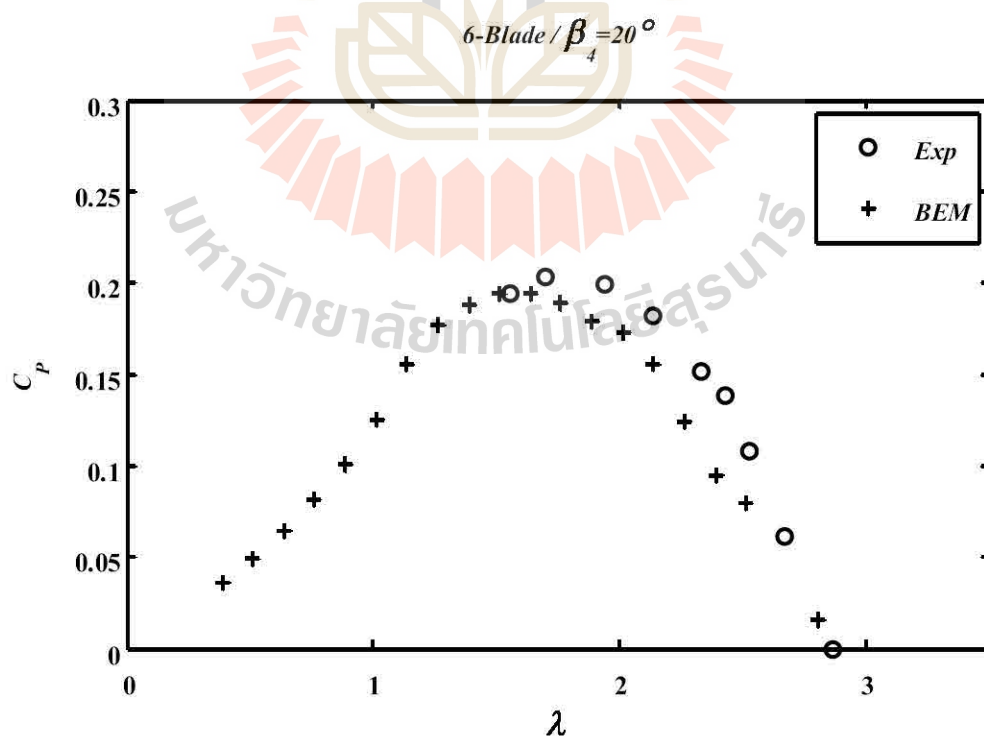
รูปที่ 7.30 ประสิทธิภาพหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ จากทฤษฎี BEM



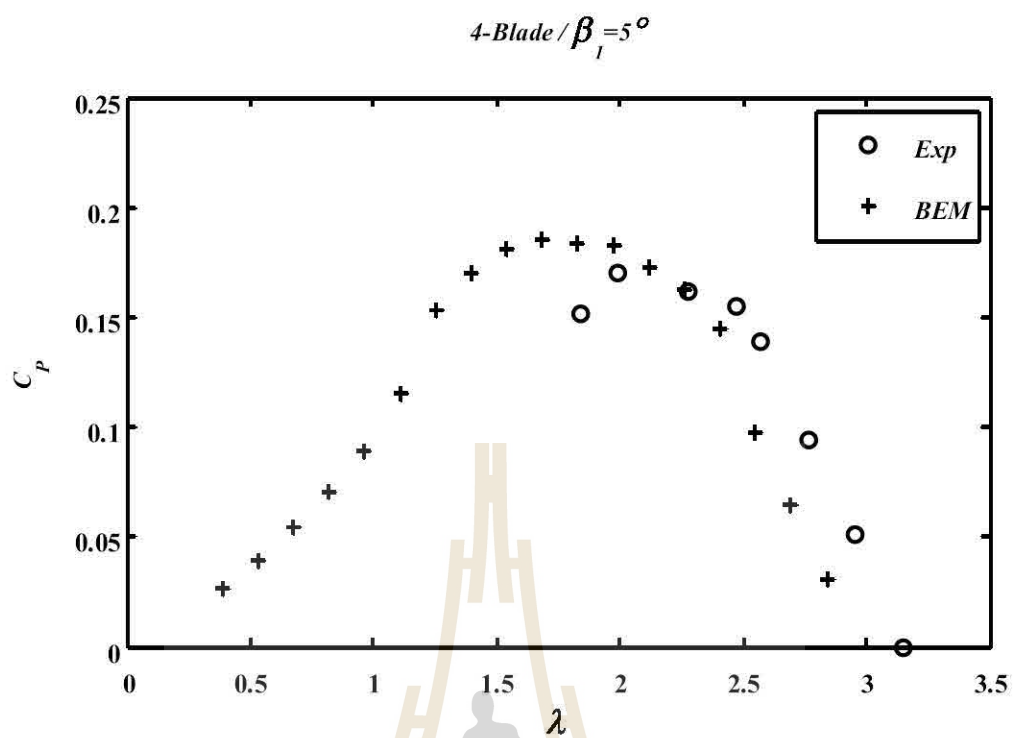
รูปที่ 7.31 ประสิทธิภาพหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ จากทฤษฎี BEM



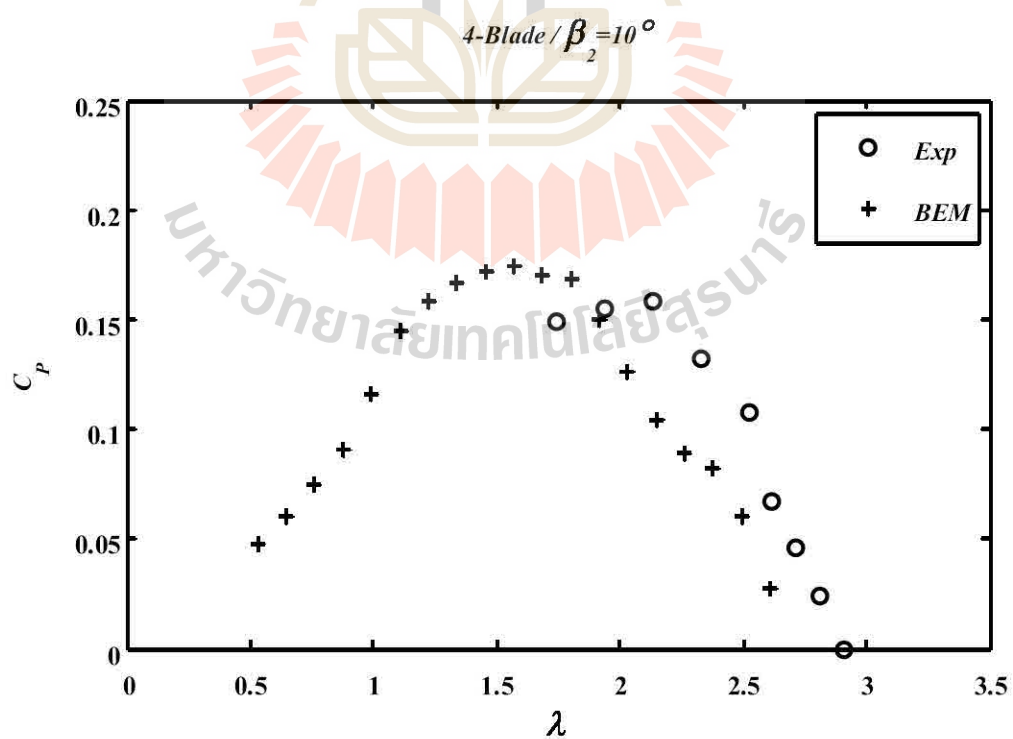
รูปที่ 7.32 ประสิทธิภาพหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$ จากทฤษฎี BEM



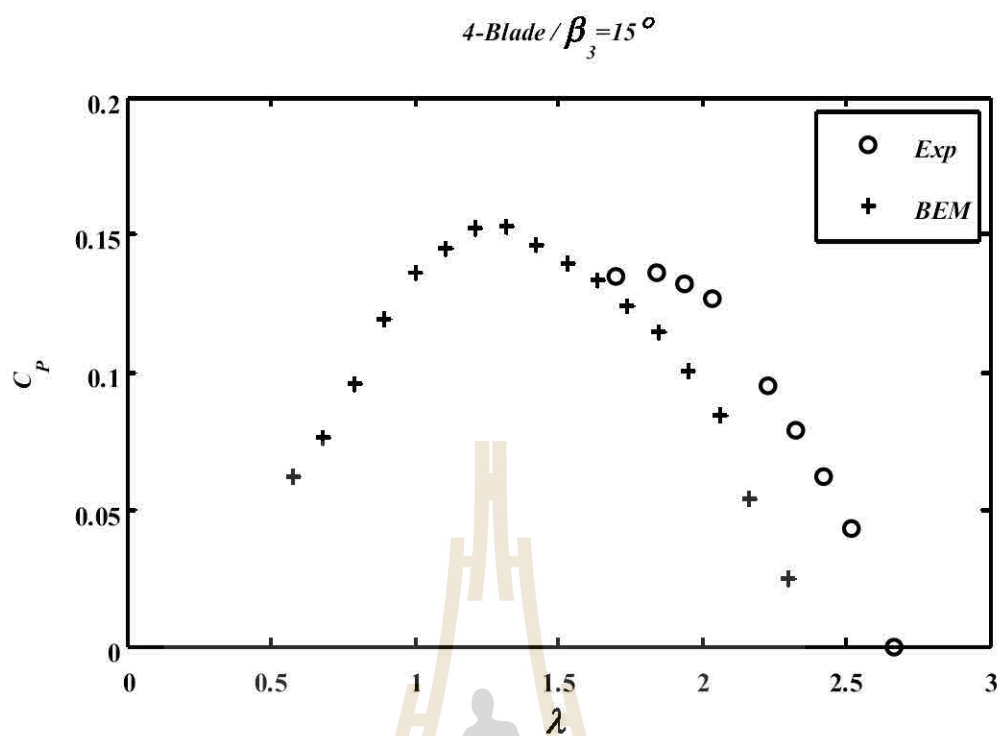
รูปที่ 7.33 ประสิทธิภาพหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ จากทฤษฎี BEM



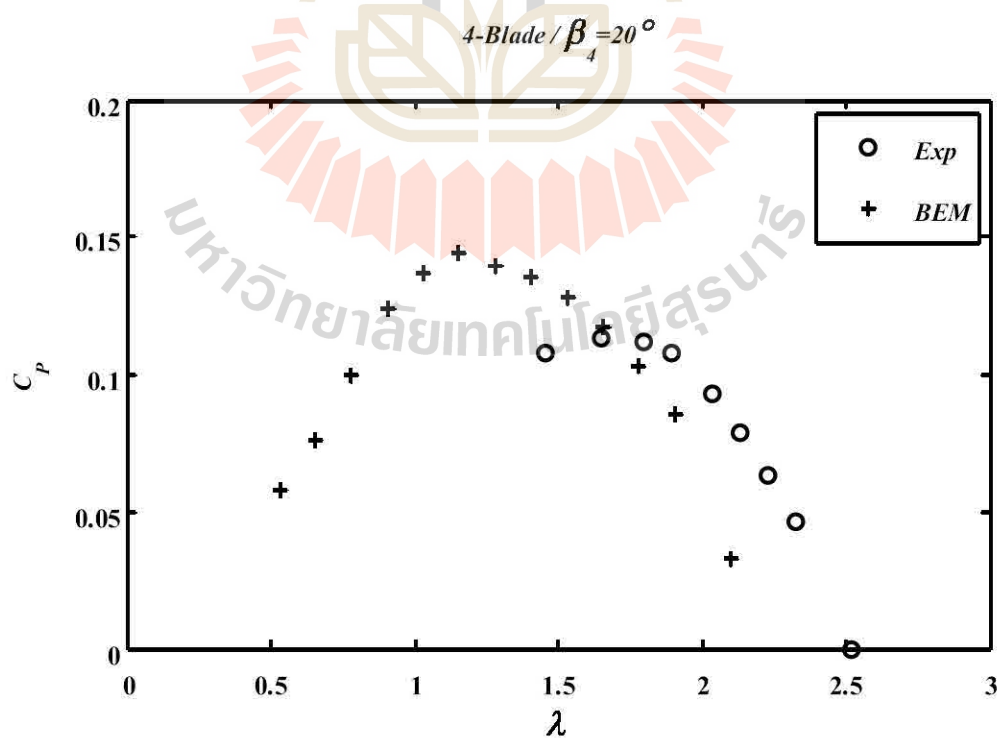
รูปที่ 7.34 ประสิทธิภาพหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ จากทฤษฎี BEM



รูปที่ 7.35 ประสิทธิภาพหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ จากทฤษฎี BEM



รูปที่ 7.36 ประสิทธิภาพหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$ จากทฤษฎี BEM



รูปที่ 7.37 ประสิทธิภาพหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ จากทฤษฎี BEM

7.7 สรุปผลการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุน

7.7.1 ประสิทธิภาพพลังงานระหว่างหุ่นจำลองแบบ Upwind และ Downwind

หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนที่ใช้โรเตอร์แบบ Upwind ให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดเท่ากับ 26% ($C_{P,max} = 0.26$) ในขณะที่หุ่นจำลองแบบ Downwind ให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดคือ 25% ($C_{P,max} = 0.25$) จะเห็นว่าต่ำกว่าหุ่นจำลองแบบ Upwind เล็กน้อย (ประมาณ 4%) แต่จะได้ประโยชน์มหาศาลจากการเป็น Passive yaw control โดยไม่ต้องมีแพนหาง (Tail-fin) อีกทั้งสามารถลดจำนวนเสาให้เหลือเพียงเสาเดียวทำให้ลดต้นทุนการติดตั้งได้ ดังนั้นโรเตอร์แบบ Downwind จึงน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่าแบบ Upwind ในกรณีกังหันลมเสื่อลำแพนขนาดเล็ก

7.7.2 การติดตั้ง Hub-fairing

พบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานได้เพียงเล็กน้อยเฉลี่ยประมาณ 2.5%

7.7.3 ผลของมุมพิชปลายใบและจำนวนใบ

- 1) กรณีหุ่นจำลองกังหันลมแบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบที่ดีที่สุดก็คือ $\beta_2 = 10^\circ$ โดยให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดเท่ากับ 25% ($C_{P,max} = 0.25$)
- 2) กรณีหุ่นจำลองกังหันลมแบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบที่ดีที่สุดก็คือ $\beta_1 = 5^\circ$ โดยให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดเท่ากับ 17% ($C_{P,max} = 0.17$)
- 3) กรณีหุ่นจำลองกังหันลมแบบ 3 ใบ มุมพิชปลายใบที่ดีที่สุดก็คือ $\beta_1 = 5^\circ$ โดยให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดเท่ากับ 13% ($C_{P,max} = 0.13$)

7.7.4 ผลของความตันใบ

ความตันใบ (Solidity) ของหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนที่ดีที่สุดคือ 28% โดยให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดในทุกกรณี

7.7.5 ผลของการปิดปลายใบ

- 1) กรณีหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบ 6 ใบ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดจากเดิม 25% ($C_{P,max} = 0.25$) เป็น 34% ($C_{P,max} = 0.34$) โดยเพิ่มขึ้นจากใบกังหันเดิมที่ไม่ได้ปิดปลายใบคิดเป็น 36.0%
- 2) กรณีหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบ 4 ใบ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดจากเดิม 17% ($C_{P,max} = 0.17$) เป็น 22% ($C_{P,max} = 0.22$) โดยเพิ่มขึ้นจากใบกังหันเดิมที่ไม่ได้ปิดปลายใบคิดเป็น 29.4%

7.7.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม BEM กับการทดลอง

ผลการประเมินด้วยทฤษฎี BEM มีความแม่นยำในช่วงปฏิบัติงานที่มีมุมปะทะต่ำหรือช่วงที่ยังไม่เกิดการ Stall โดยเฉพาะในกรณีหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ

บทที่ 8

การประเมินงานรายปี

8.1 กล่าวนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการประเมินงานรายปี (Annual energy production, AEP) ของหุ่นจำลองกังหันลมเลื้อยลำแพน จากบทที่ 7 ได้นำเสนอผลการทดลองกังหันลมเลื้อยลำแพนในรูปของกราฟสัมประสิทธิ์กำลังเทียบต่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบ (หรือ $C_P - \lambda$ curve) ซึ่งกราฟนี้บอกถึงประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมและจุดปฏิบัติงานที่ดีที่สุดเท่านั้นแต่ไม่อาจบอกถึงงานรายปีได้ ซึ่งแม้ว่าผลการทดลองของกังหันลมที่มีค่า $C_{P,max}$ สูงกว่าก็อาจจะไม่ได้หมายความว่าจะได้งานรายปีที่สูงกว่าเสมอไป แต่จะต้องพิจารณาความชันของเส้นกราฟใน $C_P - \lambda$ curve และสถิติลมด้วย โดยสถิติลมจะอยู่ในรูปของการแจกแจงความถี่ (Probability density function) ในทางทฤษฎีมีสมการการแจกแจงความถี่อยู่ 2 สมการที่นิยมใช้ประเมินสถิติลมคือฟังก์ชันเรเลย์ (Rayleigh function) และฟังก์ชันไวบูลล์ (Weibull function) (Manwell et al., 2009) ซึ่งทั้งสองสมการนี้จะต้องใช้ข้อมูลจากการวัดแล้วทำการแปลงค่าให้อยู่ในรูปสัมประสิทธิ์เพื่อให้ได้ลักษณะ (Shape) ของการแจกแจงความถี่ที่คล้ายคลึงกับข้อมูลการวัดจริง (Burton et al., 2011) เพื่อความสะดวกในการนำเสนอ เพราะการใช้ฟังก์ชันทั้งสองสามารถนำเสนอเพียงแค่ค่าสัมประสิทธิ์เท่านั้นไม่ต้องแสดงข้อมูลการวัดทั้งหมดที่มีจำนวนมาก สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้การแจกแจงความถี่ด้วยฟังก์ชันไวบูลล์ดัง ที่แสดงในสมการ 3.25 (ในบทที่ 3) ซึ่งเป็นการแจกแจงความถี่ความเร็วลมแบบยกกำลังหนึ่ง การประเมินงานรายปีสามารถพิจารณาได้ 2 ลักษณะ คือ 1) พิจารณาโดยใช้สถิติลมเดี่ยวเฉลี่ยรายปี การพิจารณาลักษณะนี้จะทำให้ได้งานรายปีออกมาโดยตรง 2) พิจารณาสถิติลมแบบแบ่งย่อยเฉลี่ยรายกลุ่มเดือน (หรือกลุ่มฤดูกาลก็ได้) การพิจารณาลักษณะนี้จะได้งานรายกลุ่มเดือนหรือรายฤดูกาล (Period work) ออกมาก่อนแล้วจึงนำมาบวกกันจึงจะได้งานรายปี วิกันดา ศรีเดช (2556) ได้วิเคราะห์เปรียบเทียบงานรายปีที่คำนวณโดยใช้วิธีการทั้ง 2 ลักษณะดังกล่าว พบว่างานรายปีที่ได้จากการพิจารณาสถิติลมแบบแบ่งย่อยเฉลี่ยรายกลุ่มเดือนจะให้ผลลัพธ์ (งานรายปี) ที่สูงกว่าการประเมินโดยใช้สถิติลมเดี่ยวเฉลี่ยรายปี (รวมถึงแม่นยำมากกว่าด้วย) เนื่องจากลมในประเทศไทยมีลักษณะเป็นลมมรสุม ซึ่งมีอยู่ 2 ทิศทางหลักคือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (ลมฝน) อยู่ในช่วงเดือนพฤษภาคม-ตุลาคม และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ลมหนาว) อยู่ในช่วงเดือนพฤศจิกายน-กุมภาพันธ์ ทั้ง 2 ช่วงเดือนนี้ต่างก็มีความเร็วลมที่ค่อนข้างสูงกว่าช่วงเดือนอื่น ๆ ดังนั้นการเฉลี่ยค่า

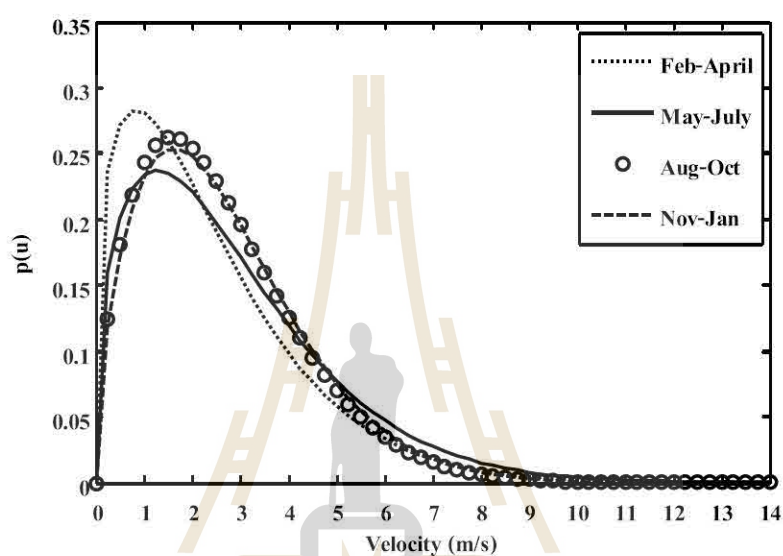
ความเร็วลมตลอดปีแบบยกกำลังหนึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้เพราะกำลังงานลม (Wind power) นั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วลมยกกำลังสาม ดังนั้นการพิจารณาสถิติลมแบบแบ่งย่อยเฉลี่ยรายกลุ่มเดือนหรือรายฤดูกาลจะให้ค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับสถิติลมจริงมากกว่าการใช้ค่าเฉลี่ยรายปี ดังนั้นจะเป็นการดีกว่าหากประเมินงานรายปีโดยการพิจารณาแบบแบ่งย่อยเฉลี่ยรายกลุ่มเดือนหรือรายฤดูกาล

8.2 การวิเคราะห์สถิติลมแบบความเร็วลมยกกำลังหนึ่ง

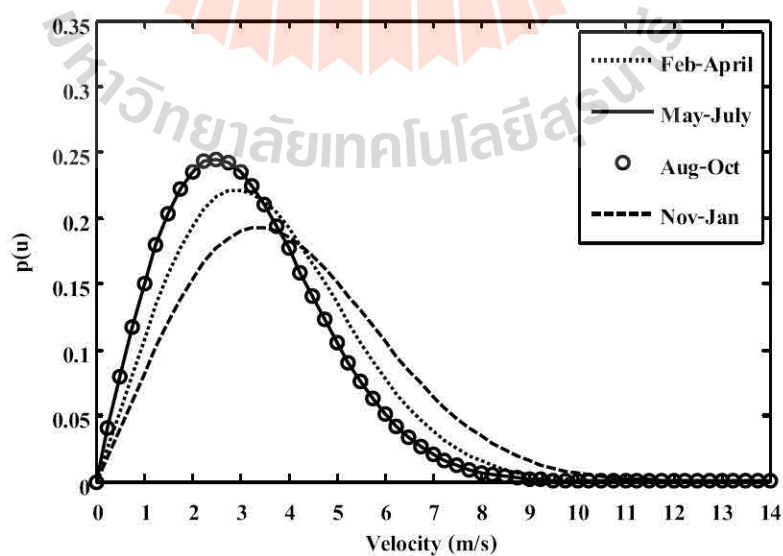
งานวิจัยนี้จะประเมินงานรายปี (AEP) โดยพิจารณาสถิติลมแบบแบ่งย่อยเฉลี่ยรายกลุ่มเดือน โดยใช้ฟังก์ชันไวบูลล์ (Weibull function) เป็นสมการแจกแจงความถี่ความเร็วลม (Probability density function, $p(U)$) Exell (1981) ได้เก็บข้อมูลสถิติลมทั่วทุกภูมิภาคในประเทศไทยที่ระยะความสูง 10 เมตร ซึ่งเป็นความสูงที่เหมาะสมเป็นอย่างดีในการนำมาใช้ประเมินงานรายปีของกังหันลมเลื้อยลำแพน เนื่องจากกังหันลมนี้มักจะติดตั้งอยู่ที่ระดับความสูงไม่เกิน 10 เมตร Exell (1981) ได้นำเสนอผลการแจกแจงความถี่ความเร็วลมโดยแบ่งออกเป็น 4 ช่วงของปีคือ ช่วงที่ 1 กุมภาพันธ์-เมษายน ช่วงที่ 2 พฤษภาคม-กรกฎาคม ช่วงที่ 3 สิงหาคม-ตุลาคม และช่วงที่ 4 พฤศจิกายน-มกราคม โดยแสดงผลด้วยค่าสัมประสิทธิ์ 2 ตัวคือ ค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (Shape parameter, k) และค่าพารามิเตอร์สเกล (Scale parameter, c) ของแต่ละจังหวัด งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้พื้นที่ 2 จังหวัดคือ จังหวัดนครราชสีมาและจังหวัดปราจีนบุรีเพื่อเป็นกรณีศึกษาในการประเมินงานรายปี ตารางที่ 8.1 แสดงค่า k และค่า c ของสมการไวบูลล์ที่ใช้ในการคำนวณสถิติลมของทั้งสองจังหวัด รูปที่ 8.1-8.2 แสดงผลการคำนวณการแจกแจงความถี่ความเร็วลมด้วยฟังก์ชันไวบูลล์โดยใช้ค่า k และค่า c ในตารางที่ 8.1 ผลที่ได้พบว่าจังหวัดนครราชสีมาให้ค่าความถี่ความเร็วลมสูงสุดค่อนข้างต่ำคืออยู่ในช่วงประมาณ 1.0-2.0 เมตร/วินาทีเท่านั้น โดยแต่ละกลุ่มเดือนไม่มีความแตกต่างกันมากนัก สำหรับจังหวัดปราจีนบุรีให้ค่าความถี่ความเร็วลมสูงสุดที่ค่อนข้างสูงกว่าคืออยู่ในช่วงประมาณ 2.0-4.0 เมตร/วินาที โดยช่วงเดือนพฤษภาคม-ตุลาคม (คือช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้) ให้ค่าความถี่ความเร็วลมสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 2.5 เมตร/วินาที และช่วงเดือนพฤศจิกายน-มกราคม (คือช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ) ให้ค่าความถี่ความเร็วลมสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3.5 เมตร/วินาที ดังนั้นจะเห็นว่าสถิติลมในจังหวัดปราจีนบุรีมีสถิติลมที่ดีกว่าจังหวัดนครราชสีมาพอสมควร ซึ่งจากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะเห็นว่าเป็นการวิเคราะห์ศักยภาพลมแบบความเร็วลมยกกำลังหนึ่งตรง ๆ แต่ว่าสำหรับงานด้านกังหันลมนั้นการประเมินศักยภาพลมแบบความเร็วลมยกกำลังหนึ่งจะทำให้ผิดพลาดอย่างมากเพราะกำลังงานลม (Wind power) เป็นสัดส่วนกับความเร็วลมยกกำลังสาม ดังนั้นการประเมินศักยภาพลมให้มีความถูกต้องอย่างแท้จริงจะต้องประเมินแบบความเร็วลมยกกำลังสาม

ตารางที่ 8.1 ตัวแปรค่า k และค่า c (Exell, 1981)

จังหวัด	ก.พ.-เม.ย.		พ.ค.-ก.ค.		ส.ค.-ต.ค.		พ.ย.-ม.ค.	
	k	c	k	c	k	c	k	c
นครราชสีมา	1.3	2.6	1.4	3.1	1.6	2.9	1.6	3.0
ปราจีนบุรี	2.1	4.0	2.0	3.5	2.0	3.5	2.1	4.6



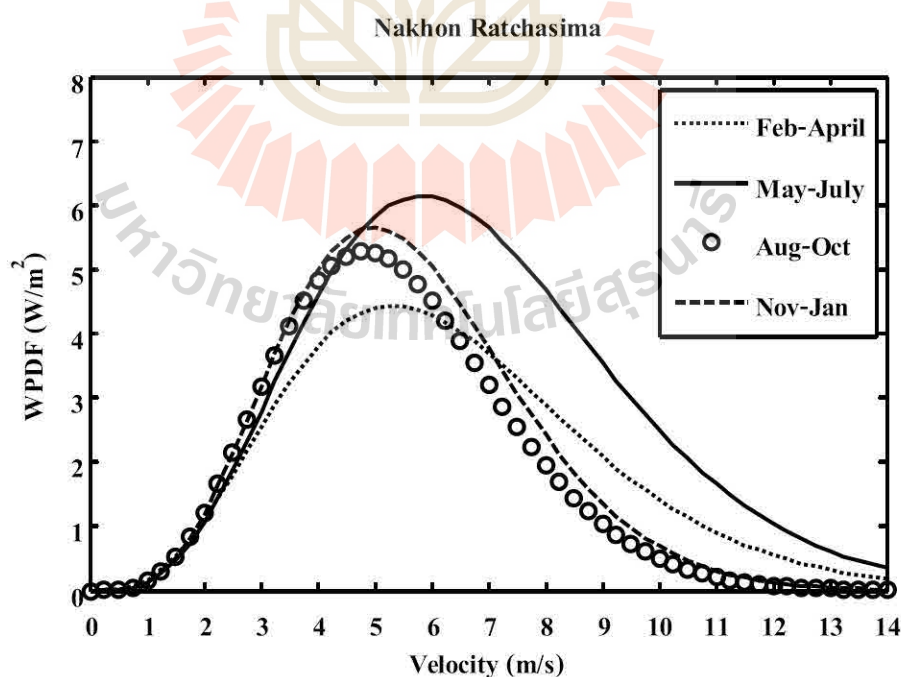
รูปที่ 8.1 ผลการแจกแจงความถี่ความเร็วลมแบบยกกำลังหนึ่งจังหวัดนครราชสีมา



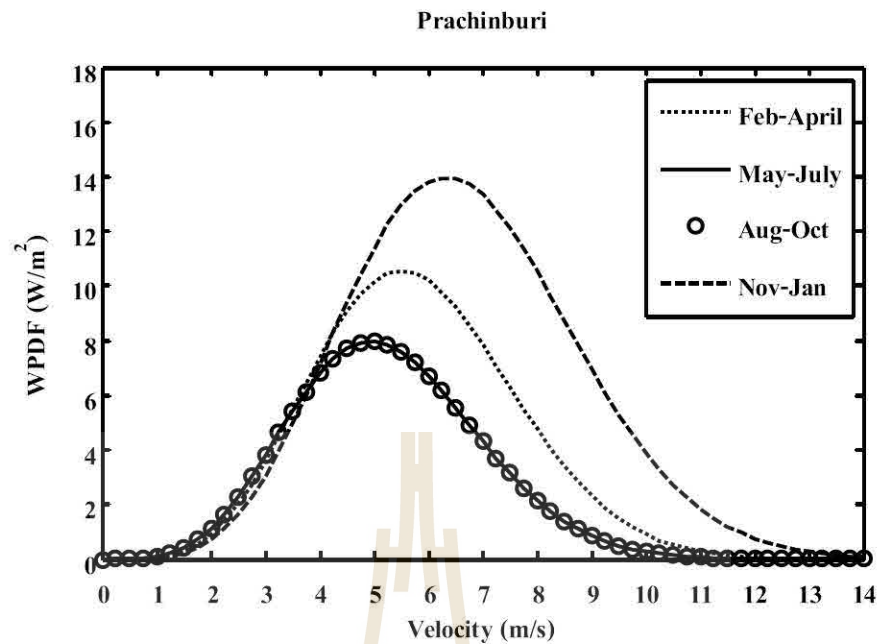
รูปที่ 8.2 ผลการแจกแจงความถี่ความเร็วลมแบบยกกำลังหนึ่งจังหวัดปราจีนบุรี

8.3 การวิเคราะห์สถิติลมแบบความเร็วมยกกำลังสาม

ในหัวข้อ 8.2 เป็นเพียงการพิจารณาสถิติลมแบบความเร็วมยกกำลังหนึ่งด้วยฟังก์ชันไวบูลล์ (Weibull function) แต่สำหรับการประเมินงานรายปีหรือแม้แต่การออกแบบกังหันลมนั้นจะต้องพิจารณาสถิติลมแบบความเร็วมยกกำลังสาม ดังนั้นจึงเสนอตัวแปรหนึ่งชื่อว่า “ความถี่ความหนาแน่นกำลังงานลม (Wind power density frequency, $WPDF$)” นิยามคือ กำลังงานลมที่เกิดจากความเร็วลมใด ๆ คูณกับความถี่ความเร็วลม (Probability density function, $p(U)$) นั้น ดังที่แสดงในสมการ 3.26 (ในบทที่ 3) จากรูปที่ 8.3-8.4 แสดงผลการแจกแจงค่า $WPDF$ ต่อหน่วยพื้นที่ของจังหวัดนครราชสีมาและจังหวัดปราจีนบุรี กราฟนี้จะทำให้ทราบถึงค่าความเร็วลมที่ให้กำลังงานสูงสุดในช่วงเดือนที่พิจารณา ซึ่งมักจะเบี่ยงไปทางซ้ายของกราฟที่แจกแจงแบบความเร็วมยกกำลังหนึ่งเสมอ ยกตัวอย่างเช่นในรูปที่ 8.2 หากพิจารณาในช่วงเดือนพฤศจิกายน-มกราคม (Nov-Jan) ซึ่งเป็นช่วงลมหนาวของจังหวัดปราจีนบุรี (พิจารณาแบบความเร็วมยกกำลังหนึ่ง) พบว่าความถี่สูงสุดอยู่ที่ความเร็วลมประมาณ 3.5 เมตร/วินาที แต่เมื่อพิจารณาสถิติลมแบบความเร็วมยกกำลังสามดังรูปที่ 8.4 พบว่าความเร็วลมที่ให้กำลังงานสูงสุด ($WPDF_{max}$) ในช่วงเดือนนี้ก็คือ 6.5 เมตร/วินาที จะเห็นว่าค่าจะเบี่ยงมาทางซ้ายจากกราฟที่แจกแจงแบบความเร็วมยกกำลังหนึ่ง ซึ่งค่าความเร็วลมนี้เรียกว่า “ความเร็วลมออกแบบ (Design wind velocity)” ที่ใช้ในการออกแบบกังหันลม



รูปที่ 8.3 ผลการแจกแจงความถี่ความเร็วลมแบบยกกำลังสามจังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 8.4 ผลการแจกแจงความถี่ความเร็วลมแบบยกกำลังสามจังหวัดปราจีนบุรี

8.4 การประเมินงานรายปี

งานรายปี (AEP) เป็นค่าสำคัญที่บ่งบอกถึงปริมาณงานสุทธิ (Net work) ที่จะได้รับภายใน 1 ปี ของกังหันลมที่ปฏิบัติงานอยู่ ณ พื้นที่ใด ๆ ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) (หรือประสิทธิภาพพลังงาน) ของกังหันลมและสถิติลมของพื้นที่การใช้งานนั้น จากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังของหุ่นจำลองกังหันลมสี่ลำแพนซึ่งแสดงผลอยู่ในรูปกราฟ $C_p - \lambda$ curve ที่ได้ในบทที่ 7 จะทำให้ทราบถึงค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ดีที่สุด (λ_{opt}) ที่กังหันลมควรปฏิบัติการ ณ จุด ๆ นั้น รวมถึงค่าความเร็วลมออกแบบ (U_{dsg}) ที่สามารถทราบได้จากการวิเคราะห์สถิติลมแบบความเร็วยกกำลังสาม (ก็คือค่าความเร็วลมที่ทำให้ได้ $WPDF_{max}$) ดังนั้นจุดปฏิบัติงานหรือความเร็วรอบของกังหันลมที่ดีที่สุดจะสามารถทราบได้จากสมการที่ 8.1

$$\Omega_{dsg} = \frac{U_{dsg} \cdot \lambda_{opt}}{R} \quad (8.1)$$

โดยที่ Ω_{dsg} คือความเร็วรอบที่ดีที่สุดหรือความเร็วรอบออกแบบ (Design rotor speed) ในขณะที่ U_{dsg} คือความเร็วลมออกแบบ λ_{opt} คืออัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ดีที่สุดซึ่งได้จากกราฟ $C_p - \lambda$ curve และ R คือรัศมีโรเตอร์

โดยปกติแล้วกังหันลมเสื่อลำแพนจะปฏิบัติงานแบบ Variable speed แต่สำหรับการประเมินงานรายปีในบทนี้จะพิจารณาว่ากังหันลมเสื่อลำแพนจะปฏิบัติงานภายใต้ความเร็วรอบคงที่ (Constant speed) กล่าวคือ จะปฏิบัติงานที่ความเร็วรอบที่ดีที่สุด Ω_{dsg} ตลอดเวลา ดังนั้นเมื่อความเร็วลมที่เข้าสู่ตัวกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลงไป ค่าความเร็วรอบจะยังคงที่อยู่ได้ แต่ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio, λ) จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วลมดังสมการที่ 8.2

$$\lambda = \frac{\Omega_{dsg} R}{U_0} \quad (8.2)$$

โดยที่ U_0 คือความเร็วลมใด ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาของสถิติลม สำหรับการประเมินงานรายปี จำเป็นต้องทราบค่ากำลังงานของกังหันลมที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งสามารถคำนวณหาได้โดยสมการที่ 8.3

$$P_{tur} = C_P \cdot \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U_0^3 \quad (8.3)$$

โดยที่ P_{tur} คือ กำลังงานกังหันลม (Wind turbine power) และ C_P คือสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient) ซึ่งได้จากการทดลอง ดังนั้นงานรายกลุ่มเดือน (Period work) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8.4

$$W_P = H \int p(U) \cdot P_{tur} du \quad (8.4)$$

โดยที่ W_P คืองานรายกลุ่มเดือน (Period work) H คือจำนวนชั่วโมงของแต่ละกลุ่มเดือน และ $p(U)$ คือความถี่ความเร็วลม (Probability density function) ดังนั้นงานรายปีก็คือผลรวมของงานรายกลุ่มเดือนนั่นเอง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 8.5

$$AEP = \sum_{i=1}^n W_{P,i} \quad (8.5)$$

โดยที่ AEP คืองานรายปี (Annual energy production) $W_{P,i}$ คืองานรายกลุ่มเดือนกลุ่มที่ i และ n คือจำนวนกลุ่มเดือนทั้งหมดที่แบ่งในระยะเวลา 1 ปี

8.5 ผลการประเมินงานรายปี

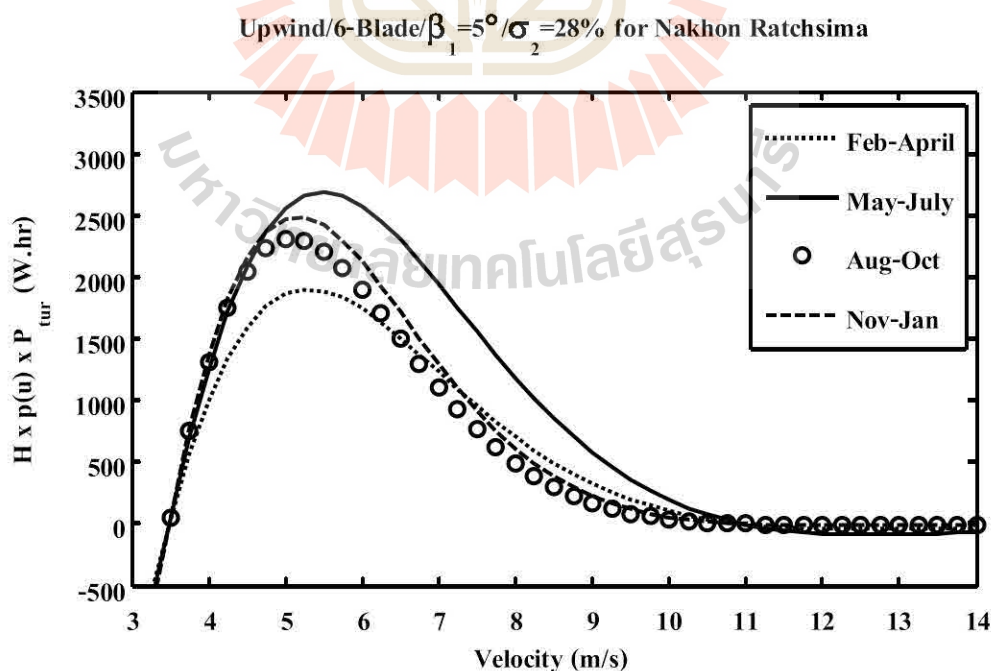
จากสมการที่ 8.4 ถ้าหากทำการพล็อตกราฟโดยกำหนดให้แกน y คือ $H \times p(U) \times P_{tur}$ และให้แกน x คือ ความเร็วลม U (หรือ U_0) ใด ๆ ที่เข้าสู่กังหันลม จะเห็นว่าค่า W_p ก็คือพื้นที่ใต้กราฟนั่นเอง ดังนั้นการนำเสนอผลลัพธ์ค่า W_p ในบทที่ 8 นี้ จะทำการนำเสนอในรูปแบบกราฟ $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ รวมถึงการอินทิเกรตหรือการหาพื้นที่ใต้กราฟแล้วนำเสนอในรูปแบบกราฟแท่งและตาราง การนำเสนอผลการประเมินงานรายปีในหัวข้อนี้จะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 ส่วน คือ 1) งานรายปีหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (Upwind-TSW) 2) งานรายปีหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ (Downwind-TSW) 3) งานรายปีหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ที่ทำการปิดปลายใบ (Downwind-TSW-Closed tip)

8.5.1 งานรายปีหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (Upwind-TSW)

หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิมก็คือ มีใบกังหันจำนวน 6 ใบ มีความตันใบเท่ากับ 28% และ โรเตอร์วางตัวแบบ Upwind มีจำนวนเสา 2 เสา ซึ่งได้ทำการทดลองไว้แล้วโดยเสนออยู่ในรูป C_p -curve โดยทดลองที่มุมพิชปลายใบ 4 ค่าประกอบด้วย 5, 10, 15, และ 20 องศา

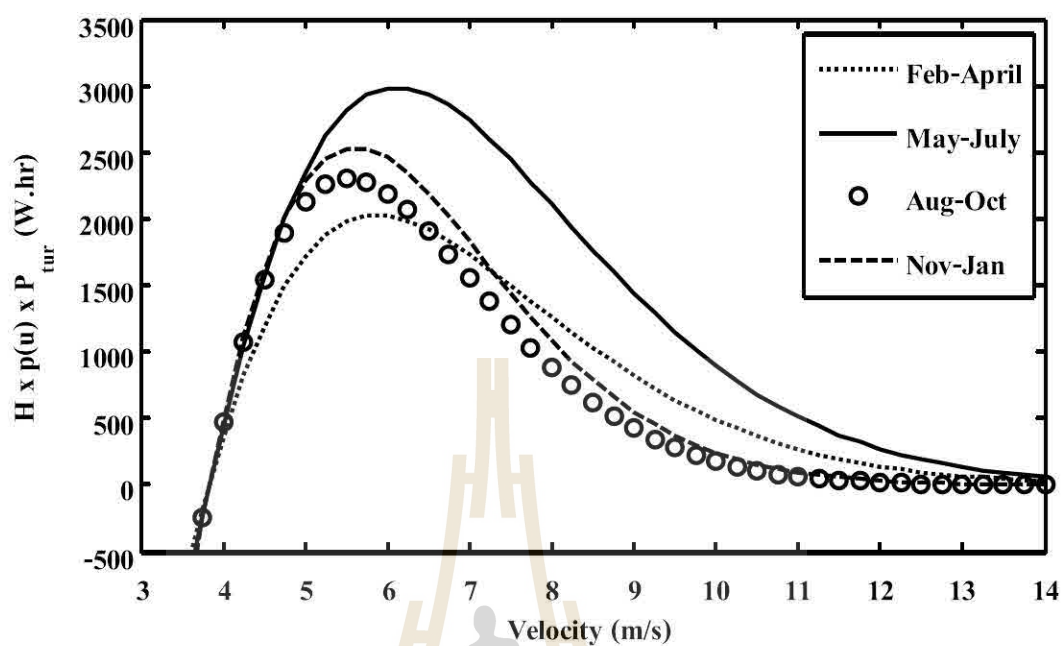
1) ผลการประเมินโดยใช้สถิติลมจังหวัดนครราชสีมา

งานรายกลุ่มเดือนหุ่นจำลองกังหันลมที่มุมพิชปลายใบ 4 ค่าแสดงอยู่ในรูปของกราฟ $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ ดังรูปที่ 8.5-8.8 และแสดงแบบสรุปอยู่ในรูปกราฟแท่งดังรูปที่ 8.9



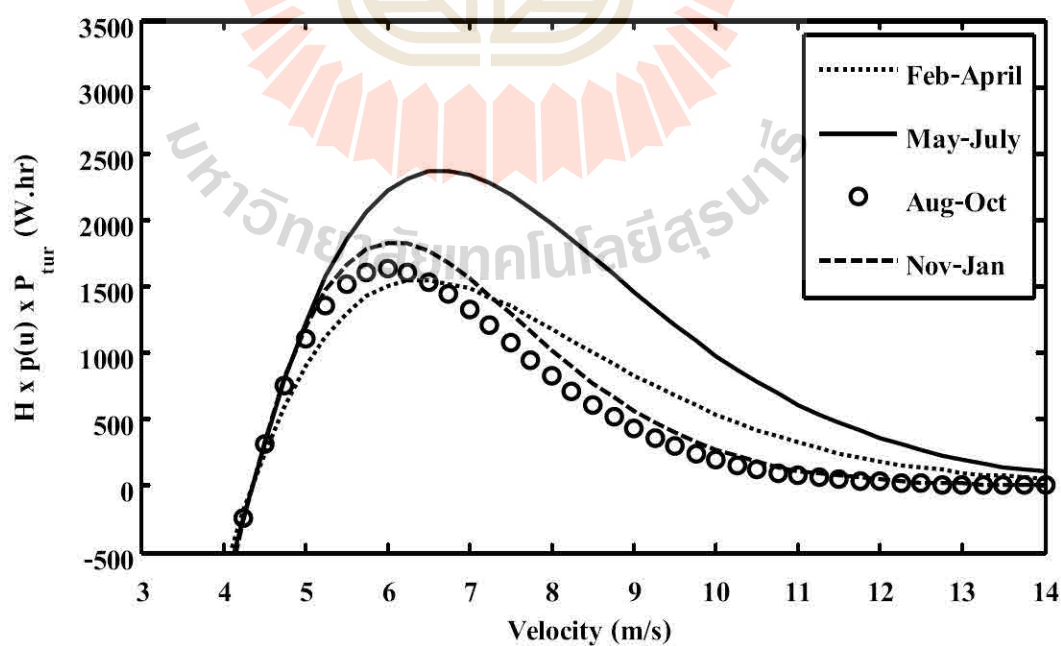
รูปที่ 8.5 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดนครราชสีมา

Upwind/6-Blade/ $\beta_2=10^\circ/\sigma_2=28\%$ for Nakhon Ratchasima

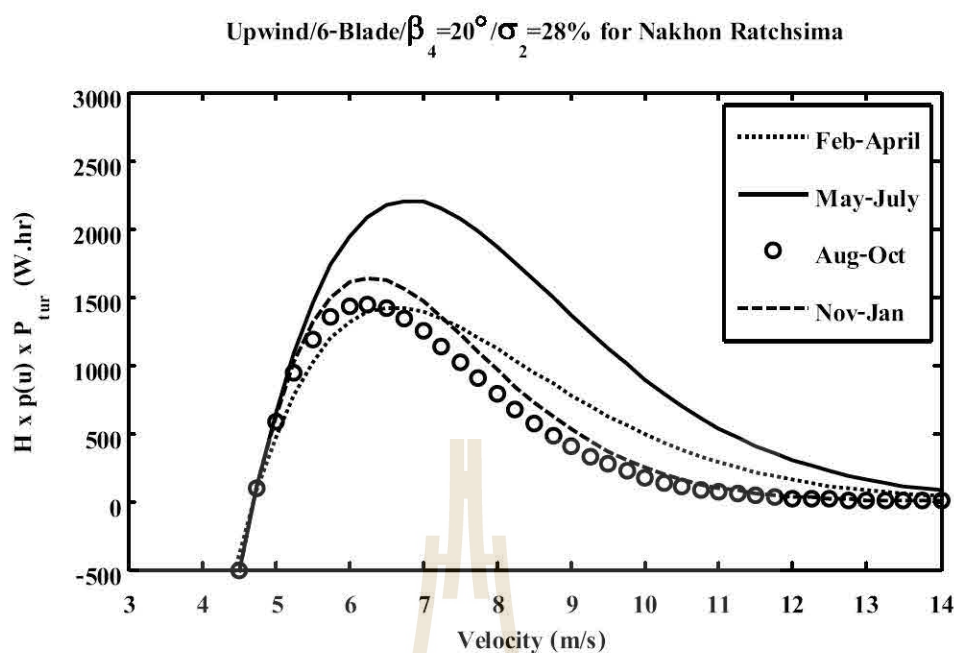


รูปที่ 8.6 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดนครราชสีมา

Upwind/6-Blade/ $\beta_3=15^\circ/\sigma_2=28\%$ for Nakhon Ratchasima

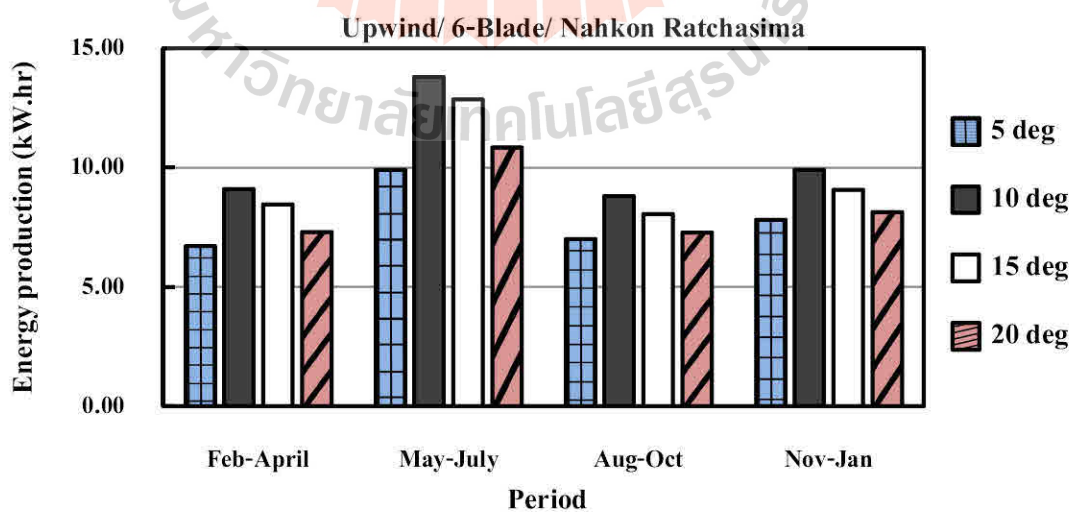


รูปที่ 8.7 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 15 องศา จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 8.8 Upwind-TSW มุมพิกชปลายใบ 20 องศา จังหวัดนครราชสีมา

จากการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 8.5-8.8 จะทำให้ได้งานรายกลุ่มเดือน (W_p) ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 8.9 จะเห็นว่าในช่วงเดือน พ.ค.-ก.ค. (May-July) ซึ่งเป็นช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (ลมฝน) จะให้ W_p สูงสุด และจากตารางที่ 8.2 จะเห็นว่ามุมพิกชปลายใบ 10 องศา ให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 41.59 kWhr



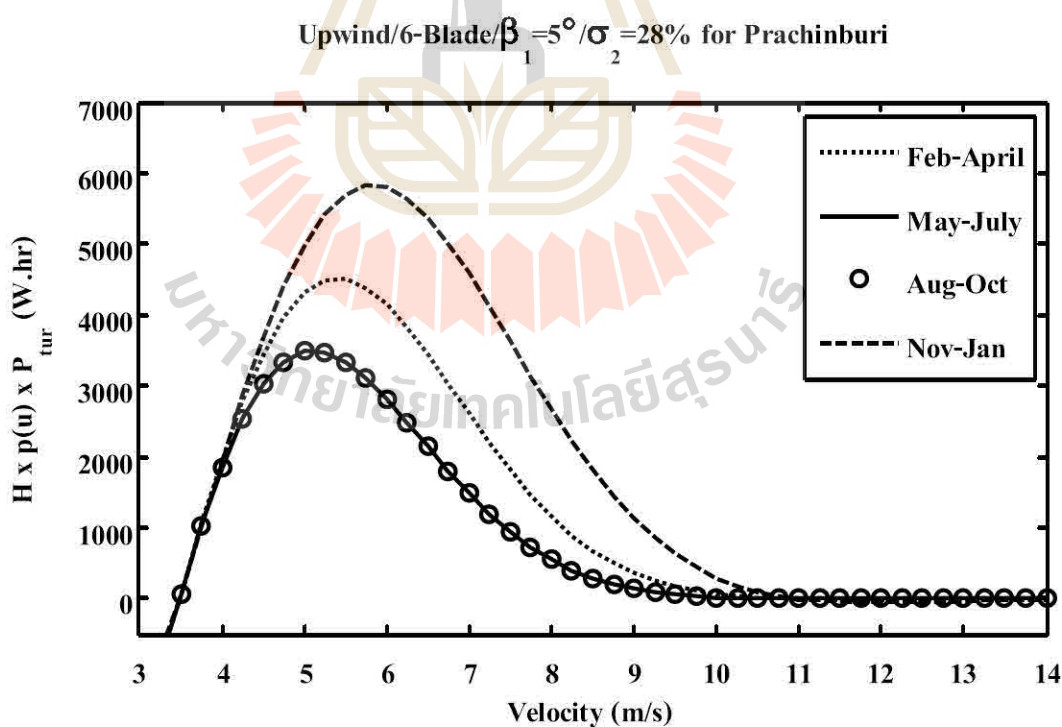
รูปที่ 8.9 งานรายกลุ่มเดือน Upwind-TSW จังหวัดนครราชสีมา

ตารางที่ 8.2 W_p และ AEP ของ Upwind-TSW จังหวัดนครราชสีมา

กลุ่มเดือน	Period work (W_p) และ AEP			
	$\beta_1 = 5^\circ$ (kW.hr)	$\beta_2 = 10^\circ$ (kW.hr)	$\beta_3 = 15^\circ$ (kW.hr)	$\beta_4 = 20^\circ$ (kW.hr)
Feb-April	6.71	9.10	8.45	7.30
May-July	9.92	13.78	12.84	10.84
Aug-Oct	7.02	8.80	8.06	7.28
Nov-Jan	7.82	9.91	9.07	8.14
AEP	31.47	41.59	38.42	33.56

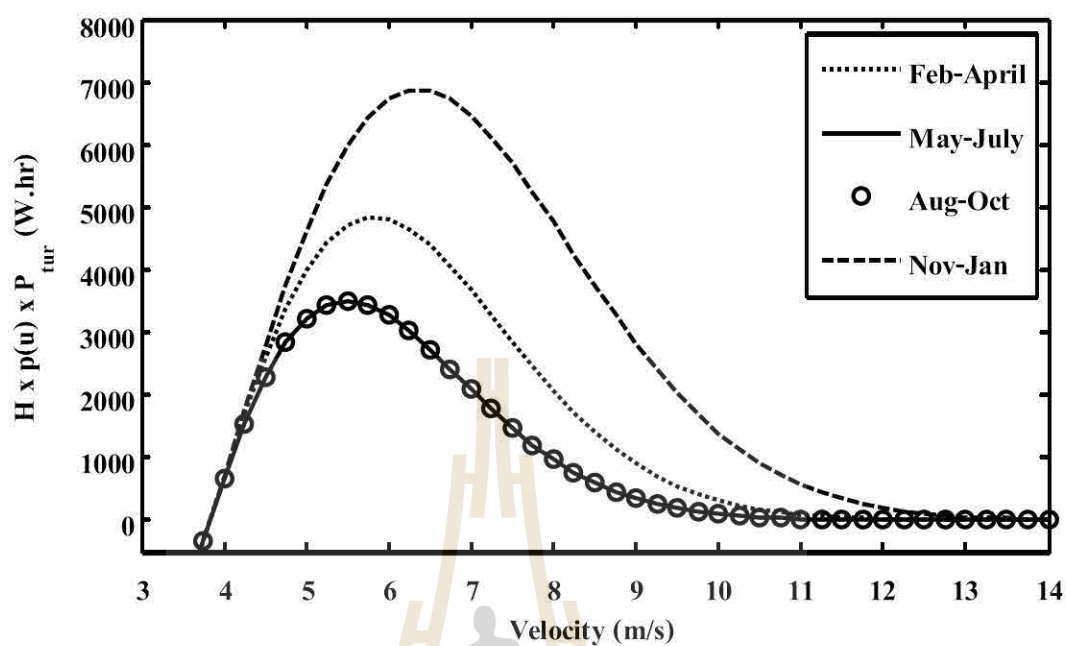
2) ผลการประเมินโดยใช้สถิติลมจังหวัดปราจีนบุรี

งานรายกลุ่มเดือนหั่นจำลองกังหันลมที่มุมพิชปลายใบ 4 ค่า แสดงอยู่ในรูปของกราฟ $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ ดังรูปที่ 8.10-8.13 และแสดงแบบสรุปอยู่ในรูปกราฟแท่งดังรูปที่ 8.14



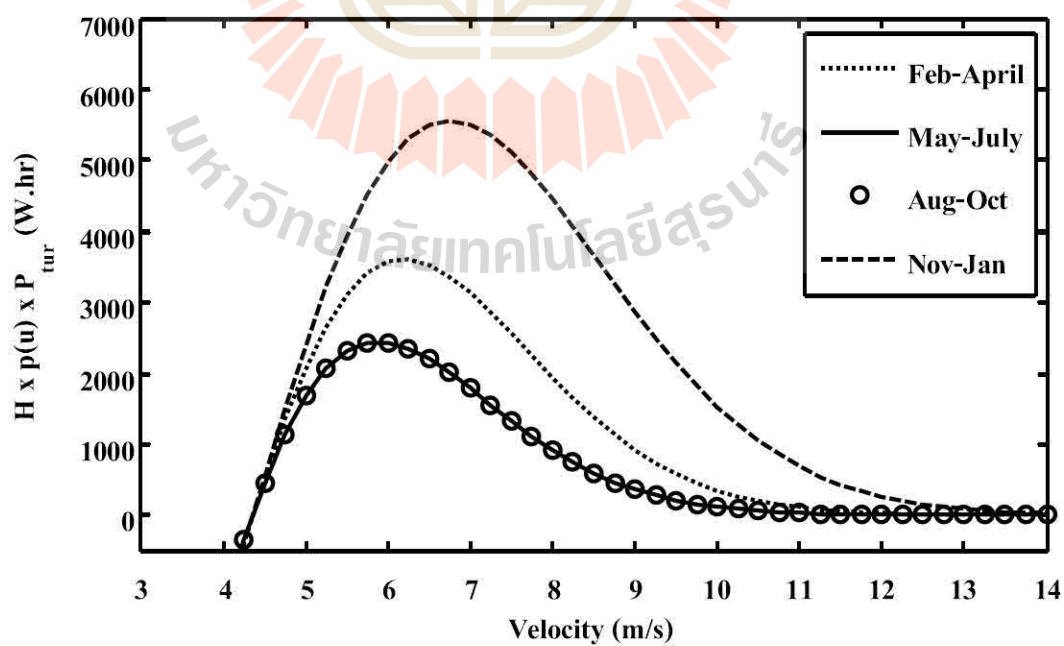
รูปที่ 8.10 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

Upwind/6-Blade/ $\beta_2=10^\circ/\sigma_2=28\%$ for Prachinburi



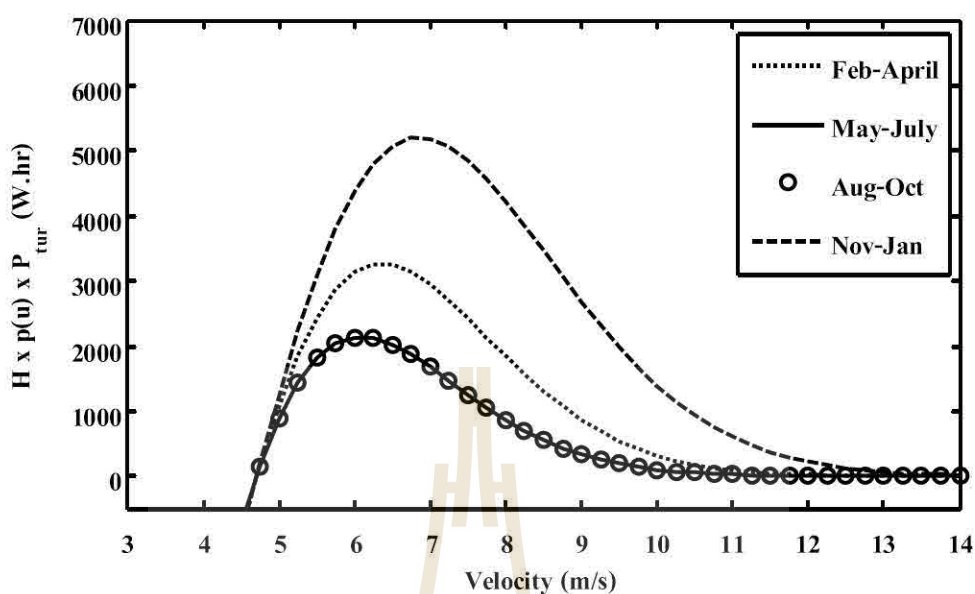
รูปที่ 8.11 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

Upwind/6-Blade/ $\beta_3=15^\circ/\sigma_2=28\%$ for Prachinburi



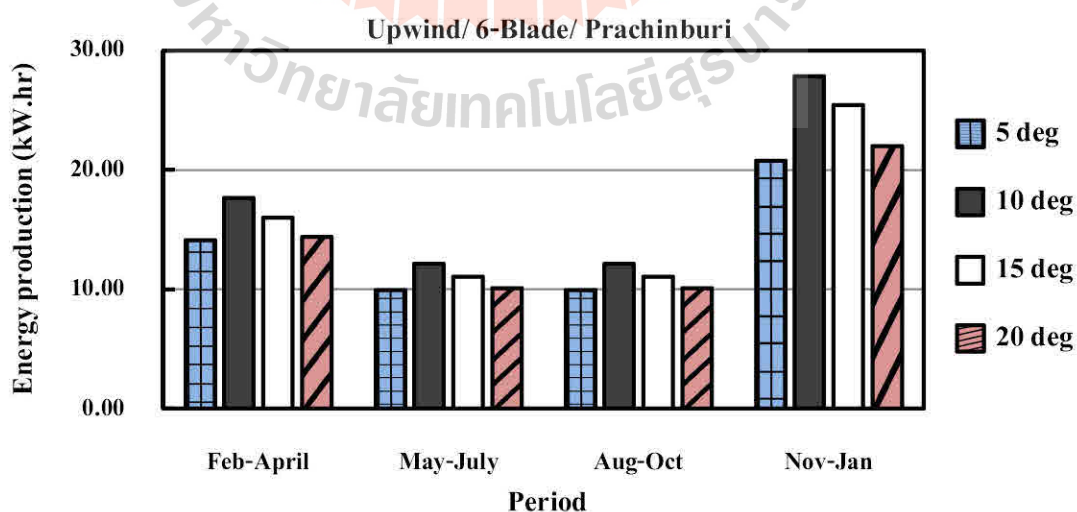
รูปที่ 8.12 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 15 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

Upwind/6-Blade/ $\beta_4=20^\circ/\sigma_2=28\%$ for Prachinburi



รูปที่ 8.13 Upwind-TSW มุมพิชปลายใบ 20 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

จากการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 8.10-8.13 จะทำให้ได้งานรายกลุ่มเดือน (W_p) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8.14 จะเห็นว่าในช่วงเดือน พ.ย.-ม.ค. (Nov-Jan) ซึ่งเป็นช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ลมหนาว) จะให้ W_p สูงสุด และจากตารางที่ 8.3 จะเห็นว่าที่มุมพิชปลายใบ 10 องศาให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 69.80 kW.hr ซึ่งสูงกว่าจังหวัดนครราชสีมาพอสมควร



รูปที่ 8.14 งานรายกลุ่มเดือน Upwind-TSW จังหวัดปราจีนบุรี

ตารางที่ 8.3 W_p และ AEP ของ Upwind-TSW จังหวัดปราจีนบุรี

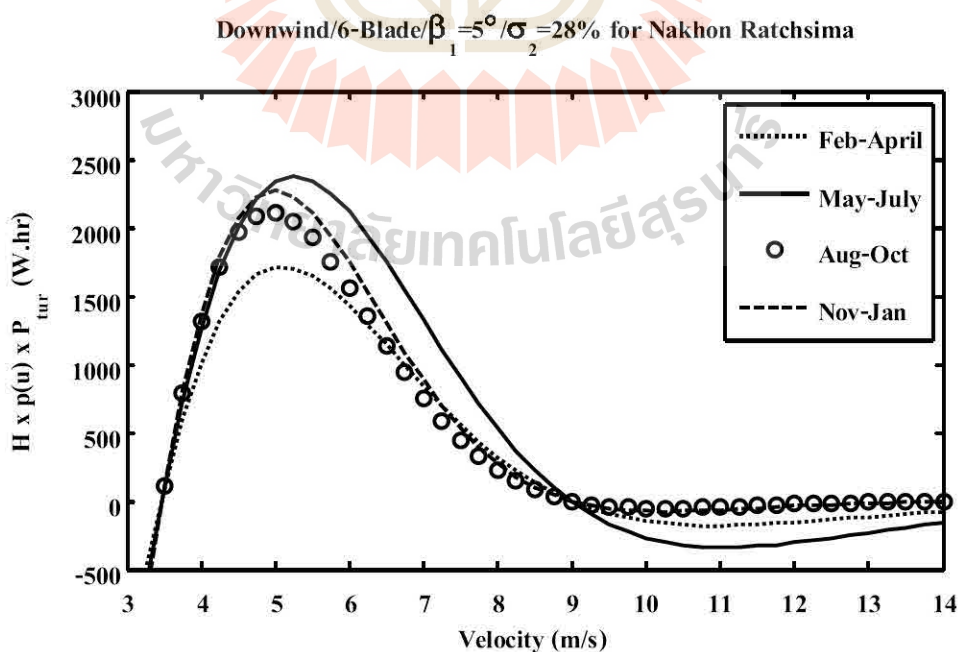
กลุ่มเดือน	Period work (W_p) และ AEP			
	$\beta_1 = 5^\circ$ (kW.hr)	$\beta_2 = 10^\circ$ (kW.hr)	$\beta_3 = 15^\circ$ (kW.hr)	$\beta_4 = 20^\circ$ (kW.hr)
Feb-April	14.12	17.67	16.00	14.38
May-July	9.94	12.15	11.03	10.10
Aug-Oct	9.94	12.15	11.03	10.10
Nov-Jan	20.78	27.83	25.44	22.00
AEP	54.78	69.80	63.50	56.58

8.5.2 งานรายปีหุ่นจำลองกังหันลมเพื่อสำเนาแบบใหม่ (Downwind-TSW)

ในหัวข้อนี้ได้เลือกนำเสนอเฉพาะกรณีหุ่นจำลองแบบ 6 ใบและ 4 ใบ ที่ความดันใบ 28% และมุมพิชปลายใบ 4 ค่าคือ 5, 10, 15, และ 20 องศา เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงข้อมูลที่มากเกินไป

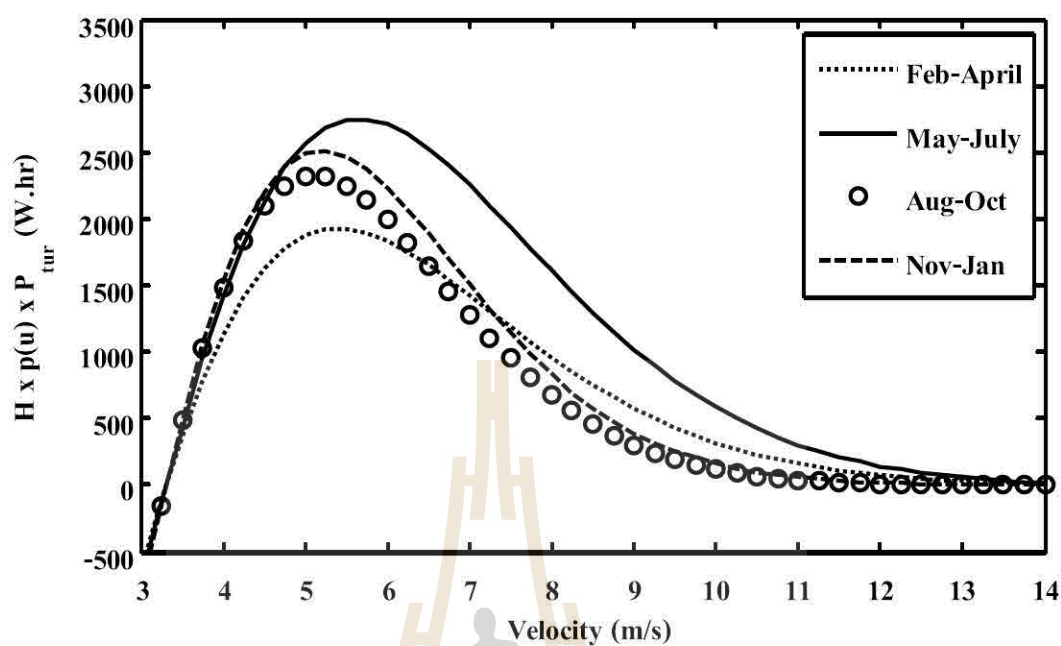
1) ผลการประเมินโดยใช้สถิติลมจังหวัดนครราชสีมา

1.1 แบบ 6 ใบ จะแสดงผลอยู่ในรูปของกราฟ $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ ดังรูปที่ 8.15-8.18 และแสดงผลการอินทิเกรตเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบดังรูปที่ 8.19 และตารางที่ 8.4



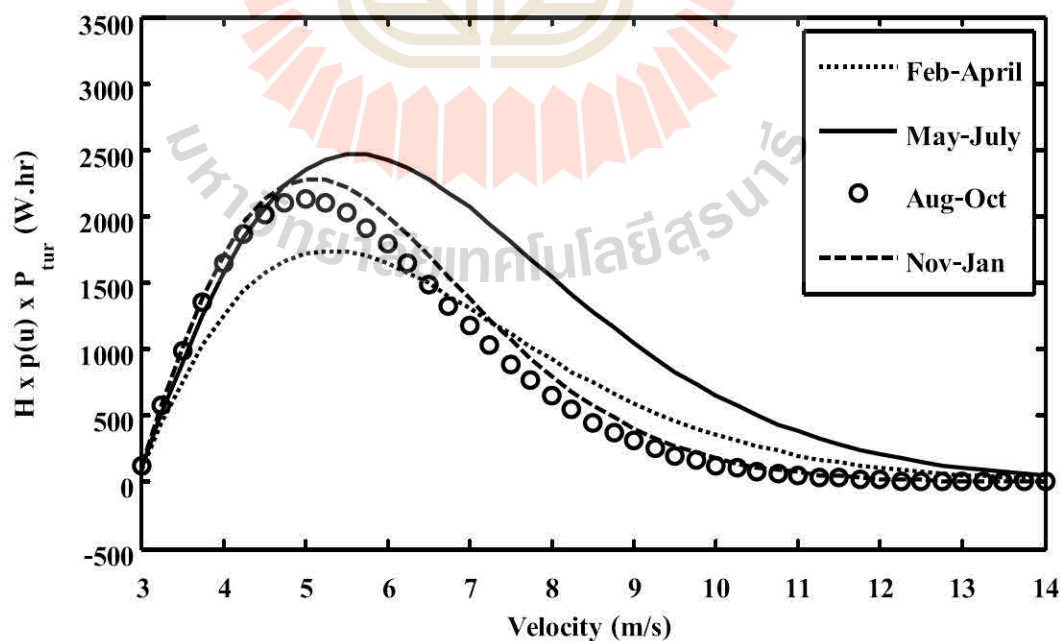
รูปที่ 8.15 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดนครราชสีมา

Downwind/6-Blade/ $\beta_2 = 10^\circ / \sigma_2 = 28\%$ for Nakhon Ratchasima

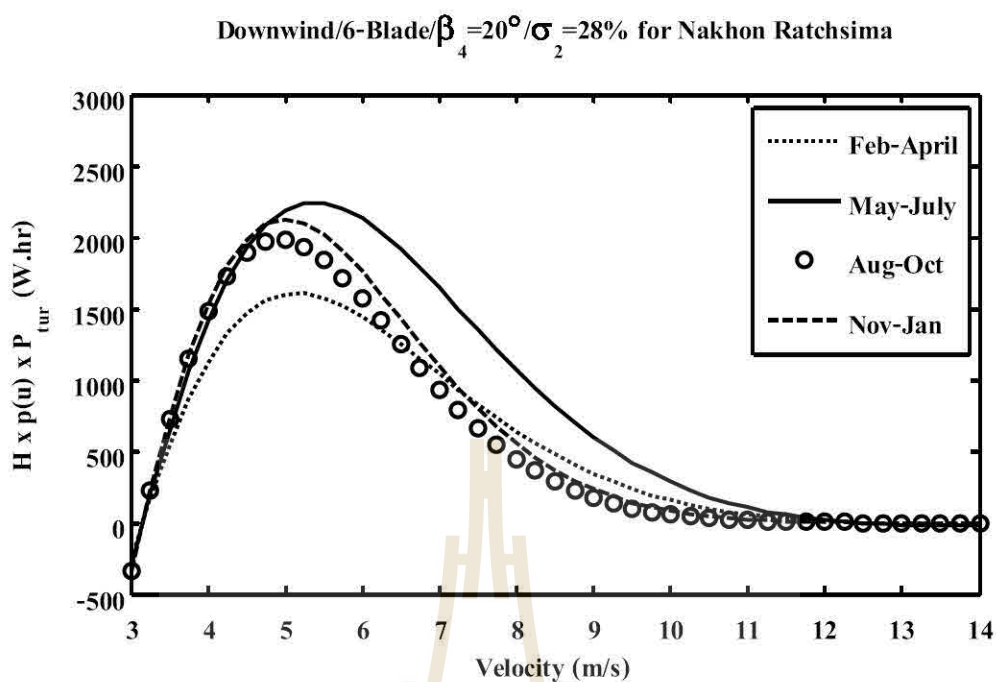


รูปที่ 8.16 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดนครราชสีมา

Downwind/6-Blade/ $\beta_3 = 15^\circ / \sigma_2 = 28\%$ for Nakhon Ratchasima

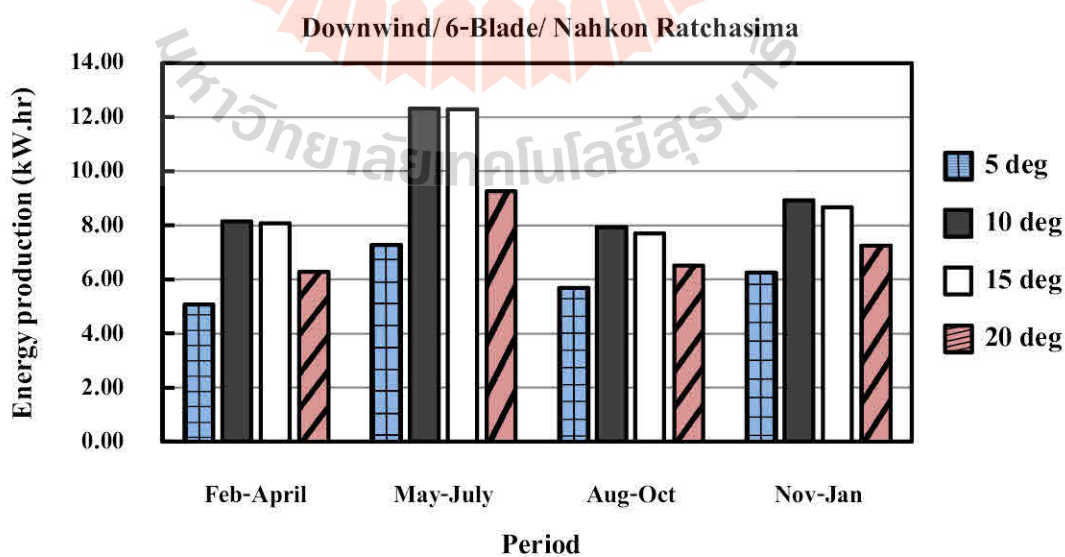


รูปที่ 8.17 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 15 องศา จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 8.18 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 20 องศา จังหวัดนครราชสีมา

จากการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 8.15-8.18 จะทำให้ได้งานรายกลุ่มเดือน (W_p) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8.19 และจากตารางที่ 8.4 จะเห็นว่าที่มุมพิชปลายใบ 10 องศาให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 37.34 kWhr



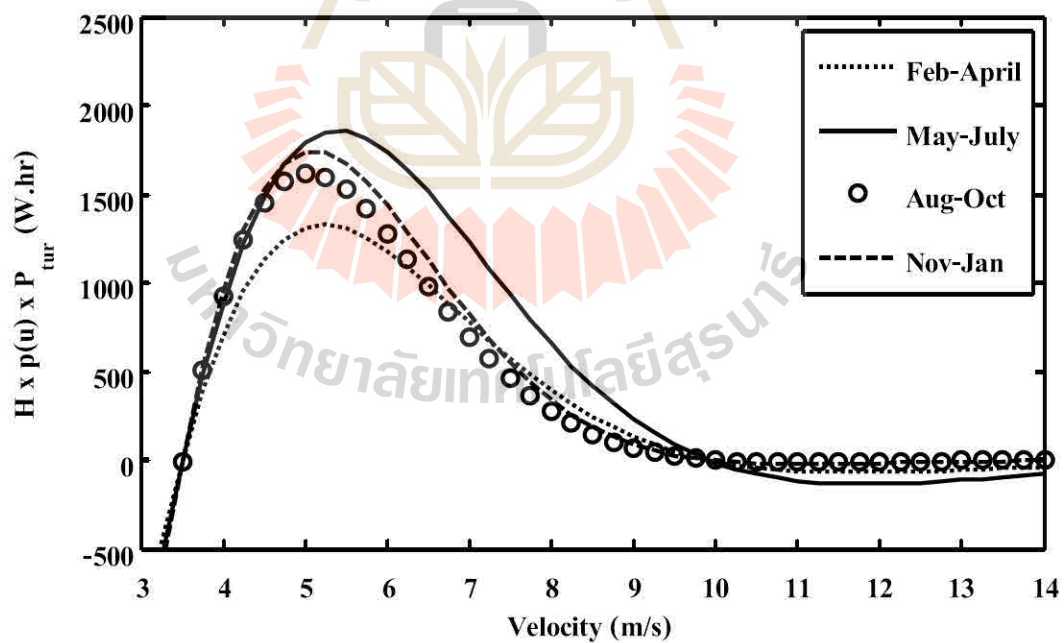
รูปที่ 8.19 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW แบบ 6 ใบ จังหวัดนครราชสีมา

ตารางที่ 8.4 W_p และ AEP ของ Downwind-TSW แบบ 6 ใบ จังหวัดนครราชสีมา

กลุ่มเดือน	Period work (W_p) และ AEP			
	$\beta_1 = 5^\circ$ (kW.hr)	$\beta_2 = 10^\circ$ (kW.hr)	$\beta_3 = 15^\circ$ (kW.hr)	$\beta_4 = 20^\circ$ (kW.hr)
Feb-April	5.09	8.15	8.09	6.30
May-July	7.30	12.31	12.30	9.27
Aug-Oct	5.70	7.94	7.70	6.54
Nov-Jan	6.26	8.93	8.67	7.27
<i>AEP</i>	24.36	37.34	36.76	29.38

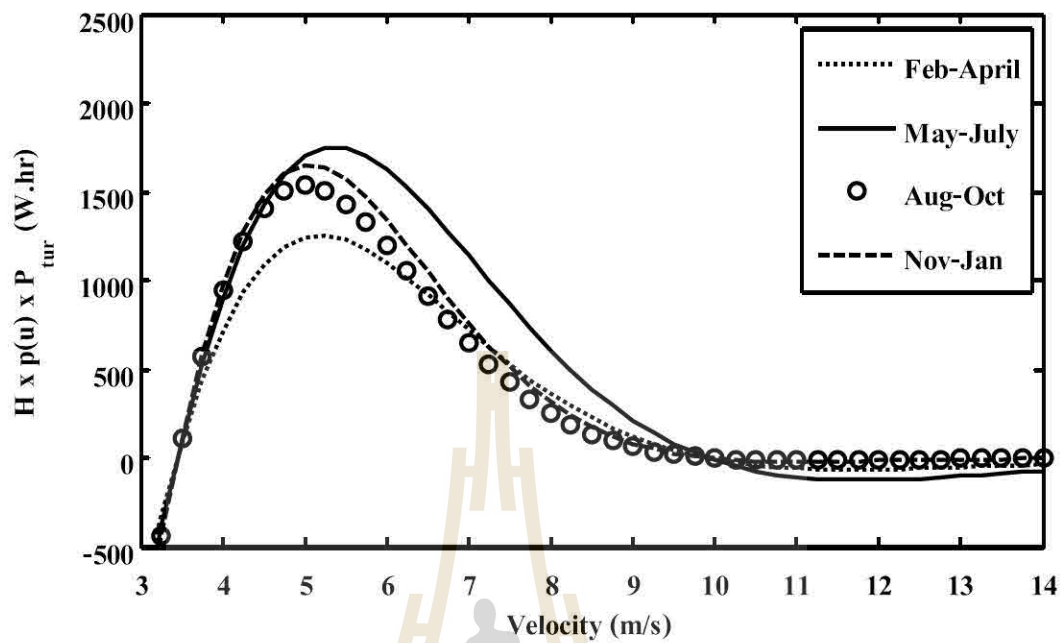
1.2 แบบ 4 ใบ จะแสดงผลอยู่ในรูปของกราฟ $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ ดังรูปที่ 8.20-8.23 และแสดงผลการอินทิเกรตเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบดังรูปที่ 8.24 และตารางที่ 8.5

Downwind/4-Blade/ $\beta_1 = 5^\circ / \sigma_2 = 28\%$ for Nakhon Ratchasima



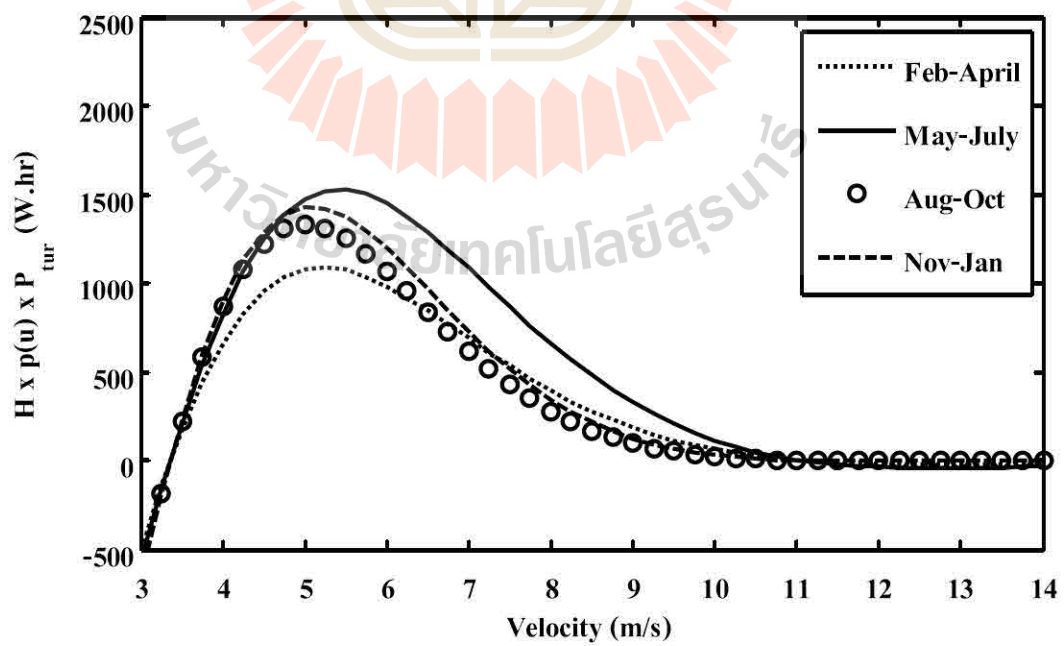
รูปที่ 8.20 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดนครราชสีมา

Downwind/4-Blade/ $\beta_2 = 10^\circ / \sigma_2 = 28\%$ for Nakhon Ratchasima

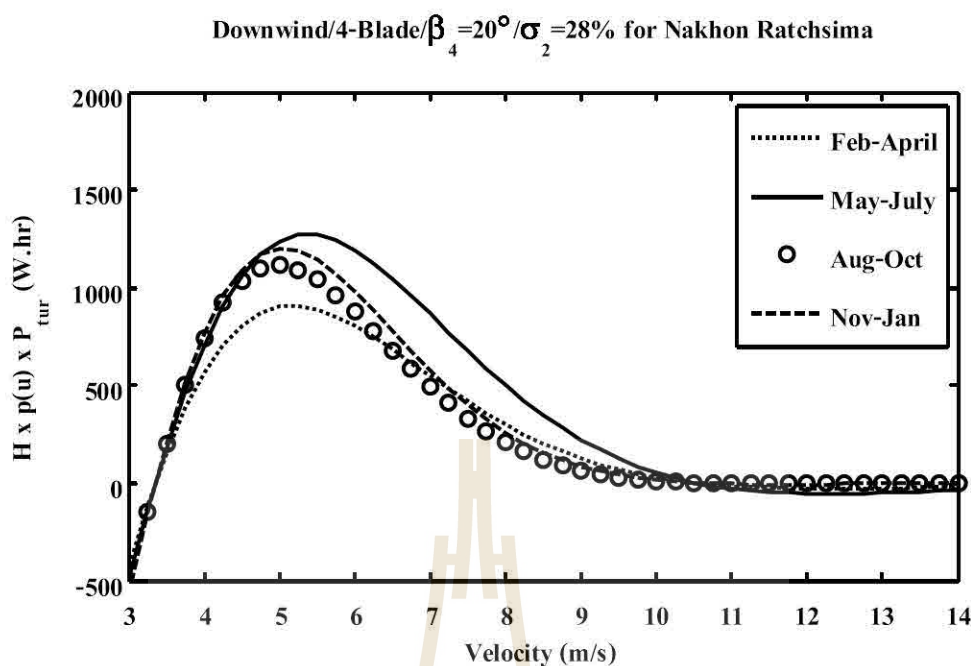


รูปที่ 8.21 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดนครราชสีมา

Downwind/4-Blade/ $\beta_3 = 15^\circ / \sigma_2 = 28\%$ for Nakhon Ratchasima

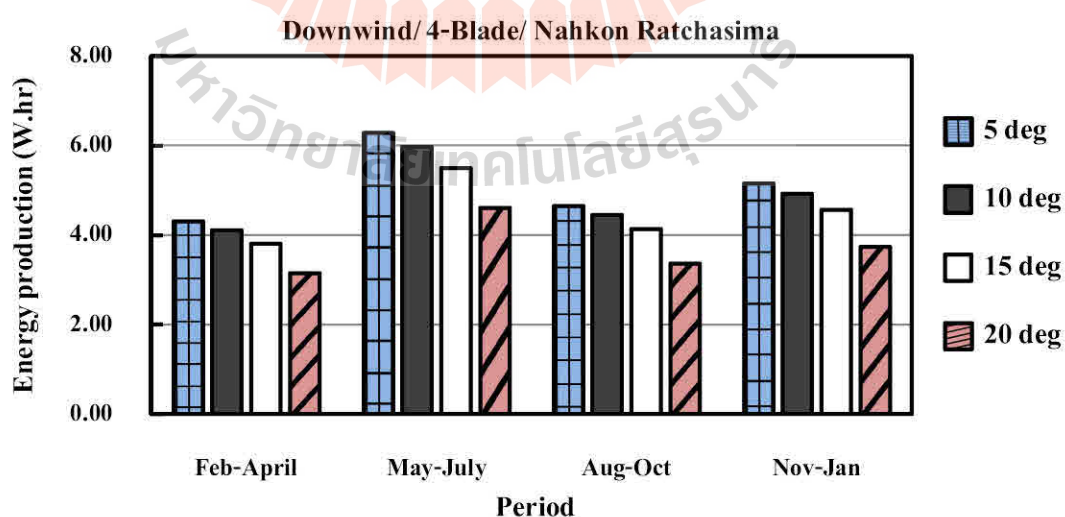


รูปที่ 8.22 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 15 องศา จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 8.23 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 20 องศา จังหวัดนครราชสีมา

จากการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 8.20-8.23 จะทำให้ได้งานรายกลุ่มเดือน (W_p) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8.24 และจากตารางที่ 8.5 จะเห็นว่าที่มุมพิชปลายใบ 5 องศาให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 20.41 kWhr



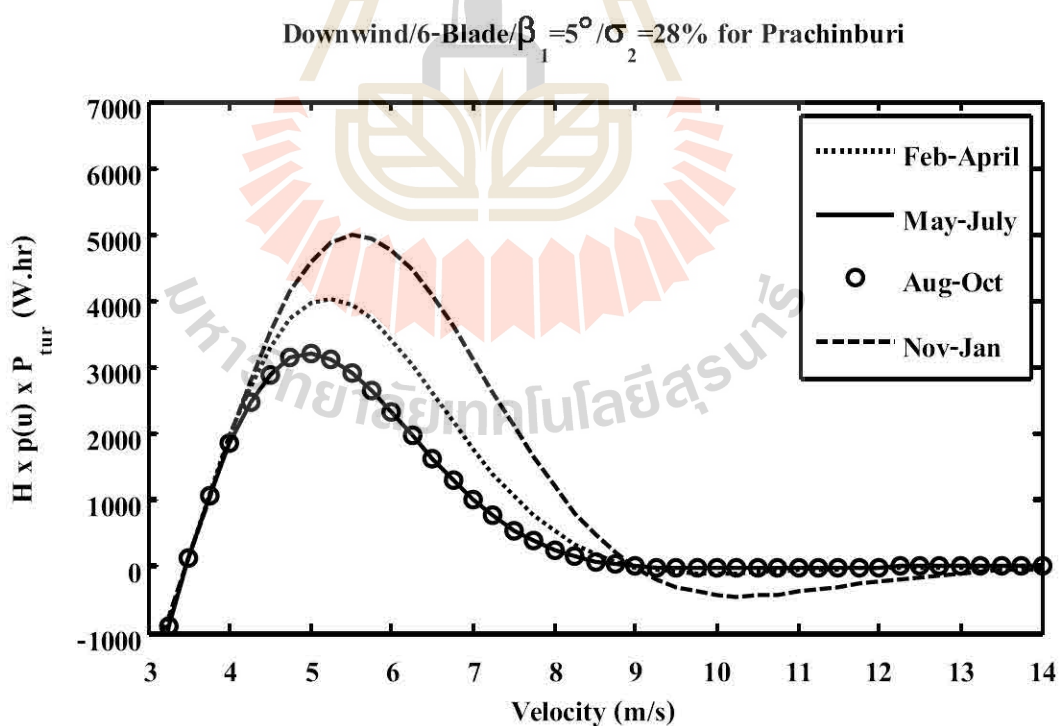
รูปที่ 8.24 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW แบบ 4 ใบ จังหวัดนครราชสีมา

ตารางที่ 8.5 W_p และ AEP ของ Downwind-TSW แบบ 4 ใบ จังหวัดนครราชสีมา

กลุ่มเดือน	Period work (W_p) และ AEP			
	$\beta_1 = 5^\circ$ (kW.hr)	$\beta_2 = 10^\circ$ (kW.hr)	$\beta_3 = 15^\circ$ (kW.hr)	$\beta_4 = 20^\circ$ (kW.hr)
Feb-April	4.32	4.11	3.81	3.16
May-July	6.29	5.97	5.50	4.61
Aug-Oct	4.65	4.45	4.14	3.37
Nov-Jan	5.16	4.92	4.56	3.74
AEP	20.41	19.44	18.01	14.88

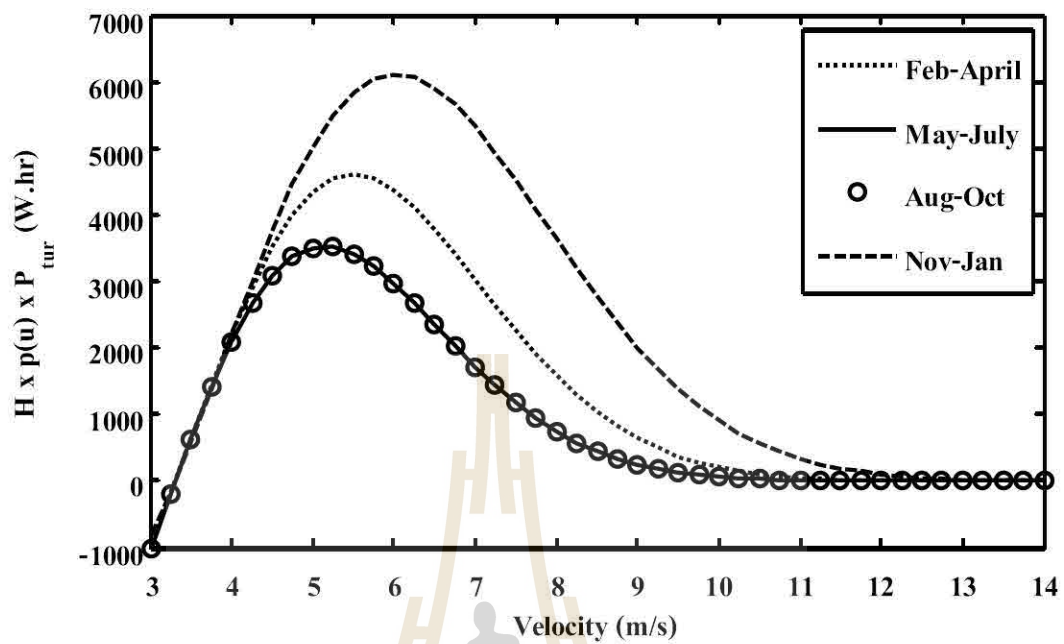
2) ผลการประเมินโดยใช้สถิติลมจังหวัดปราจีนบุรี

2.1 แบบ 6 ใบ จะแสดงผลอยู่ในรูปของกราฟ $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ ดังรูปที่ 8.25-8.28 และแสดงผลการอินทิเกรตเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบดังรูปที่ 8.29 และตารางที่ 8.6



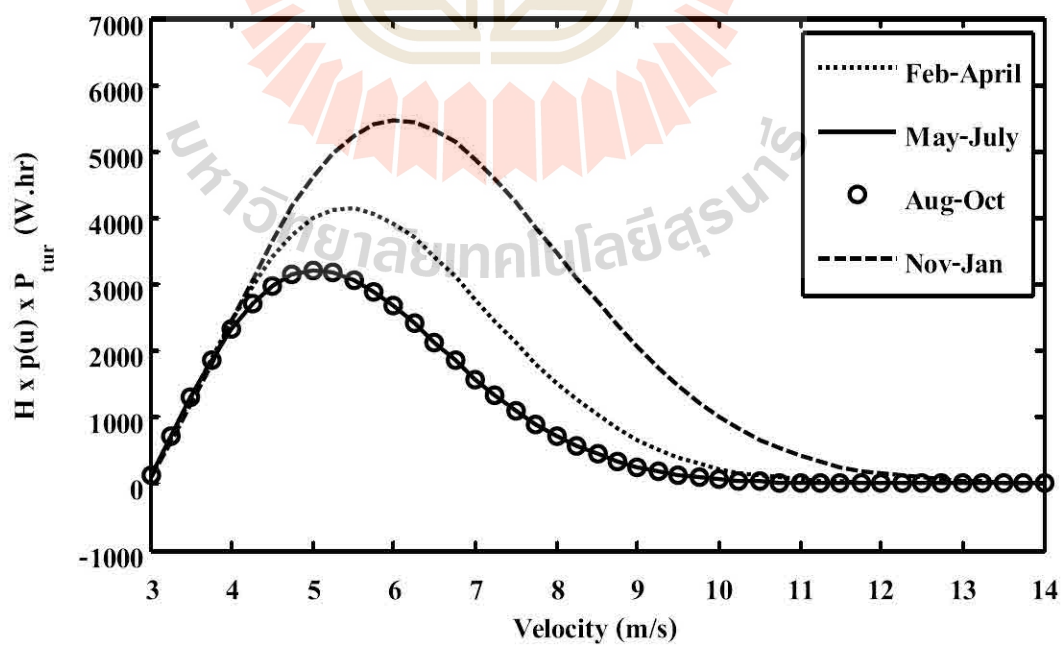
รูปที่ 8.25 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

Downwind/6-Blade/ $\beta_2 = 10^\circ / \sigma_2 = 28\%$ for Prachinburi



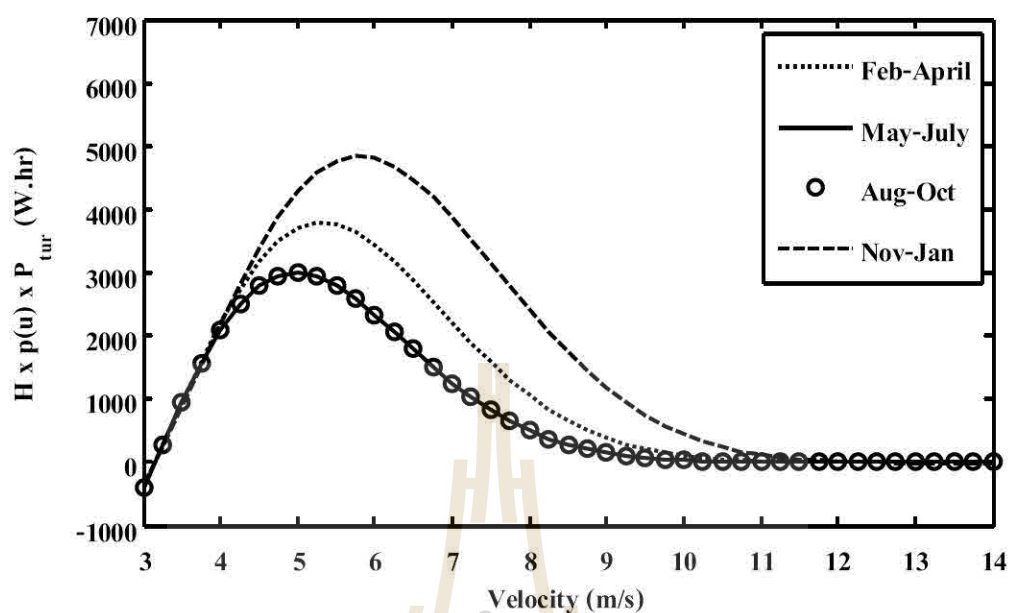
รูปที่ 8.26 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

Downwind/6-Blade/ $\beta_3 = 15^\circ / \sigma_2 = 28\%$ for Prachinburi



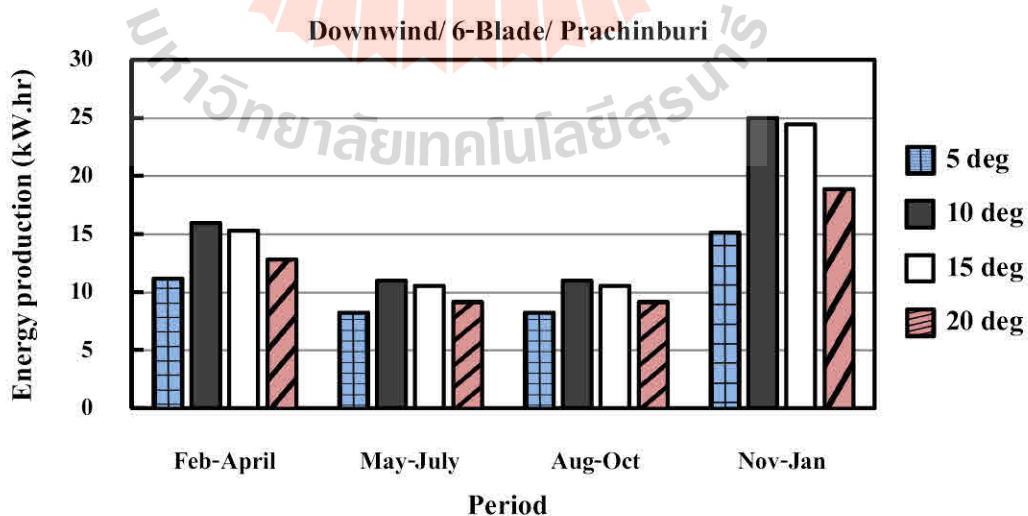
รูปที่ 8.27 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 15 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

Downwind/6-Blade/ $\beta_4 = 20^\circ / \sigma_2 = 28\%$ for Prachinburi



รูปที่ 8.28 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 20 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

จากการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 8.25-8.28 จะทำให้ได้งานรายกลุ่มเดือน (W_p) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8.29 และจากตารางที่ 8.6 จะเห็นว่าที่มุมพิชปลายใบ 10 องศาให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 62.92 kW.hr



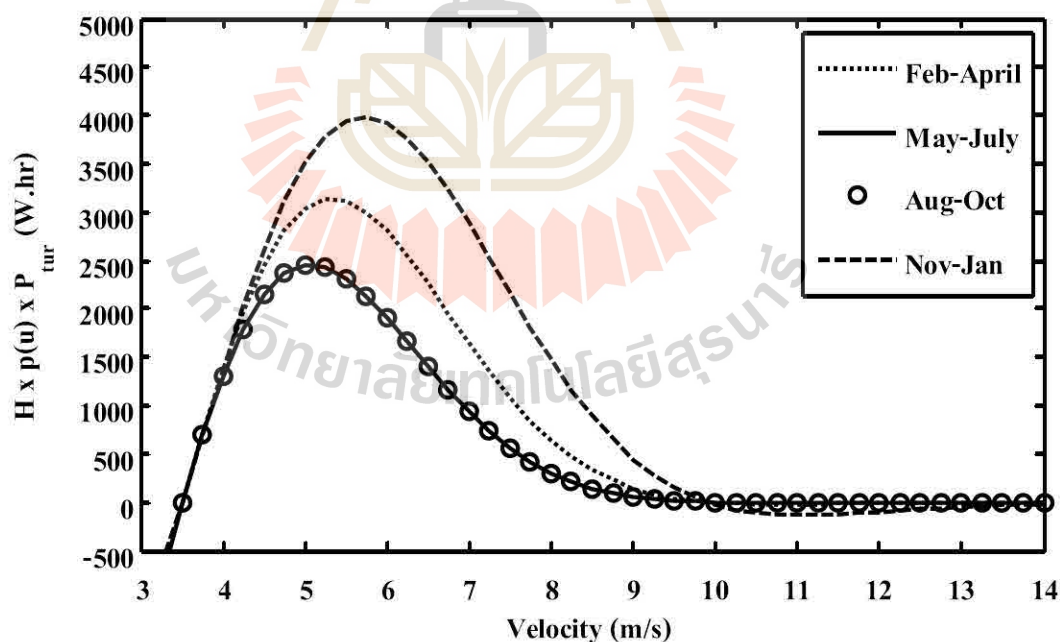
รูปที่ 8.29 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW แบบ 6 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี

ตารางที่ 8.6 W_p และ AEP ของ Downwind-TSW แบบ 6 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี

กลุ่มเดือน	Period work (W_p) และ AEP			
	$\beta_1 = 5^\circ$ (kW.hr)	$\beta_2 = 10^\circ$ (kW.hr)	$\beta_3 = 15^\circ$ (kW.hr)	$\beta_4 = 20^\circ$ (kW.hr)
Feb-April	11.21	15.96	15.30	12.84
May-July	8.26	10.98	10.53	9.17
Aug-Oct	8.26	10.98	10.53	9.17
Nov-Jan	15.16	25.00	24.40	18.93
<i>AEP</i>	42.90	62.92	60.76	50.12

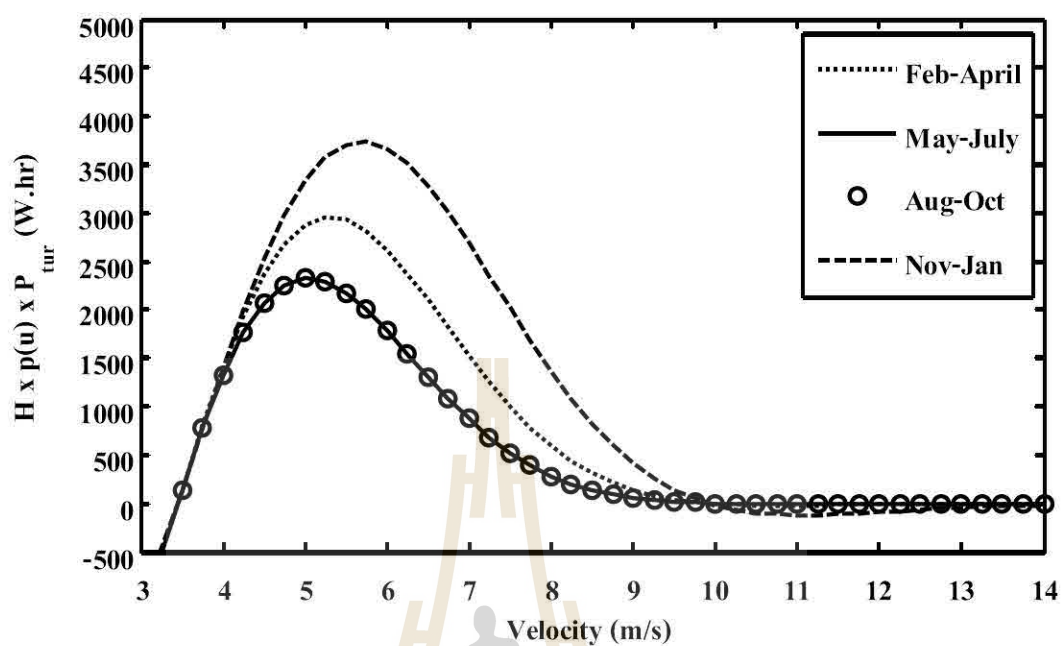
2.2 แบบ 4 ใบ จะแสดงผลอยู่ในรูปของกราฟ $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ ดังรูปที่ 8.30-8.33 และแสดงผลการอินทิเกรตเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบดังรูปที่ 8.34 และตารางที่ 8.7

Downwind/4-Blade/ $\beta_1 = 5^\circ / \sigma_2 = 28\%$ for Prachinburi



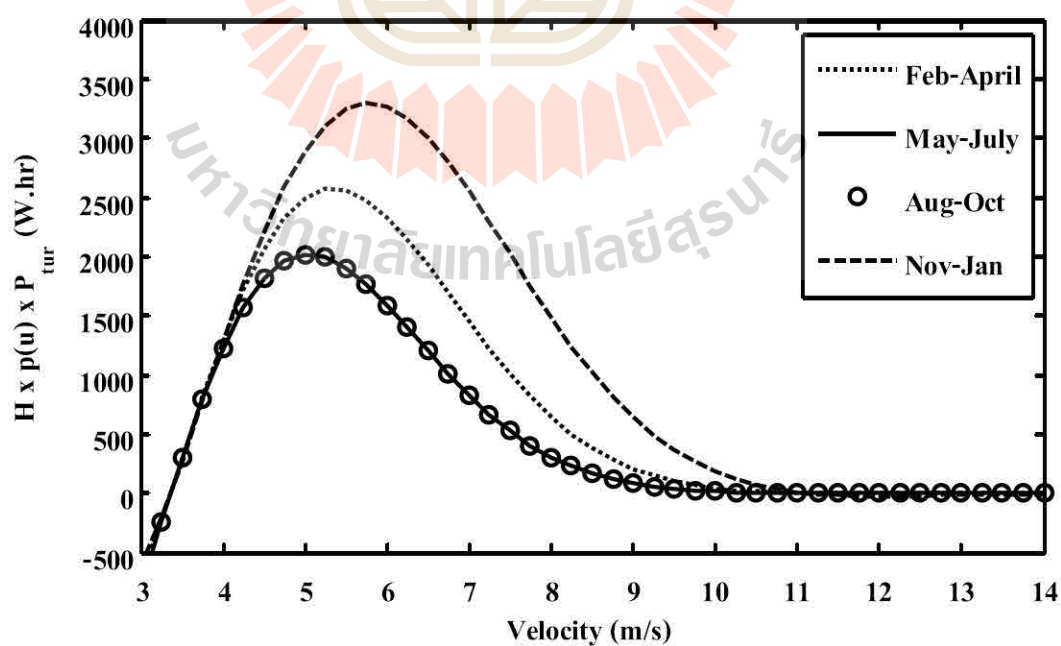
รูปที่ 8.30 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

Downwind/4-Blade/ $\beta_2=10^\circ/\sigma_2=28\%$ for Prachinburi



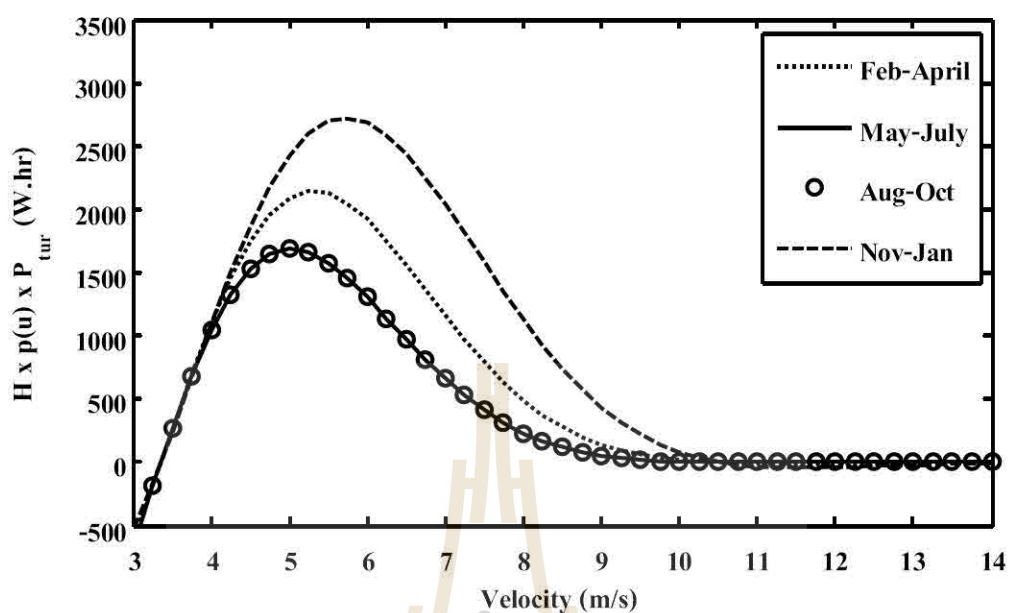
รูปที่ 8.31 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

Downwind/4-Blade/ $\beta_3=15^\circ/\sigma_2=28\%$ for Prachinburi



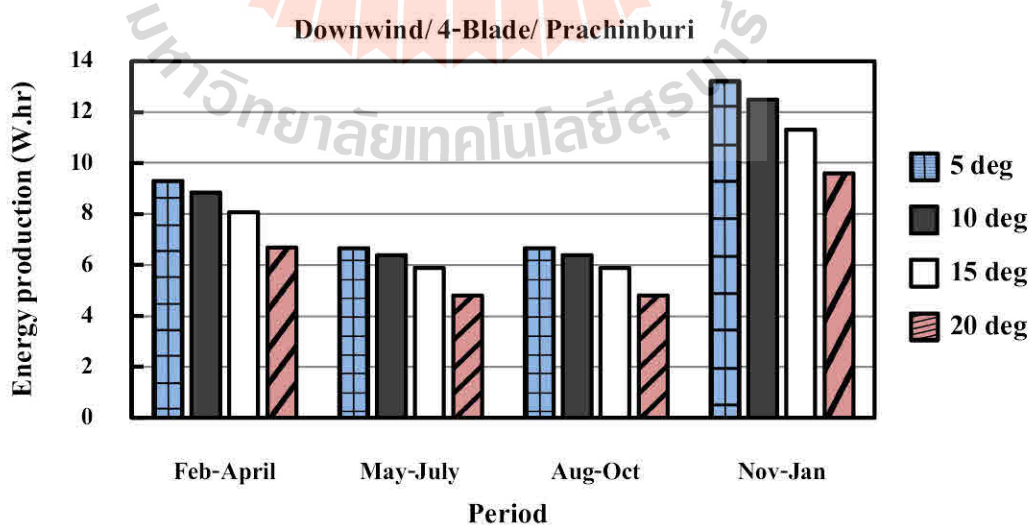
รูปที่ 8.32 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 15 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

Downwind/4-Blade/ $\beta_4 = 20^\circ / \sigma_2 = 28\%$ for Prachinburi



รูปที่ 8.33 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 20 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

จากการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 8.30-8.33 จะทำให้ได้งานรายกลุ่มเดือน (W_p) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8.34 และจากตารางที่ 8.7 จะเห็นว่าที่มุมพิชปลายใบ 5 องศาให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 35.84 kWhr



รูปที่ 8.34 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW แบบ 4 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี

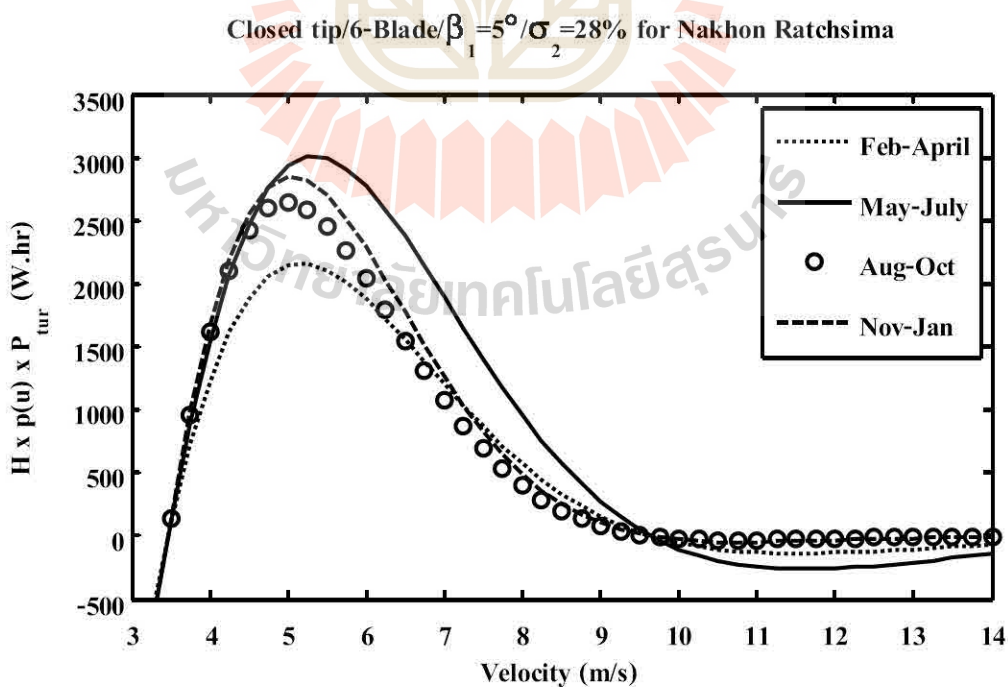
ตารางที่ 8.7 W_p และ AEP ของ Downwind-TSW แบบ 4 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี

กลุ่มเดือน	Period work (W_p) และ AEP			
	$\beta_1 = 5^\circ$ (kW.hr)	$\beta_2 = 10^\circ$ (kW.hr)	$\beta_3 = 15^\circ$ (kW.hr)	$\beta_4 = 20^\circ$ (kW.hr)
Feb-April	9.31	8.84	8.05	6.70
May-July	6.67	6.37	5.89	4.80
Aug-Oct	6.67	6.37	5.89	4.80
Nov-Jan	13.20	12.48	11.29	9.59
<i>AEP</i>	35.84	34.07	31.12	25.89

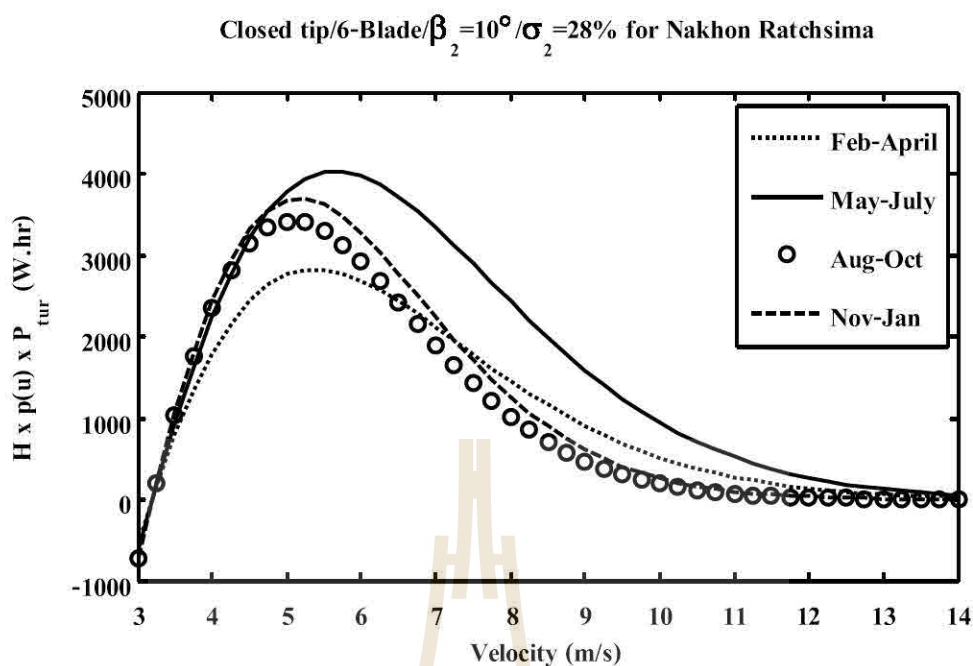
8.5.3 งานรายปีหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ที่ทำกรปิดปลายใบ (Downwind-TSW-Closed tip)

1) ผลการประเมินโดยใช้สถิติลมจังหวัดนครราชสีมา

1.1 แบบ 6 ใบ จะแสดงผลอยู่ในรูปของกราฟ $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ ดังรูปที่ 8.35-8.36 และแสดงผลการอินทิเกรตเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบดังรูปที่ 8.37 และตารางที่ 8.8

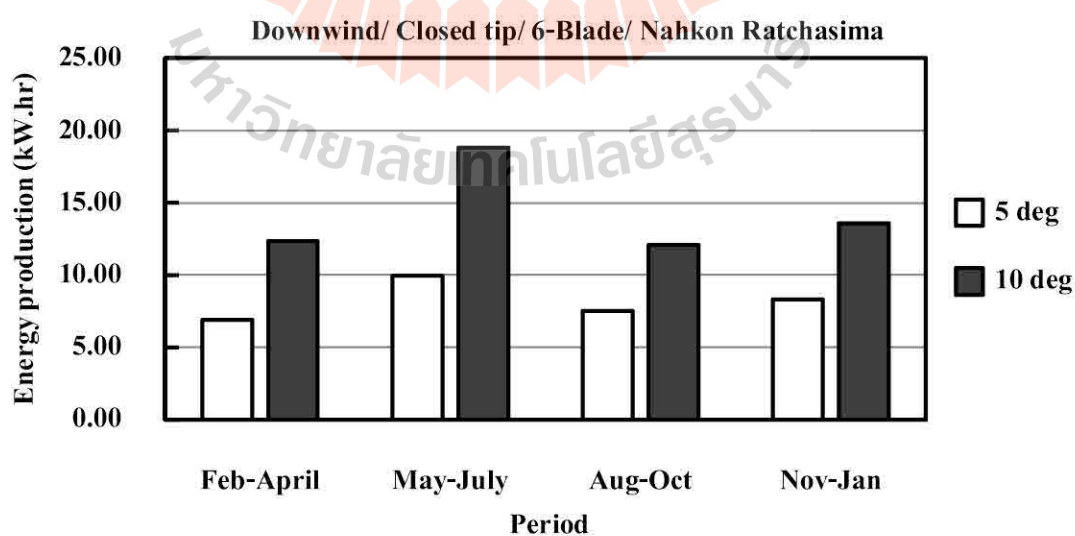


รูปที่ 8.35 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 8.36 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดนครราชสีมา

จากการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 8.35-8.36 จะทำให้ได้งานรายกลุ่มเดือน (W_p) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8.37 และจากตารางที่ 8.8 จะเห็นว่าที่มุมพิชปลายใบ 10 องศาให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 56.82 kWhr



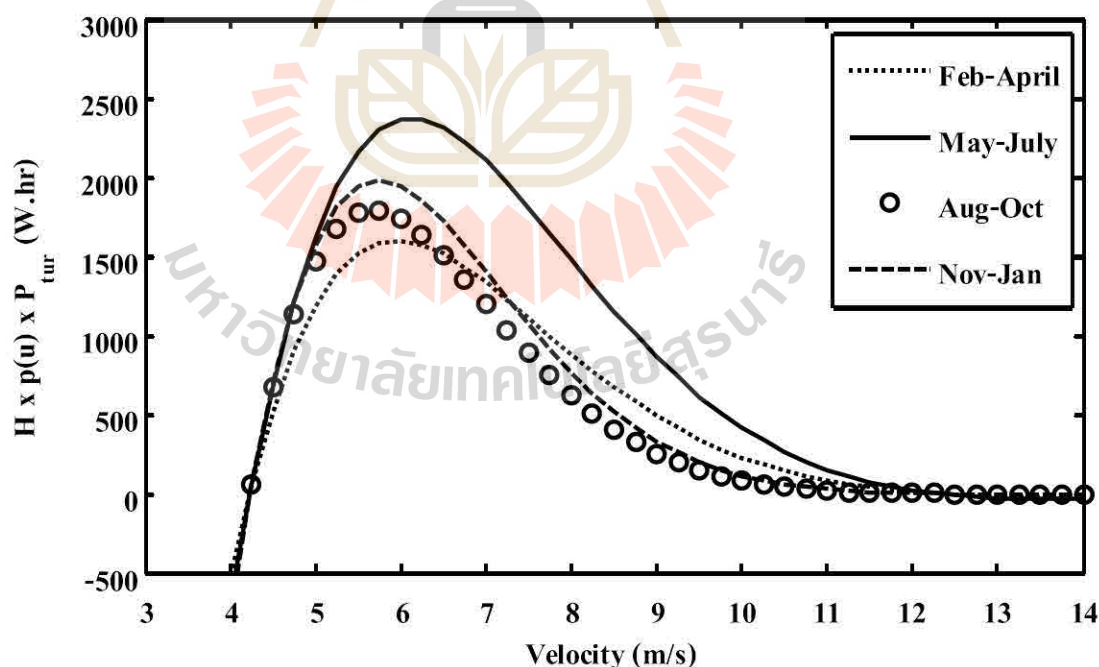
รูปที่ 8.37 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ จังหวัดนครราชสีมา

ตารางที่ 8.8 W_p และ AEP ของ Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ จังหวัดนครราชสีมา

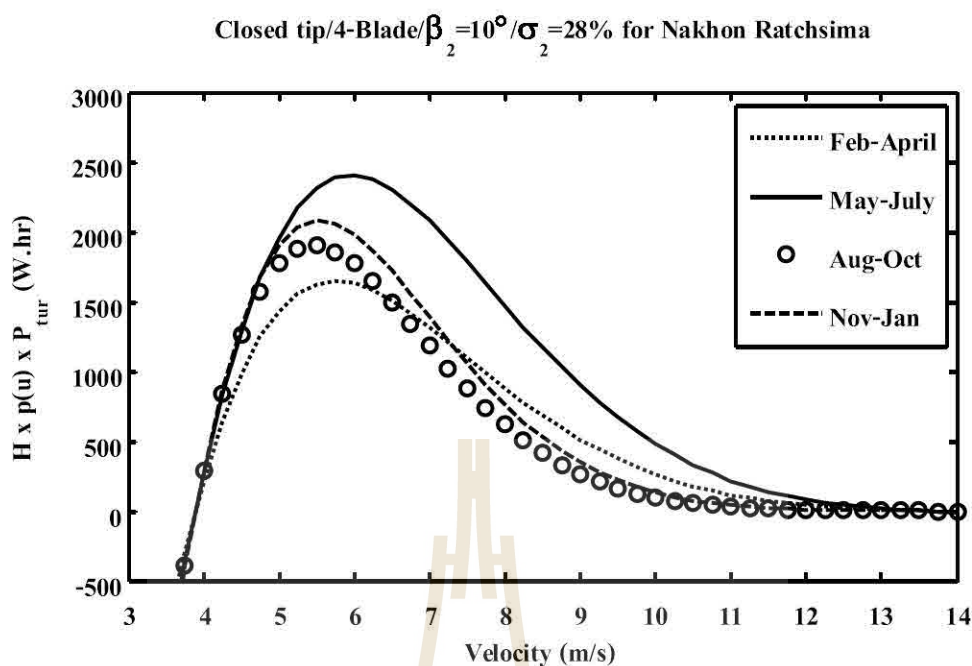
กลุ่มเดือน	Period work (W_p) และ AEP			
	$\beta_1 = 5^\circ$ (kW.hr)	$\beta_2 = 10^\circ$ (kW.hr)	$\beta_3 = 15^\circ$ (kW.hr)	$\beta_4 = 20^\circ$ (kW.hr)
Feb-April	6.88	12.34	N/A	N/A
May-July	9.97	18.81	N/A	N/A
Aug-Oct	7.51	12.09	N/A	N/A
Nov-Jan	8.30	13.58	N/A	N/A
<i>AEP</i>	32.66	56.82	N/A	N/A

1.2 แบบ 4 ใบ จะแสดงผลอยู่ในรูปของกราฟ $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ ดังรูปที่ 8.38-8.39 และแสดงผลการอินทิเกรตเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบดังรูปที่ 8.40 และตารางที่ 8.9

Closed tip/4-Blade/ $\beta_1 = 5^\circ / \sigma_2 = 28\%$ for Nakhon Ratchasima

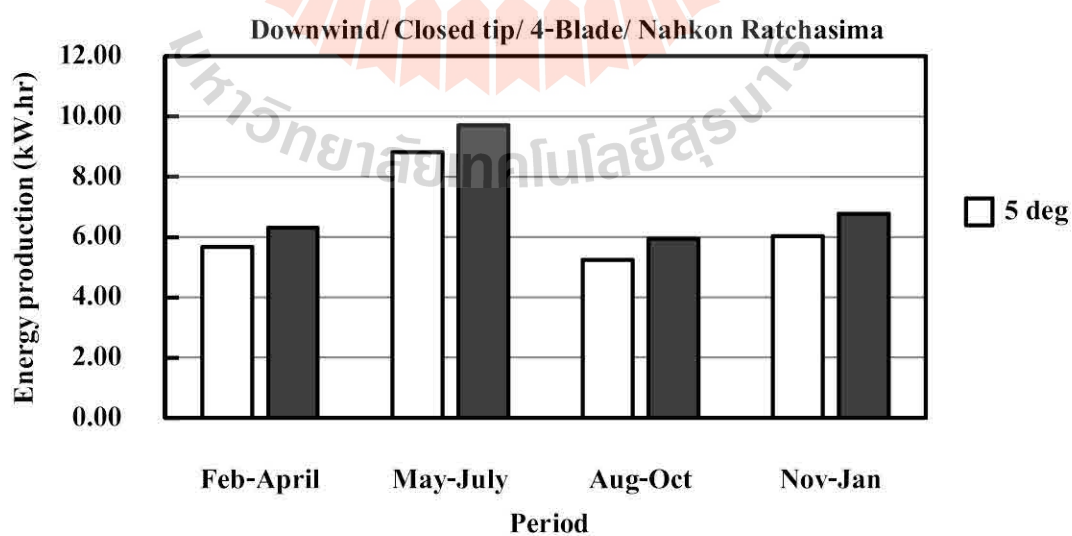


รูปที่ 8.38 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 8.39 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดนครราชสีมา

จากการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 8.38-8.39 จะทำให้ได้งานรายกลุ่มเดือน (W_p) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8.40 และจากตารางที่ 8.9 จะเห็นว่าที่มุมพิชปลายใบ 10 องศาให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 28.73 kWhr



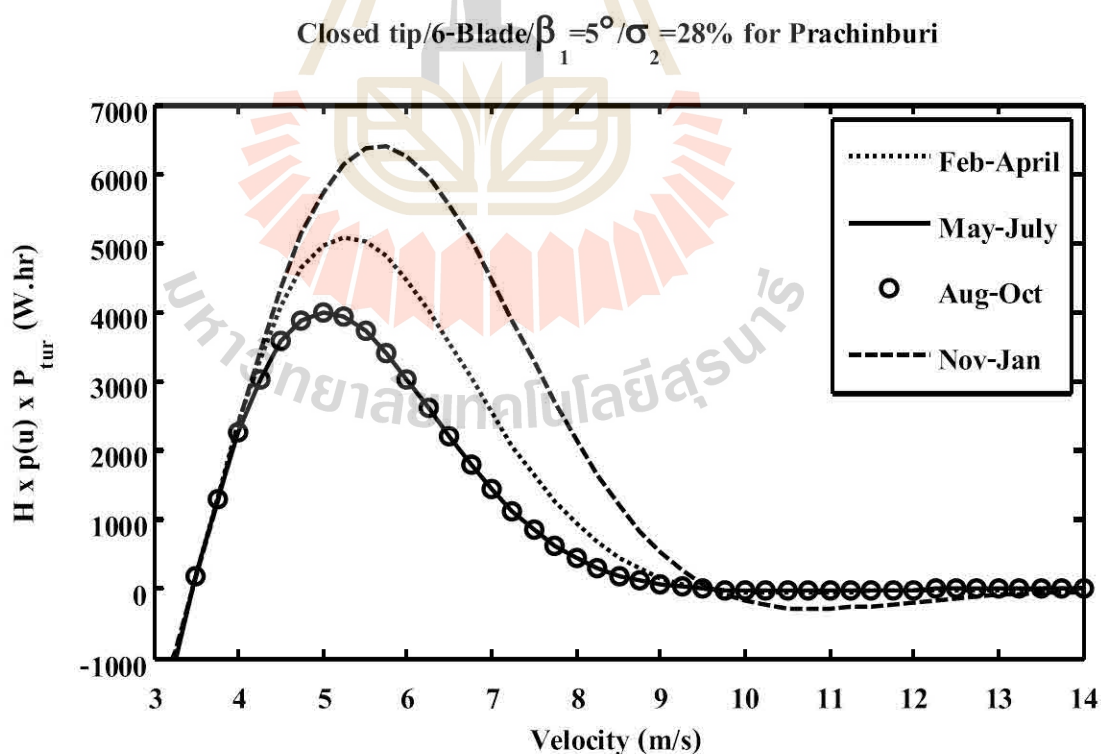
รูปที่ 8.40 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ จังหวัดนครราชสีมา

ตารางที่ 8.9 W_p และ AEP ของ Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ จังหวัดนครราชสีมา

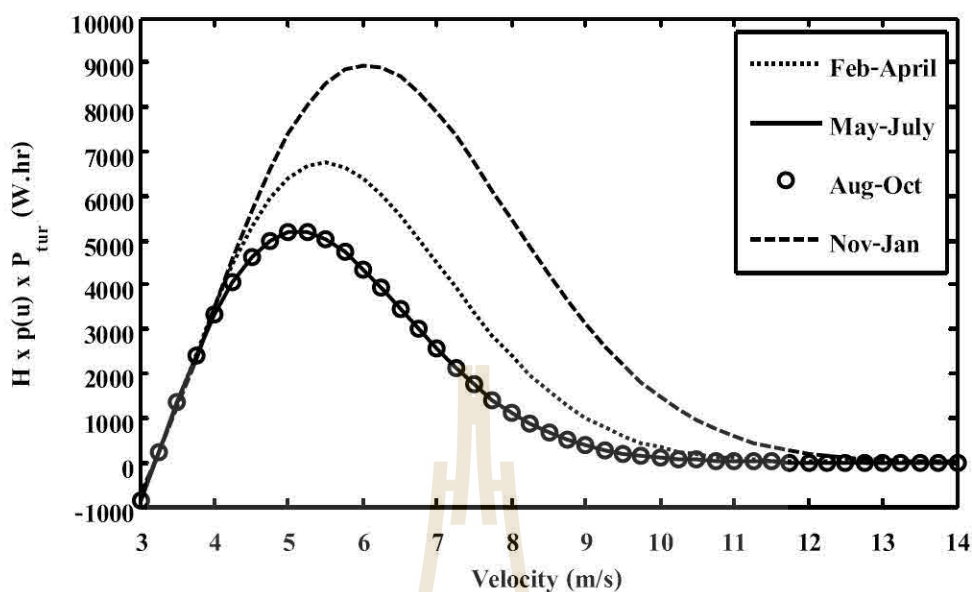
กลุ่มเดือน	Period work (W_p) และ AEP			
	$\beta_1 = 5^\circ$ (kW.hr)	$\beta_2 = 10^\circ$ (kW.hr)	$\beta_3 = 15^\circ$ (kW.hr)	$\beta_4 = 20^\circ$ (kW.hr)
Feb-April	5.68	6.31	N/A	N/A
May-July	8.81	9.71	N/A	N/A
Aug-Oct	5.25	5.94	N/A	N/A
Nov-Jan	6.03	6.77	N/A	N/A
<i>AEP</i>	25.77	28.73	N/A	N/A

2) ผลการประเมินโดยใช้สถิติลมจังหวัดปราจีนบุรี

2.1 แบบ 6 ใบ จะแสดงผลอยู่ในรูปของกราฟ $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ ดังรูปที่ 8.41-8.42 และแสดงผลการอินทิเกรตเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบดังรูปที่ 8.43 และตารางที่ 8.10

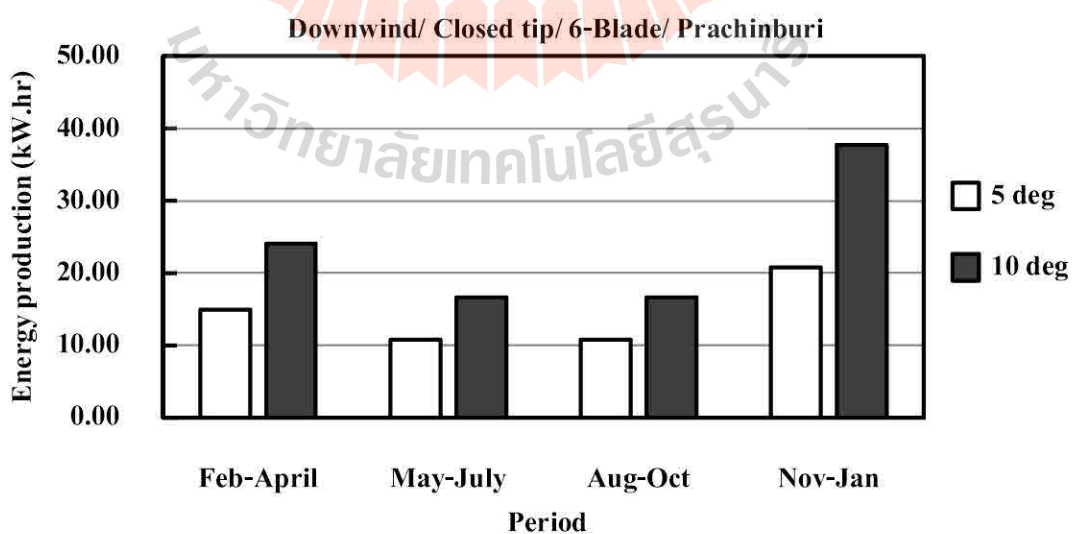


Closed tip/6-Blade/ $\beta_2=10^\circ/\sigma_2=28\%$ for Prachinburi



รูปที่ 8.42 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ มุมพิชปลายใบ 10 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

จากการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 8.41-8.42 จะทำให้ได้งานรายกลุ่มเดือน (W_p) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8.43 และจากตารางที่ 8.10 จะเห็นว่าที่มุมพิชปลายใบ 10 องศาให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 95.13 kWhr



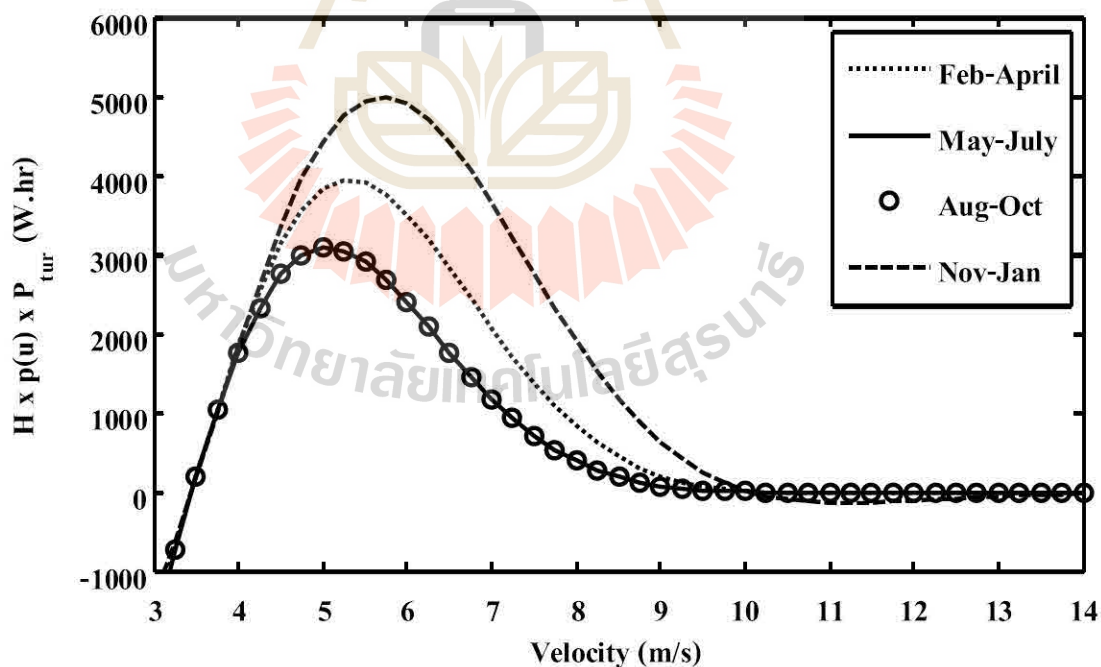
รูปที่ 8.43 งานรายกลุ่มเดือนของ Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี

ตารางที่ 8.10 W_p และ AEP ของ Downwind-TSW-Closed tip แบบ 6 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี

กลุ่มเดือน	Period work (W_p) และ AEP			
	$\beta_1 = 5^\circ$ (kW.hr)	$\beta_2 = 10^\circ$ (kW.hr)	$\beta_3 = 15^\circ$ (kW.hr)	$\beta_4 = 20^\circ$ (kW.hr)
Feb-April	14.92	24.07	N/A	N/A
May-July	10.80	16.65	N/A	N/A
Aug-Oct	10.80	16.65	N/A	N/A
Nov-Jan	20.83	37.76	N/A	N/A
<i>AEP</i>	57.35	95.13	N/A	N/A

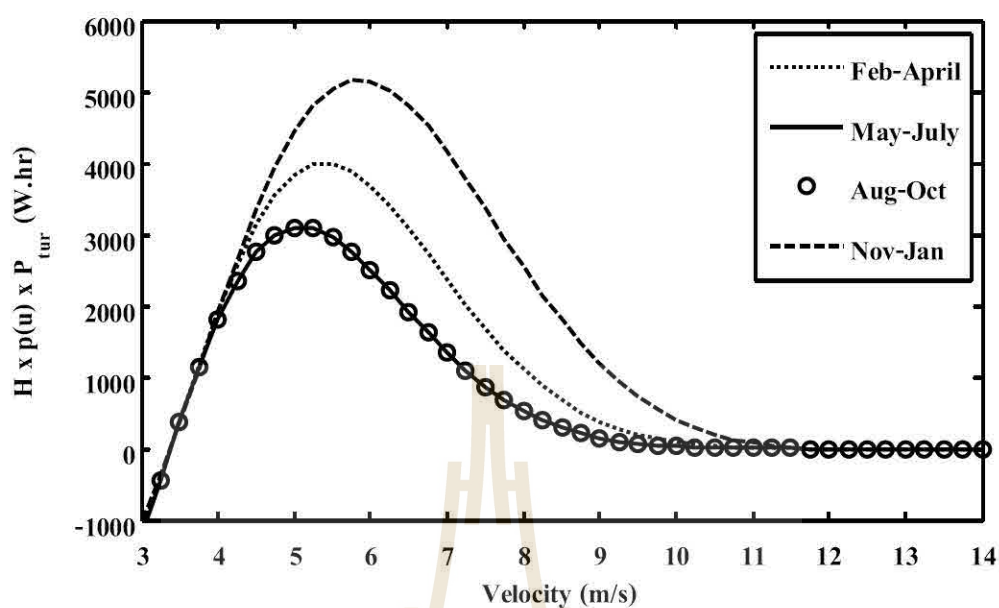
2.2 แบบ 4 ใบ จะแสดงผลอยู่ในรูปของกราฟ $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ ดังรูปที่ 8.44-8.45 และแสดงผลการอินทิเกรตเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบดังรูปที่ 8.46 และตารางที่ 8.11

Closed tip/4-Blade/ $\beta_1 = 5^\circ / \sigma_2 = 28\%$ for Prachinburi



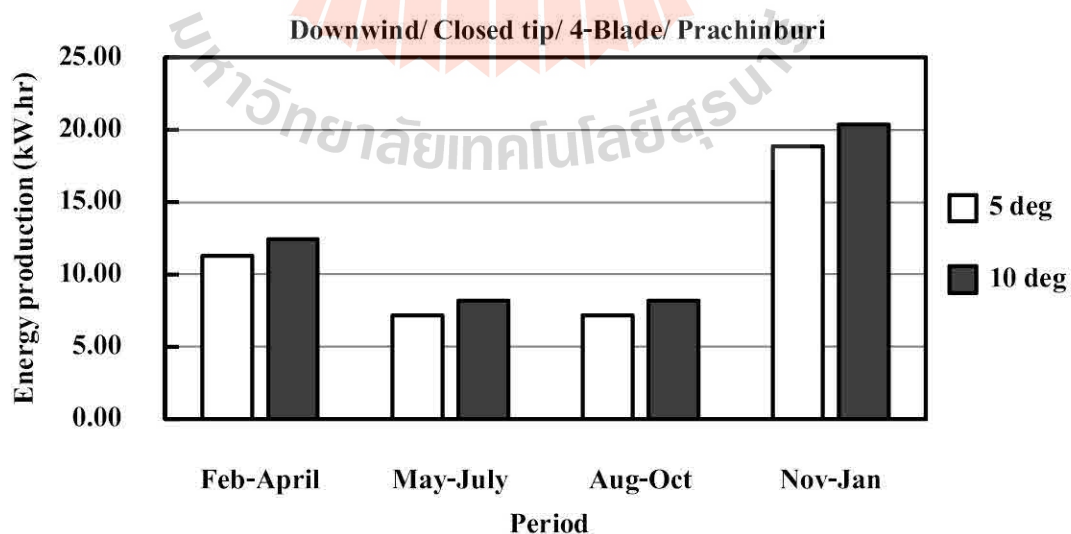
รูปที่ 8.44 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 5 องศา จังหวัดปราจีนบุรี

Closed tip/4-Blade/ $\beta_2=10^\circ/\sigma_2=28\%$ for Prachinburi



รูปที่ 8.45 Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ มุมพิชปลายใบ 10° องศา จังหวัดปราจีนบุรี

จากการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 8.44-8.45 จะทำให้ได้งานรายกลุ่มเดือน (W_p) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8.46 และจากตารางที่ 8.11 จะเห็นว่าที่มุมพิชปลายใบ 10° องศาให้งานรายปีเท่ากับ 49.18 kWhr



รูปที่ 8.46 งานรายกลุ่มเดือน Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี

ตารางที่ 8.11 W_p และ AEP ของ Downwind-TSW-Closed tip แบบ 4 ใบ จังหวัดปราจีนบุรี

กลุ่มเดือน	Period work (W_p) และ AEP			
	$\beta_1 = 5^\circ$ (kW.hr)	$\beta_2 = 10^\circ$ (kW.hr)	$\beta_3 = 15^\circ$ (kW.hr)	$\beta_4 = 20^\circ$ (kW.hr)
Feb-April	11.27	12.46	N/A	N/A
May-July	7.18	8.17	N/A	N/A
Aug-Oct	7.18	8.17	N/A	N/A
Nov-Jan	18.87	20.38	N/A	N/A
AEP	44.50	49.18	N/A	N/A

8.6 อภิปรายและสรุปผลการประเมินงานรายปี

จากการประเมินงานรายปี (AEP) ของหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนทั้งหมด 3 รูปแบบตามที่แสดงผลในหัวข้อ 8.5 คือ 1) หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (Upwind-TSW) 2) หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ (Downwind-TSW) และ 3) หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ที่ทำการปิดปลายใบ (Downwind-TSW-Closed tip) โดยใช้สถิติลมจังหวัดนครราชสีมาและจังหวัดปราจีนบุรีสามารถสรุปผลได้ดังนี้

8.6.1 หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (Upwind-TSW)

1) ที่มุมพิชปลายใบ 10 องศาให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 41.59 kWhr และ 69.80 kWhr สำหรับจังหวัดนครราชสีมา และปราจีนบุรี ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าจังหวัดปราจีนบุรีให้งานรายปีที่สูงกว่าจังหวัดนครราชสีมาเนื่องจากมีสถิติลมที่ตึกกว่านั้นเองกล่าวคือจังหวัดปราจีนบุรีมีความเร็วลมโดยเฉลี่ยตลอดปีที่สูงกว่าจังหวัดนครราชสีมา

2) จังหวัดนครราชสีมาให้งานรายกลุ่มเดือน (W_p) สูงสุดในช่วงเดือนพฤษภาคม-กรกฎาคม ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (ลมฝน) นั้นเอง แต่สำหรับจังหวัดปราจีนบุรีจะให้งานรายกลุ่มเดือนสูงสุดในช่วงเดือนพฤศจิกายน-มกราคม ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ลมหนาว) ซึ่งทั้ง 2 ช่วงนี้ต่างก็เป็นลมมรสุมทั้งคู่ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเร็วลมสูงกว่าช่วงเดือนอื่น ๆ

3) ถ้าพิจารณาในพื้นที่การใช้งานเดียวกันจะเห็นว่าหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิมที่มีมุมพิชปลายใบ 10 องศาจะให้งานรายปีสูงสุดมากกว่ามุมพิชปลายใบค่าอื่นเนื่องจากกราฟ $C_p - \lambda$ ที่ได้จากการทดสอบมีประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดและมีจุดปฏิบัติการที่ให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดมีความสอดคล้องกับความเร็วลมที่ดีที่สุดของสถิติลมในพื้นที่การใช้งานนั้น

8.6.2 หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ (Downwind-TSW)

1) กรณีหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ ให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 37.34 kWhr และ 62.92 kWhr สำหรับจังหวัดนครราชสีมา และปราจีนบุรี ตามลำดับ

2) กรณีหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ ให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 20.41 kWhr และ 35.84 kWhr สำหรับจังหวัดนครราชสีมา และปราจีนบุรี ตามลำดับ จะเห็นว่า หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่กรณีแบบ 4 ใบให้งานรายปีน้อยกว่าแบบ 6 ใบพอสมควร ดังนั้นจึงควรเลือกใช้กังหันลมเสื่อลำแพนแบบ 6 ใบจะดีที่สุด

3) จากกรณีหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่แบบ 6 ใบ จะเห็นว่างานรายปีที่ได้มีค่าน้อยกว่าหุ่นจำลองแบบดั้งเดิมเล็กน้อยเนื่องจากกังหันลมแบบใหม่เป็นแบบ Downwind จึงมีการบังลมเล็กน้อยจากเสาและชุดลูกปืนที่อยู่ด้านหน้าโรเตอร์ซึ่งทำให้เกิด Wake ไหลวนอยู่บริเวณด้านหน้าโรเตอร์และเกิดการสูญเสียพลังงาน อย่างไรก็ตามนี้เป็นเพียงการคำนวณงานรายปีที่ไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากการสูญเสียพลังงานจากการเอียงศูนย์ของทิศทางลมกับระนาบโรเตอร์ ดังนั้นในการปฏิบัติงานจริงกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิมจะให้งานรายปีที่น้อยกว่ากังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่เพราะว่ากังหันลมแบบดั้งเดิมนั้นไม่มีระบบสายหาลม (Passive yaw control) จึงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมากกว่ากังหันลมแบบใหม่ที่มีระบบสายหาลมซึ่งระนาบโรเตอร์จะตั้งฉากกับทิศทางลมตลอดเวลาแม้ลมจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไป

8.6.3 หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ที่ทำการปิดปลายใบ (Downwind-TSW-Closed tip)

1) กรณีหุ่นจำลองแบบ 6 ใบ ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ ให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 56.82 kWhr และ 95.13 kWhr สำหรับจังหวัดนครราชสีมา และปราจีนบุรี ตามลำดับ

2) กรณีหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ ให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 28.73 kWhr และ 49.18 kWhr สำหรับจังหวัดนครราชสีมา และปราจีนบุรี ตามลำดับ

3) เมื่อทำการเปรียบเทียบหุ่นจำลองทั้ง 3 รูปแบบ คือ หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (Upwind-TSW) หุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ที่ยังไม่ได้ปิดปลายใบ (Downwind-TSW) และหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ที่ทำการปิดปลายใบ (Downwind-TSW-Closed tip) พบว่างานรายปีที่ได้จากกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ที่ทำการปิดปลายใบมีค่ามากที่สุดเนื่องจากเป็นกังหันลมที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในบรรดาหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนทั้งหมด 3 รูปแบบนั่นเอง อีกทั้งยังมีจุดปฏิบัติงานที่ดีที่สุดของกังหันลมสอดคล้องกับความเร็วลมที่ดีที่สุดของสถิติลมในพื้นที่ใช้งานด้วย ดังนั้นควรเลือกใช้กังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ซึ่งเป็นแบบ Downwind และเป็น Passive yaw control แบบ 6 ใบและปิดปลายใบจึงจะให้งานรายปีสูงสุด

บทที่ 9

การประเมินเศรษฐศาสตร์กังหันลมเบื้องต้น

9.1 กล่าวนำ

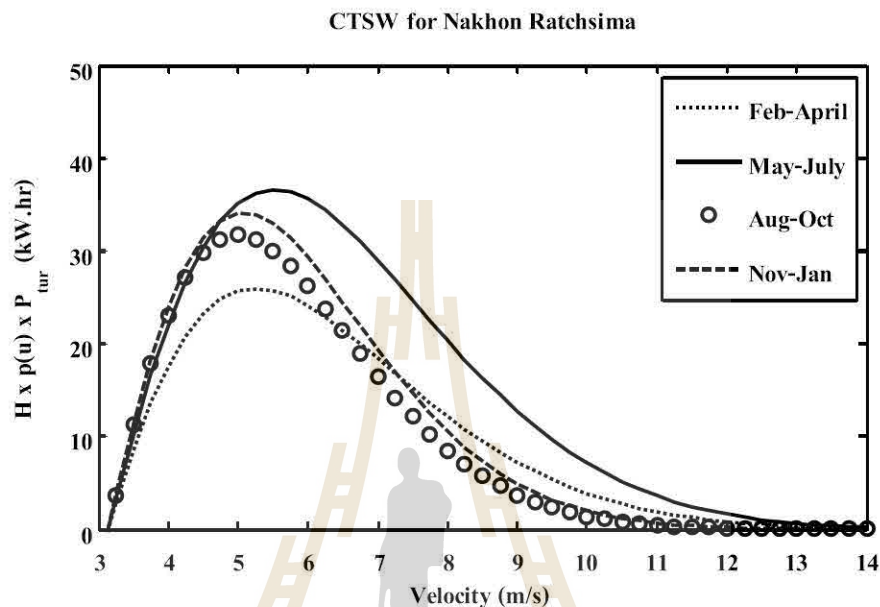
ในบทนี้จะทำการประเมินเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของกังหันลมเสื่อลำแพนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 เมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้งานจริง โดยจะประเมินในรูปของต้นทุนพลังงาน (Cost of energy) กังหันลมที่จะทำการประเมินก็คือ กังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (Conventional Thai sail windmill, CTSW) และกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้น (New Thai sail windmill, NTSW) โดยเลือกกรณีที่ดีที่สุด กล่าวคือกรณีกังหันลมแบบ Downwind จำนวน 6 ใบ ความดันใบ 28% และมุมพิชปลายใบ 10 องศาและปิดปลายใบ เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนกังหันลมเสื่อลำแพนทั้ง 2 แบบ การคำนวณต้นทุนพลังงานมีตัวแปรหลัก 2 ตัวคือ งานรายปี (Annual energy production, AEP) และราคาการประกอบติดตั้งกังหันลม (Initial cost of installation, IC) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

9.2 งานรายปีกังหันลมเสื่อลำแพนขนาดจริง

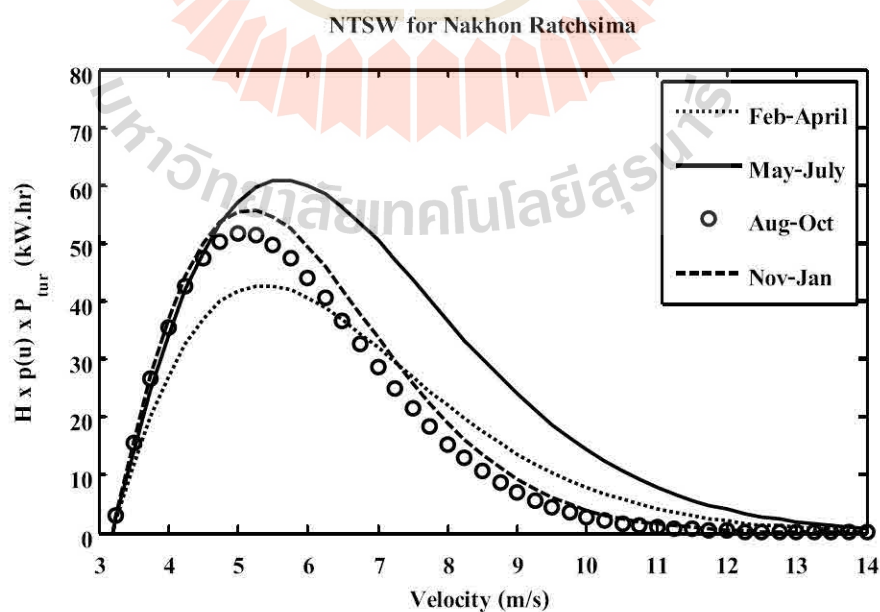
งานรายปีที่ได้จากการประเมินในบทที่ 8 เป็นเพียงงานรายปีของหุ่นจำลองกังหันลมขนาดเล็กเท่านั้นซึ่งยังไม่สามารถนำมาใช้คำนวณหาต้นทุนพลังงานของกังหันลมขนาดจริงได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะคำนวณงานรายปีของกังหันลมเสื่อลำแพนขนาดจริงเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการคำนวณต้นทุนพลังงานต่อไป วิธีการคำนวณยังคงใช้สมการเดิมคือ สมการที่ 8.3-8.5 (ในบทที่ 8) เพียงแต่จะต้องปรับแก้ค่ากำลังงานกังหันลม (Wind turbine power, P_{tur}) ที่ปรากฏในสมการที่ 8.3 ใหม่ให้มีความถูกต้องตามขนาดจริง จากนั้นจึงใช้สมการที่ 8.4-8.5 ในการคำนวณหางานรายกลุ่มเดือนและรายปี โดยการอินทิเกรตหรือการหาพื้นที่ใต้กราฟดังที่กล่าวแล้วในบทที่ 8 สำหรับสถิติลมนั้นก็ยังคงใช้สมการไวบูลล์เช่นเดิม ส่วนค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient, C_p) นั้นอาจมีปัญหาล็กน้อยเพราะว่าความจริงแล้วค่าสัมประสิทธิ์กำลังกังหันลมที่ทดสอบในระดับขนาดเล็กจะมีความแตกต่างกับกังหันลมขนาดใหญ่เล็กน้อยอันเนื่องมาจากผลของ Scale effect ซึ่งส่วนใหญ่แล้วกังหันลมที่มีขนาดใหญ่กว่ามักจะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงกว่าเพราะว่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) มีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกจะสมมุติว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมเสื่อลำแพนขนาดจริงจะมีค่าเท่ากับหุ่นจำลองกังหันลมขนาดเล็ก ดังนั้นจะทำให้งานรายปีของกังหันลมเสื่อลำแพนขนาดจริงทั้งกรณีแบบดั้งเดิม (CTSW) และแบบใหม่ (NTSW) สามารถประเมินได้ผลดังนี้

9.2.1 งานรายกลุ่มเดือนและงานรายปีที่ปฏิบัติงานในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา

จากรูปที่ 9.1 และ 9.2 เป็นกราฟ $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ ของกรณี CTSW และ NTSW ตามลำดับ ซึ่งงานรายกลุ่มเดือน (Period work, W_p) ก็คือพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 9.1 และ 9.2 นั่นเอง

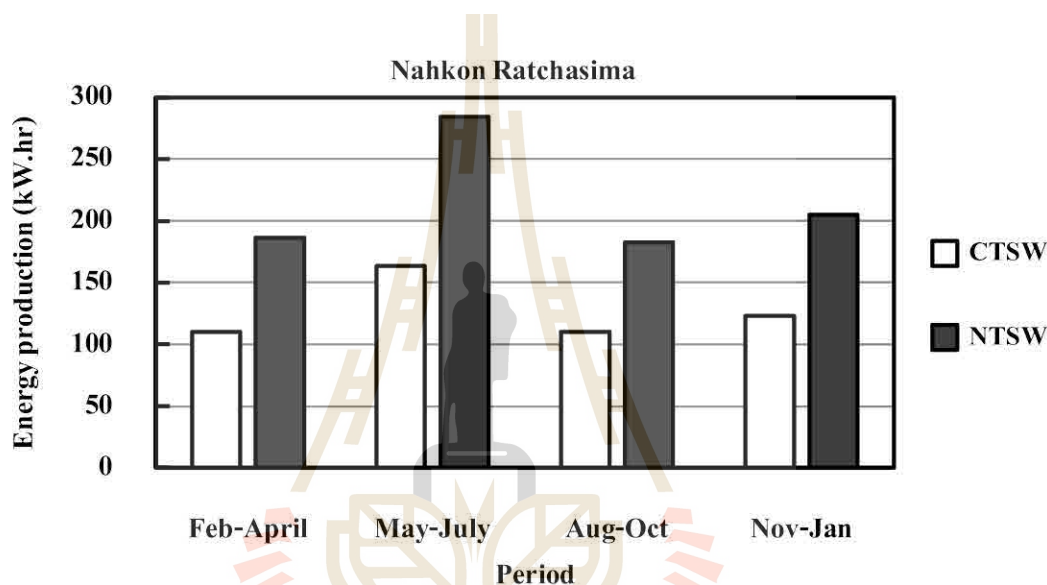


รูปที่ 9.1 $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ กังหันลมแบบดั้งเดิม (CTSW) จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 9.2 $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ กังหันลมแบบใหม่ (NTSW) จังหวัดนครราชสีมา

จากการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 9.1 และ 9.2 จะทำให้ได้งานรายกลุ่มเดือน (W_p) ของกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (Conventional Thai sail windmill, CTSW) และกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ (New Thai sail windmill, NTSW) ตามลำดับ ที่ปฏิบัติงานในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งแสดงผลแบบสรุปในรูปแบบกราฟแท่งดังรูปที่ 9.3 ซึ่งจะเห็นว่ากังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ให้งานรายกลุ่มเดือนสูงกว่ากังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิมในทุกช่วงกลุ่มเดือน ดังนั้นงานรายปี (AEP) ของกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ก็ย่อมจะสูงกว่ากังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิมตามไปด้วย ซึ่งจะเห็นว่าเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 69.38% ดังที่แสดงในตารางที่ 9.1



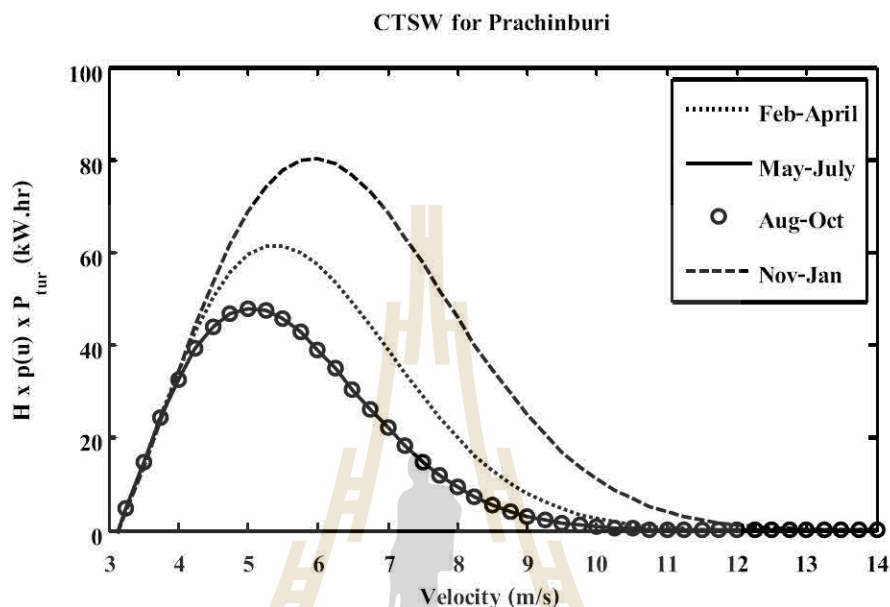
รูปที่ 9.3 งานรายกลุ่มเดือน CTSW และ NTSW จังหวัดนครราชสีมา

ตารางที่ 9.1 W_p และ AEP ของ CTSW และ NTSW จังหวัดนครราชสีมา

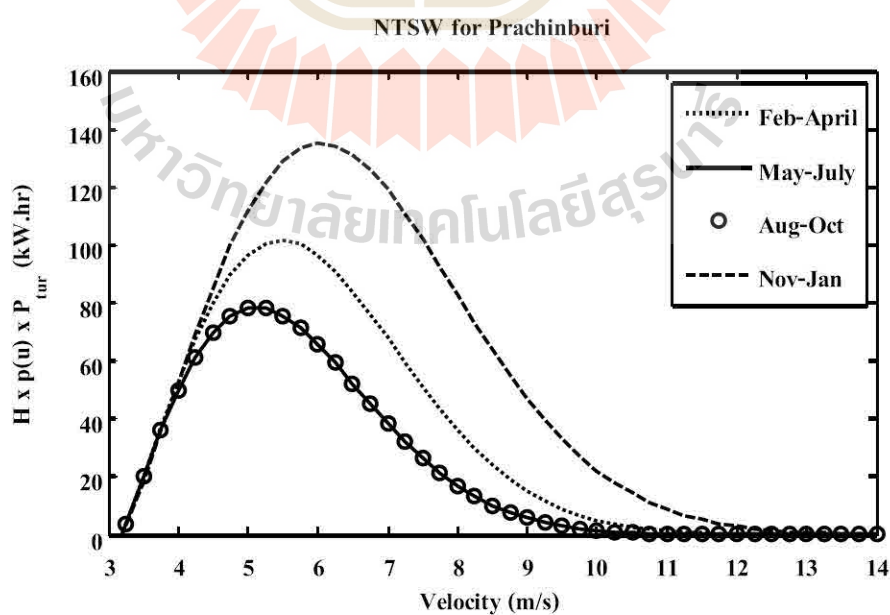
กลุ่มเดือน	Period work (W_p) และ AEP		
	CTSW (kW.hr)	NTSW (kW.hr)	เพิ่มขึ้น (%)
Feb-April	110.20	186.32	69.07
May-July	163.71	284.18	73.59
Aug-Oct	109.90	182.56	65.61
Nov-Jan	122.90	205.17	66.94
AEP	506.70	858.23	69.38

9.2.2 งานรายกลุ่มเดือนและงานรายปีที่ปฏิบัติงานในพื้นที่จังหวัดปราจีนบุรี

จากรูปที่ 9.4 และ 9.5 เป็นกราฟ $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ ของกรณี CTSW และ NTSW ตามลำดับ ซึ่งงานรายกลุ่มเดือน (Period work, W_p) ก็คือพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 9.4 และ 9.5

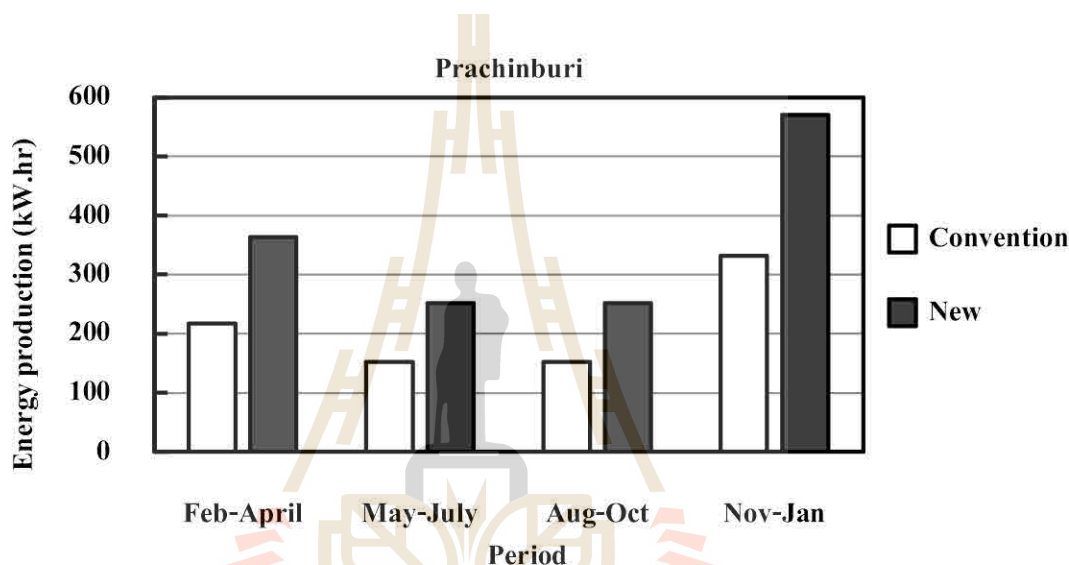


รูปที่ 9.4 $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ กิ่งहनलढढดั่งเดิม (CTSW) จังหวัดปราจีนบุรี



รูปที่ 9.5 $H \times p(U) \times P_{tur} - U$ กิ่งहनลढढแบบใหม่ (NTSW) จังหวัดปราจีนบุรี

ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 9.4 และ 9.5 จะทำให้ได้งานรายกลุ่มเดือน (W_p) ของกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (Conventional Thai sail windmill, CTSW) และกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ (New Thai sail windmill, NTSW) ตามลำดับ ของพื้นที่จังหวัดปราจีนบุรี ซึ่งแสดงผลแบบสรุปในรูปแบบกราฟแท่งดังรูปที่ 9.6 ซึ่งจะเห็นว่ากังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ให้งานรายกลุ่มเดือนสูงกว่ากังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิมในทุกช่วงกลุ่มเดือน ดังนั้นงานรายปี (AEP) ของกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ก็ย่อมจะสูงกว่ากังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิมตามไปด้วย ซึ่งจะเห็นว่าเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 68.23% ดังที่แสดงในตารางที่ 9.2



รูปที่ 9.6 งานรายกลุ่มเดือน CTSW และ NTSW จังหวัดนครราชสีมา

ตารางที่ 9.2 W_p และ AEP ของ CTSW และ NTSW จังหวัดปราจีนบุรี

กลุ่มเดือน	Period work (W_p) และ AEP		
	CTSW (kW.hr)	NTSW (kW.hr)	เพิ่มขึ้น (%)
Feb-April	217.15	363.64	67.46
May-July	152.42	251.52	65.02
Aug-Oct	152.42	251.52	65.02
Nov-Jan	332.26	570.42	71.68
<i>AEP</i>	854.24	1,437.11	68.23

9.3 ราคาการประกอบติดตั้งกังหันลม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงราคาการประกอบติดตั้ง (Initial cost of installation, IC) ของกังหันลม เพื่อลำแพนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 เมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้งานจริงทั้งกรณีแบบดั้งเดิม (CTSW) และกรณีแบบใหม่ (NTSW) เพื่อใช้เป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณหาต้นทุนพลังงาน (Cost of energy) ตารางที่ 9.3 แสดงคุณลักษณะ (Characteristic) และข้อมูลบางประการที่สำคัญของกังหันลมเพื่อลำแพนเพื่อแสดงข้อแตกต่างของกังหันลมทั้งสอง

ตารางที่ 9.3 คุณลักษณะกังหันลมเพื่อลำแพนแบบดั้งเดิมและแบบใหม่

ลักษณะ	แบบดั้งเดิม (CTSW)	แบบใหม่ (NTSW)
1. ทิศทางการวางตัวโรเตอร์	Upwind	Downwind
2. จำนวนเสา	2 เสา	1 เสา
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	4 เมตร	4 เมตร
4. จำนวนใบ/ความตันใบ	6 ใบ/ 28%	6 ใบ/ 28%
5. มุมพิกชปลายใบ	20 องศา	10 องศา
6. ระบบ Yaw (Yaw control)	ไม่มี	Passive yaw control
7. ประสิทธิภาพสูงสุด	27%	34%
8. งานรายปี (นครราชสีมา)	506.70 kW.hr	858.23 kW.hr
9. งานรายปี (ปราจีนบุรี)	854.24 kW.hr	1,437.11 kW.hr

ตารางที่ 9.4 และ 9.5 แสดงราคาวัสดุต่าง ๆ รวมถึงค่าแรงของการประกอบติดตั้งกังหันลม เพื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (CTSW) และแบบใหม่ (NTSW) ตามลำดับ ซึ่งเป็นเพียงวัสดุและค่าแรงในส่วนเฉพาะที่เป็นตัวกังหันลมเท่านั้น โดยที่ความจริงแล้วส่วนประกอบสำคัญอันอีกสองส่วนที่ต้องใช้ร่วมกับตัวกังหันลมเพื่อลำแพนด้วยเสมอก็คือ “ระหัดวิดน้ำ” และ “ระบบส่งกำลัง” ซึ่งสองส่วนนี้ถือเป็นส่วนประกอบสำคัญและมีราคาสูง แต่จะเห็นว่าในตารางที่ 9.4 และ 9.5 ไม่ได้แสดงราคาของส่วนนี้ไว้แต่อย่างใดเพราะว่าจะไม่นำข้อมูลส่วนนี้มาใช้ในการคำนวณต้นทุนพลังงาน เนื่องจากงานรายปีที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้ได้มาจากกังหันลมโดยตรงซึ่งไม่ได้ผ่านตัวระหัดวิดน้ำนั่นเอง ดังนั้นต้นทุนพลังงานที่กล่าวถึงในบทนี้คือต้นทุนพลังงานที่ไม่ได้รวมราคาระหัดวิดน้ำและระบบส่งกำลัง อย่างไรก็ตามจะกล่าวไว้เป็นข้อมูลเพิ่มเติมเท่านั้นดังนี้ ระหัดวิดความยาว 7 สอกจะมีราคาประมาณ 40,000 บาท ระบบส่งกำลังซึ่งใช้โซ่เป็นสายพานมีราคาประมาณ 10,000 บาท

ตารางที่ 9.4 ราคาวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (CTSW)

รายการ	จำนวน	ราคา (บาท)
1. โรเตอร์		
- ผ้าใบกันน้ำ	พื้นที่ 0.587 ตร.ม. × 6 ใบ	250
- ไม้ไผ่เฉียง	ขนาด 45 มม. × 6 ต้น	240
- ไม้อัดยาง	1.2 × 2.4 ตร.ม. × 1 แผ่น	480
- ดุมก้านใบ	1 ชุด	500
- เพลาไม้	100 มม. × 100 มม. × 5 ม.	2,000
- เชือกไนล่อน / ลวด	12 มม. × 20 ม. / 1 กก.	300
2. โครงสร้าง		
- เสาไม้	1 คู่ (12 เมตร)	4,800
- ฐานราก	2 ชุด	2,000
3. ค่าแรงและค่า Consume	กังหันลม 1 ตัว	10,570
<u>รวมทั้งหมด</u>		<u>21,140</u>

ตารางที่ 9.5 ราคาวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ (NTSW)

รายการ	จำนวน	ราคา (บาท)
1. โรเตอร์		
- ผ้าใบ	พื้นที่ 0.587 ตร.ม. × 6 ใบ	250
- ไม้ไผ่เฉียง	ขนาด 45 มม. × 6 ต้น	240
- ไม้อัดยาง	1.2 × 2.4 ตร.ม. × 1 แผ่น	480
- ดุมก้านใบ	1 ชุด	500
- ระบบ Passive yaw	1 ชุด	4,000
- ท่อเหล็กกลม	3 นิ้ว × 3 ม. × 1 เส้น	300
- เชือกไนล่อน	12 มม. × 20 เมตร	250
2. โครงสร้าง		
- ท่อเหล็กกลม	4 นิ้ว × 6 ม. × 1 เส้น	3,000
- ฐานราก	1 ชุด	1,000
3. ค่าแรงและค่า Consume	กังหันลม 1 ตัว	10,020
<u>รวมทั้งหมด</u>		<u>20,040</u>

9.4 ต้นทุนพลังงาน (Cost of energy)

จากตารางที่ 9.4 และ 9.5 แสดงต้นทุนการติดตั้ง (Initial cost of installation, IC) ของกังหันลมสี่ลำแพนแบบดั้งเดิมและแบบใหม่จะเห็นว่ามีความราคาประมาณ 21,140 และ 20,040 บาทตามลำดับ ซึ่งอาจดูเหมือนว่าราคาไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ว่าการประเมินเศรษฐศาสตร์กังหันลมจะต้องประเมินให้อยู่ในรูปของต้นทุนที่จ่ายต่อพลังงานที่ได้รับหรือที่เรียกว่าต้นทุนพลังงาน (COE) นั่นเอง เมื่อพิจารณาดังนี้จึงจะทำให้เห็นได้ชัดเจนว่าต้นทุนที่แท้จริงของกังหันลมทั้งสองแบบนี้มีความแตกต่างกันอย่างไร จากสมการที่ 3.28 (ในบทที่ 3) เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาต้นทุนพลังงานซึ่งผลที่คำนวณออกมาจะมีหน่วยเป็นจำนวนเงินต่อกิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี สมการนี้มี 2 พจน์ประกอบด้วย พจน์ที่ 1 คือ ราคาการติดตั้งกังหันลม (IC) ซึ่งจะพิจารณาเป็นต้นทุนต่อปี กล่าวคือ ราคาการติดตั้งทั้งหมดคูณด้วยดอกเบี้ยเงินกู้ (FCR) โดยที่สมมุติว่ากู้เงินจากธนาคารด้วยอัตราดอกเบี้ยค่าหนึ่งแล้วผ่อนจ่ายนั่นเอง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อัตราดอกเบี้ยเงินกู้เท่ากับ 7% (พ.ศ. 2559) พจน์ที่ 2 คือ ราคาการบำรุงรักษา (Annual operation and maintenance cost, AOM) ซึ่งพิจารณาเป็นรายปีเช่นกัน ส่วนใหญ่แล้วค่านี้มักจะประมาณค่าเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ของต้นทุนการติดตั้ง สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ราคาการบำรุงรักษาต่อปีเท่ากับ 3% ของราคาการติดตั้ง (Spera, 1998) ในการประเมินต้นทุนพลังงานของกังหันลมทั้งสองแบบ

9.4.1 ประเมินต้นทุนพลังงานในจังหวัดนครราชสีมา

1) กังหันลมสี่ลำแพนแบบดั้งเดิม (CTSW)

แทนค่าราคาการติดตั้ง (IC) อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (FCR) ราคาการบำรุงรักษาต่อปี (AOM) ของกังหันลมสี่ลำแพนแบบดั้งเดิม และงานรายปี (AEP) ในสมการที่ 3.28 จะได้ว่า

$$COE|_{CTSW} = \frac{21,140 \times 0.07 + 21,140 \times 0.03}{506.70} = 4.17 \frac{\text{Bath}}{\text{kW} \cdot \text{hr} \times \text{year}}$$

2) กังหันลมสี่ลำแพนแบบใหม่ (NTSW)

แทนค่าราคาการติดตั้ง (IC) อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (FCR) ราคาการบำรุงรักษาต่อปี (AOM) ของกังหันลมสี่ลำแพนแบบใหม่ และงานรายปี (AEP) ในสมการที่ 3.28 จะได้ว่า

$$COE|_{NTSW} = \frac{20,040 \times 0.07 + 20,040 \times 0.03}{858.23} = 2.34 \frac{\text{Bath}}{\text{kW} \cdot \text{hr} \times \text{year}}$$

9.4.2 ประเมินต้นทุนพลังงานในจังหวัดปราจีนบุรี

1) กังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (CTSW)

แทนค่าราคาการติดตั้ง (IC) อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (FCR) ราคาการบำรุงรักษาต่อปี (AOM) ของกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม และงานรายปี (AEP) ในสมการที่ 3.28 จะได้ว่า

$$COE|_{CTSW} = \frac{21,140 \times 0.07 + 0.03 \times 21,140}{854.24} = 2.47 \frac{\text{Bath}}{\text{kW} \cdot \text{hr} \times \text{year}}$$

2) กังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ (NTSW)

แทนค่าราคาการติดตั้ง (IC) อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (FCR) ราคาการบำรุงรักษาต่อปี (AOM) ของกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ และงานรายปี (AEP) ในสมการที่ 3.28 จะได้ว่า

$$COE|_{NTSW} = \frac{20,040 \times 0.07 + 0.03 \times 20,040}{1437.11} = 1.39 \frac{\text{Bath}}{\text{kW} \cdot \text{hr} \times \text{year}}$$

ตารางที่ 9.6 ต้นทุนพลังงานกังหันลมเสื่อลำแพนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 เมตร

จังหวัด	ต้นทุนพลังงาน (Bath / (kW.hr × year))		ลดลง (%)
	แบบดั้งเดิม (CTSW)	แบบใหม่ (NTSW)	
นครราชสีมา	4.17	2.34	42.74
ปราจีนบุรี	2.47	1.39	43.72
ลดลง (%)	40.77	40.60	N/A

จากการคำนวณต้นทุนพลังงานพบว่ากังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ (NTSW) มีต้นทุนพลังงานต่ำกว่ากังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (CTSW) 43.23% โดยเฉลี่ย และต้นทุนพลังงานของกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ที่ใช้งานในจังหวัดปราจีนบุรีต่ำกว่าจังหวัดนครราชสีมา 40.60% ดังที่แสดงในตารางที่ 9.6 เนื่องจากจังหวัดปราจีนบุรีมีสถิติลมที่ดีกว่า

บทที่ 10

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

10.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากังหันลมเสื้อลำแพนด้วยวิธีการทดลองและทฤษฎีไปพร้อมกันโดยมีจุดประสงค์เพื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและลดต้นทุนการติดตั้ง วิธีการคือทำการปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาค่าที่ดีที่สุด เช่น ความเร็วรอบ มุมพิชปลายใบ ความดันใบ จำนวนใบ รวมถึงการปิดปลายใบ และการปรับเปลี่ยนการวางตัวโรเตอร์ โดยใช้หุ่นจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตรในการทดลอง นอกจากนี้ยังได้ทำการคำนวณหาแนวรายปีเปรียบเทียบระหว่างหุ่นจำลองแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ และสุดท้ายได้ทำการประเมินเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นโดยวิเคราะห์ในรูปแบบของต้นทุนพลังงานของกังหันลมเสื้อลำแพนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 เมตร

10.2 สรุปผลการวิจัย

ประการที่ 1 หุ่นจำลองกังหันลมเสื้อลำแพนแบบ Downwind กรณีแบบ 6 ใบให้ประสิทธิภาพพลังงานต่ำกว่าแบบ Upwind เล็กน้อย คือ 25% และ 26% ตามลำดับ แต่จะได้ประโยชน์อย่างมากจากการเป็นระบบสายหาลมได้ด้วยตัวเอง (Passive yaw control) โดยไม่ต้องมีแพนหาง (Tail-fin) อีกทั้งยังลดจำนวนเสาเหลือเพียงเสาเดียวทำให้สามารถลดราคาการติดตั้งได้มาก

ประการที่ 2 หุ่นจำลองกังหันลมเสื้อลำแพนแบบ Downwind กรณีแบบ 6 ใบให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุด รองลงมาคือหุ่นจำลองแบบ 4 ใบ และแบบ 3 ใบ โดยได้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดคือ 25% ($C_{P,max} = 0.25$) 17% ($C_{P,max} = 0.17$) และ 13% ($C_{P,max} = 0.13$) ตามลำดับ

ประการที่ 3 มุมพิชปลายใบที่ดีที่สุดสำหรับกังหันลมเสื้อลำแพนคือ 10 องศาสำหรับกรณีแบบ 6 ใบ และ 5 องศาสำหรับกรณีแบบ 4 ใบ และแบบ 3 ใบ

ประการที่ 4 ความดันใบที่ดีที่สุดของกังหันลมเสื้อลำแพนคือ 28% โดยให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดในทุกกรณี

ประการที่ 5 สำหรับการปิดปลายใบ กรณีหุ่นจำลองกังหันลมเสื้อลำแพนแบบ 6 ใบ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดจากเดิม 25% ($C_{P,max} = 0.25$) เป็น 34% ($C_{P,max} = 0.34$) เพิ่มขึ้นคิดเป็น 36% และกรณีหุ่นจำลองกังหันลมเสื้อลำแพนแบบ 4 ใบ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดจากเดิม 17% ($C_{P,max} = 0.17$) เป็น 22% ($C_{P,max} = 0.22$) เพิ่มขึ้นคิดเป็น 29.4%

ประการที่ 6 กรณีหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (Upwind แบบ 6 ใบ) ให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 41.59 kW.hr และ 69.80 kW.hr สำหรับจังหวัดนครราชสีมา และปราจีนบุรี ตามลำดับ กรณีหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ (Downwind แบบ 6 ใบ) ที่ทำการปิดปลายใบให้งานรายปีสูงสุดเท่ากับ 56.82 kW.hr และ 95.13 kW.hr สำหรับจังหวัดนครราชสีมา และปราจีนบุรี ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ากังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ให้งานรายปีสูงขึ้น และจะเห็นว่าจังหวัดปราจีนบุรี ให้งานรายปีสูงกว่าจังหวัดนครราชสีมาเนื่องจากมีสถิติลมที่ดีกว่านั่นเอง

ประการที่ 7 กังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม (CTSW) มีต้นทุนพลังงานเท่ากับ 4.17 และ 2.47 Bath / (kW.hr × year) ของจังหวัดนครราชสีมาและปราจีนบุรี ตามลำดับ และสำหรับกังหันลมเสื่อลำแพนแบบใหม่ (NTSW) มีต้นทุนพลังงานเท่ากับ 2.34 และ 1.39 Bath / (kW.hr × year) ของจังหวัดนครราชสีมาและปราจีนบุรี ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าต่ำกว่ากังหันลมแบบดั้งเดิม 43.74% และ 43.72% ของจังหวัดนครราชสีมาและปราจีนบุรี ตามลำดับ และจะเห็นว่าต้นทุนพลังงานของกังหันลมในจังหวัดปราจีนบุรีจะต่ำกว่าจังหวัดนครราชสีมาเนื่องจากมีสถิติลมที่ดีกว่านั่นเอง ทั้งนี้ ต้นทุนพลังงานดังกล่าวเป็นต้นทุนพลังงานของกังหันลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 เมตรและไม่คิดต้นทุนของระหัดวิดน้ำและระบบส่งกำลัง

10.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองในกรณีหุ่นจำลองแบบ 6 ใบจะเห็นว่ามุมพิชปลายใบ 2 มุมที่ดีที่สุดคือ $\beta_2 = 10^\circ$ และ $\beta_3 = 15^\circ$ โดยให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดคือ 25% และ 23% ตามลำดับ ถ้าหากทำการทดลองโดยแบ่งย่อยมุมพิชปลายใบให้มากขึ้น อาจพบค่าที่ดีที่สุดอยู่ในระหว่างค่าของสองมุมนี้ ในทำนองเดียวกัน ค่าความดันใบ 2 ค่าที่ดีที่สุดคือ 28% และ 34% ซึ่งความจริงแล้วยังสามารถแบ่งย่อยการทดลองให้ถี่มากขึ้นเพื่อที่จะทดลองหาค่าที่ดีที่สุดให้มีความถูกต้องมากขึ้น อีกทั้งควรทำการทดลองขยายขนาด (Scale) ให้ใหญ่ขึ้นโดยอาจใช้รัศมีประมาณ 3.0 เมตร

สำหรับการประเมินสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) หรือประสิทธิภาพพลังงาน ($C_p \times 100\%$) ด้วยทฤษฎี BEM ยังมีจุดที่คลาดเคลื่อนจากการทดลองพอสมควรนั้นเกิดจากค่า C_l และ C_d ของใบกังหันที่ยังมีความไม่ถูกต้องมากนัก ซึ่งเกิดจากการที่ประเมินค่านี้จากการพิจารณาใน 2 มิติเท่านั้น ถ้าหากพิจารณาผลกระทบใน 3 มิติอาจจะทำให้ผลการประเมินมีความแม่นยำมากขึ้น อีกทั้งการวัดลักษณะหน้าตัดใบยังมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากทำการวัดลักษณะหน้าตัดใบจากการตั้งค่ามุมพิชปลายใบเพียงมุมเดียวคือ 10 องศา ทำให้ผลการประเมินประสิทธิภาพหุ่นจำลองที่ใช้มุมพิชปลายค่าอื่นยังมีความคลาดเคลื่อน รวมถึงตำแหน่งการวัดข้อมูลใบกังหันลมอาจน้อยเกินไป (11 ตำแหน่ง) ซึ่งหากต้องการที่จะให้ผลการประเมินมีความถูกต้องมากขึ้นควรวัดข้อมูลให้มีความละเอียดมากขึ้น

รายการอ้างอิง

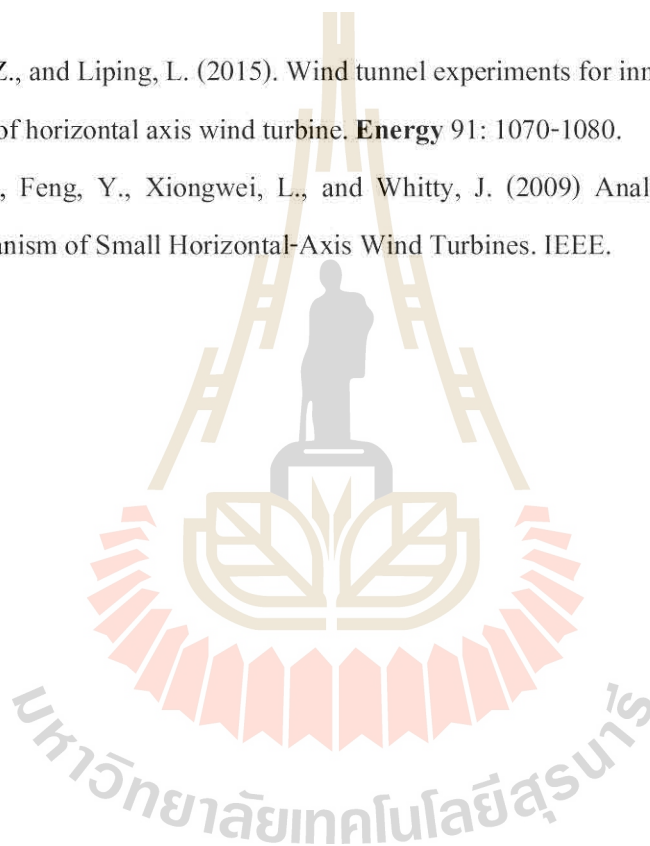
- ชโลธร ธรรมแท้ (2552). กระบวนการเชิงตัวเลขที่แม่นยำเพื่อสอบเทียบการออกแบบกังหันลมเชิงทฤษฎี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2553) กลศาสตร์ของไหล. McGrawHill Education
- วิกันดา ศรีเดช และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2551). การออกแบบกังหันลมให้สอดคล้องกับสถิติลมจำเพาะพื้นที่, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดปทุมธานี
- วิกันดา ศรีเดช (2556). กังหันลมแบบไม่ปรับมุมเฟินที่ให้รายได้ต่อปีสูงสุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Blazek, J. (2005). **Computational fluid dynamics: principles and applications**. Elsevier.
- Bottasso, C.L., Campagnolo, F., and Petrovic, V. (2014). Wind tunnel testing of scaled wind turbine models: Beyond aerodynamics. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 127: 11-28.
- Buhl, J.L. (2005, August). A new empirical relationship between thrust coefficient and induction factor for the turbulent windmill state. Technical report NREL/TP-500-36834. National Renewable Energy Laboratory, Colorado.
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., and Bossanyi, E. (2011) **Wind energy handbook**. John Wiley & Son.
- Chen, T.Y., and Liou, L.R. (2011) Blockage corrections in wind tunnel tests of small horizontal-axis wind turbines. **Experimental Thermal and Fluid Science** 35: 565-569.
- Choudhry, A., Arjomandi, M., and Kelso, R. (2016) Methods to control dynamic stall for wind turbine applications. **Renewable Energy** 86: 26-37.
- Dekker, Th.A.H. (1977). Performance characteristics of some sail and steel-bladed windrotors. **Steering Committee for Winde Eergy in Developing Countries**.
- Exell, R.H.B. (1981). Surface wind distributions in Thailand. **Journal of the Science Society of Thailand** 7: 154-169.

- Fleming, P.D. and Probert, S.D. (1982). Power Augmentation of Cheap, Sail- Type, Horizontal-Axis Wind-Turbines. **Journal of Applied Energy** 12: 53-70.
- Fleming, P.D., Probert, S.D., and Arithoppah, S. (1983). Do Centre-bodies Improve the Performance of Horizontal-axis, Sail-type Wind-turbines? **Journal of Applied Energy** 14: 123-130.
- Fleming, P.D., Probert S.D., and Arithoppah, S. (1984). Design Optimisation of Cheap Power-Augmentation Devices for a Flexible-Sail, Horizontal- Axis Wind-Turbine. **Journal of Applied Energy** 17: 169-180.
- Giguere, P, and Selig, M.S. (1997). Aerodynamic Blade Design Methods for Horizontal AxisWind turbines. In **13th Annual Canadian Wind Energy Association Conference and Exhibition**. Quebec City, Canada.
- Gipe P. (2004). **Wind power**. James & James (Science Publishers).
- Griffiths, R.T. (1983). Centre Body Effects on Horizontal Axis Wind Turbines. **Journal of Applied Energy** 13: 183-194.
- Hand, M.M., Simms, D.A., Fingersh, L.J., Jager, D.W., Cotrell, J.R., Schreck, S., and Larwood, S.M. (2001, December). Unsteady aerodynamics experiment Phases VI: Wind tunnel test configurations and available data campaigns. Technical Report NREL/TP-500-29955, National Renewable Energy Laboratory, Colorado.
- Jonkman, J.M. (2003). Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST_AD [online]. **National Renewable Energy Laboratory**. Item: NREL/TP-500-34755.
- Khan, M.A., Pillay, P., and Visser, K.D. (2005) On Adapting a Small PM Wind Generator for a Multiblade, High Solidity Wind Turbine. *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 20, no. 3,
- Kim, M-G. (2014). Yaw Systems for wind turbines - Overview of concepts, current challenges and design methods, **Journal of Physics: Conference Series** 524. doi:10.1088/1742-6596/524/1/012086
- Kishore, R.A., and Priya, Sh. (2013) Design and experimental verification of a high efficiency small wind energy portable turbine (SWEPT) **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 118: 12-19.
- Kress, C., Chokani, N., and Abhari, R.S. (2015) Downwind wind turbine yaw stability and performance. *Renewable Energy* 83: 1157-1165.

- Lanzafame, R. and Messina, M. (2007). Fluid Dynamics Wind Turbine Design: Critical Analysis, Optimization and Application of BEM Theory. **Renewable Energy**. 32: 2291-2305.
- Lanzafame, R. and Meaana, M. (2008). Design and performance of a double-pitch wind turbine with non-twisted-blades. **Renewable energy**. Vol. 34. pp. 1413 – 1420.
- Lanzafame, R., Mauro, S., and Messina, M. (2015). HAWT Design and Performance Evaluation: Improving the BEM theory Mathematical Models. **Energy Procedia** 82: 172-179.
- Larsen, J.W., Nielsen, S.R.K., and Krenk, S. (2007). Dynamic stall model for wind turbine airfoils. **Journal of Fluids and Structures** 23: 959-982.
- Maalawi, K.Y. and Badawy, M.T.S. (2001). A Direct Method for Evaluating Performance of Horizontal Axis Wind Turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 5: 175-190.
- Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L. (2009). **Wind energy explained**. John Wiley & Son.
- Martínez, J., Bernabini, L., Probst, O., and Rodríguez, C. (2004). *An Improved BEM Model for the Power Curve Prediction of Stall-regulated Wind Turbines*. *Wind Energ.* **8**: 385–402. doi: 10.1002/we.147
- Maughmer, M.D. (1976). **Optimization and Characteristics of a Sailing Windmill Rotor**. Final report/AMS Report No. 1297. Princeton University.
- Mejia, E.R., Filipek, J.W., and Salazar, J.T. (2003) A cheap, reliable and efficient regulator for small horizontal-axis wind-turbines. **Applied Energy** 74: 229-237.
- Monteiro, J.P., Silvestre, M.R., Piggott, H., and André J. (2013). Wind tunnel testing of a horizontal axis wind turbine rotor and comparison with simulations from two Blade Element Momentum codes. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 123: 99-106.
- Moriarty, P.J., and Hansen, A.C. (2005, January). AeroDyn theory manual. Technical Report NREL/TP-500-36881
- Mukhia, P. (1981). **Performance and aerodynamic analysis of the Thai four bladed wooden rotor coupled to a ladder pump**. Master Thesis, Asian Institute of Technology.
- Nelson, V. (2009) **Wind energy**. CRC press.

- Nordanger, K., Holdahl, R., Kvamsdal, T., Kvarving, A.M., and Rasheed, A. (2015) Simulation of airflow past a 2D NACA0015 airfoil using an isogeometric incompressible Navier-Stokes solver with the Spalart-Allmaras turbulence model. **Comput. Methods Appl. Mech. Engrg** 290: 183-208.
- Ockfen, A.E. and Matveev, K.I. (2009) Aerodynamic characteristics of NACA 4412 airfoil section with flap in extreme ground effect. *Inter J Nav Archit Oc Engng* 1: 1-12.
- Oner, Y., Ozcira, S., Bekiroglu, N., and Senol, I. (2013) A comparative analysis of wind power density prediction methods for C- anakkale, Intepe region, Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 23: 491-502.
- Qing'an, L., Junsuke, M., Masayuki, E., Takao, M., and Yasunari, K. (2016) Experimental and numerical investigation of the effect of turbulent inflow on a Horizontal Axis Wind Turbine (Part I: Power performance). **Energy** 113: 713-722.
- Pratumnopharat, P. and Leung, P.S. (2011) Validation of various windmill brake state models used by blade element momentum calculation. **Renewable Energy** 36: 3222-3227.
- Snel, H., Houwink, R., and Bosschers, J. (1993). Sectional prediction of lift coefficients on rotating wind turbine blades in stall. ECN-C-93-052
- Song, Q. (2012). **Design, fabrication, and testing of a new small wind turbine blade**. Master Thesis, The University of Guelpe.
- Spera, A.D. (1998). **Wind turbine technology: fundamental concepts of wind turbine engineering**. ASME Press.
- Sudhamshu, A.R., Manik, C.P., Nivedh, S., Satish, N.S. and Vivek, M. (2016) Numerical study of effect of pitch angle on performance characteristics of a HAWT. *Engineering Science and Technology,an International Journal* 19: 632-641.
- Tangler, J.L. and Kocurek, J.D. (2005). Wind turbine post-stall airfoil performance characteristics guidelines for blade-element momentum methods Technical Report NREL/CP-500-36900, National Renewable Energy Laboratory, Colorado.
- Thep Wong, R. (2013). **Design improvements of Thai sail windmill for water pumping**. Ph.D Thesis, Rajamangala University of Technology Rattanakosin.
- Thumtae, C. and Chitsomboon, T. (2009). Optimal angle of attack for untwisted blade wind turbine. **Renewable Energy** 34: 1279-1284.

- Thumtae, C. and Chitsomboon, T. (2012). **The effect of wind speed and wind statistics skewed on the commercial wind turbine in Thailand.** The 26 th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Chengrai.
- Thumtae, C. (2015). Optimum Blade Profiles for a Variable-Speed Wind Turbine in Low Wind Area. **Energy Procedia** 75: 651-657.
- United Nations. (1976). **Proceedings of the meeting of the expert working group on the use of solar and wind energy.** Report of the wind energy/Energy resources development series no.16.
- Wei, X., Pan, Z., and Liping, L. (2015). Wind tunnel experiments for innovative pitch regulated blade of horizontal axis wind turbine. **Energy** 91: 1070-1080.
- Wenzhuan, C., Feng, Y., Xiongwei, L., and Whitty, J. (2009) Analysis of the Passive Yaw Mechanism of Small Horizontal-Axis Wind Turbines. IEEE.





ภาคผนวก ก

ข้อมูลการวัด

จากการทดลองหาประสิทธิภาพของหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนด้วยวิธี Tow testing ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 6 ซึ่งได้ผลการวัด และจะนำเสนอโดยแบ่งเป็นหัวข้อการทดลองที่ ก.1-ก.6 ดังนี้

ก.1 การทดลองที่ 1

เป็นการทดลองหุ่นจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนแบบ 6 ใบ วางตำแหน่งโรเตอร์แบบ Upwind โดยทดลองเฉพาะความดันใบ 28% ซึ่งเป็นความดันใบของกังหันลมดั้งเดิม และทดลองที่ความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที และแปรผันค่ามุมพิชปลายใบ 4 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.1-ก.4

ตารางที่ ก.1 Upwind-TSW แบบ 6 ใบ ที่ความดันใบ 28% และมุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	400	0.00	41.89	0.00	83.76	0.00	3.88
0.10	0.40	385	0.13	40.32	5.34	83.76	0.06	3.73
0.15	0.65	370	0.22	38.75	8.55	83.76	0.10	3.59
0.20	0.80	360	0.26	37.70	9.99	83.76	0.12	3.49
0.30	1.00	350	0.31	36.65	11.33	83.76	0.14	3.39
0.40	1.40	330	0.44	34.56	15.26	83.76	0.18	3.20
0.50	1.80	300	0.57	31.42	18.03	83.76	0.22	2.91
0.55	2.00	270	0.64	28.27	18.10	83.76	0.22	2.62
0.60	2.00	0	0.62	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.2 Upwind-TSW แบบ 6 ใบ ที่ความดันใบ 28% และมุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	360	0.00	37.70	0.00	83.76	0.00	3.49
0.10	0.40	340	0.13	35.60	4.72	83.76	0.06	3.30
0.20	0.70	330	0.22	34.56	7.63	83.76	0.09	3.20
0.25	0.85	320	0.26	33.51	8.88	83.76	0.11	3.10
0.30	1.00	315	0.31	32.99	10.19	83.76	0.12	3.06
0.35	1.40	295	0.46	30.89	14.32	83.76	0.17	2.86

ตารางที่ ก.2 Upwind-TSW แบบ 6 ใบ ที่ความดันใบ 28% และมุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ (ต่อ)

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.40	1.60	285	0.53	29.85	15.81	83.76	0.19	2.76
0.45	1.80	275	0.60	28.80	17.16	83.76	0.20	2.67
0.50	2.20	252	0.75	26.39	19.80	83.76	0.24	2.44
0.55	2.50	230	0.86	24.09	20.73	83.76	0.25	2.23
0.60	2.65	210	0.90	21.99	19.90	83.76	0.24	2.04
0.70	2.80	0	0.93	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.3 Upwind-TSW แบบ 6 ใบ ที่ความดันใบ 28% และมุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	320	0.00	33.51	0.00	83.76	0.00	3.10
0.10	0.45	290	0.15	30.37	4.69	83.76	0.06	2.81
0.25	1.10	270	0.38	28.27	10.61	83.76	0.13	2.62
0.40	1.60	250	0.53	26.18	13.87	83.76	0.17	2.42
0.50	2.00	230	0.66	24.09	15.95	83.76	0.19	2.23
0.60	2.40	210	0.79	21.99	17.47	83.76	0.21	2.04
0.70	2.90	190	0.97	19.90	19.32	83.76	0.23	1.84
0.80	3.30	160	1.10	16.76	18.49	83.76	0.22	1.55
0.90	3.20	0	1.02	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.4 Upwind-TSW แบบ 6 ใบ ที่ความดันใบ 28% และมุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	295	0.00	30.89	0.00	83.76	0.00	2.86
0.10	0.50	275	0.18	28.80	5.09	83.76	0.06	2.67
0.15	0.90	260	0.33	27.23	9.01	83.76	0.11	2.52

ตารางที่ ก.4 Upwind-TSW แบบ 6 ใบ ที่ความดันใบ 28% และมุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ (ต่อ)

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.20	1.20	250	0.44	26.18	11.56	83.76	0.14	2.42
0.25	1.40	240	0.51	25.13	12.76	83.76	0.15	2.33
0.30	1.80	220	0.66	23.04	15.26	83.76	0.18	2.13
0.40	2.20	200	0.79	20.94	16.64	83.76	0.20	1.94
0.50	2.60	175	0.93	18.33	16.99	83.76	0.20	1.70
0.60	2.80	160	0.97	16.76	16.27	83.76	0.19	1.55
0.80	3.00	0	0.97	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ก.2 การทดลองที่ 2

เป็นการทดลองหุน้ำลองกังหันลมสี่ลำเพนแบบ 6 ใบ ของการวางตำแหน่งโรเตอร์แบบ Downwind โดยทดลองเฉพาะความดันใบ 28% และใช้ความเร็วลมทดสอบ 3 ค่าคือ 4.2 เมตร/วินาที 5.6 เมตร/วินาที และ 7.0 เมตร/วินาที และแปรผันมุมพิชปลายใบ 4 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.5-ก.16

ก.2.1 ผลการทดลองโดยใช้ความเร็วลมทดสอบ 4.2 เมตร/วินาที

เมื่อทำการแปรผันค่ามุมพิชปลายใบ 4 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.5-ก.8

ตารางที่ ก.5 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ ทดสอบด้วยความเร็วลม 4.2 เมตร/วินาที

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	300	0.00	31.42	0.00	35.33	0.00	3.88
0.05	0.35	300	0.13	31.42	4.16	35.33	0.12	3.88
0.10	0.60	280	0.22	29.32	6.47	35.33	0.18	3.62
0.20	0.80	260	0.26	27.23	7.21	35.33	0.20	3.36
0.25	0.90	240	0.29	25.13	7.21	35.33	0.20	3.10
0.30	1.00	230	0.31	24.09	7.44	35.33	0.21	2.97
0.35	1.10	224	0.33	23.46	7.77	35.33	0.22	2.90

ตารางที่ ก.5 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ ทดสอบด้วย
ความเร็วลม 4.2 เมตร/วินาที (ต่อ)

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.40	1.20	200	0.35	20.94	7.40	35.33	0.21	2.59
0.45	1.25	190	0.35	19.90	7.03	35.33	0.20	2.46
0.55	1.50	0	0.42	0.00	0.00	35.33	0.00	0.00

ตารางที่ ก.6 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ ทดสอบด้วย
ความเร็วลม 4.2 เมตร/วินาที

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	290	0.00	30.37	0.00	35.33	0.00	3.75
0.10	0.30	270	0.09	28.27	2.50	35.33	0.07	3.49
0.20	0.50	260	0.13	27.23	3.61	35.33	0.10	3.36
0.30	0.90	230	0.26	24.09	6.38	35.33	0.18	2.97
0.40	1.20	210	0.35	21.99	7.77	35.33	0.22	2.72
0.50	1.46	196	0.42	20.53	8.70	35.33	0.25	2.53
0.60	1.80	160	0.53	16.76	8.88	35.33	0.25	2.07
0.70	1.40	0	0.31	0.00	0.00	35.33	0.00	0.00

ตารางที่ ก.7 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$ ทดสอบด้วย
ความเร็วลม 4.2 เมตร/วินาที

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	240	0.00	25.13	0.00	35.33	0.00	3.10
0.10	0.30	225	0.09	23.56	2.08	35.33	0.06	2.91
0.20	0.60	208	0.18	21.78	3.85	35.33	0.11	2.69
0.25	1.00	190	0.33	19.90	6.59	35.33	0.19	2.46

ตารางที่ ก.7 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$ ทดสอบด้วย
ความเร็วลม 4.2 เมตร/วินาที (ต่อ)

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.30	1.20	170	0.40	17.80	7.07	35.33	0.20	2.20
0.35	1.50	150	0.51	15.71	7.97	35.33	0.23	1.94
0.40	1.60	140	0.53	14.66	7.77	35.33	0.22	1.81
0.45	1.70	130	0.55	13.61	7.51	35.33	0.21	1.68

ตารางที่ ก.8 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ ทดสอบด้วย
ความเร็วลม 4.2 เมตร/วินาที

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	235	0.00	24.61	0.00	35.33	0.00	3.04
0.10	0.30	220	0.09	23.04	2.03	35.33	0.06	2.85
0.20	0.60	205	0.18	21.47	3.79	35.33	0.11	2.65
0.30	0.90	190	0.26	19.90	5.27	35.33	0.15	2.46
0.40	1.20	170	0.35	17.80	6.29	35.33	0.18	2.20
0.50	1.50	150	0.44	15.71	6.93	35.33	0.20	1.94
0.60	1.70	132	0.49	13.82	6.71	35.33	0.19	1.71

ก.2.2 ผลการทดลองโดยใช้ความเร็วลมทดสอบ 5.6 เมตร/วินาที

เมื่อทำการแปรผันค่ามุมพิชปลายใบ 4 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.9-ก.12

ตารางที่ ก.9 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ ทดสอบด้วย
ความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	400	0.00	41.89	0.00	83.76	0.00	3.88
0.10	0.40	385	0.13	40.32	5.34	83.76	0.06	3.73

ตารางที่ ก.9 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ ทดสอบด้วย
ความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที (ต่อ)

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.15	0.65	370	0.22	38.75	8.55	83.76	0.10	3.59
0.20	0.80	360	0.26	37.70	9.99	83.76	0.12	3.49
0.30	1.00	350	0.31	36.65	11.33	83.76	0.14	3.39
0.40	1.40	330	0.44	34.56	15.26	83.76	0.18	3.20
0.50	1.80	300	0.57	31.42	18.03	83.76	0.22	2.91
0.55	2.00	270	0.64	28.27	18.10	83.76	0.22	2.62
0.60	2.00	0	0.62	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.10 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ ทดสอบ
ด้วยความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	360	0.00	37.70	0.00	83.76	0.00	3.49
0.10	0.40	340	0.13	35.60	4.72	83.76	0.06	3.30
0.20	0.70	330	0.22	34.56	7.63	83.76	0.09	3.20
0.25	0.85	320	0.26	33.51	8.88	83.76	0.11	3.10
0.30	1.00	315	0.31	32.99	10.19	83.76	0.12	3.06
0.35	1.4	295	0.46	30.89	14.32	83.76	0.17	2.86
0.40	1.60	285	0.53	29.85	15.81	83.76	0.19	2.76
0.45	1.8	275	0.60	28.80	17.16	83.76	0.20	2.67
0.50	2.20	252	0.75	26.39	19.80	83.76	0.24	2.44
0.55	2.5	230	0.86	24.09	20.73	83.76	0.25	2.23
0.60	2.65	210	0.90	21.99	19.90	83.76	0.24	2.04
0.70	2.80	0	0.93	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.11 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$ ทดสอบ
ด้วยความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	320	0.00	33.51	0.00	83.76	0.00	3.10
0.10	0.45	290	0.15	30.37	4.69	83.76	0.06	2.81
0.25	1.10	270	0.38	28.27	10.61	83.76	0.13	2.62
0.40	1.60	250	0.53	26.18	13.87	83.76	0.17	2.42
0.50	2.00	230	0.66	24.09	15.95	83.76	0.19	2.23
0.60	2.40	210	0.79	21.99	17.47	83.76	0.21	2.04
0.70	2.90	190	0.97	19.90	19.32	83.76	0.23	1.84
0.80	3.30	160	1.10	16.76	18.49	83.76	0.22	1.55
0.90	3.20	0	1.02	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.12 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ ทดสอบ
ด้วยความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	295	0.00	30.89	0.00	83.76	0.00	2.86
0.10	0.50	275	0.18	28.80	5.09	83.76	0.06	2.67
0.15	0.9	260	0.33	27.23	9.01	83.76	0.11	2.52
0.20	1.20	250	0.44	26.18	11.56	83.76	0.14	2.42
0.25	1.40	240	0.51	25.13	12.76	83.76	0.15	2.33
0.30	1.80	220	0.66	23.04	15.26	83.76	0.18	2.13
0.40	2.20	200	0.79	20.94	16.64	83.76	0.20	1.94
0.50	2.60	175	0.93	18.33	16.99	83.76	0.20	1.70
0.60	2.80	160	0.97	16.76	16.27	83.76	0.19	1.55
0.80	3.00	0	0.97	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ก.2.3 ผลการทดลองโดยใช้ความเร็วลมทดสอบ 7.0 เมตร/วินาที

ทำการแปรผันค่ามุมพิชปลายใบ 4 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.13-ก.16

ตารางที่ ก.13 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ ทดสอบด้วย
ความเร็วลม 7.0 เมตร/วินาที

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	540	0.00	56.55	0.00	163.52	0.00	4.19
0.10	0.40	525	0.13	54.98	7.28	163.52	0.04	4.07
0.20	0.80	500	0.26	52.36	13.87	163.52	0.08	3.88
0.30	1.40	460	0.49	48.17	23.39	163.52	0.14	3.57
0.40	1.90	440	0.66	46.08	30.51	163.52	0.19	3.41
0.50	2.50	400	0.88	41.89	36.98	163.52	0.23	3.10
0.60	2.80	360	0.97	37.70	36.61	163.52	0.22	2.79
0.70	3.00	320	1.02	33.51	34.02	163.52	0.21	2.48
0.90	3.50	0	1.15	0.00	0.00	163.52	0.00	0.00

ตารางที่ ก.14 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ ทดสอบ
ด้วยความเร็วลม 7.0 เมตร/วินาที

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	480	0.00	50.27	0.00	163.52	0.00	3.73
0.10	0.30	470	0.09	49.22	4.35	163.52	0.03	3.65
0.20	0.80	450	0.26	47.12	12.48	163.52	0.08	3.49
0.30	1.30	430	0.44	45.03	19.88	163.52	0.12	3.34
0.40	1.80	400	0.62	41.89	25.89	163.52	0.16	3.10
0.50	2.50	350	0.88	36.65	32.36	163.52	0.20	2.72
0.60	3.30	315	1.19	32.99	39.32	163.52	0.24	2.44
0.70	4.00	280	1.46	29.32	42.72	163.52	0.26	2.17
0.80	4.70	230	1.72	24.09	41.47	163.52	0.25	1.78

ตารางที่ ก.15 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$ ทดสอบ
ด้วยความเร็วลม 7.0 เมตร/วินาที

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	380	0.00	39.79	0.00	163.52	0.00	2.95
0.10	0.60	360	0.22	37.70	8.32	163.52	0.05	2.79
0.20	0.80	350	0.26	36.65	9.71	163.52	0.06	2.72
0.30	1.40	330	0.49	34.56	16.78	163.52	0.10	2.56
0.50	2.20	310	0.75	32.46	24.36	163.52	0.15	2.41
0.70	3.00	280	1.02	29.32	29.77	163.52	0.18	2.17
0.90	4.20	230	1.46	24.09	35.09	163.52	0.21	1.78
1.00	4.60	190	1.59	19.90	31.62	163.52	0.19	1.47
1.20	5.50	0	1.90	0.00	0.00	163.52	0.00	0.00

ตารางที่ ก.16 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ ทดสอบ
ด้วยความเร็วลม 7.0 เมตร/วินาที

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	370	0.00	38.75	0.00	163.52	0.00	2.87
0.10	0.60	355	0.22	37.18	8.21	163.52	0.05	2.75
0.20	0.90	345	0.31	36.13	11.16	163.52	0.07	2.68
0.30	1.20	335	0.40	35.08	13.94	163.52	0.09	2.60
0.40	1.60	315	0.53	32.99	17.47	163.52	0.11	2.44
0.50	1.90	305	0.62	31.94	19.74	163.52	0.12	2.37
0.60	2.20	295	0.71	30.89	21.82	163.52	0.13	2.29
0.70	2.80	275	0.93	28.80	26.70	163.52	0.16	2.13
0.80	3.40	255	1.15	26.70	30.65	163.52	0.19	1.98
0.85	3.60	235	1.21	24.61	29.88	163.52	0.18	1.82
0.90	3.60	0	1.19	0.00	0.00	163.52	0.00	0.00

ก.3 การทดลองที่ 3

เป็นการทดลองหุ่นจำลอง TSW แบบ 6 ใบ Downwind โดยทดลองเฉพาะที่ความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที ทำการทดลองแปรผันค่าความดันใบเพิ่มขึ้นและลดลงจากเดิม 20% ซึ่งก็คือความดันใบ 22% และความดันใบ 34% และแปรผันมุมพิชปลายใบ 4 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.17-ก.24

ก.3.1 ผลการทดลองที่ความดันใบ 22%

เมื่อทำการแปรผันค่ามุมพิชปลายใบ 4 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.17-ก.20

ตารางที่ ก.17 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	348	0.00	36.44	0.00	83.76	0.00	3.38
0.05	0.20	335	0.07	35.08	2.32	83.76	0.03	3.25
0.10	0.60	320	0.22	33.51	7.40	83.76	0.09	3.10
0.15	0.80	310	0.29	32.46	9.32	83.76	0.11	3.01
0.20	1.00	300	0.35	31.42	11.09	83.76	0.13	2.91
0.25	1.30	280	0.46	29.32	13.59	83.76	0.16	2.72
0.30	1.50	260	0.53	27.23	14.42	83.76	0.17	2.52
0.35	1.60	240	0.55	25.13	13.87	83.76	0.17	2.33
0.40	1.40	0	0.44	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.18 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	310	0.00	32.46	0.00	83.76	0.00	3.01
0.05	0.20	305	0.07	31.94	2.11	83.76	0.03	2.96
0.10	0.40	295	0.13	30.89	4.09	83.76	0.05	2.86
0.15	0.60	290	0.20	30.37	6.03	83.76	0.07	2.81
0.20	0.80	280	0.26	29.32	7.77	83.76	0.09	2.72
0.25	1.00	270	0.33	28.27	9.36	83.76	0.11	2.62

ตารางที่ ก.18 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ (ต่อ)

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.30	1.20	260	0.40	27.23	10.82	83.76	0.13	2.52
0.35	1.40	250	0.46	26.18	12.14	83.76	0.14	2.42
0.40	1.65	235	0.55	24.61	13.58	83.76	0.16	2.28
0.45	1.90	215	0.64	22.51	14.41	83.76	0.17	2.09
0.50	2.00	200	0.66	20.94	13.87	83.76	0.17	1.94
0.55	2.10	190	0.68	19.90	13.61	83.76	0.16	1.84
0.60	2.10	0	0.62	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.19 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	280	0.00	29.32	0.00	83.76	0.00	2.72
0.10	0.40	265	0.13	27.75	3.68	83.76	0.04	2.57
0.15	0.60	255	0.20	26.70	5.30	83.76	0.06	2.47
0.20	0.95	240	0.33	25.13	8.32	83.76	0.10	2.33
0.25	1.20	220	0.42	23.04	9.66	83.76	0.12	2.13
0.30	1.50	200	0.53	20.94	11.09	83.76	0.13	1.94
0.35	1.70	180	0.60	18.85	11.23	83.76	0.13	1.75
0.40	1.80	160	0.62	16.76	10.36	83.76	0.12	1.55
0.45	1.60	0	0.51	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.20 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	280	0.00	29.32	0.00	83.76	0.00	2.72
0.05	0.10	270	0.02	28.27	0.62	83.76	0.01	2.62

ตารางที่ ก.20 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$ (ต่อ)

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.10	0.40	260	0.13	27.23	3.61	83.76	0.04	2.52
0.15	0.70	240	0.24	25.13	6.10	83.76	0.07	2.33
0.20	1.00	220	0.35	23.04	8.14	83.76	0.10	2.13
0.25	1.30	200	0.46	20.94	9.71	83.76	0.12	1.94
0.30	1.50	180	0.53	18.85	9.99	83.76	0.12	1.75
0.35	1.60	170	0.55	17.80	9.82	83.76	0.12	1.65
0.40	1.40	0	0.44	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ก.3.2 ผลการทดลองที่ความดันใบ 34%

ทำการแปรผันค่ามุมพิชปลายใบ 4 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.21-ก.24

ตารางที่ ก.21 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	314	0.00	32.88	0.00	83.76	0.00	3.05
0.10	0.40	295	0.13	30.89	4.09	83.76	0.05	2.86
0.20	0.60	285	0.18	29.85	5.27	83.76	0.06	2.76
0.30	1.20	255	0.40	26.70	10.61	83.76	0.13	2.47
0.40	1.55	240	0.51	25.13	12.76	83.76	0.15	2.33
0.50	1.90	220	0.62	23.04	14.24	83.76	0.17	2.13
0.60	2.30	200	0.75	20.94	15.72	83.76	0.19	1.94
0.70	2.70	180	0.88	18.85	16.64	83.76	0.20	1.75
0.80	3.00	160	0.97	16.76	16.27	83.76	0.19	1.55
0.90	3.40	0	1.10	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.22 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	280	0.00	29.32	0.00	83.76	0.00	2.72
0.10	0.40	260	0.13	27.23	3.61	83.76	0.04	2.52
0.20	0.80	245	0.26	25.66	6.80	83.76	0.08	2.38
0.30	1.40	220	0.49	23.04	11.19	83.76	0.13	2.13
0.40	2.00	200	0.71	20.94	14.79	83.76	0.18	1.94
0.50	3.00	160	1.10	16.76	18.49	83.76	0.22	1.55
0.60	3.60	133	1.32	13.93	18.45	83.76	0.22	1.29
0.70	4.00	118	1.46	12.36	18.00	83.76	0.21	1.14
0.80	2.80	0	0.88	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.23 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	240	0.00	25.13	0.00	83.76	0.00	2.33
0.10	0.20	235	0.04	24.61	1.09	83.76	0.01	2.28
0.20	0.70	220	0.22	23.04	5.09	83.76	0.06	2.13
0.30	1.20	200	0.40	20.94	8.32	83.76	0.10	1.94
0.40	1.60	190	0.53	19.90	10.54	83.76	0.13	1.84
0.50	2.00	170	0.66	17.80	11.79	83.76	0.14	1.65
0.60	2.60	150	0.88	15.71	13.87	83.76	0.17	1.45
0.70	3.00	130	1.02	13.61	13.82	83.76	0.17	1.26
0.80	3.50	110	1.19	11.52	13.73	83.76	0.16	1.07
0.90	4.00	90	1.37	9.42	12.90	83.76	0.15	0.87
1.10	4.10	0	1.32	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.24 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	232	0.00	24.30	0.00	83.76	0.00	2.25
0.10	0.40	220	0.13	23.04	3.05	83.76	0.04	2.13
0.20	0.60	210	0.18	21.99	3.88	83.76	0.05	2.04
0.30	1.20	190	0.40	19.90	7.91	83.76	0.09	1.84
0.40	1.60	175	0.53	18.33	9.71	83.76	0.12	1.70
0.50	2.00	165	0.66	17.28	11.44	83.76	0.14	1.60
0.60	2.50	150	0.84	15.71	13.18	83.76	0.16	1.45
0.70	3.00	130	1.02	13.61	13.82	83.76	0.17	1.26
0.80	3.50	106	1.19	11.10	13.23	83.76	0.16	1.03
0.90	3.90	90	1.32	9.42	12.48	83.76	0.15	0.87
1.00	3.60	0	1.15	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ก.4 การทดลองที่ 4

เป็นการทดลองหุน้ำล่องกังหันลมสี่ลำแบบ 4 ใบ วางตำแหน่งโรเตอร์แบบ Downwind โดยทดลองเฉพาะที่ความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที ทำการทดลองแปรผันค่าความดันใบ 3 ค่าคือ ความดันใบ 22% ความดันใบ 28% และความดันใบ 34% รวมถึงแปรผันมุมพิชปลายใบ 4 ค่า ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.25-ก.36

ก.4.1 ผลการทดลองที่ความดันใบ 22%

ทำการแปรผันค่ามุมพิชปลายใบ 4 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.25-ก.28

ตารางที่ ก.25 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	200	0.00	20.94	0.00	83.76	0.00	1.94
0.05	0.10	195	0.02	20.42	0.45	83.76	0.01	1.89
0.10	0.20	190	0.04	19.90	0.88	83.76	0.01	1.84

ตารางที่ ก.25 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$ (ต่อ)

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.15	0.60	170	0.20	17.80	3.54	83.76	0.04	1.65
0.20	0.80	160	0.26	16.76	4.44	83.76	0.05	1.55
0.25	1.00	150	0.33	15.71	5.20	83.76	0.06	1.45
0.30	1.20	140	0.40	14.66	5.82	83.76	0.07	1.36
0.35	1.60	120	0.55	12.57	6.93	83.76	0.08	1.16
0.40	1.80	105	0.62	11.00	6.80	83.76	0.08	1.02
0.45	2.00	90	0.68	9.42	6.45	83.76	0.08	0.87
0.50	1.80	0	0.57	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.26 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	435	0.00	45.55	0.00	83.76	0.00	4.22
0.10	0.50	410	0.18	42.94	7.58	83.76	0.09	3.98
0.20	1.00	380	0.35	39.79	14.05	83.76	0.17	3.69
0.30	1.30	365	0.44	38.22	16.87	83.76	0.20	3.54
0.40	1.80	320	0.62	33.51	20.71	83.76	0.25	3.10
0.50	1.90	310	0.62	32.46	20.06	83.76	0.24	3.01
0.60	2.30	280	0.75	29.32	22.00	83.76	0.26	2.72
0.00	2.50	0	1.10	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.27 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	150	0.00	15.71	0.00	83.76	0.00	1.45
0.05	0.20	140	0.07	14.66	0.97	83.76	0.01	1.36

ตารางที่ ก.27 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$ (ต่อ)

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.10	0.40	130	0.13	13.61	1.80	83.76	0.02	1.26
0.15	0.60	120	0.20	12.57	2.50	83.76	0.03	1.16
0.20	0.80	110	0.26	11.52	3.05	83.76	0.04	1.07
0.25	1.10	100	0.38	10.47	3.93	83.76	0.05	0.97
0.30	1.30	90	0.44	9.42	4.16	83.76	0.05	0.87
0.35	1.60	80	0.55	8.38	4.62	83.76	0.06	0.78
0.40	1.80	70	0.62	7.33	4.53	83.76	0.05	0.68
0.45	2.00	60	0.68	6.28	4.30	83.76	0.05	0.58
0.50	2.30	50	0.79	5.24	4.16	83.76	0.05	0.48
0.55	2.20	0	0.73	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.28 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	140	0.00	14.66	0.00	83.76	0.00	1.36
0.05	0.10	136	0.02	14.24	0.31	83.76	0.00	1.32
0.10	0.20	130	0.04	13.61	0.60	83.76	0.01	1.26
0.15	0.50	118	0.15	12.36	1.91	83.76	0.02	1.14
0.20	0.70	111	0.22	11.62	2.57	83.76	0.03	1.08
0.25	0.90	100	0.29	10.47	3.00	83.76	0.04	0.97
0.30	1.20	90	0.40	9.42	3.74	83.76	0.04	0.87
0.35	1.40	80	0.46	8.38	3.88	83.76	0.05	0.78
0.45	1.80	60	0.60	6.28	3.74	83.76	0.04	0.58
0.55	2.00	50	0.64	5.24	3.35	83.76	0.04	0.48
0.60	2.00	0	0.62	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ก.4.2 ผลการทดลองที่ความดันใบ 28%

ทำการแปรผันค่ามุมพิชปลายใบ 4 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.29-ก.32

ตารางที่ ก.29 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	332	0.00	34.77	0.00	83.76	0.00	3.22
0.10	0.35	318	0.11	33.30	3.68	83.76	0.04	3.08
0.20	0.80	298	0.26	31.21	8.27	83.76	0.10	2.89
0.25	1.10	283	0.38	29.64	11.12	83.76	0.13	2.74
0.30	1.40	265	0.49	27.75	13.48	83.76	0.16	2.57
0.35	1.60	253	0.55	26.49	14.62	83.76	0.17	2.45
0.40	1.80	230	0.62	24.09	14.89	83.76	0.18	2.23
0.45	1.90	210	0.64	21.99	14.08	83.76	0.17	2.04
0.50	1.80	0	0.57	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.30 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	300	0.00	31.42	0.00	83.76	0.00	2.91
0.05	0.20	290	0.07	30.37	2.01	83.76	0.02	2.81
0.10	0.40	280	0.13	29.32	3.88	83.76	0.05	2.72
0.20	0.65	270	0.20	28.27	5.62	83.76	0.07	2.62
0.25	1.00	260	0.33	27.23	9.01	83.76	0.11	2.52
0.30	1.30	240	0.44	25.13	11.09	83.76	0.13	2.33
0.35	1.65	220	0.57	23.04	13.22	83.76	0.16	2.13
0.40	1.80	200	0.62	20.94	12.94	83.76	0.15	1.94
0.50	2.00	180	0.66	18.85	12.48	83.76	0.15	1.75
0.60	1.60	0	0.44	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.31 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	275	0.00	28.80	0.00	83.76	0.00	2.67
0.10	0.40	260	0.13	27.23	3.61	83.76	0.04	2.52
0.15	0.60	250	0.20	26.18	5.20	83.76	0.06	2.42
0.20	0.80	240	0.26	25.13	6.66	83.76	0.08	2.33
0.25	1.00	230	0.33	24.09	7.97	83.76	0.10	2.23
0.30	1.40	210	0.49	21.99	10.68	83.76	0.13	2.04
0.40	1.60	200	0.53	20.94	11.09	83.76	0.13	1.94
0.50	1.80	190	0.57	19.90	11.42	83.76	0.14	1.84
0.60	2.00	175	0.62	18.33	11.33	83.76	0.14	1.70

ตารางที่ ก.32 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	260	0.00	27.23	0.00	83.76	0.00	2.52
0.15	0.50	240	0.15	25.13	3.88	83.76	0.05	2.33
0.20	0.70	230	0.22	24.09	5.32	83.76	0.06	2.23
0.25	0.90	220	0.29	23.04	6.61	83.76	0.08	2.13
0.30	1.10	210	0.35	21.99	7.77	83.76	0.09	2.04
0.40	1.40	195	0.44	20.42	9.01	83.76	0.11	1.89
0.50	1.60	185	0.49	19.37	9.41	83.76	0.11	1.79
0.60	1.80	170	0.53	17.80	9.43	83.76	0.11	1.65
0.70	2.00	150	0.57	15.71	9.01	83.76	0.11	1.45
0.80	2.00	0	0.53	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ก.4.3 ผลการทดลองที่ความดันใบ 34%

ทำการแปรผันค่ามุมพิชปลายใบ 4 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.33-ก.36

ตารางที่ ก.33 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	225	0.00	23.56	0.00	83.76	0.00	2.18
0.10	0.40	210	0.13	21.99	2.91	83.76	0.03	2.04
0.20	0.80	200	0.26	20.94	5.55	83.76	0.07	1.94
0.30	1.20	185	0.40	19.37	7.70	83.76	0.09	1.79
0.40	2.00	160	0.71	16.76	11.83	83.76	0.14	1.55
0.50	2.80	130	1.02	13.61	13.82	83.76	0.17	1.26
0.60	3.20	108	1.15	11.31	12.98	83.76	0.15	1.05

ตารางที่ ก.34 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	190	0.00	19.90	0.00	83.76	0.00	1.84
0.05	0.20	185	0.07	19.37	1.28	83.76	0.02	1.79
0.10	0.40	180	0.13	18.85	2.50	83.76	0.03	1.75
0.20	1.00	170	0.35	17.80	6.29	83.76	0.08	1.65
0.30	1.40	160	0.49	16.76	8.14	83.76	0.10	1.55
0.40	2.00	150	0.71	15.71	11.09	83.76	0.13	1.45
0.50	2.60	132	0.93	13.82	12.81	83.76	0.15	1.28
0.60	2.90	118	1.02	12.36	12.55	83.76	0.15	1.14
0.70	3.10	105	1.06	11.00	11.65	83.76	0.14	1.02

ตารางที่ ก.35 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	190	0.00	19.90	0.00	83.76	0.00	1.84
0.10	0.40	185	0.13	19.37	2.57	83.76	0.03	1.79

ตารางที่ ก.35 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$ (ต่อ)

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.20	0.80	175	0.26	18.33	4.85	83.76	0.06	1.70
0.30	1.20	165	0.40	17.28	6.86	83.76	0.08	1.60
0.40	2.00	150	0.71	15.71	11.09	83.76	0.13	1.45
0.50	2.40	140	0.84	14.66	12.30	83.76	0.15	1.36
0.60	3.00	120	1.06	12.57	13.31	83.76	0.16	1.16
0.70	3.30	100	1.15	10.47	12.02	83.76	0.14	0.97
0.80	3.40	0	1.15	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.36 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ ความดันใบ 34% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	188	0.00	19.69	0.00	83.76	0.00	1.82
0.10	0.40	182	0.13	19.06	2.52	83.76	0.03	1.77
0.20	0.70	174	0.22	18.22	4.02	83.76	0.05	1.69
0.30	1.10	165	0.35	17.28	6.10	83.76	0.07	1.60
0.40	1.70	155	0.57	16.23	9.32	83.76	0.11	1.50
0.50	2.20	140	0.75	14.66	11.00	83.76	0.13	1.36
0.55	2.45	130	0.84	13.61	11.42	83.76	0.14	1.26
0.60	2.60	120	0.88	12.57	11.09	83.76	0.13	1.16
0.70	2.85	105	0.95	11.00	10.44	83.76	0.12	1.02
0.80	2.90	0	0.93	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ก.5 การทดลองที่ 5

เป็นการทดลองหุน้ำล่องเสื่อลำแพนแบบ 3 ใบ วางตำแหน่งโรเตอร์แบบ Downwind ทดลองเฉพาะที่ความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที ทำการทดลองแปรผันค่าความดันใบ 2 ค่าคือ ความดันใบ 22%

และความดันใบ 28% รวมถึงแปรผันมุมพิชปลายใบ 4 ค่าเช่นเดิม ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.37-ก.43

ก.5.1 ผลการทดลองที่ความดันใบ 22%

เมื่อทำการแปรผันค่ามุมพิชปลายใบ 4 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.37-ก.40

ตารางที่ ก.37 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	230	0.00	24.09	0.00	83.76	0.00	2.23
0.05	0.20	215	0.07	22.51	1.49	83.76	0.02	2.09
0.10	0.40	205	0.13	21.47	2.84	83.76	0.03	1.99
0.15	0.60	190	0.20	19.90	3.95	83.76	0.05	1.84
0.20	0.80	175	0.26	18.33	4.85	83.76	0.06	1.70
0.25	1.00	160	0.33	16.76	5.55	83.76	0.07	1.55
0.30	1.20	140	0.40	14.66	5.82	83.76	0.07	1.36
0.35	1.40	110	0.46	11.52	5.34	83.76	0.06	1.07
0.40	1.40	0	0.44	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.38 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	215	0.00	22.51	0.00	83.76	0.00	2.09
0.05	0.15	202	0.04	21.15	0.93	83.76	0.01	1.96
0.10	0.30	192	0.09	20.11	1.78	83.76	0.02	1.86
0.15	0.55	170	0.18	17.80	3.14	83.76	0.04	1.65
0.20	0.80	150	0.26	15.71	4.16	83.76	0.05	1.45
0.25	1.00	130	0.33	13.61	4.51	83.76	0.05	1.26
0.30	1.20	111	0.40	11.62	4.62	83.76	0.06	1.08
0.35	1.40	90	0.46	9.42	4.37	83.76	0.05	0.87
0.40	1.40	0	0.44	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.39 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	200	0.00	20.94	0.00	83.76	0.00	1.94
0.05	0.20	180	0.07	18.85	1.25	83.76	0.01	1.75
0.10	0.35	170	0.11	17.80	1.96	83.76	0.02	1.65
0.15	0.50	160	0.15	16.76	2.59	83.76	0.03	1.55
0.20	0.65	150	0.20	15.71	3.12	83.76	0.04	1.45
0.25	0.80	140	0.24	14.66	3.56	83.76	0.04	1.36
0.30	0.95	130	0.29	13.61	3.91	83.76	0.05	1.26
0.35	1.10	120	0.33	12.57	4.16	83.76	0.05	1.16
0.40	1.20	110	0.35	11.52	4.07	83.76	0.05	1.07
0.45	1.30	100	0.38	10.47	3.93	83.76	0.05	0.97
0.50	1.60	0	0.49	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.40 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 22% มุมพิชปลายใบ $\beta_4 = 20^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	170	0.00	17.80	0.00	83.76	0.00	1.65
0.05	0.10	165	0.02	17.28	0.38	83.76	0.00	1.60
0.10	0.20	155	0.04	16.23	0.72	83.76	0.01	1.50
0.15	0.40	140	0.11	14.66	1.62	83.76	0.02	1.36
0.20	0.60	125	0.18	13.09	2.31	83.76	0.03	1.21
0.25	0.80	110	0.24	11.52	2.80	83.76	0.03	1.07
0.30	1.00	90	0.31	9.42	2.91	83.76	0.03	0.87
0.35	1.10	70	0.33	7.33	2.43	83.76	0.03	0.68
0.50	1.20	0	0.31	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ก.5.2 ผลการทดลองที่ความดันใบ 28%

เมื่อทำการแปรผันค่ามุมพิชปลายใบ 4 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.41-ก.43

ตารางที่ ก.41 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	230	0.00	24.09	0.00	83.76	0.00	2.23
0.05	0.20	224	0.07	23.46	1.55	83.76	0.02	2.17
0.10	0.40	216	0.13	22.62	3.00	83.76	0.04	2.10
0.15	0.60	208	0.20	21.78	4.33	83.76	0.05	2.02
0.20	0.80	204	0.26	21.36	5.66	83.76	0.07	1.98
0.25	1.10	190	0.38	19.90	7.47	83.76	0.09	1.84
0.30	1.40	175	0.49	18.33	8.90	83.76	0.11	1.70
0.35	1.80	155	0.64	16.23	10.39	83.76	0.12	1.50
0.40	2.20	130	0.79	13.61	10.82	83.76	0.13	1.26
0.45	2.4	120	0.86	12.57	10.82	83.76	0.13	1.1639
0.50	2.7	100	0.97	10.47	10.17	83.76	0.12	0.9699
0.55	2.8	0	0.99	0	0	83.76	0.00	0

ตารางที่ ก.42 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	215	0.00	22.51	0.00	83.76	0.00	2.09
0.05	0.20	205	0.07	21.47	1.42	83.76	0.02	1.99
0.10	0.40	195	0.13	20.42	2.70	83.76	0.03	1.89
0.15	0.60	190	0.20	19.90	3.95	83.76	0.05	1.84
0.20	0.80	180	0.26	18.85	4.99	83.76	0.06	1.75
0.25	1.00	170	0.33	17.80	5.89	83.76	0.07	1.65
0.30	1.20	160	0.40	16.76	6.66	83.76	0.08	1.55

ตารางที่ ก.42 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$ (ต่อ)

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.35	1.40	150	0.46	15.71	7.28	83.76	0.09	1.45
0.40	1.60	140	0.53	14.66	7.77	83.76	0.09	1.36
0.45	1.80	130	0.60	13.61	8.11	83.76	0.10	1.26
0.50	2.10	111	0.71	11.62	8.21	83.76	0.10	1.08
0.55	2.40	90	0.82	9.42	7.70	83.76	0.09	0.8729
0.60	2.40	0	0.795	0.00	0.00	83.76	0.00	0

ตารางที่ ก.43 Downwind-TSW แบบ 3 ใบ ความดันใบ 28% มุมพิชปลายใบ $\beta_3 = 15^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	210	0.00	21.99	0.00	83.76	0.00	2.04
0.05	0.20	200	0.07	20.94	1.39	83.76	0.02	1.94
0.10	0.40	190	0.13	19.90	2.64	83.76	0.03	1.84
0.15	0.60	180	0.20	18.85	3.74	83.76	0.04	1.75
0.20	0.80	160	0.26	16.76	4.44	83.76	0.05	1.55
0.25	1.10	140	0.38	14.66	5.50	83.76	0.07	1.36
0.30	1.30	120	0.44	12.57	5.55	83.76	0.07	1.16
0.35	1.50	100	0.51	10.47	5.32	83.76	0.06	0.97
0.40	1.60	0	0.53	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ก.6 การทดลองที่ 6

เป็นการทดลองหุน้ำลองเสื่อลำแพนแบบที่ทำการปิดปลายใบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการทดลองสำหรับกรณีแบบ 6 ใบและ 4 ใบ ที่ความดันใบ 28% วางตำแหน่งโรเตอร์แบบ Downwind ซึ่งทดลองที่ความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที และแปรผันมุมพิชปลายใบ 2 ค่า คือ $\beta_1 = 5^\circ$ และ $\beta_2 = 10^\circ$ ผลทดลองแสดงดังตารางที่ ก.44-ก.47

ก.6.1 ผลการทดลองการปิดปลายใบ กรณีแบบ 6 ใบ

เมื่อทำการแปรผันค่ามุมพิกชปลายใบ 2 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.44-ก.45

ตารางที่ ก.44 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ และปิดปลายใบ ที่มุมพิกชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	405	0.00	42.41	0.00	83.76	0.00	3.93
0.10	0.40	385	0.13	40.32	5.34	83.76	0.06	3.73
0.20	0.90	360	0.31	37.70	11.65	83.76	0.14	3.49
0.30	1.50	330	0.53	34.56	18.31	83.76	0.22	3.20
0.40	1.90	312	0.66	32.67	21.64	83.76	0.26	3.03
0.45	2.10	300	0.73	31.42	22.88	83.76	0.27	2.91
0.50	2.30	280	0.79	29.32	23.30	83.76	0.28	2.72
0.55	2.45	260	0.84	27.23	22.84	83.76	0.27	2.52
0.60	2.50	240	0.84	25.13	21.08	83.76	0.25	2.33
0.65	2.55	0	0.84	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.45 Downwind-TSW แบบ 6 ใบ และปิดปลายใบ ที่มุมพิกชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	370	0.00	38.75	0.00	35.33	0.00	3.59
0.10	0.30	350	0.09	36.65	3.24	35.33	0.09	3.40
0.15	0.50	330	0.15	34.56	5.34	35.33	0.15	3.20
0.20	0.70	315	0.22	32.99	7.28	35.33	0.21	3.06
0.25	1.00	290	0.33	30.37	10.05	35.33	0.28	2.82
0.30	1.30	260	0.44	27.23	12.02	35.33	0.34	2.52
0.35	1.50	230	0.51	24.09	12.23	35.33	0.35	2.23
0.40	1.70	210	0.57	21.99	12.62	35.33	0.36	2.04
0.45	1.80	200	0.60	20.94	12.48	35.33	0.35	1.94
0.50	1.90	190	0.62	19.90	12.30	35.33	0.35	1.84

ก.6.2 ผลการทดลองการปิดปลายใบ กรณีแบบ 4 ใบ

เมื่อทำการแปรผันค่ามุมพิชปลายใบ 2 ค่า ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.46-ก.47

ตารางที่ ก.46 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ และปิดปลายใบ ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	330	0.00	34.56	0.00	83.76	0.00	3.20
0.10	0.40	312	0.13	32.67	4.33	83.76	0.05	3.03
0.15	0.90	290	0.33	30.37	10.05	83.76	0.12	2.81
0.20	1.20	280	0.44	29.32	12.94	83.76	0.15	2.72
0.25	1.40	270	0.51	28.27	14.35	83.76	0.17	2.62
0.30	1.70	250	0.62	26.18	16.18	83.76	0.19	2.42
0.35	2.00	230	0.73	24.09	17.54	83.76	0.21	2.23
0.40	2.20	210	0.79	21.99	17.47	83.76	0.21	2.04
0.45	2.30	195	0.82	20.42	16.68	83.76	0.20	1.89
0.50	2.40	0	0.84	0.00	0.00	83.76	0.00	0.00

ตารางที่ ก.47 Downwind-TSW แบบ 4 ใบ และปิดปลายใบ ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_2 = 10^\circ$

F_1 (kg)	F_2 (kg)	rpm	Q (N.m)	Ω (rad/s)	P_{tur} (W)	P_w (W)	C_p	λ
0.00	0.00	305	0.00	31.94	0.00	83.76	0.00	2.96
0.10	0.40	290	0.13	30.37	4.02	83.76	0.05	2.81
0.15	0.6	285	0.20	29.85	5.93	83.76	0.07	2.76
0.20	1.00	270	0.35	28.27	9.99	83.76	0.12	2.62
0.25	1.40	250	0.51	26.18	13.29	83.76	0.16	2.42
0.30	1.80	230	0.66	24.09	15.95	83.76	0.19	2.23
0.35	2.20	210	0.82	21.99	17.96	83.76	0.21	2.04
0.40	2.40	190	0.88	19.90	17.57	83.76	0.21	1.84
0.45	2.60	170	0.95	17.80	16.90	83.76	0.20	1.65

ภาคผนวก ข

ผลการคำนวณ C_l และ C_d ใบกังหันลมเสื้อลำแพนด้วยวิธี CFD

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

TSW efficiency from about 17% to about 35%. Furthermore, we changed the TSW rotor orientation from the upwind type to the downwind type (passive yaw control). It was found that the efficiency of the downwind type was slightly less than the upwind type but the cost of construction could be reduced significantly.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

ตารางที่ ข.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ หน้าตัด A (ต่อ)

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
25	0.886	0.413	2.148
28	0.913	0.478	1.910
30	0.928	0.525	1.769
35	0.939	0.643	1.461
37	0.938	0.693	1.355
40	0.977	0.808	1.209
45	0.950	0.950	1.000
50	0.838	1.017	0.824
55	0.767	1.139	0.674
60	0.681	1.256	0.542
65	0.603	1.375	0.438
70	0.524	1.495	0.351
75	0.445	1.614	0.276
80	0.367	1.734	0.212
85	0.174	1.900	0.091
90	0.000	2.000	0.000

ตารางที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ หน้าตัด B

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
-25	-0.642	0.339	-1.895
-20	-0.551	0.251	-2.194
-15	-0.444	0.179	-2.489
-10	-0.347	0.124	-2.789
-7	-0.324	0.101	-3.206
-4	-0.283	0.079	-3.589

ตารางที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ หน้าตัด B (ต่อ)

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
-2	-0.113	0.060	-1.874
0	0.220	0.048	4.624
3	0.652	0.057	11.353
5	0.839	0.076	11.097
8	0.969	0.123	7.909
10	0.967	0.159	6.081
13	0.968	0.213	4.553
15	0.976	0.248	3.930
17	0.982	0.285	3.442
20	0.991	0.340	2.909
22	0.992	0.378	2.627
25	1.004	0.441	2.275
28	1.007	0.506	1.988
30	1.003	0.550	1.824
35	0.988	0.666	1.483
37	0.973	0.711	1.368
40	0.951	0.782	1.215
45	0.897	0.897	1.000
50	0.830	1.010	0.822
55	0.754	1.123	0.672
60	0.659	1.224	0.539
65	0.565	1.325	0.426
70	0.470	1.426	0.330
75	0.375	1.527	0.246
80	0.281	1.628	0.172
85	0.200	1.700	0.118
90	0.070	1.730	0.040

ตารางที่ ข.3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ หน้าตัด C

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
-25	-0.392	0.306	-1.278
-20	-0.245	0.225	-1.090
-15	-0.094	0.158	-0.593
-10	-0.001	0.116	-0.012
-7	-0.450	0.135	-3.333
-4	-0.773	0.146	-5.289
-2	-0.733	0.133	-5.522
0	-0.392	0.118	-3.331
3	0.178	0.113	1.577
5	0.501	0.117	4.293
8	0.932	0.130	7.177
10	1.101	0.143	7.719
13	1.316	0.172	7.666
15	1.333	0.217	6.135
17	1.258	0.287	4.389
20	1.220	0.368	3.320
22	1.182	0.413	2.861
25	1.165	0.483	2.413
28	1.143	0.555	2.061
30	1.111	0.592	1.878
35	1.071	0.679	1.577
37	1.049	0.756	1.387
40	1.027	0.828	1.241
45	0.941	0.941	1.000
50	0.864	1.060	0.816
55	0.781	1.176	0.664
60	0.677	1.267	0.534

ตารางที่ ข.3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ หน้าตัด C (ต่อ)

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
65	0.572	1.357	0.422
70	0.468	1.447	0.323
75	0.364	1.538	0.236
80	0.259	1.628	0.159
85	0.200	1.700	0.118
90	0.070	1.740	0.040

ตารางที่ ข.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ หน้าตัด D

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
-25	-0.304	0.294	-1.036
-20	-0.110	0.208	-0.528
-15	0.050	0.148	0.339
-10	0.141	0.122	1.158
-7	0.236	0.096	2.466
-4	0.439	0.090	4.885
-2	-0.236	0.122	-1.934
0	-0.141	0.122	-1.155
3	0.280	0.116	2.415
5	0.522	0.117	4.458
8	0.810	0.127	6.375
10	1.116	0.146	7.625
13	1.290	0.170	7.572
15	1.371	0.191	7.179
17	1.350	0.230	5.863
20	1.206	0.337	3.579

ตารางที่ ข.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ หน้าตัด D (ต่อ)

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
22	1.176	0.391	3.004
25	1.146	0.464	2.469
28	1.107	0.525	2.109
30	1.089	0.570	1.911
35	1.054	0.692	1.523
37	1.060	0.759	1.396
40	1.048	0.852	1.230
45	0.999	0.999	1.000
50	0.905	1.111	0.815
55	0.804	1.216	0.661
60	0.706	1.328	0.532
65	0.593	1.423	0.417
70	0.475	1.497	0.317
75	0.359	1.581	0.227
80	0.244	1.665	0.146
85	0.150	1.700	0.088
90	0.060	1.730	0.035

ตารางที่ ข.5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 6 ใบ หน้าตัด E

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
-20	-0.645	0.361	-1.786
-15	-0.232	0.171	-1.363
-10	-0.147	0.121	-1.210
-7	-0.229	0.104	-2.188
-4	-0.408	0.106	-3.849

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.12	ปลายใบก้านลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิม.....83
6.13	ใบก้านลมแบบปิดปลายใบของโรเตอร์แบบ 6 ใบ.....84
6.14	ใบก้านลมแบบปิดปลายใบของโรเตอร์แบบ 4 ใบ.....84
6.15	Hub-Fairing ที่ด้านหน้าโรเตอร์.....85
6.16	ก้านลมเสื่อลำแพนแบบ Downwind.....85
6.17	ระบบ Active และ passive yaw control..... 86
6.18	เครื่องวัดความเร็วลมชนิด Hot wire.....87
6.19	เครื่องวัดความเร็วลมชนิด Pitot static tube.....87
6.20	เครื่องวัดความเร็วลมชนิดใบพัด.....88
6.21	เครื่องวัดความเร็วลมชนิด Hot bulb.....88
6.22	ผลการสอบเทียบการวัดความเร็วลม ของอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ.....88
6.23	เครื่องวัดความเร็วลมแบบ Optical sensor.....89
6.24	จอแสดงผลความเร็วลมแบบดิจิทัล.....89
6.25	เครื่องมือวัดแรงบิด.....90
6.26	การทดสอบแบบ Variable speed.....91
6.27	การทดสอบแบบ Variable velocity.....91
6.28	ตำแหน่งติดตั้งหุ่นจำลองก้านลมแบบ Upwind และเครื่องมือวัด.....92
6.29	ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดต่าง ๆ ของการทดสอบก้านลมแบบ Downwind.....92
6.30	ถนนที่ใช้ในการทดลอง.....93
6.31	การควบคุมความเร็วของผู้ขับโดยมองจากแสดงผล.....94
6.32	ข้อมูลการวัดตัวอย่างของความเร็วลมที่ควบคุมโดยผู้ขับรถ.....94
6.33	ผลของความเร็วลมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพก้านลม ที่มุมพิชปลายใบ $\beta_1 = 5^\circ$96

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1.1	เครื่องอ่านแถบสีชุดทดสอบอย่างง่ายที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์.....	4
4.1	ผลการอ่านค่าแถบสีชุดทดสอบเชื้อแบคทีเรีย Aac ที่ความเข้มข้น Healthy, 1×10^5 , 5×10^5 , 1×10^6 , 5×10^6 และ 1×10^7 CFU/mL (N=5) โดยใช้การระบุการเกิดแถบสีด้วยตาเปล่าจากผู้ทดสอบทั้งหมด 9 คน.....	53
4.2	ค่า RGB ของแถบสีที่พิมพ์ขึ้นที่มีแถบสีใกล้เคียงกับแถบสีชุดทดสอบ Aac ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	62
4.3	ค่าการสะท้อนแสงที่ลดลงที่แถบทดสอบของชุดทดสอบแบบ Multiplex.....	68

ตารางที่ ข.6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ หน้าตัด B (ต่อ)

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
45	0.990	0.990	1.000
50	0.914	1.121	0.816
55	0.832	1.252	0.665
60	0.732	1.368	0.535
65	0.633	1.514	0.418
70	0.502	1.602	0.313
75	0.364	1.674	0.217
80	0.215	1.781	0.121
85	0.150	1.900	0.079
90	0.060	2.000	0.030

ตารางที่ ข.7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ หน้าตัด C

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
-25	-0.247	0.287	-0.862
-20	-0.116	0.220	-0.530
-15	0.021	0.162	0.131
-10	0.006	0.126	0.047
-7	-0.141	0.117	-1.201
-4	-0.440	0.122	-3.608
-2	-0.611	0.130	-4.705
0	-0.467	0.119	-3.924
3	0.182	0.109	1.674
5	0.543	0.114	4.760
8	0.966	0.131	7.380
10	1.162	0.147	7.931

ตารางที่ ข.7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ หน้าตัด C (ต่อ)

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
13	1.366	0.181	7.561
15	1.464	0.214	6.827
17	1.396	0.282	4.954
20	1.300	0.383	3.396
22	1.270	0.437	2.903
25	1.247	0.515	2.419
28	1.223	0.589	2.076
30	1.204	0.637	1.890
35	1.153	0.761	1.516
37	1.128	0.810	1.392
40	1.083	0.885	1.223
45	1.005	1.005	1.000
50	0.912	1.120	0.814
55	0.809	1.228	0.659
60	0.705	1.344	0.525
65	0.594	1.451	0.410
70	0.477	1.526	0.312
75	0.349	1.581	0.220
80	0.207	1.627	0.127
85	0.150	1.700	0.088
90	0.060	1.720	0.035

ตารางที่ ข.8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ หน้าตัด D

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
-25	-0.280	0.298	-0.938

ตารางที่ ข.8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ หน้าตัด D (ต่อ)

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
-20	-0.138	0.229	-0.602
-15	-0.097	0.186	-0.523
-10	-0.284	0.180	-1.608
-7	-0.470	0.175	-2.693
-4	-0.675	0.156	-4.340
-2	-0.736	0.142	-5.184
0	-0.596	0.124	-4.789
3	0.044	0.106	0.412
5	0.442	0.105	4.203
8	0.895	0.117	7.643
10	1.114	0.132	8.464
13	1.347	0.165	8.160
15	1.424	0.206	6.924
17	1.318	0.281	4.683
20	1.249	0.373	3.344
22	1.228	0.425	2.888
25	1.216	0.500	2.430
28	1.201	0.574	2.093
30	1.187	0.622	1.906
35	1.133	0.742	1.527
37	1.106	0.790	1.401
40	1.062	0.861	1.234
45	0.977	0.977	1.000
50	0.882	1.090	0.810
55	0.779	1.196	0.651
60	0.681	1.320	0.516
65	0.572	1.422	0.402

ตารางที่ ข.8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ หน้าตัด D (ต่อ)

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
70	0.500	1.520	0.329
75	0.400	1.620	0.247
80	0.300	1.720	0.174
85	0.174	1.820	0.095
90	0.020	1.860	0.011

ตารางที่ ข.9 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และ แรงต้าน (C_d) ของโรเตอร์แบบ 4 ใบ หน้าตัด E

มุมปะทะ (α , degree)	สัมประสิทธิ์แรงยก (C_l , non-dim)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d , non-dim)	Lift to drag ratio (C_l / C_d , non-dim)
-25	-0.305	0.312	-0.978
-20	-0.156	0.240	-0.648
-15	-0.011	0.180	-0.059
-10	0.031	0.141	0.223
-7	-0.140	0.138	-1.019
-4	-0.446	0.142	-3.150
-2	-0.552	0.135	-4.091
0	-0.452	0.120	-3.756
3	0.084	0.099	0.844
5	0.483	0.096	5.028
8	0.924	0.104	8.901
10	1.130	0.116	9.722
13	1.321	0.145	9.095
15	1.388	0.175	7.943
17	1.398	0.225	6.219
20	1.231	0.350	3.516
22	1.207	0.410	2.947

1.4.5 เปรียบเทียบงานรายปี (Annual energy production หรือ AEP) ของหุ่นจำลองกังหันลม เสื้อลำแพนแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้น

1.4.6 ใช้สถิติลมจังหวัดนครราชสีมาและจังหวัดปราจีนบุรีเป็นกรณีตัวอย่างในการประเมินงานรายปี

1.4.7 ทดลองกังหันลมด้วยวิธีการลากจูงกังหันลม (Tow testing) ด้วยรถกระบะบรรทุก (Pick-up truck)

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

จะดำเนินงานวิจัยดังนี้

1.5.1 ระเบียบวิธีวิจัย

1) สืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- กังหันลมในประเทศไทย
- กังหันลมเสื้อลำแพน
- ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์
- ทฤษฎี Blade element momentum (BEM)
- การปรับปรุงทฤษฎี BEM
- ทฤษฎีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)
- วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพกังหันลมเสื้อลำแพน
- วิธีการทดลองกังหันลม

2) ประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงทางอากาศพลศาสตร์ (C_l และ C_d) ของใบกังหันลมเสื้อลำแพนด้วย CFD

- สร้างหุ่นจำลองกังหันลมเสื้อลำแพนแบบดั้งเดิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร
- วัดค่าความโค้งของหน้าตัดใบ (Blade section profile) ที่เกิดขึ้นในรัศมีต่าง ๆ
- สร้างกริด (Grid) รอบหน้าตัดใบกังหันเพื่อใช้คำนวณด้วย CFD
- คำนวณหาค่า C_l และ C_d ด้วยโปรแกรม Ansys Fluent

3) ประเมินประสิทธิภาพพลังงานหุ่นจำลองกังหันเสื้อลำแพนลมด้วยทฤษฎี BEM

- วัดค่ามุมพิชและความยาวคอर्डของใบกังหันตลอดแนวรัศมี
- เขียนโปรแกรม BEM ด้วยโปรแกรม Matlab

4) แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพ

- ทดลองหาค่ามุมพิชปลายใบที่ดีที่สุด

1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) คอมพิวเตอร์แบบ PC
- 2) โปรแกรม Ansys Fluent version 14.0
- 3) โปรแกรม MATLAB version R20011a
- 4) อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างและติดตั้งกังหันลม

4.1 เครื่องมือ

- หินเจียร์
- ตู้เชื่อมไฟฟ้า
- สว่าน
- ไฟเบอร์

4.2 Consume

- ดอกสว่าน
- ใบตัดไฟเบอร์
- ลวดเชื่อมไฟฟ้า
- ใบหินเจียร์ขนาด 4 นิ้ว
- น้ำมันเชื้อเพลิง

5) อุปกรณ์การวัด (Measuring equipment)

- 5.1 เครื่องวัดความเร็วลมแบบ Hot wire
- 5.2 เครื่องวัดความเร็วรอบแบบ Optical sensor พร้อมจอแสดงผล
- 5.3 ตาชั่งสปริงขนาด 5.0 และ 10.0 กิโลกรัม
- 6) รถกระบะบรรทุกแบบ Pick-up truck

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้กังหันลมเสื่อลำแพนที่มีประสิทธิภาพพลังงานสูงขึ้นพร้อมกับราคาที่ถูกลง
- 1.6.2 ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงทางอากาศพลศาสตร์ (C_l และ C_d) ใบกังหันลมเสื่อลำแพน
- 1.6.3 ได้โปรแกรม BEM ที่สามารถประเมินประสิทธิภาพพลังงานกังหันลมเสื่อลำแพน
- 1.6.4 นำกลับมาซึ่งการใช้งานกังหันลมเสื่อลำแพนอย่างกว้างขวางในประเทศไทย

จากทฤษฎีโมเมนตัม (Momentum theory, MT) และทฤษฎี Blade Element (BT) จะนำไปสู่ทฤษฎี Blade Element Momentum หรือ ทฤษฎี BEM ดังที่กล่าวในบทที่ 3 สำหรับกังหันลมเลื้อล้าแผนสามารถนำทฤษฎีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เพื่อการทำนายประสิทธิภาพโดยสามารถเขียนเป็นโปรแกรมหลักให้ชื่อว่า Thaisail_1 ซึ่งประกอบด้วยอีก 2 โปรแกรมย่อย ชื่อว่า BladeData และ CLCDinter1 ซึ่งเป็นโปรแกรมเกี่ยวกับการเทียบบัญญัติไตรยางค์ (Interpolation) ค่าต่าง ๆ ของข้อมูลกังหันลม และค่า C_l , C_d ตามลำดับ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

ก.1 โปรแกรมหลัก

```
function Thaisail_1
clc;
clear all;
%%%=====input=====
n=80;
B=4; %number of blade
rpm(1)=100;
drpm=12;
R=0.5146;
u0=5.6; %m/s
r(1)=0.072;
den=1.2; %kg/m^3 air density
vis=0.000018; %N.s/m^2
ac=0.4;
point=14;
%%%=====
for h=1:point
    omg(h)=rpm(h)*2*pi/60;
    tsr(h)=omg(h)*R/u0;
    %%%%=====
```

```

a(1)=0;
ap(1)=0;
dr=(R-r(1))/n;
for i=1:n
    ravg(i)=r(i)+dr/2;
    r(i+1)=r(i)+dr;
    lsr(i)=omg(h)*ravg(i)/u0;
    [Chord Pitch]=BladeData(ravg(i));
    c(i)=Chord;
    sod(i)=B*c(i)/(2*pi*ravg(i));
    pid(i)=Pitch;
    pir(i)=pid(i)*pi/180;
    fprintf('\n##### ELEMENT %d ##### RPM=%d #####',i,rpm(h))
    for j=1:200
        phi(j)=atan((1-a(j))/(lsr(i)*(1+ap(j))));
        ss(j)=sin(phi(j));
        cc(j)=cos(phi(j));
        phd(j)=phi(j)*180/pi;
        afr(j)=phi(j)-pir(i);
        afd(j)=afr(j)*180/pi;
        ur1(j)=u0*(1-a(j))/sin(phi(j));
        AA(j)=(u0^2)*((1-a(j))^2);
        BB(j)=(omg(h)^2)*(ravg(i)^2)*((1+ap(j))^2);
        ur2(j)=(AA(j)+BB(j))^0.5;
        re(i)=den*ur1(j)*c(i)/vis;
        AR(i)=dr/c(i);
        fprintf('\n++++++ Element %d +++++ RPM=%d +++++',i,rpm(h))
        fprintf('\n===== Round %d =====',j)
        fprintf('\nr=%0.4f   dr=%0.4f   r+dr=%0.4f   ravg=%0.4f',r(i),dr,r(i+1),ravg(i))

```

```

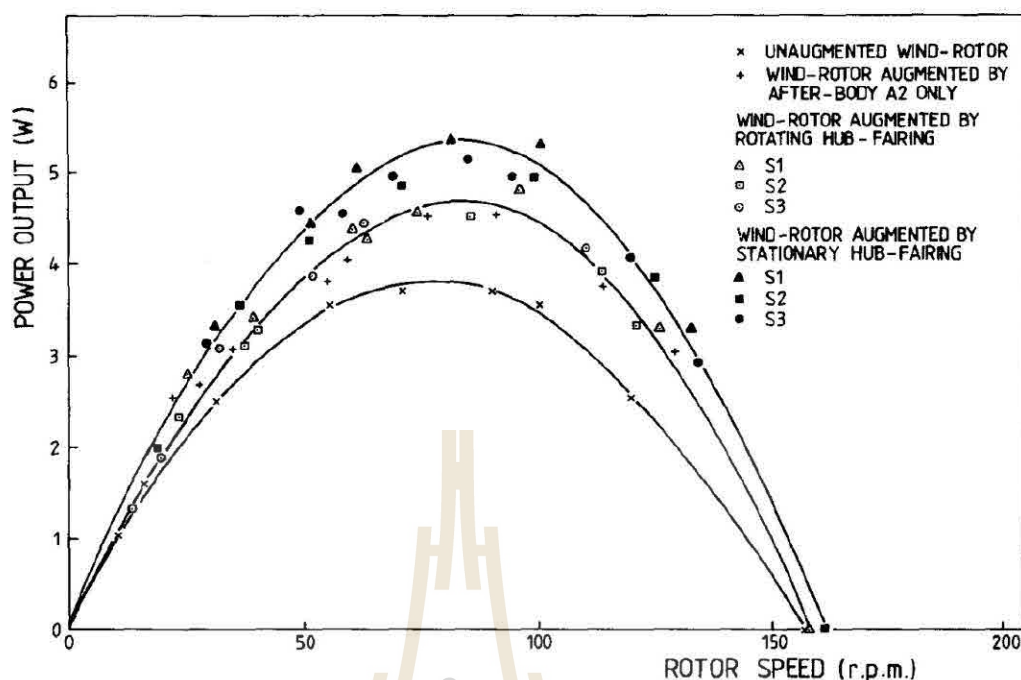
fprintf('\nomg=%0.4f lsr=%0.4f cord=%0.4f sod=%0.4f,omg(h),lsr(i),c(i),sod(i))
fprintf('\nPitch_d=%0.4f deg Pitch_r=%0.4f rad',pid(i),pir(i))
fprintf('\nPhi=%0.4f Phid=%0.4fnaoa=%0.4f sin(phi)=%0.4f
cos(phi)=%0.4f\n\n',phi(j),phd(j),afd(j),ss(j),cc(j))
[LC DC]=CLCDinterl(afd(j),ravg(i));
CL(i)=LC;
CD(i)=DC;
Ftip(j)=(2/pi)*acos(exp(-B*(R-ravg(i))/(2*ravg(i)*sin(phi(j)))));
Fhub(j)=(2/pi)*acos(exp(-B*(ravg(i)-r(1))/(2*ravg(i)*sin(phi(j)))));
F(j)=Ftip(j)*Fhub(j);
dTA(j)=den*(u0^2)*4*F(j)*a(j)*(1-a(j))*pi*ravg(i)*dr;
dQA(j)=den*u0*4*F(j)*ap(j)*(1-a(j))*pi*(ravg(i)^3)*omg(h)*dr;
Cn(j)=CL(i)*cos(phi(j))+CD(i)*sin(phi(j));
Ct(j)=CL(i)*sin(phi(j))-CD(i)*cos(phi(j));
dTB(j)=sod(i)*den*((ur1(j))^2)*pi*ravg(i)*Cn(j)*dr;
dQB(j)=sod(i)*den*((ur1(j))^2)*pi*(ravg(i)^2)*Ct(j)*dr;
PA(j)=dQA(j)*omg(h);
PB(j)=dQB(j)*omg(h);
T_avg(j)=(dTA(j)+dTB(j))/2;
Q_avg(j)=(dQA(j)+dQB(j))/2;
P_avg(j)=(PA(j)+PB(j))/2;
dA(i)=pi*((r(i+1)^2)-(r(i)^2));
dTin(i)=0.5*den*dA(i)*(u0^2);
dCT(j)=dTA(j)/dTin(i);
a(j+1)=1/(1+(4*F(j)*sin(phi(j))*sin(phi(j))/(sod(i)*Cn(j))));
ap(j+1)=1/((4*F(j)*sin(phi(j))*cos(phi(j))/(sod(i)*Ct(j)))-1);
if a(j+1)>ac
    a(j+1)=(18*F(j)-20-(3*(dCT(j)*(50-36*F(j))+12*F(j)*
    (3*F(j)-4)^0.5))/(36*F(j)-50);
end

```

```

d_a=abs(a(j+1)-a(j));
d_ap=abs(ap(j+1)-ap(j));
fprintf('AA=%.4f    BB=%.4f\n',AA(j),BB(j))
fprintf('Urel_A=%.4f    Urel_B=%.4f\n\nCL=%.4f    CD=%.4f
        Re=%.4f\n',ur1(j),ur2(j),CL(i),CD(i),re(i))
fprintf('Cn=%.4f    Ct=%.4f\n',Cn(j),Ct(j))
fprintf('\nFtip=%.4f    Fhub=%.4f    F=%.4f
        dCT=%.4f\n',Ftip(j),Fhub(j),F(j),dCT(j))
fprintf('\ndT_A=%.4f    dT_B=%.4f    dT_avg=%.4f\n',dT_A(j),dT_B(j),dT_avg(j))
fprintf('\ndQ_A=%.4f    dQ_B=%.4f    dQ_avg=%.4f\n',dQ_A(j),dQ_B(j),dQ_avg(j))
fprintf('dP_A=%.4f    dP_B=%.4f    dP_avg=%.4f\n',dP_A(j),dP_B(j),dP_avg(j))
fprintf('\na=%.6f    anew=%.6f\nap=%.6f    ap_new=%.6f\n',a(j),a(j+1),ap(j),ap(j+1))
fprintf('delta a = %.6f\ndelta ap = %.6f\n',d_a,d_ap)
    if d_a<0.000001&& d_ap<0.000001
        break
    end
end
Phhi(i)=phd(j);
Ao(i)=afd(j);
aaa(i)=a(j);
app(i)=ap(j);
UR_A(i)=ur1(j);
UR_B(i)=ur2(j);
CNN(i)=Cn(j);
CTT(i)=Ct(j);
S_sin(i)=ss(j);
C_cos(i)=cc(j);
T_A(i)=dT_A(j);
Q_A(i)=dQ_A(j);

```

รูปที่ 2.16 ผลการทดสอบ Hub fairing แบบหยุดนิ่งและแบบหมุน โดยติดตั้ง After body แบบ A2 (Fleming และ Probert, 1983)

Gipe (2004) ได้อธิบายโดยย่อเกี่ยวกับระบบควบคุมการส่ายหาลม (Yaw control) ซึ่งมี 2 ลักษณะคือ Active yaw control และ Passive yaw control ระบบ Active yaw control ส่วนใหญ่มักใช้ในกังหันลมขนาดกลางและขนาดใหญ่ซึ่งควบคุมด้วยระบบควบคุม (Controller) และขับเคลื่อนด้วยฟันเฟือง (Gear) ส่วนระบบ Passive yaw control เป็นระบบที่ควบคุมการขับเคลื่อนด้วยแรงลมธรรมชาติส่วนใหญ่ใช้กับกังหันลมขนาดเล็กซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 วิธีคือ 1) การทำมุมโคน (Coning) สำหรับเฉพาะกังหันลมแบบ Downwind 2) การติดตั้งหาง (Tail vanes หรือ Tail fins) สำหรับเฉพาะกังหันลมแบบ Upwind

Kim (2014) ได้กล่าวถึงปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นกับกังหันลมคือการสูญเสียพลังงานจากการเอียงศูนย์ของทิศทางความเร็วลมกับระนาบโรเตอร์ (Yaw misalignment) ทำให้ส่งผลต่อกำลังงานที่ได้จากกังหันลมลดลง ดังนั้นการมีระบบส่ายหาลม (Yaw system) จะช่วยลดปัญหาดังกล่าว เนื่องจากเป็นระบบที่ช่วยให้กังหันลมส่ายหาลมในทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งจะทำให้ได้พลังงานมากขึ้น อีกทั้งยังมีประโยชน์ของการลดภาระกรรมของเสากังหันลม (Tower) ได้อีกด้วย จากการที่แรงบิดที่บริเวณเสากังหันจะมีค่าลดลงเพราะมี Yaw bearing ดังนั้นจะเห็นว่ากังหันลมเสื่อลำแพนที่ปกติแล้วไม่มีระบบส่ายหาลม (Yaw system) จะเกิดการสูญเสียพลังงานอยู่เสมอเพราะความเร็วลมย่อมมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางตลอดเวลา ดังนั้นกังหันลมเสื่อลำแพนควรจะมีการปรับปรุงแก้ไขในจุดนี้

```

S(p)=Q_A(p);
T(p)=T_B(p);
W(p)=Q_B(p);
Y(p)=P_A(p);
Z(p)=P_B(p);
F_T(p)=FT(p);
F_H(p)=FH(p);
F_F(p)=FF(p);
TT_avg(p)=tavg(p);
QQ_avg(p)=qavg(p);
PP_avg(p)=pavg(p);

fprintf('\n===== \n')
fprintf('\nE%d Ravg=%.4f Cord=%.4f sod=%.4f CL=%.4f
CD=%.4f,p,U(p),Cord(p),Solid(p),CL(p),CD(p))
fprintf('\nE%d Pitch=%.4f AoA=%.4f Urel_A=%.4f Urel_B=%.4f
dr=%.4f,p,F(p),Ao(p),G(p),E(p),dr)
fprintf('\nE%d Phi_d=%.4f sin(phi)=%.4f cos(phi)=%.4f,p,Phii(p),SSS(p),CCC(p))
fprintf('\nE%d F_tip=%.4f F_hub=%.4f F_total=%.4f,p,F_T(p),F_H(p),F_F(p))
fprintf('\nE%d a=%.4f ap=%.4f Cn=%.4f Ct=%.4f
omega=%.4f,p,AAA(p),APP(p),CNN_N(p),CTT_T(p),omg(h))
fprintf('\nE%d T_A=%.4f T_B=%.4f T_avg=%.4f,p,V(p),T(p),TT_avg(p))
fprintf('\nE%d Q_A=%.4f Q_B=%.4f Q_avg=%.4f,p,S(p),W(p),QQ_avg(p))
fprintf('\nE%d P_A=%.4f P_B=%.4f P_avg=%.4f\n',p,Y(p),Z(p),PP_avg(p))
end

L(1)=0;
M(1)=0;
N(1)=0;
O(1)=0;
P(1)=0;

```

```

S(1)=0;
for k=1:n
    L(k+1)=L(k)+T_A(k);
    M(k+1)=M(k)+Q_A(k);
    N(k+1)=N(k)+T_B(k);
    O(k+1)=O(k)+Q_B(k);
    P(k+1)=P(k)+P_A(k);
    S(k+1)=S(k)+P_B(k);
end
fprintf('IIIIIIIIIIIIIIIIIIII SUM ALL ELEMENT IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII\n')
Trus_avg(h)=(L(n+1)+N(n+1))/2;
Tor_avg(h)=(M(n+1)+O(n+1))/2;
Pow_avg(h)=(P(n+1)+S(n+1))/2;
fprintf('\nSum_Trus_A=%.4f Sum_Trus_B=%.4f
        Trust_avg=%.4f,L(n+1),N(n+1),Trus_avg(h))
fprintf('\nSum_Torq_A=%.4f Sum_Tor_B=%.4f
        Torque_avg=%.4f,M(n+1),O(n+1),Tor_avg(h))
fprintf('\nSum_Pout_A=%.4f Sum_Pout_B=%.4f
        Power_avg=%.4f\n',P(n+1),S(n+1),Pow_avg(h))
Pin=0.5*den*(pi*(R^2))*(u0^3);
Tin=0.5*den*pi*(R^2)*(u0^2);
CoT_A(h)=L(k+1)/Tin;
CoT_B(h)=N(k+1)/Tin;
TrusC_avg(h)=Trus_avg(h)/Tin;
CoQ_A(h)=M(k+1)/Tin;
CoQ_B(h)=O(k+1)/Tin;
TorC_avg(h)=Tor_avg(h)/Tin;
Cp_A(h)=P(k+1)/Pin;
Cp_B(h)=S(k+1)/Pin;

```

```

PowC_avg(h)=Pow_avg(h)/Pin;
fprintf('\nPin=%0.4f Tin=%0.4f tsr=%0.4f\n',Pin,Tin,tsr(h))
fprintf('\nCoT_A=%0.4f CoT_B=%0.4f
        CoT_avg=%0.4f,CoT_A(h),CoT_B(h),TrusC_avg(h))
fprintf('\nCoQ_A=%0.4f CoQ_B=%0.4f
        Cq_avg=%0.4f,CoQ_A(h),CoQ_B(h),TorC_avg(h))
fprintf('\nCp_A=%0.4f Cp_B=%0.4f Cp_avg=%0.4f
        Cp_A(h),Cp_B(h),PowC_avg(h))
fprintf('\n=====\\n\\n')
rpm(h+1)=rpm(h)+drpm;
end
plot(tsr,PowC_avg,'ro')
xlabel('TSR')
ylabel('Cp')

```

ก.2 โปรแกรมย่อย BladeData

```

function [Chord Pitch] = BladeData(Ravg)
D=load('B2.txt'); r=D(:,1); c=D(:,2); p=D(:,3);
for i=1:10
    if Ravg>r(i)&&Ravg<r(i+1)||Ravg==r(i)||Ravg==r(i+1)
        r0=r(i); r1=r(i+1);
        c0=c(i); c1=c(i+1);
        p0=p(i); p1=p(i+1);
        Chord=c1-(c1-c0)*(r1-Ravg)/(r1-r0);
        Pitch=p1-(p1-p0)*(r1-Ravg)/(r1-r0);
    end
end

```


ก.3 โปรแกรมย่อย CLCDinter1

```

function [LC DC] = CLCDinter1(Ang,r)

% clc;

R=0.515;

%%%%%%%%%DATA%%%%%%%%%

aoa=[xx,xx,...];
CL0=[xx,xx,...];
CD0=[xx,xx,...];
CL4=[xx,xx,...];
CD4=[xx,xx,...];
CL5=[xx,xx,...];
CD5=[xx,xx,...];
CL6=[xx,xx,...];
CD6=[xx,xx,...];
CL7=[xx,xx,...];
CD7=[xx,xx,...];

if r>0.072&&r<0.208
    for i=1:32
        if Ang>aoa(i)&&Ang<aoa(i+1)||Ang==aoa(i)
            x0=aoa(i); x1=aoa(i+1);
            y0=CL0(i); y1=CL0(i+1);
            z0=CD0(i); z1=CD0(i+1);
        end
    end

    LC=y1-((x1-Ang)*(y1-y0)/(x1-x0));
    DC=z1-((x1-Ang)*(z1-z0)/(x1-x0));

```

```

else if r>0.208&&r<0.252
    r0=0.208; r1=0.252;
    for i=1:32
        if Ang>aoa(i)&&Ang<aoa(i+1)||Ang==aoa(i)
            x0=aoa(i); x1=aoa(i+1);
            y0=CL0(i); y1=CL0(i+1);
            z0=CD0(i); z1=CD0(i+1);
            p0=y1-((x1-Ang)*(y1-y0)/(x1-x0));
            q0=z1-((x1-Ang)*(z1-z0)/(x1-x0));
            Y0=CL4(i); Y1=CL4(i+1);
            Z0=CD4(i); Z1=CD4(i+1);
            p1=Y1-((x1-Ang)*(Y1-Y0)/(x1-x0));
            q1=Z1-((x1-Ang)*(Z1-Z0)/(x1-x0));
        end
    end
    LC=p1-(p1-p0)*(r1-r)/(r1-r0);
    DC=q1-(q1-q0)*(r1-r)/(r1-r0);

else if r>0.252&&r<0.296
    r0=0.252; r1=0.296;
    for i=1:32
        if Ang>aoa(i)&&Ang<aoa(i+1)||Ang==aoa(i)
            x0=aoa(i); x1=aoa(i+1);
            y0=CL4(i); y1=CL4(i+1);
            z0=CD4(i); z1=CD4(i+1);
            p0=y1-((x1-Ang)*(y1-y0)/(x1-x0));
            q0=z1-((x1-Ang)*(z1-z0)/(x1-x0));
            Y0=CL5(i); Y1=CL5(i+1);
            Z0=CD5(i); Z1=CD5(i+1);

```

```

        p1=Y1-((x1-Ang)*(Y1-Y0)/(x1-x0));
        q1=Z1-((x1-Ang)*(Z1-Z0)/(x1-x0));
    end
end
LC=p1-(p1-p0)*(r1-r)/(r1-r0);
DC=q1-(q1-q0)*(r1-r)/(r1-r0);

else if r>0.296&&r<0.340
    r0=0.296; r1=0.340;
    for i=1:32
        if Ang>aoa(i)&&Ang<aoa(i+1)||Ang==aoa(i)
            x0=aoa(i); x1=aoa(i+1);
            y0=CL5(i); y1=CL5(i+1);
            z0=CD5(i); z1=CD5(i+1);
            p0=y1-((x1-Ang)*(y1-y0)/(x1-x0));
            q0=z1-((x1-Ang)*(z1-z0)/(x1-x0));
            Y0=CL6(i); Y1=CL6(i+1);
            Z0=CD6(i); Z1=CD6(i+1);
            p1=Y1-((x1-Ang)*(Y1-Y0)/(x1-x0));
            q1=Z1-((x1-Ang)*(Z1-Z0)/(x1-x0));
        end
    end
    LC=p1-(p1-p0)*(r1-r)/(r1-r0);
    DC=q1-(q1-q0)*(r1-r)/(r1-r0);

else if r>0.340&&r<0.384
    r0=0.340; r1=0.384;
    for i=1:32

```

```

if Ang>aoa(i)&&Ang<aoa(i+1)||Ang==aoa(i)
    x0=aoa(i); x1=aoa(i+1);
    y0=CL6(i); y1=CL6(i+1);
    z0=CD6(i); z1=CD6(i+1);
    p0=y1-((x1-Ang)*(y1-y0)/(x1-x0));
    q0=z1-((x1-Ang)*(z1-z0)/(x1-x0));
    Y0=CL7(i); Y1=CL7(i+1);
    p1=Y1-((x1-Ang)*(Y1-Y0)/(x1-x0));
    Z0=CD7(i); Z1=CD7(i+1);
    q1=Z1-((x1-Ang)*(Z1-Z0)/(x1-x0));
end
end
LC=p1-(p1-p0)*(r1-r)/(r1-r0);
DC=q1-(q1-q0)*(r1-r)/(r1-r0);

else if r>0.384&&r<0.428
    r0=0.384; r1=0.428;
    for i=1:32
        if Ang>aoa(i)&&Ang<aoa(i+1)||Ang==aoa(i)
            x0=aoa(i); x1=aoa(i+1);
            y0=CL7(i); y1=CL7(i+1);
            z0=CD7(i); z1=CD7(i+1);
            p0=y1-((x1-Ang)*(y1-y0)/(x1-x0));
            q0=z1-((x1-Ang)*(z1-z0)/(x1-x0));
            Y0=CL0(i); Y1=CL0(i+1);
            Z0=CD0(i); Z1=CD0(i+1);
            p1=Y1-((x1-Ang)*(Y1-Y0)/(x1-x0));
            q1=Z1-((x1-Ang)*(Z1-Z0)/(x1-x0));

```



```

        end
    end
    LC=p1-(p1-p0)*(r1-r)/(r1-r0);
    DC=q1-(q1-q0)*(r1-r)/(r1-r0);

else if r>0.428&&r<0.515
    for i=1:32
        if Ang>aoa(i)&&Ang<aoa(i+1)||Ang==aoa(i)
            x0=aoa(i); x1=aoa(i+1);
            y0=CL0(i); y1=CL0(i+1);
            z0=CD0(i); z1=CD0(i+1);
        end
    end
    LC=y1-((x1-Ang)*(y1-y0)/(x1-x0));
    DC=z1-((x1-Ang)*(z1-z0)/(x1-x0));
end
end
end
end
end
end
end
end
end

```

ประวัติผู้เขียน

นายธีรวัฒน์ คลับคล้าย เกิดวันที่ 13 มกราคม 2528 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนคงคาราม อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรีในปี พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2550 หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาตรีได้ทำงานที่บริษัท เอสทีพี แอนด์ ไอ จำกัดมหาชน ในตำแหน่งวิศวกร 1 (Piping Engineer) โดยทำงานในโครงการ Pluto LNG ซึ่งมีบริษัท Woodside ประเทศออสเตรเลียเป็นเจ้าของโครงการเป็นเวลา 3 ปี (2550-2553) หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท (วิศวกรรมเครื่องกล) ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในปี พ.ศ. 2554 โดยทำงานวิจัยด้านการประหยัดพลังงานในโรงงานน้ำตาล ในขณะที่เดียวกันได้ทำงานในโครงการ “การปรับปรุงระบบระบายอากาศเพื่อการลดอุณหภูมิที่เกิดจากอุปกรณ์ทางความร้อนในอุตสาหกรรม” ร่วมกับบริษัทเดีย ห้างเฮียง (เจ้าสัว) และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2555 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก (วิศวกรรมเครื่องกล) ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำงานวิจัยด้านกังหันลมเกลือลำแพน โดยตั้งแต่ระดับปริญญาโทถึงปริญญาเอกได้มีผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการและวารสารระดับชาติ ในด้านการอนุรักษ์พลังงานและกังหันลมดังนี้

1. แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาล. E-Nett #8. วันที่ 2-4 พฤษภาคม 2555 จังหวัดมหาสารคาม
2. แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลโดยวิธีนิวตัน-รัปสัน. ME-Nett #26. วันที่ 24-26 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย
3. รูปแบบการกระจายความดันในระบบหม้อต้มแบบหลายขั้นตอนที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตน้ำตาลสำหรับการประหยัดพลังงาน. E-Nett #9. วันที่ 8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก
4. แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาล. วารสารมหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 5 สิงหาคม 2556
5. รูปแบบการส่งจ่ายไอหั่วหม้อสู่มืออุ่นที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตน้ำตาล. ME-Nett # 29. วันที่ 1-3 กรกฎาคม 2558 จังหวัดนครราชสีมา
6. การทำนายประสิทธิภาพกังหันลมเกลือลำแพนด้วยทฤษฎี Blade Element Momentum. ME-Nett # 29. วันที่ 1-3 กรกฎาคม 2558 จังหวัดนครราชสีมา