CONTRIBUTION

การกำหนดลักษณะใบกังหันลมเพื่อผลิตพลังงานให้ได้มากที่สุด ในสถิติลมเฉพาะพื้นที่

นางสาววิกันดา ศรีเดช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2550

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

WIND TURBINE BLADE CHARACTERISTICS FOR OPTIMAL POWER PRODUCTION IN A LOCAL WIND STATISTIC

Wikanda Sridech

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the

Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2007

การกำหนดลักษณะใบกังหันลมเพื่อผลิตพลังงานให้ได้มากที่สุด
ในสถิติลมเฉพาะพื้นที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)
กรรมการ

(อ. ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์)
กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)
รองอธิการฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วิกันดา ศรีเดช : การกำหนดลักษณะใบกังหันลมเพื่อผลิตพลังงานให้ได้มากที่สุดในสถิติลมเฉพาะพื้นที่ (WIND TURBINE BLADE CHARACTERISTICS FOR OPTIMAL POWER PRODUCTION IN A LOCAL WIND STATISTIC)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์, 104 หน้า.

กังหันลมมักถูกออกแบบให้เปลี่ยนพลังงานลมที่ความเร็วค่าหนึ่งไปเป็นพลังงานกลให้ได้มากที่สุด ในการนี้ต้องคำนึงถึงตัวแปรออกแบบ (Design variable) หลายตัว เช่น ขนาดใบ ความเร็วรอบ ความสอบ (Taper) มุมบิดใบ (Twist angle) อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio) และมุมเผิน (Pitch angle) มุมเผินที่กำหนดเป็นสิ่งสำคัญยิ่งเพราะจะส่งผลโดยตรงต่อค่ามุมปะทะ (Angle of attack) ที่ใบกังหันกระทำต่อลม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อแรงลมที่กระต่อกังหัน ดังนั้นมุมเผินที่ดีที่สุดในแต่ละพื้นที่หรือภูมิประเทศย่อมแตกต่างกันแม้ว่าความเร็วลมเฉลี่ยจะเท่ากันก็ตาม ทั้งนี้เป็นเพราะสถิติลมในแต่ละพื้นที่จะมีความเบ้ที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลให้ความเร็วลมที่ให้ความหนาแน่นพลังงานสูงสุดมีค่าแตกต่างกัน งานวิจัยนี้มุ่งหามุมเผินที่ดีที่สุดของใบกังหันโดยใช้วิธีการเชิงทฤษฎีร่วมกับสถิติลมเฉพาะพื้นที่เพื่อให้ได้งานรายปีสูงสุด วิธีนี้จึงไม่ได้ออกแบบที่ความเร็วลมเพียงจุดเดียวแต่คำนึงถึงความเร็วลมที่เปลี่ยนไปตลอดทั้งปี ทฤษฎีสำคัญที่ใช้คือทฤษฎี Blade element momentum ร่วมกับแบบจำลองชดเชยการสูญเสียการไหลเพื่อปรับแก้การไหลเชิงอุดมคติให้สอดคล้องกับความเป็นจริงยิ่งขึ้น ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในภาษา MATLAB บนพื้นฐานของทฤษฎีดังกล่าว ความน่าเชื่อถือของโปรแกรมได้จากการเปรียบเทียบผลการทำนายกับผลการทดลองของกังหันลมในสองลักษณะคือกังหันลมแบบใบตรงและกังหันลมแบบใบบิด ได้ใช้โปรแกรมค้นหามุมเผินที่ดีที่สุดในสถิติลมอันหนึ่ง โดยการปรับมุมเผินไปจนกระทั่งได้งานรายปีสูงสุด จากนั้นได้คำนวณหามุมเผินที่ดีที่สุดในกรณีที่สถิติลมเปลี่ยนไปจากเดิมโดยยังมีความเร็วลมเฉลี่ยเท่าเดิมแต่มีความเบ้ของสถิติลมต่างไปจากเดิม พบว่ามุมเผินที่ดีที่สุดเปลี่ยนไปจากเดิม ทั้งนี้น่าเป็นสาเหตุจากการที่ค่าความเร็วลมที่ให้ความหนาแน่นกำลังงานลมสูงสุดเปลี่ยนไปตามความเบ้ของสถิติลม พบว่าการปรับมุมเผินเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลให้ได้งานรายปีต่างกันพอสมควรในสถิติลมที่มีความเบ้แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐศาสตร์ของกังหันลมได้มากพอสมควร

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ปีการศึกษา 2550 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

WIKANDA SRIDECH : WIND TURBINE BLADE CHARACTERISTICS FOR OPTIMAL POWER PRODUCTION IN A LOCAL WIND STATISTIC. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. TAWIT CHITSOMBOON, Ph.D., 104 PP.

WIND TURBINE/WIND STATISTIC/ANNUAL POWER YIELD/OPTIMAL PITCH ANGLE

Wind turbines are often designed to convert wind energy at a specific speed into as much mechanical energy as possible. Many design variables are involved such as size, rotation speed, taper, twist, tip speed ratio and pitch angle. Pitch angle is especially important because it directly affects angle of attack which in turn affects the forces system on the rotor. Best pitch angles for different locales are not the same because of difference in skews of wind statistics. This research aims to find the best pitch angle for a wind turbine by using a theoretical approach in conjunction with annual wind statistics. Therefore, this is not a 'single-velocity' design but rather a 'year-round' design. The important theory employed was the Blade element momentum theory together with the various corrective models to improve theoretical predictions. A computer program in MATLAB was developed based on the mentioned theory. The credibility of the program was attained by comparing its predictions with those of the experiments comprising a straight-blade turbine and a twisted, taper blade turbine. The program was used to search for the best pitch angle in a wind statistic. Later, the program was used for two more statistics which have the same average as the first one but with different skews. It was found that the best pitch angles are not the same due probably to the shifts in the velocities that give

maximum energy densities. A small change in best pitch angle could give quite different values in annual energy yield, affecting the economy of wind turbine in the commercial system.

School of Mechanical Engineering Student's Signature_____

Academic Year 2007 Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการและด้านอื่น ๆ จากบุคคล ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ ท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งเป็นทั้งผู้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านวิชาการ อีกทั้งยังให้ข้อคิดและแนวทางในการดำเนินชีวิต หากมิได้คำแนะนำดี ๆ ในการแก้ไขปัญหาจากท่าน เชื่อว่างานวิจัยนี้คงสำเร็จลุล่วงไปมิได้ จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ ซึ่งผู้วิจัยล้วนซาบซึ้งในความปรารถนาดี และจะยึดถือปฏิบัติตามคำสอนของท่านตลอดไป

รองศาสตราจารย์ น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และ รองศาสตราจารย์ ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ รองคณบดีฝ่ายวิชาการสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ทั้งสองท่านเป็นทั้งผู้ให้ความรู้และผู้ให้โอกาสทางด้านการงาน รวมทั้งเป็นผู้ให้กำลังใจและผลักดันให้งานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ทั้งสองมา ณ ที่นี้

คุณพรสวรรค์ ทองใบ และ คุณโศรฎา แข็งการ ทั้งสองท่านนี้เป็นทั้งรุ่นพี่ร่วมสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล เป็นเพื่อนร่วมงาน และเป็นที่ปรึกษาทางด้านวิชาการรวมทั้งเรื่องส่วนตัว ซึ่งกำลังใจและข้อคิดจากทั้งสองท่าน ผู้วิจัยจะระลึกถึงตลอดไป

คุณจารุวรรณ ตั้งต้นสกุลวงศ์ และ คุณชโลธร ธรรมแท้ ขอขอบคุณเป็นอย่างสูงที่ช่วยแนะนำวิธีแก้ไขปัญหาบางประการในงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณบุญลือ สวัสดิ์มงคล คุณเกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว คุณวัชรา ยอดแก้ว คุณปราโมทย์ สิงห์ทอง และ คุณวิโรจน์ เชาว์วิเศษ รุ่นพี่และรุ่นน้องร่วมสถาบัน ขอขอบคุณที่เป็นกำลังใจเสมอมา และที่จะลืมขอบคุณเสียมิได้คือ คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอัครวิทยา เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไปของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ช่วยอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับงานทางด้านเอกสารมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อวิทูรย์ ศรีเดช และ คุณแม่ประภากร ศรีเดช บิดาและมารดาผู้เป็นที่รักยิ่ง จวบจนครูบาอาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาตั้งแต่เล็กจนเติบใหญ่ คุณงามความดีทั้งหมดของวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงขออุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่กล่าวมา

วิกันดา ศรีเดช

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญรูป ..... ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 กล่าวนำ 1
1.2 ความเป็นมาแล้วความสำคัญของปัญหา 1
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.5 ระเบียบวิธีวิจัย 3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 กล่าวนำ 4
2.2 สรุปทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4
2.2.1 ชนิดของกังหันลม 4
2.2.2 ทฤษฎีของ Rankine-Froude 5
2.2.3 ทฤษฎีของ Glauert 10
2.2.4 ทฤษฎี Blade element 11
2.2.5 ทฤษฎี Blade element momentum 13
2.2.6 วิธีการทำซ้ำเพื่อหาผลเฉลยค่า a และ a′ 16
2.2.7 ตัวประกอบการสูญเสียปลายใบ 17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.8 แบบจำลองหลังการป้อ 18
2.2.9 การปรับแก้ค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกน 19
2.2.10 สมการแจกแจงความน่าจะเป็นของไวบูลล์ 20
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22
3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 29
3.1 กล่าวนำ 29
3.2 ขั้นตอนการสร้างและการหาผลเฉลยของโปรแกรม 29
3.2.1 ขั้นตอนการสร้างโปรแกรม 29
3.2.2 ขั้นตอนการหาผลเฉลยของโปรแกรม 34
3.3 การทดสอบโปรแกรม 37
3.3.1 กังหันลมต้นแบบ NREL Phase II 37
3.3.2 กังหันลมต้นแบบ NREL Phase VI 39
3.3.3 คุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศ S809 42
3.4 การทดสอบโปรแกรมกับผลการทดลองของ NREL Phase II 43
3.5 การทดสอบโปรแกรมกับผลการทดลองของ NREL Phase VI 44
4 ผลลัพธ์และการอภิปรายผล 46
4.1 กล่าวนำ 46
4.2 สถิติลมจำเพาะพื้นที่ 3 รูปแบบ 46
4.3 มุมเผินที่ดีที่สุดสำหรับสถิติลมจำเพาะพื้นที่ 48
4.3.1 ผลกระทบจากการปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase II 48
4.3.2 ผลกระทบจากการปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase VI 54
4.4 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณ 59
4.4.1 พิจารณากังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐาน 59
4.4.2 พิจารณากังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐาน 60
4.4.3 เปรียบเทียบผลระหว่าง 2 กรณีมาตรฐาน 61
4.5 การนำโปรแกรมมาใช้กับสถิติลมในประเทศไทย 62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5 สรุปและข้อเสนอแนะ 67
5.1 กล่าวนำ 67
5.2 สรุป 67
5.3 ข้อเสนอแนะ 67
รายการอ้างอิง 69
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. การเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB 72
ภาคผนวก ข. ข้อมูลการทดสอบหน้าตัดแพนอากาศ S 809 ภายในอุโมงค์ลม 89
ประวัติผู้เขียน 104

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 ค่า Input และ Output ของโปรแกรมย่อยที่ 1 33
3.2 ค่า Input และ Output ของโปรแกรมย่อยที่ 2 34
3.3 ค่า Input และ Output ของโปรแกรมย่อยที่ 3 34
3.4 ความยาวคอร์ด, มุมบิด และความหนาของหน้าตัด ตามแนวรัศมีใบกังหัน NREL Phase VI 40
4.1 งานรายปีและประสิทธิภาพรายปีเมื่อปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase II 49
4.2 ร้อยละของงานรายปีที่เพิ่มขึ้นเทียบกับกรณีมาตรฐาน $\beta = 12$ องศา 49
4.3 งานรายปีและประสิทธิภาพรายปีเมื่อปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase VI 54
4.4 ร้อยละของงานรายปีที่เพิ่มขึ้นเทียบกับกรณีมาตรฐาน $\beta_{tip} = 3$ องศา 55
4.5 งานรายปีและประสิทธิภาพรายปีเมื่อปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase II ในบริเวณดอยม่อนล้าน 63
4.6 งานรายปีและประสิทธิภาพรายปีเมื่อปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase VI ในบริเวณดอยม่อนล้าน 65
ข.1 ค่า C_L ที่ $Re = 300000$ ทดสอบโดย CSU 90
ข.2 ค่า C_L ที่ $Re = 500000$ ทดสอบโดย CSU 90
ข.3 ค่า C_L ที่ $Re = 650000$ ทดสอบโดย CSU 91
ข.4 ค่า C_L ที่ $Re = 750000$ ทดสอบโดย CSU 93
ข.5 ค่า C_L ที่ $Re = 1000000$ ทดสอบโดย DUT 94
ข.6 ค่า C_L ที่ $Re = 1000000$ ทดสอบโดย OSU 95
ข.7 ค่า C_D ที่ $Re = 300000$ ทดสอบโดย CSU 97
ข.8 ค่า C_D ที่ $Re = 500000$ ทดสอบโดย CSU 97
ข.9 ค่า C_D ที่ $Re = 650000$ ทดสอบโดย CSU 99
ข.10 ค่า C_D ที่ $Re = 750000$ ทดสอบโดย CSU 100
ข.11 ค่า C_D ที่ $Re = 1000000$ ทดสอบโดย DUT 101
ข.12 ค่า C_D ที่ $Re = 1000000$ ทดสอบโดย OSU 102

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 แบบจำลองการไหลผ่าน Actuator disk 5
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_P, C_T และ a 9
2.3 สนามความเร็วและแรงที่กระทำบนหน้าตัดแพนอากาศ 11
2.4 โครงสร้างของชิ้นย่อย และสนามความเร็ว 14
2.5 วงแหวนที่เกิดจากชิ้นย่อยที่ r ใด ๆ 14
2.6 สัมประสิทธิ์แรงยก, C_L ที่ได้จากการทดลองสำหรับแพนอากาศ S809 16
2.7 สัมประสิทธิ์แรงต้าน, C_D ที่ได้จากการทดลองสำหรับแพนอากาศ S809 17
2.8 ค่า a เมื่อพิจารณา $F = 1$ จากแบบจำลองของ Glauert 19
2.9 ค่า a เมื่อพิจารณา $F < 1$ จากแบบจำลองของ Glauert 20
3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 36
3.2 หน้าตัดแพนอากาศ S809 38
3.3 มิติ และรูปร่างของใบกังหันลม NREL Phase II 38
3.4 กราฟสมรรถนะของกังหันลม NREL Phase II 39
3.5 มิติ และรูปร่างของใบกังหันลม NREL Phase VI 40
3.6 กราฟสมรรถนะของกังหันลม NREL Phase VI 42
3.7 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลอง
ของกังหันลม NREL Phase II 43
3.8 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลอง
ของกังหันลม NREL Phase IV 44
4.1 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมจากสถิติลมจำเพาะพื้นที่ 3 รูปแบบ 46
4.2 การแจกแจงความถี่ของความหนาแน่นกำลังงานลม
จากสถิติลมจำเพาะพื้นที่ 3 รูปแบบ 47
4.3 งานรายปีเทียบต่อมุมเผินเมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II
เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case I 50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.4 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case I 50
4.5 งานรายปีเทียบต่อมุมเผินเมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case II 51
4.6 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case II 51
4.7 งานรายปีเทียบต่อมุมเผินเมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case III 52
4.8 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case III 52
4.9 งานรายปีเทียบต่อมุมเผินเมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case I Case II และ Case III 53
4.10 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case I Case II และ Case III 53
4.11 งานรายปีเทียบต่อมุมเผินเมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case I 55
4.12 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case I 56
4.13 งานรายปีเทียบต่อมุมเผินเมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case II 56
4.14 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case II 57
4.15 งานรายปีเทียบต่อมุมเผินเมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case III 57
4.16 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case III 58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.17 งานรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI
เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case I Case II และ Case III 58
4.18 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI
เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case I Case II และ Case III 59
4.19 กราฟพลังงานเทียบต่อความเร็วลมของกังหันลม
NREL Phase II และ NREL Phase VI 62
4.20 กราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นของความเร็วลม และความหนาแน่นพลังงานลม
ที่บริเวณดอยม่อนล้าน จังหวัดเชียงใหม่..... 63
4.21 งานรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นตัวทดสอบ
ภายใต้สถิติลมบริเวณดอยม่อนล้าน จังหวัดเชียงใหม่ 64
4.22 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II
เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลมบริเวณดอยม่อนล้าน จังหวัดเชียงใหม่..... 65

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	=	มุมปะทะ
α_s	=	มุมปะทะในช่วงเกิดการป้อ
β	=	มุมเผิน
η_D	=	ประสิทธิภาพของ Actuator disk
ϕ	=	มุมลมเข้า
Γ	=	Gamma function
Ω	=	ความเร็วเชิงมุม
ρ	=	ความหนาแน่นของอากาศ
σ'	=	ความแน่นจำเพาะที่รัศมีใด ๆ
σ_V	=	ความแปรผันของความเร็วลม
a	=	ค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกน
a′	=	ค่าการเหนี่ยวนำเชิงมุม
A_d	=	พื้นที่ของแผ่นดิสก์
B	=	จำนวนใบกังหัน
C_P	=	สัมประสิทธิ์กำลัง
C_T	=	สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉาก
c	=	ความยาวเส้นคอร์ดที่รัศมีใด ๆ
C	=	พารามิเตอร์ระดับ
C_D	=	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
$C_{D,max}$	=	สัมประสิทธิ์แรงต้านสูงสุด
C_L	=	สัมประสิทธิ์แรงยก
C_{Ls}	=	สัมประสิทธิ์แรงยกในช่วงเกิดการป้อ
D	=	แรงต้าน
dD	=	อนุพันธ์ของแรงต้าน
dF	=	อนุพันธ์ของแรงในแนวสัมผัส
dL	=	อนุพันธ์ของแรงยก

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

dP	=	อนุพันธ์ของงานในย่านวงแหวนที่รัศมีใด ๆ
dQ	=	อนุพันธ์ของแรงบิด
dT	=	อนุพันธ์ของแรงตั้งฉาก

บทที่ 1
บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ลมเป็นพลังงานสะอาดและจัดว่าเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ใช้ไม่มีวันหมด ได้มีการริเริ่มนำพลังงานลมไปใช้อย่างกว้างขวางโดยเฉพาะประเทศในทวีปยุโรป ซึ่งต่อไปในอนาคตอาจนำมาทดแทนพลังงานฟอสซิลที่มีแต่จะราคาสูงขึ้นและถูกใช้หมดไปในที่สุด การลงทุนกับพลังงานลมค่อนข้างใช้เงินลงทุนที่สูง เพราะทางเลือกหนึ่งคือการติดตั้งกังหันลม ซึ่งชนิดของกังหันลมที่ติดตั้งนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน หากใช้ในการสูบน้ำอาจเป็นกังหันลมแบบที่สร้างเองได้โดยที่กลไกไม่มีความซับซ้อน และไม่จำเป็นต้องกังวลในเรื่องประสิทธิภาพมากนัก แต่หากเป็นกังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าย่อมต้องการกังหันลมที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง อีกทั้งต้องผลิตงานได้สูงสุดและจำเป็นต้องมีกลไกเพื่อป้องกันการเสียหายภายใต้สภาวะลมแรงเกินจุดออกแบบ

การออกแบบมุมเผินให้เหมาะสมกับสถิติลมในพื้นที่ นอกจากจะสามารถป้องกันการเสียหายอันเกิดจากสภาวะลมแรงได้แล้ว ยังทำให้กังหันลมผลิตงานได้สูงสุด ดังนั้นแนวทางในงานวิจัยนี้จึงเป็นไปในด้านการออกแบบมุมเผินที่เหมาะสม เพื่อให้ได้งานรายปีสูงสุด โดยเฉพาะกังหันลมที่ใช้งานในประเทศไทยมุมเผินของใบกังหันจะต้องเหมาะกับลักษณะจำเพาะของลมในประเทศไทย รวมถึงสถิติลมในแต่ละท้องถิ่นซึ่งยังคงมีความแตกต่างกันออกไป

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กังหันลมที่ติดตั้งในประเทศไทยส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศซึ่งต้องใช้ต้นทุนสูง และกังหันลมเหล่านั้นยังอาจมีลักษณะที่ไม่เหมาะกับสถิติลมในประเทศไทย ผลเสียที่เกิด คือ กังหันลมทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพก่อให้เกิดความสูญเสีย

กังหันลมเป็นทางเลือกหนึ่งของการผลิตพลังงานที่ยั่งยืนและสะอาด หากลงทุนติดตั้งกังหันลมในบริเวณที่มีความเร็วลมที่เหมาะสม ผลตอบแทนย่อมคุ้มค่าต่อการลงทุน แรกเริ่ม กังหันลมถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานในบริเวณที่มีกระแสลมแรงทางตอนเหนือของยุโรป ซึ่งความเร็วลมต่ำสุดที่จะทำให้กังหันลมเริ่มทำงานนั้น จะอยู่ที่ประมาณ 8 m/s หากนำเข้ากังหันลมเพื่อติดตั้งในประเทศไทยโดยไม่มีการดัดแปลงให้เหมาะสมกับลักษณะความเร็วลมของพื้นที่ก็อาจไม่คุ้มทุน เพราะกังหันลมที่นำเข้ามานั้นจะสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ตามที่ออกแบบไว้ได้เพียงไม่กี่วันในหนึ่งปี

เท่านั้น เนื่องจากประเทศไทยมิได้อยู่ในภูมิภาคที่มีกระแสลมแรง ดังนั้นกังหันลมจึงทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพก่อให้เกิดความสูญเสีย

ถึงแม้ว่าจะออกแบบกังหันลมให้เหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศไทยแล้วก็ตาม เมื่อเจาะจงพิจารณาลักษณะความเร็วลมในแต่ละพื้นที่ในประเทศไทยก็ยังมีการแจกแจงความเร็วลมของกราฟสถิติลมในแต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการจัดมุมเผินของใบกังหันย่อมแตกต่างกันออกไปในแต่ละพื้นที่ เพื่อให้ได้งานรายปีสูงสุดสำหรับพื้นที่นั้น โดยที่กังหันลมส่วนใหญ่มักถูกออกแบบมาให้ผลิตกำลังงานได้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดที่ จุดออกแบบจุดหนึ่งโดยทั่วไปจุดนี้หมายถึงจุดที่มีความหนาแน่นกำลังลมสูงสุดตามกราฟสถิติลม นอกจากนี้มีความเป็นไปได้ที่สถิติลมในหลายพื้นที่อาจมีความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากัน ดังนั้นลักษณะกังหันลมและมุมเผินที่เหมาะสมจึงเป็นค่าเดียวกัน แต่ในความเป็นจริง ถึงแม้ว่าในหลายพื้นที่อาจมีความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากัน แต่กราฟสถิติอาจมีรูปทรงและความเบ้ต่างกัน ทำให้จุดที่เกิดกำลังลมสูงสุดเปลี่ยนไป และมุมเผินที่เหมาะสมก็ย่อมเปลี่ยนไปด้วย ในประเทศไทยมีลมมรสุมที่เปลี่ยนทิศทางปีละสองครั้งและยังมีการเสริมด้วยลมท้องถิ่น ดังนั้นสถิติลมจึงอาจแตกต่างไปจากลมในยุโรปหรือประเทศอื่นใดที่ผลิตกังหันลม

ในงานวิจัยนี้จะหามุมเผินที่ดีที่สุดโดยไม่ได้พิจารณาการออกแบบที่ลมเพียงจุดเดียว แต่เป็นการนำกราฟสถิติลมตลอดทั้งปีมาพิจารณาเพื่อหางานที่ได้ตลอดทั้งปี โดยใช้ทฤษฎีเชิงอุดมคติเป็นพื้นฐานในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายการทำงานของกังหันลม จากนั้นเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับผลการทดลองเพื่อความมั่นใจในความแม่นตรงของโปรแกรม จากนั้นจึงใช้โปรแกรมเพื่อค้นหามุมเผินที่ดีที่สุดในการผลิตงานรายปี

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาจุดออกแบบที่ดีที่สุดในเชิงอากาศพลศาสตร์ ในประเด็นของมุมเผินของใบกังหันที่เหมาะสมกับสถิติลมเฉพาะของพื้นที่

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ทำการวิเคราะห์มุมเผินที่ดีที่สุดของใบกังหันลมแกนนอนด้วยทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์ประกอบกับข้อมูลสถิติลมจำเพาะของพื้นที่ 3 รูปแบบ โดยทำการจำลองรูปแบบการแจกแจงความถี่ของความเร็วลมจากสมการแจกแจงความน่าจะเป็นของไวบูลล์ (Weibull probability distribution function)

1.4.2 ใช้กังหันลมของ National Renewable Energy Laboratory (NREL) รุ่น NREL Phase II และ NREL Phase VI เป็นต้นแบบในการวิเคราะห์และหาจุดเหมาะสมของมุมเผิน เมื่อนำกังหันลมทั้ง 2 รุ่นมาใช้ในพื้นที่ที่มีสถิติลม 3 รูปแบบดังกล่าว

1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ของกังหันลม

1.5.2 สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษา MATLAB จากทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ของกังหันลม (Blade element momentum theory)

1.5.3 เปรียบเทียบผลกับการทดลอง เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการวิจัย

1.5.4 แสดงผลให้อยู่ในรูปของแผนภูมิที่สะดวกต่อการออกแบบ

1.5.5 การวิเคราะห์ และสรุปผล

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เป็นแนวทางในการเพิ่มผลผลิตพลังงานของกังหันลมแกนนอน

1.6.2 เพื่อสนับสนุนการนำแหล่งพลังงานทดแทนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อประเทศชาติ

1.6.3 เพื่อเพิ่มพูนความรู้อันจะนำไปสู่งานวิจัยที่สูงยิ่งขึ้นต่อไป

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

แนวทางเพื่อที่จะนำพลังงานลมมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุด ของงานวิจัยนี้เน้นไปในด้านการออกแบบใบกังหันให้มีความเหมาะสมกับสถิติลมเฉพาะในพื้นที่ที่จะติดตั้งกังหันลม ในประเด็นของการค้นหามุมเผินที่ดีที่สุด เพื่อที่จะสกัดพลังงานจากลมให้ได้สูงที่สุดภายในเวลาหนึ่งปี

ในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกังหันลม รวมทั้งอธิบายถึงแนวทางในการนำทฤษฎีดังกล่าวมาใช้ในประเด็นที่ทำการวิจัย

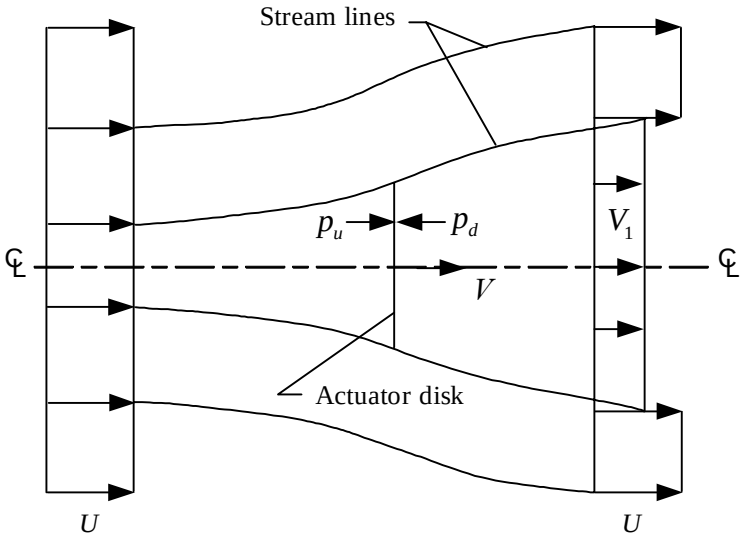
2.2 สรุปทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ชนิดของกังหันลม : กังหันลมแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้ (Spera, 1994)

1) แบ่งตามแรงที่กระทำกับใบพัดกังหัน
   - ชนิดแรงยก (Lift type) : เป็นกังหันลมที่หมุนได้โดยอาศัยแรงยก
   - ชนิดแรงต้าน (Drag type) : เป็นกังหันลมที่หมุนได้โดยอาศัยแรงต้าน
2) แบ่งตามแนวแกนการหมุน
   - กังหันลมแกนตั้ง (Vertical-axis wind turbine, VAWT) : เป็นกังหันลมที่มีแกนการหมุนอยู่ในแนวตั้ง หรือแกนการหมุนตั้งฉากกับกระแสลม
   - กังหันลมแกนตั้ง (Horizontal-axis wind turbine, HAWT) : เป็นกังหันลมที่มีแกนการหมุนอยู่ในแนวนอน หรือแกนการหมุนขนานไปกับกระแสลม

กังหันลม คือ เครื่องจักรมีหน้าที่สกัดพลังงานจลน์จากลม โดยพลังงานจลน์ดังกล่าวจะถูกส่งถ่ายผ่านเพลาที่เชื่อมต่อกับโรเตอร์ของกังหันลมในรูปของพลังงานกล และพลังงานกลจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานทางด้านไฟฟ้าต่อไป เนื้อหาส่วนนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์กังหันลม รวมทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการปรับแก้การสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อการไหลของอากาศผ่านกังหันลมเป็นการไหลแบบสามมิติ เช่น ค่าปรับแก้การสูญเสียที่ปลายโคนใบกังหัน, แบบจำลองหลังการป้อ (Post stall model)

2.2.2 ทฤษฎีของ Rankine-Froude



รูปที่ 2.1 แบบจำลองการไหลผ่าน Actuator disk (Spera, 1994)

แบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์ในรูปแบบที่ง่ายที่สุดสำหรับกังหันลม คือ แบบจำลอง Actuator disk ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งนิยามให้โรเตอร์ของกังหันลมเป็น disk เอกพันธ์ กระแสลมที่ไหลผ่าน Actuator disk จะถูกต้าน และเกิดการล้นออกด้านข้าง จึงเป็นเหตุให้เส้นกระแสถูกเหนี่ยวนำให้มีลักษณะดังรูป 2.1 ทฤษฎีนี้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Rankine ในปี ค.ศ. 1895 เพื่อที่จะอธิบายลักษณะความเร็วต้นกระแส (Up stream) และ ท้ายกระแส (Down stream) ของโรเตอร์

จากทฤษฎี Axial momentum กำหนดการไหลของกระแสลมที่ไหลผ่านกังหันลมเป็นแบบเอกรูป (Uniform) ให้ความเร็วลมที่กระแสอิสระ (Free-stream) มีค่าเป็น V_0 ความเร็วลมจะลดลงเมื่อไหลผ่านใบกังหัน เมื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลด้วยสมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และ สมการอนุรักษ์พลังงาน ภายใต้สมมติฐานให้มีเฉพาะการไหลในแนวแกน (อยู่ในแนวตั้งฉากกับโรเตอร์ของกังหันลม) และไม่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน (Rotational motion)

สมการของแรงตั้งฉาก (Thrust force) สามารถหาได้จาก 2 หลักการ คือ (Spera, 1994; Manwell, McGowan and Rogers, 2002)

1) ทฤษฎี Momentum

$$F_T = \dot{M}_D(V_0 - V_1) = \rho A_D V(V_0 - V_1) \quad (2.1)$$

เมื่อ F_T คือ แรงตั้งฉากที่กระทำบนแผ่นดิสก์ [N]

$\dot{M}_D$ คือ อัตราการไหลของลมผ่านแผ่นดิสก์ [kg/s]

V_d คือ ความเร็วลมที่แผ่นดิสก์ [m/s]

V_1 คือ ความเร็วลม ณ ตำแหน่งที่เกิดคลื่นท้าย (wake) [m/s]

A_D คือ พื้นที่ของแผ่นดิสก์ [m^2]

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ [kg/v^3]

2) ความดันตกระหว่าง Actuator disk

เมื่อพิจารณาแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับ Actuator disk จะได้

$$F_T = A_D(P_u - P_d) \quad (2.2)$$

เมื่อ P_u และ P_d คือ ความดันที่ต้นกระแส และ ท้ายกระแสของ Actuator disk [N/m^2]

จากรูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของ Stream tube ของกระแสที่ไหลผ่าน Actuator disk แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือต้นกระแส และ ท้ายกระแส เมื่อนำสมการของเบอร์ Bernoulli มาใช้หาค่าความดันที่กระทำกับแผ่นดิสก์ทั้งสองด้าน ส่วนแรกวิเคราะห์ความดันที่ต้นกระแส เริ่มพิจารณาตั้งแต่กระแสอิสระ (Free-stream) จนถึงด้านต้นลมของแผ่นดิสก์ ในส่วนที่ 2 วิเคราะห์ความดันท้ายกระแส เริ่มพิจารณาตั้งแต่ด้านท้ายลมของแผ่นดิสก์จนถึงบริเวณคลื่นท้ายอย่างไกล (Far-wake) (Vermeer et.al, 2003)

คลื่นท้าย คือ บริเวณในส่วนท้ายกระแส สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ คลื่นท้ายอย่างใกล้ (Near-wake) และ คลื่นท้ายอย่างไกล ซึ่งคลื่นท้ายอย่างใกล้ คือ บริเวณตั้งแต่ด้านหลังของ Actuator disk ห่างออกไปเป็นระยะเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนหมุน ซึ่งบริเวณนี้จะได้รับผลกระทบเนื่องจากการหมุนของส่วนหมุนเป็นอย่างมาก และ คลื่นท้ายอย่างไกล คือ ส่วนที่อยู่ถัดจากคลื่นท้ายอย่างใกล้ไปทางท้ายกระแส

ส่วนที่ 1 : ต้นกระแสถึงด้านต้นลมของ Actuator disk

$$P_{\infty} + 0.5\rho U^2 = P_u + 0.5\rho V^2 \tag{2.3}$$

ส่วนที่ 2 : ด้านท้ายลมของ Actuator disk ถึงคลื่นท้ายอย่างไกล

$$P_{\infty} + 0.5\rho V_1^2 = P_d + 0.5\rho V^2 \tag{2.4}$$

นำสมการ (2.3) – (2.4) ได้สมการ

$$P_u - P_d = 0.5\rho(U^2 - V_1^2) \tag{2.5}$$

จากนั้นแทนค่าสมการ (2.5) ลงในสมการ (2.2) ได้

$$F = 0.5\rho A_D(U^2 - V_1^2) \tag{2.6}$$

เมื่อนำสมการ (2.1) รวมกับสมการ (2.6) ได้

$$V = 0.5(U + V_1) \tag{2.7}$$

จากสมการ (2.7) พบว่าความเร็วที่ Actuator disk คือ ค่าเฉลี่ยระหว่างความเร็วที่กระแสอิสระและความเร็วที่คลื่นท้ายอย่างไกล ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่กระแสอิสระและ ความเร็วที่ Actuator disk สามารถเขียนได้ในรูป

$$U - V = aU \tag{2.8}$$

โดยที่ a คือ ค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกน (Axial induction factor)

เมื่อแทนค่าสมการ (2.7) ลงในสมการ (2.8) จะได้

$$U - 0.5(U + V_1) = aU \tag{2.9}$$

$$0.5(U - V_1) = aU \tag{2.10}$$

$$U - V_1 = 2(U - V) = 2aU \tag{2.11}$$

หรือ $$V_1 = U(1 - 2a) \tag{2.12}$$

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ กำหนดให้เป็นการไหลแบบอุณหภูมิคงที่ และความดันที่คลื่นท้ายเท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้นจะสามารถหางานได้จาก

$$P = 0.5\rho A_D \left(V_0^2 - V_1^2\right) V_D = 0.5\rho A_D V_D \left(V_0 + V_1\right)\left(V_0 - V_1\right) \tag{2.13}$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_P) จากทฤษฎี Rankine-Froude มีค่าเท่ากับ

$$C_P = \frac{P}{0.5\rho V_0^3 A} = 4a\left(1 - a\right)^2 \tag{2.14}$$

ซึ่ง C_p จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $a = 1/3$ ดังนั้น

$$C_{P,max} = 4 \times \left(\frac{1}{3}\right) \times \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = \frac{16}{27} = 0.593 \tag{2.15}$$

ค่าคงที่นี้เรียกว่า Betz limit เป็นเสมือนค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลม แต่ยังไม่ใช่ค่าประสิทธิภาพที่สูงที่สุดอย่างแท้จริง เพราะเมื่อพิจารณาสมการที่ (2.14) ค่า C_p คือ อัตราส่วน

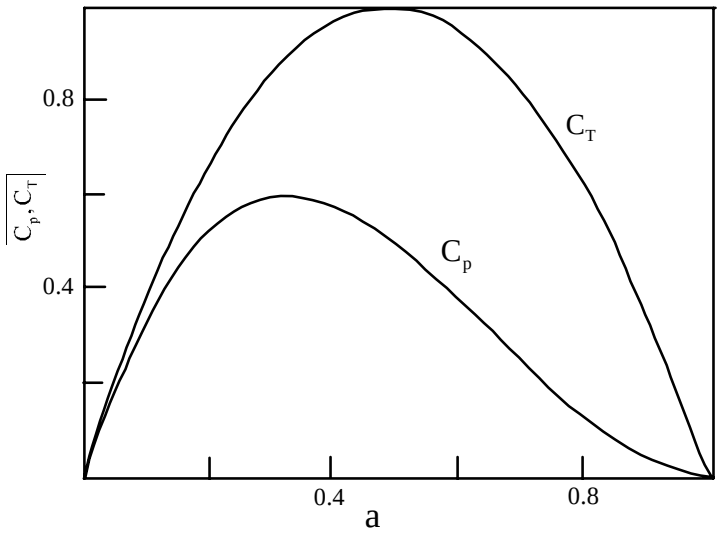
ระหว่างกำลังที่กังหันลมสามารถ1สกัดได้จากลม เทียบต่อ กำลังของลมทั้งหมด ซึ่งพิจารณาในขณะที่ไม่มีวัตถุขวางการไหล ดังนั้นที่ Actuator disk จึงมีอัตราการไหลเป็น ρUA_D แต่ในความเป็นจริงอัตราการไหลที่ Actuator disk ควรมีค่าเท่ากับ ρVA_D จึงเป็นที่มาของการนิยามประสิทธิภาพของ Actuator disk ดังนี้

$$\eta_D = \frac{F_T \cdot V}{0.5\rho U^2 V A_D} = 4a(1-a) \tag{2.16}$$

จากสมการ (2.16) หากพิจารณาในแง่ของแรงจะได้ สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉาก (Trust coefficient) ดังนี้

$$C_T = \frac{F_T}{0.5\rho U^2 A_D} = 4a(1-a) \tag{2.17}$$

เมื่อค่า a มากกว่า 0.5 หรือน้อยกว่า 0.5 จะทำให้ค่า C_T ลดลงเนื่องจากเกิดความเร็วคลื่นท้าย (V_1) ขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียให้แรงมีค่าลดลง ส่วนค่า a ที่ให้ค่า C_T มากที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 0.5 จาก $V_1 = U(1-2a)$ นั่นคือ ในสภาวะดังกล่าวไม่เกิดความเร็วคลื่นท้าย แรงที่ได้จึงมีค่าสูงที่สุด (Berton and et.al, 2001)



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_P, C_T และ a

ในการจำลองในแบบ Actuator disk ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่สูงที่สุดคือ 16/27 (Betz limit) โดยที่พิจารณาจำนวนใบพัดของกังหันลมมีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้น Betz limit จึงมีค่ามากว่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากในทางปฏิบัติ เพราะในความเป็นกังหันลมมีจำนวนใบพัดที่จำกัด และเกิดแรงกระทำบนใบพัดนอกจากแรงยก เรียกว่า แรงต้าน

2.2.3 ทฤษฎีของ Glauert

ในปี 1935 Glauert ได้พัฒนาทฤษฎี Momentum โดยปรับปรุงแบบจำลอง Actuator disk ให้เหมาะสมกับการนำมาวิเคราะห์กังหันลม บางครั้งจึงเรียกทฤษฎีนี้ว่า ทฤษฎี Glauert momentum โดยพิจารณาให้มีเฉพาะแรงยกที่กระทำบนใบกังหันลม และมีการไหลหมุนวนในบริเวณคลื่นท้าย ดังนั้น แรงตั้งฉาก (Trust) และ แรงบิด จึงหาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงแกน (Axial momentum) และ โมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) ภายในวงแหวน (Annular ring) ตามลำดับ ดังสมการ

$$dT = Bc\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 C_L \cos\phi \, dr \tag{2.18}$$

และ $$dQ = Bc\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 C_L \sin\phi \; r \, dr \tag{2.19}$$

เมื่อ dT คือ อนุพันธ์ของแรงตั้งฉาก (N)

dQ คือ อนุพันธ์ของแรงบิด (N-m)

V_{rel} คือ ความเร็วลมสัมพัทธ์ (m/s)

c คือ ความยาวเส้นคอร์ดที่รัศมีใด ๆ (m)

B คือ จำนวนใบกังหัน

จากสมการ (2.18) และ (2.19) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$dT = 4a\left(1-a\right)\rho V_0{}^2 \pi r \, dr \tag{2.20}$$

และ $$dQ = 4a'(1-a)\rho V_0 \pi r^3 \omega \, dr \qquad (2.21)$$

ซึ่งอนุพันธ์ของกำลังงานที่คำนวณได้ในย่านวงแหวน หาได้จากสมการ

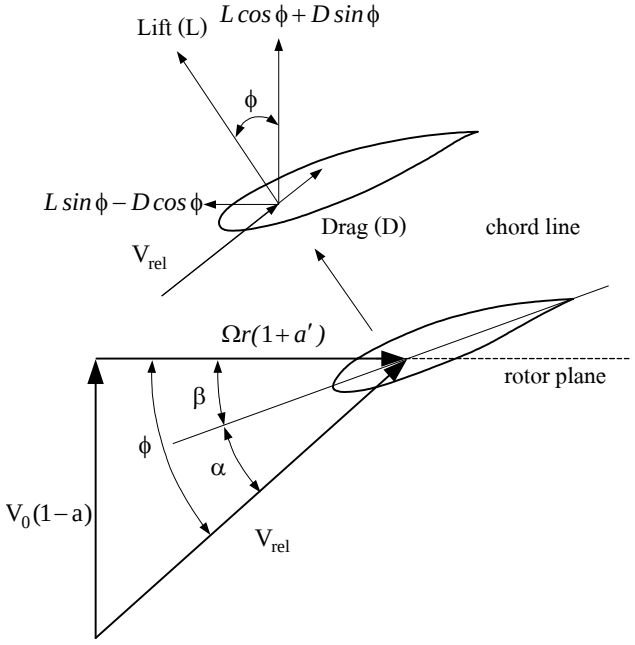
$$dP = \Omega \, dQ = \Omega \, r \, \rho \, V_d \, (r\omega)(2\pi r \, dr) \qquad (2.22)$$

เมื่อ dP คือ อนุพันธ์ของงานในย่านวงแหวนที่ r ใด ๆ (W)

โดยที่ $a' = \frac{\omega}{2\Omega}$, ค่าการเหนี่ยวนำเชิงมุม (Angular induction factor)

2.2.4 ทฤษฎี Blade element (BET)

วิธีนี้จะพิจารณาความเร็ว และ แรงที่กระทำบนหน้าตัดสองมิติของใบกังหัน ซึ่งแรงยก และ แรงต้าน จะคำนวณได้จากการแตกแรง และ รวมแรงเชิงเวคเตอร์ ดังแสดงในรูป 2.3 โดยที่ L คือ แรงยก D คือ แรงต้าน ϕ คือ มุมลมเข้า (Inflow angle) α คือ มุมปะทะ (Angle of attack) และ β คือ มุมเผิน (Pitch angle) เมื่อพิจารณาเวกเตอร์ความเร็วจากรูปที่ 2.3 จะได้ความสัมพันธ์



รูปที่ 2.3 สนามความเร็ว และ แรงที่กระทำบนหน้าตัดแพนอากาศ

$$\tan\phi = \frac{V_0(1-a)}{\Omega r(1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \tag{2.23}$$

ความเร็วสัมพัทธ์หาได้จากความสัมพันธ์

$$V_{rel} = \left[V_0^{\,2}(1-a)^2 + (\Omega r)^2(1+a')^2 \right]^{1/2} \tag{2.24}$$

โดยที่ $\sin\phi = \frac{U}{V_{rel}}(1-a)\,; \quad \cos\phi = \frac{\Omega r}{V_{rel}}(1+a')$

จะได้ $dL = C_L \frac{1}{2}\rho V_{rel}^{\,2} c\, dr$ (2.25)

และ $dD = C_D \frac{1}{2}\rho V_{rel}^{\,2} c\, dr$ (2.26)

เมื่อแตกแรงยก และ แรงต้านเข้าสู่แนวแกนการหมุน ผลบวกของทั้งสองแรงนี้ คือ แรงตั้งฉาก (Normal force)

$$dT = dL\cos\phi + dD\sin\phi \tag{2.27}$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อแตกแรงยกและแรงต้านเข้าสู่แนวสัมผัสทิศทางการหมุน ผลบวกของทั้งสองแรง คือ แรงในแนวสัมผัส (Tangential force)

$$dF = dL\sin\phi - dD\cos\phi \tag{2.28}$$

หากกังหันลมมีจำนวนใบกังหันเท่ากับ B ดังนั้นผลรวมของแรงตั้งฉากของกังหันลม ณ ตำแหน่งที่พิจารณา r วัดจากจุดศูนย์กลางของโรเตอร์ มีค่าเท่ากับ

$$dT = B\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 \left(C_L\cos\phi + C_D\sin\phi \right) c\, dr \tag{2.29}$$

$$dT = \sigma'\pi\rho\left[\frac{V_0(1-a)}{\sin\phi}\right]^2 \left(C_L\cos\phi + C_D\sin\phi\right) r\,dr \tag{2.30}$$

เมื่อ $\sigma' = Bc/2\pi r$ คือ ความแน่นจำเพาะที่ r ใด ๆ (Local solidity)

และอนุพันธ์ของแรงบิดอันเนื่องมาจากแรงสัมผัสที่กระทำ ณ ตำแหน่ง r จากจุดศูนย์กลาง มีค่าเท่ากับ

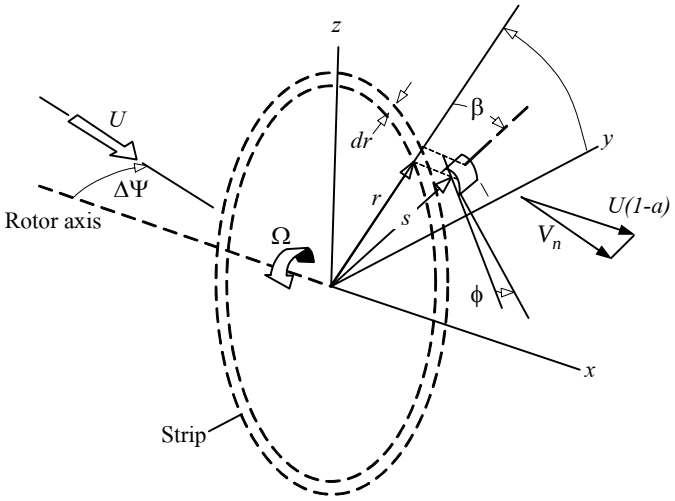
$$dQ = B\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 \left(C_L\sin\phi - C_D\cos\phi\right) cr\,dr \tag{2.31}$$

$$dQ = \sigma'\pi\rho\left[\frac{V_0(1-a)}{\sin\phi}\right]\left[\frac{\Omega r(1+a')}{\cos\phi}\right]\left(C_L\sin\phi - C_D\cos\phi\right) r^2\,dr \tag{2.32}$$

ดังนั้น $dP = dQ\,\Omega$ (2.33)

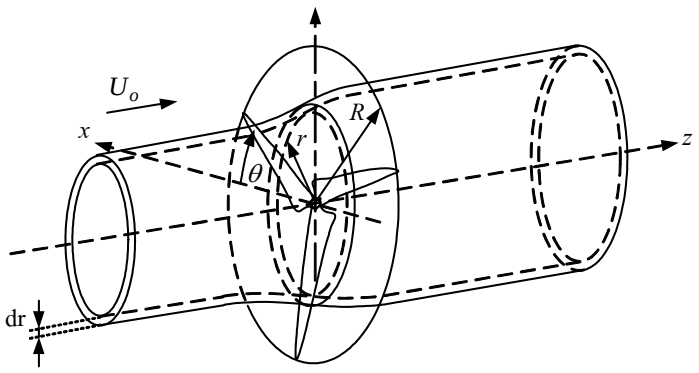
2.2.5 ทฤษฎี Blade element momentum (BEM)

ทฤษฎีนี้จะเป็นทฤษฎีที่ผสมผสานระหว่าง ทฤษฎี Momentum ของ Glauert และ ทฤษฎี Blade element วิธีนี้จะทำการแบ่งใบกังหันออกเป็นชิ้นย่อย (Strip) และพิจารณาสนามความเร็ว และ แรงกระทำต่าง ๆ บนแต่ละชิ้นย่อยของใบกังหัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 บางครั้งจึงเรียกทฤษฎีนี้ว่า ทฤษฎี Strip จากการนำสมการแรงตั้งฉาก และ สมการแรงบิด ของทฤษฎี Momentum ของ Glauert คือ สมการ (2.18) และ (2.19) และทฤษฎี Blade element คือ สมการ (2.30) และ (2.32) มาเท่ากัน จะได้สมการเพื่อหาค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกน และ ค่าการเหนี่ยวนำเชิงมุม ที่เหมาะสมได้ สำหรับการวิเคราะห์กระทำภายใต้สมมติฐานดังนี้ คือ (Freris, 1990)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของชิ้นย่อย และ สนามความเร็ว

- สมมติฐานแรก คือ กำหนดให้ การไหลเป็นแบบเอกรูป และลักษณะการไหลแบบหมุนวน (Circulation) รอบใบพัดมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอสำหรับกังหันลมที่ปรับมุมเผินตลอดใบ หากใบกังหันเป็นแบบปรับมุมเผินได้บางส่วน สมมติฐานนี้จะผิดพลาดไป
- สมมติฐานที่สอง คือ ไม่พิจารณาการไหลในแนวความยาวของใบพัด (Spanwise flow) จึงเป็นการพิจารณาการไหลแบบ 2 มิติ ผ่านหน้าตัดแพนอากาศเท่านั้น
- สมมติฐานที่สาม คือ กำหนดให้ความเร็วในแนวสัมผัสมีค่าที่คงที่ ด้วยสมมติฐานนี้ การหมุนรอบแกนของชิ้นย่อยจะทำให้เกิดวงแหวนเอกรูป (Uniform annular ring) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงแหวนที่เกิดจากชิ้นย่อยที่ r ใด ๆ

$$\sigma'\pi\rho\left[\frac{V_0(1-a)}{\sin\phi}\right]^2\left(C_L\cos\phi+C_D\sin\phi\right)r\,dr=4a(1-a)\rho V_0{}^2\pi r\,dr \tag{2.34}$$

และ

$$\sigma'\pi\rho\left[\frac{V_0(1-a)}{\sin\phi}\right]\left[\frac{\omega r(1+a')}{\cos\phi}\right]\left(C_L\sin\phi-C_D\cos\phi\right)r^2\,dr$$
$$=4a'(1-a)\rho V_0\pi r^3\,\omega\,dr \tag{2.35}$$

จัดรูปทั้งสองสมการใหม่จะได้

$$\frac{a}{(1-a)}=\frac{\sigma'}{4\sin^2\phi}\left(C_L\cos\phi+C_D\sin\phi\right) \tag{2.36}$$

$$\frac{a'}{(1+a')}=\frac{\sigma'}{4\sin\phi\cos\phi}\left(C_L\sin\phi-C_D\cos\phi\right) \tag{2.37}$$

กำหนดให้

$$P_1=\frac{\sigma'}{4\sin^2\phi}\left(C_L\cos\phi+C_D\sin\phi\right) \tag{2.38}$$

$$P_2=\frac{\sigma'}{4\sin\phi\cos\phi}\left(C_L\sin\phi-C_D\cos\phi\right) \tag{2.39}$$

ดังนั้น

$$a=\frac{P_1}{1+P_1} \tag{2.40}$$

$$a' = \frac{P_2}{1+P_2} \tag{2.41}$$

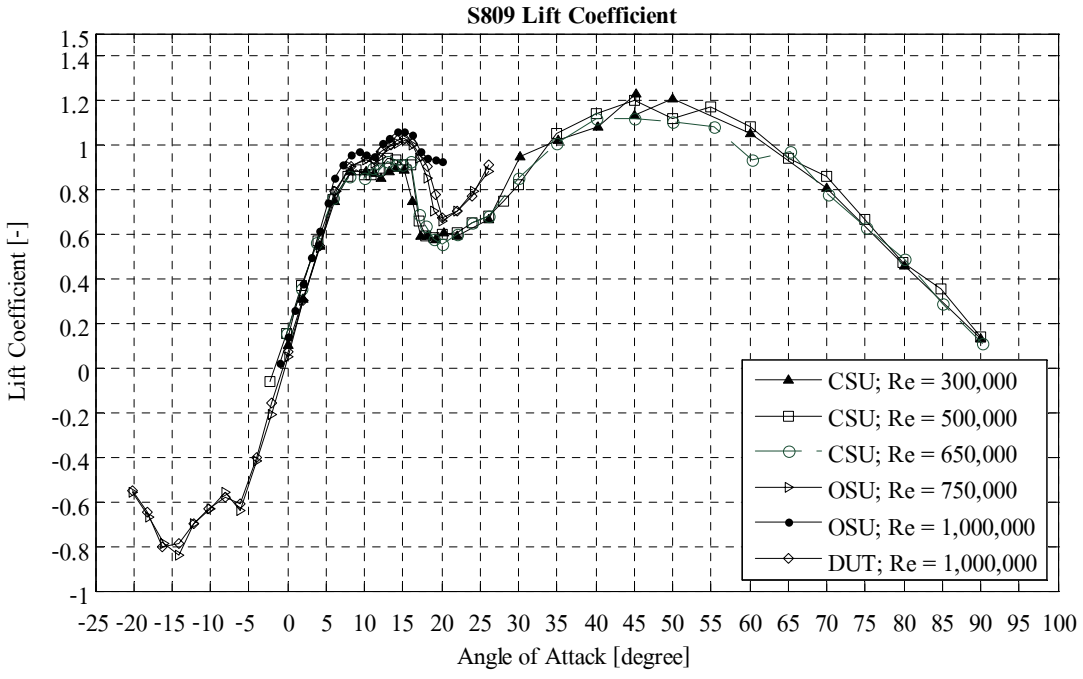
สมการ (2.40) และ (2.41) จะนำไปใช้ในการคำนวณหาเงื่อนไขการไหล (Flow condition) ต่อไป

2.2.6 วิธีการทำซ้ำเพื่อหาผลเฉลยค่า a และ a′

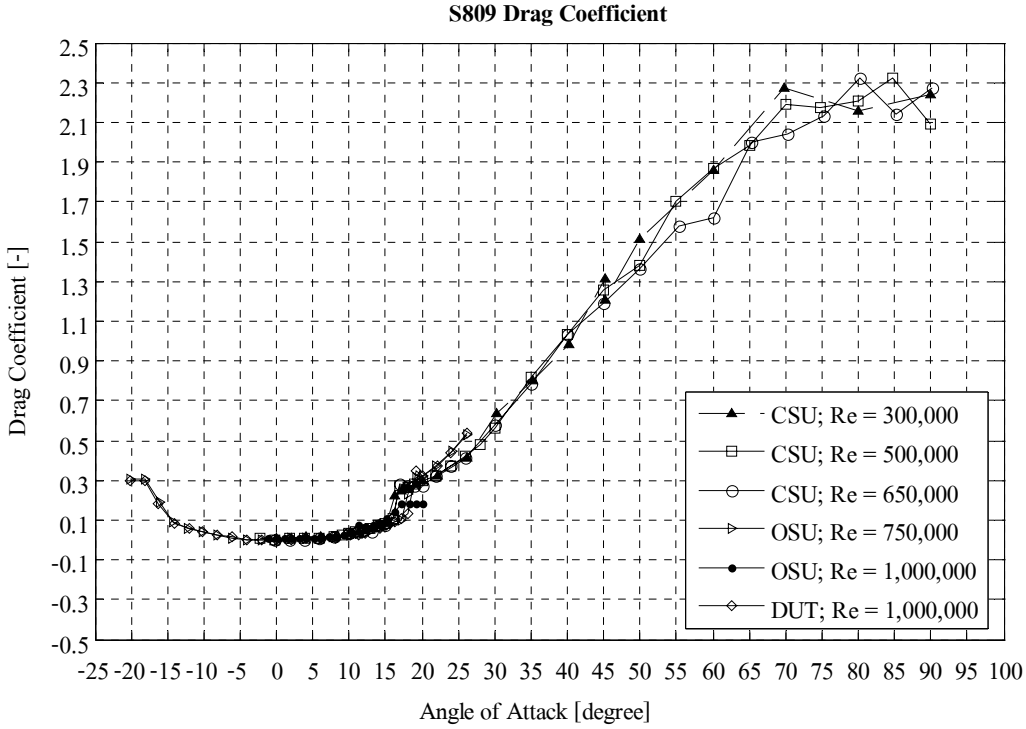
เริ่มจากการเดาค่า a และ a′

1) คำนวณมุมลมเข้า ϕ จากสมการ (2.23)
2) คำนวณมุมปะทะ จากความสัมพันธ์ $\phi = \alpha + \beta$ จากนั้นจะได้ค่า C_L และ C_D ซึ่งเป็นฟังชั่นของมุมปะทะ หาได้จากการทดสอบจากอุโมงค์ลม ดังรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 ได้จากการทดสอบหน้าตัดแพนอากาศ S809
3) ปรับแก้ค่า a และ a′ จากสมการ (2.40) และ (2.41)

คำนวณซ้ำจนกว่าค่า a และ a′ จะลู่เข้า (Eggleston and Stoddard, 1987)



รูปที่ 2.6 สัมประสิทธิ์แรงยก, C_L ที่ได้จากการทดลองสำหรับแพนอากาศ S809 (Jonkman, 2003)



รูปที่ 2.7 สัมประสิทธิ์แรงต้าน, C_D ที่ได้จากการทดลองสำหรับแพนอากาศ S809 (Jonkman, 2003)

2.2.7 ตัวประกอบการสูญเสียปลายใบ (Tip loss factor)

ผลกระทบจากการไหลแบบสามมิติเมื่อใบกังหันมีความยาวจำกัด คือ การสูญเสียที่ปลายใบ (Tip loss) จะเกิดการไหลล้นจากด้านล่างปีกซึ่งเป็นด้านที่มีความดันสูงของใบกังหัน (Pressure side) ขึ้นสู่ด้านบนปีกซึ่งเป็นด้านที่มีความดันต่ำ (Suction side) แบบจำลองการสูญเสียปลายใบกังหันที่นิยมใช้ คือ แบบจำลองของ Prandtl และ ผลเฉลยแม่นตรงของ Goldstien ซึ่งแบบจำลองของ Prandtl นั้นค่อนข้างง่าย และเป็นสมการแบบปิด (Close form) ส่วนผลเฉลยแม่นตรงของ Goldstien จะแสดงในรูปอนุกรมไม่จำกัดของ Modified Bessel function แต่ผลลัพธ์จากทั้งสองวิธีนี้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นแบบจำลองของ Prandtl จึงเป็นที่นิยมมากกว่า (Eggleston and Stoddard, 1987) สมการปรับแก้การสูญเสียปลายใบ Prandtl ได้เสนอในรูปแบบอย่างง่ายไว้ดังนี้

$$F_{tip} = (2/\pi)\cos^{-1}\exp\left(-f_{tip}\right) \tag{2.42}$$

โดยที่ $$f_{tip} = \frac{B}{2}\left(\frac{R-r}{r\sin\phi}\right) \tag{2.43}$$

จัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$f_{tip} = (1/2R)(R-r)B\sqrt{(1+X^2)} \tag{2.44}$$

เมื่อ R คือ รัศมีของโรเตอร์

X คือ อัตราส่วนความเร็วปลายใบกังหัน มีค่าเท่ากับ $R\Omega / V_0$

นอกจากการสูญเสียปลายใบแล้วยังมีการสูญเสียโคนใบ (Hub loss) ซึ่งจะรวมอยู่ในเทอมการสูญเสียโดยรวม (F) ดังสมการ

$$F = F_{tip}.F_{hub} \tag{2.45}$$

ซึ่ง $$F_{hub} = (2/\pi)\cos^{-1}\exp(-f_{hub}) \tag{2.46}$$

โดยที่ $$f_{hub} = \frac{B}{2}\left(\frac{r-r_h}{r\sin\phi}\right) \tag{2.47}$$

เมื่อ r_h คือ รัศมีจากจุดศูนย์กลางของโรเตอร์ถึงโคนใบกังหัน

ค่าปรับแก้การสูญเสียจะใช้ปรับแก้ค่าแรงตั้งฉาก และ แรงบิด ที่ได้จาก BET ส่งผลถึงสมการ (2.37) และ (2.38) ใน BEM รวมไปถึงค่าความเร็วที่กังหันลม คือ $U = V_0(1-aF)$

2.2.8 แบบจำลองหลังการป้อ (Post stall model)

เมื่อ $\alpha > 15^\circ$ จะถือช่วงนั้นเกิดการป้อขึ้น กำหนดให้ α_s คือ มุมปะทะในช่วงที่เกิดการป้อ และ AR คือ Aspect Ratio $= R/c$ เพื่อให้ได้ผลที่ดีขึ้นจึงแบบจำลองหลังการป้อ Viterna and Corrigan (1981) มาช่วยปรับแก้ค่า C_L และ C_D ให้สมจริงมากขึ้น ซึ่งประกอบด้วยชุดสมการดังต่อไปนี้

$$C_{Dmax} = 1.11 + 0.018AR \tag{2.48}$$

$$C_D = B_1 \sin^2 \alpha + B_2 \cos \alpha \tag{2.49}$$

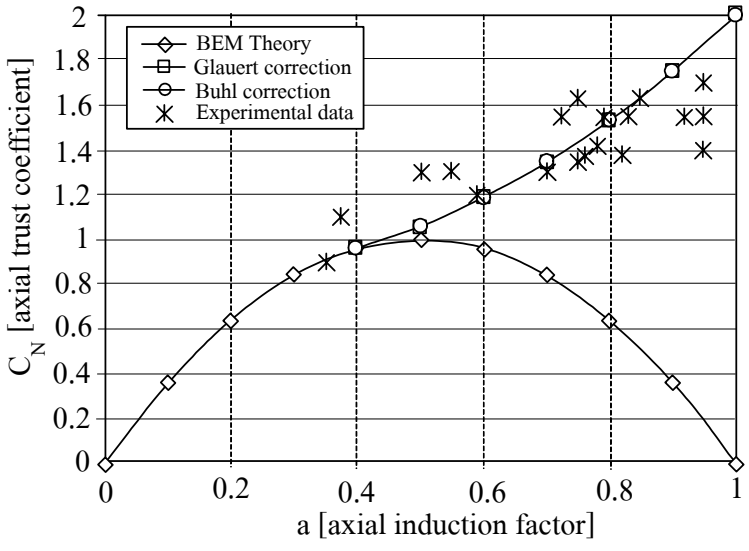
เมื่อ $B_1 = C_{Dmax}$, $B_2 = \left(1/\cos \alpha_s\right)\left(C_{Ds} - C_{Dmax} \sin^2 \alpha_s\right)$ และ $15 \le \alpha \le 90$

$$C_L = A_1 \sin^2 \alpha + A_2 \left(\cos^2 \alpha / \sin \alpha\right) \tag{2.50}$$

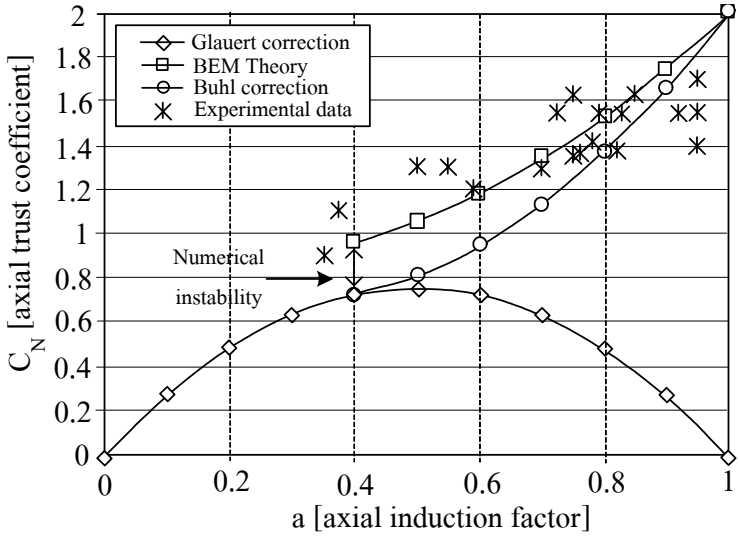
เมื่อ $A_1 = B_1 / 2$, $A_2 = \left(C_{Ls} - C_{Dmax} \sin \alpha_s \cos \alpha_s\right)\left(\sin \alpha_s / \cos^2 \alpha_s\right)$ และ $15 \le \alpha \le 90$

2.2.9 การปรับแก้ค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกน

การคำนวณค่า a จากสมการ (2.40) จะให้ค่าที่แม่นยำเชื่อถือได้ ในช่วงระหว่าง $0 \le a \le 4$ เมื่อ $a > 4$ ทฤษฎี BEM ให้ผลลัพธ์ที่ผิดไปจากผลการทดลองมาก ในขณะที่แบบจำลองปรับแก้ของ Glauert จะให้ผลลัพธ์ที่ดีเฉพาะในกรณีที่ไม่พิจารณาค่าการสูญเสียปลายใบ ($F = 1$) จากรูปที่ 2.7 แต่เมื่อพิจารณาการสูญเสียปลายใบร่วมด้วย ($F < 1$) ที่ค่า $a = 0.4$ จะเกิดความไม่เสถียรเชิงตัวเลข (Numerical instability) ขึ้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ค่า a เมื่อพิจารณา $F=1$ จากแบบจำลองของ Glauert (Lanzafame and Messina, 2007)



รูปที่ 2.9 ค่า a เมื่อพิจารณา $F<1$ จากแบบจำลองของ Glauert

(Lanzafame and Messina, 2007)

จากปัญหาดังกล่าว Buhl (2005) จึงได้นำเสนอแบบจำลองที่ใช้ปรับแก้ค่า a ในกรณีที่ $a>0.4$ และพิจารณาค่าการสูญเสียปลายใบ ดังสมการ

$$a=\frac{18F-20-3\sqrt{C_N\left(50-36F\right)+12F\left(3F-4\right)}}{36F-50} \tag{2.51}$$

เมื่อ C_T คือ สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉาก (Trust coefficient) ซึ่งจัดให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$C_T=\frac{\sigma'\pi\rho\left[\frac{V_0\left(1-a\right)}{\sin\phi}\right]^2\left(C_l\cos\phi+C_d\sin\phi\right)r\,dr}{\frac{1}{2}\rho\pi R^2V_r^2} \tag{2.52}$$

2.2.10 สมการการแจกแจงความน่าจะเป็นของไวบูลล์

การออกแบบกังหันลมให้เหมาะสมกับลักษณะลมของพื้นที่ จะต้องทำการวิเคราะห์สถิติลมเฉพาะพื้นที่ร่วมด้วย ซึ่งสมการทางสถิติที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของความเร็วลม คือ สมการแจกแจงความน่าจะเป็นของไวบูลล์ (Spera, 1994) ดังต่อไปนี้

$$PDF(V)dV = (k/C)(V/C)^{k-1}\exp\left[-(V/C)^{k}\right]dV \tag{2.53}$$

จากสมการ (2.53) แสดงการแจกแจงความน่าจะเป็นของความเร็วลมในช่วงระหว่าง V ถึง $V+dV$ โดยที่ C คือ พารามิเตอร์ระดับ (Scale parameter) และ k คือ พารามิเตอร์รูปร่าง (Shape parameter) สามารถหาค่าได้จากสมการต่อไปนี้ (กว้าน, 2527)

$$C = \frac{\bar{V}}{\Gamma(1+1/k)} \tag{2.54}$$

$$k = \left(\frac{\sigma_V}{\bar{V}}\right)^{-1.086} \tag{2.55}$$

ซึ่ง $\bar{V}$ คือ ความเร็วลมเฉลี่ย หาได้จาก

σ_V คือ ความแปรผันของความเร็วลม

$$\bar{V} = C\Gamma\left[1+(1/k)\right] \tag{2.56}$$

เมื่อ $\Gamma(x)$ คือ Gamma function

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t}t^{x-1}dt \tag{2.57}$$

และ Gamma function สามารถประมาณค่าได้โดย

$$\Gamma(x) = \left(\sqrt{2\pi x}\right)\left(x^{x-1}\right)\left(e^{-x}\right)\left(1+\frac{1}{12x}+\frac{1}{288x^2}-\frac{139}{51840x^3}+\ldots\right) \tag{2.58}$$

สำหรับการแจกแจงความเร็วลมในหน่วย ชั่วโมง/ปี (hour/year)

$$H\left(V < V_P < V + dV\right) = 8760\left(k/C\right)\left(V/C\right)^{k-1}\exp\left[-\left(V/C\right)^{k}\right]dV \tag{2.59}$$

ซึ่ง H คือ จำนวนชั่วโมงต่อปีของความเร็วลมในช่วงระหว่าง V ถึง $V + dV$

สำหรับกำลังงานรายปีคำนวณได้จาก

$$P_{annual} = 8760\int_u PDF \cdot P_t \, dV \tag{2.60}$$

โดยที่ P_t คือ งานที่ได้จากกังหันลม

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวอ้าง รวมทั้งวิจารณ์ถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือใกล้เคียงกับการศึกษานี้ ก่อนอื่นจึงขอสรุปสรุปทฤษฎีที่ได้อธิบายข้างต้นพอสังเขป ดังต่อไปนี้

ทฤษฎีเบื้องต้นอยู่บนพื้นพื้นฐานของทฤษฎีโมเมนตัม พัฒนาขึ้นโดย Rankine (1895) เพื่อใช้วิเคราะห์ใบจักรเรือเดินสมุทร โดยพิจารณาโรเตอร์ของใบจักรเป็นเสมือน Actuator disk ต่อมาได้ปรับปรุงแบบจำลอง Actuator disk ให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์กังหันลม โดยแรง และพลังงานที่ดูดซับ พิจารณาได้จากการถ่ายโอนโมเมนตัม แต่ไม่สามารถคำนวณแรงกระทำบนโรเตอร์ได้จากทฤษฎีนี้ ต่อมาในปี ค.ศ.1935 Glauert (Burton, 2001) พัฒนาแบบจำลอง Actuator disk ให้สมจริงมากขึ้นโดยรวมผลกระทบที่เกิดจากการหมุนวนที่คลื่นท้าย โดยที่แรง และ พลังงานที่ได้จากโรเตอร์ พิจารณาจากการถ่ายโอนโมเมนตัมเชิงแกน และ โมเมนตัมเชิงมุม ซึ่งแรงที่กระทำบนโรเตอร์มีเฉพาะแรงยก จากนั้น Wilson (1994) ได้วิจัยต่อจากงานของ Glauert คือการนำแบบจำลอง Actuator disk รวมเข้ากับทฤษฎี Blade element (เป็นทฤษฎีที่ช่วยในการพิจารณาแรงทาง Aerodynamic ที่กระทำกับหน้าตัดแพนอากาศใน 2 มิติ ซึ่งค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของหน้าตัดแพนอากาศจะได้จากการทดสอบ) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมแกนนอน และ แกนตั้ง ทฤษฎีนี้จะถูกสร้างเป็นโปรแกรมสำหรับออกแบบ และประเมินประสิทธิภาพกังหันลม ซึ่งจะกล่าวถึงโปรแกรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

Tangler and David (2005) ได้ปรับปรุงข้อมูลของหน้าตัดแพนอากาศในช่วงหลังป้อ เพื่อให้ผลการทำนายพลังงานจากกังหันลม NREL Phase VI ในช่วงที่เกิด peak และ post-peak แม่นยำ

ยิ่งขึ้น ผลที่ได้คือ BEM สามารถทำนายได้ดีในช่วงความเร็วลม 5-8 m/s โดยใช้ข้อมูลทดสอบหน้าตัดแพนอากาศจาก Delft University of Technology (DUT) ร่วมกับข้อมูลหน้าตัดแพนอากาศที่คำนวณได้จากแบบจำลองหลังการป้อ Viterna and Corrigan (1981) และช่วงความเร็วลมตั้งแต่ 8-10 m/s เป็นช่วงความเร็วลมที่ก่อให้เกิดกลุ่มวอร์เท็คส์ขึ้นบริเวณ 30-45% ของความยาวใบ ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดแรงยกขึ้นสูงจึงเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิด post-peak ของพลังงาน ในช่วงนี้ถือว่าเป็นช่วงหลังการป้อซึ่งพฤติกรรมของหน้าตัดแพนอากาศจะคล้ายคลึงกับพฤติกรรมของแผ่นเรียบ (Flat plate) ดังนั้นจึงเลือกใช้ $C_{L,avg}$ และ $C_{D,avg}$ ที่มุม 20 องศา จะให้ผลที่สอดคล้องกันดีระหว่างผลการทดสอบ และ ผลการคำนวณ สำหรับการคำนวณที่ความเร็วตั้งแต่ 16-22 m/s จะต้องมีการปรับค่าสัดส่วนความเพรียว (Aspect ratio) เพื่อให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลองยิ่งขึ้น อย่างไรก็ดีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการปรับในแบบจำลองหลังการป้อ รวมถึงข้อมูลหน้าตัดแพนอากาศที่คำนวณได้นั้น เหมาะที่จะนำไปใช้ร่วมกับ BEM เพื่อทำนายสมรรถนะของกังหันลมได้เป็นอย่างดีแต่อยู่ในเงื่อนไขที่ว่า กังหันลมที่นำมาใช้วิเคราะห์จะต้องเป็นของ NREL Phase VI และ หน้าตัดแพนอากาศ S809 เท่านั้น หากนอกเหนือจากเงื่อนไขนี้ จะต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแบบจำลองหลังการป้อใหม่เพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำในการทำนายสมรรถนะของกังหันลม

Lanzafame and Messina (2007) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้พื้นฐานของทฤษฎี BEM เพื่อทำการออกแบบโรเตอร์ โดยเริ่มต้นจากการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกังหันลม เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ ชนิดของหน้าตัดแพนอากาศ ความโตของใบ มุมเผิน และ มุมบิด เป็นต้น จากนั้นจึงสามารถคำนวณแรงกระทำที่ใบกังหัน รวมทั้งแรงบิด และ พลังงานที่เพลาโรเตอร์ อุปสรรคที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความเสถียร คือ กระบวนวิธีในการคำนวณหาค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกน และความน่าเชื่อถือของพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบหน้าตัดแพนอากาศในอุโมงค์ลม อย่างไรก็ดี แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้จากการปรับปรุงทฤษฎี BEM ด้วยแบบจำลอง และ ค่าปรับแก้ต่าง ๆ เช่น แบบจำลองหลังป้อ Viterna and Corrigan ตัวประกอบการสูญเสียปลายใบของ Prandtl และ แบบจำลองปรับแก้ค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกนของ Buhl ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลแรงบิดจากการผลทดสอบกังหันลม NREL Phase VI และ ผลลัพธ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ พบว่าผลจากแบบจำลองนี้ค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดสอบโดยเฉพาะที่ช่วงความเร็วลมต่ำ แต่ที่ความเร็วลม 13-20 m/s ผลการทำนายต่ำกว่าผลการทดสอบพอสมควรแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ดี และหลังจากความเร็วลม 20 m/s เป็นต้นไปผลการทำนายจึงกลับมาดีอีกครั้ง จึงถือได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถประเมินสมรรถนะของกังหันลมได้อย่างค่อนข้างดีในช่วงความเร็วลมที่กว้าง

Maalawi and Badawy (2000) ได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลมโดยหาคำตอบ ของค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกนให้อยู่ในรูป Closed form solution ด้วยวิธีที่เรียกว่า Exact trigonometric function method โดยทำการแปลงสมการพื้นฐานของ Glauert (1935)ให้อยู่ในรูปฟังก์ชั่นตรีโกณมิติ ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้จึงต้องอยู่ในรูปฟังก์ชั่นต่อเนื่องทั้งหมด จากการที่เป็นสมการแบบ Close form จึงทำให้การคำนวณทำได้รวดเร็วยิ่งขึ้น แต่ยังต้องอาศัยวิธีเชิงตัวเลขในการหาคำตอบเนื่องจากสมการที่ได้เป็นแบบไม่เชิงเส้น วิธีนี้ต่างจากการหาคำตอบแบบดั้งเดิมของ Wilson et. al. (1976) ซึ่งใช้การคำนวณแบบทำซ้ำเพื่อหาค่าเหนี่ยวนำเชิงแกน งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการออกแบบมุมบิด (twist) และความโตใบ (chord) ตลอดความยาวใบของกังหัน ERDA NASA MOD-0 พบว่าวิธีของ Maalawi and Badawy ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับ Wilson et. al. เป็นอย่างดี และได้พัฒนาต่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพกังหันตลอดช่วงความเร็วลมทำงานด้วย ทั้งนี้ ทั้งสองวิธีอยู่บนการวิเคราะห์ที่ไม่คิดผลของแรงต้านเพื่อให้สมการที่เกี่ยวข้องอยู่ในรูปที่สามารถหาคำตอบได้ง่าย จึงทำให้ผลการคำนวณประสิทธิภาพสูงกว่าความเป็นจริงประมาณ 14% ขณะที่การไหลยังไม่เกิดการแยกตัว (Separation)

งานวิจัยทางด้าน CFD ส่วนใหญ่นิยมใช้หลักการ Actuator disk เพื่อวิเคราะห์แรงกระทำบนโรเตอร์ ซึ่งเป็นหลักการที่ง่ายเนื่องจากสมมติให้การไหลที่ Actuator disk เป็นการไหลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสมมติฐานที่ขัดแย้งกับความเป็นจริง เพราะการไหลผ่านกังหันลมจริงซึ่งมีจำนวนใบจำกัด ลักษณะการไหลจะมีความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้น Christophe and Christian (2004) จึงได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถคำนวณหาแรงที่กระทำบนกังหันลมในรูปของความเร็วไม่ต่อเนื่อง (Velocity discontinuities) บนพื้นฐานของแบบจำลอง Actuator disk ร่วมกับทฤษฎีเส้นยก (Lifting line theory) เรียกหลักการนี้ว่า แบบจำลอง Actuator-Lifting Surface จากหลักการดังกล่าวจะถูกนำมาสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขเชิง 2 มิติ และ 3 มิติ เพื่อที่จะศึกษาปัญหาขั้นพื้นฐาน 3 ประการ คือ ปัญหาการกระจายตัวอย่างไม่คงรูปของกลุ่มวอร์เท็คส์เชิง 2 มิติ แรงกระทำอย่างไม่คงรูปบน Actuator disk และการไหลหมุนวนเมื่อมีอิทธิพลของปีกจำกัด (Finite wing) มาเกี่ยวข้อง สำหรับผลลัพธ์ เช่น แรงยกเหนี่ยวนำ และความเร็วเหนี่ยวนำ ที่ทำนายได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่ไม่สามารถทำนายค่าแรงต้านเหนี่ยวนำได้เนื่องจากเหตุผลทางด้านทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยไม่เพียงพอที่จะสร้างกริดที่ไม่เกิดผลกระทบกับผลเฉลย ซึ่งในงานวิจัยต่อมาได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว ไปวิเคราะห์กังหันลม 4 เครื่อง คือ NREL Phase II IV และ VI รวมทั้งกังหันลม Tjaereborg พบว่าหลักการนี้สามารถทำนายผลของแรงกระทำบนกังหันลมในช่วงที่ยังไม่เกิดการป้อได้ค่อนข้างดี แต่เมื่อกังหันลมอยู่ในช่วงที่เกิดการป้อผลลัพธ์ที่ได้จะเกิดความแตกต่างจากทฤษฎี Blade element ค่อนข้างมาก เนื่องจากแบบจำลองนี้ได้ตัดผลกระทบอันเกิดจาก

แรงต้านออกไป เมื่อกังหันลมเริ่มเกิดการป้อซึ่งเป็นช่วงที่เกิดแรงต้านขึ้นสูง ผลเฉลยที่ได้จาก 2 หลักการเปรียบเทียบกัน จึงเกิดความแตกต่างมากขึ้น

Venkatesh and Kulkarni (2006) ได้ทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อออกแบบความเร็วรอบของกังหันลมที่เหมาะสมกับไวบูลล์พารามิเตอร์ เพื่อให้ได้พลังงานรายปีสูงสุด สำหรับสมการที่เป็นเครื่องบ่งชี้ว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมกับสถิติลม ควรมีค่าเป็นเท่าใดนั้น เรียกว่า Maxima Energy Indicator (MEI) ซึ่งสมการนี้จะถูกจำลองขึ้นจาก 2 หลักการ คือ หลักการเชิงตัวเลข (Numerical approach) และหลักการเชิงวิเคราะห์ (Analytical approach) เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกันดีระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลอง และผลการทดลอง จากนั้นจึงนำแบบจำลองที่ได้มาใช้ในการออกแบบความเร็วรอบที่ดีที่สุด โดยทำการปรับค่า k ของสมการการแจกแจงความน่าจะเป็นของไวบูลล์ จาก 1.8-2.8 ไปทีละ 0.2 ค่า โดยกำหนดให้ค่า C คงที่เท่ากับ 5 m/s เมื่อค่า k เพิ่มขึ้น การแจกแจงความถี่ของพลังงานลมจะเกิดขึ้นสูงที่บริเวณลมอ่อนหรืออีกนัยหนึ่งคือ เส้นกราฟของความหนาแน่นพลังงานลมจะบีตัวแคบลงและเลื่อนตำแหน่งมาทางด้านซ้ายมิซึ่งเป็นย่านของลมอ่อน ในทางกลับกัน เมื่อค่า k ลดลง เส้นกราฟความหนาแน่นพลังงานลมจะกว้างขึ้นและเลื่อนตำแหน่งไปทางด้านขาวมือซึ่งเป็นย่านลมแรง ผลที่ได้ คือ ความเร็วรอบ และค่า k จะมีความสัมพันธ์ในเชิงโพลิโนเมียล โดยที่ความเร็วรอบจะลดลงเมื่อค่า k เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องดีเนื่องจากค่า k สูงบ่งชี้ว่ากังหันลมทำงานที่ย่านความเร็วลมต่ำความเร็วลมที่เหมาะสมจึงต่ำไปด้วย

Duque, et al. (2000) ได้นำเสนอผลจากการทำนายค่าพลังงาน และแรงทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมแกนนอน ที่ได้จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่แตกต่างกัน 3 วิธี ซึ่งวิธีแรกพัฒนาขึ้นภายใต้หลักการ BEM เป็นรู้จักในชื่อ YAWDYN/AERODYN โดย Hanson (1999) วิธีที่สองภายใต้หลักการ Vortex lattice (VT) เป็นรู้จักในชื่อ CAMRAD II พัฒนาโดย Johnson (1998) ซึ่งโปรแกรมทั้ง 2 ใช้แบบจำลองหน่วงการป้อ (Stall delay model) ของ Du and Selig (1998) และวิธีสุดท้ายจากหลักการ Reynolds-average thin layer Navier-Stokes method (RaNS) ร่วมกับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence model) Baldwin-Lomax และ Baldwin-Barth ซึ่งเป็นที่รู้จักในชื่อ OVERFLOW พัฒนาขึ้นโดย Buning, et.al (1990) ผลการทำนายกำลังงาน และแรงทางอากาศพลศาสตร์ ในช่วงก่อนป้อทั้ง 3 แบบจำลองให้ผลเป็นที่ค่อนข้างดี เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกังหันลมจากฐานข้อมูลของ IEA Annex XIV (Simms et al., 1999) สำหรับช่วงหลังป้อเป็นต้นไป YAWDYN/AERODYN และ CAMRAD II ยังคงให้ผลการทำนายที่น่าพอใจ เนื่องจากแบบจำลองหน่วงการป้อที่เลือกใช้ค่อนข้างเหมาะสมถึงแม้ว่าบริเวณโคนใบผลการทำนายจะเกินจริงไปอยู่บ้าง ส่วน OVERFLOW นั้นจับพฤติกรรมช่วงเกิดการป้อได้ไม่ดีนัก จึงควรมีการพิจารณาผลกระทบจากการไหลผ่านหน้าตัดแพนอากาศที่ก่อให้เกิดแรงยก และแรงต้านร่วมด้วย

Giguere, Selig and Tangler (1999) ออกแบบใบกังหันโดยวิธีการแลกเปลี่ยน (Trade-offs) ซึ่งใช้หน้าตัดแพนอากาศชนิดแรงยกต่ำ สำหรับกังหันลมแกนนอนที่ควบคุมผ่านการป้อ (Stall-regulated) เดิมที NREL ได้ทำการออกแบบกังหันลมที่ควบคุมผ่านการป้อโดยใช้วิธีแลกเปลี่ยนระหว่างหน้าตัดแพนอากาศชนิดแรงยกต่ำและหน้าตัดแพนอากาชนิดแรงยกสูง โดยเลือกใช้หน้าตัดแพนอากาศ S809 ของ NREL ซึ่งแนวคิดของงานวิจัยนี้คือ การเลือกใช้หน้าตัดแพนอากาศชนิดแรงยกต่ำที่บริเวณปลายปีก เพื่อปรับลดพลังงานส่วนเกินพิกัดในกรณีลมแรง การออกแบบใบกังหันด้วยหลักการนี้ไม่ใช่วิธีการใหม่ และเพื่อให้แน่ใจว่าวิธีการนี้จะสามารถปรับใช้กับหน้าตัดแพนอากาศรุ่นอื่นได้ดีเช่นกัน แนวคิดในการออกแบบคือการหาจุดเหมาะสมระหว่างงานรายปีสูงสุด (Maximum annual energy production) กับจำนวนเงินคืนทุนต่ำสุด อีกทั้งยังต้องวิเคราะห์ความแข็งแรงของใบกังหันโดยโปรแกรมร่วมด้วย ซึ่งรูปทรงใบกังหันจะถูกสร้างโดยโปรแกรม PROPGA (Giguere and Selig, 1997) ใบกังหันที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PROPID (Giguere and Selig, 1997; Selig and Tangler, 1995) เพื่อคำนวณหาค่างานรายปี (Annual energy production, AEP) และวิเคราะห์ความแข็งแรงของใบกังหัน จากนั้นจึงกลับมาพิจารณาขนาด และน้ำหนักเพื่อประเมินราคาต้นทุนซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งของสมการคำนวณหาค่า Cost of Energy (COE) ผลจากการศึกษานี้ได้ข้อสรุปว่า ค่า $C_{L,max}=1$ เป็นค่าต่ำสุดที่ใช้ในกังหันลมแบบความคุมผ่านการป้อ อาจเลือกใช้ค่าต่ำกว่านี้ได้ในกรณีที่ต้องการลดเสียงรบกวน และหากกังหันลมมีขนาดใหญ่ขึ้นควรใช้ค่า $C_{L,max}>1$ แต่สังเกตได้ว่าในงานวิจัยนี้วิเคราะห์เพียงความยาวคอร์ด และชนิดของหน้าตัดแพนอากาศที่มีผลต่อ $C_{L,max}$ โดยมิได้วิเคราะห์มุมเผินร่วมด้วย ทั้งที่มุมเผินมีผลกระทบโดยตรงต่อค่า AEP ซึ่งเป็นเงื่อนไขหนึ่งในการวิเคราะห์หารูปทรงที่เหมาะสมของใบกังหัน

Wasey (2004) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบมุมเผินที่ดีที่สุดเพื่อควบคุมพิกัดพลังงาน (Rated power) ที่ได้จากกังหันลมชนิดควบคุมผ่านการป้อ และ กังหันลมชนิดควบคุมผ่านการลู่ลม (Feather regulation control) เนื่องจากจุดประสงค์ของการออกแบบกังหันลมชนิดนี้ เพื่อที่จะควบคุมพลังงานส่วนเกินในขณะที่กังหันลมทำงานภายใต้สภาวะนอกเหนือจุดออกแบบผ่านรูปทรงที่ดีที่สุดของใบกังหัน คำนวณได้โดยโปรแกรมที่สร้างขึ้นจาก MATLAB ภายใต้ทฤษฎี Blade element ซึ่งรูปทรงที่ดีที่สุดจะได้จากการคำนวณหาจุดเหมาะสมระหว่างพลังงานเฉลี่ยของกังหันลมที่ความเร็วลมต่าง ๆ ร่วมกับ Cost function ที่เป็นผลสืบเนื่องมาจากกระบวนการผลิตใบกังหัน ผลที่ได้คือ รูปทรงที่ดีที่สุดของใบกังหันจะให้พลังงานเฉลี่ยสูงกว่ารูปทรงดั้งเดิมของกังหันลมต้นแบบ เป็นที่น่าสังเกตว่า หากออกแบบโดยคำนึงถึงพลังงานรายปีร่วมด้วย รูปทรงที่คาดว่าดีที่สุดจากการออกแบบ อาจจะไม่ให้พลังงานรายปีสูงสุดก็เป็นได้

งานวิจัยของ Jung et al. (2005) เป็นการวิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลมแบบหมุนสวนทาง (Counter-rotating, C/R) ซึ่งเป็นกังหันลมที่มีใบพัด 2 ชุด คือ โรเตอร์หลัก (Main rotor) และ โรเตอร์ช่วย (Auxiliary rotor) ซึ่งโรเตอร์ช่วย จะต้องมีขนาดเล็กกว่าครึ่งหนึ่งของโรเตอร์หลัก และระยะระหว่างโรเตอร์หลัก กับ โรเตอร์ช่วยจะต้องมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลางของโรเตอร์ช่วย ซึ่งระยะดังกล่าวถือเป็นระยะที่เหมาะสมที่จะทำให้กังหันลมมีสมรรถนะที่ดีที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างกังหันลมที่มีโรเตอร์ช่วย กับที่ไม่มีโรเตอร์ช่วย พบว่ากำลังงานที่ได้จากกังหันลมที่มีโรเตอร์ช่วย มากกว่ากังหันลมที่ไม่มีโรเตอร์ช่วย และค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์กำลังจะมีค่าประมาณ 0.5 แต่ทว่าในงานวิจัยนี้ไม่ได้ลองทำการเปรียบเทียบพลังงานรวมที่ได้ในกรณีที่แยก โรเตอร์หลัก และโรเตอร์ช่วย ออกเป็นกังหันลม 2 เครื่อง

Johansen and Sørensen (2002) ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการไหลที่บริเวณปลายใบกังหันที่มีลักษณะแตกต่างกัน 3 แบบ คือ 1) Original standard tip 2) Swept tip และ 3) Tapered tip พฤติกรรมที่พิจารณา คือ แรงดัด และโมเมนต์ดัด รวมถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า C_L และ C_D ผลที่ได้ คือ โมเมนต์ดัดที่เกิดกับ Original standard tip จะมีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ดัดที่เกิดบนปลายใบกังหันอีก 2 แบบ สำหรับ Original standard tip พบว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น C_L และ C_D จะมีค่าลดลง แต่ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองจะมีค่าคงที่สำหรับ Tapered tip และสำหรับ Swept tip ค่า C_L จะมีค่าคงที่ที่ความเร็วต่ำ และลดลงอย่างรวดเร็วที่ความเร็วสูง ส่วนค่า C_D จะมีค่าลดลงที่ความเร็วต่ำและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความเร็วสูงเนื่องจากปลายใบกังหันลักษณะนี้จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนขึ้นมากบริเวณปลายใบกังหัน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองค่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่บริเวณดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากกังหันลมที่มีปลายใบแตกต่างกันสามแบบ ผลลัพธ์คือ พลังงานที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ารูปทรงของปลายใบกังหันมีผลต่อพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดออกมาจากลมน้อยมาก

Kishinami et al. (2004) ทำการศึกษาสมรรถนะของกังหันลมแกนนอนและทำการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกังหันลมชุดสาธิต กับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี สำหรับตัวแปรที่สามารถบ่งชี้ถึงสมรรถนะของกังหันลม และเหมาะสมกับการนำมาเปรียบเทียบนั้น ได้แก่ สัมประสิทธิ์กำลัง C_p สัมประสิทธิ์แรงบิด C_q และ สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉาก C_N เทียบต่อความเร็วปลายใบกังหัน λ สำหรับกังหันลมที่พิจารณานั้นจะมีรูปทรงของใบกังหันที่แตกต่างกันสามแบบ คือ Type I Type II และ Type III ซึ่ง Type I และ Type II ใช้หน้าตัดแพนอากาศ NACALS04XX และ NACA44XX ตามลำดับ ซึ่งเป็นใบกังหันที่มีการบิดตัวอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของใบกังหัน สำหรับ Type III ดัดแปลงมาจาก Type II ความแตกต่างระหว่างใบกังหันทั้งสองแบบนี้ คือ มุมบิดที่ระยะ 60% ของความยาวใบกังหันจนถึงปลายของใบกังหัน

แบบ Type III นั้นมีค่าเท่ากับ 0 องศา ผลที่ได้จากการทดสอบ และ การคำนวณ มีความสอดคล้องและสามารถสรุปได้ว่า ใบกังหันแบบ Type I เหมาะที่จะใช้กับกังหันลมที่มีระบบควบคุม เพราะสัมประสิทธิ์กำลังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการปรับมุมเผิน และใบกังหันแบบ Type III นั้นเหมาะสำหรับกังหันลมที่มีขนาดเล็ก ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีระบบควบคุมมุม เนื่องจากมุมเผินไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์กำลังเท่าใดนัก โดยเฉพาะที่ความเร็วลมต่ำ

ในการออกแบบกังหันลมนอกจากจะคำนึงถึงการออกแบบรูปร่างใบกังหันเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำกังหัน โดยที่จะต้องทำการวิเคราะห์ว่าแรงที่กระทำบนใบกังหันนั้นเกิดในลักษณะใด และก่อให้เกิดความเค้นในแบบใดมากที่สุด ซึ่งงานวิจัยของ สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ (2538) ได้กล่าวถึงทฤษฎีวิเคราะห์และผลเฉลยเชิงตัวเลขของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ทำนายค่าความเค้นบนใบกังหันลมภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ กัน และสรุปได้ว่า ความเค้นบนใบกังหันลมสามารถแบ่งเป็นความเค้นจากแรงดึง และ ความเค้นจากโมเมนต์ดัด ซึ่งค่าความเค้นบนใบกังหันลมจะแปรตามภาระบนใบกังหัน และมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio) สูงขึ้น ซึ่งค่าความเค้นเนื่องจากแรงดึงนั้นขึ้นอยู่กับแรงหนีศูนย์กลาง จะมีขนาดมากว่าค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดซึ่งเป็นแรงทางอากาศพลศาสตร์อย่างมาก ดังนั้นความเสียหายที่เกิดขึ้นกับกังหันลมแนวนอนในสภาวะปกติจึงเกิดจากความเค้นเนื่องจากแรงดึง

สำหรับงานวิจัยของ Noda and Flay (1999) ได้ทำการวิเคราะห์ความล้าที่โคนของใบกังหัน Danish-type ด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาจากภาษา Delphi โดยใบกังหันที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะเปรียบเทียบกันระหว่างวัสดุ 2 ชนิด คือ SB-combi และ Khaya Ivvorensis พบว่าความเสียหายเนื่องจากความล้าเป็นผลมาจากตัวแปรต่างๆ ดังนี้ คือ ความเร็วลมโดยเฉลี่ย Turbulence intensity wind shear และ ลมที่พัดขึ้นในแนวตั้ง โดยเฉพาะความเสียหายเนื่องจาก Turbulence intensity ที่มีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นนั้น จะทำให้ความเสียหายเนื่องจากความล้าเกิดมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการเปรียบเทียบใบกังหันทั้ง 2 ชนิด นั้นจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และผลกระทบเนื่องจาก Wind shear ต่อความเสียหายเนื่องจากความล้านั้นค่อนข้างต่ำ

บทที่ 3
ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.1 กล่าวนำ

ทฤษฎีที่นิยมใช้ในการออกแบบ และวิเคราะห์แรงทางด้านอากาศพลศาสตร์ที่กระทำกับกังหันลม คือ ทฤษฎี Blade element momentum ดังนั้นโปรแกรมที่สร้างขึ้นจึงอ้างอิงทฤษฎีดังกล่าวเป็นหลัก และเพื่อปรับแก้การไหลเชิงอุดมคติให้สอดคล้องกับความเป็นจริงยิ่งขึ้นจึงพิจารณาแบบจำลองชดเชยการสูญเสียการไหลร่วมด้วย ซึ่งให้ผลการคำนวณที่แม่นยำพอสมควร ขั้นตอนต่อมา คือ การทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลอง หากแนวโน้มระหว่างผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม และผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือ และเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานจริงต่อไป

3.2 ขั้นตอนการสร้างและการหาผลเฉลยของโปรแกรม

3.2.1 ขั้นตอนการสร้างโปรแกรม

โปรแกรมคอมพิวเตอร์จากงานวิจัยนี้ ได้พัฒนาขึ้นมาจากโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เหมาะกับการแก้ไขปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะปัญหาที่ตัวแปรอยู่ในรูปเวคเตอร์ และ เมทริกซ์ อีกทั้งยังรวบรวมฟังก์ชันสำเร็จรูปไว้มากมาย จึงช่วยประหยัดเวลาในการเขียนโปรแกรมไปได้มาก

โปรแกรมที่สร้างขึ้นนี้จะแบ่งเป็นโปรแกรมหลัก ซึ่งบันทึกข้อมูลเป็น Script file และโปรแกรมย่อยซึ่งบันทึกข้อมูลเป็น Function file และถูกเรียกใช้ในโปรแกรมหลักเพื่อคำนวณและส่งคืนค่าปรับแก้ต่าง ๆ รวมทั้งค่า C_L และ C_D โดยที่โปรแกรมหลักจะคำนวณหาแรงบิด, งานที่ผลิตได้จากกังหันลม และงานรายปีอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากงานโดยรวมที่ได้จากกังหันลมตลอดทั้งปี สำหรับโปรแกรมย่อย จะประกอบไปด้วย 1) โปรแกรมย่อยที่ 1 : คำนวณหาค่า a และ a′ รวมทั้งค่า F 2) โปรแกรมย่อยที่ 2 : คำนวณหาค่า PDF ของไวบูลล์ สำหรับสถิติลม 3 รูปแบบ 3) โปรแกรมย่อยที่ 3 : ค้นหาค่า C_L และ C_D ของหน้าตัดแพนอากาศที่สัมพันธ์กับมุม α และ Re ซึ่งโปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อยจะสามารถอธิบายขั้นตอนโดยละเอียดได้ดังต่อไปนี้

- **โปรแกรมหลัก**

เนื่องจากการคำนวณภายในโปรแกรมหลักเป็นการคำนวณหาแรงกระทำทางอากาศพลศาสตร์ และงานรายปี ดังนั้นสมการหลักในโปรแกรม คือ สมการที่ได้จากบทที่ 2 ดังต่อไปนี้

$$dQ(r) = B\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 \left(C_L \sin\phi - C_D \cos\phi\right) c\, dr \tag{3.1}$$

ซึ่ง $$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{V_0(1-a)}{\Omega r(1+a')}\right) \tag{3.2}$$

และ $$V_{rel} = \left[V_0{}^2(1-a)^2 + (\Omega r)^2(1+a')^2\right]^{1/2} \tag{3.3}$$

สมการ (3.2) และสมการ (3.3) จะถูกปรับใหม่เมื่อพิจารณาการสูญเสียปลายใบและโคนใบดังต่อไปนี้

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{V_0(1-aF)}{\Omega r(1+a')}\right) \tag{3.4}$$

และ $$V_{rel} = \left[V_0{}^2(1-aF)^2 + (\Omega r)^2(1+a')^2\right]^{1/2} \tag{3.5}$$

โดยที่ a , a' และ F จะถูกคำนวณและส่งค่ามาจากโปรแกรมย่อยที่ 1

C_L และ C_D จะถูกค้นหาและส่งค่ามาจากโปรแกรมย่อยที่ 3

$$dP(r) = dQ(r)\,\Omega \tag{3.6}$$

หากต้องการคำนวณพลังงานที่ได้จากกังหันลมที่ความเร็วลมใด ๆ สามารถทำได้โดยการอินทีเกรตอนุพันธ์ของพลังงานในแต่ละชิ้นย่อย จากสมการ (3.6) ตลอดความยาวใบกังหัน

สำหรับการคำนวณงานรายปี จะคำนวณได้จากผลคูณระหว่างงานที่ได้จากกังหันลมที่ความเร็วลมใด ๆ กับค่าการแจกแจงความน่าจะเป็นของความเร็วลมตลอดทั้งปี ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{annual}(V) = 8760 \int_u PDF(V) \cdot P(V) dV \tag{3.7}$$

โดยที่ PDF จะถูกส่งค่ามาจากโปรแกรมย่อยที่ 2

- **โปรแกรมย่อย**

1) โปรแกรมย่อยที่ 1 : คำนวณหาค่า a, a′, F

จากทฤษฎี BEM จะคำนวณค่า a และ a′ ได้จากสมการ

$$a = \frac{P_1}{1 + P_1} \tag{3.8}$$

$$a' = \frac{P_2}{1 + P_2} \tag{3.9}$$

โดยที่ $$P_1 = \frac{\sigma'}{4\sin^2\phi}\left(C_L \cos\phi + C_D \sin\phi\right) \tag{3.10}$$

$$P_2 = \frac{\sigma'}{4\sin\phi\cos\phi}\left(C_L \sin\phi - C_D \cos\phi\right) \tag{3.11}$$

และ $$\sigma' = Bc / 2\pi r \tag{3.12}$$

หากพิจารณาการสูญเสียปลายใบร่วมด้วย จะต้องทำการปรับสมการ (3.10) และ สมการ (3.11) ใหม่ได้ดังนี้

$$P_1 = \frac{\sigma'}{4F\sin^2\phi}\left(C_L \cos\phi + C_D \sin\phi\right) \tag{3.13}$$

$$P_2 = \frac{\sigma'}{4F\sin\phi\cos\phi}\left(C_L\sin\phi - C_D\cos\phi\right) \tag{3.14}$$

ซึ่ง $$F = F_{tip}.F_{hub} \tag{3.15}$$

โดยที่ $$F_{tip} = \left(2/\pi\right)\cos^{-1}\exp\left(-f_{tip}\right) \tag{3.16}$$

$$f_{tip} = \frac{B}{2}\left(\frac{R-r}{r\sin\phi}\right) \tag{3.17}$$

และ $$F_{hub} = \left(2/\pi\right)\cos^{-1}\exp\left(-f_{hub}\right) \tag{3.18}$$

$$f_{hub} = \frac{B}{2}\left(\frac{r-r_h}{r\sin\phi}\right) \tag{3.19}$$

เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่ดียิ่งขึ้นจึงมีการพิจารณาแบบจำลองหลังการป้อร่มด้วย ในที่นี้เลือกแบบจำลองหลังการป้อ Viterna and Corrigan ซึ่งอยู่ในรูปชุดสมการดังต่อไปนี้

$$C_{Dmax} = 1.11 + 0.018AR \tag{3.20}$$

$$C_D = B_1\sin^2\alpha + B_2\cos\alpha \tag{3.21}$$

เมื่อ $B_1 = C_{Dmax}$, $B_2 = \left(1/\cos\alpha_s\right)\left(C_{Ds} - C_{Dmax}\sin^2\alpha_s\right)$ และ $15 \le \alpha \le 90$

$$C_L = A_1\sin^2\alpha + A_2\left(\cos^2\alpha/\sin\alpha\right) \tag{3.22}$$

เมื่อ $A_1 = B_1/2$, $A_2 = \left(C_{Ls} - C_{Dmax}\sin\alpha_s\cos\alpha_s\right)\left(\sin\alpha_s/\cos^2\alpha_s\right)$ และ $15 \le \alpha \le 90$

ในกรณีที่ $a = 0.4$ จะเกิดปรากฏการณ์ความไม่เสถียรเชิงตัวเลขขึ้น กล่าวคือ ค่า C_T ที่ทำนายได้จากทฤษฎีของ Glauert จะเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นที่ตำแหน่ง $a = 0.4$ จึงได้มีการพิจารณาแบบจำลองปรับแก้ค่า a (Buhl, 2005) ร่วมด้วย ดังสมการ

$$a = \frac{18F - 20 - 3\sqrt{C_T(50 - 36F) + 12F(3F - 4)}}{36F - 50} \tag{3.23}$$

เมื่อ $$C_T = \frac{\sigma' \pi \rho \left[\frac{V_0(1-a)}{\sin\phi}\right]^2 (C_l \cos\phi + C_d \sin\phi) r\, dr}{\frac{1}{2}\rho \pi R^2 V_r^2} \tag{3.24}$$

ตารางที่ 3.1 ค่า Input และ Output ของโปรแกรมย่อยที่ 1

Input	Wind turbine characteristics, V_0, V_{rel}, ϕ, Re และ α
Output	a, a' และ F

2) โปรแกรมย่อยที่ 2 : คำนวณค่า PDF ของไวบูลล์

ในโปรแกรมย่อยนี้ จะทำการรับค่าที่เป็นช่วงความเร็วลมมาจากโปรแกรมหลัก (2 m/s - 22 m/s) เพื่อที่จะสร้างสถิติลมที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบขึ้นมา ดังนั้นตัวแปรที่ถูกกำหนดขึ้นคือ ค่า k สำหรับ ค่า C คำนวณได้จากสมการ

$$C = \frac{\bar{V}}{\Gamma(1 + 1/k)} \tag{3.25}$$

เมื่อ $\bar{V}$ คือ ความเร็วลมเฉลี่ยซึ่งกำหนดให้เป็นค่าคงที่เท่ากับ 12 m/s

และ $$\Gamma(x) = \left(\sqrt{2\pi x}\right)\left(x^{x-1}\right)\left(e^{-x}\right)\left(1 + \frac{1}{12x} + \frac{1}{288x^2} - \frac{139}{51840x^3} + \ldots\right) \tag{3.26}$$

ดังนั้น $\mathrm{PDF}(V)\,dV = (k/C)(V/C)^{k-1}\exp\left[-(V/C)^{k}\right]dV$ (3.27)

ตารางที่ 3.2 ค่า Input และ Output ของโปรแกรมย่อยที่ 2

Input	Wind data
Output	PDF

3) โปรแกรมย่อยที่ 3 : ค้นหาค่า C_L และ C_D ของหน้าตัดแพนอากาศ

ในการสร้างโปรแกรมค้นหาค่า C_L และ C_D นั้น ได้ใช้คำสั่ง interp2 ซึ่งเป็นฟังก์ชันสำเร็จรูปของ MATLAB ที่ใช้ในการค้นหาข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับอีก 2 ตัวแปร โดยมากมักใช้ในการทำตารางค้นหาค่า (Table lookup) ในขั้นตอนนี้จะทำการรวบรวมข้อมูลการทดสอบหน้าตัดแพนอากาศที่มุม α และค่า Re ต่าง ๆ ดังตารางในภาคผนวก ข. ซึ่งค่า C_L และ C_D ที่ได้จากการทดสอบที่ Re ต่าง ๆ จะถูกนำมาจัดรวบรวมไว้ในตารางเดียวกันโดยแยกกันระหว่างตารางของ C_L และ C_D เพื่อให้ง่ายต่อการค้นหาค่า โดยที่ขั้นตอนในการค้นหาของโปรแกรมจะเริ่มจากการรับค่า α และ Re ที่คำนวณมาจากโปรแกรมหลัก จากนั้นฟังก์ชัน interp2 จะทำการค้นหาค่า C_L และ C_D ที่สัมพันธ์กับค่า α และ Re แล้วส่งคืนกลับไปยังโปรแกรมหลักอีกครั้ง

ตารางที่ 3.3 ค่า Input และ Output ของโปรแกรมย่อยที่ 3

Input	Re และ α
Output	C_L และ C_D

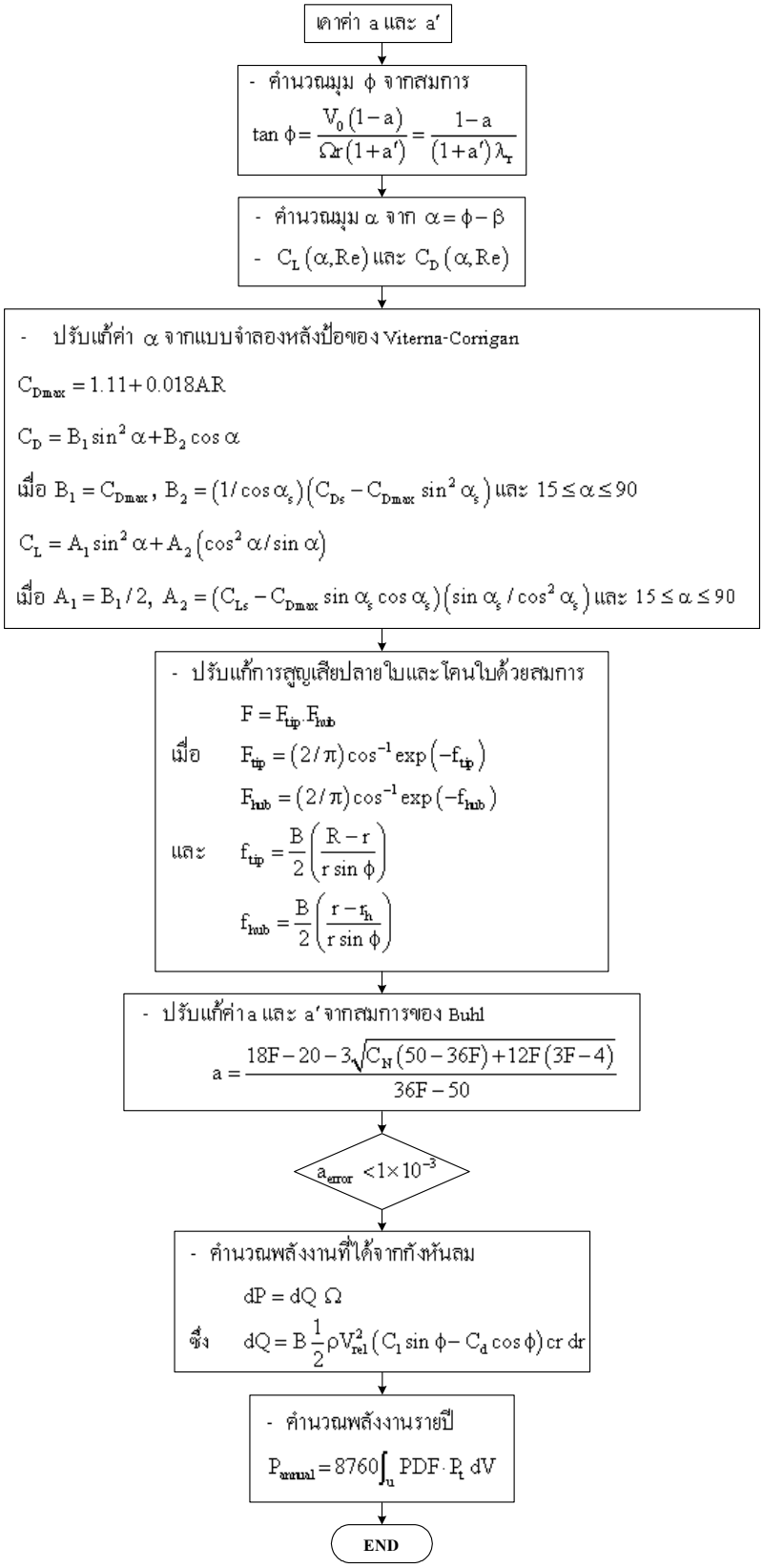
3.2.2 ขั้นตอนการหาผลเฉลยของโปรแกรม

เริ่มจากการเดาค่า a และ a′

1) กำหนดมุมเผินเริ่มต้น โดยยึดมุมเผินของกังหันลมต้นแบบเป็นหลัก
2) คำนวณมุมลมเข้า (ϕ) จากสมการ (3.4)
3) คำนวณมุมปะทะ (α) จากความสัมพันธ์ $\alpha = \phi - \beta$ จากนั้นจะได้ค่า C_L และ C_D ซึ่งเป็น ฟังชั่นของมุมปะทะ ซึ่งหาได้จากข้อมูลการทดสอบจากอุโมงค์ลมดังที่ได้อ้างถึงในภาคผนวก ข.
4) ปรับแก้ค่า C_L และ C_D เมื่อมุม $\alpha > 15$ องศา เนื่องจากเป็นช่วงที่กังหันลมเกิดการป้อ โดยเลือกใช้แบบจำลองหลังการป้อ Viterna and Corrigan ดังสมการ (3.20) ถึง (3.22)

5) ปรับแก้การสูญเสียปลายใบ ด้วยแบบจำลองของ Prandtl ดังสมการ (3.16) รวมทั้งปรับแก้การสูญเสียโคนใบด้วยสมการ (3.18) ในพจน์ของการสูญเสียรวมโดยใช้สมการ (3.15)
6) ปรับแก้ค่า a และ a′ จากสมการ (3.8) และ (3.9) หากต้องการผลการคำนวณถูกต้องมากขึ้น จึงได้มีแบบจำลองปรับปรุงค่า a โดยใช้สมการ (3.23) ที่ Buhl ได้นำเสนอไว้
7) กลับไปคำนวณในขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง และคำนวณซ้ำจนกระทั่งค่า a และ a′ ลู่เข้า
8) นำค่าเงื่อนไขการไหลที่เหมาะสม มาใช้คำนวณหางานรายปีที่ได้ ที่มุมเผินต่าง ๆ พร้อมทั้งหาประสิทธิภาพรายปี
9) เปรียบเทียบกับสถิติลมในแบบอื่น เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของมุมบิดที่มีต่องานรายปี เมื่อสถิติลมเปลี่ยนแปลงไป

ขั้นตอนการหาผลเฉลยของโปรแกรมข้างต้น สามารถเขียนเป็นไดอะแกรมดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.3 การทดสอบโปรแกรม

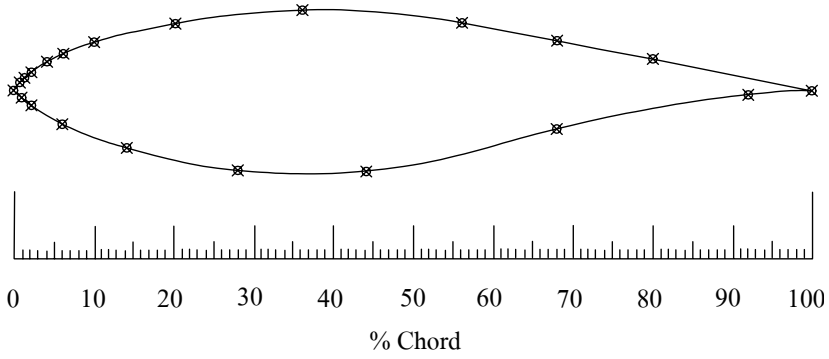
การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมทำโดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม กับผลการทดสอบกังหันลมต้นแบบ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกกังหันลม NREL PhaseII และ NREL PhaseVI เป็นกังหันลมต้นแบบซึ่งออกแบบและสร้างขึ้นโดย NREL ซึ่งเป็นสถาบันวิจัยเกี่ยวกับพลังงานทดแทนแห่งสหรัฐอเมริกา สำหรับการทดสอบกังหันลมทั้ง 2 รุ่นนี้ ได้ทำการทดสอบภายในอุโมงค์ลม ภายใต้สภาวะการทดสอบแบบอากาศพลศาสตร์ไม่คงตัว (Unsteady Aerodynamics Experiment, UAE) เพื่อลดช่องว่างระหว่างสภาวะไม่คงตัวเชิงสามมิติที่เกิดขึ้นในขณะกังหันลมทำงาน กับสภาวะคงตัวเชิงสองมิติซึ่งเป็นสมมติฐานในการออกแบบ ดังนั้นทาง NREL จึงนำวิธีการทดสอบกังหันลมในรูปแบบ UAE มาใช้ทดสอบกังหันลมเพื่อให้ได้มาซึ่งพฤติกรรมทางอากาศพลศาสตร์เชิงสามมิติของกังหันลมที่สมจริง และสามารถเป็นข้อมูลอ้างอิงที่น่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

3.3.1 กังหันลมต้นแบบ NREL Phase II

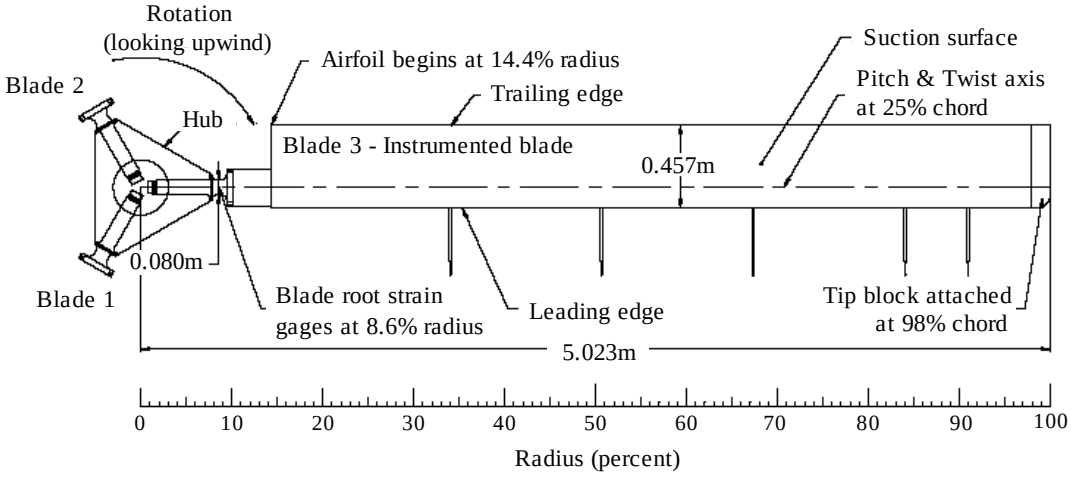
1) ลักษณะของกังหันลมต้นแบบ NREL Phase II มีดังนี้

- จำนวนใบกังหันลม : 3 ใบ
- เส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์ : 10.1 m
- ความสูงของแกนกังหันลมจากพื้น : 17.03 m
- ความเร็วรอบ : 71.63 rpm ที่ความเร็วซิงโครนัส
- ความเร็วลมตัดเข้า (Cut in) : 6 m/s
- ระบบควบคุมพลังงานส่วนเกิน : ระบบควบคุมผ่านการป้อ (Stall regulation)
- พิกัดพลังงาน : 19.8 kW
- มุมกระดก (Tilt angle) : เท่ากับ 1 องศา
- มุมโคน (Coning angle) : 3.417 องศา
- ตำแหน่งโรเตอร์ : ท้ายลม (Down wind)
- ทิศทางการหมุนของโรเตอร์ : ตามเข็มนาฬิกา (มองจากด้านท้ายลม)
- ตำแหน่งที่โรเตอร์ยื่นออกมาจากเสา : 1.32 m
- กังหันแบบใบตรง (Untwisted blade)
- หน้าตัดแพนอากาศ : S809
- ความยาวคอร์ด : 0.4572 m ตลอดความยาวใบกังหัน
- ความยาวก้านเชื่อมโคน (Root extension) : 0.723 m
- มุมเผินของใบกังหัน : 12 องศา

- ความหนาของใบกังหัน : ที่ 14% ของความยาวใบกังหัน (Span) ความหนาเท่ากับ 43% ของความยาวคอร์ด ระยะระหว่าง 14% ถึง 30% ของความยาวใบกังหัน ความหนาลดลงอย่างเชิงเส้น ที่ระยะ 30% ของความยาวใบกังหัน ความหนาเท่ากับ 20.95% ของความยาวคอร์ด และที่ระยะเกินกว่า 30% ของความยาวใบกังหันออกไป ความหนาคงที่ที่ 20.95% ของความยาวคอร์ด

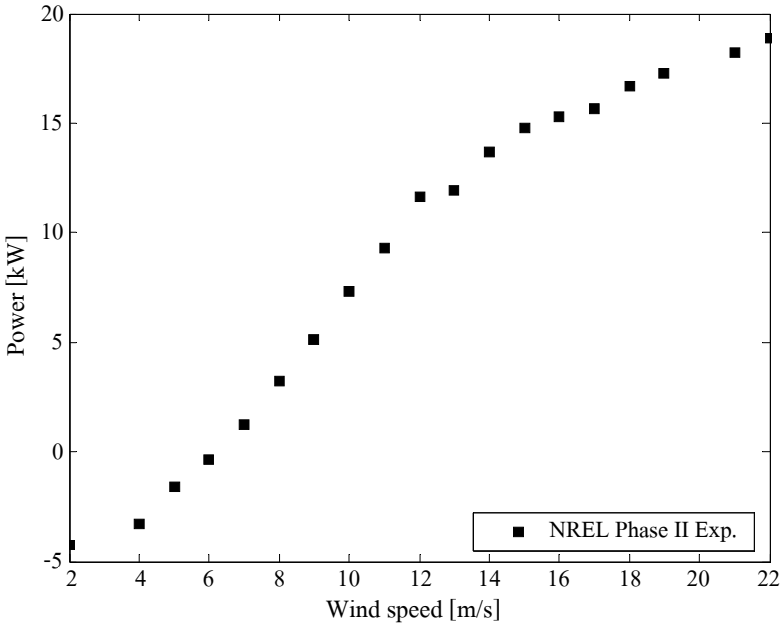


รูปที่ 3.2 หน้าตัดแพนอากาศ S809 (Schreck and Robinson, 2007)



รูปที่ 3.3 มิติ และ รูปร่างของใบกังหันลม NREL Phase II (Simms and et.al., 1999)

2) กราฟแสดงสมรรถนะของกังหันลม NREL Phase II



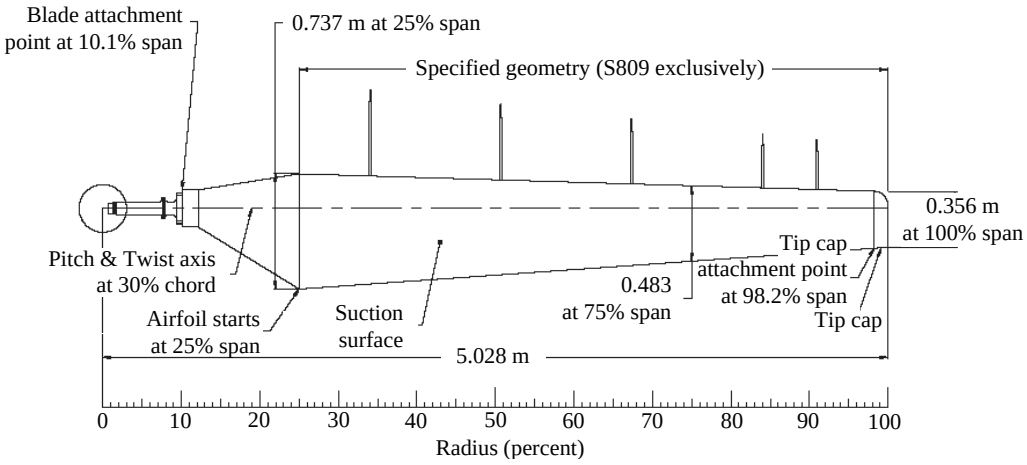
รูปที่ 3.4 กราฟสมรรถนะของกังหันลม NREL Phase II (Simms and et.al., 1999)

3.3.2 กังหันลมต้นแบบ NREL Phase VI

1) ลักษณะของกังหันลมต้นแบบ NREL Phase VI

- จำนวนใบกังหันลม : 2 ใบ
- ลักษณะของโรเตอร์ : ต้นลม (Up wind) หรือ ท้ายลม ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน
- ระบบควบคุมพลังงานส่วนเกิน : ระบบควบคุมผ่านการป้อ
- ชนิดของโรเตอร์ : โรเตอร์แบบกระดก (Teetered roter) หรือ โรเตอร์แบบยึด (Rigid rotor) ในกรณีทดสอบจะพิจารณาเฉพาะโรเตอร์แบบยึด
- อัตรากำลัง : 19.8 kW
- ความเร็วลม Cut in : 6 m/s
- ความสูงของแกนกังหันเหนือระดับพื้น : 12.192 m
- เส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์ : 10.1 m
- หน้าตัดแพนอากาศ : S809 ดังรูปที่ 3.2

- มีการบิดใบกังหันตลอดแนวความยาวเทียบกับจุด Twist zero ที่ระยะ 3.772 m (75% ของความยาวใบกังหัน) และทิศทางการบิดเป็นมุมบวกไปทางด้านลู่ลม (Feather)
- ช่วงระยะ 0.508 m ถึง 0.883 m เป็นช่วงโคนใบกังหันที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก
- ช่วงที่ใบกังหันเปลี่ยนจากหน้าตัดวงกลมเข้าสู่หน้าตัดแพนอากาศ คือ ช่วงระยะ 0.883 m ถึง 1.257 m



รูปที่ 3.5 มิติ และรูปร่างของใบกังหันลม NREL Phase VI (Simms and et.al., 2001)

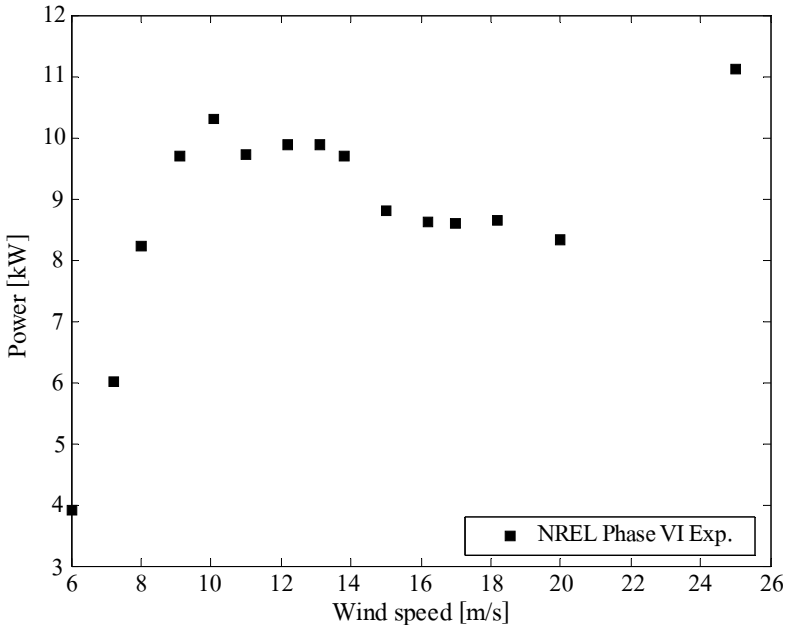
ตารางที่ 3.4 ความยาวคอร์ด มุมบิด และความหนาของหน้าตัดตามแนวรัศมีใบกังหัน NREL Phase VI

Distance from rotor center [m]	**Chord length [m]**	**Twist [degree]**	**Thickness [m]**
0	hub	hub	hub
0.508	0.218	0	0.218
0.66	0.218	0	0.218
0.883	0.183	0	0.183
1.008	0.349	6.7	0.163
1.067	0.441	9.9	0.154

ตารางที่ 3.4 ความยาวคอร์ด มุมบิด และความหนาของหน้าตัดตามแนวรัศมีใบกังหัน NREL Phase VI (ต่อ)

Distance from rotor center [m]	**Chord length [m]**	**Twist [degree]**	**Thickness [m]**
1.133	0.544	13.4	0.154
1.257	0.737	20.04	0.154
1.51	0.711	14.292	0.149
1.648	0.697	11.909	0.146
1.952	0.666	7.979	0.14
2.257	0.636	5.308	0.133
2.343	0.627	4.715	0.131
2.562	0.605	3.425	0.127
2.867	0.574	2.083	0.12
3.172	0.543	1.15	0.114
3.185	0.542	1.115	0.114
3.476	0.512	0.494	0.107
3.781	0.482	-0.015	0.101
4.023	0.457	-0.381	0.096
4.086	0.451	-0.475	0.094
4.391	0.42	-0.92	0.088
4.696	0.389	-1.352	0.081
4.78	0.381	-1.469	0.08
5	0.358	-1.775	0.075
5.029	0.355	-1.815	0.074

2) กราฟแสดงสมรรถนะของกังหันลม NREL Phase VI



รูปที่ 3.6 กราฟสมรรถนะของกังหันลม NREL Phase VI (Simms and et.al., 2001)

3.3.3 คุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศ S809

ลักษณะเฉพาะของหน้าตัดแพนอากาศรุ่น S809 โดยวิเคราะห์จากพฤติกรรมการเกิดการป้อ จากรูปที่ 2.6 แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ (Lanzafame and Messina, 2007)

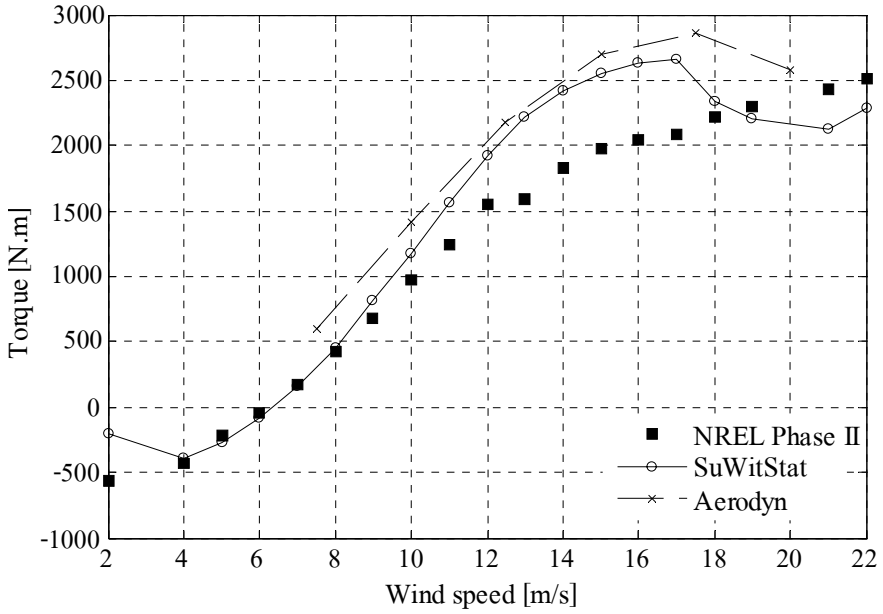
- ช่วง $-5 \le \alpha \le 7$ คือ ช่วงก่อนเกิดการป้อ (Pre-stalled regime หรือ Attach flow regime)
- ช่วง $7 < \alpha \le 20$ คือ ช่วงการป้อเริ่มก่อตัว (Stall development regime)
- ช่วง $\alpha > 20$ คือ ช่วงเกิดการป้อเต็มขั้น (Fully-stalled regime)

ที่ความเร็วลม 5 ถึง 7.5 m/s ยังอยู่ในช่วง Pre-stalled ถัดจากช่วงนี้ไปจนถึงความเร็ว 10 m/s เป็นช่วงที่เกิดแรงยกขึ้นสูง การป้อเริ่มก่อตัวหรืออยู่ในช่วง Stall development และจากความเร็วตั้งแต่ 10 m/s ถึง 20 m/s เป็นช่วงที่เกิดการป้อไปแล้ว แต่ยังให้แรงยกที่สูงขึ้นได้อีก โดยที่แรงต้านสูงเช่นกัน ช่วงนี้เรียกได้อีกนัย คือ ช่วง Transition และหลังจากช่วงนี้ไปเป็นช่วง Fully-stalled แรงยกตกลงอย่างรวดเร็ว และแรงต้านเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน

3.4 การทดสอบโปรแกรมกับผลการทดลองของ NREL Phase II

เนื่องจากได้มีการสร้างโปรแกรม SuWiT เพื่อใช้ออกแบบกังหันลมที่ความเร็วลมเฉพาะจุดขึ้นมาก่อนหน้านี้แล้ว ดังนั้นจึงได้ขนานนามโปรแกรมนี้ว่า SuWiTStat ซึ่ง SuWiT ย่อมาจาก Suranaree Wind Turbine ประกอบกับโปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมุมเผินที่ดีที่สุดของกังหันลมโดยวิเคราะห์ร่วมกับสถิติลมเฉพาะพื้นที่ (Local Wind Statistic) ทั้งหมดนี้จึงเป็นที่มาของชื่อโปรแกรมดังกล่าว

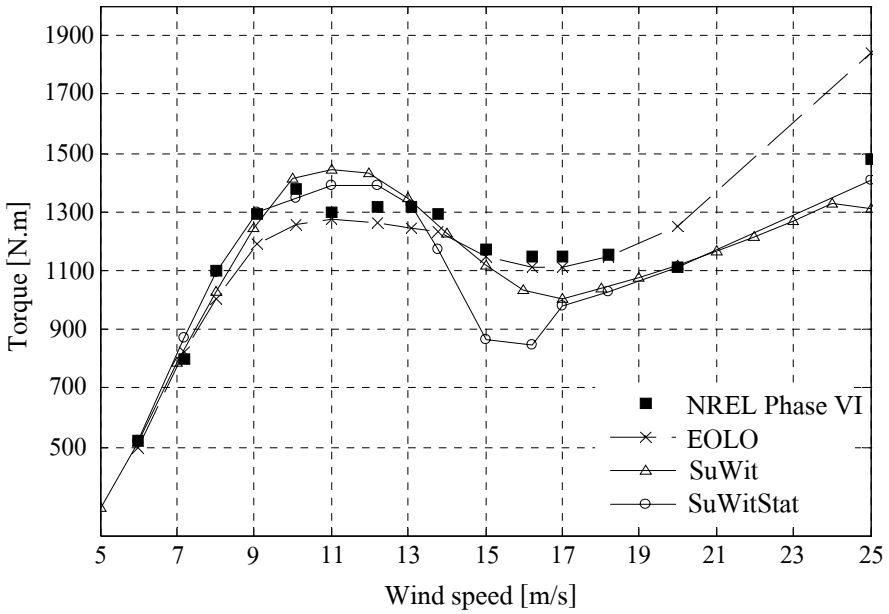
จากรูปที่ 3.7 พบว่าที่ช่วงความเร็วต่ำผลการคำนวณจะค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่เมื่อความเร็วลมสูงขึ้นตั้งแต่ 10 m/s เป็นต้นไป ผลการคำนวณจะค่อนข้างห่างจากผลการทดลองพอสมควร ทั้งนี้เป็นลักษณะปกติของกังหันลม NREL Phase II เนื่องจากเป็นกังหันลมแบบใบตรงย่อมเกิดการป้อขึ้นสูงเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น พลังงานที่ได้จริงจึงต่ำกว่าผลการคำนวณเนื่องจากสูญเสียไปส่วนหนึ่งจากการป้อ และที่ความเร็วลม 17 m/s เป็นช่วงที่เส้นกราฟของผลการคำนวณเริ่มตก จนกระทั่งเส้นกราฟตัดกันที่ความเร็วลมประมาณ 19 m/s ลักษณะเช่นนี้คาดได้ว่าเป็นช่วงที่เกิดการป้อแบบเต็มขั้น ซึ่งจะเกิดแรงต้านสูง แต่ทั้งนี้ยังเกิดแรงยกในปริมาณที่สูงเช่นเดียวกัน ทำให้พลังงานยังคงเพิ่มขึ้นได้อีก ซึ่งแบบจำลองหลังการป้อที่เลือกใช้นั้นไม่สามารถจับพฤติกรรมเช่นนี้ได้ดีนัก หากต้องการให้ผลดีกว่านี้จึงควรที่จะต้องพิจารณาแบบจำลองการป้อแบบพลวัต (Dynamic stall) มาใช้ร่วมด้วย



รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองของกังหันลม NREL Phase II

เมื่อเทียบผลกับโปรแกรมซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีอย่าง Aerodyn (Xu, 2001; Moriarty and Hansen, 2005) จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณจากโปรแกรมของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าตลอดช่วงความเร็วลมที่พิจารณา

3.5 การทดสอบโปรแกรมกับผลการทดลองของ NREL Phase VI



รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองของกังหันลม NREL Phase VI

จากรูปที่ 3.8 เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองของกังหันลม NREL Phase VI พบว่าผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดีในช่วงความเร็วต่ำถึงปานกลาง ทั้งนี้เนื่องจากที่ช่วงความเร็วดังกล่าวยังเป็นช่วงที่การไหลยังเกาะติดใบกังหันได้ดี หรือเรียกว่าช่วง Attached flow ซึ่งยังไม่เกิดการป้อบนใบกังหัน หรืออาจเกิดในปริมาณที่ต่ำผลการคำนวณจึงแม่นยำมากพอสมควร หลังจากความเร็วลม 14 m/s เป็นต้นไปผลการคำนวณจะห่างจากผลการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากโปรแกรมนี้ยังไม่ได้พิจารณาแบบจำลองที่ปรับแก้ผลสืบเนื่องจากการเกิดการป้อแบบพลวัต ซึ่งในช่วงนี้ไม่เพียงแต่เกิดแรงต้านขึ้นสูง แต่ยังให้แรงยกในปริมาณที่สูงเช่นเดียวกัน ผลการคำนวณจึงต่ำกว่าผลการทดลองพอสมควร และในช่วงท้ายจึงกลับมาใกล้เคียงกับผลการทดลองอีกครั้งที่ความเร็วลม 20 m/s เป็นต้นไป

เมื่อเปรียบเทียบผลกับโปรแกรมอื่น จะเห็นว่าผลการคำนวณจากโปรแกรมในงานวิจัยนี้ ดีกว่า EOLO (Lanzafame and Messina, 2007) และ SuWiT (ชโลธร และทวิช, 2008) ในช่วงความเร็วลม 5-13 m/s ซึ่ง EOLO และ SuWiT จะดีกว่าในช่วง 13-18 m/s

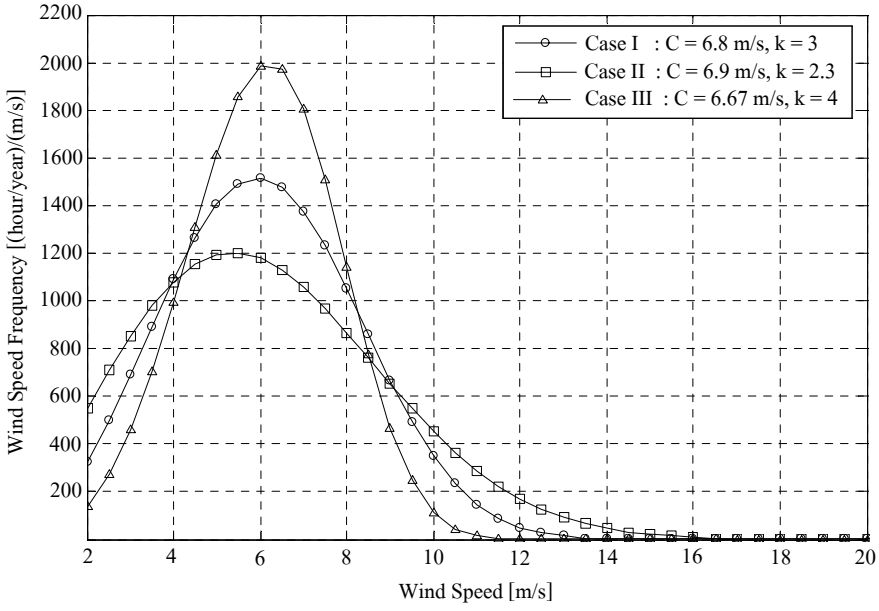
จะเห็นได้ว่าตลอดช่วงความเร็วลม กังหันลมที่มีการบิดใบจะทำให้เกิดย่านการป้อลดลง จึงเป็นเหตุให้เปรียบกับผลการทดลองได้ดีกว่ากังหันลมแบบใบตรง เพราะใบตรงทำให้เกิดการป้อสูง ผลการทำนายจึงสูงกว่าพลังงานที่ได้จริงซึ่งสูญเสียไปส่วนหนึ่งจากการป้อ

บทที่ 4
ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

4.1 กล่าวนำ

หลังจากที่ทำการทดสอบโปรแกรมจนกระทั่งมั่นใจได้ว่ามีความแม่นยำในระดับหนึ่งแล้ว ขั้นตอนต่อมาจึงเป็นการนำโปรแกรมมาใช้งานร่วมกับข้อมูลสถิติลมเฉพาะพื้นที่ 3 รูปแบบที่จำลองขึ้นภายใต้ทฤษฎีทางสถิติ โดยที่ทั้ง 3 กรณี ถูกออกแบบให้มีความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากันที่ 6.032 m/s แต่มีลักษณะการแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ต่างกัน ในบทนี้จะทำการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่นำกังหันลมมาติดตั้งในพื้นที่ที่มีสถิติลม 3 ลักษณะ เพื่อที่จะศึกษาผลกระทบต่องานรายปีเมื่อมุมเผินเปลี่ยนแปลงไป

4.2 สถิติลมเฉพาะพื้นที่ 3 รูปแบบ



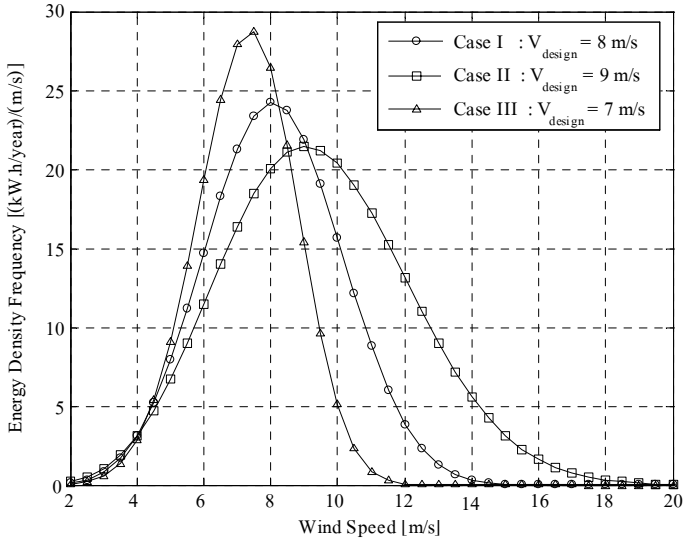
รูปที่ 4.1 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมจากสถิติลมเฉพาะพื้นที่ 3 รูปแบบ

รูปที่ 4.1 แสดงการแจกแจงความถี่ของความเร็วลม (Wind speed frequency distribution) 3 รูปแบบ สำหรับเหตุผลที่ต้องทำการจำลองสถิติลม 3 รูปแบบ ที่แตกต่างกัน เนื่องจากต้องการให้เห็นผลกระทบจากลักษณะการเบ้ของกราฟสถิติลมที่มีต่องานรายปีที่ผลิตได้จากกังหันลม โดยที่สถิติลมทั้ง 3 รูปแบบ จะถูกกำหนดให้มีค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่เท่ากัน ซึ่งเริ่มจากการจำลองสถิติลมรูปแบบแรก (Case I) ด้วยการกำหนดค่า k = 3 และ C = 6.8 m/s ลงไปในสมการการแจกแจงของไวบูลล์จนกระทั่งได้ $\overline{V}^3$ = 8 m/s (นักออกแบบส่วนใหญ่เลือกใช้ค่านี้เป็นความเร็วลมออกแบบ) ซึ่งค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้ คือ 6.032 m/s จากนั้นจึงยึดค่านี้เป็นความเร็วลมเฉลี่ยของอีก 2 รูปแบบที่เหลือ โดยที่ลักษณะการเบ้ของกราฟสถิติจะขึ้นอยู่กับการปรับค่าพารามิเตอร์ C และ k ดังต่อไปนี้

- Case I : C = 6.8 m/s และ k = 3
- Case II : C = 6.9 m/s และ k = 2.3
- Case III : C = 6.67 m/s และ k = 4

ในแง่ของกำลังงานลม สถิติลมรูปแบบแรกให้กำลังงานลมรายปีเท่ากับ 124.09 MW.h/year ส่วนรูปแบบที่ 2 (Case II) ให้กำลังงานลมรายปีเท่ากับ 243.50 MW.h/year โดยที่ $\overline{V}^3$ = 9 m/s และรูปแบบที่ 3 (Case III) ให้กำลังงานลมรายปีเท่ากับ 107.65 MW.h/year โดยที่ $\overline{V}^3$ = 7 m/s ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 ความเร็วลมที่ก่อให้เกิดความหนาแน่นกำลังงานลมสูงสุดของ Case I มีค่าเท่ากับ 8 m/s ส่วน Case II และCase III มีค่าเท่ากับ 9 m/s และ 7 m/s ตามลำดับ แท้จริงแล้วจุดนี้คือ จุดสูงสุดของเส้นกราฟความหนาแน่นกำลังงานลม โดยมากนักออกแบบมักเลือกใช้ความเร็วลมที่ให้กำลังงานสูงสุดเป็นความเร็วลมในการออกแบบกังหันลม



รูปที่ 4.2 การแจกแจงความถี่ของความหนาแน่นกำลังงานลมจากสถิติลมเฉพาะพื้นที่ 3 รูปแบบ

4.3 มุมเผินที่ดีที่สุดสำหรับสถิติลมเฉพาะพื้นที่

ในขั้นตอนนี้ข้อมูลสถิติลมจะถูกเพิ่มเข้าไปในกระบวนการคำนวณของโปรแกรม จากนั้นจึงทำการปรับมุมเผินโดยอ้างอิงจากมุมเผินของกังหันลมต้นแบบ NREL Phase II และ NREL Phase VI (กล่าวคือกังหันลม NREL Phase II มีมุมเผินคงที่ที่ค่า 12 องศา และกังหันลม NREL Phase VI จะปรับมุมเผินปลายใบไว้ที่ 3 องศา) จนกระทั่งได้มุมเผินที่ให้งานรายปีสูงสุด พบว่ามุมเผินที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละกรณีของสถิติลมจะมีค่าแตกต่างกันออกไป และมิใช่ค่าเดียวกับมุมเผินออกแบบของกังหันลมต้นแบบ จากนั้นจึงจำลองสถานการณ์ว่านำกังหันลมที่ให้งานรายปีสูงสุดจาก Case I ไปติดตั้งภายในพื้นที่ที่มีสถิติลมแตกต่างออกไป อย่างเช่น Case II และ Case III มุมเผินที่ดีที่สุดจาก Case I นั้นจะมีผลเช่นไรต่องานรายปี เมื่อกังหันลมทำงานภายใต้สถิติลมอีก 2 รูปแบบ

4.3.1 ผลกระทบจากการปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase II

จากตารางที่ 4.1 เมื่อปรับมุมเผินจาก 1 องศา ถึง 15 องศา งานรายปีมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่มุมเผินค่าหนึ่งจะทำให้ได้งานรายปีที่สูงสุด สำหรับกรณีสถิติลม Case I ได้งานรายปีสูงสุด 15.91 MW.h/year ที่มุมเผิน 6 องศา ในกรณีสถิติลม Case II กังหันลมให้งานรายปีสูงสุด 16.48 MW.h/year ที่มุมเผิน 7 องศา และในกรณีสถิติลม Case III กังหันลมให้งานรายปีสูงสุด 15.04 MW.h/year ที่มุมเผิน 6 องศา

สำหรับประสิทธิภาพรายปี η_{annual} สูงสุดเมื่อปรับมุมเผินไปที่จุดเหมาะสมของทั้ง 3 กรณีสถิติลม คือ 12.82%, 10.87% และ 13.97% ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากประสิทธิภาพที่มุมอ้างอิง 12 องศา ถึง 5.48%, 3.24% และ 7.43% ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้จาก งานรายปีที่ได้จากกังหันลมเทียบต่อกำลังงานลมรายปี ดังตัวอย่างการคำนวณในกรณี Case I ที่มุมเผิน 6 องศา

$$\eta_{annual} = \frac{15.91}{124.09} \times 100 = 12.82\%$$

เมื่องานรายปีที่ได้จากกังหันลมมีค่า 15.91 MW.h/year และกำลังงานลมรายปีมีค่า 124.09 MW.h/year ดังนั้น η_{annual} จึงมีค่าเท่ากับ 12.82%

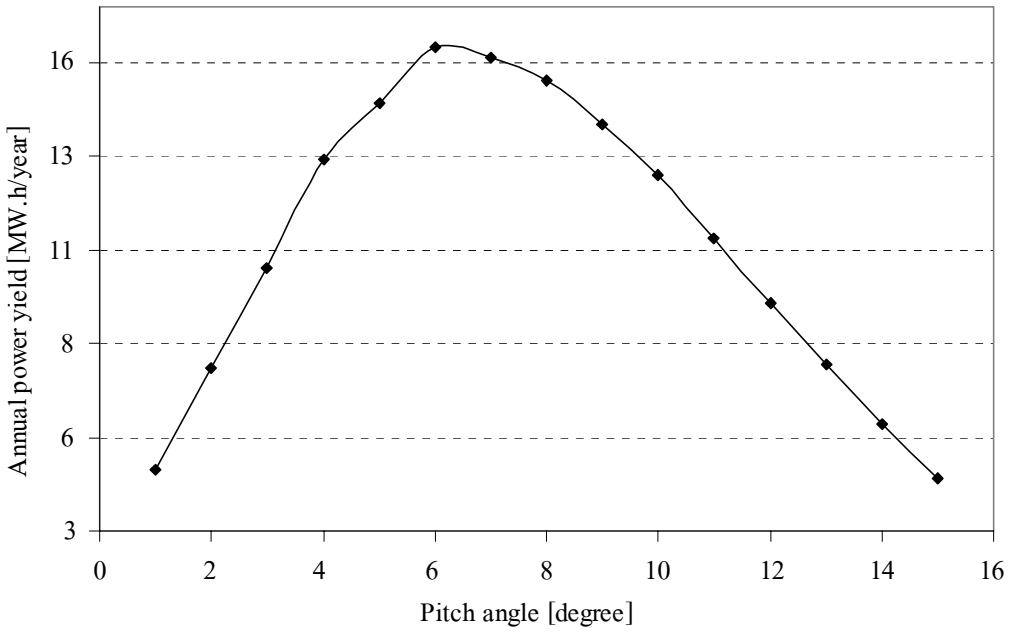
ตารางที่ 4.1 งานรายปีและประสิทธิภาพรายปีเมื่อปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase II

Pitch	Pannual [MW.h/year]			Annual efficeincy [%]		
	Case I	Case II	Case III	Case I	Case II	Case III
1	4.65	4.80	3.75	3.75	3.16	3.48
2	7.34	7.54	6.28	5.92	4.97	5.83
3	10.04	10.29	8.81	8.09	6.78	8.19
4	12.93	13.19	11.98	10.42	8.70	11.13
5	14.42	14.79	13.51	11.62	9.76	12.55
6	15.91	16.40	15.04	12.82	10.81	13.97
7	15.65	16.48	14.60	12.61	10.87	13.56
8	15.05	16.22	13.81	12.13	10.70	12.83
9	13.88	15.38	12.43	11.19	10.14	11.55
10	12.49	14.37	10.83	10.07	9.48	10.06
11	10.82	13.02	8.93	8.72	8.59	8.29
12	9.10	11.56	7.04	7.34	7.63	6.54
13	7.44	10.10	5.25	5.99	6.66	4.88
14	5.85	8.61	3.68	4.71	5.68	3.42
15	4.39	7.17	2.35	3.54	4.73	2.18

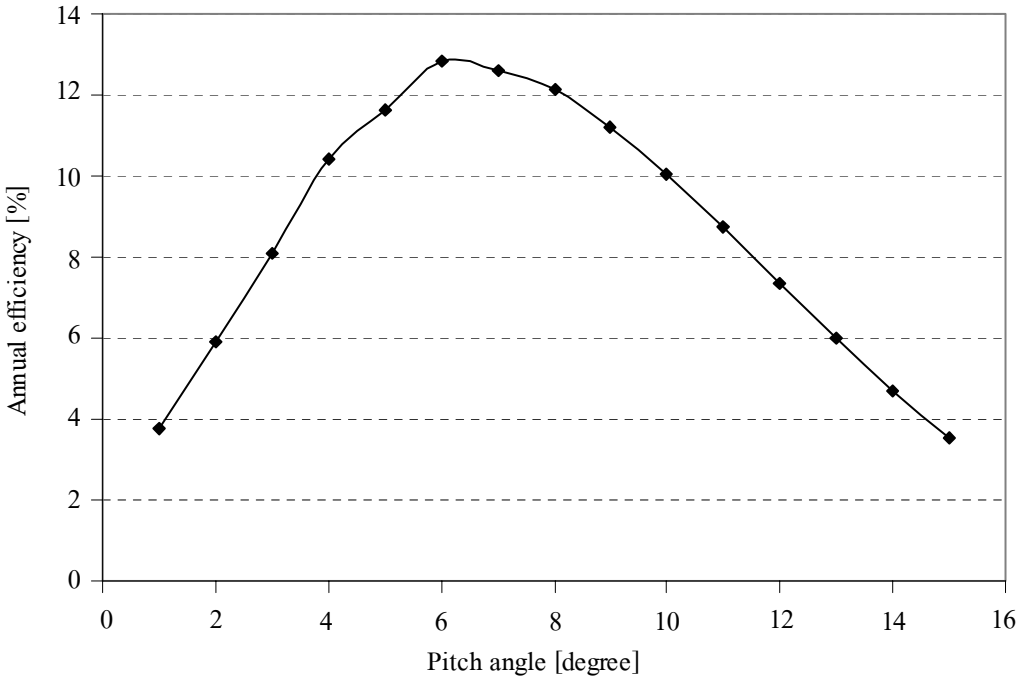
งานรายปีที่ได้เมื่อมุมเผินอ้างอิง 12 องศา จาก 3 กรณีสถิติลม คือ 9.10 MW.h/year 11.56 MW.h/year และ 7.04 MW.h/year ตามลำดับพบว่า ร้อยละของงานรายปีที่เพิ่มขึ้นเมื่อปรับใบกังหันไปที่มุมเผินที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 74.72%, 42.53% และ 113.71% ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ร้อยละของงานรายปีที่เพิ่มขึ้นเทียบกับกรณีมาตรฐาน $\beta = 12$ องศา

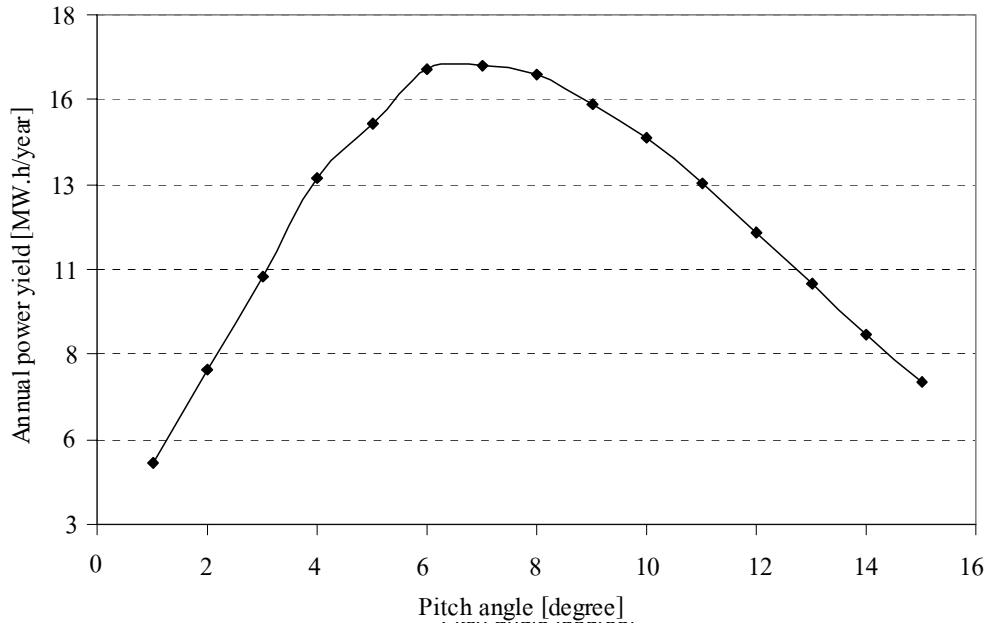
Case		
I : $\beta_{opt} = 6$ องศา	II : $\beta_{opt} = 7$ องศา	III : $\beta_{opt} = 6$ องศา
74.72 MW.h/year	42.53 MW.h/year	113.71 MW.h/year



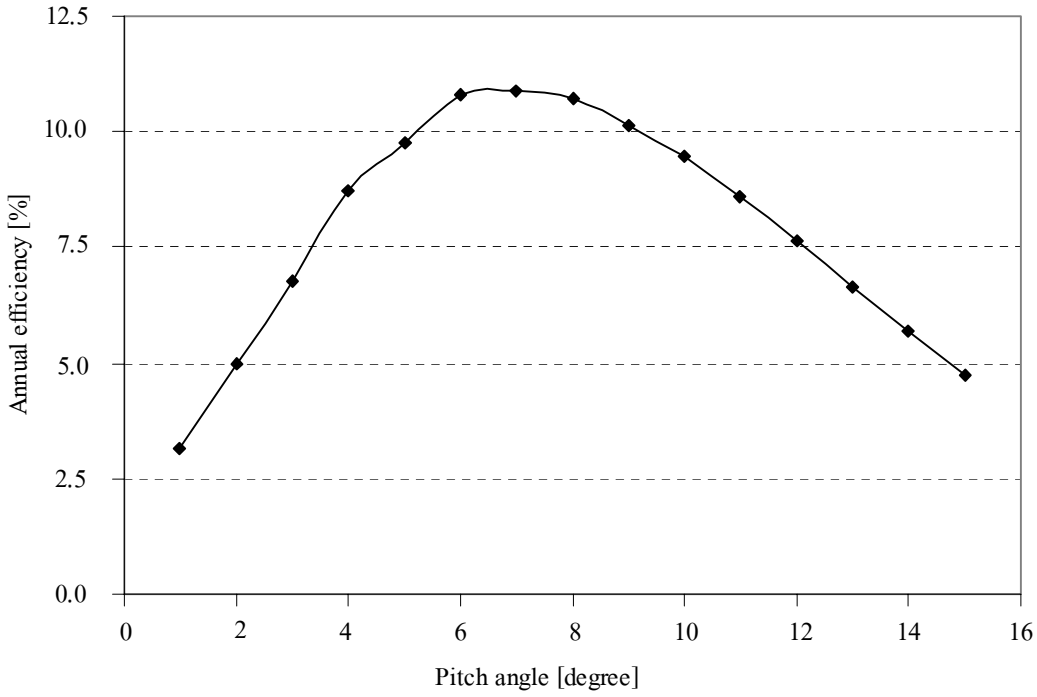
รูปที่ 4.3 งานรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case I



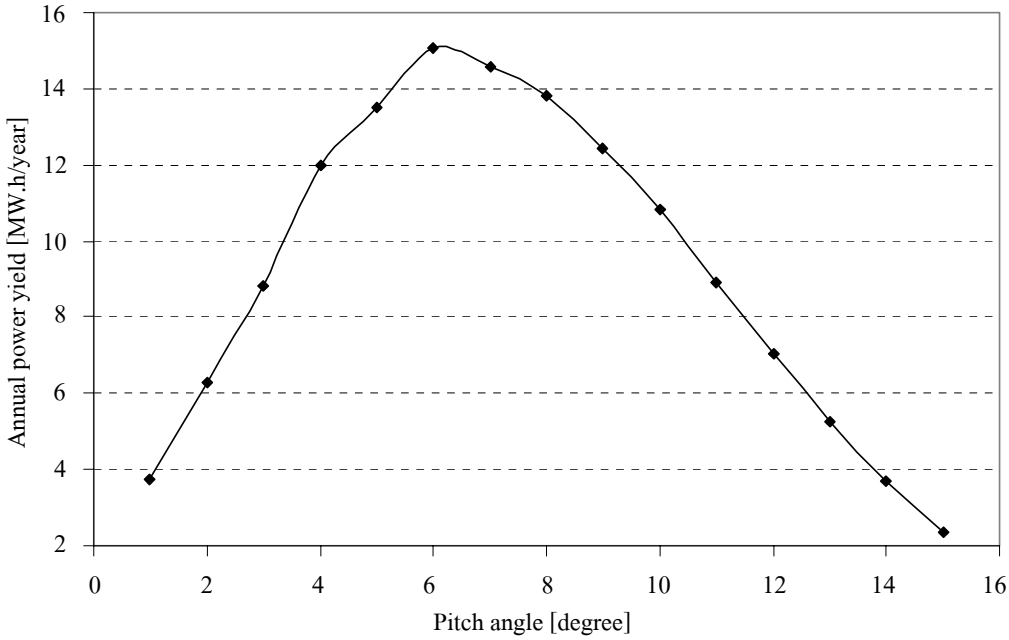
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case I



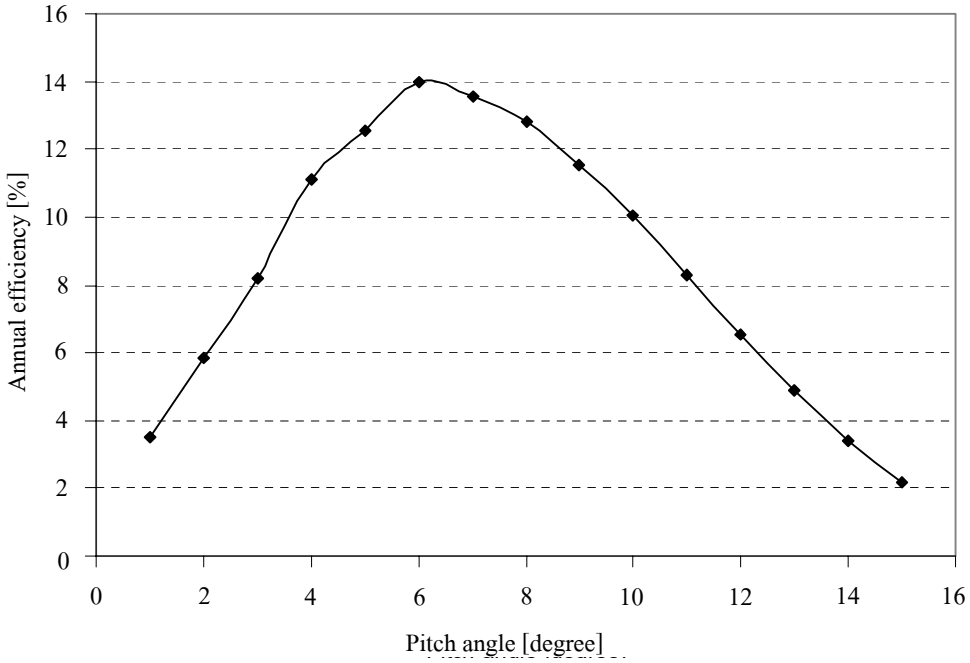
รูปที่ 4.5 งานรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case II



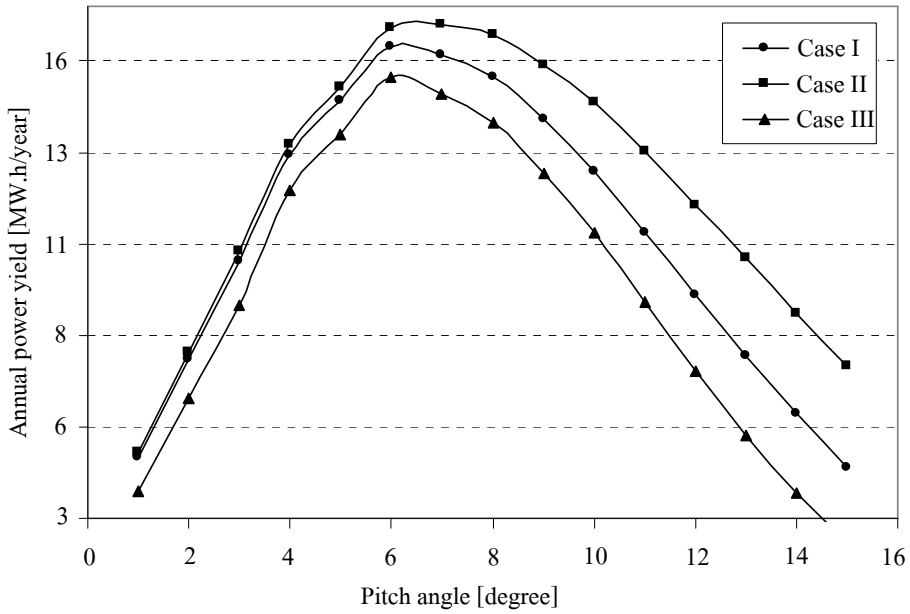
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case II



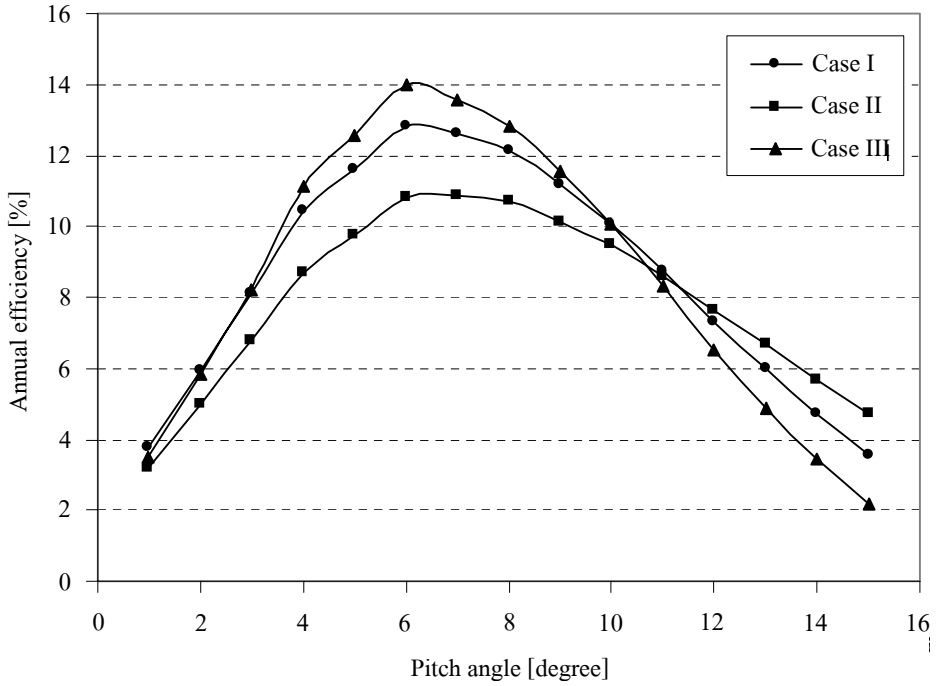
รูปที่ 4.7 งานรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นตัวกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case III



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นตัวกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case III



รูปที่ 4.9 งานรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case I Case II และ Case III



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case I Case II และ Case III

4.3.2 ผลกระทบจากการปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase VI

ขั้นตอนต่อมาทำการวิเคราะห์กังหันลม NREL Phase VI และปรับมุมเผินปลายใบจาก -5-11 องศา โดยมุมเผินอ้างอิงอยู่ที่ 3 องศา เนื่องจากกังหันลม NREL Phase VI เป็นกังหันลมแบบใบบิด จึงอ้างอิงมุมเผินที่ปลายใบเป็นหลัก จากผลการคำนวณงานรายปีมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อบิดมุมเผินปลายใบมากขึ้น จนกระทั่งถึงจุดเหมาะสมงานรายปีที่ได้จะมีค่าสูงสุด หลังจากนั้นงานรายปีที่ได้จะลดลง ในกรณีสถิติลม Case I จะได้งานรายปีสูงสุด 14.77 MW.h/year เมื่อปรับมุมเผินปลายใบไปที่ 2 องศา ส่วนในกรณีสถิติลม Case II จะได้งานรายปีสูงสุด 14.11 MW.h/year เมื่อปรับมุมเผินปลายใบไปที่ 3 องศา และกรณีสถิติลม Case III ที่มุมเผิน 11 องศาให้งานรายปีสูงสุด 15.25 MW.h/year สำหรับประสิทธิภาพของกังหันลมเมื่อปรับมุมเผินปลายใบไปที่จุดเหมาะสมมีค่าเท่ากับ 10.90%, 8.62% และ 12.77% ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากจุดอ้างอิงถึง 0.16%, 0.00% และ 0.42% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 งานรายปีและประสิทธิภาพรายปีเมื่อปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase VI

Tip pitch	**Pannual [MW.h/year]**			**Annual efficeincy [%]**		
[degree]	**Case I**	**Case II**	**Case III**	**Case I**	**Case II**	**Case III**
-5	6.35	5.05	7.94	4.74	3.09	6.83
-4	8.66	7.06	10.37	6.46	4.31	8.92
-3	10.26	8.56	11.87	7.66	5.23	10.21
-2	11.54	9.90	12.95	8.61	6.05	11.14
-1	13.16	11.69	14.27	9.82	7.14	12.28
0	14.05	12.80	14.92	10.49	7.82	12.84
1	14.62	13.61	15.25	10.91	8.32	13.12
2	14.77	14.01	15.21	11.02	8.56	13.08
3	14.61	14.11	14.84	10.90	8.62	12.77
4	14.16	13.93	14.17	10.57	8.51	12.19
5	13.48	13.54	13.22	10.06	8.27	11.37
6	12.56	12.94	12.03	9.37	7.90	10.35
7	11.48	12.18	10.66	8.56	7.44	9.17
8	10.26	11.27	9.18	7.66	6.88	7.90
9	8.97	10.28	7.65	6.69	6.28	6.58

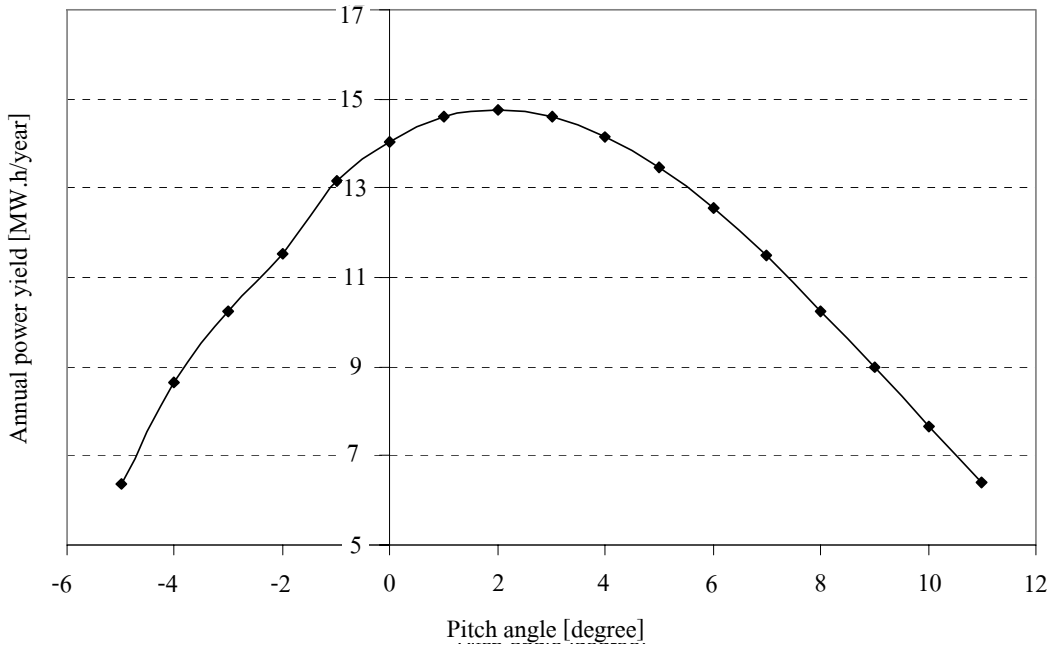
ตารางที่ 4.3 งานรายปีและประสิทธิภาพรายปีเมื่อปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase VI (ต่อ)

Tip pitch [degree]	Pannual [MW.h/year]			Annual efficeincy [%]		
	Case I	Case II	Case III	Case I	Case II	Case III
10	7.67	9.23	6.17	5.73	5.64	5.31
11	6.41	8.17	4.78	4.78	4.99	4.11

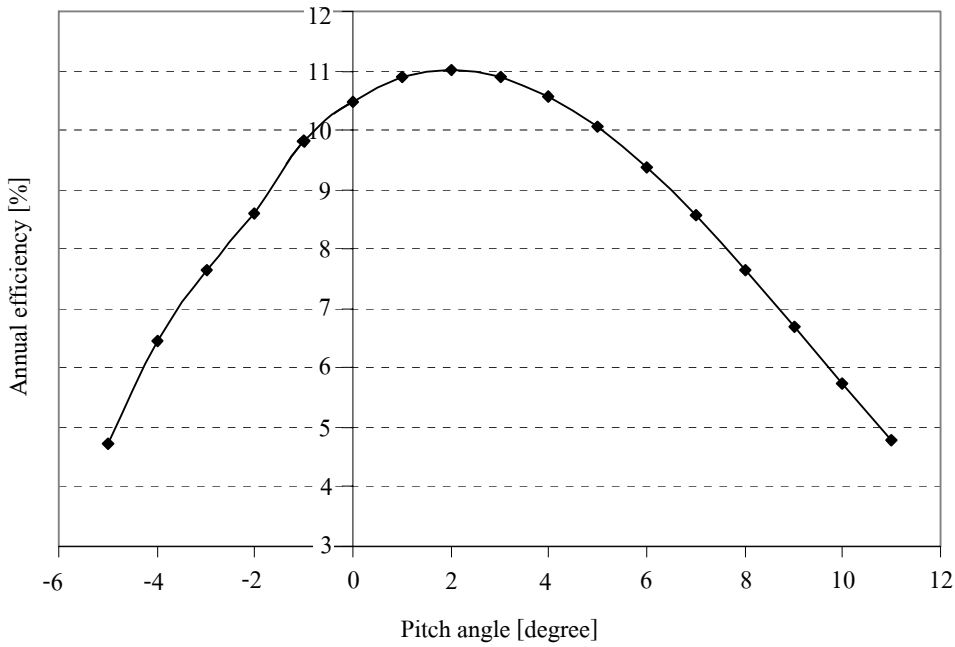
เป็นอีกกรณีที่เปรียบเทียบให้เห็นว่าเมื่อทำการปรับมุมเผินไปจากมุมในกรณีมาตรฐาน โดยยึดมุมเผินปลายใบเป็นหลักที่ 3 องศา จะสามารถเพิ่มงานรายปีได้สูงสุดถึง 1.12%, 0.00% และ 2.80% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ร้อยละของงานรายปีที่เพิ่มขึ้นเทียบกับกรณีมาตรฐาน $\beta_{tip} = 3$ องศา

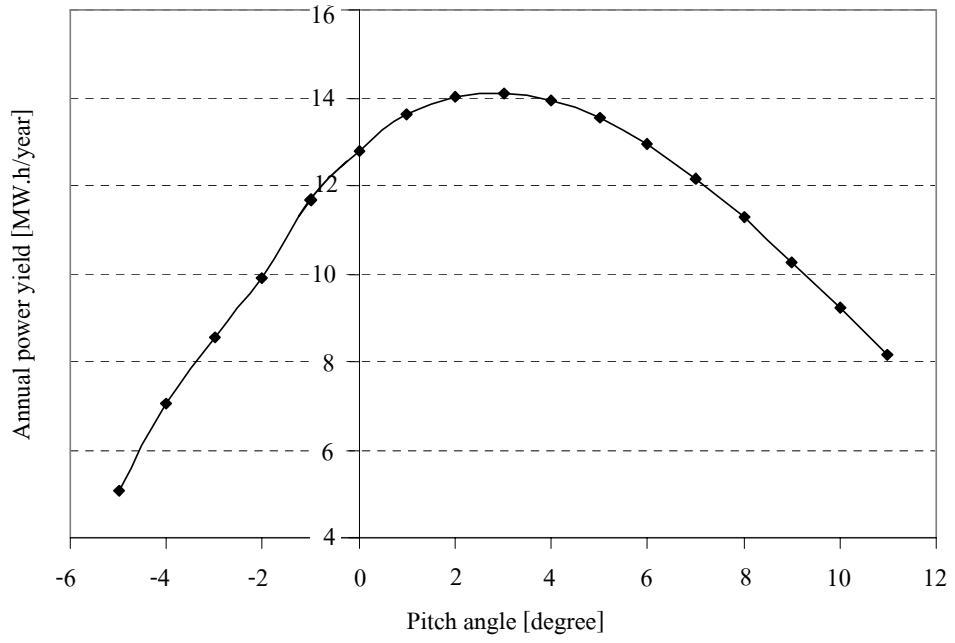
Case		
I : $\beta_{tip,opt} = 2$ องศา	II : $\beta_{tip,opt} = 3$ องศา	III : $\beta_{tip,opt} = 1$ องศา
1.12 MW.h/year	0.00 MW.h/year	2.80 MW.h/year



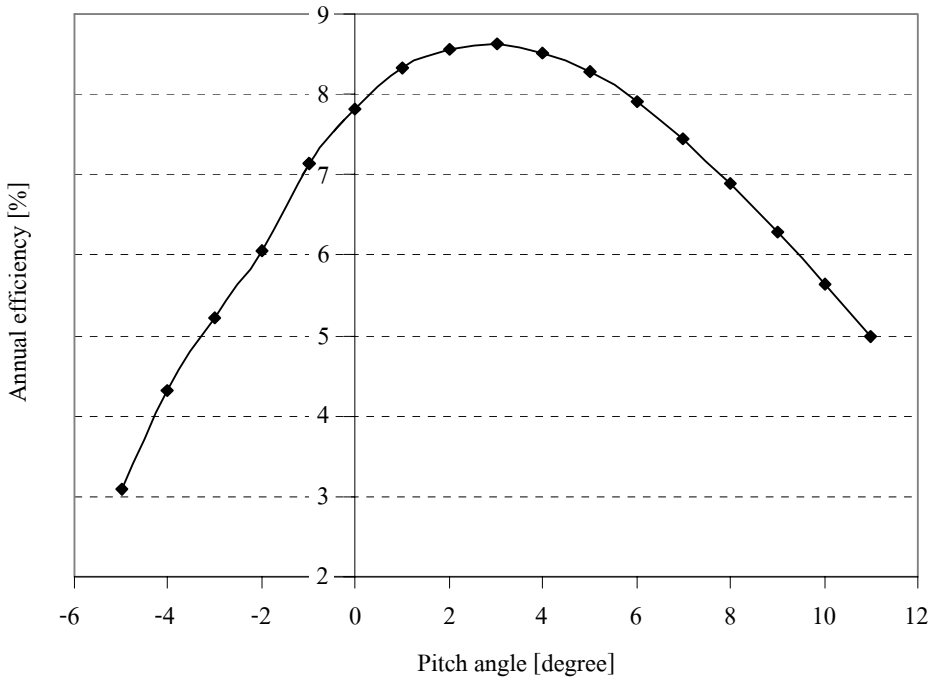
รูปที่ 4.11 งานรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐานภายใต้สถิติลม Case I



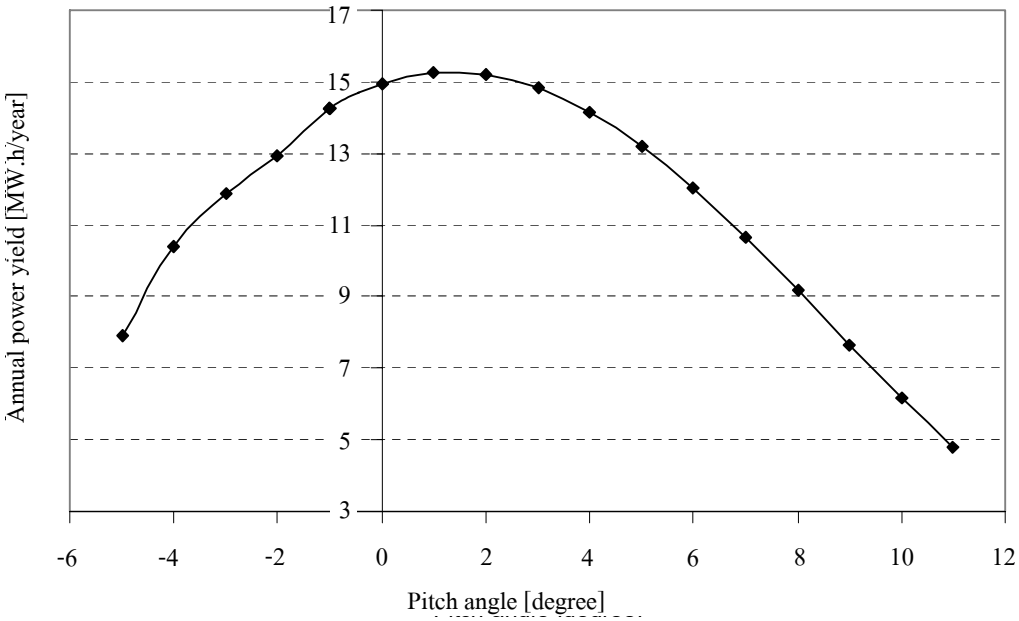
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case I



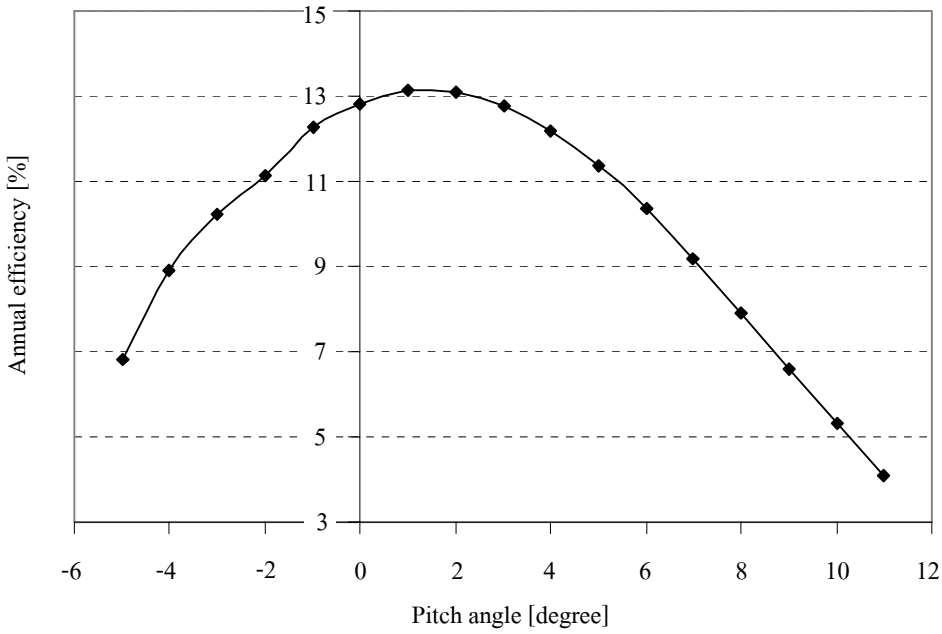
รูปที่ 4.13 งานรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case II



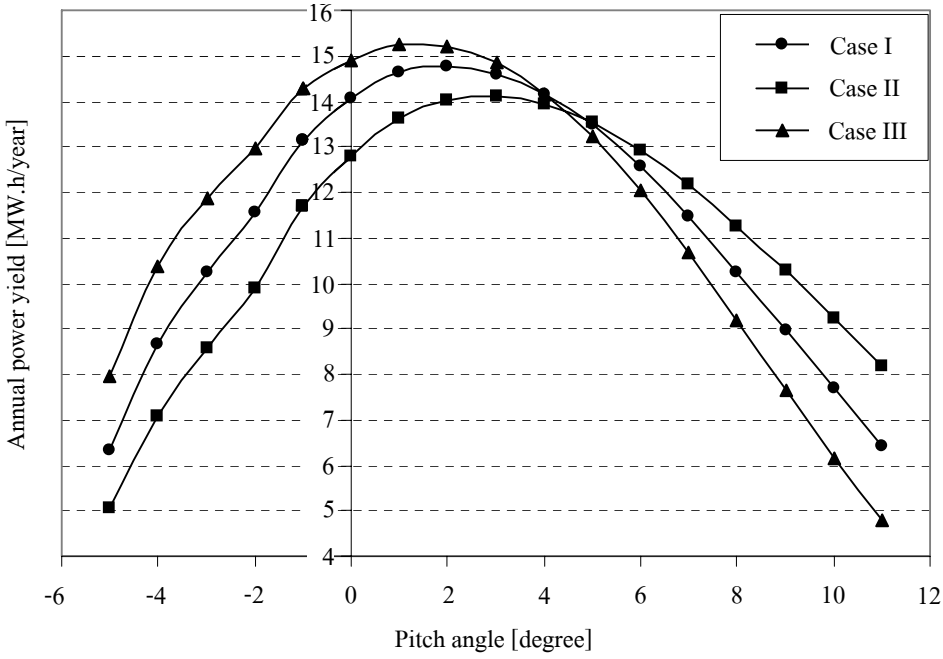
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case II



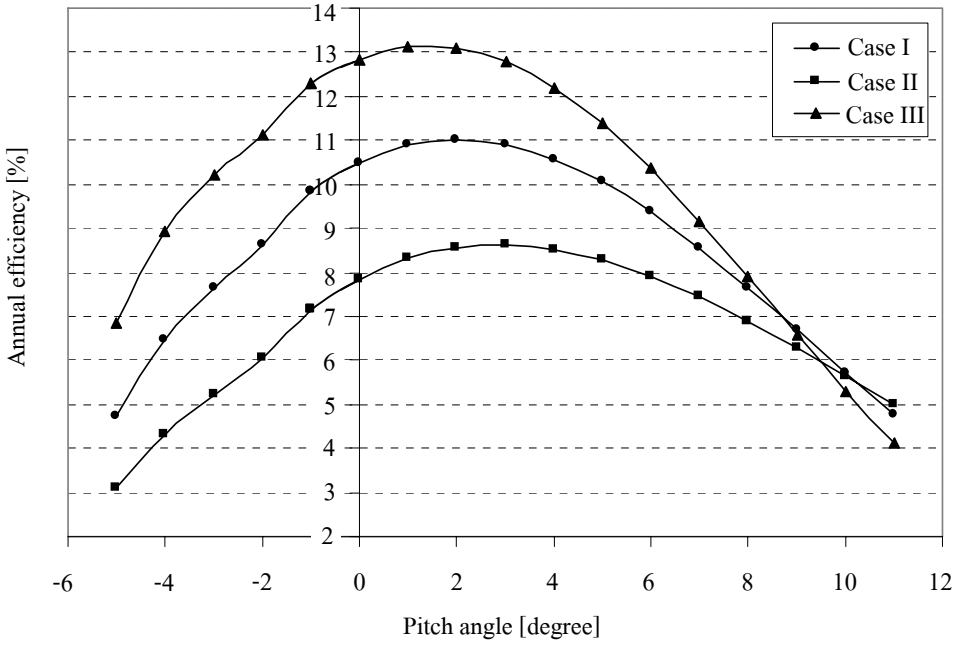
รูปที่ 4.15 งานรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case III



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case III



รูปที่ 4.17 งานรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case I Case II และ Case III



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลม Case I Case II และ Case III

4.4 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณ

4.4.1 พิจารณากังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐาน

งานรายปีสูงสุดที่กังหันลมผลิตได้จากสถิติลม 3 กรณี ได้ผลสรุป คือ Case II < Case I < Case III มีสาเหตุหลักเนื่องมาจากความแตกต่างกันของลักษณะการแจกแจงความถี่ของความหนาแน่นพลังงานลม (รูปที่ 4.2) ซึ่งในกรณี Case I และ Case II มีความหนาแน่นพลังงานลมค่อนไปทางด้านลมแรงหรืออีกนัยหนึ่งคือ กังหันลมมีช่วงการทำงานที่กว้างกว่า Case III และจากกราฟสมรรถนะของกังหันลม NREL Phase II ยังชี้ให้เห็นว่ากังหันลมสามารถผลิตงานได้สูงอย่างต่อเนื่องเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น เนื่องจากระบบควบคุมงานส่วนเกินผ่านการป้อนั้นไม่มีผลต่องานที่กังหันลมผลิตได้เท่าใดนัก ดังนั้นกังหันลมที่ทำงานภายใต้สถิติลม Case II จึงมีโอกาสดูดซับพลังงานจากลมเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีมาตรฐานได้มากกว่ากังหันลมที่ทำงานภายใต้สถิติลมรูปแบบอื่น และในทำนองเดียวกัน กังหันลมที่ทำงานภายใต้สถิติลม Case I ซึ่งมีช่วงการทำงานที่กว้างกว่ากังหันลมที่ทำงานภายใต้สถิติลม Case III ดังนั้นงานรายปีในกรณี Case I จึงมากกว่า Case III

สำหรับร้อยละของงานรายปีที่เพิ่มขึ้นจากกรณีมาตรฐานได้ผลดังนี้ คือ Case III < Case I < Case II เป็นผลสืบเนื่องมาจากความสอดคล้องของงานรายปีสูงสุดกับฐานกำลังงานลมรายปีทั้ง 3 กรณี เมื่องานรายปีสูงสุดของแต่ละกรณีสถิติลมไม่แตกต่างกันมากนัก กำลังงานลมรายปีที่สูงที่สุดจะ

ถ่วงให้ร้อยละของงานรายปีที่เพิ่มขึ้นจากกรณีมาตรฐานมีค่าต่ำสุด ในทางกลับกันกำลังงานลมรายปีที่ต่ำที่สุดจะถ่วงได้น้อยกว่า ดังนั้นร้อยละของงานรายปีที่เพิ่มขึ้นจากกรณีมาตรฐานจึงสูงสุด

หากนำกังหันลมที่ปรับมุมเผินไว้ที่ 6 องศา (ซึ่งเป็นมุมเผินที่ดีที่สุดจาก Case I) ไปติดตั้งในบริเวณอื่นที่มีสถิติลมแตกต่างออกไป ดังเช่น Case II และ Case III พบว่าที่มุมเผิน 6 องศา กังหันลมจะให้งานรายปี 16.40 MW.h/year และ 15.40 MW.h/year สำหรับ Case II และ Case III ตามลำดับ แต่หากทำการปรับมุมเผินเพิ่มจากเดิมอีกเล็กน้อย จะทำให้งานรายปีของกังหันลมภายใต้สถิติลม Case II เพิ่มขึ้นเป็น 16.48 MW.h/year ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.51% แต่การปรับมุมเผินไปจากเดิมไม่มีผลต่อการเพิ่มหรือลดของงานรายปี เนื่องจากมุมเผิน 6 องศา เป็นค่าที่ดีที่สุดของกังหันลมที่ทำงานภายใต้สถิติลม Case III อยู่แล้วแต่เดิม

4.4.2 พิจารณากังหันลม NREL Phase VI เป็นกรณีมาตรฐาน

งานรายปีสูงสุดที่กังหันลมผลิตได้จากสถิติลม 3 กรณี ได้ผลสรุป คือ Case III > Case II > Case I เนื่องจากกังหันลมชนิดนี้เป็นแบบใบบิด ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะชะลอการเกิดการป้อ อีกทั้งยังเป็นระบบควบคุมงานส่วนเกินด้วยในเวลาเดียวกัน ดังนั้นพลังงานที่ช่วงความเร็วลมต่ำจึงมีผลต่องานรายปีที่กังหันลมผลิตได้มากที่สุด จากรูปที่ 4.2 พบว่าที่ช่วงความเร็วประมาณ 2 m/s ถึง 8 m/s เป็นช่วงที่ความหนาแน่นพลังงานลมของทั้ง 3 กรณี แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยที่กรณีที่ได้เปรียบที่สุด คือ Case III Case I และ Case II ตามลำดับ ผลคือ กังหันลมจะมีโอกาสดูดซับพลังงานลมจาก Case III ได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่ Case I และ Case II สำหรับพลังงานลมในช่วงลมแรง คือ ตั้งแต่ 10 m/s เป็นต้นไป จะไม่ก่อให้เกิดงานจากกังหันลมมากนักเนื่องจากงานถูกกำจัดไปกับการป้อเสียส่วนใหญ่ซึ่งเป็นธรรมชาติของกังหันลมแบบใบบิด

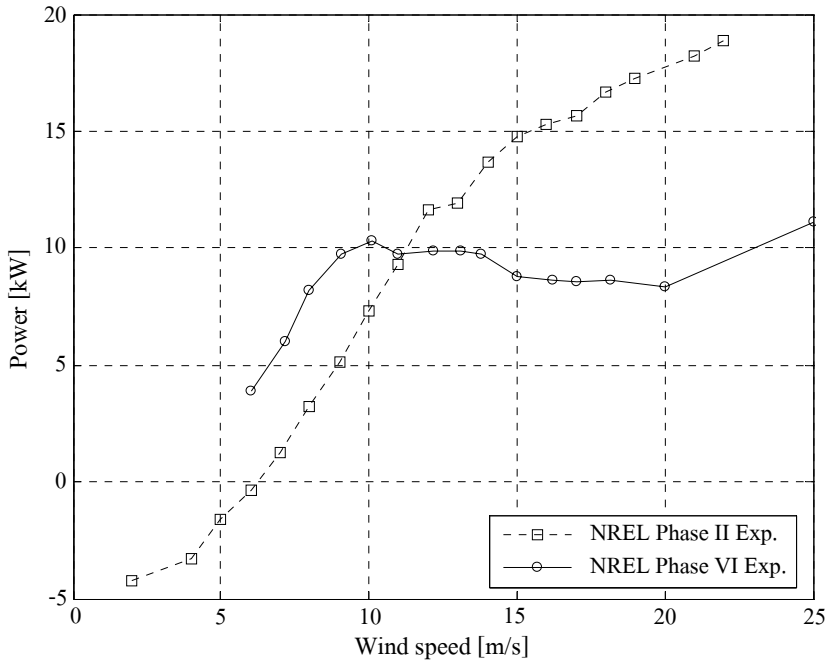
เมื่อจำลองสถานการณ์โดยการนำกังหันลม NREL Phase VI ที่มีมุมเผินปลายใบ 2 องศา ซึ่งเป็นมุมเผินปลายใบที่ดีที่สุดของ Case I ไปติดตั้งภายใต้สถิติลม Case II และ Case III พบว่าเมื่อปรับมุมเผินไปจากเดิมเล็กน้อยจะทำให้ได้งานรายปีเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยทำการปรับมุมเผินไปที่ 3 องศา สำหรับกังหันลมที่ทำงานภายใต้สถิติลม Case II จะได้งานรายปี 14.11 MW.h/year ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ใช้มุมเผิน 2 องศา 0.69% และทำการปรับมุมเผินไปที่ 1 องศา สำหรับกังหันลมที่ทำงานภายใต้สถิติลม Case III จะได้งานรายปี 15.25 MW.h/year ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.32% ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณที่ไม่มากนักในทางวิศวกรรม แต่ในทางเศรษฐศาสตร์ถือว่าเป็นกำไรที่ได้เพิ่มขึ้นมา ดังตัวอย่างเช่น เดิมมีกำไร 3% เมื่อได้งานเพิ่ม 0.69% ก็เท่ากับว่าได้กำไรมากขึ้น $(0.69/3) \times 100 = 23\%$ ถือได้ว่าเป็นผลกำไรที่มีค่ามหาศาลในระยะยาว

4.4.3 เปรียบเทียบผลระหว่าง 2 กรณีมาตรฐาน

งานรายปีสูงสุดและร้อยละของงานที่เพิ่มขึ้นจากกรณีมาตรฐานในกรณีกังหันลม NREL Phase II มีค่าสูงกว่าผลการคำนวณในกรณีของกังหันลม NREL Phase VI มากกว่า 60% ทั้งนี้มีอาจสาเหตุได้หลายกรณี คือ

1) จากรูปที่ 4.19 สังเกตได้ว่าที่ระดับความเร็วลม 10 m/s เป็นต้นไป เส้นกราฟสมรรถนะของกังหันลม NREL Phase VI จะตกลงเป็นแนวเส้นตรงเกือบอยู่ในระดับคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากใบกังหันของ NREL Phase VI ถูกออกแบบมาเพื่อทำให้เกิดการป้อเมื่อกระแสลมแรงเกินกว่าจุดออกแบบ ซึ่งถือว่าเป็นระบบควบคุมงานส่วนเกินแบบหนึ่ง ในด้านการออกแบบเรียกว่าระบบนี้ว่า ระบบควบคุมผ่านการป้อ ในขณะที่กังหันลม NREL Phase II เป็นกังหันลมแบบใบตรง การควบคุมงานส่วนเกินผ่านการป้อ จึงมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร สังเกตได้จากเส้นกราฟสมรรถนะ งานที่กังหันผลิตได้จะยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อกระแสลมแรงขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้งานรายปีสูงสุดของกังหันลม NREL Phase II ที่พิจารณาร่วมกับสถิติลม Case I และ Case II มีค่าสูงกว่างานรายปีสูงสุดของกรณีกันหันลม NREL Phase VI แต่ในกรณีสถิติลม Case III ได้ผลที่ต่างออกไปคือ งานรายปีสูงสุดของกังหันลม NREL Phase VI กลับสูงกว่าของ NREL Phase II ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าลักษณะการบิดใบของ NREL Phase VI ยังช่วยชะลอการป้อในช่วงความเร็วลม 2-0 m/s ซึ่งเป็นช่วงที่สถิติลม Case III มีความหนาแน่นกำลังงานลมสูงกว่าอีก 2 กรณีมาก จึงเป็นจุดที่กังหันลม NREL Phase VI ได้เปรียบ NREL Phase II ภายใต้สถิติลม Case III

2) ใบกังหันลม NREL Phase VI มีความโตกว่าจากโคนใบจนถึงที่ระยะ 80% ของความยาวใบ จะมีความยาวของเส้นคอร์ดที่เท่ากับกังหันลม NREL Phase II และสอบลงอีกจนกระทั่งถึงปลายใบ ซึ่งโคนใบเป็นบริเวณที่เกิดการป้อสูงอีกทั้งยังมีขนาดที่ใหญ่กว่า ผลที่ตามมาคือ การสูญเสียเนื่องจากแรงต้าน จึงเป็นอีกสาเหตุที่ NREL Phase VI ให้พลังงานต่ำกว่า NREL Phase II

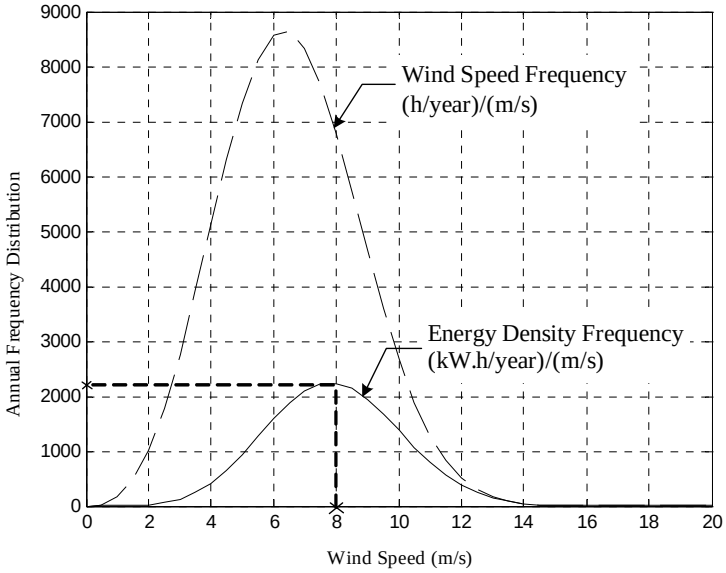


รูปที่ 4.19 กราฟงานเทียบต่อความเร็วลมของกังหันลม NREL Phase II และ NREL Phase VI

4.5 การนำโปรแกรมมาใช้กับสถิติลมในประเทศไทย

ในประเทศไทยมีหลายพื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานลมเพียงพอที่จะติดตั้งกังหันลมได้ อาทิเช่น บริเวณชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมเต็มที่ รวมทั้งบริเวณยอดเขาและ ช่องเขาทางภาคเหนือที่มีกระแสลมแรงพัดผ่านตลอดปี และยังไม่รวมอีกหลายพื้นที่ซึ่งลักษณะเป็นช่องลมแรงซึ่งตกสำรวจ

จากการคำนวณข้างต้น สถิติลมทั้ง 3 ลักษณะเป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นของความเร็วลมที่สมมติขึ้น ซึ่งอาจมีบางประเด็นที่มีความไม่สมจริงอยู่บ้าง ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงได้นำสถิติลมจริงที่บริเวณดอยม่อนล้าน จังหวัดเชียงใหม่ (ธเนศ ไชยชนะ และคณะ, 2551) มาเป็นอีกกรณีหนึ่งเพื่อทดสอบการใช้งานโปรแกรม ซึ่งการแจกแจงความน่าจะเป็นของความเร็วลมในพื้นที่นี้เป็นการแจกแจงแบบไวบูลล์ ที่ ค่า k มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.686 และค่า C มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.338 ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นของความเร็วลม และความหนาแน่นพลังงานลมที่บริเวณดอยม่อนล้าน จังหวัดเชียงใหม่

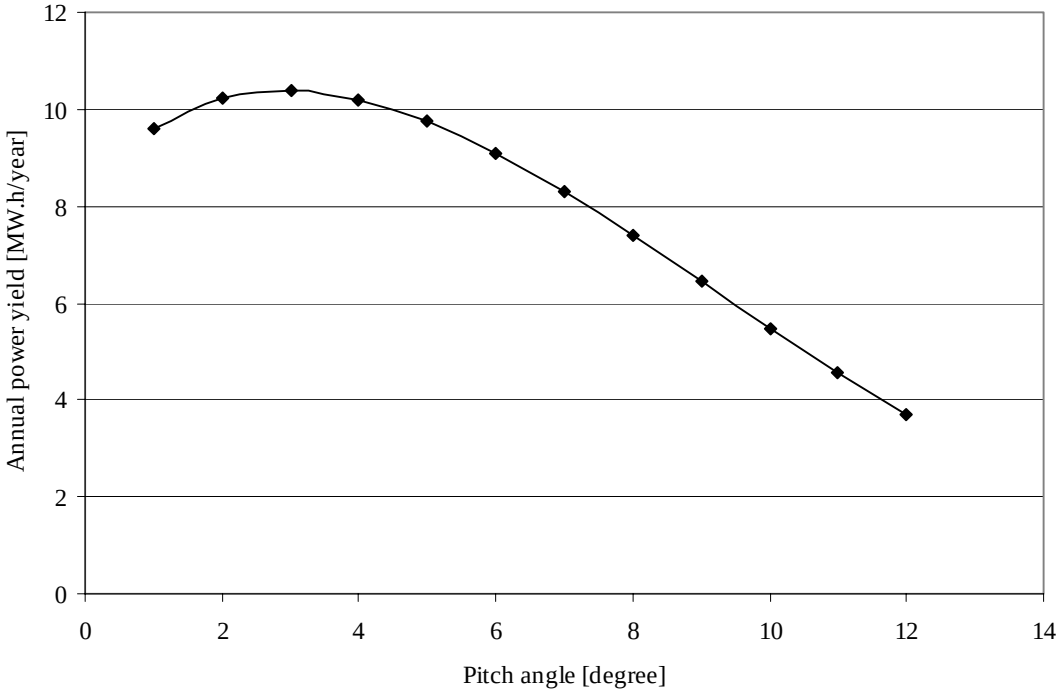
จากผลการคำนวณ มุมเผินที่เหมาะสมกับลักษณะลมของดอยม่อนล้านเมื่อพิจารณากังหันลม NREL Phase II คือ 6 องศา ได้งานรายปีสูงสุด 13.559 MW.h/year ซึ่งเพิ่มขึ้น 7.386 MW.h/year ที่จุดอ้างอิง 12 องศา ถึง 83.58% ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 งานรายปีและประสิทธิภาพรายปีเมื่อปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase II

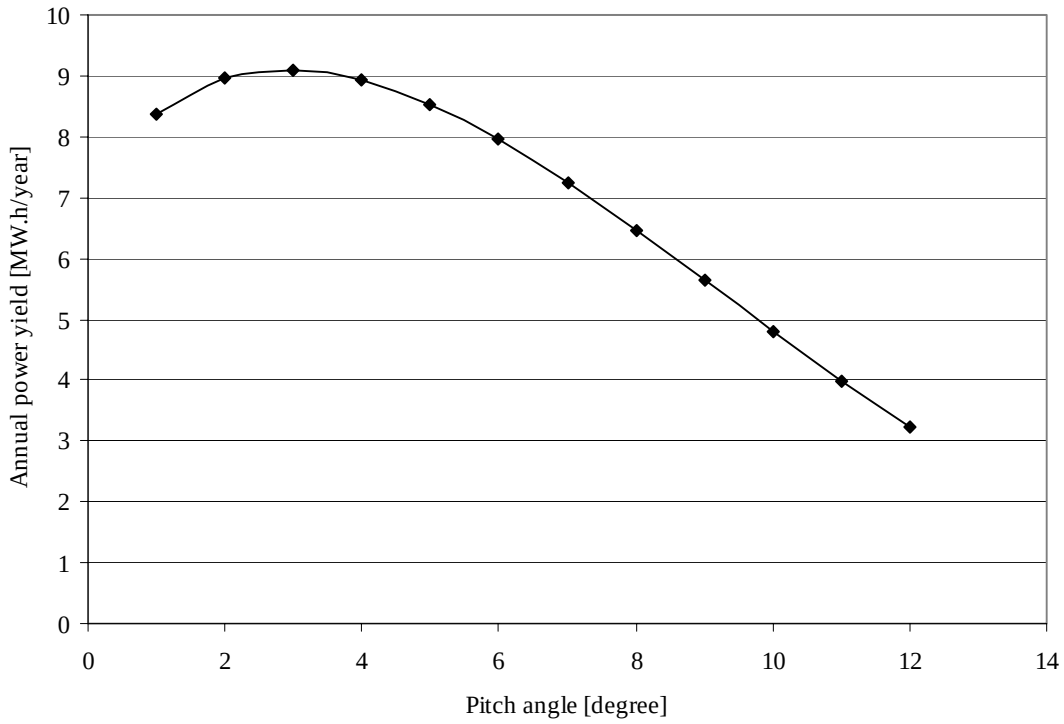
Pitch [degree]	P_{annual} [MW.h/year]	Annual efficiency [%]
3	8.165	7.704
4	10.770	10.161
5	12.916	12.186
6	13.559	12.793
7	13.089	12.349
8	12.672	11.956
9	11.601	10.945
10	10.342	9.758
11	8.867	8.366
12	7.386	6.969

ตารางที่ 4.5 งานรายปีและประสิทธิภาพรายปีเมื่อปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase II (ต่อ)

Pitch [degree]	P_{annual} [MW.h/year]	Annual efficiency [%]
13	5.977	5.639
14	4.670	4.406



รูปที่ 4.21 งานรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นตัวทดสอบ ภายใต้สถิติลมบริเวณดอยม่อนล้าน จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพรายปีเทียบต่อมุมเผิน เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase II เป็นกรณีมาตรฐาน ภายใต้สถิติลมบริเวณดอยม่อนล้าน จังหวัดเชียงใหม่

เมื่อใช้กังหันลม NREL Phase VI ในการคำนวณร่วมกับสถิติลมชุดนี้ พบว่างานรายปีสูงสุดมีค่าเท่ากับ 10.39 MW.h/year มุมเผินปลายใบเหมาะสมอยู่ที่ 3 องศา ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งไม่จำเป็นต้องปรับมุมเผินปลายใบจากจุดอ้างอิงซึ่งเป็นจุดออกแบบของกังหันลมรุ่นนี้ ซึ่งสมเหตุสมผลเพราะกังหันลม NREL Phase VI ได้ถูกออกแบบมาให้เหมาะสมกับช่วงความเร็วลมต่ำถึงปานกลาง (8 m/s) ซึ่งสอดคล้องกับจุดที่มีความหนาแน่นพลังงานลมสูงสุดในรูปที่ 4.15 และโดยปกตินักออกแบบมักจะใช้จุดนี้เป็นจุดออกแบบกังหันลม

ตารางที่ 4.6 งานรายปีและประสิทธิภาพรายปีเมื่อปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase VI

Tip pitch [degree]	P_{annual} [MW.h/year]	Annual efficiency [%]
1.00	9.593	8.380
2.00	10.246	8.950
3.00	10.390	9.080
4.00	10.205	8.920

ตารางที่ 4.6 งานรายปีและประสิทธิภาพรายปีเมื่อปรับมุมเผินของใบกังหัน NREL Phase VI (ต่อ)

Tip pitch [degree]	P_{annual} [MW.h/year]	Annual efficiency [%]
5.00	9.746	8.520
6.00	9.100	7.950
7.00	8.297	7.250
8.00	7.396	6.460
9.00	6.438	5.630
10.00	5.487	4.790
11.00	4.562	3.990
12.00	3.701	3.230

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมด้านอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมและสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษา MATLAB โดยขนานนามโปรแกรมนี้ว่า SuWiTStat มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบมุมเผินให้เหมาะสมกับสถิติลมเฉพาะพื้นที่ ทำให้กังหันลมผลิตงานรายปีได้สูงสุด จากผลการทดสอบและผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม สามารถสรุปผลและประมวลเป็นข้อเสนอแนะที่จะขยายผลสำหรับงานวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

5.2 สรุป

- การทดสอบโปรแกรมกับผลการทดลองของกังหันลม NREL Phase II และ NREL Phase VI พบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยเฉพาะที่ความเร็วลมต่ำก่อนเกิดการป้อ และช่วงหลังการป้อโปรแกรมยังมีความแม่นยำพอสมควรเนื่องจากแบบจำลองเพื่อปรับปรุงการไหลที่เลือกใช้มีความเหมาะสม ดังนั้นโปรแกรม SuWiTStat จึงเหมาะกับการคำนวณร่วมกับลักษณะลมของประเทศไทยเป็นอย่างยิ่ง เพราะที่ช่วงความเร็วลมต่ำถึงปานกลางซึ่งเป็นช่วงของความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทย โปรแกรมยังคงให้ผลการคำนวณที่เชื่อถือได้
- เมื่อทำการวิเคราะห์สถิติลมจำเพาะพื้นที่ร่วมกับการคำนวณ โปรแกรมจะประมวลผลจนกระทั่งได้จุดออกแบบที่ดีที่สุดของมุมเผินที่ให้พลังงานรายปีสูงสุด โปรแกรม SuWiTStat เหมาะอย่างยิ่งในการปรับปรุงและดัดแปลงกังหันลมที่นำเข้าจากต่างประเทศให้เหมาะกับสถิติลมในพื้นที่ที่จะติดตั้งกังหันลม ซึ่งประเด็นหลักคือการดัดแปลงมุมเผินจากจุดที่ถูกออกแบบไว้แล้ว ให้เป็นมุมเผินที่เหมาะสมมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการออกแบบและผลิตกังหันลมเพื่อใช้เองภายในประเทศ

5.3 ข้อเสนอแนะ

- ทำการออกแบบรูปทรงของใบกังหันที่ดีที่สุดในประเด็นของมุมบิดและความสอบที่เหมาะสมกับสถิติลมจำเพาะพื้นที่

- พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อจาก SuWiTStat โดยเลือกแบบจำลองปรับปรุงการไหลที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้งาน
- ทำการจำลองพฤติกรรมทางอากาศพลศาสตร์ของใบกังหันลมที่ผ่านการออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CFD
- เปรียบเทียบผลการจำลองจากโปรแกรมสำเร็จรูปกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น
- ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของใบกังหันลมที่ได้จากการออกแบบ เพื่อหาจุดเหมาะสมระหว่างรูปทรงที่ดีกับความแข็งแรงทนทานต่อความเค้นที่ใบกังหันได้รับ

รายการอ้างอิง

กว้าน สีตะนี. (2527). การวิเคราะห์พลังงานลมในประเทศไทย. (วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาเทคโนโลยีพลังงาน. คณะพลังงานและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).

ชโลธร ธรรมแท้ และทวิช จิตรสมบูรณ์. (2551). SuWiT โปรแกรมเพื่อการออกแบบและประเมินกังหันลม. ใน **เอกสารการประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4**. นครปฐม: คณะวิศวกรรมศาสตร์และ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

ธเนศ ไชยชนะ, สัมพันธ์ ไชยเทพ, วสันต์ จอมภักดี, วิวัฒน์ คล่องพานิช และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี. (2551). การวิเคราะห์ศักยภาพกำลังลมในฤดูฝนที่โครงการเกษตรที่สูงตามพระราชดำริ ดอยม่อนล้าน โดยใช้วิธีการการแจกแจงแบบไวบูลล์ ใน **เอกสารการประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สมศักดิ์ ไชยภินันท์. (2538). การวิเคราะห์ภาระบนใบพัดกังหันลมแนวนอนเพื่อช่วยในการออกแบบทางโครงสร้างของใบกังหันลม. **วิศวกรรมสาร**. 48 (10):35-41.

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E. (2001). **Wind Energy Handbook**. New York: John Wiley & Son, Ltd.

Christophe, L. and Christain, M. (2004). Wind Turbine Performance Predictions Using a Differential Actuator-Lifting Disk Modeling. **In Canada Research Chair on the Aerodynamics of Wind Turbines in Nordic Environment, Proceeding and Abstracts**. Montreal. Canada.

Duque, E.P.N., Johnson, W., Vandam, C.P., Regina, C. and Karen, Y. (2000). Numerical Predictions of Wind Turbine Power and Aerodynamic Loads for the NREL Phase II Combined Experiment Rotor. In **ASME/AIAA Wind Energy Symposium, Proceeding and Abstracts**. Reno. Nevada. January 10-13.

Eggleston, D.M. and Stoddard F. S. (1987). **Wind Turbine Engineering Design**. New York: Van Nostrand Company

Freris, L.L. (1990). **Wind Energy Conversion Systems**. Englewood Cliffs: Prentice Hall International (UK) Ltd.

Giguere, P, and Selig, M.S. (1997). Aerodynamic Blade Design Methods for Horizontal Axis Wind turbines. In **13th Annual Canadian Wind Energy Association Conference and Exhibition**. Quebec City, Canada.

Giguere, P, Selig, M.S. and Tamgler, J.L. (1999). Blade Design Trade-Offs Using Low-Lift Airfoils for Stall-Regulated HAWTs. **In ASME/AIAA Wind Energy Symposium, Proceeding and Abstracts**. Reno, Nevada, January 11-14.

Jack, W. (2004). Optimising wind turbine blade shape and pitch control strategy using blade element theory. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** (7: 145-167).

Johansen , J. and Sørensen, N.N. (2002, August). Numerical Investigation of Three Wind Turbine Blade Tips [online]. **Risø National Laboratory** Item: 87-550-3088-2

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

Kishinamia, K., Taniguchib H., Suzukia J., Ibanoc H., Kazunoud, T. and Turuhamie, M. (2005) Theoretical and experimental study on the aerodynamic characteristics of a horizontal axis wind turbine. In **International Symposium on CO_2 Fixation and Efficient Utilization of Energy (CandE 2002) and the International World Energy System Conference (WESC-2002)** (30: pp. 2089-2100).

Lanzafame, R. and Messina, M. (2007). Fluid Dynamics Wind Turbine Design: Critical Analysis, Optimization and Application of BEM Theory. **Renewable Energy**. 32: 2291-2305

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. (2002). **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. Chichester: John Wiley & Son, Ltd.

Moriarty P.J. and Hansen A.C. (2005). AeroDyn Theory Manual [online]. **National Renewable Energy Laboratory**. Item: NREL/TP-500-36881

Noda M. and Flay, R.G.J. (1999). A simulation model for wind turbine blade fatigue loads. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.** 83: 527-540.

Schreck S. and Robinson M. (2007). Wind Turbine Blade Flow Fields and Prospects for Active Aerodynamic Control [online]. **National Renewable Energy Laboratory**. Item: NREL/TP-500-41606

Selig, M.S. and Tamgler, J.L. (1995). Development and Application of a Multipoint Inverse Design Method for Horizontal Axix Wind Turbines. **Wind Engineering**. 19(2): 91-105.

Simms, D. A., Hand, M. M., Fingersh, L.J. and Jager, D.W. (1999). Unsteady aerodynamics experiment Phases II–IV test configurations and available data campaigns [online]. **National Renewable Energy Laboratory**. Item: NREL/TP-500-25950

Simms, D. A., Hand, M. M., Fingersh, L.J. and Jager, D.W. (2001). Unsteady aerodynamics experiment Phases VI: Wind tunnel test configurations and available data campaigns [online]. **National Renewable Energy Laboratory**. Item: NREL/TP-500-29955

Spera, D.A. (1994). **Wind Turbine Technology: Fundamental Concept of Wind Turbine Engineering**. New York: ASME Press.

Sung, N.J., No, T.S. and Ryu, K.W. (2005). Aerodynamic performance prediction of a 30 kW counter-rotating wind turbine system. **Renewable energy** (pp. 631-644). Oxford: Elsevier Science.

Tangler,J. and David,K.J. (2005). Wind Turbine Post-stall Airfoil Performance Characteristics Guidelines for Blade-Element Momentum Methods. In **The 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit**. Reno. Nevada.

Venkatesh, G.C. and Kulkarni, S.V. (2006) **Energy Yield of Passive Stall Regulated Fixed Speed Wind Turbine With Optimum Rotor Speed**. Electric Power System Research. Vol.76. Jan 2006. pp. 1019-1026.

Viterna, L .A., and Corrigan, R. D. (1981). **Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines**. DOE/NASA Workshop on Large Horizontal Axis Wind Turbines. Cleveland. Ohio. July.

Viterna, L .A., and Corrigan, R. D. (1981). Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines [online]. **Its Large Horizontal-Axis Wind Turbines** (pp. 69-85). Item: SEE N83-19231 09-44

Xu, G. (2001). **Computational Studies of Horizontal Axis Wind Turbines**. Ph.D Thesis. Georgia Institute of Technology. May.

ภาคผนวก ก

การเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB

ก.1 กล่าวนำ

MATLAB เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในแวดวงของนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรในปัจจุบัน ชื่อโปรแกรม MATLAB นั้นย่อมาจาก MATrix LABoratory สำหรับ MATLAB ได้เริ่มพัฒนาครั้งแรกโดย Dr. Cleve Molor ซึ่งเขียนโปรแกรมนี้ขึ้นมาด้วยภาษา Fortran โดยโปรแกรมนี้ได้พัฒนาภายใต้โครงการ LINPACK และ EISPACK สำหรับในปัจจุบันนี้ MATLAB ได้ ถูกเขียนขึ้นโดยใช้ ภาษา C โดยบริษัท MathWorks ภายใต้โครงการ LAPACK และ ARPACK จนกระทั่งทุกวันนี้ MATLAB เป็นโปรแกรมที่มีความเยี่ยมยอดในการคำนวณที่คำนวณด้านเมทริกซ์สำหรับงานทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมโปรแกรมหนึ่ง

ผลงานที่ได้จากงานวิจัยนี้คือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่หามุมเผินที่ดีที่สุด ซึ่งพัฒนาขึ้นบนโปรแกรม MATLAB 7 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความถนัดทางด้านการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ อีกทั้งยังมีอัลกอริธึ่มที่ง่าย และยังสามารถจัดเก็บตัวแปรให้อยู่ในลักษณะของอาเรย์ โดยไม่จำเป็นต้องทำการจองพื้นที่เหมือนกับโปรแกรมอื่น ดังนั้นในการแก้ปัญหาที่ตัวแปรที่อยู่ในรูปเวคเตอร์หรือเมทริกซ์จึงทำได้โดยง่าย

ก.2 โปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อย

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นนี้ จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ โปรแกรมหลัก 1 โปรแกรม และโปรแกรมย่อย 3 โปรแกรม

ก.2.1 โปรแกรมหลัก

```
% Phase II: (constant chord, no taper,untwisted,constant pitch)
% Constant induction factor along blade
% combined this method with validation method

clear;
clc;
dens = 1.125;                   % air density at sea level
visc = 1.789e-5;
rroot = 0.723;
rtip = 5.05;
chord = 0.4572;
numelem = 20;
numb = 3;

rev = 71.63;                    % [rmp]
omega = rev*(2*pi/60);

radius = linspace(rroot,rtip,numelem);
radius1 = radius(1:end-1);
```

```
radius2 = radius(2:end);
dr = radius2 - radius1;
rcal = [radius(1)-dr(1)/2, radius(1:end-1)+dr/2, radius(end)+dr(end)/2];
dr1 = rcal(1:end-1);
dr2 = rcal(2:end);
drr = dr2-dr1;                          % the increment between elements

data = load('wind_NREL_Annex.txt');
data = data(:,1);

cutin = min(data);
cutout = max(data);

step = 0.5;
bin = cutin:step:cutout;

% ************* to select the design wind speed ******************

 [pdf U_design wind_annual] = NREL_makeup(dens,visc,rroot,rtip,data,bin);

lambda = (omega*rtip)./(bin);           % w*R = 37.8804 rad/s
lambda_75 = (0.75)*(omega*rtip)./(bin);
lambda_design = (omega*rtip)/U_design

% ************** to calculate velocities field **********************
%                       Reynold's number

U = length(bin);
alpha_init = 6;
phi_init = atand(U_design/(0.75*omega*rtip));
pitch_init = round(phi_init - alpha_init)       % design pitch at design wind speed

var = [5:1:10];                 % the step of pitch variation; caseI, caseII
pitch_var = pitch_init + var;       % start at the minimum step of variation

sigma = (chord*numb)./(2*pi*radius);

for k = 1:length(var)

pitch(k) = pitch_var(k);

for u = 1:U
        for r = 1:numelem
                phi_init(u,r) = atand(bin(u)/(omega*radius(r)));        _init(u,r) =
                phi_init(u,r) - pitch(k);
                vr_init(u,r) = sqrt((bin(u)^2)+(omega*radius(r))^2);           Re_init(u,r)
                = dens*chord*vr_init(u,r)/visc;
```

```
                lambda_init = (omega*radius(r))/bin(u);

                [cl(u,r) cd(u,r)] = Aerodata_S809(alpha_init(u,r),Re_init(u,r));

                a_init(u,r) = 1/(1+((4*(sind(phi_init(u,r)))^2)/(sigma(r)*(cl(u,r)*...
                cosd(phi_init(u,r))+cd(u,r)*sind(phi_init(u,r))))));

                ap_init(u,r) = 1/(1+((4*(sind(phi_init(u,r))*cosd(phi_init(u,r))))/...
                (sigma(r)*(cl(u,r)*sind(phi_init(u,r))-cd(u,r)*cosd(phi_init(u,r))))));
   end
end

F_init = 1*ones(U,numelem);          % initial condition
a_error = ones(U,numelem);           % initial error
ap_error = ones(U,numelem);          % initial error
vr_error = ones(U,numelem);

m = 10;     % round of calculation
tol = 0.001;

for n = 1:m

   if m > n
      for u = 1:U
         for r = 1:numelem
            bin_init(u,r) = (1-a_init(u,r)*F_init(u,r))*bin(u);
%             bincal(u,r) = (1-a_init(u,r))*bin(u);    % No Tiploss
            vtan_init(u,r) = (1+ap_init(u,r))*(omega*radius(r));
            phi_init(u,r) =          atand(bin_init(u,r)/(vtan_init(u,r)));
            vr_init(u,r) = sqrt((bin_init(u,r))^2+((vtan_init(u,r))^2));

            Re_init(u,r) = dens*chord*vr_init(u,r)/visc;                lambda_init(u,r) =
                        (omega*radius(r))/bin_init(u);

            alpha_init(u,r) = phi_init(u,r) - pitch(k);
         end
      end

   elseif n == m

      for u = 1:U
         for r = 1:numelem
            if a(u,r) > 1
               a(u,r) = 1;
            elseif a(u,r) < 0
               a(u,r) = 0;
            end
```

```
            if ap(u,r) < 0
               ap(u,r) = 0;
            end

            bin_init(u,r) = (1-a_init(u,r)*F_init(u,r))*bin(u);

%              bincal(u,r) = (1-a_init(u,r))*bin(u);  % No Tiploss
            vtan_init(u,r) = (1+ap_init(u,r))*(omega*radius(r));

            phi_init(u,r) = atand(bin_init(u,r)/(vtan_init(u,r)));

            vr_init(u,r) = sqrt((bin_init(u,r))^2+((vtan_init(u,r))^2));

             Re_init(u,r) = dens*chord*vr_init(u,r)/visc;
             lambda_init(u,r) = (omega*radius(r))/bin_init(u);

            alpha_init(u,r) = phi_init(u,r) - pitch(k);
         end
      end

   end

   [a ap F Ft_show Fh_show cl cd] =
  Induction_factor_P2(dens,chord,numb,rroot,rtip,dr,rev,bin,omega,...
  radius,drr,numelem,bin_init,lambda_init,alpha_init,vr_init,Re_init,phi_init,a_init,ap
  _init);
%    [a ap cl cd] = Induction_factor(dens,chord,numb,rroot,rtip,dr,rev,bin,omega,...
%             radius,numelem,alpha_init,vr_init,Re_init,phi_init,a_init,ap_init);  % No
tiploss

      for u = 1:U
         for r = 1:numelem
            bincal(u,r) = (1-a(u,r)*F(u,r))*bin(u);   % Velocity components with a and
a'
%              bincal(u,r) = (1-a_init(u,r))*bin(u);    % No Tiploss
            vtan(u,r) = (1+ap(u,r))*(omega*radius(r));
            phi(u,r) = atand(bincal(u,r)/(vtan(u,r)));
            vrel(u,r) = sqrt((bincal(u,r))^2+((vtan(u,r))^2));
            Re(u,r) = dens*chord*vrel(u,r)/visc;
            lambda(u,r) = (omega*radius(r))/bin_init(u);
            alphad(u,r) = phi(u,r) - pitch(k);
         end
      end

    a_error = abs(a_init-a)./a_init;
   vr_error = abs(vr_init-vrel)./vr_init;
```

```
   if a_error <= tol
      break
   end

   a_init = a;
   ap_init = ap;
   F_init = F;

end

%*********************************************************************
%                          POWER CALCULATION
%*********************************************************************

vrcal_elem = [U,numelem];
for u = 1:U
   vrcal_elem(u,1:numelem) = vrel(u,1:numelem);
   Recal_elem(u,1:numelem) = Re(u,1:numelem);

   for r = 1:numelem
         dpower(u,r) = ((0.5*dens*numb*chord*vrcal_elem(u,r)^2)*(omega))*...
                     (cl(u,r)*sind(phi(u,r))-...
                     cd(u,r)*cosd(phi(u,r)))*radius(r);

         dtorque(u,r) = (0.5*dens*numb*chord*vrcal_elem(u,r)^2)*...
                     (cl(u,r)*sind(phi(u,r))-...
                     cd(u,r)*cosd(phi(u,r)))*radius(r);
   end

   dp = zeros(1,numelem);
   dp = dpower(u,:);
   dp1 = dp(1:end-1);

   dp2 = dp(2:end);
   sum_dp = dp1 + dp2;
   trap_power = 0.5*sum_dp.*dr;
   sum_power(u) = sum(trap_power);      % Rotor power

   dt = dtorque(u,:);
   dt1 = dt(1:end-1);
   dt2 = dt(2:end);
   sum_dt = dt1 + dt2;
   trap_torque = 0.5*sum_dt.*dr;
   sum_torque(u) = sum(trap_torque);

   [pdf U_design wind_annual] = NREL_makeup(dens,visc,rroot,rtip,data,bin);

   power_bin(u) = pdf(u) * sum_power(u);
```

```
    if power_bin(u) < 0
       power_bin(u) = 0;
    end

end

    palpha_bin(1:U) = power_bin(1:U);
    palpha_bin1 = palpha_bin(1:end-1);

    palpha_bin2 = palpha_bin(2:end);
    sum_power = palpha_bin1 + palpha_bin2;

    trap_pcurve = 0.5*(sum_power)*dr(1);
    pannual(k) = 8760*sum(trap_pcurve)      % W.h/year

    eff_annual(k) = pannual(k)./wind_annual

    Pwind = 0.5*dens*pi*rtip^2*bin.^3;
    Cp = (power_bin./Pwind)*100;

% ****************************** PLOT
******************************

% plot(radius(1:end),dpower(17,1:end),'-o',radius(1:end),dpower(27,1:end),'-
s',radius(1:end),dpower(37,1:end),'-');
% xlabel('Radius [m]');
% ylabel('Power [kW]');
% hold on

plot(bin,power_bin/1000,'-o');
title('Power Distribution VS Wind Speed');
xlabel('Wind Speed [m/s]');
ylabel('Power Distribution [kW]');
hold on

end

Pan_max = max(pannual)
pitch_opt = interp1(pannual,pitch,Pan_max)
```

ก.2.2 โปรแกรมย่อยที่ 1

```
%*********************************************************************
%                  to calculate flow conditions from Prandtl's approach
%*********************************************************************
function [a ap F cl cd] =
Induction_factor_P2(dens,chord,numb,rroot,rtip,dr,rev,bin,omega,...
radius,drr,numelem,bin_init,lambda_init,alpha_init,vr_init,Re_init,phi_init,a_init,ap_i
nit);
```

```
%----------------------------
% NO! Tiploss correction
%----------------------------
% nc = numb*chord;
% U = length(bin);
% zigma = (chord*numb)./(2*pi*radius);
% for u = 1:U
%     for r = 1:numelem
%         [cl(u,r),cd(u,r)] = Aerodata_S809(alpha_init(u,r),Re_init(u,r));
%         A(u,r) = ((zigma(r)*rtip)/(8*radius(r)))*((cl(u,r)*cosd(phi_init(u,r))+...
%             cd(u,r)*sind(phi_init(u,r)))/(sind(phi_init(u,r)))^2);
%         AP(u,r) = ((zigma(r)*rtip)/(8*radius(r)))*((cl(u,r)*sind(phi_init(u,r))-...
%             cd(u,r)*cosd(phi_init(u,r)))/(sind(phi_init(u,r))*cosd(phi_init(u,r))));
%         a(u,r) = A(u,r)/(1-A(u,r));
%         ap(u,r) = AP(u,r)/(1-AP(u,r));
%     end
% end

%----------- 1) Table look up for optimize values of a and ap -------
%                 (from Glauert optimum HAWT rotor)

% a_optimum = load('J:\MyThesis\Result of Matlab\my programing\a_opt.txt');
% ap_optimum = load('J:\MyThesis\Result of Matlab\my programing\ap_opt.txt');
%
% U = length(bin);
%
% for u = 1:U
%     for r = 1:numelem
%         lambda(u,r) = (omega*radius(r))/(bin(u));
%         a(u,r) = interp1(a_optimum(:,1),a_optimum(:,2),lambda(u,r),'spline');
%         ap(u,r) = interp1(ap_optimum(:,1),ap_optimSum(:,2),lambda(u,r),'spline');
%     end
% end
%
% a = 0.6*a;                    % Axial induction factor
% ap = 0.5*ap;                   % Tangential induction factor

%------------ 2) Opmization and application of BEM theory ----------

% U = length(bin);
% zigma = (chord*numb)./(2*pi*radius);
% % for u = 1:U
% %     for r = 1:numelem
% %         F(u,r) = (2/pi)*acos(exp((numb*(radius(r)-
rtip))/(2*radius(r)*sin(phi_init(u,r)))));
% %     end
% % end
```

```
% for u = 1:U
%     for r = 1:numelem
% %         [cl(u,r) cd(u,r)] = Aerodata_S809(alpha_init(u,r),Re_init(u,r));
%
% %------- Viterna-Corrigan stall model
%         AR = chord/rtip;              % aspect ratio
%         alpha_stall = 20;
% %         AR(r) = chord(r)/dr(r);
%           if alpha_init >= alpha_stall     % fully stall regime
%              cd_max(r) = 1.11 + 0.018*AR(r);
%              cl_stall(u,r) = 1.24;       % cl average
%              cd_stall(u,r) = 0.44;       % cd average
%              B1(r) = cd_max(r);
%              B2(u,r) = (1/cosd(alpha_stall))*(cd_stall(u,r) -
                                        cd_max(r)*sind(alpha_stall));
%              A1(r) = B1(r)/2;
%             A2(u,r) = (cl_stall(u,r) - cd_max(r)*sind(alpha_stall)*cosd(alpha_stall))*
                            (sind(alpha_stall)/(cosd(alpha_stall))^2);
%              cl(u,r) = A1(r)*(sind(alpha_init(u,r)))^2 +
                                        A2(u,r)*((cosd(alpha_init(u,r)))^2)/sind(alpha_init(
                                        u,r));
%              cd(u,r) = B1(r)*(sind(alpha_init(u,r)))^2 + B2(u,r)*cosd(alpha_init(u,r));
%           else
%
%           [cl(u,r),cd(u,r)] = Aerodata_S809(alpha_init(u,r)
                                                ,Re_init(u,r));
%           end
%
%         F = ones(U,numelem);          % Glauert valid for F=1
%
%         a(u,r) = 1/(((4*F(u,r)*(sind(phi_init(u,r)))^2)/...

(zigma(r)*(cl(u,r)*cosd(phi_init(u,r))+cd(u,r)*sind(phi_init(u,r)))))+1);
%
%         ap(u,r) = 1/(((4*F(u,r)*(sind(phi_init(u,r))* ...
                              cosd(phi_init(u,r))))/
%                 (zigma(r)*(cl(u,r)*sind(phi_init(u,r))-cd(u,r)*cosd(phi_init(u,r)))))+1);
%     end
% end

%---------------------- 3) Prandtl tip loss model ---------------------
%

rhub = 0.508;               % Phase II & VI
nc = numb*chord;
U = length(bin);

% sigma = (chord*numb)./(pi*rtip);              % Phase II
```

```
% sigma_l = (chord(1:end-1).*dr);                % Phase VI; Total
% sigma = numb/(pi*rtip^2)*sum(sigma_l);

sigma = (chord*numb)./(2*pi*radius);        % local solidity
% sigma = (chord*numb)./(pi*radius);        % total solidity

X = omega*rtip./bin;

alpha_stall = 20;           % 15 for PhaseII & 20 for PhaseVI

for u = 1:U
   for r = 1:numelem

      x(u,r) = omega*radius(r)/bin(u);

% ---------------------- Viterna - Corrigan -----------------------

if alpha_init(u,r) < alpha_stall

         [cl(u,r) cd(u,r)] = erodata_S809(alpha_init(u,r),Re_init(u,r));

elseif alpha_init(u,r) >= alpha_stall & alpha_init(u,r) <= 90

         cl_stall = 1.24;           % cl average along blade @ alpha = 20
    cd_stall = 0.441;   % cd average along blade @ alpha = 20

    B1 = cd_max;
    B2 = (1/cosd(alpha_stall))*(cd_stall - cd_max*(sind(alpha_stall))^2);
    A1 = B1/2;
    A2 = (cl_stall - d_max*sind(alpha_stall)*cosd(alpha_stall))*...
        (sind(alpha_stall)/(cosd(alpha_stall))^2);

         cl(u,r) = A1*(sind(2*alpha_init(u,r))) +
                     A2*((cosd(alpha_init(u,r)))^2)/sind(alpha_init(u,r));

         cd(u,r) = B1*(sind(alpha_init(u,r)))^2 + B2*cosd(alpha_init(u,r));

 end

% ------------------------------------------------------------------

%        f_tip(u,r) = (numb/2)*(rtip-(radius(r)))/(rtip*sind(phi_init(u,r)));    % use for
validation
       f_tip(u,r) = (1/(2*rtip))*(rtip-radius(r))*(numb*sqrt(1+(x(u,r))^2));
       F_tip(u,r) = (2/pi)*acosd(exp(-f_tip(u,r)));

%       f_hub(u,r) = (1/(2*rhub))*(radius(r)-rhub)*(numb*sqrt(1+(x(u,r))^2));
       f_hub(u,r) = (numb/2)*((radius(r)-rhub)/(radius(r)*sind(phi_init(u,r))));
```

```
      F_hub(u,r)= (2/pi)*acosd(exp(-f_hub(u,r)));

   end

   F_70(u) = interp1(radius,F_tip(u,:),0.7*rtip);

end

for u = 1:U
   for r = 1:numelem

      F(u,r) = F_tip(u,r)*F_hub(u,r);   % with hub loss
%       F(u,r) = F_tip(u,r);              % no hub loss

      p1(u,r) = (4*F(u,r)*(sind(phi_init(u,r)))^2)/
                          (sigma(r)*(cl(u,r)*cosd(phi_init(u,r))+cd(u,r)*
                          sind(phi_init(u,r))));

      p2(u,r) = (4*F(u,r)*(sind(phi_init(u,r))*cosd(phi_init(u,r))))/
                          (sigma(r)*(cl(u,r)*sind(phi_init(u,r))-cd(u,r)*cosd(phi_init(u,r))));

      a(u,r) = 1/(1+p1(u,r));
      ap(u,r) = 1/(1+p2(u,r));

      dN(u,r)=((0.5*dens*nc(r)*(bin_init(u,r))^2)/
                       ((sind(phi_init(u,r)))^2))*
                       (cl(u,r)*cosd(phi_init(u,r))+cd(u,r)*sind(phi_init(u,r)))*drr(r);

      Cn(u,r) = dN(u,r)/(0.5*dens*(pi*rtip^2)*vr_init(u,r)^2);

      if Cn(u,r) > 0.96*F(u,r)
         a(u,r) = (18*F(u,r)-20-3*(sqrt(Cn(u,r)*(50-36*F(u,r))+12*F(u,r)*...
               (3*F(u,r)-4))))/(36*F(u,r)-50);
      end

      ap(u,r) = 0.5*(sqrt(1+4/(lambda_init(u,r))^2*a(u,r)*(1-a(u,r)))-1);

   end

end
```

ก.2.3 โปรแกรมย่อยที่ 2

```
% ******************** NREL Weibull-Makeup_data **********************

function [pdf U_design wind_annual] = NREL_makeup(dens,visc,rroot,rtip,data,bin);

% ---------------------------------------------------------------------------------------------
% wbparam = the mean value of c and k
% ck95 = the lower bounds and the upper bounds of the both Weibull parameters
% ---------------------------------------------------------------------------------------------

%---------------------------------- CaseI: Normal distribution -----------------------------
% mean = 12;
% sigma2 = 30;
% pdf = (1/(sqrt(2*pi*sigma2)))*exp(-((bin-mean).^2/(2*sigma2)));

% mean = 3;       % U_design = 8 m/s
% sigma2 = 14;

% pdf = (1/(sqrt(2*pi*sigma2)))*exp(-((bin-mean).^2/(2*sigma2)));

mean = 10;       % U_design = 13.5 m/s
sigma2 = 15;

pdf = (1/(sqrt(2*pi*sigma2)))*exp(-((bin-mean).^2/(2*sigma2)));

%---------------- CaseII; Weibull distribution, k = , c =  -------
% mean = 12;
%
% k = 1.8;
%
% gam_int = @(t)(t.^((1/k)-1)).*exp(-t);
% gamma = (1/k)*quad(gam_int,0,10^10);
%
% c = mean/gamma;
% % c = 8;
%
% pdf = (k./c).*((bin./c).^(k-1)).* exp(-(bin./c).^k);

% mean = 5;          % U_design = 8 m/s
%
% k = 2;
%
% gam_int = @(t)(t.^((1/k)-1)).*exp(-t);
% gamma = (1/k)*quad(gam_int,0,10^10);
%
% c = mean/gamma;
% pdf = (k./c).*((bin./c).^(k-1)).* exp(-(bin./c).^k);
```

```
% mean = 8;          % U_design = 13.5 m/s
%
% k = 1.8;
%
% gam_int = @(t)(t.^((1/k)-1)).*exp(-t);
% gamma = (1/k)*quad(gam_int,0,10^10);
%
% c = mean/gamma;
% % c = 8;
%
% pdf = (k./c).*((bin./c).^(k-1)).* exp(-(bin./c).^k);

%---------------- CaseIII; Weibull distribution, k = , c =  -------

% mean = 12;
%
% k = 4;
%
% gam_int = @(t)(t.^((1/k)-1)).*exp(-t);
% gamma = (1/k)*quad(gam_int,0,10^1);
%
% c = mean/gamma;

% pdf = (k./c).*((bin./c).^(k-1)).* exp(-(bin./c).^k);

% mean = 6;          % U_design = 8 m/s
%
% k = 3;
%
% gam_int = @(t)(t.^((1/k)-1)).*exp(-t);
% gamma = (1/k)*quad(gam_int,0,10^1);
%
% c = mean/gamma;
%
% pdf = (k./c).*((bin./c).^(k-1)).* exp(-(bin./c).^k);

% mean = 11;          % U_design = 13.5 m/s
%
% k = 4;
%
% gam_int = @(t)(t.^((1/k)-1)).*exp(-t);
% gamma = (1/k)*quad(gam_int,0,10^1);
%
% c = mean/gamma;
%
% pdf = (k./c).*((bin./c).^(k-1)).* exp(-(bin./c).^k);
```

```
% ------------------------- CHECK!!! ------------------------------

pdf1 = pdf(1:end-1);
pdf2 = pdf(2:end);
bin1 = bin(1:end-1);
bin2 = bin(2:end);
trap_pdf = 0.5*(pdf2+pdf1).*(bin2-bin1);
sum_pdf = sum(trap_pdf);

wp = 0.5*dens*pi*rtip^2*bin.^3;
wp_curve = 8760*pdf.*wp;
peak = max(wp_curve);
U_design = interp1(wp_curve,bin,peak,'spline')

wind1 = wp_curve(1:end-1);
wind2 = wp_curve(2:end);
trap_wind = 0.5*(wind2+wind1).*(bin2-bin1);
wind_annual = sum(trap_wind);

plot(bin,8760*pdf./bin,'-');
title('Weibull Probability Density');
xlabel('Wind Speed [m/s]');
ylabel('Annual Frequency Distribution');
hold on

% plot(bin,pdf,'-');
% title('Weibull Probability Density');
% xlabel('Wind Speed [m/s]');
% ylabel('Annual Frequency Distribution');
% hold on
```

ก.2.4 โปรแกรมย่อยที่ 3

```
%*****************************************************************
%                                NREL_S809
%                          Table lookup for Cl and Cd
%*****************************************************************

function [cl,cd] = Aerodata_S809(alphad,Re);

aerolift = load('Cl_S809_new.txt');
aerodrag = load('Cd_S809_new.txt');

alphatest = -20.1:0.1:90.2;
Retest = [300000 500000 650000 750000 1000000];
```

```
if Re >= min(Retest) & Re <= max(Retest)
   if alphad <= max(alphatest) & alphad >= min(alphatest)
      cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad);
      cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad);
   elseif alphad < min(alphatest)
      alphad = min(alphatest);
      cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad);
      cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad);
   elseif alphad > max(alphatest)
      alphad = max(alphatest);
      cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad);
      cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad);
   end
elseif Re > max(Retest)
   Re = max(Retest);
   if alphad <= max(alphatest) & alphad >= min(alphatest)
      cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad);
      cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad);
   elseif alphad < min(alphatest)
      alphad = min(alphatest);
      cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad);
      cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad);
   elseif alphad > max(alphatest)
      alphad = max(alphatest);
      cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad);
      cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad);
   end
elseif Re < min(Retest)
   Re = min(Retest);
   if alphad <= max(alphatest) & alphad >= min(alphatest)
      cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad);
      cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad);
   elseif alphad < min(alphatest)
      alphad = min(alphatest);
      cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad);
      cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad);

   elseif alphad > max(alphatest)
      alphad = max(alphatest);
      cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad);
      cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad);
   end
end

% Extrapolation case
% if Re >= min(Retest) & Re <= max(Retest)
%    if alphad <= max(alphatest) & alphad >= min(alphatest)
%       cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad,'cubic');
```

```
%         cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad,'cubic');
%     elseif alphad < min(alphatest)
%         alphad = alphatest;
%         cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad,'cubic',cl);
%         cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad,'cubic',cd);
%
%     end
% elseif Re > max(Retest)
%     Re = max(Retest);
%     if alphad <= max(alphatest) & alphad >= min(alphatest)
%         cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad,'cubic');
%         cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad,'cubic');
%     elseif
%         cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad,'cubic',cl);
%         cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad,'cubic',cd);
%     end
% elseif Re < min(Retest)
%     Re = min(Retest);
%     if alphad <= max(alphatest) & alphad >= min(alphatest)
%         cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad,'cubic');
%         cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad,'cubic');
%     elseif
%         cl = interp2(Retest,alphatest,aerolift,Re,alphad,'cubic',cl);
%         cd = interp2(Retest,alphatest,aerodrag,Re,alphad,'cubic',cd);
%     end
% end
```

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบหน้าตัดแพนอากาศ S809 ภายในอุโมงค์ลม

ข.1 ค่าจากการทดสอบหน้าตัดแพนอากาศ S809

ข้อมูลด้านอากาศพลศาสตร์ที่ได้จากทดสอบหน้าตัดแพนอากาศ S809 นี้รวบรวมจากการทดสอบของ 3 แหล่งข้อมูลคือ 1) จากการทดสอบของ Colorado State University (CSU) ที่ค่า Re เท่ากับ 300000 500000 650000 และ 750000 2) จากการทดสอบของ Delft University of Technology (DUT) ที่ Re เท่ากับ 1000000 3) จากการทดสอบของ Oregon State University (OSU) ที่ Re เท่ากับ 1000000 ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ข.1 ค่า C_L ที่ $Re = 300000$ ทดสอบโดย CSU

CSU: Re = 300000	
α	C_L
0	0.105
1.99	0.307
4.08	0.545
6.11	0.748
8.14	0.88
10.2	0.878
11.2	0.87
12.2	0.854
13.1	0.877
14.1	0.894
15.2	0.891
16.3	0.745
17.2	0.591
18.1	0.592
19.2	0.58
20.2	0.604
22.1	0.588
26.2	0.669

CSU: Re = 300000	
α	C_L
30.2	0.946
35.2	1.02

ตารางที่ ข.1 ค่า C_L ที่ $Re = 300000$ ทดสอบโดย CSU (ต่อ)

CSU: Re = 300000	
α	C_L
40.3	1.08
45.2	1.23
45.1	1.13
50	1.21
60	1.05
69.9	0.805
80	0.456
90	0.128

ตารางที่ ข.2 ค่า C_L ที่ $Re = 500000$ ทดสอบโดย CSU

CSU: Re = 500000	
α	C_L
-2.23	-0.06
-0.161	0.156
1.84	0.369
3.88	0.571
5.89	0.755
7.89	0.86
8.95	0.887
9.91	0.869
10.9	0.868
12	0.894
12.9	0.938

CSU: Re = 500000	
α	C_L
14	0.929
14.9	0.908
16	0.912

ตารางที่ ข.2 ค่า C_L ที่ $Re = 500000$ ทดสอบโดย CSU (ต่อ)

CSU: Re = 500000	
α	C_L
17	0.655
18	0.588
19	0.587
20	0.597
22	0.603
24	0.647
26	0.683
28.1	0.745
30	0.824
35	1.05
40	1.14
45	1.2
50	1.12
55	1.17
60	1.08
65	0.94
70	0.857
74.9	0.666
79.9	0.472
84.8	0.356
89.9	0.142

ตารางที่ ข.3 ค่า C_L ที่ Re = 650000 ทดสอบโดย CSU

CSU: Re = 650000	
α	C_L
-0.25	0.151

ตารางที่ ข.3 ค่า C_L ที่ Re = 650000 ทดสอบโดย CSU (ต่อ)

CSU: Re = 650000	
α	C_L
1.75	0.354
3.81	0.561
5.92	0.765
7.94	0.86
9.98	0.848
11	0.892
12	0.888
13	0.927
14	0.91
15	0.91
16	0.928
17	0.686
18	0.639
19	0.576
20	0.552
22	0.596
23.9	0.649
26	0.68
30	0.851
35	1.01
40	1.12

45	1.12
50	1.1
55.3	1.08
60.2	0.931
65.2	0.968
70.2	0.776

ตารางที่ ข.4 ค่า C_L ที่ $Re = 750000$ ทดสอบโดย CSU

CSU: Re = 750000	
α	C_L
75.2	0.63
80.2	0.485
85.1	0.289
90.2	0.109
-20.1	-0.56
-18.1	-0.67
-16.1	-0.79
-14.2	-0.84
-12.2	-0.7
-10.1	-0.63
-8.2	-0.56
-6.1	-0.64
-4.1	-0.42
-2.1	-0.21
0.1	0.05
2	0.3
4.1	0.54
6.2	0.79
8.1	0.9
10.2	0.93
11.3	0.92

12.1	0.95
13.2	0.99
14.2	1.01
15.3	1.02
16.3	1

ตารางที่ ข.4 ค่า C_L ที่ $Re = 750000$ ทดสอบโดย CSU (ต่อ)

CSU: Re = 750000	
C_L	C_L
17.1	0.94
18.1	0.85
19.1	0.7
20.1	0.66
22	0.7
24.1	0.79
26.2	0.88

ตารางที่ ข.5 ค่า C_L ที่ $Re = 1000000$ ทดสอบโดย DUT

DUT: Re = 1000000	
α	C_L
-1.04	0.019
-0.01	0.139
1.02	0.258
2.05	0.378
3.07	0.497
4.1	0.617
5.13	0.736
6.16	0.851
7.18	0.913
8.2	0.952

DUT: Re = 1000000	
α	C_L
9.21	0.973
10.2	0.952
11.21	0.947
12.23	1.007
13.22	1.031

ตารางที่ ข.5 ค่า C_L ที่ $Re = 1000000$ ทดสอบโดย DUT (ต่อ)

DUT: Re = 1000000	
C_L	C_L
14.23	1.055
15.23	1.062
16.22	1.043
17.21	0.969
18.19	0.938
19.18	0.929
20.16	0.923

ตารางที่ ข.6 ค่า C_L ที่ $Re = 1000000$ ทดสอบโดย OSU

OSU: Re = 1000000	
α	C_L
-20.1	-0.55
-18.2	-0.65
-16.2	-0.8
-14.1	-0.79
-12.1	-0.7
-10.2	-0.63
-8.2	-0.58
-6.2	-0.61

OSU: Re = 1000000	
α	C_L
-4.1	-0.4
-2.1	-0.16
0	0.07
2.1	0.3
4.1	0.55
6.1	0.79
8.2	0.9

ตารางที่ ข.6 ค่า C_L ที่ $Re = 1000000$ ทดสอบโดย OSU (ต่อ)

OSU: Re = 1000000	
α	C_L
10.1	0.94
11.2	0.93
12.2	0.97
13.3	1.00
14.2	1.02
15.2	1.03
16.2	1.01
17.2	0.95
18.1	0.9
19.2	0.78
20	0.67
22.1	0.7
24	0.77
26.1	0.91

ข.2 ค่า C_D จากการทดสอบหน้าตัดแพนอากาศ S809

ตารางที่ ข.7 ค่า C_D ที่ $Re = 300000$ ทดสอบโดย CSU

CSU: Re = 300000	
α	C_L
0	0.0117
1.99	0.0116
4.08	0.0139
6.11	0.0135
8.14	0.0198
10.2	0.036

ตารางที่ ข.7 ค่า C_D ที่ $Re = 300000$ ทดสอบโดย CSU (ต่อ)

CSU: Re = 300000	
α	C_L
11.2	0.0446
12.2	0.0496
13.1	0.0619
14.1	0.0731
15.2	0.0865
16.3	0.22
17.2	0.248
18.1	0.265
19.2	0.279
20.2	0.298
22.1	0.323
26.2	0.412
30.2	0.633
35.2	0.799
40.3	0.983
45.2	1.31
45.1	1.21
50	1.51
60	1.86
69.9	2.27
80	2.16

ตารางที่ ข.8 ค่า C_D ที่ $Re = 500000$ ทดสอบโดย CSU

CSU: Re = 500000	
α	C_L
-2.23	0.006
-0.161	0.004
1.84	0.006
3.88	0.008
5.89	0.009
7.89	0.017
8.95	0.024
9.91	0.035
10.9	0.039
12	0.048
12.9	0.061
14	0.074
14.9	0.08
16	0.106
17	0.271
18	0.265
19	0.281
20	0.299
22	0.326
24	0.375
26	0.419
28.1	0.482
30	0.56

ตารางที่ ข.9 ค่า C_D ที่ $Re = 650000$ ทดสอบโดย CSU

CSU: Re = 650000	
α	C_L
-0.25	0.002
1.75	0.001
3.81	0.002
5.92	0.006
7.94	0.015
9.98	0.031
11	0.043
12	0.049
13	0.043
14	0.075
15	0.075
16	0.107
17	0.278
18	0.276
19	0.273
20	0.275
22	0.323
23.9	0.37
26	0.417
30	0.576
35	0.789
40	1.03
45	1.19
50	1.36
55.3	1.58
60.2	1.62

ตารางที่ ข.9 ค่า C_D ที่ $Re = 650000$ ทดสอบโดย CSU (ต่อ)

CSU: Re = 650000	
α	C_L
65.2	2
70.2	2.04
75.2	2.13
80.2	2.32
85.1	2.14
90.2	2.27

ตารางที่ ข.10 ค่า C_D ที่ $Re = 750000$ ทดสอบโดย CSU

CSU: Re = 750000	
α	C_L
-20.1	0.3027
-18.1	0.3069
-16.1	0.1928
-14.2	0.0898
-12.2	0.0553
-10.1	0.039
-8.2	0.0233
-6.1	0.0112
-4.1	-0.0004
-2.1	-0.0003
0.1	0.0029
2	0.0056
4.1	0.0067
6.2	0.0085
8.1	0.0127
10.2	0.0274

ตารางที่ ข.10 ค่า C_D ที่ $Re = 750000$ ทดสอบโดย CSU (ต่อ)

CSU: Re = 750000	
α	C_L
11.3	0.0303
12.1	0.0369
13.2	0.0509
14.2	0.0648
15.3	0.0776
16.3	0.0917
17.1	0.0994
18.1	0.2306
19.1	0.3142
20.1	0.3186
22	0.3694
24.1	0.4457
26.2	0.526

ตารางที่ ข.11 ค่า C_D ที่ $Re = 1000000$ ทดสอบโดย DUT

DUT: Re = 1000000	
α	C_L
-1.04	0.0095
-0.01	0.0094
1.02	0.0096
2.05	0.0099
3.07	0.01
4.1	0.01
5.13	0.0097
6.16	0.0095
7.18	0.0127

ตารางที่ ข.11 ค่า C_D ที่ $Re = 1000000$ ทดสอบโดย DUT (ต่อ)

DUT: Re = 1000000	
α	C_L
8.2	0.0169
9.21	0.0247
10.2	0.0375
11.21	0.0725
12.23	0.0636
13.22	0.0703
14.23	0.0828
15.23	0.1081
16.22	0.1425
17.21	0.1853
18.19	0.1853
19.18	0.1853
20.16	0.1853

ตารางที่ ข.12 ค่า C_D ที่ $Re = 1000000$ ทดสอบโดย OSU

OSU: Re = 1000000	
α	C_L
-20.1	0.2983
-18.2	0.2955
-16.2	0.1826
-14.1	0.0793
-12.1	0.0547
-10.2	0.0401
-8.2	0.0266
-6.2	0.0183
-4.1	0.0004

ตารางที่ ข.12 ค่า C_D ที่ $Re = 1000000$ ทดสอบโดย OSU (ต่อ)

OSU: Re = 1000000	
α	C_L
-2.1	0.0009
0	0.0022
2.1	0.0037
4.1	0.005
6.1	0.0063
8.2	0.0096
10.1	0.0231
11.2	0.0236
12.2	0.0368
13.3	0.0551
14.2	0.0618
15.2	0.0705
16.2	0.088
17.2	0.1043
18.1	0.1325
19.2	0.3474
20	0.3211
22.1	0.3699
24	0.4348
26.1	0.5356

ประวัติผู้เขียน

นางสาววิกันดา ศรีเดช เกิดเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม พ.ศ. 2521 เริ่มศึกษาชั้นประถม ที่โรงเรียนเพ็ชรศึกษา ตั้งแต่ชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-3 ชั้นประถมศึกษาปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนอนุบาลกำแพงเพชร ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนกำแพงเพชรพิทยาคม จังหวัดกำแพงเพชร และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2543 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เริ่มทำงานที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ เป็นเวลา 2 ปี

ปี พ.ศ. 2546 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ทำหน้าที่เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ Geomechanics Research Unit ในโครงการวิจัยเรื่อง การประเมินศักยภาพทางด้านกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินเพื่อใช้เก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปอากาศอัดภายใต้แรงดันในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (Geomechanics Performance of Salt Formation for Compressed-Air Energy Storage in the Northeast of Thailand)
ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 ประจำปี พ.ศ. 2551 เรื่อง มุมเผินที่ดีที่สุดของใบกังหันลมสำหรับสถิติลมจำเพาะพื้นที่ (Optimal Pitch Angle for Wind Turbine in a Local Wind Statistic)