

## การออกแบบกังหันลมแกนนอนด้วยวิธีเชิงทฤษฎีร่วมกับวิธีเชิงตัวเลข

### The Design of Horizontal Axis Wind Turbines using a Combination of

### Theoretical and Numerical Methods

ชโลธร ธรรมแท้ และ ทวีช จิตรสมบูรณ์<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

\*ผู้ติดต่อ: tabon@sut.ac.th, โทร 0-4422-4410, โทรสาร 0-4422-4413

#### บทคัดย่อ

วิธีเชิงทฤษฎีและเชิงตัวเลขถูกนำมาใช้ร่วมกันเพื่อบูรณาการการออกแบบกังหันลมแกนนอนตามหลักอากาศพลศาสตร์ หลักการคืออาศัยวิธีการคำนวณเชิงทฤษฎีที่คำนวณได้อย่างรวดเร็วในการค้นหาค่าที่เหมาะสมสำหรับกังหันลม และใช้วิธีเชิงตัวเลขที่มีความแม่นยำสูงกว่าในการยืนยันหรือปรับการออกแบบในเชิงทฤษฎี (หากจำเป็น) การออกแบบกังหันลมในที่นี่มีเป้าหมายในการออกแบบคือ 1. ได้ประสิทธิภาพสูงที่ลมต่ำ และ 2. ได้ Rated Power ที่ลมต่ำกว่า 10 m/s การออกแบบกังหันลมด้วยโปรแกรมเชิงทฤษฎีที่ได้พัฒนาขึ้นให้ผลตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ และเมื่อสอบเทียบการออกแบบด้วยวิธีเชิงตัวเลขพบว่าประสิทธิภาพกังหันลมที่ได้มีความสอดคล้องกัน ทำให้กังหันลมที่ออกแบบมีความน่าเชื่อถือ

**คำหลัก:** กังหันลมแกนนอน, การออกแบบเชิงทฤษฎี, การยืนยันการออกแบบ

#### Abstract

Semi-theoretical and numerical methods were employed concurrently to design a horizontal axis wind turbine blade according to the aerodynamic principle. The fast semi-theoretical method was used to search for an appropriate blade configuration while the numerical method used to verify or modify the design if necessary. The aims of the design were: 1) high efficiency at low wind and 2) rated power at wind speed lower than 10 m/s. The design was accomplished in accordance with the set goal and was verified satisfactorily by the numerical method. This mutually and independently verifying methodology helps establish credibility to the design procedure.

**Keywords:** HAWT, theoretical design, design validation

## 1. บทนำ

คณะผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมเชิงทฤษฎีเพื่อการออกแบบกังหันลมแกนนอน โดยให้ชื่อโปรแกรมนี้ว่า SuWiT [1] โปรแกรมนี้ได้ถูกพัฒนาปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง [1-3] บนพื้นฐานของทฤษฎี Blade Element Momentum Theory (BEM) ร่วมกับแบบจำลองปรับแก้ค่าต่างๆ [4-7] โดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบกังหันลมให้มีประสิทธิภาพสูง สิ่งที่จะได้จากโปรแกรมคือขนาด (chord) และ มุมบิดใบ (twist) เป็นปฏิภาคกับระยะรัศมีใบกังหัน

คณะผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงวิธี CFD สำหรับการคำนวณการไหลผ่านกังหันลมอย่างต่อเนื่อง [8-12] พบว่าขนาดโดเมนของการคำนวณมีผลต่อความแม่นยำของ CFD [9] โดเมนที่ใช้ในการคำนวณควรมีขนาดที่ใหญ่เพียงพอที่จะไม่กระทบต่อคำตอบ ขณะเดียวกันไม่ควรมีขนาดใหญ่เกินไปจนทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรการคำนวณโดยไม่จำเป็น แบบจำลองความปั่นป่วนมีผลอย่างมากต่อความแม่นยำของการคำนวณการไหลผ่านกังหันลม จึงได้พัฒนาแบบจำลองความปั่นป่วนโดยเพิ่มฟังก์ชันการหน่วงที่หนึ่งเข้ากับแบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\omega$  SST [10] ซึ่งทำให้ปรับปรุงความแม่นยำในการคำนวณการไหลผ่านแพนอากาศและกังหันลมได้เป็นอย่างดี วิธีการใหม่นี้เรียกว่าวิธี SST+ ซึ่งมักจะให้ผลการทำนายกำลังงานกังหันลมที่ต่ำกว่าการใช้วิธี SST ปกติ ซึ่งนับว่ามีความถูกต้องมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม SuWiT ในการออกแบบกังหันลมขั้นพื้นฐานและใช้วิธี CFD ที่ได้พัฒนาไว้จนน่าเชื่อถือแล้วในการสอบเทียบผลลัพธ์ ทั้งนี้อาจมีการปรับการออกแบบของ SuWiT ด้วย CFD หากจำเป็น

ในการออกแบบกังหันลมนี้จะอ้างอิงเปรียบเทียบกับกังหันลม NREL Phase VI [13, 14]

ซึ่งใช้แพนอากาศรุ่น S809 [15] เนื่องจากการเปรียบเทียบจะทำได้ง่ายเพราะมีข้อมูลการทดลองที่นำเชื่อถือสำหรับกังหันลมรุ่นนี้ ได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ใช้กังหันลมนี้ในการอ้างอิง [1-3, 8-12]

## 2. เป้าประสงค์การออกแบบ

เพื่อให้กังหันลมที่ออกแบบใหม่สามารถใช้งานได้ดีที่ความเร็วลมต่ำ ซึ่งเป็นลมส่วนใหญ่ของประเทศไทย จึงกำหนดเป้าประสงค์ในการออกแบบดังนี้

1. ประสิทธิภาพในช่วงความเร็วลมต่ำ ที่ 4-6 m/s ควรสูงกว่า 40%<sup>1</sup>
2. ควรมี Rated Power (กำลังประเมิน) ที่ความเร็วลมต่ำกว่า 10 m/s

ในการออกแบบนี้ เพื่อให้เป็นไปตามกังหันลม NREL Phase VI จึงได้กำหนดให้รัศมีของกังหันลมมีค่า 5.03 เมตร และเป็นชนิดที่ควบคุมกำลังที่ลมแรงด้วยวิธี Stall-regulated ความเร็วรอบกันหันคงที่ที่ 72 RPM สำหรับกระบวนการคำนวณเพื่อให้ได้กังหันตามเป้าประสงค์ที่กำหนดนั้นใช้วิธีวนซ้ำ (iteration) โดยการใช้โปรแกรม SuWiT ที่คำนวณได้รวดเร็วซึ่งเหมาะกับการออกแบบในลักษณะนี้ ในกระบวนการทำซ้ำเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพกังหันลมตามเป้าประสงค์นั้น เริ่มด้วยการศึกษาความไวจากการเปลี่ยนความโตใบ (chord) และมุมบิดใบ (twist) โดยการแบ่งใบกังหันประมาณ 20 ส่วน แล้วทดลองปรับ chord และ twist ในแต่ละส่วนของใบ เพื่อศึกษาผลกระทบท่อค่าประสิทธิภาพที่ความเร็วลมต่างกัน ซึ่งพบว่าที่บริเวณโคนใบ กลางใบ และปลายใบ จะให้ผลต่อประสิทธิภาพของกังหันที่ความเร็วลมต่างกัน จากนั้นจึงทำการปรับ chord และ twist โดยละเอียดเพื่อให้ได้กังหันลมตามเป้าประสงค์ เมื่อได้กังหันลมที่ต้องการจากการออกแบบด้วยวิธี BEM แล้วจึงทำการสอบเทียบผลลัพธ์กับวิธี CFD อีกครั้งเพื่อเป็นการยืนยันผล

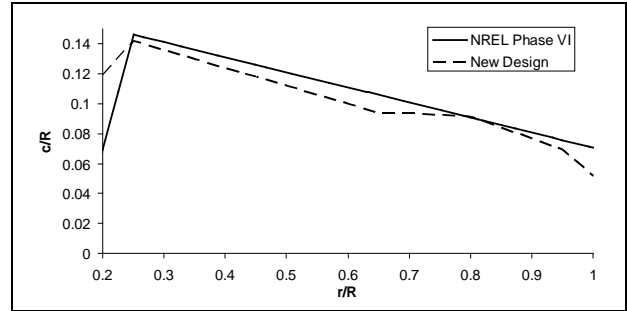
<sup>1</sup> ประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมไม่เกิน 16/27 หรือ 59.3% [4-7]

### 3. ผลการออกแบบกังหันลมด้วยวิธี BEM

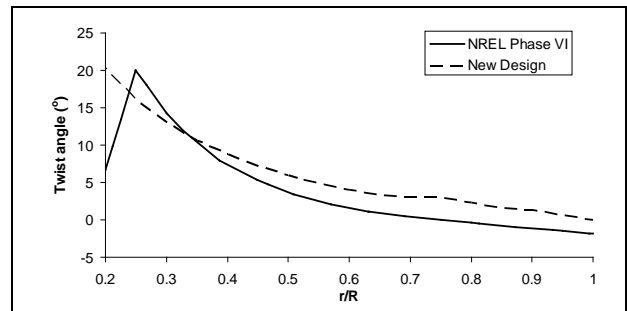
จากการวิเคราะห์พบว่ากังหันลม NREL Phase VI มีค่า Tip Speed Ratio (TSR) ที่ต่ำกว่ากังหันทั่วไป จึงทำให้ดักจับพลังงานได้ไม่ดีนัก ทั้งนี้เป็นเพราะได้มีการพัฒนาต่อเนื่องมาหลายรุ่นตั้งแต่ NREL Phase II [16] ซึ่งกำหนดความโตของใบ (chord) ไว้ที่ 0.457 m โดยเป็นกังหัน 3 ใบ เมื่อมาสู่กังหัน NREL Phase VI ได้ถูกกำหนดกังหันเป็นแบบ 2 ใบโดยจะต้องมี chord ที่ระยะ effective radius เท่ากับกังหันรุ่นก่อน โดยใช้ความเร็วรอบการหมุนเท่าเดิม [13] ปัจจุบันเหล่านี้จึงทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดของ NREL Phase VI มีค่าประมาณ 38%

การเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นจากเดิมทำได้สามแนวทางคือ 1. เพิ่มความเร็วรอบเพื่อให้ได้ค่า TSR ที่เหมาะสม หรือ 2. คงความเร็วรอบของการหมุนเท่าเดิมแต่เพิ่มความโตของใบกังหัน และ 3. คงความเร็วรอบของการหมุนเท่าเดิมแต่เพิ่มจำนวนใบกังหัน ในงานวิจัยนี้จะเลือกแนวทางการเพิ่มจำนวนใบจาก 2 ใบ เป็น 3 ใบเพื่อเป็นกรณีทดสอบการออกแบบแบบบูรณาการระหว่างวิธีการทางทฤษฎีและวิธีทาง CFD

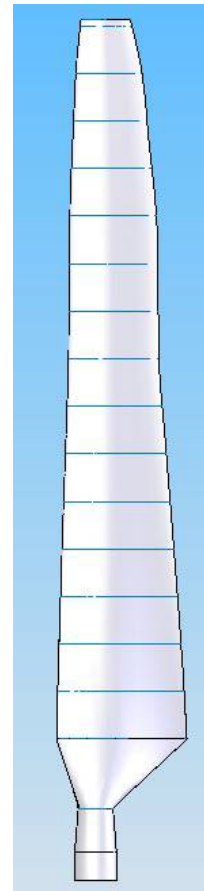
การเปรียบเทียบความโตใบ (chord) และมุมบิดใบ (twist) ระหว่างกังหันที่ออกแบบใหม่กับกังหัน NREL Phase VI แสดงอยู่ในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ สำหรับกังหันที่ออกแบบใหม่จะมี 3 ใบพัด ซึ่งต่างจากของเดิมที่มี 2 ใบพัด ขนาดของใบและมุมบิดแตกต่างจากกังหันเดิมอย่างชัดเจน ในภาพรวมกังหันใหม่มีขนาดเล็กกว่าและมีมุมบิดมากกว่า เห็นได้ชัดว่ากังหันใหม่มีมุมบิดและความโตใบที่ไม่เป็นเชิงเส้นหลังจากประมาณ 65% ของความยาวใบ ทั้งนี้เป็นเพราะเงื่อนไขในการออกแบบที่จำกัดให้มีประสิทธิภาพสูงที่ความเร็วลมต่ำและเกิดกำลังสูงสุดที่ความเร็วลมไม่เกิน 10 m/s ตามเป้าประสงค์การออกแบบ สำหรับรูปร่างกังหันที่ออกแบบใหม่ด้วยโปรแกรมออกแบบ 3 มิติ แสดงอยู่ในรูปที่ 3



รูปที่ 1 เปรียบเทียบความโตใบของกังหันที่ออกแบบใหม่กับกังหัน NREL Phase VI

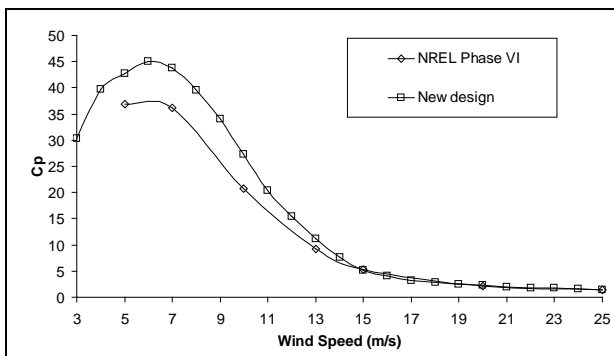


รูปที่ 2 เปรียบเทียบมุมบิดใบของกังหันที่ออกแบบใหม่กับกังหัน NREL Phase VI

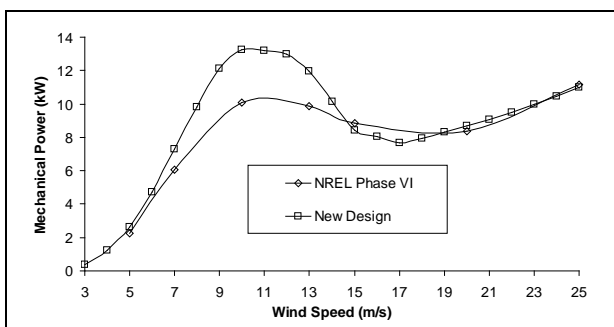


รูปที่ 3 รูปร่างใบกังหันลมที่ออกแบบใหม่

ผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพและกำลังของกังหันใหม่เปรียบเทียบกับกังหัน NREL Phase VI แสดงอยู่ในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ เห็นได้ว่ากังหันใหม่มีประสิทธิภาพสูงกว่ากังหัน NREL Phase VI ในช่วงความเร็วลม 5-15 m/s เมื่อพ้นความเร็วลม 15 m/s จะมียุทธศาสตร์ใกล้เคียงกัน กังหันใหม่สามารถทำประสิทธิภาพสูงสุดถึง 45% และมีประสิทธิภาพสูงกว่า 40% ในช่วงความเร็วลม 4-8 m/s กำลังสูงสุดเกิดที่ความเร็วลม 10 m/s ซึ่งประเมินได้ว่าเป็นความเร็วประเมิน (rated speed) สำหรับประเทศไทยที่มีความเร็วลมเฉลี่ยอย่างมากประมาณ 6 m/s เห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ออกมาเป็นไปตามเป้าประสงค์ที่ได้ตั้งไว้แต่แรก



รูปที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันที่ออกแบบใหม่กับกังหัน NREL Phase VI



รูปที่ 5 เปรียบเทียบกำลังเชิงกลของกังหันที่ออกแบบใหม่กับกังหัน NREL Phase VI

#### 4. การสอบเทียบวิธี BEM ด้วย CFD

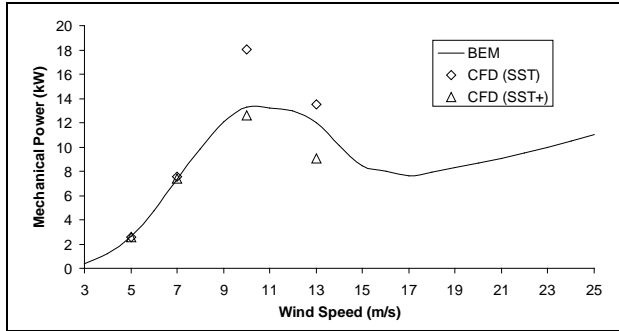
รูปที่ 6 แสดงกำลังงานเชิงทฤษฎี (BEM/SuWiT) ที่ได้จากกังหันใหม่เปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วย CFD สำหรับวิธี CFD แสดงผลลัพธ์ทั้งของวิธี  $k-\omega$  SST และ  $k-\omega$  SST+ ซึ่งเป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ได้เพิ่มฟังก์ชันการหน่วงที่ผนัง [10]

จากรูปเห็นได้ว่าที่ความเร็วลม 5 และ 7 m/s การคำนวณแรงบิดจากวิธี BEM และ CFD สอดคล้องกันดี ทำให้มั่นใจได้ว่ากังหันใหม่จะได้กำลังเป็นไปตามการออกแบบ ที่การคำนวณมีความสอดคล้องกันสูงเพราะเป็นช่วงที่ยังไม่เกิดการไหลแยกจากผิว (separated flow) แต่ที่ความเร็วลมสูงขึ้นจะเกิดการไหลแยกมากขึ้น จึงเห็นได้ว่าผลการคำนวณด้วยวิธี BEM และ CFD มีความแตกต่างกันมากขึ้น แต่ก็ยังให้แนวโน้มที่คล้ายกัน กล่าวคือมีค่าสูงสุดที่ความเร็วลมประมาณ 10 m/s และลดลงที่ความเร็วลมประมาณ 13 m/s

เมื่อพิจารณาเฉพาะผลการคำนวณด้วยวิธี CFD ที่ความเร็วลมสูง เห็นได้ว่าแบบจำลองความปั่นป่วน SST+ คำนวณค่ากำลังได้ต่ำกว่าวิธี SST ซึ่งสามารถสรุปจากการศึกษาทดลองเปรียบเทียบในอดีตของคณะผู้วิจัยได้ว่าแบบจำลอง SST+ มีความถูกต้องมากกว่าเมื่อเทียบกับผลการวัดจริง

ในภาพรวมสำหรับกังหันลม NREL Phase VI ความแม่นยำของ CFD จะค่อนข้างดีจนถึงที่ความเร็วลมประมาณ 10 m/s (ก่อนเกิดการไหลแยก) สำหรับผลการสอบเทียบวิธี BEM กับผลการทดลองกังหันลม NREL Phase VI ในอดีตที่ผ่านมามีความแม่นยำดีมากในช่วงความเร็วลมไม่เกิน 10 m/s เช่นเดียวกัน อีกทั้งให้ผลที่ค่อนข้างดีในช่วงความเร็วลม 10 - 15 m/s ดังนั้นในช่วงก่อน 10 m/s ผลการออกแบบโดย BEM จึงมีความน่าเชื่อถือ

สำหรับที่ความเร็วลมสูงกว่า 10 m/s อาจประเมินได้ว่ากำลังที่ได้จากกังหันลมใหม่มีค่าอยู่ระหว่างที่วิธี BEM และ วิธี CFD แบบ SST+



รูปที่ 6 เปรียบเทียบกำลังเชิงกลของกังหันใหม่จากการคำนวณด้วยวิธี BEM และ CFD

### 5. สรุป

ได้ปรับการออกแบบกังหันลม NREL Phase VI จาก 2 ใบพัดเป็น 3 ใบพัด และใช้ทฤษฎี BEM เป็นพื้นฐานในการออกแบบใหม่ ทำให้ได้ขนาดใบและมุมบิดต่างไปจากเดิม และทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดจาก 38% เป็น 45% มีประสิทธิภาพเกิน 40% ในช่วงความเร็วลม 4-8 m/s และยังมีความเร็วลมประเมิน (rated wind speed) ที่ประมาณ 10 m/s ซึ่งเหมาะกับสภาพลมในประเทศไทย ผลการออกแบบดังกล่าวนี้ได้รับการยืนยันด้วยการคำนวณเชิงตัวเลข (CFD) ที่ได้พัฒนาปรับปรุงมาก่อนหน้านี้จึงมีความแม่นยำสูง ความสอดคล้องกันของผลการออกแบบเชิงทฤษฎีและการคำนวณทำให้การออกแบบมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สนับสนุนโดยโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

### 7. เอกสารอ้างอิง

[1] ชโลธร ธรรมแท้ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2551). 'SuWIT' โปรแกรมเพื่อการออกแบบและประเมินกังหันลม, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4, จังหวัดนครปฐม

[2] ชโลธร ธรรมแท้ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2550). การออกแบบใบกังหันลมให้ดีที่สุดสำหรับประเทศไทยโดยใช้ ทฤษฎีสตรีป, การประชุมวิชาการ

เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3, จังหวัดกรุงเทพ

[3] ชโลธร ธรรมแท้ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, (2551). การเปรียบเทียบแบบจำลองห้วงการป้อนเพื่อการออกแบบและประเมินกังหันลม, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, จังหวัดปทุมธานี

[4] Spera, A.D. (1994). *Wind Turbine Technology : Fundamental Concept of Wind Turbine Engineering*, ASME Press

[5] Eggleston, D.M. (1987). and Stoddard F. S., *Wind Turbine Engineering Design*, Van Nostrand Company

[6] Burton, T. et al. (2001). *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Son

[7] Manwell, J. F., McGowan J.G. and Rogers A.L. (2002). *Wind Energy Explained*, John Wiley & Son

[8] ชโลธร ธรรมแท้ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2549). การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลผ่านกังหันลมแกนนอนที่มีการบิดใบ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, จังหวัดนครราชสีมา

[9] ชโลธร ธรรมแท้ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, (2550). ขนาดโดเมนที่เหมาะสมในการจำลองการไหลผ่านกังหันลมแกนนอน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, จังหวัดชลบุรี

[10] ชโลธร ธรรมแท้ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, (2552). การปรับปรุงแบบจำลอง  $k-\omega$  SST ด้วยฟังก์ชันการหน่วงที่ผนังเพื่อนำมาพยากรณ์กังหันลม, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5, จังหวัดพิษณุโลก

[11] Thumthae C., and Chitsomboon T. (2006). Optimal Pitch for Untwisted Blade Horizontal Axis Wind Turbine, *The 2<sup>nd</sup> Joint*

*International Conference on Sustainable Energy and Environment*, Bangkok, Thailand

[12] Thumthae C., and Chitsomboon T. (2009), Optimal angle of attack for untwisted blade wind turbine, *Renewable Energy*, vol. 43(5), May 2009, pp. 1279-1284., doi:10.1016/j.renene.2008.09.017

[13] Giguere P, Selig MS. (1999). Design of a tapered and twisted blade for the NREL combined experiment rotor. *NREL/SR-500-26173*, NREL, Colorado

[14] Simms, D.A., Hand, M.M., et. al. (2001). Unsteady aerodynamics experiment Phases VI: Wind tunnel test configurations and available data campaigns. *NREL/TP-500-29955*, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, December 2001

[15] Somers, D. M. (1997). "Design and Experimental Results for the S809 Airfoil," Airfoils, Inc., State College, PA, *NREL/SR-440-6918*

[16] 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. Technical Report *NREL/TP-500-25950*, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, July 1999