

การทำนายประสิทธิภาพกังหันลมเสื่อลำแพนด้วยทฤษฎี Blade Element Momentum Prediction of Thai Sail Windmill Performance by a Blade Element Momentum Theory

ธีรวัฒน์ คลับคล้าย¹, ทวีช จิตรสมบุญ^{1,*}

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*E-mail: tawit.boon@gmail.com โทรศัพท์ 044 224410 โทรสาร 044 224413

บทคัดย่อ

ในอดีตกังหันลมเสื่อลำแพนของไทยนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการวิดน้ำเข้านาข้าวและนาเกลือ ปัจจุบันความนิยมได้ลดลงไปมาก เพราะยังมีประสิทธิภาพต่ำและราคาแพง ทำให้ประชาชนส่วนใหญ่หันไปใช้เครื่องสูบน้ำยนต์จากต่างประเทศที่มีประสิทธิภาพดีกว่า ดังนั้นการที่จะทำให้กังหันลมเสื่อลำแพนกลับมาเป็นที่นิยมอีกครั้ง เพื่อลดการนำเข้าเครื่องสูบน้ำยนต์จากต่างประเทศ และพึ่งพาตนเอง จึงจำเป็นต้องวิจัยพัฒนากังหันลมเสื่อลำแพนให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำนายประสิทธิภาพของกังหันลมเสื่อลำแพนโดยใช้ทฤษฎี Blade element momentum (BEM) โดยนำผลที่ได้จากการทำนายเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับการทดลองจะใช้กังหันลมเสื่อลำแพนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร โดยใช้จำนวน 4 ใบ และ 6 ใบ การทดสอบจะใช้ถกกระเบรบรรทุกกังหันวิดด้วยความเร็วคงที่ 5 m/s และ 6 m/s วัดแรงบิดและความเร็วรอบเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพ ผลการทดลองพบว่า กรณีกังหันลมแบบ 4 ใบ แบบจำลอง BEM-SUT 2 ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองในแง่ของค่าประสิทธิภาพสูงสุด ตำแหน่งประสิทธิภาพสูงสุด และช่วง Tip speed ratio ส่วนกรณีกังหันลมแบบ 6 ใบ แบบจำลอง BEM-SUT 2+ ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองในแง่ของค่าประสิทธิภาพสูงสุด ตำแหน่งประสิทธิภาพสูงสุด แต่ช่วงของ Tip speed ratio ยังมีความแม่นยำไม่มากนัก

คำหลัก: กังหันลมเสื่อลำแพน, ทฤษฎี BEM, การทำนายประสิทธิภาพกังหันลมเสื่อลำแพน

Abstract

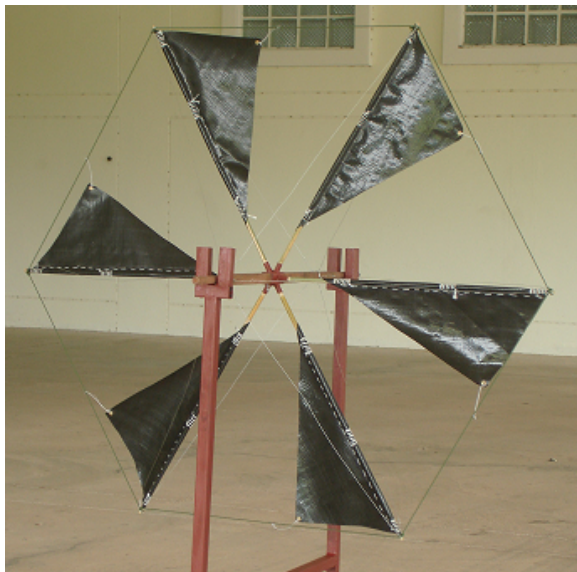
In the past, Thai sail windmill was widely used to pump water to the rice and salt farm. Currently, it is not very popular because it has been still low efficiency and very expensive for first cost. So, Thai agriculturist makes switch to use the pump from abroad that is more efficiency. Therefore, Thai sail windmill will be got more popular again so that Thai people will less import pump from abroad, be able to depend oneself, the research is needful to do for efficiency enhancement. This article is intended to predict the efficiency of Thai sail windmill by blade element momentum theory (BEM). The prediction results will be compared with the experiment results. For experiment, the 1 meter rotor used a number of 4 and 6 blades is installed on the pickup trucks. The pickup trucks would be moved at constant speed 5 m/s and 6 m/s. Then, the torque and angular velocity would be measured in order to calculate the efficiency. Results, 4 blades case, BEM-SUT 2 model yield prediction nearly with the experiment results in the meaning of magnitude of C_p maximum, position of C_p maximum and length of tip speed ratio. 6 blades case, BEM-SUT 2+ model yield prediction nearly with the experiment results in the meaning of magnitude of C_p maximum, position of C_p maximum but the length of tip speed ratio is not very accurate as expected.

Keywords: Thai sail windmill, BEM Theory, Thai sail windmill efficiency prediction.

CST-43

1. บทนำ

การทำนายประสิทธิภาพกังหันลมเสื้อลำแพนด้วยทฤษฎี Blade element momentum (BEM) จะมีลักษณะเดียวกันกับกังหันลมสมัยใหม่ที่มีใบเป็นลักษณะ Solid airfoil แต่จะซับซ้อนกว่าในเรื่องของใบกังหันลมเพราะมีความยืดหยุ่น ทำให้มุมพิทช์ ความโค้งของใบ ไม่คงที่เมื่อความเร็วลม หรือความดันใบ (Solidity) เปลี่ยนไป ทำให้ค่า C_l และ C_d เป็นฟังก์ชันของรัศมีของโรเตอร์ด้วย นอกจาก มุมปะทะ และเรโนลด์นัมเบอร์ บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำนายประสิทธิภาพของกังหันลมเสื้อลำแพนโดยใช้ทฤษฎี BEM โดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลอง สำหรับการทดลองจะใช้กังหันลมเสื้อลำแพนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ดังรูปที่ 1 โดยใช้จำนวนใบ 4 ใบ และ 6 ใบ โดยใช้รถกระบะบรรทุกกังหันวิ่งด้วยความเร็วคงที่ 5 m/s และ 6 m/s วัดแรงบิดและความเร็วรอบเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพ [1]



รูปที่ 1 กังหันลมเสื้อลำแพนขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร

2. ทฤษฎี Blade element momentum (BEM)

ทฤษฎี BEM [2] เป็นทฤษฎีที่มาจากการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นบนใบกังหันจาก 2 ทฤษฎีร่วมกันคือ ทฤษฎีโมเมนตัม และทฤษฎี Blade element ซึ่งจะกล่าวโดยย่อดังนี้

ทฤษฎีโมเมนตัม (Momentum theory)

จากการวิเคราะห์สมการอนุรักษ์โมเมนตัมโดยพิจารณาเป็นวงแหวนซึ่งมีความหนา dr จะได้สมการแรงตามแนวแกนและแรงบิดตามลำดับดังนี้

$$dT = \rho U_0 4a(1-a)\pi r dr \quad (2.1)$$

$$dQ = \rho U_0 4a'(1-a)\pi r^3 \Omega dr \quad (2.2)$$

ทฤษฎี Blade element (Blade element theory)

เป็นการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นบนใบกังหันใน 2 มิติในแต่ละ Element ที่ถูกแบ่งตามความยาว แล้วคำนวณแรงทั้งหมดโดยการอินทิเกรตทุก Element ของใบ

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{U_0(1-a)}{\Omega r(1+a')} \right] \quad (2.3)$$

$$\alpha = \phi - \beta \quad (2.4)$$

$$dF_N = \sigma' \rho U_{rel}^2 \pi r [C_l \cos \phi + C_d \sin \phi] dr \quad (2.5)$$

$$dQ = \sigma' \rho U_{rel}^2 \pi r^2 [C_l \sin \phi - C_d \cos \phi] dr \quad (2.6)$$

$$\text{ซึ่ง } \sigma' = \frac{Bc}{2\pi r} \text{ เรียกว่า ความดันใบ (Solidity)}$$

ทฤษฎี Blade element momentum (BEM)

$$a = \frac{1}{1 + \frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma' C_n}} \quad (2.7)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma' C_t} - 1} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \text{ซึ่ง } C_n &= C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \\ C_t &= C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \end{aligned}$$

สำหรับค่าประสิทธิภาพหรือสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ของกังหันลมสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (2.9)

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{H}{0.5 \rho \pi R^2 U_0^3} \int_0^R \Omega dQ \quad (2.9)$$

กระบวนการหาคำตอบ

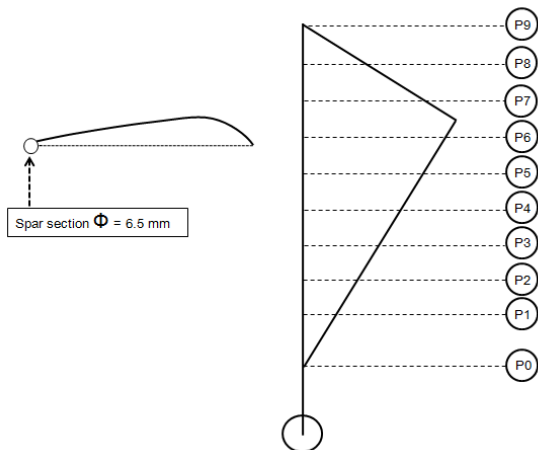
การหาคำตอบของทฤษฎี BEM สามารถทำได้โดยการทำซ้ำ (Iteration) ทั้งนี้จะต้องทราบค่า r , c , β , U_1 , C_l และ C_d ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ α โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เดาค่า a และ a'
2. คำนวณมุมลมสัมพันธ์ (ϕ) จากสมการ (2.3)
3. คำนวณมุมปะทะ (α) จากสมการ (2.4)
4. คำนวณหาค่า C_l และ C_d ได้จากรูปที่ 3 ถึงรูปที่ 7
5. ปรับค่า a และ a' ใหม่ จากสมการ (2.7) และ (2.8)

CST-43

3. กังหันเสือลมลำแพน

ใบของกังหันลมเสือลำแพนจะทำการแบ่งเป็น 10 ตำแหน่ง (P0-P9) เพื่อทำการวัดค่า รัศมี (r) คอร์ด (c) มุมพิท (β) และระดับความโค้ง (Curvature) ที่รัศมีต่างๆ ดังในตารางที่ 1 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณ โดยที่ระดับความโค้งนั้นจะนำไปคำนวณหา C_l และ C_d ตามหลักการอากาศพลศาสตร์ (CFD) ดังรูปที่ 3-7

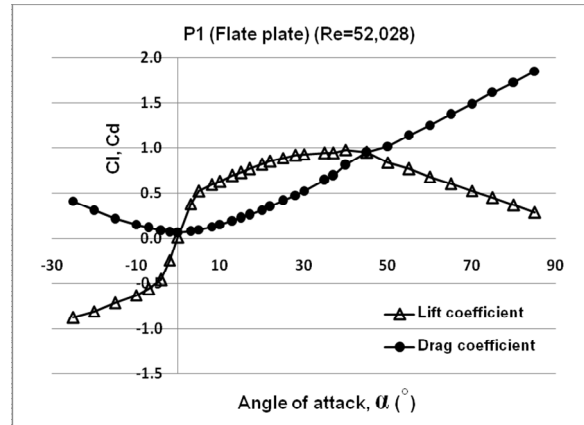


รูปที่ 2 ตำแหน่งของการวัดข้อมูลรัศมีต่างๆ
ของใบกังหันลมเสือลำแพน

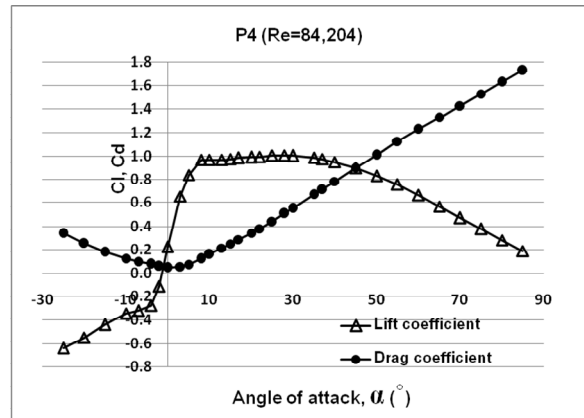
ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ได้จากการวัดที่ตำแหน่งรัศมีต่างๆ
ของใบกังหันลมเสือลำแพน

Position	r (m)	c (m)	β (deg)	Curvature of blade
P0	0.115	0.000	0	N/A
P1	0.195	0.049	45	P1
P2	0.235	0.074	40	P1
P3	0.275	0.099	41	P1
P4	0.315	0.123	40	P4
P5	0.355	0.148	26	P5
P6	0.395	0.173	21	P6
P7	0.435	0.130	23	P7
P8	0.475	0.065	34	P1
P9	0.515	0.000	0	N/A

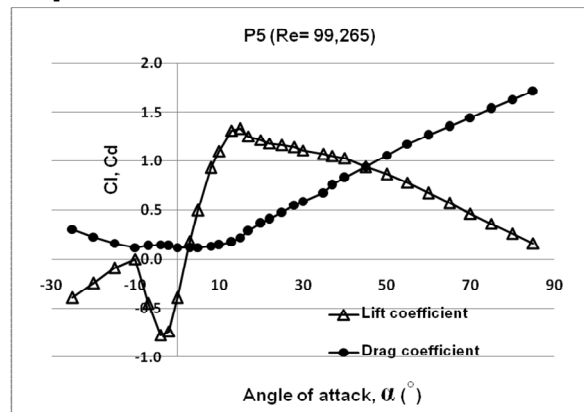
จากตารางที่ 1 จะเห็นว่า ที่ตำแหน่ง P2, P3, และ P8 จะใช้ลักษณะความโค้งของใบแบบเดียวกับตำแหน่ง P1 เพราะว่าที่ตำแหน่งดังกล่าวอยู่ใกล้โคนและปลายใบ ซึ่งมีระยะคอร์ดสั้นทำให้ลักษณะใบใกล้เคียง Flat plate



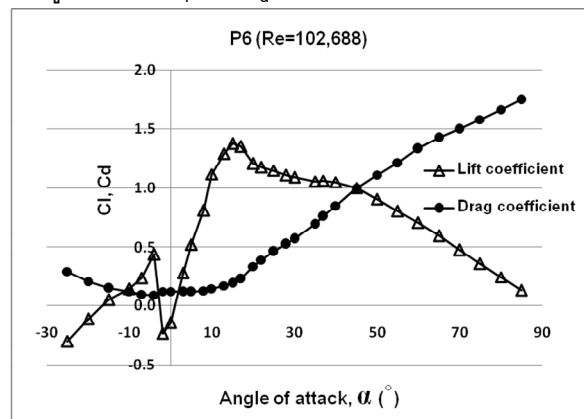
รูปที่ 3 ค่า C_l และ C_d ของใบกังหันที่ตำแหน่ง P1



รูปที่ 4 ค่า C_l และ C_d ของใบกังหันที่ตำแหน่ง P4

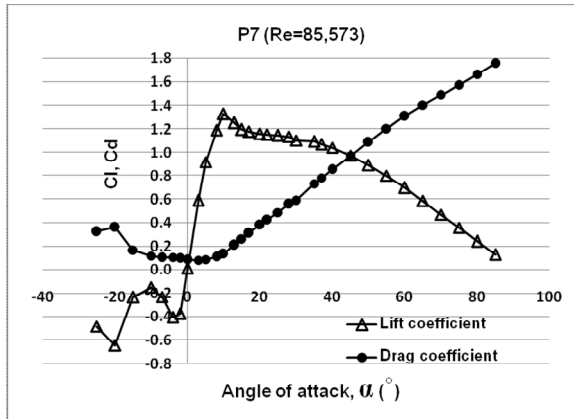


รูปที่ 5 ค่า C_l และ C_d ของใบกังหันที่ตำแหน่ง P5

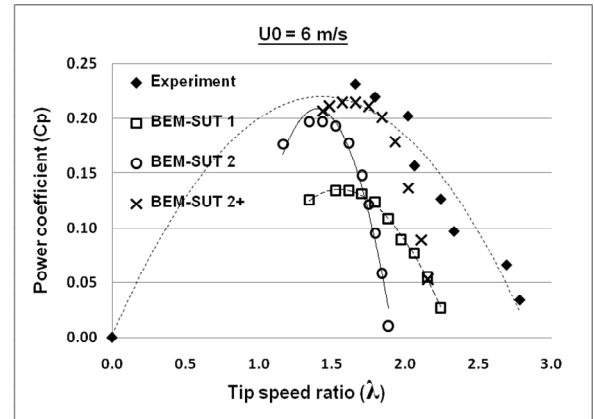


รูปที่ 6 ค่า C_l และ C_d ของใบกังหันที่ตำแหน่ง P6

CST-43



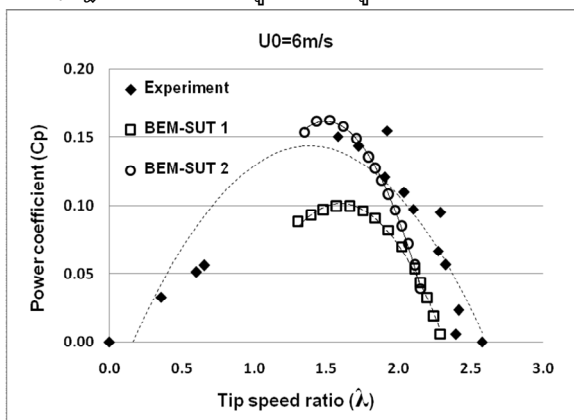
รูปที่ 7 ค่า C_l และ C_d ของใบกังหันที่ตำแหน่ง P7



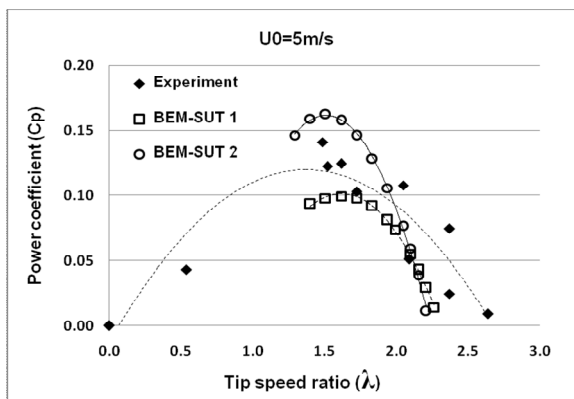
รูปที่ 10 ผลการคำนวณโดย BEM แบบ 6 ใบ ที่ $U_0=6$ m/s

4. ผลการการคำนวณ

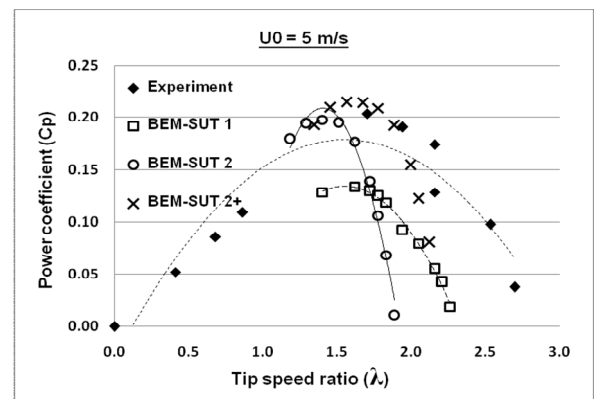
แบบจำลอง BEM ที่สร้างขึ้น แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ BEM-SUT 1 สร้างโดยสมมุติฐานว่าขณะที่กังหันลมหมุน ใบกังหันลมยังคงมีความเป็น Flat plate อยู่ตลอดทั้งใบ และ BEM-SUT 2 สร้างโดยใช้ความโค้งของใบจากการวัดจริงขณะที่กังหันได้รับลมซึ่งมีความโค้งที่ไม่เหมือนกันในแต่ละรัศมี จากผลการทดลองและผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี BEM ได้ผลดังรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 11



รูปที่ 8 ผลการคำนวณโดย BEM แบบ 4 ใบ ที่ $U_0=6$ m/s



รูปที่ 9 ผลการคำนวณโดย BEM แบบ 4 ใบ ที่ $U_0=5$ m/s



รูปที่ 11 ผลการคำนวณโดย BEM แบบ 6 ใบ ที่ $U_0=5$ m/s

5. วิเคราะห์ผล

กรณีกังหันลมแบบ 4 ใบ แบบจำลอง BEM-SUT 2 ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองในแง่ของค่าประสิทธิภาพสูงสุด ตำแหน่งประสิทธิภาพสูงสุด และช่วง Tip speed ratio ในขณะที่แบบจำลอง BEM-SUT 1 ให้ผลคือประสิทธิภาพ (C_p) ต่ำกว่าผลการทดลองประมาณ 5 % แต่ตำแหน่งประสิทธิภาพสูงสุดใกล้เคียงกับผลการทดลอง อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าความเหมือนของเส้นกราฟ (Trend) ของแบบจำลอง BEM-SUT 1 มีแนวโน้มที่ดีกว่าแบบจำลอง BEM-SUT 2

กรณีกังหันลมแบบ 6 ใบ แบบจำลอง BEM-SUT 2 ให้ผลที่ห่างจากผลการทดลองมากพอควรโดยเฉพาะช่วง Tip speed ratio ทั้งนี้เป็นเพราะว่ามุมพิทช์ ของกังหันลมจำนวน 6 ใบ ควรจะมีค่าน้อยกว่ากังหันลมจำนวน 4 ใบ เพราะความตันใบ (Solidity) ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วลมที่เข้าสู่กังหันลม $U_0(1-a)$ มีค่าน้อยลงเนื่องมาจาก Wake ที่เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วลมลดลง ส่งผลให้มุมพิทช์ของใบกังหันลดลงนั่นเอง จากข้อสมมุติฐานนี้ จึงทำการ

CST-43

ทดสอบปรับมุมพิทช์ลดลงโดยสุ่ม 5 องศาจากค่าในตารางที่ 1 และให้ชื่อว่า BEM-SUT 2+ จะเห็นว่าให้ผลที่ดีขึ้นกว่าแบบจำลอง BEM-SUT 2 ซึ่งใช้มุมพิทช์เดิม แต่ว่าช่วงของ Tip speed ratio ยังคงห่างจากผลการทดลองพอควร เป็นเพราะว่า ความเร็วลมที่ลดลงนั้นส่งผลต่อลักษณะความโค้งของใบกังหันลดลงด้วย ซึ่งส่งผลให้ค่า C_l และ C_d ของใบกังหันลมเปลี่ยนแปลงไป หากพิจารณาแบบจำลอง BEM-SUT 1 ซึ่งใบมีความโค้งน้อย (Flat plate ตลอดใบ) ให้ผลของเส้นแนวโน้มของกราฟที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังนั้นแบบจำลอง BEM-SUT 2+ ถ้าหากพิจารณาผลของความโค้งใบกังหันที่ลดลงจะสามารถทำให้ได้ผลที่ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น หากเราสามารถทำนายประสิทธิภาพกังหันลมให้มีความแม่นยำได้ จะนำไปสู่การออกแบบกังหันลมที่ทำให้ได้พลังงานสูงสุดต่อปีของแต่ละพื้นที่ได้

6. สรุป

กรณีกังหันลมแบบ 4 ใบ แบบจำลอง BEM-SUT 2 ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองในแง่ของค่าประสิทธิภาพสูงสุด ตำแหน่งประสิทธิภาพสูงสุด และช่วง Tip speed ratio ส่วนกรณีกังหันลมแบบ 6 ใบ แบบจำลอง BEM-SUT 2+ ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองในแง่ของค่าประสิทธิภาพสูงสุด ตำแหน่งประสิทธิภาพสูงสุด แต่ช่วงของ Tip speed ratio ยังมีความแม่นยำไม่มากนัก

7. คำอธิบายสัญลักษณ์

ρ	ความหนาแน่นอากาศ (kg / m^3)
Ω	ความเร็วรอบ (rad / s)
α	มุมปะทะ ($^\circ$)
β	มุมพิทช์, Pitch angle ($^\circ$)
ϕ	มุมลมสัมพันธ์ ($^\circ$)
σ'	ความตันใบ (Solidity)
a	สัมประสิทธิ์เหนี่ยวนำเชิงแกน
a'	สัมประสิทธิ์เหนี่ยวนำเชิงมุม
c	ความยาว Chord (m)
dQ	แรงบิด ณ Element ใดๆ (N.m)
dT	แรงตามแนวแกน ณ Element ใดๆ (N)
r	รัศมีกังหัน ณ จุดใดๆ (m)
R	รัศมีกังหัน ณ จุดปลายใบ (m)

B	จำนวนใบ (ใบ)
H	ระยะ Hub (m)
dF_n	แรงตามแนวแกน ณ Element ใดๆ (N)
C_l	สัมประสิทธิ์แรงยก
C_d	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
P_{in}	กำลังงานจากลมที่ได้รับ (W)
P_{out}	กำลังงานจากกังหันลม (W)
U_0	ความเร็วลม Free stream (m/s)
U_{rel}	ความเร็วลมสัมพันธ์ (m/s)
BEM	Blade element momentum

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mark, D. M., Optimization and Characteristics of a Sailwing Windmill Rotor, 1976
- [2] Manwell, J. F., McGowan J.G. and Rogers A.L., "Wind Energy Explained", John Wiley & Son, 2002
- [3] Jonkman, J. M., "Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST_AD", NREL/TP 34755, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2003
- [4] Tangler, J.L. and Kocurek, J.D., "Wind Turbine PostStall Airfoil Performance Characteristics Guidelines for BladeElement Momentum Methods", NREL/CP36900, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2004.
- [5] Simms, D.A., Hand, M. M., et. al., "Unsteady aerodynamics experiment Phases VI: Wind tunnel test configurations and available data campaigns", NREL/TP29955, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2001.
- [6] Dekker Th.A.H., Performance characteristics of some sail and steel-bladed windrotors, 1977
- [7] Proceedings of the meeting of the expert working group on the use of solar and wind energy., Energy resources development series No. 16, The design and construction of low-cost wind-powered water pumping systems, 1976
- [8] Mukhia P., Performance and aerodynamic analysis of the Thai four bladed wooden rotor coupled to a ladder pump, 1981