ทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัมเพื่อการประเมินประสิทธิภาพกังหันลมเสื่อลำแพน

ธีรวัฒน์ คลับคล้าย[1*] วิกันดา ศรีเดช[2] และทวิช จิตรสมบูรณ์[3]

บทคัดย่อ

กังหันลมเสื่อลำแพนเป็นเครื่องจักรกลท้องถิ่นของประเทศไทย ปัจจุบันใช้ในการสูบน้ำเข้านาเกลือ เป็นกังหันลมแกนนอนที่มีลักษณะใบเป็นรูปสามเหลี่ยมทำจากผ้าใบ กังหันลมเสื่อลำแพนแบบดั้งเดิมจะมีประสิทธิภาพประมาณ 10-17% แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาจนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้สูงขึ้นถึง 30-35% ดังนั้นจากต้นทุนการสร้างที่ค่อนข้างต่ำ โครงสร้างเรียบง่าย และประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ทำให้กังหันลมเสื่อลำแพนมีความน่าสนใจต่อการทำวิจัยมากขึ้น อนึ่งงานวิจัยประเภทการจำลอง (Simulation) ก็นับเป็นหัวข้อหนึ่งที่มีความสำคัญ เพราะว่าการจำลองที่แม่นยำจะนำไปสู่การประเมินค่าแรงบิด กำลัง และประสิทธิภาพในสภาวะอื่น ๆ ได้อย่างถูกต้องโดยไม่ต้องพึ่งการทดลอง ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการออกแบบใบกังหันลม วัตถุประสงค์ของบทความนี้คือ สร้างแบบจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนโดยใช้พื้นฐานทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัม เพื่อประเมินประสิทธิภาพและสอบเทียบกับผลการทดลอง การประเมินประสิทธิภาพจะพิจารณาที่มุมพิตช์ปลายใบ 4 ลักษณะ คือ 5, 10, 15 และ 20 องศา ผลลัพธ์ที่ได้คือ ประสิทธิภาพกังหันลมเสื่อลำแพนที่ประเมินด้วยแบบจำลองมีความแม่นยำที่มุมพิตช์ปลายใบเท่ากับ 10, 15 และ 20 องศา ในช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบ 2.0-3.5 โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 7.0%

คำสำคัญ : ทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัม, การจำลองกังหันลมเสื่อลำแพน, ประสิทธิภาพกังหันลม, การสอบเทียบ

[1*] ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
[2] ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก (CTAE) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
[3] นักวิจัยอิสระ
[*] ผู้ติดต่อ, อีเมล์: teerawat.k@cit.kmutnb.ac.th, รับเมื่อ 5 สิงหาคม 2562 ตอบรับ 5 ตุลาคม 2562

Blade Element Momentum Theory for Estimating Efficiency of Thai Sail Windmill

Teerawat Klabklay[1*], Wikanda Sridech[2] and Tawit Chitsomboon[3]

Abstract

Thai sail windmill (TSW) is a local machine of Thailand now using for pumping brine to the salt farms. TSW is a horizontal axis wind turbine that the blade is a triangular shape made of canvas. Traditional TSW efficiency is typically about 10-17%. However, it has been now developed and augmented its efficiency until 30-35%. Therefore, due to a low construction cost, an uncomplicated structure and a higher efficiency, these things encourage TSW more interesting for research. By the way, the wind turbine simulation is one significant research topic because the accurate simulation can bring about the evaluation of torque, power and efficiency correctly in another condition without the experiment. So, the simulation is very helpful to design the blade of the wind turbine. The purpose of this article is to perform the TSW simulation based on the blade element momentum theory to appraise the efficiency and to validate results with the experiment data. The efficiency evaluation would be regarded by 4 manners of the tip pitch angle as follows: 5, 10, 15 and 20 degrees. The results show that the TSW efficiencies estimated by the simulation are accurate at the tip pitch angle of 10, 15 and 20 degrees in the range of tip speed ratio of 2.0-3.5 whose average percentage error is about 7.0%.

Keywords : Blade Element Momentum Theory, Thai Sail Windmill Simulation, Wind Turbine Efficiency, Validation

[1*]Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

[2]Research Centre for Combustion and Alternative Energy (CTAE), Science and Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

[3]Independent Researchers, tawit.boon@gmail.com

[*] Corresponding, E-mail: teerawat.k@cit.kmutnb.ac.th, Received: 5 August 2019, Accepted: 5 October 2019

1. บทนำ

กังหันลมเสื่อลำแพนเป็นกังหันลมดั้งเดิมของไทยที่ใช้งานกันมาอย่างยาวนานนับ 100 ปี อดีตใช้สูบน้ำเข้านาข้าวและนาเกลือ ปัจจุบันใช้เพียงนาเกลือเท่านั้น เป็นกังหันลมแกนนอนชนิดขับเคลื่อนด้วยแรงยก (Lift Type) ใบกังหันมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม มีจำนวนใบ 6-8 ใบ [1] ดังรูปที่ 1.1 ลักษณะเด่นคือความเร็วรอบต่ำแต่แรงบิดสูง แต่เดิมมีประสิทธิภาพประมาณ 10-17% [2] ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพได้สูงขึ้น 30-35% มีระบบ Passive Yaw Control เพื่อทำให้สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง [3] ดังนั้นจากประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ประกอบกับความเรียบง่ายของโครงสร้าง และต้นทุนก่อสร้างต่ำ จึงทำให้กังหันลมเสื่อลำแพนมีความน่าสนใจต่อการทำวิจัยมากขึ้น

งานวิจัยด้านการจำลองกังหันลม (Simulation) เพื่อการประเมินประสิทธิภาพเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีความสำคัญ เพราะจะทำให้ลดต้นทุนในการทดลองได้มาก เนื่องจากไม่จำเป็นต้องทดลองกังหันลมในทุกสภาพการณ์ แต่จะใช้การจำลองช่วยประเมินแทน ปัจจุบันวิธีการจำลองกังหันลมที่เป็นที่นิยมมี 2 วิธี คือ 1) พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) [4] 2) ทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัม (Blade Element Momentum Theory, BEM Theory) หรือทฤษฎีสตริป (Strip Theory) [5, 6]

ธีรวัฒน์ และ ทวิช [7] ได้ทำการจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนโดยยังไม่ได้พิจารณาถึงผลของการสูญเสียปลายใบ (Tip Loss) และโคนใบ (Hub Loss) และไม่ได้พิจารณาปรับค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกน หรือ Brake State Model [8] ให้มีความเหมาะสม ทำให้ผลลัพธ์การจำลองยังมีความคลาดเคลื่อนสูง วัตถุประสงค์บทความนี้คือสร้างแบบจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนโดยใช้ทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัม พร้อมกับปรับค่าการสูญเสียปลายใบและโคนใบ รวมถึงปรับค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกน เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำลองมากขึ้น โดยจะสอบเทียบกับผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความแม่นยำ

รูปที่ 1 กังหันลมเสื่อลำแพน [3]

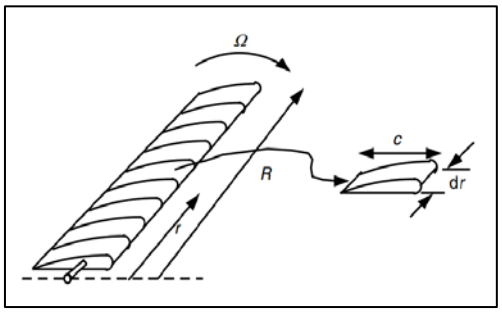
2. ทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัม

ทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัม (หรือทฤษฎีเบ็ม) มีอีกชื่อหนึ่งว่าทฤษฎีสตริป [9] ทฤษฎีนี้ประกอบด้วย 2 ทฤษฎีร่วมกันคือ 1) ทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์ (Blade Element Theory, BET) 2) ทฤษฎีโมเมนตัม (Momentum Theory, MT) ทั้ง 2 ทฤษฎีนี้จะถูกเชื่อมโยงความสัมพันธ์กันด้วยค่าของแรงบิด (Torque) และแรงในแนวแกน (Thrust) แล้วจัดรูปเป็นสมการใหม่ที่ช่วยนำไปสู่การแก้ระบบสมการเพื่อหาค่าของแรงบิดและแรงในแนวแกนของกังหันลมได้ง่าย

2.1 ทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์

คือการแบ่งใบกังหันลมออกเป็นเอลิเมนท์ย่อยจำนวนหลายๆเอลิเมนท์ ดังรูปที่ 2 คำนวณแรงยก (Lift) และแรงต้าน (Drag) ที่เกิดขึ้นตามมุมปะทะ

(Angle of Attack, α) แล้วแตกแรงไปเป็นแรงบิดและแรงในแนวแกนดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเกิดขึ้นในทุกเอลิเมนท์ เมื่อทำการอินทิเกรทตลอดความยาวใบ จะทำให้ได้แรงบิดและแรงในแนวแกนสุทธิของใบกังหันลม 1 ใบ



รูปที่ 2 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนท์ [9]

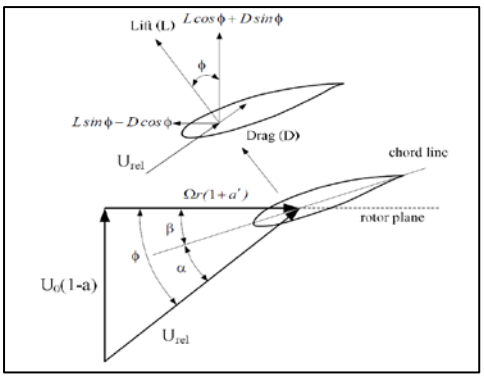
จากการแตกแรงยกและแรงต้านไปเป็นแรงบิดและแรงในแนวแกนดังรูปที่ 2.2 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

2.1.1 มุมความเร็วลมสัมพัทธ์ (ϕ) ที่รัศมี (r) [9]

$$\phi = tan^{-1}\left[\frac{U_0(1-a)}{\Omega r(1+a')}\right] \quad (2.1)$$

2.1.2 มุมปะทะ (α) ที่รัศมี (r) [9]

$$\alpha = \phi - \beta_r \quad (2.2)$$



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงการแตกแรง [10]

แรงบิดย่อย (dQ) และแรงในแนวแกนย่อย (dT) ในแต่ละเอลิเมนท์จะเป็นไปตามสมการที่ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ [9]

$$dQ = \sigma'\rho U_{rel}^2 \pi r^2 \left[C_L \sin\phi - C_D \cos\phi\right] dr \quad (2.3)$$

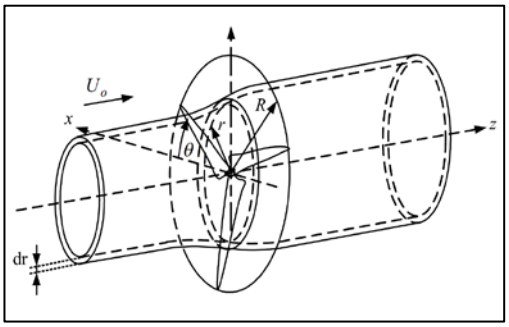
$$dT = \sigma'\rho U_{rel}^2 \pi r \left[C_L \cos\phi + C_D \sin\phi\right] dr \quad (2.4)$$

$$\sigma' = \frac{Nc}{2\pi r} \quad (2.5)$$

ซึ่ง σ' เรียกว่า ความตันใบ (Solidity)

2.2 ทฤษฎีโมเมนตัม

ใช้เพื่อคำนวณหาแรงบิดย่อย (dQ) และแรงในแนวแกนย่อย (dT) เช่นเดียวกัน แต่คำนวณผ่านสมการโมเมนตัมเชิงมุมและโมเมนตัมเชิงเส้น ตามลำดับ โดยพิจารณาการไหล 1 มิติ ผ่าน Actuator Disc แบบวงแหวน (Annular Actuator Disc) [9] ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 Annular Actuator Disc [10]

ดังนั้นแรงบิดย่อย (dQ) และแรงในแนวแกนย่อย (dT) ในแต่ละเอลิเมนท์จะเป็นไปตามสมการที่ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ [9]

$$dQ = 4a'(1-a)\rho U_0^2 \pi r^3 \Omega dr \quad (2.6)$$

$$dT = 4a(1-a)\rho U_0^2 \pi r dr \quad (2.7)$$

2.3 ทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัม

จากสมการที่ 2.3 และ 2.6 เมื่อเชื่อมความสัมพันธ์โดยการกำจัดพจน์ dQ จะได้สมการ (2.8) [9]

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

โดยที่ $C_t = C_L \sin\phi - C_D \cos\phi$ (2.9)

จากสมการที่ 2.4 และ 2.7 เมื่อเชื่อมความสัมพันธ์โดยกำจัดพจน์พจน์ dT จะได้สมการ (2.10) [9]

$$a = \frac{1}{1 + \frac{4\sin^2\phi}{\sigma' C_n}} \quad (2.10)$$

โดยที่ $C_n = C_L \cos\phi + C_D \sin\phi$ (2.11)

2.4 การปรับปรุงทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัม

แบบจำลองจะต้องทำการปรับปรุงปัจจัยอื่นเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความสมจริงมากขึ้น ประกอบด้วย ผลของการสูญสียปลายใบ (F_T) และโคนใบ (F_H) รวมกันเป็นการสูญเสียรวม (F) ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองของ Prandtl [11] ดังสมการ (2.12) รวมถึงเพิ่มการปรับแก้ค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกน (Brake State Model) โดยใช้แบบจำลองของ Buhl [12] ดังสมการ (2.13)

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

$$F_H = \frac{2}{\pi}\cos^{-1}\left(\exp\left[-\frac{N(r-R_H)}{2r\sin\phi}\right]\right)$$

$$F = F_T \cdot F_H \quad (2.12)$$

การปรับปรุงค่าปัจจัยการเหนี่ยวนำเชิงแกน (Axial Induction Factor, a) ของ Buhl คือเมื่อ $a > 0.4$ ค่า a จะถูกปรับค่าให้เป็นไปตามสมการที่ (2.13) [12]

$$a = \frac{18F - 20 - 3\sqrt{C_T(50-36F) + 12F(3F-4)}}{36F-50} \quad (2.13)$$

การปรับปรุงแบบจำลองจะทำให้สมการ (2.8) และสมการ (2.10) เปลี่ยนเป็นสมการ (2.14) และ (2.15) [9]

$$a' = \frac{1}{\frac{4F\sin\phi\cos\phi}{\sigma' C_t} - 1} \quad (2.14)$$

$$a = \frac{1}{1 + \frac{4F\sin^2\phi}{\sigma' C_n}} \quad (2.15)$$

2.5 ขั้นตอนการแก้สมการ

ใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (Iteration) จนกระทั่งคำตอบลู่เข้าสู่คำตอบ (Converge) โดยทำตามขั้นตอนดังนี้ [9]

1. เดาค่า a และ a'
2. คำนวณมุมลมสัมพัทธ์ (ϕ) จากสมการ (2.1)
3. คำนวณมุมปะทะ (α) จากสมการ (2.2)
4. นำค่า α ที่ได้ไปประมาณค่า C_L และ C_D จากกราฟโดยใช้ข้อมูลงานวิจัยของ ธีรวัฒน์ และ ทวิช [7]
5. คำนวณหาค่า C_t และ C_n จากสมการ (2.9) และ (2.11) ตามลำดับ
6. คำนวณหาค่า a' และ a ค่าใหม่ จากสมการ (2.14) และ (2.15) ตามลำดับ
7. คำนวณซ้ำในขั้นตอนที่ 2. โดยนำค่า a' และ a ค่าใหม่ไปหาค่า ϕ และ α เพื่อหา C_L และ C_D อีกครั้ง
8. คำนวณ C_t C_n a' และ a อีกครั้ง แล้วคำนวณซ้ำจนกระทั่ง a' a ϕ และ α ลู่เข้าสู่คำตอบ

2.6 ประสิทธิภาพกังหันลม

ประสิทธิภาพกังหันลมเป็นประสิทธิภาพเชิงพลังงาน หมายถึงค่าสัมประสิทธิ์กำลังกังหันลม (C_P) คูณด้วย 100% ดังสมการ (2.16) [13]

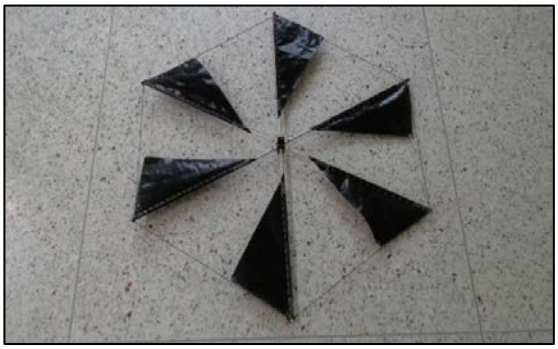
$$C_P = \frac{P_T}{P_W} = \frac{\int_H^R \Omega dQ}{0.5\rho\pi R^2 U_0^3} \qquad (2.16)$$

สัมประสิทธิ์กำลังกังหันลมมักจะนำเสนอในรูปแบบของกราฟโดยจะเทียบกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio, λ) [13] ดังที่แสดงในรูปที่ 5.1-5.4

$$\lambda = \frac{\Omega r}{U_0} \qquad (2.17)$$

3. ขอบเขตการศึกษา

3.1) จำลองกังหันลมเสื่อลำแพนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 5 โรเตอร์กังหันลมเสื่อลำแพนขนาด 1.0 เมตร

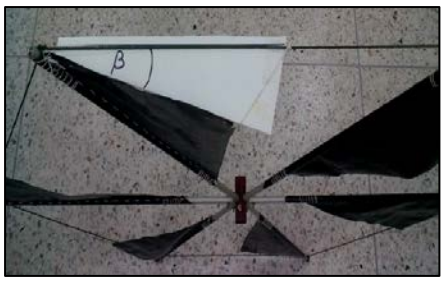
3.2) จำลองที่มุมพิตช์ปลายใบ 4 ลักษณะคือ 5, 10, 15 และ 20 องศา

3.3) ใช้ใบกังหันลมจำนวน 6 ใบ โดยมีค่าความตันใบ (Solidity) ของโรเตอร์เท่ากับ 28%

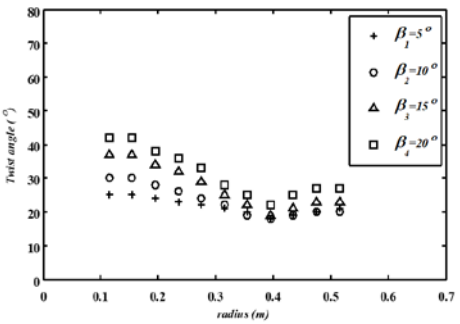
3.4) ศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมด้วยเรโนลด์นัมเบอร์ในช่วง 68,000-160,000

4. ข้อมูลใบกังหันลมเสื่อลำแพน

การจำลองกังหันลมจะทดลองบิดใบใน 4 ลักษณะด้วยการจัดมุมพิตช์ปลายใบ (β) ดังรูปที่ 6 กล่าวคือ 5, 10, 15 และ 20 องศา มุมพิตช์ปลายใบทั้ง 4 ค่านี้จะส่งผลต่อการทำให้เกิดมุมบิด (Twist Angle) ตลอดรัศมีของใบกังหันลมดังรูปที่ 7 มุมบิดดังกล่าวนี้ก็คือมุมพิตช์เพียงแต่เป็นมุมพิตช์ในแต่ละรัศมีซึ่งมีค่าไม่เท่ากันตลอดแนวใบ ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลใบกังหันลมเสื่อลำแพน หมายถึง ความยาวคอร์ด (c) และมุมพิตช์ในแต่ละรัศมี (β_r) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ประกอบการคำนวณ เช่น สมการที่ (2.2) และ (2.5) เป็นต้น



รูปที่ 6 มุมพิตช์ปลายใบ



รูปที่ **7** ลักษณะการบิดใบจากการจัดมุมพิตช์ปลายใบ 4 ลักษณะ [7]

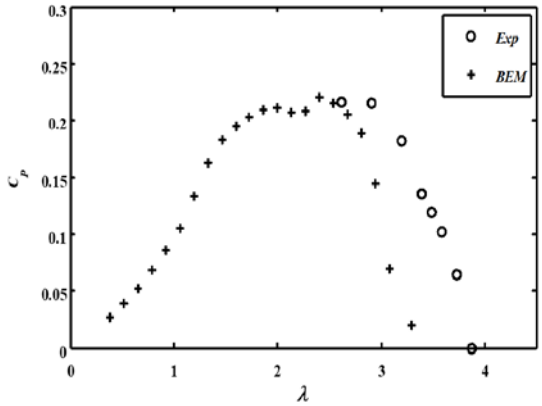
ตารางที่ **1** ข้อมูลใบกังหันลมเสื่อลำแพน

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

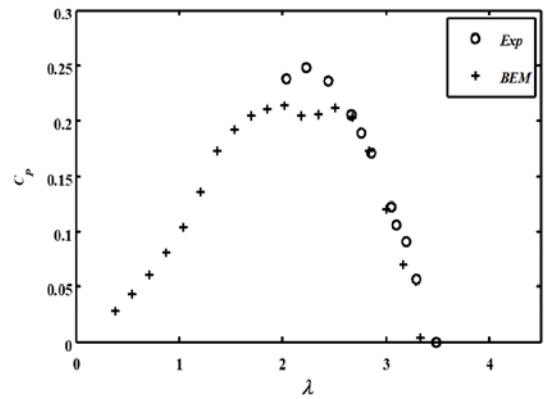
5. ผลการจำลอง

จากทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัมดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 2 สรุปได้ว่า มี 4 สมการสำคัญที่จะต้องใช้ในการแก้ระบบสมการเพื่อหาคำตอบของประสิทธิภาพกังหันลม ประกอบด้วย สมการที่ (2.1), (2.2), (2.14) และ (2.15) รวมถึงข้อมูลใบกังหันลมเสื่อลำแพนที่แสดงในตารางที่ 1 เพื่อใช้เป็นตัวแปรควบคุมประกอบการคำนวณซึ่งเป็นค่าคงที่ นั่นคือความยาวคอร์ด (c) และมุมพิตช์ในแต่ละรัศมี (β_r) ซึ่งมีค่าไม่เท่ากันตลอดแนวใบกังหันลม การแก้ระบบสมการจะใช้วิธีการคำนวณซ้ำดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.5 โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมช่วยในการเขียนโปรแกรมเพื่อแก้ระบบสมการ โดยผลการจำลองแสดงอยู่ในรูปของกราฟสัมประสิทธิ์กำลังและอัตราส่วนความเร็วปลายใบ อนึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองกังหันลมเสื่อลำแพนที่มุมพิตช์ปลายใบ 4 ลักษณะคือ 5, 10, 15 และ 20 องศา (ซึ่งมาจากการสุ่ม) เพื่อศึกษาว่ามุมพิตช์ปลายใบขนาดเท่าใดจะมีแนวโน้มให้สัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด

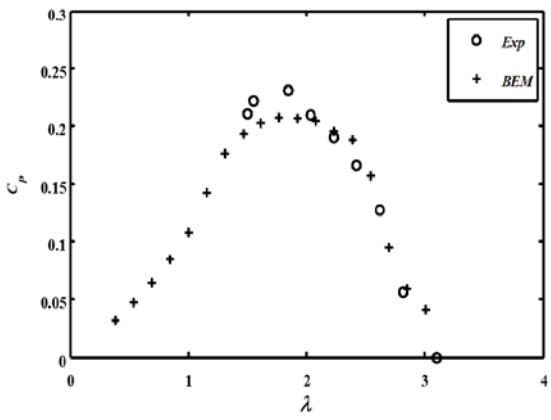
ผลการจำลองที่ได้แสดงในรูปที่ 5.1-5.4 สัมประสิทธิ์กำลังคือสัดส่วนของกำลังงานที่กังหันลมสร้างขึ้นกับกำลังงานลมที่วิ่งเข้าสู่โรเตอร์ สัมประสิทธิ์กำลังจะมีค่าอยู่ในระหว่าง 0 - 1 เสมอ และถ้าคูณด้วย 100% ก็คือประสิทธิภาพกังหันลม ส่วนอัตราส่วนความเร็วปลายใบนั้นเป็นค่าที่ผกผันกับมุมความเร็วลมสัมพัทธ์ กล่าวคืออัตราส่วนความเร็วปลายใบที่มีค่ามาก จะหมายถึงมุมความเร็วลมสัมพัทธ์มีค่าน้อย และถ้าหากพิจารณาสมการ (2.2) จะเห็นว่ามุมปะทะก็จะมีค่าน้อยเช่นกัน ดังนั้น อาจกล่าวได้อีกแง่หนึ่งว่า เมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบมีค่าสูงขึ้นหมายถึงมุมปะทะจะมีค่าต่ำลง



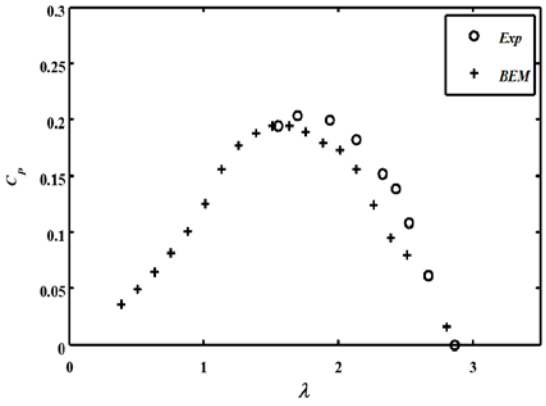
รูปที่ 8 ค่า C_p ที่มุมพิตช์ปลายใบเท่ากับ 5 องศา



รูปที่ 9 ค่า C_p ที่มุมพิตช์ปลายใบเท่ากับ 10 องศา



รูปที่ 10 ค่า C_p ที่มุมพิตช์ปลายใบเท่ากับ 15 องศา



รูปที่ 11 ค่า C_p ที่มุมพิตช์ปลายใบเท่ากับ 20 องศา

จากรูปที่ 8-11 เป็นผลการเปรียบเทียบผลระหว่างเส้น *Exp* คือ สัมประสิทธิ์กำลังจากการทดลอง และเส้น *BEM* คือ สัมประสิทธิ์กำลังจากผลการจำลองด้วยทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัมซึ่งเป็นผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้ สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

1) การทดลองมักมีปัญหาการวัดประสิทธิภาพกังหันลมที่ย่านมุมปะทะสูง (λ ต่ำ หรือ การทดสอบที่ความเร็วรอบต่ำ) คือวัดค่าไม่ได้ เนื่องจากความเร็วรอบต่ำเกินไป โรเตอร์มักจะหยุดก่อนเพราะแรงเสียดทานของโรเตอร์มากกว่าแรงบิด ทำให้อ่านค่าความเร็วรอบได้เท่ากับศูนย์ กำลังงานจึงเป็นศูนย์ไปด้วย ดังนั้นจะเห็นว่าไม่มีจุดการทดลองในบริเวณที่มุมปะทะสูง ($\lambda \approx 0-1.5$) แต่การจำลองด้วยทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัมสามารถคำนวณได้

2) ในช่วงมุมพิตช์ปลายใบ 5-10 องศา กังหันลมเสื่อลำแพนให้ประสิทธิภาพสูงสุด 22% ซึ่งสูงกว่าการปรับมุมพิตช์ปลายใบที่ 15-20 ซึ่งให้ประสิทธิภาพ 19% เป็นเพราะว่าเป็นช่วงการบิดใบที่ทำให้เกิดมุมปะทะเฉลี่ยดีที่สุด เป็นผลทำให้ได้ค่าอัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้านสูงสุด (Maximum Lift to Drag Ratio) ทั้งนี้

ประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้มีค่าเพียง 22% ไม่ถึง 30-35% ดังที่ได้อ้างอิงไว้ในบทนำ เนื่องจากกังหันลมนี้ยังไม่ได้ใช้เทคนิคพิเศษในการเพิ่มประสิทธิภาพ กล่าวคือ เทคนิคการปิดปลายใบ [3] ซึ่งสามารถลดการสูญเสียที่ปลายใบ (Tip Loss) ได้มาก จึงช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ เนื่องจากกังหันลมเสื่อลำแพนมีขนาดปลายใบที่ใหญ่จึงมีการสูญเสียที่ปลายใบสูงมาก หลักการปิดปลายใบนี้ คล้ายคลึงกับการติดตั้งวิงเล็ท (Winglet) ที่ปลายปีกเครื่องบินเพื่อลดแรงต้านเหนี่ยวนำ (Induced Drag) ซึ่งทำให้สูญเสียแรงยกและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

3) ผลการจำลองด้วยทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัมมีความสอดคล้องกับผลการทดลองดีมากเฉพาะในช่วงมุมพิตช์ปลายใบเท่ากับ 10, 15 และ 20 องศา และในช่วง $\lambda = 2.0 - 3.5$ ซึ่งเป็นย่านมุมปะทะต่ำ อย่างไรก็ตามในย่านมุมปะทะสูง ผลลัพธ์ที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นโดยเฉพาะจุดที่เริ่มเกิดการสะตอล คือจุดที่อยู่บริเวณสูงสุดของกราฟเยื้องไปทางด้านที่ λ มีค่าต่ำ เหตุเพราะเกิดจากผลของการหมุนของใบกังหันลม ซึ่งมีแรงเหวี่ยง (Centrifugal Force) และแรงคอลิโอริส (Coriolis Force) เกิดขึ้น แรงทั้งสองนี้จะส่งผลให้เกิดการสะตอล (Stall) ที่มุมปะทะสูงขึ้นกว่าปกติที่ไม่มีการหมุน เช่น การไหลของอากาศผ่านปีกเครื่องบิน เป็นต้น พฤติกรรมนี้เรียกว่า Stall-Delay [14]

4) กรณีมุมพิตช์ปลายใบ 5 องศา ให้ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนสูงตั้งแต่ย่านมุมปะทะต่ำ เหตุเพราะว่าที่มุมปะทะต่ำคือช่วงที่ใบกังหันลมมีความเร็วรอบสูง ซึ่งอาจจะสูงมากจนกระทั่งทำให้ลักษณะความโค้งของใบกังหันมีการเปลี่ยนแปลงมากเกินไปจนกระทั่งส่งผลให้ค่า Aerodynamic Loads (C_L, C_D) ของใบกังหันลมเสื่อลำแพนเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมาก

6. สรุปผลการทดลอง

1) ในช่วงมุมพิตช์ปลายใบ 5-10 องศา ผลการจำลองให้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 22% ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 2.0-2.5

2) ทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัมให้ผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลองดีมากในช่วงมุมพิตช์ปลายใบ 10 15 และ 20 องศา ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 2.0-3.5 โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 7.0%

3) การจำลองที่มุมปะทะสูงยังคงมีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากผลของการ Stall-Delay ถือเป็นข้อจำกัดของแบบจำลองนี้

7. รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

α	=	มุมปะทะ ($^\circ$)
β	=	มุมพิตช์ปลายใบ ($^\circ$)
β_r	=	มุมพิตช์ใดๆตลอดแนวรัศมี ($^\circ$)
λ	=	อัตรส่วนความเร็วปลายใบ
Ω	=	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
ρ	=	ความหนาแน่น (kg/m^3)
σ'	=	ความตันใบ
ϕ	=	มุมลมสัมพัทธ์ ($^\circ$)
a	=	ปัจจัยการเหนี่ยวนำเชิงแกน
a'	=	ปัจจัยการเหนี่ยวนำเชิงมุม
c	=	ความยาวคอร์ด (m)
dQ	=	แรงบิดย่อย (N.m)
dr	=	ความยาวเอลิเมนท์ (m)
dT	=	แรงในแนวแกนย่อย (N)
r	=	รัศมีใดๆของใบกังหัน (m)
C_D	=	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
C_L	=	สัมประสิทธิ์แรงยก

C_n = ค่าของ $C_L \cos\phi + C_D \sin\phi$
C_P = สัมประสิทธิ์กำลัง
C_t = ค่าของ $C_L \sin\phi - C_D \cos\phi$
C_T = สัมประสิทธิ์แรงขับ
D = แรงต้าน (N)
F = สัมประสิทธิ์การสูญเสียรวม
F_H = สัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ดุม
F_T = สัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ปลายใบ
H = ดุมโรเตอร์
L = แรงยก (N)
N = จำนวนใบ
P_W = กำลังงานลม (W)
P_T = กำลังงานกังหันลม (W)
R = รัศมีโรเตอร์ (m)
R_H = รัศมีดุมโรเตอร์ (m)
U_0 = ความเร็วลมเข้าสู่โรเตอร์ (m/s)
U_{rel} = ความเร็วลมสัมพัทธ์ (m/s)
BEM = ผลการจำลองจากทฤษฎีเบลดเอลิเมนท์โมเมนตัม
Exp = ผลการทดลอง

8. เอกสารอ้างอิง

[1] P. Mukhia, “Performance and Aerodynamic Analysis of The Thai Four Bladed Wooden Rotor Coupled to A Ladder Pump”, Master Thesis, Asian Institute of Technology, Thailand. 1981.

[2] R. Thepwong, “Design Improvements of Thai Sail Windmill for Water Pumping”, Ph.D Thesis, School of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin. 2013.

[3] T. Klabklay, “Efficiency Enhancement and Cost Reduction of Thai Sail Windmill”, Ph.D. Thesis, School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology. 2016. (in Thai)

[4] L. Wang, R. Quant and A. Kolios, “Fluid Structure Interaction Modelling of Horizontal-Axis Wind Turbine Blades Based on CFD and FEA”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 158, 2016, pp. 11-25.

[5] J.P. Monteiro, M.R. Silvestre, H. Piggott and J. André, “Wind Tunnel Testing of A Horizontal Axis Wind Turbine Rotor and Comparison with Simulations From Two Blade Element Momentum Codes”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 123, 2013, pp. 99-106.

[6] J.L. Tangler, and J.D. Kocurek, “Wind Turbine Post-Stall Airfoil Performance Characteristics Guidelines for Blade-element Momentum Methods”, Technical Report NREL/CP-500-36900. National Renewable Energy Laboratory, Colorado. 2005.

[7] T. Klabklay and T. Chitsomboon, “Prediction of Thai Sail Windmill Performance by a Blade Element Momentum Theory”, The 29th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 2015, pp. 713-717 (in Thai)

[8] P. Pratumnopharat and P.S. Leung, “Validation of Various Windmill Brake State Models Used by Blade Element Momentum Calculation”, Renewable energy 36, 2011, pp. 3222-3227.

[9] J.F. Manwell et al., "Wind energy explained" (2nd ed.)", John Wiley & Son, 2009.

[10] Ch. Thumthae, "Accurate CFD Procedures for The Validation of The Theoretical Design of Wind Turbine", Ph.D. Thesis, School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology. 2009. (in Thai)

[11] L. Prandtl and A. Betz, "Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und Aerodynamik", Göttinger Nachr, Göttingen, 1927, pp. 88–92.

[12] J.L. Buhl, "A New Empirical Relationship between Thrust Coefficient and Induction Factor for The Turbulent Windmill State", Technical report NREL/TP-500-36834. NREL, Colorado. 2005.

[13] A.D. Spera, "Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering (2nd ed.)", ASME Press, 1998.

[14] R. Lanzafame, S. Mauro and M. Messina, "HAWT Design and Performance Evaluation: Improving the BEM Theory Mathematical Models", Energy Procedia 82, 2015, pp. 172-179.