

## การออกแบบกังหันลมให้สอดคล้องกับสถิติลมจำเพาะพื้นที่ Design of Wind Turbines to in a Local Wind Statistic

วิกันดา ศรีเดช และ ทวิช จิตรสมบูรณ์\*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร 0-4422-4410 โทรสาร 0-4422-4411 \*E-mail: tabon@sut.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งหามุมเอน (pitch) ที่ดีที่สุดของใบกังหันโดยใช้วิธีการเชิงทฤษฎีร่วมกับสถิติลมเฉพาะพื้นที่เพื่อให้ได้งานรายปีสูงสุด วิธีนี้จึงไม่ได้ออกแบบที่ความเร็วลมเพียงจุดเดียวแต่คำนึงถึงความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดทั้งปี ทฤษฎีสำคัญที่ใช้คือทฤษฎี Blade element momentum ร่วมกับแบบจำลองชดเชยการสูญเสียการไหลเพื่อปรับแก้การไหลเชิงอุดมคติให้สอดคล้องกับความเป็นจริงยิ่งขึ้น ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในภาษา MATLAB บนพื้นฐานของทฤษฎีดังกล่าว ความน่าเชื่อถือของโปรแกรมได้จากการเปรียบเทียบผลการทำนายกับผลการทดลองของกังหันลมในสองลักษณะคือกังหันลมแบบใบตรงและกังหันลมแบบใบบิด ได้ใช้โปรแกรมค้นหามุมเอนที่ดีที่สุด สถิติลมอันหนึ่ง โดยการปรับมุมเอนไปจนกระทั่งได้งานรายปีสูงสุด จากนั้นได้คำนวณหามุมเอนที่ดีที่สุดในการที่สถิติลมเปลี่ยนไปจากเดิมโดยยังมีความเร็วลมเฉลี่ยเท่าเดิมแต่มีความเบ้ของสถิติลมต่างไปจากเดิม พบว่ามุมเอนที่ดีที่สุดเปลี่ยนไปจากเดิม ทั้งนี้เป็นสาเหตุจากการที่ค่าความเร็วลมที่ให้ความหนาแน่นกำลังงานลมสูงสุดเปลี่ยนไปตามความเบ้ของสถิติลม พบว่าการปรับมุมเอนเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลให้ได้งานรายปีต่างกันพอสมควรในสถิติลมที่มีความเบ้แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐศาสตร์ของกังหันลมได้มากพอสมควร

### Abstract:

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.

### 1. บทนำ

กังหันลมเป็นทางเลือกหนึ่งของการผลิตพลังงานที่ยั่งยืนและสะอาด หากลงทุนติดตั้งกังหันลมในบริเวณที่มีความเร็วลมที่เหมาะสม ผลตอบแทนย่อมคุ้มค่าต่อการลงทุน กังหันลมเชิงการค้าส่วนใหญ่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานในบริเวณที่มีกระแสลมแรงทางตอนเหนือของยุโรป ซึ่งความเร็วลมต่ำสุดที่จะทำให้กังหันลมเริ่มทำงานนั้น จะอยู่ที่ประมาณ 8 m/s หากนำเข้ากังหันลมเพื่อติดตั้งในประเทศไทย โดยไม่มีการดัดแปลงให้เหมาะสมกับลักษณะความเร็วลมของพื้นที่ ก็อาจไม่คุ้มค่า เพราะกังหันลมที่นำเข้ามานั้น จะสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ตามที่ออกแบบไว้ได้เพียงไม่กี่วันในหนึ่งปีเท่านั้น เนื่องจากประเทศไทยมีได้อยู่ในภูมิภาคที่มีกระแสลมแรง และถึงแม้ว่าจะได้ทำการออกแบบกังหันให้เหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศไทยแล้วก็ตาม แต่ลมในแต่ละพื้นที่ แม้มีความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากัน ก็ยังมีสถิติลมที่ต่างกัน เช่น อาจมีความเบ้ซ้ายเบ้ขวาของกราฟสถิติลม ดังนั้นการจัดมุมเอนใบกังหันย่อมต่างกันออกไปในแต่ละพื้นที่เพื่อให้ได้งานรายปีสูงสุดสำหรับพื้นที่นั้น

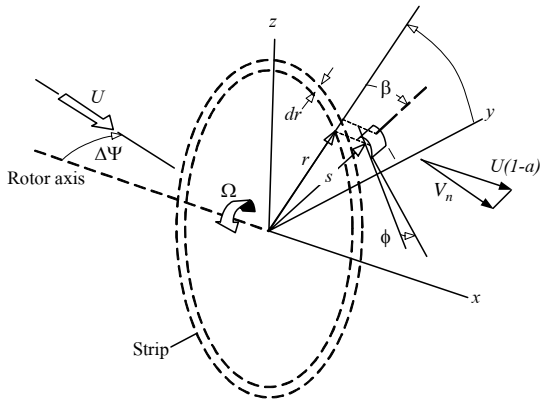
กังหันลมส่วนใหญ่ถูกออกแบบมาให้ผลิตกำลังงานได้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดที่ "จุดออกแบบ" จุดหนึ่ง ซึ่งโดยทั่วไปจุดนี้หมายถึงจุดที่มีความหนาแน่นกำลังลมสูงสุดตามกราฟสถิติลม ซึ่งนักออกแบบไม่ได้มีกราฟสถิติลมล่วงหน้าจึงมักนิยมสมมติให้เป็นกราฟที่มีการกระจายแบบปกติ (normal distribution) แต่ในความเป็นจริงกราฟลมในแต่ละพื้นที่จะแตกต่างกันไป เช่น ในสามพื้นที่ที่มีความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากัน แต่กราฟอาจมีความเบ้ต่างกัน ทำให้จุดที่เกิดกำลังลมสูงสุดเปลี่ยนไป และมุมเอนก็ย่อมเปลี่ยนไปด้วย ในประเทศไทยมีลมมรสุมที่เปลี่ยนทิศทางปีละสองครั้งและยังมีการ

เสริมด้วยลมท้องถิ่น ดังนั้นสถิติลมจึงอาจแตกต่างไปจากลมในยุโรปหรือประเทศอื่นใดที่ผลิตกังหันลม

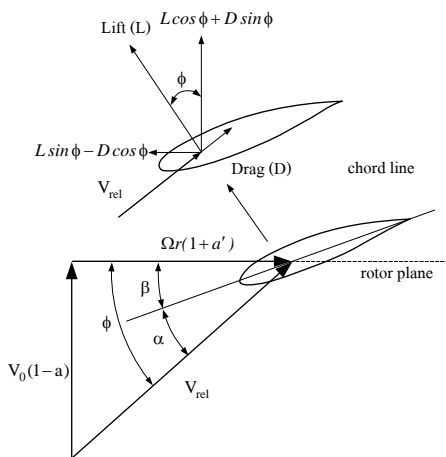
ในงานวิจัยนี้จะหามุมเฟินที่ดีที่สุดโดยไม่ได้พิจารณาการออกแบบที่ลมเพียงจุดเดียว แต่นำกราฟสถิติลมตลอดทั้งปีมาพิจารณา เพื่อหาวันที่ได้ตลอดทั้งปี โดยใช้ทฤษฎีเชิงอุดมคติเป็นพื้นฐานในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายการทำงานของกังหันลม จากนั้นเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับผลการทดลองเพื่อความมั่นใจในความแม่นยำตรงของโปรแกรม จากนั้นจึงใช้โปรแกรมเพื่อค้นหามุมเฟินที่ดีที่สุดในการผลิตงานรายปี

## 2. ทฤษฎี Strip สำหรับกังหันลมแกนนอน

ทฤษฎี Strip แบ่งใบกังหันออกเป็นชั้นย่อย (Strip) และพิจารณาสนามความเร็ว และแรงกระทำต่าง ๆ บนแต่ละชั้นย่อยของใบกังหัน ดังแสดงในรูปที่ 1 บางครั้งเรียกทฤษฎีนี้ว่า ทฤษฎี Blade element momentum (BEM)



รูปที่ 1 โครงสร้างของชั้นย่อย และสนามความเร็ว



รูปที่ 2 สนามความเร็วและแรงที่กระทำบนหน้าตัดแพนอากาศ

จากรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาสนามความเร็วที่หน้าตัดแพนอากาศ

-  $V_0(1-a)$  คือ ความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับระนาบการหมุน หรือทิศทางลม โดยที่  $V_0$  คือความเร็วลม และ  $a$  คือ ค่าการเหนี่ยวนำเชิง

แกน (Axial induction factor) ซึ่ง  $a = (V_0 - V_d)/V_0$  เมื่อ  $V_0$  คือความเร็วต้นกระแส และ  $V_d$  คือความเร็วที่ใบกังหัน

-  $\omega r(1+a')$  คือ ความเร็วในแนวสัมผัสกับทิศทางการหมุน โดยที่  $\Omega$  คือความเร็วเชิงมุมของใบกังหัน และ  $a'$  คือการเหนี่ยวนำเชิงมุม (Angular induction factor) ซึ่ง  $a' = \Omega/\omega r$  เมื่อ  $\Omega$  คือความเร็วเชิงมุมในย่านคลื่นท้าย (wake) ของใบกังหัน

-  $V_{rel}$  คือ ความเร็วสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นผลรวมระหว่าง  $V_0(1-a)$  และ  $\omega r(1+a')$

เมื่อ  $L$  คือ แรงยก,  $D$  คือ แรงต้าน,  $\phi$  คือ มุมลมเข้า (Inflow angle),  $\alpha$  คือ มุมปะทะ (Angle of attack) และ  $\theta$  คือ มุมเฟิน (Pitch angle) จะได้ความสัมพันธ์

$$\tan \phi = \frac{V_0(1-a)}{\omega r(1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \quad (1)$$

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

เนื่องจากทฤษฎี Blade element momentum เป็นการผสมผสานระหว่าง ทฤษฎี Moment และ ทฤษฎี Blade element ดังนั้น จึงสามารถนำแรงตั้งฉาก และ แรงบิด จากทั้ง 2 ทฤษฎีมาเทียบเท่ากันได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} dT|_{BET} &= dT|_{Momentum} \\ B \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) c dr & \\ &= 4a(1-a)\rho V_0^2 \pi r dr \end{aligned} \quad (6)$$

และ

$$\begin{aligned} dQ|_{BET} &= dQ|_{Momentum} \\ B \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) cr dr & \\ &= 4a'(1-a)\rho V_0^2 \pi r^3 \omega dr \end{aligned} \quad (7)$$

จัดรูปใหม่จะได้ [9]

$$\begin{aligned} \sigma' \pi \rho \left[ \frac{V_0(1-a)}{\sin \phi} \right]^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) r dr & \\ &= 4a(1-a)\rho V_0^2 \pi r dr \end{aligned} \quad (8)$$

และ

$$\begin{aligned} \sigma' \pi \rho \left[ \frac{V_0(1-a)}{\sin \phi} \right] \left[ \frac{\omega r(1+a')}{\cos \phi} \right] (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r^2 dr & \\ &= 4a'(1-a)\rho V_0^2 \pi r^3 \omega dr \end{aligned} \quad (9)$$

เมื่อ  $\sigma' = Bc/2\pi r$   
จัดรูปทั้งสองสมการใหม่จะได้

$$\frac{a}{(1-a)} = \frac{\sigma'}{4\sin^2\phi} (C_L \cos\phi + C_D \sin\phi) \quad (10)$$

$$\frac{a'}{(1+a')} = \frac{\sigma'}{4\sin\phi\cos\phi} (C_L \sin\phi - C_D \cos\phi) \quad (11)$$

จะได้

$$a = \frac{\frac{\sigma'}{4\sin^2\phi} (C_L \cos\phi + C_D \sin\phi)}{1 + \frac{\sigma'}{4\sin^2\phi} (C_L \cos\phi + C_D \sin\phi)} \quad (12)$$

$$a' = \frac{\frac{\sigma'}{4\sin\phi\cos\phi} (C_L \sin\phi - C_D \cos\phi)}{1 + \frac{\sigma'}{4\sin\phi\cos\phi} (C_L \sin\phi - C_D \cos\phi)} \quad (13)$$

สมการ (12) และ (13) จะนำไปใช้ในการคำนวณหาเงื่อนไขการไหล (Flow condition) ต่อไป

### 2.1 ตัวประกอบการสูญเสียปลายใบและโคนใบ

สมการปรับแก้การสูญเสียปลายใบกึ่งหนึ่งของ Prandtl เสนอในรูปแบบอย่างง่ายได้ดังนี้ [1-2]

$$F = (2/\pi)\cos^{-1}\exp(-f) \quad (14)$$

โดยที่

$$f(r) = (1/2R)(R-r)B\sqrt{1+X^2} \quad (15)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของโรเตอร์

X คือ อัตราส่วนความเร็วปลายใบกึ่งหนึ่ง มีค่าเท่ากับ  $R\omega/V_0$

$$F = F_{tip} \cdot F_{hub} \quad (16)$$

$$\text{ซึ่ง } F_{hub} = (2/\pi)\cos^{-1}\exp(-f_{hub}) \quad (17)$$

$$\text{โดยที่ } f_{hub} = \frac{B}{2} \left( \frac{r-r_h}{r\sin\phi} \right) \quad (18)$$

เมื่อ  $r_h$  คือ รัศมีจากจุดศูนย์กลางของโรเตอร์ถึงโคนใบกึ่งหนึ่ง

ค่าปรับแก้การสูญเสียที่ปลายใบจะถูกนำไปปรับแก้ค่าความเร็วที่กึ่งหนึ่งลม กล่าวคือ  $U = V_0(1-aF)$

### 2.2 แบบจำลองหลังป้อ (Post stall model)

เมื่อ  $\alpha > 15^\circ$  จะถึงช่วงนั้นเกิดป้อขึ้น กำหนดให้  $\alpha_c$  คือ มุมปะทะในช่วงที่เกิดป้อ และ AR คือ Aspect Ratio =  $R/c$  เพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุดจึงนำสมการของ Viterna-Corrigan [6-7] มาช่วยปรับแก้ค่า  $C_L$  และ  $C_D$  ให้สมจริงมากขึ้น

### 2.3 สมการการแจกแจงความน่าจะเป็นของ Weibull

การออกแบบกังหันลมให้เหมาะสมกับลักษณะลมของพื้นที่จะต้องทำการวิเคราะห์สถิติลมจำเพาะพื้นที่ร่วมด้วย ซึ่งสมการทางสถิติที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของความเร็วลม คือ สมการแจกแจงความน่าจะเป็นของ Weibull ดังต่อไปนี้ [2]

$$PDF(V)dV = (k/c)(V/c)^{k-1} \exp[-(V/c)^k] dV \quad (19)$$

จากสมการ (26) แสดงการแจกแจงความน่าจะเป็นของความเร็วลมในช่วงระหว่าง V ถึง V+dV

โดยที่ C คือ scale parameter

k คือ shape parameter

กำลังงานรายปีจึงคำนวณได้จาก

$$P_{\text{annual}} = 8760 \int_u PDF \cdot P_t dV \quad (20)$$

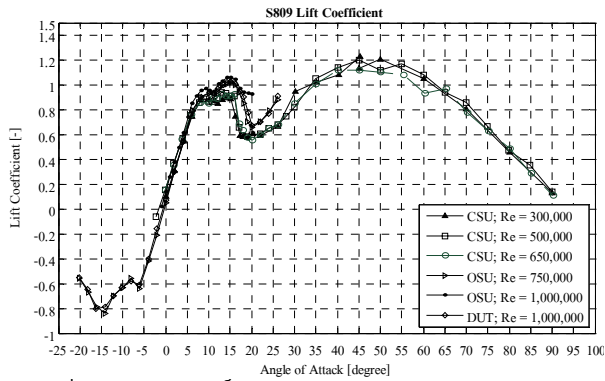
โดยที่  $P_t$  คือ กำลังงานที่ได้จากกังหันลม

### 3. ขั้นตอนการหาผลเฉลี่ยและการทดสอบโปรแกรม

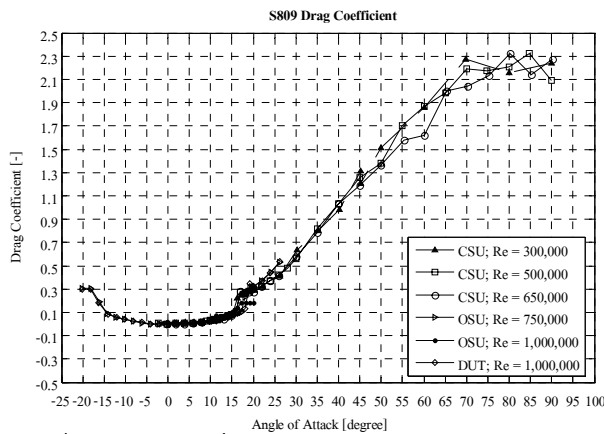
เริ่มจากการเดาค่า a และ a'

- 1) กำหนดมุมเฟินเริ่มต้น โดยยึดมุมเฟินของกังหันลมต้นแบบเป็นหลัก
- 2) คำนวณมุมลมเข้า  $\phi$  จากสมการ (1)
- 3) คำนวณมุมปะทะ  $\alpha$  จากความสัมพันธ์  $\alpha = \phi - \beta$  จากนั้นจะได้ค่า  $C_L$  และ  $C_D$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมปะทะหาได้จากข้อมูลการทดสอบจากอุโมงค์ลม ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4
- 4) ปรับแก้ค่า  $C_L$  และ  $C_D$  เมื่อมุม  $\alpha > 15$  องศา เนื่องจากเป็นช่วงที่กังหันลมเกิดการป้อ โดยเลือกใช้แบบจำลองหลังการป้อ Viterna and Corrigan
- 5) ปรับแก้การสูญเสียปลายใบ ด้วยแบบจำลองของ Prandtl ดังสมการ (14) รวมทั้งปรับแก้การสูญเสียโคนใบด้วยสมการ (17) ในพจน์ของการสูญเสียรวมโดยใช้สมการ (16)
- 6) ปรับแก้ค่า a และ a' จากสมการ (12) และ (13) หากต้องการผลการคำนวณถูกต้องมากขึ้น จึงได้มีแบบจำลองปรับปรุงค่า a โดยใช้แบบจำลองของ Buhl
- 7) กลับไปคำนวณในขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง และคำนวณซ้ำจนกระทั่งค่า a และ a' ลู่เข้า

- 8) นำค่าเงื่อนไขการไหลที่เหมาะสม มาใช้คำนวณหาแรงยกที่ ได้ ที่มุมเอนต่าง ๆ พร้อมทั้งหาประสิทธิภาพรายปี
- 9) เปรียบเทียบกับสถิติลมในแบบอื่น เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของ มุมบิตที่มีต่องานรายปี เมื่อสถิติลมเปลี่ยนแปลงไป

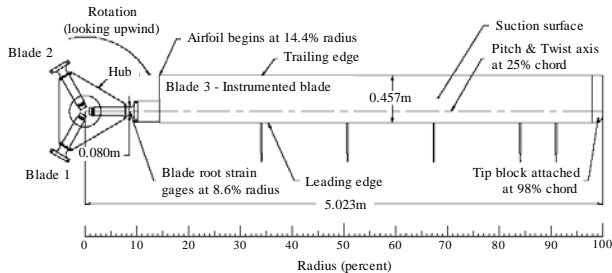


รูปที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของหน้าตัดแพนอากาศ S809 [5]



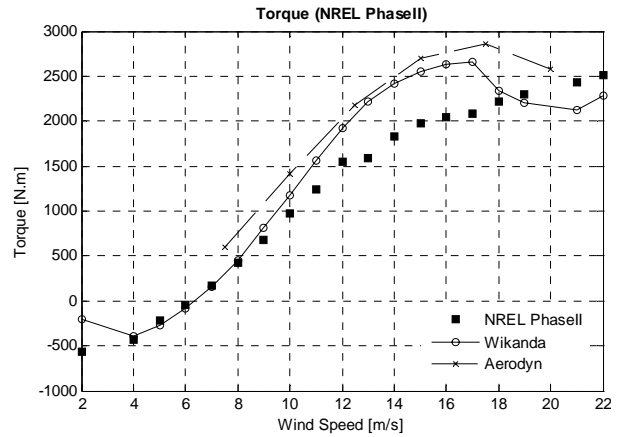
รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของหน้าตัดแพนอากาศ S809 [5]

### 3.1 การทดสอบโปรแกรมกับ NREL Phase II



รูปที่ 5 รูปร่างและขนาดของกังหันลม NREL Phase II

จากรูป 5 แสดงลักษณะของกังหันลม NREL Phase II [10] เป็นกังหันลมแบบ 3 ใบขนาด 19.8 kW มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10.1 m ความเร็วรอบเท่ากับ 71.63 rpm ที่ความเร็วเชิงโคโรนัส ทำงานที่ความเร็วลมตัดเข้า 6 m/s ใบกังหันลมเป็นแบบใบตรงที่  $C=0.4572$  m ตลอดความยาวใบกังหัน ใช้หน้าตัดแพนอากาศ S809 และตั้งค่า  $\theta = 12$  องศา

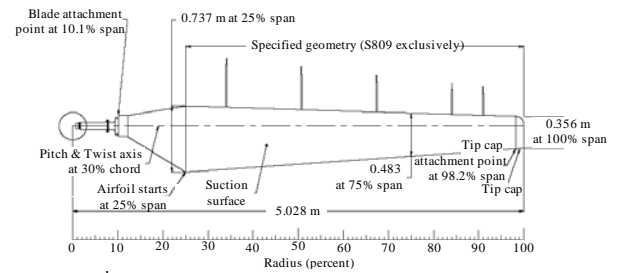


รูปที่ 6 การเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองของ กังหันลม NREL Phase II

เนื่องจากได้มีโปรแกรม SuWIT เพื่อใช้ออกแบบกังหันลม เฉพาะจุดแล้ว จึงขนานนามโปรแกรมนี้ว่า SuWitStat จากรูปที่ 6 จะเห็นว่าช่วงความเร็วต่ำผลการคำนวณจะค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่เมื่อความเร็วสูงขึ้นตั้งแต่ 10 m/s เป็นต้นไปผลการคำนวณจะค่อนข้างห่างจากผลการทดลองพอสมควร ทั้งนี้เป็นลักษณะปกติของกังหันลม NREL Phase II เพราะเป็นกังหันลมแบบใบตรง ย่อมเกิดบ่อขึ้นสูงเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงการสูญเสีย โดยเฉพาะบริเวณปลายใบกังหันซึ่งเป็นตำแหน่งที่ให้กำลังงานมากที่สุด

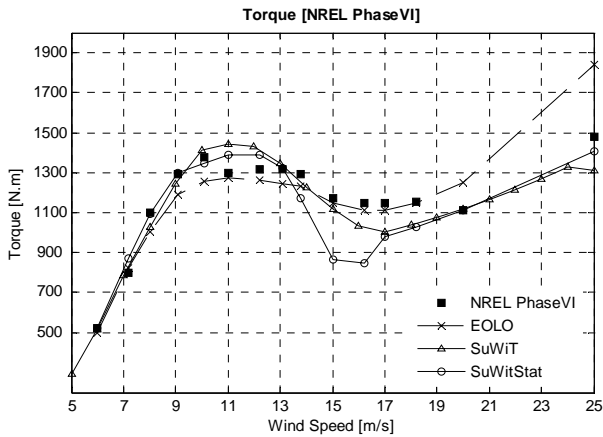
เมื่อเทียบกับโปรแกรมซึ่งเป็นที่รู้จักอย่าง Aerodyn [8] จะเห็นว่าผลการคำนวณจากโปรแกรมของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่า

### 3.2 การทดสอบโปรแกรมกับ NREL Phase VI



รูปที่ 7 รูปร่างและขนาดของกังหันลม NREL Phase VI

จากรูป 7 แสดงลักษณะของกังหันลม NREL Phase VI [11] เป็นกังหันลมแบบ 2 ใบขนาด 19.8 kW มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10.1 m ความเร็วรอบเท่ากับ 71.63 rpm ที่ความเร็วเชิงโคโรนัส ทำงานที่ความเร็วลมตัดเข้า 6 m/s ใบกังหันลมเป็นแบบใบบิด (Twist) และมีความสอบ (Taper) ใช้หน้าตัดแพนอากาศ S809 และตั้งค่า  $\theta = 0$  องศา ที่ปลายใบกังหัน



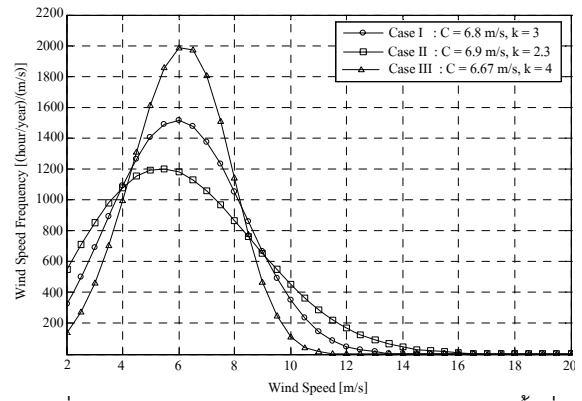
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองของ กังหันลม NREL Phase VI

จากรูปที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองของ กังหันลม NREL Phase VI พบว่าผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดีในช่วงความเร็วต่ำถึงปานกลาง ตั้งแต่ความเร็วลม 14 m/s เป็นต้นไปผลการคำนวณจะต่ำกว่าผลการทดลอง และกลับมาใกล้เคียงกับผลการทดลองอีกครั้งที่ความเร็วลม 20 m/s เมื่อเปรียบเทียบผลกับโปรแกรมอื่น จะเห็นว่าผลการคำนวณจากโปรแกรมในงานวิจัยนี้ ดีกว่า EOLO และ SuWiT ในช่วงความเร็วลม 5 – 13 m/s ซึ่ง EOLO และ SuWiT จะดีกว่าในช่วง 13 – 18 m/s

#### 4. มุมเอนที่ตีที่ดีที่สุดสำหรับสถิติลมจำเพาะพื้นที่

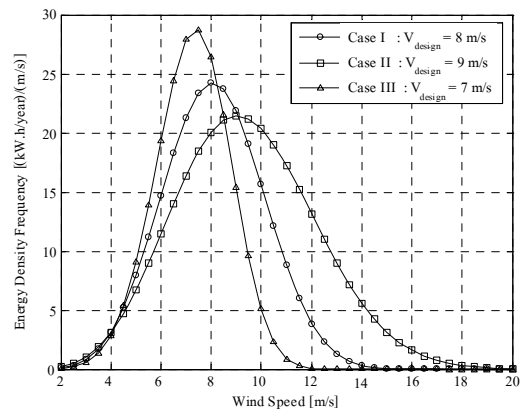
รูปที่ 9 แสดงการแจกแจงความถี่ของความเร็วลม (Wind speed frequency distribution) 3 รูปแบบ สำหรับเหตุผลที่ต้องทำการจำลองสถิติลม 3 รูปแบบ ที่แตกต่างกัน เนื่องจากต้องการให้เห็นผลกระทบจากลักษณะการเบี่ยงของกราฟสถิติลมที่มีต่องานรายปีที่ผลิตได้จากกังหันลม โดยที่สถิติลมทั้ง 3 รูปแบบ จะถูกกำหนดให้มีค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่เท่ากัน ซึ่งเริ่มจากการจำลองสถิติลมรูปแบบแรก (Case I) ด้วยการกำหนดค่า  $k = 3$  และ  $C = 6.8$  m/s ลงไปในสมการการแจกแจงของไวบูลล์จนกระทั่งได้  $\sqrt[3]{(V^3)} = 8$  m/s (นำออกแบบส่วนใหญ่เลือกใช้ค่านี้เป็นความเร็วลมออกแบบ) ซึ่งค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้ คือ 6.032 m/s จากนั้นจึงยึดค่านี้เป็นความเร็วลมเฉลี่ยของอีก 2 รูปแบบที่เหลือ โดยที่ลักษณะการเบี่ยงของกราฟสถิติจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ 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



รูปที่ 9 การแจกแจงความเร็วลม ของ 3 สถิติลมจำเพาะพื้นที่

ในแง่ของกำลังงานลม สถิติลมรูปแบบแรกให้กำลังงานลมรายปีเท่ากับ 124.09 MW.h/year ส่วนรูปแบบที่ 2 (Case II) ให้กำลังงานลมรายปีเท่ากับ 243.50 MW.h/year โดยที่  $\sqrt[3]{(V^3)} = 9$  m/s และรูปแบบที่ 3 (Case III) ให้กำลังงานลมรายปีเท่ากับ 107.65 MW.h/year โดยที่  $\sqrt[3]{(V^3)} = 7$  m/s ตามลำดับ ซึ่งรูปกราฟสถิติของกรณีทั้งสามดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การแจกแจงความถี่ของความหนาแน่นกำลังงานลมจากสถิติลมเฉพาะพื้นที่ 3 รูปแบบ

ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม SuWiTStat โดยใช้กังหันลม NREL Phase II (ซึ่งเป็นแบบใบตรง) เป็นต้นแบบ ในสถิติลมทั้งสามที่มุมเอนต่างๆ ดังปรากฏในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 งานรายปีและประสิทธิภาพรายปีเมื่อปรับมุมเอนของใบ กังหัน NREL Phase II

Pitch	P <sub>annual</sub> [MW.h/year]			Annual efficiency [%]		
	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

Pitch	P <sub>annual</sub> [MW.h/year]			Annual efficiency [%]		
	Case I	Case II	Case III	Case I	Case II	Case III
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

จากตารางที่ 1 พบว่างานรายปีสูงสุดของสถิติลม Case I อยู่ที่มุมเฝิน 6 องศา ในขณะที่ Case II อยู่ที่มุมเฝิน 7 องศา และ Case III ได้ที่มุมเฝิน 6 องศา พังสึงเกตว่ากั๊งหั้นนี้ได้รับการออกแบบดั่งเดิมไว้ที่มุมเฝิน 12 องศา ดั่งนั้นเมื่อเทียบประสิทธิภาพที่ดี่ที่สุดกับประสิทธิภาพ ณ จุดนี้ จะเห็นได้ว่ามีค่าเพิ่มขึ้น 5.48%, 3.24% และ 7.43% ตามลำดับ ค่าที่เพิ่มนี้อาจเห็นว่าไม่มากนักเพราะคิดเทียบกับพลังงานลมทั้งหมด แต่หากคิดเทียบกับกำลังงานที่ได้ ณ จุด 12 องศาจะได้ค่าการเพิ่มที่เปลี่ยนไปมากคือได้เพิ่ม 74.7%, 42.5% และ 113.7% ตามลำดับ

จากนั้นได้คำนวณผลสำหรับกั๊งหั้นลม NREL Phase VI (ซึ่งเป็นแบบใบบิต) โดยปรับมุมเฝินปลายใบจาก -5-11 องศา โดยมุมเฝินของการออกแบบดั่งเดิมอยู่ที่ 3 องศา เนื่องจากกั๊งหั้นลม NREL Phase VI เป็นกั๊งหั้นลมแบบใบบิต จึงอ้างอิงมุมเฝินที่ปลายใบเป็นหลัก จากตารางที่ 3 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่คำนวณได้พบว่างานรายปีสูงสุดของสถิติลม Case I เกิดขึ้นที่มุมเฝินปลายใบ 2 องศา ส่วนในสถิติลม Case II เกิดที่ 3 องศา และ Case III ที่ 1 องศา สำหรับประสิทธิภาพของกั๊งหั้นลมเมื่อคิดเทียบกับพลังงานลมทั้งปีจะเพิ่มขึ้นจากจุดออกแบบที่ 3 องศาเป็นจำนวน 0.16%, 0.00% และ 0.42% ตามลำดับ

ตารางที่ 2 งานรายปีและประสิทธิภาพรายปีเมื่อปรับมุมเฝินของใบกั๊งหั้น NREL Phase VI

Pitch	P <sub>annual</sub> [MW.h/year]			Annual efficiency [%]		
	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

Pitch	P <sub>annual</sub> [MW.h/year]			Annual efficiency [%]		
	Case I	Case II	Case III	Case I	Case II	Case III
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
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

เช่นเดียวกันกรณีแรกถ้าคิดประสิทธิภาพที่เพิ่มด้วยการเทียบกับกำลังงานที่จุดออกแบบดั่งเดิม (องศา) จะได้จำนวนร้อยละที่เพิ่มขึ้นดังนี้คือ 1.12%, 0.00% และ 2.80% ตามลำดับ

เห็นได้ว่าในกรณี phase VI นี้มีการเพิ่มกำลังงานค่อนข้างน้อยกว่ากรณี phase II ทั้งนี้เพราะกั๊งหั้นรุ่นนี้ได้ออกแบบไว้สำหรับกำลังลมต่ำที่ 8 m/s ซึ่งตรงกับสถิติลมที่ใช้ในการคำนวณ แต่ในกรณี phase II ได้ออกแบบไว้สำหรับลมที่แรงกว่านี้ แม้กระนั้นตัวเลขการเพิ่มที่ดูเหมือนว่าน้อยในเชิงวิศวกรรมนี้อาจมีนัยสำคัญมากในเชิงเศรษฐศาสตร์ เช่นถ้าการผลิตไฟฟ้ามีกำไร 5% ของเงินลงทุน ดั่งนั้นการเพิ่มงานได้ 1.12% และ 2.80% จึงเป็นการได้กำไรสุทธิ (ไม่มีเงินลงทุนหรือดำเนินการ) ดั่งนั้นจึงเป็นการเพิ่มกำไรมากกว่าเดิมถึง 22.4% และ 56% ตามลำดับ

## 5. สรุปผล

โปรแกรม SuWitStat ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ได้ถูกทดสอบความน่าเชื่อถือด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจนเป็นที่น่าพอใจ จากนั้นได้ใช้ทำรายงานปีของกั๊งหั้นลมตัวเดียวกันในสถิติลมที่มีความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากันแต่มีความเบ้ที่ต่างกัน พบว่ามุมเฝินใบกั๊งหั้น (Pitch) ที่ดี่ที่สุดสำหรับลมในแต่ละแบบมีค่าต่างกันได้มากถึง 2 องศา ซึ่งก่อให้เกิดงานปีที่ผิดไปจากงานปีของจุดออกแบบแบบมุมเฝินคงค่าถึงเกือบประมาณ 3% ซึ่งนับว่าเป็นปริมาณที่มากเมื่อมองในแง่ผลของผลตอบแทนการลงทุนที่มากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Spera, A.D., "Wind Turbine Technology : Fundamental Concept of Wind Turbine Engineering", ASME Press, 1994
- [2] Eggleston, D.M. and Stoddard F. S., "Wind Turbine Engineering Design", Van Nostrand Company, 1987
- [3] Burton, T. et al., "Wind Energy Handbook", John Wiley & Son, 2001
- [4] Manwell, J. F., McGowan J.G. and Rogers A.L., "Wind Energy Explained", John Wiley & Son, 2002
- [5] Jonkman, J. M., "Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST\_AD", NREL/TP-500-34755, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2003

- [6] Viterna, L .A., and Corrigan, R. D., "Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines," DOE/NASA Workshop on Large Horizontal Axis Wind Turbines, Cleveland, Ohio, July 1981.
- [7] Tangler, J.L. and Kocurek , J.D., "Wind Turbine Post-Stall Airfoil Performance Characteristics Guidelines for Blade-Element Momentum Methods", NREL/CP-500-36900, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, October 2004.
- [8] Moriarty P.J. and Hansen A.C., "AeroDyn Theory Manual", NREL/TP-500-36881, January 2005
- [9] Lanzafame, R., and Messina, M., "Fluid dynamics wind turbine design: Critical analysis, optimization and application of BEMtheory".RenewEnergy(2007),doi:10.1016/j.renene.2006.12.010.
- [10] Simms, D. A., Hand, M. M., Fingersh, L.J., Jager, D.W., "Unsteady aerodynamics experiment Phases II–IV test configurations and available data campaigns", National Renewable Energy Laboratory, Colorado, July 1999.
- [11] Simms, D.A., Hand, M. M., et. al., "Unsteady aerodynamics experiment Phases VI: Wind tunnel test configurations and available data campaigns", NREL/TP-500-29955, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, December 2001.
- [12] Freris, L.L., 1990, "Wind Energy Conversion Systems,"