

ความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติในการประเมินงานรายปีของกังหันลม

Statistical errors in the assessment of annual energy yields of a wind turbine

วิกันดา ศรีเดช¹ และ ทวีช จิตรสมบุญ^{1,*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 ติดต่อกับ: โทรศัพท์: 0-4422-4410, โทรสาร 0-4422-4413

* E-mail: tabon@sut.ac.th

บทคัดย่อ

การวัดและวิเคราะห์ข้อมูลลมเชิงสถิติมีความสำคัญต่อการออกแบบกังหันลมให้ได้ประสิทธิภาพและได้งานรายปีสูงสุด ระบบสถิติลมที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ไวบูลล์ (Weibull) และเรย์เลย์ (Rayleigh) ระบบทั้ง 2 นี้ ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง เพราะเป็นเพียงการประมาณการของจริงด้วยเส้นกราฟทางทฤษฎีเท่านั้น จุดประสงค์ของวิจัยนี้คือ การประเมินหาปริมาณความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการใช้ทฤษฎีทางสถิติดังกล่าวเมื่อเทียบกับการวัดจริง โดยการประเมินค่าของการวัดจริงนั้นจะใช้ระบบเส้นตรงเฉียงเฉพาะจุด (Trapezoidal rule) จากนั้นทำการประเมินว่างานกังหันลมรายปีที่ทำนายด้วยสถิติทั้งสามระบบแตกต่างกันมากน้อยเพียงใดโดยใช้ทฤษฎี blade element momentum สถิติลมที่ใช้ในการวิจัยมาจาก 3 จังหวัดคือ ระยอง ชลบุรี และ นครศรีธรรมราช พบว่าอาจเกิดการคลาดเคลื่อนของงานรายปีได้มากถึง 28%

คำหลัก: กังหันลม, ความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติ, งานรายปี, สถิติจำเพาะพื้นที่, กำลังงานสูงสุด

Abstract

Wind statistic measurement and analysis are design keys to maximize wind turbine efficiency and annual yield. The most widely used distribution functions are Weibull's and Rayleigh's distributions. These two systems are subject to some inherent inaccuracies in wind data evaluation, since they are merely theoretical approximations of the real phenomena. Therefore the objective of this study was to evaluate the differences between the statistical representations and the measurement data which were represented by the trapezoidal distribution. Afterward the wind turbine outputs were computed by using the three statistical representations (Weibull, Rayleigh and Trapezoidal distributions) in conjunction with the Blade Element Momentum Theory in order to evaluate the differences in annual energy yields. Three wind statistics from three provinces in Thailand were employed, namely: Chonburi, Rayong and Nakhonsri Thammarat. As much as 28% error in annual energy yield was observed.

Keywords: wind turbine, statistical error, annual power yield, local wind statistic, optimum power output

1. บทนำ

กังหันลมเป็นทางเลือกหนึ่งของการผลิตพลังงานที่ยั่งยืนและสะอาด หากลงทุนติดตั้งกังหันลมในบริเวณที่มีความเร็วลมที่เหมาะสม ผลตอบแทนย่อมคุ้มค่าต่อการลงทุน แต่กังหันลมเชิงการค้าส่วนใหญ่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานในบริเวณที่มีกระแสลมแรงของต่างประเทศ หากนำเข้ากังหันลมเพื่อติดตั้งในประเทศไทยโดยไม่มีการดัดแปลงให้เหมาะสมกับลักษณะความเร็วลมของพื้นที่ ก็อาจไม่คุ้มค่า เพราะกังหันลมที่นำเข้ามาจะทำงานได้เต็มประสิทธิภาพตามที่ออกแบบไว้ได้เพียงไม่กี่วันในหนึ่งปีเท่านั้น เนื่องจากประเทศไทยมีได้อยู่ในภูมิภาคที่มีกระแสลมแรง ดังเช่นประเทศอื่น ๆ ในทวีปยุโรป

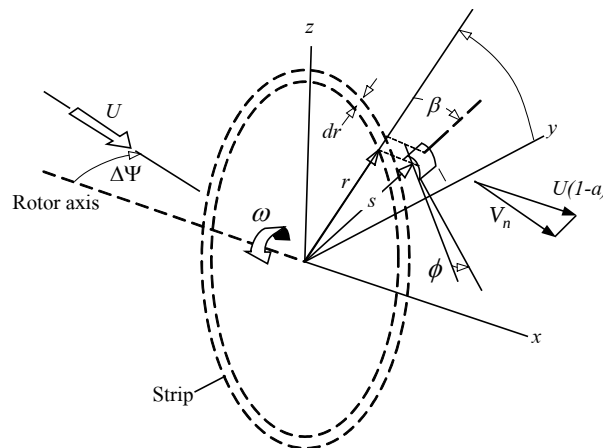
การออกแบบกังหันลมให้เหมาะสมกับลมในแต่ละพื้นที่นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาศักยภาพพลังงานลมเบื้องต้นด้วยหลักการทางสถิติ เพื่อวิเคราะห์ความแรงและความน่าจะเป็น (Probability distribution) ของความเร็วลม ด้วยหลักการซึ่งเป็นที่นิยม เช่น Weibull's distribution และ Rayleigh's distribution อย่างไรก็ตาม การประเมินศักยภาพลมด้วยหลักการทางสถิติ เป็นเพียงการนำทฤษฎีมาประมาณความน่าจะเป็นของพลังงานลม ซึ่งยังคงมีความผิดพลาดเมื่อเปรียบเทียบกับ การประเมินด้วยข้อมูลลมที่ได้จากการวัดจริง สำหรับหลักการประเมินค่าของการวัดจริงนั้นจะกระทำด้วยการแทนค่าข้อมูลลมด้วยวิธีการ Trapezoidal distribution

การเปรียบเทียบผลการประเมินค่าของการวัดจริงกับการประเมินค่าด้วยหลักการทางสถิติจะทำให้ทราบว่าวิธีการใดเหมาะสมที่สุดในการประเมินศักยภาพพลังงานลม ในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบในสองระดับคือ 1) ในระดับของกำลังงานลมตลอดปี และ 2) ในระดับของงานรายปีที่จะได้จากกังหันลมตลอดปี ในการคำนวณงานรายปีนี้จะใช้ทฤษฎี Blade element momentum ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

2. ทฤษฎี blade element momentum (BEM)

เป็นการแบ่งใบกังหันออกเป็นชิ้นย่อย (Strip) แล้วกระจายอิทธิพลออกไปตลอดวงแหวน (Annular ring)

ดังรูปที่ 1 วิธีวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงเส้น (Axial momentum) และโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) ผ่านสตริปซึ่งเป็นหลักการเดียวกันกับหลักการ Actuator disk นั้นเอง



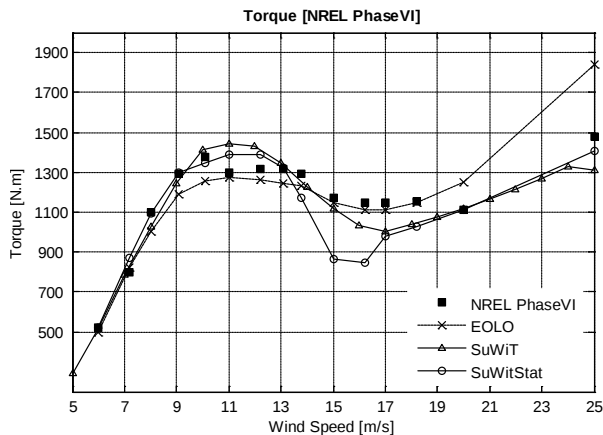
รูปที่ 1 พื้นฐานของทฤษฎี BEM

นอกจากนี้ยังใช้ค่าสัมประสิทธิ์ แรงยก และ แรงดูดของแพนอากาศจากการทดลองเข้ามาร่วมในการคำนวณอีกด้วย ดังนั้นแท้จริงแล้ววิธีการนี้จึงเป็นวิธีการ "กึ่งทฤษฎี" ซึ่งทฤษฎีพื้นฐานยังต้องถูกปรับปรุงด้วยวิธีการต่าง ๆ คือ

- การปรับปรุงค่าเหนี่ยวนำเชิงแกน
- การเพิ่มตัวประกอบการสูญเสียปลายใบและโคนใบ
- แบบจำลองหลังป้อ (Post stall model)
- แบบจำลองการหน่วงการป้อ (Stall delay)

รายละเอียดของทฤษฎีนี้และแบบจำลองการปรับปรุงต่าง ๆ อาจหาได้ในเอกสารอ้างอิง [1-4]

ในงานวิจัยได้ใช้ทฤษฎี BEM พัฒนาโปรแกรม SuWiTstat เพื่อใช้ทำนายงานรายปีของกังหันลมจากสถิติลม รายละเอียดของโปรแกรมนี้สามารถหาได้จากเอกสารอ้างอิง [13-14] ผลการเปรียบเทียบการทำนายของ SuWiTstat กับผลการทดลองและโปรแกรมอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองของกังหันลม NREL Phase VI

2.1 Weibull's Distribution

การออกแบบกังหันลมให้เหมาะสมกับลักษณะลมของพื้นที่ จะต้องเก็บข้อมูลความเร็วลมเป็นรายปีและวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติ เพื่อใช้ในการทำนายงานรายปีที่ผลิตได้และความคุ้มทุนของการติดตั้งกังหันลม ระบบสถิติ Weibull เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในการวิเคราะห์ลม สมการของไวบูล คือ [2]

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

เรียกสมการ (1) ได้ในนาม Weibull probability density function หรือ Weibull PDF ซึ่งแสดงการแจกแจงความน่าจะเป็นของความเร็วลมในช่วงระหว่าง V ถึง $V + dV$

โดยที่ C คือ scale parameter

k คือ shape parameter

กำลังงานลมรายปีจึงคำนวณได้จาก

$$P_{\text{annual}} = 8760 \int_u PDF \cdot P_t dV \quad (2)$$

โดยที่ P_t คือ กำลังงานที่ได้จากกังหันลมที่ค่าความเร็วลมค่าหนึ่ง และ 8760 คือจำนวนชั่วโมงใน 1 ปี

2.2 Rayleigh Distribution

ถือเป็นกรณีพิเศษของ Weibull Distribution เพราะเป็นกรณีที่ $k = 2$ จึงสามารถจัดรูปสมการแจกแจงความน่าจะเป็นให้อยู่ในรูปดังต่อไปนี้

$$PDF(V)dV = 2V/C^2 \exp[-(V/C)^2] dV \quad (3)$$

เรียกสมการ (3) ได้ในนาม Rayleigh probability density function หรือ Rayleigh PDF

2.3 Trapezoidal Distribution

วิธีการนี้เป็นการแทนที่ข้อมูลสถิติลมด้วยระบบเส้นเจียงตรงเฉพาะจุด ในงานวิจัยนี้จะถือว่าระบบนี้เป็นค่าอ้างอิงที่ไม่มีความผิดพลาด

3. ผลลัพธ์และการวิจารณ์

3.1 ข้อมูลลม

สำหรับข้อมูลลม เป็นข้อมูลลมจากสถานีอุตุนิยมวิทยา 3 แห่ง คือ สถานีฯ ชลบุรี (เกาะสีชัง) ระยอง และ นครศรีธรรมราช (อ.ขนอม) การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่วัดได้จากสถานีฯ ทั้งสามแห่ง แสดงในรูปที่ 3 – 5 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมจริงซึ่งคำนวณจากระบบเส้นตรงเจียงเฉพาะจุด เทียบต่อการแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ทำนายจาก Weibull PDF และ Rayleigh PDF

งานลมรายปีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของแต่ละสถานี ๆ สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ (4) และ (5)

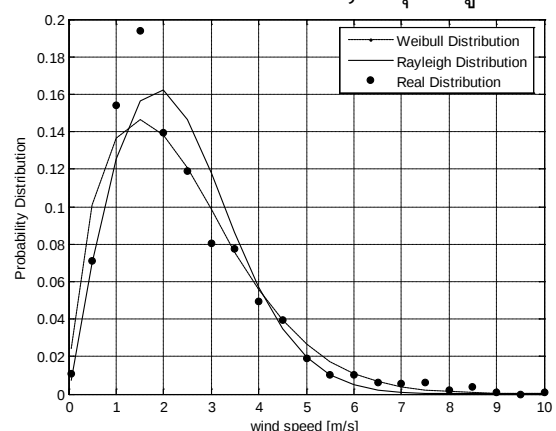
$$P_w(V) = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (4)$$

$$P_{w,\text{annual}} = 8760 \int_u PDF \cdot P_{\text{wind}} dV \quad (5)$$

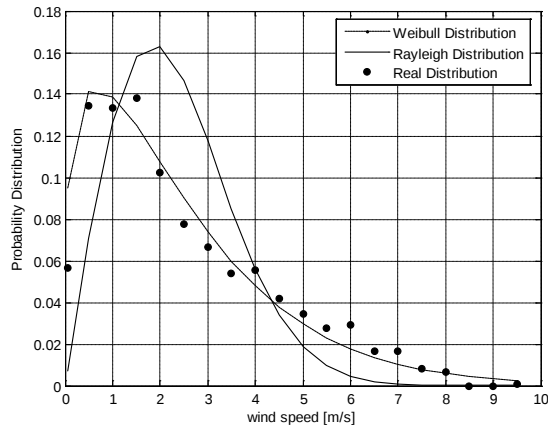
เมื่อ P_w คือ กำลังงานลมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$P_{w,\text{annual}}$ คือ งานลมรายปีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

V คือ ความเร็วลมใด ๆ ในชุดข้อมูลลม

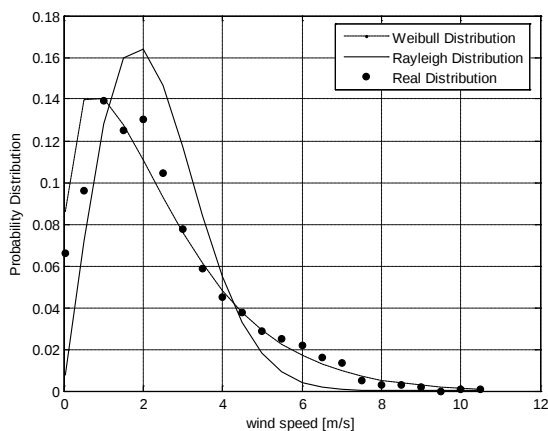


รูปที่ 3 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลม ณ สถานีฯชลบุรี



รูปที่ 4 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลม

ณ สถานีฯ ระยอง



รูปที่ 5 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลม

ณ สถานีฯ นครศรีธรรมราช

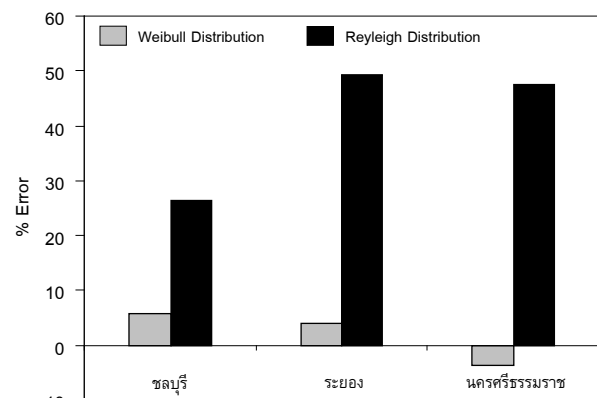
ผลการคำนวณงานลมรายปีของแต่ละสถานีฯ แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยที่ Scale (c) และ Shape parameter (k) ของ Weibull PDF และ Rayleigh PDF แสดงไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งคำนวณโดยฟังก์ชัน wblfit ของ MATLAB ผลลัพธ์ที่ฟังก์ชันนี้ส่งค่าออกมาคือ Weibull parameter (c และ k) ที่สอดคล้องกับการกระจายตัวของข้อมูลลม

เมื่อพิจารณาความผิดพลาดระหว่างข้อมูลจริงกับการทำนายด้วย Weibull PDF และ Rayleigh PDF ในรูปที่ 10 พบว่า Weibull PDF มีความแม่นยำในการทำนายค่างานลมรายปีมากกว่าเพราะมีความ ยืดหยุ่น ในการคำนวณ เนื่องจาก ค่า c และ k ของ Weibull PDF เป็นตัวแปรที่เหมาะสมกับการกระจายตัวของ ข้อมูลลม ในขณะที่ Rayleigh PDF เป็นกรณีพิเศษ

ของ Weibull PDF ที่มีค่า c เท่ากัน และค่า $k = 2$ ดังนั้นความยืดหยุ่นในการคำนวณจึงน้อยกว่านั่นเอง

ตารางที่ 1 งานลมรายปี ณ สถานีฯ ชลบุรี ระยอง และนครศรีธรรมราช

Probability Distribution	งานลมรายปี [kW.h/year]		
	ชลบุรี	ระยอง	นครศรีธรรมราช (อ.ขนอม)
Real Distribution	81.04	114.92	108.27
Weibull Distribution	76.29	110.47	112.26
Rayleigh Distribution	59.52	58.35	56.94

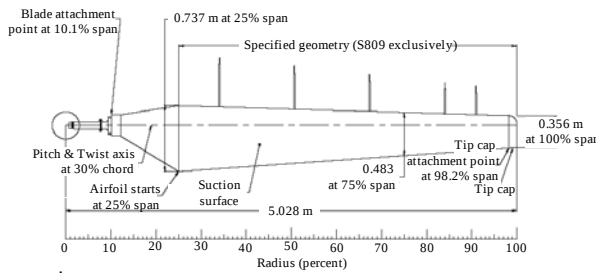


รูปที่ 6 ค่าความผิดพลาดในการทำนายงานลมรายปี

ตารางที่ 2 Scale parameter (c) และ Shape parameter (k)

สถานี	Weibull Distribution		Rayleigh Distribution	
	c	k	c	k
ชลบุรี	5.26	1.64	5.26	2
ระยอง	5.22	1.23	5.22	2
นครศรีธรรมราช (อ.ขนอม)	5.18	1.26	5.18	2

3.2 งานกังหันลมรายปี



รูปที่ 7 รูปร่างและขนาดของกังหันลม NREL Phase VI การวิเคราะห์และทำนายงานกังหันลมในการศึกษานี้ เลือกใช้กังหันลม NREL Phase VI [10] ซึ่งเป็นกังหันลมแบบ 2 ใบ ขนาด 19.8 kW มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10.1 m ความเร็วรอบเท่ากับ 71.63 rpm ที่ความเร็วเชิงโคโรนัส ทำงานที่ความเร็วลมตัดเข้า 6 m/s ใบกังหันลมเป็นแบบบิด (Twist) และมีความสอบ (Taper) ใช้หน้าตัดแพนอากาศ S809 และตั้งค่า $\theta = 0$ องศาที่ปลายใบกังหัน ซึ่งขนาดและรูปร่างของใบกังหันลม NREL Phase VI แสดงไว้ในรูปที่ 7

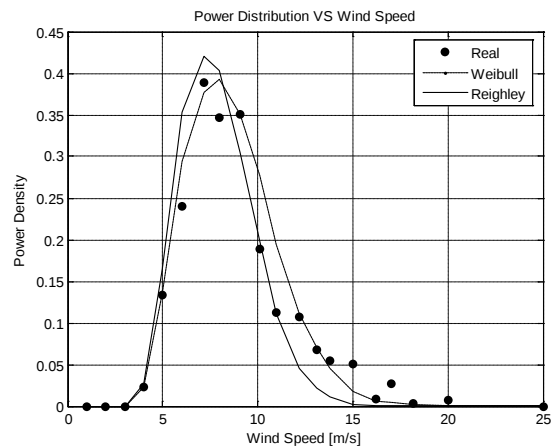
การคำนวณหาพลังงานที่ได้จากกังหันลมใช้โปรแกรม SuWiTstat ผสมเข้ากับข้อมูลลมจริงจากสถานีฯ ทั้งสาม สำหรับช่วงความเร็วลมที่ใช้ในการคำนวณ จะถูกแบ่งจากความเร็วลมต่ำสุด ถึงความเร็วลมสูงสุด โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 m/s ต่อจากนั้นเป็นหน้าที่ของโปรแกรม SuWiTstat ที่จะคำนวณงานกังหันลมรายปี จากการอินทิเกรตผลคูณของกำลังงานกังหันลมที่ความเร็วใด ๆ (สมการ (14)) กับความถี่ของความเร็วลมนั้น (สมการ (13) หรือ (15)) ตลอดทั้งปี ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 8 – 10 เมื่อสังเกตจากเส้นกราฟ พบว่าเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณด้วย Weibull PDF มีความสอดคล้องกับข้อมูลจริงมากกว่าเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณด้วย Rayleigh PDF ตลอดทุกช่วงความเร็วลม

หากพิจารณาการคำนวณงานกังหันลมรายปี ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่างานกังหันลมรายปีที่ใช้ข้อมูลลม สถานีฯ ชลบุรี ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างออกไป คือ งานกังหันลมที่ทำนายด้วย Rayleigh PDF ให้ผลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากกว่า สาเหตุเนื่องจากในกรณีนี้ ผลการคำนวณด้วย Rayleigh PDF สอดคล้องกับข้อมูลจริง ในช่วงความเร็วลม 5 – 11 m/s ซึ่งถือ

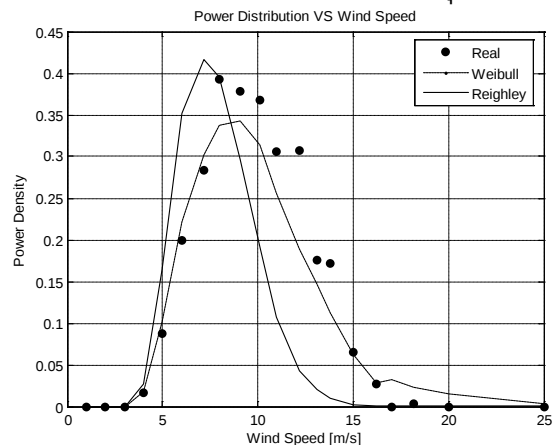
ว่าเป็นช่วงความเร็วหวังผล เพราะความเร็วช่วงนี้มีความถี่สูง จึงมีผลกระทบต่อความถูกต้องของการคำนวณงานกังหันลมรายปี ซึ่งมีความถี่ของความเร็วลมเป็นตัวแปรสำคัญ

ตารางที่ 3 งานกังหันลมรายปี ณ สถานี ชลบุรี ระยอง และนครศรีธรรมราช

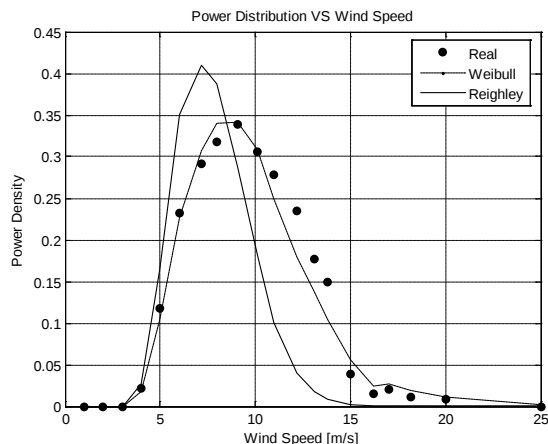
Probability Distribution	งานกังหันลมรายปี [MW.h/year]		
	ชลบุรี	ระยอง	นครศรีธรรมราช (อ.ชนอม)
Real Distribution	2.81	3.71	3.41
Weibull Distribution	3.07	3.33	3.28
Rayleigh Distribution	2.75	2.7	2.64



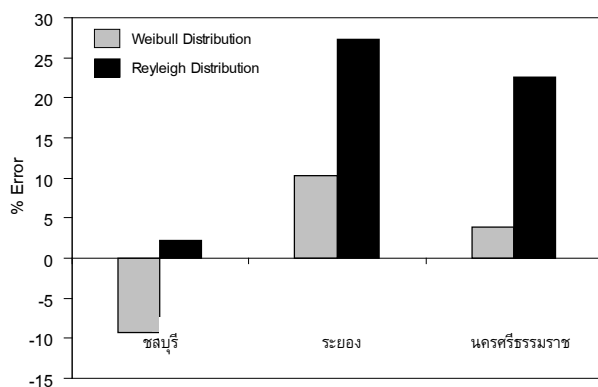
รูปที่ 8 การแจกแจงกำลังงานของกังหันลมเทียบกับความเร็วลม ณ สถานีฯ ชลบุรี



รูปที่ 9 การแจกแจงกำลังงานของกังหันลมเทียบกับความเร็วลม ณ สถานีฯ ระยอง



รูปที่ 10 การแจกแจงกำลังงานของกังหันลมเทียบกับ
ความเร็วลม ณ สถานี นครศรีธรรมราช



รูปที่ 11 ค่าความผิดพลาดในการทำนาย
งานกังหันลมรายปี

4. สรุป

ในภาพรวมการทำนายงานลมรายปีของข้อมูลลมจากสถานี ชลบุรี ระยอง และนครศรีธรรมราช ด้วย Weibull PDF ให้ความแม่นยำสูงกว่าการทำนายด้วย Rayleigh PDF สำหรับการวิเคราะห์งานกังหันลมรายปี พบว่า Rayleigh PDF ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงข้อมูลจริง เฉพาะกรณีข้อมูลลมของ สถานี ชลบุรี ส่วน Weibull PDF ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงข้อมูลจริง ในกรณีข้อมูลลมของสถานี ระยอง และนครศรีธรรมราช

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 BEM theory". Renew Energy (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,”
- [13] วิกันดา ศรีเดช และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ การออกแบบกังหันลมให้สอดคล้องกับสถิติลมจำเพาะพื้นที่, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
- [14] วิกันดา ศรีเดช และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, มุมเห็นที่ดีที่สุดของใบกังหันลมสำหรับสถิติลมจำเพาะพื้นที่, การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4, มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม