

การออกแบบใบกังหันชนิดความเร็วรอบคงที่เพื่อให้ได้งานรายปีสูงสุด
ภายใต้สถิติลมจำเพาะพื้นที่

The design of stall-regulated wind turbine blade for a maximum annual energy
output based on a specific wind statistic

วิกันดา ศรีเดช¹, ชโลธร ธรรมแท้¹ และ ทวีช จิตรสมบูรณ์^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: E-mail, tabon@sut.ac.th

บทคัดย่อ

การออกแบบกังหันลมชนิดความเร็วรอบคงที่เพื่อให้ได้งานรายปีสูงสุดยังคงเป็นงานออกแบบที่ยังยาก โดยทั่วไปมักเลือกที่จะออกแบบที่ความเร็วลมเฉลี่ยตลอดทั้งปีร่วมกับหลักการพื้นฐานทางสถิติแบบไวบูล โดยเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ระดับ $k = 2$ ในการศึกษาจะทำการออกแบบที่ซับซ้อนมากขึ้นรวมทั้งพิจารณาความเบ้ของเส้นกราฟสถิติเพื่อเป็นเกณฑ์ในการออกแบบ สำหรับข้อมูลลมที่ใช้เป็นข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จากสถานีวัดลมลำตะคอง จ.นครราชสีมา สำหรับวัตถุประสงค์ของการศึกษาคือ การออกแบบใบกังหันที่ดีที่สุด โดยใช้แผนอากาศ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกับกังหันลม NREL Phase VI โดยจะทำการออกแบบที่ความเร็วลมหนึ่งจุดเพื่อให้ได้ใบกังหันที่มีประสิทธิภาพสูงสุด หลังจากนั้นจะใช้โปรแกรม SuWiTStat ที่พัฒนาขึ้นภายใต้หลักการของทฤษฎี BEM (Blade Element Momentum Theory) เพื่อค้นหาจุดทำงานที่ทำให้ได้งานรายปีสูงสุด นอกจากนั้นยังได้นำหลักการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) มาเป็นเครื่องยืนยันความน่าเชื่อถือของเส้นกราฟสถิติของไวบูล ว่ามีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นตัวแทนข้อมูลลมจริง

คำหลัก: การออกแบบใบกังหัน งานรายปี สถิติลมจำเพาะพื้นที่ กำลังงานที่เหมาะสม

Abstract

The design of a stall-regulated wind turbine to achieve a maximum annual energy output is still a formidable task for engineers. The design could be carried out using an average wind speed together with a standard statistical distribution such as a Weibull with $k = 2.0$. In this study a more elaborated design will be attempted by also considering the statistical bias as a design criterion. The wind data used in this study were that of the Lamtakong Weather Station in Nakhonratchasima Province, Thailand. The objective is to design a best aerodynamic configurations for the blade (chord, twist and pitch) using the same airfoil as that of NREL Phase VI wind turbine. Such design is carried out at a design wind speed point. After that other design points will be employed in order to compare to obtain a maximum annual energy output. The work will be carried out by the program "SuWiTStat" which was developed by the authors and based on BEM (Blade Element Momentum Theory). Another side issue is the credibility of the Weibull statistic in representing the real wind measurement. This study uses a regression analysis to determine this issue.

Keywords: wind turbine blade design, annual power yield, local wind statistic, optimum power output

1. บทนำ

การออกแบบกังหันลมชนิดความเร็วรอบคงที่ให้ได้ประสิทธิภาพสูงเป็นศาสตร์ที่ค่อนข้างซับซ้อน ส่วนใหญ่กังหันลมชนิดนี้จะเป็นกังหันขนาดกลางถึงเล็กเหมาะกับการติดตั้งเพื่อใช้งานในบ้านเรือน หรือในพื้นที่ห่างไกล แต่ทว่ามีความท้าทายที่ต่ำเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีระบบควบคุมความเร็วรอบ และระบบควบคุมการปรับมุมเฟิน ดังนั้นในพื้นที่ที่มีความเร็วลมเฉลี่ยไม่สูงมากนัก การติดตั้งกังหันลมชนิดความเร็วรอบไม่คงที่ จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพียงแต่จะต้องออกแบบให้ใบกังหันมีประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์สูงที่สุด เมื่อทำงานภายใต้สภาวะลมในพื้นที่ติดตั้ง

อีกหนึ่งปัจจัยหลักสำหรับการออกแบบใบกังหันที่เหมาะสมกับสถิติลมเฉพาะพื้นที่ คือ คุณภาพของความเร็วลมตรวจวัดของพื้นที่นั้น ๆ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคุณภาพของข้อมูลมีหลายปัจจัย เช่น ระยะเวลาที่ทำการตรวจวัด (รายสัปดาห์ รายเดือน หรือรายปี) ความถี่ของการตรวจวัด รวมถึงคุณภาพของเครื่องมือวัดลม เป็นต้น ข้อมูลที่ดีควรมีระยะเวลาในการตรวจวัดอย่างน้อย 2 ปี [1] สำหรับความถี่ในการตรวจวัดขึ้นอยู่กับความละเอียดของเครื่องมือวัดลม ส่วนใหญ่จะเป็นความเร็วลมรายนาฬิกา จากนั้นจะนำมาเฉลี่ยเป็นความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมง เพื่อลดทอนจำนวนข้อมูลให้เหมาะแก่การวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป

2. ข้อมูลลมที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลลมที่ใช้ในบทความนี้เป็นข้อมูลลมที่วัดได้จาก สถานีวัดลมลำตะคอง จ.นครราชสีมา ตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 ถึง พ.ศ.2551 ณ ตำแหน่ง ละติจูดที่ $14^{\circ}47'58''\text{N}$ ลองจิจูดที่ $101^{\circ}33'32.2''\text{E}$ ที่ระดับความสูง 661 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล ซึ่งได้รับการ

สนับสนุนข้อมูลลมจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

2.1 การวิเคราะห์สถิติลมจริง

การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ได้จากการวัด นิยมแสดงผลในรูปแบบภูมิแท่ง ที่มีความกว้างช่วงความเร็วลม (Bin width) เท่ากับ 1 m/s [2] สำหรับความถี่ของความเร็วลมในแต่ละช่วง คำนวณได้จากสมการ (1)

$$f_H(v) = \frac{\sum_{i=1}^n A_{I_k}(V_i)}{n.W}, \quad v \in I_k \quad (1)$$

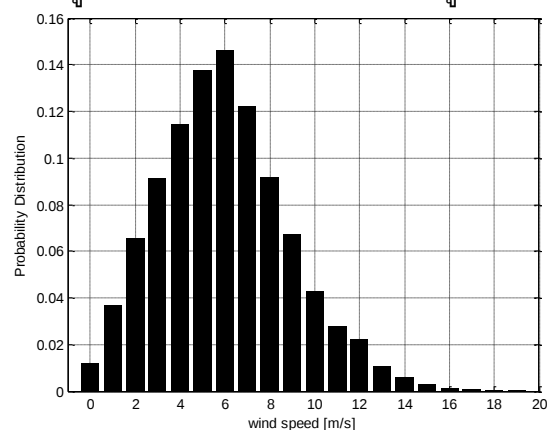
เมื่อ n คือ จำนวนทั้งหมดของข้อมูลลมเฉลี่ยรายชั่วโมง

I_k คือ ช่วงความเร็วลมใด ๆ

$A_{I_k}(v)$ คือ ค่าดัชนีในช่วงความเร็วลม I_k หากความเร็วลม v อยู่ในช่วง I_k จะทำให้ $A_{I_k} = 1$ หาก v ไม่อยู่ในช่วง I_k แล้ว $A_{I_k} = 0$

W คือ ความกว้างของช่วงความเร็วลม

เมื่อนำความเร็วลมที่ตรวจวัดมาคำนวณหาความถี่ของแต่ละช่วงความเร็วลม จากสมการ (1) จะได้แผนภูมิแท่งของการแจกแจงความถี่ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภูมิแท่งการแจกแจงความถี่ของความเร็วลมตรวจวัด ที่สถานีวัดลมลำตะคอง จ.นครราชสีมา

3. การวิเคราะห์สถิติลมด้วยสมการการแจกแจงของไวบูลล์

ลักษณะของสถิติลม โดยทั่วไปจะมีลักษณะใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบไวบูลล์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2)

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (2)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วลม (m/s)

k คือ พารามิเตอร์ระดับ

c คือ พารามิเตอร์รูปร่าง (m/s)

$$k = \left(\frac{\sigma_V}{\bar{V}} \right)^{-1.086}$$

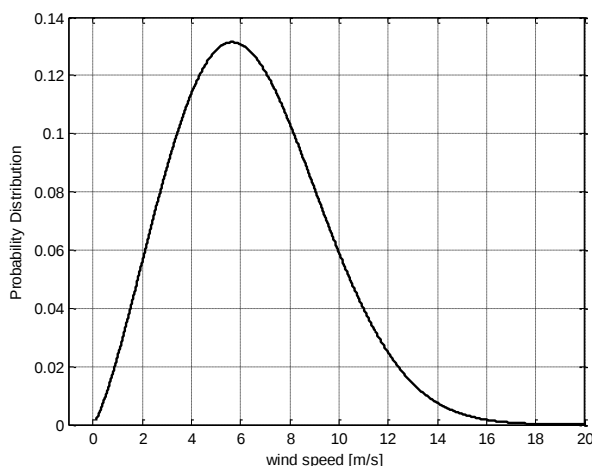
$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma(1+1/k)}$$

และ $\bar{V}$ คือ ความเร็วลมเฉลี่ยคำนวณได้จาก

$$\bar{V} = c\Gamma(1+1/k)$$

เมื่อ $\Gamma(x)$ คือ แกมมาฟังก์ชันคำนวณได้จาก

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt$$



รูปที่ 2 กราฟการแจกแจงความถี่ของความเร็วลม
ตรวจวัดในรูปแบบการแจกแจงแบบไวบูลล์
ที่สถานีวัดลมลำตะคอง จ.นครราชสีมา

จากสถิติลมที่ตรวจวัดจากสถานีวัดลมลำตะคอง เมื่อนำมาวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสถิติ ด้วยสมการการแจกแจงแบบไวบูลล์ จะได้เส้นกราฟสถิติลม ดังรูปที่ 2 โดยมีพารามิเตอร์ทางสถิติดังตารางที่ 1 สำหรับค่า R^2 สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - \hat{p}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2} \quad (3)$$

เมื่อ p_i คือ ความน่าจะเป็น ซึ่งได้จากการตรวจวัด

$\hat{p}_i$ คือ ความน่าจะเป็นที่คำนวณได้จากสมการการแจกแจงแบบไวบูลล์

$\bar{p}$ คือ ค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นจากการตรวจวัดทั้งหมด

จากการคำนวณพบว่า $R^2 = 0.9628$ ตามหลักการวิเคราะห์การถดถอย ถือว่า R^2 ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 บ่งบอกได้ว่า เส้นกราฟสถิติที่ได้จากสมการการแจกแจงแบบไวบูลล์สามารถทำนายความน่าจะเป็นของแต่ละความเร็วลมได้ 96.28% สรุปได้ว่าเส้นกราฟสถิติมีความน่าเชื่อถือ เหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำนายความน่าจะเป็นของความเร็วลม ณ สถานีวัดลมลำตะคอง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ทางสถิติของความเร็วลม
ตรวจวัด ณ สถานีวัดลมลำตะคอง

c	7.2427 m/s
k	2.3173
Variance	8.6374
mean	6.4170 m/s
$\sqrt[3]{(V^3)}$	9.4700 m/s
R^2	0.9628

4. การออกแบบกังหันลมที่ดีที่สุด

การออกแบบกังหันลม ส่วนใหญ่ยึดหลักการออกแบบภายใต้ทฤษฎี Blade Element Momentum (BEM) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ง่ายและให้ผลการคำนวณที่ค่อนข้างแม่นยำ ในการศึกษาจะใช้โปรแกรม SuWiTStat [4] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาภายใต้หลักการของทฤษฎี BEM และเน้นออกแบบกังหันลมควบคู่กับสถิติลมจำเพาะพื้นที่ ในการศึกษาใช้ความเร็วลมออกแบบเท่ากับ 9.47 m/s ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ให้พลังงานสูงสุดในช่วงเวลาตลอดทั้งปี และใช้กังหันลม NREL Phase VI [3] เป็นกังหันลมต้นแบบ ซึ่งมีพิกัดกำลังงาน (Rated power) เท่ากับ

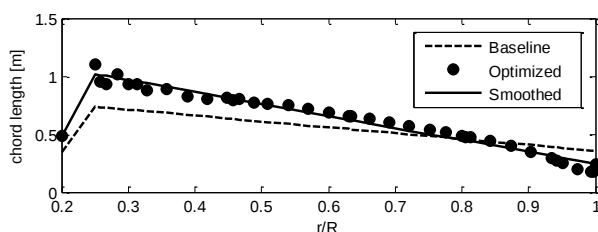
19.8 kW มีจำนวนใบกังหัน 2 ใบ ลักษณะใบเป็นแบบใบบิด (Twist) และมีความสอบ (Taper) ดังนั้นตัวแปรที่เป็นเป้าหมายของการออกแบบ คือ ความยาวคอร์ด มุมบิด และ มุมเอน ซึ่งโปรแกรมจะทำการค้นหาความยาวคอร์ด มุมบิด และ มุมเอน ที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่ว่า สัมประสิทธิ์กำลังของแต่ละอิลิเมนต์จากหลักการของ BEM จะต้องมีความสูงที่สุด สามารถคำนวณได้จากสมการ (4)

$$C_{P,r} = dP_r / V_d^3 \rho \pi r dr \quad (4)$$

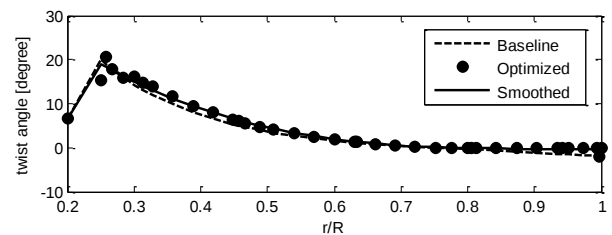
โดยที่

$$dP_r = \frac{1}{2} \rho N V_d^2 r C \Omega (C_L \sin \phi_r - C_D \cos \phi_r) dr$$

ผลลัพธ์ที่ได้ คือ ใบกังหันที่เหมาะสม จะมีความยาวคอร์ด และมุมบิดตลอดความยาวของใบ ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ สำหรับความไม่ต่อเนื่องของจุดเหมาะสมที่โปรแกรมทำการค้นหา มีสาเหตุมาจากการกำหนดจำนวน และระยะห่างระหว่างจุดที่จะทำการค้นหาในแต่ละอิลิเมนต์ หากเพิ่มจำนวนจุดในการค้นหามากขึ้น จะทำให้ได้ใบกังหันที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น แต่ผลเสียคือ ทำให้ใช้เวลานานขึ้นในการคำนวณ เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปผลิตเป็นใบจริง จึงได้สร้างเส้นแนวโน้มที่สอดคล้องกับจุดเหมาะสม ทำให้ได้ใบกังหันที่สมจริงและเหมาะสมมากยิ่งขึ้น (Smoothed blade) เห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่เพิ่มขึ้นจากกังหันลมต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 5 และเส้นกราฟกำลังงานที่ความเร็วลมต่าง ๆ ของกังหันลมที่เหมาะสมเทียบกับกังหันลมต้นแบบ ได้แสดงในรูปที่ 6 สำหรับการนำเสนอผล จะเลือกนำเสนอเฉพาะผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ Smoothed blade



รูปที่ 3 ความยาวคอร์ดที่ดีที่สุดเทียบกับความยาวคอร์ดของใบต้นแบบ

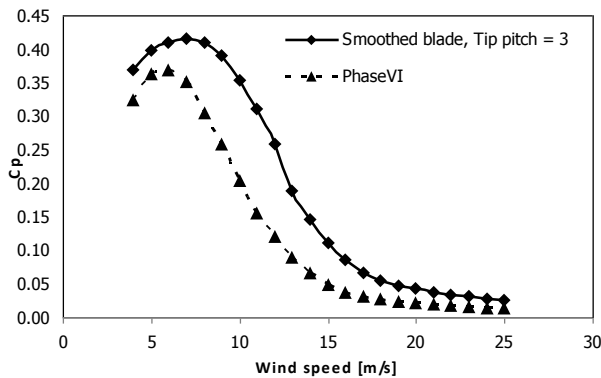


รูปที่ 4 มุมบิดที่ดีที่สุดเทียบกับมุมบิดของใบต้นแบบ

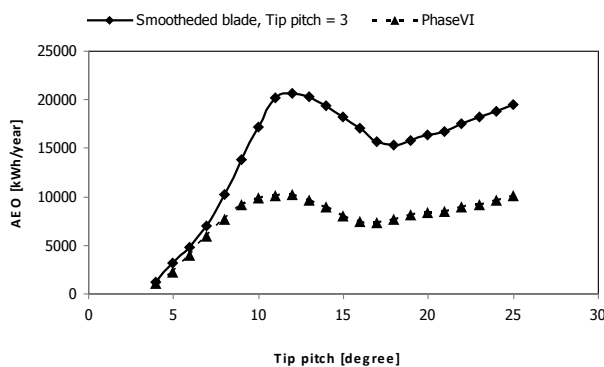
เนื่องจากใบกังหันถูกออกแบบที่ความเร็วลมออกแบบเพียงหนึ่งจุด หากทำงานภายใต้สภาวะจริงซึ่งความเร็วลมจะมีความผันผวนตลอดเวลา ดังนั้นกังหันลมดังกล่าวจะต้องถูกปรับให้เหมาะสมกับลักษณะของลมในพื้นที่ที่ทำการติดตั้ง ด้วยการวิเคราะห์ภายใต้หลักการทางสถิติ พบว่าเมื่อกังหันลมต้นแบบทำงานภายใต้สถิติลมจากสถานีวัดลมลำตะคอง จะสามารถผลิตงานรายปี (AEO) ได้สูงสุดถึง 62.04 MW.h/year ที่มุมเอนเท่ากับ 3 องศา ดังรูปที่ 7 ในขณะที่กังหันลมต้นแบบสามารถผลิตงานรายปีได้ 40.96 MW.h/year ซึ่งต่ำกว่าถึง 51.48 % ทำให้เห็นถึงแนวโน้มของกำไรที่เพิ่มขึ้นหากเลือกติดตั้งกังหันลมที่เหมาะสมกับสถิติลมของพื้นที่

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณในด้านสมรรถนะของกังหันลมที่ดีที่สุด และกังหันลมต้นแบบ

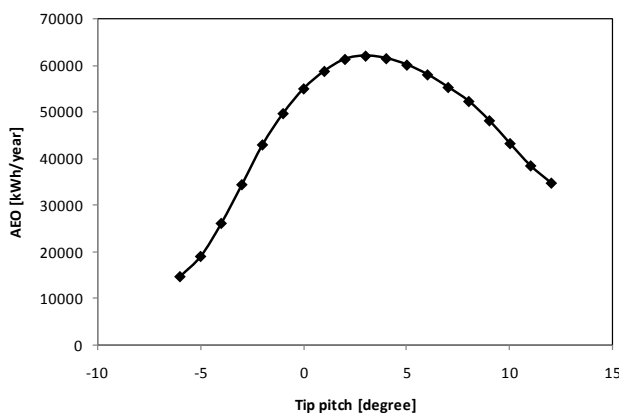
	AEO [MW.h/year]
Original	40.96
Optimized	63.51
Smoothed	62.04



รูปที่ 5 เส้นกราฟสัมประสิทธิ์กำลังที่
ความเร็วลมต่าง ๆ



รูปที่ 6 เส้นกราฟกำลังงานที่ความเร็วลมต่าง ๆ ของ
กังหันลมที่เหมาะสมเทียบต่อกังหันลมต้นแบบ



รูปที่ 7 งานรายปีที่กังหันลมที่เหมาะสมสามารถผลิต
ได้ ที่แปรผันตามมุมเอนที่เปลี่ยนไป

5. สรุปผล

การนำเข้ากังหันลมจากต่างประเทศ ซึ่งถูกออกแบบที่ความเร็วลมเฉลี่ยค่อนข้างสูง หากนำเข้ามาใช้ในประเทศไทย แน่นอนว่ากังหันลมนั้นย่อมทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพเท่าที่ควร ดังนั้นแนวคิดในการออกแบบใบกังหันเองเพื่อใช้ในประเทศไทยจึงเป็นทางออก

ที่ดีทั้งในด้านของการลดต้นทุนในการนำเข้าจากต่างประเทศ และในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลม จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า กังหันลมที่ถูกออกแบบให้เหมาะสมกับสถิติลมของ จ.นครราชสีมา จะสามารถผลิตงานรายปีได้เพิ่มขึ้นถึง 51.48 % ในขณะที่สัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดเพิ่มขึ้น 12.13 % อย่างไรก็ดี ในศึกษานี้ยังไม่ได้คำนึงถึงการเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความเร็วลมที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะมีผลต่อความเร็วรอบของกังหันลม และงานที่กังหันลมจะสามารถผลิตได้เพิ่มขึ้น ประเด็นนี้จะเป็นหัวข้อที่จะการศึกษาต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลลมสำหรับทำการศึกษา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. A. Spera, Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, New York: ASME Press, 1994
- [2] J. Cartar, P. Ramirez and S. Velazquez, Influence of the level of fit of a density probability function to wind-speed data on the WECS mean power output estimation. Energy Conversion and Management 2008, 49: 2647-2655
- [3] The National Renewable Energy Laboratory (NREL), "Wind Resource Assessment Handbook" April, 1997.
- [4] วิกันดา ศรีเดช และ ทวีช จิตรสมบุญ (2551). การออกแบบกังหันลมให้สอดคล้องกับสถิติลมจำเพาะพื้นที่, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดปทุมธานี