

บทที่ 2

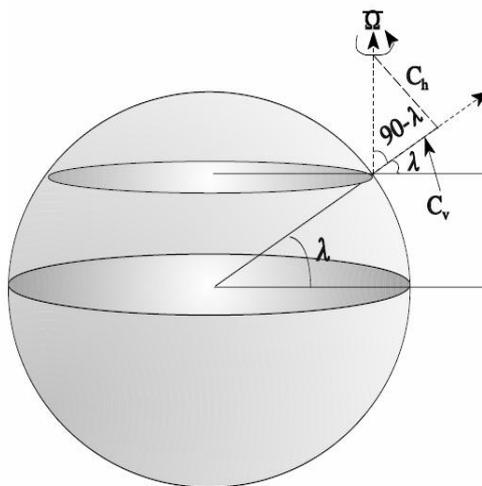
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 ลม

ลม คือ กระแสอากาศที่เคลื่อนที่ในที่แนวนอน ส่วนความกดอากาศ คือ อากาศที่เคลื่อนที่ในแนวตั้ง การเรียกชื่อลมนั้นเรียกตามทิศทางลมนั้นๆ พัดมา เช่น ลมที่พัดมาจากทิศเหนือเรียกว่า ลมเหนือ และลมที่พัดมาจากทิศใต้เรียกว่าลมใต้ โดยการเกิดลมมาจากปรากฏการณ์ของอากาศที่มีการเคลื่อนไหว โดยเกิดจากความแตกต่างของความดันอากาศหรือความร้อนสองจุดบนผิวโลก โดยลมจะพัดจากบริเวณที่มีความดันอากาศสูงไปยังบริเวณที่มีความดันอากาศต่ำ โดยกระแสการไหลของลมจะหยุดเมื่อความดันของสองจุดมีค่าเท่ากัน อย่างไรก็ตามการไหลของลมจะเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากแรงโคริโอลิส (coriolis acceleration) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของโลกเป็นสาเหตุให้การไหลจากศูนย์สูตรไปยังขั้วโลกมีการเบี่ยงเบนไปทางด้านทิศตะวันออกและการไหลกลับไปยังศูนย์สูตรมีการเบี่ยงเบนไปทางด้านทิศตะวันตกซึ่งทำให้เกิดลมนั่นเอง

แรงโคริโอลิส (coriolis acceleration) สามารถได้มาจากภาพที่ 2.1 เมื่อ λ คือ ละติจูดของพื้นที่ที่ทำการศึกษ้อัตราการหมุนของโลก (Ω) มี 3 องค์ประกอบได้แก่ องค์ประกอบของ East-West องค์ประกอบของ North-South (C_h) และองค์ประกอบตามแนวตั้ง (C_v) แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แรงโคริโอลิส

(ที่มา: http://www.ccpo.odu.edu/~arnoldo/ocean405/conserv_moment.pdf, 2552)

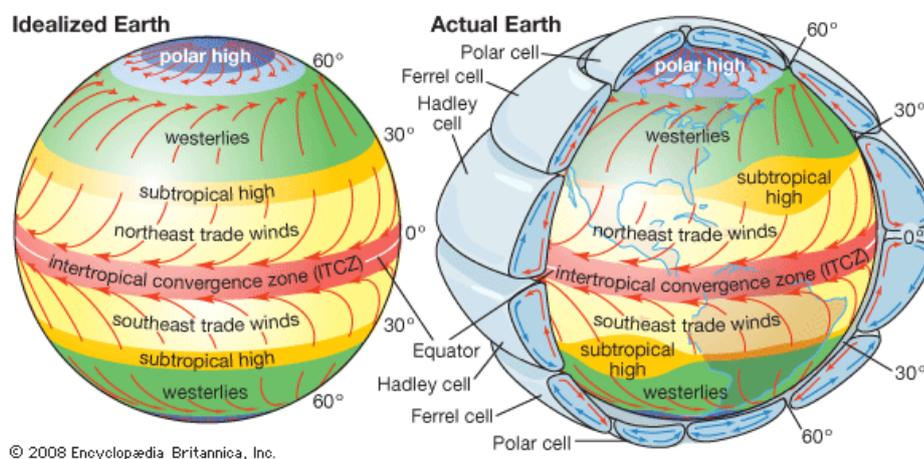
จะเห็นว่าองค์ประกอบของ East-West เป็นศูนย์ และองค์ประกอบของ North-South เท่ากับ $|\bar{\Omega}|\sin(90^\circ - \lambda) = |\bar{\Omega}|\cos \lambda$ ส่วนองค์ประกอบตามแนวตั้ง (C_v) เท่ากับ $|\bar{\Omega}|\cos(90^\circ - \lambda) = |\bar{\Omega}|\sin \lambda$ เมื่อ $\bar{\Omega} = (0, \Omega \cos \lambda, \Omega \sin \lambda)$ ดังนั้นแรงโคริโอลิสแสดงดังสมการที่ (2.1) มีสามองค์ประกอบดังต่อไปนี้

$$2\bar{\Omega} \times \bar{u} = (2\Omega \cos \lambda w - fv, fu, -2\Omega \cos \lambda u) \dots \dots \dots (2.1)$$

พารามิเตอร์ $f = 2\Omega \sin \lambda$ เรียกว่าพารามิเตอร์ Coriolis $\Omega = |\bar{\Omega}|$ คือ อัตราการหมุนของโลก ซึ่งก็คือ ความเร็วที่โลกหมุนหนึ่งรอบใน 24 ชั่วโมง $\Omega = 2\pi / (24h \times 3600 \text{sec}) = 7.27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ เราจะใช้ Ω เป็นค่าคงที่ถึงแม้จะมีแนวโน้มที่จะแตกต่างกันไปเล็กน้อยดังสมการ (2.1) มีความสมบูรณ์รูปของเทอม Coriolis ของสมการการเคลื่อนที่

รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้น โลกจะก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ในสเกลขนาดใหญ่ของบรรยากาศ (superimposed) โดยที่การเปลี่ยนแปลงในระดับท้องถิ่นเกิดขึ้นเนื่องจากหลายๆ ปัจจัย อากาศบริเวณศูนย์สูตรจะได้รับความร้อนมากกว่าและมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่นๆ และจะลอยตัวสูงขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นต่ำกว่า อากาศบริเวณขั้วโลกซึ่งเย็นกว่าและหนักกว่าก็จะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ อากาศร้อนบริเวณศูนย์สูตรจะเคลื่อนที่ไปทางขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ และจะหยุดการเคลื่อนที่ดังกล่าวบริเวณ 30 องศาเหนือ และ 30 องศาใต้ ซึ่งเป็นบริเวณที่อากาศจมตัวลงและเวียนกลับไปแทนที่อากาศร้อน ความเร่งเนื่องจากแรงโคริโอลิส (coriolis acceleration) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของโลกเป็นสาเหตุให้การไหลจากศูนย์สูตรไปยังขั้วโลกมีการเบี่ยงเบนไปทางด้านทิศตะวันออกและการไหลกลับไปยังศูนย์สูตรมีการเบี่ยงเบนไปทางด้านทิศตะวันตกซึ่งทำให้เกิดลมสินค้า (trade wind) นั่นเอง (Johnson: 2001: 2-7)

เหนือบริเวณ 30 องศาเหนือ และ 30 องศาใต้ การไหลเวียนของบรรยากาศจะมีคุณลักษณะตามลมเวสเทอร์ลี (westerly wind) การเคลื่อนที่ในระดับมหภาคทั่วไป (general large-scale motion) ของบรรยากาศ (Johnson: 2001: 2-7) แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การไหลเวียนทั่วไปของบรรยากาศเหนือพื้นผิวของโลก
(ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2551)

2.1.2 คุณลักษณะของลม

กำลังลมเป็นอัตราส่วนกับอัตราเร็วลมยกกำลังสาม ดังนั้นการประเมินศักยภาพของพลังงานลมให้มีความถูกต้องแม่นยำเพื่อศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับคุณลักษณะของลมอย่างละเอียด เป็นที่ทราบกันดีว่าอัตราเร็วลมที่มีค่ามาก ๆ นั้นมักจะพบบริเวณเนินเขา แนวชายฝั่งทะเลและนอกทะเล พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบสำหรับการวิเคราะห์ศักยภาพของพลังงานลม ได้แก่ อัตราเร็วลมเฉลี่ย (mean wind speed) ข้อมูลเชิงทิศทาง (directional data) การเปลี่ยนแปลงรายวัน (daily variation) การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (seasonal variation) การเปลี่ยนแปลงรายปี (annual variation) และการเปลี่ยนแปลงเทียบกับความสูง ข้อมูลดังกล่าวข้างต้นมักจะมีค่าเฉพาะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดและระยะเวลาในการเก็บบันทึกข้อมูล ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกใช้ในการประเมินสมรรถนะและเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าพลังงานลม (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2551)

2.1.3 อิทธิพลระดับท้องถิ่น

การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมใกล้พื้นโลกผิวประมาณ 100 เมตร มีความสำคัญสำหรับการเปลี่ยนรูปแบบของลม (wind pattern) ในระดับความสูงนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายๆ ปัจจัย

ลมบก-ลมทะเล (land-sea breeze) เป็นตัวอย่างของอิทธิพลระดับท้องถิ่น ในเวลากลางวันพื้นดินได้รับความร้อนและมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นผิวน้ำทะเล ด้วยเหตุนี้ทำให้อากาศใกล้พื้นดินลอยตัวสูงขึ้นเป็นผลให้เกิดบริเวณความกดอากาศต่ำ (low pressure region) และเหนี่ยวนำให้อากาศเย็นเหนือทะเลเคลื่อนที่เข้ามาแผ่นดินและเรียกลมชนิดนี้ว่าลมทะเล (sea breeze) ในเวลากลางคืน

กระบวนการดังกล่าวเกิดการย้อนกลับโดยพื้นดินเย็นตัวได้เร็วกว่าน้ำทะเล ดังนั้นลมจะมีทิศทางจากพื้นดินไปยังทะเลและเรียกลมชนิดนี้ว่าลมบก (land breeze) (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน: 2544: 11)

ในพื้นที่บริเวณหุบเขา อากาศเหนือพื้นผิวจะได้รับความร้อนและลอยตัวสูงขึ้นไปตามความชันของแนวเขาในระหว่างกลางวัน ซึ่งอากาศส่วนนี้จะถูกแทนที่ด้วยอากาศที่เย็นกว่าทำให้เกิดลมหุบเขา (valley wind) ส่วนในเวลากลางคืนอากาศจะไหลจากภูเขาไปยังหุบเขาซึ่งเรียกว่าลมภูเขา (mountain wind) ปรากฏการณ์นี้อาจจะทำให้เกิดกระแสอากาศที่มีกำลังแรงและพัฒนาไปเป็นลมที่มีกำลังสูงได้ แรงเฉือนลม (wind shear) ความปั่นป่วน (turbulence) และความเร่ง (acceleration) เหลือเกินเป็นตัวอย่างของอิทธิพลลมท้องถิ่น (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2544)

2.1.4 สถิติลม

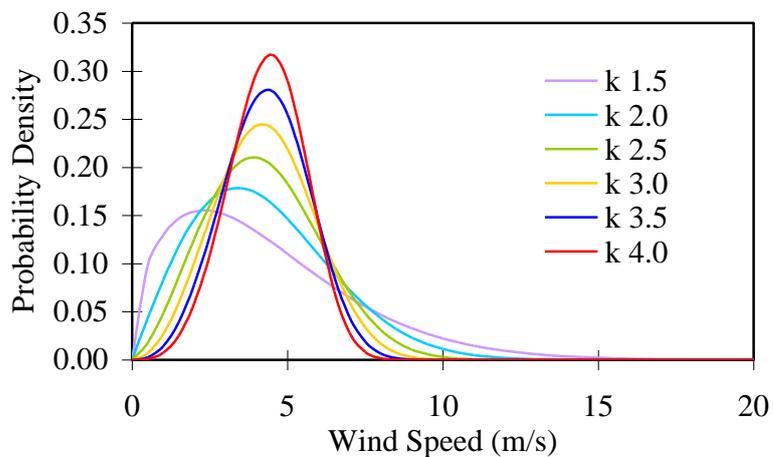
การแจกแจงไวบูลล์เป็นการแจกแจงทางสถิติ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว ที่สามารถใช้แทนลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลสถิติลม และเป็นการแจกแจงที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลสถิติลม การแจกแจงไวบูลล์ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว ได้แก่

2.1.4.1 พารามิเตอร์รูปร่าง (shape parameter, k -shape)

พารามิเตอร์รูปร่างเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะการกระจายของสถิติลม ในบริเวณที่มีค่า V ต่ำ แสดงว่าในบริเวณนั้นมีความเร็วลมต่ำพัดบ่อยครั้งกว่าความเร็วลมสูง และในกรณีที่มีค่า V สูง ก็จะแสดงผลที่ตรงกันข้ามกัน ภาพที่ 2.3 แสดงการแจกแจงไวบูลล์เมื่อค่า k มีค่าต่างกัน

2.1.4.2 พารามิเตอร์สเกล (scale parameter, c -scale)

พารามิเตอร์สเกลเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วลมเฉลี่ย เมื่ออัตราเร็วลมเฉลี่ยมีค่าสูง c จะมีค่าสูง และเมื่ออัตราเร็วลมเฉลี่ยต่ำค่า c จะมีค่าต่ำด้วย



ภาพที่ 2.3 การแจกแจงไวบูลล์เมื่อค่า k มีค่าต่างกัน ($c = 4.0 \text{ m/s}$)

การแจกแจงไวบูลล์เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function) แบบหนึ่งที่สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 2.2 (Sethyajith Mathew, 2005)

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (2.2)$$

อัตราเร็วลมเฉลี่ยพิจารณาได้จากสมการที่ 2.3

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} V f(V) dV \quad (2.3)$$

จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วลมกับไวบูลล์พารามิเตอร์ คือ

$$\bar{V} = c \int_0^{\infty} \left(\frac{V}{c} \right) \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] d \left(\frac{V}{c} \right)^k \quad (2.4)$$

จากสมการดังกล่าว สามารถเขียนสมการใหม่ให้อยู่ในรูปแกมมาฟังก์ชัน (Gamma function, Γ) โดยรูปแบบทั่วไปของฟังก์ชัน คือ

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} X^{n-1} \exp[-X] dX \quad (2.5)$$

แทนค่า $X = \left(\frac{V}{c}\right)^k$ และ $n = \left(1 + \frac{1}{k}\right)$ ในสมการที่ 2.5 สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) = \int_0^{\infty} \left\{ \left(\frac{V}{c}\right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \exp\left[-c\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] d\left(\frac{V}{c}\right)^k \quad (2.6 ก)$$

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) = \int_0^{\infty} \frac{V}{c} \exp\left[-c\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] d\left(\frac{V}{c}\right)^k \quad (2.6 ข)$$

แทนค่าสมการที่ 2.6 ข ลงในสมการ 2.4

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

เมื่อนำสมการการแจกแจงไวบูลล์มาคำนวณเป็นสมการแจกแจงสะสมของอัตราเร็วลม $\{F(V)\}$ จะได้

$$F(V) = \int_0^V f(V) dV \quad (2.7)$$

$$F(V) = \int_0^V \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] dV$$

$$F(V) = \int_0^V \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] d\frac{V}{c}$$

$$F(V) = \int_0^V \frac{k \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] d\frac{V}{c}}{k \left(\frac{V}{c}\right)^k d\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1}}$$

$$F(V) = \int_0^V \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] d\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1}$$

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.9)$$

แทนค่า c ลงในสมการที่ 2.4 และสมการที่ 2.8 จะได้

$$F(V) = \frac{k}{V} \left(\frac{V}{\bar{V}}\right) \Gamma^k \left(1 + \frac{1}{k}\right) \exp\left[-\Gamma^k \left(1 + \frac{1}{k}\right) \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^k\right] \quad (2.10)$$

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\Gamma^k \left(1 + \frac{1}{k}\right) \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^k\right] \quad (2.11)$$

เนื่องจาก $F(V)$ เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น เมื่อทำการปริพันธ์แล้ว จะมีค่าเท่ากับ 1 ดังสมการ

$$\int_0^{\infty} f(V) dV = 1 \quad (2.12)$$

ถ้าเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันไร้มิติ (dimensionless) จะเขียนได้เป็น $f = \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)$ ซึ่งเมื่อทำการปริพันธ์ $f\left(\frac{V}{\bar{V}}\right)d\left(\frac{V}{\bar{V}}\right)$ จะพบว่ามามีค่าเท่ากับ 1

$$\int_0^{\infty} f\left(\frac{V}{\bar{V}}\right)d\left(\frac{V}{\bar{V}}\right) = 1 \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.12 และ 2.13 จะได้

$$\int_0^{\infty} f(V)dV = \int_0^{\infty} f\left(\frac{V}{\bar{V}}\right)d\left(\frac{V}{\bar{V}}\right) = 1 \quad (2.14)$$

$$\int_0^{\infty} f(V)dV = \frac{1}{\bar{V}} \int_0^{\infty} f\left(\frac{V}{\bar{V}}\right)dV \quad (2.15)$$

$$\int_0^{\infty} \bar{V} f(V)dV = \int_0^{\infty} f\left(\frac{V}{\bar{V}}\right)dV \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.13 สามารถสรุปได้ว่า

$$f\left(\frac{V}{\bar{V}}\right) = \bar{V} f(V)$$

และสามารถเขียนได้เป็น

$$f\left(\frac{V}{\bar{V}}\right) = \bar{V} f(V) = \bar{V} \frac{k}{\bar{V}} \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^k \Gamma^k \left(1 + \frac{1}{k}\right) \exp \left[-\Gamma^k \left(1 + \frac{1}{k}\right) \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^k \right]$$

$$f\left(\frac{V}{\bar{V}}\right) = k \Gamma^k \left(1 + \frac{1}{k}\right) \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^{k-1} \exp \left[-\Gamma^k \left(1 + \frac{1}{k}\right) \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^k \right] \quad (2.17)$$

เราสามารถนำสมการดังกล่าวมาเขียนกราฟ ระหว่าง $f\left(\frac{V}{c}\right)$ กับ $\left(\frac{V}{c}\right)$ ในกรณีค่า k มีค่าต่างๆ ได้

การหาค่าไวบูลล์พารามิเตอร์สำหรับข้อมูลสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

1. ระเบียบวิธีทางกราฟ (Graphical Method)
2. ระเบียบวิธีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation Method)
3. ระเบียบวิธีโมเมนต์ (Moment Method)
4. ระเบียบวิธีความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method)
5. ระเบียบวิธีปัจจัยรูปแบบพลังงาน (Energy Pattern Factor Method)

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะระเบียบวิธีทางกราฟ ทั้งนี้จะพิจารณาจากสมการแจกแจงสะสม (cumulative frequency distribution) ของอัตราเร็วลม

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (2.18)$$

เมื่อ V คือ อัตราเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

k คือ พารามิเตอร์รูปร่าง

c คือ พารามิเตอร์ระดับ (เมตรต่อวินาที)

จัดรูปสมการใหม่ โดยการใส่ค่า \ln ทั้ง 2 ข้างของสมการ จะได้

$$\ln[-\ln(1-F(V))] = k \ln V - k \ln c \quad (2.19)$$

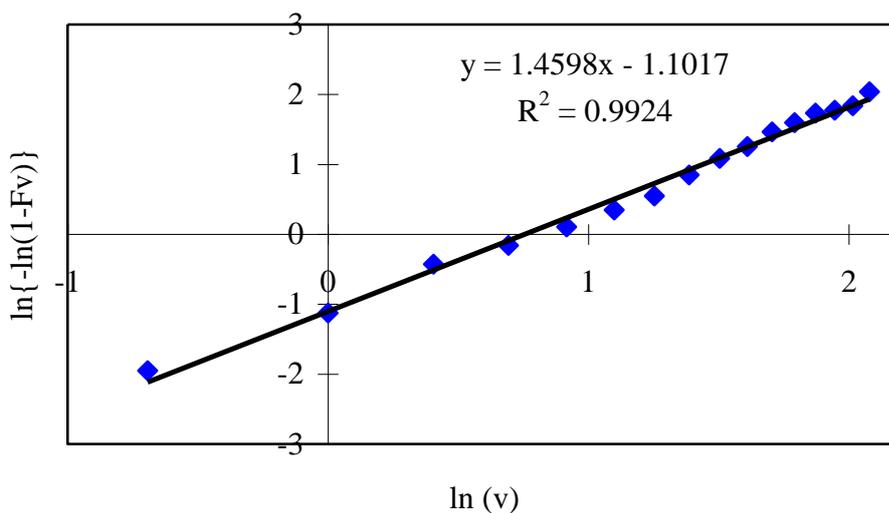
พิจารณาให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง

$$Y_i = kX_i + k \ln c \quad (2.20)$$

$$Y_i = \ln[-\ln(1-F(V))]$$

$$X_i = \ln V$$

เนื่องจากสมการที่ 2.20 เป็นสมการเส้นตรง ดังนั้นสามารถนำค่าไปพล็อตกราฟเมื่อ กำหนดให้ $Y = \ln[-\ln(1 - F(V))]$ และ $X = k \ln(V)$, $b = -k \ln(C)$ ซึ่งความชันของกราฟที่ได้คือค่า k และค่า $c = \exp\left(-\frac{b}{k}\right)$ แสดงดังภาพที่ 2.4 (Sethyajith Mathew, 2005)



ภาพที่ 2.4 ระเบียบวิธีทางกราฟสำหรับการวิเคราะห์ไวบูลล์พารามิเตอร์

2.1.5 เกรเดียนท์อัตราเร็วลมทางดิ่ง

อัตราเร็วลมที่ระดับผิวพื้น (surface) มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากความเสียดทาน (friction) ระหว่างอากาศและพื้นดินซึ่งเป็นอิทธิพลของชั้นขอบเขต (boundary layer effect) อย่างไรก็ตามอัตราเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งใกล้พื้นดินและอัตราเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยลงที่ระดับความสูงสูงขึ้นไปมาก ที่ระดับความสูง 2 กิโลเมตรเหนือพื้นดินการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วลมจะมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งเรียกลมที่ระดับความสูงนี้ว่าลมชั้นบน (upper wind) การเปลี่ยนแปลงทางดิ่งของอัตราเร็วลม (vertical variation of the wind speed) หรือ โปรไฟล์อัตราเร็วลม (wind speed profile) สามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันหลายรูปแบบด้วยกัน แต่โดยทั่วไปแล้วมักจะอธิบายด้วยฟังก์ชันพื้นฐานที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วลมเฉลี่ย (mean wind speed) เทียบกับความสูงซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานของการทดลองดังนี้

2.1.5.1 ฟังก์ชันยกกำลัง

ฟังก์ชันยกกำลังเป็นสมการที่ได้จากการแทนค่าโปรไฟล์ของความเร็วมบริเวณผิวพื้นของการไหลแบบปั่นป่วนที่ได้จากการทดลองดังสมการที่ 2.21

$$V(z) = V_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (2.21)$$

เมื่อ	z	คือ	ระดับความสูงที่ต้องการทราบค่าอัตราเร็วลมเหนือพื้นดิน (เมตร)
	z_r	คือ	ระดับความสูงที่ทราบค่าอัตราเร็วลมเหนือพื้นดิน (เมตร)
	V_r	คือ	อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง z_r (เมตรต่อวินาที)
	$V(z)$	คือ	อัตราเร็วลมที่ต้องการทราบค่าที่ระดับความสูง z (เมตรต่อวินาที)
	α	คือ	สัมประสิทธิ์แรงเฉือนลม (ไร้หน่วย)

ฟังก์ชันยกกำลังได้นำมาประยุกต์ใช้กับการปรับค่าความเร็วลมที่ระดับความสูงต่างๆ โดยได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมตามลักษณะความขรุขระของพื้นผิว

เนื่องจากการวัดความเร็วลมในจุดตรวจวัดต่างๆ ได้มีการติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมที่ระดับความสูงจากพื้นดินแตกต่างกัน ดังนั้นในการนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบต้องทำการปรับค่าความเร็วลมให้อยู่ในระดับความสูงที่เท่ากัน ซึ่งโดยทั่วไปนิยมปรับค่าความเร็วลมให้อยู่ในระดับความสูง 10 เมตร จากพื้น ซึ่งเป็นระดับความสูงที่เป็นไปตามมาตรฐานขององค์การอุตุนิยมวิทยาโลก แต่ในทางพลังงานอาจจะปรับค่าความเร็วลมให้อยู่ในระดับความสูงของศูนย์กลางส่วนหมุนของกังหันลม เพื่อสามารถพิจารณาพลังงานที่กังหันลมสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานได้

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมสามารถกระทำได้โดยการประยุกต์ logarithmic ได้จากสมการที่ 2.22

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{V_z}{V_r}\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_r}\right)} \quad (2.22)$$

เมื่อ V_z คือ ความเร็วลมที่ต้องการทราบค่าที่ระดับความสูง z (เมตรต่อวินาที)

สัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมส่วนใหญ่จะมีค่าตั้งแต่ 0.1–0.4 ตามสภาพความขรุขระของสภาพพื้นที่ที่ทำการศึกษา ซึ่งจากการศึกษาของนักวิจัยที่ผ่านได้ประมาณค่า wind shear coefficient ที่สภาพพื้นที่ต่างๆ แต่เนื่องจากในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าอัตราเร็วลมที่ระดับความสูงหลาย

ระดับ ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมเฉพาะพื้นที่ (site dependent wind shear coefficient) ได้จากสมการที่ 2.22 ได้

2.1.5.2 ฟังก์ชันลอการิทึม

ฟังก์ชันลอการิทึมสำหรับการอธิบายโปรไฟล์อัตราเร็วลมทางดิ่งแสดงดังสมการที่ 2.23

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (2.23)$$

เมื่อ z_0 คือ ความยาวของความขรุขระ (roughness length) (เมตร)

สัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมและความยาวของความขรุขระสำหรับลักษณะภูมิประเทศต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณโปรไฟล์ทางดิ่งของอัตราเร็วลม

ชนิดของภูมิประเทศ	ชั้นความขรุขระ (roughness class)	ความยาวของความ ขรุขระ (roughness length) (m)	สัมประสิทธิ์ แรงเฉือนลม (ไร้นหน่วย)
พื้นน้ำ	0	0.0001	0.1
ภูมิประเทศแบบเปิดมีความ ขรุขระของพื้นผิวเล็กน้อย	1	0.12	0.12
พื้นที่ไร่นา มีอาคารจำนวนน้อย	2	0.05	0.16
พื้นที่ไร่นาที่มีต้นไม้ใหญ่และ ป่าไม้ปกคลุมและหมู่บ้าน	3	0.3	0.28

(ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2551)

อย่างไรก็ตามฟังก์ชันทั้งสองสามารถใช้ได้เมื่อทราบอัตราเร็วลมที่ระดับความสูงอ้างอิง (reference height) สำหรับค่าความยาวของความขรุขระนั้นอาจจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.5-1 สำหรับสวนผลไม้และต้นไม้เตี้ยๆ และมีค่าอยู่ในช่วง 1-2 สำหรับพื้นที่ป่าปกคลุมและใจกลางเมือง

2.1.6 พลังงานลมและกำลังลม

พลังงานจลน์ของกระแสอากาศที่มีมวล m และเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.24

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \quad (2.24)$$

เมื่อ E คือ พลังงานจลน์ (จูล)

m คือ มวลของอากาศ (air parcel) (กิโลกรัม)

V คือ ความเร็วของอากาศ (เมตรต่อวินาที)

พิจารณาส่วนหมุน (rotor) ของกังหันลมที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง (cross sectional area) A พลังงานจลน์ของกระแสอากาศที่กังหันลมสามารถนำไปเปลี่ยนรูปได้แสดงดังสมการที่ 2.25

$$E = \frac{1}{2} \rho_a vV^2 \quad (2.25)$$

เมื่อ ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม)

v คือ ปริมาตรของมวลอากาศ (air parcel) ที่พัดผ่านส่วนหมุน (ลูกบาศก์เมตร)

V คือ ความเร็วของอากาศ (เมตรต่อวินาที)

ก่อนมวลอากาศที่พัดผ่านส่วนหมุนต่อหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งมีพื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากับพื้นที่ภาคตัดขวางของส่วนหมุน (A_T) และความหนาแน่นเท่ากับอัตราเร็วลม ดังนั้นพลังงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา (E/t) หรือกำลัง (power) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.26

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3 \quad (2.26)$$

เมื่อ P คือ กำลังของกังหันลม (วัตต์หรือจูลต่อวินาที)

A_T คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของส่วนหมุน (ตารางเมตร)

จากสมการที่ 2.26 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังของกระแสลมได้แก่ ความหนาแน่นอากาศ พื้นที่ส่วนหมุนของกังหันและความเร็วลม โดยที่อิทธิพลของลมค่อนข้างส่งผลกระทบต่อกำลังลมเนื่องจากมีค่ายกกำลังสาม

ปัจจัยอย่างเช่น อุณหภูมิ ความกดอากาศ (atmospheric pressure) ระดับความสูง (elevation) และองค์ประกอบของอากาศ (air constituents) จะส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของอากาศ เมื่อพิจารณาอากาศแห้ง (dry air) ซึ่งพิจารณาให้เป็นก๊าซอุดมคติ (ideal gas) และจากกฎของก๊าซอุดมคติ (ideal gas law) แสดงดังสมการที่ 2.27

$$pV_G = nRT \quad (2.27)$$

เมื่อ p คือ ความกดอากาศ (พาสคาล)

V_G คือ ปริมาตรของแก๊ส (ตารางเมตร)

n คือ จำนวนกิโลโมลของแก๊ส

R คือ ค่าคงที่สากลของแก๊ส (universal gas constant)

T คือ อุณหภูมิ (องศาเคลวิน)

ความหนาแน่นของอากาศซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างมวลของ 1 กิโลโมลต่อปริมาตร แสดงดังสมการที่ 2.28

$$\rho_a = \frac{m}{V_G} \quad (2.28)$$

จากสมการที่ 2.27 และสมการที่ 2.28 เราสามารถเขียนสมการความหนาแน่นได้เป็น

$$\rho_a = \frac{mp}{RT} \quad (2.29)$$

ถ้าเราทราบระดับความสูง z และอุณหภูมิ T ณ สถานีวัดความเร็วลม เราสามารถคำนวณหาความหนาแน่นอากาศได้ดังสมการที่ 2.30

$$\rho_a = \frac{353.049}{T} e^{\left(-0.034 \frac{z}{T}\right)} \quad (2.30)$$

ความหนาแน่นของอากาศมีค่าลดลงเมื่อความสูงและอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่แล้วความหนาแน่นอากาศมักจะพิจารณาให้มีค่าเป็น 1.225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังเช่นในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ *WASP 9.0*

ในการวิเคราะห์พลังงานลมได้มีการจัดทำระดับชั้นกำลังลม (wind power class) เพื่อป้องกันถึงศักยภาพของพลังงานลมโดยมีระดับชั้นกำลังลมที่ความสูง 10 เมตร และ 50 เมตร แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ระดับชั้นกำลังลมที่ความสูง 10 เมตร และ 50 เมตร

Wind Power Class	10 m		50 m	
	Wind Speed (m/s)	Wind Power Density (W/m ²)	Wind Speed (m/s)	Wind Power Density (W/m ²)
1	< 4.4	< 100	< 5.6	< 200
2	4.4-5.1	100-150	5.6-6.4	200-300
3	5.1-5.6	150-200	6.4-7.0	300-400
4	5.6-6.0	200-250	7.0-7.5	400-500
5	6.0-6.4	250-300	7.5-8.0	500-600
6	6.4-7.0	300-400	8.0-8.8	600-800
7	> 7.0	> 400	> 8.8	> 800

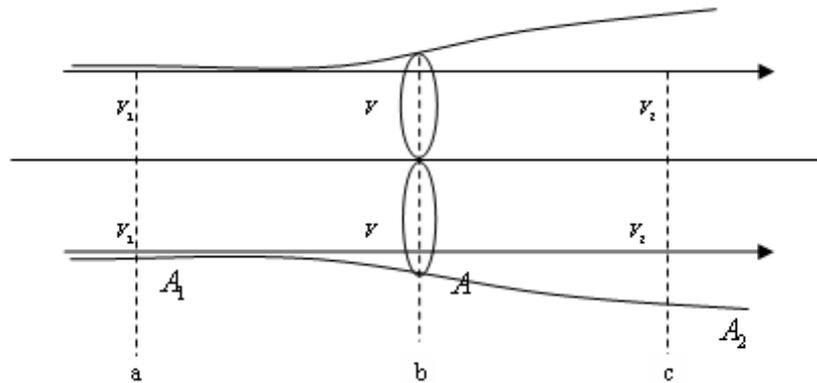
หมายเหตุ: อัตราเร็วลมในแนวตั้งคำนวณโดยใช้กฎยกกำลัง 1/7 อัตราเร็วลมเฉลี่ยมีการแจกแจงแบบรีเลย์ ของสมมูลความหนาแน่นกำลังลมสำหรับอัตราเร็วลมที่ระดับน้ำทะเลเฉลี่ย (ที่มา: Li and Li., 2005)

2.1.7 กังหันลมผลิตไฟฟ้า

2.1.7.1 ข้อจำกัดของ Betz

กำลังลมเป็นปริมาณพลังงานต่อหน่วยเวลาที่อยู่ในกระแสอากาศ มีเพียงปริมาณกำลังบางส่วนเท่านั้นที่สามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ (useful

energy) โดยกังหันลม กำลังที่กังหันลมสามารถเปลี่ยนรูปได้จะมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านส่วนหมุนของกังหัน พิจารณาการไหลผ่านหลอดกระแสอากาศ (stream tube) ที่พิจารณาให้เป็นรูปปิด (enclosure) ของส่วนหมุนแสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การไหลผ่านหลอดกระแสอากาศ (stream tube)

(ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2551)

โดยพิจารณาให้การไหลของอากาศเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ (incompressible) เนื่องจากความเร็วลมโดยปกติมีค่าต่ำดังนั้นจึงไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น เส้นกระแส (streamline) มักจะพุ่งออกเมื่อลมเคลื่อนที่ผ่านส่วนหมุนของกังหันเนื่องจากกระแสลมมีความเร็วลดลง เมื่อพิจารณาทฤษฎีโมเมนตัมพื้นฐานที่ว่าความดันจะมีค่าคงที่ และภายใต้สมมติฐานที่ว่าอิทธิพลดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากใบกังหันลมขนาดบางและไม่จำกัดจำนวน (infinite number of thin blades) ทำให้เกิดแรงที่เท่ากันต่อกระแสการไหลของอากาศซึ่งมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยสำหรับส่วนหมุนจริง

อัตราการไหลเชิงมวล (mass flow rate) มีค่าคงที่สำหรับกระแสอากาศที่ต้นสาย (upstream) ส่วนหมุนและปลายสาย (downstream)

$$m = \rho A_o V_o = \rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 \quad (2.31)$$

แรง F ที่กระทำต่อส่วนหมุนเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมดังนี้

$$F = m(V_o - V_2) \quad (2.32)$$

กำลังที่ส่วนหมุนดึง ไปใช้จะเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ดังนี้

$$W = m(1/2V_o^2 - 1/2V_2^2) \quad (2.33)$$

ที่ส่วนหมุน แรงที่ทำให้เกิดงาน ณ อัตราเร็วลม V_1 สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$W = FV_1 \quad (2.34)$$

จากสมการที่ 2.31-2.33 เราสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$V_1 = 1/2(V_o + V_2) \quad (2.35)$$

เราอาศัยปัจจัยความเร็วลมที่ปลายสาย b เพื่ออธิบายอัตราส่วนระหว่างอัตราเร็วลมที่ต้นสายและที่ปลายสายดังนี้

$$b = \frac{V_2}{V_o} \quad (2.36)$$

อาศัยสมการที่ 2.34 สมการที่ 2.33 และสมการที่ 2.31 เราจะเห็นได้ว่า

$$\frac{F}{A_1} = 1/2\rho V_o^2(1-b^2) \quad (2.37)$$

และใช้สมการที่ 2.34 และสมการที่ 2.35

$$\frac{W}{A_1} = 1/2\rho V_o^3 \times 1/2(1-b^2)(1+b) \quad (2.38)$$

สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (coefficient of performance), C_p มีนิยามให้เป็นสัดส่วนของพลังงานที่ถูกนำไปใช้โดยกังหันลมต่อพลังงานรวมของกระแสลมที่ไหลผ่านพื้นที่กวาดของกังหันในกรณีที่ไม่มีกังหันวางอยู่ ดังนั้น

$$C_p = \frac{W}{W_1} \quad (2.39)$$

เมื่อ

$$W_1 = 1/2 \rho A_1 V_o^3 \quad (2.40)$$

ทำให้ได้

$$C_p = 1/2(1-b^2)(1+b) \quad (2.41)$$

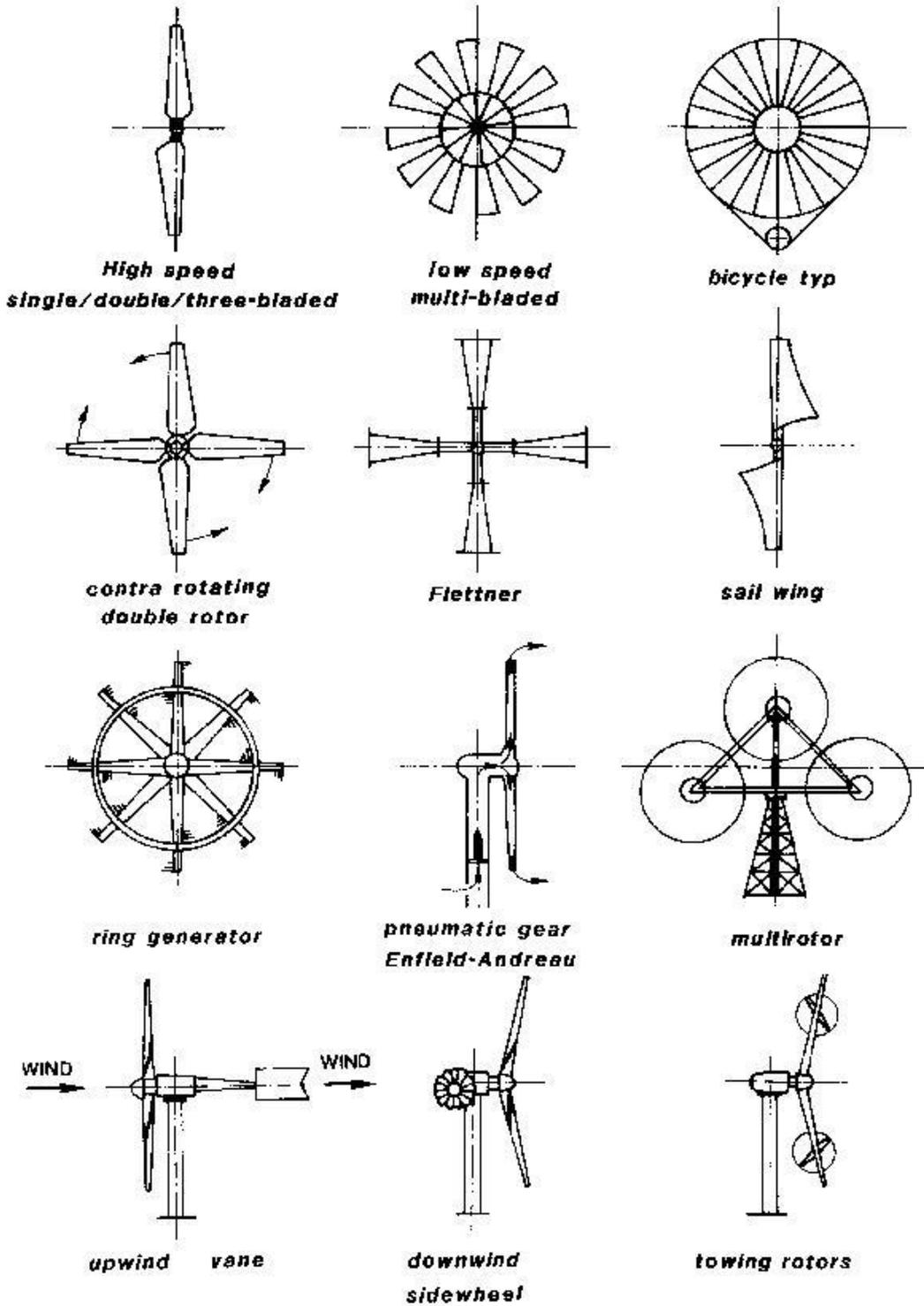
ทำการอนุพันธ์ C_p เทียบกับ b และแสดงให้เห็นว่า C_p มีค่ามากที่สุดเมื่อ $b = 1/3$ ทำให้ได้ $C_p = \frac{16}{27}$ หรือ ร้อยละ 59 ซึ่งเป็นข้อจำกัดของ เบทซ์ (Betz)

เบทซ์ (Betz) ได้นำเสนอข้อจำกัดดังกล่าวในปี ค.ศ. 1919 และสามารถใช้ได้กับกังหันลมทุกชนิด

2.1.7.2 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

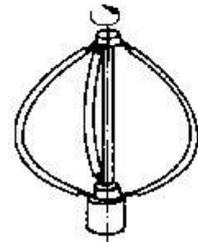
กังหันลมสามารถจำแนกออกเป็น 2 ชนิด หลักๆ โดยอาศัยแกนหมุน ได้แก่ กังหันลมแกนตั้ง (vertical axis wind turbine) แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 2.6 และกังหันลมแกนนอน (horizontal axis wind turbine) แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 2.7 ในกรณีของกังหันลมแกนตั้งสามารถจำแนกตามลักษณะการปะทะกับกระแสลมได้เป็น 2 ชนิด คือ กังหันลมต้นกระแสลม (upwind turbine) และกังหันลมปลายกระแสลม (downwind turbine) ส่วนในกรณีของกังหันลมแกนตั้งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลักๆ ได้แก่ ซาโวเนียส (Savonius) ดารีอูส (Darrieus) และ ไจโรมิลล์ (Giromill) แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 2.8

HORIZONTAL AXIS LIFT FORCES

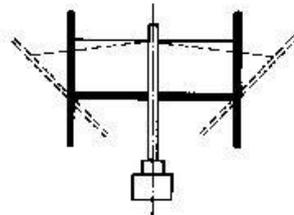


ภาพที่ 2.6 กังหันลมแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine)

VERTICAL AXIS LIFT FORCES



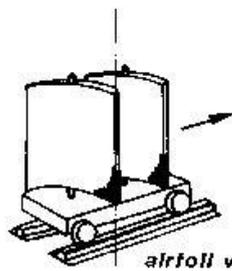
Darrieus



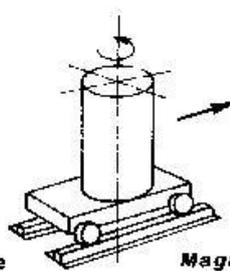
H/V-Darrieus



giromill

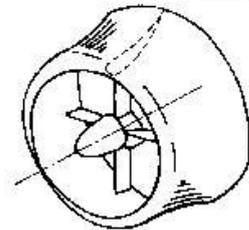


airfoil vehicle

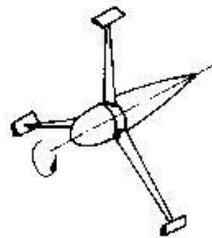


Magnus/Flettner vehicle

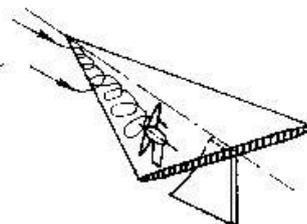
CONCENTRATING DEVICES



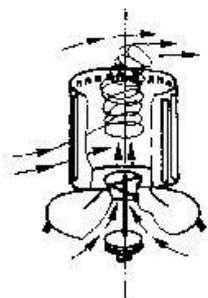
shrouded rotor



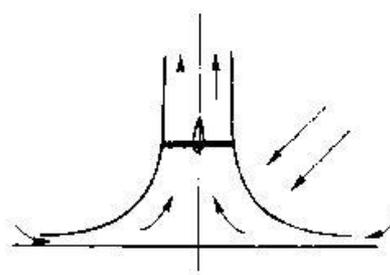
wing tips



unconfined vortex

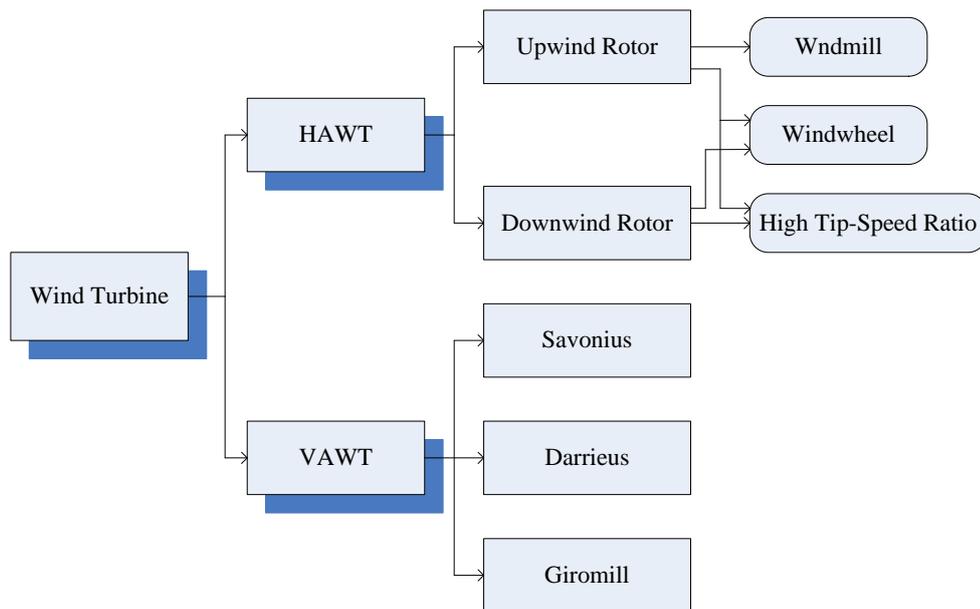


*confined vortex
tornado typ*



sunlight thermal tower

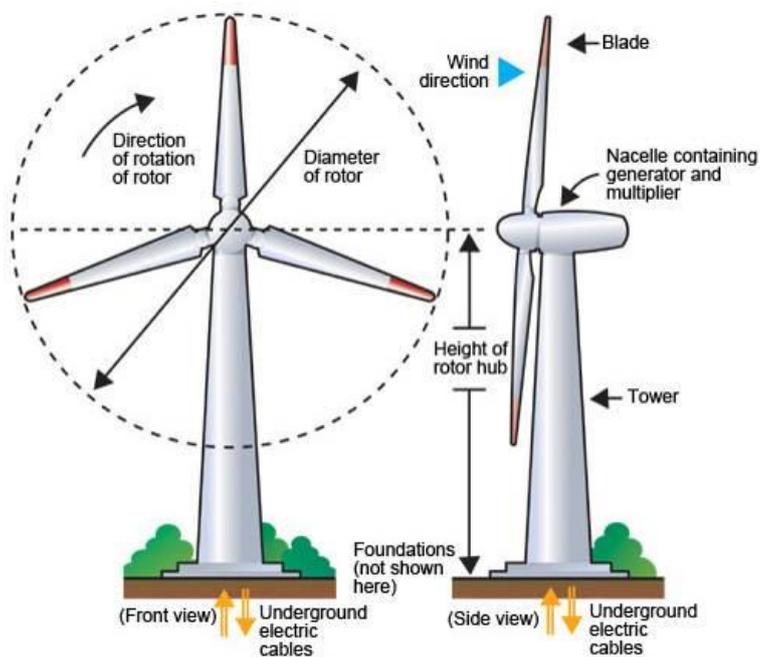
ภาพที่ 2.7 กังหันลมแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine)



ภาพที่ 2.8 กังหันลมชนิดต่างๆ

(ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2551)

กังหันลมแบบแนวแกนนอนเป็นแบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ส่วนมากออกแบบให้เป็นชนิดที่ขับใบกังหันด้วยแรงยก แต่อย่างไรก็ตาม กังหันลมแบบแนวแกนตั้ง ซึ่งได้รับการพัฒนามากในระยะหลังก็ได้รับความสนใจมากขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากข้อดีกว่าแบบแนวแกนนอนคือ ในแบบแนวแกนตั้งนั้น ไม่ว่าจะลมจะเข้ามาทิศไหนก็ยังสามารถหมุนได้ โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมให้กังหันหันหน้าเข้าหาลม นอกจากนี้แล้วแบบแนวแกนตั้งนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบการส่งกำลังวางไว้ใกล้พื้นดินมากกว่าแบบแกนนอน เวลาเกิดปัญหาแก้ไขง่ายกว่าแบบแกนนอนที่ติดอยู่บนหอคอยสูง



ภาพที่ 2.9 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

(ที่มา: <https://picasaweb.google.com/107360739898028045872>)

2.1.7.3 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

กังหันลมผลิตไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญๆ ดังนี้

(1) ส่วนหยุดนิ่ง (stationary part)

ประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

(1.1) หอคอย (tower)

(1.2) ห้องเครื่อง (nacelle)

(2) ส่วนหมุน (rotating part)

ประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

(2.1) ใบกังหันลม (wind turbine blade)

(2.2) ศูนย์กลางส่วนหมุน (hub)

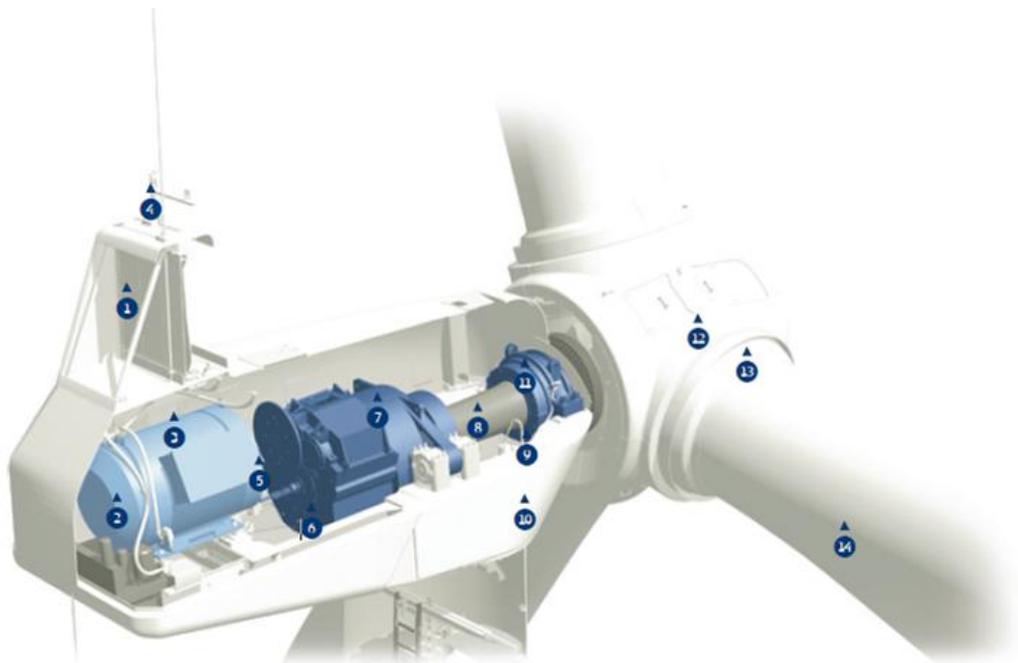
นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ประกอบตัวกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่สำคัญได้แก่

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator)

2. ระบบควบคุมการทำงาน (operating controller)

3. เซนเซอร์ตรวจวัดอัตราเร็วและทิศทางของลมสำหรับควบคุมการทำงานของกังหันลม

ส่วนประกอบที่สำคัญของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ห้องเครื่องและส่วนหมุนกังหันลมรุ่น Vestes V82 ขนาด 1.65 MW

(ที่มา: <http://www.tomkingston.com/n80-3db.jpg>, 2553)

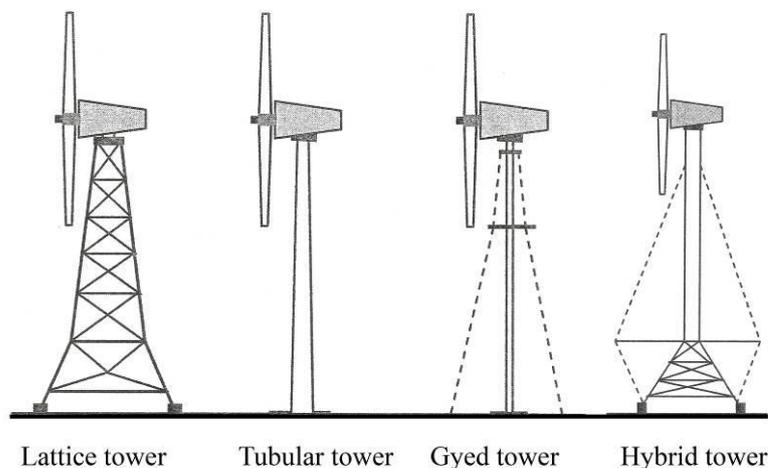
กังหันลมขนาดใหญ่แสดงดังภาพที่ 2.8 มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

1. ตัวระบายความร้อน (cooler)
2. ตัวกำเนิดไฟฟ้า (generator)
3. ส่วนควบนัคเซลล์ (nacelle controller)
4. ระบบวัดลม (anemometer windvanes)
5. เครื่องพ่วง (coupling)
6. จานเบรก (mechanical brake)
7. กระจุกเฟืองเกียร์ (gearbox)
8. เพลาของส่วนหมุน (main shaft)
9. ระบบขับเคลื่อนกังหัน (yaw gears)
10. ฐานเครื่อง (machine foundation)
11. ตลับลูกปืนของส่วนหมุน (main bearing)
12. ศูนย์กลางใบพัด (hub controller)
13. ระบบควบคุมการหมุนของใบกังหัน (pitch system)
14. ใบพัด (blade)

15. แผงควบคุม (main panel)
16. บันได (stairway)
17. พื้นที่ห้องควบคุม (ground controller)



ภาพที่ 2.11 หอคอยกังหันลมรุ่น Vestes V82 ขนาด 1.65 MW
(ที่มา: <http://www.tomkingston.com/n80-3db.jpg>, 2553)



ภาพที่ 2.12 ชนิดต่างๆ ของหอคอยกังหันลม

(ที่มา: Sathyajith., 2006)

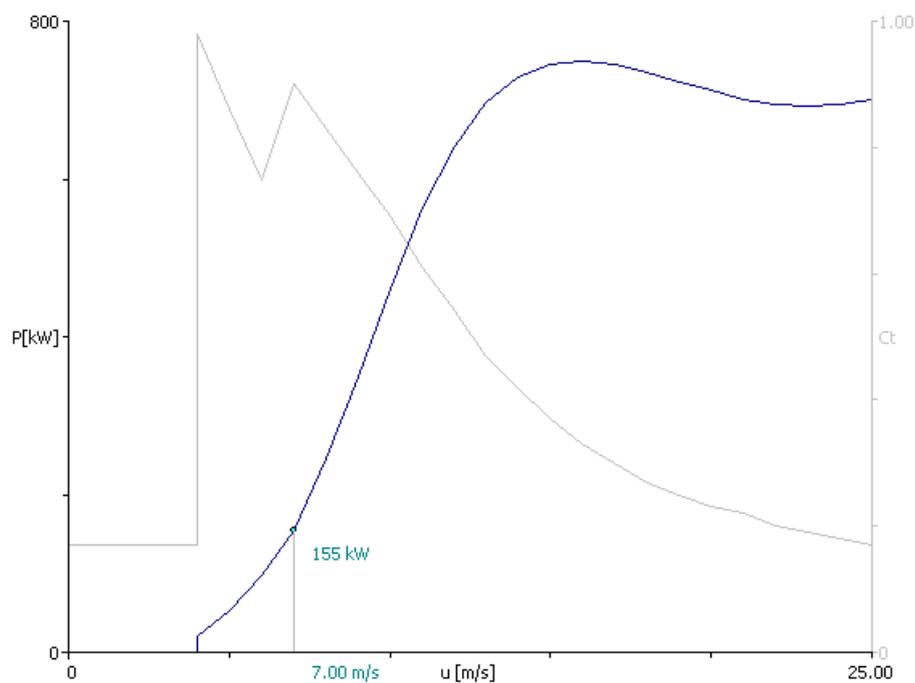
2.1.7.4 เส้นโค้งกำลัง

เส้นโค้งกำลังสามารถบ่งบอกถึงสมรรถนะของกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยปกติเราสามารถประมาณค่ากำลังไฟฟ้าจากกังหันลมโดยใช้เส้นโค้งกำลัง ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแบบกังหันลมและสมบัติของแหล่งลม โดยแสดงอยู่ในรูปของความหนาแน่นความน่าจะเป็นของอัตราเร็ว (speed probability density) ซึ่งในการวิเคราะห์ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมมักจะอาศัยสมการที่ 2.42 และเส้นโค้งกำลังแสดงดังภาพที่ 2.11

$$P = \begin{cases} 0, (v < v_{ci}), \\ P_r \frac{v^k - v_{ci}^k}{v_r^k - v_{ci}^k}, (v_{ci} \leq v \leq v_r), \\ P_r, (v_r \leq v \leq v_{co}), \\ 0, (v > v_{co}) \end{cases} \quad (2.42)$$

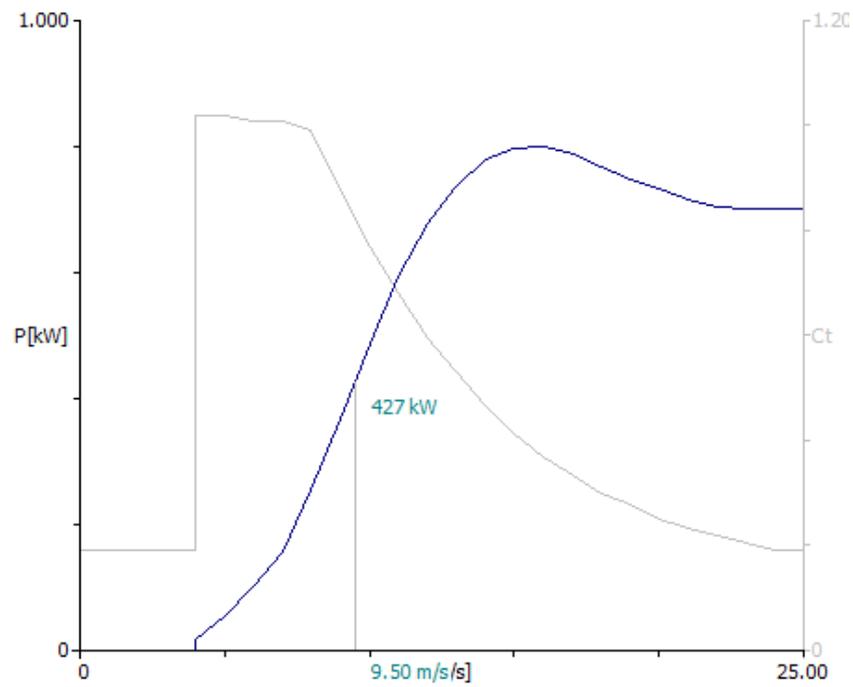
โดยที่	P	คือ	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลม (กิโลวัตต์)
	P_r	คือ	กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากกังหันลม (กิโลวัตต์)
	v_{ci}	คือ	cut in wind speed (เมตรต่อวินาที)
	v_{co}	คือ	cut out wind speed (เมตรต่อวินาที)
	v_r	คือ	rated wind speed (เมตรต่อวินาที)

โครงการวิจัยนี้ได้พิจารณาขนาดของกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าจำนวน 3 ขนาด ดังนี้ รุ่น NEG-Micon 750-48 ขนาด 0.75 เมกะวัตต์ รุ่น Nordex N50 ขนาด 0.8 เมกะวัตต์ และรุ่น Bonus 1.0 ขนาด 1.0 เมกะวัตต์ ตามลำดับ ตารางที่ 2.4 แสดงข้อมูลจำเพาะของกังหันลม ขนาดพิกัดดังกล่าว โดยเป็นกังหันลมจากผู้ผลิตต่างกัน เนื่องจากกังหันลมที่ขนาดพิกัดเดียวกันจะมี รุ่นต่างๆ ที่ผลิตโดยผู้ผลิตต่างกัน ดังนั้นในการเลือกกังหันลมขนาดใหญ่ในการผลิตไฟฟ้าจึง พิจารณาจากเส้นโค้งกำลังของกังหันลม โดยเส้นโค้งกำลังของกังหันลมรุ่นต่างๆ ดังกล่าวแสดงดัง ภาพที่ 2.13-2.15

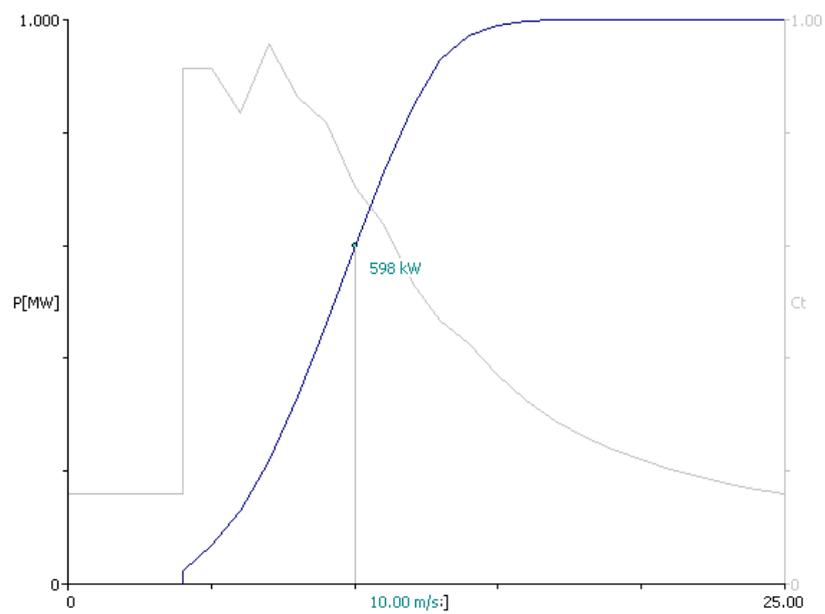


ภาพที่ 2.13 เส้น โค้งกำลังของกังหันลมรุ่น NEG-Micon48 ขนาด 750 kW

(ที่มา: WAsP 9.0. 1987-2010)



ภาพที่ 2.14 เส้นโค้งกำลังของกังหันลมรุ่น Nordex N50 ขนาด 800 kW
(ที่มา: WAsP 9.0. 1987-2010)



ภาพที่ 2.15 เส้นโค้งกำลังของกังหันลมรุ่น Bonus ขนาด 1 MW
(ที่มา: WAsP 9.0. 1987-2010)

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลจำเพาะของกังหันลมรุ่นต่างๆ

รายละเอียด	0.75 MW	0.8 MW	1 MW
ผู้ผลิต	NEG-Micon A/S	Nordex	Siemens Wind Power A/S
รูป			
รุ่น	NEG-Micon 48	Nordex N50	Bonus 1 MW
Rotor			
Rotor Diameter	48.2 m	50	54.2 m
Area Swept	1,824 m ²	1,963 m ²	2,306 m ²
Speed of Revolution	22/14 rpm	-	22 rpm
No. of Blade	3	3	3
Tower			
Hub Height	45 m	46 m	50 m
Generator			
Generator Type	Asynchronous	Asynchronous	Asynchronous
Name Plate Rating	750/200 kW	800 kW	1,000 kW
Nominal Frequency	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Operational Data			
Cut in Wind Speed	4 m/s	4 m/s	4 m/s
Cut out Wind Speed	25 m/s	25 m/s	25 m/s
Power Regulation	Stall	Stall	Stall

- http://www.creswindfarm.gr/sites1/tech_specs.htm
- <http://www.afm.dtu.dk/wind/smep/bonus.htm>

2.1.7.5 อิทธิพลของเวก

ลมที่เคลื่อนที่ผ่านกังหันจะมีพลังงานลดลงซึ่งเป็นไปตามกฎของอนุรักษ์พลังงาน ลมที่เคลื่อนที่ผ่านกังหันจะมีอัตราเร็วลดลงและเกิดเป็นกลุ่มลมด้านหลังและมีความปั่นป่วนเมื่อเปรียบเทียบกับลมด้านหน้ากังหัน ดังนั้นการจัดวางกังหันลมสำหรับฟาร์มกังหันจึงมักจะจัดวางให้ห่างกันเป็นระยะ 7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเพื่อหลีกเลี่ยงความปั่นป่วนทางด้านหลังของกังหันลมซึ่งอาจจะเป็นด้านหน้าของกังหันลมตัวอื่นๆ นั่นเอง อิทธิพลของเวกแสดงดังภาพที่ 2.12

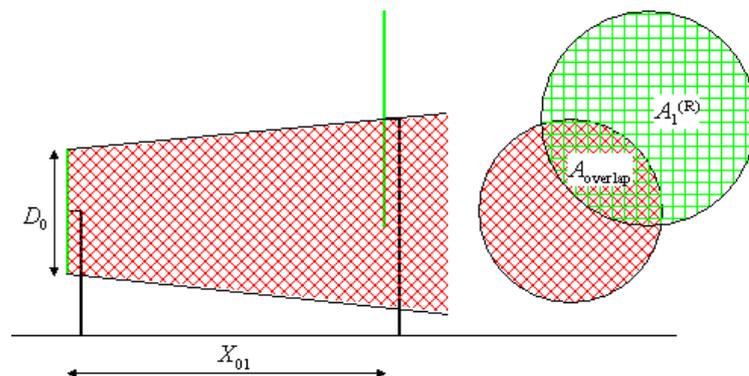


ภาพที่ 2.16 อิทธิพลของเวก

(ที่มา: www.adamscountywind.com)

การคำนวณ wake effect ระหว่างกังหันลมในฟาร์มกังหันลมมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองซึ่งถูกอธิบายในบทความทางวิชาการในการประชุมวิชาการ Europe Wind Energy Association 1986 (EWEA 1986)

สนามการไหล (flow field) ที่ใช้ในแบบจำลองสำหรับการคำนวณเอาต์พุตของกังหันลมแสดงดังนี้



ภาพที่ 2.17 พื้นที่ที่ทับซ้อนกันของกังหันลมเมื่อมองจากด้านหลัง

(ที่มา: <http://www.wasp.dk/Products/WAsP>)

อัตราเร็วลมประสิทธิผลที่ลดลง (effective wind speed deficit) เมื่อไหลผ่านทางด้านหลังของกังหันตัวหน้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.43

$$\delta V_{01} = U_0 \left(1 - \sqrt{1 - C_t}\right) \left(\frac{D_0}{D_0 + 2kx_{01}}\right)^2 \frac{A_{overlap}}{A_1^{(R)}} \quad (2.43)$$

เมื่อ U_0 คือ อัตราเร็วลมที่ไม่ถูกรบกวนทางด้านหน้าของกังหันลม (เมตรต่อวินาที)

D_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนหมุน (เมตร)

C_t คือ สัมประสิทธิ์ของทรัสต์ (thrust coefficient)

x_0 คือ ระยะทางในแนวราบระหว่างกังหันลมสองตัว (เมตร)

k คือ ค่าคงที่การสลายตัวของเวก (wake decay constant)

สัมประสิทธิ์ของทรัสต์มีความสัมพันธ์กับแรง F_T และความหนาแน่นของอากาศดังนี้

$$C_t = \frac{2F_T}{\rho \frac{\pi}{4} D_0^2 U_0^2} \quad (2.44)$$

การลดลงของอัตราเร็วลมเริ่มต้นจาก U_0 จนมีค่าเท่ากับ V เมื่ออากาศไหลผ่านแนวระนาบการหมุน (rotor plane) มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของทรัสต์ดังนี้

$$1 - C_t = (V/U_0)^2 \quad (2.45)$$

โดยที่ค่าคงที่ของการสลายตัวของเวกมีค่า $k = 0.075$ ซึ่งเป็นค่าสำหรับการใช้งานบนพื้นที่ราบ ในกรณีของนอกชายฝั่งค่าดังกล่าวมีค่าประมาณ $k = 0.04$

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ

การศึกษาศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยได้เริ่มดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2518 โดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทางด้านพลังงานลมได้มีความพยายามที่จะศึกษาศักยภาพของพลังงานลมของประเทศไทยด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อที่จะได้ทราบถึงศักยภาพของพลังงานลมในประเทศไทย ซึ่งปรากฏว่ามีการดำเนินการมาโดยหลายหน่วยงานดังนี้

ปี พ.ศ. 2518 สำนักงานพลังงานแห่งชาติ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน) ได้จัดทำแผนที่แสดงความเร็วลมต่างๆ โดยใช้ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยจากกรมอุตุนิยมวิทยา เพื่อแสดงศักยภาพพลังงานลมที่มีกำลังสูงและกำลังปานกลางทั่วประเทศไทย ทั้งนี้เพื่อใช้ประโยชน์ในการวางแผนสร้างกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ ต่อมาจึงได้สร้างสถานีวัดความเร็วลมแห่งแรกโดยมีความสูงระดับ 10 เมตร ที่บริเวณเกาะสีชัง จังหวัดชลบุรี ระหว่างปี พ.ศ. 2522-2524

ปี พ.ศ. 2524 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ร่วมกันจัดทำแผนที่พลังงานลมโดยใช้ข้อมูลลมจากกรมอุตุนิยมวิทยาช่วงเวลา 13 ปี พ.ศ. 2509-2521 จำนวน 53 สถานี เป็นข้อมูลความเร็วเฉลี่ยและปรับระดับความสูงให้เป็นความสูงมาตรฐานที่ 10 เมตร โดยใช้สูตรกฎของกำลัง (power law)

ปี พ.ศ. 2524 สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) ได้ทำการศึกษาจัดทำโดยใช้ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยาปรับเป็นความเร็วลมที่ระดับ 10 เมตร

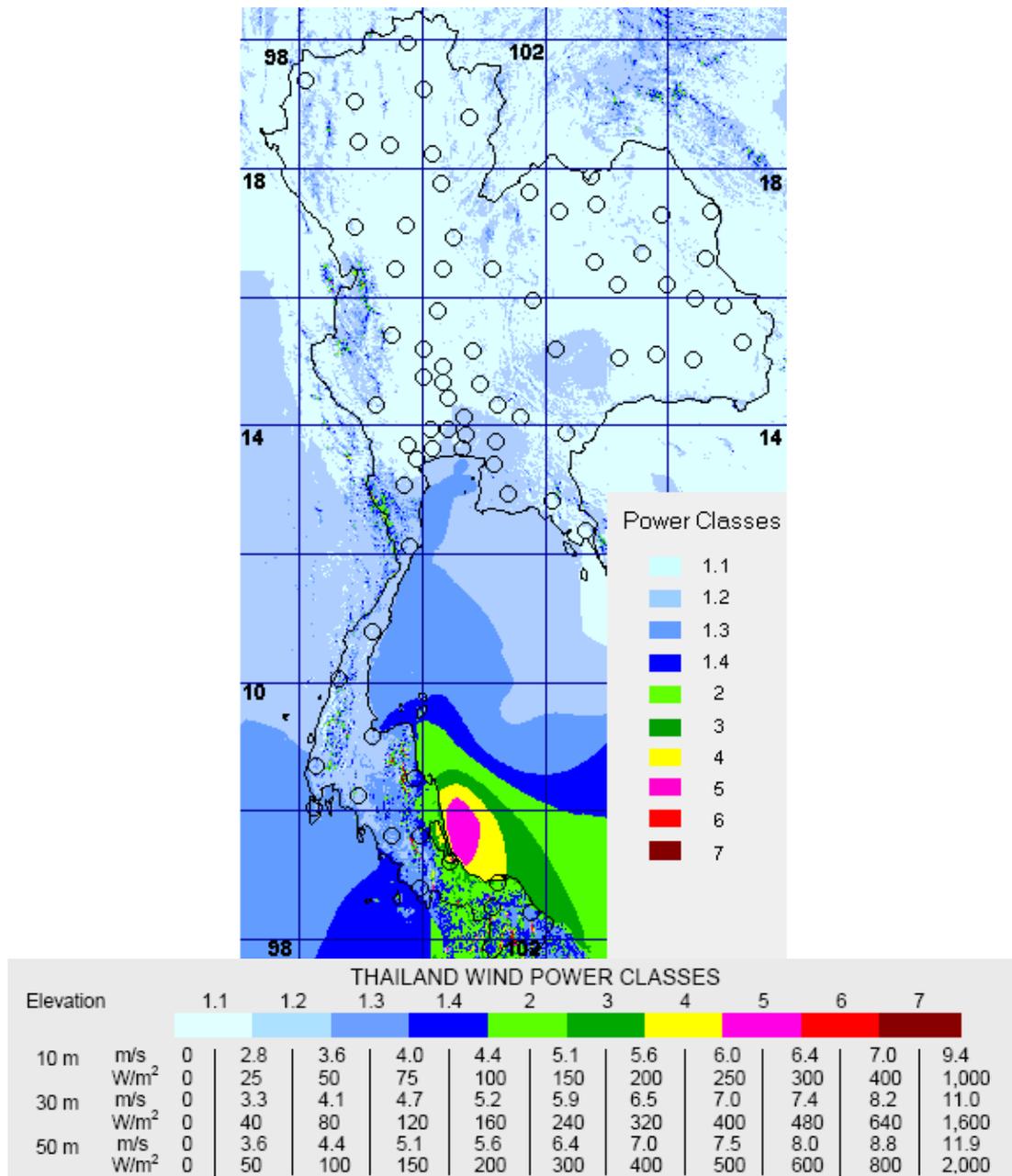
ปี พ.ศ. 2527 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้รับทุนสนับสนุนจาก USAID ผ่านการตรวจสอบและกำกับโดยกรมอุตุนิยมวิทยา สำหรับการประเมินศักยภาพของพลังงานลมโดยใช้ข้อมูลความเร็วลมจากกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 62 สถานี มีระยะเวลาเก็บข้อมูล 17 ปี พ.ศ. 2509 - 2535 (ปี ค.ศ. 1966-1992) และได้จัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมแสดงความเร็วและกำลังลม ซึ่งปรับระดับโดยใช้ logarithmic law ที่ความสูง 10 เมตร โดยพิจารณาช่วงลมสงบและไม่รวมลมสงบ เพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ยและกำลังลม ผลการประเมินพบว่าบริเวณชายฝั่งทะเลและบริเวณภาคใต้ได้มีความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุด ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือรองลงมา โดยภาคเหนือจะมีความเร็วลมต่ำสุดที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน โดยมีค่าความเร็วลม 5-10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีกำลังลมเป็น 7.60 วัตต์ต่อตารางกิโลเมตร สำหรับในภาคใต้ที่จังหวัดภูเก็ตมีความเร็วลม 15.30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ผลการศึกษาแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย ที่ความสูง 10 เมตร พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยมีความเร็วลมอยู่ในระดับ 1.1 ซึ่งมีความหนาแน่นพลังงานลมไม่ถึง 25 วัตต์ต่อตารางเมตร Suwantragul และคณะ (1994) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ R. H. B. Exell ที่แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่มีศักยภาพสูงสำหรับการตั้งฟาร์มกังหันลมคือแหล่งลมทะเลสาบสงขลา ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

- (1) บริเวณนอกชายฝั่งทะเลสาบสงขลาที่มีพื้นที่ลมระดับ 5 ประมาณ 6,500 ตารางกิโลเมตร ความเร็วลมระดับนี้ที่ความสูง 30 เมตรและ 60 เมตร ให้ความหนาแน่นกำลังลมอย่างน้อย 400 และ 500 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ

- (2) บริเวณทะเลสาบสงขลาส่วนเชื่อมต่อกับอ่าวไทย เป็นพื้นที่ลุ่มระดับ 6 ประมาณ 25 ตารางกิโลเมตร ความเร็วลมที่ความสูง 30 และ 60 เมตร ให้ความหนาแน่นกำลังลมอย่างน้อย 480 และ 600 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ ส่วนทะเลสาบ เป็นพื้นที่ลุ่มระดับ 5 ประมาณ 80 ตารางกิโลเมตร

ปี พ.ศ. 2544 กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (ขณะนั้นยังเป็นกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน) ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย โครงการนี้ซึ่งอยู่ภายใต้การจัดการของบริษัท เฟลโลว์-เอ็นจิเนียร์ส คอนซัลแตนต์ จำกัด (Fellow Engineers Consultants Co, Ltd.) ผู้รับผิดชอบจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้ดำเนินการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย โดยการรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานต่างๆ ประกอบด้วยข้อมูลลมผิวพื้นจากสถานีตรวจอากาศผิวพื้นจากกรมอุตุนิยมวิทยา กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และกองทัพอากาศ รวม 134 สถานี ข้อมูลลมในทะเลและชายฝั่งจากทุ่นลอย ของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประกาศารจากกองทัพเรือ และสถานีขุดเจาะก๊าซธรรมชาติของบริษัท UNOCAL (ประเทศไทย) จำกัด รวมจำนวน 21 สถานี ข้อมูลลมจากเรือเดินทะเลและดาวเทียม จำนวน 46 ตำแหน่ง และข้อมูลลมชั้นบนจากสถานีตรวจอากาศชั้นบนของกรมอุตุนิยมวิทยา จำนวน 11 สถานี ข้อมูลดังกล่าวมีระยะเวลา 15 ปี การดำเนินการวิเคราะห์ พบว่าแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีของประเทศไทยมีกำลังลมเฉลี่ยทั้งปีอยู่ในระดับ 3 (class 3) ซึ่งให้ความเร็วลม 6.4 เมตรต่อวินาที ขึ้นไปที่ความสูง 50 เมตร อยู่ทีภาคใต้บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก ตั้งแต่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา และปัตตานี และที่อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเกิดจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงปลายเดือนมีนาคม อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากโครงการนี้เป็นเพียงข้อมูลนำร่องเท่านั้น การตัดสินใจติดตั้งกังหันลมอย่างจริงจังควรมีการเก็บข้อมูลใหม่อีกครั้ง เนื่องจากข้อมูลที่เก็บได้ส่วนใหญ่เป็นการเก็บข้อมูลทุก 3 ชั่วโมง อาจไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการติดตั้งกังหันลม การตั้งค่าตัวแปรเสริมบางตัวในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประกอบการวิเคราะห์กับความเร็วมที่เป็นข้อมูลหลัก เช่น ค่าความเสียหายระหว่างลมกับพื้นผิวซึ่งเป็นภูมิประเทศแบบต่างๆ เป็นการตั้งค่าโดยประมาณ ผลการคำนวณอาจคลาดเคลื่อนจากการเป็นจริงความเร็วลมเฉลี่ยบริเวณที่ศักยภาพพลังงานลมดีได้จากข้อมูลที่มีค่าความเบี่ยงเบนสูง จึงอาจใช้ประโยชน์จากลมได้ไม่เต็มที่ตลอดทั้งปี เช่น ที่ตั้งอาจมีลมแรงมาก 6 เดือนและลมสงบอีก 6 เดือนก็ได้

แผนที่ที่ได้เป็นการหาผลลัพท์ในระหว่างข้อมูล (interpolation) ที่มีจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับพื้นที่ดังนั้นความคลาดเคลื่อนย่อมเกิดขึ้นได้



ภาพที่ 2.18 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมตั้งแต่กราคมถึงธันวาคมของประเทศไทย
(ที่มา: กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2544)

นอกจากนี้ยังพบว่า มีแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีอีกส่วนหนึ่งอยู่บริเวณเทือกเขาด้านทิศตะวันตกตั้งแต่ภาคใต้ตอนบนจรดภาคเหนือตอนล่าง ในเขตจังหวัดเพชรบุรี กาญจนบุรี ตาก ซึ่งเกิดจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม และยังมีแหล่ง

ศักยภาพพลังงานลมที่ดีที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ อยู่ในบริเวณเทือกเขาในอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง จังหวัดสุราษฎร์ธานี อุทยานแห่งชาติเขาหลวง และใต้ร่มเย็น จังหวัดนครศรีธรรมราช อุทยานแห่งชาติศรีพังงา จังหวัดพังงา และเขาพนมเบญจา จังหวัดกระบี่ ส่วนแหล่งที่มีศักยภาพพลังงานลม รองลงมาที่มีความเร็วลม 4.4 เมตรต่อวินาที ขึ้นไปที่ความสูงระดับ 50 เมตร พบว่าอยู่ในภาคใต้ตอนบนบริเวณอ่าวไทย ตั้งแต่จังหวัดเพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร จรดจังหวัดสุราษฎร์ธานี และบริเวณเทือกเขาในภาคเหนือ เช่น จังหวัดเชียงใหม่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือคือ จังหวัดเพชรบูรณ์และเลย เป็นต้น ซึ่งได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และพบว่าอยู่ที่ภาคใต้ฝั่งตะวันตก ตั้งแต่จังหวัดพังงา ภูเก็ต กระบี่ ตรัง จรดสตูลและในอ่าวไทยชายฝั่งตะวันออกคือ จังหวัดระยองและชลบุรี ซึ่งได้รับอิทธิพลจากมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

ปี พ.ศ. 2544 กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ยังได้สนับสนุนโครงการศึกษาศักยภาพของทรัพยากรลมในพื้นที่ชายฝั่งทะเลภาคใต้ ในความรับผิดชอบของกองพัฒนาระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยมีจุดมุ่งหมายหลักคือศึกษาความเป็นไปได้ในการติดตั้งกังหันลม หลังจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการติดตั้งอุปกรณ์วัดลมเป็นเวลา 2 ปี ใน 4 พื้นที่ ได้แก่ ชายหาดอำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา แหลมตะลุมพุก อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช แหลมปะการัง อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา และชายหาดบ้านราไวย์เหนือ อำเภอทุ่งหว้า จังหวัดสตูล พบว่าชายหาดอำเภอสทิงพระมีศักยภาพลมสูงที่ความเร็วลมเฉลี่ย 5.6 เมตรต่อวินาที เหมาะต่อการติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจำหน่าย ผลของโครงการทำให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคตัดสินใจติดตั้งกังหันลมแกนอนแบบไร้เฟืองทดกำลังการผลิต 1.5 เมกะวัตต์ เพื่อเป็นโครงการนำร่องผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานลม

ปี พ.ศ. 2544 กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน โดยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ทำการศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่ง ในบริเวณพื้นที่ จังหวัดภาคใต้ ประกอบด้วย จ.สงขลาและพัทลุง การดำเนินการได้ตรวจสอบความเร็วลมและเลือกจุดที่ตั้งเครื่องวัดความเร็วและทิศทางลมจำนวน 3 สถานีที่ ต.ท่ามะเดื่อ อ.บางแก้ว จ.พัทลุง ที่ ต.สนามชัย อ.สทิงพระ จ.สงขลา และที่ ต.เกาะเต่า อ.เมือง จ.สงขลา ภายหลังจากศึกษาและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม WASP 8.3 แล้ว พบว่าบริเวณที่มีแหล่งลมดีและพื้นที่เหมาะสมต่อการติดตั้งฟาร์มกังหันลมได้คือที่เนินควรสีปาน บนเกาะใหญ่ ต.เกาะใหญ่ อ.กระแสสินธุ์ จ.สงขลา ความเร็วลมเฉลี่ย 5.38 เมตรต่อวินาที

ปี พ.ศ. 2549 สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) โดยให้ศูนย์วิจัยพลังงานมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในเขตภาคเหนือตอนบน ในพื้นที่ 6 จังหวัด

ประกอบด้วย จ.แม่ฮ่องสอน เชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน แพร่และน่าน การดำเนินการได้คัดเลือกพื้นที่ๆ มีศักยภาพพลังงานลมดี จำนวน 18 แห่ง และตรวจสอบคัดเลือกกองเหลือ 7 แห่ง เพื่อติดตั้งเครื่องวัดความเร็วและทิศทางลมที่ระดับ 20 เมตร 30 เมตร และ 40 เมตร จำนวน 6 สถานี และที่ระดับ 20 เมตร 40 เมตรและ 80 เมตร อีก 1 สถานี ผลการศึกษาได้พื้นที่ๆ มีศักยภาพพลังงานลมดีเหมาะสมที่จัดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้ 3 แห่งคือ บริเวณบ้านคอยม่อนล้าน อ.พร้าว จ.เชียงใหม่ ความเร็วลมเฉลี่ย 5.73 เมตรต่อวินาที บริเวณบ้านกัวลม อ.ปาย จ.แม่ฮ่องสอน ความเร็วลมเฉลี่ย 6.24 เมตรต่อวินาที บริเวณบ้านแม่แฮ อ.สะเมิง จ.เชียงใหม่ ความเร็วลมเฉลี่ย 5.72 เมตรต่อวินาที

ปี พ.ศ. 2549 สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) โดยให้มหาวิทยาลัยทักษิณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ร่วมดำเนินการศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่ง โครงการประเมินศักยภาพของพลังงานเฉพาะพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ของประเทศไทย โดยคัดเลือกพื้นที่ติดตั้งเครื่องวัดความเร็วและทิศทางลมระดับ 20 เมตร 30 เมตร และ 40 เมตร จำนวน 18 สถานีใน 6 จังหวัด คือ ด้านฝั่งทะเลอ่าวไทย 14 สถานี จ.สุราษฎร์ธานี ติดตั้ง 4 สถานี นครศรีธรรมราช จำนวน 5 สถานี สงขลา จำนวน 5 สถานี รวมสถานีด้านฝั่งทะเลอันดามัน 4 สถานีคือ กระบี่ จำนวน 2 สถานี ตรัง จำนวน 1 สถานี และสตูล จำนวน 1 สถานี โดยในการวิเคราะห์ได้พิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ ในกรณีของการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า ณ สถานีวิจัยพลังงานลม และในกรณีที่ติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในบริเวณแหล่งลมดี ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ที่ระดับความสูง 60 เมตร ซึ่งเป็นระดับความสูงของศูนย์กลางส่วนหมุนของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 เมกะวัตต์ มีสถานีวิจัยพลังงานลมที่มีอัตราเร็วลมเฉลี่ยมากกว่า 6 เมตรต่อวินาที จำนวน 3 สถานี ได้แก่ ท่าศาลา ปากพนังและระโนด ส่วนสถานีวิจัยพลังงานลมที่มีอัตราเร็วลมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4-6 เมตรต่อวินาที จำนวน 5 สถานี ได้แก่ หัวไทร สทิงพระ1 สทิงพระ2 จะนะและสิงหนคร โดยในกรณีของแหล่งลมดีนั้นได้พิจารณาแบ่งออกเป็นสถานีวิจัยพลังงานลมที่มีศักยภาพของพลังงานลมสูง (> 8 เมตรต่อวินาที) ปานกลาง (5-8 เมตรต่อวินาที) และต่ำ (< 5 เมตรต่อวินาที) ซึ่งพบว่ามีสถานีวิจัยพลังงานลมที่มีศักยภาพของพลังงานลมสูงจำนวน 5 สถานี ได้แก่ ขนอม ท่าชนะ ท่าศาลา สิชลและกาญจนดิษฐ์ สำหรับสถานีวิจัยพลังงานลมที่มีศักยภาพของพลังงานลมปานกลางจำนวน 8 สถานี ได้แก่ ระโนด ท่งหว้า จะนะ เกาะลันดา สทิงพระ1 ปากพนังเหนือคลอง และหัวไทร

การผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยกังหันลมขนาด 1.5 เมกะวัตต์ ณ สถานีวิจัยพลังงานลม และป้อนไฟฟ้าที่ผลิตได้เข้าสู่ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสรุปได้ดังนี้

- (1) โรงไฟฟ้าพลังงานลมที่ผลิตไฟฟ้าป้อนเข้าสู่ระบบจำหน่ายได้มาก ได้แก่
 - สถานีวิจัยพลังงานลมปากพนัง ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ 3.23 จิกะวัตต์ชั่วโมง

- สถานีวิจัยพลังงานลมท่าศาลา ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ 3.16 จิกะวัตต์ชั่วโมง
- สถานีวิจัยพลังงานลมระโนด ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ 2.98 จิกะวัตต์ชั่วโมง
- (2) โรงไฟฟ้าพลังงานลมที่ผลิตไฟฟ้าป้อนเข้าสู่ระบบจำหน่ายได้ปานกลาง ได้แก่
 - สถานีวิจัยพลังงานลมสทิงพระ1 ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ 2.30 จิกะวัตต์ชั่วโมง
 - สถานีวิจัยพลังงานลมจะนะ ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ 1.69 จิกะวัตต์ชั่วโมง
 - สถานีวิจัยพลังงานลมทุ่งหว้า ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ 1.49 จิกะวัตต์ชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมพบว่ามิโรงไฟฟ้าพลังงานลมขนาด 1.5 เมกะวัตต์ ซึ่งทำการติดตั้ง ณ สถานีวิจัยพลังงานลม มีประสิทธิภาพดังนี้

- (3) โรงไฟฟ้าพลังงานลมที่มีประสิทธิภาพสูง (> ร้อยละ 20) ได้แก่
 - สถานีวิจัยพลังงานลมปากพนัง ประสิทธิภาพร้อยละ 24.6
 - สถานีวิจัยพลังงานลมท่าศาลาประสิทธิภาพร้อยละ 24.1
 - สถานีวิจัยพลังงานลมระโนด ประสิทธิภาพร้อยละ 22.3
- (4) โรงไฟฟ้าพลังงานลมที่มีประสิทธิภาพปานกลาง (ร้อยละ10-20) ได้แก่
 - สถานีวิจัยพลังงานลมสทิงพระ1 ประสิทธิภาพร้อยละ 17.5
 - สถานีวิจัยพลังงานลมจะนะ ประสิทธิภาพร้อยละ 12.8
 - สถานีวิจัยพลังงานลมทุ่งหว้า ประสิทธิภาพร้อยละ 11.3

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมขนาด 1.5 เมกะวัตต์ พบว่ามีโรงไฟฟ้าต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าต่ำ (< 7 บาทต่อหน่วย) ดังนี้

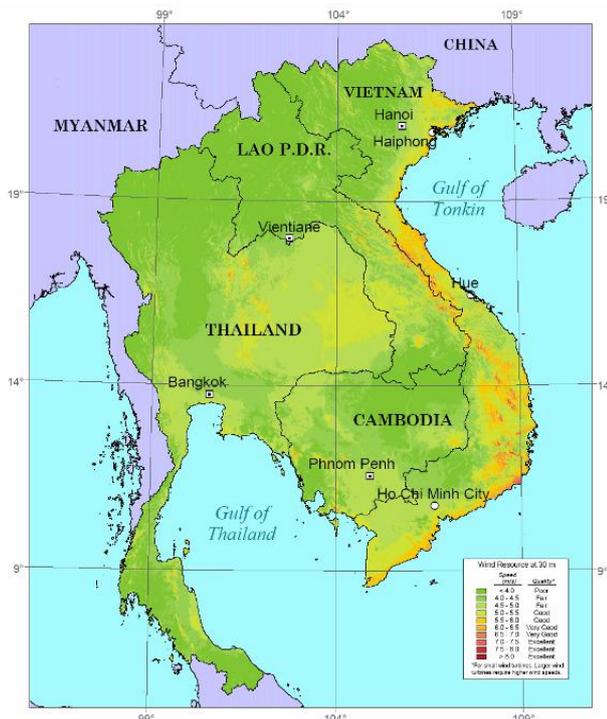
- สถานีวิจัยพลังงานลมปากพนัง ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้า 1.7 บาทต่อหน่วย
- สถานีวิจัยพลังงานลมท่าศาลาต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้า 1.8 บาทต่อหน่วย
- สถานีวิจัยพลังงานลมระโนด ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้า 1.9 บาทต่อหน่วย
- สถานีวิจัยพลังงานลมสทิงพระ1 ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้า 2.5 บาทต่อหน่วย
- สถานีวิจัยพลังงานลมจะนะ ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้า 3.4 บาทต่อหน่วย
- สถานีวิจัยพลังงานลมทุ่งหว้า ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้า 3.7 บาทต่อหน่วย
- สถานีวิจัยพลังงานลมหัวไทร ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้า 4.3 บาทต่อหน่วย
- สถานีวิจัยพลังงานลมสทิงพระ2 ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้า 4.5 บาทต่อหน่วย
- สถานีวิจัยพลังงานลมสิงหนคร ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้า 6.2 บาทต่อหน่วย

สำหรับกรณีของการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า ณ บริเวณแหล่งลมดีนั้นพบว่าต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าต่ำกว่า 3 บาท เกือบทุกสถานี ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมแสดงให้เห็นว่าในกรณีของการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าบนพื้นราบหรือ ณ

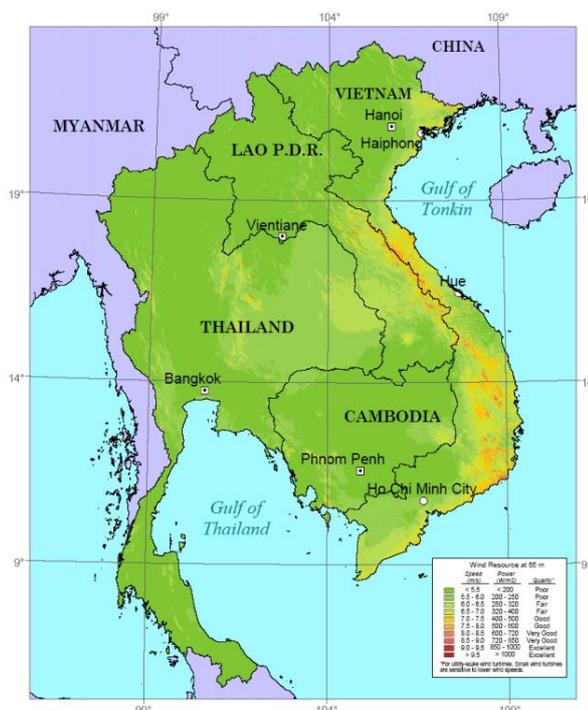
สถานีวิจัยพลังงานลม นั้น มีสถานีวิจัยพลังงานลมที่สามารถติดตั้งกังหันลมได้ทุกขนาดจำนวน 3 สถานี ได้แก่ ท่าศาลา ปากพั่นและระโนด ส่วนสถานีวิจัยพลังงานลมสทิงพระ1 จะนะและทุ่งหว้า สามารถติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้ขนาด 1.0 เมกะวัตต์ ขึ้นไป ส่วนในกรณีของสถานีวิจัยพลังงานลมสทิงพระ2 และสิงหนคร สามารถติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.0 เมกะวัตต์ และ 2.0 เมกะวัตต์ เท่านั้น สำหรับการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในบริเวณแหล่งลมดีนั้น ผลการศึกษวิจัยพบว่าสามารถติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้ทุกขนาดและทุกสถานี ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม WAsP 9.0 พบแหล่งลมดีจำนวน 55 แหล่ง และอาศัยการวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์เพื่อจัดลำดับความสำคัญของการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานลมชนิดฟาร์มกังหันลม โดยทำการติดตั้งฟาร์มกังหันลมผลิตไฟฟ้าจำนวน 55 คลัสเตอร์ ขนาดกำลังการผลิตรวมทั้งสิ้น 385 เมกะวัตต์ ผลจากการวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ปรากฏว่ามีโรงไฟฟ้าพลังงานลมชนิดฟาร์มกังหันลมจำนวน 47 คลัสเตอร์ ตามแนวชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ของประเทศไทยที่มีศักยภาพสูงพอสำหรับการส่งเสริมและพัฒนาต่อไป โดยมีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งจำนวนทั้งสิ้น 348 เมกะวัตต์ แยกรายจังหวัดดังนี้ จ.สุราษฎร์ธานี 20 เมกะวัตต์ จ.นครศรีธรรมราช 179 เมกะวัตต์ จ.สงขลา 104 เมกะวัตต์ จ.กระบี่ 29 เมกะวัตต์ และ จ.สตูล 16 เมกะวัตต์

ปี พ.ศ. 2549 บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ศึกษาศักยภาพพลังงานลมเพื่อผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย พบว่าศักยภาพพลังงานลมผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยมีประมาณ 1,454 เมกะวัตต์ บริเวณที่มีศักยภาพสูง พบว่าเป็นบริเวณอ่าวไทยภาคใต้ ตั้งแต่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี และบริเวณบ้านแหลม จ.เพชรบุรี ความเร็วลมเฉลี่ย 3-4.2 เมตรต่อวินาที กังหันลมที่เหมาะสมขนาด 140 ถึง 320 กิโลวัตต์

แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ที่จัดทำปี พ.ศ. 2544 ธนาคารโลกได้ศึกษาศักยภาพพลังงานลมบนแผ่นดินในคาบสมุทรอินโดจีนที่ความสูง 30 เมตร และ 65 เมตร ด้วยโปรแกรม MesoMap พบว่า เวียดนามมีศักยภาพพลังงานลมในประเทศสูงถึง 500,000 เมกะวัตต์ ในขณะที่ประเทศลาว ไทย และกัมพูชามีศักยภาพ 180,000 เมกะวัตต์ 150,000 เมกะวัตต์ และ 26,000 เมกะวัตต์ ตามลำดับ (<http://web.worldbank.org/>) ดังนั้นพลังงานลมจึงเป็นพลังงานทดแทนหลักตัวหนึ่งที่มีโอกาสเติบโตสูงเพื่อรองรับการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นในอนาคต

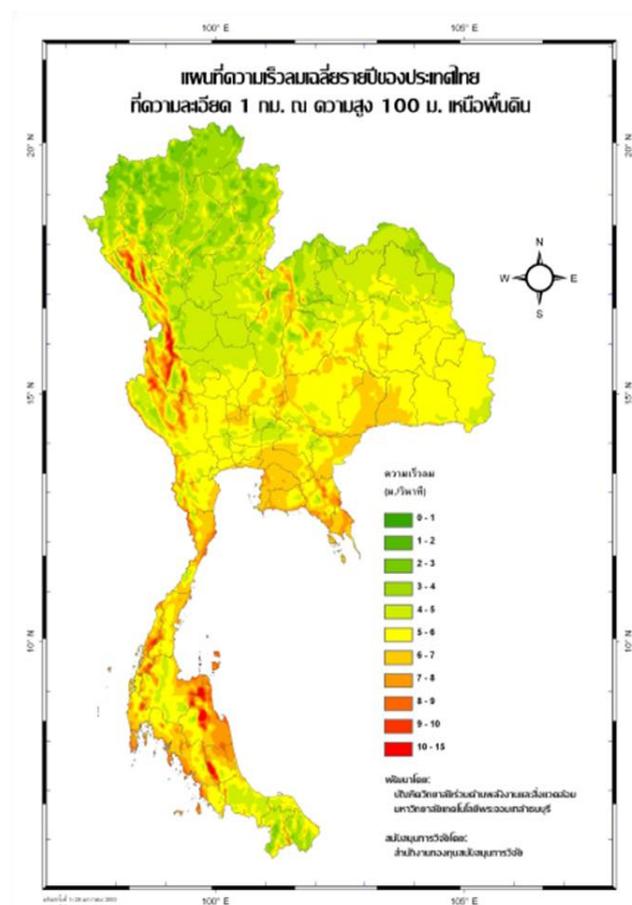


ภาพที่ 2.19 แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานลม โดย โปรแกรม MesoMap ที่ได้รับการสนับสนุนจากรนาคารโลกในระดับความสูง 30 เมตร (ที่มา: www.worldbank.org)



ภาพที่ 2.20 แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานลม โดย โปรแกรม MesoMap ที่ได้รับการสนับสนุนจากรนาคารโลกในระดับความสูง 65 เมตร (ที่มา: www.worldbank.org)

เกษมสันต์ มโนมัยพิบูลย์ และคณะ (2553) ได้มีการศึกษาพัฒนาแผนที่ศักยภาพพลังงานลมที่ความละเอียด 1 กิโลเมตร ครอบคลุมทั่วประเทศไทย ที่ระดับความสูงต่างๆ รวมถึง 100 เมตรเหนือพื้นดิน ควบคู่กับแผนที่ภูมิศาสตร์สารสนเทศเพื่อประกอบการคัดเลือกพื้นที่ติดตั้งกังหันลม โดยใช้ระยะเวลาการพัฒนาทั้งสิ้น 3 ปี (พ.ศ. 2550-2552) โดยวัตถุประสงค์ของแผนที่ดังกล่าวคือใช้เป็นฐานข้อมูลพื้นฐานที่มีความทันสมัยและน่าเชื่อถือมากขึ้นกว่าในอดีตและเข้าถึงได้โดยสาธารณะ (http://complabbkt.jgsee.kmutt.ac.th/wind_proj/) เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาพลังงานลมเพื่อผลิตไฟฟ้าในประเทศ การพัฒนาแผนที่ศักยภาพพลังงานลมนี้ได้อาศัยเทคนิคการจำลองแบบเมโสสเกล-ไมโครสเกลรวมกัน ซึ่งวิธีนี้เหมาะสมสำหรับสเกลพื้นที่ใหญ่ๆ จากการศึกษาพบว่า ผลโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้แต่มีแนวโน้มที่จะให้ค่าสูงกว่าค่าที่ตรวจวัด โดยแสดงแผนที่ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง 100 เมตร ดังภาพที่ 2.17



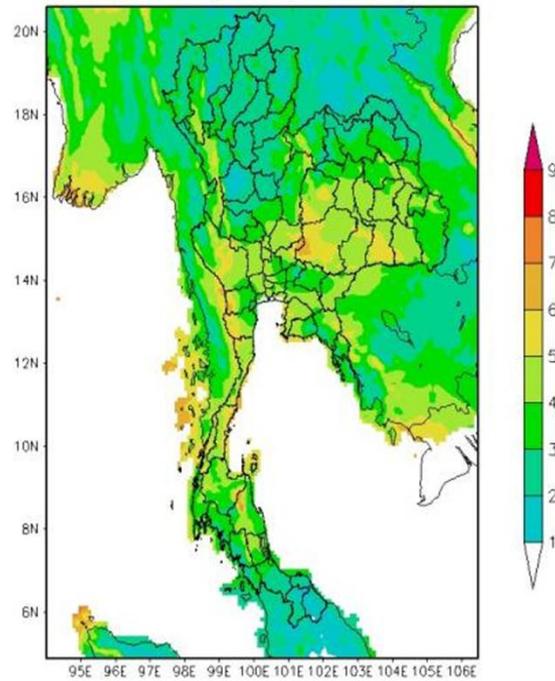
ภาพที่ 2.21 แผนที่ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง 100 เมตร

จอมภพ แววศักดิ์ และคณะ (2551) ได้มีการศึกษาเบื้องต้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมบริเวณชายฝั่งของภาคใต้ โดยอาศัยข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยา 14 แห่งในภาคใต้ ควบคู่กับการใช้โปรแกรมเซอร์เฟอร์ (Surfer) ผลการศึกษาพบว่าแหล่งลมทะเลสาบสงขลาเป็นบริเวณที่มีศักยภาพสูงในการผลิตกระแสไฟฟ้าสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้กล่าวมา

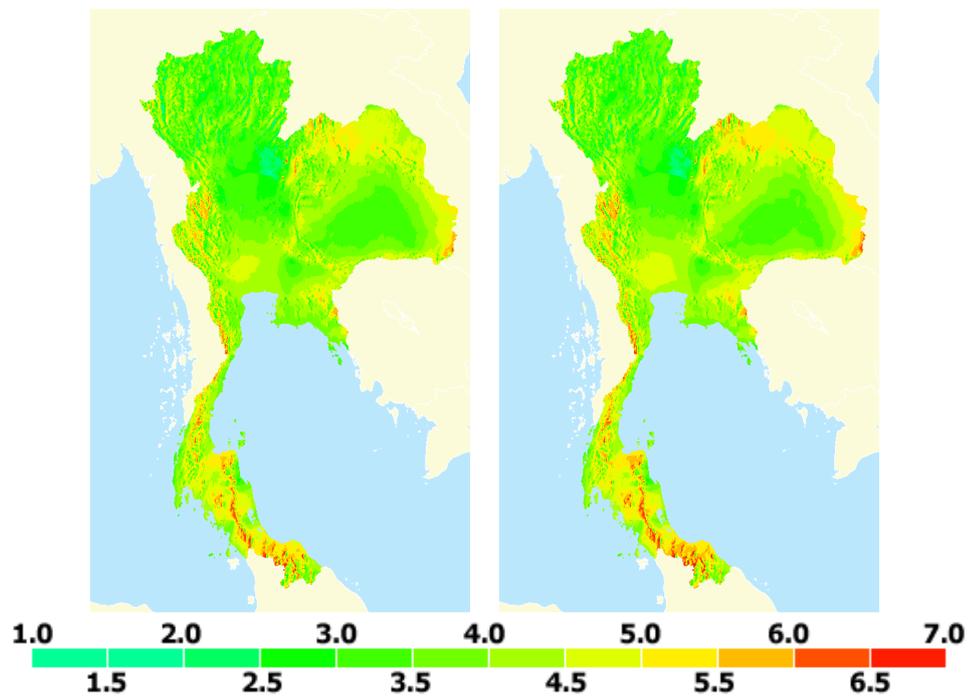
รัตเกล้า พันธุ์รุ่ม และคณะ (2553) ทำการประเมินศักยภาพพลังงานลม โดยอาศัย three-dimensional meso-scale meteorological model มาใช้งาน โดยแบบจำลองดังกล่าวทำการคำนวณหาผลลัพธ์จากชุดสมการของ atmospheric physic process ซึ่งสัมพันธ์กับหลักการด้านพลศาสตร์ (dynamic) เฮอร์โมไดนามิก (thermodynamic) ไมโครฟิสิกส์ (microphysic) และการเปลี่ยนสถานะของความชื้นในบรรยากาศ (moisture phasechange) ผลลัพธ์ที่ได้จาก three-dimensional meso-scale meteorological model คือ ข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยาได้แก่ ความเร็วลม ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้น ในพื้นที่ที่ระดับความสูงต่างๆ ในแต่ละชั่วโมง ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้เป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย ไม่ต้องใช้เครื่องมือวัด ไม่ต้องเสียเวลาในการเก็บข้อมูลตรวจวัดจริง และค่าที่ได้ยังสามารถใช้ทวนสอบกับค่าตรวจวัดจริงได้ด้วย โดยได้ทำการศึกษาข้อมูลลมของปี 2548-2550 ซึ่งถือได้ว่าเป็นปีปกติ หรือ ปีที่สภาพอุตุนิยมวิทยาของไทยไม่ได้รับอิทธิพลสูงจากปรากฏการณ์เอลนีโญ และลานีญา ผลจากการคำนวณทำให้ได้ข้อมูลความเร็วลมรายชั่วโมงที่มีความละเอียดขนาด 10×10 ตารางกิโลเมตร หรือระบุพื้นที่ได้ถึงระดับอำเภอ ซึ่งเป็นการคำนวณที่ละเอียดที่สุดเท่าที่เคยทำในประเทศไทย โดยแสดงแผนที่ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง 70 เมตร ดังภาพที่ 2.18

เสริม จันทร์ฉาย และคณะ (2553) ได้ทำการพัฒนาแผนที่ศักยภาพพลังงานลมสำหรับประเทศไทยฉบับใหม่ โดยในการจัดทำแผนที่ได้ทำการคัดเลือกแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางโดยคณะนักวิจัยของมหาวิทยาลัยคาร์ลสรูห์ ประเทศเยอรมัน (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model, KAMM) สำหรับคำนวณคำนวณความเร็วลมในประเทศไทย และทำการจัดหาข้อมูลสถานะพื้นฐานของบรรยากาศ พร้อมทั้งข้อมูลระดับความสูงของพื้นที่และความหยาบของพื้นที่ (roughness) ของประเทศไทยสำหรับเป็นอินพุทของแบบจำลองจากนั้นใช้ระบบดังกล่าวทำการคำนวณความเร็วลมรายชั่วโมงครอบคลุมช่วงระยะเวลา 15 ปี (ค.ศ. 1995-2009) โดยใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์แล้วนำผลมาหาค่าเฉลี่ยระยะยาวรายเดือนและรายปี แล้วได้นำค่าจากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้วัดแต่ละภูมิภาค ผลการเปรียบเทียบพบว่า ความเร็วลมจากการคำนวณส่วนใหญ่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัด มีค่าความแตกต่างในรูป root mean square difference เท่ากับ 12.9 % และจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยที่ระดับความสูง 10 40 70 90 และ 110 เมตร พบว่าบริเวณที่มีความเร็วลมเฉลี่ย 6-7 m/s อยู่ในพื้นที่ภูเขาในภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แสดงดังภาพที่ 2.19

mean wind speed (70m) in July 2005–2007



ภาพที่ 2.22 แผนที่ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง 70 เมตร

(ที่มา: http://prv.nrct.go.th/shopping/home/show_product.php?research_id=182)

ภาพที่ 2.23 แผนที่ความเร็วลมเฉลี่ยรายปีที่ระดับความสูง 90 เมตร และ 110 เมตร

อาบีดิน จิหลา (2009) ได้ทำการวิจัยการใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับการสร้างแผนที่ศักยภาพพลังงานลม: กรณีศึกษาจังหวัดชัยภูมิ งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม WindSim และเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ใช้ข้อมูลลมที่วัดที่สถานีวัดลมสองสถานีที่ห่างกัน 10 กิโลเมตร คือที่ตำบลท่ามะไฟหวานและตำบลเก่ายาดิ อำเภอแก้งคร้อ จังหวัดชัยภูมิ พบว่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูง 10 เมตร 45 เมตร 60 เมตร และ 90 เมตร มีค่าเท่ากับ 3.19 4.55 4.95 และ 5.33 m/s ตามลำดับ ส่วนที่เก่ายาดิมีค่าเท่ากับ 3.41 4.70 5.24 และ 5.57 m/s

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ

Abadi (2005) ทำการประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานลมสำหรับ 5 สถานีของประเทศซาอุดีอาระเบียโดยอาศัยข้อมูลในระหว่างปี ค.ศ. 1995-2002 โดยโปรไฟล์ความถี่ของความเร็วลมแสดงให้เห็นว่าที่สถานี Dhulam และ Aran มีศักยภาพสูงและมีความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 5.7 เมตรต่อวินาที และ 5.4 เมตรต่อวินาที และใช้กังหันลมรุ่น Nordex N43 ในการพิจารณาการผลิตไฟฟ้าพบว่าสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด 1,080 เมกะวัตต์ชั่วโมง ณ สถานี Dhulam นอกจากนี้ยังได้มีการประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานลมสำหรับเมือง Yanbo ของประเทศซาอุดีอาระเบียอีกด้วย โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิตามปี ค.ศ. 1970-1983 และทำการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมขนาดต่างๆ ดังนี้ 150 กิโลวัตต์ 250 กิโลวัตต์ 600 กิโลวัตต์ 800 กิโลวัตต์ 1,000 กิโลวัตต์ 1,300 กิโลวัตต์ 1,500 กิโลวัตต์ 2,300 กิโลวัตต์ และ 2,500 กิโลวัตต์ โดยผลการศึกษาพบว่าที่ระดับความสูงประมาณ 40 เมตร 50 เมตร 60 เมตร และ 80 เมตร ความเร็วลมมีค่าสูงกว่า 3.5 เมตรต่อวินาที ผลจากการวิเคราะห์การผลิตพลังงานไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าการใช้กังหันลมขนาดเล็กจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่ากังหันลมขนาดใหญ่เนื่องจากความเร็วมีค่าไม่สูงมากนักนั่นเอง โดยฟาร์มกังหันลมมีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งที่เหมาะสมอยู่ในระดับ 30 เมกะวัตต์ นอกจากนี้ capacity factor ของกังหันลมขนาดเล็กมีค่าสูงกว่ากังหันลมขนาดใหญ่อีกด้วย

Acker. et.al. (2007) ได้ทำการประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานลมในมลรัฐโอริโซนา โดยใช้แบบจำลองพลังงานลมสเกลเมโซ (meso-scale wind energy map) และอาศัยข้อมูลทางสารสนเทศภูมิศาสตร์สำหรับพัฒนาแผนที่ลมของสถานีจำนวน 4 สถานี ผลการศึกษาพบว่าทั้ง 4 สถานีมีระดับ (class) แตกต่างกัน และมีค่าระดับอยู่ในช่วง 3-6

Christiansen. et.al. (2006) ใช้ข้อมูลลมเป็นอินพุตสำหรับการประเมินแหล่งพลังงานลม โดยเปรียบเทียบผลการวัดและการประมวลผลจากภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณทะเลเหนือ ผลปรากฏว่าข้อมูลทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันไม่มาก ดังนั้นการประเมินแหล่งพลังงานลมจากภาพถ่ายดาวเทียมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการวิเคราะห์ศักยภาพของพลังงานลมและการจัดทำแผนที่ศักยภาพของพลังงานลมสำหรับพื้นที่บริเวณกว้าง

Elhadidy and Shaahid (2007) ได้ทำการประเมินแหล่งพลังงานลมบริเวณชายฝั่งทางตะวันออกเฉียงของประเทศซาอุดีอาระเบีย โดยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายชั่วโมงซึ่งได้ทำการบันทึกไว้ในปี ค.ศ. 1986-1997 และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรายวัน รายเดือนและรายปีของข้อมูลลมดังกล่าว ผลการศึกษาพบว่าความเร็วลมมีค่าอยู่ในช่วง 4.2-6.4 เมตรต่อวินาที และได้ทำการศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาดพิคัดต่างๆ 150 กิโลวัตต์ 250 กิโลวัตต์ 600 กิโลวัตต์ เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของกังหันลมสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า ผลการวิจัยพบว่าสำหรับฟาร์มกังหันลมขนาด 6 เมกะวัตต์ ที่ระดับความสูงของศูนย์กลางกังหัน 50 เมตร กังหันลมขนาด 150 กิโลวัตต์ สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่ากังหันลมขนาด 600 กิโลวัตต์ ประมาณร้อยละ 48

Elamouri and Amar (2008) ข้อมูลลมจากสถานีอุตุนิยมวิทยาจำนวน 17 สถานีทั่วประเทศตูนิเซียถูกวิเคราะห์โดยวิธีทางอุตุนิยมวิทยาและโดยอาศัยวิธีการกระจายแบบไวบูลล์ โดยทำการตรวจวัดความเร็วลมที่ระดับความสูงของเซนเซอร์ในช่วง 6-12.5 เมตรต่อวินาที และทำการปรับค่าให้เป็นมาตรฐานเดียวกันที่ระดับความสูง 10 เมตร หลังจากนั้นจึงได้ทำการประมาณค่าแบบนอกช่วงเพื่อคำนวณความเร็วลมที่ระดับความสูง 30 เมตร 50 เมตร และ 70 เมตร และได้ทำการวิเคราะห์ไวบูลล์พารามิเตอร์ของแต่ละสถานีรวมทั้งได้ทำการสร้างผังลมของแต่ละสถานี จากผลการศึกษาสามารถจำแนกแหล่งพลังงานลมออกเป็น 3 กลุ่ม

กลุ่ม A มีค่าความเร็วลมระหว่าง 3.6-4.8 เมตรต่อวินาที และมีค่าพลังงานเฉลี่ยอยู่ในช่วง 537-893 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี

กลุ่ม B มีค่าความเร็วลมระหว่าง 2.7-3.6 เมตรต่อวินาที และมีค่าพลังงานเฉลี่ยอยู่ในช่วง 268-433 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี

กลุ่ม C มีค่าความเร็วลมระหว่าง 2.0-2.7 เมตรต่อวินาที และมีค่าพลังงานเฉลี่ยอยู่ในช่วง 128-227 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี

Gokcek et al. (2007) สำหรับในประเทศตุรกีได้มีการตรวจวัดความเร็วลมโดยอาศัยข้อมูลปี ค.ศ. 2004 และได้ทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยรายเดือนและรายปี นอกจากนั้นยังได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบฟังก์ชันไวบูลล์และแบบเรย์เลย์ (Weibull and Rayleigh probability power density function) และอาศัย power law สำหรับการประมาณค่านอกช่วง (extrapolation) เพื่อคำนวณหาความเร็วลมที่ระดับสูงขึ้นไป 30 เมตร 40 เมตร 60 เมตร และ 80 เมตร ผลจากการวิเคราะห์พบว่าความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนมีการกระจายแบบไวบูลล์และพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าดังนี้ shape parameter $k = 1.75$ และ scale parameter $c = 5.25$ เมตรต่อวินาที

Herbert et al. (2007) ได้ทำการปริทรรศน์เกี่ยวกับเทคโนโลยีพลังงานลม โดยได้กล่าวถึงแนวโน้มการใช้พลังงานลมของโลก ขนาดของกังหันลม การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในต่างประเทศบางประเทศ และการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในอนาคต นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงการประเมินศักยภาพของพลังงานลม อิทธิพลของเวก ความน่าเชื่อถือของกังหันลม ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมรวมทั้งเทคโนโลยีกังหันลมในหัวข้อของการออกแบบ ภาระ ใบกังหัน ก่อตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้า การเชื่อมต่อกับระบบสายส่ง ระบบควบคุม และเศรษฐศาสตร์ของระบบกังหันลม

การวิจัยและพัฒนาทางด้านพลังงานลมมักจะเริ่มต้นจากการศึกษาศักยภาพของพลังงานลม โดยเริ่มจากการตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อพิจารณาคุณลักษณะ (characteristics) ของลม ดังจะเห็นได้จากประเทศต่างๆ ดังนี้ ฮังการี ตุรกี ไชปรัส แคนาดา โดยส่วนใหญ่จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรายวันและรายเดือน โดยมีการวิเคราะห์หอนุกรมเวลาของค่าความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูลลมปี ค.ศ. 1991-2000 ในประเทศฮังการี และมีการศึกษาการกระจายของความเร็วลมโดยใช้การกระจายของไวบูลล์รวมทั้งได้มีการศึกษาความเร็วลมที่ระดับความสูงต่างๆ ตั้งแต่ระดับความสูง 20 เมตร 40 เมตร 60 เมตร 80 เมตร และ 100 เมตร โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ เอลล์มาน (Hellmann) แสดงดังสมการที่ 2.46

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^\alpha \quad (2.46)$$

Hoogwijk et al. (2007) ได้ทำการประเมินศักยภาพของพลังงานลมตามแนวชายฝั่งทะเลในระดับมหภาค ระดับภูมิภาค โดยวิเคราะห์ทางเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าศักยภาพทางเทคนิคของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีค่าประมาณ 96 เพตะวัตต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าการบริโภคพลังงานไฟฟ้าทั้งโลกถึง 6-7 เท่า โดยในการผลิตพลังงานปริมาณดังกล่าวจำเป็นต้องติดตั้งกังหันลมบนพื้นที่เท่ากับประเทศจีน ประเทศสหรัฐอเมริกา มีศักยภาพมากที่สุด ภูมิภาคที่มีศักยภาพต่ำที่สุดได้แก่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ทางใต้และทางตะวันตกของทวีปแอฟริกาและญี่ปุ่นด้วย เทคโนโลยีปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจะมีต้นทุนการผลิตประมาณ 0.07 เหรียญสหรัฐต่อกิโลวัตต์ และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าสำหรับประเทศแคนาดา สหรัฐอเมริกา อเมริกาใต้ กลุ่มประเทศ OECD ในยุโรป และอดีตสหภาพโซเวียต

Hrayshat (2007) ได้ทำการประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานลมบริเวณทางใต้ของประเทศจอร์แดน โดยอาศัยข้อมูลจากการตรวจวัดที่ระดับความสูง 10 เมตร เป็นระยะเวลา 12 ปี

(ค.ศ. 1990-2001) โดยทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรายวัน รายเดือนและรายปี และได้ทำการคำนวณความเร็วลมที่ระดับความสูง 20 เมตร 30 เมตร และ 40 เมตร ผลการศึกษาได้เสนอแนะการติดตั้งกังหันลมขนาด 4 กิโลวัตต์ จำนวน 25 ตัว หรือฟาร์มกังหันลมขนาดเล็ก

Khadem and Hussain. (2006) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของแหล่งพลังงานลมโดยใช้ข้อมูลอนุกรมเวลาของความเร็วลมที่มีการตรวจวัดทุกๆ 3 ชั่วโมง เวลา 10 ปี (1991-2000) ของประเทศบังคลาเทศ และได้ทำการวิเคราะห์ความเร็วลมเฉลี่ยรวมทั้งทำการคำนวณความเร็วลมที่ระดับความสูง 30 เมตร 50 เมตร 65 เมตร 75 เมตร และ 90 เมตร โดยอาศัยกฎลอการิทึม (logarithmic law) และใช้โปรแกรม WAsP สำหรับการประเมินพลังงานลมโดยพิจารณาอิทธิพลของสิ่งกีดขวาง ความขรุขระ และลักษณะทางภูมิประเทศ โดยผลการศึกษาได้ข้อสรุปว่าควรจะมีการตรวจวัดที่ระดับความสูง 50 เมตร ในพื้นที่ที่มีศักยภาพสูงสำหรับการติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่ โดยกังหันลมขนาดความสูง 30 เมตร หรือสูงกว่าจะมีความยั่งยืนมากกว่า โดยบริเวณทางใต้และทางตะวันออกเฉียงของประเทศบังคลาเทศเป็นบริเวณที่มีศักยภาพของพลังงานลมสูงสำหรับการผลิตไฟฟ้า

Li and Li. (2005) นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาคุณลักษณะของลมและการประเมินศักยภาพของพลังงานลมสำหรับ Waterloo ประเทศแคนาดา โดยอาศัยข้อมูลการตรวจวัดลมผิวพื้นที่ระดับความสูง 10 เมตร คาบ 5 ปี (ค.ศ. 1999-2003) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมและทิศทางรายวัน รายเดือนและรายปี รวมทั้งได้อาศัยข้อมูลจากการวิเคราะห์สำหรับการประมาณค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นกำลังลม (average wind power density วัดต่อตารางเมตร) พบว่าบริเวณดังกล่าวมีความหนาแน่นกำลังลมเฉลี่ยประมาณ 105 วัตต์ต่อตารางเมตร และมีความหนาแน่นกำลังลมสูงสุดเท่ากับ 118 วัตต์ต่อตารางเมตร

Migoya. et.al. (2007) ได้ทำการประเมินแหล่งพลังงานลมในเขตบริเวณเมืองมาดริดโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ WAsP สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา การผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม ผลการวิจัยปรากฏว่าเมืองมาดริดมีพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งกังหันลมที่มีระดับความสูงของศูนย์กลางกังหัน 78 เมตร ประมาณ 220 ตารางกิโลเมตร และไม่มีปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งที่ระดับความสูงดังกล่าวมีความเร็วลมประมาณ 7 เมตรต่อวินาที ผลจากการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า การติดตั้งฟาร์มกังหันลมขนาดกำลังการผลิตทั้งหมด 200 เมกะวัตต์ มีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

Nguyen (2007) ทำการประเมินแหล่งพลังงานลมในประเทศเวียดนาม รวมทั้งได้วิเคราะห์สถานภาพการพัฒนาและการใช้ประโยชน์ในอนาคต โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographical Information System, GIS) สำหรับการจัดทำแผนที่ โดยพบว่าพื้นที่ 31,000 ตาราง

กิโลเมตร สามารถพัฒนาเพื่อติดตั้งกังหันลมจำนวน 865 ตารางกิโลเมตร ซึ่งมีกำลังการผลิตเท่ากับ 3,572 เมกะวัตต์ โดยมีค่าจ่ายในการผลิตไฟฟ้าน้อยกว่า 0.06 เหรียญดอลลาร์สหรัฐต่อวัตต์ชั่วโมง ซึ่งผลจากการผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยพลังงานลมสามารถแก้ปัญหาครัวเรือนที่ยังไม่มีไฟฟ้าใช้อีกประมาณ 300,000 ครัวเรือน