

บทที่ 2

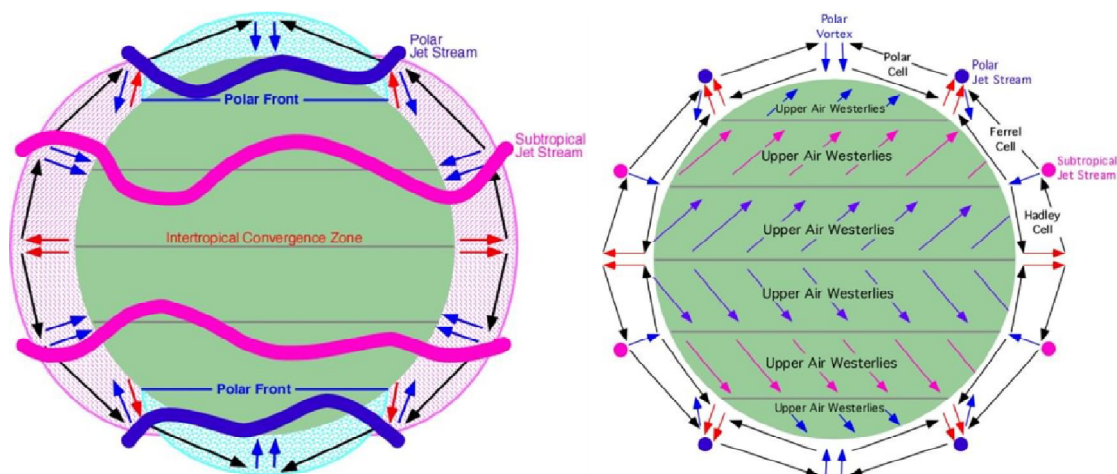
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลมเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ความกดดันของบรรยากาศและแรงจากการหมุนของโลก ลมสามารถนำมาใช้ในรูปแบบของพลังงานอย่างไม่มีวันหมดสิ้น ปัจจุบันได้มีการพัฒนากังหันลม ซึ่งเป็นชุดเครื่องจักรกลชนิดหนึ่งที่เปลี่ยนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกลและนำพลังงานมาใช้ในการสูบน้ำ และระบบผลิตไฟฟ้าและด้วยเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาตลอดหลายสิบปีทำให้พลังงานลมเป็นพลังงานสะอาดที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 ลม

ลม คือ มวลของอากาศที่เคลื่อนที่ในแนวนอน ส่วนกระแสอากาศ คือ อากาศที่เคลื่อนที่ในแนวตั้ง การเรียกชื่อลมนั้นเรียกตามทิศทางลมนั้นๆ พัดมา เช่น ลมที่พัดมาจากทิศเหนือเรียกว่าลมเหนือ และลมที่พัดมาจากทิศใต้เรียกว่าลมใต้ โดยที่เกิดลมมาจากปรากฏการณ์ของอากาศที่มีการเคลื่อนไหว โดยเกิดจากความแตกต่างของความดันอากาศหรือความร้อนสองจุดบนผิวโลก โดยลมจะพัดจากบริเวณที่มีความดันอากาศสูง ไปยังบริเวณที่มีความดันอากาศต่ำ โดยกระแสการไหลของลมจะหยุดเมื่อความดันของสองจุดมีค่าเท่ากัน อย่างไรก็ตามการไหลของลมจะเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากแรงโคริโอลิส (Coriolis Force) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของโลกเป็นสาเหตุให้การไหลจากศูนย์สูตรไปยังขั้วโลกมีการเบี่ยงเบนไปทางด้านทิศตะวันออกและการไหลกลับไปยังศูนย์สูตรมีการเบี่ยงเบนไปทางด้านทิศตะวันตกซึ่งทำให้เกิดลมนั่นเอง

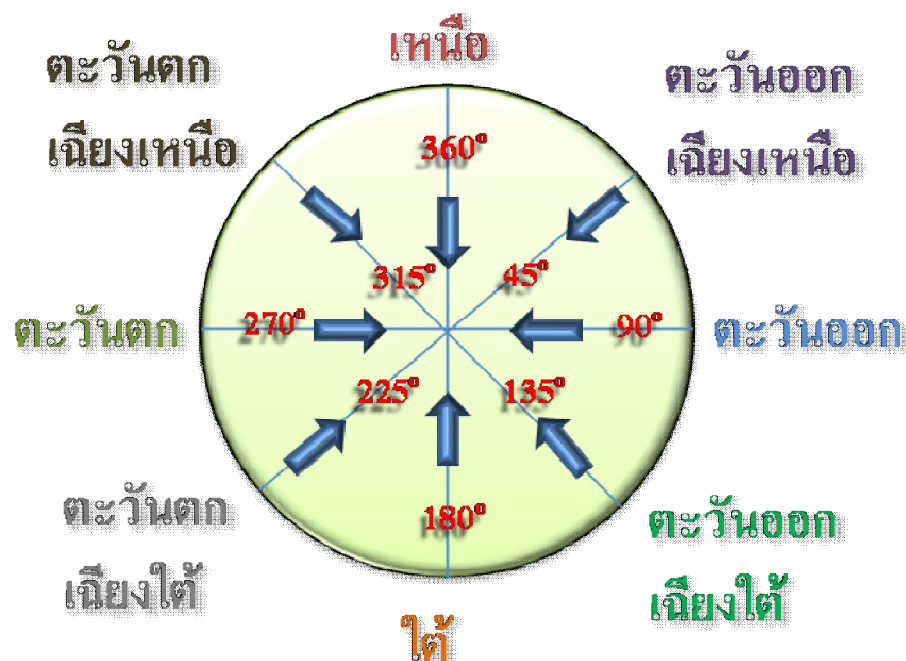


ภาพที่ 2 การไหลเวียนของบรรยากาศเหนือผิวโลก
(ที่มา: Physicalgeography. สืบค้นเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2555, จาก
www.physicalgeography.net/fundamentals/7q.html)

2.1.2 การวัดลม

ข้อมูลที่จำเป็นในการวัดมี 2 ค่า คือการวัดทิศทางลม และวัดอัตราเร็วลม

1. ทิศลม อาจเรียกชื่อตามทิศต่างๆ ของเข็มทิศ หรือเรียกเป็นองศาจากทิศจริง ปัจจุบันการวัด ทิศลมนิยมวัดทิศลมตามเข็มทิศ และวัดเป็นองศา ถ้าวัดทิศลมด้วยเข็มทิศ เข็มทิศจะถูกแบ่งออกเป็น ทิศใหญ่ๆ 4 ทิศ คือ ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก ซึ่งทิศทั้ง 4 ทิศ เมื่อแบ่งย่อยอีกจะเป็น 8 ทิศ โดยจะเพิ่มทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ทิศตะวันออกเฉียงใต้ ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ และทิศตะวันตกเฉียงใต้ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งจาก 8 ทิศ ให้ย่อยเป็น 16 ทิศ หรือ 32 ทิศ ได้อีก แต่การรายงานทิศนั้น มักนิยมรายงานจำนวนทิศเพียง 8 หรือ 16 ทิศ เท่านั้น ส่วนการวัดทิศลมที่เป็นองศาบอกมุมของลมจากทิศจริง ในลักษณะที่เวียนไปตามเข็มนาฬิกา ใช้สเกลจาก 0 องศา ไปจนถึง 360 องศา เช่น ลมทิศ 0 องศา หรือ 360 องศา เป็นทิศตะวันออก ลมทิศ 45 องศา เป็นทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ลมทิศ 90 องศา เป็นทิศตะวันออก ลมทิศ 135 องศา เป็นทิศตะวันออกเฉียงใต้ ลมทิศ 180 องศา เป็นทิศใต้ ลมทิศ 225 องศา เป็นทิศตะวันตกเฉียงใต้ ลมทิศ 270 องศา เป็นทิศตะวันตก และลมทิศ 315 องศา เป็นทิศตะวันตกเฉียงเหนือ



ภาพที่ 3 ทิศทางลมเรียกเป็นองศาจากทิศทางจริง

(ที่มา: Physicalgeography. สืบค้นเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2555, จาก

www.physicalgeography.net/fundamentals/7q.html)

2. อัตราเร็วลมคือ การเคลื่อนที่ของอากาศที่ทำให้เกิดแรง หรือความกดที่ผ่านจุดที่กำหนดให้บนพื้นผิวโลก และแรงหรือความกดเป็นสัดส่วนกับกำลัง 2 ของความเร็วลม อธิบายดังในรูปของสมการที่ 2.1

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.1)$$

เมื่อ	P	คือ ความดันที่เกิดจากการกระทำของลม (W/m^2)
	v	คือ อัตราเร็วลม (m/s)
	ρ	คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

2.1.3 เครื่องมือวัดลม

2.1.3.1 เครื่องวัดทิศทางลม เรียกว่า ศรลม (Wind Vane) ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นลูกศรยาว ซึ่งมีความยาวเป็นเส้นทางตรงเป็นตัวบังคับให้ปลายศรลมชี้ในทิศทางที่ลมพัดเข้ามา โดยมีแกนของศรลมหมุนไปโดยรอบ และต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้า อ่านทิศทางลมตามที่ปลายศรลมชี้ไปที่หน้าหัดของเครื่อง



ภาพที่ 4 ศรลม

(ที่มา : APRS World's Gallery. สืบค้นเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2555, จาก

<http://www.aprsworld.com/gallery/Wind-Vane>)

2.1.3.2 เครื่องวัดอัตราเร็วลม เรียกว่า แอนิโมมิเตอร์ (Anemometer) ซึ่งแอนิโมมิเตอร์แบบเก่าแก่ที่สุดคือ แบบแผ่นกระดก (Pressure Plate Anemometer) ประดิษฐ์โดย โรเบิร์ต ฮุก (Robert Hook) เมื่อปี พ.ศ. 2210 ประกอบด้วย แผ่นโลหะรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแขวนติดอยู่กับแกน และแกนนี้ติดอยู่กับเสาในแนวตั้ง แผ่นโลหะนี้หมุนรอบแกนได้อย่างอิสระ และตั้งฉากกับทิศทางลมเสมอ เมื่อมีลมพัดปะทะกับแผ่นโลหะ ปลายด้านหนึ่งของแผ่นโลหะจะกระดกขึ้น มุมที่แผ่นโลหะทำกับแนวตั้งนั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของลม ถ้าลมนั้นแรงมากมุมที่จะทำให้ใหญ่ขึ้น ความเร็วลมอ่านได้จากสเกลที่ทำไว้บนโลหะ โค้งที่ติดอยู่กับแกนของแผ่นโลหะ ปัจจุบันแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ แบบลูกถ้วย (Cup Anemometer) ประกอบด้วย ลูกถ้วยรูปครึ่งทรงกลม 3 หรือ 4 ใบ ติดอยู่กับเพลาในแนวตั้ง



ภาพที่ 5 แอนิโมมิเตอร์แบบ 3 ลูกถ้วย

(ที่มา : Directindustry. สืบค้นเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2555, จาก

<http://www.directindustry.com/prod/nrg-systems/cup-anemometers-61562-403309.html>)

ความกดที่แตกต่างกันจากด้านหนึ่งของลูกถ้วยไปหนึ่งไปยังลูกถ้วยอีกใบหนึ่ง เป็นเหตุให้ลูกถ้วยหมุนรอบ ๆ เพลา อัตราที่ลูกถ้วยหมุนจะเป็นสัดส่วนตรงต่อความเร็วลม การหมุนของลูกถ้วยปกติจะถูกเปลี่ยนกลับเป็นความเร็วลมผ่านระบบเกียร์และสามารถอ่านความเร็วลมได้จากหน้าปัดหรือส่งไปยังเครื่องบันทึกเวลา

ส่วนเครื่องวัดที่วัดได้ทั้งความเร็วลมและทิศทางลม เรียกว่า แอโรเวน (Aero Vane) โดยรวมแอนิโมมิเตอร์และครลมเข้าด้วยกัน เครื่องมือนี้ใช้ใบพัด 3 ใบวัดความเร็วลม ใบพัดหมุนเป็นอัตราส่วนกับความเร็วลม ด้วยรูปร่างของเครื่องที่มีรูปทรงอากาศพลศาสตร์ดีและมีหางเสืออยู่ในแนวตั้งช่วยให้ใบพัดหันเข้าหาลม ดังภาพที่ 6 ครลมจะทำหน้าที่ 2 อย่าง คือ บอกทิศทางลมและช่วยให้แกนของใบพัดชี้เข้าหาทิศทางลม ทั้งแอนิโมมิเตอร์และครลม เชื่อมต่อเข้ากับเครื่องมือที่ทำการบันทึก



ภาพที่ 6 แอโรเวน

(ที่มา : The Physical Environment. สืบค้นเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2555, จาก

http://www.earthonlinemedia.com/ebooks/tpe_3e/essentials/geographic_inquiry.html)

2.1.4 ลักษณะของลมในประเทศไทย

2.1.4.1 ลมประจำปี เป็นลมที่พัดอยู่เป็นประจำตลอดทั้งปีในส่วนต่างๆ ของโลก แตกต่างกันไปในแต่ละเขตละติจูดของโลกเป็นลมที่เกิดจากความกดอากาศที่มีอยู่เดิมตลอดปี เนื่องมาจากบริเวณขั้วโลกและบริเวณเส้นศูนย์สูตรได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ไม่เท่ากันทำให้ลมพัดผ่านส่วนต่างๆ ของโลกประจำ ประกอบกับการเบี่ยงเบนเนื่องจากการหมุนของโลกเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เช่น บริเวณซีกโลกใต้จะมีลมพัดจากทิศตะวันออกเฉียงใต้ไปยังทิศตะวันตกเฉียงเหนือ เรียกว่า ลมสินค้า เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในบริเวณเขตศูนย์สูตร อิทธิพลของลมประจำปีจึงไม่มีประโยชน์ในการนำมาใช้ แต่ลมประจำปีที่มีอิทธิพลต่อทวีปยุโรปมากที่สุดคือลมตะวันตกเฉียงใต้ เนื่องจากลมตะวันตกเฉียงใต้พัดผ่านมหาสมุทรแอตแลนติกทำให้น้ำฝนมาตกบนพื้นแผ่นดินของทวีปยุโรปทำให้อากาศเย็นสบาย ส่วนลมขั้วโลกตะวันออกเฉียงเหนือพัดพาความหนาวเย็นจากขั้วโลกเหนือทำให้อากาศทางตอนเหนือของทวีปมีอากาศหนาวยิ่งขึ้น เมื่อลมขั้วโลกตะวันออกเฉียงเหนือมาปะทะลมตะวันตกเฉียงใต้ทำให้เกิดฝนปะทะมวลอากาศตกในทวีปยุโรปอยู่เป็นประจำ

2.1.4.2 ลมประจำฤดู เป็นลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางตามฤดูกาลและเป็นลมที่พัดเป็นเวลานานตลอดฤดูของทุกปี เรียกว่า ลมมรสุม (Monsoon) มาจากคำในภาษาอาหรับว่า Mausim

แปลว่า ฤดู ดังนั้นลมมรสุมจึงหมายถึง ลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางพร้อมกับการเปลี่ยนฤดู ในประเทศไทยโดยปกติ ลมมรสุมจะมี 2 ฤดู คือ

1. **ลมมรสุมฤดูร้อน** ซึ่งเป็นลมพัดจากทะเลเข้าสู่พื้นดิน เกิดขึ้นในฤดูร้อน ลมมรสุมฤดูร้อนจะนำความชุ่มชื้นหรือฝนจากทะเลมาสู่แผ่นดิน ในทวีปเอเชียและประเทศไทยเรียกว่า ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยจะพัดอยู่ยาวนาน 6 เดือน คือ ระหว่างเดือนเมษายนถึงเดือนกันยายน

2. **ลมมรสุมฤดูหนาว** เป็นลมพัดจากใจกลางทวีปที่มีความกดอากาศสูง ไปสู่ ทะเลหรือบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำเป็นลมที่นำความหนาวเย็นและความแห้งแล้ง เรียกว่า ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ พัดอยู่ยาวนาน 6 เดือน คือ ระหว่างเดือนตุลาคมถึงเดือนมีนาคม

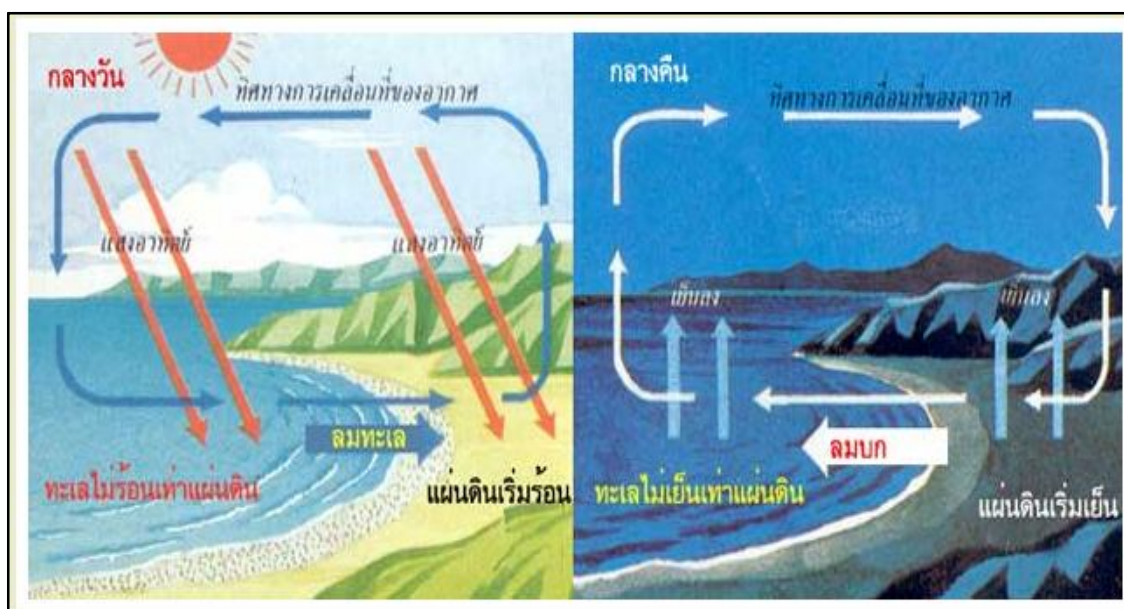


ภาพที่ 7 ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและตะวันตกเฉียงใต้
(ที่มา : กรมอุตุนิยมวิทยา. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน 2555, จาก
<http://www.tmd.go.th/info/info.php>)

2.1.4.3 ลมประจำเวลา เป็นลมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความกดอากาศระหว่าง 2 บริเวณในระยะเวลาสั้นๆ ได้แก่ ลมบก ลมทะเล ลมภูเขา และลมหุบเขา บริเวณที่อยู่ตามชายฝั่งอิทธิพลของลมบกและลมทะเลมีสูงมาก

1. ลมบก (Land Breeze) เกิดขึ้นในเวลากลางคืน เมื่อพื้นดินคายความร้อน โดยการแผ่รังสีออก จะคายความร้อนออกได้เร็วกว่าพื้นน้ำ ทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าพื้นน้ำ อากาศเหนือพื้นน้ำซึ่งร้อนกว่าพื้นดินจะลอยตัวขึ้นสู่เบื้องบน อากาศเหนือพื้นดินซึ่งเย็นกว่าจะไหลเข้าไปแทนที่เกิดเป็นลมพัดจากฝั่งไปสู่ทะเล ลมบกซึ่งลมบกจะมีความแรงของลมอ่อนกว่าลมทะเล จึงไม่สามารถพัดเข้าสู่ทะเลได้ระยะทางไกลเหมือนลมทะเล โดยลมบกสามารถพัดเข้าสู่ทะเลมีระยะทางเพียง 8-10 กิโลเมตร เท่านั้น

2. ลมทะเล (Sea Breeze) เกิดขึ้นในฤดูร้อนตามชายฝั่งทะเล ในเวลากลางวันเมื่อพื้นดินได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูงกว่า พื้นน้ำ และอากาศเหนือพื้นดินเมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัวลอยขึ้นสู่เบื้องบน อากาศเหนือพื้นน้ำซึ่งเย็นกว่าจะไหลเข้าไปแทนที่ เกิดลมจากทะเลพัดเข้าหาฝั่งมีระยะทางไกลถึง 16-48 กิโลเมตร และความแรงของลมจะลดลงเมื่อเข้าถึงฝั่ง

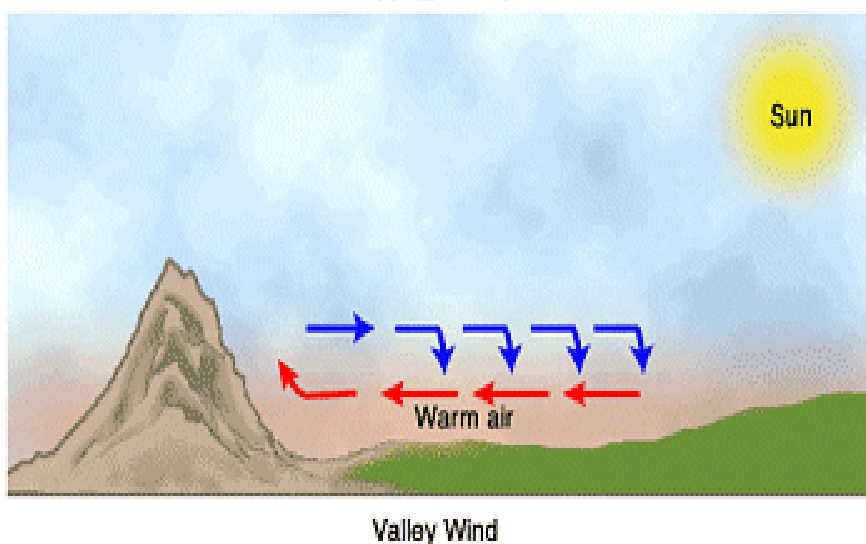
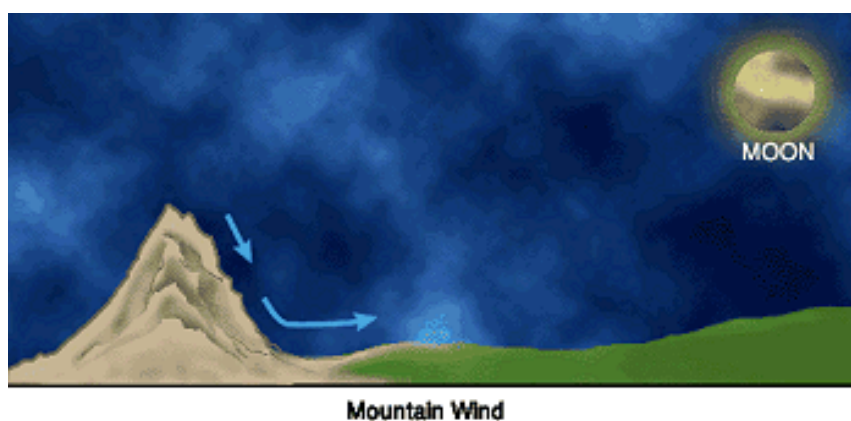


ภาพที่ 8 ลมบกและลมทะเล

(ที่มา : ชาญชัย เลิศวิมลศักดิ์. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน 2555, จาก

<https://sites.google.com/site/wwwwindwindcom/history>)

3. **ลมภูเขาและลมหุบเขา (Mountain and Valley Winds)** เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสันเขาและหุบเขา โดยลมภูเขาจะพัดจากสันเขาลงไปสู่หุบเขาในตอนกลางคืน เนื่องจากบริเวณสันเขาอยู่ในที่สูงกว่าจึงเย็นเร็วกว่าหุบเขาดังนั้นจึงมีลมพัดลงจากยอดเขาสู่หุบเขา ส่วนลมหุบเขาจะพัดจากหุบเขาขึ้นไปสู่สันเขาโดยเกิดขึ้นในตอนกลางวัน เนื่องจากบริเวณหุบเขาเบื้องล่างจะมีอุณหภูมิต่ำกว่ายอดเขาจึงมีลมพัดขึ้นไป ตามความสูงของสันเขา นอกจากนี้ยังมีการเรียกชื่อลมตามทิศการเคลื่อนที่ในแต่ละฤดูกาล เช่น ลมมรสุม ซึ่งหมายถึงลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางกับการเปลี่ยนฤดูคือฤดูร้อนจะพัดอยู่ในทิศทางหนึ่ง และจะพัดเปลี่ยนทิศทางเป็นตรงกันข้ามในฤดูหนาว



ภาพที่ 9 ลมภูเขาและลมหุบเขา
(ที่มา : กรมอุตุนิยมวิทยา. สืบค้นเมื่อวันที่ 18 พฤศจิกายน 2555, จาก
<http://www.tmd.go.th/info/info.php>)

4. ลมตะเภาและลมว่าว เป็นลมท้องถิ่นในประเทศไทย โดยลมตะเภาเป็น ที่พัดจากทิศใต้ไปยังทิศเหนือคือ พัดจากอ่าวไทยเข้าสู่ภาคกลางตอนล่าง พัดในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ถึงเดือนเมษายน ซึ่งเป็นช่วงที่ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ จะเปลี่ยนเป็นลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ เป็นลมที่นำความชื้นมาสู่ภาคกลางตอนล่าง ในสมัยโบราณลมนี้จะช่วยพัดเรือสำเภาซึ่งเข้ามาค้าขายให้แล่นไปตามลำน้ำเจ้าพระยา และพัดในช่วงที่ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จะเปลี่ยนเป็นลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ หรืออาจจะเรียกว่าลมข้าวเบา เพราะพัดในช่วงที่ข้าวกำลังออกรวง

2.1.5 สถิติลม (Wind Statistics)

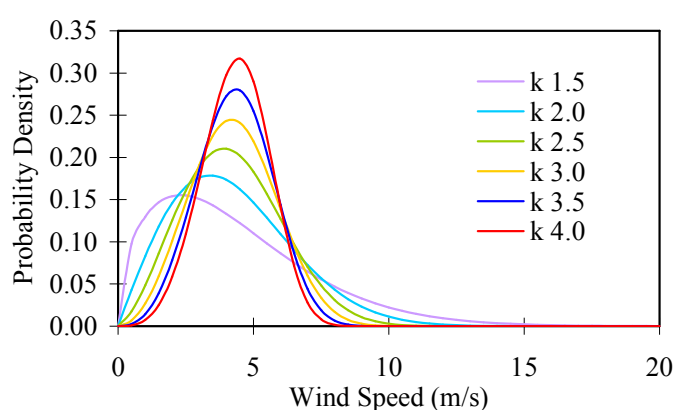
การแจกแจงไวบูลล์เป็นการแจกแจงทางสถิติ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว ที่สามารถใช้แทนลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลลมสถิติ และเป็นการแจกแจงที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลลมสถิติ การแจกแจงไวบูลล์ประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังนี้

1. พารามิเตอร์รูปร่าง (Shape Parameter, k -Shape)

พารามิเตอร์รูปร่างเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะการกระจายของสถิติลม ในบริเวณที่มีค่า V ต่ำ แสดงว่าในบริเวณนั้นมีความเร็วลมต่ำพัดบ่อยครั้งกว่าความเร็วลมสูง และในกรณีที่ค่า V สูง ก็จะแสดงผลที่ตรงกันข้ามกัน ดังภาพที่ 10 แสดงการแจกแจงไวบูลล์เมื่อค่า k มีค่าต่างกัน

2. พารามิเตอร์ระดับ (Scale Parameter, c -Scale)

พารามิเตอร์ระดับเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วลมเฉลี่ย เมื่ออัตราเร็วลมเฉลี่ยมีค่าสูง c จะมีค่าสูง และเมื่ออัตราเร็วลมเฉลี่ยมีค่าต่ำ c จะมีค่าต่ำด้วย



ภาพที่ 10 การแจกแจงไวบูลล์เมื่อค่า k มีค่าต่างกัน ($c = 4.8$ m/s)

(ที่มา : InVEST 2.5.2 Documentation. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 พฤศจิกายน 2555, จาก

http://ncp-dev.stanford.edu/~dataportal/invest-releases/documentation/2_5_2/wind_energy.html)

การแจกแจงไวบูลล์เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) ที่สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 2.2

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

อัตราเร็วลมเฉลี่ยพิจารณาได้จากสมการที่ 2.3

$$\bar{V} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (2.3)$$

งานวิจัยนี้อาศัยระเบียบวิธีทางกราฟในการพิจารณาพารามิเตอร์ไวบูลล์ทั้งสอง ทั้งนี้จะพิจารณาจากสมการแจกแจงสะสม (Cumulative Frequency Distribution) ของอัตราเร็วลม

$$F(V) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (2.4)$$

เมื่อ	V	คือ	อัตราเร็วลม (m/s)
	k	คือ	พารามิเตอร์รูปร่าง
	c	คือ	พารามิเตอร์ระดับ (m/s)

จัดรูปสมการใหม่ โดยการใส่ค่า $\ln$ ทั้ง 2 ข้างของสมการ จะได้

$$\ln \left[-\ln (1 - F(V)) \right] = k \ln V - k \ln c \quad (2.5)$$

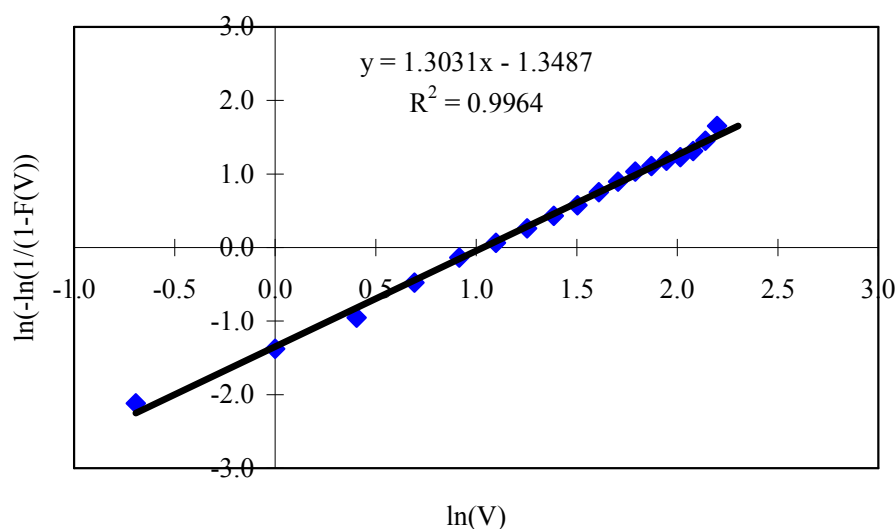
พิจารณาให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง

$$Y_i = kX_i + K \ln c \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$Y_i = \ln \left[-\ln (1 - F(V)) \right] \text{ และ } X_i = \ln V$$

เนื่องจากสมการที่ 2.6 เป็นสมการเส้นตรง ดังนั้นสามารถนำค่าไปพล็อตกราฟเมื่อกำหนดให้ $Y = \ln[-\ln(1-F(V))]$ และ $X = k \ln(V)$, $b = -k \ln(C)$ ซึ่งความชันของกราฟที่ได้คือค่า k และค่า $c = \exp\left(-\frac{b}{k}\right)$ แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ระเบียบวิธีทางกราฟสำหรับการวิเคราะห์ไวบูลล์พารามิเตอร์

(ที่มา : InVEST 2.5.2 Documentation. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 พฤศจิกายน 2555, จาก

http://ncp-dev.stanford.edu/~dataportal/invest-releases/documentation/2_5_2/wind_energy.html)

2.1.6 เกรเดียนท์อัตราเร็วลมทางดิ่ง (Vertical Wind Speed Gradient)

อัตราเร็วลมที่ระดับผิวพื้น (Surface) มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากความเสียดทาน (Friction) ระหว่างอากาศและพื้นดินซึ่งเป็นอิทธิพลของชั้นขอบเขต (Boundary Layer Effect) อย่างไรก็ตามอัตราเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งใกล้พื้นดินและอัตราเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยลงที่ระดับความสูงสูงขึ้น ที่ระดับความสูง 2 กิโลเมตรเหนือพื้นดินการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วลมจะมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งเรียกลมที่ระดับความสูงนี้ว่าลมชั้นบน (Upper Wind) การเปลี่ยนแปลงทางดิ่งของอัตราเร็วลม (Vertical Variation of the Wind Speed) หรือโปรไฟล์อัตราเร็วลม (Wind Speed Profile) สามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันหลายรูปแบบด้วยกัน แต่โดยทั่วไปแล้วมักจะอธิบายด้วยฟังก์ชันพื้นฐานที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วลมเฉลี่ย (Mean Wind Speed) เทียบกับความสูงซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานของการทดลองดังนี้

1. ฟังก์ชันยกกำลัง (Power Exponent Function)

ฟังก์ชันยกกำลังเป็นสมการที่ได้จากการแทนค่าโปรไฟล์ของความเร็วลมบริเวณผิวพื้นของการไหลแบบปั่นป่วนที่ได้จากการทดลองดังสมการที่ 2.7

$$V_z = V_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (2.7)$$

เมื่อ	z	คือ	ระดับความสูงที่ต้องการทราบค่าอัตราเร็วลมเหนือพื้นดิน (เมตร)
	z_r	คือ	ระดับความสูงที่ทราบค่าอัตราเร็วลมเหนือพื้นดิน (เมตร)
	V_r	คือ	อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง z_r (เมตร/วินาที)
	V_z	คือ	อัตราเร็วลมที่ต้องการทราบค่าที่ระดับความสูง z (เมตร/วินาที)
	α	คือ	สัมประสิทธิ์แรงเฉือนลม (ไร้หน่วย)

ฟังก์ชันยกกำลังได้นำมาประยุกต์ใช้กับการปรับค่าความเร็วลมที่ระดับความสูงต่างๆ โดยได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมตามลักษณะความขรุขระของพื้นผิว

เนื่องจากการวัดความเร็วลมในจุดตรวจวัดต่างๆ ได้มีการติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมที่ระดับความสูงจากพื้นดินแตกต่างกัน ดังนั้นในการนำข้อมูลที่ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบต้องทำการปรับค่าความเร็วลมให้อยู่ในระดับความสูงที่เท่ากัน ซึ่งโดยทั่วไปนิยมปรับค่าความเร็วลมให้อยู่ในระดับความสูง 10 m จากพื้น ซึ่งเป็นระดับความสูงที่เป็นไปตามมาตรฐานขององค์การอุตุนิยมวิทยาโลก แต่ในทางพลังงานอาจจะปรับค่าความเร็วลมให้อยู่ในระดับความสูงของศูนย์กลางส่วนหมุนของกังหันลม เพื่อสามารถพิจารณาพลังงานที่กังหันลมสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานได้

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมสามารถทำได้โดยการประยุกต์ Logarithmic แสดงดังสมการที่ 2.8

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{V_z}{V_r}\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_r}\right)} \quad (2.8)$$

เมื่อ	V_z	คือ	อัตราเร็วลมที่ต้องการทราบค่าที่ระดับความสูง z (เมตร/วินาที)
-------	-------	-----	---

สัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมส่วนใหญ่จะมีค่าตั้งแต่ 0.1 – 0.4 ตามสภาพความขรุขระของพื้นที่ที่ทำการศึกษา ซึ่งจากการศึกษาของนักวิจัยที่ผ่านมาได้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมที่สภาพพื้นที่ต่างๆ แต่เนื่องจากในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 20 เมตร 30 เมตร และ 40 เมตร ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมเฉพาะพื้นที่ (Site Dependent Wind Shear Coefficient) ได้จากสมการที่ 2.8

2. ฟังก์ชันลอการิธึม (Logarithmic Function)

ฟังก์ชันลอการิธึมสำหรับการอธิบายโปรไฟล์อัตราเร็วลมทางดิ่งแสดงดังสมการที่ 2.9

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (2.9)$$

เมื่อ z_0 คือ ความยาวของความขรุขระ (Roughness Length) (เมตร)
สัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมและความยาวของความขรุขระสำหรับลักษณะภูมิประเทศต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณโปรไฟล์ทางดิ่งของอัตราเร็วลม

ชนิดของภูมิประเทศ	ชั้นความขรุขระ (Roughness Class)	ความยาวของ ความขรุขระ (Roughness Length) (เมตร)	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

อย่างไรก็ตามฟังก์ชันทั้งสองสามารถใช้ได้เมื่อทราบอัตราเร็วลมที่ระดับความสูงอ้างอิง (Reference Height) สำหรับค่าความยาวของความขรุขระนั้นอาจจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.5-1.0 สำหรับสวนผลไม้และต้นไม้เตี้ยๆ และมีค่าอยู่ในช่วง 1-2 สำหรับพื้นที่ป่าปกคลุมและใจกลางเมือง

2.1.7 พลังงานลมและกำลังลม (Wind Energy and Power)

พลังงานจลน์ของกระแสอากาศที่มีมวล m และเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.10

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (2.10)$$

พิจารณาส่วนหมุน (Rotor) ของกังหันลมที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง (Cross Sectional Area) A พลังงานจลน์ของกระแสอากาศที่กังหันลมสามารถนำไปเปลี่ยนรูปได้แสดงดังสมการที่ 2.11

$$E = \frac{1}{2} \rho_a v V^2 \quad (2.11)$$

เมื่อ	ρ_a	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	V	คือ	ปริมาตรของก้อนมวลอากาศ (Air Parcel) ที่พัดผ่านส่วนหมุน (ลูกบาศก์เมตร)

ก้อนมวลอากาศที่พัดผ่านส่วนหมุนต่อหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งมีพื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากับพื้นที่ภาคตัดขวางของส่วนหมุน (A_T) ดังนั้นพลังงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา (E/t) หรือกำลัง (Power) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3 \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังของกระแสลมได้แก่ ความหนาแน่นอากาศ พื้นที่ส่วนหมุนของกังหันลมและความเร็วลม โดยที่อิทธิพลของลมค่อนข้างส่งผลกระทบต่อกำลังลมเนื่องจากมีค่ายกกำลังสาม

ปัจจัยอย่างเช่นอุณหภูมิ (Temperature) ความกดอากาศ (Atmospheric Pressure) ระดับความสูง (Elevation) และองค์ประกอบของอากาศ (Air Constituents) จะส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของอากาศ เมื่อพิจารณาอากาศแห้ง (Dry Air) ซึ่งพิจารณาให้เป็นแก๊สอุดมคติ (Ideal Gas) และจากกฎของแก๊สอุดมคติ (Ideal Gas Law) แสดงดังสมการที่ 2.13

$$pV_G = nRT \quad (2.13)$$

เมื่อ	p	คือ	ความกดอากาศ (ปาสคาล)
	V_G	คือ	ปริมาตรของแก๊ส (ลูกบาศก์เมตร)
	n	คือ	จำนวนกิโอมอลของแก๊ส (โมล)
	R	คือ	ค่าคงที่สากลของแก๊ส (Universal Gas Constant)
	T	คือ	อุณหภูมิ (เคลวิน)

ความหนาแน่นของอากาศซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างมวลของ 1 kmole/m³ แสดงดังสมการที่ 2.14

$$\rho_a = \frac{m}{V_G} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.13 และสมการที่ 2.14 เราสามารถเขียนสมการความหนาแน่นได้เป็น

$$\rho_a = \frac{mp}{RT} \quad (2.15)$$

ถ้าเราทราบระดับความสูง z และอุณหภูมิ T ณ สถานีวัดความเร็วลม เราสามารถคำนวณหาความหนาแน่นอากาศได้ดังสมการที่ 2.16

$$\rho_a = \frac{353.049}{T} e^{\left(-0.034 \frac{z}{T}\right)} \quad (2.16)$$

ความหนาแน่นของอากาศมีค่าลดลงเมื่อความสูงและอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่แล้วความหนาแน่นอากาศมักจะพิจารณาให้มีค่าคงที่เท่ากับ 1.225 (กิโกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

ในการวิเคราะห์พลังงานลมได้มีการจัดทำระดับชั้นกำลังลม (Wind Power Class) เพื่อป้องกันถึงศักยภาพของพลังงานลมโดยมีระดับชั้นกำลังลมที่ความสูง 10 m และ 50 m แสดงดังตารางที่ 2 และอัตราเร็วลมเฉลี่ยอ้างอิงจากการแจกแจงราเลย์ และเป็นอัตราเร็วลมสำหรับเงื่อนไขระดับน้ำทะเลมาตรฐาน (Standard Sea-Level Condition)

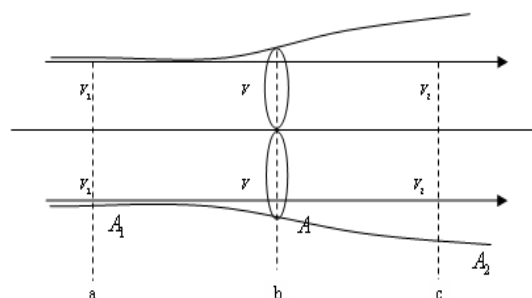
ตารางที่ 2 ระดับชั้นกำลังลมที่ความสูง 10 เมตร และ 50 เมตร

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

2.1.8 กังหันลมผลิตไฟฟ้า

2.1.8.1 ข้อจำกัดของเบตซ์ (Betz Limit)

กำลังลมเป็นปริมาณพลังงานต่อหน่วยเวลาที่อยู่ในกระแสอากาศ มีเพียงปริมาณกำลังบางส่วนเท่านั้นที่สามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ (Useful Energy) โดยกังหันลม กำลังที่กังหันลมสามารถเปลี่ยนรูปได้จะมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านส่วนหมุนของกังหัน พิจารณาการไหลผ่านหลอดกระแสอากาศ (Stream Tube) ที่พิจารณาให้เป็นรูปปิด (Enclosure) ของส่วนหมุนแสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การไหลผ่านหลอดกระแสอากาศ (Stream Tube)

ที่พิจารณาให้เป็นรูปปิด (Enclosure) ของส่วนหมุน

(ที่มา : University of Sydney. สืบค้นเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน 2555, จาก http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/propeller/prop1.html)

โดยพิจารณาให้การไหลของอากาศเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible) เนื่องจากความเร็วลมโดยปกติมีค่าต่ำดังนั้นจึงไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น เส้นกระแส (Streamline) มักจะพุ่งออกเมื่อลมเคลื่อนที่ผ่านส่วนหมุนของกังหันเนื่องจากกระแสมีความเร็วลดลง เมื่อพิจารณาทฤษฎีโมเมนตัมพื้นฐานที่ว่าความดันจะมีค่าคงที่ และภายใต้สมมติฐานที่ว่าอิทธิพลดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากใบกังหันลมขนาดบางจำนวนไม่จำกัด (Infinite Number of Thin Blades) ทำให้เกิดแรงที่เท่ากันต่อกระแสการไหลของอากาศซึ่งมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยสำหรับส่วนหมุนจริง

อัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) มีค่าคงที่สำหรับกระแสอากาศที่ต้นสาย (Upstream) ส่วนหมุนและปลายสาย (Downstream) คำนวณได้จากสมการที่ 2.17

$$\text{Mass Flow Rate, } m = \rho A_o V_o = \rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 \quad (2.17)$$

แรง F ที่กระทำต่อส่วนหมุนเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมดังนี้

$$F = m(V_o - V_2) \quad (2.18)$$

กำลังที่ส่วนหมุนดึงไปใช้จะเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ดังนี้

$$W = m[(1/2)V_o^2 - (1/2)V_2^2] \quad (2.19)$$

ที่ส่วนหมุน แรงที่ทำให้เกิดงาน ณ อัตราเร็วลม V_1 สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$W = FV_1 \quad (2.20)$$

จากสมการที่ 2.18-2.20 เราสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$V_1 = (1/2)(V_o + V_2) \quad (2.21)$$

อาศัยปัจจัยความเร็วลมที่ปลายสาย b เพื่ออธิบายอัตราส่วนระหว่างอัตราเร็วลมที่ต้นสายและที่ปลายสายดังนี้

$$b = \frac{V_2}{V_0} \quad (2.22)$$

อาศัยสมการที่ 2.17 สมการที่ 2.19 และสมการที่ 2.20 จะได้ว่า

$$\frac{F}{A_1} = (1/2)\rho V_o^2 (1-b^2) \quad (2.23)$$

และใช้สมการที่ 2.20 และสมการที่ 2.21

$$\frac{W}{A_1} = (1/2)\rho V_o^3 \times (1/2)(1-b^2)(1+b) \quad (2.24)$$

สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (Coefficient of Performance), C_p มีนิยามให้เป็น สัดส่วนของพลังงานที่ถูกนำไปใช้โดยกังหันลมต่อพลังงานรวมของกระแสลมที่ไหลผ่านพื้นที่ กวาดของกังหันในกรณีที่ไม่มีกังหันวางอยู่ ดังนั้น

$$C_p = \frac{W}{W_1} \quad (2.25)$$

เมื่อ

$$W_1 = 1/2\rho A_1 V_o^3 \quad (2.26)$$

ทำให้ได้

$$C_p = 1/2(1-b^2)(1+b) \quad (2.27)$$

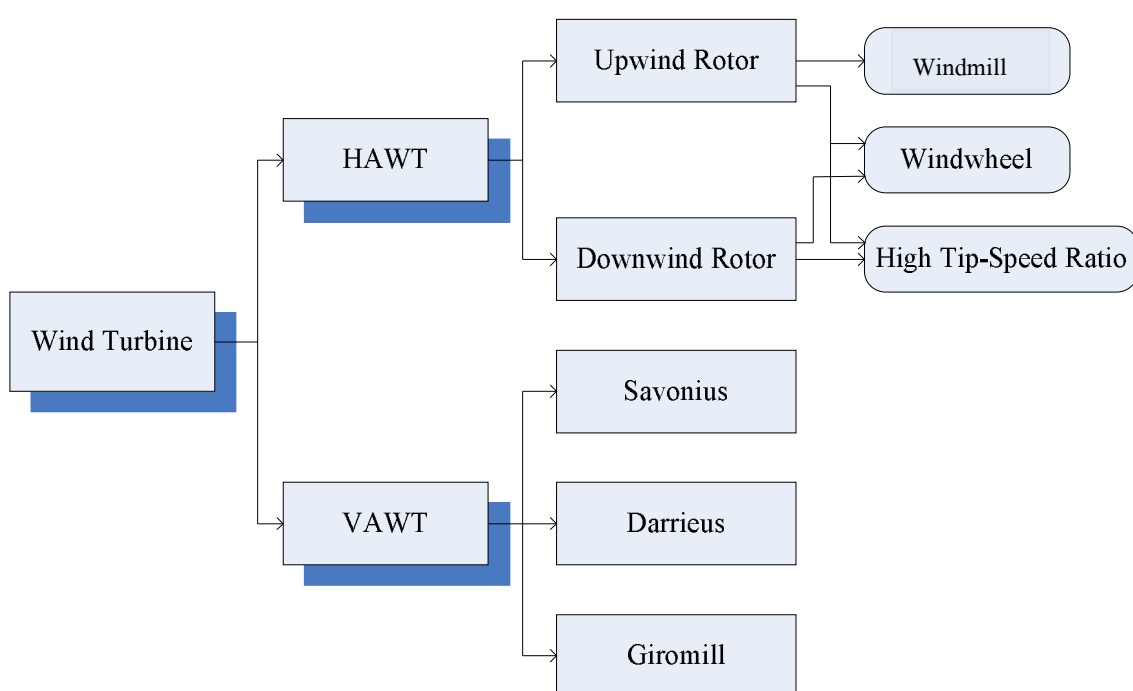
ทำการอนุพันธ์ C_p เทียบกับ b และแสดงให้เห็นว่า C_p มีค่ามากที่สุดเมื่อ $b = 1/3$ ทำให้ได้

$$C_p = \frac{16}{27} \text{ หรือ } 59\% \quad \text{ซึ่งเป็นข้อจำกัดของเบทซ์ (Betz)}$$

เบทซ์ (Betz) ได้นำเสนอข้อจำกัดดังกล่าวในปี ค.ศ. 1919 และสามารถใช้ได้กับกังหันลม ทุกชนิด

2.1.8.2 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

กังหันลมสามารถจำแนกออกเป็น 2 ชนิด หลักๆ โดยอาศัยแกนหมุน ได้แก่ กังหันลมแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine) และกังหันลมแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine) ในกรณีของกังหันลมแกนนอนสามารถจำแนกตามลักษณะการปะทะกับกระแสลมได้เป็น 2 ชนิด คือ กังหันต้นกระแสลม (Upwind Turbine) และกังหันปลายกระแสลม (Downwind Turbine) ส่วนในกรณีของกังหันลมแกนตั้งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลักๆ ได้แก่ Savonius Darrieus และ Giromill แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ชนิดของกังหันลม

2.1.8.3 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

กังหันลมผลิตไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญๆ ดังนี้

1. ส่วนหยุดนิ่ง (Stationary Part)

ประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1.1 หอคอย (Tower)

1.2 ห้องเครื่อง (Nacelle)

2. ส่วนหมุน (Rotating Part)

ประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

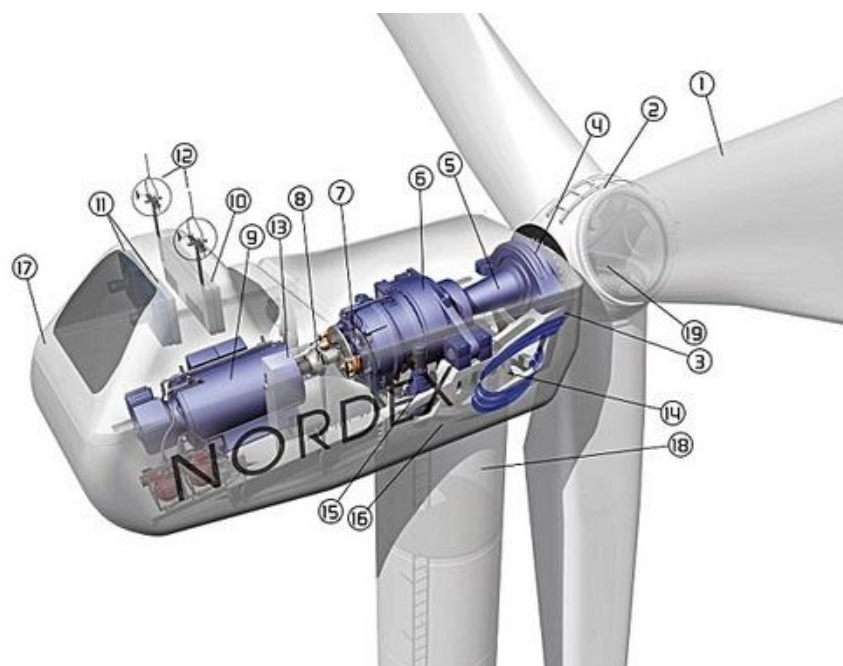
2.1 ใบกังหันลม (Wind Turbine Blade)

2.2 ศูนย์กลางส่วนหมุน (Hub)

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ประกอบตัวกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่สำคัญได้แก่

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)
2. ระบบควบคุมการทำงาน (Operating Controller)
3. เซนเซอร์ตรวจวัดอัตราเร็วและทิศทางของลมสำหรับควบคุมการทำงานของกังหันลม

ส่วนประกอบที่สำคัญของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 กังหันลมรุ่น Nordex N80 ขนาด 2.5 MW

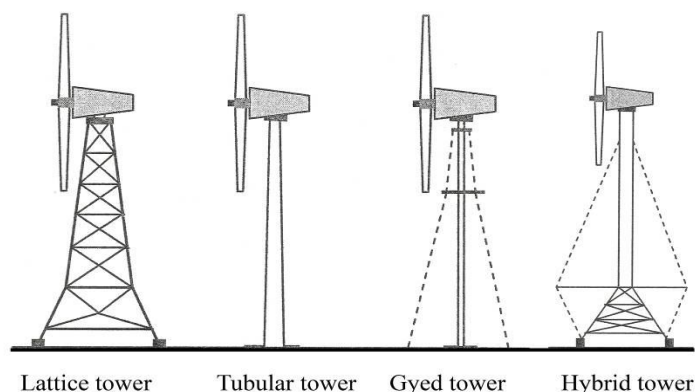
(ที่มา: Kington, T. สืบค้นเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน 2555, จาก

<http://sgdelestaing.pagesperso-orange.fr/Francais/Eoliennes.htm>)

กังหันลมขนาดใหญ่แสดงดังภาพที่ 14 มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

1. ใบพัด (Rotor Blades) ทำจากไฟเบอร์กลาสผสมพลาสติก
2. ศูนย์กลางใบพัด (Hub) ทำจากเหล็กหล่อ (Cast Iron)

3. ห้องเครื่องของกังหัน (Turbine Frame) มีลักษณะเป็นท่อทำจากเหล็กหล่อซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนทานต่อการสั่นและมีลักษณะลดการเกิดเสียง
4. ตลับลูกปืนของส่วนหมุน (Rotor Bearing) เป็นตลับลูกปืนทรงกลมแข็งสองชั้นมีลักษณะของกล่องเป็นท่อ
5. เพลาของส่วนหมุน (Rotor Shaft) มีลักษณะเป็นท่อทำจากเหล็กหล่อ
6. กล่องเกียร์ (Gearbox) เป็นแบบเกียร์ทศรอบ 2 ชั้น
7. จานเบรก (Disk Brake) ประกอบด้วยเบรกแบบปากคีบอยู่ที่เพลาความเร็วรอบสูงของกล่องเกียร์
8. ส่วนคู่ควบของตัวกำเนิดไฟฟ้า (Generator Coupling)
9. ตัวกำเนิดไฟฟ้า (Generator) มีระบบระบายความร้อนด้วยของเหลวเป็นแบบอะซิงโครนัสแบบป้อนสองทาง
10. ตัวระบายความร้อน (Cooling Radiator) เป็นส่วนทำความเย็นสำหรับกล่องเกียร์
11. พัดลมระบายความร้อน (Fan Coolers) สำหรับระบายความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
12. ระบบวัดลม (Wind Measuring System) ประกอบไปด้วยแอนิโมมิเตอร์และสตรัมซึ่งสามารถวัดเงื่อนไขของลมและส่งสัญญาณไปยังระบบควบคุมกังหัน
13. ระบบควบคุม (Control System) ทำหน้าที่ติดตามและควบคุมการทำงานของกังหันลม
14. ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic System) จะรักษาและควบคุมความดันไฮดรอลิกของจานเบรกและระบบเบรกสำหรับการขับเคลื่อนกังหัน
15. ระบบขับเคลื่อนกังหัน (Yaw Drive) ประกอบไปด้วยเกียร์ 2 ตัว ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้าที่ควบคุมด้วยความถี่
16. ตลับลูกปืนของตัวขับเคลื่อน (Yaw Bearing) เป็นแบบ 4-Point Ball-Bearing With Outer Teething และมีระบบจานเบรกของตัวขับเคลื่อน
17. ส่วนครอบนักเซลล์ (Nacelle Cover) ทำจากไฟเบอร์กลาสผสมด้วยพลาสติกวางอยู่บนโครงสร้างเหล็ก
18. หอคอย (Tower) มีหลายระดับความสูงและมีรูปทรงแตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 15
19. ระบบพิช (Pitch System) ประกอบด้วยเกียร์พิชอิสระกัน 3 ตัว ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า



ภาพที่ 15 ชนิดต่างๆ ของหอคอยกังหันลม

(ที่มา : Kathleen Wynne. สืบค้นเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน 2555, จาก

<http://www.omafr.gov.on.ca/english/engineer/facts/03-047.htm>)

2.1.8.4 เส้นโค้งกำลัง (Power Curve)

เส้นโค้งกำลังสามารถบ่งบอกถึงสมรรถนะของกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยปกติเราสามารถประมาณค่ากำลังไฟฟ้าจากกังหันลมโดยใช้เส้นโค้งกำลัง ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแบบกังหันลมและสมบัติของแหล่งลม โดยแสดงอยู่ในรูปของความหนาแน่นความน่าจะเป็นของอัตราเร็ว (Speed Probability Density) ซึ่งในการวิเคราะห์ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมมักจะอาศัยสมการที่ 2.28

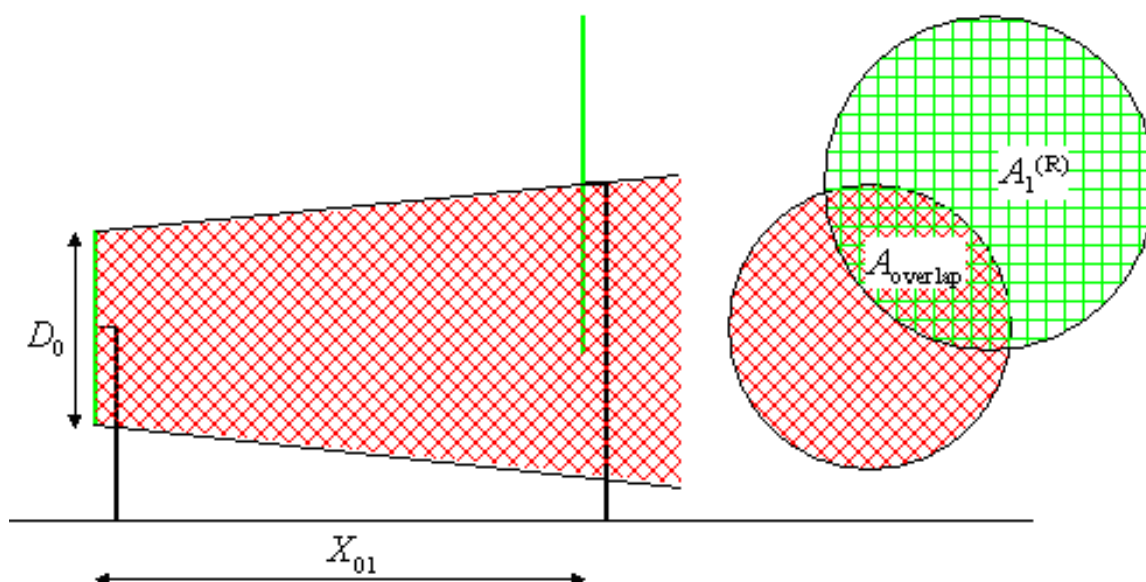
$$P = \begin{cases} 0, (v < v_{ci}), \\ P_r \frac{v^k - v_{ci}^k}{v_r^k - v_{ci}^k}, (v_{ci} \leq v \leq v_r), \\ P_r, (v_r \leq v \leq v_{co}), \\ 0, (v > v_{co}) \end{cases} \quad (2.28)$$

โดยที่	P	คือ	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลม (kW)
	P_r	คือ	กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากกังหันลม (kW)
	v_{ci}	คือ	Cut In Wind Speed (m/s)
	v_{co}	คือ	Cut Out Wind Speed (m/s)
	v_r	คือ	Rated Wind Speed (m/s)

2.1.8.5 อิทธิพลของเวก (Wake Effect)

ลมที่เคลื่อนที่ผ่านกังหันจะมีพลังงานลดลงซึ่งเป็นไปตามกฎของอนุรักษ์พลังงาน ลมที่เคลื่อนที่ผ่านกังหันจะมีอัตราเร็วลดลงและเกิดเป็นกลุ่มลมด้านหลังและมีความปั่นป่วนเมื่อเปรียบเทียบกับลมด้านหน้ากังหัน ดังนั้นการจัดวางกังหันลมสำหรับฟาร์มกังหันจึงมักจะจัดวางให้ห่างกันอย่างน้อยเป็นระยะ 7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเพื่อหลีกเลี่ยงความปั่นป่วนทางด้านหลังของกังหันลมซึ่งอาจจะเป็นด้านหน้าของกังหันลมตัวอื่นๆ นั่นเอง

การคำนวณ Wake Effect ระหว่างกังหันลมในฟาร์มกังหันลมมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองซึ่งถูกอธิบายในบทความทางวิชาการในการประชุมวิชาการ European Wind Energy Association 1986 (EWEA 1986) สนามการไหล (Flow Field) ที่ใช้ในแบบจำลองสำหรับการคำนวณเอาต์พุตของกังหันลมแสดงดังนี้



ภาพที่ 16 พื้นที่เหลื่อมทับกันของกังหันลมเมื่อมองจากด้านหลัง

(ที่มา : The Wind Farm. สืบค้นเมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน 2555, จาก

<http://130.226.56.171/Support/FAQ/WebHelp/ParkModel.htm>)

อัตราเร็วลมประสิทธิภาพที่ลดลง (Effective Wind Speed Deficit) เมื่อไหลผ่านทางด้านหลังของกังหันตัวหน้าแสดงดังภาพที่ 16 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.29

$$\delta V_{01} = U_0 \left(1 - \sqrt{1 - C_t}\right) \left(\frac{D_0}{D_0 + 2kx_{01}}\right)^2 \frac{A_{overlap}}{A_1^{(R)}} \quad (2.29)$$

เมื่อ	U_0	คือ	อัตราเร็วลมที่ไม่ถูกรบกวนทางด้านหน้าของกังหันลม (m/s)
	D_0	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนหมุน (m)
	C_t	คือ	สัมประสิทธิ์ของทรัสต์ (Trust Coefficient)
	x_0	คือ	ระยะทางในแนวราบระหว่างกังหันลมสองตัว (m)
	k	คือ	ค่าคงที่การสลายตัวของเวก (Wake Decay Constant)

สัมประสิทธิ์ของทรัสต์มีความสัมพันธ์กับแรง F_T และความหนาแน่นของอากาศดังนี้

$$C_t = \frac{2F_T}{\rho \frac{\pi}{4} D_0^2 U_0^2} \quad (2.30)$$

การลดลงของอัตราเร็วลมเริ่มต้นจาก U_0 จนมีค่าเท่ากับ V เมื่ออากาศไหลผ่านแนวระนาบการหมุน (Rotor Plane) มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของทรัสต์ดังนี้

$$1 - C_t = (V/U_0)^2 \quad (2.31)$$

โดยที่ค่าคงที่ของการสลายตัวของเวกมีค่า $k = 0.075$ ซึ่งเป็นค่าสำหรับการใช้งานบนพื้นทวีป ในกรณีของนอกชายฝั่งค่าดังกล่าวมีค่าประมาณ $k = 0.04$

2.1.9 ผลกระทบทางเสียงเนื่องจากการติดตั้งกังหันลม

โดยปกติแล้วอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนไหวย่อมจะก่อให้เกิดเสียงดัง ในระดับที่เกิดการรบกวนได้แม้แต่กังหันลมผลิตไฟฟ้า อย่างไรก็ตามผู้ผลิตกังหันลมมักจะออกแบบกังหันลมให้ทำงานอย่างเงียบเชียบเมื่อเปรียบเทียบกับเสียงดังจากการจราจรบนท้องถนน เสียงจากอากาศยานและกิจกรรมจากการก่อสร้าง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกิจกรรมดังกล่าวแล้วการทำงานของกังหันลมก่อให้เกิดเสียงดังน้อยกว่ามาก ซึ่งระดับความดังของเสียงจากแหล่งต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3

เสียงรบกวน คือ ระดับเสียงจากแหล่งกำเนิดในขณะที่มีการรบกวนที่มีระดับเสียงสูงกว่าระดับเสียงพื้นฐาน โดยมีระดับการรบกวนเกินกว่าระดับเสียงรบกวนที่กำหนดไว้ในคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 29 (พ.ศ. 2550) เรื่อง ค่าระดับเสียงรบกวน

ระดับเสียงพื้นฐาน คือ ระดับเสียงที่ตรวจวัดในสิ่งแวดล้อมในขณะที่ยังไม่เกิดเสียงหรือไม่ได้รับเสียงจากแหล่งกำเนิดที่ประชาชนร้องเรียนหรือแหล่งกำเนิดที่คาดว่าประชาชนจะได้รับการรบกวน

ระดับเสียงขณะมีการรบกวน คือ ระดับเสียงที่ได้จากการตรวจวัดและจากการคำนวณระดับเสียงในขณะที่เกิดเสียงของแหล่งกำเนิด ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่ประชาชนร้องเรียนหรือแหล่งกำเนิดที่คาดว่าประชาชนจะได้รับการรบกวน

ระดับเสียงขณะไม่มีการรบกวน คือ ระดับเสียงที่ตรวจวัดในสิ่งแวดล้อมในขณะที่ยังไม่เกิดเสียงหรือไม่ได้รับเสียงจากแหล่งกำเนิดที่ประชาชนร้องเรียนหรือแหล่งกำเนิดที่คาดว่าประชาชนจะได้รับการรบกวน เป็นระดับเสียงเฉลี่ย (L_{Aeq})

ตารางที่ 3 ระดับความดังของเสียงเนื่องจากกิจกรรมและแหล่งกำเนิดเสียงต่างๆ

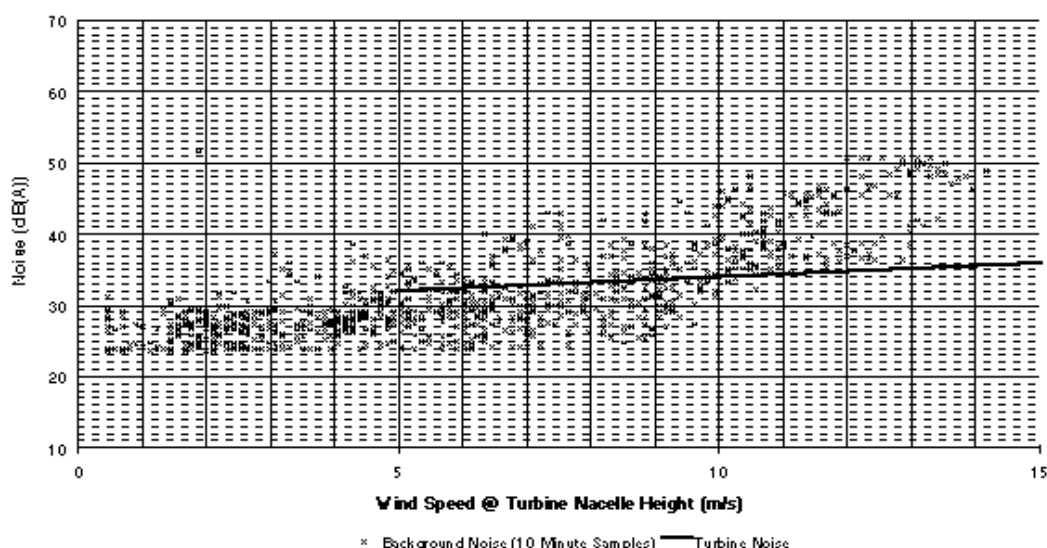
Source/Activity	Indicative Noise Level dB (A)
Threshold of Hearing	0
Rural Night-Time Background	20-40
Quiet Bedroom	35
Wind Farm at 350 m	35-45
Car at 40 mph at 100 m	55
Busy General Office	60
Truck at 30 mph at 100 m	65
Pneumatic Drill at 7 m	95
Jet Aircraft at 250 m	105
Threshold of Pain	140

(ที่มา : The Scottish Office, Environment Department, Planning Advice Note, PAN 45, Annex A: Wind Power, A.27. Renewable Energy Technologies, August 1994)

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า เสียงจากฟาร์มกังหันลมมีค่าน้อยกว่าเสียงจากการจราจรบนท้องถนน ถึงแม้ว่าอัตราเร็วของลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม อย่างไรก็ตามการพยากรณ์การเพิ่มขึ้นของระดับเสียงดังที่เกิดขึ้นเนื่องจากจะต้องทำการลดระดับของเสียงพื้น (Background

Sound) ออกก่อน เช่น เสียงเนื่องจากลม โดยภาพที่ 17 แสดงระดับของเสียงดังที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วลมเพิ่มสูงขึ้น

Background Noise and Turbine Noise vs. Wind Speed



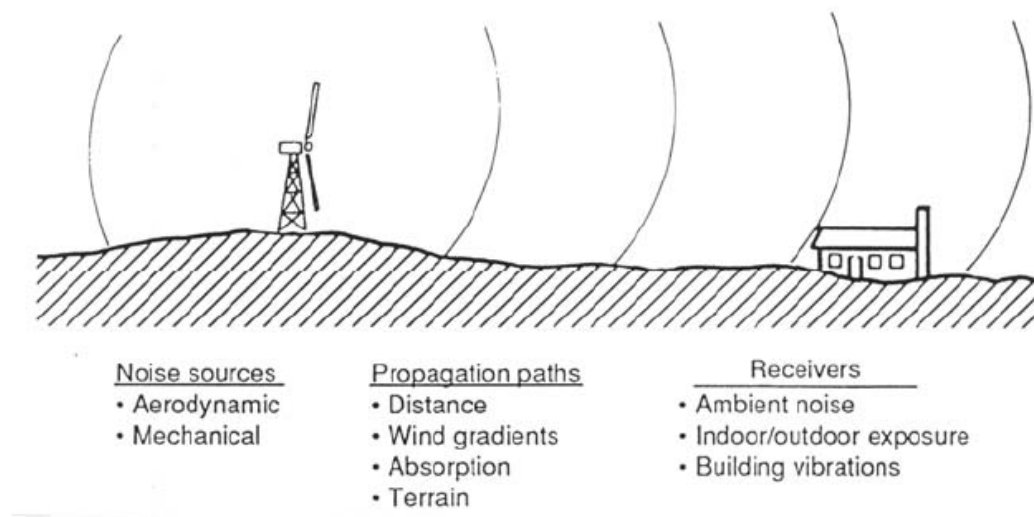
ภาพที่ 17 ระดับความดังของเสียงเทียบกับการเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วของเสียง
(ที่มา : USDA. สืบค้นเมื่อวันที่ 8 มิถุนายน 2556, จาก http://www.ruralenergy.wisc.edu/renewable/wind/default_wind.aspx)

เสียงดังจากการทำงานของกังหันลมมาจากแหล่งกำเนิดเสียงเพียง 2 แหล่ง ได้แก่

1. การที่ใบกังหันเคลื่อนที่ผ่านอากาศ
2. ก่อให้เกิดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใน nacelle (Nacelle)

โดยปกติระดับกำลังของเสียงจากกังหันลมหนึ่งตัวจะมีค่าอยู่ในช่วง 90-100 dB(A) ซึ่งจะทำให้ระดับความดันของเสียงมีค่าประมาณ 50-60 dB(A) ที่ระยะห่าง 40 m จากกังหันลม ณ ระยะห่างประมาณ 500 m ระดับความดันของเสียงจะมีค่าประมาณ 25-35 dB(A) ดังนั้นการวางแผนเกี่ยวกับโครงการโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมควรจะพิจารณาเกี่ยวกับเสียงดังที่จะเกิดขึ้น การประเมินผลกระทบทางเสียงสามารถทำได้โดยการทำนายเสียงดังที่เกิดขึ้นจากกังหันลมและเคลื่อนที่ผ่านบ้านเรือนที่อยู่ในพื้นที่ของโครงการ และทำการเปรียบเทียบกับเสียงจากพื้นหลัง (Background) ในกรณีที่ไม่มีกรก่อสร้างโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลม นอกจากนี้เสียงดังจากกังหันลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามกังหันลมจะไม่ทำงานถ้าอัตราเร็วลมมีค่าน้อยกว่าอัตราเร็วลม

เริ่มต้น (Cut-in Wind Speed) ประมาณ 4-5 m/s ข้อมูลลมส่วนใหญ่มักจะบ่งชี้ว่าอัตราเร็วมีค่าต่ำกว่าอัตราเร็วลมเริ่มต้นประมาณ 30%



ภาพที่ 18 แหล่งกำเนิดเสียงดัง การเดินทางและผู้รับเสียง
(ที่มา : Australian Wind Energy. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มิถุนายน 2556,
จาก <http://sound.westhost.com/lamps/auswea.pdf>)

ในการวัดความดังของเสียงมักจะวัดระดับของเสียงในรูปของระดับกำลังของเสียง (Sound Power Level) และระดับความดันของเสียง (Sound Pressure Level, SPL)

ระดับกำลังของเสียงมักจะวัดในหน่วยของเดซิเบลและสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.32

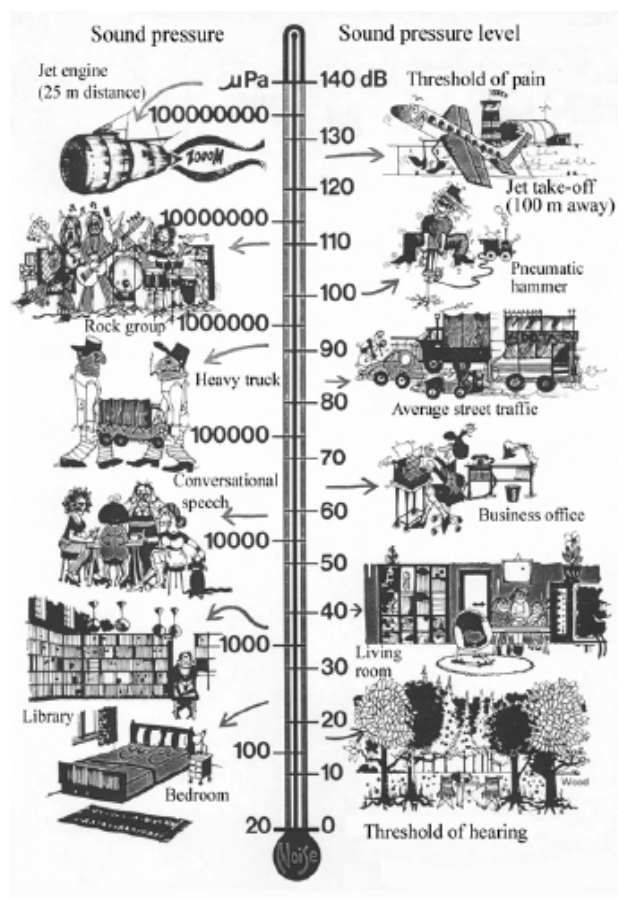
$$L_w = 10 \log_{10} (P / P_0) \quad (2.32)$$

เมื่อ L_w คือ ระดับกำลังของเสียงจากแหล่งกำเนิด หน่วย dB(A)
 P คือ ระดับกำลังของเสียงในหน่วยความหนาแน่นกำลัง (N/m^2)
 P_0 คือ ระดับกำลังของเสียงอ้างอิง ($P_0 = 2 \times 10^{-5} N/m^2$)

ระดับความดันของเสียง (Sound Pressure Level: SPL) วัดในหน่วยของ dB(A) ซึ่งเป็นหน่วยวัดความดังเสียงที่ใกล้เคียงกับการตอบสนองต่อเสียงของมนุษย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.33

$$L_p = 20 \log_{10} (p / p_0) \quad (2.33)$$

เมื่อ	L_p	คือ	ระดับความดันของเสียง หน่วย dB(A)
	p	คือ	ระดับความดันเสียงประสิทธิผล (Effective Sound Pressure)
	p_0	คือ	ระดับความดันเสียงประสิทธิผลอ้างอิง ($2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$)



ภาพที่ 19 ระดับความดังของเสียงและระดับความดันของเสียง
 (ที่มา : Australian Wind Energy. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มิถุนายน 2556,
 จาก <http://sound.westhost.com/lamps/auswea.pdf>)

การตรวจวัดความดังของเสียงสามารถตรวจวัดได้โดยใช้อุปกรณ์การตรวจวัด ระดับเสียง (Sound Level Meter) ซึ่งจะมีไมโครโฟนและตัวแปลงการเปลี่ยนแปลงความดันให้เป็นสัญญาณแรงดันและทำการบันทึกสัญญาณแรงดันดังกล่าว โดยจะทำการแปลงสัญญาณระดับแรงดันไปเป็นเดซิเบล สำหรับการวัดความดังของเสียงที่มีความถี่ต่างกันมักจะใช้ตัวกรอง โดยแบ่งออกเป็น 4 ระดับ ดังนี้

1. A-Weighting : เป็นระดับของการประเมินเสียงดังจากสภาพแวดล้อมทั่วไป
2. B-Weighting : เป็นระดับเสียงดังปานกลางมีค่าประมาณ 70 dB
3. C-Weighting : เป็นระดับเสียงดังที่หูได้ยินจนถึงระดับเสียงดังมาก ซึ่งมักจะใช้กับคลื่นเสียงความถี่ต่ำ
4. D-Weighting : สำหรับระดับเสียงต่ำมาก (Infrasound)

ในการวัดระดับความดังของเสียงจากกังหันลมมักจะทำการวัดคู่กับอัตราเร็วและทิศทางของลมแล้วทำการปรับเทียบให้เป็นอัตราเร็วลมที่ระดับความสูงมาตรฐาน 10 เมตร และความยาวความขรุขระ (Roughness Length) 0.05 m โดยอาศัยสมการที่ 2.34

$$V_s = \frac{V_z \ln\left(\frac{10}{0.05}\right) \ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H}{0.05}\right) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.34)$$

เมื่อ	V_s	คือ	อัตราเร็วลมที่ระดับความสูงมาตรฐาน (m/s)
	V_z	คือ	อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง z (m/s)
	H	คือ	ความสูงของศูนย์กลางส่วนหมุน (m)
	z_0	คือ	ความยาวความขรุขระของสถานที่ทำการทดสอบ (m)
	z	คือ	ความสูงของระดับที่ทำการวัดอัตราเร็วลม (m)

อย่างไรก็ตามการวัดระดับเสียงดังขณะการทำงานของกังหันลมมักจะสัมพันธ์กับระดับความดังของพื้นหลังที่ระดับความสูงมาตรฐาน ดังนั้นการตรวจวัดความดังของเสียงที่สัมพันธ์กับความดังของพื้นหลังสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.35

$$L_s = 10 \log[10^{(L_s+n/10)} - 10^{(L_n/10)}] \quad (2.35)$$

เมื่อ	L_s	คือ	ระดับความดันของเสียง (dB) สมมูลกับการทำงานของกังหันลมเพียงลำพัง
	$L_s + n$	คือ	ระดับความดันของเสียง (dB) สมมูลกับการทำงานของกังหันลมและเสียงจากพื้นหลัง
	L_n	คือ	ระดับความดันของเสียง (dB) สมมูลกับเสียงจากพื้นหลัง

ระดับความดันของเสียงจากกังหันลมที่สัมพันธ์กับเสียงจากพื้นหลังจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกำลังของเสียงโดยใช้สมการที่ 2.36

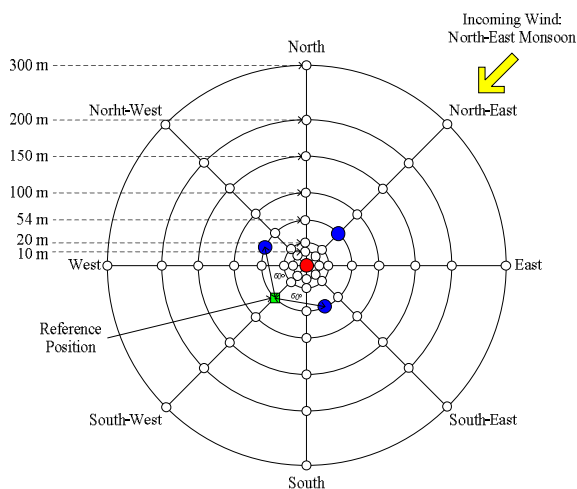
$$L_{WA} = L_{Aeq,c} - 6 + 10 \log[4\pi R_1^2 / S_0] \quad (2.36)$$

เมื่อ	L_{WA}	คือ	ระดับความดันของเสียงปรากฏของกังหันลม (dB) ที่สัมพันธ์กับเสียงจากพื้นหลังโดยใช้ตัวกรอง A
	$L_{Aeq,c}$	คือ	ระดับความดันของเสียงที่สัมพันธ์กับเสียงจากพื้นหลังโดยใช้ตัวกรอง A
	R_1	คือ	ระยะของตัวกรองในหน่วยเมตรระหว่างไมโครโฟนและศูนย์กลางส่วนหมุน
	S_0	คือ	พื้นที่อ้างอิง ($S_0 = 1 \text{ m}^2$)

โดยสามารถจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองซึ่งแสดงการจัดวางอุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 20 โดยรัศมีของระยะห่างของไมโครโฟนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.37

$$R_0 = H + \frac{D}{2} \quad (2.37)$$

เมื่อ	R_0	คือ	ระยะห่างรัศมีของไมโครโฟน (m)
	H	คือ	ความสูงของศูนย์กลางส่วนหมุน (m)
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนหมุน (m)



ภาพที่ 20 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดเสียงตามมาตรฐาน IEC
(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มิถุนายน 2556, จาก

http://www.pcd.go.th/public/Publications/print_air.cfm?task=noise_world)

ในบางประเทศมีกฎหมายบังคับใช้เกี่ยวกับระดับความดังของเสียงในพื้นที่ต่างๆ เช่น ประเทศเดนมาร์ก เยอรมนี และเนเธอร์แลนด์แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 กฎหมายบังคับระดับเสียงดัง (dB(A)) ในประเทศเดนมาร์ก เยอรมนีและเนเธอร์แลนด์

ประเทศ	เชิงพาณิชย์	ผสม	บ้านพักอาศัย	ชนบท
เดนมาร์ก	-	-	40	45
เยอรมนี				
(กลางวัน)	65	50	60	45
(กลางคืน)	55	40	50	35
เนเธอร์แลนด์				
(กลางวัน)	-	50	40	45
(กลางคืน)	-	35	40	30

(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มิถุนายน 2556, จาก <http://www.pcd.go.th/public/>

[Publications/print_air.cfm?task=noise_world](http://www.pcd.go.th/public/Publications/print_air.cfm?task=noise_world))

สามารถคำนวณหาความดันเสียงที่ผู้ฟังได้รับจากฟาร์มกังหันลมจากสมการที่ 2.38

$$L_{ft} = L_w + D_c - A \quad (2.38)$$

เมื่อ	L_w	คือ	กำลังเสียงจากกังหันลม (Sound Power Level) dB(A)
	D_c	คือ	ตัวปรับแก้การส่งสัญญาณเสียงของกังหันลม (Directivity Correction)(dB) *กรณีกังหันลมส่งเสียงรอบทิศ $D_c = 0$
	A	คือ	การลดทอนเสียงที่เกิดขึ้นในระหว่างการส่งสัญญาณเสียงจากกังหันลมไปยังผู้ฟัง

คำนวณหา A จากสมการที่ 2.39

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} + A_{met} \quad (2.39)$$

A_{div}	คือ	การลดทอนเสียงจากลักษณะภูมิประเทศ (Geometrical Divergence)
A_{atm}	คือ	การลดทอนเสียงจากการดูดกลืนโดยบรรยากาศ (Atmospheric Absorption)
A_{gr}	คือ	การลดทอนเสียงจากพื้นดิน (Ground Effect)
A_{bar}	คือ	การลดทอนเสียงจากสิ่งกีดขวาง (Barriers)
A_{misc}	คือ	การลดทอนเสียงจากใบไม้, สิ่งก่อสร้าง (Other Effects Like Foliage and Building)
A_{met}	คือ	การลดทอนเสียงจากภูมิอากาศ (Meteorological Effects)

คำนวณหา A_{div} จากสมการที่ 2.40

$$A_{div} = [20 \log(d) + 11] \text{ (dB)} \quad (2.40)$$

เมื่อ d คือ ระยะทางระหว่างกังหันลมกับผู้ฟัง

คำนวณหา A_{atm} จากสมการที่ 2.41

$$A_{atm} = \left(\frac{\alpha}{1000} \right) \quad (2.41)$$

เมื่อ α คือสัมประสิทธิ์การลดทอนเสียงจากการดูดกลืนโดยบรรยากาศ
(dB/km) สำหรับแต่ละความถี่

คำนวณหา A_{gr} จากสมการที่ 2.42

$$A_{gr} = -3q \text{ dB} \quad (2.42)$$

คำนวณหา q จากสมการที่ 2.43

$$q = \begin{cases} 1 - \frac{30(h_s + h_r)}{d_p}, & d_p > 30(h_s + h_r) \\ 0, & x < 30(h_s + h_r) \end{cases} \quad (2.43)$$

เมื่อ

h_s	คือ	ความสูงของศูนย์กลางใบพัดกังหันลม
h_r	คือ	ความสูงของผู้รับเหนือพื้นดิน
d_p	คือ	ระยะทางจากฐานกังหันลมถึงผู้รับในแนวพื้นดิน

2.1.10 ผลกระทบจากเงาของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

จากการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้น นอกจากจะเกิดผลกระทบทางด้านเสียงแล้ว สำหรับบางฤดูกาลที่ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงหรือมีแสงแดดมาก การเคลื่อนไหวของใบพัดจะทำให้เกิดเงาที่เคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Shadow Flicker) เหล่านี้จะก่อให้เกิดความรำคาญแก่ผู้พบเห็นได้ เงาที่เคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลาที่เกิดจากวัตถุที่เป็นตัวกลางที่บดบังแสงมาขวางกั้นทางเดินของแสง แบ่งได้ 2 ชนิดคือ

1. เงามืด คือ เงาในบริเวณที่ไม่มีแสงผ่านไปถึงทำให้บริเวณนั้นมีดสนิท
2. เงามัว คือ เงาบริเวณที่มีแสงบางส่วนผ่านไปถึง และทำให้บริเวณนั้นมีดสนิท

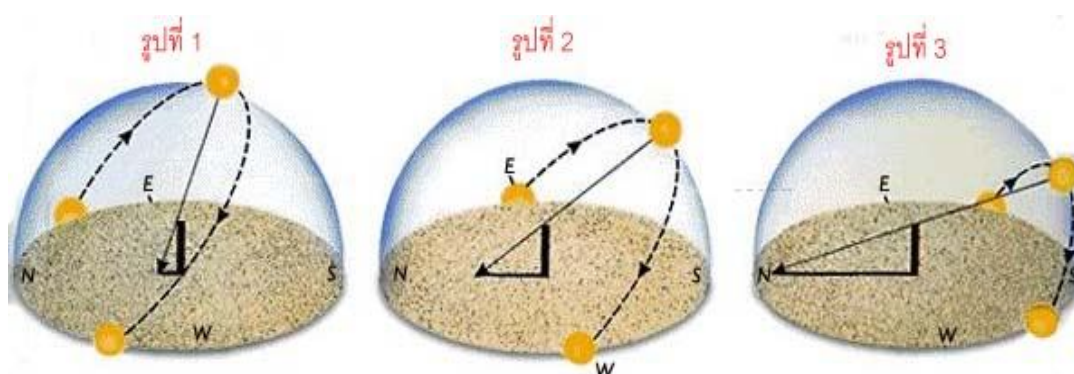
แสงจากดวงอาทิตย์ เป็นแหล่งกำเนิดแสงในธรรมชาติ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานของสิ่งมีชีวิตบนโลก ในแง่ของการมองเห็น แสงอาทิตย์เป็นแสงที่ให้ค่าสเปกตรัมที่ต่อเนื่อง แสงอาทิตย์มีความแตกต่างกันไปในแต่ละภูมิภาค และแต่ละช่วงเวลา ทั้งในแง่ของแสง สี และความเข้ม การเคลื่อนไหวของดวงอาทิตย์มีผลกระทบโดยตรงต่อการเกิดเงา

2.1.10.1 การเคลื่อนที่ของโลกรอบดวงอาทิตย์ในรอบ 1 ปี จะมีช่วงเวลาที่สามารรถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของดวงอาทิตย์ได้อย่างชัดเจนอยู่ 4 วันด้วยกันคือ

1. ในวันที่ 21 มิถุนายน โลกจะเอียงขั้วเหนือเข้าหาดวงอาทิตย์มากที่สุด ทำให้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าอยู่สูงสุด เรียกตำแหน่งนี้ว่า Summer Solstice คนไทยเรียก ครีษมายัน ช่วงนี้ประเทศทางซีกโลกเหนือจะเป็นฤดูร้อน กลางวันนานกว่ากลางคืน ในขณะที่ประเทศทางซีกโลกใต้จะเป็นฤดูหนาว กลางวันสั้นกว่ากลางคืน การขึ้นและตกของดวงอาทิตย์จะค่อนข้างไปทางเหนือเล็กน้อย ดังภาพที่ 21 รูปที่ 1 (สำหรับประเทศในซีกโลกเหนืออย่างประเทศไทย)

2. ในวันที่ 22 ธันวาคม โลกจะเอียงขั้วใต้เข้าหาดวงอาทิตย์มากที่สุดเช่นกัน ทำให้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าอยู่ต่ำสุด เรียกตำแหน่งนี้ว่า Winter Solstice คนไทยเรียก เหมายัน (เห-มา-ยัน) ช่วงนี้ประเทศทางซีกโลกเหนือจะเป็นฤดูหนาว เวลากลางวันจะสั้นกว่ากลางคืน ในขณะที่ประเทศทางซีกโลกใต้จะเป็นฤดูร้อน มีเวลากลางวันนานกว่ากลางคืน การขึ้นและตกของดวงอาทิตย์จะค่อนข้างไปทางใต้เล็กน้อย ดังภาพที่ 21 รูปที่ 3 (สำหรับประเทศทางซีกโลกเหนืออย่างประเทศไทย)

3. สำหรับในวันที่ 21 มีนาคม และ 23 กันยายน โลกจะเอียงด้านข้างให้กับดวงอาทิตย์ ทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์อยู่บนเส้นศูนย์สูตรฟ้าพอดี ประเทศทางซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้มีช่วงเวลากลางวันและกลางคืนยาวเท่ากัน แนวปรากฏของดวงอาทิตย์จะขึ้นทางทิศตะวันออกและตกทางทิศตะวันตกพอดี ดังภาพที่ 21 รูปที่ 2 (สำหรับประเทศทางซีกโลกเหนืออย่างประเทศไทย) เราเรียกวันทั้งสองนี้ว่า วิษุวัต หรือ Equinox (อิควินอกซ์) ซึ่งวันที่ 21 มีนาคมเรียกว่า Vernal Equinox (วสันตวิษุวัต) และวันที่ 23 กันยายน เรียกว่า Autumnal Equinox (ศารทวิษุวัต)



ภาพที่ 21 การเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ในรอบ 1 ปี

(ที่มา : Observatory Global Telescope Network. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2556, จาก

<http://lcogt.net/en/book/equatorial-coordinate-system>)

2.1.10.2 หลักการคำนวณการเคลื่อนไหวนของเงา

การเกิดการเคลื่อนไหวนของเงา (Occurrence of Shadow Flicker) ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของกังหันลมและตำแหน่งของดวงอาทิตย์

ในการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์อาจจะบอกด้วยมุมหรือบอกด้วยส่วนโค้งของทรงกลมท้องฟ้า (Celestial Sphere) ที่รองรับมุมดังกล่าวก็ได้ มีการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ 2 ระบบด้วยกันดังนี้

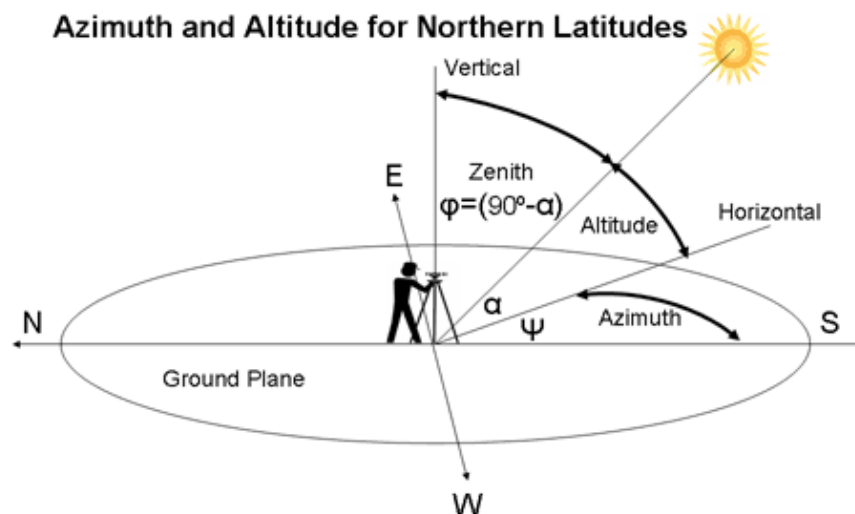
1. ระบบอาซิมุท-อัลติจูด (Azimuth-Altitude System) ระบบนี้ใช้มุม 2 มุม ดังภาพที่ 22 เป็นตัวบอกตำแหน่งได้แก่

1.1 มุมอาซิมุท (Azimuth Angle, az) เป็นมุมที่วัดจากแนวทิศใต้ไปยังเงา (Projection) บนระนาบขอบฟ้าของเส้นตรงซึ่งเชื่อมระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์ โดยกำหนดว่าถ้าเงาดังกล่าวอยู่ด้านตะวันออกมุมอาซิมุทมีค่าเป็นบวกและทางตะวันตกมีค่าเป็นลบ ดังนั้น $-180 < az < 180$ องศา หรือมีค่า $0^\circ \leq az \leq 360^\circ$ เมื่อ เริ่มจาก 0° เหนือ

1.2 มุมอัลติจูด (Altitude Angle, el) เป็นมุมเงย ณ ตำแหน่งผู้สังเกตของเส้นตรงซึ่งเชื่อมระหว่างดวงอาทิตย์กับผู้สังเกต จะมีค่าจาก 0 ถึง 90 องศา สำหรับมุมที่อยู่ระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์เรียกว่ามุมเซนนิธ (Zenith Angle, θ_z) ซึ่งสามารถใช้บอกตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้เช่นกัน

$$\text{โดยที่ } \theta_z = 90 - el \quad (2.44)$$

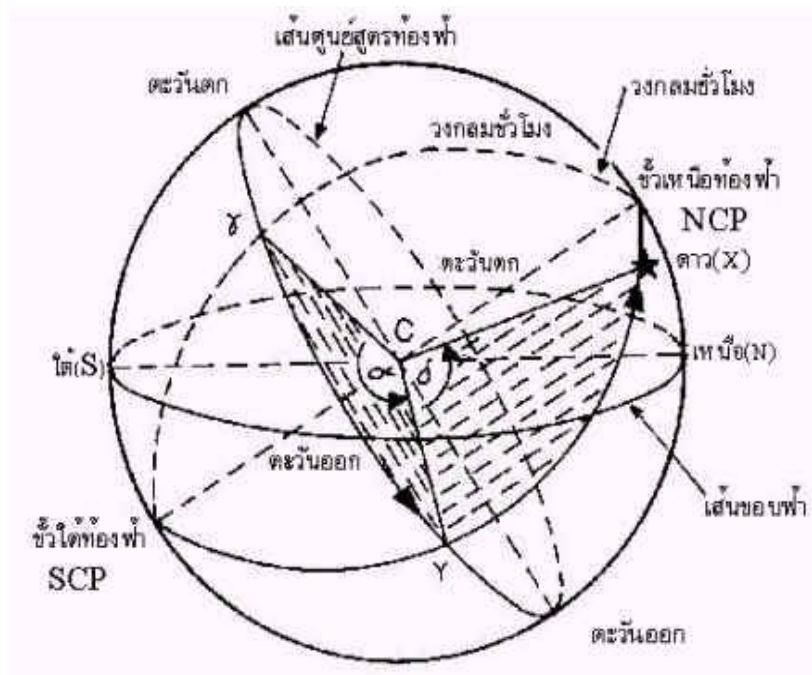
การบอกตำแหน่งโดยใช้ระบบอาซิมุท-อัลติจูด มีข้อดีคือเข้าใจได้ง่าย แต่ก็มีข้อด้อยคือค่าอาซิมุทและอัลติจูด จะเปลี่ยนแปลงไปทุกขณะตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนดวงอาทิตย์ตก และเปลี่ยนแปลงไปตามวันในรอบปีด้วย



ภาพที่ 22 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบอาซิมุท-อัลติจูด
(ที่มา : Observatory Global Telescope Network. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2556, จาก
<http://lcogt.net/en/book/equatorial-coordinate-system>)

2. ระบบศูนย์สูตร (Equatorial System) ระบบนี้ใช้มุมหรือส่วน โค้งของทรงกลมท้องฟ้า ตามภาพที่ 23 เป็นตัวบอกตำแหน่งดังนี้

2.1 เดคลิเนชัน (Declination, dec) เป็นส่วน โค้งของวงกลม (Great Circle) ที่ผ่านขั้วทั้งสองของทรงกลมท้องฟ้าระหว่างเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้ากับทางเดินของดวงอาทิตย์ดังภาพที่ 23 มีค่าอยู่ระหว่าง $-23.5 < \text{dec} < 23.5$ องศา ถือว่ามีค่าคงที่ในแต่ละวันและมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามวันในรอบปี



ภาพที่ 23 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบศูนย์สูตร
(ที่มา : Observatory Global Telescope Network. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2556, จาก
<http://lcogt.net/en/book/equatorial-coordinate-system>)

2.2 มุมชั่วโมง (Hour Angle, ha) เป็นมุมที่ขั้วของทรงกลมท้องฟ้า (Celestial pole) หรือส่วนโค้งของทรงกลมท้องฟ้าระหว่างเส้นเมริเดียน (Meridian) ของผู้สังเกต กับวงกลมใหญ่ที่ลากผ่านดวงอาทิตย์และขั้วทั้งสองของทรงกลมท้องฟ้า มีค่าเป็นบวกเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ทางตะวันออกของเมริเดียนและเป็นลบเมื่ออยู่ทางตะวันตกของเมริเดียน ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ มีความสัมพันธ์กันตามสมการต่อไปนี้

คำนวณหามุมอัลติจูดได้จากสมการที่ 2.45

$$\sin(el) = \sin(dec) \cdot \sin(lat) + \cos(dec) \cdot \cos(lat) \cdot \cos(ha) \quad (2.45)$$

คำนวณหามุมอะซิมูทได้จากสมการที่ 2.46

$$\sin(az) = -\cos(dec) \cdot \frac{\sin(ha)}{\cos(el)} \quad (2.46)$$

เมื่อ	<i>el</i>	คือ	มุมอัลติจูด (องศา)
	<i>az</i>	คือ	มุมอาซิมุท (องศา)
	<i>ha</i>	คือ	มุมชั่วโมง (องศา)
	<i>lat</i>	คือ	ละติจูด (องศา)
	<i>dec</i>	คือ	เดคลิเนชัน (องศา)

จากสมการที่ 2.45 และ 2.46 คำนวณหามุมชั่วโมงจากสมการที่ 2.47

$$ha = lmst - ra \quad (2.47)$$

เมื่อ *lmst* คือ เวลาดาราคติท้องถิ่น (Local Mean Sidereal Time)

Sidereal Time เป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยอิงคาบการหมุนรอบตัวเองของโลก เกี่ยวข้องกับดาวฤกษ์ ซึ่งเวลาที่ 0 ชั่วโมง อยู่ตำแหน่งที่จุด Vernal Equinox ผ่านจุด Meridian ของผู้สังเกต ซึ่ง Sidereal Time มีค่าเท่ากับค่า Right Ascension ของวัตถุที่ตำแหน่งที่ตำแหน่ง Meridian ของผู้สังเกตนั่นเอง

ra คือ ไรท์แอสเซนชัน (Right Ascension) (ชั่วโมง)

Right Ascension (ไรท์แอสเซนชัน) เรียกย่อๆ *ra* ว่า (อาร์เอ) เป็นเส้นวงกลมชั่วโมง (Hour Circle) บนทรงกลมท้องฟ้า (Celestial Object) มีหน่วยบอกเป็น ชั่วโมงหน่วยย่อยเป็นนาทีย และ วินาที ใช้ในการบอกพิกัดวัตถุท้องฟ้าในระบบเส้นศูนย์สูตร โดยที่เส้น RA ที่ 0 ชั่วโมง อยู่จุด Vernal Equinox (อยู่ในกลุ่มดาวปลาคนในปัจจุบัน) และนับไปทางทิศตะวันออก หรือ ไปทางขวามือ เมื่อเราหันหน้าเข้าหาทิศเหนือ มีค่าเป็น 1..2..3 ชั่วโมงไปเรื่อยจนครบรอบ 24 ชั่วโมง โดยเส้น *ra* แต่ละชั่วโมงจะมีระยะห่างเชิงมุม 15 องศา

จากสมการที่ 2.47 คำนวณหาเวลาดาราคติท้องถิ่น จากสมการที่ 2.48

$$lmst = gmst + \frac{east.longitude}{15} \quad (2.48)$$

เมื่อ *gmst* คือ เวลาดาราคติเฉลี่ยกรีนนิช (Greenwich Mean Sidereal Time) (ชั่วโมง)

east.longitude คือ ลองจิจูดตะวันออก (องศา)

จากสมการที่ 2.48 คำนวณหาเวลาดาราคติเฉลี่ยกรีนิชจากสมการที่ 2.49

$$gmst = 6.697375 + 0.0657098242 \cdot n + hour(UT) \quad (2.49)$$

$$(0 \leq gmst < 24h)$$

เมื่อ UT คือ เวลาสากล (Universal Time)

และจากสมการที่ 2.49 คำนวณหาพิกัดของตำแหน่งของวัตถุท้องฟ้าจากสมการที่ 2.50

$$\tan(ra) = \cos(ep) \cdot \frac{\sin(l)}{\cos(l)} \quad (2.50)$$

เมื่อ $n = JD - 2451545.0$ (2.51)

$$L = 280.460 + 0.9856474 \cdot n \quad (0^\circ \leq L < 360^\circ) \quad (2.52)$$

$$g = 357.528 + 0.9856003 \cdot n \quad (0^\circ \leq g < 360^\circ) \quad (2.53)$$

$$l = L + 1.915 \cdot \sin(g) + 0.020 \cdot \sin(2g) \quad (2.54)$$

$$(0^\circ \leq l < 360^\circ)$$

$$ep = 23.439 - 0.0000004 \cdot n \quad (2.55)$$

เมื่อ

L คือ ลองจิจูด (Mean Longitude)

g คือ อะนอมัลลีสุริยะเฉลี่ย (Mean Anomaly)

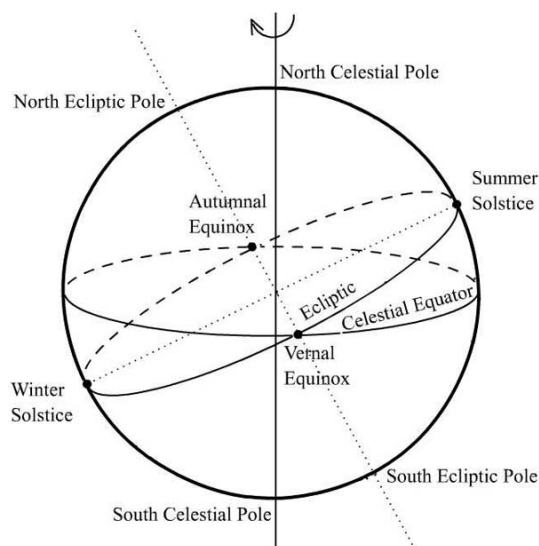
Anomaly เป็นการวัดเชิงมุมในการบอกตำแหน่งของวัตถุบนวงโคจรที่เป็นวงรี

l คือ มุมลองจิจูดอิกลิปติก (Ecliptic Longitude)

Ecliptic Longitude กำหนดค่าเป็นระยะทางเชิงมุม มีหน่วยเป็นองศา นับเส้นโค้งที่ผ่านจุดเวอร์นอนอลิกวินอกซ์ และจุดขั้วอิกลิปติกทั้งสอง เริ่มต้นให้มีมุมลองจิจูดอิกลิปติกเป็น 0 องศา เมื่อหมุนวนตามแนวเส้นอิกลิปติก ไปทางทิศตะวันออก (ทวนเข็มนาฬิกา เมื่อมองจากด้านบนของระนาบอิกลิปติก) ให้มีมุมลองจิจูดอิกลิปติกเพิ่มขึ้นเรื่อยไปแล้วอ้อมกลับมาทางทิศตะวันตก จนถึง จุดเวอร์นอนอลิกวินอกซ์ อีกครั้ง ให้มีมุมลองจิจูดอิกลิปติก เป็น 360 องศา ดังภาพที่ 24

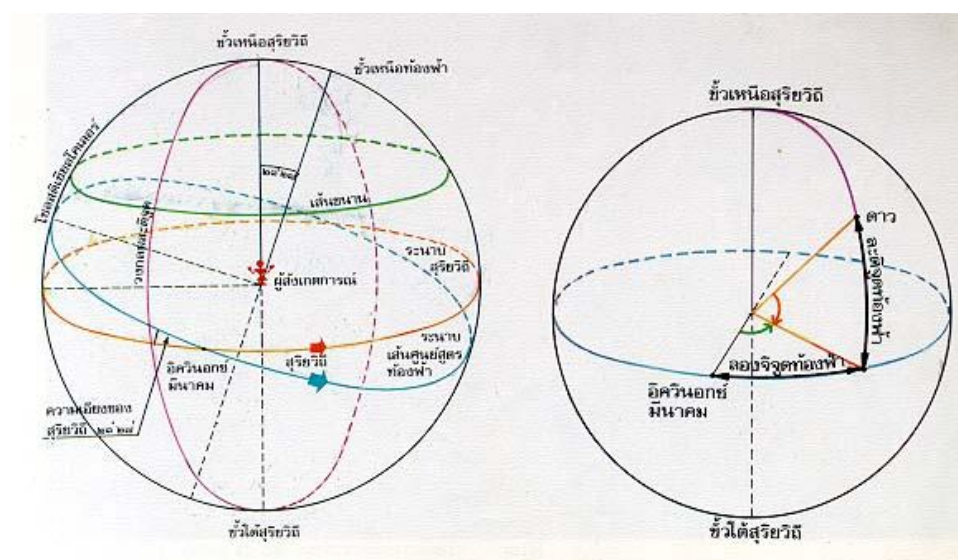
ep คือ ความเอียงของสุริยวิถี (Obliquity of the Ecliptic)

ความเอียงของสุริยวิถี Obliquity of the Ecliptic เป็นมุมที่ระนาบสุริยวิถีกระทำกับระนาบศูนย์สูตรท้องฟ้า ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 24 พิกัดในระบบพิกัดแนวอิกลิปติก

(ที่มา : LESA. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน 2556, จาก http://msci.bcc.ac.th/07-Learn/LESA%202.1.2/1/celestial_sphere/ecliptic/ecliptic.html)



ภาพที่ 25 ระนาบสุริยวิถี

(ที่มา : LESA. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน 2556, จาก http://msci.bcc.ac.th/07-Learn/LESA%202.1.2/1/celestial_sphere/ecliptic/ecliptic.html)

จากสมการที่ 2.45 คำนวณหาวันจูเลียนจากสมการที่ 2.56

$$JD = 2432916.5 + 365 \cdot \text{delta} + \text{leap} + \text{day} + \text{hour}/24 \quad (2.56)$$

เมื่อ $\text{delta} = \text{year} - 1949 \quad (2.57)$

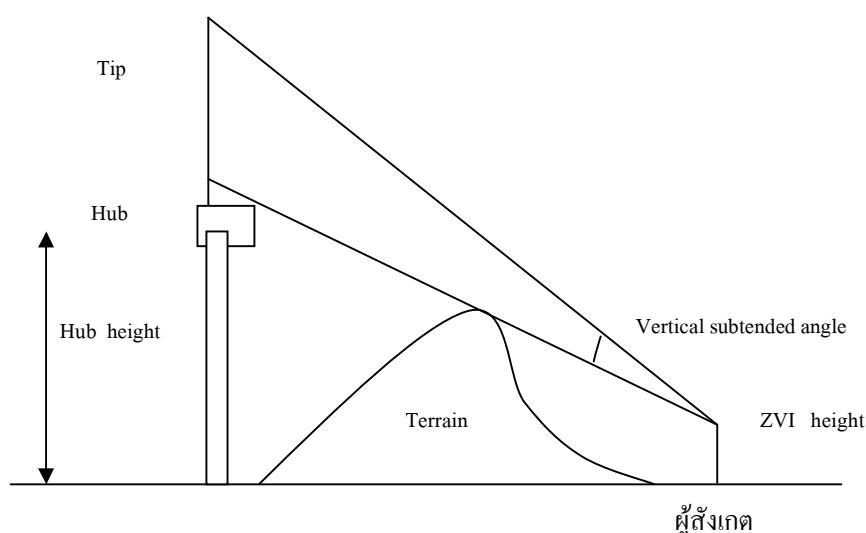
$$\text{leap} = \text{int}(\text{delta}/4) \quad (2.58)$$

เมื่อ	JD	คือ	วันจูเลียน (Julian Day)
	delta	คือ	ผลต่างของปี ค.ศ. ปัจจุบันกับปี ค.ศ. 1949
	leap	คือ	จำนวนเต็มของ[(ปี ค.ศ. ปัจจุบัน-ปี ค.ศ. 1949)/4]
	day	คือ	จำนวนวันนับจากวันเริ่มต้นปีใหม่

2.1.11 ผลกระทบต่อการมองเห็นเนื่องจากการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า

การมองเห็นของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้นยังไม่ได้มีการประเมินผลออกมาอย่างชัดเจน กังหันลมขนาดใหญ่จะมีความสูงมากกว่า 50 เมตรขึ้นไป ทำให้สามารถมองเห็นได้จากระยะไกล กังหันลมที่ติดตั้งอยู่ตามทุ่งหญ้า สร้างความสวยงาม สร้างจินตนาการ และความคิดต่างๆ ให้กับผู้พบเห็น กังหันลมสามารถใช้เป็นสื่อการเรียนรู้หลักการทางอากาศพลศาสตร์ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญต่อเทคโนโลยีการบินหรืออากาศยานได้

2.1.11.1 ขอบเขตมาตรฐานของการเห็นกังหันลมส่วนของ Hub และส่วนปลายของใบพัด (Tip) (Standard ZVI for Hub and for Tip Visibility)



ภาพที่ 26 ขอบเขตมาตรฐานของการเห็นกังหันลม

(ที่มา : Garradhassan. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน 2556, จาก www.garradhassan.com)

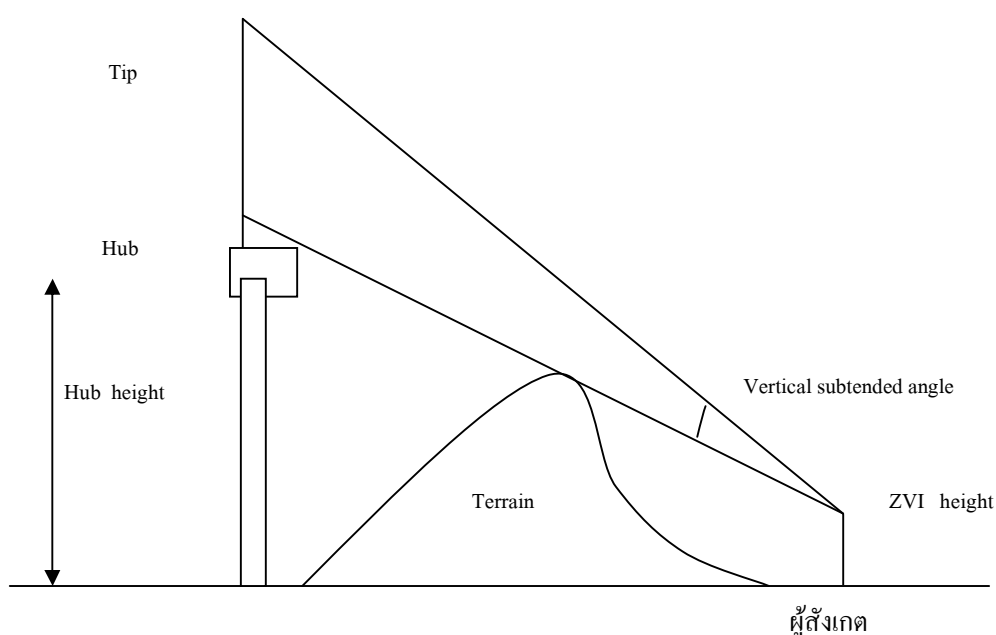
แผนที่ ZVI จะแสดงผลให้ผู้สังเกตทราบถึงจำนวนกังหันลมซึ่งความสูงของกังหันที่มองเห็นส่วนใหญ่ประมาณ 2 เมตร โดยจะกำหนดจุดการมองเห็นไว้ ดังนี้

1. จุดที่เริ่มสังเกตเห็นศูนย์กลางของใบพัด
2. จุดที่เริ่มสังเกตเห็นใบพัด

ความถูกต้องแม่นยำของ ZVI สามารถนำไปประเมินได้โดยการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการสร้าง ZVI กับ การมองเห็นจากจุดเดียวกัน ที่ผู้สังเกตสนใจ

2.1.11.2 มุมโอบล้อมแนวตั้ง (Vertical Subtended Angle)

เป็นการคำนวณมุมของกังหันลมตามแนวตั้งระหว่างส่วนที่ต่ำที่สุดและส่วนที่สูงที่สุดของกังหันที่ผู้สังเกตมองเห็น การคำนวณหามุมของกังหันลมตามแนวตั้งนี้ทำให้ทราบว่าใบพัดมีขนาดใหญ่เท่าไร

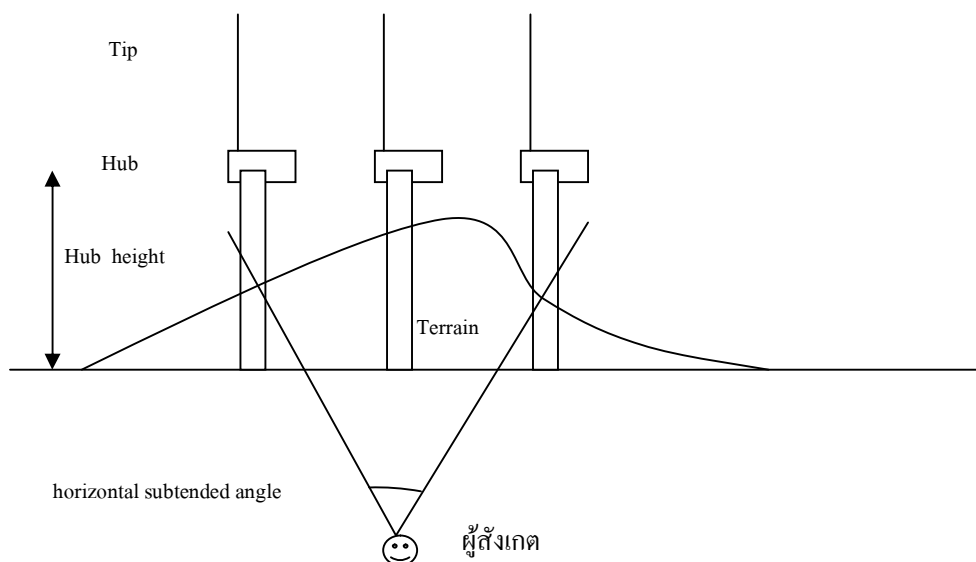


ภาพที่ 27 มุมโอบล้อมแนวตั้ง

(ที่มา : Garradhassan. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน 2556, จาก www.garradhassan.com)

2.1.11.3 มุมโอบล้อมแนวนอน (Horizon Subtended Angle)

เป็นการคำนวณมุมในแนวนอนระหว่างกังหันลมด้านซ้ายที่มองเห็นได้มากที่สุดกับกังหันลมด้านขวาที่มองเห็นได้มากที่สุด



ภาพที่ 28 มุมโอบล้อมแนวนอน

(ที่มา : Garradhassan. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน 2556, จาก www.garradhassan.com)

2.1.11.4 มองเห็นกังหันลมชัดเจนบางส่วน (Visibility of Site) เป็นการมองเห็นกังหันลมเพียงบางส่วนของที่ติดตั้งกังหันลมทั้งหมด



ภาพที่ 29 กังหันลมที่มองเห็นบางส่วน

(ที่มา : Garradhassan. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน 2556, จาก www.garradhassan.com)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิรัช ไรยนรินทร์ (2552) ศึกษา วิจัย พัฒนาและสาธิตต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ พบว่าในทางประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมชนิดแนวแกนนอนขนาด 5 กิโลวัตต์ ที่ผลิตขึ้นในประเทศ สามารถเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ใช้ได้กับชุมชนและเกือบทุกพื้นที่ที่มีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 4-5 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นศักยภาพลมที่มีอยู่ในพื้นที่ทั่วไปบริเวณชายฝั่งทะเลและที่ราบสูงหรือตามแหล่งหมู่เกาะต่างๆ และบนภูเขาสูงซึ่งเป็นที่ตั้งของหน่วยงานราชการหรืออุทยานต่างๆ ซึ่งไม่มีไฟฟ้าจากระบบสายส่งเข้าไปได้ถึง รวมทั้งหมู่เกาะต่างๆ ในปัจจุบันใช้เครื่องยนต์ดีเซลในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นการส่งเสริมการผลิตขึ้นส่วนภายในประเทศและนำผลการวิจัยที่ได้จากโครงการนี้ให้ก่อประโยชน์เป็นรูปธรรม ลดการนำเข้าการใช้เชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้าจากต่างประเทศเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า สร้างแนวความคิดใหม่ในการนำกังหันลมผลิตไฟฟ้าจากต่างประเทศเข้ามาใช้ในเมืองไทย เพื่อรู้และเข้าใจถึงเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการพัฒนาพลังงานทดแทน ซึ่งในเบื้องต้นแนวทางการส่งเสริมควรเป็นกังหันลมชนิดแนวแกนนอนขนาด 5 กิโลวัตต์ ส่วนกังหันลมแนวแกนตั้งควรมีการส่งเสริมการวิจัยให้ต่อเนื่องเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดนี้ให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้ด้วยความเร็วลมต่ำ โดยในเรื่องการพัฒนาาระบบตัดต่อและส่งกำลังขณะกังหันลมเริ่มหมุน และพัฒนาตัวปั่นไฟฟ้าให้สามารถลดรอบการทำงานเพื่อสามารถจับตรงโดยไม่มีชุดเกียร์ทด อย่างไรก็ตามผลการวิจัยเบื้องต้นจะเห็นได้ว่ากังหันลมผลิตไฟฟ้าสามารถใช้งานได้จริง หากมีการออกแบบ วิเคราะห์ และสร้างขึ้นมาเพื่อความเร็วลมที่เหมาะสมต่อการใช้งานในประเทศ ซึ่งอาจทำให้มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ากังหันลมสูงได้ถึง 25-30 % โดยหากมีการส่งเสริมให้มีการผลิตและติดตั้งกังหันลมที่ได้จากการวิจัยและพัฒนาในครั้งนี้เป็นจำนวนมากขึ้น ก็จะทำให้ราคาของกังหันลมที่ผลิตในประเทศลดลงไปอีกไม่ต่ำกว่า 15-20% ของราคากังหันลมต้นแบบที่ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ในการวิจัยในโครงการนี้ ซึ่งอาจจะลดราคาของกังหันลมขนาดเล็กที่มีขนาดไม่เกินกว่า 5 กิโลวัตต์ ที่ผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยความเร็วลมสูงสุดไม่เกิน 9 m/s อยู่ที่ประมาณ 200-250 บาทต่อวัตต์ ซึ่งราคาดังกล่าวนี้นรวมทุกชิ้นส่วนและทุกระบบ และรวมค่าการติดตั้งไว้แล้ว ดังนั้นจะเห็นได้ว่าจะทำให้ราคาของกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ติดตั้งแล้วเสร็จอยู่ที่ประมาณหนึ่งล้านบาท ถึงหนึ่งล้านสองแสนห้าหมื่นบาท ซึ่งจะมีราคาที่ต่ำกว่ากังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งในปัจจุบันกังหันลมที่มีประสิทธิภาพสูงที่นำเข้ามาจากต่างประเทศอยู่ที่ราคาพร้อมติดตั้งประมาณหนึ่งล้านห้าแสนถึงหนึ่งล้านเจ็ดแสนบาท อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่ากังหันลมที่ผลิตภายในประเทศอีกด้วย หากมีการส่งเสริมการใช้งานและการผลิตที่ถูกต้องต่อเนื่องและเหมาะสมซึ่งได้แสดงให้เห็นในงานวิจัยชิ้นนี้แล้วก็จะทำให้สามารถพัฒนาศักยภาพทางด้านการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมภายในประเทศได้เป็นอย่างดี และเป็นศักยภาพ

ทางความมั่นคงทางด้านพลังงานให้แก่ประเทศชาติรวมทั้งทางทหาร การเมือง และการปกครองของประเทศชาติต่อไป (วิรัช โยชนรินทร์. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2554, จาก

http://thaiwindy.com/index.php?option=com_content&task=view&id=41&Itemid=75)

ศศิอนงค์ วัชรศิขร (2549 : 1-4) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำพลังงานลมมาใช้งานในเขตการไฟฟ้านครหลวง จากการศึกษาด้วยข้อมูลปัจจุบันพบว่ายังไม่เหมาะสมนักเนื่องจากความเร็วลมเฉลี่ยของเขตกรุงเทพมหานครยังอาจไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า อย่างไรก็ตามในพื้นที่บางแห่งในเขตพื้นที่ของการไฟฟ้านครหลวงอาจมีความเหมาะสมในการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม เช่น พื้นที่เขตใกล้ชายฝั่งทะเลหรือที่ยอดอาคารสูง ซึ่งในอนาคตควรมีการศึกษาในเรื่องของ “Wind Survey” เพิ่มเติม อีกทั้งควรมีการติดตามเทคโนโลยีทางด้านกังหันลมที่ใช้ในพื้นที่เขตความเร็วลมต่ำเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในเขตพื้นที่การไฟฟ้านครหลวงต่อไป หากมีความเป็นไปได้ทั้งทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์

สำเร็จ แพนงศรี (2551) พัฒนาเครื่องต้นแบบการใช้พลังงานลมผลิตกระแสไฟฟ้า วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาเครื่องต้นแบบการใช้พลังงานลมผลิตกระแสไฟฟ้า ให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตามปริมาณอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้า และนำกระแสไฟฟ้าที่ได้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์กับอุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า คือ โดชาร์ตของรถยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าและบรรจุเก็บในแบตเตอรี่ และใช้อุปกรณ์อินเวอร์เตอร์แปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยออกแบบกังหันลมเป็นเพลแกนตั้งแบบขึ้นเดียว 3 แฉกใบรับลม จากการเก็บข้อมูลการทำงานของเครื่องทดสอบสองเดือน พบว่า ใบกังหันสามารถหมุนผลิตกระแสไฟฟ้าได้ดีที่ความเร็วรอบของใบ 12 รอบต่อวินาที ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4 เมตรต่อวินาที กระแสที่ผลิต 13 โวลต์ สามารถบรรจุเก็บไว้ในแบตเตอรี่ได้ และช่วงเวลาที่กังหันหมุนและผลิตกระแสไฟฟ้าได้ดี คือ ช่วงเวลา 13.00 น.-17.00 น. ของช่วงการทดลอง ข้อเสนอแนะจากการวิจัยพบว่าการออกแบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าควรออกแบบให้มีขนาดเล็กเพื่อสะดวกต่อการติดตั้งและบำรุงรักษา รวมทั้งต้นทุนต่ำ โดยให้มีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการใช้ และจัดให้มีอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากลมพายุ (สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2554, จาก http://www.ird.rmutp.ac.th/files_upload/windenergy)

สุรัช ชัยทัศนีย์ (2551) ศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยพบว่า ณ ปัจจุบัน การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมทั่วโลกมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยพบว่ามีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเพิ่มขึ้นประมาณปีละ 19,800 เมกะวัตต์ และจากการประมาณการการเพิ่มขึ้นของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมทั่วโลกจะอยู่ที่ประมาณ 50,000 เมกะวัตต์ ในปี พ.ศ. 2555 ซึ่งจะทำให้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมรวมทั้งสิ้นเป็น 287,000 เมกะวัตต์ หรือ เป็นปริมาณประมาณ 2.7%

ของการใช้ไฟฟ้าทั่วโลก ในประเทศไทยนั้นได้มีการนำพลังงานลมมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากทั้งตัวผู้ใช้ไฟฟ้าเอง (ผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้เองเป็นหลัก) และจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (ผลิตไฟฟ้าเพื่อส่งเข้าระบบส่ง) โดยตามแผนการพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยฉบับ พ.ศ. 2550-2564 (PDP 2007) การนำพลังงานลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าได้ถูกบรรจุในโครงการพลังงานทดแทน (Renewable Portfolio Standard: RPS) ซึ่งกำหนดนโยบายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เป็นสัดส่วนไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 ของกำลังผลิตไฟฟ้าใหม่ที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน และถ่านหิน) โดยการผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตทั้งที่ดำเนินการเองและให้ภาคเอกชนดำเนินการซึ่งจะก่อสร้างในช่วงปี พ.ศ. 2551-2553 จะมีกำลังไฟฟ้าจากพลังงานลมทั้งสิ้น 4 เมกะวัตต์ (คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2554, จาก <http://newsletters.eng.chula.ac.th/?q=node/147>)

แอบบาดี (Abbadi, 2005 : 1453-1466) ทำการประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานลมสำหรับ 5 สถานที่ของประเทศซาอุดีอาระเบียโดยอาศัยข้อมูลในระหว่างปี ค.ศ. 1995-2002 โดยโปรไฟล์ความถี่ของอัตราเร็วลมแสดงให้เห็นว่าที่สถานี Dhulam และ Aran มีศักยภาพสูงและมีความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 5.7 m/s และ 5.4 m/s และใช้กังหันลมรุ่น Nordex N43 ในการพิจารณาการผลิตไฟฟ้าพบว่าสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด 1,080 MWh ณ สถานี Dhulam นอกจากนี้ยังได้มีการประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานลมสำหรับเมือง Yanbo ของประเทศซาอุดีอาระเบียอีกด้วย โดยใช้อัตราข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในระหว่างปี ค.ศ. 1970-1983 และทำการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมขนาดต่างๆ ดังนี้ 150 kW 250 kW 600 kW 800 kW 1,000 kW 1,300 kW 1,500 kW 2,300 kW และ 2,500 kW โดยผลการศึกษาพบว่าที่ระดับความสูงประมาณ 40 m 50 m 60 m และ 80 m ความเร็วลมมีค่าสูงกว่า 3.5 m/s ผลจากการวิเคราะห์การผลิตพลังงานไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าการใช้กังหันลมขนาดเล็กจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่ากังหันลมขนาดใหญ่เนื่องจากความเร็วมีค่าไม่สูงมากนักนั่นเอง โดยฟาร์มกังหันลมมีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งที่เหมาะสมอยู่ในระดับ 30 MW นอกจากนั้น Capacity Factor ของกังหันลมขนาดเล็กมีค่าสูงกว่ากังหันลมขนาดใหญ่อีกด้วย

แอคเคอร์, วิลเลียม, ดูคิว, บรูเมล และบรูเมลเลอร์ (Acker, Williams, Duque, Brummels and Buechler, 2007 : 1489-1499) ได้ประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานลมในมลรัฐโอริโซนาโดยใช้แบบจำลองพลังงานลมสเกลเมโส (Meso-Scale Wind energy map) และอาศัยข้อมูลทางสารสนเทศภูมิศาสตร์สำหรับพัฒนาแผนที่ลมของสถานีจำนวน 4 สถานี ผลการศึกษาพบว่าทั้ง 4 สถานีมีระดับ (Class) แตกต่างกัน และมีค่าระดับอยู่ในช่วง 3-6

คริสเตนเซน, คอรัช, ฮอร์ทแมน, ฮาร์ซาร์เกอร์ และนิลเซน (Christiansen, Koch, Horstman, Hasager and Nielsen. 2006 : 68-81) ใช้ข้อมูลเป็นอินพุตสำหรับการประเมินแหล่งพลังงานลม โดยเปรียบเทียบผลการวัดและการประมวลผลจากภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณทะเลเหนือ พบว่าข้อมูลทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันไม่มาก ดังนั้นการประเมินแหล่งพลังงานลมจากภาพถ่ายดาวเทียมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการวิเคราะห์ศักยภาพของพลังงานลมและการจัดทำแผนที่ศักยภาพของพลังงานลมสำหรับพื้นที่บริเวณกว้าง

อาร์เดน, เบคคาลิ, เซลลुरา และบรานโน (Ardente, Beccali, Cellura and Brano. 2006 : 1453-1466) ศึกษาเกี่ยวกับความสำเร็จด้านพลังงานและการประเมินวัฏจักรชีวิตของฟาร์มกังหันลมในอิตาลี ประเมินด้านพลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของฟาร์มกังหันลม พบว่าผลกระทบหลักของฟาร์มกังหันลมตั้งแต่การผลิตกังหันลมและการก่อสร้างนั้น ผลกระทบพื้นฐานประกอบด้วยมลพิษทางอากาศ ขยะของแข็ง และทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมัน และสารหล่อลื่น เป็นต้น รูปแบบของการทำลายสิ่งแวดล้อมหลัก คือการได้มาของวัตถุดิบที่นำมาใช้ ได้แก่ การผลิตเหล็ก ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อโลกถึง 70% โดยแสดงปริมาณผลกระทบที่เกิดขึ้นดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปริมาณผลกระทบแต่ละประเภทที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้า 1 kWh จากฟาร์มกังหันลม

Category	Quantity	
Global Warming Potential	14.8	g CO ₂ -eq
Ozone Depletion Potential	6.59×10^{-7}	g CFC11-eq
Acidification	3.63×10^{-3}	Mol H ⁺ -eq
Photochemical Ozone Creation Potential	1.61×10^{-2}	g C ₂ H ₄ -eq
Eutrophication	0.35	g O ₂ -eq
Insert Wastes	154.2	Mg
Special Wastes	1.2	Mg

ตารางที่ 6 ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการรีไซเคิล

Category	Nacelle (kPt)	Rotor (kPt)	Tower (kPt)	Total with Foundation (kPt)	Green Energy (kPt)
Carcinogens	-257	-1610	-686	-2740	-4380
Respiratory Organics	-0.807	-446	-1.92	-445.847	-37.6
Respiratory Inorganics	-549	0	-907	-1180	-27.1
Global Warming	-403	-783	-1170	-2615	-9810
Radiation	-2.43	-61.8	0	-64	0
Ozone layer	-0.274	-0.342	-0.509	-0.983	-9.75
Ecotoxicity	-43.3	-0.0297	38.5	11	-3430
Acidification/ Eutrophication	-46.8	-34.6	-96.4	-110	-2380
Land Use	-13	-0.482	0	33.118	0

สำหรับการใช้พลังงานจะอยู่ในช่วง 42.1 – 50.7 TJ ซึ่งก่อให้เกิดก๊าซ CO₂ เท่ากับ $2.7 \times 10^6 - 3.7 \times 10^6$ kgCO₂ โดยมีการใช้พลังงานมากที่สุดในการผลิตและติดตั้งกังหันลม ซึ่งพลังงานหลักๆ ที่ใช้อยู่ในส่วนของตัวกังหันลม การก่อสร้าง และการขนส่ง ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงการใช้พลังงานในการผลิตไฟฟ้าจากฟาร์มกังหันลม 1 kWh พบว่ามีการใช้พลังงานในช่วง 0.04-0.07 kWh_{Prim} ซึ่งก่อให้เกิด CO₂ เท่ากับ 8.8-18.5 g/kWh

พบว่ากังหันลมสองขนาดก่อให้เกิดผลกระทบหลัก 4 ประเภท คือ การลดลงของทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป การเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศ ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ และผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ สำหรับกังหันลมขนาด 4.5 MW ผลกระทบส่วนใหญ่เกิดในขั้นตอนการขนส่ง ชิ้นส่วนอุปกรณ์เพื่อนำมาผลิตและติดตั้ง ในส่วนของขั้นตอนการดำเนินงานนั้นก่อให้เกิดผลกระทบเพียงเล็กน้อย สำหรับกังหันลมขนาด 250 W เกิดผลกระทบในขั้นตอนการขนส่งเพียงเล็กน้อย เนื่องจากทำการขนส่งทางเรือ เมื่อพิจารณาผลกระทบต่อหนึ่งหน่วยการผลิตกระแสไฟฟ้าพบว่า ในทุกประเภทของผลกระทบที่เกิดขึ้นกังหันขนาดเล็กก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่ากังหันขนาดใหญ่ เนื่องจากกังหันขนาดเล็กผลิตกระแสไฟฟ้าได้น้อย การออกแบบกังหันลม

ให้มีความคงทน แข็งแรงเพื่อใช้ตลอดอายุการใช้งานนั้น ในการผลิตและออกแบบหากไม่เหมาะสมกับสภาพการเคลื่อนที่ของลม จะส่งผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้

ดักลาส, การ์ธ และไซมอน (Douglas, Gareth and Simon. 2007 : 23-33) ศึกษาทัศนคติของสาธารณะชนต่อฟาร์มกังหันลม Cornish จากการศึกษาพบว่าสาธารณะชนให้การสนับสนุนการใช้พลังงานลม แต่มีบ้างในการต่อต้านฟาร์มกังหันลมในบางแห่ง ส่งผลให้เกิดการล้มเหลวในการอนุญาตให้สร้างฟาร์มกังหันลม เป้าหมายของการศึกษานี้เพื่อหาว่าความคิดเห็นของชุมชนต่อการสร้างฟาร์มกังหันลมและความคิดเห็นหลังจากสร้างกังหันลมแล้ว โดยทำการถามประชาชนในเขต St Newlyn East, Cornwall ประเทศอังกฤษ ต่อความคิดเห็นที่มีต่อฟาร์มกังหันลม Carland Cross ในปี ค.ศ. 1991 และ ค.ศ. 2006 พบว่าเกิดการเปลี่ยนทัศนคติต่อฟาร์มกังหันลมในด้านทัศนียภาพที่สวยงามและแหล่งพลังงานที่ได้

เอลฮาดีดี และ ชาฮิด (Elhadidy and Shaahid. 2007 : 199-208) ประเมินแหล่งพลังงานลมบริเวณชายฝั่งทางตะวันออกของประเทศซาอุดีอาระเบีย โดยวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิตามรายชั่วโมง ซึ่งบันทึกไว้ในปี ค.ศ. 1986-1997 และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรายวัน รายเดือนและรายปีของข้อมูลดังกล่าว พบว่าความเร็วลมมีค่าอยู่ในช่วง 4.2-6.4 m/s และทำการศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาดพิกัดต่างๆ 150 kW 250 kW 600 kW เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของกังหันลมสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า พบว่าสำหรับฟาร์มกังหันลมขนาด 6 MW ที่ระดับความสูงของศูนย์กลางกังหัน 50 m กังหันลมขนาด 150 kW สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่ากังหันลมขนาด 600 kW ประมาณ 48%

กอตเชก, มาซลัม และอัครียัท (Gokcek, Mazlum and Akyurt 2008 : 66 - 69) ได้ตรวจวัดความเร็วลมในประเทศตุรกี โดยอาศัยข้อมูลปี ค.ศ.2004 และได้ทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยรายเดือนและรายปี นอกจากนั้นยังได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบฟังก์ชันไวบูลล์และแบบเรย์เลย์ (Weibull and Rayleigh Probability Power Density Function) และอาศัย PowerLaw สำหรับการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) เพื่อคำนวณหาความเร็วลมที่ระดับสูงขึ้น 30 m 40 m 60 m และ 80 m ผลจากการวิเคราะห์พบว่าความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนมีการกระจายแบบไวบูลล์และพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าดังนี้ Shape Parameter $k = 1.75$ และ Scale Parameter $C=5.25$ m/s

เฮอ์เบิร์ต, ซีวาลซาน, และ ราจาปานเดียน (Herbert, Sreevalsan and Rajapandian. 2007 : 1117-1145) ศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีพลังงานลม การประเมินศักยภาพของพลังงานลม อิทธิพลของเวก ความน่าเชื่อถือของกังหันลม ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมรวมทั้งเทคโนโลยีกังหันลมใน

หัวข้อของการออกแบบ ใบกังหัน ก่อตั้งเครื่อง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้า การเชื่อมต่อกับระบบสายส่ง ระบบควบคุมและเศรษฐศาสตร์ของระบบกังหันลม

การวิจัยและพัฒนาทางด้านพลังงานลมมักจะเริ่มต้นจากการศึกษาศักยภาพของพลังงานลม โดยเริ่มจากการตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อพิจารณาคุณลักษณะ (Characteristics) ของลม ดังตัวอย่างจากประเทศต่างๆ เช่น อังกฤษ ตุรกี ไชปรัส แคนาดา โดยส่วนใหญ่จะวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิตามเวลาเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรายวันและรายเดือน โดยมีการวิเคราะห์อนุกรมเวลาของค่าความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูลในปี ค.ศ. 1991-2000 ในประเทศอังกฤษ และมีการศึกษาการกระจายของความเร็วลมโดยใช้การกระจายของไวบูลล์ รวมทั้งได้มีการศึกษาความเร็วลมที่ระดับความสูงต่างๆ ตั้งแต่ระดับความสูง 20 m 40 m 60 m 80 m และ 100 m โดยอาศัยความสัมพันธ์ของเฮลแมน (Hellmann) ดังสมการที่ 2.59

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^\alpha \quad (2.59)$$

ในประเทศตุรกีมีการตรวจวัดความเร็วลมโดยอาศัยข้อมูลปี ค.ศ. 2004 และวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยรายเดือนและรายปี ศึกษาการกระจายตัวของความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบฟังก์ชันไวบูลล์และแบบเรย์เลย์ (Weibull and Rayleigh Probability Power Density Function) และอาศัย Power Law สำหรับการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) เพื่อคำนวณหาความเร็วลมที่ระดับสูงขึ้นไป 30 m 40 m 60 m และ 80 m ผลการวิเคราะห์พบว่าความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนมีการกระจายแบบไวบูลล์และพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าดังนี้ Shape Parameter $k = 1.75$ และ Scale Parameter $c = 5.25$ m/s

ฮูกวิก, วีรี และ เทอร์เคนเบิร์ก (Hoogwijk, Vries and Turkenburg, 2004 : 889-919) ได้ประเมินศักยภาพของพลังงานลมตามแนวชายฝั่งทะเลในระดับมหภาค ระดับภูมิภาค โดยวิเคราะห์ทางเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าศักยภาพทางเทคนิคของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีค่าประมาณ 96 PWh year^{-1} ซึ่งมีค่ามากกว่าการบริโภคพลังงานไฟฟ้าทั้งโลกถึง 6-7 เท่า โดยในการผลิตพลังงานปริมาณดังกล่าวจำเป็นต้องติดตั้งกังหันลมบนพื้นที่เท่ากับประเทศจีน ประเทศสหรัฐอเมริกา มีศักยภาพมากที่สุด ภูมิภาคที่มีศักยภาพต่ำที่สุดได้แก่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ทางใต้และทางตะวันตกของทวีปแอฟริกาและญี่ปุ่น ด้วยเทคโนโลยีปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจะมีต้นทุนการผลิตประมาณ $0.07 \text{ US\$/ (kWh)}^{-1}$ และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าสำหรับประเทศแคนาดา สหรัฐอเมริกา อเมริกาใต้ กลุ่มประเทศ OECD ในยุโรป และอดีตสหภาพโซเวียต

ข้อมูลลมจากสถานีอุตุนิยมวิทยาจำนวน 17 สถานีทั่วประเทศดูนิเซียวิเคราะห์โดยวิธีทางอุตุนิยมวิทยาและโดยอาศัยวิธีการกระจายแบบไวบูลล์ โดยตรวจวัดความเร็วลมที่ระดับความสูงของเซนเซอร์ในช่วง 6-12.5 m และทำการปรับค่าให้เป็นมาตรฐานเดียวกันที่ระดับความสูง 10 m หลังจากนั้นจึงประมาณค่าแบบนอกช่วงเพื่อคำนวณความเร็วลมที่ระดับความสูง 30 m 50 m และ 70 m และวิเคราะห์ไวบูลล์พารามิเตอร์ของแต่ละสถานีรวมทั้งได้ทำการสร้างผังลมของแต่ละสถานีจากผลการศึกษาสามารถจำแนกแหล่งพลังงานลมออกเป็น 3 กลุ่ม

- กลุ่ม A มีค่าอัตราเร็วลมระหว่าง 3.6-4.8 m/s และมีค่าพลังงานเฉลี่ยอยู่ในช่วง 537-893 kWh/m²/year

- กลุ่ม B มีค่าอัตราเร็วลมระหว่าง 2.7-3.6 m/s และมีค่าพลังงานเฉลี่ยอยู่ในช่วง 268-433 kWh/m²/year

- กลุ่ม C มีค่าอัตราเร็วลมระหว่าง 2.-2.9 m/s และมีค่าพลังงานเฉลี่ยอยู่ในช่วง 128-227 kWh/m²/year [7]

ฮาร์ชาร์ต (Hrayshat, 2007 : 1948-1960) ได้ทำการประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานลมบริเวณทางใต้ของประเทศจอร์แดนโดยอาศัยข้อมูลจากการตรวจวัดที่ระดับความสูง 10 m เป็นระยะเวลานาน 12 ปี (ค.ศ. 1990-2001) โดยทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรายวัน รายเดือนและรายปี และได้ทำการคำนวณความเร็วลมที่ระดับความสูง 20 m 30 m และ 40 m ผลการศึกษาได้เสนอแนะการติดตั้งกังหันลมขนาด 4 kW จำนวน 25 ตัว หรือฟาร์มกังหันลมขนาดเล็ก

เฮอร์ธาโด, โจควิน, จอร์จ และ เอดูอาร์โด (Hurtado, Joaquin, Jorge and Eduardo, 2003 : 483-491) ศึกษาหาผลกระทบด้านทัศนียภาพของฟาร์มกังหันลมของสเปน กฎหมายปัจจุบันของสเปนในการหาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของฟาร์มกังหันลมยังไม่ชัดเจน โดยเฉพาะที่เกี่ยวกับผลกระทบด้านทัศนียภาพ ไม่มีกฎหมายเฉพาะระดับประเทศ มีเพียงกฎหมายท้องถิ่น เป้าหมายหลักของกฎหมายนี้เพื่อรักษาสีเขียว (อนุรักษ์สัตว์และพืช) และเสียงดังที่เกิดขึ้น จุดเน้นของการศึกษานี้คือผลกระทบด้านทัศนียภาพที่มองเห็น ใช้วิธีในการคาดหมายผลกระทบด้านทัศนียภาพที่จะเกิดจากฟาร์มกังหันลมก่อนการสร้างจริง การศึกษานี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์และประเมินโครงการพลังงานลม ทั้งโครงการของรัฐและเอกชน วิธีที่พัฒนาขึ้นมานี้มีความรวดเร็ว ถูกต้องและชัดเจน

จุนเฟง (Junfeng, 1997 : 381-394) ได้ศึกษาการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนในประเทศจีนโดยประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงาน สถานภาพทางเทคโนโลยีและศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากำลังลมมีค่าประมาณ 3,200 จิกะวัตต์ โดยในปลายปี ค.ศ. 1995 จะมีการติดตั้งฟาร์มกังหันลมแบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งขนาดพิกัด 36 เมกกะวัตต์ โดยจะติดตั้ง

กัณฑ์ลมขนาดพิกัด 50 วัดต์ ถึง 5 กิโลวัดต์ การแจกแจงความถี่ของทิศทาง (Wind Direction Frequency Distribution) การเปลี่ยนแปลงในตอนกลางวันรายวันของอัตราเร็วลม (Daily Diurnal Variation of Wind Speed) และความหนาแน่นกำลังเฉลี่ย (Mean Power Density) โดยผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าข้อมูลลมที่ได้จากการตรวจวัดดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากแผนที่ลมของประเทศซาอุดีอาระเบีย (Saudi Arabia Wind Atlas)

คาเด็ม และ ฮุสเซน (Khadem and Hussain. 2006 : 2329-2341) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของแหล่งพลังงานลมโดยใช้ข้อมูลอนุกรมเวลาของความเร็วลมที่มีการตรวจวัดทุกๆ 3 ชั่วโมง เวลา 10 ปี (1991-2000) ของประเทศบังคลาเทศ และวิเคราะห์ความเร็วลมเฉลี่ยรวมทั้งทำการคำนวณความเร็วลมที่ระดับความสูง 30 m 50 m 65 m 75 m และ 90 m โดยอาศัยกฎลอการิทึม (Logarithmic Law) และใช้โปรแกรม WAsP สำหรับการประเมินพลังงานลมโดยพิจารณาอิทธิพลของสิ่งกีดขวาง ความขรุขระ และลักษณะทางภูมิประเทศ ได้ข้อสรุปว่าควรมีการตรวจวัดที่ระดับความสูง 50 m ในพื้นที่ที่มีศักยภาพสูงสำหรับการติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่ โดยกังหันลมขนาดความสูง 30 m หรือสูงกว่าจะมีความยั่งยืนมากกว่า โดยบริเวณทางใต้และทางตะวันออกของประเทศบังคลาเทศเป็นบริเวณที่มีศักยภาพของพลังงานลมสูงสำหรับการผลิตไฟฟ้า

มาร์ตินเนซ, ซานส์, เพเลกรินี, เจมีเนซ และบลังโก (Martínez, Sanz, Pellegrini, Jimenez and Blanco. 2008 : 1-7) วิจัยประเมินวัฏจักรชีวิตกังหันลมขนาด 2 MW ด้วยวิธี CML โดยในการศึกษาได้วิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตั้งแต่กระบวนการผลิตทุกส่วนประกอบของกังหัน การขนส่งกังหันจากโรงงานไปยังฟาร์มกังหันลม การติดตั้ง ผลกระทบที่เกิดจากการใช้งาน การบำรุงรักษาตลอดอายุการใช้งาน และการกำจัดกังหันหลังสิ้นสุดการใช้งาน โดยมีช่วงอายุการใช้งานอย่างน้อย 20 ปี หน่วยการทำงานที่ศึกษาคือกระแสไฟฟ้า 1 kWh ผลที่ได้พบว่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของระบบกังหันลม นั้นมีผลกระทบน้อยกว่าการผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไปมาก โดยผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมลดลงจากเดิม 89 – 99% ขึ้นอยู่กับประเภท ระยะเวลาการใช้พลังงานน้อยกว่า 1 ปี (เวลาเกี่ยวกับความต้องการใช้พลังงานในการผลิตและจัดทำกังหัน) ซึ่งน้อยกว่าช่วงเวลาของการใช้งานของระบบมาก

มาร์ติน และคณะ (Martínez et al. 2008: 52-63) วิจัยเรื่องการประเมินวัฏจักรชีวิตกังหันลมในประเทศสเปน โดยในการศึกษาได้วิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตั้งแต่กระบวนการผลิตทุกส่วนประกอบของกังหัน การขนส่งกังหันจากโรงงานไปยังฟาร์มกังหันลม การติดตั้ง ผลกระทบที่เกิดจากการใช้งาน การบำรุงรักษาตลอดอายุการใช้งาน และการกำจัดกังหันหลังสิ้นสุดการใช้งาน ซึ่งผลการวิจัยพบว่าการผลิตไฟฟ้าโดยฟาร์มกังหันลมช่วยลดปัญหาด้าน

สิ่งแวดล้อม เนื่องจากช่วยลดการเกิด CO₂ SO₂ และ NO_x อีกทั้งวัสดุที่ใช้เป็นกังหันสามารถนำมา
แปรรูปหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 7 เปอร์เซ็นต์การลดลงของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของกังหันลมเปรียบเทียบกับไฟฟ้า
แบบผสมของสเปน

Impact Category	% Reduction of Environmental Impact
Abiotic Depletion	98.99
Global Warming (GWP100)	98.76
Ozone Layer Depletion (ODP)	96.73
Human Toxicity	89.26
Freshwater Aquatic Eco-toxicity	94.06
Marine Aquatic Eco-toxicity	99.34
Terrestrial Eco-toxicity	92.68
Photochemical Oxidation	99.24
Acidification	99.28
Eutrophication	97.78

ตารางที่ 8 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกังหันลม

Category	Turbine Environmental Impact (Pt)	Environmental Cost Avoided by Power Generated in 1 year (Pt)	Payback Time (days)	% 20 years
Carcinogens	322.33	5221.82	22.53	0.31
Respiratory Organics	28.54	26.27	396.56	5.43
Respiratory Inorganics	28040.85	26482.92	386.47	5.29
Global Warming	2349.87	9134.37	93.90	1.29

ตารางที่ 8 (ต่อ)

Category	Turbine Environmental Impact (Pt)	Environmental Cost Avoided by Power Generated in 1 year (Pt)	Payback Time (days)	% 20 years
Radiation	16.40	0.00	Never	Never
Ozone Layer	7.11	6.60	393.42	5.39
Ecotoxicity	3156.05	5495.57	209.62	2.87
Acidification/ Eutrophication	2117.28	3758.59	205.61	2.82
Land Use	2951.07	0.00	Never	Never
Minerals	46.32	0.00	Never	Never
Fuels	26902.26	58336.21	168.32	2.31

มิโกยะ, เครสโป, เจมินเนซ, กราเซีย และ มานัว (Migoya, Crespo, Jeminez, Garcia, and Manuel. 2007 : 4482-4491.) ได้ประเมินแหล่งพลังงานลมในเขตบริเวณเมืองมาดริด โดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ WAsP สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิตัวการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม พบว่าเมืองมาดริดมีพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งกังหันลมที่มีระดับความสูงของศูนย์กลางกังหัน 78 m ประมาณ 220 km² และไม่มีปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมซึ่งที่ระดับความสูงดังกล่าวมีความเร็วลมประมาณ 7 m/s ผลจากการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าการติดตั้งฟาร์มกังหันลมขนาดกำลังการผลิตทั้งหมด 200 MW มีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

นุเยน (Nguyen. 2007 : 1045-1413) ประเมินแหล่งพลังงานลมในประเทศเวียดนาม รวมทั้งได้วิเคราะห์สถานภาพการพัฒนาและการใช้ประโยชน์ในอนาคต โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographical Information System, GIS) สำหรับการจัดทำแผนที่ โดยพบว่าพื้นที่ 31,000 km² สามารถพัฒนาเพื่อติดตั้งกังหันลมจำนวน 865 km² ซึ่งมีกำลังการผลิตเท่ากับ 3,572 MW โดยมีค่าจ่ายในการผลิตไฟฟ้าน้อยกว่า 6 US cents/kWh ซึ่งผลจากการผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยพลังงานลมสามารถแก้ปัญหาครัวเรือนที่ยังไม่มีไฟฟ้าใช้อีกประมาณ 300,000 ครัวเรือน

ปีเดอร์เซน, เบิร์ก, บากเกอร์ และ บูมา (Pedersen, Berg, Bakker, Bouma. 2010 : 2520-2527) ศึกษาเสี่ยงจากการจลาจลบนถนนสามารถหลบเลี่ยงกังหันลมได้หรือไม่ โดยศึกษาเสี่ยงกังหันลมในระดับเสี่ยงจากการจลาจลที่ต่างกัน กังหันลมเป็นพลังงานนำกลับมาใช้ใหม่เป็นที่ได้รับความ

นิยม แต่พื้นที่สำหรับการสร้างฟาร์มลมหายาก ปัจจัยหนึ่งเพราะผลกระทบด้านเสียง เป้าหมายของการศึกษานี้เพื่อศึกษาว่าเสียงการจราจรสามารถกลบเสียงกังหันลมได้ไหม หรือในทางกลับกันอาจเป็นการเพิ่มเสียงรบกวน การศึกษานี้ทำการสำรวจเสียงรบกวนจากการจราจรและเสียงจากกังหันลมในฟาร์มลมในประเทศเนเธอร์แลนด์ในปี ค.ศ. 2007 และคำนวณระดับเสียง พบว่าเสียงการจราจรโดยปกติไม่ได้ลดผลกระทบจากเสียงกังหันลม ยกเว้นในกรณีที่ระดับเสียงของกังหันลมอยู่ในระดับต่ำที่ 35-40 dB(A) และเสียงการจราจรมีระดับสูงกว่านั้นอย่างน้อย 20 dB(A) ผลกระทบด้านเสียงของทั้งสองแหล่งมีความเกี่ยวเนื่องกัน แต่ขึ้นกับปัจจัยเฉพาะอื่นด้วย ทักษะภาพและทัศนคติต่อกังหันลมมีความเกี่ยวเนื่องสำคัญต่อผลกระทบด้านเสียง ผลการศึกษานี้สามารถใช้ในการหาที่ตั้งฟาร์มกังหันลมที่เหมาะสมได้

สาธิต เทียมรัตน์ (Satit Thiemrat, 2007: 1-7) ศึกษาการใช้ไฟฟ้าจากกังหันลมขนาดเล็กในประเทศไทย ทำการศึกษาเกี่ยวกับความเหมาะสมของการใช้ไฟฟ้าจากกังหันลมขนาดเล็ก กับอัลเตอร์เนเตอร์ ชนิดความเร็วรอบต่ำในประเทศไทย โดยมีจุดประสงค์ที่จะนำกระแสไฟฟ้าที่ได้ไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน ศึกษาในพื้นที่ที่มีความเร็วลมเฉลี่ยต่ำ และมีความหนาแน่นของกระแสลม ที่ไม่สม่ำเสมอ โดยจะประยุกต์ใช้กับกังหันลมขนาดเล็กความเร็วรอบต่ำในพื้นที่ของประเทศไทย เนื่องด้วยศักยภาพพลังงานลมของไทย ในพื้นที่เลียบชายฝั่งทะเลและพื้นที่ที่ห่างจากชายฝั่งทะเล ระยะ 5 กม. ถึง 10 กม. นั้นมีศักยภาพที่จะสามารถใช้พลังงานลมมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ด้วยกังหันลมขนาดเล็กความเร็วรอบต่ำ ศึกษากังหันลมความเร็วขนาดเล็กต่อเชื่อมกับ AC อัลเตอร์เนเตอร์แบบความเร็วรอบต่ำ ชุดแปลงไฟ AC เป็น DC เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ และเครื่องแปลงกระแสไฟจาก 24 VDC เป็น 220 VAC ในตลอดคาบเวลาที่มีกระแสลมแรงหรืออ่อน ซึ่งสามารถที่จะทำให้กังหันลมขนาดเล็กทำงานและผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ กระแสไฟฟ้าถูกเก็บไว้ในแบตเตอรี่ทันที และ Inverter จะแปลงไฟกระแสตรงจากแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับทันที และสามารถที่จะนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านได้ ทดลองใช้กับเครื่องสูบน้ำภายในบ้านพัก ขนาด 200 วัตต์ 220 V ข้อดีของกังหันลมขนาดเล็ก กับอัลเตอร์เนเตอร์แบบความเร็วรอบต่ำที่ไม่ต้องมีชุดเกียร์ทดรอบและการส่ง แรงโดยตรงไปยังอัลเตอร์เนเตอร์ ที่มีความเร็วรอบการทำงานที่ต่ำมาก ประมาณ 100 - 500 rpm ก็จะทำให้กังหันลมขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้นมาอีก

ทรีเมคและมิวเนียร์ (Tremeac and Meunier. 2009 : 2104-2110) ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของกังหันลมขนาด 4.5 MW และ 250 W ศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของกังหันลมขนาด 4.5 MW และ 250 W ตั้งแต่กระบวนการผลิตกังหัน การขนส่ง การติดตั้ง การบำรุงรักษา การแยกชิ้นส่วน และการทิ้งทำลาย ในการศึกษาให้กังหันลมสองขนาดมีอายุการใช้งานเท่ากับ 20 ปี โดย กังหันลมขนาด 4.5 MW สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 11.7 GWh/ปี และกังหันลมขนาด 250 W สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 120 kWh/ปี