

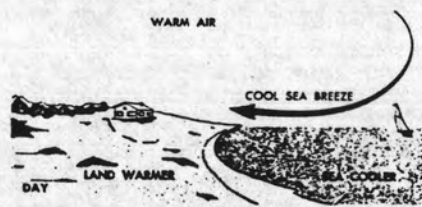


การเกิดลม และประวัติเกี่ยวกับกังหันลม

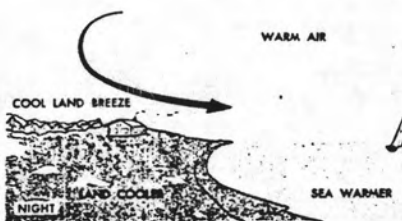
2.1 แหล่งกำเนิด (Wind Resources)

การเกิดลมบนผิวโลก นั้น มีสาเหตุเนื่องมาจาก ผิวโลกได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ไม่เท่าเทียมกัน อีกทั้งการเก็บความร้อนในแหล่งที่ต่างกันก็อาจจะไม่เท่ากัน เป็นผลทำให้เกิดการถ่ายเทของอากาศเกิดขึ้น อย่างเช่น ในระหว่างกลางวัน อากาศเหนือผิวน้ำทะเล หรือทะเลสาบ ยังเย็นอยู่ เมื่อเทียบกับผิวดิน และความร้อนจากดวงอาทิตย์จะถูกน้ำดูดไว้ จึงทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอ ส่วนพื้นดินซึ่งรับความร้อน และเก็บความร้อนได้ดีกว่า จะทำให้อากาศเหนือพื้นดินเบาและลอยตัวสูงขึ้น อากาศเย็นเหนือผิวน้ำซึ่งหนักกว่าก็จะเคลื่อนเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดลมซึ่งเราเรียกว่า "ลมทะเล" ดังรูปที่ 2.1 ในทางกลับกัน ในระหว่างกลางคืน อากาศเหนือพื้นดินจะเย็นลงเร็ว เมื่อเทียบกับอากาศเหนือผิวน้ำ ทำให้อากาศเหนือผิวน้ำลอยตัวสูงขึ้น เป็นเหตุให้อากาศเหนือพื้นดินซึ่งเย็นกว่าเคลื่อนมาแทนที่ ทำให้เกิดลมที่เรียกว่า "ลมบก" ดังรูปที่

2.2

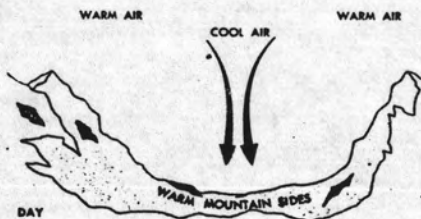


รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดและการพัดของลมทะเล



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดและการพัดของลมบก

ลมตามหุบเขาก็มักเช่นเดียวกัน ในตอนกลางวัน ตามแนวลาดชัน (Slope) ของภูเขา อากาศจะอุ่นและลอยตัวขึ้นสูงขึ้น และอากาศด้านบนซึ่งเย็นกว่าเคลื่อนตัวลงมา ดังรูปที่ 2.3 พอเวลากลางคืน อากาศตามแนวลาดชันของภูเขาจะเย็นกว่า เมื่อเทียบกับอากาศด้านบน จึงทำให้ให้อากาศตามแนวลาดชันเคลื่อนตัวลงมา ดังรูปที่ 2.4

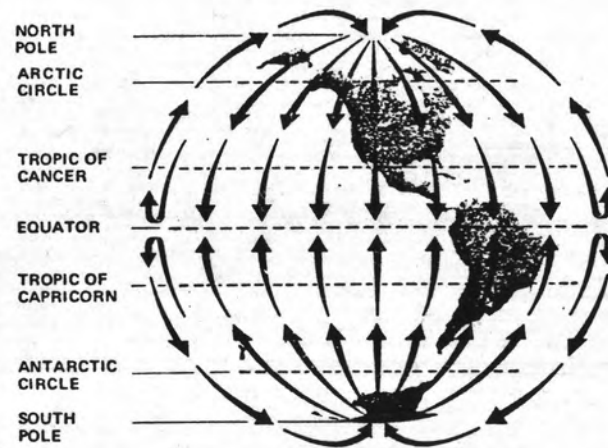


รูปที่ 2.3 ลมระหว่างหุบเขาในเวลากลางวัน



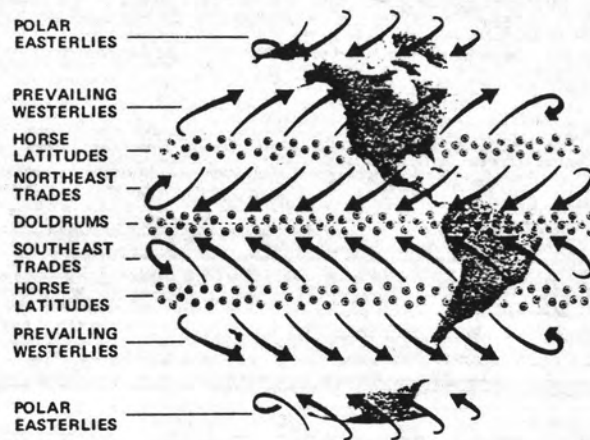
รูปที่ 2.4 ลมระหว่างหุบเขาในเวลากลางคืน

พิจารณาการหมุนเวียนของลมตามผิวโลก ระหว่างเส้นศูนย์สูตร (Equator) และขั้วโลก (Poles) พบว่าบริเวณเส้นศูนย์สูตรได้รับความร้อนมากกว่าบริเวณขั้วโลก ทำให้อากาศเย็นบริเวณขั้วโลกเคลื่อนมาสู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรและอากาศร้อนบริเวณเส้นศูนย์สูตร จะลอยสูงขึ้น เคลื่อนตัวสู่เส้นเขตร้อน (Tropic) จนถึงชั้นบรรยากาศ แล้วมุ่งไปสู่ขั้วโลก ดังรูปที่ 2.5



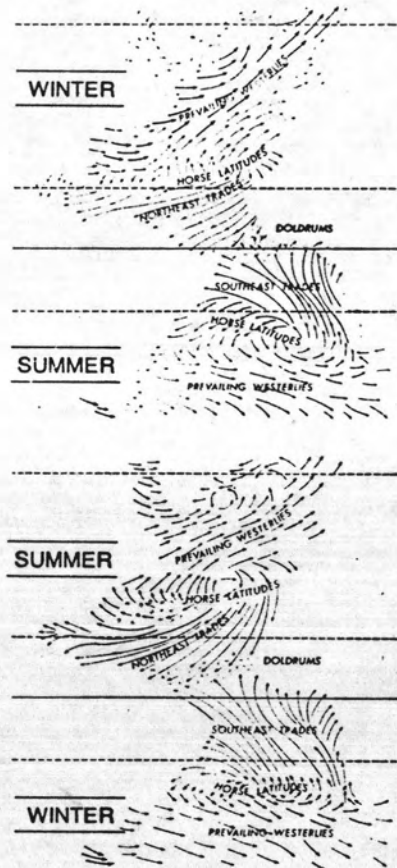
รูปที่ 2.5 การเคลื่อนตัวของอากาศบนผิวโลกเมื่อพิจารณาตอนโลกไม่หมุน

เมื่อพิจารณาการหมุนของโลกด้วย พบว่ามีผลต่อการเคลื่อนตัวของลมบนผิวโลกอย่างมาก เพราะความเฉื่อยของอากาศเย็น (Cold air) จะทำให้ อากาศเย็นเคลื่อนตัวลงมาใกล้ผิวโลก ขณะโลกหมุน และมุ่งสู่เส้นศูนย์สูตร แล้วค่อย ๆ บิดตัว เคลื่อนไปทางทิศตะวันตก ขณะที่อากาศอุ่น (Warm air) เคลื่อนลอยตัวสูงสู่ชั้นบรรยากาศ (atmosphere) แล้วมุ่งสู่ขั้วโลก ต่อจากนั้นก็เปลี่ยนทิศทางไปทางด้านทิศตะวันออก จากสาเหตุดังกล่าวนี้ การไหลเวียน (Circulation) ของอากาศรอบบริเวณความกดอากาศต่ำ ทางครึ่งซีกโลกทางเหนือ (Northern hemisphere) จะเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกา (Counter-clockwise) ส่วนการไหลเวียนแบบตามเข็มนาฬิกา (Clockwise) จะอยู่ในบริเวณทางครึ่งซีกโลกตอนใต้ (Southern hemisphere) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การหมุนของโลกมีผลต่อทิศทางและการเคลื่อนตัวของลม

เนื่องจากแกนการหมุนของโลกเอียงทำมุม 23.5° กับแนวระนาบการเคลื่อนที่รอบดวงอาทิตย์ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล มูลเหตุของการเปลี่ยนแปลงมาจากการรับความร้อนจากดวงอาทิตย์ไม่เท่ากันนั่นเอง และยังมีผลต่อการเปลี่ยนความแรงและทิศทางของลมในแต่ละตำแหน่งบนผิวโลกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเคลื่อนตัวและการปิดตัวของลมในแต่ละฤดู

ในการศึกษา ประโยชน์ที่ได้จากกำลังลมเมื่อไม่นานมานี้ โดย ดร.มาร์วิน กุสตาฟสัน (Dr. Marvin Gustavson) แห่งห้องปฏิบัติการลอเรนซ์ ลีเวอร์มอร์ (Lawrence Livermore Laboratories) ได้ชี้ให้เห็นว่า 2% ของฟลักซ์แสงอาทิตย์ (Solar flux) ทั้งหมด ซึ่งเฉลี่ยประมาณ 350 วัตต์ ต่อตารางเมตร ที่ตกบนผิวโลก จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานลม และประมาณ 10% ของพลังงานลมดังกล่าวนี้เองที่ใช้มาเป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกลที่อาศัยลมในการทำงาน และ ดร.กุสตาฟสัน ยังชี้ให้เห็นอีกว่า กำลังงานจากลมได้ถูกนำมาใช้งานมากกว่ากำลังงานจากรูปอื่น ๆ เช่น กำลังงานจากกระแสน้ำ กำลังงานจากความร้อนใต้ธรณี ดังตารางที่ 2.1 ข้างล่างนี้ (2)

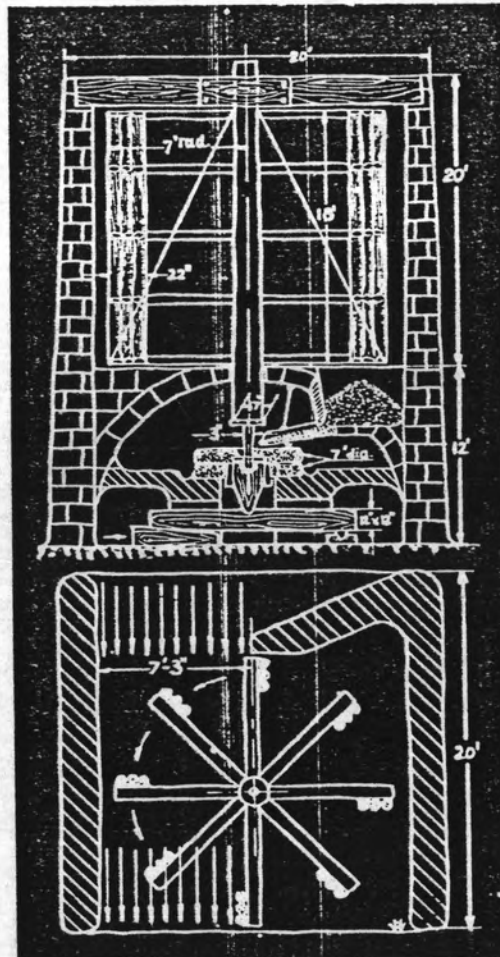
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบ ความต้องการกำลัง และขีดจำกัดของกำลัง ที่สกัดได้จากธรรมชาติ (หน่วยควอดซ์ต่อปี)

<u>ทั่วโลก (Global)</u> ความต้องการกำลัง	กำลังที่สกัดได้
	300
<u>กำลังที่สกัดได้จากธรรมชาติ</u>	
- กำลังลม (Wind Power)	4000
- กำลังจากขงไหล (Hydropower)	120
- กำลังจากความร้อนใต้ธรณี (Geothermal power)	6
- กำลังจากกระแสน้ำ (Tidal power)	2

* 1 ควอดซ์ (Quads) มีค่าเทียบเท่ากับพลังงานที่ได้จากถ่านหินที่บรรทุกโดยรถไฟ 500,000 คัน

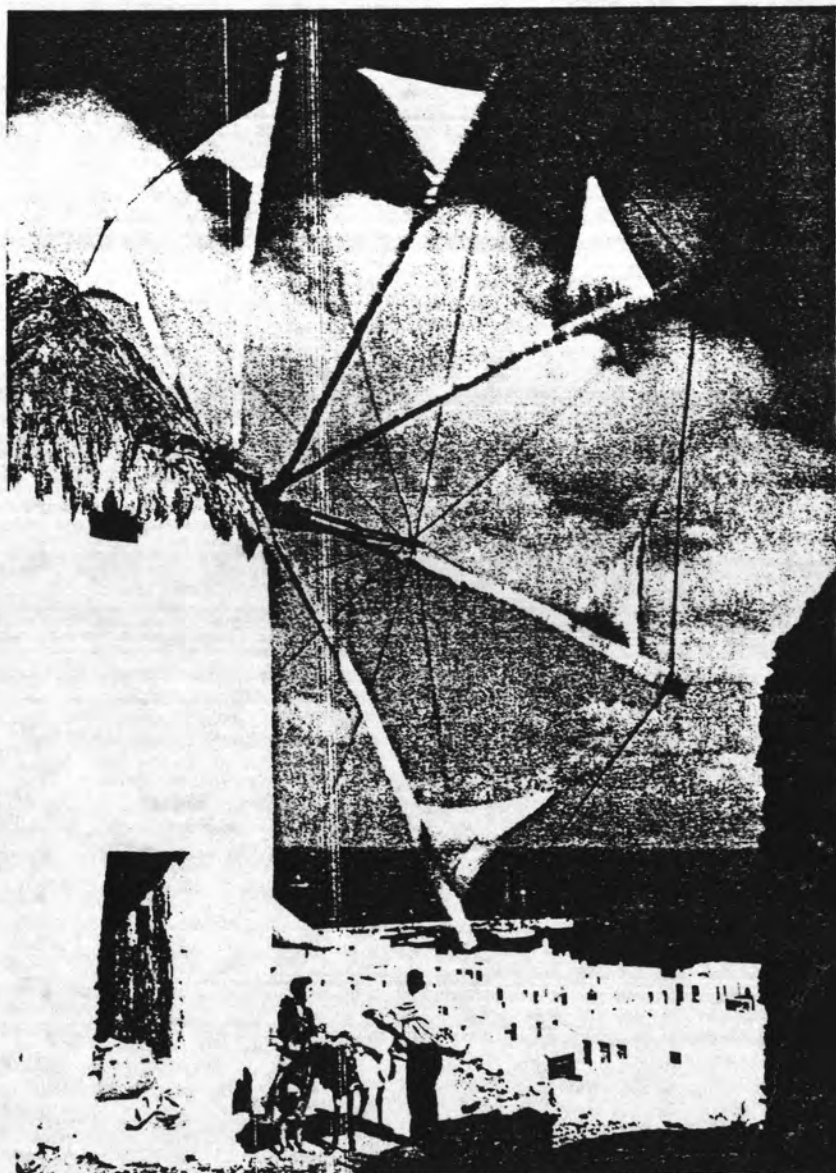
2.2 ประวัติเกี่ยวกับกังหันลม

กังหันลม (Wind Turbine) ในสมัยยุคแรก ๆ นั้นเป็น กังหันลมแกนตั้งแบบง่าย ๆ ดังเช่น ที่ใช้ในแถบเปอร์เซียประมาณ 200 ปี ก่อนคริสตกาล โดยใช้สำหรับสีข้าว ดังรูปที่ 2.8 ซ้ำล่าง การใช้กังหันลมแบบตั้ง ต่อมาได้ใช้กันแพร่หลายทั่วไป ในหมู่ของกลุ่มอิสลามทั่วโลก (2)



รูปที่ 2.8 กังหันลมแกนตั้งแบบเปอร์เซีย พร้อมกับหินโม้ โดยมองจากด้านข้างและด้านบน

ต่อมา กังหันลมแบบแนวนอน (Horizontal axis wind turbine) ก็ได้ถูกสร้างขึ้น โดยทำจากไม้ และก็ได้พัฒนามาเรื่อย ๆ ดังเช่น ในรูปที่ 2.9 เป็นกังหันลมแบบดั้งเดิม (Primitive type) ซึ่งปัจจุบันก็ยังพบอยู่มากในแถบเมดิเตอร์เรเนียน (Mediterranean region)

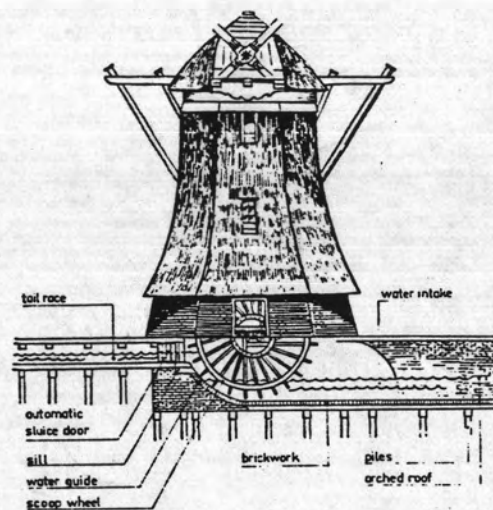


รูปที่ 2.9 กังหันลมแนวนอนแบบดั้งเดิมซึ่งทำด้วยไม้ ใช้สำหรับโรงสีข้าว กังหันลมชนิดนี้ปัจจุบันอยู่ที่เมืองมิโคนอส (Mikonos) บนเกาะกรีก (Greek island)

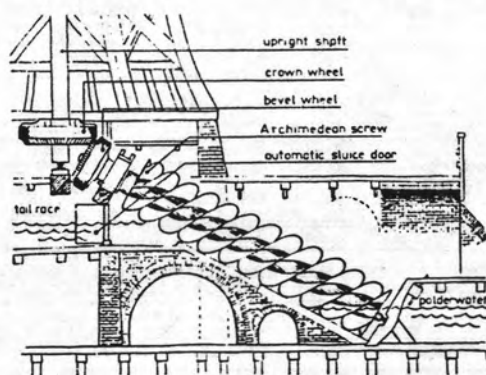
ยุคกลาง (Middle ages)

เมื่อประมาณศตวรรษที่ 11 หลังคริสตกาล กังหันลมก็ได้ใช้กันอย่างแพร่หลายในแถบ ตะวันออกกลาง (Middle East) และก็ได้ถูกนำไปใช้ในแถบยุโรป ในศตวรรษที่ 11 เช่นกัน โดยพวกครูเสด (Crusaders) (2)

ในศตวรรษที่ 14 ชาวดัตช์ (Dutch) ได้ปรับปรุงและออกแบบกังหันลมเพื่อทอนน้ำ จากทะเลสาบ (Lake) ของแม่น้ำไรน์ (Rhine River) เครื่องมือที่ใช้มีลักษณะดังรูปที่ 2.10 และ 2.11

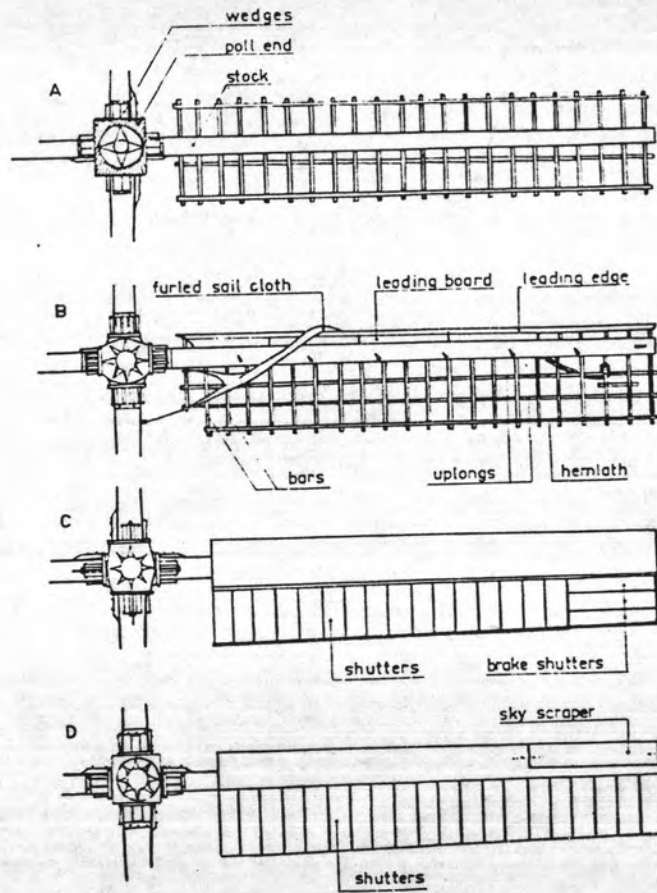


รูปที่ 2.10 กังหันลมที่ใช้กับโรงสีแบบแปดเหลี่ยม ซึ่งเป็นแบบของชาวฮอลแลนด์ใต้ (South Holland) โดยมีกังล้อภายใน พร้อมทั้งแสดงส่วนการทำงานของกังล้อ (Scoop wheel)



รูปที่ 2.11 รูปแสดงส่วนของการขับเคลื่อน (Driving) โดยใช้หลัก อาคิมีเดียนสกรู (Archimedean screw) ที่ใช้กับโรงระบายน้ำ (drainage mill)

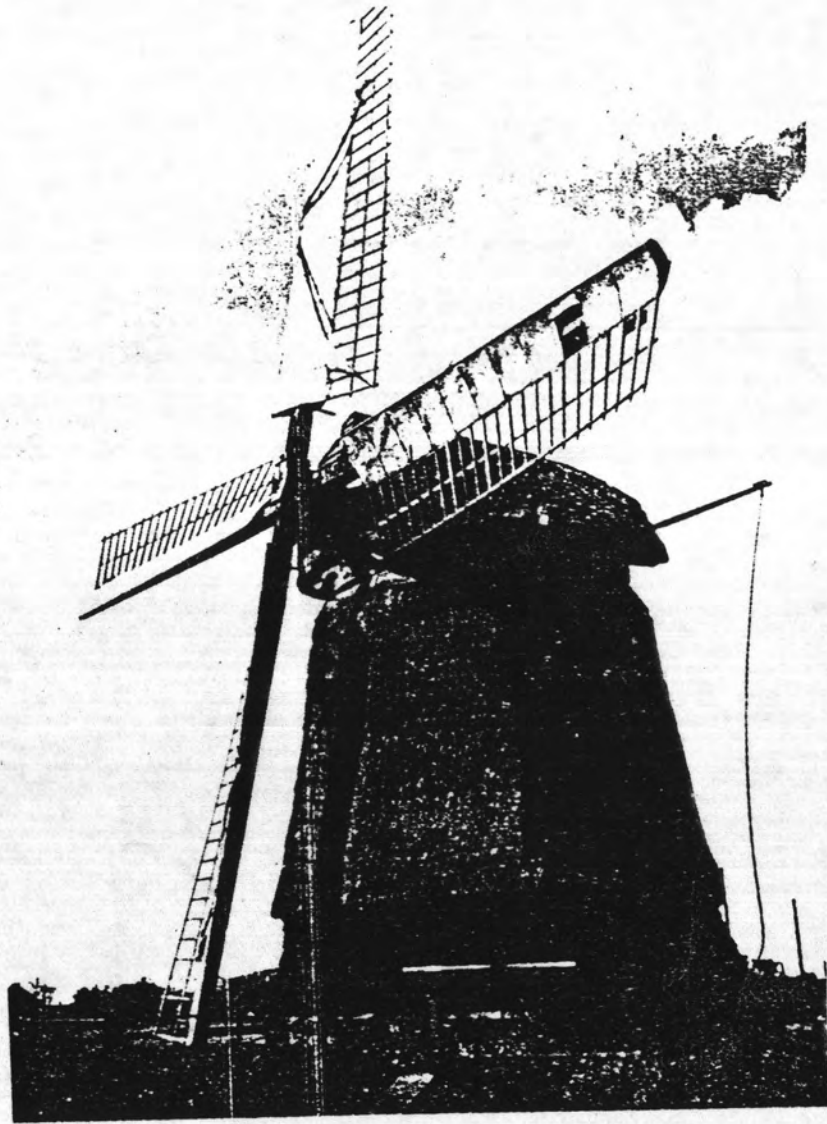
โรงน้ำมันกำลังลม (Oil mill) ได้สร้างขึ้นเป็นครั้งแรกในฮอลแลนด์ ในปี ค.ศ. 1582 และในปี ค.ศ. 1586 โรงผลิตกระดาษกำลังลม (Paper mill) ก็ได้สร้างขึ้นเช่นกัน เนื่องจากความต้องการกระดาษของโรงพิมพ์มีมาก ปลายศตวรรษที่ 16 โรงเลื่อยไม้กำลังลม (Saw mill) ก็ได้ถูกสร้างขึ้น เพื่อเลื่อยไม้เป็นสินค้าออกในแถบบอลติก (Baltic region) ตอนระยะหลัง ๆ ต่อมาชาวคัทซีได้ปรับปรุง และออกแบบกังหันลมในลักษณะต่าง ๆ โดยเฉพาะใบพัดแบบโรเตอร์ (Rotor) ในศตวรรษที่ 16 ใบพัดที่ทำด้วยไม้ก็ได้ถูกออกแบบในลักษณะดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 โดยส่วนที่เป็นด้านหาง (Trailing edge) ของโรเตอร์ ก็ได้ถูกปรับปรุงและออกแบบตามลักษณะของวิชาอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic design) ดังรูปที่ 2.14 การออกแบบใบพัดในสมัยใหม่ตอนหลังได้ใช้แผ่นเหล็กแทนผ้า และส่วนประกอบอื่นก็ใช้เป็นเหล็ก ทำให้เกิดความแข็งแรง และมีกำลังมากขึ้น



รูปที่ 2.12 แสดงชนิดของใบกังหันแบบสมัยแรก ๆ



รูปที่ 2.13 แสดงตัวกังหันลมที่ได้ถูกติดตั้งและพร้อมที่จะใช้งาน



รูปที่ 2.14 กังหันลมที่ใช้ในการระบายน้ำ เป็นแบบฮอลแลนด์เหนือ สร้างใน ค.ศ. 1761

2.3 ชนิดของเครื่องกลที่ใช้เป็นตัวเก็บพลังงานจากลม

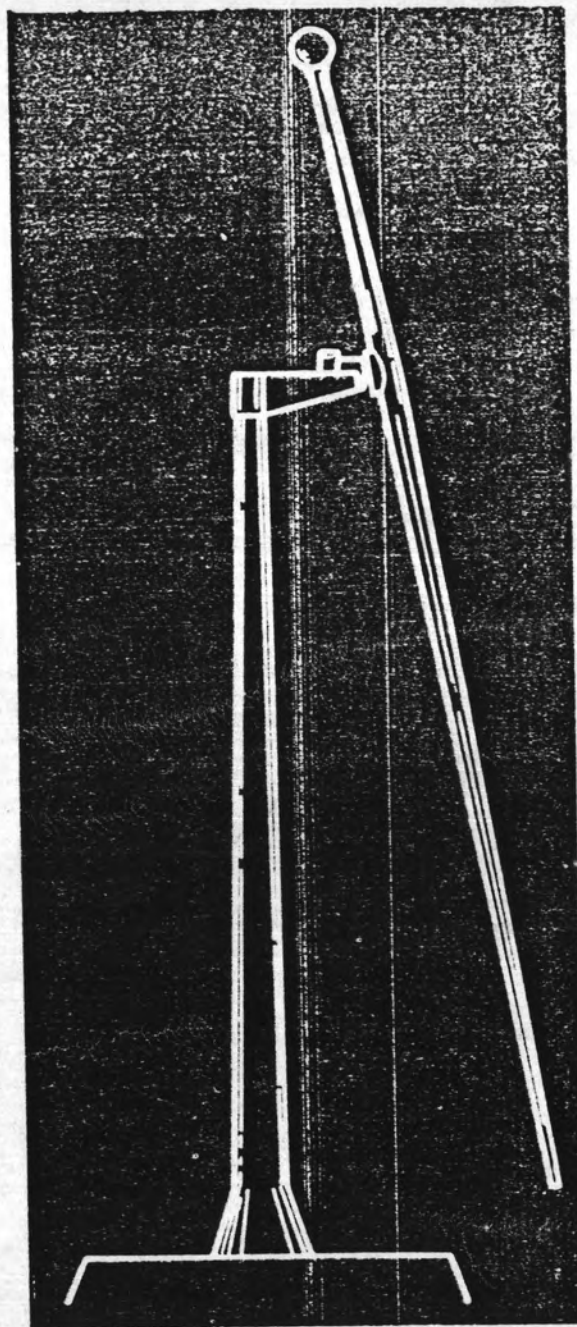
ตัวเก็บพลังงานจากลมมีอยู่หลายชนิด ซึ่งเป็นเครื่องมือที่จะดึงเอาลมมาใช้ประโยชน์ ลักษณะโครงสร้าง (Configuration) ทางกายภาพส่วนใหญ่จะสร้างขึ้นในลักษณะที่แรงกระทำจากกระแสลมไม่สมมาตร (Asymmetry) กัน ทำให้เกิดการหมุน (Rotate) และเลื่อนตำแหน่ง (Translate) นอกจากนี้ยังสามารถที่จะดึง (Extract) เอากำลังออกมาใช้ประโยชน์ได้ คำถามที่สำคัญก็คือ เครื่องมือควรมีขนาดและราคาเท่าไร และจะให้กำลังออกมาเท่าไรนั้น ยังต้องพิจารณากันอยู่ (2)

เครื่องกลที่ต้องใช้ตัวหมุน (Rotor) เป็นส่วนเก็บพลังงานจากลมนั้นอาจจะแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่รอบแกนหมุน (Axis of Rotation) ของเครื่องมือ เทียบกับแนวกระแสลม (Windstream) ที่พัดผ่าน ได้ดังนี้

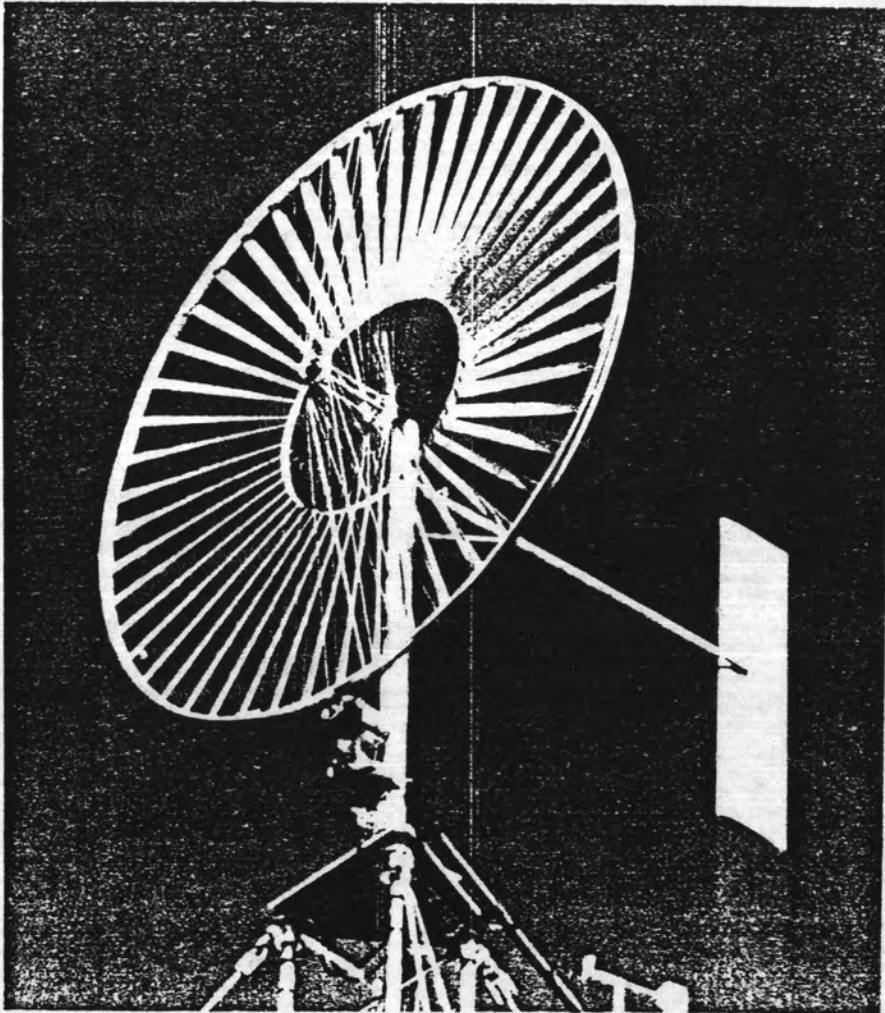
1. ตัวหมุนแบบแกนนอน (Horizontal-axis Rotor) ซึ่งแกนหมุนจะขนานกับทิศทางของกระแสลมที่พัดผ่าน
2. ตัวหมุนแบบแกนนอนและแกนขวางทางลม (Crosswind horizontal-axis Rotor) ซึ่งแกนหมุนจะมีทั้งอยู่ในแนวขนานกับผิวโลก และตั้งฉากกับทิศทางของกระแสลม
3. ตัวหมุนแบบแกนตั้ง (Vertical-axis Rotor) ซึ่งแกนหมุนจะตั้งฉากกับผิวโลก และทิศทางของกระแสลม

ตัวหมุนแบบแกนนอน

ตัวหมุนแบบแกนนอนเป็นเครื่องมือที่มีทั้งแรงยก (Lift force) และแรงครูด (Drag force) เกี่ยวข้อง การทำงานจะมีได้ 2 ลักษณะ คือ อาศัยแรงยก หรือแรงครูดเป็นหลักในการทำงานของเครื่องมือ แต่โดยทั่วไปพบว่า เครื่องมือที่อาศัยแรงยกในการทำงาน จะมีอัตราการหมุน และกำลังดีกว่าแบบที่ใช้แรงครูด และยังหมุนเร็วกว่าความเร็วของลมด้วย ตัวหมุนชนิดที่ใช้แรงยกหรือแรงครูดในการทำงานนี้ สามารถออกแบบในลักษณะที่ใช้จำนวนใบต่าง ๆ กัน โดยมีตั้งแต่ใบเดียว จนถึงหลาย ๆ ใบ ดังรูปที่ 2.15 และ 2.16



รูปที่ 2.15 ตัวหมุนชนิดใบเดียว (One-bladed Rotor)



รูปที่ 2.16 ตัวหมุนแกนนอนชนิดหลายใบ (Multi-bladed Rotor)

ตัวหมุนแบบแกนนอนโดยทั่วไป จะออกแบบในลักษณะที่สามารถจะหันเหไปตามทิศทางลม ได้แบบอิสระ โดยจะมีส่วนที่ช่วยในการเปลี่ยนทิศทาง ซึ่งเราเรียกว่า แพนหาง (Tail-vane) ซึ่งอุปกรณ์ส่วนนี้จะเป็นตัวช่วยในการให้ตัวหมุนหรือใบพัดวางตัวอยู่ในแนวที่จะรับลมได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ ในกรณีที่ตัวหมุน หรือใบพัดหมุนเร็วจนเกินไป ก็จะมีส่วนที่จะมาทำหน้าที่ช่วยหน่วงความเร็วให้เหลืออยู่ในอัตราที่เหมาะสม อุปกรณ์ส่วนนี้เรียกว่า ตัวหน่วงการหมุน (Flap) การทำงานจะอาศัยระบบกลไกของสปริง เป็นตัวหน่วง

ตัวหมุนแบบแกนนอนและแกนขวางทางลม

เครื่องมือในลักษณะนี้ก็ได้รับการพัฒนาเช่นเดียวกัน แต่พบว่าประสิทธิภาพไม่ค่อยดีและไม่มีประโยชน์เท่าไรสำหรับตัวหมุนแบบนี้ และก็ไม่ได้ดีกว่าตัวหมุนแบบแกนนอนและแกนตั้งเลย จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมกัน

ตัวหมุนแบบแกนตั้ง

โดยทั่วไป ตัวหมุนแบบแกนตั้ง มีข้อได้เปรียบมากกว่าแกนนอน เพราะไม่ต้องปรับตัวเองไปตามทิศทางของลม โดยลมจะมาทางทิศไหนก็สามารถจะรับได้ นอกจากนี้แล้วยังลดความซับซ้อนเกี่ยวกับโครงสร้างของระบบด้วย ที่สำคัญยังลดการสั่นบนตัวใบ ความเค้น (Stress) บนตัวใบ บนลูกปืน (Bearing) บนแกนหมุน (Shaft) บนเส้า (Tower) และส่วนประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ลักษณะใบพัดแบบแกนตั้ง มีหลายลักษณะรูปแบบ และถูกพัฒนามาเรื่อย ๆ ตั้งแต่สมัยอดีต โดยใช้แรงครูด (Drag force) เป็นแรงหมุนใบพัด เช่น แบบแผ่นราบ (Plate) แบบถ้วย (Cup) หรือ แบบกังหัน (Turbine) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีตัวหมุนแกนตั้งอีก 2 ชนิด ซึ่งแตกต่างจากที่กล่าวมาแล้ว คือ

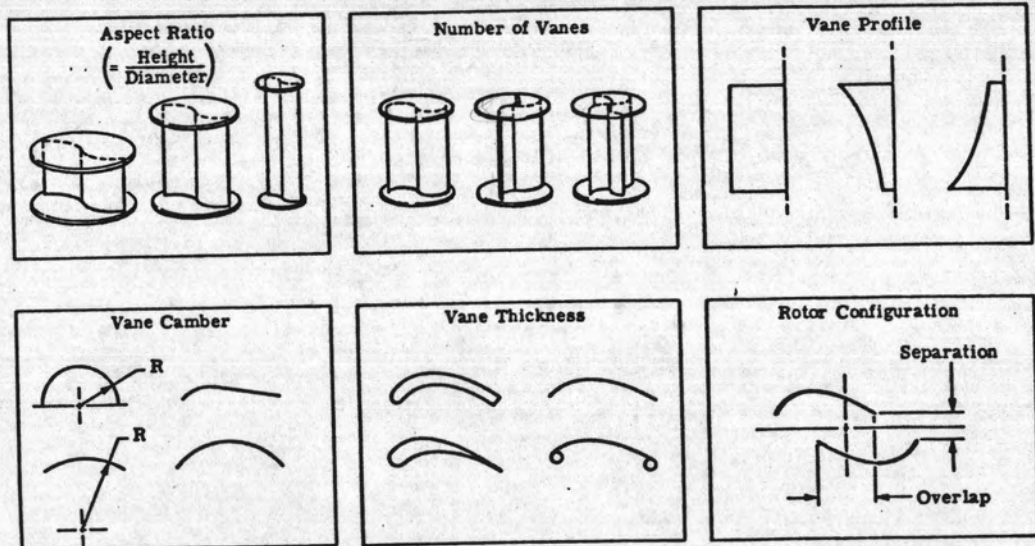
1. ตัวหมุนแบบซาโวเนียส (Savonius S-shaped Rotor) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และ 2.18 ซึ่งการทำงานจะมีแรงยกช่วยบ้างเล็กน้อย ส่วนใหญ่จะเป็นแรงครูด อุปกรณ์ชนิดนี้จะสตาร์ท (Start) ด้วยคาทอร์ค (Torque) สูงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ใช้แรงยกช่วยหมุน เพราะว่ามีค่า Solidity สูง แต่มีอัตราเร็ว การหมุนต่ำ และกำลังออกมาน้อย เมื่อคิดเทียบต่อขนาด (Size) น้ำหนัก (Weight) และ ราคา (Cost)



CHARACTERISTICS:

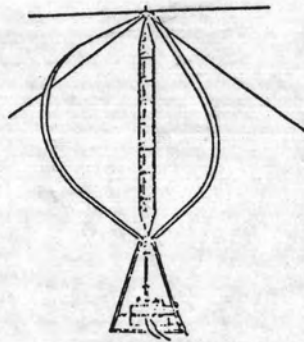
- Self-Starting
- Low Speed
- Low Efficiency

รูปที่ 2.17 ตัวหมุนแบบซาโวเนียส



รูปที่ 2.18 การออกแบบลักษณะตัวหมุนแบบซาโวเนียส

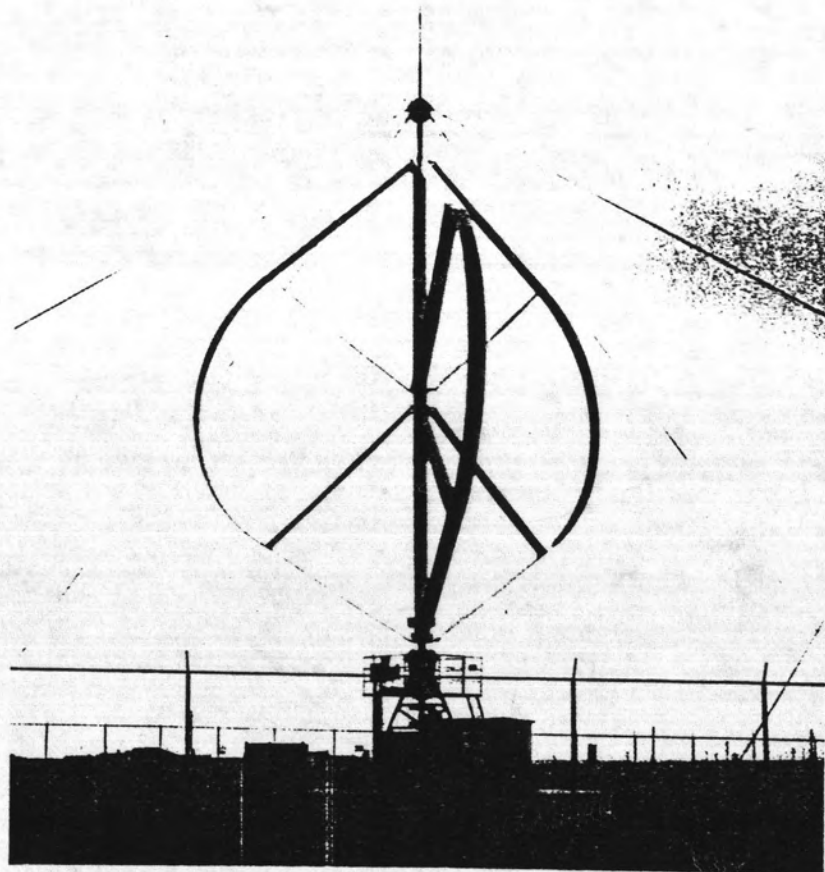
2. ตัวหมุนแบบแดร์เรีเยส (Darrieus type Rotor) ตั้งในรูปที่ 2.19 และ 2.20 ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดย จี.เจ.เอ็ม. แดร์เรีเยส (G.J.M. Darrieus) ชาวฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1920 และก็ได้รับการพัฒนาต่อ ๆ มา โดยห้องวิจัยแห่งชาติของแคนาดา (National Research Council of Canada) ในต้นปี 1970 และโดยห้องปฏิบัติการซานเดีย (Sandia Laboratories) ของสหรัฐอเมริกา ในปี 1974 ตัวหมุนแบบแดร์เรีเยส เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แรงยก (Lift force) ในการหมุน ตัวใบ (Blade) จะมีลักษณะโค้ง ตัวหมุนแบบนี้มีค่า Solidity ต่ำ มีค่าทอร์คเริ่มต้นต่ำ มีอัตราการผลิตสูง และมีกำลังที่ได้ออกมาสูงเมื่อเทียบกับขนาดน้ำหนักและราคา



CHARACTERISTICS:

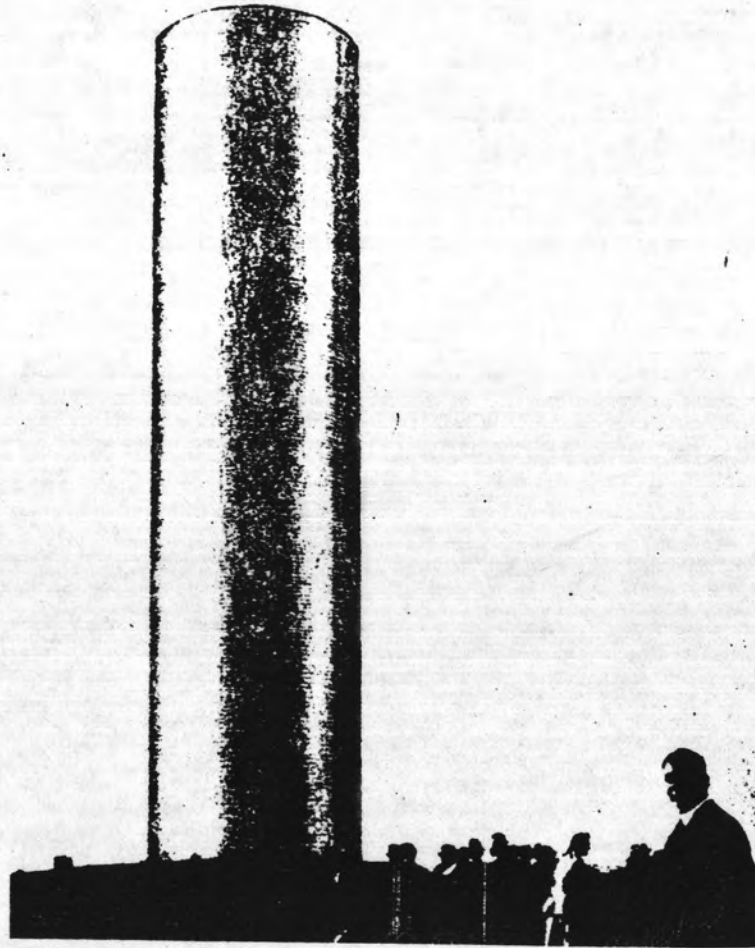
- Not Self-Starting
- High Speed
- High Efficiency
- Potentially Low Capital Cost

รูปที่ 2.19 ตัวหมุนแบบแดร์เรีเยส (Darrieus Rotor)



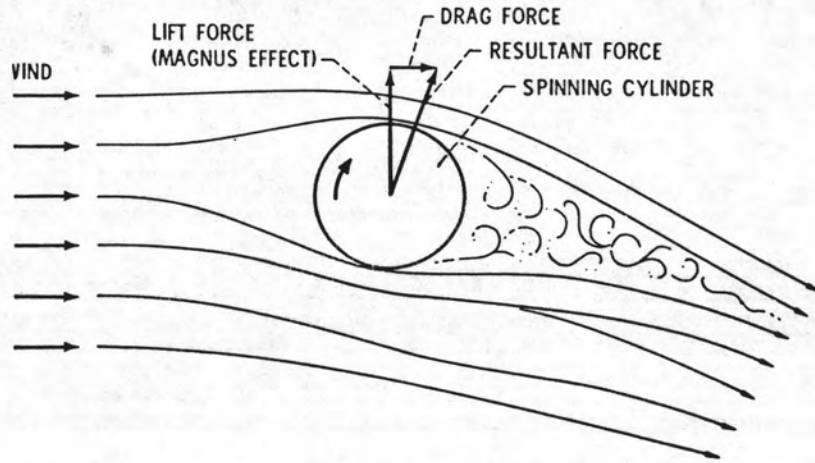
รูปที่ 2.20 ตัวหมุนแกนตั้งแบบแคร์เรียสสร้างโดยห้องปฏิบัติการซานเตียในนิวเม็กซิโก
(New Mexico)

นอกจากนี้ยังมีตัวหมุนแกนตั้งอีกแบบที่เรียกว่า Magnus Effect Rotor ซึ่งอาศัยปรากฏการณ์ แมกนัส (Magnus effect) ในการขับเคลื่อน ตัวหมุนแบบนี้ เรียกว่า เป็นแบบ Madaras หรือ Flettner ซึ่งประกอบด้วย แท่งกระบอกหมุนได้ (Spinning Cylinder) ดังในรูปที่ 2.21

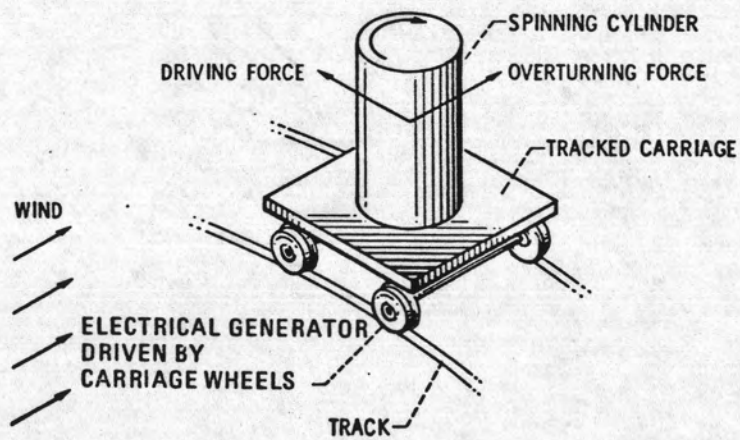


รูปที่ 2.21 การทดสอบแบบจำลองของตัวหมุนแบบ Madaras ที่เบอร์ลิงตัน (Burlington) รัฐนิวเจอร์ซีย์

เมื่อกระแสลมพัดผ่านแท่งทรงกระบอกนี้ จะเกิดแรงที่ทำให้เกิดการเลื่อนตำแหน่ง (Translational force) ซึ่งตั้งฉากกับแนวกระแสลม แรงที่เกิดขึ้นเป็นผลอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์แมกนัส ต่อจากนั้น จะทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวนี้ ขับเคลื่อนไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 และ 2.23

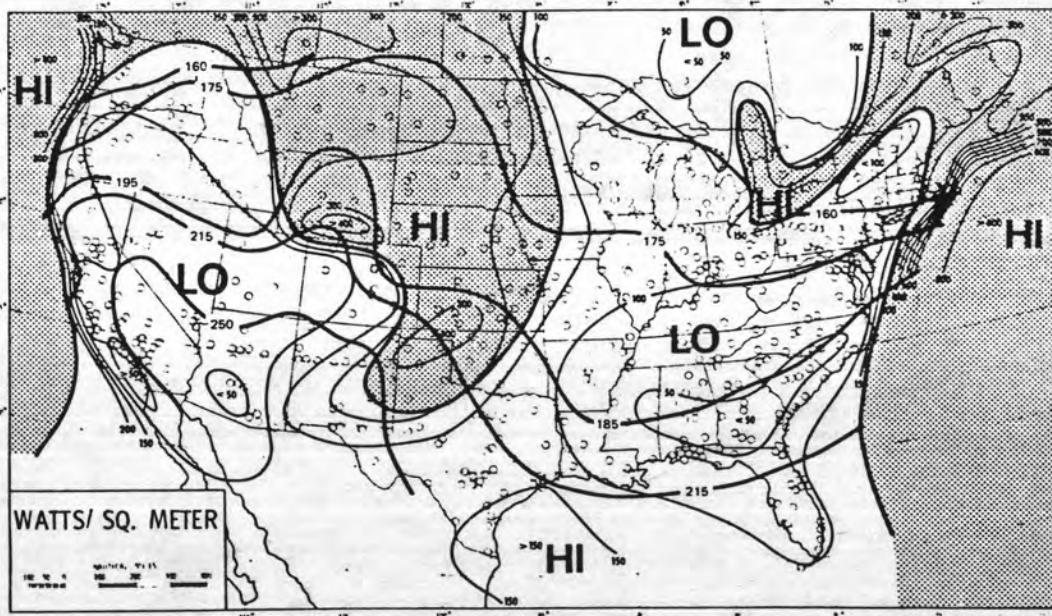


รูปที่ 2.22 ปรากฏการณ์แมกนัส (Magnus effect)



รูปที่ 2.23 แนวคิดเกี่ยวกับตัวหมุนแบบ Madaras

เราทราบว่าเพียง 2% ของพลังงานจากแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่ตกบนโลก จะกลายเป็นพลังงานลม เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของกำลังเฉลี่ยของลมบริเวณใกล้ผิวโลกที่วัดตามแนวตั้ง โดยตั้งฉากกับทิศทางของลมพบว่าจะมีค่ามากกว่าความหนาแน่นของกำลังเฉลี่ยของพลังงานแสงอาทิตย์ที่วัดตามแนวนอน (ศึกษาในสหรัฐอเมริกา) ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (2)

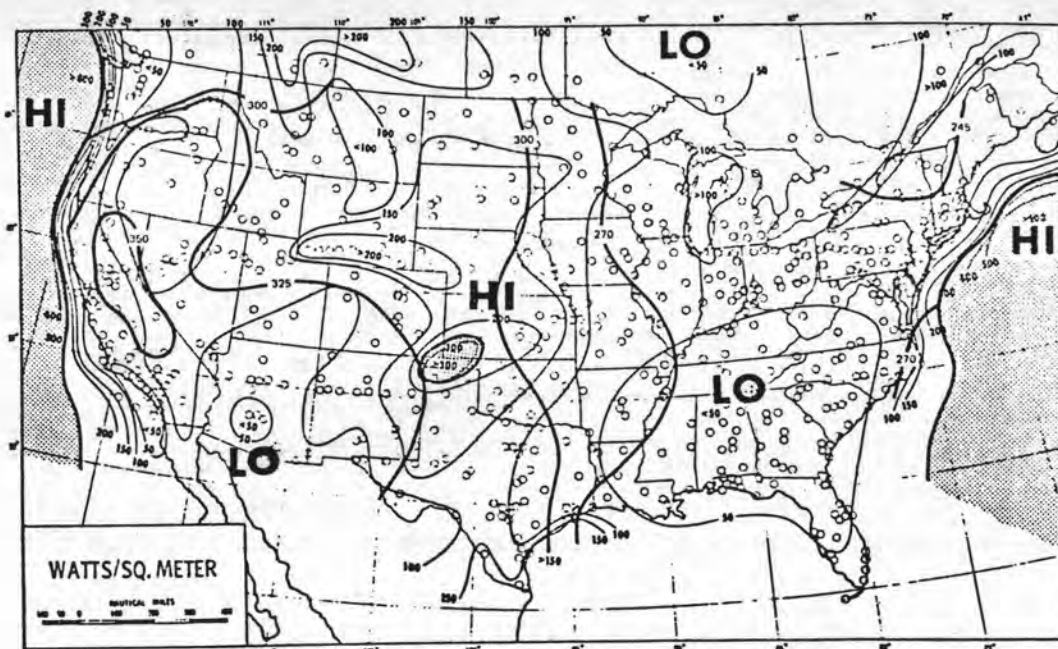


Available Wind Power, annual average ———
 Available solar power, annual average ———
 (horizontal plane)
 Areas in which wind power exceeds solar power [shaded area]

รูปที่ 2.24 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของกำลังลมและกำลังจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar power)

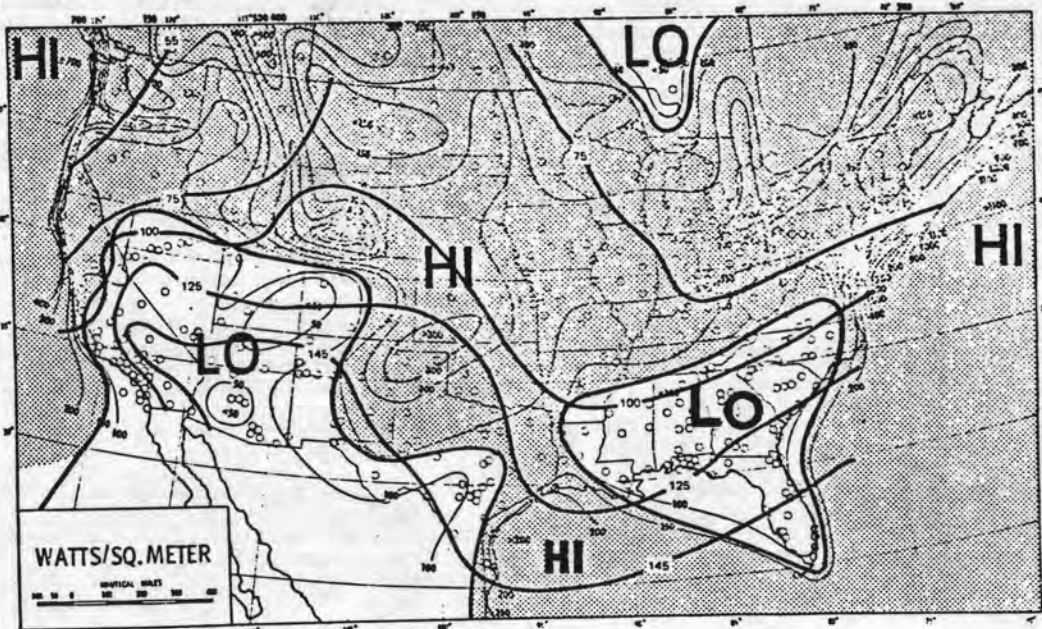
สาเหตุเพราะว่า รูปร่างของโลก ส่วนใหญ่ผิวที่จะรับพลังค์ของแสงอาทิตย์ได้คือจะอยู่ที่ประมาณเส้นละติจูด (Latitude) 30 องศา ยิ่งกว่านี้พลังงานจากแสงอาทิตย์ก็ยังคงถูกดูดกลืน (Absorb) ในชั้นบรรยากาศ หรือถูกสะท้อนกลับออกไปสู่อวกาศภายนอก (Outer space) โดยกลุ่มหมอกที่ปกคลุมผิวโลกเอาไว้ หรืออาจจะสะท้อนตามพื้นที่ผิวโลก เช่น บริเวณมหาสมุทร (Ocean) ทะเล (Sea) เป็นต้น จากผลอันนี้เอง ทำให้ความหนาแน่นของกำลังจากแสงอาทิตย์ มีการ

เปลี่ยนแปลงไปตามฤดู (Season) ค้างแสดงในรูปที่ 2.25 และ 2.26



Available wind power, summer average ———
 Available solar power, July average (horizontal plane) ———
 Areas in which wind power exceeds solar power [shaded box]

รูปที่ 2.25 การเปรียบเทียบความหนาแน่นกำลังของลม และจากแสงอาทิตย์ในฤดูร้อน

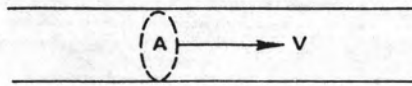


Available wind power, winter average ———
 Available solar power, January average (horizontal plane) ———
 Areas in which wind power exceeds solar power [shaded box]

รูปที่ 2.26 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของกำลังลมและแสงอาทิตย์ในฤดูหนาว

2.4 ลักษณะของลม (Wind characteristics)

กำลังของกระแสลมที่ไหลอิสระซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้นั้น เราอาจพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.27 ข้างล่างนี้



รูปที่ 2.27 ลำของกระแสลม

เมื่อกำหนดให้	A เป็นพื้นที่หน้าตัดของกระแสลม
	V เป็นความเร็วของกระแสลม
	ρ เป็นความหนาแน่นของมวลอากาศ
และ	P เป็นกำลังของกระแสลมที่จะนำมาใช้ประโยชน์

ดังนั้นจาก

กำลัง (Power) = (อัตราการไหลของปริมาตรอากาศ) \times (พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของอากาศ)

$$P = (AV) \times \left(\rho \frac{V^2}{2} \right)$$

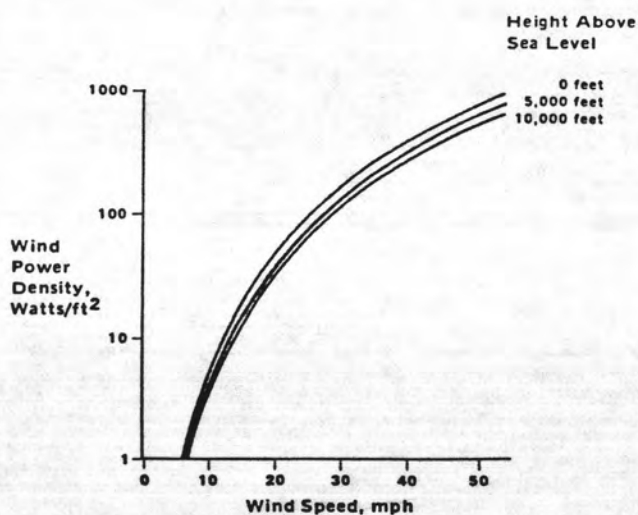
$$P = \frac{\rho AV^3}{2}$$

เพราะฉะนั้น

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3$$

จากผลดังกล่าวนี้ เมื่อพิจารณา ความหนาแน่นกำลังลมที่ระดับน้ำทะเล (Sea level) ซึ่งเพิ่มจาก 5 วัตต์ต่อตารางฟุต ที่ความเร็วลม 10 ไมล์ต่อชั่วโมง เป็น 140 วัตต์ต่อตารางฟุต

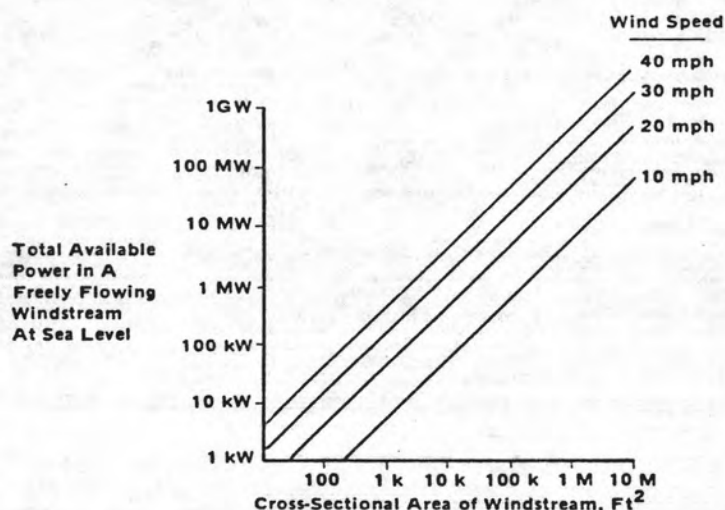
ที่ความเร็วลม 30 ไมล์ต่อชั่วโมง และ 650 วัตต์ต่อตารางฟุตที่ความเร็วลม 50 ไมล์ต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ทำให้ทราบความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นได้ชัดเจนขึ้นตามรูปกราฟข้างล่าง



รูปที่ 2.28 การเปลี่ยนความหนาแน่นกำลังเมื่อเทียบกับความเร็วลมและระยะความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (Altitude)

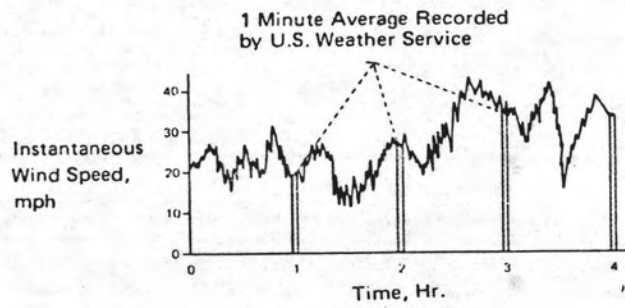
และพบว่าที่ระยะความสูงเหนือระดับน้ำทะเลมากขึ้น ความหนาแน่นอากาศจะน้อย ทำให้ความหนาแน่นของกำลังลดลง

ถ้าพิจารณากำลังลมที่นำมาใช้ประโยชน์จากกระแสลมที่พัดอิสระทั่วไป พบว่ากำลังเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่กระแสลมที่ไหลผ่านมากขึ้น ดังแสดงในรูป กราฟที่ 2.29 ตัวอย่างเช่น ที่ระดับน้ำทะเล ความเร็วลม 20 ไมล์ต่อชั่วโมง พื้นที่หน้าตัดของกระแสลม 100 ตารางฟุต จะให้กำลังลมประมาณ 4 กิโลวัตต์ และจะให้กำลังเป็น 40 เมกะวัตต์ ถ้าพื้นที่หน้าตัดของกระแสลมเป็นหนึ่งล้านตารางฟุต

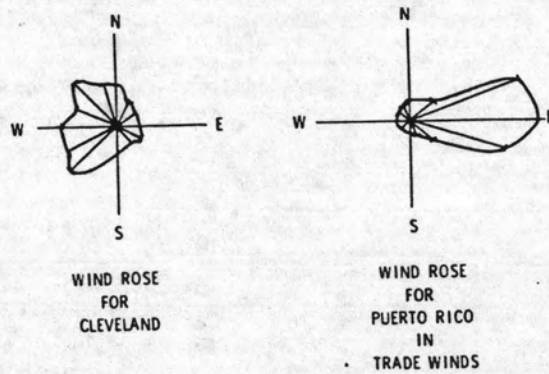


รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจากกระแสลม กับพื้นที่หน้าตัดของกระแสลม และความเร็วของลม

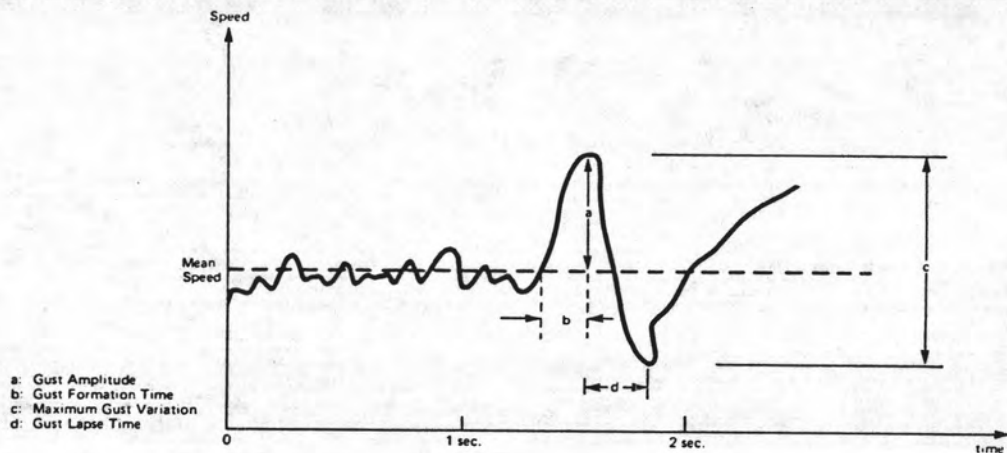
ลักษณะของลมโดยทั่วไป ตามพื้นที่ต่าง ๆ จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.30 มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางบ่อย ๆ ดังแสดงตามรูปที่ 2.31 และที่สำคัญบางครั้ง ความเร็วอาจมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ซึ่งเราเรียกว่า ภาวะการเปลี่ยนความเร็วอย่างกะทันหัน (gusting conditions) ดังรูปที่ 2.32 ความเร็วเฉลี่ยของลมตามปกติจะมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลในแต่ละปี อย่างเช่น พบว่าความเร็วเฉลี่ยของลมจะเพิ่มขึ้น ในฤดูหนาว 30 ถึง 35% มากกว่าในฤดูร้อน และความหนาแน่นของกำลังลมในฤดูหนาวจะมากกว่าในฤดูร้อน สองส่วนสามเท่า พื้นที่ที่มีลักษณะเช่นนี้ เช่น ตามแนวชายฝั่งแถบละติจูดตอนเหนือ (northern latitude) ตามพื้นที่ภูเขา และตามที่ราบสูงมาก ๆ (high great plain)



รูปที่ 2.30 ลักษณะของความเร็วที่บันทึกได้จากพื้นที่แห่งหนึ่ง

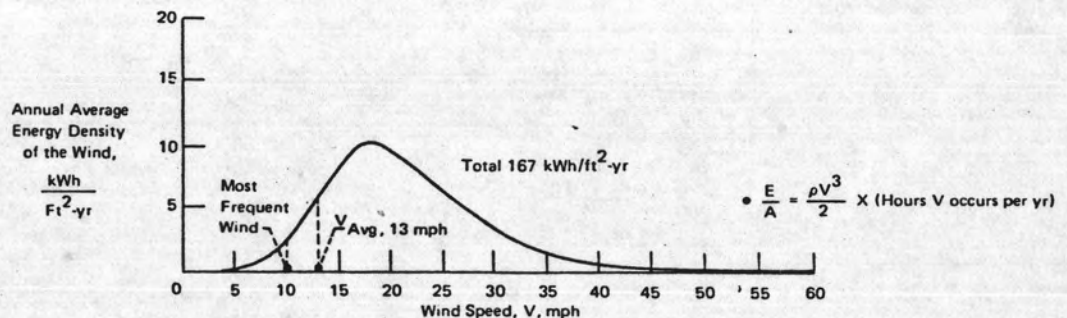


รูปที่ 2.31 แสดงการกระจายของลมที่พัดในแต่ละทิศจากจุด ๆ หนึ่ง

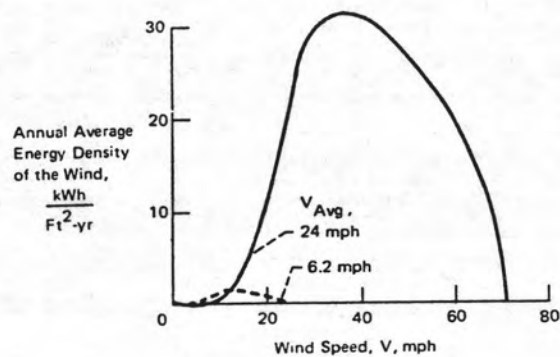


รูปที่ 2.32 ตัวอย่างแสดงกราฟการเปลี่ยนอัตราเร็วลมอย่างกระทันหัน (gusting)

รูปกราฟ รูปที่ 2.33 และ 2.34 ข้างล่างนี้ แสดงการกระจายของความหนาแน่นของพลังงานลมในรอบปีที่อัตราเร็วลมต่าง ๆ กันในพื้นที่ที่ศึกษา จะเห็นว่าพลังงานลมส่วนใหญ่ จะอยู่ในช่วงที่มีอัตราเร็วลมมากกว่าอัตราเร็วเฉลี่ย ดังในรูปที่ 2.33 แต่ถ้าพิจารณาพลังงานทั้งหมดของลมสำหรับทุก ๆ อัตราเร็ว แล้วจะพบว่าที่อัตราเร็วลมเฉลี่ยตามกราฟรูปแรกจะน้อยกว่าสามเท่า สำหรับอัตราเร็วลมที่มีค่าสูง ๆ ขึ้นไป

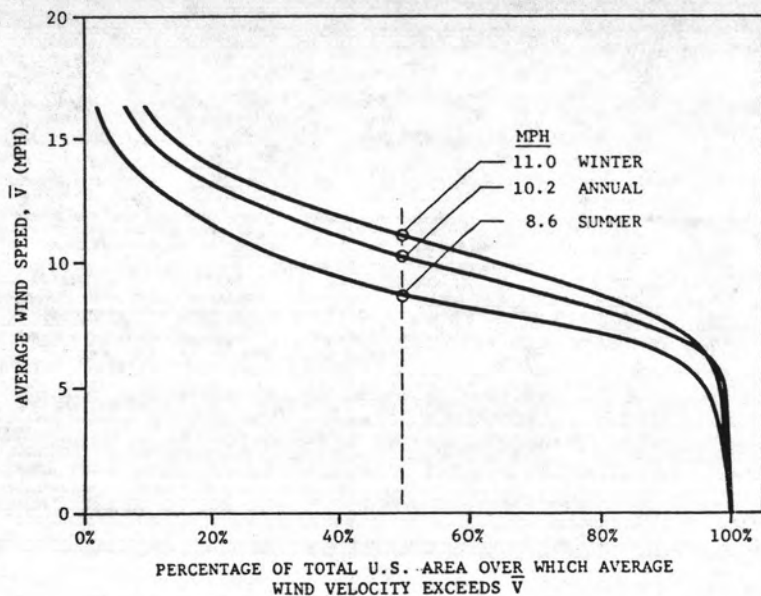


รูปที่ 2.33 ลักษณะการกระจายความหนาแน่นของพลังงานลมในรอบปี ที่อัตราเร็วลมต่าง ๆ

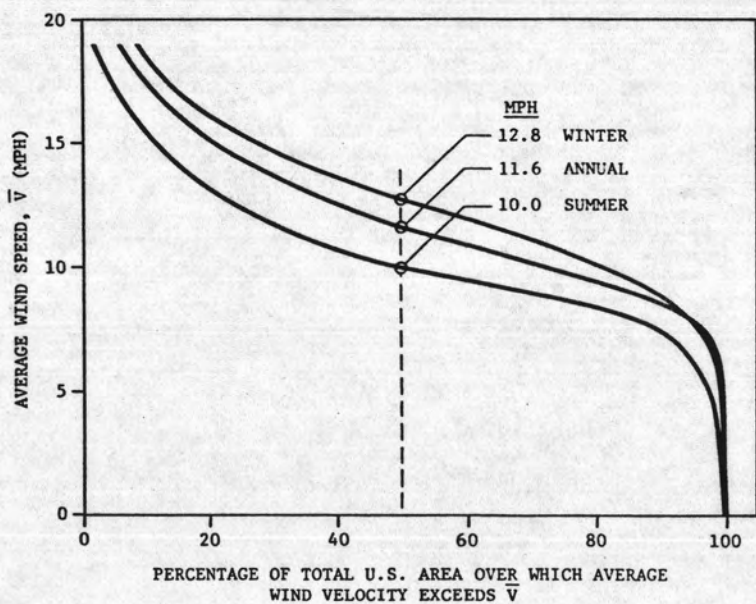


รูปที่ 2.34 ลักษณะการกระจายของความหนาแน่นพลังงานลมที่ค่าอัตราเร็วสูง ๆ

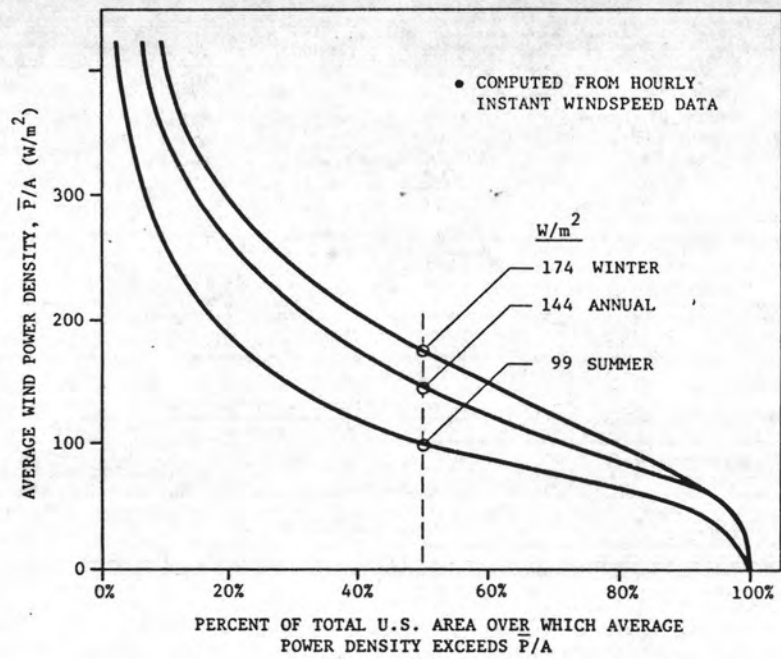
ลักษณะลมโดยทั่วไป ถ้าหากลองพิจารณาการกระจายของลมในเชิง ธรณีวิทยา แล้ว จะเห็นว่า ในพื้นที่บางส่วนอาจไม่มีลมพัดผ่าน แต่พื้นที่บางส่วน เช่น แถบชายฝั่งทางเหนือของโลก แถบภูเขาและแถบที่ราบสูง บริเวณเหล่านี้ จะมีลมพัดผ่านอยู่เสมอ เช่น จากข้อมูลที่ยกได้ โดยเปรียบเทียบอัตราเร็วลมที่ระยะความสูงต่าง ๆ พบว่า เฉลี่ยอัตราเร็วลม 20 ถึง 25 ไมล์ต่อชั่วโมง จะอยู่ที่ระยะความสูง 20 เมตรจากระดับพื้น (ground level) และ 28 ถึง 35 ไมล์ ต่อชั่วโมง จะอยู่ที่ระดับความสูง 40 เมตร และต่อไปนี้เป็นกราฟที่แสดงการกระจายของอัตราเร็วลม และความหนาแน่นของกำลังลมบนพื้นที่ทั้งหมดใน 50 รัฐของอเมริกา ซึ่งจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันในแต่ละฤดู ดังแสดงในกราฟรูปที่ 2.35 2.36 2.37 และ 2.38



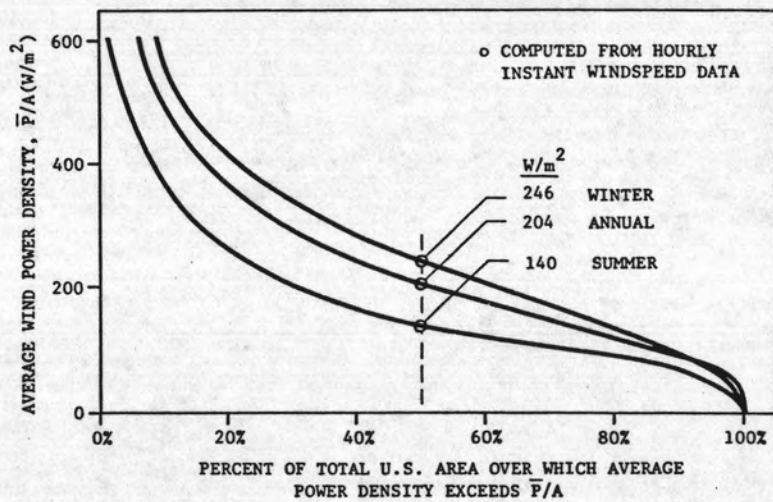
รูปที่ 2.35 การกระจายของอัตราเร็วลมเฉลี่ยในเชิงธรณีวิทยาที่ระดับความสูง 20 เมตร จากพื้น



รูปที่ 2.36 การกระจายของอัตราเร็วลมเฉลี่ยในเชิงธรณีวิทยาที่ระดับความสูง 40 เมตร จากพื้น



รูปที่ 2.37 การกระจายของความหนาแน่นของกำลังลมในเชิงธรณีวิทยาที่ระดับความสูง 20 เมตร จากพื้น

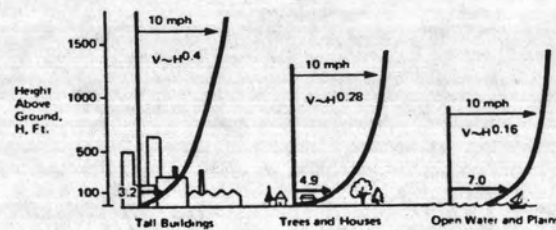


รูปที่ 2.38 การกระจายของความหนาแน่นของกำลังลมในเชิงธรณีวิทยาที่ระดับความสูง 40 เมตร จากพื้น

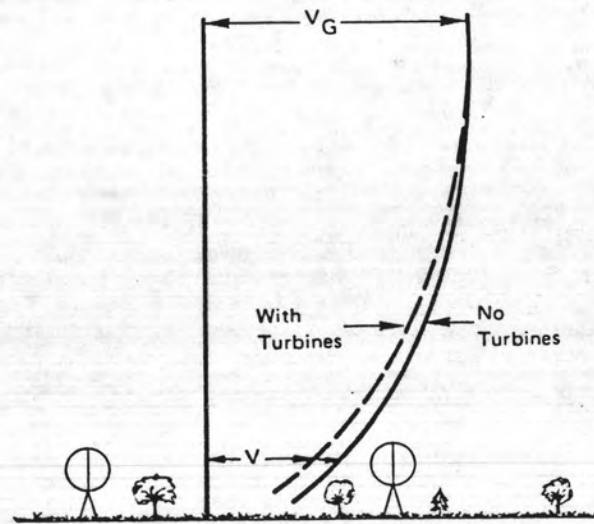
2.5 การเลือกทำเลที่จะติดตั้งเครื่องกลที่ต้องอาศัยลมในการทำงาน

การเลือกทำเลเพื่อติดตั้งเครื่องมือที่อาศัยลมทำงานนี้ นับว่ามีความสำคัญไม่น้อย เพราะถ้าเลือกที่ติดตั้งไม่เหมาะสมแล้ว จะทำให้การทำงานของเครื่องมือไม่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

เด็่มที่ องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องมือก็คือ แรงเฉือน (Shear force) การอัด (Compression) ของลม ซึ่งจะเกิดเมื่อกระแสลมพัดผ่านส่วนที่เป็นเนิน หรือส่วนที่เป็นพื้นผิวหยาบ (Rough surface) ของผิวโลก แรงเฉือนจะมีผลทำให้อัตราเร็วของลมต่ำลงเมื่อพัดใกล้ผิวโลก แต่ถ้าพัดที่ตำแหน่งสูงเพียงพอก็จะมีผล นอกจากนั้นตึกอาคาร ต้นไม้และสิ่งกีดขวางอื่น ๆ ก็มีผลเช่นกัน พบว่าถ้าลมพัดในบริเวณใกล้ผิวโลก เช่น บริเวณเหนือผิวน้ำที่เปิดกว้าง (Open water) หรือ บนพื้นราบ (Flat plain) อัตราเร็วของลมจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.39 และ 2.40

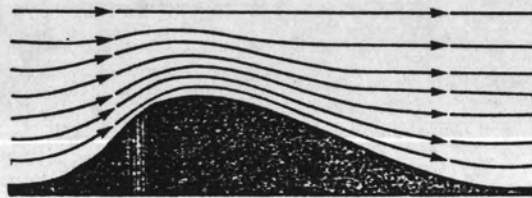


รูปที่ 2.39 แสดงการกระจายของอัตราเร็วลมตามแนวตั้ง เทียบกับความหยาบของผิวพื้น บนผิวโลก

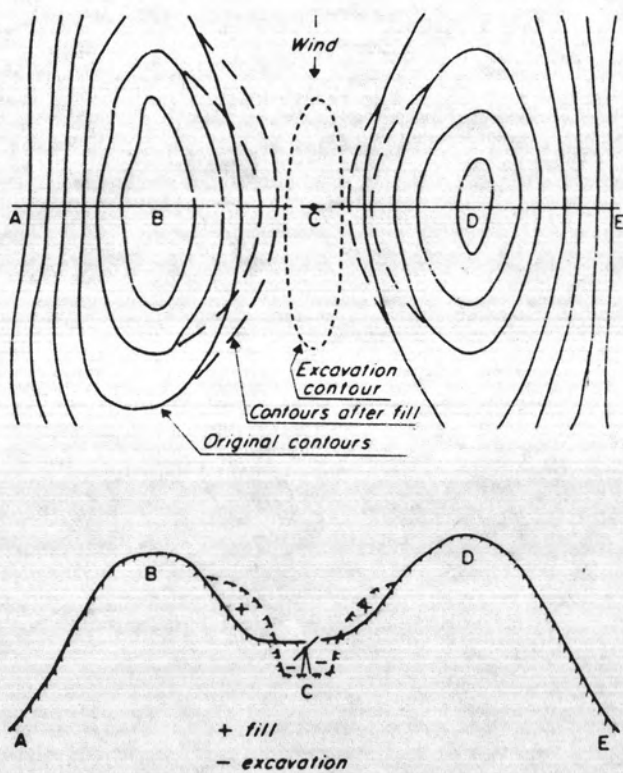


รูปที่ 2.40 ผลจากการขวางทางลมของตัวกังหันที่ความสูงต่าง ๆ

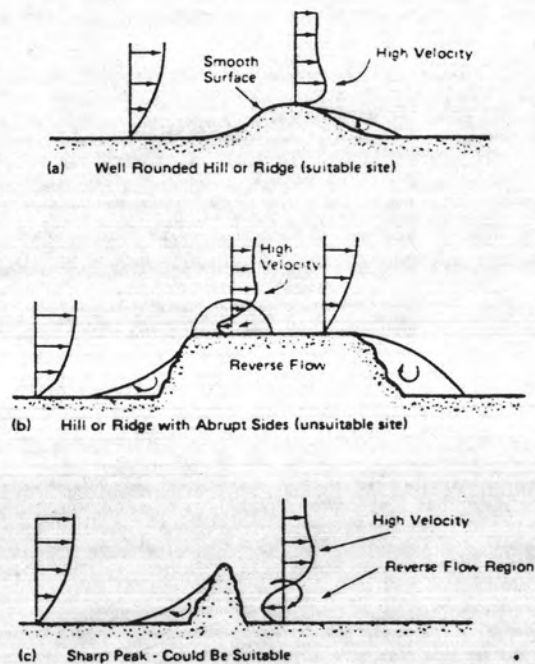
สิ่งสำคัญอีกอย่างที่มีผลต่ออัตราเร็วลมก็คือ ภูเขา (hill) ถ้ากระแสลมไหลผ่านภูเขา จะทำให้เกิดการอัดในช่วงที่ปะทะกับตีนเขาด้านล่าง และจะไหลอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านด้านบนของภูเขา นอกจากนี้บริเวณส่วนช่องแคบระหว่างหุบเขาก็คือเป็นจุดหนึ่งที่มีอัตราเร็วลมสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.41, 2.42 และ 2.43 ถ้าติดตั้งอุปกรณ์เกี่ยวกับลมที่บริเวณดังกล่าวนี้ ก็จะทำให้เครื่องมือทำงานได้อย่างเต็มที่และได้รับประโยชน์สูง



รูปที่ 2.41 การไหลของลมผ่านภูเขา จะมีอัตราเร็วสูงตรงส่วนบน



รูปที่ 2.42 ภาพแสดงการไหลของลมระหว่างหุบเขา แสดงให้เห็นส่วนข้าง
และด้านบน



รูปที่ 2.43 การเลือกจุดที่เหมาะสมในการติดตั้งเครื่องมือเกี่ยวกับลม

ข้อสรุปจากตารางข้างล่างนี้ แสดงให้เห็นถึงวิธีการเลือกทำเลที่เหมาะสมในการใช้เป็นที่ติดตั้งเครื่องมือที่อาศัยลมในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

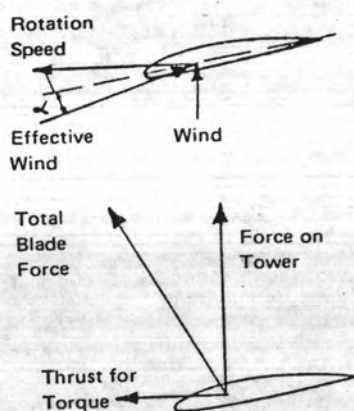
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงลักษณะทำเลที่เหมาะสม

ลักษณะของทำเลที่เหมาะสม

1. มีการไหลของอัตราเร็วลมเฉลี่ยสูงในรอบปี
2. ไม่มีสิ่งกีดขวางทางลม ที่สร้างขึ้นมาในลักษณะที่มีความสูงมากเกินไป
3. ตามยอดภูเขาที่ราบเรียบ ตามพื้นราบและตามเกาะในมหาสมุทร หรือทะเล
4. บริเวณที่ราบเปิดกว้าง หรือตามชายฝั่งที่เปิดกว้าง
5. ตามแนวระหว่างช่องเขา

2.6 กำลังที่สกัดได้จากกระแสลม (Power extraction from a windstream)

กระแสลมที่ไหลพัดผ่านนี้เราสามารถจะสกัดเอากำลังมาใช้ประโยชน์ได้ เพียงแต่ต้องมีเครื่องมือไปดักเอาพลังงานเหล่านี้มา เครื่องมือนั้นคือ เครื่องมือดักพลังงานที่เรียกว่า ตัวกังหันลม (Wind turbine) ดังในรูปที่ 2.44

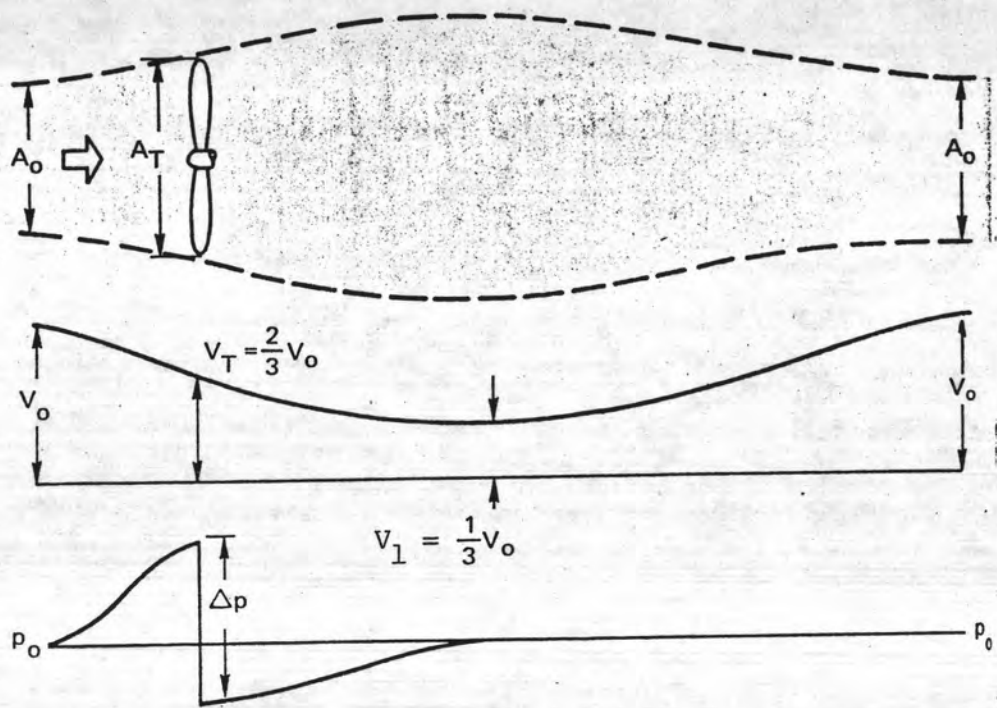


รูปที่ 2.44 ความสัมพันธ์ของแรงที่กระทำบนใบกังหัน

กำลัง (P) ที่ใบกังหันสกัดจากกระแสลมได้ มีค่าเท่ากับอัตราการไหลของปริมาตรอากาศ (ลบ) ที่ใบกังหันรับได้ ($V_T A_T$) คูณกับผลบวกของพลังงาน เนื่องจากความดันที่เปลี่ยนแปลง (ΔP) และพลังงานจลน์ที่เปลี่ยนแปลง (Δq) ของหนึ่งหน่วยปริมาตรอากาศ (unit volume of air) ที่ไหลผ่านใบกังหัน ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$P = V_T A_T (\Delta P + \Delta q) \quad (2.1)$$

โดยที่ A_T คือ พื้นที่ล้ากระแสลมที่ใบกังหันรับได้ ดังในรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.45 ภาพแสดงการไหลของลม อัตราเร็วและความดันของลมขณะใบกังหันทำงาน

สำหรับขณะที่ใบกังหันกำลังทำงานโดยมีกระแสลมไหลลงที่อย่างสม่ำเสมอและความเร็วตอนเริ่มต้นเท่ากับ V_0 พบว่า ความเร็วของหนึ่งหน่วยปริมาตรอากาศจะลดลง เมื่อเข้าไปใกล้ใบกังหัน ดังรูปที่ 2.45 เมื่อผ่านใบกังหันออกไปแล้ว ปริมาตรอากาศส่วนนี้ก็รับพลังงานจลน์จากสิ่งแวดล้อม (Surrounding) ภายนอกอีก ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นจนทำให้ความเร็วมีค่าเท่ากับความเร็วตอนเริ่มเข้าสู่ใบกังหันอีก ส่วนการเปลี่ยนแปลงความดันและพลังงานจลน์ของหนึ่งหน่วยปริมาตรอากาศพบว่าขณะที่ปริมาตรอากาศเข้าไปใกล้ใบกังหัน จะทำให้ความดันเพิ่มขึ้น ส่วนพลังงานจลน์จะลดลง ดังรูปที่ 2.45 และความดันจะมากที่สุดเมื่อปริมาตรอากาศปะทะกับใบกังหัน ตอนลมอากาศผ่านใบกังหัน ความดันจะลดต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เมื่อปริมาตรอากาศค่อย ๆ ห่างจากใบกังหันออกไป พบว่าความดันก็จะค่อย ๆ สูงขึ้นจนมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure) ส่วนพลังงานจลน์ขณะที่ผ่านใบกังหันนั้น จะค่อย ๆ ลดลง จนความดันมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ และพลังงานจลน์ จะเพิ่มขึ้นอีกเนื่องจากได้รับพลังงานจลน์จากสิ่งแวดล้อม และจะเพิ่มจนกระทั่ง มีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ของสิ่งแวดล้อม จึงจะหยุดการเพิ่ม

การคำนวณหาค่ากำลังมากที่สุดที่จะสกัดได้จากกระแสลมที่ผ่านใบกังหันนั้น อาจกระทำได้
โดยการใช้ทฤษฎี โมเมนตัม (Momentum Theory) (7) วิเคราะห์ จากรูปที่ 2.45

ให้	V_0	เป็นความเร็วลมที่พัดเข้ามาทางจากใบกังหัน
	V_T	เป็นความเร็วลมที่ดึงผ่านใบกังหัน
	V_1	เป็นความเร็วลมที่พัดออกทางจากใบกังหันออกไป
	Q	เป็นอัตราการเคลื่อนที่ของมวลอากาศที่ผ่านเข้ามา
และ	ρ	เป็นความหนาแน่นของอากาศ

ดังนั้น
$$V_T = V_0 - V_1$$

อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมของอากาศ $= Q(V_0 - V_1)$

หรือ แรงกระทำต่อใบกังหัน $= Q(V_0 - V_1)$

จากสมการ กำลัง $=$ แรง \times ความเร็ว

เพราะฉะนั้น กำลังงานที่ใบกังหันได้รับจากลม $= Q(V_0 - V_1)V_T$ (2.2)

จากสมการ (2.1) อัตราการเปลี่ยนกำลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ของอากาศ $= \Delta p + \Delta q$

หรือ $= \frac{1}{2}QV_0^2 - \frac{1}{2}QV_1^2$ (2.3)

จากหลังการคงที่ของพลังงาน จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q(V_0 - V_1)V_T &= \frac{1}{2}QV_0^2 - \frac{1}{2}QV_1^2 \\ &= \frac{1}{2}Q(V_0^2 - V_1^2) \\ &= \frac{1}{2}Q(V_0 - V_1)(V_0 + V_1) \end{aligned}$$

จะได้ $V_T = \frac{V_0 + V_1}{2}$ (2.4)

จากสมการ (2.2) และ (2.4) จะได้ว่า

$$P = Q(V_0 - V_1) \frac{(V_0 + V_1)}{2}$$

แต่ $Q = \rho A_T V_T$

$$= \rho A_T \frac{(V_0 + V_1)}{2}$$

ดังนั้น

$$P = \rho A_T \frac{(V_0 + V_1)(V_0 - V_2)(V_0 + V_1)}{2}$$

$$P = \frac{1}{4} \rho A_T (V_0 - V_1)(V_0 + V_1)^2 \quad (2.5)$$

กำลังงานที่ได้รับจากลมจะขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่พัดออกไปจากตัวใบกังหันซึ่งก็คือ ความเร็ว V_1 ดังนั้นเมื่อพิจารณาในกรณีที่กำลังงานนี้มีค่ามากที่สุด ก็ต่อเมื่อ เป็นไปตามเงื่อนไข

$$\frac{\partial P}{\partial V_1} = 0$$

จากสมการ (2.5) จะได้ว่า

$$3V_1^2 + 2V_0V_1 - V_0^2 = 0$$

ดังนั้น

$$V_1 = \frac{1}{3} V_0 \quad (2.6)$$

แทนสมการ (2.6) ใน (2.5) จะได้ว่า

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \rho A_T \left(\frac{2}{3}V_0\right) \left(\frac{4}{3}V_0\right)^2$$

$$= \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A_T V_0^3\right) \quad (2.7)$$

ปริมาณ $\frac{1}{2} \rho V_0^3$ = ความหนาแน่นของกำลังลมต่อหนึ่งหน่วย ปริมาตรของอากาศที่ล้อมรอบ

ตัวประกอบ $\frac{16}{27}$ หรือเท่ากับ 0.593 เป็นค่าที่มีชื่อว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของเบตซ์ (Betz coefficient) ซึ่งเป็นชื่อที่ตั้งขึ้นมาเพื่อให้เกียรติแก่เบตซ์ที่ได้ศึกษาและคำนวณค่าที่ได้นี้เป็นคนแรก

ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลัง C_p (Power coefficient)

การหาค่าสัมประสิทธิ์ของกำลัง C_p ของตัวกังหัน ถูกนิยามในรูปของอัตราส่วนระหว่าง กำลังที่กังหันส่งให้กับกำลังทั้งหมด ที่ได้จากกระแสลมที่ให้แก่กังหัน ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์ของกำลัง } C_p = \frac{\text{กำลังที่กังหันส่งให้}}{\text{กำลังทั้งหมด จากกระแสลม}}$$

ในเชิงทฤษฎี สามารถคำนวณหาค่า C_p ของกังหันลมได้ จากสมการ (2.7) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{0.593(\frac{1}{2} \rho A_T V^3)}{\frac{1}{2} \rho A_T V^3} \\ &= 0.593 \end{aligned}$$

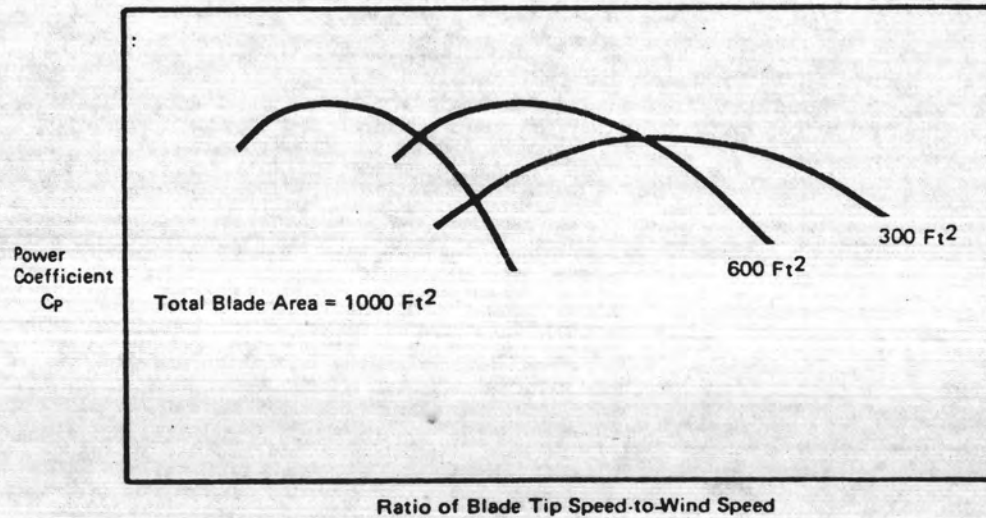
แต่ค่า C_p ที่คำนวณได้นี้เป็นค่าในเชิงทฤษฎี ในทางปฏิบัติแล้ว กังหันลมโดยทั่วไป จะสามารถรับกำลังลมออกมาได้น้อยกว่านี้

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของใบกังหัน กับอัตราการไหลของกระแสลมที่พัดผ่าน และค่าสัมประสิทธิ์ของกำลัง (C_p) จะให้ผลดังตารางที่ 2.3 ข้างล่างนี้

ตารางที่ 2.3 สัมประสิทธิ์ของกำลังในอุดมคติสำหรับใบกังหันพื้นที่ต่าง ๆ

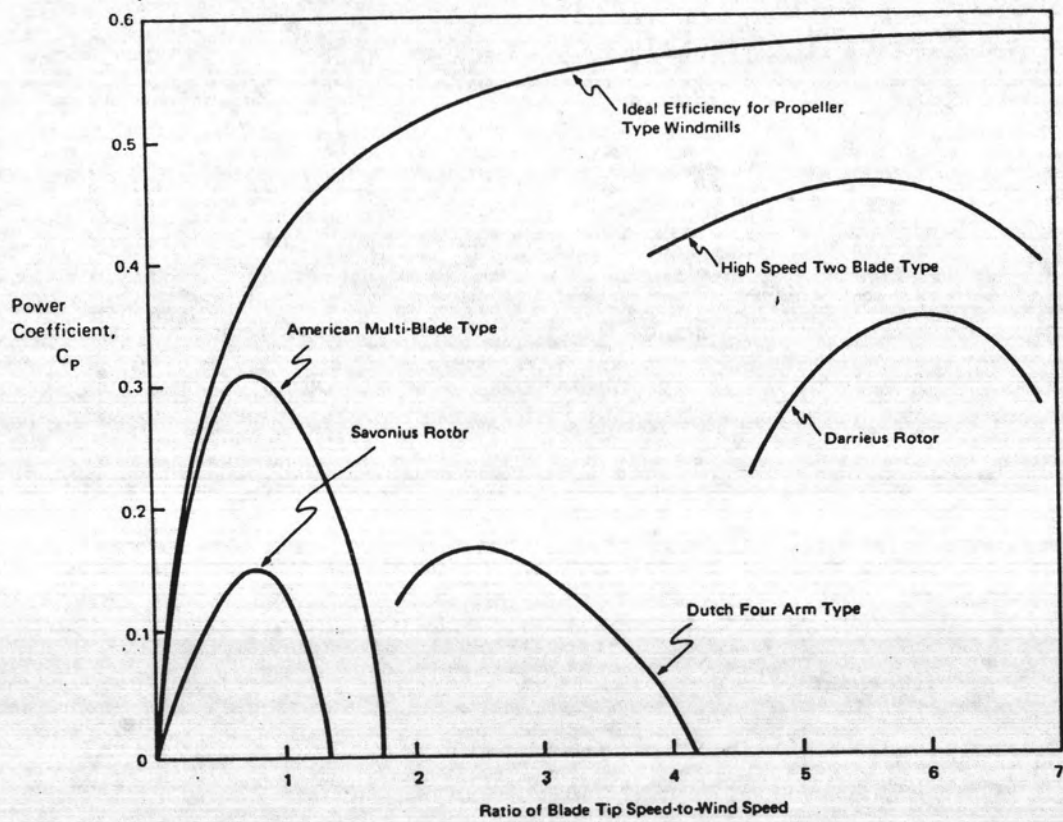
Turbine Blade Area	Flow Rate	Pressure Drop at Turbine	Power Delivered	C_p
Small	High	Small	Low	<0.59
Large	Low	Large	Low	<0.59
Optimum	Optimum	Optimum	Optimum	0.59

เมื่อพิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลัง C_p กับอัตราเร็วของการหมุนที่พื้นที่ของใบกังหันต่าง ๆ กัน จะให้ผลดังกราฟรูปที่ 2.47 ข้างล่าง



รูปที่ 2.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังกับอัตราเร็วของการหมุนและพื้นที่ของใบกังหัน

ลักษณะการทำงานของกังหันลมแบบต่าง ๆ โดยทั่วไปอาจเปรียบเทียบจากกราฟรูปที่ 2.48 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังจากใบกังหันที่ค่าต่าง ๆ ของอัตราส่วนระหว่างอัตราเร็วปลายใบกับอัตราเร็วลม จะเห็นว่า ที่ค่าสูงสุดของ C_p คือ 0.59 ค่าอัตราส่วนของอัตราเร็วปลายใบ กับอัตราเร็วลม จะอยู่ที่ประมาณค่า 5 หรือ 6



รูปที่ 2.47 แสดงกราฟการทำงานของกังหันลมแบบต่าง ๆ