

บทที่ 2



ทฤษฎีและการออกแบบ

2.1 บทนำ

กังหันลมคือเครื่องมือที่ใช้เปลี่ยนพลังงานลมซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ มาเป็นพลังงานกลเพื่อวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการคือ การสูบน้ำ และการผลิตไฟฟ้า กังหันลมอาจถูกแบ่งประเภทของการจำแนกลักษณะ เป็น

2.1.1 จำแนกตามขนาดกำลังงานที่ได้

2.1.2 จำแนกตามแนวแกนหมุน

2.1.3 จำแนกตามลักษณะของแรงขับที่กระทำต่อใบพัด

2.1.1 จำแนกตามขนาดกำลังงานที่ได้ แบ่งได้ 3 ขนาดคือ

- ขนาดเล็ก ส่วนมากใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า หรือใช้ในการสูบน้ำวัดกำลังงานไม่เกิน 1 กิโลวัตต์
- ขนาดกลาง ถ้าใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ให้ค่ากำลังงานระหว่าง 1-100 กิโลวัตต์
- ขนาดใหญ่ ถ้าใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า จะให้ค่ากำลังงานเกิน 100 กิโลวัตต์ขึ้นไป

2.1.2 จำแนกตามแนวแกนหมุน แบ่งได้ 2 แบบคือ

- แบบแกนนอน แกนของกังหันลมวางอยู่ในแนวขนานกับพื้นโลก หรือแนวเดียวกับกระแสลม กังหันชนิดนี้อาจประกอบด้วยใบพัดต่างๆ จำนวนคือ
- แบบ 2 ใบพัด จะให้ความเร็วรอบใบพัดสูง สามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังค่อนข้างสูงกว่าแบบอื่นๆ คืออาจมีค่าสูงถึง 42 % แต่มีปัญหาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนทั้งของตัวกังหัน

ลมเองและของตัวกังหันลมเมื่อไปสัมพันธ์กับตัวหอกังหัน

ทำให้การปรับสมดุลทำได้ยากพอสมควร

- แบบ 3 ใบพัด จะมีความเร็วรอบใบพัดปานกลางถึงค่อนข้างสูง ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังประมาณ 30 % และมีปัญหาการสั่นสะเทือนน้อยกว่าแบบ 2 ใบ
- แบบหลายใบ (Multi-blade) จะให้แรงบิดเริ่มต้นสูงทำงานได้ในที่ความเร็วลมต่ำ แต่มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังต่ำประมาณ 15-28 %
- แบบแกนตั้ง แกนของกังหันจะตั้งฉากกับผิวโลก หรือตั้งฉากกับทิศทางลม ทำให้รับลมได้ทุกทิศทาง สำหรับกังหันลมแบบแกนตั้งแบบที่นิยมใช้จกามี
 - แบบดาร์เรี่ยล (Darrius) ใบกังหันมีลักษณะคล้ายเครื่องตีไข่ มีความเร็วรอบสูง ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงพอๆ กับแบบ 3 ใบพัด โดยมากใช้ในการผลิตไฟฟ้า
 - แบบซาโวเนียล (Savonius) มีลักษณะคล้ายถังทรงกระบอกผ่าครึ่ง แล้วนำมาติดบนเพลลา มีความเร็วรอบต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังต่ำประมาณ 15 % โดยมากใช้ในการสูบน้ำเพราะให้ค่าแรงบิดเริ่มต้นสูง

2.1.3 จำแนกตามลักษณะของแรงขับที่กระทำต่อใบพัด กล่าวคือแรงขับที่กระทำบนใบพัดเป็นแรงยก (Lift force) เช่น กังหันลมแบบพริบเพลเลอร์ หรือแบบดาร์เรี่ยล และแรงขับที่กระทำบนใบพัดเป็นแรงต้านหรือแรงหน่วง เช่น กังหันลมซาโวเนียล เป็นต้น

การจำแนกในข้อที่ 2.1.2 เป็นวิธีที่เด่นชัดที่สุด สามารถเข้าใจได้ง่าย จึงนิยมมากกว่าแบบข้อ 2.1.3 ซึ่งต้องพิจารณาโดยใช้ความรู้ทางด้านอากาศพลศาสตร์ประกอบด้วย

2.2 พลังงานที่ได้จากกระแสลม (1)

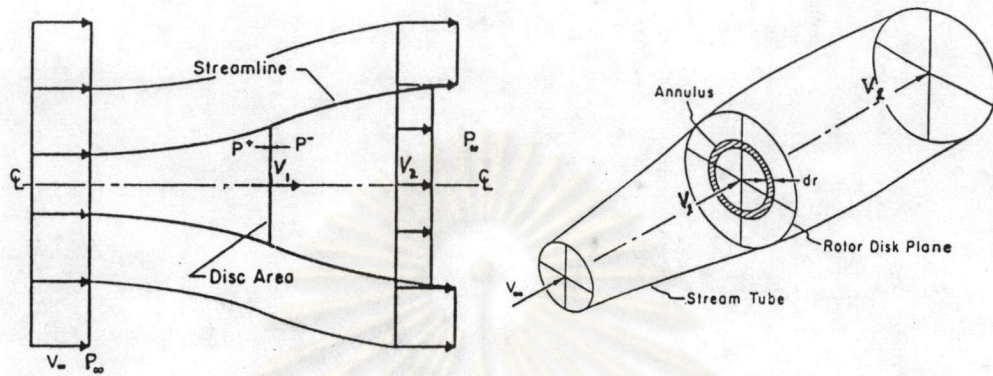
ในการพิจารณาพลังงานที่กังหันลมได้รับจากกระแสลมในเชิงคณิตศาสตร์ สามารถอธิบายพลังงานที่มีอยู่ในลมโดยการเขียนออกมาในรูปของพลังงานจลน์ $\frac{1}{2} \rho V^2$ ได้ เมื่อกำหนดให้ ρ คือความหนาแน่นของอากาศ V_∞ เป็นอัตราเร็วของกระแสลม และอัตราของพลังงานที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด A ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสลมจะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3$ หรือ $\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3$ ในทางอุดมคติแล้ว กังหันลมสามารถดึงเอากำลัง (Power) ออกจากกระแสลมได้มากที่สุดเพียง $\frac{16}{27}$ ของอัตราพลังงานที่มีอยู่ ($\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3$) แต่ในทางปฏิบัติเราจะสามารถดึงเอากำลังออกไปใช้ได้มากที่สุดประมาณ $\frac{5}{27} \rho A V_\infty^3$ เท่านั้น ส่วนที่สูญเสียไปนั้นเกิดจากการสูญเสียทางอากาศพลศาสตร์ และการสูญเสียในเชิงประสิทธิภาพทางกลและทางไฟฟ้าของระบบด้วย

ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน

ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน เป็นทฤษฎีเบื้องต้นที่สุดที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมในแนวการไหลของลำอากาศที่พัดผ่านตัวกังหัน ทฤษฎีนี้ได้ถูกพัฒนามาจากทฤษฎี Actuator disk ของเฮลิคอปเตอร์ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นโดย Rankine และ Froude และต่อมาได้ถูกพัฒนาเพิ่มเติมโดย Bilau (1925) Betz (1927) และ Gtuert ในปี ค.ศ. 1935 โดยการอธิบายทฤษฎีโมเมนตัม คัดการไหลของลำอากาศในทิศทางมิติเดียวและมีสมมติฐานที่ว่า

- เป็นการเคลื่อนที่ของลำอากาศที่ยุบตัวไม่ได้
- ไม่มีความหนืดหรือความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของลำอากาศ
- การเคลื่อนที่ของลำอากาศนี้ไม่มีการหมุนวน

รูปที่ 2-1 แสดงถึงการไหลของลำอากาศผ่านตัวกังหันลมซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดรับลม A เมื่อลมพัดเข้าหาโรเตอร์ของกังหันลมด้วยความเร็วต้นทาง V_∞ จะถูกชะลอให้ช้าลงเป็นความเร็ว V_1 ที่หน้าโรเตอร์ และ V_2 ที่ปลายทาง ในขณะที่เดียวกันที่ความดันหน้าโรเตอร์เท่ากับ P^+ และด้านหลังโรเตอร์เป็น P^-



รูปที่ 2-1 Stream tube ของกังหันลม

จากรูปข้างต้น สามารถแสดงค่าแรงกระทำตามแนวแกน (thrust) จาก
สมการโมเมนตัมได้ดังนี้คือ

$$T = \rho A V_1 (V_\infty - V_2) \quad (2-1)$$

ค่าแรงกระทำตามแนวแกนจากผลต่างของความดันเป็น

$$T = A (P^+ - P^-) \quad (2-2)$$

จากสมการเบอร์นูลี

$$\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 + P_\infty = \frac{1}{2} \rho V_1^2 + P^+ \quad (2-3)$$

$$\frac{1}{2} \rho V_2^2 + P_\infty = \frac{1}{2} \rho V_1^2 + P^- \quad (2-4)$$

จากสมการ (2-1) (2-2) (2-3) และ (2-4)

$$V_1 = \frac{V_\infty + V_2}{2} \quad (2-5)$$

ถ้ากำหนดให้ $V_1 = V_\infty(1-a)$ โดย $a =$ axial induction factor
แล้วความเร็วของลำอากาศด้านหลัง (wake) จะมีค่าเท่ากับ

$$V_2 = V_\infty(1-2a) \quad \text{-----} \quad (2-6)$$

เมื่อแทนค่า V_1 และ V_2 กลับไปในสมการ (2-1) แรงกระทำตามแนวแกน
ที่เกิดขึ้นบนลำอากาศซึ่งอยู่ในลักษณะวงแหวนกว้าง dr ที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับ

$$dT = \rho(2\pi r dr) V_\infty (1-a) (2aV_\infty) \quad \text{-----} \quad (2-7)$$

เมื่อ

$$2\pi r dr = \text{พื้นที่วงแหวนของลำอากาศที่โรเตอร์ของกังหันลม}$$

เราสามารถคำนวณหาค่ากำลัง (power) ได้จากผลคูณของแรง (thrust)

กับความเร็วลมที่โรเตอร์ V_1 หรืออาจคำนวณได้จากอัตราของพลังงานจลน์

$$\rho AV_1 \left(\frac{V_\infty^2}{2} - \frac{V_2^2}{2} \right)$$

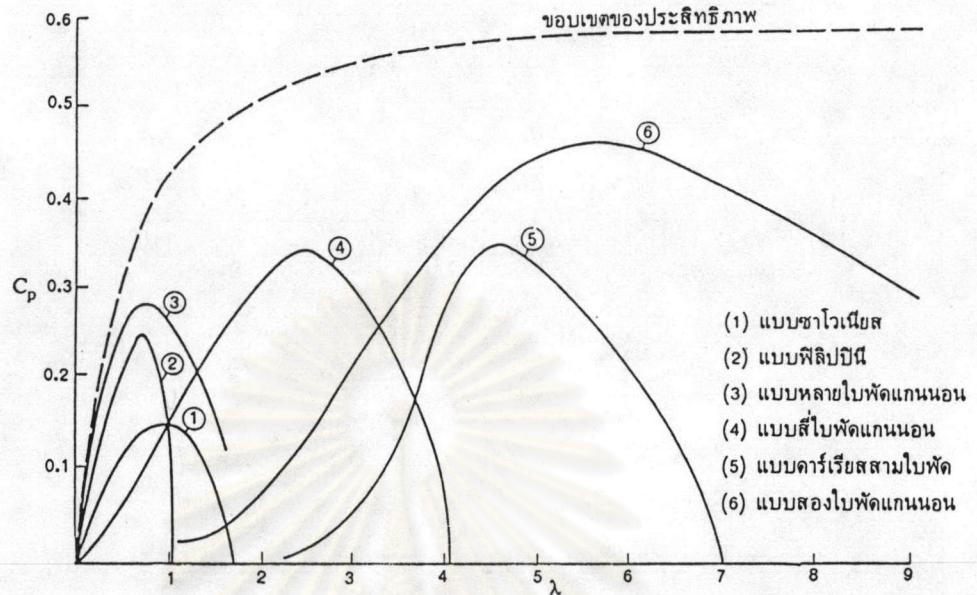
จากค่าของ V_1 และ V_2 ในสมการ (2-5) และ (2-6) ค่าของกำลัง
สามารถแสดงเป็น

$$\text{Power} = \frac{1}{2} \rho AV_\infty^3 4a (1-a)^2 \quad \text{-----} \quad (2-8)$$

กำลังในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังจะมีค่า

$$C_p = \frac{\text{Power}}{\frac{1}{2} \rho AV_\infty^3} = 4a(1-a)^2 \quad \text{-----} \quad (2-9)$$

จากสมการ (2-9) จะสามารถหาค่า C_p ที่มีค่าสูงสุดได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{16}{27}$
หรือ 0.593 เมื่อ $a = \frac{1}{3}$ ซึ่งค่า $C_{p \max}$ นี้ก็คือขอบเขตของ Betz นั้นเอง



รูปที่ 2-2 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์กำลังและอัตราส่วนความเร็วปลายใบ

รูปที่ 2-2 จะแสดงถึงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) และอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ หรือ TSR) ของกังหันลมประเภทต่างๆ โดยที่ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบจะสามารถเขียนได้เป็น

$$\lambda = \frac{\Omega r}{V_\infty} \quad \text{-----} \quad (2-10)$$

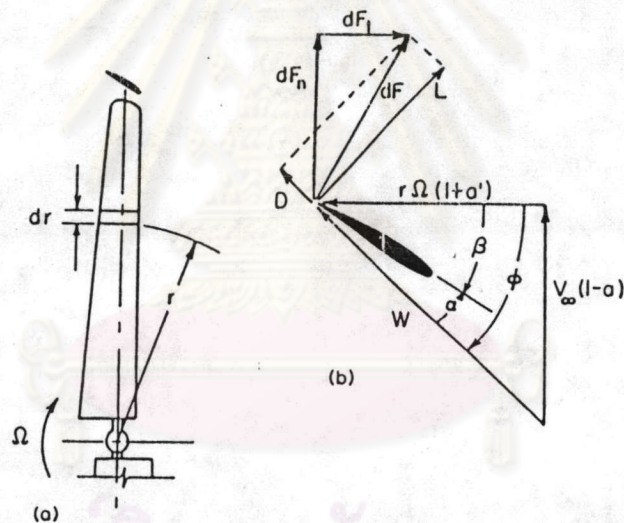
เมื่อ Ω คือความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์กังหันลม และ r คือระยะปลายรัศมีใบพัด V_∞ เป็นความเร็วลม กังหันลมแต่ละชนิดจะทำงานได้ประสิทธิภาพดีที่ช่วง λ หนึ่งๆ เท่านั้น ฉะนั้นในการเลือกกังหันควรเลือกให้เหมาะสมกับช่วงประสิทธิภาพตัวมันเอง และสภาพการนำไปใช้งานดังในรูป 2-2

ทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ (Blade element theory)

ทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบก็คือ ทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์ที่ใช้คำนวณหาค่าแรงที่เกิดขึ้นบนส่วนเล็กๆ ของใบแต่ละส่วน (blade element section) โดยมีสมมติฐานกำหนดไว้ว่าแรงที่เกิดขึ้นบนส่วนของใบแต่ละส่วนของใบจะมีแค่แรงยกหรือแรงหน่วง เท่านั้น และสิ่งที่เกิดขึ้นบนส่วนของใบแต่ละส่วน (หรือวงแหวนของลำอากาศบนส่วนของใบ) จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งที

เกิดขึ้นบนส่วนของใบส่วนถัดไป ดังนั้นถ้าเราสามารถหาแรง และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนส่วนของใบเล็กๆ (differential element of the blade) ทั้งหมดได้ ก็จะหาแรงและโมเมนต์ทั้งหมดได้โดยการอินทิเกรตตลอดความยาวของใบกังหัน

รูปที่ 2-3 แสดงถึงลักษณะของใบกังหันลม ที่มองจากด้านหน้า และจากภาพตัดขวาง จากความเร็วที่เกี่ยวข้องบนภาพหน้าตัดขวางของใบกังหัน จะเห็นได้ว่า ความเร็วลมที่ใบจะถูกชะลอให้ช้าลงจากความเร็ว V_∞ ด้วยปริมาณ aV_∞ อันสืบเนื่องจากการดึงเอาพลังงานออกจากอากาศและความเร็วของอากาศเมื่อมองจากใบพัดที่หมุนอยู่ จะมีค่าเท่ากับ $r\Omega(1+a')$ โดยมีมุม β เป็นมุมบิดของใบกังหันจากระนาบของ rotor มุม α เป็นมุมปะทะของความเร็วรวมของอากาศกับเส้น zero lift ของใบกังหัน และ $\phi = \beta + \alpha$



รูปที่ 2-3 ใบพัดกังหันพร้อมทั้งความเร็วและแรงที่เกี่ยวข้อง

a) ภาพด้านหน้า b) ภาพด้านตัดขวาง

แรงที่เกิดขึ้นบนกังหันสามารถเขียนเป็นแรงย่อยในแนวตั้งฉาก และขนานกับระนาบของ rotor ได้ดังต่อไปนี้คือ

$$dF_n = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (2-11)$$

$$dF_t = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (2-12)$$

L คือแรงยกและ D คือแรงหน่วง

ดังนั้น สำหรับกังหันลมที่มีจำนวนใบกังหันเท่ากับ B ใบ ค่าแรง thrust และ torque ที่ rotor ของกังหันมีค่าเท่ากับ

$$dT = Bc \frac{1}{2} \rho W^2 C_n dr \quad (2-13)$$

$$dQ = BC \frac{1}{2} \rho W^2 C_t r dr \quad (2-14)$$

c = ความกว้างของใบกังหัน

C_n = สัมประสิทธิ์ของแรงในแนวตั้งฉากกับระนาบของ rotor

C_t = สัมประสิทธิ์ของแรงในแนวขนานกับระนาบของ rotor

W = ความเร็วรวมของอากาศที่ใบกังหัน

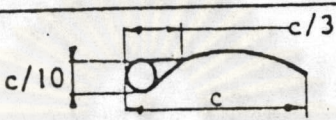

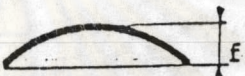
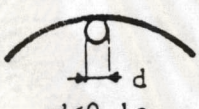

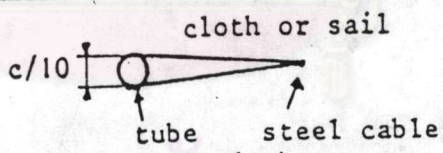
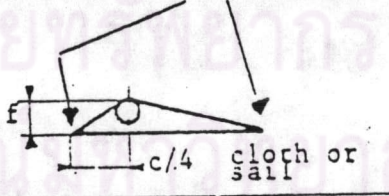
จะเห็นได้ว่าในทฤษฎีฮิวลิเมนต์ของใบนี้ สัมรรถนะของกังหันลมขึ้นกับค่าแรงยกและแรงหน่วงที่เกิดขึ้นบนใบกังหัน ดังนั้นการเลือกใบกังหันที่เหมาะสมจะให้ค่าแรงยกมาก ยังผลให้กังหันลมมีสัมรรถนะดีขึ้นด้วย

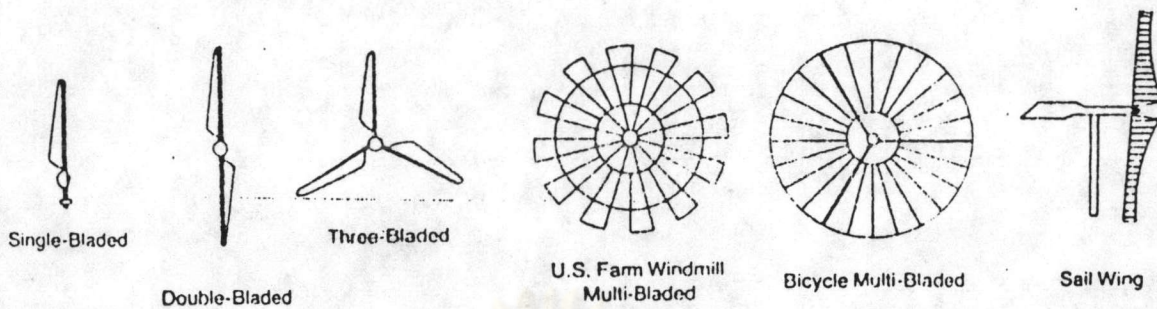
คุณสมบัติของใบกังหัน (2)

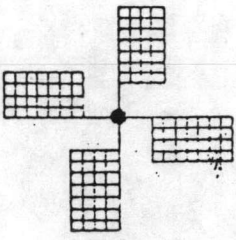
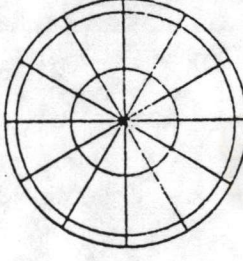
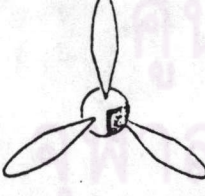
ใบกังหันลมชนิดต่างๆ ก็จะมีค่าแรงยกและแรงหน่วงต่างกันไป ใบกังหันใดมีรูปร่างที่มีประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ดีก็จะให้ค่าแรงยกสูงตามไปด้วย เช่น ใบกังหันที่มีลักษณะภาคตัดขวางเป็นรูปแพนอากาศ

ตารางที่ 2-1 แสดงถึงค่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์แรงหน่วยต่อแรงยก $\frac{C_d}{C_l}$ มุมปะทะ α และสัมประสิทธิ์แรงยกของใบกังหันชนิดต่างๆ C_l ตารางที่ 2-2 แสดงรูปแบบของกังหันลมแกนแนวนอน และข้อแนะนำในการเลือกใช้กังหันลมที่แรงบิด และความเร็วรอบต่างกัน

ตาราง 2-1 คุณสมบัติของใบกังหันรูปลักษณะต่างๆ

airfoil name	geometrical description	(C_d/C_{lmin})	α°	C_l
sail and pole		0.1	5	0.8
flat steel plate		0.1	4	0.4
arched steel plate		$f/c=0.07$	4	0.9
		$f/c=0.1$	3	1.25
arched steel plate with tube on concave side		$f/c=0.07$	5	0.9
		$d < 0.1c$ $f/c=0.1$	4	1.1
arched steel plate with tube on convex side		$f/c=0.1$	14	1.25
sail wing		0.05	2	1.0
sail trouser		$f/c=0.1$	4	1.0
NACA 4412		0.01	4	0.8
NACA 23015		0.01	4	0.8



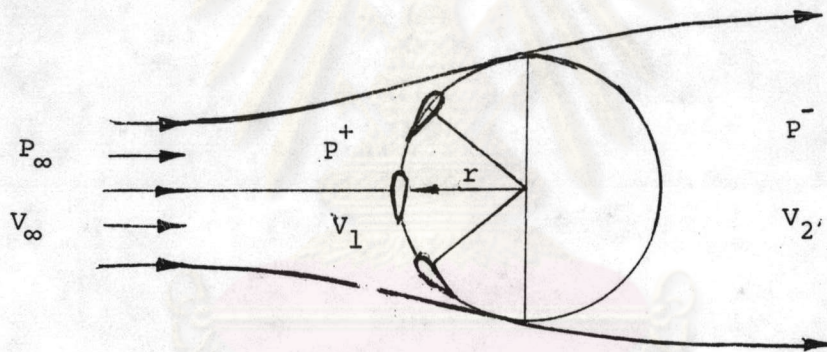
ROTOR TYPE	Cp MAX	COMMENTS
 <p>Dutch</p>	0.17	High Torque, Low RPM Inefficient Blade Design
 <p>Farm</p>	0.15	High Torque, Low RPM High Losses
 <p>Modern Propeller</p>	0.47	Low Torque, High RPM Efficient Blade Design

ตารางที่ 2-2 รูปแบบกังหันลมชนิดต่างๆ และข้อแนะนำบางประการ

กังหันลมแบบแกนตั้ง (3)

ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน และทฤษฎีฮิลล์เมนต์ของใบนับเป็นทฤษฎีเบื้องต้นที่นิยมใช้ในการหาค่าสัมรรถนะของกังหันลม ซึ่งในส่วนต้นของบทนี้ ได้แสดงไว้เพื่อใช้สำหรับกังหันลมแนวนอน

ส่วนกังหันลมแกนตั้งนั้นในการหาค่าสัมรรถนะก็ยังคงสามารถใช้ทฤษฎีทั้งสองอยู่ แต่ต้องมีการปรับปรุงให้เหมาะสมกับลักษณะของกังหัน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของใบกังหันเป็นเส้นรอบวงต่างกับกังหันลมแนวนอน



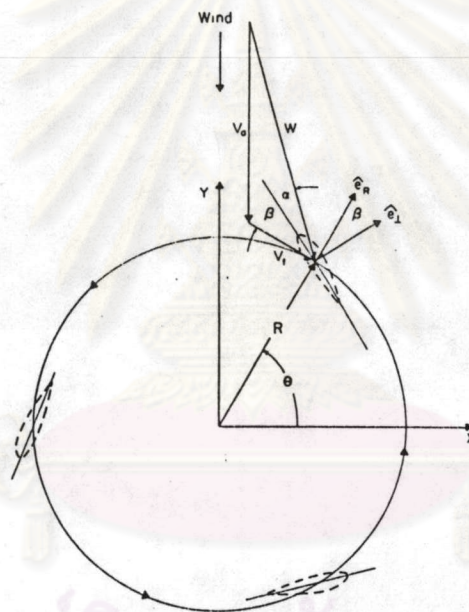
รูปที่ 2-4 แสดงถึงค่าอากาศที่ไหลผ่านกังหันลมในแนวตั้ง

หากใช้ทฤษฎีขึ้นพื้นฐานโดยถือว่าค่าอากาศนั้นเป็น single stream tube (ค่า axial induction factor คงที่ตลอดค่าอากาศ) ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนจะให้ค่าแรงเท่ากับ

$$T = 4Rl \rho V_{\infty}^2 a (1-a) \quad (2-15)$$

- เมื่อ R = ความยาวของแขนกังหันลมจากแกนกลาง
 l = ความสูงของใบกังหัน
 T = แรง thrust
 V = ความเร็วลม
 a = ค่า axial induction factor

เมื่อพิจารณาล้วนของใบกังหันที่ตำแหน่งใดๆ ของกังหันลมแนวตั้ง ความเร็วของลมที่เกิดขึ้นบนส่วนใบกังหันจะมีค่าดังแสดงในรูป 2-5



รูปที่ 2-5 เวกเตอร์ของความเร็วลมขณะผ่านกังหันลมแนวตั้ง

- ซึ่ง V_a คือความเร็วลมที่ใบกังหัน ($V_a = V_\infty(1-a)$) (2-16)
 V_t คือความเร็วของอากาศเมื่อมองจากใบพัดที่หมุนอยู่ (เท่ากับความเร็วของใบกังหัน แต่มีทิศทางตรงข้าม)
 W คือความเร็วรวม
 α คือมุมปะทะ
 β คือมุมบิดของใบกังหัน
 θ คือมุมกวาดของใบกังหัน

จากความเร็วที่เกี่ยวข้องนี้จะทำให้สามารถหาค่าแรง thrust และ torque ในลักษณะเดียวกับที่แสดงในทฤษฎีฮิลล์เมนต์ของใบในกังหันแนวอนโต้ แต่ในกรณีของกังหันลมแนวตั้งนี้ ความเร็ววนใบกังหันจะมีค่าเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของใบ ดังนั้นค่าแรง thrust และ torque เกลี่ยนั้นจะหาได้จากการอินทิเกรตค่าแรง thrust และ torque ที่ตำแหน่งใด ตลอดรอบเส้นรอบวงจาก $\theta = 0^\circ$ ถึง 360°

ค่าแรง thrust ของกังหันลมแนวตั้งสามารถเขียนได้เป็น

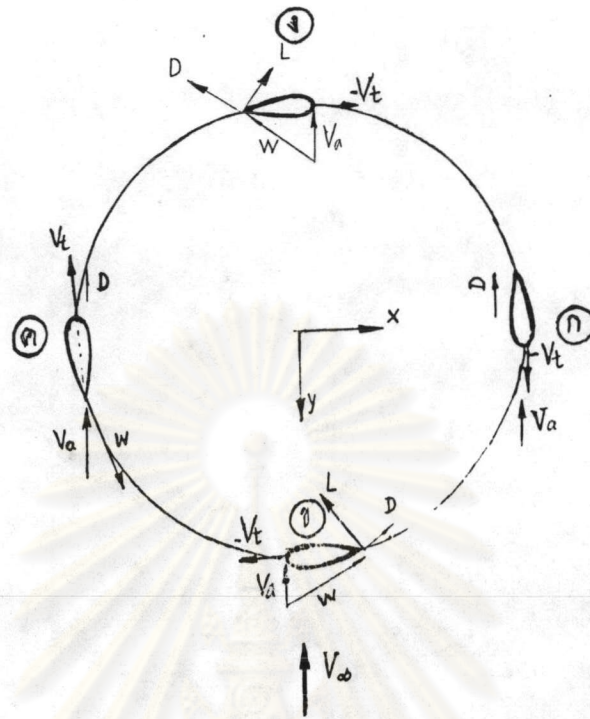
$$T = \frac{B}{2} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \rho W^2 C_l [C_L \sin(\theta + \alpha) + C_D \cos(\theta + \alpha)] d\theta \quad (2-17)$$

และเมื่อนำค่าแรง thrust ที่หาได้จากทฤษฎีโมเมนต์ตามแนวแกนมาเท่ากับค่าแรง thrust จากทฤษฎีฮิลล์เมนต์ของใบ ก็จะสามารถหาค่า axial induction factor ได้ และสามารถนำกลับไปหาค่าสัมประสิทธิ์ของกังหันลมต่อไปได้

การทำงานของกังหันลมแนวตั้งแบบดาร์ริเยล

กังหันลมแนวตั้งนี้จะทำงานโดยอาศัยหลักการทางอากาศพลศาสตร์ เมื่ออากาศไหลผ่านทำมุมปะทะกับใบกังหันที่มีลักษณะภาคตัดขวางเป็นรูปแพนอากาศ ก็จะทำให้เกิดแรงยกและแรงหมุน ทำให้ใบกังหันเคลื่อนที่ไปได้ แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ของใบกังหันเป็นเส้นรอบวง และค่าแรงยกนี้ก็ขึ้นกับความเร็วรอบของลมที่ใบกังหัน และที่ตำแหน่งต่างๆ บนเส้นทางที่ใบกังหันเคลื่อนที่ไปนั้น ค่าความเร็วรวมที่ใบกังหันจะเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูป 2-6

ดังนั้นขนาดและทิศทางแรงยกที่เกิดขึ้นบนใบกังหันก็จะมีค่าแปรตามตำแหน่งที่มันเคลื่อนที่ไปรอบๆ

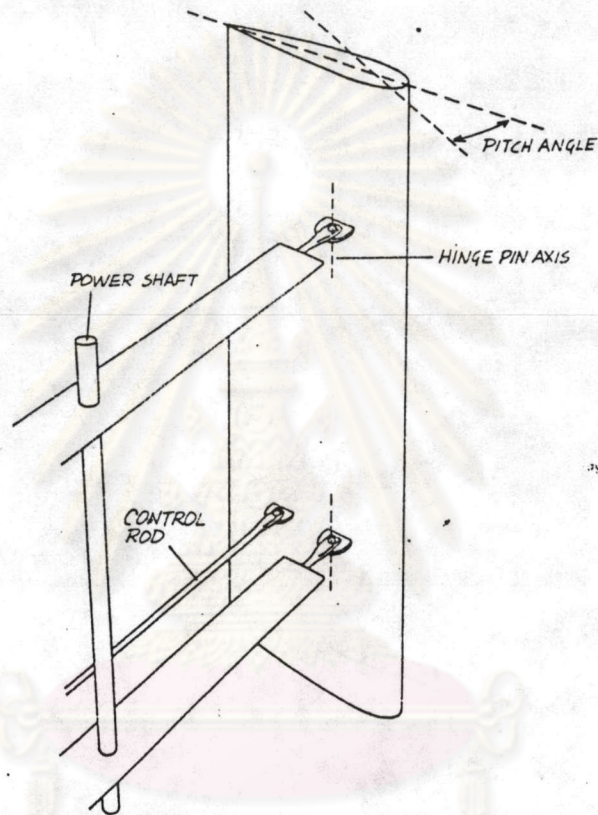


รูปที่ 2-6 ทิศทางของแรงบนใบกังหันแกนตั้งขณะหมุนไปในตำแหน่งต่างๆ

ในกรณีของใบกังหันที่ไม่มี camber จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง ก มุมปะทะเท่ากับ ศูนย์ ดังนั้นจึงเกิดแต่แรงหน่วง ซึ่งมีทิศทางต้านกับการเคลื่อนที่ของใบกังหัน ในตอนที่ตำแหน่ง ค มุมปะทะเท่ากับ 180° แรงหน่วงจะมีทิศทางเดียวกับกับการเคลื่อนที่ของใบกังหัน ในตำแหน่ง ข และ ง จะเกิดทั้งแรงยกและแรงหน่วง ซึ่งทำมุมกัน เมื่อแตกแรงทั้งสองลงในแนว x แรงทั้งสองจะหักล้างกันเหลือเป็นส่วนที่จะทำให้ใบกังหันเคลื่อนที่ไปข้างหน้า หรือถอยหลัง

จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง ข และ ค หากความเร็วของใบกังหัน ($-V_t$) มีค่าน้อย มุมปะทะจะมีค่าสูง เมื่อมุมปะทะสูงถึงค่าหนึ่งแรงยกจะมีค่าลดลงในขณะที่มีแรงหน่วงมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากการ separation ของ boundary layer ที่แพนอากาศ เรามักเรียกปรากฏการณ์ของการสูญเสียแรงยก เมื่อมุมปะทะสูงนี้ว่า Stall ดังนั้นเมื่อเกิดเหตุการณ์นี้ขึ้นบนกังหันลมแบบแนวตั้ง ค่าแรงหน่วงจะมีค่าสูงกว่าแรงยกและเมื่อแตกแรงลงในแนวการเคลื่อนที่ของใบกังหันแรงหน่วงจะหักล้างกับแรงยกทำให้พยายามดึงใบกังหันให้ถอยหลัง ซึ่งนั่นก็คือเหตุผลที่กังหันลมชนิดนี้ไม่สามารถหมุนได้เองที่ความเร็วรอบต่ำๆ มันจะทำงานได้ดีที่ความเร็วรอบสูง ดังนั้นกังหันลมชนิดนี้มักจะมีอุปกรณ์ที่来帮助หมุนให้มีความเร็วรอบสูงขึ้น เพื่อให้มี

การทำงานพื้นช่วง stall นี้ไปก่อน ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้อาจเป็นกังหันลมแบบฮาโวเนียส หรือมอเตอร์ไฟฟ้า หรืออาจมีการตัดแปลงติดกลไกให้สามารถปรับมุมใบกังหันเพื่อลดมุมปะทะลง หลีกเลี่ยงการเกิด stall ขึ้น



รูปที่ 2-7 ภาพวาดแสดงระบบปรับมุมใบกังหันเพื่อเลี่ยงอาการเกิด rotor stall ของกังหันลมแต่เรียงสับแบบใบตรง โดยการปรับมุมใบให้ขยับรับลมในตำแหน่งต่างๆ

กึ่งหันลมใบอ่อนแกนตั้ง

จะเห็นได้ว่าข้อดีข้อหนึ่งของกึ่งหันลมแรงยกแบบแนวตั้งก็คือ มันสามารถรับลมได้จากทุกทิศทางไม่จำเป็นต้องมีหางเสือเพื่อหันกังหันเข้าหาลมแบบกึ่งหันลมแนวนอน แต่ก็มีข้อเสียที่ว่ามันมีปัญหาที่ไม่สามารถหมุนได้ด้วยตัวมันเอง และต้องทำงานที่ความเร็วรอบสูงพอสมควรเพื่อหนีการเกิด stall ของใบกังหัน นั่นก็หมายถึงต้องมีความเร็วลมสูงพอสมควรด้วย

กึ่งหันลมแบบใบอ่อนจะมีข้อเด่นกว่าแบบใบแข็งอยู่ตรงที่โครงสร้าง และการจัดทำได้ง่ายกว่า ราคาถูก และเนื่องจากเป็นใบอ่อน มันสามารถลู่ตามลมทำให้เป็นแพนอากาศ ลักษณะเป็น camber ขึ้นได้ ผลของการเกิดเป็น stall ตามลมก็จะช่วยให้ลดมุมปะทะให้เล็กลงทำให้สามารถทำงานที่ความเร็วรอบต่ำกว่าแบบใบแข็ง โดยไม่เกิด stall ได้ และผลของการเกิด camber ถ้ามีการออกแบบที่เหมาะสมก็จะสามารถหมุนได้เองโดยไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์ช่วย

ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบ และทดสอบกึ่งหันลมใบอ่อนแกนตั้ง เพื่อหาสมรรถนะ และทดลองติดตั้งกับเครื่องสูบน้ำว่าเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่

การออกแบบเบื้องต้น

ในการออกแบบกึ่งหันลมใบอ่อนตัวต้นแบบนี้ ในเบื้องต้นได้เลือกสถานที่ทดสอบกึ่งหันลมชนิดนี้ที่ สำนักงานพลังงานแห่งชาติ ศูนย์รังสิต และที่สถานีวิจัยปรับปรุงดิน ตามโครงการวิจัย US.AID. GRANT No. 936-5542-G-SS-3036-00 ซึ่งเป็นสถานที่มีความเร็วลมเฉลี่ยสูง และปริมาณลมค่อนข้างมาก การคำนวณได้หาขนาดพื้นที่รับลมของกังหัน ความยาวคอรัทไบพัด ความสูงของใบพัดและรัศมีการหมุนของใบพัด ซึ่งความต้องการและข้อมูลที่เลือกใช้คือ

- กว้างด้านทางออก 100 วัตต์
- ความเร็วลมใช้งาน 5 เมตร/วินาที
- อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่อความเร็วลม 2
- สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม C_p เลือก 0.25

ขั้นตอนในการออกแบบจะอาศัยหลักการทางด้านอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศ มาช่วยตามเอกสาร (3.) ดังนี้ :-

- 1) หาพื้นที่กวาดของใบพัด คำนวณจากสมการกำลังงานที่ได้จากพลังงานลม

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3 C_p$$

$$\text{แทนค่า } 100 = \frac{1}{2} \times 1.2 \times A \times (5)^3 \times (0.25)$$

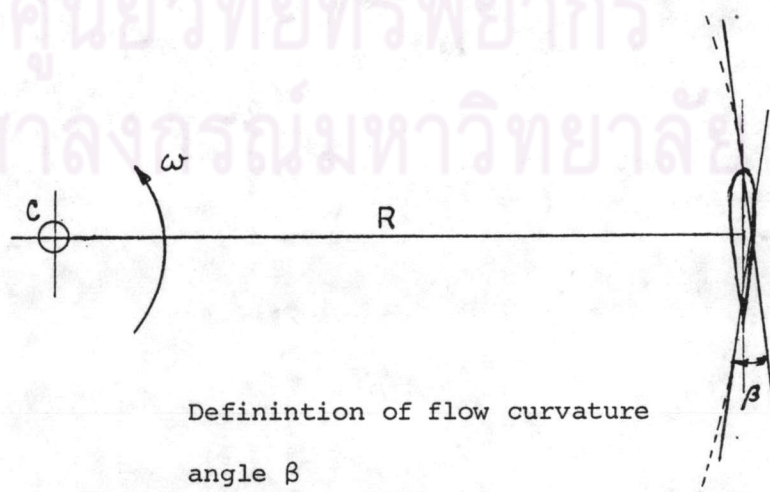
$$\text{ดังนั้นพื้นที่กวาด } L \cdot (2R) = 5.3 \quad \text{ตารางเมตร} \quad (2-18)$$

- 2) อัตราส่วนของรูปทรง (Aspect ratio) ในกรณีของกังหันลมแกนแนวตั้ง ขนาดของพื้นที่กวาดใบรับลมจะประกอบด้วยความสูงของใบพัด และความยาวคอรัตของใบกังหันลม โดยจะคำนึงถึง โครงสร้างและความแข็งแรงด้วย ในที่นี้เลือกอัตราส่วนคือ

$$\text{Aspect ratio} = L/C = 5 \quad (2-19)$$

- 3) ค่ามุมการเคลื่อนที่ของแพนอากาศตามแนวเส้นรอบวง (Flow curvature) มุม β ดูจากภาพประกอบซึ่งมุม β นี้ จะหาได้จากสมการ ดังนี้

$$\beta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{C}{2R} \right) \quad (2-20)$$



โดยทั่วๆ ไปมุม β นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของแพนอากาศ ซึ่ง β จะมีค่าไม่เกิน 10 องศา ดังนั้น

$$\text{ค่าสูงสุดของ } \frac{R}{C} = 5.72 \quad \text{-----} \quad (2-21)$$

จากสมการ (1), (2), (3) จะได้ค่า

$$C = 0.30 \text{ m.}$$

$$L = 1.51 \text{ m.}$$

$$R = 1.73 \text{ m.}$$

การเลือกจำนวนใบพัด B ซึ่งสัมพันธ์กับค่า solidity

$$\sigma = \frac{BC}{2R} = \frac{B}{2} \left(\frac{1}{5.72} \right) \quad \text{-----} \quad (2-22)$$

$$\text{เมื่อเลือก } B = 2 \quad \text{จะได้ } \sigma = 0.175$$

$$B = 3 \quad \sigma = 0.262$$

$$B = 4 \quad \sigma = 0.350$$

ในกรณีค่า solidity ที่ใช้ทั่วๆ ไปมักอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.4 ดังนั้นกังหันลมที่ออกแบบนี้จะมีลักษณะดังต่อไปนี้

$$\text{ความยาวรัศมี} = 1.73 \text{ เมตร}$$

$$\text{ความยาวคอรัต} = 0.3 \text{ เมตร}$$

$$\text{ความยาวของใบกังหัน} = 1.5 \text{ เมตร}$$

$$\text{จำนวนใบ} = 3 \text{ ใบ}$$

สำหรับแบบส่วนประกอบและขนาดของส่วนต่างๆ ที่สร้างกังหันลมใบอ่อนแกนตั้ง ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข (แบบกังหันลมและราคาวัสดุ)

ตั้งได้กล่าวไว้ในข้างต้นว่าสมรรถนะของกังหันจะดีขึ้นหรือไม่นั้น ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของแผนอากาศตามทฤษฎีอีลีเมนท์ของใบ การออกแบบแผนกังหันลมชุดนี้ซึ่งเลือกรูปทรงของแผนกังหันเป็นแผนอากาศภาคตัดคล้าย NACA 0012 ซึ่งใช้กับกังหันลมชุดที่ 1 วัสดุทำด้วยไม้อัดและปลายแขนโค้งยาวเพื่อรองรับความกว้างใบอ่อนขนาด 30 เซนติเมตร ผลการทดลองในสภาวะอากาศกรุงเทพฯ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2528 จนถึงเดือนเมษายน 2529 พบว่าคุณสมบัติของไม้อัดเริ่มเสื่อมสภาพและปลายแขนงอโค้งลงประมาณ 4 เซนติเมตร จากแนวระนาบเดิม จึงตัดสินใจสร้างกังหันลมชุดที่ 2 ซึ่งมีส่วนประกอบและขนาดคล้ายชุดที่ 1 ทุกประการ แต่เพิ่มบันไดสำหรับปีนขึ้นลงได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้แผนกังหันลมของชุดที่ 2 ทำด้วย Extruded aluminium มีภาคตัดเป็นแผนอากาศ NACA 0018 จากผลการทดลองปรากฏว่า ความเร็วรอบของกังหันลมชุดที่ 2 หมุนได้ความเร็วรอบสูงกว่าชุดที่ 1 แต่ยังไม่มากนัก จึงเปลี่ยนความกว้างของใบอ่อนจาก $c = 0.30$ เมตร เป็นความกว้างใบอ่อน $c = 0.50$ เมตร ผลจากการเปลี่ยนความกว้างใบพัดนี้ ทำให้ความเร็วรอบของกังหันลมสูงขึ้น และอัตราการไหลของน้ำที่ออกจากเครื่องสูบน้ำโรตารีแบบใบพามีจำนวนเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงบิดที่ rotor ของกังหันลมเพิ่มขึ้นตามค่า C ที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับสมการ -15 ในเอกสาร (XX) ที่ว่า

$$dQ = BC \frac{1}{2} \rho W^2 C_t r \cdot dr \quad \text{-----} \quad (2-23)$$

สำหรับกังหันลมชุดที่ 2 สามารถเปลี่ยนความกว้างใบพัดได้หลายขนาดโดยที่รองรับใบอ่อนสามารถเปลี่ยนให้ยาวได้มากที่สุดถึง 0.50 เมตร หากมากกว่านี้ปลายแขนจะโค้งงอลงมาเล็กน้อย ซึ่งพอมองเห็นได้ชัดเจน