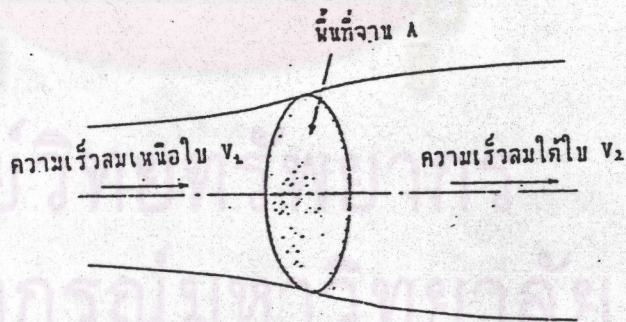


บทที่ 2

ทฤษฎีกังหันลม

2.1 ทฤษฎีกังหันลมแบบแกนนอน

ในการอธิบายการทำงานของกังหันลมเริ่มโดย ไบเลอว์ (Bilau) ในปี 1925 และเบตซ์ (Betz) ในปี 1927 (Legourieres, 1982) ได้ใช้ทฤษฎีโมเมนตัมและพลังงานมาอธิบาย เริ่มด้วยการแสดงกังหันลมเป็นรูปของแผ่นจาน (Disc) เมื่อมีกระแสลมไหลผ่านแผ่นจาน จะเกิดความไม่ต่อเนื่องของความเร็วขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดงการไหลของกระแสลมผ่านแผ่นจาน

การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนตัมและพลังงานใช้กลศาสตร์ของนิวตัน (Newtonian Mechanics) เป็นหลักในการคำนวณ ความเร็วลมเฉลี่ยที่แผ่นจาน กำหนดให้เป็น

$$V = [V_1 + V_2] / 2 \quad (2.1)$$

กำลัง P ที่แผ่นจานแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากการไหลมาของลมเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นที่แผ่นจาน ทำให้แผ่นจานหมุน จะได้

$$P = \rho AV [V_1^2 - V_2^2] / 2 \quad (2.2)$$

โดยที่

ρAV คือ อัตราการไหลของมวล (Mass flow rate)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

A คือ พื้นที่ของแผ่นจาน

V_1 คือ ความเร็วลมขณะกระทบแผ่นจานทางด้านหน้า

V_2 คือ ความเร็วลมที่ผ่านแผ่นจานไปทางด้านหลัง

ความเร็วลมมีความสัมพันธ์กับ ตัวประกอบตามแนวแกน (Axial Interference Factor) a คือ

$$V = V_1 [1 - a] \quad (2.3)$$

และ
$$V_2 = V_1 [1 - 2a] \quad (2.4)$$



แทนค่า V และ V_2 จากสมการ (2.3) และ (2.4) ลงในสมการ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วลมขณะกระทบแผ่นงานทางด้านหน้า ดังนี้

$$P = [4a(1-a)^2] \rho AV_1^3 / 2 \quad (2.5)$$

เทอม $[4a(1-a)^2]$ กำหนดให้เป็นตัวประกอบกำลัง (Power Coefficient) C_p ซึ่งเป็นอัตราส่วนของพลังงานลมที่ส่งถ่ายไปให้กับแผ่นงานต่อพลังงานทั้งหมดที่ผ่านพื้นที่นั้น ถ้าตัวประกอบตามแนว a เท่ากับ 1 ทำให้ C_p เป็น 0 หมายความว่าพลังงานไม่มีการส่งผ่าน ถ้า a เท่ากับ 0.5 ทำให้ความเร็วลมหลังแผ่นงาน (Downstream) V_2 เท่ากับ 0 ซึ่ง C_p เป็น 0.5 หมายความว่าพลังงานจะถูกส่งถ่ายจนหมดสิ้น ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ พลังงานสูงสุดที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ตามทฤษฎีพื้นฐานพบว่า a เท่ากับ $1/3$ ดังนั้นค่า

$$C_{p_{max}} = 16/27 \quad (2.6)$$

หากพิจารณาแรงตามแนวแกน (Axial Thrust) พบว่า

$$T = [4a(1-a)] \rho AV_1^2 / 2 \quad (2.7)$$

เทอม $[4a(1-a)]$ เรียกว่า ตัวประกอบแรงขับ (Trust Coefficient) C_T ซึ่งจะมีค่าสูงสุด เมื่อ a เท่ากับ 0.5 แต่สำหรับกรณีที่พลังงานสูงสุดเมื่อ a เท่ากับ $1/3$ พบว่า C_T เท่ากับ $8/9$ คือค่าสูงสุด

การสูญเสียต่างๆเมื่อรวมกันจะลดกำลังที่ได้รับในทางทฤษฎี ค่า C_p ในทางปฏิบัติวัดได้ประมาณ 0.46 ถึง 0.47 ความพยายามที่จะให้ได้ค่า C_p เท่ากับ 16/27 หรือประมาณ 0.59 นั้นในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่า C_p เท่ากับ 0.59 เป็นขีดจำกัดบนในทางปฏิบัติ

2.2 กฎเกณฑ์ของกังหันลม

ค่าที่ใช้ในการคำนวณและอธิบายประสิทธิภาพของกังหันลมเรียกว่า อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio) โดยกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของความเร็ววงรอบ (Turbine Peripheral Speed) ต่อความเร็วลม V_1 ดังนี้

$$\lambda = \omega r / V_1 \quad (2.8)$$

โดยที่ λ คือ อัตราส่วนความเร็วปลายใบ

ω คือ อัตราเร็วเชิงมุม

r คือ รัศมีการหมุนของแขนใบ

V_1 คือ ความเร็วลมที่เข้ามาปะทะกังหันทางด้านหน้า

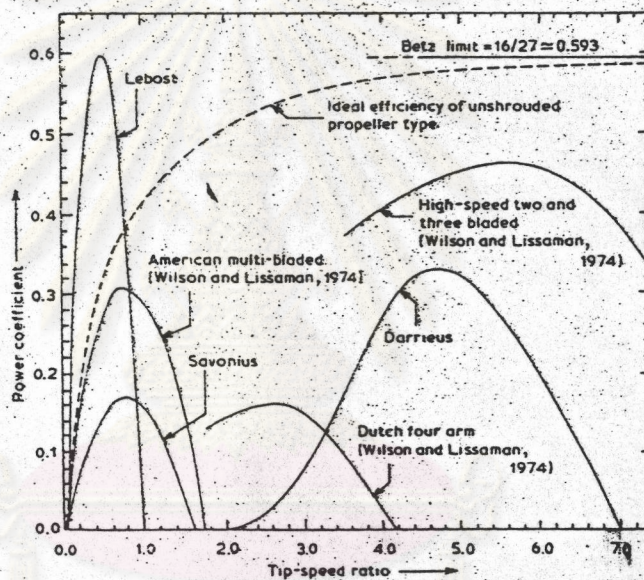
กังหันลมที่ทำงานที่ความเร็วของลมต่างๆโดยทั่วไปแล้วพบว่า λ

จะมีค่าน้อยกว่า 2 ในทางปฏิบัติพบว่าถ้าตัวประกอบกำลัง C_p ยิ่งมีค่ามากค่า λ

จะมีค่าสูง หมายความว่ากังหันลมยังมีประสิทธิภาพสูง กลับกันถ้าอัตราส่วน

ความเร็วปลายใบ λ ยิ่งสูงขึ้นเท่าไรค่าตัวประกอบกำลัง C_p ก็ยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น

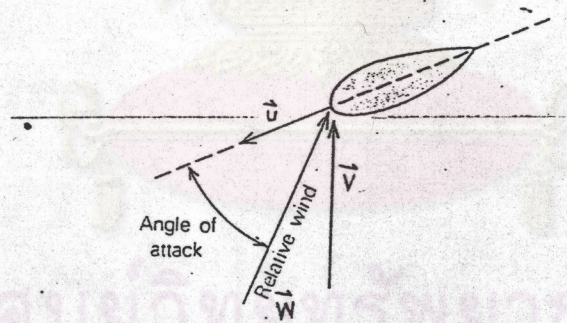
ในการทดลองของกังหันลมชนิดต่าง ๆ เป็นดังนี้ (Warne, 1983)



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงค่า C_p กับ λ ของกังหันลมชนิดต่าง ๆ

2.3 ทฤษฎีกังหันลมแบบแกนตั้ง

ผู้ที่ริเริ่มศึกษากังหันลมแบบแกนตั้งซึ่งมีชื่อเสียงมากคือนักประดิษฐ์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ แดร์เรียส (Darrieus) ส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดคือใบที่มีลักษณะโค้ง มีหน้าตัดเหมือนหน้าตัดปีกเฮลิคอปเตอร์หมุนรอบ ๆ แกนกลาง ใบยึดติดอยู่กับที่ ต่อมาได้มีการพัฒนาตัวกังหันให้มีรูปแบบต่าง ๆ กัน เช่น รูปทรงกระบอก รูปทรงกรวย รูปทรงกลม รูปทรงพาราโบล่าอย่างไรก็ตามกฎพื้นฐานที่ใช้อธิบายคล้ายๆ กัน



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของความเร็วลมต่าง ๆ

\vec{W} คือ ความเร็วลมสัมพัทธ์

\vec{V} คือ ความเร็วลม

\vec{U} คือ ความเร็วลมขอบของกังหันลม

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วทั้งสามเป็นดังนี้

$$\vec{V} = \vec{U} + \vec{W}$$



เขียนใหม่ได้เป็น

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} \quad (2.9)$$

ถ้าทราบค่า \vec{V} และ \vec{U} จะสามารถหาค่า \vec{W} ได้ และจะนำไปสู่ การหาแรงทางแอโรไดนามิค (Aerodynamic Force) ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการหา สมมติว่า ความเร็วลมคงที่ การคำนวณทำได้โดยการใช้สามเหลี่ยมแทนแรง สำหรับตำแหน่งต่าง ๆ ของใบแสดงถึงแรงที่เกิดขึ้นในตำแหน่งนั้น มุมตกกระทบ สัมพัทธ์บนส่วนโค้งของใบจะไม่เกินขีดจำกัดค่าหนึ่งคือ

$$i_{max} = \sin^{-1}(v/u) \quad (2.10)$$

มุมนี้ค่อนข้างแหลม ถ้าความเร็วของ \vec{U} มีค่ามากกว่าความเร็ว \vec{V} มาก และ ถ้าหากว่ากรณีที่กังหันอยู่กับที่คือไม่หมุน ความเร็วลมสัมพัทธ์ \vec{W} จะมีค่าความเร็ว เท่ากับ \vec{V} การสตอล (Stall) จะเกิดขึ้นผลที่ตามมาคือจะทำให้ค่าโมเมนต์ของ การเริ่มต้นต่ำมาก (Starting Couple) ดังนั้นกังหันลมแต่เรียด ส่วนมากไม่

สามารถสร้างตัวเองได้

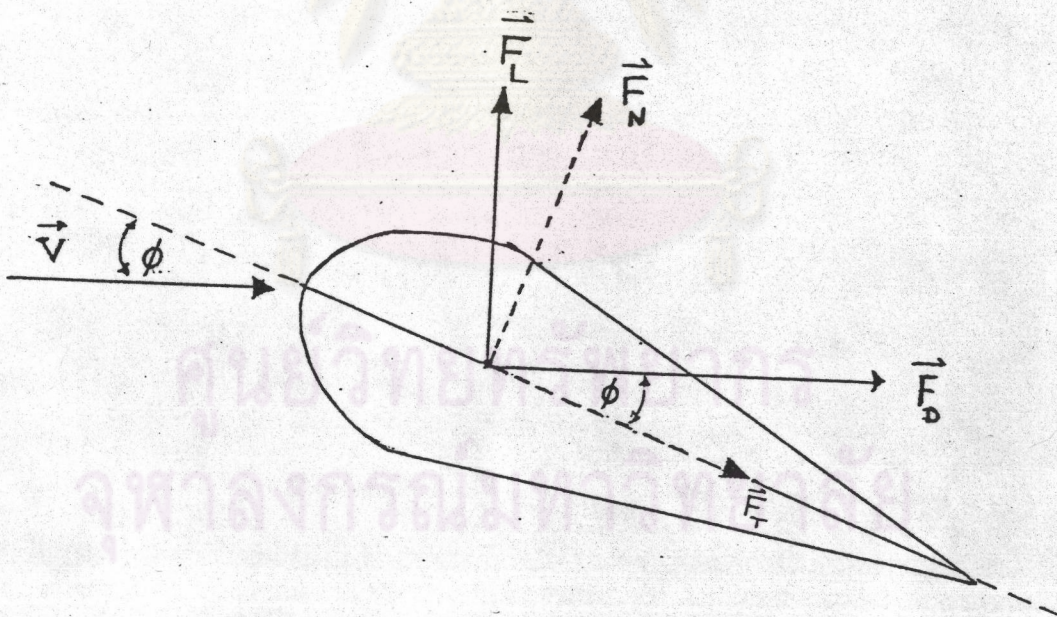
2.3.1 แรงที่กระทำต่อใบพัดของกังหันลม

พิจารณาแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนตัวใบกังหันขณะที่

กระแสลมวิ่งเข้ามาปะทะแรงสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นบนตัวใบประกอบด้วยแรง 2 แรง คือ แรงยก (Lift Force) กับ แรงลาก (Drag Force) โดยที่

แรงลาก (\vec{F}_D) จะมีทิศทางเดียวกับผลรวมทางเวกเตอร์ของความเร็วลมกับความเร็วยกใบ

แรงยก (\vec{F}_L) จะมีทิศทางตั้งฉากกับแรงลาก



รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางของแรง

แรงยก (\vec{F}_L) และ แรงลาก (\vec{F}_D) เป็นสัดส่วนกับปริมาณเหล่านี้

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

A คือ พื้นที่ผิวของใบ

V คือ ความเร็วลมสัมพัทธ์

C_L คือ ตัวประกอบแรงยก

C_D คือ ตัวประกอบแรงลาก

พบว่า

$$F_L = \rho A C_L V^2 / 2 \quad (2.11)$$

$$F_D = \rho A C_D V^2 / 2 \quad (2.12)$$

หากพิจารณาแรงที่อยู่ในทิศทางการหมุน (\vec{F}_T) กับ แรงที่อยู่ในทิศทางตั้งฉากกับการหมุน (\vec{F}_N) สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง \vec{F}_L, \vec{F}_D กับ \vec{F}_T และ \vec{F}_N ได้ดังนี้

$$F_N = F_L \cos\phi - F_D \sin\phi \quad (2.13)$$

$$F_T = F_L \sin\phi - F_D \cos\phi \quad (2.14)$$

การหาสัดส่วนของ C_L และ C_D ขึ้นกับตัวแปรหลายตัวซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีค่าแตกต่างกันไปตามขนาดของใบ และรูปทรงของใบนอกจากนี้ค่า C_L และ C_D ยังขึ้นอยู่กับ มุมของการชน (Angle of Attack) α โดยทั่วไปค่า C_L จะมีค่าสูงสุดเมื่อ α อยู่ในช่วง 10° ถึง 15° ซึ่งมุมในช่วงนี้เรียกว่า มุมสตอล (The angle of stall) ถ้ามุม α มากกว่า ช่วงนี้แล้วค่า C_L จะลดลงส่วนตัวประกอบแรงลาก C_D ยากที่จะประมาณค่าได้อย่างถูกต้องเพราะขึ้นอยู่กับความเร็วและแรงเสียดทาน ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ทางกลศาสตร์

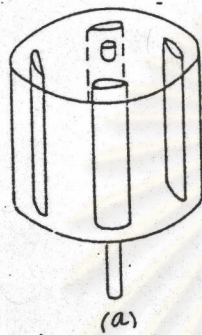
พิจารณาโรเตอร์ของแดเรียสซึ่งหมุนรอบแกนตั้ง สมมติให้เป็นแกน OZ ความเร็วสมบูรณ์ (Absolute Speed) ของลมที่ผ่านตัวโรเตอร์ V มีทิศทางขนานกับ OX ส่วนของใบที่จุดศูนย์กลางให้เป็นจุด M อยู่บนแนวคอร์ด l โดยที่

ds คือ ระยะจากจุดกลางตัวใบถึงปลายใบ

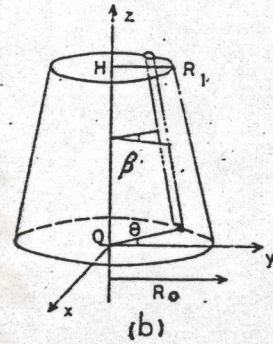
r คือ ระยะทางจากตัวใบไปจนถึงแกน

θ คือ มุมระหว่างระนาบ OYZ กับระนาบตั้ง

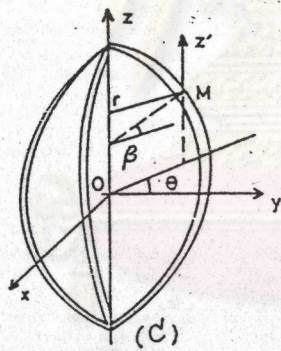
β คือ มุมระหว่างแกนที่ตั้งฉากกับส่วนของใบกับระนาบในแนวนอน



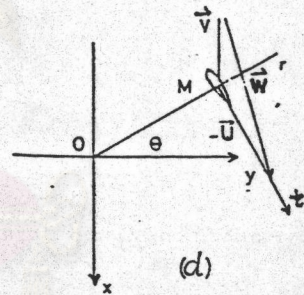
Cylindrical Darrieus rotor



Truncated conical D. rotor



Parabolic D. rotor



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.5 กังหันลมแต่เวียน

สำหรับ โรเตอร์แบบพาลาโบลา ที่สูง $2H$ จุดศูนย์กลางอยู่ที่ O พบว่า

$$r/R = 1 - Z^2/H^2 \tag{2.15}$$

$$\beta = \tan^{-1}(2ZR/H^2) \tag{2.16}$$

สำหรับ โรเตอร์แบบทรงกระบอก ซึ่งมีใบอยู่ในแนวตั้ง

$$r = R \quad (2.17)$$

$$\beta = 0 \quad (2.18)$$

สำหรับ โรเตอร์แบบกรวยกลม

$$r = R_0 - Z[R_0 - R_1]/H \quad (2.19)$$

$$\beta = \tan^{-1}[(R_0 - R_1)/H] \quad (2.20)$$

การคำนวณหาส่วนประกอบของความเร็วสัมพัทธ์ \vec{w} ต้องสร้างแกนช่วย (Auxiliary Axes) โดยที่

แกน MZ' ให้เป็นแนวเมือชี้ขึ้น

แกน Mt เป็นแนวเมือคิดจากขอบหัวไปขอบหางของใบ

แกน Mr เป็นแกนนอนตั้งฉากกับคอร์ด

ความเร็วสัมพัทธ์ \vec{w} สัมพันธ์กับความเร็ว \vec{U} ซึ่งขนาดของ \vec{U} มีค่าเท่ากับ wr ดังสมการต่อไปนี้

$$\vec{w} = \vec{V} - \vec{U} \quad (2.21)$$

เวกเตอร์ \vec{W} คือผลรวมของเวกเตอร์แนวนอน 2 เวกเตอร์
ส่วนประกอบของ \vec{W} เป็นดังนี้

$$W_r = V \sin \theta \quad (2.22)$$

$$W_u = U + V \cos \theta \quad (2.23)$$

$$W_z = 0 \quad (2.24)$$

ทิศทางในแนวโคซายน์ตั้งฉากกับตัวใบ ดังนั้นส่วนประกอบของเวกเตอร์ \vec{W}
ที่ตั้งฉากกับตัวใบ คือ $V \sin \theta \cos \beta$ และ

$$W_u = W_r + V \cos \theta \quad (2.25)$$

ดังนั้นขนาดผลรวมของเวกเตอร์ \vec{W} คือ

$$W^2 = [W_r + V \cos \theta]^2 + V^2 \sin^2 \theta \cos^2 \beta \quad (2.26)$$

สำหรับมุมของการตกกระทบกำหนดให้เป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\tan i = (V \sin \theta \cos \beta) / (W_r + V \cos \theta) \quad (2.27)$$

กำหนดให้ ความดันแบบไดนามิก (Dynamic Pressure)

เป็นดังนี้ คือ

$$q = \rho W^2 / 2 \quad (2.28)$$

กำหนดให้

- l คือ ความยาวคอร์ดของตัวใบ
 C_N คือ ตัวประกอบทางพลศาสตร์ที่ตั้งฉากกับคอร์ด
 C_T คือ ตัวประกอบทางพลศาสตร์ที่ขนานกับคอร์ด

พบว่า

$$C_N = C_L \sin i - C_D \cos i \quad (2.29)$$

$$C_T = C_L \cos i + C_D \sin i \quad (2.30)$$

ส่วนประกอบของแรงทางแอโรไดนามิก (Dynamic Force)

ในทิศทางขนานกับคอร์ดและตั้งฉากกับคอร์ด เป็นดังนี้

$$dN = C_N q l dZ / \cos \beta \quad (2.31)$$

$$dT = C_T q l dZ / \cos \beta \quad (2.32)$$

โดยที่ dZ มีความสัมพันธ์กับ ds ดังนี้คือ

$$dZ = ds \cos \beta \quad (2.33)$$

แรงลัพธ์ที่กระทำที่ส่วนน้อย ๆ บนตัวโรเตอร์ คือ

$$dF = dN \cos \beta \sin \theta - dT \cos \theta \quad (2.34)$$

$$dF = ql [C_N \sin \theta - C_T \cos \theta / \cos \beta] dz \quad (2.35)$$

การหาแรงที่เกิดขึ้นบนใบแต่ละใบ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทาง
การหมุนของกังหันลม การคำนวณจึงต้องหาในลักษณะของการอินทิเกรตโดย
กำหนดเงื่อนไขว่า ความยาวคอร์ดของใบมีค่าคงที่ ดังนั้น แรงในทิศทางของลมที่
กระทำบนตัวโรเตอร์ทั้งหมด เขียนได้ดังนี้

$$F = (bl/2\pi) \rho \int_0^H \int_0^{2\pi} [C_N \sin \theta - C_T \cos \theta / \cos \beta] d\theta dz \quad (2.36)$$

โดยที่

b คือ จำนวนใบพัดของกังหันลม

2.3.2 โมเมนต์และกำลัง (Moment and Power)

โมเมนต์ของแรงแอโรไดนามิค ที่กระทำที่ส่วนน้อย ๆ บนตัวโรเตอร์
รอบแกนหมุน คือ

$$dM = C_T q l r dz / \cos \beta \quad (2.37)$$

ดังนั้น โมเมนต์ บนตัวโรเตอร์ทั้งหมด

$$M = (bl/2\pi) \int_{-H}^H \int_0^{2\pi} (C_{Tqr}/\cos\beta) d\theta dZ \quad (2.38)$$

และเนื่องจาก กำลัง (P) มีความสัมพันธ์กับโมเมนต์ (M) และอัตราเร็วเชิงมุม ω ดังนี้คือ

$$P = M \omega \quad (2.39)$$

ดังนั้นกำลังทั้งหมดบนตัวโรเตอร์ คือ

$$P = (bl/2\pi) \int_{-H}^H \int_0^{2\pi} (C_{Tqr}\omega/\cos\beta) d\theta dZ \quad (2.40)$$

เนื่องจากสมการที่ (2.40) ไม่สามารถอธิบายประสิทธิภาพของ กังหันลมได้ จึงใช้ทฤษฎีของเบสซ์ (Betz) มาอธิบาย ให้แรงที่กระทำกับตัวโรเตอร์ เท่ากับ

$$F = \rho AV (V_1 - V_2) \quad (2.41)$$

และกำหนดให้

$$V = KV_1 \quad (2.42)$$

ความสัมพันธ์ของความเร็วต่าง ๆ เป็นดังนี้

$$V = (V_1 + V_2)/2 = V_1(1+K)/2 \quad (2.43)$$

ดังนั้นแรงที่ได้อคือ

$$F = \rho A (V_1^2 - V_2^2)/2 \quad (2.44)$$

$$F = \rho A V_1^2 (1-K^2)/2 \quad (2.45)$$

$$F = 2\rho A V^2 (1-K)/(1+K) \quad (2.46)$$

สมมติว่าทฤษฎีของเบสซ ใช้ได้กับกังหันลมแบบแกนตั้ง เทียบสมการ (2.36) กับ (2.46) จะได้

$$2\rho A V^2 (1-K)/(1+K) = (bl/2\pi) \int_{-H}^H \int_0^{2\pi} q [C_N \sin\theta - (C_T \cos\theta / \cos\beta)] d\theta dZ \quad (2.47)$$

โดยการแทนค่า q ด้วย $\rho A W^2/2$ และ $G = (1-k)/(1+K)$ จะได้

$$G = (bl/8\pi A) \int_0^{2\pi} (W_u^2/V^2) [C_N \sin\theta - (C_T \cos\theta / \cos\beta)] d\theta dZ \quad (2.48)$$

เนื่องจาก

$$W_u^2/V^2 = [wr/V + \cos\theta]^2 + \sin^2\theta \cos^2\beta \quad (2.49)$$

แต่ $wr/V = (r/R)(wR/V)$ (2.50)

สามารถเขียน

$$W_u^2/V^2 = [(wR/V)(r/R)\cos\theta]^2 + \sin^2\theta \cos^2\beta \quad (2.51)$$

และพบว่า

$$\tan i = \sin\theta \cos\beta / [(wR/V)(r/R) + \cos\theta] \quad (2.52)$$

อัตราส่วน wR/V ได้จากการวัด แทนค่าใน (2.51) สามารถหาค่า G ได้และสามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$K = (1-G)/(1+G) \quad (2.53)$$

เมื่อทราบค่า K ทำให้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนความเร็วปลายใบได้ คือ

$$\gamma = wR/V_1 = (wR/V)[(1+K)/2] = wR/V(1+G) \quad (2.54)$$



ตัวประกอบกำลัง (C_p) และ ตัวประกอบโมเมนต์ (C_m)

$$C_p = 2P/\rho AV_1^3 = (bl/2\pi) \int_0^H \int_0^{2\pi} [C_T W_u^2 wr/V_1^3 \cos\beta] d\theta dz \quad (2.55)$$

$$\text{โดยที่ } (W_u^2/V_1) wr = (W_u^2/8V^2)(wr/V)(r/R)[1+K]^3 \quad (2.56)$$

ใช้สมการ (2.56) หาค่า C_p จะคำนวณได้จากค่าต่าง ๆ ของ wr/V โดยที่แต่ละค่าของ wr/V จะสมนัยกับค่าของ χ สำหรับตัวประกอบโมเมนต์ มีความสัมพันธ์กับตัวประกอบกำลัง ดังนี้

$$C_p = C_m \chi \quad (2.57)$$

ดังนั้นเมื่อคำนวณตัวประกอบกำลังได้ ทำให้ทราบค่าตัวประกอบโมเมนต์ด้วย ดังนี้

$$C_m = C_p/\chi = (2P/\rho AV_1^3)(V_1/wr) = 2M/\rho ARV_1^2 \quad (2.58)$$

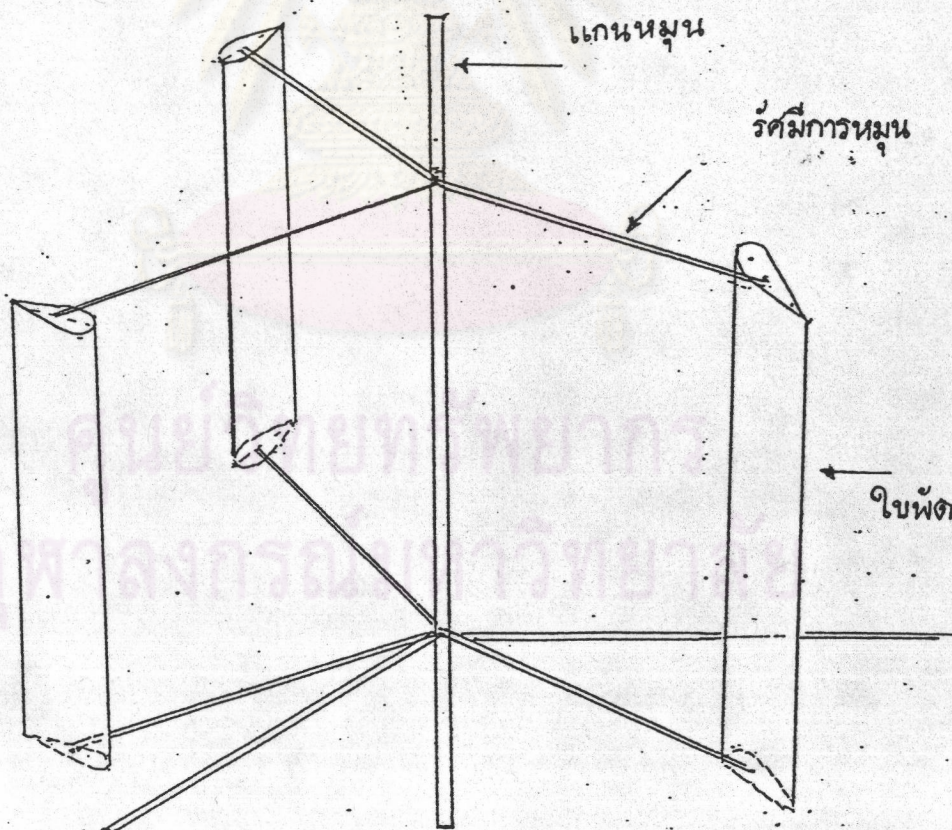
2.3.3 ข้อสังเกต

1. จะเห็นว่าสมการข้างบนจำกัดด้วยรูปร่างของโรเตอร์ ซึ่งอธิบายได้ด้วยค่าของ r อยู่ในรูป ฟังก์ชันของ Z และ $\cos\beta$ การคำนวณโดยทั่วไปสามารถดัดแปลงไปอธิบายกังหันลมรูปอื่นๆได้ เช่น รูปทรงกระบอก รูปทรงกรวย รูปทรงกลม รูปทรงพลาโบลาโดย การเปลี่ยนค่า Z และ $\cos\beta$

2. การพิจารณาโดยใช้ลักษณะสมมาตรของกึ่งทรงกลม ทำให้มีข้อจำกัดของการคำนวณ ดังนั้นกึ่งทรงกลม แบบพลาโบลา หรือกึ่งทรงกลมแบบทรงกลม การคำนวณต้องคิดที่ระนาบนี้จากจุดศูนย์กลางซึ่งจำเป็นต้องมีแกนช่วย

2.4 กึ่งทรงกลมไซโร

เพื่อที่จะอธิบาย กึ่งทรงกลมไซโร จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีกึ่งทรงกลมแบบแกนตั้งที่ผ่านมาในกรณีนี้ ไซโรเตอร์มีรูปร่างทรงกระบอก ซึ่งหมายความว่า $r = R$ และ มุม $\beta = 0$ ลักษณะของกึ่งทรงกลม ประกอบด้วยใบพัดซึ่งมีรูปร่างคล้ายปีกเฮลิคอปเตอร์ จำนวน 3 ใบ ดังรูป



รูป 2.6 แสดงรูปร่างของกึ่งทรงกลมไซโร

ดังนั้นจากสมการที่ (2.36) จะได้ว่า แรงทั้งหมดที่กระทำกับตัวโรเตอร์ คือ

$$F = (bl/2\pi) \int_{-H}^H \int_0^{2\pi} q [C_N \sin\theta - C_T \cos\theta] d\theta dZ \quad (2.59)$$

และจากสมการที่ (2.38) จะได้โมเมนต์บนตัวโรเตอร์ทั้งหมด คือ

$$M = (bl/2\pi) \int_{-H}^H \int_0^{2\pi} C_T q r d\theta dZ \quad (2.60)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.40) จะได้กำลังทั้งหมดที่กังหันรับได้จากลม ดังนี้

$$P = (bl/2\pi) \int_{-H}^H \int_0^{2\pi} C_T q r d\theta dZ \quad (2.61)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย