

อากาศพลศาสตร์ ของกังหันลมแนวตั้ง

สมศักดิ์ ไชยะภินันท์*
Somsak Chaiyapinunt

บทคัดย่อ :

บทความนี้กล่าวถึง อากาศพลศาสตร์ของกังหันลมแนวตั้ง การหาค่าสมรรถนะของกังหันลม ซึ่งประกอบด้วย แรง โมเมนต์ และกำลัง รวมทั้งการหาค่า induced velocity ที่ rotor ของกังหันลม จากทฤษฎีโมเมนต์ม ทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ และทฤษฎีสตริบ

Abstract :

The aerodynamics of vertical axis wind turbines is presented. The relationships are developed for solving induced velocity, thrust, torque and power by using momentum theory, blade element theory, and strip theory.

บทนำ

กังหันลมเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้ในการดึงพลังงานออกจากลมเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ กังหันลมจะสามารถแบ่งตามลักษณะแกนหมุนได้เป็นกังหันลมแนวนอน และกังหันลมแนวตั้ง กังหันลมแนวตั้งจะมีคุณลักษณะพิเศษที่ได้เปรียบกว่ากังหันลมแนวนอนตรงที่ว่า มันสามารถรับลมได้ทุกทิศทาง ในขณะที่กังหันลมแนวนอนนั้นมักต้องมีระบบคัดให้กังหันลมหมุนเข้ารับลมเต็มหน้าเมื่อลมเปลี่ยนทิศทาง และหากระบบในการคัดกังหันนี้ไม่ดีพอ กังหันมักประสบปัญหาของการหนีลม ซึ่งจะส่งผลให้สมรรถนะลดลงและก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับภาระบนโครงสร้างด้วย [3] การหนีลมนี้นี้เป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งของกังหันลมแนวนอน นอกจากนี้ สำหรับกังหันลมแนวนอนที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้ามักจะติดตั้งส่วนของการผลิตกระแสไฟฟ้า (generator) อยู่บนส่วนของ nacelle ของกังหัน ซึ่งเป็นการเพิ่มน้ำหนักขึ้นบนโครงสร้างของหอกังหัน ในขณะที่กังหันลมแนวตั้งนั้นไม่มีปัญหาการหนีลม และระบบผลิตกระแสไฟฟ้า

หรือระบบถ่ายกำลังที่หนักนั้นสามารถตั้งไว้ที่พื้นต่อจากแกนกังหันได้ ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายและลดปัญหาทางโครงสร้างหอกังหันได้ กังหันลมแนวตั้งนั้นยังสามารถแบ่งแยกตามลักษณะแรงหลักของใบที่ใช้ขับให้กังหันหมุนได้เป็นกังหันชนิดแรงยก และกังหันชนิดแรงหน่วง สำหรับข้อเสียเปรียบหรือจุดอ่อนของกังหันลมแนวตั้งโดยเฉพาะชนิดแรงยกนั้นมีอยู่ที่ว่า มันไม่สามารถจะเริ่มหมุนได้เอง จะต้องมียุอุปกรณ์ช่วยในการหมุนเพื่อให้กังหันลมเริ่มหมุนในตอนแรก

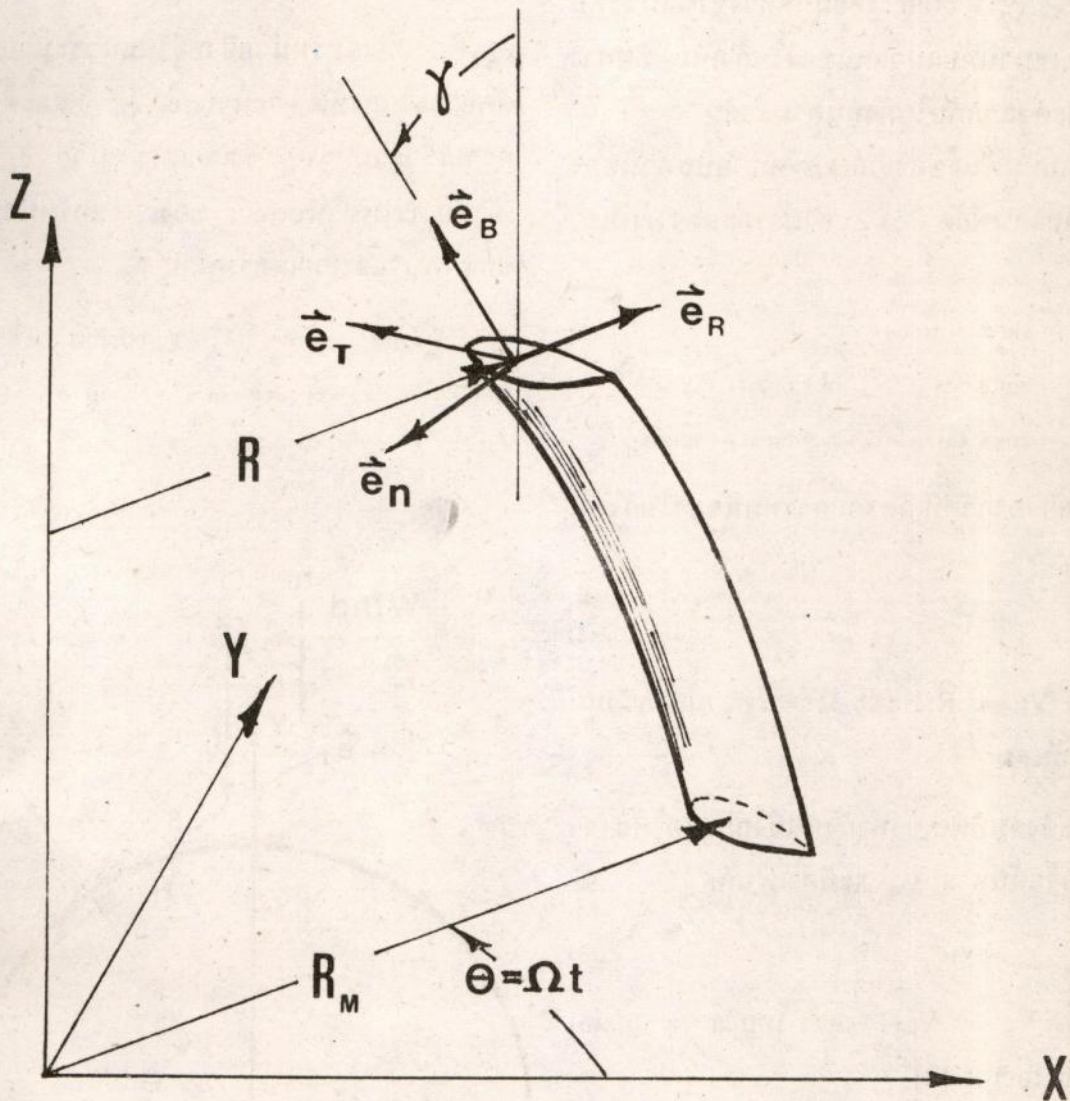
ในบทความนี้จะมุ่งกล่าวเฉพาะกังหันลมแนวตั้งชนิดแรงยก ซึ่งจะมีความเร็วรอบค่อนข้างสูงเหมาะสมสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า ในการออกแบบผลิตกังหันลมขึ้นหนึ่งตัว ผู้ออกแบบควรจะต้องรู้ถึงสมรรถนะและภาระบนใบกังหัน ภาระบนโครงสร้างของระบบกังหันและอื่น ๆ ซึ่งเราสามารถคาดคะเนหรือหาผลเฉลยของสิ่งเหล่านี้โดยการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมได้ ซึ่งในการวิเคราะห์นั้นจะต้องอาศัยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอากาศพลศาสตร์เพื่อนำมาวิเคราะห์แรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากการที่

*ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อากาศไหลผ่านตัดกับใบกังหันที่หมุนอยู่ สำหรับแนวทางการนำทฤษฎีอากาศพลศาสตร์มาใช้กับกังหันลม แนวตั้ง จะมีแนวทางในการวิเคราะห์ทำนองเดียวกับทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมแนวนอน[1][2] จลนศาสตร์ (kinematics)

การวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม

แนวตั้ง เริ่มจากการพิจารณาส่วนของใบกังหันที่หมุนอยู่ในขณะที่ลมพัดเข้าหาหน้ามีความเร็ว V_w และเพื่อให้ผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ สามารถใช้กับกังหันลมแนวตั้งชนิดแรงยกรูปแบบต่าง ๆ ในบทความนี้จึงใช้แบบจำลองซึ่งสามารถดัดแปลงให้เป็นแบบจำลองของกังหันลมได้หลายแบบ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนของใบกังหันแนวตั้งพร้อมด้วยเวกเตอร์หน่วยที่ตรึงอยู่บนภาคตัดขวางของใบกังหัน

รูปที่ 1 แสดงถึงส่วนของใบกังหันลมที่มีรูปภาคตัดขวางเป็นรูปแบนอากาศและตัวใบโค้งทำมุม γ กับแนวตั้ง ซึ่งถ้าเป็นกังหันแบบ Darrieus มุมบิดของใบกังหัน β มักมีค่าเท่ากับศูนย์ และส่วนโค้งของใบชนิดนี้จะมีรูปร่างที่ทำให้ภาระซึ่งเกิดขึ้นบนใบกังหันนั้นเป็นภาระจากแรงดึง (tensile) อย่างเดียว ซึ่งเราเรียกลักษณะโค้งของใบกังหันแบบ Darrieus

ว่า โค้งลักษณะ troposkien ส่วนในกรณีที่เป็นกังหันลมแนวตั้งชนิดใบตั้ง มุม γ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่ารัศมี R จะเท่ากันหมด มุมบิดของใบ β จะมีหรือไม่ก็ได้

ในรูปที่ 1 นอกจากจะแสดงถึงส่วนของใบกังหันแล้ว ยังแสดงถึงแกนพิกัดและเวกเตอร์หน่วยที่เกี่ยวข้อง โดยให้แกนพิกัด XYZ ตรึงแน่นกับพื้น

ณ จุดศูนย์กลาง rotor โดยมีแกน Z เป็นแนวดิ่ง และให้ลมพัดเข้ามาในทิศทางแนวแกน -Y ให้การกวาดของมุมของใบกังหันมีค่า $= \theta(\Omega, t)$ โดยเริ่มกวาดจากแกน X และให้เวกเตอร์หน่วย $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ เป็นเวกเตอร์ที่ชี้ในทิศทางบวกของแกน XYZ ตามลำดับ บนภาคตัดขวางของใบกังหันมีเวกเตอร์หน่วย $\vec{e}_R, \vec{e}_B, \vec{e}_T, \vec{e}_n$ ดังอยู่ โดยมีทิศทางชี้ในแนวรัศมี R ทิศทางขนานกับแนวแกนของใบกังหัน ทิศทางสัมผัส และตั้งฉากกับใบกังหันตามลำดับ

ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์หน่วยบนส่วนของใบกังหันกับแกนพิกัด XYZ สามารถแสดงได้เป็น

$$\begin{aligned}\vec{e}_R &= \vec{i} \cos \theta + \vec{j} \sin \theta \\ \vec{e}_T &= -\vec{i} \sin \theta + \vec{j} \cos \theta \\ \vec{e}_n &= -\vec{i} \cos \theta \cos \gamma - \vec{j} \sin \theta \cos \gamma - \vec{k} \sin \gamma \\ \vec{e}_B &= -\vec{i} \cos \theta \sin \gamma - \vec{j} \sin \theta \sin \gamma + \vec{k} \cos \gamma\end{aligned} \quad \text{.....(1)}$$

ความเร็วของอากาศที่เกิดจากการหมุนของใบกังหันมีค่า

$$\vec{V}_t = -V_t \vec{e}_T \quad \text{.....(2)}$$

เมื่อ $V_t = R\Omega$ และ Ω = ความเร็วเชิงมุมของใบกังหันลม

ความเร็วของลมที่พัดเข้าหาใบกังหันซึ่งถูกชดเชยให้ช้าลงจากความเร็วต้นทาง V_w จะมีค่าเท่ากับ

$$\vec{V}_1 = -V_a \vec{j} \quad \text{.....(3)}$$

เมื่อ $V_a = V_w(1-a)$ โดย a = axial induction factor [2]

ดังนั้นความเร็วของอากาศซึ่งผู้สังเกตการณ์ที่นั่งอยู่บนส่วนของใบกังหันเห็นจะมีค่า

$$\vec{W} = \vec{V}_1 + \vec{V}_t = -V_a \vec{j} - V_t \vec{e}_T \quad \text{.....(4)}$$

ความเร็วของอากาศในระนาบของส่วนใบกังหันจะมีค่า

$$\begin{aligned}W_e &= (\vec{W} \cdot \vec{e}_n) \vec{e}_n + (\vec{W} \cdot \vec{e}_T) \vec{e}_T \\ &= V_a \sin \theta \cos \gamma \vec{e}_n - (V_t + V_a \cos \theta) \vec{e}_T\end{aligned} \quad \text{.....(5)}$$

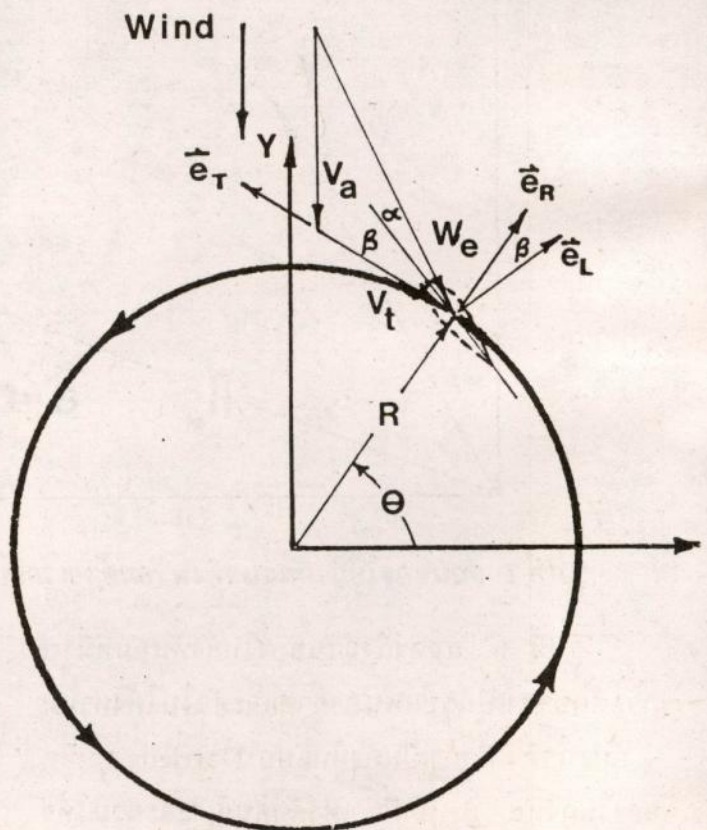
ทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ (Blade element theory)

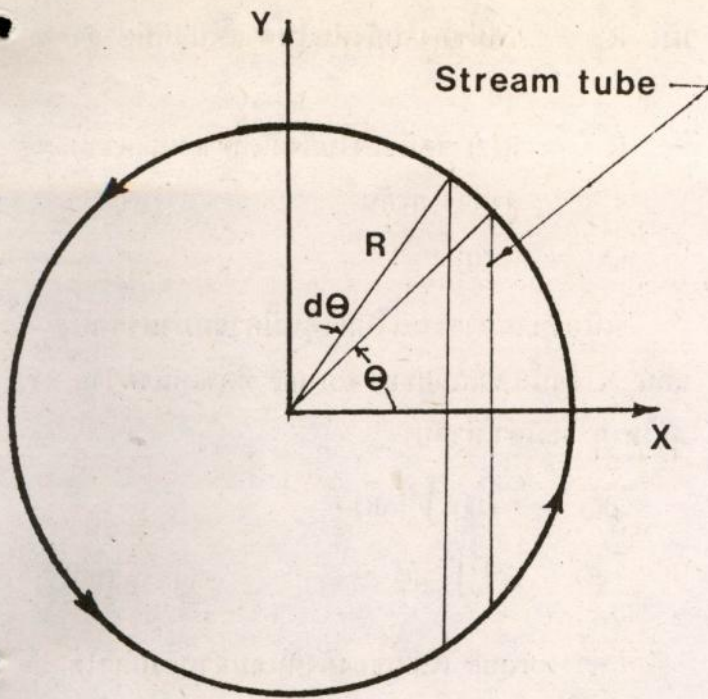
ภายใต้สมมติฐานของอากาศพลศาสตร์ 2 มิติ (ละทิ้งความเร็วในแนวขนานกับแกนใบกังหัน (ในทิศทางของเวกเตอร์หน่วย $\vec{e}_B$)) แรยยกบนส่วนของใบกังหันซึ่งยาว ds จะมีค่าเท่ากับ

$$d\vec{L} = 1/2 \rho W_e^2 c_L ds \vec{e}_L \quad \text{.....(6)}$$

$\vec{e}_L$ คือ เวกเตอร์หน่วยซึ่งอยู่ในแนวระนาบของภาคตัดขวางใบกังหัน (ระนาบ $\vec{e}_n \perp \vec{e}_T$) และตั้งฉากกับความเร็วรวม W_e ซึ่งเวกเตอร์หน่วย $\vec{e}_L$ จะมีค่าเท่ากับ cross product ของเวกเตอร์หน่วยในแนวของ W_e และเวกเตอร์หน่วย $\vec{e}_B$

$$\begin{aligned}\vec{e}_L &= -1/W_e [(V_t + V_a \cos \theta)(\vec{i} \cos \theta \cos \gamma \\ &\quad + \vec{j} \sin \theta \cos \gamma + \vec{k} \sin \gamma) \\ &\quad - V_a \sin \theta \cos \gamma (\vec{j} \cos \theta - \vec{i} \sin \theta)] \dots(7)\end{aligned}$$





(ข)

รูปที่ 2 ภาพตัดขวางส่วนของใบพัด พร้อมทั้ง

ก) ความเร็วที่เกี่ยวข้อง

ข) Stream tube ของ flow ที่พิจารณา

ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน

(Axial momentum theory)

จากการนำทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนมาใช้กับลำอากาศ (stream tube) ที่อยู่บน rotor plane ดังรูปที่ 2 ค่าแรงที่เกิดขึ้นตามแนวแกน Y นั้น จะสามารถคำนวณได้จากการพิจารณาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมที่ต้นทางและปลายทาง

$$dT = \rho V_a dA (V_2 - V_w) \quad \dots\dots(8)$$

โดยที่ T = แรงในทิศทาง Y

$V_a = V_w(1-a)$ ความเร็วลมที่ rotor plane

V_w = ความเร็วลมต้นทาง

$V_2 = V_w(1-2a)$ ความเร็วลมปลายทาง

$dA = R d\theta |\sin \theta| dZ$ คือพื้นที่ภาคตัดขวางของลำอากาศ

$$dT = -2\rho V_w^2(1-a)aR |\sin \theta| d\theta dZ \quad \dots\dots\dots(9)$$

ทฤษฎีสตริป (Strip theory)

เมื่อพิจารณาลำอากาศในรูปที่ 2 จะเห็นว่าในการที่ใบกังหันหนึ่งใบหมุนครบหนึ่งรอบนั้น ใบกังหันจะมีโอกาสอยู่ในลำอากาศที่พิจารณา 2 ครั้ง คืออยู่ทางด้านหน้าของ rotor หนึ่งครั้ง และทางด้านหลังของ rotor อีกหนึ่งครั้ง ดังนั้นใบกังหันจะมีโอกาสอยู่ในลำอากาศเท่ากับ $2d\theta/(2\pi)$ ของเวลาที่ใช้ในการหมุน 1 รอบ และถ้าใบกังหันมีใบกังหัน B ใบ โอกาสจะเป็น $2Bd\theta/(2\pi)$

ภายใต้สมมติฐานที่ว่าใบกังหันในขณะหมุนไปอยู่ในลำอากาศที่ตำแหน่งด้านหลังของ rotor จะไม่มีผลกระทบจากใบกังหันใบอื่นที่อยู่ในลำอากาศในส่วนด้านหน้าของ rotor หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือใบกังหันขณะที่อยู่ตำแหน่งด้านหน้า และด้านหลังจะมีการละและสมรรถนะเท่ากัน แรงยกในแนวของลำอากาศ (แนว Y) จะมีค่าเท่ากับ dot product ของแรงยกกับเวกเตอร์หน่วย $\vec{j}$

$$\begin{aligned} d\vec{L} \cdot \vec{j} &= 1/2 \rho B W_e^2 C_L ds (2d\theta/2\pi) \vec{e}_L \cdot \vec{j} \\ &= -1/2 \rho B W_e^2 C_L V_r \sin \theta dZ d\theta / \pi \quad \dots\dots(10) \end{aligned}$$

เมื่อ $dZ = ds \cos \gamma$, $V_r = R\Omega$

นำแรงบนใบกังหันจากสมการ (10) มาเท่ากับแรงที่เกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมจากสมการ (9) จะได้

$$4a(1-a) = (Bc/R)(R\Omega/V_w)(C_L/\pi)(W_e/V_w) \quad \dots\dots(11)$$

โดยที่มีมุม ϕ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลบวกของมุมปะทะ α กับมุมบิดของใบกังหัน β

$$\begin{aligned} \phi &= \alpha + \beta \\ &= \tan^{-1} [\{ V_w(1-a) \sin \theta \cos \gamma \} / \\ &\quad \{ V_w(1-a) \cos \theta + R\Omega \}] \quad \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

ค่า axial induction factor, a, ของส่วนใบกังหันบนแต่ละตำแหน่งของใบสามารถหาได้ โดยการ iterate ต่อไปนี้คือ

1. ที่ตำแหน่งหนึ่งบนใบกังหัน R และที่มุม θ ค่าหนึ่ง สมมติค่า a

2. คำนวณค่า ϕ : $\phi = \tan^{-1} \{ [V_w(1-a) \sin \theta \cos \gamma] / [V_w(1-a) \cos \theta + R\Omega] \}$

3. คำนวณค่า α : $\alpha = \phi - \beta$

4. คำนวณค่า C_L จากข้อมูลของใบกังหันที่มุม α

5. คำนวณค่า a จากสมการ (11) และ (5)

6. เปรียบเทียบค่า a ที่คำนวณได้ใหม่จากข้อ 5 กับค่าเก่า ถ้าเท่ากันหรืออยู่ในขอบเขตที่กำหนดก็หยุด ถ้าไม่เท่ากันเริ่มต้นข้อ 2 ใหม่จนกว่าจะได้ค่าที่ต้องการ

7. จากนั้นก็เปลี่ยนค่ามุม θ โดยเริ่มที่ข้อ 1 ใหม่จนครบหนึ่งรอบของการหมุน

8. เปลี่ยนค่ามุม γ หรือเปลี่ยนตำแหน่งของใบ โดยเริ่มจากข้อ 1 ใหม่จนครบความยาวของใบกังหัน

จะสังเกตเห็นว่า ในการหาค่า axial induction factor นั้น จะละทิ้งแรงหน่วงในสมการของแรงบนใบกังหันเพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐานที่ใช้กับทฤษฎีโมเมนตัม และถ้าหากนำค่าแรงหน่วงมาคิดด้วยในทฤษฎีสตริป จะทำให้ผลเฉลยสมการที่ (11) มีค่าอนันต์หรือเกิด singularity ที่ $\theta = 0^\circ$ และ $\theta = 180^\circ$

หลังจากได้ค่าของ a แล้ว ก็จะสามารถหาค่า torque และ power ได้ โดยพิจารณาจากแรงที่เกิดขึ้นบนใบกังหันซึ่งรวมถึงแรงหน่วง (Drag) บนใบกังหันด้วย

Torque จากแรงยกและแรงหน่วงบนใบกังหันมีค่า

$$\begin{aligned} dQ &= \vec{RdL} \cdot \vec{e_T} + \vec{RdD} \cdot \vec{e_T} \\ &= \frac{R_m^2}{2} \rho V_w^2 \frac{Bc}{R} \frac{W_e}{V_w} \left[C_L(1-a) \sin \theta \right. \\ &\quad \left. - \frac{C_D}{\cos \gamma} \left(\frac{R\Omega}{V_w} + (1-a) \cos \theta \right) \right] \frac{Rdz}{R_m} \dots\dots(13) \end{aligned}$$

เมื่อ R_m = รัศมีของใบกังหันในตำแหน่งที่มีค่าสูงสุด

$R = R(z)$ รัศมีของใบกังหันที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ กัน

Q = torque

เนื่องจากภาระบนใบกังหันมีค่าสมมาตรรอบแกน X ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ torque ที่ตำแหน่งความสูงใด ๆ จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} d\bar{Q} &= 1/(2\pi) \int_0^{2\pi} dQ \\ d\bar{Q} &= 1/\pi \int_0^\pi dQ \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

ค่า torque เฉลี่ยของกังหันลมสามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการ (14) ตลอดความสูงของใบกังหัน

ค่ากำลังงานของกังหันลมก็คือ ผลคูณระหว่าง torque กับความเร็วเชิงมุมของกังหันลม

ดังนั้นค่ากำลังงานสามารถเขียนได้เป็น

$$P = \Omega \int_0^{Z_{max}} (dQ/dZ) dZ \dots\dots\dots(15)$$

P = กำลังงาน (power)

บทส่งท้าย

จะเห็นได้ว่าจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมแนวตั้งชนิดแรงยกที่บรรยายไว้ในบทความนี้ จะทำให้สามารถทำนายสมรรถนะของกังหันลมแนวตั้งนี้ได้หากรู้ข้อมูลของใบกังหัน (แรงยกและแรงหน่วงที่มุมปะทะต่าง ๆ กันและที่ Reynolds numbers ที่เกี่ยวข้อง) ซึ่งก็จะเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบหรือเลือกกังหันให้เหมาะสมกับสภาพอากาศ (ความเร็วลม) และความต้องการทางด้านกำลังงานและยังเป็นทฤษฎีขั้นพื้นฐานที่สามารถนำไปวิเคราะห์หัดถึงภาระบนใบกังหันและโครงสร้างของกังหันลม ปัญหาการลั่นสะเทือนของระบบ เพื่อที่จะได้กังหันลมที่มีประสิทธิภาพสูงและมีโครงสร้างที่แข็งแรงพอเพียงด้วย

เอกสารอ้างอิง (Reference)

1. Wilson, R.E., Lissaman, P.S., and Walker, S.N.,
"Aerodynamic Performance of Wind Turbines",
Oregon State University, June 1976
2. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์, "อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม
แนวนอน" วิศวกรรมศาสตร์ 5 (มิถุนายน 2529) หน้า
51-57
3. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ "การวิเคราะห์กังหันลมที่อยู่ใน
สภาพหนีลม" วิศวกรรมศาสตร์ 5 (กันยายน 2529) หน้า
56-60