บทที่ 2
หลักการ เหตุผล และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

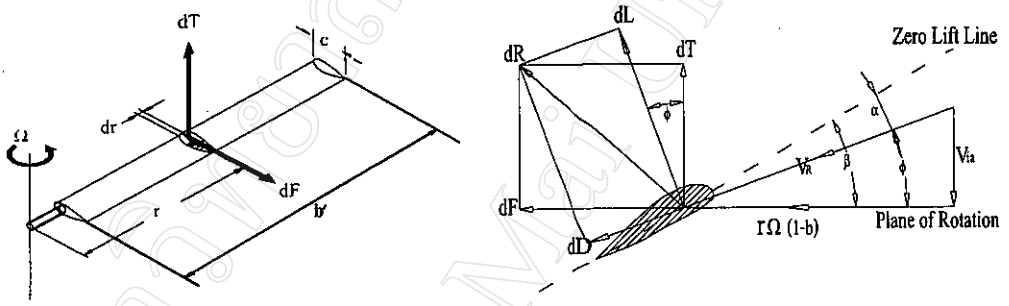
2.1 คุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ของภาคหน้าตัดปีก

คุณสมบัติที่สำคัญหลักๆ ของภาคตัดปีกมีดังต่อไปนี้

2.1.1 อัตราส่วนสนทรรศ (Aspect ratio)

อัตราส่วนสนทรรศ (AR) คือ อัตราส่วนความกว้างของปีกเมื่อเทียบกับคอร์ด c ดังรูป 2.1 (ก) และเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [สัมพันธ์ ไชยเทพ, 2535] คือ

$$AR = \frac{b'}{c} \tag{2.1}$$



(ก) (ข)

รูป 2.1 แสดงความเร็วลมและแรงที่กระทำบนเบลดอิลิเมนท์

ที่มา : McCormic, 1995

2.1.2 สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านของภาคตัดปีก

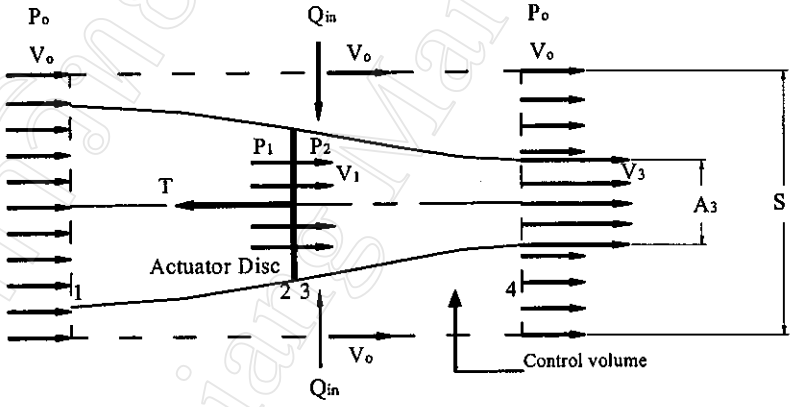
เมื่อมีความเร็วลมไหลผ่านภาคตัดปีกหรือรูปทรงวัตถุทั่วไปอย่างสม่ำเสมอก็จะทำให้มีแรงกระทำเกิดขึ้น และเกิดความแตกต่างของความเร็วบนผิวของวัตถุ ในที่นี้คือ ปีกใบพัด โดยที่ผิวด้านบนของปีกจะมีความเร็วสูงกว่าผิวด้านล่างจึงทำให้ความดันที่ผิวด้านบนต่ำกว่าที่ผิวด้านล่าง ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงยกขึ้น แรงที่ตั้งฉากกับความเร็วสัมพัทธ์ถูกเรียกว่า แรงยก ส่วนแรงที่มีทิศเดียวกับความเร็วสัมพัทธ์ถูกเรียกว่า แรงต้าน ดังรูป 2.1(ข) และเขียนอยู่ในรูปไร้หน่วย คือ สัมประสิทธิ์แรงยก C_l และสัมประสิทธิ์แรงต้าน C_d โดยมีรูปแบบสมการ [Lysen, 1982] คือ

$$dC_l = \frac{dL}{\frac{1}{2}\rho W^2 c.dr} \tag{2.2}$$

$$dC_d = \frac{dD}{\frac{1}{2}\rho W^2 c.dr} \tag{2.3}$$

2.1.3 ทฤษฎีโมเมนตัมในแนวแกน

ทฤษฎีโมเมนตัมในแนวแกนจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนใบพัดกับความเร็วในการไหลของของไหล สมมุติฐานเบื้องต้นสำหรับพิจารณาถ่ายแรงในทฤษฎีนี้ [McCormick, 1995] คือ ความเร็วของอากาศที่ผ่านใบพัดเท่ากันทั่วทั้งจานถ่ายแรง ความดันแตกต่างของอากาศคร่อมจานขับมีค่าเท่ากันทั่วทั้งพื้นที่จานถ่ายแรง การไหลผ่านใบพัดกระแสจะแยกจากอากาศรอบข้างโดยขอบเขตการไหลจินตภาพซึ่งมีลักษณะเป็นท่อ และของไหลเป็นแบบยุบตัวไม่ได้ ดังรูป 2.2



รูป 2.2 จานถ่ายแรงและการไหลของอากาศ

ที่มา : McCormick, 1995

จากสมการโมเมนตัม สมการเบอร์นูลี่ (Bernoulli equation) และสมการความต่อเนื่อง จะสามารถหาสมการของความเร็ว และหาสมการของแรงขับเขียนความสัมพันธ์ดังนี้ [McCormick, 1995]

$$V_1 = \frac{(V_0 + V_3)}{2} \tag{2.4}$$

จากเงื่อนไขใบพัดไม่มีการเคลื่อนที่ $V_0 = 0$ ดังนั้น

$$V_1 = \frac{V_3}{2} \tag{2.5}$$

จาก $V_0 = 0$ ดังนั้นความเร็วลมที่ผ่านจานขับในแนวแกนเพลา (V_1) ก็คือความเร็วลมที่ถูกเหนี่ยวนำ (V_{ia})

สมการแรงขับ $T = \rho A_a V_{ia}^2$ (2.6)

2.1.4 ทฤษฎีเบลดอิลิเมนท์ (Blade element theory)

ทฤษฎีเบลดอิลิเมนท์ตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่า ไม่มีการรบกวนเกิดขึ้นระหว่างเบลดอิลิเมนท์ตลอดทั้งใบพัด และแรงที่กระทำบนเบลดอิลิเมนท์จะอยู่ในรูปของแรงยกและแรงต้านบนภาคตัดปีก

ทฤษฎีนี้เป็นการหาค่าแรงที่กระทำบนเบลดอิลิเมนท์ในรูปของดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) และอินติเกรต (Integrate) ตลอดความยาวใบพัดเพื่อหาค่าแรงขับและแรงบิด จากรูป 2.1(ข) สมมติ ทุกเบลดอิลิเมนท์เคลื่อนที่ในระนาบเดียวกัน แรงขับ dT และแรงบิด dQ สามารถหาได้จากแรงลัพธ์ที่มีทิศทางในแนวตั้งฉากและขนานกับระนาบการหมุนของโรเตอร์ ตามลำดับ ดังนั้นสมการของแรงขับและแรงบิด [McCormick, 1995] คือ

$$dT = \frac{1}{2}\rho V_R^{\,2}\left(C_L \cos\phi - C_D \sin\phi\right)c\,dr \tag{2.7}$$

$$dF = \frac{1}{2}\rho V_R^{\,2}\left(C_L \sin\phi + C_D \cos\phi\right)c\,dr \tag{2.8}$$

$$dQ = \frac{1}{2}\rho V_R^{\,2}\left(C_L \sin\phi + C_D \cos\phi\right)cr\,dr \tag{2.9}$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.7) และ (2.9) ตลอดความยาวกลีบใบจะได้ แรงขับ T และแรงบิด Q ของใบพัด

2.2 ทฤษฎีการหาประสิทธิภาพของอุโมงค์ลม

ในการหาประสิทธิภาพของอุโมงค์ลม ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างเช่น ลักษณะใบพัดของพัดลม ความเร็วรอบ ความสูญเสียที่ปลายใบ ฯลฯ ซึ่งในที่นี้จะไม่นำมาพิจารณา โดยประสิทธิภาพของอุโมงค์ลมจะขึ้นอยู่กับกำลังที่เป็นประโยชน์เกิดการขับเคลื่อนมวลอากาศให้ไหลในช่วงทำงานด้วยความเร็วต่อกำลังที่ต้องป้อนให้แก่พัดลมที่เพลาจะได้ค่าประสิทธิภาพกำลังพัดลม (η_f) เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [สัมพันธ์ ไชยเทพ, 2527]

$$\eta_f = \frac{P_a}{P_s} \times 100 \tag{2.10}$$

โดยที่อัตราการไหลของมวลอากาศ ($\dot{m}$, $\frac{kg}{s}$) ที่ผ่านหน้าตัดช่วงทำงาน [Dougherty, 1985]

$$\dot{m} = \rho A_T V_T \tag{2.11}$$

และอัตราการเปลี่ยนพลังงานจลน์ของมวลอากาศ ($\dot{m}$) พิจารณาที่หน้าตัดช่วงทำงานให้เป็น P_a จะได้เป็น [สัมพันธ์ ไชยเทพ, 2527]

$$P_a = \frac{1}{2}\dot{m}V_T^2 \tag{2.12}$$

แทนค่า ($\dot{m}$) จากสมการ (2.11) ลงในสมการ (2.12) จะได้

$$P_a = \frac{1}{2}\rho A_T V_T^3 \tag{2.13}$$

2.3 ทฤษฎีความสูญเสียภายในอุโมงค์ลม

ประสิทธิภาพของอุโมงค์ลมในทางปฏิบัติจะแตกต่างจากทฤษฎี สาเหตุมาจากความสูญเสียต่าง ๆ เช่น แรงเสียดทาน การเปลี่ยนความเร็วในการไหล การเปลี่ยนทิศทางการไหลของอุโมงค์ลม เป็นต้น ในการหาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในอุโมงค์ลมจะแยกคิดเป็นส่วน ๆ ในเทอมความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียกับความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ผ่านแต่ละส่วนของอุโมงค์ เขียนความสัมพันธ์ดังนี้ [Pimpin and Bunyajitradulya, 1999]

$$h_{li} = K_i \frac{V_i^2}{2} \tag{2.14}$$

เมื่อเขียนในเทอมความสัมพันธ์ของความเร็วที่หน้าตัดทำงาน (V_T) และสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเทียบเท่า (K_i')ดังนี้ [Pimpin and Bunyajitradulya, 1999]

$$h_{li} = K_i' \frac{V_T^2}{2} \tag{2.15}$$

โดยที่

$$K_i = \left[\frac{V_T}{V_i}\right]^2 K_i' = \left[\frac{A_T}{A_i}\right]^2 K_i' \tag{2.16}$$

เมื่อเขียนความสัมพันธ์ในเทอมของความดันสูญเสียกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน (V_T) และสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเทียบเท่า (K_i') ในส่วนต่างๆของอุโมงค์ลมดังนี้

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \Sigma K_i' \frac{V_T^2}{2} \tag{2.17}$$

ในการพิจารณาความสูญเสียส่วนต่าง ๆ ของอุโมงค์ลม มีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 ความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (Friction Resistance Loss)

ในการเคลื่อนที่อากาศไหลผ่านเข้าไปในช่วงทำงานและช่วงปรับสภาพการไหลของอุโมงค์ลม จะเกิดแรงต้าน เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างผนังของอุโมงค์กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศ ทำให้เกิดการแยกการไหลและความปั่นป่วนในการไหล ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของอุโมงค์ลม, ความเร็วของอากาศ, เรโนลย์นัมเบอร์ และค่าความขรุขระของผนัง ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [Gorlin and Siennger, 1966]

$$h_{lf} = \lambda_f \frac{l}{D_H} \frac{V_T^2}{2} \tag{2.18}$$

2.3.2 ความสูญเสียเนื่องจากรังผึ้ง (Honeycomb loss)

ในส่วนของรังผึ้งจะช่วยในการปรับลักษณะการไหล (Stream line) ให้มีความเรียบสม่ำเสมอก่อนเข้าหน้าตัดช่วงทำงานของอุโมงค์ลม ค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของแรงเสียดทานที่ตัวรังผึ้งในแต่ละเซล โดยตัวแปรที่มีผล คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อของตัวรังผึ้ง (L_h) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของตัวรังผึ้ง (D_h) และค่าความพรุนของตัวรังผึ้ง (Porosity , β_h) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [Eckert, Mort and Jope, 1976]

$$h_{lh} = K_h \frac{V_T^2}{2} \tag{2.19}$$

$$K_h = \lambda_h \left(\frac{L_h}{D_h} + 3 \right) \left(\frac{1}{\beta_h} \right)^2 + \left(\frac{1}{\beta_h} - 1 \right)^2 \tag{2.20}$$

2.3.3 ความสูญเสียเนื่องจากตะแกรงลวด (Wire Gauze Screen Loss)

วิธีที่จะป้องกันการเกิดการไหลแยกตัวออกจากผนัง คือ การติดตั้งชุดตะแกรงลวด ซึ่งจากให้รูปร่างของความเร็วสม่ำเสมอมากขึ้น คือ ลดความเร็วเฉลี่ยที่แตกต่างกัน และการหักเหของทิศทางการไหล ซึ่งในการหาค่าความดันสูญเสีย จะพิจารณาหาค่า สัมประสิทธิ์ความดันสูญเสีย (K_w) ในเทอมของอัตราส่วนพื้นที่ใช้งาน (Open area ratio, β) ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [Suthapornnanon *et al.*, 1999]

$$h_{lw} = K_w \frac{V_T^2}{2} \tag{2.21}$$

โดยที่

$$K_w = \frac{0.9\,(1-\beta_w)}{\beta_w^2} \tag{2.22}$$

และ

$$\beta_w = \left(1 - \frac{d_w}{l_w} \right)^2 \tag{2.23}$$

2.3.4 ความสูญเสียเนื่องจากปากทางเข้าแบบระฆัง (Bell Mount Loss)

ในการเคลื่อนที่ของอากาศจากบรรยากาศเข้าสู่อุโมงค์ลม ได้มีการติดตั้งชุดปากทางเข้าแบบระฆัง เพื่อจะจัดรูปแบบการไหลของอากาศก่อนเข้าอุโมงค์ลม เพื่อให้เกิดความราบเรียบและสม่ำเสมอ ไม่ให้เกิดความปั่นป่วนก่อนเข้าอุโมงค์ลม ซึ่งตัวแปรที่มีผล คือ อัตราส่วนระหว่างรัศมีความโค้งของปากระฆัง (R) กับ เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ลม (D) ซึ่งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสีย (K_b) ตั้งแต่ 0.04-0.28 ที่ค่า R/D อยู่ในช่วง 0-0.15 เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [ประเสริฐ, 2541]

$$h_{lb} = K_b \frac{V_T^2}{2} \tag{2.24}$$

2.3.5 ความดันสูญเสีย เนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบการไหล (Transition Loss)

การเปลี่ยนทิศทางการไหลจากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นรูปวงกลม จะมีตัวแปรที่สำคัญ คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ และ ค่ามุมที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปร่าง ซึ่งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสีย (K_t) ตั้งแต่ 0.1 - 0.9 ที่มุมตั้งแต่ 8 องศา – 180 องศา ที่อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ตั้งแต่ 2 เท่าขึ้นไป เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [Stein, 1997]

$$h_{lt} = K_t \frac{V_T^2}{2} \tag{2.25}$$

2.4 สัมประสิทธิ์ไร้หน่วย

ในการพิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะของอุโมงค์ลมจะใช้สัมประสิทธิ์ไร้หน่วยเป็นตัวเปรียบเทียบ ซึ่งสัมประสิทธิ์ไร้หน่วยที่เสนอมีดังต่อไปนี้

2.4.1 เรย์โนล์นัมเบอร์ (Reynolds Number)

เรย์โนล์นัมเบอร์ คือ อัตราส่วนของแรงเฉื่อยกับแรงเนื่องจากความหนืดหรือแรงเสียดทาน ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [Streeter and Wylie, 1983]

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V l}{\mu} \tag{2.26}$$

2.4.2 สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficent)

สัมประสิทธิ์กำลังจะนิยามด้วย อัตราส่วนของกำลังงานที่ใช้ในการขับใบพัดต่อพลังงานจลน์ของมวลอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดช่วงทำงานของอุโมงค์ลม เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [Eck, 1973]

$$\lambda = \frac{P_s}{\frac{1}{2}\rho V_T^{\ 3} A_T} \tag{2.27}$$

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University