บทความวิชาการ

พื้นฐานอากาศพลศาสตร์ของปีกตรง

Basic Aerodynamic of Straight Wings

ทศพร สุนทรเภสัช
Tosaporn Soontornpasatch

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
E-mail: Tosaporns@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอหลักการพื้นฐานทางอากาศพลศาสตร์ของปีกตรง ซึ่งเป็นรูปทรงปีกแบบพื้นฐานของอากาศยานความเร็วต่ำทั่วไปในปัจจุบัน โดยปีกตรงมีคุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์พื้นฐานเช่นคล้ายกับแพนอากาศ แต่การไหลผ่านปีกนั้นเป็นการไหลแบบสามมิติซึ่งแตกต่างจากการไหลผ่านแพนอากาศที่เป็นสองมิติ จึงทำให้ค่าตัวแปรทางอากาศพลศาสตร์ คือ สัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าที่แตกต่างกับแพนอากาศ ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตัวแปรทางอากาศพลศาสตร์ดังกล่าวได้แก่ รูปแบบของปีก หน้าตัดของปีก อัตราส่วนความเรียวและอัตราส่วนความกว้างปีกยกกำลังสองต่อพื้นที่ ซึ่งตัวแปรดังกล่าวเป็นสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาเสมอในการคำนวณค่าตัวแปรทางอากาศพลศาสตร์ของปีก นอกจากนี้รูปแบบของปีกยังส่งผลต่อรูปแบบของการไหลแยกตัวในสภาวะที่เกิดการร่วงหล่นอีกด้วย ดังนั้นความรู้และความเข้าใจในพื้นฐานอากาศพลศาสตร์ของปีกจึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบอากาศยาน

คำสำคัญ : ปีกอากาศยาน อากาศพลศาสตร์ การออกแบบอากาศยาน

Abstract

The purpose of this article is to briefly review the basic aerodynamic of straight wing which is the basic pattern of the most low speed aircraft in the present day. The straight wing has the basic aerodynamic principle nearly the same as the airfoil. However, the flow field over the straight wing is three-dimensional pattern which differ from the two-dimensional flow field of airfoil. Therefore, the wing aerodynamic parameters such as lift coefficient and drag coefficient differ from the airfoil too. The shape parameters that effect the wing aerodynamic characteristics are wing platform, wing section profile, taper ratio and aspect ratio. These parameters are used to calculate value of wing aerodynamic parameters. Moreover, some parameters such as wing platform also effect flow separation pattern when wing is in stall condition. Therefore, the knowledge and understanding of the basic aerodynamic of straight wing is very important in aircraft design.

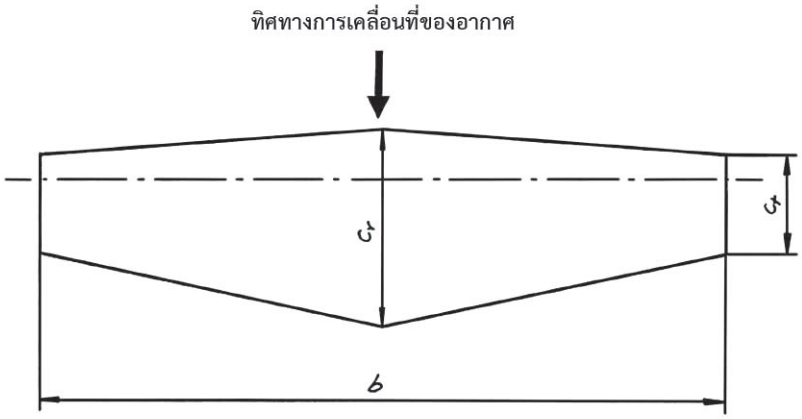
Keywords : Aircraft Wings, Aerodynamics, Aircraft Design.

1. บทนำ

ปีกเป็นส่วนสำคัญของอากาศยานแบบปีกติดลำตัวทุกแบบ อากาศยานเหล่านั้นจะสามารถลอยตัวในอากาศได้โดยอาศัยแรงยกที่สร้างจากปีกเป็นหลัก ในปัจจุบันจะพบว่าปีกของอากาศยานมีรูปแบบหลายอย่างทั้งนี้รูปทรงดังกล่าวเกิดจากการออกแบบโดยพิจารณาจากเงื่อนไขทางอากาศพลศาสตร์เป็นหลัก ปีกแต่ละแบบมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันและมีการใช้งานในช่วงการบินต่างๆ ที่ไม่เหมือนกัน ความรู้ความเข้าใจในอากาศพลศาสตร์สำหรับปีกของอากาศยานจึงเป็นสิ่งที่สำคัญในการออกแบบอากาศยาน ในบทความนี้จะนำเสนอหลักการพื้นฐานทางอากาศพลศาสตร์พื้นฐานของปีกตรงซึ่งเป็นรูปแบบปีกพื้นฐานของอากาศยานความเร็วต่ำทั่วไป (General Aviation) เพื่อให้ผู้อ่านได้เข้าใจถึงลักษณะทางกายภาพของการไหลและตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการไหลและแรงที่เกิดขึ้นบนปีกของอากาศยาน

2. รูปทรงพื้นฐานปีกตรง

ปีกตรงเป็นรูปแบบปีกพื้นฐานของอากาศยานซึ่งสามารถแสดงดังภาพที่ 1 โดยตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญของปีกตรงมีดังนี้



ภาพที่ 1 *แสดงรูปทรงพื้นฐานของปีกตรง*

1) ความยาวคอร์ดที่โคนปีกและปลายปีก (Root and Tip Chord Length, C_r,C_t)

2) ความกว้างของปีก (Wing Span, b)

3) อัตราส่วนความเรียวปีก (Taper Ratio, λ)

$$\lambda = C_t/C_r \tag{1}$$

4) พื้นที่ปีก (Wing Area, S)

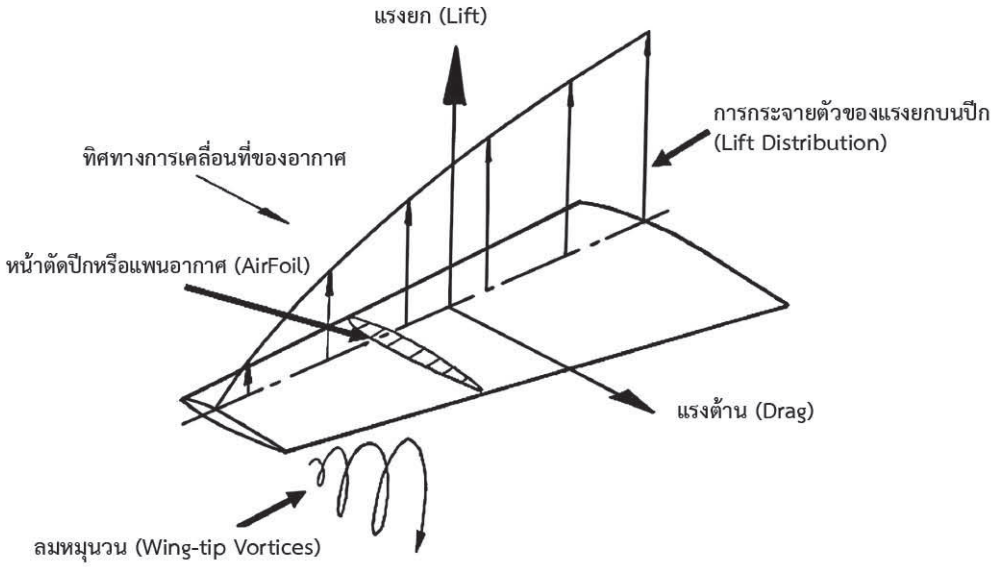
$$S = \frac{1}{2}(C_r + C_t)b \tag{2}$$

5) ค่าอัตราส่วนความกว้างกำลังสองต่อพื้นที่ปีก (Aspect Ratio, AR)

$$AR = \frac{b^2}{S} \tag{3}$$

สำหรับหน้าตัดของปีกมีรูปทรงแบบแพนอากาศ ซึ่งทำให้เกิดแรงยกเมื่อมีลมไหลผ่าน ในบริเวณปีกจะมีพื้นผิวควบคุม เช่น Flap หรือ Ailerons ซึ่งใช้เพิ่มแรงยกและควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกนของอากาศยาน อย่างไรก็ตามในปีกอากาศยานบางแบบจะมีการปรับมุมปะทะของหน้าตัดในแต่ละจุดของปีกไม่เท่ากันซึ่งเรียกว่า การบิดทางรูปทรงของปีก (Wing Twisted) โดยในกรณีที่มุมปะทะของหน้าตัดปีกที่บริเวณโคนมากกว่าบริเวณปลายปีกจะเรียกว่าการบิดแบบ Washout [1]

3. การไหลของอากาศบนปีก



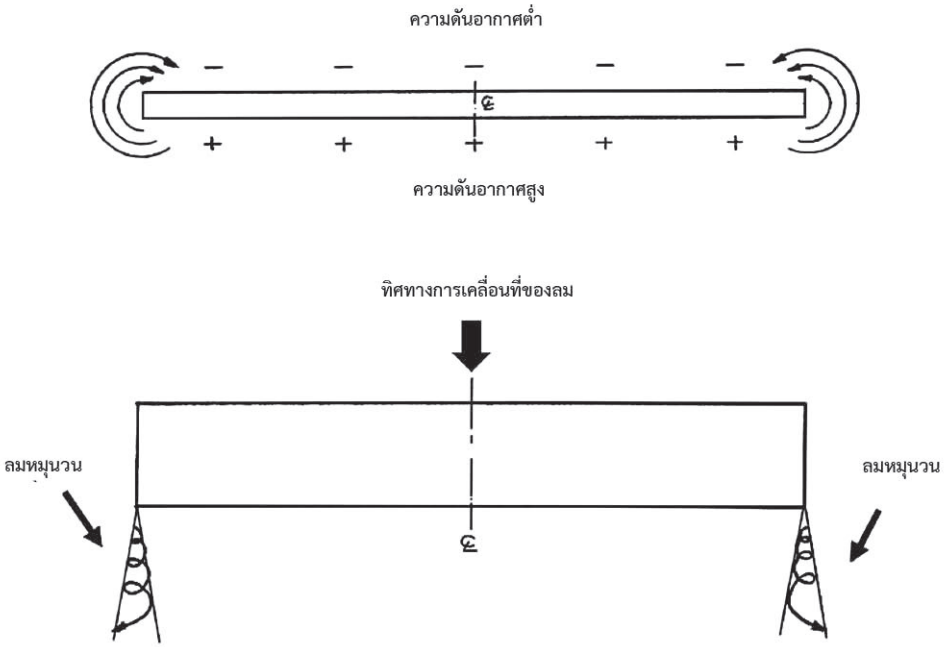
ภาพที่ 2 *แสดงแรงและการกระจายของแรงที่เกิดบนปีก*

เนื่องจากปีกมีรูปทรงหน้าตัดเป็นแพนอากาศ คือ เป็นรูปทรงเพรียวลม ผิวด้านบนและด้านล่างมีความโค้ง เมื่ออากาศไหลผ่านจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลและความดันตามจุดต่างๆ ซึ่งโดยมากความดันที่ผิวด้านล่างจะสูงกว่าผิวด้านบนจึงทำให้เกิดแรงยกขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดแรงในแนวทิศทางการไหลของอากาศหรือแรงต้านด้วยเช่นกัน แรงยกบนปีกจะมีลักษณะเป็นแรงกระจายตัว (Distribution Forced) ตามแนวความกว้างของปีก ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2 อย่างไรก็ตามปีกจะแตกต่างจากแพนอากาศตรงที่ปีกมีขอบปลายทั้งสองด้าน ดังนั้นที่บริเวณปลายปีกจะมีอากาศไหลวนจากด้านผิวล่างขึ้นสู่ผิวด้านบนของปีก (Wing-tip Vortices) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3 ลมหมุนที่เกิดขึ้นส่งผลให้แรงยกตามจุดต่างๆ ของปีกลดลงเล็กน้อยและทำให้แรงต้านเพิ่มขึ้น ซึ่งแรงต้านดังกล่าวเรียกว่า แรงต้านเหนี่ยวนำ (Induced Drag)

4. สัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านเหนี่ยวนำของปีก

เมื่อพิจารณาปีกกับแพนอากาศที่มีรูปทรงหน้าตัดเหมือนกันจะพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกต่อมุมปะทะของปีกมีลักษณะเช่นเดียวกัน คือ เมื่อมุมปะทะมากขึ้นสัมประสิทธิ์แรงยกจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4 แต่ค่าความชันในกรณีของปีกจะน้อยกว่าของแพนอากาศ ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากลมหมุนที่ปลายปีก

ตามที่ได้กล่าวไปแล้ว อย่างไรก็ตามค่ามุมปะทะที่ทำให้แรงยกมีค่าเป็นศูนย์ของปีกนั้นจะมีค่าเท่ากับของแพนอากาศ ในการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของปีกตรงใดๆ ไม่สามารถนำค่าสัมประสิทธิ์แรงยกจากแพนอากาศมาใช้ได้โดยตรง เพราะจะทำให้ได้ค่ามากกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของปีก จะต้องพิจารณาหาค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและมุมปะทะใหม่โดยใช้สมการ (4) จากนั้นจึงคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงยกของปีกโดยใช้สมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ



ภาพที่ 3 *แสดงการเกิดลมหมุนวนจากผิวปีกด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน*

$$a = \frac{a_0}{1+a_0/(\pi e_1 AR)} \tag{4}$$

$$C_L = a(\alpha - \alpha_{L=0}) \tag{5}$$

$$L = q_\infty S C_L \tag{6}$$

โดย a คือ ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกและมุมปะทะของปีก (1/Radian)

a_0 คือ ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกและมุมปะทะของแพนอากาศในทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 2π (1/Radian)

e_1 คือ ค่า Wing Geometric Shape Factor สำหรับรูปทรงปีกตรงทั่วไปมีค่าในช่วง 0.95 [2]

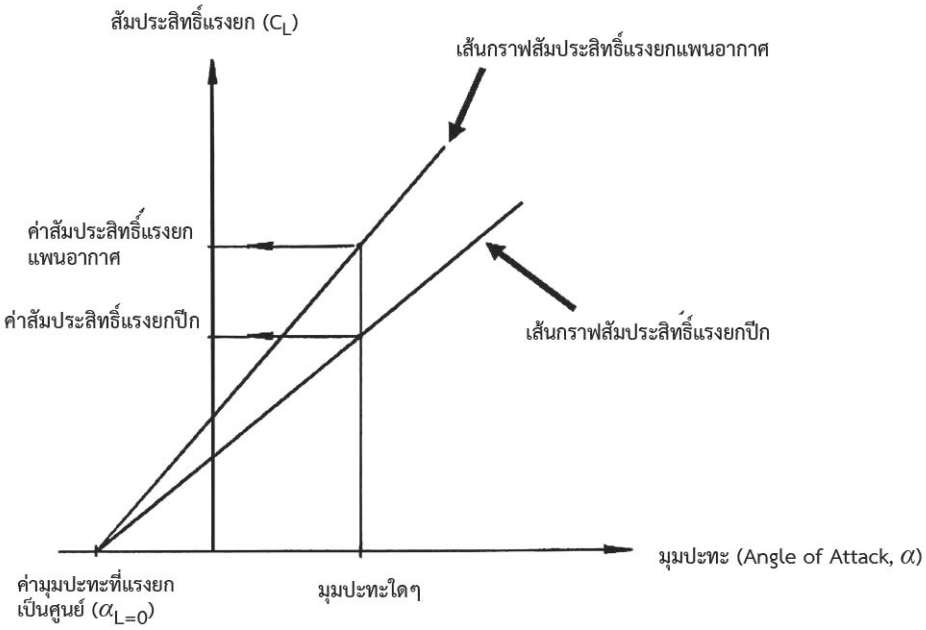
$\alpha, \alpha_{L=0}$ คือ มุมปะทะของปีกและค่ามุมปะทะที่สัมประสิทธิ์แรงยกเป็นศูนย์ (Degree)

L, C_L คือ แรงยก (N) และสัมประสิทธิ์แรงยกของปีก

q_∞ คือ ค่าความดันของการไหลมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}\rho_\infty {U_\infty}^2$

โดย ρ_∞ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3) และ U_∞ คือความเร็วของอากาศ (m/s)

จากสมการที่ (4) จะพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความชันของสัมประสิทธิ์แรงยกคือ Aspect Ratio ของปีก โดยปีกที่มีค่า Aspect Ratio สูงจะมีค่าความชันของเส้นกราฟสัมประสิทธิ์แรงยกมากกว่าปีกที่มีค่าต่ำ



ภาพที่ 4 *แสดงการเปรียบเทียบเส้นกราฟความสัมพันธ์ของแพนอากาศและปีก*

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเหนี่ยวนำนั้นเกิดจากการไหลของลมหมุนที่ปลายปีก ดังนั้นในทางอากาศพลศาสตร์จึงพิจารณาค่าดังกล่าวว่า เกิดจากการไหลแบบไม่มีความหนืดการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเหนี่ยวนำ สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (7) อย่างไรก็ตามในการพิจารณาสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของปีกจะต้องพิจารณาผลของความหนืดของอากาศร่วมด้วย ดังนั้นสมการสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของปีกและแรงต้านของปีกสามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ

$$C_{D,i} = \frac{{C_L}^2}{\pi\mu(AR)} \tag{7}$$

$$C_D = c_d + C_{D,i} \tag{8}$$

$$D = q_\infty S C_D \tag{9}$$

โดย $C_{D,i}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเหนี่ยวนำ

D, C_D คือ ค่าแรงต้าน (N) และสัมประสิทธิ์แรงต้านของปีก

c_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรูปทรงแพนอากาศ (Profile Drag)

μ คือ ค่า Span Efficient Factor มีค่าในช่วง 0.98 ถึง 1.0 [3]

เมื่อพิจารณาสมการที่ (7) จะพบว่าแรงต้านเหนี่ยวนำมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงยก นั่นคือเมื่อค่า

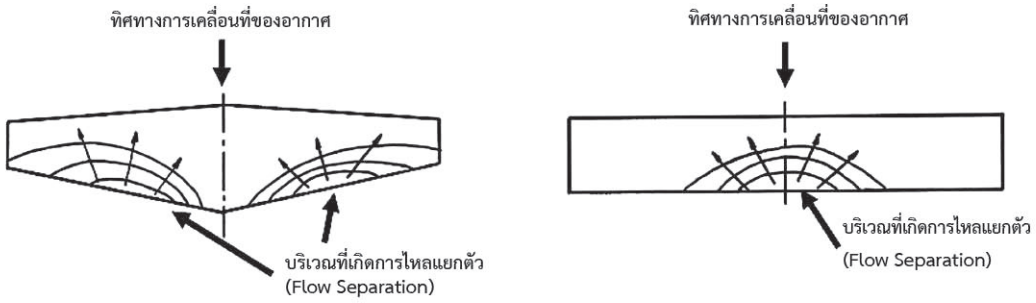
สัมประสิทธิ์แรงยกมากขึ้นแรงต้านเหนี่ยวนำจะเพิ่มตามในระดับกำลังสอง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงในขณะที่อากาศยานทำการบินที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมาก เช่น ตอนบินขึ้นหรือร่อนลง (Takeoff and Landing) เป็นต้น ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวลงจึงต้องใช้ตัวแปรอื่นๆ ในทางอากาศพลศาสตร์เข้ามาแก้ไข นั่นคือ ค่า Aspect Ratio ของปีกและค่าความเรียวปีก

5. ค่าความเรียวของปีกและค่า Aspect Ratio

อัตราส่วนความเรียวของปีกเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเหนี่ยวนำของปีก จากการคำนวณทางทฤษฎีและการทดสอบในอุโมงค์ลมพบว่า เมื่ออัตราส่วนความเรียวของปีกมีค่าน้อยลงค่าแรงต้านเหนี่ยวนำจะลดลงจนมีค่าต่ำสุดเมื่อค่าความเรียวอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.5 [1] ดังนั้นในการออกแบบปีกตรงสำหรับอากาศยานความเร็วต่ำค่าอัตราส่วนความเรียวปีกที่นิยมใช้จะอยู่ในช่วงดังกล่าว สำหรับตัวแปรที่สองที่ส่งผลต่อแรงต้านเหนี่ยวนำ คือ ค่า Aspect Ratio ของปีก ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (7) จะพบว่า เมื่อค่าดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเหนี่ยวนำลดลงเช่นกัน ดังนั้นอากาศยานปีกตรงในปัจจุบันส่วนใหญ่จะถูกออกแบบให้มีค่า Aspect Ratio อยู่ในช่วง 6 ถึง 9 [2] จึงทำให้ปีกอากาศยานส่วนใหญ่มีลักษณะความยาวคอร์ดสั้นและมีค่าความกว้างปีกมากดังเช่นที่เห็นในปัจจุบัน

6. การไหลแยกตัวและการร่วงหล่นของปีก

เมื่อปีกเปิดมุมปะทะมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แรงยกจะเพิ่มขึ้นดังที่ได้กล่าวไปแล้ว อย่างไรก็ตามเมื่อเปิดมุมปะทะถึงค่าหนึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงยกจะลดลงอย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าการร่วงหล่น (Stall) การร่วงหล่นมีสาเหตุมาจากไหลของอากาศมีการหมุนวนและเกิดการแยกตัวออกจากผิวของปีกซึ่งเป็นผลของความหนืด อย่างไรก็ตามรูปทรงของปีกมีผลต่อรูปแบบการไหลแยกตัวที่เกิดขึ้นเช่นกัน โดยในกรณีของปีกตรงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะเกิดการไหลแยกตัวขึ้นที่บริเวณโคนปีกแล้วค่อยๆ ขยายตัวไปสู่ปลายปีก ในทางกลับกันปีกเรียว (Taper Wings) จะเกิดการไหลแยกตัวที่บริเวณค่อนไปทางปลายปีกแล้วค่อยๆ ขยายตัวออกทั้งสองด้าน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 *แสดงบริเวณการเกิดและทิศทางการแพร่กระจายของการไหลแยกตัวบนปีก*

จากรูปแบบดังกล่าวในการออกแบบอากาศยาน ถ้าผู้ออกแบบต้องการให้เกิดความปลอดภัยในกรณีที่เครื่องบินเข้าสู่สภาวะร่วงหล่น ควรใช้รูปแบบปีกสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพราะเมื่อเกิดการไหลแยกตัว นักบินจะยังสามารถบังคับพื้นผิวควบคุม (Control Surface) ที่ปลายปีกเพื่อบังคับท่าทางการบินได้ซึ่งทำให้มีความปลอดภัยมากกว่าปีกตรงแบบเรียว อย่างไร

ก็ตามปีกแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้านั้นจะมีแรงต้านมากกว่าปีกตรงแบบเรียว ดังนั้นในการออกแบบจึงควรพิจารณาถึงความสมดุลในเรื่องดังกล่าวด้วยเช่นกัน

7. ตัวอย่างการคำนวณทางอากาศพลศาสตร์ของปีก

ในตัวอย่างนี้จะแสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_L) สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) ของปีกตรงที่มุมปะทะ 1.5 องศา ซึ่งรูปทรงปีกแสดงดังภาพที่ 1 ปีกมีความยาวคอร์ดที่โคนและปลายปีกเท่ากับ 2.5 และ 1.0 เมตร ตามลำดับ และมีความกว้างปีก 15.1 เมตร ปีกถูกสร้างจากแพนอากาศแบบ NACA4415 ซึ่งมีค่ามุมปะทะที่สัมประสิทธิ์แรงยกเท่ากับศูนย์เท่ากับ -4.0 องศา [4] และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรูปทรงแพนอากาศ (Profile Drag) เท่ากับ 0.0095 [4] กำหนดให้พิจารณาการไหลของอากาศที่ระดับความสูง 5,000 เมตร และมีความเร็วลม 140 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

วิธีทำ

ที่ระดับความสูง 5,000 เมตร มีความหนาแน่นของอากาศ 0.73643 kg/m^3 และที่ความเร็วลม 140 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 38.89 เมตรต่อวินาที จากรูปทรงของปีก อัตราส่วนความเรียวปีก พื้นที่และค่า Aspect Ratio สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1), (2) และ (3) จะได้

$$\lambda = \frac{1.0}{2.5} = 0.4 \tag{10}$$

$$S = \frac{1}{2}(2.5 + 1.0) \times 15.1 = 26.425 \qquad m^2 \tag{11}$$

$$AR = \frac{15.1^2}{26.425} = 8.629 \tag{12}$$

จากสมการที่ (4) จะได้ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกและมุมปะทะ

$$a = \frac{2\pi}{1+\frac{2\pi}{(\pi \times 0.95 \times 8.629)}} = 5.05 \qquad \text{(1/radian)} \tag{13}$$

ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของปีกและแรงยกของปีกคำนวณได้จากสมการที่ (5) และ (6)

$$C_L = 5.05 \times \big(1.5 - (-4.0)\big) \times (\pi/180) = 0.485 \tag{14}$$

$$L = \frac{1}{2} \times 0.7364 \times 38.89^2 \times 26.425 \times 0.485 \qquad N \tag{15}$$

$$L = 7{,}135.11 \quad N \tag{16}$$

จากสมการ (7) พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเหนี่ยวนำได้โดย

$$C_{D,i} = \frac{0.485^2}{\pi \times 0.98 \times 8.629} = 0.008854 \quad (17)$$

จากสมการที่ (8) และ (9) ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านและแรงต้านของปีกมีค่า

$$C_D = 0.0095 + 0.008854 = 0.018 \quad (18)$$

$$D = \frac{1}{2} \times 0.7364 \times 38.89^2 \times 26.425 \times 0.018 \quad N \quad (19)$$

$$D = 264.878 \quad N \quad (20)$$

8. สรุป

ปีกตรงมีคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์แบบเดียวกับแพนอากาศ คือ เมื่อมุมปะทะมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านจะมากขึ้นตาม อย่างไรก็ตามเนื่องจากปีกมีขอบเขตจำกัดทั้งสองด้านจึงทำให้เกิดลมหมุนที่ปลายปีกส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกลดลงเมื่อเทียบกับแพนอากาศรูปทรงเดียวกันและยังทำให้เกิดแรงต้านมากขึ้น ซึ่งแรงต้านที่เพิ่มขึ้นนั้นเรียกว่า แรงต้านเหนี่ยวนำ รูปทรงของปีกที่แตกต่างกันย่อมส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านเหนี่ยวนำต่างกัน โดยปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรดังกล่าวนั้น ได้แก่ อัตราส่วนความเรียวของปีกและค่า Aspect Ratio นอกจากนี้รูปทรงของปีกยังทำให้รูปแบบการเกิดการไหลแยกตัวบนปีกมีความแตกต่างกันด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการออกแบบปีกผู้ออกแบบจึงควรพิจารณาถึงความเหมาะสมในเรื่องดังกล่าว เพื่อให้ได้ปีกที่มีคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์เหมาะสมและทำให้อากาศยานมีสมรรถนะทางการบินที่ดี สำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาในรายละเอียดสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเอกสารต่างๆ ตามเอกสารอ้างอิงที่ได้แสดงไว้ท้ายบทความ

เอกสารอ้างอิง

[1] Raymer D.P. (1992). Aircraft Design: A Conceptual Approach. USA. AIAA Education Series
[2] Anderson J.D. (1999). Aircraft Performance and Design. Singapore. McGraw-Hill.
[3] Shevell R.S. (1988). Fundamental of Flight. 2nd edit. USA. Prentice Hall.
[4] Abbott I.H. Doenhoff A.E.V. (1959). Theory of Wing Sections. USA. Dover Publications.