

แนวคิดที่เพี้ยนไปเกี่ยวกับแรงยกบนปีกเครื่องบิน

เมื่อกล่าวถึงการลอยตัวของเครื่องบินในอากาศ หนังสือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีส่วนมากจะอธิบายคล้าย ๆ กันว่า เกิดจากการสร้างปีกเครื่องบินให้ด้านบนโค้งมากกว่าด้านล่าง เมื่อเครื่องบินเคลื่อนที่ไปในอากาศ อากาศที่ไหลผ่านด้านบนของปีกจะมีความเร็วมากกว่าอากาศที่ไหลผ่านใต้ปีก ผลจากการที่อากาศด้านบนของปีกเคลื่อนที่เร็วกว่าอากาศใต้ปีกทำให้ความดันของอากาศใต้ปีกมากกว่า



ซึ่งอ้างโดยใช้หลักของเบอร์นูลลี ทำให้เกิดแรงยกและเครื่องบินสามารถลอยอยู่ในอากาศได้ ทั้งหนังสือไทยและหนังสือต่างประเทศหลายเล่มในอดีตเขียนแบบนี้ และปัจจุบันก็ยังเขียนแบบนี้ มีหลายทฤษฎีที่อธิบายการเกิดแรงยกบนปีกเครื่องบินแต่ไม่มีใครที่ทฤษฎีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งที่อธิบายใน Encyclopedia และบนเว็บไซต์ ตลอดจนหนังสือเรียนบางเล่มบางแห่งยังคงคลาดเคลื่อนอยู่ จนทำให้เกิดความสับสนกับผู้ที่สนใจศึกษาเรื่องนี้โดยไม่จำเป็น เพราะว่าถ้าเป็นจริงดังที่อธิบายข้างต้น ทำไมเครื่องบินที่บินแสดงผาดโผนจึงบินหงายท้องได้

บทความนี้เขียนขึ้นเพื่อให้เป็นแนวคิด และลองพิจารณาเองว่า แรงยกที่ทำให้เครื่องบินบินอยู่ในอากาศขึ้นกับอะไรกันแน่ ซึ่งจะมีทั้งส่วนที่เป็นทฤษฎีและส่วนการทดลอง

การไหลที่อัดตัวได้ (compressible flow)

การบินคือการที่เครื่องบินเคลื่อนที่ไปในอากาศ หรืออาจกล่าวได้ว่าอากาศไหลผ่านปีกเครื่องบิน ซึ่งเป็น การเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างเครื่องบินกับอากาศ อากาศเป็นของไหลชนิดหนึ่ง ในวิชากลศาสตร์ ของไหลอาจแบ่งออกเป็น ของไหลที่อัดไม่ได้ และของไหลที่อัดได้

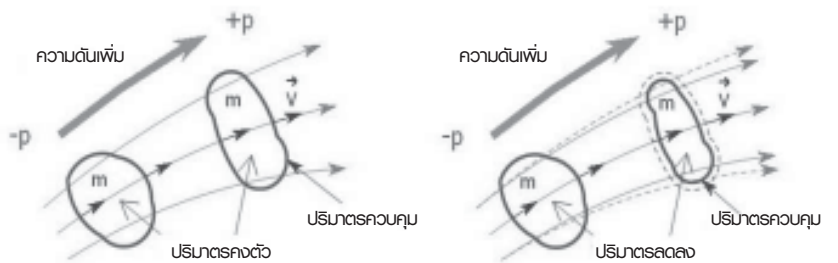
ของไหลที่อัดไม่ได้ (incompressible fluid) หมายถึงของไหลที่มีความหนาแน่นคงตัวหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากภายใต้การเปลี่ยนแปลงความดัน ตัวอย่างของไหลที่อัดไม่ได้เช่น โปรท น้ำ น้ำมัน

ของไหลที่อัดได้ (compressible fluid) หมายถึงของไหลที่ความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญภายใต้การเปลี่ยนแปลงความดัน ตัวอย่างของไหลที่อัดได้เช่น แก๊ส อากาศ

เมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมพันธ์กับบางสิ่งบางอย่างเราเรียกว่าการไหล (flow) เช่น การไหลของน้ำในท่อ การไหลของน้ำผ่านเรือ (หรือเรือแล่นในน้ำ) การไหลของอากาศผ่านเครื่องบิน (หรือเครื่องบินเคลื่อนที่อยู่ในอากาศ) ฯลฯ การไหลของของไหลอาจแบ่งออกเป็น 2 แบบคือการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ และการไหลแบบอัดตัวได้

การไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (incompressible flow) หมายถึงการไหลของของไหลที่ความหนาแน่นของของไหลคงตัวหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนไม่มีความสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน

การไหลแบบอัดตัวได้ (compressible flow) หมายถึงการไหลของของไหลที่ความหนาแน่นของของไหลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน



ก) การไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (incompressible flow) ข) การไหลแบบอัดตัวได้ (compressible flow)

รูปที่ 1

จากรูปที่ 1 พิจารณาของไหลที่บรรจุอยู่ในปริมาตรควบคุม (control volume, CV) ซึ่งกำหนดโดยเส้นที่ปิดล้อมรอบของไหลมวลคงตัว m

กรณีรูปที่ 1 ก) เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ความหนาแน่น ρ ของของไหลไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นปริมาตรของ CV คือ $V = \frac{m}{\rho}$ มีค่าคงตัว

กรณีรูปที่ 1 ข) เป็นการไหลแบบอัดตัวได้ ปริมาตรของ CV จะหดหรือขยายตามการเปลี่ยนแปลงของความดัน (p) (เส้นประแทนกรณีของการไหลแบบอัดตัวไม่ได้) ความหนาแน่นของของไหลในปริมาตรควบคุมเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาตรของปริมาตรควบคุม

การไหลของของไหลที่อัดไม่ได้จัดเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ส่วนการไหลของของไหลที่อัดตัวอาจเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ หรือการไหลแบบอัดตัวได้ก็ได้ เมื่อไหร่จึงจะสามารถพิจารณาการไหล (ของแก๊ส หรือ อากาศ) ว่าเป็นการไหลแบบอัดตัวได้

การพิจารณาว่าการไหลจะเป็นการไหลแบบอัดตัวได้ ต้องดูที่ตัวเลขแมช (Mach number, M)*

$M < 0.3$ เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้

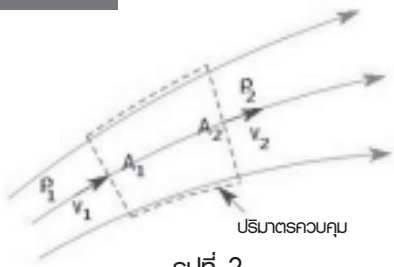
$M \geq 0.3$ เป็นการไหลแบบอัดตัวได้

อากาศที่มีความเร็วเทียบกับวัตตันน้อยกว่า 100 m/s หรือวัตตันเคลื่อนที่ในอากาศด้วยความเร็วน้อยกว่า 100 m/s จะมี $M < 0.3$ จัดเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ และอากาศที่มีความเร็วเทียบกับวัตตันตั้งแต่ 100 m/s ขึ้นไป จะมี $M \geq 0.3$ จัดเป็นการไหลแบบอัดตัวได้

ดังนั้นการไหลของอากาศผ่านเครื่องบินขณะขึ้น เครื่องบินกำลังบินจึงเป็นการไหลแบบอัดตัวได้

สมการพื้นฐานสำหรับกลศาสตร์ของไหล

สมการต่อเนื่อง



รูปที่ 2

สมการต่อเนื่องได้จากการประยุกต์ใช้กฎการทรงมวล ด้วยการไหลแบบสม่ำเสมอ (steady flow) ผ่านปริมาตรควบคุม อัตราไหลมวลที่เข้าและออกจากระบบต้องเท่ากัน

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

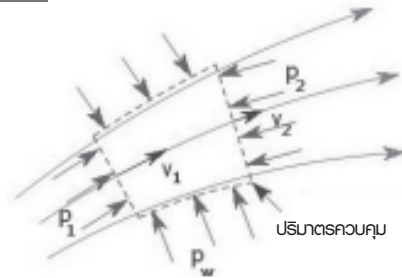
กรณีการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ $\rho =$ ค่าคงตัว

สมการต่อเนื่องจะเป็น

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

- เมื่อ
- \dot{m} = อัตราไหลมวล
 - A = พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล
 - v = ความเร็ว

สมการโมเมนตัมเชิงเส้น



รูปที่ 3

การไหลแบบสม่ำเสมอ ของไหลสามารถส่งแรงกระทำไปบนสิ่งที่อยู่รอบตัวได้จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

แรง = อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม

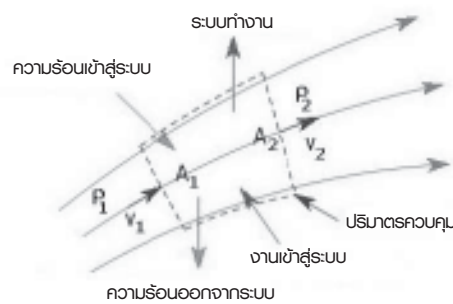
$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} m\vec{v}$$

พิจารณาของไหลในปริมาตรควบคุมในรูปที่ 3 สมการโมเมนตัมเชิงเส้นในแนวแกน X คือ

$$(p_1 A_1)_x - (p_2 A_2)_x + F_x = \dot{m} (v_2 - v_1)_x$$

เมื่อ $p =$ ความดัน

สมการพลังงาน



รูปที่ 4

จากกฎการทรงพลังงาน สมการพลังงานทั่วไปสำหรับการไหลแบบสม่ำเสมอจะได้

$$q + u_1 + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + z_1 g = u_2 + \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + z_2 g + w$$

- เมื่อ
- q = ปริมาณความร้อนที่เข้าหรือออกจากระบบ
 - w = งานที่ใส่ให้ระบบ หรือระบบทำงานให้สิ่งแวดล้อม
 - u = พลังงานภายในระบบ
 - p = ความดัน
 - v = ความเร็ว
 - ρ = ความหนาแน่น
 - z = ความสูงจากระดับอ้างอิง
 - g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

สำหรับในกรณีที่เป็นการไหลแบบสม่ำเสมอสมการพลังงานสามารถทำให้ง่ายลงได้โดยตั้งสมมติฐานว่า

1. ไม่มีความเสียดทานในการไหล นั่นคือไม่มีการสูญเสียพลังงานในการไหล

ดังนั้น $u_1 = u_2$

2. การไหลเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ρ มีค่าคงตัว
3. ไม่มีความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ $q = 0$
4. ไม่มีการให้งานกับระบบหรือระบบทำงาน $w = 0$

ด้วยสมมติฐานนี้สมการพลังงานจะเป็น

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + z_1 g = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + z_2 g$$

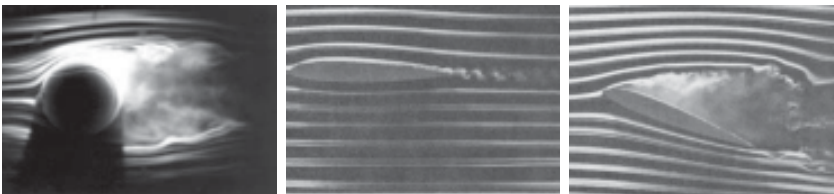
สมการนี้เป็นสมการพลังงานสำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้และรู้จักกันในชื่อ **สมการเบอร์นูลลี** ดังนั้นการใช้สมการเบอร์นูลลีจะต้องระมัดระวังเพราะสมการเบอร์นูลลีใช้ไม่ได้กับการไหลแบบอัดตัวได้

แรงกระทำบนของแข็งที่จมอยู่ในของไหล

เมื่อของแข็งกระทบกันแรงจะถูกส่งผ่านหรือกระทำที่จุดสัมผัส แต่เมื่อวัตถุแข็งสัมผัสกับของไหลสิ่งที่เกิดขึ้นอธิบายได้ยากกว่าเพราะของไหลสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ สำหรับวัตถุแข็งที่จมอยู่ในของเหลว (เช่นปีกเครื่องบินที่อยู่ในอากาศ) ทุกๆ จุดบนพื้นผิววัตถุแข็งจะเป็นจุดสัมผัส ของไหลสามารถไหลรอบๆ วัตถุและยังคงสัมผัสกับทุกจุด แรงทางกลที่กระทำหรือส่งผ่านระหว่างวัตถุแข็งกับของไหลเกิดขึ้นที่ทุกจุดบนพื้นผิววัตถุ และเกิดขึ้นโดยผ่านความดันของของไหล

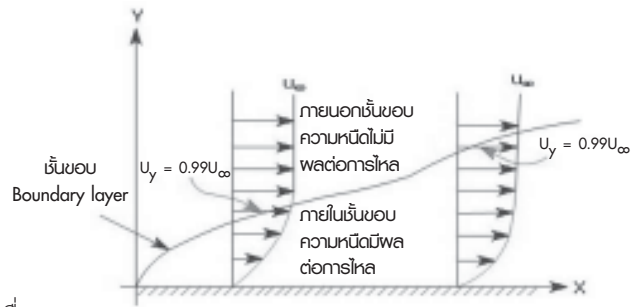
สำหรับของไหลที่เคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งที่ต่างกันรอบวัตถุ ความเร็วแต่ละตำแหน่งจะไม่เท่ากันทำให้ความดันต่างกัน เนื่องจากความดันที่แต่ละตำแหน่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วดังสมการพลังงาน ดังนั้นความดันที่แปรเปลี่ยนไปรอบๆ พื้นผิวปิดของวัตถุจะทำให้เกิดแรงลัพธ์บนวัตถุ

วัตถุที่จมในของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ ของไหลจะยังคงสัมผัสกับพื้นผิวของวัตถุ ถ้ารูปร่างของวัตถุ การเคลื่อนที่ของวัตถุสัมพันธ์กับของไหล หรือวัตถุอยู่ในลักษณะเอียงในทางที่ทำให้การไหลมีการเบี่ยงเบนทิศทาง หรือไหลกลับทางจะมีผลให้ความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งสัมผัสกับของแข็งมีขนาด หรือทิศทาง หรือทั้งสองอย่างเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงความเร็วนี้ทำให้เกิดแรงลัพธ์บนวัตถุ ตามสมการโมเมนตัมเชิงเส้น ขอให้สังเกตว่าการเบี่ยงเบนของของไหลเกิดขึ้นเพราะโมเลกุลของของไหลเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เมื่อของไหลสัมผัสวัตถุ ส่วนต่างๆ ของวัตถุสามารถเบี่ยงเบนทิศทางการไหลได้



รูปที่ 5 แสดงการเบี่ยงเบนทิศทางการไหลเมื่อของไหลผ่านวัตถุแข็ง

เมื่อของไหลไหลไปบนพื้นผิววัตถุแข็ง ความเร็วของของไหลในทิศที่สัมผัสพื้นผิวจะมีขนาดไม่เท่ากันขึ้นกับระยะห่างจากผิวถึงโมเลกุลของของไหล โมเลกุลของของไหลที่อยู่ติดกับผิวของวัตถุแข็งจะมีความเร็วเป็นศูนย์ เมื่อไม่มีการลื่นไถลของของไหลบนผิวของแข็ง และผลความหนืดของของไหลจะต้านการเคลื่อนที่ของของไหลทำให้เกิดความเสียดทานในการไหล โมเลกุลที่อยู่ห่างถัดออกมาจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นจนถึงระยะหนึ่งที่มีความหนืดไม่มีผลต่อการไหล ความเร็วก็จะเท่ากับความเร็วสูงสุด ดูรูปที่ 6 จากผลนี้ของไหลได้สร้างชั้นขอบ (boundary layer) ขึ้นมา

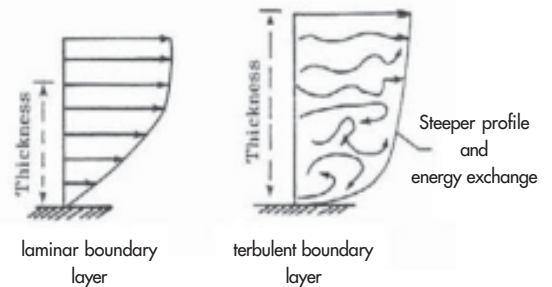


รูปที่ 6 แสดงชั้นขอบ (boundary layer)

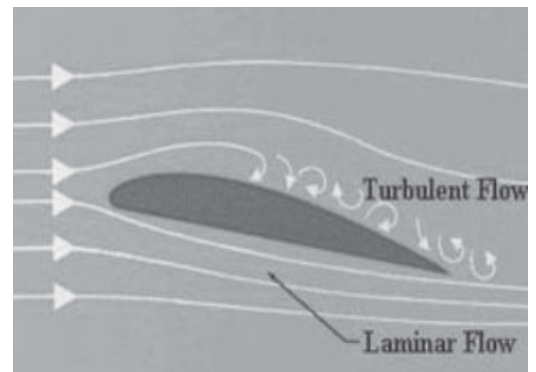
ชั้นขอบ (boundary layer) คือส่วนของของไหลที่ใกล้กับผิววัตถุซึ่งผลของความหนืดมีความสำคัญต่อการไหล ชั้นขอบเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในขณะที่ของไหลมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง ความหนาของชั้นขอบคือความสูงที่วัดจากผิวของวัตถุแข็งถึงตำแหน่งที่ของไหลมีความเร็วเท่ากับ 99% ของความเร็วสูงสุด ชั้นขอบมี 2 ชนิดคือ

1. ชั้นขอบที่มีการไหลแบบราบเรียบ (laminar boundary layer)
2. ชั้นขอบที่มีการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent boundary layer)

ในชั้นขอบที่มีการไหลแบบราบเรียบ โมเลกุลของของไหลที่ชิดกับพื้นผิวไหลเข้ามาอันเป็นผลมาจากความหนืด และทำให้เกิดแรงกดดันโมเลกุลที่อยู่ถัดออกมา ในชั้นชั้นขอบที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจะมีกระแสไหลวน (vortex) เกิดขึ้นทำให้มีแรงกดดันมากกว่าในชั้นขอบที่มีการไหลแบบราบเรียบ



รูปที่ 7



รูปที่ 8 ชั้นขอบที่เกิดขึ้นบนปีกเครื่องบิน

แรงที่กระทำบนเครื่องบิน

แรงที่กระทำบนเครื่องบินโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ แรงจุด (drag) แรงขับ (thrust) น้ำหนัก (weight) และแรงยก (lift) แรงจุดคือแรงที่ดึงเครื่องบินไปข้างหลังทำให้ความเร็วของเครื่องบินลดลง แรงขับคือแรงดึงหรือผลักเครื่องบินไปข้างหน้า น้ำหนักคือผลของแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อเครื่องบิน และแรงยกคือแรงที่ยกเครื่องบินให้ลอยอยู่ในอากาศได้ เมื่อเครื่องบินบินอยู่ที่ระดับความสูงคงที่ค่าหนึ่งด้วยความเร็วคงตัว แรงยกจะเท่ากับน้ำหนัก และแรงขับจะเท่ากับแรงจุด



รูปที่ 9

อะไรทำให้เกิดแรงเหล่านี้

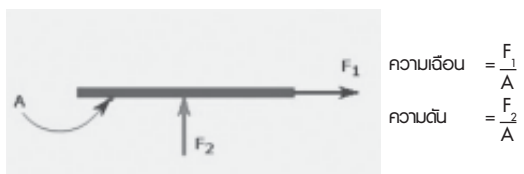
น้ำหนักเป็นแรงที่คุ้นเคยกัน มีสาเหตุมาจากแรงดึงดูดระหว่างเครื่องบินและโลก

แรงขับคือแรงที่ได้จากเครื่องยนต์ อาจเป็นเครื่องยนต์เจ็ท หรือเครื่องยนต์ที่ขับใบพัด

สำหรับแรงจุดและแรงยกเป็นแรงที่เกิดจากพลศาสตร์อากาศ ทางวิศวกรรมแบ่งแรงพลศาสตร์อากาศออกเป็น ความเฉื่อย และความดัน

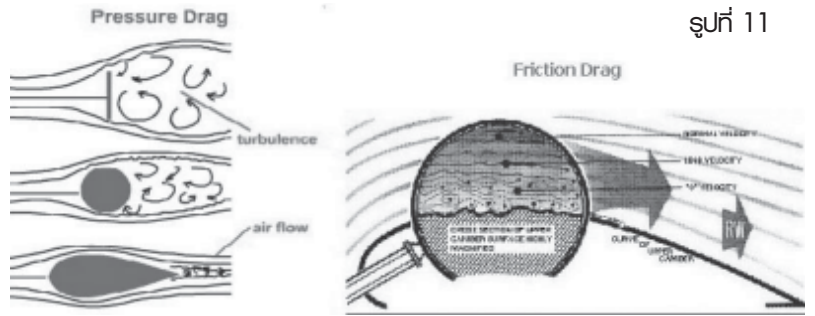
ความเฉื่อยคือแรงต่อพื้นที่หนึ่งตารางหน่วยโดยที่ทิศทางของแรงกระทำตั้งฉากกับพื้นที่

ความดันคือแรงต่อพื้นที่หนึ่งตารางหน่วยโดยที่ทิศทางของแรงกระทำตั้งฉากกับพื้นที่



รูปที่ 10 ความเฉื่อย และความดัน

แรงจุดเกิดจากองค์ประกอบของความเฉื่อยและความดันในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของการบิน กล่าวอีกอย่างหนึ่งแรงจุดเกิดจากความดันและความเสียดทานของอากาศซึ่งดึงเครื่องบินไปข้างหลัง

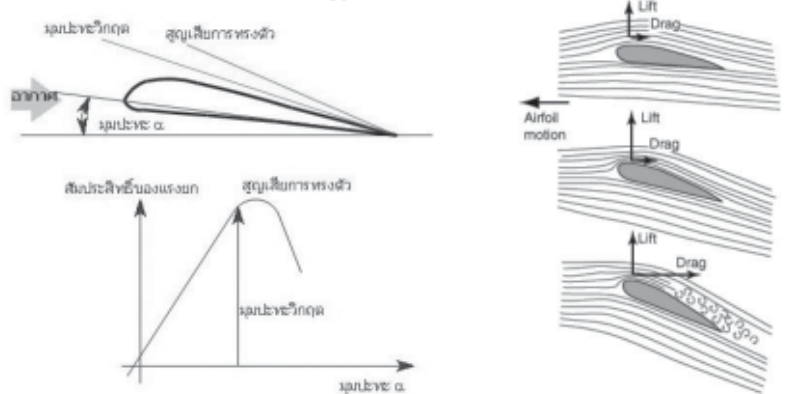


รูปที่ 11

แรงยกเกิดจากองค์ประกอบของความเฉื่อยและความดันที่กระทำบนเครื่องบินในทิศตั้งฉากกับทิศทางการบิน เป็นแรงที่ทำให้เครื่องบินลอยอยู่ในอากาศ แรงยกเกือบทั้งหมดเกิดขึ้นที่ปีกของเครื่องบิน สิ่งที่ต้องเน้นย้ำคือการอธิบายที่นิยมใช้กันทั่วไป จะเกี่ยวข้องกับรูปร่างของปีกซึ่งนำไปสู่ความเข้าใจที่คลาดเคลื่อน ถึงแม้ว่ารูปร่างของปีกเครื่องบินจะสำคัญมาก แต่ถ้ารูปร่างเป็นหนทางเดียวที่จะทำให้เกิดแรงยกบนปีกเครื่องบินแล้ว เครื่องบินจะไม่สามารถบินหลายท้องได้เลย และในทำนองเดียวกันเครื่องบินที่พับจากกระดาษจะไม่สามารถร่อนขึ้นสูงได้ด้วยปีกแบน ๆ สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ เครื่องบินบินได้โดยการผลัดกันหรือเปลี่ยนทิศทางการของอากาศให้มีทิศลงเพื่อสร้างแรงยกตามสมการโมเมนตัมเชิงเส้นหรือกฎข้อที่สองของนิวตัน

การสร้างแรงยกทำโดยการเบี่ยงเบนอากาศให้มีทิศลง ปีกต้องสามารถเปลี่ยนความเร็วของอากาศเพื่อให้เกิดความเร่ง (หรือเปลี่ยนโมเมนตัม) ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความดันด้านบนของปีกต่ำกว่าความดันใต้ปีกทำให้ยกขึ้นได้ **ข้อสำคัญที่ต้องจำคือปีกต้องเบี่ยงเบนอากาศเพื่อเป็นสาเหตุให้เปลี่ยนแปลงความดัน**

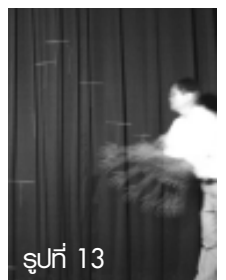
สิ่งที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของอากาศได้คือการทำให้ปีกเครื่องบินทำมุมกับทิศทางการไหลของอากาศซึ่งเรียกว่า มุมปะทะ (attack angle) สิ่งนี้จะทำให้เกิดแรงยก แต่จากข้อมูลการทดลองทางวิศวกรรมพบว่ามุมปะทะไม่ควรเกิน 15 องศา เพราะถ้ามากกว่านั้นจะทำให้เครื่องบินเสียการทรงตัว ดูรูปที่ 12



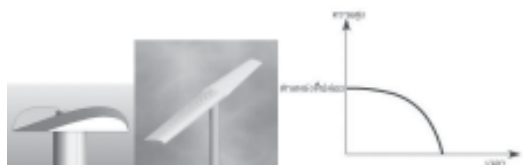
รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะและแรงยก

การทดลอง

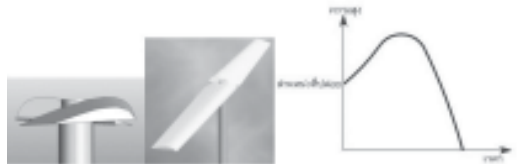
เพื่อเป็นการยืนยันว่าอะไรที่ทำให้เครื่องบินยกตัวลอยอยู่ในอากาศได้ในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ในอากาศ ผู้เขียนได้ทำกังหันที่ใบกังหันมีหน้าตัดเหมือนหน้าตัดของปีกเครื่องบิน และหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กังหันทำจากไม้สน ความยาวของใบ 8 เซนติเมตร มวลทั้งหมดของกังหันประมาณ 9 - 12 กรัม (น้ำหนักประมาณ 0.09 - 0.12 นิวตัน) ขนาดของมุมปะทะ 0 องศา และน้อยกว่า 15 องศา หมุนกังหันด้วยความเร็วรอบใกล้เคียงกัน จากการทดลองกังหันแบบต่างๆ ได้กราฟระหว่างตำแหน่งของกังหันกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 13



มุมปะทะ = 0 องศา ด้านบนโค้ง ด้านล่างเรียบ



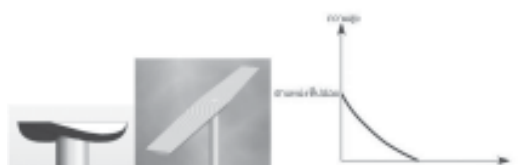
ข) มุมปะทะ > 0 องศา ด้านบนโค้ง ด้านล่างเรียบ



ค) มุมปะทะ = 0 องศา ด้านบนและด้านล่างโค้งเหมือนกัน



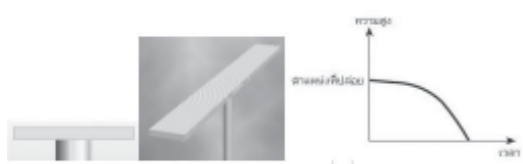
ง) มุมปะทะ > 0 องศา ด้านบนและด้านล่างโค้งเหมือนกัน



จ) มุมปะทะ = 0 องศา ด้านบนเรียบ ด้านล่างโค้ง



ฉ) มุมปะทะ > 0 องศา ด้านบนเรียบ ด้านล่างโค้ง



ช) มุมปะทะ = 0 องศา หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



ซ) มุมปะทะ > 0 องศา หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

รูปที่ 14

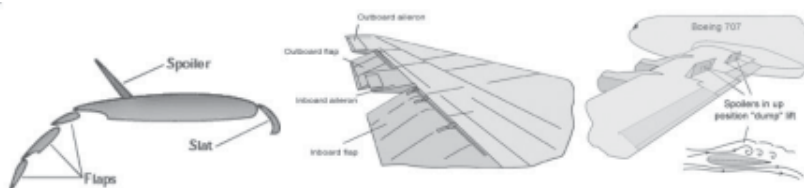
จากผลการทดลองพบว่าก้านทุกรูปแบบที่มีมุมปะทะมีขนาดมากกว่า 0 องศาลอยสูงขึ้นจากตำแหน่งที่ปล่อย ส่วนก้านที่ขนาดของมุมปะทะเท่ากับ 0 องศา

ไม่ลอยสูงขึ้น แต่จะเคลื่อนที่ลงด้วยความเร็วที่ต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความโค้งของใบก้าน จากผลการทดลองรูปที่ 14 จ) แสดงว่าความโค้งมีผลทำให้ความดันใต้ใบก้านน้อยกว่าด้านบน และเกิดแรงยกบนก้าน ส่งผลให้ก้านเคลื่อนที่ลงอย่างรวดเร็ว แต่สำหรับกรณีรูปที่ 14 ก) ใบก้านโค้งทางด้านบน ความโค้งมีผลให้ความดันด้านบนน้อยกว่าใต้ใบก้าน ทำให้เกิดแรงยกขึ้นแต่มีขนาดน้อยไม่สามารถเอาชนะน้ำหนักของก้านได้ทำให้ก้านไม่ลอยสูงขึ้น แต่ก็มีผลทำให้ก้านตกช้าลง

รูปที่ 14 ข) ถึงแม้ว่าใต้ใบก้านจะมีความโค้งมากกว่าด้านบนแต่มุมปะทะมากกว่า 0 องศา จึงทำให้ก้านลอยสูงขึ้นในอากาศได้

รูปที่ 14 ช) หน้าตัดของใบก้านไม่มีส่วนโค้งทั้งด้านบนและด้านล่าง สามารถลอยขึ้นสูงได้เพราะมีมุมปะทะมากกว่า 0 องศา

จากทฤษฎีกลศาสตร์ของไหลบางส่วนและผลการทดลองที่ได้นำเสนอมานี้ จะเห็นได้ว่าแรงยกบนปีกเครื่องบินส่วนใหญ่เกิดจากการบังคับให้อากาศเบี่ยงเบนทิศทางการไหล ซึ่งเขียนไปจากคำอธิบายที่ปรากฏอยู่ในหนังสือส่วนใหญ่ (ทั้งของไทยและต่างประเทศ) บทความนี้จะช่วยให้ผู้อ่านหาคำตอบได้ว่า ทำไมเครื่องบินจึงบินหงายท้องได้ และเครื่องร่อนที่มีปีกแบน ๆ ร่อนโฉบขึ้นลงได้อย่างไร สิ่งที่สำคัญในการออกแบบปีกเครื่องบินคือการทำให้ปีกสามารถบังคับให้อากาศเบี่ยงเบนไปในทิศทางที่สร้างแรงยกในทิศทางที่ต้องการ



รูปที่ 15 แสดงส่วนต่าง ๆ ของปีกเครื่องบินสำหรับเบี่ยงเบนทิศทางการไหลของอากาศเพื่อสร้างแรงดูด และแรงยก

ของฟลักก่อนจากกัน

อุปกรณ์สำหรับทดลองเกี่ยวกับแรงยกบนปีกเครื่องบินอีกแบบหนึ่งแสดงไว้ดังรูปด้านล่างนี้ ตัวปีกจำลองทำด้วยโฟม (ขนาด 8 cm x 15 cm x 2 cm) ใช้คัตเตอร์และกระดาษทรายตัดแต่งให้มีหน้าตัดเหมือนรูปปีกเครื่องบิน ใช้ไม้ขัดทำก็ได้ เจาะรู 2 รู บนปีกจำลอง ระยะห่างระหว่างรู ประมาณ 8 cm รูที่เจาะต้องทำให้ปีกจำลองมีมุมปะทะ 0, 5, 10, 15 และ 20 องศา (โดยประมาณ) เมื่อนำไปใส่ในเสามันฐานดังแสดงในรูป สำหรับปีกจำลองที่ทำจากโฟมควรใช้หลอดดูดนมเปรี๊ยะใส่ในรูที่เจาะเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและลดความเสียหายระหว่างปีกจำลองกับเสา

การทดลองนำอุปกรณ์ไปตั้งไว้หน้าพัดลม เปิดพัดลมให้ลมเป่าผ่านอุปกรณ์ ต้องทำเองจึงจะรู้ว่าคุณก็ทำได้

