การทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลม

เรียบเรียง โดย ผศ.ร.อ.ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

กล่าวนำ

อุโมงค์ลมเป็นอุปกรณ์ในการทดสอบทางด้านกลศาสตร์ของไหลที่มีความสำคัญมากอุปกรณ์หนึ่ง โดยเฉพาะการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมในด้านอากาศพลศาสตร์ การใช้อุโมงค์ลมทดสอบชิ้นส่วนต่างๆ นับตั้งแต่วัตถุที่มีรูปทรงง่ายๆ จนกระทั่งถึงวัตถุที่มีรูปทรงยุ่งยาก เช่น อากาศยานต่างๆ เป็นต้น การทดสอบด้วยอุโมงค์ลมนั้นได้ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านวิศวกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นวิศวกรรมการบิน วิศวกรรมยานยนต์ วิศวกรรมโยธา เป็นต้น ขนาดและความเร็วลมของอุโมงค์ลมนั้นก่มีมากมายหลายแบบ ทั้งที่มีขนาดเล็กที่ใช้ในสถานบันการศึกษาทั่วไป ถึงขนาดใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ส่วนความเร็วลมก็มีตั้งแต่ย่านความเร็วต่ำไปจนถึงย่านความเร็วเหนือเสียง

แม้ว่าปัจจุบันนี้คอมพิวเตอร์จะเข้ามามีบทบาทต่องานออกแบบของวิศวกรเป็นอย่างมาก แต่ความสำคัญของอุโมงค์ลมนั้นไม่ได้ลดลงไปเลย เพราะอย่างไรก็ตามในการออกแบบเมื่อวิศวกรได้คำนวณและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาบนคอมพิวเตอร์แล้วความจำเป็นที่จะต้องสร้างแบบจำลองหรือต้นแบบเพื่อที่จะมาทดสอบในอุโมงค์ลมก็ยังคงมีอยู่ต่อไป เพื่อเป็นการตรวจสอบและวัดค่าต่างๆที่เกิดขึ้นในรูปทรงจริงอีกครั้งหนึ่ง

เอกสารฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะอธิบายถึงหลักการการทำการทดลองตลอดจนกระทั่งวิธีการเปรียบวัด และการวัดค่าต่างๆ ภายในอุโมงค์ลม โดยที่เอกสารนี้จะเขียนอยู่บนพื้นฐานของอุโมงค์ลมขนาดเล็กและการไหลของอากาศถือว่าเป็นการไหลแบบไม่อัดตัวตามอุโมงค์ลมที่มีอยู่ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อุโมงค์ลม

สำหรับอุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบมีเครื่องวัดอยู่หลายแบบ ดังนั้นในขั้นแรกนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดการเปรียบวัดอุโมงค์ลมเสียก่อน จุดมุ่งหมายในการเปรียบวัดอุโมงค์ลมก็เพื่อที่จะสามารถวัดความเร็วของลมในตำแหน่งต่างๆ ของอุโมงค์ลมได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ สำหรับอุโมงค์ลมความเร็วต่ำกว่าเสียงที่ใช้อยู่ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมีคุณสมบัติดังนี้

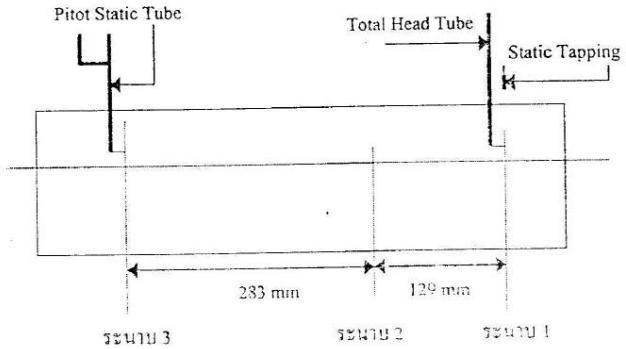
ผู้ผลิต	PLINT & PARTNERS Ltd., England
รุ่น	TE54/8418
แบบ	Open circuit subsonic wind tunnel
Working section	300 mm x 300 mm
การควบคุมความเร็ว	ลิ้นปีกผีเสื้อที่ปลายด้านออกติดตั้งพัดลม
ความเร็วลมสูงสุด	44.4 m/s
มอเตอร์	3 Ph., 380 V, 50 Hz, 6.2 kW, 2910 rpm

Starter	4127 mm X 1100 mm x 1600 mm (L x W x H)
เครื่องมือวัด	1 – Total head tube
	1 – Pitot –static tube
	1 – 24 Column water manometer
	1 – Electronic Three Component Balance รุ่น TE81E/8146
ชิ้นทดสอบ	64 mm diameter cylinder with pressure tapping
	150 mm chord NACA 0012 x 300 mm airfoil
	150 mm chord NACA 0012 x 150 mm airfoil
	150 mm chord NACA 2412 x 300 mm airfoil with variable flap
อุปกรณ์อื่นๆ	Smoke Generator

การเปรียบวัดอุโมงค์ลม

ในหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายถึงวิธีการเปรียบวัดอุโมงค์ลมอย่างๆสั้นๆ ให้เหมาะสมกับการแนะนำการใช้อุโมงค์ลมภายในห้องปฏิบัติการและแนะนำให้เข้าใจถึงหลักการของ ความดันสถิตย์ ความดันพลวัตร และความดันรวม ตลอดถึงการเกิด boundary layer

ขั้นตอนแรกเป็นการวัดการกระจายของการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมตลอดความสูงของส่วนทดสอบ พิจารณาตามรูปที่ 1 ระนาบที่ต้องมีการเปรียบวัดความดันจะมีสองระนาบคือระนาบที่ 1 และระนาบที่ 3 โดยระนาบที่ 1 เป็นระนาบที่วัดความดันรวมและความดันสถิตย์ของลมก่อนเข้าสู่ชิ้นทดสอบ ส่วนระนาบที่ 3 เป็นการวัดความดันรวมและความดันสถิตย์โดยมี Pitot static วัดความดันหลังชิ้นทดสอบ สำหรับระนาบที่ 2 เป็นระนาบของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 1 ส่วนที่ใช้งานและการวัดของอุโมงค์ลม

สำหรับความดันพลวัตร (P_D)ของของไหลนั้นในกรณีที่การไหลเป็นการไหลที่ไม่อัดตัวดังเช่นในอุโมงค์ลมนี้ สามารถหาได้จาก

$$P_D = \frac{\rho U^2}{2} \qquad (1)$$

สำหรับความดันรวม P_T นั้นเป็นการวัดความดันในจุดที่ของไหลเกิดการชะงักการไหลในสนามการไหล ซึ่งความดันรวมนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าความดันชะงักไหล (Stagnation Pressure) และความสำคัญของความดันรวมกับความดันสถิตย์ P_S และความดันพลวัตรก็คือ

$$P_T = P_S + P_D \qquad (2)$$

เครื่องมือวัดความเร็วของลมในอุโมงค์ลมที่มีอยู่นี้เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความแตกต่างของความดันเป็นหลัก การเปรียบวัดที่จำเป็นก็คือการเปรียบวัดเครื่องมืออ่านค่าความดันเหล่านี้ เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเร็วและความดันพลวัตรที่คลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎีที่แสดงในสมการที่ (1) สำหรับความหนาแน่นของอากาศที่จะใช้ในสมการที่ (1) หาได้จากสมการของก๊าซอุดมคติ คือ

$$P = \rho R t \qquad (3)$$

เมื่อ R คือ gas constant ของอากาศ มีค่า 0.287 kJ/kg-K

ขั้นตอนการเปรียบวัดความเร็ว

ขั้นตอนการเปรียบวัดอุโมงค์ลมจะเป็นการตรวจสอบการกระจายตัวของความเร็วตลอดหน้าตัดทดสอบ โดยระนาบที่ 1 ตามรูปที่ 1 จะใช้หัวอ่านความดันรวม ส่วนในระนาบที่ 3 จะใช้ Pitot tube โดยลำดับขั้นตอนดังนี้

1. เปิดมอเตอร์อุโมงค์ลม
2. ตั้งความเร็วลมให้สูงสุด(เป็นลิ้นปีกผีเสื้อเต็มที่)
3. วัดค่าความดันทั้งระนาบที่ 1 และระนาบที่ 3 โดยเลื่อนหัวอ่านความดันจากจุดสูงสุดไปจุดต่ำสุด โดยมีช่วงการวัดทุก 20 mm และอาจมีการลดระยะลงในช่วงที่ใกล้กับผนังของอุโมงค์ลม เพื่อสังเกตปรากฏการณ์ของชั้นชิดผิว

หมายเหตุ เครื่องมือวัดที่เราใช้อยู่นี้ความจริงแล้วไม่เหมาะสมกับการอ่านค่าความเร็วในชั้นชิดผิว เนื่องจากความหนาของชั้นชิดผิวซึ่งไม่เกิน 5 mm ในระนาบที่ 3 และจะน้อยกว่านี้ในระนาบที่ 1 นั้น มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับหัวอ่านความดัน ดังนั้นการจะอ่านค่าความเร็วในชั้นชิดผิวนี้เป็นไปได้ยาก

4. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งบนอุโมงค์ลมและความเร็วที่ระนาบ 1 และ 3
5. สำหนรับอุโมงค์ลมที่ได้รับการออกแบบและสร้างอย่างถูกต้อง ความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆนอกชั้นชิดผิวควรจะคงที่ นอกจากนั้นความแตกต่างความเร็วของระนาบที่ 1 และที่ 3 ที่ไม่ควรจะมีความแตกต่างกันมาก

ขั้นตอนการเปรียบวัดความดัน

เมื่อได้มีการวัดความดันในส่วนทำนงานเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการเปรียบวัดค่าที่ได้กับค่ามาตราฐาน สำหรับค่าความดันรวมของอากาศในอุโมงค์ลมบริเวณส่วนทดสอบ เนื่องจากความเร็วของอากาศภายในอุโมงค์ลมจะสามารถหาได้จากความแตกต่างของความดันรวมและความดันสถิตย์ ซึ่งการเปรียบวัดค่านี้จะทำให้เราได้ทราบค่าความเร็วที่ถูกต้องเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความดันรวม

เนื่องจากใบพัดที่ให้กำลังกับลมนี้นอยู่หลังส่วนทดสอบ ดังนั้นการไหลของอากาศจากภายนอกมาสู่ส่วนทดสอบประมาณได้ว่าค่าพลังงานรวมจะคงที่ หรือจะกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือในเมื่องอากาศไม่ได้รับพลังงานเพิ่มเติม พลังงานรวมของอากาศจะต้องคงที่ อย่างไรก็ตามในการไหลจริงอาจมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมบ้างการเปรียบวัดนี้จึงเป็นการพิจารณาถึงผลการเปลี่ยนแปลงพพลังงานรวมซึ่งอาจเกิดจากผลกระทบต่างๆ เช่น แรงเสียดทาน หรือการอัดตัวของอากาศนั่นเอง

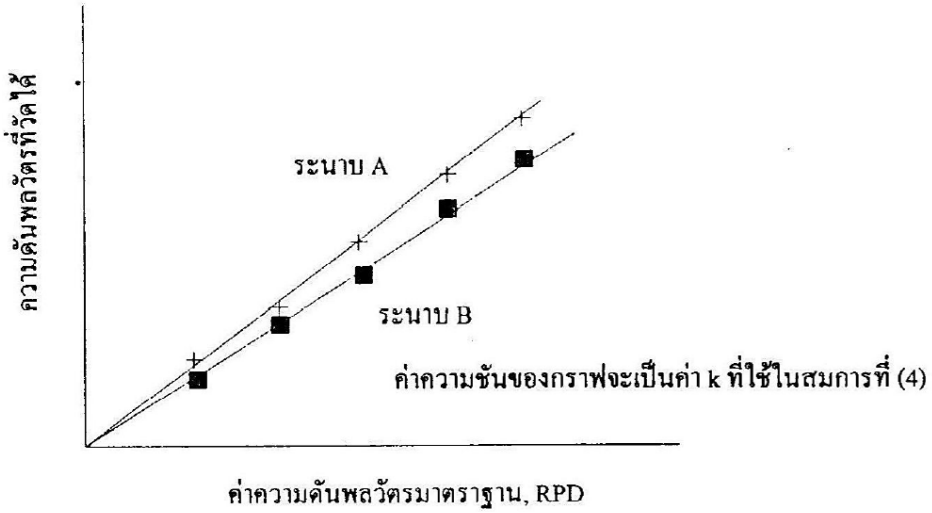
ในเมื่ออากาศนอกอุโมงค์ลมมีความเร็วประมาณศูนย์ ความดันภายนอกของอากาศรอบๆข้าง ก็คือความดันรวมตามสมการที่ (1) แต่จากสมการที่ (1) เช่นกัน เราพบว่าค่าความแตกต่างความดันรวมกับความดันสถิตย์ก็คือค่าแตกต่างความดันที่เท่ากับความดันพลวัตร ดังนั้นจึงได้นิยามค่าความแตกต่างความดันมาตรฐาน (Reference Pressure Difference, ***RPD***) ของความดันพลวัตรว่าคือ ความแตกต่างความดันของบรรยากาศภายนอกกับความดันสถิตย์ที่ระนาบที่ 1 และเนื่องจากมาตรวัดความดันของเรานั้นเป็นมาตรวัดความดันเกจจ์ที่เทียบต่อความดันภายนอกอยู่แล้ว ดังนั้นค่าความดันสถิตย์ที่วัดที่ระนาบที่ 1 จึงถือเป็นค่า *RPD* ของความดันพลวัตรได้ ดังนั้นการเปรียบวัดก็คือการเปรียบเทียบว่าค่าความแตกต่างของความดันมาตรฐานกับค่าความแตกต่างความดันหรือความดันพลวัตรที่เราวัดได้นั้นแตกต่างกันเท่าใด สำหรับขั้นตอนการเปรียบ วัดอุโมงค์ลมมีดังนี้

1. จัดอุปกรณ์การวัดความดันให้อยู่กึ่งกลางของอุโมงค์ลม เปิดพัดลม
2. ปรับลิ้นปีกผีเสื้อให้เปิดประมาณ 10% ของค่าสูงสุด
3. บันทึกค่าความดันสถิตย์และความดันพลวัตรที่ระนาบที่ 1 และ 2
4. ปรับลิ้นผีเสื้อให้เปิด 25%, 50%, 75%, 90% และ 100% ของค่าสูงสุดแล้วบันทึกค่า
5. นำค่าความดันที่วัดได้มาสร้าง calibration curve โดยแกนตั้งเป็นความดันพลวัตรที่วัดได้ ส่วนค่าในแกนนอนเป็นค่าความดัน ***RPD*** และเนื่องจากเราใช้น้ำเป็นเครื่องวัดความดัน หน่วยที่ใช้อาจจะใช้เป็น mmH_2O ก็ได้ curve ที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกราฟในรูปที่ 2
6. ค่า slop ของ calibration curve ก็คือ calibration factor ***(k)*** ซึ่งเมื่อได้ค่า ***k*** มาแล้วความเร็วของการไหลที่จุดต่างๆ จะหาได้จากการนำสมการที่ (1) มาเพิ่มค่า calibration factor นั่นคือจะได้สมการ

$$P_D = k \cdot RPD$$

ดังนั้น ค่าความเร็วในส่วนทดสอบจะเป็น

$$U = \sqrt{\frac{2k \cdot RPD}{\rho}} \qquad (4)$$



รูปที่ 2 กราฟการเปรียบวัดความดันพลวัตร

สำหรับการเปรียบวัดที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือการเปรียบวัด Electronic Three Component Balance ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดค่าแรงยก แรงด้าน และแรงบิดบนชิ้นทดสอบ อย่างไรก็ตามเนื่องจากขั้นตอนการเปรียบวัดอุปกรณ์วัดแรงชุดนี้มีความยุ่งยากและต้องการผู้ที่มีความชำนาญสูง ดังนั้นเนื่องจากเวลาที่จำกัดที่มีสำหรับการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมทำให้ทางฝ่ายจัดเตรียมห้องปฏิบัติการจะเป็นผู้เปรียบวัดค่านี้ไว้ก่อนและจะจัดเตรียม calibration curve ไว้ให้นักศึกษาเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าที่ถูกต้อง

อย่างไรก็ตามหากว่านักศึกษาผู้ใดมีความสนใจต้องการจะทราบรายละเอียดการเปรียบวัดเครื่องมือนี้ สามารถที่จะหาคู่มือการใช้และการเปรียบวัดของเครื่องมือนี้ได้ที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล

การทดลอง : การไหลผ่านทรงกระบอกลม

สำหรับการไหลของของไหลที่ผ่านวัตถุใดๆ นั้น มีทฤษฎีอยู่หลายทฤษฎีที่ใช้กันอยู่ในวิชากลศาสตร์ของไหล สำหรับทฤษฎีหนึ่งที่ได้รับการยอมรับกันมากทฤษฎีหนึ่งก็คือการไหลของของไหลที่ไม่มีความหนืดในสภาวะคงตัว หรือที่เรียกกันสั้นๆ ว่า Potential Flow ส่วนทฤษฎีของ potential flow สำหรับการไหลของอากาศผ่านทรงกระบอกลมที่ไม่มีการหมุนนั้นเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าทฤษฎีนี้จะคาดการณ์ได้ผิดไปจากความเป็นจริง นั่นคือ ทฤษฎีจะคาดการณ์ได้ว่าเมื่ออากาศไหลผ่านทรงกระบอกกลมจะไม่เกิดแรงยกและแรงต้านขึ้นบนทรงกระบอก แต่ในทางปฏิบัติ แล้วจะเกิดแรงยกและแรงต้านขึ้นบนทรงกระบอก อันเนื่องมาจากผลของความหนืด ตลอดจนถึงการเกิดการแยกตัวของกระแสอากาศจากผิวทรงกระบอก ซึ่งทฤษฎีของ potential flow ไม่สามารถคาดการณ์ได ต้องใช้ Boundary layer theory เป็นทฤษฎีที่ใช้คาดการณ์ผลที่จะเกิดขึ้น

อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบทฤษฎี Potential flow กับทางปฏิบัติการจริงว่าลักษณะการไหล การกระจายของความดัน แรงกระทำต่างๆจะมีความแตกต่างจากสภาพความเป็นจริงมากน้อยเพียงใด

Potential Flow Theory

สำหรับการไหลของของไหลที่ไม่มีความหนืดในสภาวะที่คงตัวสำหรับการไหลในสองมิติ จะมีสมการความต่อเนื่องเป็น

$$\frac{\partial V_x}{\partial x}+\frac{\partial V_y}{\partial y}=0 \tag{5}$$

และมีสมการโมเมนตัมเป็น

$$V_x\frac{\partial V_x}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_x}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+g_x \tag{6}$$

$$V_x\frac{\partial V_y}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_y}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}+g_y \tag{7}$$

เมื่อ V คือความเร็ว, P คือความดัน และ g คือ body force โดยสมการนี้นิยมเรียกว่า Euler Equation จากสมการทั้งสามจะมีตัวแปรคือ ความเร็วและ Pressure Gradient สำหรับ potential flow theory วิธีการก็คือ หาความเร็วของของไหลก่อนจากสมการความต่อเนื่อง จากนั้นจงหา pressure gradient จากสมการ Euler Equation หรือถ้าการไหลเป็นการไหลแบบไม่หมุนวน การหาความดันใน flow field อาจจะหาจาก Bernoulli's Equation ก็ได้

สำหรับการไหลอย่างคงตัวของของไหลที่ไม่มีความหนืดและไม่มีการหมุนวนวิธีที่ง่ายที่สุดก็คือการกำหนด Velocity Potential, ϕ และ Stream function, ψ โดยมีนิยามคือ

$$V_x=\frac{\partial \psi}{\partial y}=\frac{\partial \phi}{\partial x} \tag{8}$$

$$V_y=-\frac{\partial \psi}{\partial x}=\frac{\partial \phi}{\partial y} \tag{9}$$

ซึ่งถ้าหากว่า ϕ และ ψ นี้เป็น harmonic function จะได้ว่าการไหลนี้เป็นไปตามสมการความต่อเนื่อง และการไหลจะเป็นการไหลแบบไม่หมุนวน (irrational flow) สำหรับความสัมพันธ์ใน polar coordinate จะเป็น

$$V_r=\frac{1}{r}\frac{\partial \psi}{\partial \theta}=\frac{\partial \phi}{\partial r} \tag{10}$$

$$V_\theta=-\frac{\partial \psi}{\partial r}=\frac{1}{r}\frac{\partial \phi}{\partial \theta} \tag{11}$$

และเส้นที่มีค่า ψ คงที่ก็จะเป็นเส้น stream line ของการไหลแบบนั้นๆ

$$\psi=Ur\sin\theta-\frac{qa}{\pi r}\sin\theta \tag{12}$$

$$\phi=Ur\cos\theta+\frac{qa}{\pi r}\cos\theta \tag{13}$$

เมื่อ U คือ free stream velocity ส่วน q เป็นค่าคงที่ซึ่งมีความสัมพันธ์กับรัศมีทรงกระบอก R คือ

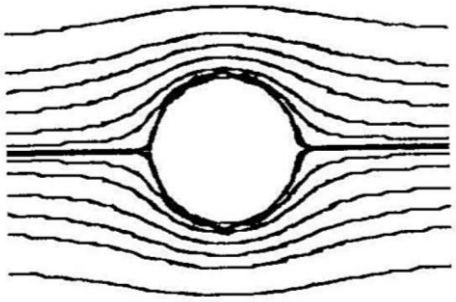
$$R = \sqrt{\frac{qa}{U\pi}} \tag{14}$$

แทนสมการที่ (12) (หรือสมการที่ (13)) ลงในสมการที่ (10) และ (11) และจากสมการที่ (14) จะได้ความเร็วของการไหลรอบๆ ทรงกระบอกเป็น

$$V_r = U\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right)\cos\theta \tag{15}$$

$$V_\theta = -U\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right)\sin\theta \tag{16}$$

ซึ่ง stream line ของการไหลจะเป็นตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 Stream line ของการไหลผ่านทรงกระบอกกลม

สำหรับการไหลผ่านทรงกระบอกนั้นจะมีจุดชะงักไหล 2 จุดคือที่ $\theta = 0$ และ $\theta = \pi$ สำหรับการหาความดันบนผิวทรงกระบอก เนื่องจากการไหลเป็นการไหลที่ไม่มีการหมุนวนดังนั้นจึงสามารถใช้สมการ Bernoulli's หาค่าความดันบนผิวทรงกระบอก โดยขั้นตอนคือพิจารณาพลังงานที่จุดใดๆ บนผิวทรงกระบอกกับจุดใดๆ ในสนามการไหลซึ่งห่างจากทรงกระบอกมากๆ จะได้

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gy = \frac{P_\infty}{\rho} + \frac{U^2}{2} + gy \tag{17}$$

เมื่อ P_∞ เป็นความดันที่จุดที่ห่างจากผิวทรงกระบอกและ V คือความเร็วของของไหลโดย จากสมการที่ (17) เมื่อพิจารณาที่ระดับ y เท่ากันจัดเทอมใหม่จะได้

$$\frac{P}{\rho} = \frac{P_\infty}{\rho} + \frac{U^2}{2} - \frac{\left[V_r^2 + V_\theta^2\right]_{@r=R}}{2} \tag{18}$$

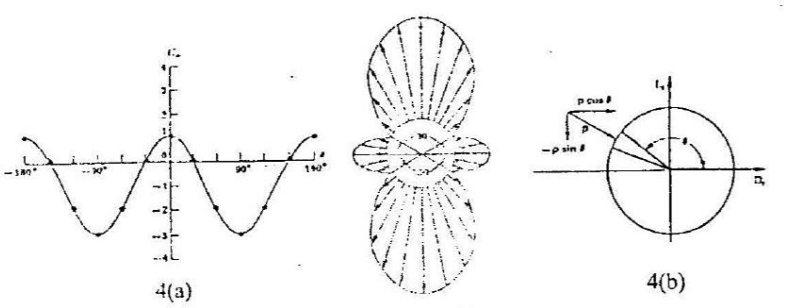
แทนค่าความเร็วจากสมการที่ (15) และ (16) จะได้

$$\frac{2\left(P - P_\infty\right)}{\rho U^2} = 1 - 4\sin^2\theta \tag{19}$$

ซึ่งถ้าหาก P_∞ เป็นความดันบรรยากาศส่วนบนด้านซ้ายมือของสมการที่ (19) ก็สามารถวัดเป็นความดันเกจได้ และซ้ายมือของสมการที่ (19) นั้นนิยมเรียกว่า pressure coefficient, C_P หรือ

$$C_P = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2} \qquad (20)$$

หากนำสมการที่ (20) ไปเขียนกราฟจะได้การกระจายของความดันรอบๆ ผิวทรงกระบอกตามรูปที่ 4 โดยรูปที่ 4(a) เป็นการแสดงค่าที่มุมต่างๆ ส่วนรูป 4(b) เป็น polar point ของความดันที่กระจายรอบทรงกระบอก



รูปที่ 4 การกระจายของความดันรอบทรงกระบอก

การหาค่าแรงยกและแรงต้าน

สำหรับแรงยกและแรงต้านบนทรงกระบอกสามารถหาได้จากการอินทิเกรทแรงกระทำเนื่องจากความดันรอบทรงกระบอกจากรูปที่ 4 จะได้ว่าแรงต้าน D_f มีค่าเป็น

$$D_f = \iint P\cos\theta dA \qquad (21)$$

โดย dA สำหรับทรงกระบอกจะเท่ากับ $LRd\theta$ เมื่อ L คือความยาวของทรงกระบอกและความดัน P หาได้จากสมการที่ (19) ซึ่งจะได้

$$D_f = RL\int_0^{2x}\left(P_m + \rho U^2 - 2\rho U^2\sin^2\theta\right)\cos\theta d\theta \qquad (22)$$

จัดเทอมใหม่จะได้

$$D_f = RL\left(P_\infty + \frac{\rho U^2}{2}\right)\int_0^{2x}\cos\theta d\theta - 2RL\rho U^2\int_0^{2x}\sin^2\theta\cos\theta d\theta \qquad (23)$$

ซึ่งผลของการอินทิเกรททั้งสองเทอมทางด้านขวามือจะเป็นศูนย์ดังนั้น

$$D_f = 0 \qquad (24)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับแรงยก L_f สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$L_f = \iint -P\sin\theta dA \qquad (25)$$

ซึ่งในทำนองเดียวกันจะได้ว่า L_f มีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน

นั่นคือตามทฤษฎี potential flow แล้วการไหลของของไหลที่ไม่มีความหนืดจะไม่ทำให้เกิดแรงยกหรือแรงต้านบนทรงกระบอก แต่สิ่งที่เราพบอยู่ในชีวิตประจำวันนั้นขัดแย้งกับสิ่งที่ได้จากทฤษฎีนี้ สาเหตุก็เป็นเพราะในความเป็นจริงแล้วอากาศเป็นของไหลที่มีความหนืด แม้ว่าจะมีค่าน้อยมากแต่ก็ได้สร้างผลกระทบขณะที่ไหลผ่านทรงกระบอก การทดลองนี้จะเป็นการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จริงกับค่าทางทฤษฎี

เครื่องมือวัดแรง

เครื่องมือวัดแรงกระทำที่ใช้สำหรับอุโมงค์ลมนี้เป็นเครื่อง Three component balance electronic ของบริษัท PLINT & PARTNERS รุ่น TE81E ซึ่งมีลักษณะตามรูปในภาคผนวก เครื่องมือนี้จะติดตั้งเครื่องวัดแรง (load cell) 3 เครื่อง โดยจะประกอบด้วยเครื่องวัดแรงตามแนวนอน 1 เครื่อง เพื่อที่จะใช้วัดค่าแรงต้านหรือเรียกว่าเครื่องวัดแรงด้านหน้า (fore load cell) 1 เครื่องและเครื่องมือวัดแรงด้านหลัง (aft load cell) อีกหนึ่งเครื่อง โดยเครื่องวัดแรงทั้งหมดจะต่อกับสายลวดเพื่อไปวัดแรงกระทำที่จุดยืนตามแนวต่างๆ

สำหรับค่าแรงต้านจะสามารถหาได้จากการอ่านค่าของเครื่องวัดแรงต้านโดยตรง ส่วนแรงยกนั้นจะเป็นผลรวมของเครื่องวัดแรงด้านหน้าและด้านหลังรวมกัน ส่วนการอ่านค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นผลต่างของค่าที่ได้จากเครื่องวัดแรงยกและเครื่องวัดแรงต้านคูณกับระยะทางระหว่างจุดวัดแรงซึ่งสำหรับเครื่องมือชุดนี้จได้ระยะทางเท่ากับ 0.127 m จากที่กล่าวมาข้างต้นจะสามารถสรุปได้ดังนี้

- แรงต้าน อ่านจาก drag load cell [N]
- แรงยก เป็นผลรวมของ aft load cell และ fore load cell [N]
- โมเมนต์ หาจาก 0.127 (fore – aft) [N-m]

สำหรับเครื่องมือวัดแรงนี้ สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการของ strain gage ดังนั้นจึงเหมือนกับเครื่องมือที่ใช้หลักการนี้ทุกชนิดคือต้องมาการปรับให้ bridge อยู่ในสภาพที่สมดุลเสียก่อน สำหรับตำแหน่งที่ปรับนั้นจะอยู่บริเวณด้านบนขวาของเครื่องวัดแรง และจะเป็นช่องปรับด้านซ้ายมือ ส่วนด้านขวามือจะเป็นช่องปรับความต่างศักย์ของวงจร ซึ่งไม่ควรปรับช่องทางด้านขวามือยกเว้นในกรณีของการเปรียบเทียบเครื่องมือเท่านั้น

ขั้นตอนการทดลอง

1. หลังจากที่เปรียบวัดค่าความเร็วของอุโมงค์ลมเรียบร้อยแล้ว ปิดเครื่องแล้วติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับอุโมงค์ลม
2. ขั้นตอนการติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับอุโมงค์ลมจะอยู่กับเอกสารประกอบเครื่องขอให้อ่านก่อนทำการติดตั้ง และขอให้ระมัดระวังในการติดตั้งชิ้นทดสอบด้วย โดยเฉพาะการติดตั้ง Electronic Balance ขอให้ระมัดระวังเป็นพิเศษ
3. ติดตั้งสายวัดความดันเข้ากับเครื่องวัดความดัน ทรงกระบอกนี้สามารถหมุนไปเพื่อวัดความดันสถิตที่มุมต่างๆการทดลองให้เริ่มวัดจากมุมศูนย์องศาไปจนกระทั่งครบรอบวงกลม โดยมีอัตราเพิ่มขึ้นครั้งละ 10°
4. การทดลองให้ทำการทดลองที่ความเร็วสองค่า(ตามค่าที่ผู้ควบคุมกำหนด)
5. สำหรับค่าแรงยกและแรงต้านบนทรงกระบอกให้บันทึกจากผลที่ได้จากเครื่องวัด
6. เนื่องจากการเปรียบวัดค่า Three Component Balance ใช้เวลามากทางผู้ควบคุมจะเปรียบวัดค่าไว้ให้ก่อนแล้ว

การประเมินผล

1. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับจุดต่างๆบนทรงกระบอก ทั้งแบบ Cartesian Plot และ Polar plot (เช่นที่แสดงในรูปที่ 4) แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก potential flow theory
2. จากความดันที่ได้ใช้ Simpson Rule หรือวิธีการทาง Numerical integration อื่นๆ อินทิเกรทหาค่าแรงยกและแรงต้าน เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้

การทดลอง : การไหลผ่านแพนอากาศ

ในการทดลองที่สองของอุโมงค์ลมนี้จะเป็นการหาคุณสมบัติของแพนอากาศ (airfoil) เมื่อมีอากาศไหลผ่านตัวแปรที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของแพนอากาศจะประกอบด้วย

Lift coefficient $$C_L = \frac{L_f}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \qquad (26)$$

Drag coefficient $$C_D = \frac{D_f}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \qquad (27)$$

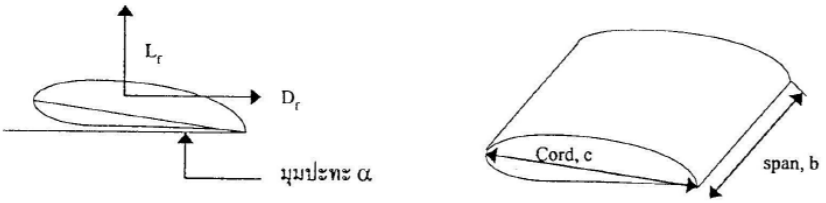
เมื่อ L_f คือแรงยก (lift force)

D_f คือแรงต้าน (drag force)

U คือความเร็วของกระแสอากาศอิสระที่ผ่านวัตถุ (free stream velocity)

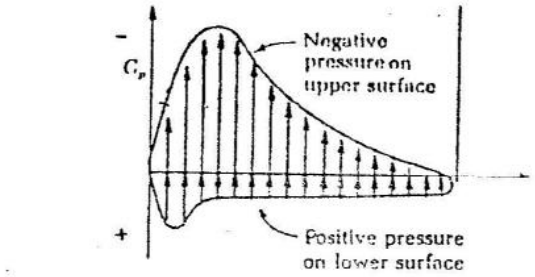
A คือพื้นที่หน้าตัดที่การปะทะไหลผ่าน

สำหรับแพนอากาศ A จะเท่ากับความยาวของแพนอากาศคูณกับ cord ของแพนอากาศ หรือ $A = bc$ ส่วนรายละเอียดการเรียกชื่อส่วนจ่างๆของแพนอากาศแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ส่วนต่างๆของแพนอากาศ

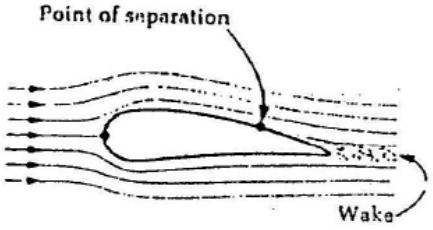
สำหรับแรงยกที่กระทำบนแพนอากาศนั้นสามารถหาได้จากการวัดความดันที่กระทำบนแพนอากาศทั้งด้านล่างและด้านบนของแพนอากาศ ซึ่งทางผิวด้านบนของแพนอากาศจะมีความเร็วของกระแสอากาศสูงทำให้มีความดันสถิตย์ต่ำหรือเป็น Negative pressure ส่วนด้านล่างนั้นอากาศมีความเร็วต่ำกว่าจะมีความดันสถิตสูงหรือเป็น positive pressure ทำให้เกิดรวมขึ้นเป็นแรงยกขึ้นบนแพนอากาศ ลักษณะทั่วไปของการกระจายความดันแสดงในรูปที่ 6

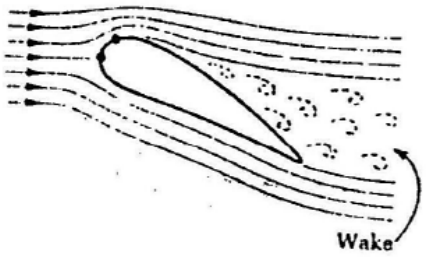


รูปที่ 6 การกระจายของความดันบนผิวแพนอากาศ

เมื่อต้องการเพิ่มแรงยกของแพนอากาศให้สูงขึ้นวิธีการคือการเปิดมุมปะทะ (angle of attack, a) โดยหลักการก็คือการเพิ่มมุมปะทะจะทำให้อากาศไหลผ่านด้านบนของแพนอากาศเร็วขึ้นจึงทำให้ความดันด้านบนของแพนอากาศลดลงไปอีกเป็นผลให้แรงกระทำสุทธิซึ่งเกิดจากค่าแรงยกมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มมุมปะทะหรือเพิ่มความเร็วบนผิวของแพนอากาศทำให้ความดันด้านบนลดลงเรื่อยๆ แต่เนื่องจากอากาศที่อยู่ห่างออกไปจากแพนอากาศจะมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ทำให้การไหลของอากาศที่อยู่ที่ชิดผิวบนแพนอากาศที่ตำแหน่งใดๆมีความดันอยู่ด้านหน้ามากกว่าความดันที่อยู่ด้านหลัง ซึ่งสภาพนี้เรียกว่าอยู่ในสภาพ averse pressure gradient แต่อากาศยังสามารถไหลต่อไปได้ด้วยโมเมนตัมของการไหล แต่หากว่าเราเพิ่มมุมปะทะหรือลดความดันบนผิวมากขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ค่า averse pressure gradient มีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่ง โมเมนตัมของการไหลไม่สามารถที่จะเอาชนะความแตกต่างความดันนี้ได้ อากาศเริ่มไหลกลับซึ่งทำให้

เกิดการไหลแยกตัว (low separation) ของกระแสอากาศ และจะทำให้แพนอากาศบริเวณนั้นขาดแรงยก และเมื่อเพิ่มมุมปะทะมากขึ้นพื้นที่ที่ไม่มีแรงยกก็จะมากขึ้นจนกระทั่งจากแรงยกที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มมุมปะทะเมื่อถึงจุดจุดหนึ่งแรงยกรวมบน





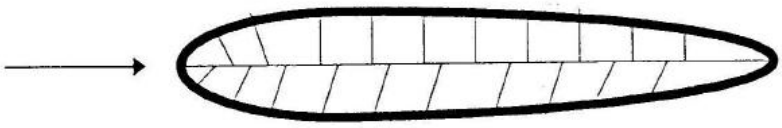
แพนอากาศก็จะลดลงและหมดไปอย่างรวดเร็ว เราเรียกอาการหมดแรงยกของแพนอากาศนี้ว่า Stall รูปที่ 7 เป็นการแสดงการไหลแยกตัวของกระแสอากาศที่มุมปะทะเพิ่มขึ้น จนทำให้เกิดการ Stall ขึ้น

รูปที่ 7 การไหลแยกตัวของกระแสอากาศ

ดังนั้นบนปีกของเครื่องบินที่ใช้อยู่จริง จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์เพื่อเพิ่มแรงยก โดยเฉพาะในขณะที่เครื่องกำลังวิ่งขึ้นและขณะร่อนลงอุปกรณ์ที่เพิ่มแรงยกบนปีกเครื่องบิน มีอยู่หลายแบบเช่น flap ซึ่งเป็นแพนอากาศขนาดเล็กที่ติดอยู่ด้านหลังตอนล่างของปีกเครื่องบิน และจะใช้งานในเวลาเครื่องขึ้นหรือลงเท่านั้น หรือ landing eage slat ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดอยู่ด้านหน้าของแพนอากาศ ใช้เพิ่มแรงยกของปีกเช่นเดียวกับ flap นอกจากนนี้ยังมีวิธีการเพิ่มโมเมนต์ตัมให้กับอากาศที่ไหลผ่านแพนอากาศเพื่อป้องกันการแยะตัวของกระแสอากาศอีกด้วย สำหรับผู้ที่สนใจในเรื่องนี้สามารถหาอ่านได้จากหนังสือทางด้านอากาศพลสาสตร์และหนังสือทางด้านแพนอากาศโดยเฉพาะ ในเอกสารนี้จะไม่ขอกล่างถึงรายละเอียดในส่วนนี้

ชิ้นทดสอบ

ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดลองนี้เป็น แพนอากาศแบบ 150 mm chord NACA 0012 x 3000 mm ซึ่งจะมีการเจาะรูบนแพนอากาศเพื่อวัดความดันอยู่ 20 จุด เป็นด้านบน 10 จุด และด้านล่าง 10 จุด สำหรับรายละเอียดและตำแหน่งการเจาะรูอยู่ในรูปที่ 8



ด้านบน	1.52	7.62	15.24	22.86	41.15	59.44	77.73	96.02	114.30	129.54
ด้านล่าง	0.76	3.81	11.43	19.05	38.00	62.00	80.77	101.35	121.92	137.16

รูปที่ 8 ลักษณะและตำแหน่งของการเจาะรูของแพนอากาศ *NACA 0012* (ตำแหน่งวัดระยะด้านหน้า *mm*)

ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งแพนอากาศเข้ากับอุโมงค์ลม
2. ติดตั้งท่อวัดความดันกับเครื่องวัดความดัน
3. เปิดเครื่องอุโมงค์ลม ตั้งความเร็วให้สูงสุด(เพื่อให้ได้ R_E สูงที่สุด)ตรวจจับและบันทึกความเร็วลม U
4. เริ่มการทดลองจากมุมปะทะศูนย์ บันทึกการกระจายของความดันที่ผิวด้านบนและด้านล่างของแพนอากาศ พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงยกและแรงต้านของแพนอากาศจากเครื่องวัดแรง(เพื่อความสะดวกในการอ่านค่าจาก เครื่องวัด นิยมที่จะบิดมุมปะทะย้อนตามเข็มนาฬิกาเพื่อให้ได้ค่าแรงที่แสดงมีค่าเป็นบวก)
5. เพิ่มมุมปะทะคราวละ 2° แล้วบันทึกค่าตามข้อ 4
6. เพิ่มมุมปะทะขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดอาการ *Stall* ของแพนอากาศจึงหยุดการทดลอง
7. เนื่องจากการเปรียบวัดค่า *Three Component Balance* ใช้เวลามากทางผู้ควบคุมจะเปรียบวัดค่าไว้ให้ก่อนแล้ว

การเสนอผล

1. เขียนกราฟแสดงการกระจายของ *pressure coefficient,* C_P กับตำแหน่งบนแพนอากาศทั้งด้านล่างและด้านบนสำหรับแต่ละมุมปะทะทีทำการทดลอง(ดูตัวอย่างในภาคผนวก)โดย

$$C_P = \frac{P_i - P_s}{\frac{1}{2}\rho U^2}$$ เมื่อ P_i คือค่าความดันที่จุดนั้นๆ

2. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Lift coefficient กับมุมปะทะ
3. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Drag coefficient กับมุมปะทะ
4. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Lift coefficient กับ Drag coefficient
5. วิเคราะห์และสรุปข้อมูลที่ได้ทั้งหมด

เอกสารอ้างอิง

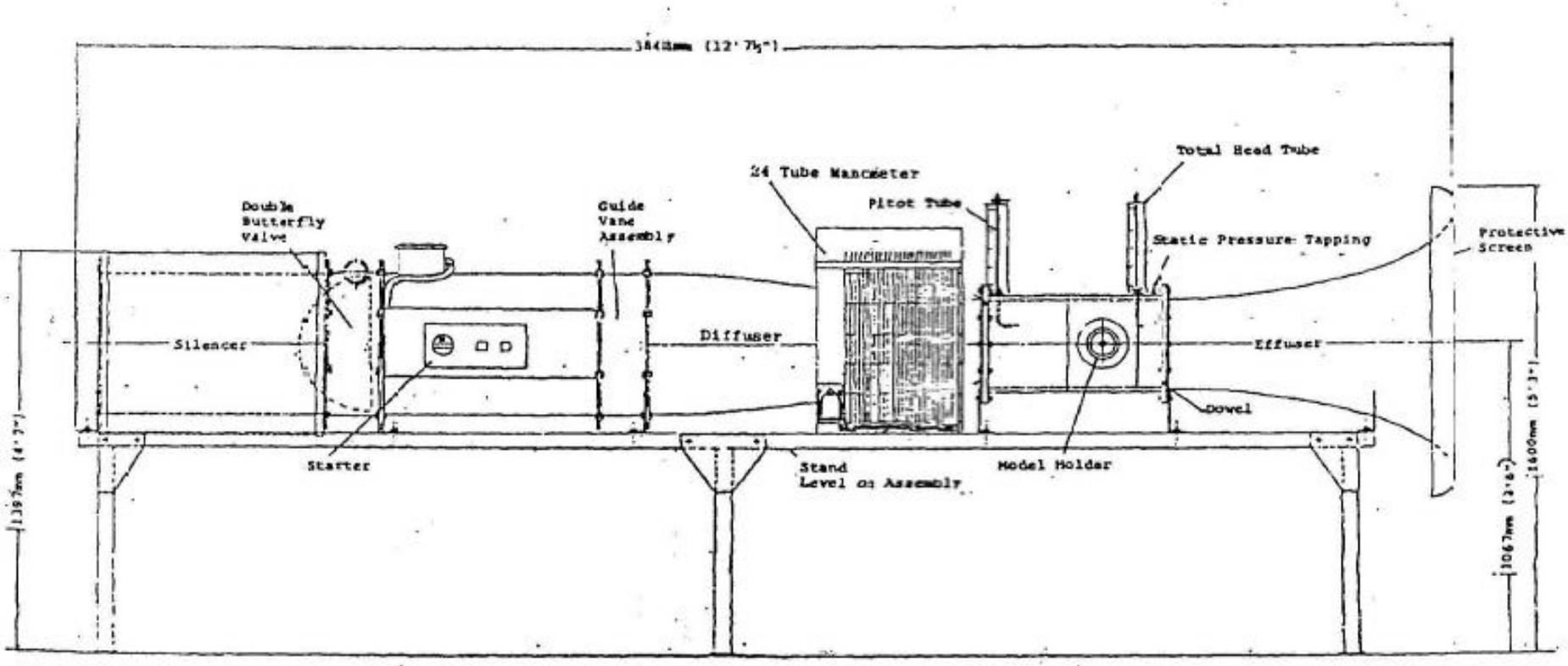
Fox, R.W., McDonal, A.T., ”Introduction to Fluid Mechanics,” 4th ed.,Wiley,1992

Abbott, I.H., and A.E. Von Doenhoff., “Theory of Wing Sections, Including a Summary of Airfoil Data, Dover, 1959

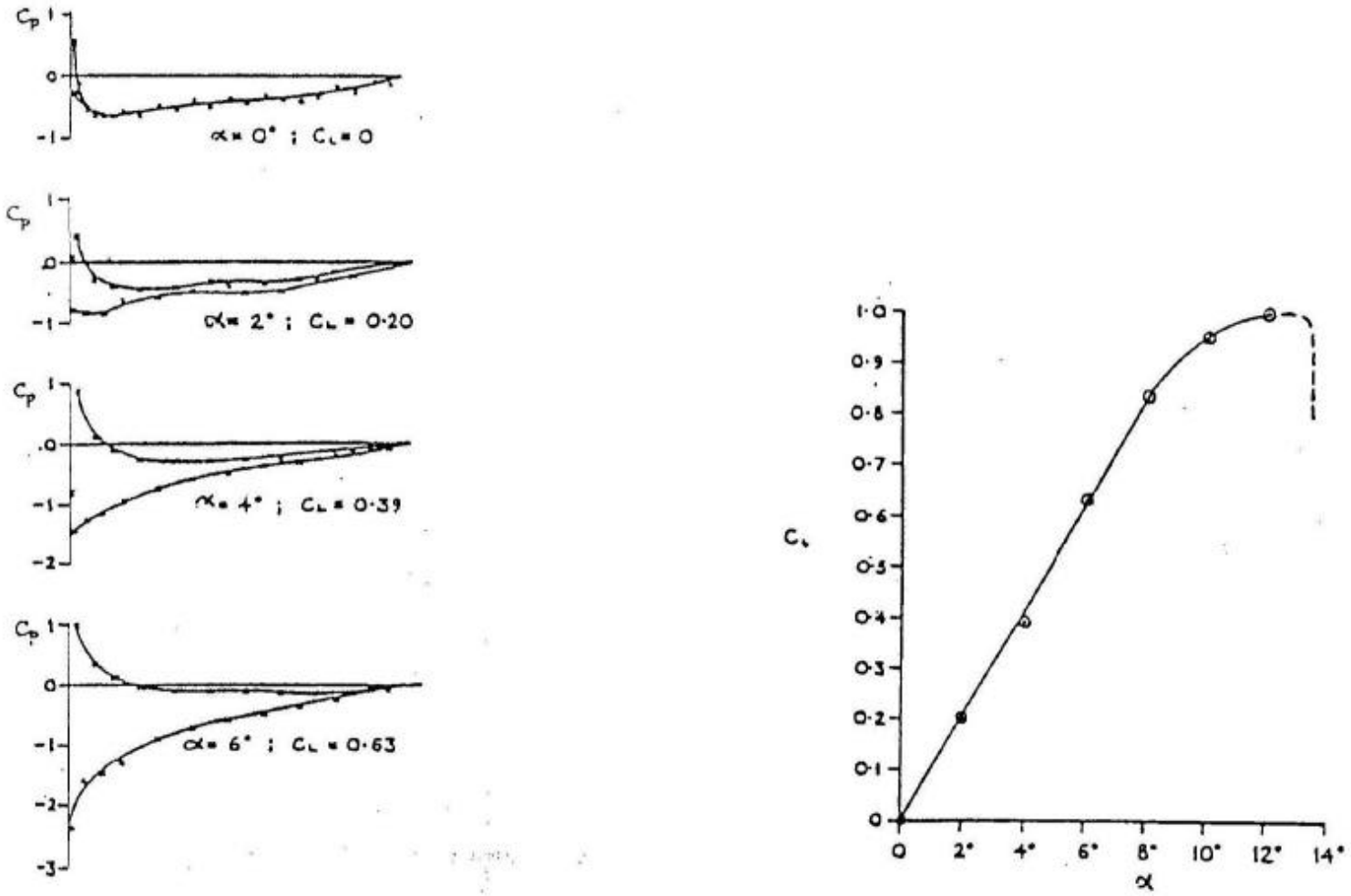
Shame, I.H. , “Mechanics of Fluid.” 3rd ed., McGraw-Hill, 1992.

Janna, W.S., “Introduction to Fluid Mechanics ,” 3rd ed.,PWS , 1993

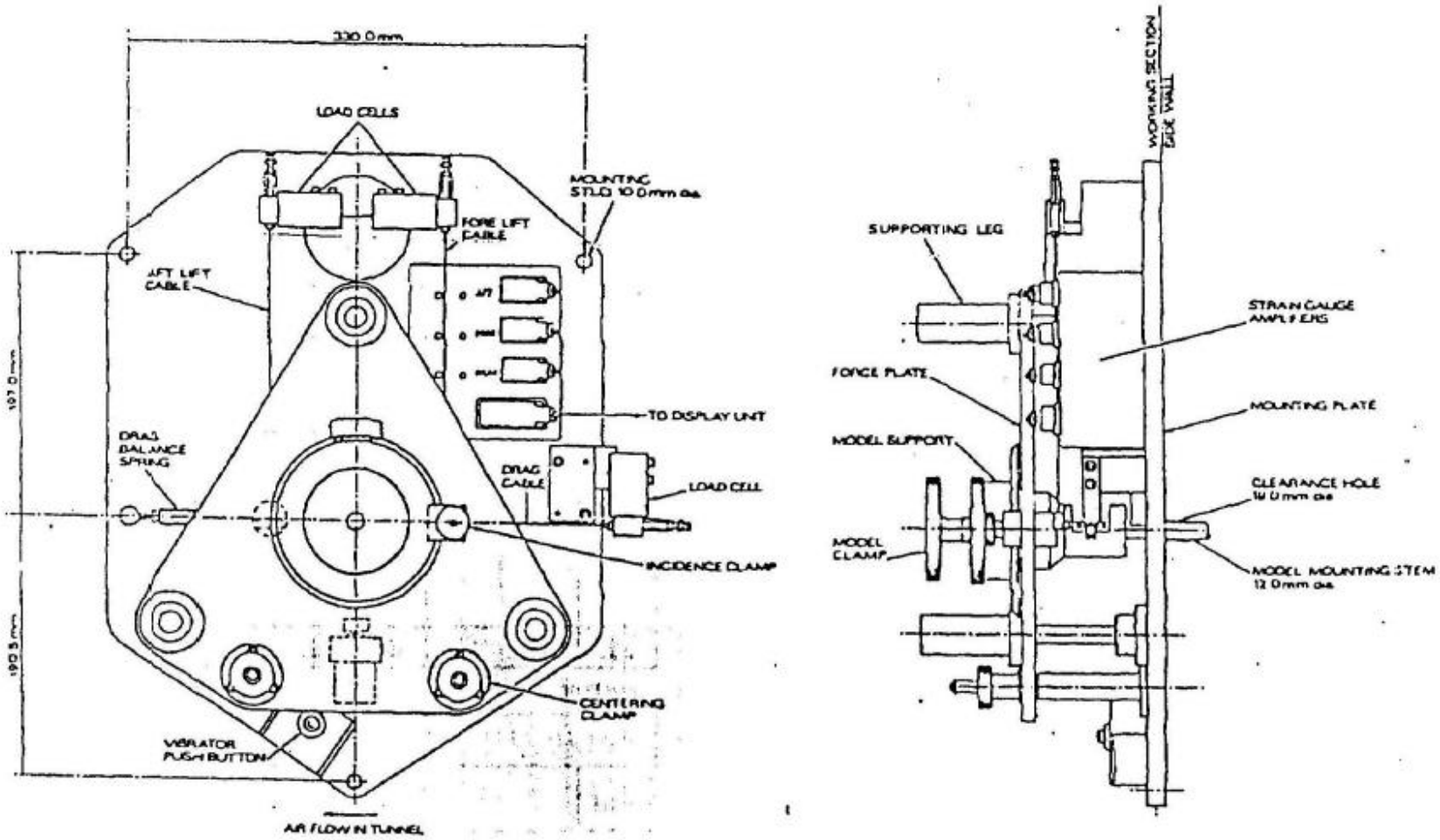
PLIST TE54A : WIND TUNNEL INSTRUCTION MANNAL



รูปที่ A1 อุโมงค์ลม PLINT TE54



รูปที่ A2 การแสดงผลของการไหลผ่านแพนอากาศ



รูปที่ A3 เครื่องมือวัดแรงและส่วนประกอบต่างๆ

DATA SHEET

Calibration of Wind Tunnel: Velocity Profiled

ENGINEER :									ID No.			GROUP			DATE :				
AIR TEMP: °C	ATM Pressure:								Wind Tunnel : PLINT TE54			Fan Blade Angle : 26°			Motor : 3 Ph, 380 V				
Maximum Speed	DISTANCE FROM TOP SURFACE (mm)																		
	5	10	15	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	290	295
P_S of Plan 1 (mmH_2O)																			
P_T of Plan 1 (mmH_2O)																			
P_S of Plan 3 (mmH_2O)																			
P_T of Plan 3 (mmH_2O)																			

Calibration of Wind Tunnel: Calibration Factor, ***k***

ENGINEER :				ID No.		GROUP		DATE :	
AIR TEMP: °C	ATM Pressure:			Wind Tunnel : PLINT TE54		Fan Blade Angle : 26°		Motor : 3 Ph, 380 V	
Center line Velocity	Gate Opening (% of Maximum Opening)								
	10%		25%	50%		75%	90%		100%
P_S of Plan 1 (mmH_2O)									
P_T of Plan 1 (mmH_2O)									
P_S of Plan 3 (mmH_2O)									
P_T of Plan 3 (mmH_2O)									

Pressure Around Cylinder: First Experiment Gate Open..... % (Wind Velocity: .....m/s) : Second Experiment Gate Open..... % (Wind Velocity: .....m/s)

ENGINEER :								ID No.				GROUP		DATE :					
AIR TEMP: °C	ATM Pressure:							Drag: / N			Fore: / N		AFT: / N			Pitching Moment: N			SUT
	ANGULAR ROTATION (DEGREES)																		
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
1^{st} : P_S (mmH_2O)																			
2^{rd} : P_T (mmH_2O)																			

Flow Pass Airfoil:

ENGINEER :										ID No.				GROUP				DATE :						SUT		
AIR TEMP: °C				ATM PRESSURE:						Wind Tunnel : PLINT TE54				WIND VELOCITY : m/s				***Mechanical Engineering***								
	UPPER SURFACE STATICS PRESSURE (mmH_2O)										LOWER SURFACE STATICS PRESSURE (mmH_2O)										FORCE (N)		
Tap Positions	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	D_r	Fore	AFT
$\alpha = 0°$																							
$\alpha = 2°$																							
$\alpha = 4°$																							
$\alpha = 6°$																							
$\alpha = 8°$																							
$\alpha = 10°$																							
$\alpha = 12°$																							
$\alpha = 14°$																							
$\alpha = 16°$																							
$\alpha = 18°$																							
$\alpha = 20°$																							
$\alpha = 22°$																							