บทที่ 3
ชุดทดลองและการทดลอง

งานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับผลของระยะห่างระหว่างวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์ (S) ต่อการเพิ่มสมรรถนะของดิฟฟิวเซอร์ ซึ่งมีชุดทดลองที่ประกอบด้วย อุโมงค์ลม, ท่อก่อนเข้าดิฟฟิวเซอร์, ดิฟฟิวเซอร์ 3 ขนาด, ท่อทางออกของดิฟฟิวเซอร์ (Tailpipe) และวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์แบบ half-delta wing 5 ชุดที่มีระยะห่างระหว่างวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์วัดได้เป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาของชั้นขอบเขตต่อระยะห่างของวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์ (δ/S) เท่ากับ 0.15, 0.19, 0.25, 0.37 และ 0.75 โดยวัดค่าความดันรวมและความดันสถิตที่ทางเข้าและออกของดิฟฟิวเซอร์เพื่อคำนวณหาค่าสมรรถนะของดิฟฟิวเซอร์ และศึกษาลักษณะการกระจายความดันสถิตบนผนังท่อตามทิศทางการไหล ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

3.1. ชุดทดลอง

3.1.1 อุโมงค์ลม (Wind tunnel)

งานวิจัยได้ทำการทดลองในอุโมงค์ที่มีขนาดพัดลม 3 แรงม้า, หน้าตัด settling chamber ประมาณ 1x1 เมตร^2 และ test section เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.6x0.18 เมตร^2 ซึ่งในกรณีนี้จะเป็นส่วนที่ติดตั้งดิฟฟิวเซอร์ โดยรูปภาพที่แสดงส่วนประกอบต่างๆของอุโมงค์ลมอยู่ในรูปที่ 3.1 และภาพถ่ายของอุโมงค์ลมได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2

อากาศจะถูกดูดจากบรรยากาศของห้องไหลผ่านพัดลมแบบเหวี่ยง (Centrifugal blower) ที่ติดตั้งเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (Inverter) เพื่อทำให้สามารถควบคุมความเร็วของการไหลได้ หลังจากนั้นจะผ่านไปยังท่อยาง (Rubber duct) ที่ทำหน้าที่ลดแรงสั่นสะเทือนจากพัดลมไม่ให้มีผลต่อส่วนชุดทดลองอื่นๆ และจะไหลมาจัดตัวในส่วนของท่อพัก (Settling duct) ก่อนไหลเข้าดิฟฟิวเซอร์ที่มีขนาด พื้นที่ทางออกต่อทางเข้าของดิฟฟิวเซอร์เท่ากับ 5.1 เพื่อลดความเร็วของการไหล โดยในดิฟฟิวเซอร์ได้ติดตั้งสกรีน mesh 8 จำนวน 3 อันเพื่อลดการไหลแยกตัวออกจากผนัง ที่ตำแหน่ง 28, 48 และ 88 ซ.ม. วัดตามแนวแกนของดิฟฟิวเซอร์จากทางเข้า (อ่านรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ข) ต่อจากนั้นอากาศจะไหลเข้า settling chamber ที่ประกอบด้วยสกรีน mesh 4 ที่ทางเข้า, honeycomb ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ม.ม. ยาว 120 ม.ม. และ screen mesh 16 อีก 7 อันซึ่งทำหน้าที่ในการจัดเรียงการไหลและลดความปั่นป่วนซึ่งเกิดจากพัดลมลง หลังจากอากาศไหลออกจาก settling chamber จะถูกทำให้มีความเร็วสูงขึ้นเมื่อผ่านเข้าไปยัง contraction ที่มี AR เท่ากับ 9.3 แล้วอากาศจะไหลเข้าส่วน test section ซึ่งประกอบ

ด้วยท่อก่อนเข้าดิฟฟิวเซอร์ (Leading pipe) ที่ทำจากอะคลิลิกใส, ดิฟฟิวเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง และท่อที่ต่อจากทางออกของดิฟฟิวเซอร์ (Tailpipe) แล้วจึงไหลออกสู่บรรยากาศห้องต่อไป

สำหรับรายละเอียดของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถศึกษาเพิ่มเติมจาก Pimpin and Bunyajitradulya (1999), Sathapornnanon et al. (1999) และ Sakulyanontvittaya et al. (1999)

3.1.2 ท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ (Leading pipe)

รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ ซึ่งทำจากแผ่นอะคลิลิกที่มีความหนา 10 ม.ม. นำมาตัดเป็นผนังทั้งสี่ด้าน โดยผนังด้านบนและด้านล่างยึดเข้ากับโครงอะลูมิเนียมมีความหนา 0.25 นิ้ว สำหรับผนังด้านข้างจะยึดกับหน้าแปลนของโครงอะลูมิเนียมทำให้สามารถถอดประกอบผนังด้านข้างทั้งสองด้านได้ ส่วนหน้าแปลนของท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ทำจากอะลูมิเนียมที่มีความหนา 0.5 นิ้ว เมื่อประกอบทุกส่วนเข้าด้วยกันแล้วได้ทำการอุดรอยรั่วด้วยซิลิโคน และทำการปรับผิวที่บริเวณรอยต่อให้เรียบ

3,1.3 ดิฟฟิวเซอร์

รูปที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของดิฟฟิวเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยคือ ดิฟฟิวเซอร์ที่มีลักษณะการไหลแบบ Transitory stall, Fully-developed stall และ Jet flow เรียงจากซ้ายมาขวา โดยดิฟฟิวเซอร์ทั้งหมดมีขนาดของทางเข้าเท่ากับ 18x60 ซ.ม.^{2} และขนาดของทางออกเท่ากับ 70x60 ซ.ม.^{2} หรือมี AR เท่ากับ 3.9 โดยมีมุมรวมเท่ากับ 28, 50 และ 70 องศาตามลำดับ และค่า L/W_i เท่ากับ 5.8, 3.1 และ 2.1 ตามลำดับ ซึ่งพารามิเตอร์ของดิฟฟิวเซอร์เป็นไปตามตารางที่ 3.1 และอยู่ในแผนภูมิลักษณะการไหลของดิฟฟิวเซอร์ในรูปที่ 2.1

ดิฟฟิวเซอร์ทุกตัวมีผนังทั้ง 4 ด้านทำจากแผ่นเหล็กหนา 2 ม.ม. นำมาเชื่อมประกอบเข้าด้วยกัน แล้วเชื่อมเข้ากับหน้าแปลนที่ทำจากเหล็กหนา 5 ม.ม. หลังจากนั้นทำการแต่งพื้นและผนังบริเวณทางเข้าและทางออกให้เรียบ

3.1.4 ท่อทางออกของดิฟฟิวเซอร์ (Tailpipe)

รูปที่ 3.5 ได้แสดงลักษณะของ tailpipe ซึ่งทำจากเหล็กหนา 2 ม.ม. สร้างโดยวิธีเดียวกันกับดิฟฟิวเซอร์ มีหน้าตัด 60x70 ซ.ม.^{2} ยาว 120 ซ.ม. เมื่อนำส่วนท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์, ดิฟฟิวเซอร์ และ tailpipe มาประกอบเข้าด้วยกัน จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.6

3.1.5 วอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์

วอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยได้เปลี่ยนจากแบบ delta wing ในการศึกษาเบื้องต้น (อ่านรายละเอียดในภาคผนวก ก หรือ Pimpin and Bunyajitradulya, (1998)) มาเป็น half-delta wing เนื่องจากสามารถควบคุมระยะห่างของวอร์เทกซ์ได้ง่ายโดยที่พารามิเตอร์อื่นของวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์ไม่เปลี่ยนแปลง โดยทำจากแผ่นเหล็กหนา 1.2 ม.ม. ตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากที่มีความยาว chord 11 ซ.ม. เชื่อมบนฐานที่มีขนาด 12x60 ซ.ม.^{2} ซึ่งทำจากแผ่นเหล็กหนา 1.2 ม.ม.เช่นกัน และแต่งรอยเชื่อมให้เป็น chamfer เมื่อสร้างเสร็จแล้วจะมีลักษณะของชุด half-delta wing ทั้ง 5 ชุดเป็นดังรูปที่ 3.7 โดยการติดตั้ง half-delta wing ให้มีมุมปะทะกับ freestream ด้านเดียวกันหมดดังลักษณะดามรูป จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของวอร์เทกซ์เป็นแบบหมุนดามกัน ซึ่งมีระยะห่างระหว่างปีกสามเหลี่ยมเท่ากับ 4, 8, 12, 16 และ 20 ซ.ม. หรือมีอัตราส่วนของความหนา 95% ของชั้นขอบเขตต่อระยะห่างระหว่างวอร์เทกซ์-เจเนอเรเตอร์ (δ / S) เท่ากับ 0.75, 0.37, 0.25, 0.19 และ 0.15 ดามลำดับ

วอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์ในดิฟฟิวเซอร์ได้ติดตั้งดามรูปที่ 3.8 โดยเว้นระยะห่างจากปากทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ 12 ม.ม. วัดจากด้านท้ายของวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์ ผนังด้านบนได้ติดตั้งให้ด้านท้ายของ half-delta wing หันเข้าหาผนังดิฟฟิวเซอร์ทางซ้ายมือ และผนังด้านล่างได้ติดตั้งให้หันเข้าหาผนังดิฟฟิวเซอร์ทางขวามือ เมื่อมองจากด้านทางออกของดิฟฟิวเซอร์

3.2 ผลการปรับเทียบชุดทดลอง

หลังจากสร้างชุดทดลองเสร็จเรียบร้อย ได้ทำการ calibrate ท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์โดยการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วทั้งหน้าตัดและความหนาของชั้นขอบเขตบนผนังทุกด้าน ที่ตำแหน่งปลายของท่อในขณะที่ไม่ประกอบดิฟฟิวเซอร์ โดยการใช้ pitot probe ซึ่งปลายด้ามทำจากเข็มฉีดยาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.8 ม.ม. และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 1.2 ม.ม. โดยได้วัดปรับเทียบกับ pitot probe มาดรฐานแล้ว ในการปรับเทียบชุดทดลองได้ทำที่ความเร็ว freestream เฉลี่ย 13.5 เมตรต่อวินาที โดยรูปถ่ายของ pitot probe แสดงไว้ในรูปที่ 3.9

การวัดการกระจายของความเร็ว ได้วัดเป็นเมตริกซ์ขนาด 8x29 จุด โดยเว้นระยะห่างจากผนังโดยรอบเท่ากับ 2 ซ.ม. และระยะห่างระหว่างแต่ละจุดทั้งแนวตั้งฉากกับการไหลแนวนอน (Spanwise) และแนวขวางการไหลแนวตั้ง (Transverse) เท่ากับ 2 ซ.ม. ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เมื่อนำค่าความเร็วเฉพาะนอกชั้นขอบเขตซึ่งมีขนาดเมตริกซ์เท่ากับ 6x27 จุดมาพล็อตกราฟพบว่าลักษณะการกระจายของความเร็วเป็นดังรูปที่ 3.10 จากกราฟพบว่าความเร็วนอกชั้น

ขอบเขตจะมีค่าอยู่ในช่วง 13.4-13.7 เมตรต่อวินาที หรือมีความไม่สม่ำเสมอของความเร็วไม่เกิน ± 1.2% ของความเร็ว freestream เฉลี่ย

การวัดรูปร่างความเร็วและความหนาของชั้นขอบเขต ได้วัดทุกๆระยะห่าง 1 ม.ม.จากผนัง ที่ตำแหน่ง A-J ตามรูปที่ 3.10 โดยได้แสดงผลการวัดรูปร่างความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆเทียบกับสมการ power law ที่มีค่า n เป็นค่าเฉลี่ยไว้ในรูปที่ 3.11 พบว่ารูปร่างความเร็วของทุกตำแหน่งจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน และความหนา 95% ของชั้นขอบเขต (δ) ของผนังด้านบนและด้านล่าง (ตำแหน่ง A-F) มีค่าประมาณ 28 ม.ม. และผนังด้านข้าง (ตำแหน่ง G-J) มีค่าประมาณ 30 ม.ม. จากค่าความเร็วที่วัดได้สามารถนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ดังนี้ ค่า displacement thickness (δ_1) ของผนังทุกด้านมีค่าอยู่ในช่วง 4.8-5.4 ม.ม., ค่า momentum thickness (δ_2) มีค่าอยู่ในช่วง 3.6-4.2 ม.ม. และค่า shape factor (H) มีค่าอยู่ในช่วง 1.3-1.4 โดยการคำนวณพารามิเตอร์เหล่านี้ได้จากการประมาณให้รูปร่างความเร็วในชั้นขอบเขตเป็นสมการ power law ซึ่งเป็นการนำผลการวัดมาสร้างสมการของ u/U กับ y/δ แล้วจึงทำการอินทิเกรตหาค่าพารามิเตอร์ สำหรับค่าพารามิเตอร์ของชั้นขอบเขตของทุกตำแหน่งวัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 นอกจากนั้นแล้วทุกตำแหน่งการวัดมีค่า friction coefficient (C_f) ประมาณ 0.0031-0.0033

3.3 พารามิเตอร์ของการทดลอง

รูปที่ 3.12 แสดงความหมายของค่าพารามิเตอร์และลักษณะการติดตั้ง half-delta wing ในการทดลอง ซึ่งการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์ได้แสดงในรูปของพารามิเตอร์ δ/S (δ หมายถึงความหนา 95% ของชั้นขอบเขต และ S หมายถึงระยะห่างระหว่าง half delta wing ที่อยู่ติดกัน) โดยจะต้องกำหนดให้พารามิเตอร์ทางรูปร่างของวอร์-เทกซ์เจเนอเรเตอร์คือ มุม sweepback (Λ), อัตราส่วนของระยะความสูงของปีกสามเหลี่ยมต่อความหนาของชั้นขอบเขต (h/δ) และมุมปะทะ (α) มีค่าคงที่ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า พารามิเตอร์ทางรูปร่างของ half-delta wing ที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานกับดิฟฟิวเซอร์มีค่าดังต่อไปนี้

1. Senoo and Nishi (1974), Anabtawi (1998) และ Johari and Moreira (1998) พบว่ามุมปะทะควรจะมีค่าประมาณ 15 องศา และมุม sweepback ประมาณ 70 องศา เพราะเป็นมุมปะทะและมุม sweepback ที่ทำให้เกิดวอร์เทกซ์ที่มี strength เหมาะสมและไม่เกิดการสลายตัวของวอร์เทกซ์บน half-delta wing

2. Brown et al. (1968), Senoo and Nishi (1974) และ Anabtawi (1998) พบว่าอัตราส่วนของระยะความสูงของปีกสามเหลี่ยมต่อความหนา 95% ของชั้นขอบเขต (h/δ) ควรจะมีค่าประมาณ 1-1.3 ประกอบกับเหตุผลว่าเมื่อความสูงของปีกสามเหลี่ยมมากขึ้น แม้ว่าจะทำให้ strength ของวอร์เทกซ์สูงขึ้น แต่จะทำให้วอร์เทกซ์มีทิศทางออกจากชั้นขอบเขตและแรงด้านที่เกิดขึ้นบนปีกก็จะมากขึ้นด้วย
3. Senoo and Nishi (1974) และ Pauley and Eaton (1988) พบว่าควรจะทำให้เกิดแถวของวอร์เทกซ์ที่มีการเคลื่อนที่แบบ co-rotating flow เพราะการเคลื่อนที่ของวอร์เทกซ์ลักษณะนี้ จะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของดิฟฟิวเซอร์ได้มากกว่าแถวของวอร์เทกซ์แบบ counter-rotating flow โดยลักษณะของการไหลทั้งสองแบบเปรียบเทียบกับการติดตั้ง half-delta wing ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.13
4. ใช้ปีกสามเหลี่ยมที่มีผิวเรียบแบน เพราะสร้างได้ง่าย

ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างปีกสามเหลี่ยมเท่ากับ 4, 8, 12, 16 และ 20 ซ.ม. และกรณีที่ไม่มีวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์จะถือว่ามีระยะห่างระหว่างวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์เท่ากับ ∞ ดังนั้นอัตราส่วนของ δ ต่อระยะห่างระหว่างวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์ (δ/S) จึงมีค่าเท่ากับ 0.75, 0.37, 0.25, 0.19, 0.15 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งพารามิเตอร์ของ half-delta wing ทุกชุดได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

การทดลองทั้งหมดได้ทำการทดลองในดิฟฟิวเซอร์ทั้ง 3 แบบ คือ Transitory stall, Fully-developed stall และ Jet flow ในแต่ละดิฟฟิวเซอร์ได้ทำการวัดสมรรถนะในกรณีที่ติดวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์ทั้ง 5 แบบเทียบกับดิฟฟิวเซอร์แบบธรรมดา (ดิฟฟิวเซอร์ที่ไม่ได้ติดตั้งวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์) และเพื่อทำให้การเรียกชื่อกรณีการทดลองสะดวกจึงกำหนดสัญลักษณ์ของการทดลอง คือ ดิฟฟิวเซอร์แบบ Transitory stall เป็น TSD, ดิฟฟิวเซอร์แบบ Fully-developed stall เป็น FSD และ ดิฟฟิวเซอร์แบบ Jet flow เป็น JD โดยต่อด้วยเลขที่บอกระยะห่างระหว่างวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์เป็น δ/S แต่ตัดเลขศูนย์และจุดทศนิยม ตัวอย่างเช่น TSD25 เป็นการทดลองในดิฟฟิวเซอร์แบบ Transitory stall และมีค่า δ/S เท่ากับ 0.25

3.4. การวัดความดัน

ในการทดลองได้ทำการวัดค่าความดันสถิตและความดันรวมที่ตำแหน่งทางเข้า (ตำแหน่งที่ 1) ซึ่งมีระยะก่อนทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ 18 ซ.ม. หรือ 1 เท่าของความกว้างทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ และที่ตำแหน่งทางออก (ตำแหน่งที่ 2) ซึ่งมีระยะหลังจากทางออกของดิฟฟิวเซอร์เท่ากับ 96 ซ.ม. หรือ 1.5 เท่าของ hydraulic diameter ของทางออกดิฟฟิวเซอร์ เพื่อนำไปคำนวณหา

สมรรถนะของดิฟฟิวเซอร์ซึ่งจะกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.5 การวัดความดันทุกจุดจะอ้างอิงจากความดันสถิดที่ตำแหน่งอ้างอิงซึ่งอยู่บนผนังด้านบนของท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ที่ตำแหน่งที่ 1 (P_{ref}) และใช้ differential pressure transducer ของ AUTO TRAN INCORPORATED รุ่น 750D-212 ที่มีช่วงอ่านค่าความดัน $\pm$ 0.5 นิ้วน้ำ ความดันไฟฟ้าออก 1-10 โวลย์ มีความผิดพลาด $\pm$ 0.25% ซึ่งแสดง pressure transducer และตัวอ่านค่า (Read out) ในรูปที่ 3.14 โดยการวัดความดันทั้งสองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 การวัดค่าความดันสถิด

การอ่านค่าความดันสถิดใช้ท่อทองเหลืองที่มีความยาวประมาณ 1 นิ้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 ม.ม. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 3.2 ม.ม. เสียบผ่านรูบนผนังชุดทดลองโดยปรับแต่งผิวภายในชุดทดลองให้เรียบ ในการอ่านค่าความดันสถิดจะแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ การอ่านค่าความดันที่ตำแหน่งที่ 1, ตำแหน่งที่ 2 และการอ่านค่าความดันสถิดบนผนังด้านบนและด้านล่างของชุดทดลองตามทิศทางการไหลของอากาศ

การอ่านค่าความดันสถิดที่ตำแหน่ง 1 ได้วัดความดันสถิดที่ตำแหน่งกึ่งกลางบนผนังทุกด้าน สำหรับที่ตำแหน่งที่ 2 ได้อ่านค่าความดันสถิดบนผนังทุกด้านของ tailpipe เป็นจำนวน 22 ตำแหน่ง โดยผนังด้านบนและด้านล่างมีด้านละ 5 ตำแหน่งแต่ละตำแหน่งห่างกัน 10 ซ.ม. และผนังด้านข้างมีด้านละ 6 ตำแหน่งแต่ละตำแหน่งห่างกัน 10 ซ.ม. โดยตำแหน่งของการอ่านค่าความดันสถิดที่ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.15(ก-ข)

การอ่านค่าความดันสถิดบนผนังเอียงของดิฟฟิวเซอร์และบนผนังด้านบนและด้านล่างของ tailpipe ได้เจาะรูบนผนังเอียงของดิฟฟิวเซอร์เพื่อเสียบ pressure tap ในลักษณะเดียวกับท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์แต่ทำการติด pressure tap ทั้งหมด 4 แถวบนผนังเอียงแต่ละด้าน มีระยะห่างจากแนวตรงกลางดิฟฟิวเซอร์เท่ากับ 0, 6, 8 และ 12 ซ.ม. จากรูปที่ 3.16(ก-จ) พบว่าแนวทั้งสี่ (เส้นประ) จะมี 2 แนวที่อยู่ตรงกลางระหว่างวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์และแนวที่อยู่ด้านหลังวอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์ของแต่ละกรณีการทดลอง โดย pressure tap 8 ตำแหน่งแรกจากทางเข้าดิฟฟิวเซอร์มีระยะห่างตามแนวผนังเอียงระหว่าง pressure tap เท่ากับ 2 ซ.ม. หรือ 0.67 เท่าของความหนาชั้นขอบเขตสำหรับ 8 ตำแหน่งถัดมาได้เว้นระยะห่างเท่ากับ 4 ซ.ม. หรือ 1.33 เท่าของความหนาชั้นขอบเขต ส่วนตำแหน่งที่เหลือได้เว้นระยะห่างเท่ากับ 8 ซ.ม. หรือ 2.67 เท่าของความหนาชั้นขอบเขต ทำให้ดิฟฟิวเซอร์แต่ละตัวจะมีจำนวนของ pressure tap แตกต่างกันคือ ดิฟฟิวเซอร์แบบ Transitory stall มี 23 ตำแหน่ง ดิฟฟิวเซอร์แบบ Fully-Developed stall มี 19 ตำแหน่ง และดิฟฟิวเซอร์แบบ Jet flow มี 17 ตำแหน่ง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.2 การอ่านค่าความดันรวม

การอ่านค่าความดันรวมใช้ pitot probe ที่ทำขึ้นใช้เองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้ทำการ calibrate เทียบกับ pitot-static probe มาตรฐานแล้ว โดยการวัดความดันรวมแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ การวัดความดันรวมที่ตำแหน่งที่ 1, การวัดรูปร่างความเร็วในชั้นขอบเขตที่ตำแหน่ง 1 และการวัดการกระจายความดันรวมที่ตำแหน่งที่ 2

การวัดความดันรวมที่ตำแหน่ง 1 เพื่อหาค่าความดันจลน์ที่ทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ได้ทำการวัดเพียงตำแหน่งเดียวเนื่องจากความเร็วของการไหลมีความสม่ำเสมอค่อนข้างมากตามผลการปรับเทียบชุดทดลอง ในการวัดใช้ pitot probe ที่ปลายด้ามทำจากเข็มฉีดยาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.8 ม.ม. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 1.2 ม.ม. ก้าน probe ทำจากท่อทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 3.2 ม.ม. ซึ่งมีลักษณะตามรูปที่ 3.9 สอดผ่านรูบนผนังของท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์

สำหรับการวัดรูปร่างความเร็วภายในชั้นขอบเขตบนผนังด้านบนและด้านล่างที่ตำแหน่งที่ 1 ได้ใช้ pitot probe อันเดียวกับการวัดความดันรวมที่ตำแหน่ง 1 ซึ่งวัดเฉพาะตำแหน่งกึ่งกลางของท่อโดยการเลื่อน probe ในแนว transverse ทีละ 2 ม.ม. จนถึงระยะ 50 ม.ม. จากผนัง จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการวัดไม่เกิน $\pm$ 0.5 ม.ม. โดยได้แสดงตำแหน่งการวัดไว้ในรูปที่ 3.17(ก) ในการวัดค่าได้สอด probe ผ่านรูบนผนังท่อซึ่งเป็นรูเดียวกับที่ใช้วัดความดันรวม และภาพถ่ายวิธีการวัดได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.18

การอ่านค่าการกระจายความดันรวมที่ตำแหน่ง 2 ใช้ pitot probe ที่ทำจากท่อสแตนเลสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 ม.ม. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 4.5 ม.ม. ได้ทำการวัดเป็นเมตริกซ์ขนาด 18x15 จุด ซึ่งระยะห่างระหว่างจุดทั้งแนว spanwise และแนว transverse เท่ากับ 4 ซ.ม. โดยเว้นระยะจากผนังด้านบนและล่างเท่ากับ 1 ซ.ม. และเว้นจากผนังด้านข้างทั้งสองด้านเท่ากับ 2 ซ.ม. โดยได้แสดงตำแหน่งการวัดไว้ในรูปที่ 3.17(ข) ในการวัดค่าได้ทำการเลื่อน probe ในแนว spanwise ทีละ 4 ซ.ม. ผ่านรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ม.ม. บนผนังของ tailpipe ด้านซ้ายมือ ซึ่งจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการวัดไม่เกิน $\pm$ 4 ม.ม. ซึ่งความคลาดเคลื่อนของการวัดจะมีค่ามากเมื่อก้าน probe ยื่นเข้าไปใน tailpipe มาก เพราะจะทำให้ก้าน probe สั่น แต่จากการลองจับก้าน probe ให้อยู่นิ่งพบว่าความคลาดเคลื่อนของการอ่านค่าความดันไม่เกิน $\pm$ 1.5 Pa และภาพถ่ายวิธีการวัดได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.19

3.5 สัมประสิทธิ์ที่ใช้วัดค่าสมรรถนะของดิฟฟิวเซอร์

ในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของดิฟฟิวเซอร์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การฟื้นความดันสถิต, สัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันรวม, สัมประสิทธิ์การกระจายตัวความดันรวม, ดัชนีความเบี่ยงเบนความดันรวม, ค่าความเบี่ยงเบน $C_{p,t}$ และสัมประสิทธิ์การกระจายความดันสถิตบนผนัง ดิฟฟิวเซอร์โดยแต่ละค่าสัมประสิทธิ์จะนิยามดังต่อไปนี้

3.5.1. สัมประสิทธิ์การฟื้นความดันสถิต (Static pressure recovery, C_p)

ได้นิยามค่าสัมประสิทธิ์การฟื้นความดันสถิตเป็น

$$C_p = \frac{\tilde{P}_2 - \tilde{P}_1}{q_1} \qquad (3.5.1)$$

โดย

$\tilde{P}_2$ คือค่าเฉลี่ยของความดันสถิตที่ทางออกของดิฟฟิวเซอร์ โดยการวัดความดันสถิตรอบ tailpipe ที่ตำแหน่ง 2 เป็นจำนวน 22 จุด

$\tilde{P}_1$ คือค่าเฉลี่ยของความดันสถิตที่ทางเข้าของดิฟฟิวเซอร์ โดยการวัดความดันสถิตโดยรอบท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ที่ตำแหน่ง 1 เป็นจำนวน 4 จุด

q_1 คือความดันจลน์ที่ทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ เป็นค่าความแตกต่างของความดันรวมที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์กับค่าเฉลี่ยความดันสถิตที่ตำแหน่งที่ 1

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การฟื้นความดันสถิตจะสามารถบอกถึง ความสามารถของดิฟฟิวเซอร์ในการเปลี่ยนพลังงานจลน์มาเป็นพลังงานศักย์ในรูปของความดันสถิตที่เพิ่มมากขึ้น ในเทอมที่เป็นอัตราส่วนกับความดันจลน์ที่ทางเข้าของดิฟฟิวเซอร์

3.5.2 สัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันรวม (Total pressure loss coefficient, K)

ได้นิยามค่าสัมประสิทธิ์ความดันลดเป็น

$$K = \frac{P_{T1} - \hat{P}_{T2}}{q_1} \qquad (3.5.2)$$

โดย

P_{T1} คือความดันรวมที่ทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ โดยการวัดความดันรวมที่ตำแหน่งกึ่งกลางของท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ที่ตำแหน่ง 1

$\hat{P}_{T2}$ คือค่า area-averaged ของความดันรวมที่ทางออกของดิฟฟิวเซอร์ โดยการวัดความดันรวมที่ตำแหน่ง 2 เป็นเมตริกซ์ขนาด 18x15 จุด

q_1 คือความดันจลน์ที่ทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ เป็นค่าความแตกต่างของความดันรวมที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์กับค่าเฉลี่ยความดันสถิตที่ตำแหน่งที่ 1

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันรวมจะมีความหมายว่า พลังงานที่สูญเสียในรูปของความดันรวมที่ลดลง อยู่ในเทอมอัตราส่วนต่อความดันจลน์ที่ทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ โดยการหาค่าเฉลี่ยของความดันรวมไม่ได้ใช้วิธีการ mass averaged เหมือนกับสมการ 2.3.4 เนื่องจากการแปลงค่าความดันเป็นความเร็วที่บางจุดของการทดลองจะทำไม่ได้ เพราะค่าความดันรวมต่ำกว่าความดันสถิต เนื่องจากมีการไหลย้อนกลับหรือทิศทางของความเร็วไม่แน่นอน ทำให้เปลี่ยนมาใช้การหาค่าเฉลี่ยแบบ area averaged แทน

3.5.3 สัมประสิทธิ์การกระจายความดันรวม (Total pressure distribution coefficient, C_{PT})

ได้นิยามค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความดันรวมเป็น

$$C_{PT} = \frac{P_{T2} - \hat{P}_{T2}}{q_1} \qquad (3.5.3)$$

โดย

P_{T2} คือค่าความดันรวมที่วัดแต่ละตำแหน่ง ที่ตำแหน่งที่ 2

$\hat{P}_{T2}$ คือค่า area-averaged ของความดันรวมที่ทางออกของดิฟฟิวเซอร์

q_1 คือความดันจลน์ที่ทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ เป็นค่าความแตกต่างของความดันรวมที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์กับค่าเฉลี่ยความดันสถิตที่ตำแหน่งที่ 1

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การกระจายความดันรวม จะแสดงถึงค่าความดันรวมที่ตำแหน่งใดๆในหน้าตัดมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของความดันรวมที่ทางออกของดิฟฟิวเซอร์ อยู่ในเทอมอัตราส่วนต่อความดันจลน์ที่ทางเข้าดิฟฟิวเซอร์

3.5.4 ดัชนีความเบี่ยงเบนความดันรวม (Total pressure distortion index, D)

ได้นิยามค่าดัชนีความเบี่ยงเบนความดันรวมเป็น

$$D = \frac{\hat{P}_T\big|_{x,y} - \hat{P}_{T2}}{\hat{P}_{T2} - P_{ref}} \qquad (3.5.4)$$

โดย

$\hat{P}_T\big|_{x,y}$ คือค่า area-averaged ของความดันรวม ในบริเวณหน้าด่างที่สนใจที่มีขนาดเมดริกซ์ x x y จุด โดยการเลือกการกระจายความดันรวมขนาดเมดริกซ์ x จุดต่อ y จุด

$\hat{P}_{T2}$ คือค่า area-averaged ของความดันรวมที่ทางออกของดิฟฟิวเซอร์

P_{ref} คือความดันสถิตอ้างอิงที่ตำแหน่งก่อนทางเข้าดิฟฟิวเซอร์

ดังนั้นดัชนีความเบี่ยงเบนความดันรวมมีความหมายว่า ความแตกต่างระหว่างความดันรวมเฉลี่ยในบริเวณหน้าด่างที่สนใจกับความดันรวมเฉลี่ยทั้งพื้นที่ทางออกของดิฟฟิวเซอร์ ในเทอมที่เป็นอัตราส่วนกับความแตกต่างระหว่างความดันรวมเฉลี่ยทั้งพื้นที่ทางออกของดิฟฟิวเซอร์กับ P_{ref}

งานวิจัยนี้ได้คำนวณค่า D โดยเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าด่างหลายๆค่าและได้กล่าวถึงผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าด่างไว้ในหัวข้อ 4.7

3.5.5 ค่าความเบี่ยงเบน C_{PT} ($\sigma_{C_{PT}}$)

ได้นิยามค่าความเบี่ยงเบน C_{PT} เป็น

$$\sigma_{C_{PT}} = \sqrt{\frac{1}{A}\iint_A \left[C_{PT} - \hat{C}_{PT}\right]^2 dA} \qquad (3.5.5)$$

โดย

C_{PT} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความดันรวม

$\hat{C}_{PT}$ คือ ค่า area averaged ของ C_{PT}

A คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล

ดังนั้นค่าความเบี่ยงเบน C_{prf} มีความหมายว่า ความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันรวมทั้งหน้าตัดทางออกของดิฟฟิวเซอร์ ถ้ามีค่ามากหมายความว่าการกระจายความดันรวมไม่สม่ำเสมอมาก

3.5.6 สัมประสิทธิ์การกระจายความดันสถิตบนผนังดิฟฟิวเซอร์ (Wall static pressure coefficient, C_{pw})

ได้นิยามค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความดันสถิตบนผนังดิฟฟิวเซอร์เป็น

$$C_{pw} = \frac{P - P_{ref}}{q_1} \qquad (3.5.6)$$

โดย

P คือความดันสถิตบนผนังของดิฟฟิวเซอร์และ tailpipe ในทิศทางการไหล

P_{ref} คือความดันสถิตอ้างอิงที่ตำแหน่ง 1

q_1 คือความดันจลน์ที่ทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ เป็นค่าความแตกต่างของความดันรวมที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์กับค่าเฉลี่ยความดันสถิตที่ตำแหน่งที่ 1

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การกระจายความดันสถิตบนผนังดิฟฟิวเซอร์จึงมีความหมายว่า ความแตกต่างระหว่างความดันสถิตที่ตำแหน่งต่างๆกับ P_{ref} ในเทอมที่เป็นอัตราส่วนต่อความดันจลน์ที่ทางเข้าดิฟฟิวเซอร์

3.6 สภาวะของการทดลอง

ในทุกการทดลองได้กำหนดให้ การไหลมีความดันรวมเทียบกับ P_{ref} ในท่อก่อนเข้าดิฟฟิวเซอร์ที่ตรงกลางหน้าตัดที่ตำแหน่งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 110.2 $\pm$ 1.1 Pa หรือคิดเป็นความเร็วเท่ากับ 13.28 $\pm$ 0.05 เมตรต่อวินาที หรือมีเรโนลด์นัมเบอร์ที่นิยามด้วยความกว้างของทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ (Re_w) เท่ากับ 1.6×10^5

หลังจากได้วัดสภาวะของการไหลในท่อทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ พบว่าทุกการทดลองมีค่าความหนา 95% ของชั้นขอบเขต (δ) ที่บริเวณทางเข้าของดิฟฟิวเซอร์อยู่ในช่วง 28-32 ม.ม. ตลอดแนวผนังทุกด้าน มีค่า displacement thickness (δ_1) อยู่ในช่วง 5.0-6.2 ม.ม. มีค่า momentum thickness (δ_2) อยู่ในช่วง 3.9-4.5 ม.ม. และมีค่า shape factor (H) ประมาณ 1.2-

1.4 และพื้นที่ขวางการไหลของชั้นขอบเขต (B_1) ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของพื้นที่ displacement thickness ต่อพื้นที่ทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ทั้งหมดของดิฟฟิวเซอร์ที่ไม่ได้ติดวอร์-เทกซ์เจเนอเรเตอร์ประมาณ 0.08-0.09 โดยการคำนวณพารามิเตอร์เหล่านี้ได้จากการประมาณให้รูปร่างความเร็วในชั้นขอบเขตเป็นสมการ power law ซึ่งเป็นการนำผลการวัดมา สร้างสมการของ u/U กับ y/δ แล้วจึงทำการอินทิเกรตหาค่าพารามิเตอร์ โดยได้สรุปสมการของความเร็วในชั้นขอบเขต, δ , δ_1, δ_2 และ H ของแต่ละการทดลอง ในตารางที่ 3.4 ซึ่งพบว่าในแต่ละการทดลองจะมีลักษณะรูปร่างความเร็วในชั้นขอบเขตบนผนังด้านบนและด้านล่างคล้ายคลึงกัน

การหาค่า skin friction coefficient (C_f) ได้จากการพล็อตความเร็วในชั้นขอบเขตที่วัดได้เทียบกับสมการจาก Cole's law โดยรายละเอียดของการคำนวณสามารถอ่านเพิ่มเติมจาก Clauser F.H. (1954) พบว่าทุกการทดลองจะมีค่าประมาณ 0.0029-0.0032 และรูปร่างความเร็วในชั้นขอบเขตของทุกการทดลองเปรียบเทียบกับสมการของ Cole's Law อยู่ในกราฟรูปที่ 3.20 (ก-ค) พบว่าลักษณะของรูปร่างความเร็วของทุกการทดลองมีความใกล้เคียงกับรูปร่างของความเร็วที่คำนวณด้วยสมการของ Cole's Law ยกเว้นในบริเวณที่ใกล้กับผนังและในบริเวณขอบด้านนอกของชั้นขอบเขต เพราะ pitot probe ที่ใช้ในการวัดมีขนาดใหญ่ทำให้ค่าที่วัดใกล้กับผนังอาจจะมีความคลาดเคลื่อนได้ และสำหรับความแตกต่างในช่วงที่ u/U มีค่าใกล้กับ 1 สันนิษฐานว่าอาจจะเกิดจากสมการของ Cole's Law ใช้ได้ดีเฉพาะในช่วง outer layer ของชั้นขอบเขตเท่านั้น ทำให้การพล็อตกราฟในบริเวณที่ใกล้กับขอบด้านนอกของชั้นขอบเขตมีลักษณะดามรูป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย