บทที่ 2

ชุดทดลองและการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มต้นที่มีต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ทร้อนที่หมุนควงในกระแสลมขวาง โดยการใช้ Tab รูปสามเหลี่ยมวางบนตำแหน่งรอบขอบปากเจ็ท 8 ตำแหน่ง และทำการทดลองที่ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) คงที่ประมาณเท่ากับ 4 ทั้งในกรณีที่เจ็ทมีการหมุนควงที่ค่า Swirl ratio (Sr) ประมาณเท่ากับ 0.52 และในกรณีที่เจ็ทไม่มีการหมุนควง ซึ่งการทดลองจะให้ความร้อนกับเจ็ทอากาศจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของกระแสลมขวางประมาณ 50 องศาเซลเซียส และวัดอุณหภูมิเป็นหน้าตัดตามแนว Downstream โดยมีรายละเอียดของชุดทดลองและการทดลองดังนี้

2.1 ชุดทดลอง

ชุดทดลองในงานวิจัยนี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยชุดทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ อุโมงค์ลมที่มีขนาดหน้าตัดทดสอบ 98.5×98.5 ตารางเซนติเมตร และชุดเจ็ทแบบท่อหมุนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร

2.1.1 อุโมงค์ลม (Wind tunnel)

อุโมงค์ลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหน้าที่สร้างกระแสลมขวาง โดยแสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ พัดลมแบบหอยโข่ง (Centrifugal Blower) ขนาด 30 กิโลวัตต์ ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (Diffuser) ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) ขนาด 300×300 ตารางเซนติเมตร Contraction ที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดด้านทางเข้าต่อด้านทางออกเท่ากับ 9 และหน้าตัดทดสอบ (Test section) ขนาด 98.5×98.5 ตารางเซนติเมตร

การทำงานของอุโมงค์ลมเริ่มจากอากาศจะถูกดูดจากบรรยากาศของห้องผ่านพัดลมหอยโข่ง (Centrifugal Blower) ชนิดใบพัดแบบ Backward-curved airfoil blade ขนาด 30 กิโลวัตต์ดังรูปที่ 2.2 มีขนาดทางออกกว้าง 80 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร ซึ่งถูกควบคุมความเร็วรอบโดยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (Inverter) จากนั้นอากาศจะไหลผ่านท่ออ่อน (Flexible duct) ซึ่งทำหน้าที่ลดผลของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากพัดลมออกจากส่วนอื่นๆของอุโมงค์ลม

หลังจากนั้นอากาศจะผ่านเข้าไปในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (Main diiffuser) ดังรูปที่ 2.3 เพื่อลดความเร็วของอากาศ โดยมี Adaptor diffuser เป็นส่วนต่อระหว่าง Flexible duct กับ Main Diffuser โดย Main Diffuser มีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดทางเข้า 160×160 ตารางเซนติเมตร ขนาดทางออก 300×300 ตารางเซนติเมตร ยาว 160 เซนติเมตร คิดเป็นอัตราส่วนพื้นที่เท่ากับ 3.5 และมีมุมเอียงรวม 47 องศา โดยภายใน Diffuser นั้นมีส่วนประกอบสำหรับปรับการไหลได้แก่ แผ่นเหล็กเจาะรู (Perforated plate) ที่มี ขนาดรู (มิลลิเมตร)× ระยะระหว่างรู (มิลลิเมตร) เท่ากับ 25×32 มีอัตราส่วนช่องเปิด 55 % จำนวน 4 แผ่น และแผ่นเหล็กเจาะรูที่มีขนาด 2×3 มีอัตราส่วนช่องเปิด 40 % จำนวน 1 แผ่น ที่ระยะจากทางเข้า Main Diffuser เท่ากับ 0, 25, 50, 80 และ 110 เซนติเมตรตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิด Seperation, ทำให้อากาศกระจายเต็มพื้นที่หน้าตัดของ Diffuser และลดการหมุนวนของอากาศที่ออกจากพัดลม

หลังจากอากาศถูกลดความเร็วใน Diffuser แล้ว จะผ่านเข้าไปยังห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) ที่มีขนาด 300×300 ตารางเซนติเมตร ยาว 217 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.4 โดยภายในมีส่วนประกอบสำหรับปรับการไหลได้แก่ ตาข่ายสแตนเลส (Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ 50×36 จำนวน 2 แผ่น และตาข่ายอลูมิเนียม (Household screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ (16×18)×31 จำนวน 5 แผ่น โดยมีระยะห่างกันประมาณ 31 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อปรับทิศทางการไหลและเพิ่มความสม่ำเสมอของความเร็วของอากาศ จากนั้นอากาศจะไหลผ่าน Contraction ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดด้านทางเข้ากับด้านทางออกเท่ากับ 9 โดยรูปร่างเส้นโค้งของ Contraction นั้นออกแบบตามสมการ Polynomial ดีกรี 4 โดยมีจุดเปลี่ยนความโค้งที่ระยะ 2/3 เท่าของความยาว 300 เซนติเมตร โดยที่ด้านเข้าและด้านออกของส่วนโค้งจะต่อส่วนตรงขนานกับทิศทางการไหลยาวออกมาอีกด้านละ 10 เซนติเมตร ทำให้ Contraction มีความยาวรวมจริง 320 เซนติเมตร Contraction ทำหน้าที่เร่งให้อากาศมีความเร็วสูงขึ้นจนได้ความเร็วภายในหน้าตัดทดสอบ (Test section) ที่ต้องการ และยังช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอและลดปริมาณความปั่นป่วนของอากาศก่อนไหลเข้าสู่ Test section

สำหรับ Test section ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5 มีขนาดหน้าตัด 98.5×98.5 ตารางเซนติเมตร ประกอบด้วย 2 ท่อน แต่ละท่อนมีความยาว 240 เซนติเมตร สำหรับท่อนแรกแสดงดังรูปที่ 2.6 เป็นท่อนที่ทำการทดลอง ซึ่งผนังด้านบนและด้านข้างทำจากแผ่นอะคลีลิกหนา 1 เซนติเมตร และพื้นด้านล่างซึ่งเป็นส่วนที่ต่อกับชุดเจ็ทแบบท่อหมุนนั้นทำจากเหล็กแผ่นหนา 5 มิลลิเมตร กว้าง 97.5 เซนติเมตร ซึ่งกว้างน้อยกว่าระยะห่างระหว่างผนังข้าง ทำให้มีช่องว่างระหว่างพื้นด้านล่างกับผนังของ Test section ด้านละประมาณ 5 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันผลของการไหลแบบหมุนวนบริเวณมุม (Conner flow) โดยพื้นด้านล่างยื่นไปใน Contraction 10 เซนติเมตร และยกสูงขึ้น

มาจากโครงด้านล่างของหน้าตัดทดสอบ 4.5 เซนติเมตร เพื่อลดผลของความหนาของชั้นขอบเขตที่พื้นที่เติบโตขึ้นภายใน Contraction ทำให้ขนาดหน้าตัดทดสอบส่วนแรกมีความกว้าง 98.5 เซนติเมตรและสูง 94 เซนติเมตร โดยชุดเจ็ทแบบหมุนควงจะติดตั้งที่ระยะ 50 เซนติเมตร จากขอบด้านหน้าของแผ่นเหล็กด้านล่าง สำหรับ Test section ส่วนที่สองมีหน้าที่ป้องกันผลของเจ็ทที่ปลายทางออกที่อาจมีผลต่อการวัดโดยผนังทั้ง 4 ด้านทำจากแผ่น อะคลีลิกหนา 1 เซนติเมตร และมีขนาดหน้าตัด 98.5×98.5 ตารางเซนติเมตร

2.1.2 ชุดเจ็ทแบบท่อหมุน

ชุดเจ็ทแบบท่อหมุนแสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.7 และภาพถ่ายดังรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนได้แก่ ส่วนพัดลมและ Orifice ส่วน Heating chamber และส่วนท่อหมุน (Rotating pipe)

ในส่วนพัดลมและ Orifice นี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมและตรวจสอบอัตราการไหลของเจ็ทซึ่งแสดงดังภาพถ่ายในรูปที่ 2.9 โดยอากาศจะถูกเป่าจากพัดลมแบบความดันสูง (High pressure blower) ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ผ่านท่ออ่อน (Flexible duct) เพื่อลดการสั่นสะเทือนจากพัดลมไปยังส่วนอื่นๆของชุดทดลอง ผ่านระบบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3, 4 และ 5 นิ้ว (Norminal size) โดยมีวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly valve) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของเจ็ทอากาศ ต่อจากนั้นอากาศจะผ่าน Honeycomb ซึ่งทำจากหลอดพลาสติกเรียงเต็มหน้าตัดของท่อปะกบปลายทั้งสองด้วยตาข่ายอลูมิเนียม (Household screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ (16×18)×31 เพื่อปรับทิศทางการไหลและทำให้อากาศมีความเร็วสม่ำเสมอผ่าน Orifice ซึ่งมีอัตราส่วนช่องเปิด (β) เท่ากับ 0.7 เพื่อตรวจสอบอัตราการไหลของเจ็ท

ในส่วน Heating chamber นั้นเป็นส่วนที่ให้ความร้อนกับเจ็ทอากาศแสดงดังรูปที่ 2.10 โดยมีลักษณะเป็นห้องขนาดหน้าตัด 30×30 ตารางเซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร โดยทางเข้ามีลักษณะเป็นหน้าแปลนขนาดท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว (Nominal size) ซึ่งต่อกับท่อพลาสติกของส่วนพัดลมและ Orifice โดยติดตั้งตาข่ายสแตนเลส (Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ 50×36 เพื่อเป็น Filter สำหรับกรองฝุ่น สำหรับทางออกได้ติดตั้ง Bush ซึ่งทำจากวัสดุผสมของคาร์บอนและกราไฟท์เกรด JP1300 เพื่อต่อรองรับท่อหมุน ภายใน Heating chamber ได้ติดตั้ง Heater ไฟฟ้าขนาด 2 กิโลวัตต์ จำนวน 3 ตัว ซึ่งจะถูกควบคุมกำลังโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Variac แบบ 3 เฟส ขนาด 27 kVA (0-480 V / 30A) ดังรูปที่ 2.10ค และระหว่าง Heater แต่ละตัวจะมีแผ่นเหล็กเจาะรูที่มีขนาดรู (มิลลิเมตร)×ระยะระหว่างรู (มิลลิเมตร) เท่ากับ 10×15 และมีอัตราส่วนช่องเปิด 50% ทั้งนี้ก็เพื่อทำให้อุณหภูมิของอากาศมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดก่อนผ่าน Heater แต่ละตัว และหลังจาก Heater ตัวสุด

ท้ายจะมีแผ่นเหล็กเจาะรูดังกล่าวอีก 4 แผ่น เพื่อให้อากาศมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอก่อนเข้าไปในส่วนของท่อหมุน (Rotating pipe) นอกจากนี้ที่ผนังด้านนอกทุกด้านของห้องจะติดตั้งฉนวนชนิดแผ่นใยหินเพื่อลดการสูญเสียพลังงานความร้อนออกสู่ภายนอก

ในส่วนท่อหมุน (Rotating pipe) เป็นส่วนที่ทำให้เจ็ทอากาศมีความเร็วในแนวสัมผัสและทำให้เกิดการหมุนควง โดยแสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.11 และภาพถ่ายดังรูปที่ 2.12 สำหรับท่อที่ใช้เป็นท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (d) เท่ากับ 32 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร โดยแบ่งเป็น 3 ท่อนดังรูปที่ 2.12ก และรูปที่ 2.12ข ซึ่งท่อแต่ละท่อนสวมอยู่กับตลับลูกปืนชนิดปรับแนวได้เอง (Self-aligning ball bearings) แบบมีปลอกสวม (Adaptor sleeve) ยี่ห้อ SKF รุ่น 1209EK ท่อนละ 2 ชุดและท่อแต่ละท่อนถูกยึดติดกันด้วย Coupling ซึ่งทำจากท่อเหล็กและใช้ Set screw ในการยึด

สำหรับท่อท่อนแรกมีความยาว 30 เซนติเมตร ($9.4d$) ปลายด้านล่างสวมด้วย Bush ซึ่งติดตั้งที่ทางออกของ Heating chamber ท่อท่อนที่สองมีความยาว 51 เซนติเมตร ($15.9d$) ซึ่งภายในบรรจุ Honeycomb โดยทำจากท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.5 มิลลิเมตร บรรจุเต็มหน้าตัดท่อและยาวตลอดความยาวของท่อนที่สอง โดยมีตาข่ายสแตนเลส (Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ 30×35 ปะกบ สำหรับท่อท่อนที่สามมีความยาว 45 เซนติเมตร ($14d$) ภายในบรรจุตาข่ายสแตนเลส (Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ 30×35 จำนวน 3 อัน โดยอันแรกติดตั้งที่ระยะห่างจากปลาย Honeycomb 6 เซนติเมตร ($1.9d$) แต่ละอันห่างกัน 6 เซนติเมตร ($1.9d$) ทำให้อันสุดท้ายอยู่ห่างจากปากเจ็ท 27 เซนติเมตร ($8.4d$) ตาข่ายดังกล่าวมีหน้าที่ลดความปั่นป่วนของอากาศหลังจากผ่าน Honeycomb นอกจากนี้ที่ปลายด้านบนของท่อท่อนที่สามได้ต่อเข้ากับพื้นด้านล่างของ Test section ของอุโมงค์ลมด้วย Bush ซึ่งทำจากวัสดุผสมของคาร์บอนและกราไฟท์เกรด JP1300 และใช้ Mechanical seal ยี่ห้อ Zero-leak แบบ Double cartridge seal ขนาด 40 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันอากาศรั่วระหว่างท่อหมุนกับพื้นด้านล่างของหน้าตัดดังรูปที่ 2.12ค โดยใช้น้ำในการหล่อเย็นหน้าสัมผัสของ Mechanical seal ซึ่งทำจาก Silicon carbide และแสดงอุปกรณ์ในการหล่อเย็นดังรูปที่ 2.12ง

ในการหมุนขับท่อได้ใช้สายพานชนิดร่องวีต่อเข้ากับ Pulley แบบ Taper lock ขับจากเพลาของมอเตอร์ ยี่ห้อ Crompton Greaves แบบ 3-phase induction motor ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ 2830 รอบต่อนาที โดยส่งกำลังไปยังท่อท่อนที่สอง ซึ่งมีอัตราทดความเร็วรอบของมอเตอร์ต่อความเร็วรอบของท่อหมุนเท่ากับ 1 ต่อ 2.2 และควบคุมความเร็วรอบของท่อหมุนโดยใช้เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (Inverter) ยี่ห้อ ABB รุ่น ACS401-006-3 ขนาด 5.5 กิโลวัตต์ดังรูปที่ 2.13

2.1.3 Tab รูปสามเหลี่ยม

Tab ที่ใช้ทำจากแผ่นเหล็กซึ่งมีความหนา 1 มิลลิเมตร โดยมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่มีมุมยอดเท่ากับ 90^{o} และมีความสูงซึ่งวัดจากขอบปากเจ็ทถึงมุมยอดของสามเหลี่ยมเท่ากับ 4.8 มิลลิเมตร โดยจะติด Tab ให้วางราบอยู่บนพื้นของ Test section ตรงขอบปากเจ็ท ซึ่งจะทำให้ระนาบของ Tab รูปสามเหลี่ยมนี้จะตั้งฉากกับแนวแกนของเจ็ท ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ทั้งนี้ Tab จะมีค่า Blockage ratio ประมาณ 3.0% ของพื้นที่ปากทางออกของเจ็ท โดยที่ค่านี้จะประมาณเท่ากับค่า Blockage ratio ของ Tab รูปสามเหลี่ยมที่ใช้ในการวิจัยของ Zaman and Foss (1997) แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการติดตั้ง Tab ที่ใช้ในการวิจัยนี้จะมีความแตกต่างกับงานวิจัยของ Zaman and Foss (1997) ซึ่งได้ติดตั้งโดยให้ระนาบของ Tab เอียงทำมุม $\pm 45^{o}$ กับแนวแกนของเจ็ท

2.2 พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง

พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.15 คือพิกัด X, Y และ Z ซึ่งเป็นพิกัดอ้างอิงเทียบกับหน้าตัดทดสอบ โดยมีตำแหน่งกึ่งกลางเจ็ทเป็นจุดเริ่มต้น

ตำแหน่งที่ติด Tab ตามแนวเส้นรอบวงของปากเจ็ทนั้นกำหนดให้ห่างกันทุกๆ 45^{o} โดยถ้ายึดตำแหน่งขอบปากเจ็ทด้านที่ปะทะกระแสลมขวาง (Windward) เป็นตำแหน่งเริ่มต้น ดังนั้นจะได้ตำแหน่งที่ติด Tab ทั้งหมดจำนวน 8 ตำแหน่งคือ ตำแหน่ง Windward (W), Suction (S), Leeward (L), Pressure (P) และตำแหน่งตรงกลางระหว่างตำแหน่งหลักทั้งสี่อีก 4 ตำแหน่งคือ Suction - Windward (SW), Suction - Leeward (SL), Pressure - Leeward (PL) และ Pressure - Windward (PW) แสดงดังรูปที่ 2.14

ทั้งนี้การเรียกชื่อตำแหน่งหลักของขอบปากเจ็ททั้งสี่ดังกล่าวข้างต้นนั้น เนื่องมาจากการสร้างให้เจ็ทอากาศเกิดการหมุนควงในกระแสลมขวางโดยใช้ท่อหมุน ทำให้ลักษณะการไหลของเจ็ทคล้ายกับการหมุนควงของทรงกระบอกในกระแสลมขวาง ซึ่งในกรณีหลังนี้จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Magnus effect” ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยด้านที่ทิศทางของความเร็วในแนวสัมผัสของการหมุนเสริมกับทิศทางของกระแสลมขวาง จะทำให้กระแสลมขวางมีความเร็วมากขึ้น ส่งผลให้มีความดันลดลงจนเกิดความดันต่ำด้าน A (ด้าน Suction) ในขณะที่ด้านที่ทิศทางของความเร็วสัมผัสของการหมุนหักล้างกับความเร็วของกระแสลมขวาง จะทำให้กระแสลมขวางมีความเร็วลดลง ส่งผลให้มีความดันเพิ่มขึ้นจนเกิดความดันสูงด้าน B (ด้าน Pressure) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะยืมศัพท์ของปรากฏการณ์ “Magnus effect” โดยจะเรียกด้านที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสของท่อหมุนมีทิศทางเดียวกันกับความเร็วของกระแสลมขวางว่า “ด้าน Suction” ในและ

ด้านที่ความเร็วของท่อหมุนมีทิศทางตรงข้ามกับความเร็วของกระแสลมขวางว่า "ด้าน Pressure" ส่วนขอบด้านหน้าที่ปะทะกระแสลมขวางโดยตรงนั้นจะเรียกว่า "ด้าน Windward" และสุดท้ายขอบหลังของปากเจ็ทที่ไม่ได้ปะทะกับกระแสลมขวางจะเรียกว่า "ด้าน Leeward"

2.3 สภาวะของการทดลอง

การทดลองได้ทำที่ความเร็วของกระแสลมขวางประมาณ 2.2 ± 0.0 เมตรต่อวินาที และความเร็วของเจ็ทซึ่งพิจารณาจากค่าเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area average) ซึ่งนิยามจาก

$$\overline{u_j} = \frac{1}{A}\int u dA \qquad (2.1)$$

โดย $\overline{u_j}$ ในการทดลองมีค่าประมาณ 9.4 ± 0.1 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วที่จุดกึ่งกลางประมาณ 10.0 ± 1.0 เมตรต่อวินาที และมีอุณหภูมิของกระแสลมขวางประมาณ 29.7 ± 1.8 °C และอุณหภูมิของเจ็ทซึ่งพิจารณาจากค่าเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area average) ซึ่งนิยามจาก

$$\overline{T_j} = \frac{1}{A}\int T dA \qquad (2.2)$$

โดย $\overline{T_j}$ ในการทดลองมีค่าประมาณ 77.8 ± 1.7 °C โดยมีอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางประมาณ 86.6 ± 1.9 °C ทำให้ได้อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล $r = (\rho_j \overline{u}_j^2 / \rho_{cf} \overline{u}_{cf}^2)^{1/2}$ คงที่ที่ประมาณ 4.0 และอัตราส่วนความเร็ว $r_v = \overline{u}_j / \overline{u}_{cf}$ ประมาณ 4.3 อัตราส่วนความหนาแน่น $r_d = \rho_j / \rho_{cf}$ ประมาณ 0.9 โดยมีค่า Reynolds number ของเจ็ท $\mathrm{Re}_j = \overline{u}_j d/\nu$ ประมาณ $14{,}500 \pm 100$ และ Reynolds number ของกระแสลมขวาง $\mathrm{Re}_{cf} = \overline{u}_{cf} d/\nu$ ประมาณ $4{,}300 \pm 0$ โดยแสดงค่ารายละเอียดของสภาวะการทดลองและค่าความคลาดเคลื่อนในทดลองดังตารางที่ 2.1

เนื่องจากการให้ความร้อนกับเจ็ทอากาศทำให้มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเจ็ทและกระแสลมขวาง ดังนั้นจึงพิจารณาผลของแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นจากค่า Densimetric Froude number (Fr) ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวของเจ็ทอากาศกับแรงเฉื่อยของกระแสลมขวางโดย

$$Fr = \left[\frac{(\rho_{cf} - \rho_j) g d}{\rho_{cf} u_{cf}^2}\right]^{1/2} \qquad (2.3)$$

ซึ่งในการทดลองมีค่า Fr เท่ากับ 0.1 และค่า Fr/r ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวของเจ็ทอากาศกับแรงเฉื่อยของเจ็ทอากาศโดย

$$Fr/r = \left[\frac{(\rho_{cf} - \rho_j)gd}{\rho_j u_j^2}\right]^{1/2} \qquad (2.4)$$

ซึ่งในการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.024 นั่นคือผลของแรงลอยตัวเนื่องจากเจ็ทร้อนนั้นมีค่าประมาณ 10% ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของกระแสลมขวางและมีค่าประมาณ 2.4% ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของเจ็ท

เพื่อความสะดวกจะได้นิยามชื่อกรณีการทดลองที่ไม่ติด Tab เป็น Sr0 และ Sr52 สำหรับกรณีที่เจ็ทไม่มีการหมุนควง และมีการหมุนควงที่ Swirl ratio (*Sr*) เท่ากับ 0.52 ตามลำดับ และในกรณีที่มีการติด Tab จะใช้ตัวอักษร W, S, L, P, SW, SL, PL และ PW วางต่อท้ายชื่อกรณีการทดลองดังกล่าวด้วย โดยตัวอักษรเหล่านี้จะแทนชื่อตำแหน่งบนขอบปากเจ็ทที่กล่าวแล้วข้างต้น ทั้งนี้ได้สรุปกรณีการทดลองทั้งหมดไว้ในตารางที่ 2.2

2.4 วิธีการทดลองและอุปกรณ์การวัด

การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือการวัดสภาวะเริ่มต้นและการวัดการกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การวัดสภาวะเริ่มต้น

การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวาง

การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวางในการศึกษานี้ ได้ทำการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วภายในหน้าตัดทดสอบ และการวัดความหนาของชั้นขอบเขตที่ผนังพื้นของหน้าตัดทดสอบ

สำหรับการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วภายใน Test section นั้น จะทำการวัดที่ระยะ x = -15 เซนติเมตร และที่ความเร็วเฉลี่ยภายในหน้าตัดทดสอบประมาณ 2.2 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้ในการทดลอง โดยได้แบ่งการวัดออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจะทำการวัดทั้งหน้าตัดทดสอบของอุโมงค์ลมซึ่งมีขนาด 100 x 100 ตารางเซนติเมตร โดยทำการวัดเป็นเมตริกซ์ขนาด 9 จุด × 9 จุด ห่างกัน 10 เซนติเมตร สำหรับส่วนที่สองจะทำการวัดละเอียดเฉพาะบริเวณที่คาดว่ากระแสลมขวางจะปะทะกับเจ็ท ซึ่งมีขนาดหน้าตัดประมาณ $3rd$ x $3rd$ หรือ 40 x 40 ตารางเซนติเมตร โดยทำการวัดเป็นเมตริกซ์ขนาด 9 จุด × 9 จุด ห่างกัน 5 เซนติเมตร ทั้งนี้การวัดความเร็วจะใช้ Pitot probe (แบบ A) ดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.17ก และภาพถ่ายในรูปที่

2.18ก เป็นเครื่องมือวัด โดย Probe ดังกล่าวทำขึ้นจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 3 มิลลิเมตร ดัดให้โค้งเป็นมุมฉาก มีระยะจากปลาย Probe ถึงแนวก้าน 90 มิลลิเมตร (19 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของปลาย Probe) และก้าน Probe ยาว 140 เซนติเมตร ความดันที่วัดได้จาก Pitot probe จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer ชนิด Differential ยี่ห้อ SETRA รุ่น 264 ที่มีช่วงการวัดความดันขาเข้า ±0.05 นิ้วน้ำ ช่วงแรงดันไฟฟ้าด้านทางออก 0-5 Volts และความถูกต้อง (Accuracy) เท่ากับ ±0.25% Full scale ดังรูปที่ 2.19ก จากนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวจะถูกอ่านค่าโดยใช้ Digital multimeter ยี่ห้อ Fluke รุ่น 19 ดังรูปที่ 2.19ข

สำหรับการวัดความหนาของชั้นขอบเขตที่ผนังพื้นของหน้าตัดทดสอบนั้น จะทำการวัด 3 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งแรกก่อนถึงขอบปากเจ็ทด้าน Windward $(x, z) = (-0.5rd, 0)$ ส่วนอีกสองตำแหน่งนั้นจะวัดที่ด้านข้างทั้งสองก่อนถึงปากเจ็ท $(x, z) = (-0.5rd, -1.5rd), (-0.5rd, 1.5rd)$ ที่ความเร็วเฉลี่ยภายในหน้าตัดทดสอบประมาณ 2.2 เมตรต่อวินาที โดยใช้ความละเอียด (Resolution) ในการวัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร สำหรับเครื่องมือวัดนั้นใช้ Pitot probe (แบบ B) ดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.17ข และภาพถ่ายในรูปที่ 2.18ข เป็นเครื่องมือวัด โดย Probe ดังกล่าวทำขึ้นจากเข็มสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1.2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.8 มิลลิเมตร โดยเข็มถูกดัดให้โค้งเป็นมุมฉาก และมีระยะจากปลายเข็มถึงแนวก้าน 32 มิลลิเมตร (53 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของเข็ม) โดยเข็มสแตนเลสถูกต่อเข้ากับท่อทองเหลืองเพื่อใช้เป็นก้าน Probe มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3.2 มิลลิเมตร ทำให้มีความยาวรวมของก้าน Probe ประมาณ 33 เซนติเมตร ความดันที่วัดได้จาก Pitot probe จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer และถูกอ่านค่าโดยใช้ Digital multimeter ชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วของกระแสลมขวาง

การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ท

การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ทก่อนทำการทดลองในแต่ละกรณี ได้ทำการวัดในขณะที่ไม่มีกระแสลมขวาง และยังไม่มีการติด Tab ที่ขอบปากเจ็ท โดยจะให้ความร้อนกับเจ็ทจนจุดศูนย์กลางเจ็ทมีอุณหภูมิและความเร็วคงที่เท่ากับ 87.0 ± 1.4 °C และ 10.6 ± 0.1 เมตรต่อวินาที สำหรับกรณีที่เจ็ทไม่มีการหมุนควง และเท่ากับ 86.2 ± 2.0 °C และ 9.6 ± 0.1 เมตรต่อวินาที สำหรับกรณีที่เจ็ทมีการหมุนควงที่ Sr เท่ากับ 0.52 ตามลำดับ ทั้งนี้สภาวะเริ่มต้นของทั้งกรณีเจ็ทไม่หมุนควงและเจ็ทหมุนควงจะมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากันคือ 9.4 ± 0.1 เมตรต่อวินาที ดังนั้นทั้งสองกรณีจะมีอัตราการไหลโดยปริมาตรเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อได้ติด Tab ไปบนขอบปากเจ็ทแล้ว ไม่ได้ทำการวัดความเร็วหรืออัตราการไหลโดยปริมาตรอีกครั้ง ดังนั้นอัตราการไหลโดย

ปริมาตรของอากาศที่ออกมาจากปากเจ็ทอาจไม่เท่ากันในทุกกรณีการทดลองที่ติด Tab ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล $r = (\rho_j \overline{u_j^2} / \rho_{cf} \overline{u_{cf}^2})^{1/2}$ คงที่ประมาณ 4.0 เป็นเพียงค่า Nominal

ทั้งนี้ในการวัดจะใช้ Pitot probe และ Yaw probe ในการวัดการกระจายของความเร็ว และใช้ Thermocouple ในการวัดการกระจายของอุณหภูมิ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับการวัดความเร็วในกรณีเจ็ทที่ไม่หมุนควง (Sr0) นั้นได้วัดการกระจายของความเร็วเริ่มต้นที่ปากเจ็ท 4 แนวโดยทำการหมุนท่อทีละ 45 องศา ทั้งหมด 4 ครั้ง และใช้ Pitot probe ในการวัดความเร็วในแนวแกน (u) ซึ่งในการวัดนั้นได้ใส่ Probe เข้าทางด้านข้างของหน้าตัดทดสอบ และเลื่อน Probe ตามแนว z ดังรูปที่ 2.20 ทั้งนี้ใช้ความละเอียดในการวัด (Resolution) เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร โดยใช้ Pitot Probe (แบบ C) ดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.17ค และภาพถ่ายในรูปที่ 2.18ค เป็นเครื่องมือวัด โดย Probe ทำขึ้นจากเข็มสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1.2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.8 มิลลิเมตร ถูกดัดให้โค้งเป็นมุมฉาก และมีระยะจากปลายเข็มถึงแนวก้าน 35 มิลลิเมตร (28 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของเข็ม) โดยเข็มสแตนเลสถูกต่อเข้ากับท่อทองเหลืองเพื่อใช้เป็นก้าน Probe มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3.2 มิลลิเมตร ทำให้มีความยาวรวมของก้าน Probe 87 เซนติเมตร ซึ่งความดันที่วัดได้จาก Pitot probe จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer (ยี่ห้อ SETRA รุ่น 264) ที่มีช่วงการวัดความดันขาเข้า ±0.25 นิ้วน้ำและถูกอ่านค่าโดยใช้ Digital multimeter (ชุดเดียวกับที่ใช้ในการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วของกระแสลมขวาง)

สำหรับการวัดความเร็วในกรณีที่เจ็ทมีการหมุนควงที่ (Sr52) นั้นได้ใช้ Yaw probe แบบ Three-tube cobra probe ลักษณะเดียวกับของ Chue (1975) ในการวัดความเร็วแนวแกน (u) และความเร็วแนวสัมผัส (w) โดยวัดตามแนว z ดังรูปที่ 2.20 ทั้งนี้ใช้ความละเอียด (Resolution) ในการวัดเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร สำหรับ Yaw probe ที่ใช้นั้นแสดงดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.17 ง และภาพถ่ายในรูปที่ 2.18ง ทำขึ้นจากเข็มสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 0.5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.32 มิลลิเมตร จำนวน 3 อันยึดติดกัน โดยเข็มด้านข้างทั้ง 2 ด้านถูกฝนให้มีมุมเอียง (α) เท่ากับ 30 องศา และถูกดัดโค้งเป็นมุมฉาก โดยมีระยะจากปลายเข็มถึงแนวก้าน 35 มิลลิเมตร ซึ่งก้านเข็มสแตนเลสแต่ละก้านถูกต่อเข้ากับท่อทองเหลืองเพื่อใช้เป็นก้าน Probe มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3 มิลลิเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร ทำให้ก้าน Probe มีความยาวรวม 77 เซนติเมตร ซึ่งความดันแตกต่างที่วัดได้จาก Yaw probe แต่ละด้านจะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure (ยี่ห้อ SETRA รุ่น 264) ที่มีช่วงการวัดความดันขาเข้า ±0.25 นิ้วน้ำและถูกอ่านค่าโดยใช้ Digital multimeter (ชุดเดียวกับที่ใช้ในการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วของกระแสลมขวาง)

โดย Yaw probe ที่ทำขึ้นนี้ได้ทำการปรับเทียบกับ Pitot-Static Probe แบบมาตรฐานที่ความเร็ว 4, 8 และ 12 เมตรต่อวินาทีที่อุณหภูมิห้อง และเนื่องจากเป็นการวัดเจ็ทอากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นในการคำนวณความเร็วจึงได้พิจารณาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเนื่องจากอุณหภูมิของเจ็ทอากาศดังกล่าวด้วย โดยแสดงรายละเอียดของการปรับเทียบและการคำนวณความเร็วในภาคผนวก ข และในการวัดความเร็วรอบของท่อหมุนได้ใช้ Optical tachometer ยี่ห้อ SKF รุ่น TMOT6 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.19ค

สำหรับการวัดอุณหภูมิในทุกกรณีนั้นได้ใช้ Thermocouple เป็นอุปกรณ์การวัด สำหรับกรณี Sr0 ได้ทำการวัด 4 แนวเช่นเดียวกับการวัดความเร็ว และวัดตามแนว z สำหรับกรณี Sr52 ดังรูปที่ 2.20 โดย Thermocouple ที่ใช้นั้นมี Sensor เป็นลวด Thermocouple ชนิด Type T (Copper-Constantan) ยี่ห้อ OMEGA รุ่น TT-T-30 ที่มีช่วงของการวัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง –270 ถึง 400 องศาเซลเซียส โดยลวด Thermocouple ดังกล่าว จะถูกสอดเข้าไปใน Probe ดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.17จ และภาพถ่ายในรูปที่ 2.18จ ซึ่งก้าน Probe ทำจากท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และมีความยาวรวม 126 เซนติเมตร เพื่อให้มีการโก่งน้อยที่สุด และส่วนปลาย Probe ทำจากท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3 มิลลิเมตร และเข็มฉีดยาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1.5 มิลลิเมตร โดยดัดให้ส่วนปลายงอเป็นรูปตัวแอลยื่นออกจากแนวแกน 10 เซนติเมตร และให้ปลายของ Thermocouple อยู่เลยจากปลาย Probe ประมาณ 5 มิลลิเมตร เพื่อให้ Probe มีผลต่อการไหลน้อยที่สุด โดยสัญญาณที่ได้จากลวด Thermocouple จะถูกส่งเข้าไปในตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermocouple thermometer) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 52-2 ดังรูปที่ 2.19ง ซึ่งมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 0.1 องศาเซลเซียส โดยค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบเครื่องมือวัดนี้ถูกจำกัดโดยลวด Thermocouple ซึ่งมีค่าประมาณ ±0.5 °C ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ทำการทดลองคือประมาณ 87 °C โดย Thermocouple ดังกล่าวได้ทำการสอบเทียบ (Calibrate) กับอุปกรณ์มาตรฐานคือ Thermometer โดยใช้อ่างน้ำทำความร้อน และทำการสอบเทียบทุก 2 องศาเซลเซียส ดังแสดงผลการสอบเทียบดังรูปที่ 2.21 พบว่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก Thermocouple มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิที่อ่านได้จากอุปกรณ์มาตรฐาน โดยมีความชันของกราฟเท่ากับ 1 และระยะตัดแกนเท่ากับ +0.1

2.4.2 การวัดการกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัด

ในงานวิจัยนี้สำหรับทุกกรณีที่ศึกษา นั้นได้ทำการวัดการกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัดบนระนาบขวาง (Cross plane) y-z ตามแนว Downstream ในบริเวณ Near field และ Far field ที่ระยะ x/rd เท่ากับ 0.25, 0.50 และ 1.0 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.22 โดยใช้ Thermocouple และตัวอ่านอุณหภูมิ ชุดเดียวกันกับการวัดสภาวะเริ่มต้นของอุณหภูมิที่ปากเจ็ท ทั้งนี้ได้วัดเป็น

เมตริกซ์ที่มีความละเอียดในการวัด (Resolution) เปลี่ยนตามขนาดของการกระจายของเจ็ทในแต่ละหน้าตัดคือ ที่ระยะ x/rd เท่ากับ 0.25 และ 0.50 ใช้ความละเอียด ($\Delta y \times \Delta z$) = (10 มิลลิเมตร × 10 มิลลิเมตร) และที่ระยะ x/rd เท่ากับ 1.0 ใช้ความละเอียด ($\Delta y \times \Delta z$) = (12 มิลลิเมตร × 12 มิลลิเมตร) โดยมีจำนวนจุดในการวัดแต่ละหน้าตัดประมาณ 18จุด × 18 จุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย