บทที่ 2

ชุดทดลองและการทดลอง

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีเจ็ตทุติยภูมิฉีดแบบคงตัวและแบบพัลส์เข้าผสมตามแนวเส้นรอบวง รวมถึงกรณีของเจ็ตปฐมภูมิที่ไม่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิ ซึ่งเป็นการไหลแบบเจ็ตอิสระ สำหรับการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์จะพิจารณาถึงผลของความถี่และ Duty cycle ของการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์ที่มีต่อคุณลักษณะการผสม โดยมีรายละเอียดของชุดทดลองและการทดลองดังนี้

2.1 ชุดทดลอง

ชุดทดลองในงานวิจัยนี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหลภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยชุดทดลองประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ อุโมงค์น้ำ, ชุดเจ็ตปฐมภูมิที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D) 9.4 มิลลิเมตร และชุดเจ็ตทุติยภูมิที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) 1 มิลลิเมตร

2.1.1 อุโมงค์น้ำ

อุโมงค์น้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหน้าที่สร้างการไหลแบบกระแสน้ำตาม โดยแสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ 1)เครื่องสูบน้ำ 2)ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) 3) หน้าตัดทดสอบ (Test Section) ขนาดหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส 19.6 x 19.6 ตารางเซนติเมตร และ 4) ส่วนควบคุมระดับน้ำล้นแบบคงที่

การทำงานของอุโมงค์น้ำมีระบบการไหลเป็นแบบระบบเปิด (Open Circuit) เริ่มจากน้ำจะถูกดูดจาก ถังเก็บน้ำขนาด 220 ลิตรผ่านเครื่องสูบน้ำแบบ Submersible Water Pump ยี่ห้อ HAILIDA รุ่น HX-6500B ขนาด 130 วัตต์ ดังรูปที่ 2.2 จากนั้นจะไหลผ่านสายยางซึ่งทำหน้าที่ส่งผ่านน้ำเข้ามายังอุโมงค์น้ำทางท่ออะคลีลิกที่มีรูเจาะพรุนดังรูปที่ 2.3 เพื่อกระจายน้ำที่เข้ามายังอุโมงค์ให้เกิดการไหลเต็มพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์น้ำ และเพื่อลดความปั่นป่วนที่ทางเข้าจะหุ้มท่ออะคลีลิกด้วยฟองน้ำดังรูปที่ 2.4

หลังจากนั้นน้ำจะไหลเข้ามายังส่วนแรกของอุโมงค์น้ำ ซึ่งเป็นส่วนของห้องจัดปรับการไหล (Settling Chamber) ดังรูปที่ 2.5 ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดทางเข้าและออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 19.6 x19.6 ตารางเซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ภายในประกอบด้วยตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh 30 จำนวน 2 แผ่นอยู่ด้านหน้าและหลังของ Honeycomb ซึ่งทำจากหลอดกาแฟที่มี

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ยาว 10 เซนติเมตร วางเรียงเต็มหน้าตัดการไหล และถัดมาจะมีตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh 50 จำนวน 2 แผ่นวางห่างกันประมาณ 5 เซนติเมตร ชุดจัดปรับการไหลนี้มีหน้าที่เพื่อปรับทิศทางการไหลและทำให้ความเร็วของของไหลมีความสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดก่อนที่จะไหลเข้าสู่ส่วนที่สองของอุโมงค์น้ำคือส่วนหน้าตัดทดสอบ (Test Section)

สำหรับส่วนหน้าตัดทดสอบนั้นแสดงไว้ดังรูปที่ 2.6 มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 19.6 x 19.6 ตารางเซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร ผนังทั้งสี่ด้านทำจากแผ่นอะคลีลิกหนา 5 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าตัดทดสอบจะมีท่อเจ็ตติดตั้งอยู่เพื่อให้การไหลของเจ็ตอยู่ในส่วนของหน้าตัดทดสอบ เมื่อของไหลไหลผ่านหน้าตัดทดสอบจะไหลต่อไปยังส่วนที่สามของอุโมงค์น้ำคือส่วนควบคุมระดับน้ำล้นแบบคงที่ ดังรูปที่ 2.7 มีขนาดพื้นที่หน้าตัดทางเข้าและออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 19.6 x19.6 ตารางเซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร โดยของไหลจะไหลออกจากอุโมงค์น้ำทางช่องน้ำล้น (Overflow Channel) ซึ่งอยู่ที่ส่วนท้ายของอุโมงค์น้ำ ทำให้สามารถควบคุมระดับน้ำของระบบให้คงที่ เมื่อของไหลไหลออกจากอุโมงค์น้ำแล้วจะไหลเข้าสู่ถังระบายน้ำทิ้ง สาเหตุที่เลือกการทำงานของอุโมงค์น้ำเป็นระบบเปิด เนื่องมาจากในการทดลองเป็นการศึกษาการผสมของเจ็ตโดยใช้การเกิดปฏิกิริยาของสารละลายกรด-เบส ในการแสดงผลจึงต้องการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายกรด-เบสให้คงที่ในระหว่างทำการทดลอง

2.1.2 ชุดเจ็ตปฐมภูมิ

ชุดเจ็ตปฐมภูมิได้แสดงลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.8 มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ 1) เครื่องสูบน้ำ 2) ถังเก็บน้ำ และ 3) ถังควบคุมระดับน้ำจ่ายเจ็ตแบบคงที่ (Constant Head)

การทำงานของชุดเจ็ตปฐมภูมิเริ่มจากเครื่องสูบน้ำแบบ Submersible Water Pump ยี่ห้อ KAIYO รุ่น KY-150TS ขนาด 150 วัตต์ดังรูปที่ 2.9 ทำหน้าที่ในการจ่ายน้ำจากถังเก็บน้ำปริมาตร 120 ลิตร ผ่านสายยางขนาด 0.75 นิ้ว ไปยังถังควบคุมระดับน้ำจ่ายเจ็ตแบบคงที่ (Constant Head) ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งอยู่สูงจากระดับพื้นเป็นระยะ 4 เมตร โดยภายในถังควบคุมระดับน้ำจ่ายเจ็ตจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนที่จ่ายน้ำเข้าสู่ท่อของเจ็ตปฐมภูมิ ซึ่งระดับน้ำในส่วนนี้จะถูกควบคุมให้มีระดับคงที่ โดยน้ำที่ล้นออกจากส่วนแรกจะไหลเข้าสู่ส่วนที่สองของถังควบคุมระดับน้ำจ่ายเจ็ตและไหลกลับเข้าสู่ถังเก็บน้ำด้านล่าง ซึ่งในการทดลองปั๊มจะจ่ายน้ำไหลวนในระบบการไหลตลอดการทดลอง

เมื่อของไหลไหลออกจากถังควบคุมระดับน้ำจ่ายเจ็ตที่ต่ออยู่กับท่อเจ็ตปฐมภูมิซึ่งเป็นท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 9.4 มิลลิเมตร ต่ออยู่กับบอลวาล์ว (Ball Valve) ทำหน้าที่ในการปิด-เปิดน้ำจ่ายเจ็ตปฐมภูมิ จากนั้นของไหลจะผ่านมายังเกจวาล์ว (Gate Valve) ทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลของเจ็ต และไหลเข้าสู่ข้องอเพื่อปรับทิศทางการไหลก่อนไหลเข้าสู่อุโมงค์

น้ำ โดยมีความยาวของท่อตรงก่อนออกจากปากเจ็ตเท่ากับ 95 เซนติเมตร ($90D$) และปากทางออกของเจ็ตจะอยู่ในส่วนของหน้าตัดทดสอบการไหลของอุโมงค์น้ำ ซึ่งอยู่ห่างจากตาข่ายอลูมิเนียมตัวสุดท้ายของอุโมงค์น้ำเป็นระยะ 15 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.6 และแสดงท่อเจ็ตปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 9.4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.11

2.1.3 ชุดเจ็ตทุติยภูมิ

ชุดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์มีลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.12 มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ 1) เครื่องสูบน้ำ 2) ถังเก็บน้ำ และ 3) ชุดวงจรควบคุมการเปิด-ปิดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์

การทำงานของชุดเจ็ตทุติยภูมิเริ่มจาก เครื่องสูบน้ำแบบ Submersible Water Pump ยี่ห้อ PROPUMP รุ่น JSW-100 ขนาด 125 วัตต์ ดังรูปที่ 2.13 ทำหน้าที่จ่ายน้ำจากถังเก็บน้ำปริมาตร 100 ลิตร ผ่านสายยางขนาด 0.5 นิ้ว ผ่านตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh 50 เพื่อป้องกันฝุ่นละอองในระบบทำให้เกิดการอุดตันรูปากทางออกเจ็ต ต่อมาจะไหลเข้าสู่ห้องขยายหน้าตัดการไหล (Expansion Chamber) ซึ่งเป็นท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 10 เซนติเมตรยาว 15 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.14 ทำหน้าที่ลดความไม่สม่ำเสมอของความดันของระบบเนื่องจากปั๊ม หลังจากนั้นของไหลจะไหลผ่านท่อทองเหลืองขนาดเส้นศูนย์กลางภายในเท่ากับ 9.4 มิลลิเมตร และไหลผ่านไปยังชุดวาล์วควบคุมการไหลของเจ็ตทุติยภูมิเพื่อแบ่งการไหลออกเป็น 4 ส่วน ในแต่ละส่วนจะมีส่วนประกอบเหมือนกันดังรูปที่ 2.15 คือบอลวาล์ว (Ball Valve) ทำหน้าที่ในการเปิด-ปิดการไหลผ่านท่อ ต่อมาเป็นเกจวาล์ว (Gate Valve) ทำหน้าที่ในการปรับอัตราการไหลในท่อ และต่อมาเป็นส่วนของโซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve) ทำหน้าที่ในการเปิด-ปิดการไหลแบบพัลส์ โดยรับสัญญาณจากชุดวงจรควบคุมการเปิด-ปิดโซลินอยด์วาล์วดังรูปที่ 2.16 ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้คือ เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator) ทำหน้าที่ให้กำเนิดสัญญาณในการควบคุมการเปิด-ปิดโซลินอยด์วาล์ว และสามารถปรับค่าความถี่และ Duty Cycle ของสัญญาณผ่านทางจอแสดงผลของเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)โดยเลือกลักษณะของสัญญาณเป็นแบบ Square wave ซึ่งจะส่งสัญญาณมายังกล่องควบคุม (Controller Box) ซึ่งมีวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 2.17 กล่องควบคุมนี้ทำหน้านำสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณมาใช้ควบคุมในการเปิด-ปิดของโซลินอยด์วาล์ว

หลังจากของไหลไหลผ่านโซลินอยด์วาล์ว จะไหลผ่านมายังท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 9.4 มิลลิเมตร และไหลต่อไปยังข้องอเพื่อปรับทิศทางการไหลให้อยู่ในแนวระดับและผ่านมายังข้อต่อลดขนาด (Contraction) ลงมาเป็นท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีความยาว 80 เซนติเมตร ซึ่งจะมีลักษณะที่เหมือนกันทั้ง 4 ส่วนของท่อเจ็ตทุติยภูมิ หลังจากนั้นแต่ละท่อจะต่อเข้ากับแต่ละห้องของหัวฉีดเจ็ตทุติยภูมิ ซึ่งแสดง

เป็นรูป Schematic ดังรูปที่ 2.18 และแต่ละห้องมีการไหลที่แยกออกจากกัน โดยแต่ละห้องจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ยาว 6.7 เซนติเมตรที่ปลายท่อจะมีรูเจาะ (Orifice) ขนาด 1 มิลลิเมตรซึ่งจะเจาะทะลุผ่านเข้ามายังท่อเจ็ตปฐมภูมิ โดยมีตำแหน่งของรูเจาะห่างจากปากทางออกของเจ็ตปฐมภูมิเป็นระยะ 4 มิลลิเมตร ($1.0rd$) และในแต่ละห้องของหัวฉีดเจ็ตทุติยภูมิจะมีการเจาะรูในลักษณะเดียวกัน ซึ่งรูเจาะแต่ละรูอยู่ห่างกันเป็นระยะ 90 องศาตามแนวเส้นรอบวงของเจ็ตปฐมภูมิ

2.2 พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้กำหนดระบบแกน (Coordinate system) ที่ใช้อ้างอิงในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.19ก ประกอบด้วยพิกัด x, y และ z กำหนดให้จุดกำเนิดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของปากทางออกเจ็ตปฐมภูมิ และให้แกน x มีทิศทางไปตามการไหลของเจ็ตแกน y มีทิศพุ่งขึ้นตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเจ็ต และแกน z มีทิศทางตั้งฉากกับระนาบ xy ในการทดลองนี้จะแสดงผลการทดลองด้วยภาพถ่ายซึ่งลักษณะของภาพถ่ายจะแสดงอยู่ในระนาบของแกน xy ดังรูปที่ 2.19ข

2.3 สภาวะการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีเจ็ตทุติยภูมิฉีดแบบคงตัวและแบบพัลส์เข้าผสมตามแนวเส้นรอบวง รวมถึงกรณีเจ็ตปฐมภูมิที่ไม่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิ ซึ่งเป็นการไหลแบบเจ็ตอิสระ และศึกษาผลของค่าความถี่และ Duty Cycle ของการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์ ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองที่ค่าความถี่ 1, 5 Hz และค่า Duty Cycle 25, 50, 75 และ 100 % ตามลำดับ และได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับกรณีเจ็ตปฐมภูมิที่ไม่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิโดยควบคุมให้อัตราการไหลของของไหลโดยรวมเมื่อออกมาจากปากเจ็ตให้เท่ากับกรณีเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิเข้าผสม การแสดงผลการทดลองสามารถวิเคราะห์จากภาพถ่ายกล้องดิจิตอลวีดีโอ และในการทดลองได้ใช้วิธีในการแสดงผลการผสมด้วยการทำปฏิกิริยาเคมี (Active Scalar) วิธีนี้สามารถแสดงการผสมในระดับโมเลกุล โดยใช้สารละลายกรด-เบสเป็นตัวทำปฏิกิริยาและมีตัวบ่งชี้จุดสิ้นสุดของการทำปฏิกิริยา (pH Indicator) ในการทดลองนี้ใช้การทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) เป็นส่วนของของไหลในอุโมงค์น้ำซึ่งมีความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 0.0100 ± 0.0003 โมลต่อลิตร(Molarity,M) หรือคิดเป็นค่าความแตกต่างไม่เกิน 3.0 % ระหว่างกรณีการทดลอง และสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) เป็นส่วนของของไหลในเจ็ตปฐมภูมิและเจ็ตทุติยภูมิซึ่งมีความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 0.0100 ± 0.0007 โมลต่อลิตร(Molarity,M)หรือคิดเป็นค่าความแตกต่างไม่เกิน 7.0 % ระหว่างกรณีการ

ทดลอง และใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน ($C_{20}H_{14}O_4$) เป็นตัวบ่งชี้การเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนมีคุณสมบัติ เมื่อผสมในสารละลายกรดจะได้สารละลายใสไม่มีสี (Colorless) และเมื่อผสมกับสารละลายเบสจะได้สารละลายสีชมพูแดง (Magenta) ซึ่งการทำปฏิกิริยาเคมีของสารละลายกรด-เบสที่ใช้ในการทดลองแสดงด้วยกราฟการไตเตรทชั่น (Titration Curve) ดังรูปที่ 2.20 โดยในการทดลองจะผสมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนในสารละลายเบสซึ่งเป็นส่วนของของไหลในเจ็ตปฐมภูมิและเจ็ตทุติยภูมิ และได้แสดงค่าอัตราส่วนการผสมโดยมวล (Stoichiometric Ratio, *SR*) ระหว่างสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ส่วนของไหลในเจ็ตปฐมภูมิและเจ็ตทุติยภูมิ) กับสารละลายกรดไนตริก (ส่วนของไหลในอุโมงค์น้ำ) มีค่าคงที่ประมาณ 1.00 ± 0.03 หรือมีความแตกต่างกันไม่เกิน 3.0 % ระหว่างกรณีการทดลอง และอัตราส่วนการไหลโดยมวลระหว่างเจ็ตปฐมภูมิและเจ็ตทุติยภูมิมีค่าคงที่ประมาณ 5.4 ± 0.3 หรือมีความแตกต่างกันไม่เกิน 6.0 % ระหว่างกรณีที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิ

ในงานศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการทดลองทั้งหมด 8 กรณี โดยแบ่งเป็นการทดลองในกรณีเจ็ตปฐมภูมิที่ไม่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิ (SJ0) กรณีเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบสม่ำเสมอ (SSJ) และกรณีเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์มี 6 กรณี ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองฉีดเจ็ตทุติยภูมิที่ค่าความถี่ 1, 5 *Hz* และค่า Duty Cycle 25, 50 และ 75 % (SJ1H25D, SJ1H50D, SJ1H75D, SJ5H25D, SJ5H50D, SJ5H75D) ตามลำดับโดยรายละเอียดแสดงค่าพารามิเตอร์ของการทดลองและความคลาดเคลื่อนในแต่ละกรณีแสดงในตาราง 2.1

สำหรับการทดลองได้พิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิเข้าผสมซึ่งประกอบด้วย อัตราส่วนความหนาแน่น (r_ρ) อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r_{eff}) อัตราส่วนการผสมโดยมวล (Stoichiometric Ratio, *SR*) ระหว่างเจ็ตและกระแสน้ำตาม อัตราส่วนการไหลโดยมวลระหว่างเจ็ตปฐมภูมิและเจ็ตทุติยภูมิ ($r_{\dot{m}}$) เรย์โนนัมเบอร์เจ็ตปฐมภูมิ (Re_J) เรย์โนนัมเบอร์เจ็ตทุติยภูมิ (Re_j) และ เรย์โนนัมเบอร์เจ็ตรวมสุทธิ (Re_{Jj}) (การคำนวณค่า Parameter ต่างๆในการทดลองแสดงการวิเคราะห์แบบตัวแปรไร้มิติในภาคผนวก ข) โดยในการทดลองทุกกรณีนั้นได้ทำการทดลองที่ค่าอัตราส่วนความหนาแน่นคงที่ประมาณ 1.0 อัตราส่วนการผสมโดยมวลคงที่ประมาณ 1.00 ± 0.03 และอัตราส่วนการไหลโดยมวลระหว่างเจ็ตปฐมภูมิและเจ็ตทุติยภูมิมีค่าคงที่ประมาณ 5.4 ± 0.3 โดยในการทดลองนิยามค่าความเร็วของกระแสน้ำตามจากค่าเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area average)

$$\bar{u}_{cf} = \frac{Q_{cf}}{A_{cf}} \tag{2.1}$$

โดยที่ Q_{cf} คืออัตราการไหลของอุโมงค์น้ำ และ A_{cf} คือพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์น้ำ

ในทุกกรณีการทดลอง $\bar{u}_{cf}$ มีค่าประมาณ 1.20 ± 0.05 เซนติเมตรต่อวินาทีคิดเป็นค่า Reynolds number เท่ากับ 2,900 สำหรับความเร็วเจ็ตปฐมภูมินิยามในลักษณะเดียวกับความเร็วของกระแสน้ำตามคือ

$$\bar{u}_J = \frac{Q_J}{A_J} \tag{2.2}$$

โดยที่ Q_J คืออัตราการไหลของเจ็ตปฐมภูมิ และ A_J คือพื้นที่หน้าตัดของท่อเจ็ตปฐมภูมิ

โดยในการทดลองกรณีเจ็ตปฐมภูมิที่ไม่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิ $\bar{u}_J$ มีค่าประมาณ 0.58 ± 0.02 เมตรต่อวินาที คิดเป็นค่า Reynolds number เท่ากับ 6,800 และในกรณีเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิ $\bar{u}_J$ มีค่าประมาณ 0.48 ± 0.02 เมตรต่อวินาทีคิดเป็นค่า Reynolds number เท่ากับ 5,600 สำหรับความเร็วเจ็ตทุติยภูมินิยามในลักษณะเดียวกันคือ

$$\bar{u}_j = \frac{Q_j}{\alpha A_j} \tag{2.3}$$

โดยที่ Q_j คืออัตราการไหลของเจ็ตทุติยภูมิ α คือค่า Duty cycle ในการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์และ A_j คือพื้นที่หน้าตัดของท่อเจ็ตทุติยภูมิ

ในกรณีการทดลองที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิมีค่าอัตราการไหลของเจ็ตทุติยภูมิแต่ละตัวเท่ากับ 0.094 ± 0.004 ลิตรต่อนาที โดยกรณีการทดลองฉีดเจ็ตทุติยภูมิที่ค่า Duty cycle 25 % $\bar{u}_j$ มีค่าประมาณ 8.00 ± 0.43 เมตรต่อวินาทีคิดเป็นค่า Reynolds number เท่ากับ 10,000 กรณีการทดลองฉีดเจ็ตทุติยภูมิที่ค่า Duty cycle 50 % $\bar{u}_j$ มีค่าประมาณ 3.97 ± 0.30 เมตรต่อวินาทีคิดเป็นค่า Reynolds number เท่ากับ 5,000 กรณีการทดลองฉีดเจ็ตทุติยภูมิที่ค่า Duty cycle 75 % $\bar{u}_j$ มีค่าประมาณ 2.67 ± 0.17 เมตรต่อวินาทีคิดเป็นค่า Reynolds number เท่ากับ 3,300 และกรณีการทดลองฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบคงตัว $\bar{u}_j$ มีค่าประมาณ 1.96 เมตรต่อวินาทีคิดเป็นค่า Reynolds number เท่ากับ 2,500 สำหรับค่าความเร็วประสิทธิผลรวมของเจ็ตเมื่อออกจากปากท่อเจ็ตนิยามจากค่าเฉลี่ยแบบพื้นที่ในลักษณะเดียวกันคือ

$$\bar{U}_{Jj} = \frac{Q_J + Q_j}{A_J} \tag{2.4}$$

โดยในทุกกรณีการทดลอง $\bar{U}_{Jj}$ มีค่าประมาณ 0.58 ± 0.02 เมตรต่อวินาทีคิดเป็นค่า Reynolds number เท่ากับ 6,800 และในการทดลองกรณีเจ็ตปฐมภูมิที่ไม่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิมีค่าความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่มีค่าเท่ากันกับกรณีที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิเช่นเดียวกัน

2.4 การวัดสภาวะเริ่มต้น

สำหรับการทดลองได้แบ่งการวัดสภาวะเริ่มต้นเป็น 3 ส่วน คือการวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสน้ำตาม การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตปฐมภูมิและการวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตทุติยภูมิ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสน้ำตาม

การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสน้ำตามในการศึกษานี้ใช้วิธีการหาค่าอัตราการ ไหลของของไหลด้วยการวัดปริมาตรของไหลและจับเวลาในขณะระบบมีสภาวะคงที่ (Steady state) โดยมีค่าอัตราการไหลของกระแสน้ำตามประมาณ 28 ± 1 ลิตรต่อนาที คิดเป็นค่าความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ประมาณ 1.2 ± 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที

ในการทดลองนี้ศึกษาถึงการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิเข้าผสม ดังนั้นสภาวะการทดลองของระบบจึงมีค่าของอัตราส่วนความเร็วของเจ็ตโดยรวมเมื่อออกมาจากปากท่อต่อความเร็วของกระแสน้ำตามมีค่าเท่ากับ 48 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วของกระแสน้ำตามมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วเจ็ต จึงเป็นการลดผลของความเร็วกระแสน้ำตามที่มีต่อเจ็ต เพื่อให้เจ็ตที่พุ่งออกมามีลักษณะของเจ็ตอิสระ (Free Jet) และในแง่ของการศึกษาคุณลักษณะการผสมของเจ็ตจะแสดงถึงความสามารถของเจ็ตในการดึงเอากระแสการไหลรอบข้างเข้าผสม (Entrainment) ซึ่งแสดงด้วยระยะความยาวของสีในการผสม (Flame Length)

2.4.2 การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตปฐมภูมิ

การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตปฐมภูมิในการศึกษานี้ใช้วิธีการหาค่าอัตราการไหลของของไหลด้วยการวัดปริมาตรของไหลและจับเวลาในขณะระบบมีสภาวะคงที่ (Steady state) ในลักษณะเดียวกับกระแสน้ำตาม โดยในขณะทำการวัดปริมาตรของไหลนั้นจะทำในขณะที่มีน้ำอยู่เต็มชุดทดลองและเปิดเจ็ตปฐมภูมิจนสภาวะของระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ แล้วจึงวัดอัตราการไหลของเจ็ตปฐมภูมิ ซึ่งจะเป็นส่วนของของไหลที่ล้นออกมาจากชุดทดลอง โดยมีค่าอัตราการ ไหลของเจ็ตปฐมภูมิกรณีที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิประมาณ 2.0 ± 0.1 ลิตรต่อนาที คิดเป็นค่าความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ประมาณ 0.48 ± 0.02 เมตรต่อวินาที และกรณีเจ็ตปฐมภูมิที่มีไม่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิมีค่าอัตราการไหลประมาณ 2.4 ± 0.1 ลิตรต่อนาที คิดเป็นค่าความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ประมาณ 0.58 ± 0.02 เมตรต่อวินาที

2.4.3 การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตทุติยภูมิ

การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตทุติยภูมิในการศึกษานี้ใช้วิธีการหาค่าอัตราการไหลของของไหลด้วยการวัดปริมาตรของไหลและจับเวลาในขณะระบบมีสภาวะคงที่ (Steady state) ในลักษณะเดียวกัน โดยในขณะทำการวัดปริมาตรของไหลนั้นจะทำในขณะที่มีน้ำอยู่เต็มชุดทดลองและเริ่มแรกจะเปิดเจ็ตทุติยภูมิทีละตัวและวัดปริมาตรของของไหลในส่วนที่ล้นออกมาจากชุดทดลอง เพื่อปรับอัตราการไหลของเจ็ตทุติยภูมิแต่ละตัวให้เท่ากัน พบว่าอัตราการไหลของเจ็ตทุติยภูมิแต่ละตัวมีค่าประมาณ 0.094 ± 0.004 ลิตรต่อนาที ต่อมาวัดปริมาตรของเจ็ตทุติยภูมิในขณะเปิดเจ็ตทุกตัวพร้อมกัน เพื่อวัดอัตราการไหลของเจ็ตเมื่อเปิดพร้อมกัน จากนั้นจึงวัดอัตราการไหลของเจ็ตทุติยภูมิเมื่อเปิดพร้อมกันในขณะที่เปิดเจ็ตปฐมภูมิด้วย ในการวัดปริมาตรของของไหลส่วนที่ล้นนั้นนำมาหักส่วนปริมาตรของไหลเจ็ตปฐมภูมิออกทำให้ได้ปริมาตรของไหลในส่วนของเจ็ตทุติยภูมิ เพื่อวัดอัตราการไหลของเจ็ตทุติยภูมิเมื่อมีผลของความดันจากการเปิดเจ็ตปฐมภูมิ จากการปรับอัตราการไหลของเจ็ตทุติยภูมิของการทดลองนี้พบว่าอัตราการไหลของเจ็ตทุติยภูมิรวมทั้งหมดมีค่าประมาณ 0.37 ± 0.01 ลิตรต่อนาที

2.5 วิธีการทดลองและอุปกรณ์การวัด

ในการทดลองแสดงผลของคุณลักษณะการผสมใช้การทำปฏิกิริยาเคมีของสาร และแสดงผลการทดลองด้วยภาพถ่ายจากกล้องดิจิตอลวีดีโอ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 การแสดงผลคุณลักษณะการผสมด้วยปฏิกิริยาเคมี

ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีเจ็ตทุติยภูมิฉีดแบบคงตัวและแบบพัลส์เข้าผสมตามแนวเส้นรอบวง รวมถึงกรณีของเจ็ตปฐมภูมิที่ไม่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิ ซึ่งเป็นลักษณะการไหลของเจ็ตอิสระ ในการแสดงผลการผสมใช้วิธีการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Active Scalar) ในการศึกษาคุณลักษณะการผสมในระดับโมเลกุล โดยใช้สารละลายกรด-เบสเป็นตัวทำปฏิกิริยาและมีตัวบ่งชี้จุดสิ้นสุดของการทำปฏิกิริยา (pH Indicator) ในการทดลองนี้ใช้การทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) และสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) และใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน ($C_{20}H_{14}O_4$) เป็นตัวบ่งชี้การเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนมีคุณสมบัติ เมื่อผสมในสารละลายกรดจะได้สารละลายใสไม่มีสี (Colorless) และเมื่อผสมกับสารละลายเบสจะได้สารละลายสีชมพูแดง (Magenta) ซึ่งมีช่วง pH ในการเปลี่ยนสีอยู่ระหว่าง (8-10) โดยลักษณะของโครงสร้างพันธะเคมีของสารละลายฟีนอล์ฟ

ทาลีนจะเปลี่ยนไปเมื่ออยู่ในสารละลายกรดหรือเบส ในการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายกรดไนตริกและสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์มีสมการการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$HNO_3 + NaOH \rightarrow NaNO_3 + H_2O \tag{2.5}$$

จากสมการ 2.5 สามารถเขียนสมการแสดงการเกิดปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปสมการไอออนคือ

$$H^+ + NO_3^- + Na^+ + OH^- \rightarrow Na^+ + NO_3^- + H_2O \tag{2.6}$$

จากสมการที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าทั้งสองข้างของสมการมีเทอมของ Na^+ และ NO_3^- อยู่ ดังนั้นจึงสามารถลดรูปของสมการ 2.6 ได้คือ

$$H^+ + OH^- \rightarrow H_2O \tag{2.7}$$

เนื่องจากในการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายกรดไนตริกและสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นเป็นการทำปฏิกิริยาของสารละลายกรดแก่กับเบสแก่ (คือสารที่มีการแตกตัวได้ H^+ และ OH^- ที่สมบูรณ์) ผลของปฏิกิริยาที่ได้คือ น้ำและสารละลายเกลือโซเดียมไนเตรท ซึ่งมีระดับ pH เป็นกลาง ดังนั้นผลของการเกิดปฏิกิริยาจึงเป็นกลาง

ในการแสดงผลคุณลักษณะการผสมด้วยปฏิกิริยาเคมีนี้ มีพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการกำหนดคุณลักษณะการผสมคือ อัตราส่วนการผสมโดยมวล (Stoichiometric ratio, SR) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดและเบส ดังสมการ

$$SR = \frac{C_b - 10^{(pH-14)}}{C_a + 10^{(pH-14)}} \tag{2.8}$$

โดยที่ C_a, C_b เป็นค่าความเข้มข้นสารละลายกรด-เบสที่ใช้ในการทดลอง
pH เป็นค่า pH ในช่วงที่สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนเปลี่ยนสี

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าอัตราส่วนการผสมโดยมวลให้คงที่มีค่าประมาณ 1.00 ± 0.03 และจากสมการที่ 2.8 จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนในการผสมโดยมวลสามารถกำหนดได้ด้วยค่าความเข้มข้นของสารละลายกรด-เบส ในการทดลองได้กำหนดค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดมีค่าคงที่ประมาณ 0.0100 โมลต่อลิตร และความเข้มข้มสารละลายเบสมีค่าคงที่ประมาณ 0.0100 โมลต่อลิตร ซึ่งในการเตรียมสารละลายที่ใช้ในการทดลอง มีสมการที่ใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายกรดดังนี้

$$C_a = \frac{M_a V_a}{V_a + V_W} \tag{2.9}$$

โดยที่ M_a เป็นความเข้มข้นสารละลายกรดที่ระบุจากขวด

V_a เป็นปริมาตรสารละลายกรดที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย

V_W เป็นปริมาตรน้ำที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย

ในการเตรียมสารละลายกรดที่ใช้ทำการทดลองมีค่า M_a = 15.0 M, V_a = 0.147 L และ V_W = 220 L แทนค่าลงในสมการที่ 2.9 จะได้ค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดมีค่าเท่ากับ 0.0100 โมลต่อลิตร และในการเตรียมสารละลายนั้น มีค่าความไม่แน่นอนของค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดที่เกิดจากการตวงปริมาตรเท่ากับ ± 0.0003 M หรือคิดเป็นค่าความแตกต่างไม่เกิน ± 3.0 % ระหว่างกรณีการทดลอง

ในการคำนวณค่าความเข้มข้นของสารละลายเบสที่ใช้ในการทดลองมีสมการในการคำนวณในลักษณะเดียวกันดังสมการ

$$C_b = \frac{M_b V_b}{V_b + V_W} \tag{2.10}$$

โดยที่ M_b เป็นค่าความเข้มข้นสารละลายเบสที่ระบุจากขวด

V_b เป็นปริมาตรสารละลายเบสที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย

V_W เป็นปริมาตรน้ำที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย

ในการเตรียมสารละลายเบสที่ใช้ทำการทดลองมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ M_b = 19.2 M, V_b = 0.042 L และ V_W = 80 L แทนลงในสมการที่ 2.10 จะได้ค่าความเข้มข้นของสารละลายเบสมีค่าเท่ากับ 0.0100 โมลต่อลิตร และในการเตรียมสารละลายนั้น มีค่าความไม่แน่นอนของค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดที่เกิดจากการตวงปริมาตรเท่ากับ ± 0.0007 M หรือคิดเป็นค่าความแตกต่างไม่เกิน ± 7.0 % ระหว่างกรณีการทดลอง

ขั้นตอนในการเตรียมสารละลายกรด-เบสของการทดลอง มีความสำคัญต่อค่าความไม่แน่นอนของความเข้มข้นของสารละลายและอัตราส่วนการผสมโดยมวล ซึ่งได้แสดงการคำนวณค่าความไม่แน่นอนไว้ในภาคผนวก ค.

2.5.2 การแสดงผลการทดลองด้วยภาพถ่าย

ในการถ่ายภาพของการทดลองเป็นการแสดงคุณลักษณะการผสมของเจ็ต ภาพถ่ายที่ได้จะบอกถึงระดับความเข้มแสงและสี (Intensity) ของเจ็ต โดยค่าระดับความเข้มของแสงและสีนี้จะถูกเก็บบันทึกลงบนเซลล์ไวแสง (Charge Coupled Devices, CCDs) ภายในเซลล์ไวแสงจะ

ประกอบด้วยเซลล์รับแสงขนาดเล็ก (Photodiode) เรียงอยู่อย่างเป็นระเบียบ แต่ละเซลล์จะทำหน้าที่เหมือนจอภาพเล็กๆภาพหนึ่ง(Pixel) ซึ่งการถ่ายภาพในการทดลองนี้ใช้กล้องดิจิตอลวีดีโอยี่ห้อ Sony รุ่น DCR-TRV320E ดังรูปที่ 2.21 มีจำนวนของเซลล์รับแสงประมาณ 400,000 Pixels สามารถให้ภาพวีดีโอมีความละเอียด 720 x 576 Pixels มีระบบสีแบบ PAL ซึ่งมีความไวในการถ่ายภาพ 25 เฟรมต่อวินาที และบันทึกค่าระดับความเข้มของแสงแบ่งเป็น 3 สีคือสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (RGB) โดยใช้ม้วนเทปดิจิตอลแบบ Digital 8

ในการมองเห็นแสงของตาคนนั้น มีค่าความถี่ของแสงอยู่ในช่วง $3.84\times10^{14}\ Hz$ ถึง $7.69\times10^{14}\ Hz$ ซึ่งได้แสดงค่าความถี่ของแสงสีและความยาวคลื่นในช่วงการมองเห็นดังรูปที่ 2.22 ความยาวคลื่นและความถี่ของแสงมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\lambda = \frac{c}{\upsilon} \tag{2.11}$$

โดยที่ λ คือความยาวคลื่นของแสง

c คือความเร็วแสงในสูญญากาศมีค่าเท่ากับ 3.0×10^{8} เมตรต่อวินาที

υ คือความถี่ของแสง

อย่างไรก็ตามในถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอลวีดีโอมีระบบในการบันทึกค่าระดับความเข้มของแสงสี 3 สี คือสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (RGB) ซึ่งมีลักษณะของระบบของสีและการรวมกันของสีดังรูปที่ 2.23 หรือเขียนให้อยู่ในระบบสมการได้คือ

$$R+G+B=W$$

$$\begin{aligned} M+G&=W \quad \text{โดยที่} \quad R+B=M \\ C+R&=W \quad \text{โดยที่} \quad B+G=C \\ Y+B&=W \quad \text{โดยที่} \quad R+G=Y \end{aligned} \tag{2.12}$$

โดยที่ C (Cyan) คือ สีฟ้าเขียว

M (Magenta) คือ สีชมพูแดง

Y (Yellow) คือ สีเหลือง

สำหรับการมองเห็นสีของวัตถุใดๆ นั้น เมื่อแสงผ่านตัวกลางมาตกกระทบยังวัตถุ วัตถุจะดูดซับแสงของสีอื่นไว้และจะสะท้อนแสงของสีวัตถุเข้าสู่ตาคน ปริมาณของแสงที่ดูดซับคือค่าระดับความเข้มแสง (Intensity, I) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าระดับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสง (I_o) ตามกฎของเบียร์ (Beer's Law)

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\varepsilon z} \tag{2.13}$$

โดยที่ ε คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงของวัตถุ

z คือระยะที่มีการดูดซับแสง

2.6 การให้แสง

ในการแสดงผลของการทดลองด้วยภาพถ่าย สีของภาพเจ็ตที่เห็นมีสีชมพูแดง (Magenta) เกิดจากการดูดซับของแสงสีเขียวจึงเห็นสีของสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนในเจ็ตเป็นสีชมพูแดง และอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลของสัญญาณแสงในการทดลองจะใช้กล้องดิจิตอลวีดีโอในการบันทึกค่าระดับความเข้มแสงลงบนเซลล์ไวแสง (CCDs)

หลักการที่สำคัญของการถ่ายภาพคือการให้แสง เนื่องจากการให้แสงจะมีผลต่อค่าระดับความเข้มแสงของเจ็ต ซึ่งเป็นผลของสัญญาณ (Signal) เจ็ตที่ต้องการ ดังนั้นในการให้แสงจึงต้องการแหล่งกำเนิดแสง (Light source) ที่มีระดับความเข้มของแสงที่ตกลงบนฉากรับแสงมีค่าสม่ำเสมอ เพื่อจะได้เห็นถึงความแตกต่างของระดับความเข้มแสงของสัญญาณเจ็ตกับระดับความเข้มแสงของฉากรับแสง ในการทดลองนี้ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ 3 ดวง เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยมีลักษณะการจัดเรียงตัวของหลอดไฟดังรูปที่ 2.24 ในการให้แสงนี้จะปรับระยะห่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อปรับค่าของระดับความเข้มแสงที่ตกลงบนฉากรับแสงให้มีความสม่ำเสมอ ซึ่งมีลักษณะของการให้แสงบนฉากรับแสงดังรูปที่ 2.25 และได้แสดงภาพของฉากรับแสงและลักษณะสัญญาณของค่าระดับความเข้มแสงของภาพฉากรับแสงในรูปที่ 2.26 จะเห็นได้ว่าค่าระดับความเข้มแสงของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน บนฉากรับแสง ในแนวนอนและแนวขวางของรูปมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้ในการทดลองยังมีความไม่สม่ำเสมอของระดับความเข้มแสง ทำให้มีผลของสัญญาณแสงบนฉากรับแสงที่ไม่สม่ำเสมอรบกวนต่อส่วนของค่าระดับความเข้มแสงของสัญญาณเจ็ต ซึ่งในการทดลองต้องการผลของสัญญาณเจ็ต (Signal) มีค่ามากกว่าสัญญาณของฉากรับแสงที่รบกวน (Noise) เพื่อทำให้เห็นถึงความแตกต่างของส่วนสัญญาณเจ็ตกับสัญญาณ Noise ได้ชัดเจน โดยทั่วไปส่วนใหญ่จะใช้ค่าอัตราส่วนของสัญญาณเจ็ตต่อสัญญาณรบกวนของฉากรับแสง (Signal to Noise ratio, S/N) เพื่อบอกถึงปริมาณของสัญญาณเจ็ตในภาพ

2.7 การวิเคราะห์สัญญาณจากภาพ

ในการวิเคราะห์ผลของสัญญาณจากภาพ ได้แสดงลักษณะของสัญญาณที่ได้จากภาพเจ็ตและภาพของฉากรับแสงดังรูปที่ 2.27 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณที่ได้จากภาพทั้งสอง

จะเห็นว่าลักษณะของสัญญาณของภาพฉากรับแสง มีค่าระดับความเข้มแสงของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอทั้งในทิศทางตามแนวการไหลของเจ็ตและทิศทางตามขวางกับแนวการไหล แต่สัญญาณในแนวตามขวางของภาพเจ็ตมีค่าระดับความเข้มแสงของสีเขียวในส่วนของเจ็ตลดลงน้อยกว่าค่าระดับความเข้มแสงของสีเขียวในส่วนที่เป็นฉากรับแสง ซึ่งเป็นปริมาณของแสงที่ถูกดูดซับ ส่วนสีแดงและสีน้ำเงินมีค่าระดับความเข้มแสงของส่วนที่เป็นเจ็ตมากกว่าค่าระดับความเข้มแสงของส่วนที่เป็นฉากรับแสง ซึ่งเป็นปริมาณของแสงที่สะท้อน เมื่อพิจารณาถึงสัญญาณของแสงในทิศทางการไหลของเจ็ต พบว่ามีลักษณะเดียวกัน สีเขียวจะถูกดูดซับจึงมีค่าลดลง ส่วนสีแดงและสีน้ำเงินมีผลจากการสะท้อนจึงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของแสงที่ถูกดูดซับและปริมาณของแสงที่สะท้อนจะเห็นว่าค่าปริมาณของแสงที่ถูกดูซับมีค่ามากกว่า ในการแสดงผลของสัญญาณเจ็ตจึงเลือกใช้ ปริมาณของแสงส่วนที่ถูกดูดซับ ซึ่งเป็นปริมาณของแสงสีเขียว เนื่องจากมีปริมาณมากทำให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าระดับความเข้มแสงในส่วนของเจ็ตและส่วนที่เป็นฉากรับแสงได้ชัดเจน

2.8 การทำกระบวนการทางภาพ

การทำกระบวนการทางภาพ (Image Processing) มีแนวทางการดึงค่าระดับความเข้มแสงของสัญญาณเจ็ตจากภาพมาวิเคราะห์ โดยใช้กฎของเบียร์ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแสงที่ดูดซับคือค่าระดับความเข้มแสง (Intensity, I) กับค่าระดับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสง (I_o) เมื่อเปรียบเทียบกับการถ่ายภาพเจ็ตในการทดลอง จะเห็นว่าภาพของเจ็ตที่มีค่าปริมาณความเข้มแสงของสีเขียวที่ถูกดูดซับจะเปรียบเสมือนกับปริมาณของแสงที่ถูกดูดซับ (Intensity, I) และภาพฉากรับแสงเมื่อไม่มีเจ็ต ซึ่งในภาพจะมีแต่ปริมาณความเข้มของแสงจากแหล่งกำเนิดจะเปรียบเสมือนกับค่าระดับความเข้มแสงของแหล่งกำเนิด (I_o) จึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าปริมาณของแสงสีเขียวที่ถูกดูดซับ โดยการแทนค่าในสมการของเบียร์ดังนี้

$$\frac{(J_{ij})_k}{(\overline{B}_{ij})} = \frac{I_{ij,k}}{I_{0ij}} = e^{-(\varepsilon)_{ij,k}} \qquad (2.14)$$

โดยที่ J_{ij} คือภาพของเจ็ต

$\overline{B}_{ij}$ คือภาพเฉลี่ยของฉากรับแสง

i, j คือลำดับ (i, j) ของ pixels ภาพเจ็ตและภาพฉากรับแสงมีค่าเท่ากับ 720 x 576 Pixels

k คือภาพเจ็ตขณะใดๆ ภาพที่ k

การหาภาพเฉลี่ยของภาพฉากรับแสง (Mean Background Image) จะนำภาพเฉลี่ยของฉากรับแสงก่อนทำการถ่ายภาพเจ็ตและภาพเฉลี่ยของฉากรับแสงหลังจากทำการถ่ายภาพเจ็ต การหาภาพเฉลี่ยของภาพฉากรับแสงมีสมการคือ

$$\overline{B}_{ij} = \frac{(\overline{B}_{ij})_1 + (\overline{B}_{ij})_2}{2} \tag{2.15}$$

โดยที่ $(\overline{B}_{ij})_1$ คือภาพเฉลี่ยของฉากรับแสงก่อนทำการถ่ายภาพเจ็ต และ $(\overline{B}_{ij})_2$ คือภาพเฉลี่ยของฉากรับแสงหลังจากทำการถ่ายภาพเจ็ต การหาภาพเฉลี่ยของฉากรับแสงก่อนถ่ายและหลังถ่ายภาพเจ็ตมีสมการคือ

$$(\overline{\mathrm{B}}_{\mathrm{ij}})_1 = \sum_{\mathrm{k}=1}^{\mathrm{N}/2}\left(\frac{(\mathrm{B}_{\mathrm{ij}})_{1\mathrm{k}}}{(\mathrm{N}/2)}\right) \text{และ } (\overline{\mathrm{B}}_{\mathrm{ij}})_2 = \sum_{\mathrm{k}=1}^{\mathrm{N}/2}\left(\frac{(\mathrm{B}_{\mathrm{ij}})_{2\mathrm{k}}}{(\mathrm{N}/2)}\right) \tag{2.16}$$

โดยที่ $(B_{ij})_1$ และ $(B_{ij})_2$ เป็นภาพฉากรับแสงก่อนถ่ายและหลังถ่าย และ N เป็นจำนวนของภาพฉากรับแสงที่นำมาหาภาพเฉลี่ย ซึ่งผลรวมของภาพฉากรับแสงก่อนถ่ายและหลังถ่ายภาพเจ็ตเท่ากับจำนวนของภาพเจ็ตที่นำมาหาภาพเฉลี่ย

จากสมการที่2.14 สามารถเขียนใหม่ได้ในเทอมของ εz เนื่องจากเป็นเทอมที่แสดงถึงสัดส่วนของปริมาณความเข้มแสงที่ถูกดูดซับ ดังสมการที่ 2.17

$$(X'_{ij})_k = (\varepsilon z)_{ij,k} = -\ln\left(\frac{(J_{ij})_k}{(\overline{B}_{ij})}\right) \tag{2.17}$$

จากสมการที่ 2.17 ค่าของ εz จะปรากฏอยู่ในภาพ $(X'_{ij})_k$ ซึ่งมีค่าของสัญญาณบางส่วนในบริเวณของฉากรับแสงเป็นลบ จึงได้ทำการปรับค่าที่เป็นลบให้มีค่าเท่ากับศูนย์ และเก็บค่าไว้ในตัวแปร $(X_{ij})_k$ จากนั้นจึงนำค่า $(X_{ij})_k$ มาหาค่ารูปภาพเฉลี่ยของเจ็ตดังสมการที่ 2.18

$$\left(\overline{X}_{ij}\right) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left[\left(X_{ij}\right)_k\right] \tag{2.18}$$

โดยที่ N คือจำนวนภาพเจ็ตทั้งหมดในการคำนวณ

นอกจากการแสดงภาพเฉลี่ยของเจ็ตแล้วยังมีการแสดงภาพเจ็ตแบบเบี่ยงเบนมาตราฐาน ซึ่งมีสมการในการคำนวณดังสมการที่ 2.19 คือ

$$\sigma_{X_{ij}} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)}\sum_{k=1}^{N}\left[(X_{ij})_k - (\bar{X}_{ij})\right]^2} \qquad (2.19)$$

ในการทำกระบวนการทางภาพของการทดลองกรณีที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์ ได้นำภาพเจ็ตในช่วงมีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิเป็นจำนวน 100 พัลส์มาคำนวณหาค่าภาพเฉลี่ยและภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานของเจ็ต ส่วนกรณีที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบคงตัวและกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิจะนำภาพเจ็ตในช่วงระยะเวลา 40 วินาที มาวิเคราะห์หาภาพเฉลี่ยและภาพเบี่ยงเบนมาตราฐาน โดยจำนวนภาพเจ็ตและภาพฉากรับแสงที่นำมาหาภาพเฉลี่ยแสดงในตารางที่ 2.2 และในการทำกระบวนการทางภาพมีรายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้งานแสดงในภาคผนวก จ.

สำหรับการทำกระบวนการทางภาพของการทดลองนอกจากจะใช้วิธีตามกฎของเบียร์แล้ว ยังได้ทำกระบวนทางภาพด้วยวิธีการ Correct Background ซึ่งมีหลักการและผลการทดลองแสดงภาพเจ็ตรวมถึงลักษณะของสัญญาณจากภาพแสดงไว้ในภาคผนวก ฉ และ ช

2.9 การสอบเทียบโปรแกรม

สำหรับโปรแกรมที่นำมาใช้ในทำกระบวนการทางภาพ ได้ทำการปรับเทียบโดยการสร้างภาพที่รู้ค่าระดับความเข้มของแสง 4 ชุด ภาพแรกจะมีค่าระดับเข้มแสงของสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน เท่ากับ เท่ากับ 25, 50 และ 75 ภาพที่สองมีค่าระดับความเข้มแสงของสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน เท่ากับ 50, 100 และ 150 ภาพที่สามมีระดับความเข้มแสงสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน เท่ากับ 75, 150 และ 225 ภาพที่สี่มีระดับความเข้มแสงสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน เท่ากับ 255, 255 และ 255 ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำภาพทั้งสี่ชุดมาผ่านการทำกระบวนการทางภาพ โดยใช้โปรแกรมประมวลผลภาพตามขั้นตอนของการทำกระบวนการทางภาพตามกฎของเบียร์และได้ผลลัพท์ของภาพเฉลี่ยซึ่งมีค่าระดับความเข้มของแสงสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน เท่ากับ 172, 103 และ 62 ส่วนภาพเบี่ยงเบนมาตราฐานมีค่าระดับความเข้มแสงสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน เท่ากับ 188, 188 และ 188 เมื่อตรวจสอบกับค่าที่ได้โดยการคำนวณ พบว่ามีค่าตรงกัน ซึ่งเป็นการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมให้มีความถูกต้อง และได้แสดงรายละเอียดในการสอบเทียบโปรแกรมใช้งานไว้ในภาคผนวก ซ