บทที่ 4

อภิปรายผลการทดลอง

ผลของความแตกต่างของความหนาแน่น

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการไหลของเจ็ตสองลำที่วางตัวแบบเรียงแถวในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง ซึ่งได้ทำการทดลองโดยกำหนดให้การไหลของเจ็ตมีอุณหภูมิสูงกว่ากระแสลมขวาง จึงส่งผลให้ลักษณะการไหลที่ออกมามีผลเนื่องจากแรงลอยตัว (Buoyancy force) เกิดขึ้น โดยในการไหลของเจ็ตที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นของอากาศน้อยกว่าในการไหลของกระแสลมขวางที่มีอุณหภูมิต่ำส่งผลให้แรงลอยตัวของเจ็ตมีทิศทางพุ่งขึ้น และทำให้การไหลของเจ็ตมีแนวโน้มที่จะลอยตัวสูงขึ้น ซึ่งผลเนื่องจากแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลในด้านบวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในงานทั่วไปที่มีการไหลคล้ายคลึงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การผสมของไหลสองชนิด ดังเช่นในงานด้านการผสมสารเคมีที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน หรืองานที่เกี่ยวกับการผสมกันของอากาศกับเชื้อเพลิง โดยเฉพาะในห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะเป็นแบบ Staged combustor เป็นต้น ซึ่งการนำไปประยุกต์ใช้ในงานดังกล่าวจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาวิจัย แต่ถ้าหากนำผลที่ได้นี้ไปประยุกต์ใช้กับงานที่มีสภาวะการไหลที่แตกต่างออกไปจากการทดลอง ดังเช่นการไหลของเจ็ตที่มีอุณหภูมิเท่ากันหรือต่ำกว่าหรือมีความหนาแน่นมากกว่าการไหลของกระแสลมขวางก็อาจทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแตกต่างไปจากผลการทดลองอยู่บ้าง

อย่างไรก็ตามคาดว่าผลที่ได้นี้อาจจะไม่แตกต่างไปจากผลที่ได้จากงานวิจัยมากนัก ทั้งนี้เนื่องจาก ในทุกกรณีการทดลองจะมีค่า Densimetric Froude number (Fr) ประมาณ 0.09 และมีค่า Fr/r ประมาณ 0.002 นั่นคือผลเนื่องจากแรงลอยตัวของเจ็ตร้อนจะมีค่าประมาณ 9 % ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของกระแสลมขวาง และมีค่าเพียง 0.2 % ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของเจ็ตเท่านั้น และนอกจากนี้ยังได้วางทิศทางเจ็ตโดยให้เจ็ตมีทิศพุ่งขึ้น เพื่อให้ผลเนื่องจากแรงลอยตัวมีทิศทางเดียวกับทิศทางการไหล จึงทำให้สันนิษฐานว่า ผลการทดลองส่วนใหญ่ที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังคงสามารถใช้ประมาณค่าได้ดีในสภาวะการไหลที่เจ็ตมีความหนาแน่นเท่ากับหรือมากกว่ากระแสลมขวางทั้งในส่วนของคุณลักษณะการไหลเฉพาะหน้าตัด, การลดลง-เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตามแนวแกนการไหล หรือแม้แต่ลักษณะการกระจายตัวของเจ็ต

ผลของความไม่สมมาตรสำหรับกรณี *S0*

ในทางทฤษฎี การฉีดเจ็ตที่มีความสมมาตร (ตามแนวแกน $y = 0$) จะทำให้เกิดการพัฒนาตัวที่มีความสมมาตร (ตามแนวแกน $y = 0$) เช่นกัน แต่ในความเป็นจริง ไม่มีสิ่งใดที่บ่งบอกได้ถึง

ความสมมาตรอย่างแท้จริง ถึงแม้ว่าพยายามฉีดเจ็ดให้มีความแม่นยำและเที่ยงตรงที่สุดเท่าใดก็ตาม ซึ่งแตกต่างจากการคำนวณ

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง สำหรับกรณี *S0* พบว่าผลที่ได้มีความไม่สมมาตรตามแนวแกน ($y = 0$)โดยในกรณี *S0rd00* (รูปที่ 3.8) พบว่าที่หน้าตัดหลังๆ โดยเฉพาะที่หน้าตัด $x/r_{eff}d$ = 2.00 เป็นต้นไป พบว่าบริเวณอุณหภูมิสูงมีการหมุนไปจากแนวแกนกลางโดยจะหมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และเมื่อสังเกตจากบริเวณอุณหภูมิต่ำจะเห็นว่าตั้งแต่หน้าตัด $x/r_{eff}d$ = 0.50 บริเวณอุณหภูมิต่ำก็มีการหมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเช่นกัน จากลักษณะดังกล่าวอาจเกิดจากการตั้งศูนย์ของเจ็ตไม่ตรงศูนย์กลางโดยเจ็ตที่พุ่งขึ้นเอียงไปชนผนังท่อด้านบนที่มีมุมน้อยกว่า 90 องศา (ดังรูปที่ 4.1) และเนื่องจากเจ็ตมีโมเมนตัมสูง ดังนั้นการตั้งเจ็ตที่ไม่ตรงศูนย์กลางอาจมีผลจากความไม่สมมาตรในการชนผนังด้านบนซึ่งเป็นรัศมีความโค้งของท่อ อาจทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน (Induced Swirl)

เจ็ตที่พุ่งขึ้นเอียงไปชนผนังท่อด้านบนที่มีมุมน้อยกว่า 90 องศา (ดังรูปที่ 4.1) อาจเกิดจาก 1) การตั้งแกนของเจ็ตไม่ผ่านศูนย์กลางโดยเจ็ตที่พุ่งออกมาไม่อยู่ในแนวดิ่ง (ดังรูปที่ 4.1ก) คือเจ็ตพุ่งเอียงขึ้นไปชนผนังท่อด้านบนที่มีมุมน้อยกว่า 90 องศา (เมื่อมองจาก Downstream) เล็กน้อย และเนื่องจากเจ็ตมีโมเมนตัมสูง ดังนั้นการตั้งแนวแกนเจ็ตที่ไม่ตรงศูนย์กลางท่อพอดีอาจมีผลจากความไม่สมมาตร ทำให้เจ็ตชนผนังท่อด้านบนอย่างไม่สมมาตร และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน (Induced swirl) หรือ 2) ปากเจ็ตไม่ตรงศูนย์กลาง แต่เจ็ตที่พุ่งออกมาอยู่แนวดิ่ง (ดังรูปที่ 4.1ข) คือเจ็ตพุ่งตรงขึ้นไปชนผนังท่อด้านบนที่มีมุมน้อยกว่า 90 องศา (เมื่อมองจาก Downstream) เล็กน้อย และ3) เป็นผลรวมทั้งข้อ 1) และข้อ 2) (ดังรูปที่ 4.1ค)

ในกรณี *S0rd05* (รูปที่ 3.9) พบว่ารูปร่างการกระจายตัวของ C_{TG} ที่ $x/r_{eff}d$ = 2.00 และ 2.12 มีบริเวณอุณหภูมิสูงซึ่งคาดว่าเป็นบริเวณของเจ็ตนั้น ไม่มีความสมมาตรตามแนวแกน ($y = 0$) โดยเจ็ตที่วิ่งไปตามผนังท่อในทิศทางตามเข็มนาฬิกาไปถึงบริเวณด้านล่าง (มุม 270 องศา) ก่อนเจ็ตที่วิ่งไปตามผนังท่อในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจาก เจ็ตตัวใดตัวหนึ่งหรือเจ็ตทั้งสองตัววางตำแหน่งไม่ได้ศูนย์กลางโดยเจ็ตที่ชนผนังด้านบนน่าจะเอียงไปทางที่มีมุมมากกว่า 90 องศา (ดังรูปที่ 4.2) จึงทำให้เกิดการไหลวนที่ไม่สมมาตรดังกล่าว และเมื่อสังเกตจาก Level สูงสุดของ C_{TL} (0.9-1.0) ในแต่ละหน้าตัด พบว่าที่หน้าตัด $x/r_{eff}d$ = 1.50, 2.00 และ 2.12 Level สูงสุดของ C_{TL} อยู่บริเวณเจ็ตที่วิ่งไปตามผนังท่อในทิศทางตามเข็มนาฬิกา นั่นแสดงให้เห็นถึงเจ็ตบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูง ซึ่งสอดคล้องกับการพิจารณารูปร่างการกระจายตัวของ C_{TG}

นอกจากนี้ เมื่อสังเกต จาก Level สูงสุดของ C_{TL} (0.9-1.0) ในแต่ละหน้าตัด พบว่าที่หน้าตัด $x/r_{eff}d$ = 1.50, 2.00 และ 2.12 Level สูงสุดของ C_{TL} อยู่บริเวณเจ็ตที่วิ่งไปตามผนังท่อในทิศทางตามเข็มนาฬิกา แสดงให้เห็นถึงเจ็ตบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ เมื่อสังเกตถึงบริเวณที่มีค่า C_{TL} ต่ำสุดในแต่ละหน้าตัด จะสังเกตเห็นลักษณะการเดินทางของบริเวณอุณหภูมิต่ำ โดยเริ่ม

แรกที่ $x/r_{eff}d$ = 0.25 บริเวณอุณหภูมิต่ำซึ่งประกอบด้วย Crossflow Fluid มาก จะกระจายอยู่บริเวณขอบๆด้านข้าง แล้วเคลื่อนที่มารวมตัวกันที่บริเวณด้านล่างแล้วลอยขึ้นด้านบนของท่อ โดยผ่านจุดศูนย์กลางท่อ แล้วไปชนผนังด้านบน (การชนผนังดูจากบริเวณที่มีค่า C_{TL} ต่ำสุดในแต่ละหน้าตัด) ที่ $x/r_{eff}d$ ประมาณ 2.50 แต่เอียงไปทางด้านที่มีมุมน้อยกว่า 90 องศาแสดงว่าเจ็ตตัวใดตัวหนึ่งหรือเจ็ตทั้งสองตัววางตำแหน่งไม่ได้ศูนย์กลางโดยเจ็ตที่ชนผนังด้านบนน่าจะไปทางด้านที่มีมุมมากกว่า 90 องศา จึงทำให้เกิดการไหลวนที่ไม่สมมาตรดังกล่าวโดยที่การกระจายตัวของบริเวณที่มีค่า C_{TL} ต่ำสุดในแต่ละหน้าตัดนั้นมีลักษณะการพัฒนาตัวคล้ายๆกับลักษณะการพัฒนาตัวของเจ็ตเช่นกัน และเมื่อสังเกตที่ $x/r_{eff}d$ = 2.12 จะเห็นตำแหน่งการชนกันของเจ็ต และตำแหน่งการชนผนังของบริเวณอุณหภูมิต่ำ ซึ่งถ้าลากเส้นผ่านจุดทั้งสองให้เป็นแกนกลางจะพบว่าลักษณะการกระจายตัวของด้านทั้งสองค่อนข้างจะสมมาตร

ในกรณี *S0rd10* (รูปที่ 3.10) การกระจายตัวของ C_{TG} ที่ $x/r_{eff}d$ ตั้งแต่ 2.00 จะเห็นว่าบริเวณอุณหภูมิสูงซึ่งคาดว่าเป็นบริเวณของเจ็ตนั้น ไม่มีความสมมาตรตามแนวแกน (y = 0) เช่นเดียวกับกรณี *S0rd05* โดยเจ็ตที่วิ่งไปตามผนังท่อในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาวิ่งไปถึงมุม 10 องศา ในขณะที่ เจ็ตที่วิ่งไปตามผนังในทิศทางตามเข็มนาฬิกาวิ่งไปถึงมุม 350 องศา โดยเห็นได้อย่างชัดเจนที่หน้าตัด $x/r_{eff}d$ = 3.00 นั่นหมายความว่า เจ็ตตัวใดตัวหนึ่งหรือเจ็ตทั้งสองตัววางตำแหน่งไม่ได้ศูนย์กลางโดยเจ็ตที่ชนผนังด้านบนน่าจะไปทางด้านที่มีมุมน้อยกว่า 90 องศา (ดังรูปที่ 4.3) จึงทำให้เกิดการไหลที่ไม่สมมาตรดังกล่าว และเมื่อสังเกตจาก Level สูงสุดของ C_{TL} (0.9-1.0) ในแต่ละหน้าตัด พบว่า Level สูงสุดของ C_{TL} (0.9-1.0) ตั้งแต่ $x/r_{eff}d$ = 2.00 จะเห็นลักษณะความไม่สมมาตรเช่นกัน

จากการวิเคราะห์ลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุดในแต่ละหน้าตัดตามแนวแกน (รูปที่ 3.40) พบว่าความไม่สมมาตรเกิดขึ้นเนื่องจากการตั้งศูนย์ของเจ็ตไม่ตรงนั้นมีผลทำให้ กรณี *S0rd00* ในช่วงแรก ($x/r_{eff}d$ ระหว่าง 0.25 ถึง 1.50) อุณหภูมิต่ำสุดจะมีการหมุนที่เร็วกว่าอุณหภูมิสูงสุด และลักษณะการหมุนจะพอๆกันในช่วงหลัง ($x/r_{eff}d$ ตั้งแต่ 2.00)

กรณี *S0rd05* พบลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายกันของอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดคือพบว่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดมีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายกันคือ มีลักษณะการแยกเป็นสองส่วนแล้วมารวมตัวกัน โดยที่อุณหภูมิสูงสุดจะมีลักษณะเป็นแบบ 1 ส่วน ไปเป็น 2 ส่วน และกลับมาเป็น1 ส่วน ในขณะที่อุณหภูมิต่ำสุดจะมีลักษณะเป็นแบบเดิมมี 2 ส่วน และรวมกันเป็น1 ส่วน นอกจากนี้เมื่อมองถึงตำแหน่งที่ไม่สมมาตรพบว่ามีลักษณะเหมือนกัน คือทั้งอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดมีการหมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกามากกว่าในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

กรณี *S0rd10* อุณหภูมิสูงสุดแบ่งออกเป็นสองส่วน คือส่วนแรกเคลื่อนที่ไปตามขอบท่อในลักษณะหมุนทวนเข็มนาฬิกา และส่วนที่สองเคลื่อนที่ไปตามขอบท่อในลักษณะหมุนตามเข็มนาฬิกา โดยในช่วงแรกของการแยกเป็นสองส่วน ($x/r_{eff}d$ = 2.00 และ 2.50) ส่วนที่เคลื่อนที่ไป

ตามขอบท่อในลักษณะหมุนทวนเข็ม หมุนไปได้ไกลกว่าส่วนที่เคลื่อนที่ไปตามขอบท่อในลักษณะหมุนตามเข็มนาฬิกา สำหรับลักษณะการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิต่ำสุด จะเคลื่อนที่อยู่บริเวณด้านล่างโดยพบลักษณะการหมุนเล็กน้อย

ผลของระยะห่างระหว่างเจ็ตสำหรับกรณี *S0*

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองกรณีเจ็ตสองตัว ในกรณีที่กระแสลมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควงพบว่า ลักษณะการกระจายตัวของเจ็ตหลังเจ็ตตัวที่สองมีลักษณะการกระจายตัวของเจ็ตแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม

โดยกรณี *S0rd05* (รูปที่ 3.9) ลักษณะการพัฒนาตัวของเจ็ตหลังเจ็ตตัวที่สองได้แบ่งออกเป็นสองกลุ่ม โดยกลุ่มหนึ่งจะวิ่งไปตามผนังท่อในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และอีกกลุ่มหนึ่งจะวิ่งไปตามผนังท่อในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โดยเจ็ตทั้งสองกลุ่มมีการหมุนวนไปตามผนังท่อใกล้เคียงกันและชนกันอีกครั้งหนึ่งที่บริเวณด้านล่างของท่อที่ระยะประมาณ $x/r_{eff}d = 2.83$ แล้วรวมตัวกันพุ่งขึ้นด้านบน

ในขณะที่กรณี *S0rd10* (รูปที่ 3.10) ลักษณะการพัฒนาตัวของเจ็ตหลังเจ็ตตัวที่สองได้แบ่งออกเป็นสองกลุ่ม โดยกลุ่มหนึ่งจะวิ่งไปตามผนังท่อในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และอีกกลุ่มหนึ่งจะวิ่งไปตามผนังท่อในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเช่นกัน แต่เจ็ตทั้งสองกลุ่มไม่ได้แยกจากกันอย่างชัดเจนและไม่มีการพุ่งมาชนกันที่บริเวณด้านล่าง โดยตั้งแต่ $x/r_{eff}d = 1.50$ เกิดลักษณะความมีเสถียรภาพของบริเวณอุณหภูมิสูงอยู่ด้านบน (คล้าย ⌒) และบริเวณอุณหภูมิต่ำอยู่บริเวณด้านล่างตลอดแนวการเคลื่อนที่

ซึ่งข้อแตกต่างทั้งสองกรณีนี้อาจเกิดจากระยะห่างระหว่างเจ็ตตัวแรกและเจ็ตตัวที่สอง โดยในกรณี *S0rd05* เจ็ตตัวที่สองวางห่างจากเจ็ตตัวแรกน้อยกว่ากรณี *S0rd10* ซึ่งเป็นผลให้ในกรณี *S0rd05* เจ็ตตัวที่สองมี r_{eff} สูงขึ้น เนื่องจากเจ็ตตัวแรกประพฤติตัวเสมือน Solid body ดังนั้นหลัง Solid body จะเป็นช่วง wake จึงทำให้ r_{eff} ที่แท้จริงของเจ็ตตัวที่สองมีค่าเพิ่มขึ้นและการวางตำแหน่งที่ใกล้กันนี้ทำให้เกิดการเสริมกันของโมเมนตัมของเจ็ตทั้งสองตัวที่ผนังด้านบน จึงทำให้เกิดการไหลวนที่มากกว่า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงรูปร่างการไหลโดยรวมของกรณี *S0rd05* พบว่าลักษณะการไหลดังกล่าวมีลักษณะการหมุนเช่นเดียวกับกรณี *S0rd00* หรืออีกนัยหนึ่งอาจกล่าวได้ว่ากรณี *S0rd05* มีลักษณะการเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน (Induce swirl) โดยการหมุนวนดังกล่าวจะแตกต่างจากกรณี *S0rd00* (ดังรูปที่ 4.4)

ผลของความไม่สมมาตรในกรณี *S0rd00* และผลของระยะห่างในกรณี *S0rd05* ทำให้เกิดลักษณะการไหลแบบหมุนวนในกรณี *S0* ทั้งในกรณีเจ็ตหนึ่งตัวและเจ็ตสองตัวสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ทั้งกรณีเจ็ตหนึ่งตัวและเจ็ตสองตัวสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนได้ (Induce

swirl) โดยที่กรณีเจ็ตหนึ่งตัวเมื่อมีการฉีดเจ็ตไม่ตรงศูนย์กลางหรือฉีดเจ็ตเป็นมุมเอียงจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน (รูปที่ 4.1) ในขณะที่กรณีเจ็ตสองตัวเมื่อระยะห่างระหว่างเจ็ตตัวที่หนึ่งกับเจ็ตตัวที่สองเหมะสม และ r_{eff} มากเพียงพอ จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน (รูปที่ 4.4 และ 4.5) เช่นกัน โดยการหมุนวนในกรณีเจ็ตหนึ่งตัวจะเป็นลักษณะหนึ่งวง ในขณะที่การหมุนวนในกรณีเจ็ตสองตัวจะเป็นลักษณะสองวง

ผลของการหมุนวนที่เกิดจากการหมุนควงของกระแสลมขวาง

ลักษณะการหมุนวนที่เกิดจากการหมุนควงของกระแสลมขวางคือในกรณี *S18* โดยกรณี *S18rd00* (รูปที่ 3.11) พบว่ารูปร่างการกระจายตัวของ C_{TG} ตั้งแต่ระยะ $x/r_{eff}d = 2.00$ จะเห็นลักษณะการหมุนของบริเวณเจ็ตและบริเวณอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ C_{TL} ที่ $x/r_{eff}d = 0.25$ พบลักษณะการหมุนของบริเวณ C_{TL} ระหว่าง 0.4 ถึง 0.6 โดยมีทิศทางเดียวกับการหมุนควงของกระแสลมขวาง และที่ $x/r_{eff}d = 0.50$ พบลักษณะการหมุนของบริเวณ C_{TL} ระหว่าง 0.4 ถึง 0.6 ที่หมุนไปตามส่วนโค้งของวงกลมมากขึ้น โดยเฉพาะที่ C_{TL} ระหว่าง 0.4 ถึง 0.5 นั้นหมุนไปตามส่วนโค้งของวงกลมจนเกือบชนอีกด้านหนึ่ง ที่ $x/r_{eff}d = 0.75$ บริเวณ C_{TL} ระหว่าง 0.4 ถึง 0.5 ทำให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า เจ็ตไหลไปตามผนังท่อและดึงอากาศบริเวณผนังท่อมาผสมได้ดีกว่าบริเวณกึ่งกลาง ทั้งนี้เนื่องจากการไหลแบบหมุนควงของกระแสลมขวางมีลักษณะเป็นแบบ Solid-body rotation ดังนั้นขนาดเวคเตอร์ความเร็วในแนวสัมผัส (w) ที่ขอบท่อจึงมีมากกว่าตรงกลางกอรปกับโมเมนตัมของเจ็ตที่พุ่งชนผนังอยู่บริเวณขอบท่อ ดังนั้นลักษณะทั้งสองมีลักษณะเสริมกัน ทำให้การหมุนที่บริเวณของท่อมีมากกว่าบริเวณตรงกลาง และที่ $x/r_{eff}d$ ตั้งแต่ 1.50 สามารถมองเห็นลักษณะการหมุนของทั้งบริเวณอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงได้อย่างชัดเจน

กรณี *S18rd05* (รูปที่ 3.12) เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ C_{TL} พบว่า Level สูงสุดของ C_{TL} (0.9-1.0) ที่ $x/r_{eff}d = 1.50$ และ 2.00 มีบริเวณช่วง C_{TL} ดังกล่าวอยู่ 2 ช่วงด้วยกัน คือบริเวณขอบท่อด้านบน และบริเวณขอบท่อด้านล่าง โดยกลุ่มที่อยู่บริเวณขอบท่อด้านบนค่อนข้างจะอยู่นิ่ง ในขณะที่กลุ่มที่อยู่บริเวณขอบท่อด้านล่างหมุนไปในทิศทางเดียวกับการหมุนควงของกระแสลมขวาง และเมื่อสังเกตบริเวณอุณหภูมิต่ำ (ค่า C_{TL} ระหว่าง 0.8 ถึง 0.9) ที่ $x/r_{eff}d$ ตั้งแต่ 2.50 จะมองเห็นลักษณะการหมุนของบริเวณดังกล่าวได้อย่างชัดเจน ซึ่งบริเวณดังกล่าวน่าจะเป็นผลจากการหมุนควงของกระแสลมขวาง

กรณี *S18rd10* (รูปที่ 3.13) เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ C_{TL} พบว่า Level สูงสุดของ C_{TL} (0.9-1.0) ที่ $x/r_{eff}d = 1.50$ และ 2.00 มีบริเวณของช่วง C_{TL} ดังกล่าวอยู่ 2 ช่วงด้วยกันคือบริเวณขอบท่อด้านบน และบริเวณขอบท่อด้านข้าง โดยเมื่อสังเกตจากบริเวณดังกล่าว

พบว่ากลุ่มที่อยู่บริเวณขอบท่อด้านบนค่อนข้างจะอยู่นิ่ง ในขณะที่กลุ่มที่อยู่บริเวณขอบท่อด้านล่างหมุนไปในทิศทางเดียวกับการหมุนควงของกระแสลมขวาง และเมื่อสังเกตบริเวณที่มีค่า C_{TL} ระหว่าง0.8 ถึง 0.9 ที่ $x/r_{eff}d$ ตั้งแต่ 2.50 จะมองเห็นลักษณะการหมุนของบริเวณดังกล่าวได้อย่างชัดเจน ซึ่งลักษณะดังกล่าวน่าจะเป็นผลจากการหมุนควงของกระแสลมขวางเช่นเดียวกันกับกรณี *S18rd05*

จากการวิเคราะห์ลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุดในแต่ละหน้าตัดตามแนวแกน (รูปที่ 3.41) พบว่าการไหลแบบหมุนควงของกระแสลมขวางมีผลทำให้ กรณี *S18rd00* ในช่วงแรก ($x/r_{eff}d$ ระหว่าง 0.25 ถึง 1.50) อุณหภูมิต่ำสุดจะมีการหมุนที่เร็วกว่าอุณหภูมิสูงสุด และลักษณะการหมุนจะพอๆกันในช่วงหลัง ($x/r_{eff}d$ ตั้งแต่ 2.00)

กรณี *S18rd05* โดยที่ในช่วงแรก ($x/r_{eff}d$ ระหว่าง 0.25 ถึง 0.75) อุณหภูมิต่ำสุดจะมีการหมุนที่เร็วกว่าอุณหภูมิสูงสุด และหลังจากนั้น ($x/r_{eff}d$ ระหว่าง 0.75 ถึง 3.00) ลักษณะการหมุนของอุณหภูมิสูงสุดที่ไปตามขอบท่อโดยมีลักษณะหมุนทวนเข็มนาฬิกา (มีทิศทางเดียวกับการหมุนควงของกระแสลมขวาง) มีลักษณะการหมุนที่สุด รองลงมาเป็นการหมุนของอุณหภูมิต่ำสุด และรองลงมาเป็นการหมุนของอุณหภูมิสูงสุดที่ไปตามขอบท่อโดยมีลักษณะหมุนตามเข็มนาฬิกา (มีทิศทางสวนกับการหมุนควงของกระแสลมขวาง) หลังจากนั้น ($x/r_{eff}d$ ระหว่าง 3.00 ถึง 4.23) อุณหภูมิสูงสุดจะรวมตัวเป็นหนึ่งเดียวและมีลักษณะหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในขณะที่อุณหภูมิต่ำสุดก็ยังคงหมุนไปในทิศทางเดิม

กรณี *S18rd10* โดยที่ในช่วงแรก ($x/r_{eff}d$ ระหว่าง 0.25 ถึง 0.50) อุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุด จะมีการหมุนใกล้เคียงกัน และหลังจากนั้น ($x/r_{eff}d$ ระหว่าง 0.50 ถึง 3.00) ลักษณะการหมุนของอุณหภูมิสูงสุดที่ไปตามขอบท่อโดยมีลักษณะหมุนทวนเข็มนาฬิกา (มีทิศทางเดียวกับการหมุนควงของกระแสลมขวาง) มีลักษณะการหมุนที่สุด รองลงมาเป็นการหมุนของอุณหภูมิต่ำสุด และรองลงมาเป็นการหมุนของอุณหภูมิสูงสุดที่ไปตามขอบท่อโดยมีลักษณะหมุนตามเข็มนาฬิกา (มีทิศทางสวนกับการหมุนควงของกระแสลมขวาง) หลังจากนั้น ($x/r_{eff}d$ ระหว่าง 3.00 ถึง 4.23) อุณหภูมิสูงสุดจะรวมตัวเป็นหนึ่งเดียวและมีลักษณะหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในขณะที่อุณหภูมิต่ำสุดก็ยังคงหมุนไปในทิศทางเดิม

ผลของระยะห่างระหว่างเจ็ตสำหรับกรณี *S18*

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองกรณีเจ็ตสองตัว ในกรณีที่กระแสลมขวางมีการไหลแบบหมุนควง โดยพิจารณาการพัฒนาตัวของเจ็ตจากสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ C_{TL} ในกรณี *S18rd05* (รูปที่ 3.12) และกรณี *S18rd10* (รูปที่ 3.13) พบลักษณะการกระจายตัวของเจ็ตหลังเจ็ตตัวที่สองมีลักษณะการกระจายตัวของบริเวณที่มี Jet fluid มาก แบ่งออกเป็นสองกลุ่มเช่นกัน โดย

มีความแตกต่างกันโดยกลุ่มหนึ่งจะวิ่งไปตามผนังท่อในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และอีกกลุ่มหนึ่งจะมีลักษณะค่อนข้างหยุดนิ่งและเจ็ตทั้งสองกลุ่มชนกันอีกครั้งหนึ่งที่บริเวณผนังท่อด้านบนที่ระยะประมาณ $x/r_{eff}d = 3.00$ แล้ววิ่งไปตามผนังท่อในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

นอกจากนี้ ยังได้สันนิษฐานการเกิดของเจ็ตทั้ง 2 กลุ่มได้ 2 กรณี คือ 1) เจ็ตทั้งสองกลุ่มเกิดจากการชนและรวมตัวกันของเจ็ตทั้งสองตัวแล้วแยกออกเป็นการไหลไปตามผนังท่อแบบทวนเข็มและแบบตามเข็ม โดยที่กลุ่มเจ็ตที่ไหลตามผนังท่อแบบทวนเข็มจะมีทิศทางการหมุนเดียวกับการหมุนควงของกระแสลมขวาง จึงมีส่วนเสริมกันให้หมุนเร็วขึ้น ในขณะที่กลุ่มเจ็ตที่ไหลตามผนังท่อแบบตามเข็มจะมีทิศทางการหมุนสวนทางกับการหมุนควงของกระแสลมขวางดังนั้นผลของการหมุนจึงหักล้างกัน โดยสมมุติฐานนี้มาจากการเลียนแบบการพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณี *S0rd05* และ 2) เจ็ตทั้งสองกลุ่มไม่เกี่ยวข้องกันเลยคือ เจ็ตกลุ่มแรกที่วิ่งไปในทิศทางเดียวกับการหมุนกวงของกระแสลมขวางเกิดจากเจ็ตตัวแรก และเจ็ตกลุ่มอยู่กับที่ด้านบนเกิดจากเจ็ตตัวที่สอง เนื่องจากจากเจ็ตตัวแรกอยู่ที่ระยะ Downstream .ใกล้ๆค่าของการหมุนควงของกระแสลมขวางจึงมีค่าสูง ในขณะที่เจ็ตตัวที่สองอยู่ที่ระยะ Downstreamไกลออกไปค่าการหมุนควงของกระแสลมขวางจึงมีค่าต่ำลงดังนั้น เจ็ตตัวแรกจึงมีผลจากการหมุนควงของกระแสลมขวางมากกว่า นอกจากนี้เจ็ตตัวแรกยังพุ่งชนผนังด้านบนตั้งแต่ $x/r_{eff}d = 0.25$ จะทำให้เกิดการ block การหมุนควงของกระแสลมขวางอีกทางหนึ่งดังนั้นผลของการหมุนควงของกระแสลมขวางจึงมีผลต่อเจ็ตตัวที่สองน้อยกว่าโมเมนตัมของเจ็ตตัวที่สองมากๆ ดังนั้นเจ็ตตัวที่สองจึงไม่หมุน

เมื่อพิจารณาโดยรวมกับการวิเคราะห์ลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุดในแต่ละหน้าตัดตามแนวแกน (รูปที่ 3.41) โดยดูจากกรณี *S18rd10* แล้วพบว่าการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิสูงสุดมีทิศหมุนตามเข็มนาฬิกาเกิดขึ้นด้วย จึงคาดว่าลักษณะการเกิดของเจ็ตทั้งสองกลุ่มเป็นดังข้อสันนิษฐานข้อที่หนึ่ง โดยที่ในกรณี *S18rd05* มองไม่เห็นการไหลของเจ็ตในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเนื่องจากผลของการหมุนควงของกระแสลมขวางมีมากกว่าผลของการหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาของเจ็ต เนื่องจากกรณี *S18rd05* ตำแหน่งที่เจ็ตแยกเป็นสองกลุ่มอยู่ที่ระยะ Downstream ใกล้ ผลของการหมุนควงของกระแสลมขวางมีมากกว่าในกรณี *S18rd10* (การหมุนควงของกระแสลมขวางจะมีค่าลดลงตามระยะ Downstream ที่เพิ่มขึ้น)

จากการอภิปรายผลการทดลองสามารถสังเกตลักษณะการหมุนของกรณีต่างๆโดยในกรณี *S0rd00* กับ *S18rd00* พบลักษณะที่คล้ายกันสองอย่างคือบริเวณอุณหภูมิสูงอยู่ด้านบนและมีแนวโน้มที่จะหมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และบริเวณอุณหภูมิต่ำอยู่ด้านล่างและหมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา แต่ลักษณะการหมุนของทั้งสองกรณีต่างกันคือ กรณี *S0rd00* การหมุนที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดจากการตั้งเจ็ตไม่ตรงศูนย์กลาง แต่กรณี *S18rd00* การหมุนที่เกิดขึ้นเกิดจากกระแสลมขวางมีการหมุนควง

นอกจากนี้การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอุณหภูมิสูงสุดของกรณี *S0rd00* กับ *S18rd00* นั้น (รูปที่ 3.42) ลักษณะการหมุนของกรณี *S0rd00* หมุนไปมากกว่ากรณี *S18rd00* อาจเป็นเพราะผลของการตั้งเจ็ตที่ไม่ตรงศูนย์กลางทำให้เกิด Induced swirl นั้นมีผลต่อบริเวณเจ็ตมากกว่าผลของการหมุนควงของกระแสลมขวาง และตำแหน่งที่ชนผนังด้านบนในกรณี *S18rd00* ทำให้เกิดการ Induced swirl ที่มีทิศทางการไหมุนตรงข้างกับทิศของกระแสลมขวางแต่เนื่องจากผลของการหมุนควงของกระแสลมขวางมีมากกว่าผลของการเหนี่ยวนำให้เกิดการหมุนวนในทิศทางตรงข้ามกับการหมุนควงของกระแสลมขวาง ดังนั้นกรณี *S18rd00* จึงมีลักษณะการหมุนไปในทิศทางเดียวกับการหมุนควงของกระแสลมขวางแต่มีลักษณะการหมุนที่น้อยกว่ากรณี *S0rd00* ในขณะที่บริเวณอุณหภูมิต่ำ (รูปที่ 3.43) กรณี *S18rd00* หมุนไปมากกว่ากรณี *S0rd00* นอกจากนี้ ในกรณีเจ็ตสองตัวลักษณะการเหนี่ยวนำให้เกิดการหมุนในกรณี *S0rd05* ยังทำให้เกิดลักษณะการหมุนในลักษณะสองวง ในขณะที่กรณี *S18rd05* และ *S18rd10* เป็นการหมุนวนเนื่องจากการหมุนควงของกระแสลมขวาง โดยเจ็ตจะมีลักษณะเสริม (การไหลของเจ็ตกลุ่มที่มีทิศทางการไหลไปตามขอบท่อในทิศทางเดียวกับกระแสลมขวาง) และหักล้าง (การไหลของเจ็ตกลุ่มที่มีทิศทางการไหลไปตามขอบท่อในทิศสวนทางกับกระแสลมขวาง) กับการหมุนควงของกระแสลมขวาง โดยที่ลักษณะการหมุนวนเป็นแบบหนึ่งวง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย