บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการไหลของเจ็ตกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการไหลแบบเจ็ตนี้เป็นลักษณะการไหลที่พบได้ทั่วไป และมีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในงานทางวิศวกรรม เช่น ในหัวฉีดเชื้อเพลิง หัวฉีดเพื่อการผสม หัวจ่ายในระบบปรับอากาศ ฯลฯ ซึ่งการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ที่พบเห็นกันทั่วไปมักใช้วิธีการควบคุมการไหล (Flow control) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเป็นส่วนใหญ่ จากการศึกษาพบว่าการควบคุมการไหลแบบปั่นป่วน มีผลต่อโครงสร้างของ Coherent Sturcture ซึ่งรวมถึงการก่อตัวขึ้น, การพัฒนาตัว, และการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันของโครงสร้าง Coherent Structure และโครงสร้างนี้ยังเป็นโครงสร้างหลักในการไหลแบบ Turbulent Shear Flow ซึ่งพบในการไหลแบบ Fully developed flow ของการไหลของ Jet, Wake และ Shear Layer โดยโครงสร้าง Coherent Structure มีความสำคัญต่อการถ่ายเทของความร้อน มวล และ โมเมนตัม กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การควบคุมการไหลเป็นการควบคุมโครงสร้าง Coherent Structure ซึ่งเป็นโครงสร้างที่พบได้ทั่วไปในการไหลแบบ Turbulent Shear Flow ในปัจจุบันจึงนิยมการใช้การควบคุมการไหลมาประยุกต์ในงานทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย เพื่อจุดประสงค์ต่างๆ เช่น เพิ่มประสิทธิภาพการผสม, การระบายความร้อน, การเกิดปฏิกิริยาเคมีและการเผาไหม้ รวมถึงการลดแรงต้านในการเคลื่อนที่ในทางอากาศพลศาสตร์

จากที่กล่าวมาแล้วนี้ทำให้ทราบถึงความสำคัญและประโยชน์ของวิธีการควบคุมการไหล นอกจากนี้ในการศึกษาการควบคุมการไหลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ 1) การควบคุมการไหลแบบมีการกระตุ้น (Active Control) เป็นการควบคุมการไหลโดยอาศัยพลังงานจากภายนอกในการควบคุมการไหลของของไหลเช่นการใช้ Actuator แบบต่างๆ ในการกระตุ้นเจ็ตที่พุ่งออกมา หรือการใช้พลังงานเสียงในการกระตุ้น และ 2) การควบคุมการไหลแบบไม่มีการกระตุ้น (Passive Control) เป็นการควบคุมการไหลแบบไม่อาศัยพลังงานจากภายนอก แต่จะใช้การเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลของของไหลในการควบคุมการไหลของของไหลนั้นเอง เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่บริเวณปากทางออกของเจ็ต หรือการใช้อุปกรณ์บางอย่างติดบริเวณปากเจ็ตเพื่อช่วยในการเพิ่มการหมุนวนตามแนวการไหล และเพิ่มพื้นที่หน้าตัดในการแลกเปลี่ยนของไหล เช่นการใช้ Tab, การใช้ Vane หรือการใช้ Lobed mixer-nozzle เป็นต้น

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการควบคุมการไหลของของไหลแบบ Active Control ในการควบคุมการไหลของเจ็ตปฐมภูมิด้วยการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์ตามแนวเส้นรอบวง ซึ่งเจ็ตทุติยภูมิมีลักษณะการไหลแบบพัลส์เจ็ตในกระแสลมขวาง (Pulsed Jet in Crossflow)

ในขั้นพื้นฐานการไหลแบบพัลส์เจ็ตในการแสลมขวาง ประกอบด้วยคุณลักษณะต่างๆ ของการไหลคือ เจ็ต (Jet), เจ็ตในกระแสลมขวาง (Jet in Crossflow, JICF), พัลส์เจ็ตในกระแสลมขวาง (Pulsed Jet in Crossflow, PJICF)

สำหรับการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF) นั้นได้มีการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ ของการไหล ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวาง (Fric and Roshko, 1994) เส้นทางการไหล (Trajectory) ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Pratte and Baines, 1967) อัตราการลดลงของ Concentration ในแนวแกนของ เจ็ต (Decay rate) (Smith and Mungal, 1998) โดยในการศึกษาเหล่านี้ได้มีการศึกษาในรูปลักษณะ (Configuration) ของเจ็ตแบบต่างๆคือ เจ็ตที่มีปากเจ็ตอยู่ที่ระดับพื้น (Ground-level source หรือ Flush-mounted) (Fric and Roshko, 1994) และปากเจ็ตยกสูงจากพื้น (Pratte and Baines, 1967)

สำหรับการไหลแบบพัลส์เจ็ตในกระแสลมขวาง เป็นลักษณะการไหลอีกรูปแบบหนึ่งที่ได้รับความสนใจและมีการทำวิจัยกันมากขึ้น พบว่าการไหลแบบนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผสมได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากผลของความไม่ต่อเนื่องในการฉีดเจ็ตแบบพัลส์ โดยมีผู้ศึกษาถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะการผสมของพัลส์เจ็ตในกระแสลมขวาง เช่น Wu et al. (1998), Hermanson et al. (1998) และ Johari et al. (1999) ได้ทำการศึกษาผลของระยะเวลาในการฉีดเจ็ต (Injection time) , และค่าความถี่ของการฉีดเจ็ต (Pulsed frequency) และยังมีผู้ศึกษาการผสมโดยพิจารณาจากระยะ Flame length ของการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น Johari et al. (1999), Eroglu and Breidenthal (2001) พบว่าลักษณะของการไหลแบบ Pulsed Jet ใน Crossflow ทำให้ประสิทธิภาพของการผสมเพิ่มขึ้น

ดังนี้จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการนำลักษณะของการฉีดเจ็ตแบบพัลส์ มาประยุกต์ใช้ในการไหลแบบเจ็ตที่มีใช้อยู่ในงานอุตสาหกรรม เช่น หัวฉีดของ Burner ในการฉีดอากาศเข้าผสมกับเชื้อเพลิง และหัวฉีดสารเคมีในการผสมสารเคมี เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมการใช้งาน Burner นั้นพบได้ในลักษณะงานประเภทต่าง ๆ เช่น การทำงานของหม้อไอน้ำ (Steam Boiler), อุตสาหกรรมการหลอมโลหะ (Metal Melting), การให้ความร้อนของเตาเผา (Kiln or Furnace) และ อุตสาหกรรมอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร (Food Drying) เป็นต้น

ในการออกแบบ Burner นั้นจะต้องคำนึงถึงการผสมและการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเผาไหม้คือ อัตราการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง

(Air/Fuel Ratio), ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้, สารมลพิษ, ความมีเสถียรภาพของเปลวไฟ (Flame Stability) รวมถึงมลภาวะทางเสียง

การจำแนกประเภทของ Burner ที่ใช้ในอุตสาหกรรมนั้นสามารถจำแนกได้ตามลักษณะของการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ Non-Premixed Burner, Premixed Burner และ Partial Premixed Burner โดย Krass et al. (1999) ได้กล่าวถึงลักษณะของ Burner แต่ละชนิดไว้ดังนี้

Non-Premixed Burner เป็น Burner ที่มีลักษณะการฉีดของอากาศกับเชื้อเพลิงเข้าผสมเพื่อก่อให้เกิดการเผาไหม้กันโดยตรง Burner ลักษณะนี้มีข้อดีคือ ไม่เกิด Flashback ของเปลวไฟการเผาไหม้จึงมีความปลอดภัยในการทำงาน ส่วนข้อเสียคือ ผลจากการเผาไหม้ก่อให้เกิดมลพิษสูง

Premixed Burner เป็น Burner ที่มีลักษณะต่างจาก Non-Premixed Burner คือ อากาศกับเชื้อเพลิงจะมีการผสมกันก่อนใน Chamber แล้วจึงฉีดออกมาเพื่อทำการเผาไหม้ ข้อดีของ Burner ชนิดนี้คือ ผลจากการเผาไหม้มีปริมาณมลพิษที่ต่ำกว่า Non-Premixed Burner ส่วนข้อเสียคือ ลักษณะของการเผาไหม้ให้เปลวไปที่ไม่มีเสถียรภาพ และอาจเกิดการ Flashback ของเปลวไฟขึ้น

Partial Premixed Burner เป็น Burner ที่มีลักษณะที่รวมเอาข้อดีของทั้ง Non-Premixed Burner และ Premixed Burner เข้าไว้ด้วยกัน กล่าวคือ การเผาไหม้ไม่ก่อให้เกิด Flashback ลดการเกิดปริมาณของสารพิษและให้เปลวไฟที่มีเสถียรภาพ ลักษณะการทำงานของ Burner ชนิดนี้จะมีการทำงานเป็นแบบ Stage Combustion โดยในขั้นแรกอากาศกับเชื้อเพลิงจะมีการเผาไหม้เป็นแบบ Rich-burn และในการเผาไหม้ขั้นที่สอง ซึ่งเป็นผลจากการฉีด Secondary air เข้าผสมกับเชื้อเพลิงที่เหลือจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ในขั้นแรก การเผาไหม้จะเป็นแบบ Lean-burn ข้อดีของการเผาไหม้แบบ Stage Combustion นี้คือช่วยลดความรุนแรงของปฏิกิริยาการเผาไหม้ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ จึงเกิดก๊าซมลพิษ คือ NO_x น้อยดังนั้น Burner ลักษณะนี้จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการออกแบบใช้ในงานอุตสาหกรรม

เนื่องจากศักยภาพในการเพิ่มการผสมของการฉีดเจ็ตแบบพัลส์ และการนำมาประยุกต์ใช้กับหัวฉีดของ Burner และ หัวฉีดผสมสารเคมี ดังกล่าวข้างต้น กอปรกับยังมีผู้ประยุกต์วิจัยศึกษาการฉีดเจ็ตแบบพัลส์ในการไหลแบบ Circular Jet น้อยหรือแทบไม่มีเลย ดังนี้จึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งมีเป้าหมายในการศึกษาคุณลักษณะการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบเป็นพัลส์ เข้าผสมตามแนวเส้นรอบวง

1.2 งานวิจัยในอดีต

1.2.1 เจ็ตอิสระ

Beer และ Chigier (1972) ได้ทำการศึกษา Turbulent free jet พบว่าสามารถแบ่งลักษณะของบริเวณต่างของการไหลได้ดังรูปที่ 1.1 โดยที่ระยะใกล้ปากเจ็ตเป็นบริเวณที่เรียกว่า Potential core ซึ่งภายในบริเวณนี้ความเร็วของเจ็ตที่ออกมามีลักษณะสม่ำเสมอ ส่วนบริเวณด้านนอกของ Potential core คือบริเวณ Transition region บริเวณนี้จะมีการพัฒนาของ Mixing layer ซึ่งจะมีการถ่ายเทโมเมนตัมและมวลตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของการไหลของเจ็ต ในบริเวณ Fully developed region ซึ่งอยู่ถัดจาก Transition region ที่บริเวณนี้พบว่ามีลักษณะ Similarity ของการกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวรัศมี สำหรับความยาวของ Potential core และ Transition region มีค่าประมาณ 4-5 และ 10 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของสภาวะเริ่มต้น เช่น ระดับ Turbulence ของเจ็ตที่ถูกฉีดออกจากของ Nozzle

Rajaratnam (1976) ได้แบ่งลักษณะของเจ็ตอิสระ (Free jet) ออกเป็น 3 บริเวณดังรูปที่ 1.2 ได้แก่ 1) บริเวณ Potential core ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วสม่ำเสมอ ยังไม่ได้รับผลของ Shear layer ที่ปากเจ็ต 2) บริเวณ Flow development ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการพัฒนาตัวของ Shear layer ที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ตและบรรยากาศ โดยบริเวณนี้ครอบคลุมจากบริเวณปากเจ็ตถึงบริเวณปลาย Potential core และ 3) บริเวณ Fully developed flow ซึ่งเป็นบริเวณที่มีคุณสมบัติ Similarity ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Corrsin (1946), Hinze and Zijnen (1949), Albertson et al. (1950) และ Abramovich (1963) และจากการวิเคราะห์โดยใช้วิธี Similarity ดังกล่าว Townsend (1956) และ Tennekes and Lumley (1972) พบว่าอัตราการขยายตัว (Spread rate) ของ Turbulent jet ซึ่งแสดงโดยความกว้างของเจ็ตแปรตามระยะตามแนวแกนของเจ็ต ส่วนฉวามเร็วในแนวแกนของเจ็ตจะแปรผกผันกับระยะทางตามแนวแกนของเจ็ต ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองของ Liepman and Laufer (1947)

การผสม (Entrainment) ของเจ็ต

กรณีการดึงอากาศภายนอกเข้ามาผสมของเจ็ต (Entrainment) นั้น Corrsin and Uberoi (1949) พบว่าที่อัตราส่วนความหนาแน่นระหว่างเจ็ตและบรรยากาศ (Density ratio, $S = \rho_j / \rho_\alpha$) มีค่าต่ำเจ็ตจะมีอัตราการ Entrainment สูง โดยพบว่าเจ็ตมีส่วนของ Potential core ที่สั้นและมีอัตราการลดลง (Decay) ของความเร็วในแนวแกนและอุณหภูมิสูงกว่าเจ็ตที่มีอัตราส่วนความหนาแน่นของเจ็ตสูง Ricou and Spalding, (1961) และ Sforza and Mons

(1978) พบว่า อัตราการ Entrainment เป็นฟังก์ชันของ $(\rho_\alpha / \rho_j)^{1/2} (x/d_j)$; ρ_α คือ ค่าความหนาแน่นของ Freestream, ρ_j คือ ค่าความหนาแน่นของเจ็ต, x คือแกนพิกัดจากเจ็ตไปทาง Downstream และ d_j คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต นอกจากนี้ Ricou and Spalding (1961) ยังพบอีกว่าเจ็ตที่อัตราส่วนความหนาแน่นเท่ากับ 0.07 เจ็ตมีการ Entrainment สูง

Russ and Strykowski (1993) ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มต้นที่มีต่อโครงสร้างและการผสมของเจ็ต โดยศึกษาผลของค่าอัตราส่วนความหนาแน่นของเจ็ต (S) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างท่อเจ็ตแบบ Expansion tube แสดงด้วยอัตราส่วน L/D (L/D = 1, 2.6, 12) และการเปลี่ยนแปลงสภาวะที่ปากทางออกของเจ็ตด้วยการติด Screen ที่ตำแหน่ง $2.6D$ ก่อนถึงปากทางออกเจ็ต ซึ่งทำการทดลองที่เรย์โนนัมเบอร์เจ็ตเท่ากับ 10,000 พบว่า ผลของค่าอัตราส่วนความหนาแน่นแสดงดังรูปที่ 1.3 จะเห็นว่าเจ็ตที่ค่าอัตราส่วนความหนาแน่นสูง (S = 0.75) ดังรูปที่ 1.3ก เจ็ตมีการกระจายตัวด้วยมุมกว้างครึ่งหนึ่งมีค่าประมาณ 10° องศา แต่ที่ค่าอัตราส่วนความหนาแน่นต่ำ (S = 0.50) เจ็ตมีการกระจายตัวกว้างกว่าอย่างชัดเจนและมีมุมกว้างครึ่งหนึ่งประมาณ 45° องศา ดังรูปที่ 1.3ข ส่วนผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะที่ปากทางออกเจ็ตด้วยการติด Screen ที่ตำแหน่งประมาณ $2.6D$ ก่อนถึงปากทางออกเจ็ต แสดงดังรูปที่ 1.4 โดยในรูปที่ 1.4ก แสดงรูปของเจ็ตที่ไม่ติด Screen เจ็ตมีระดับความปั่นป่วนของ Boundary layer ที่ปากทางออกน้อยกว่า 2.5 % จะเห็นว่าเจ็ตมีการกระจายตัวกว้างมีมุมกว้างครึ่งหนึ่งประมาณ 45° องศา แต่เมื่อติด Screen ดังรูปที่ 1.4ข เจ็ตมีระดับความปั่นป่วนของ Boundary layer ที่ปากทางออกประมาณ 5.0 % พบว่าเจ็ตมีแตกตัวเป็น Small scale จำนวนมาก แต่เจ็ตกลับมีการกระจายตัวแคบกว่า ซึ่งมีมุมกว้างครึ่งหนึ่งประมาณ 10° องศา นอกจากนี้ Russ and Strykowski (1993) ยังแสดงค่าการ Entrainment ของเจ็ตเปรียบเทียบผลกับการทดลองของ Crow and Champagne (1971) และ Abramovich et al. (1969) ดังรูปที่ 1.5 แสดงผลด้วยค่า $\left[\left(\dot{m}_{10}/\dot{m}_0\right)-1\right]$ พบว่าเจ็ตมีค่าอัตราการ Entrainment ใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของท่อเจ็ตแสดงด้วยอัตราส่วน (L/D = 1, 2.6, 12) พบว่า เจ็ตที่มีรูปร่างของท่อแบบ L/D = 12 เจ็ตมีอัตราการ Entrainment ต่ำกว่าเจ็ตที่มีรูปร่างของท่อแบบ L/D = 1, 2.6 เมื่อเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะปากทางออกเจ็ต พบว่าการติด Screen ทำให้เจ็ตมีการ Entrainment ต่ำกว่าเมื่อไม่ติด Screen ที่ทุกกรณีของเจ็ตที่มีรูปร่างท่อแบบต่าง ๆ

1.2.2 เจ็ตในกระแสลมขวาง (Jet In Crossflow, JICF)

การศึกษาเจ็ตในกระแสลมขวางนั้นมีผู้ศึกษาคุณลักษณะต่างๆไม่ว่าจะเป็นลักษณะโครงสร้าง (Flow structure) (Fric and Roshko (1994)), เส้นทางของเจ็ต (Trajectory) (Pratte and Baines (1967)), การผสม (Mixing and entrainment) (Yuan and Street (1998)), การ

ขยายตัวของเจ็ต (Spread rate) (Pratte and Baines (1967)) และการลดลงของปริมาณต่างๆตามแนวแกนเจ็ต (Decay rate) (Smith and Mungal (1998))

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อคุณลักษณะดังกล่าว (Parametric study) โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความเร็วของเจ็ตและกระแสลมขวาง (r_u) (Pratte and Baines (1967)) และอัตราส่วนระหว่างโมเมนตัมของเจ็ตและกระแสลมขวาง (r_m) โดยเฉพาะกรณีที่มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเจ็ตและกระแสลมขวาง (Kamotani and Greber (1972)) โดยกรณีที่ความหนาแน่นของเจ็ตเท่ากับกระแสลมขวาง ($\rho_j = \rho_{cf}$) r_u จะมีค่าเท่ากับ r_m นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่เกิดขึ้นบริเวณปากเจ็ตนั้นจะมีผลอย่างมากต่อคุณลักษณะและการพัฒนาตัวของเจ็ต ทำให้มีการศึกษาผลของสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาผลของรูปร่างของปากเจ็ต (Sivadas et al. (1997) และ Findlay et al. (1999)) ผลจากการใส่สภาวะที่ไม่คงตัว (Unsteady) (Raud et al. (1999)) และอื่นๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ลักษณะและโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Rajaratnam (1976) ได้แบ่งลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางออกเป็น 3 บริเวณดังรูปที่ 1.6 ได้แก่ 1) บริเวณ Potential core ซึ่งเป็นบริเวณกึ่งกลางของ Shear layer ของเจ็ตในช่วงต้นซึ่งมีค่าความดันรวมสม่ำเสมอ โดย Keffer and Baines (1963) พบว่าที่อัตราส่วนความเร็วมากกว่า 4 นั้น แกนของ Potential core จะยังคงอยู่ในแนวแกนของเจ็ต ในขณะที่เมื่ออัตราส่วนความเร็ว (r_u) น้อยกว่า 4 นั้น แกนของ Potential core จะเริ่มโค้งไปตามทิศทางของกระแสลมขวาง นอกจากนี้ Pratte and Baines (1967) ยังพบว่าที่อัตราส่วนความเร็วสูงๆ ความยาวของ Potential core ของเจ็ตในกระแสลมขวางจะมีขนาดเข้าใกล้กรณีของเจ็ตอิสระ และต่อจาก Potential core การไหลจะพัฒนาตัวเข้าสู่ 2) บริเวณที่มีการเลี้ยวเบนมากที่สุด (Zone of maximum deflection) ซึ่งเป็นบริเวณที่มี Pressure gradient, อัตราการผสม (Entrainment rate) และการเปลี่ยนทิศทางของเจ็ตมากที่สุด ต่อจากนั้นจะเข้าสู่ 3) บริเวณ Vortex zone ซึ่งจะเห็นโครงสร้างของ Vortical structure อย่างชัดเจน โดย Pratte and Baines (1967) ยังคงพบโครงสร้างดังกล่าวที่ระยะทางถึง $1000d$ จากปากเจ็ต

Fric and Roshko (1994) ได้สรุปโครงสร้างของ Vortical sturcture ที่เกิดขึ้นในเจ็ตในกระแสลมขวางโดยแบ่งเป็น 4 ลักษณะดังรูปที่ 1.7 ได้แก่ 1) Jet shear layer vortices ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Vortex ring ของเจ็ต เป็นผลของ Kelvin-Helmholtz instability จากการแยกตัว (Separation) ของ Shear layer บริเวณปาก Jet ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Vortex ring ในกรณีของ Free Jet อย่างไรก็ตาม Lim et al. (2001) ทำการทดลองโดยการใช้เทคนิค Flow

Visualization พบว่า Vortices ที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้เป็นลักษณะของ Vortex ring แต่เป็นลักษณะของ Vortex loop โดย Adnan and Robert (2001) พบว่า Loop vortices ที่เกิดขึ้นนี้ Loop ที่อยู่ใกล้ๆกันจะมีปฏิสัมพันธ์กัน โดยอาจเกิดการรวมตัวกันและทำให้ Vorticity เพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่ง Yuan and Street (1998) พบว่าบริเวณ Jet shear layer vortices นี้เป็นบริเวณที่สำคัญที่เกิดการ Entrainment ในช่วง Near field 2) Horseshoe vortices เป็นการม้วนตัวของกระแสลมขวางในบริเวณชั้นขอบเขตที่พื้นรอบปากเจ็ต ซึ่งเกิดจากการที่กระแสลมขวางได้รับผลของ Adverse pressure gradient ที่เกิดจากการกีดขวางการไหลโดยเจ็ตที่พุ่งออกมา ประกอบกับผลของความหนาของชั้นขอบเขตของพื้นบริเวณปากเจ็ต 3) Wake vortices เกิดบริเวณด้านหลังเจ็ต ซึ่งมีลักษณะคล้าย Wake ที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก โดยที่ Reynolds number สูง Kelso et al. (1996) พบลักษณะการเกิดของ Wake vortices 3 ลักษณะคือ Von Karman vortex street, Mushroom-like upright vortex และ Alternative mushroom-like upright vortex ดังรูปที่ 1.8 (จากรูป $U_\infty = u_{cf}, v_j = u_j$) โดยที่ผ่านมาได้มีแนวคิดสำหรับกลไกในการเกิด Wake ดังกล่าวดังนี้ เนื่องจาก Vorticity ไม่สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อไม่มี Solid boundary ดังนั้น Wake votices จะต้องมีแหล่งกำเนิดมาจาก Vorticity ที่ผนังที่พื้นหรือผนังของเจ็ตหรือทั้งผนังที่พื้นและผนังของเจ็ต ดังนั้นในกรณีที่ปากเจ็ตอยู่ที่ระดับพื้นนั้น ต้องเป็นผลมาจาก convection, turning, stretching และ diffustion ของ Vorticity ที่เกิดจากชั้นขอบเขตของผนังของ กระแสลมขวางหรือชั้นขอบเขตที่ผนังของเจ็ต โดย (Fric and Roshko, 1989, 1994 และ Fric, 1990) ได้ทำการทดลองโดยใช้ Smoke-Wire Flow Visualization และแสดงให้เห็นว่าแท้จริงแล้ว Wake vortices เกิดจาก Vorticity ในชั้นขอบเขตบนผนังของกระแสลมขวางบริเวณปากเจ็ตไม่ใช่จากชั้นขอบเขตบนผนังท่อเจ็ตหรือจาก Vortex Shedding ด้านหลังของลำเจ็ตและ 4) Counter-rotating vortex pair (CVP) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เป็นกลไกสำคัญในการผสม โดยเฉพาะในบริเวณ Far field สำหรับกลไกในการเกิด CVP ยังไม่เป็นที่เข้าใจมากนัก แต่นักวิจัยส่วนใหญ่ให้ความเห็นตรงกันคือ เกิดจาก Separation ของชั้นขอบเขตภายในท่อที่ปากเจ็ตจึงทำให้เกิดการม้วนตัว

เส้นทาง (Trajectory) ของเจ็ตในกระแสลมขวาง

ที่ผ่านมามีการศึกษาเส้นทางของเจ็ตในกระแสลมขวางค่อนข้างมาก โดยมีความแตกต่างกันทั้งวิธีการศึกษาและผลการศึกษาซึ่งมักแสดงเป็นสมการของความสัมพันธ์ (Correlation) Margason (1968) ได้สรุปผลการศึกษาต่างๆและแสดงความสัมพันธ์ (Correlation) ของเส้นทางในรูปของกฎกำลัง (Power law)

$$\frac{y}{r_{eff}d} = A\left(\frac{x}{r_{eff}d}\right)^{m} \qquad (1.1)$$

โดย A และ m เป็นค่าคงที่ของสมการ มีค่าประมาณ 1.6 และ 1/3 ตามลำดับ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ต และ r_{eff} เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity ratio)

สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการไหลแบบเจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง ดังนั้น r_{eff} นิยามโดยมีค่าเท่ากับรากที่สองของอัตราส่วนโมเมนตัม (r_m)

$$r_{eff} = \left(\frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf}(u_{cf}^2 + w_{cf}^2)}\right)^{1/2} \qquad (1.2)$$

โดย u_j คือความเร็วของเจ็ตอากาศ

u_{cf} คือความเร็วของกระแสลมขวางตามแนวแกน

w_{cf} คือความเร็วของกระแสลมขวางตามแนวสัมผัส

ρ_j คือความหนาแน่นของเจ็ตอากาศ

ρ_{cf} คือความหนาแน่นของกระแสลมขวาง

สำหรับกรณีที่กระแสลมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควง ค่า w_{cf} ในสมการที่ 1.2 จะมีค่าเท่ากับศูนย์จะได้

$$r_{eff} = \left(\frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2}\right)^{1/2} \qquad (1.2.1)$$

และสำหรับกรณีที่ความหนาแน่นของกระแสลมขวางมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของเจ็ตอากาศสมการที่ 1.2.1 จะลดรูปเป็น

$$r_{eff} = r_u = \frac{u_j}{u_{cf}} \qquad (1.2.2)$$

โดยที่ r_u คืออัตราส่วนความเร็ว

Pratte และ Baines (1967) ศึกษาเส้นทาง (Trajectory) ของเจ็ต โดยปากเจ็ตอยู่สูงจากระดับพื้น 8 นิ้ว ปากติดอยู่บริเวณศูนย์กลางของแผ่นราบกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว ทำให้ไม่มีผลของ Boundary Layer ที่พื้น และพบความสัมพันธ์ของเส้นทางในรูป Empirical Equation ใน r_u-scale ตามความสัมพันธ์ $y/r_u d = A/(x/r_u d)^m$ เมื่อแกน Coordinate แสดงในรูปที่ 1.9 โดยที่ อัตราส่วนความเร็ว ($r_u = u_j/u_{cf}$) นิยามว่าเป็นความเร็วของเจ็ตต่อความเร็วของกระแสลมขวาง, d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ต, A และ m คือ ค่าคงที่ และ r_u ในการทดลองอยู่ระหว่าง 4 ถึง 35 โดยค่าคงที่ A และ m สำหรับกรณี Trajectory ของ Outer boundary,

Centerline และ Inner boundary (Centerline Trajectory นิยามเป็นระยะกึ่งกลางระหว่าง Outer และ Inner boundary) แสดงไว้ในตารางที่ 1.1 และผลการทดลองแสดงในรูปที่1.6 (จากรูป $\alpha = r_u$) รวมทั้งยังแสดงผลของ Trajectory ตามแนวแกนของเจ็ต (ξ) (แนวแกนของเจ็ต (ξ) นิยามเป็น จุดภายในเจ็ตที่มีความเร็วสูงสุด) ดังรูปที่ 1.10

Kamotani and Greber (1972) ได้ศึกษาเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ต โดยให้ความร้อนกับเจ็ตจนมีอุณหภูมิสูงกว่ากระแสลมขวางประมาณ 75 °F และ 320 °F ที่อัตราส่วนโมเมนตัม ($r_m = \rho_j u_j^2 / \rho_{cf} u_{cf}^2$) เท่ากับ 15.3 และ 59.3 ดังรูปที่ 1.11 โดยเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิ นิยามเป็นตำแหน่งของจุดที่มีความเร็วและอุณหภูมิสูงที่สุดบนระนาบสมมาตรตามลำดับ พบว่า ที่อัตราส่วนโมเมนตัมเดียวกัน เส้นทางของอุณหภูมิอยู่ต่ำกว่าเส้นทางของความเร็ว และยังพบว่า อัตราส่วนโมเมนตัมเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและส่งผลต่อเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิ ในขณะที่อัตราส่วนความหนาแน่นไม่ส่งผลต่อเส้นทางของความเร็ว โดยส่งผลต่อเส้นทางของอุณหภูมิเล็กน้อย โดยแสดงความสัมพันธ์ของเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิดังสมการ

$$\frac{y_U}{d} = 0.89 r_m^{0.47} \left(\frac{x}{d}\right)^{0.36} \tag{1.3}$$

$$\frac{y_T}{d} = 0.73 r_m^{0.52} \left(\frac{\rho_j}{\rho_{cf}}\right)^{0.11} \left(\frac{x}{d}\right)^{0.29} \tag{1.4}$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปของผลคูณระหว่างความเร็วประสิทธิผลและเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต ($r_{eff}d$-scale) ได้เป็น

$$\frac{y_U}{r_{eff} d} = 0.89 r_{eff}^{0.3} \left(\frac{x}{r_{eff} d}\right)^{0.36} \tag{1.5}$$

$$\frac{y_T}{r_{eff} d} = 0.73 r_{eff}^{0.33} \left(\frac{\rho_j}{\rho_{cf}}\right)^{0.11} \left(\frac{x}{r_{eff} d}\right)^{0.29} \tag{1.6}$$

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาเส้นทางของ Scalar concentration (นิยามจากแนวจากจุดที่มีค่า Concentration มากที่สุดบนระนาบ $z = 0$) โดยใช้ Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ในช่วงอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r_{eff}) ตั้งแต่ 5 ถึง 25 โดยการศึกษาจะเป็นลักษณะปากเจ็ตอยู่ที่พื้นของ Test section ซึ่งต่อกับ Contraction โดยตรง และใช้ Length scale เป็น d, $r_{eff}d$ และ $r_{eff}^2 d$ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 1.12 (จากรูป $r = r_{eff}$) พบว่าเส้นทางของ Scalar concentration ซึ่งนิยามจากตำแหน่งของจุดที่มี Concentration มากที่สุดบนระนาบ

สมมาตร ขึ้นกับอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r_{eff}) เมื่อใช้ $r_{eff}\ d$ เป็น Length scale แสดงว่า $y/r_{eff}d = A(x/r_{eff}d)^m$ โดยที่ A เป็นฟังก์ชันของ r_{eff} ($A = A(r_{eff})$) และ m เป็นฟังก์ชันของ r_{eff} ($m = m(r_{eff})$) ซึ่งต่างจากผลการทดลองของ Pratte and Baines (1967) โดย Smith and Mungal (1998) อธิบายว่าเป็นผลของชั้นขอบเขตที่พื้น และผลของบริเวณความดันต่ำด้านหลังปากเจ็ตที่มีค่าขึ้นกับอัตราส่วนความเร็ว(r_u) โดย Fric and Roshko (1994) พบบริเวณที่มีความดันต่ำดังกล่าวที่อัตราส่วนความเร็ว (r_u) น้อยกว่า 8

สำหรับการศึกษาอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางที่ได้จากการวัดความเร็วนั้น Keffer and Baines, (1963) ศึกษาเส้นทางของเจ็ต โดยปากเจ็ตอยู่สูงจากระดับพื้น 6 นิ้ว ปากติดอยู่บริเวณศูนย์กลางของแผ่นราบกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว ทำให้ไม่มีผลของ Boundary Layer ที่พื้น พบว่าเส้นทางของเจ็ตจะ collapse ใน $r_{eff}^2 d$-scale (สำหรับ r_{eff} = 6, 8 และ 10) ในช่วงประมาณ $8d$ แรกนับจากปากเจ็ตไปตาม Downstream (x) Platten and Keffer, (1971) ศึกษาเส้นทางของเจ็ต โดยการฉีดเจ็ตเป็นมุมต่างๆเทียบกับกระแสลมขวาง โดยปากเจ็ตอยู่สูงจากระดับพื้น 15 เซนติเมตร ปากติดอยู่บริเวณศูนย์กลางของแผ่นราบกลมอะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30.5 เซนติเมตร หนา 0.308 เซนติเมตร เพื่อให้ไม่มีผลของ Boundary Layer ที่พื้น พบว่าไม่มี Self similarity ของเส้นทางของเจ็ตที่มุมต่างๆของการฉีด และระยะการเจาะทะลุขึ้นกับอัตราส่วนความเร็ว Isaac and Jakubowski, (1985) ศึกษาเส้นทางของเจ็ตสองตัวที่วางเรียงกันตามแนว Downstream โดยเจ็ตทั้งสองตัววางห่างกัน 4 เท่าของระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง และเจ็ตแต่ละตัวมีอัตราส่วนความเร็วเท่ากับสอง พบว่าเส้นทางของเจ็ตสองตัวมีลักษณะคล้ายกับเส้นทางของเจ็ตตัวเดียว นอกจากนี้ยังมีผู้ศึกษาเส้นทางของเจ็ตในกระแสลมขวางในกรณีที่มีเจ็ตมากกว่าหนึ่งตัวอีกเช่น Kamotani and Greber (1974), Schwendemenn (1973), Ziegler and Wooler (1973), Isaac and Schetz (1982) และ Makihata and Miyai (1979) เป็นต้น

การผสม (Entrainment) ของเจ็ตในกระแสลมขวาง

การศึกษาการผสมสำหรับเจ็ตในกระแสลมขวางนั้นมีความซับซ้อนค่อนข้างมากเนื่องจากการไหลมีลักษณะเป็น 3 มิติ โดยการดึงกระแสลมขวางเข้าไปในตัวเจ็ต (Entraiment) จะเป็นกลไกสำคัญในการผสม ซึ่งการศึกษาที่ผ่านมาจะพิจารณาจากปริมาณบ่งชี้ต่างๆได้แก่ การขยายตัวของเจ็ต (Spread rate) และการลดลง (Decay rate) ของปริมาณต่างๆตามแนวแกนเจ็ตไม่ว่าจะเป็น ความเร็ว, อุณหภูมิ และ Scalar concentration ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ มีความเชื่อมโยงกับการผสม

Pratte and Baines (1967) พบความสัมพันธ์ของความหนาของเจ็ตในแนว Spanwise (Δz) ในพิกัด Cartesian ดังรูปที่ 1.13 ตามสมการ $\left(\Delta z/r_{eff}d\right) = A\left(x/r_{eff}d\right)^m$ โดยค่าคงที่ A =

1.25 และ m = 0.4 และยังพบความสัมพันธ์ของความหนาของเจ็ตในแนว Transverse $(\Delta\eta)$ ในพิกัดของเจ็ต (Natural coordinate) ตามสมการ $\left(\Delta\eta / r_{eff} d\right) = A\left(x / r_{eff} d\right)^{m}$ โดยค่าคงที่ A = 0.92 และ m = 0.4

Kamotani and Greber (1972) พบว่าในช่วงต้นของการพัฒนาตัว เจ็ตในกระแสลมขวางมีการขยายตัวและอัตราการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนเจ็ต (ξ) บนระนาบสมมาตร มากกว่ากรณีของเจ็ตอิสระและจะเข้าใกล้กรณีของเจ็ตอิสระบริเวณไกลปากเจ็ต ดังรูปที่ 1.14โดยทดลองถึงระยะตามแนวแกนเจ็ต (ξ) ประมาณ $70\xi/d$ นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายของอุณหภูมิซึ่งอยู่ในรูป $\left(T - T_{cf}\right)/\left(T_{max} - T_{cf}\right)$ ตามแนว Transverse ซึ่งเขียนในรูป $\eta/\eta_{0.5}$ บนระนาบสมมาตรนั้นจะตกลงบนเส้นเดียวกัน ที่ระยะตามแนวแกนเจ็ต (ξ) ต่างๆกัน แสดงถึงคุณสมบัติ Similarity โดยมีลักษณะเช่นเดียวกับผลของการวัดความเร็วโดย Keffer and Baines (1963) ซึ่งแสดงการกระจายของความเร็วในรูป $\left(u - u_{cf}\right)/\left(u_{max} - u_{cf}\right)$ ตามแนว Lateral ในรูป $\zeta/\zeta_{0.5}$

Sherif and Pletcher (1989) ได้ศึกษาการลดลงของอุณหภูมิของเจ็ตน้ำในอุโมงค์น้ำ โดยใช้ Cold film anemometer ในการวัดอุณหภูมิ ที่อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 1, 4 และ 7 โดยให้ความร้อนกับเจ็ตจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในอุโมงค์น้ำในช่วง 28 ถึง 32 °C พบว่าอุณหภูมิส่วนเกินซึ่งนิยามจาก $\left(T - T_{cf}\right)/\left(T_j - T_{cf}\right)$ สูงสุดบนระนาบสมมาตรแปรตาม $(x/d)^{-0.5}$ ดังรูปที่ 1.15 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ramsey and Goldstein (1970) และ Andreopoulos (1983)

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาการลดลงของ Scalar concentration ตามแนวแกนเจ็ตโดยใช้ $r_{eff}^{2} d$ scale ดังรูปที่ 1.16ก (จากรูป $r = r_{eff}$) พบว่าการลดลงตามแนวแกนเจ็ตสามารถแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ Near field และ Far field โดยมีจุดแบ่งที่ $s/ r_{eff}^{2} d$ = 0.3 และเมื่อใช้ $r_{eff}\, d$ scale ดังรูปที่ 1.16ข พบว่าบริเวณ Near field มีอัตราการลดลงแปรตาม $(s\, r_{eff}\, d)^{-1.3}$ ซึ่งสูงกว่ากรณีของเจ็ตอิสระที่มีอัตราการลดลงแปรตาม $(s/r_{eff}\, d)^{-1}$ ในขณะที่บริเวณ Far field มีอัตราการลดลงแปรตาม $(s/r_{eff}\, d)^{-2/3}$ ซึ่งต่ำกว่าในช่วงแรกและกรณีของเจ็ตอิสระ ผลการทดลองแสดงว่าเจ็ตในกระแสลมขวางมีการผสมที่ดีในช่วง Near field แต่จะมีการผสมลดลงในช่วง Far field ทำให้สรุปได้ว่า CVP ที่มีการพัฒนาตัวเต็มที่ในบริเวณ Far field นั้น ไม่ช่วยเพิ่มการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง ในขณะที่บริเวณ Near field ซึ่งเป็นบริเวณที่ CVP กำลังพัฒนาตัวจะมีการผสมมากกว่า

1.2.2 พัลส์เจ็ตในกระแสลมขวาง (Pulsed Jet In Crossflow, PJICF)

การศึกษาการไหลแบบพัลส์เจ็ตในกระแสลมขวางนั้น ได้มีผู้ศึกษาถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะการไหลและการผสมของพัลส์เจ็ตในกระแสลมขวาง เช่น Eroglu and

Breidenthal (1991) พบว่าการฉีดเจ็ตแบบพัลส์ในกระแสลมขวางช่วยในการเพิ่มระยะ Penetration depth และอัตราการผสมระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง Vermuelen et al. (1990) ศึกษาผลของการใช้ความถี่เสียงในการกระตุ้นเจ็ต (Excited Jet) พบว่ามีผลต่อโครงสร้างของเจ็ตทำให้ระยะ Penetration depth เพิ่มขึ้น และ เจ็ตมีการผสมและการกระจายตัวได้ดีขึ้น Wu et al. (1998) ศึกษาผลของความถี่ในการฉีดเจ็ตต่อโครงสร้างของเจ็ต พบว่าความถี่ในการฉีดเจ็ตมีผลต่อระยะห่างและกำลังของ Vortex ring โดยการฉีดเจ็ตที่ค่าความถี่ต่ำจะมีค่า Penetration depth เพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าของเจ็ตแบบ Steady ที่ค่า Momentum flux ratio เดียวกัน และเมื่อเพิ่มความถี่ในการฉีด จะทำให้ระยะห่างระหว่าง Vortex ring น้อยลง และเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Vortex ring ที่อยู่ข้างเคียงมากขึ้นทำให้ Penetration depth ของเจ็ต ลดลง Johari et al. (1997) ศึกษาผลของระยะเวลาในการฉีดเจ็ต (Injection time) แบบ Pulsed พบว่าระยะระหว่าง Puff มีค่าขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการฉีดเจ็ต ซึ่งมีความสำคัญต่ออัตราการผสม

Hermanson et al. (1998) ศึกษาพัลส์เจ็ตในกระแสลมขวางทำการทดลองโดยใช้เทคนิค Laser Induced Fluorescence (LIF) พบว่า Duty cycle ของการฉีดเจ็ตแบบ Pulsed มีผลต่อโครงสร้างและระยะ Penetration depth ของเจ็ต ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของระยะเวลาในการฉีดเจ็ต (τ), Duty cycle (α), และ ค่าความถี่ในการฉีดเจ็ต (f) ที่มีผลต่อ Penetration depth ดังรูปที่ 1.17ก-ข โดยใช้ค่า Y/Y_{st} เมื่อ Y คือระยะ Penetration depth ของ Pulsed Jet และ Y_{st} คือระยะ Penetration depth ของ Steady Jet ตามสมการ $Y_{st}/rd = 1.54(x/rd)^{0.32}$ จากรูปพบว่า เมื่อทำการฉีดเจ็ตที่ค่าความถี่และค่า Duty cycle คงที่ค่าหนึ่ง ในการฉีดเจ็ตในช่วงระยะเวลาสั้นมีผลให้เจ็ตมีค่า Penetration depth มากกว่าการฉีดเจ็ตในช่วงระยะเวลายาว ในทางกลับกันเมื่อทำการฉีดเจ็ตในช่วงระยะเวลาที่คงที่ค่าหนึ่ง การเพิ่มค่าความถี่หรือค่า Duty cycle ของการฉีดเจ็ตจะมี Penetration depth ลดลง ในรูปที่ 1.18 แสดงการเปรียบเทียบฉีดเจ็ตในรูปแบบต่างๆ คือ การฉีดเจ็ตแบบ Steady (รูป 1.18ก) การฉีดเจ็ตในช่วงระยะเวลายาว (รูป 1.18ข) และการฉีดเจ็ตในช่วงระยะเวลาสั้น (รูป 1.18ค) จะเห็นได้ว่าการฉีดเจ็ตในช่วงระยะเวลาสั้น (Short injection time) ทำให้ลดการเกิดโครงสร้างของ Vortex ring ซึ่งเป็นการลดผลกระทบเนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Vortex ring ที่อยู่ใกล้กัน จึงทำให้ Penetration depth ของเจ็ตเพิ่มขึ้น และการฉีดเจ็ตในช่วงระยะเวลายาว (Long injection time) เจ็ตจะมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน (Puff) ที่แบ่งขอบเขตกันโดยมีช่องว่างระหว่าง Puff เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่า Duty cycle ในการฉีดเจ็ตจะมีผลต่อระยะห่างระหว่าง Puff โดยในการฉีดเจ็ตที่มีค่า Duty cycle สูงจะทำให้ระยะห่างระหว่าง Puff น้อย ส่วนการฉีดเจ็ตที่มีค่า Duty cycle ต่ำจะทำให้ระยะห่างระหว่าง Puff มาก ซึ่งเป็นการลดปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Puff ที่อยู่ใกล้กัน เจ็ตจึงมี Penetration depth เพิ่มขึ้น และยังมีผลของความถี่ในการฉีดเจ็ต โดยการฉีดเจ็ตที่ค่าความถี่สูงจะทำให้ระยะห่างระหว่าง Vortex ring น้อย และเมื่อ

ฉีดเจ็ตด้วยความถี่ต่ำ ระยะห่างระหว่าง Vortex ring จะมากขึ้น ส่งผลให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Vortex ring ที่อยู่ใกล้กันลดลง เจ็ตจึงมีค่า Penetration depth เพิ่มขึ้น

Johari et al. (1999) ศึกษาลักษณะของ Pulsed Jet ใน Crossflow โดยใช้เทคนิค Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) ในการดูลักษณะโครงสร้างของเจ็ต และใช้ผลจากการทำปฏิกิริยาเคมีของสารในการดูผลของการผสม พบว่า การฉีดเจ็ตแบบ Pulsed ทำให้ Penetration depth ของเจ็ตเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการฉีดเจ็ตแบบ Steady ที่ค่า Velocity ratio เดียวกัน และการฉีดเจ็ตด้วยค่า Duty cycle ต่ำจะทำให้ค่า Penetration depth ของเจ็ตเพิ่มขึ้น และยังพบว่าการฉีดเจ็ตในช่วงเวลาสั้น มีผลทำให้เจ็ตมีค่า Penetration depth เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงผลในการทดลองในรูปที่ 1.19ก-ข และ 1.20ก-ค ในเทอมของ Y_{pulsed}/Y_{steady} และนิยามค่า $Y_{steady}/rd = 1.7(x/rd)^{0.25}$ โดยที่มีค่า $r = U_j/U_\infty$ = 5, 10 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Eroglu and Breidenthal (1991) และ Hermanson et al. (1998)

Eroglu and Breidenthal (2001) ศึกษาพัลส์เจ็ตในกระแสลมขวางโดยใช้เทคนิค Laser Induced Fluorescence (LIF) และใช้การทำปฏิกิริยาของสารเคมีในการศึกษาลักษณะการผสม ซึ่งได้ทำการทดลองที่ค่า Velocity ratio ต่ำและสูง และศึกษาผลของความถี่ (f) ที่มีต่อคุณลักษณะการผสม โดยความถี่มีความสัมพันธ์กับ Strouhal number ตามสมการ $St = fd_j/u_j$ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 1.21 พบว่าการฉีดเจ็ตแบบ Steady (รูปที่ 1.21ก) จะต่างจากการฉีดเจ็ตที่ค่า Velocity ratio ต่ำ (r = 2.3) เมื่อฉีดเจ็ตด้วยความถี่ต่ำ St = 0.28 (รูป 1.21ข) อย่างชัดเจน กล่าวคือเจ็ตที่พุ่งออกมาจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะพุ่งลึกเข้าไปใน Crossflow ในขณะที่ส่วนที่สองจะอยู่ในบริเวณใกล้กับผนัง เจ็ตส่วนแรกจะสังเกตเห็นเป็น Vortex ring ชัดเจน ซึ่งพบว่า Vortex ring เกิดการรวมตัวกันที่ระยะ $15d_{jet}$ เจ็ตส่วนที่สองที่อยู่บริเวณใกล้ผนังพบว่าลักษณะของ Vortex ring จะถูกบิดเกิดการเสียรูป เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้นที่ St = 0.42 (รูปที่ 1.21ค) พบว่าเจ็ตในส่วนแรกมีระยะห่างระหว่าง Vortex ring ลดลง ตำแหน่งที่เกิดการรวมตัวของ Vortex ring เลื่อนเข้าใกล้ Upstream มากขึ้น และเจ็ตส่วนที่สองอยู่ติดผนังมากขึ้น เมื่อฉีดเจ็ตด้วยความถี่สูง St = 0.71 (รูปที่ 1.21ง) พบว่าเจ็ตมีระยะ Penetration depth ลดลง เนื่องจาก Vortex ring เข้าใกล้กันมากขึ้น ทำให้มีผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Vortex ring ข้างเคียงมากขึ้น สำหรับผลการทดลองที่ค่า Velocity ratio สูง แสดงไว้ในรูปที่ 1.22ก-ง พบว่าการไหลมีโครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้นกว่าที่ค่า Velocity ratio ต่ำ และมีผลของความถี่ในการฉีดเจ็ตในลักษณะเดียวกัน คือการฉีดเจ็ตด้วยความถี่ต่ำ จะทำให้มีค่า Penetration depth เพิ่มขึ้น เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเจ็ตจะมีระยะห่างระหว่าง Vortex ring น้อยลง ทำให้มีผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Vortex ring ที่อยู่ใกล้กันมากขึ้น ดังนี้จะเห็นว่าความถี่ในการฉีดเจ็ตมีผลต่อ ระยะห่าง และ กำลังของ Vortex ring รวมถึงระยะ Penetration depth ของเจ็ต ซึ่งในการฉีดเจ็ตด้วยความถี่ที่เหมาะสม จะทำให้ค่า Penetration depth เพิ่มขึ้น 70% และในการศึกษาการผสมจากปฏิกิริยาเคมี พบว่าสำหรับค่า

Velocity ratio สูง (r = 4.4) การฉีดเจ็ตด้วยความถี่ที่เหมาะสม จะทำให้ความยาวในการทำปฏิกิริยาของเจ็ต (Reaction length or Flame length) ลดลง 50% ซึ่งบ่งบอกถึงอัตราการผสมที่เพิ่มขึ้นของเจ็ต จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าในการฉีดเจ็ตแบบพัลส์ในกระแสลมขวางจะมีผลทำให้เจ็ตมีการผสมที่ดีขึ้น ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับการฉีดอากาศเข้าผสมกับเชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ หรือการฉีดผสมของสารเคมี และเนื่องจากแนวทางในการออกแบบหัวฉีดของ Burner ในอนาคต แนวทางหนึ่งเพื่อลดมลพิษคือ การออกแบบ Burner แบบ Stage Combustion ซึ่งจะช่วยลดอุณหภูมิในการเผาไหม้ลง และส่งผลให้ลดการเกิดสารมลพิษ NO_x (NO_x จะเกิดขึ้นมากในการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง) ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงคุณลักษณะการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์เข้าผสมตามแนวเส้นรอบวง เพื่อดูผลของความถี่และ Duty cycle ของการฉีดเจ็ตทุติยภูมิ

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาคุณลักษณะการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบคงตัวและแบบพัลส์เข้าผสมตามแนวเส้นรอบวง และศึกษาผลของพารามิเตอร์ในการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์ซึ่งแสดงในรูปของ ความถี่ และ Duty cycle รวมถึงกรณีของเจ็ตปฐมภูมิที่ไม่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิ (เจ็ตอิสระ)

1.4 แนวทางการทำวิจัย

ในช่วงต้นของการศึกษาได้ทำการศึกษาเบื้องต้นดังแสดงในภาคผนวก ก เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของงานวิจัย พารามิเตอร์ที่เหมาะสมและข้อบกพร่องต่างๆ ที่อาจมีผลต่อการทดลอง และนำผลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบชุดทดลอง เช่น การออกแบบขนาดสเกล และการปรับสภาวะของการไหลที่เหมาะสม รวมทั้งยังช่วยในการออกแบบการทดลอง เช่น การกำหนดช่วงพารามิเตอร์และขอบเขตในการทดลองที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองศึกษาคุณลักษณะการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์ โดยการแสดงผลของคุณลักษณะของการผสมด้วยการทำปฏิกิริยาเคมีของสารละลายกรด-เบส และมีตัวบ่งชี้การเกิดปฏิกิริยา (pH Indicator) สารละลายกรดที่ใช้คือสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) สารละลายเบสที่ใช้คือสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) และสารละลายที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้การเกิดปฏิกิริยาคือสาระลายฟีนอล์ฟทาลีน ($C_{20}H_{14}O_4$) เนื่องจากสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนมีคุณสมบัติ เมื่อผสมในสารละลายกรดจะได้สารละลายใสไม่มีสี (Colorless) และเมื่อผสมกับสารละลายเบสจะได้สารละลายสีชมพูแดง (Magenta)

การแสดงผลการทดลองใช้วิธีการถ่ายภาพจากกล้องวีดีโอ ซึ่งรูปภาพจะบอกถึงระดับความเข้มของแสง (Intensity) ที่ผ่านการดูดซับจากสีชมพูแดง ซึ่งสามารถบอกถึง บริเวณที่ยังมีการผสมไม่สมบูรณ์ตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด การพัฒนาตัวของเจ็ตตามแนวการไหล และระยะในการผสมของการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Length or Flame Length) เนื่องจากงานวิจัยนี้คำนึงถึงลักษณะการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบคงที่และแบบพัลส์เข้าผสมตามแนวเส้นรอบวง ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อคุณลักษณะการผสมประกอบด้วย อัตราส่วนความหนาแน่น (r_ρ) ระหว่างเจ็ตและกระแสน้ำตาม อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r_{eff}) อัตราส่วนการผสมโดยมวล (Stoichiometric Ratio, SR) ระหว่างเจ็ตและกระแสน้ำตาม อัตราส่วนของอัตราการไหลโดยมวลระหว่างเจ็ตปฐมภูมิและเจ็ตทุติยภูมิ ($r_{\dot{m}}$) เรย์โนนัมเบอร์ของเจ็ตปฐมภูมิ (Re_J)เรย์โนนัมเบอร์ของเจ็ตทุติยภูมิ (Re_j) เรย์โนนัมเบอร์ของเจ็ตรวมสุทธิ (Re_{Jj})เรย์โนนัมเบอร์ของกระแสน้ำตาม (Re_{cf}) รวมถึงค่าความถี่ และ Duty cycle ในการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์

การศึกษาคุณลักษณะการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิตามแนวเส้นรอบวง มีการกำหนดให้พารามิเตอร์ของการทดลองมีค่าคงที่คือ อัตราส่วนความหนาแน่น ($r_\rho = \rho_{Jj} / \rho_{cf}$) มีค่าคงที่ประมาณ 1.0 อัตราส่วนอัตราการไหลโดยมวล ($r_{\dot{m}}$) มีค่าคงที่ประมาณ 5.4 ซึ่งนิยามโดย

$$r_{\dot{m}} = \frac{\dot{m}_J}{\dot{m}_j} \tag{1.7}$$

โดยที่ $\dot{m}_J$ คืออัตราการไหลโดยมวลของเจ็ตปฐมภูมิ

$\dot{m}_j$ คืออัตราการไหลโดยมวลของเจ็ตทุติยภูมิ

สำหรับการแสดงคุณลักษณะการผสมด้วยปฏิกิริยาเคมีนั้น ได้กำหนดค่าอัตราส่วนการผสมโดยมวล (Stoichiometric Ratio, SR) ระหว่างเจ็ตและกระแสน้ำตาม มีค่าคงที่ประมาณ 1.0 ทุกกรณีการทดลอง ซึ่งนิยามโดย

$$SR = \frac{\dot{m}_{Jj}}{\dot{m}_{cf,e}} \tag{1.8}$$

โดยที่ $\dot{m}_{Jj}$ คืออัตราการไหลโดยมวลรวมของเจ็ตปฐมภูมิและเจ็ตทุติยภูมิ

$\dot{m}_{cf,e}$ คืออัตราการไหลโดยมวลของกระแสน้ำตามที่ถูกเจ็ตดึงเข้าผสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาถึงผลของความถี่และ Duty Cycle ในการฉีดเจ็ตทุติยภูมิ ค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงการกระตุ้นเจ็ตปฐมภูมิด้วยการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์คือค่าความถี่ (f) และ Duty Cycle (α) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\alpha = f * \tau \tag{1.9}$$

โดยที่ τ คือช่วงระยะเวลาในการฉีดเจ็ต

สำหรับการศึกษาคุณลักษณะการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบคงตัวและแบบพัลส์เข้าผสมตามแนวเส้นรอบวง รวมถึงเจ็ตปฐมภูมิที่ไม่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิ (เจ็ตอิสระ) ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองที่อัตราส่วนความหนาแน่น ($r_\rho = \rho_{Jj} / \rho_{cf}$) มีค่าคงที่ประมาณ 1.0 อัตราส่วนอัตราการไหลโดยมวล ($r_{\dot{m}}$) คงที่ประมาณ 5.4 เรย์โนนัมเบอร์ของเจ็ตปฐมภูมิในกรณีที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิเท่ากับ 5,600 เรย์โนนัมเบอร์ของเจ็ตปฐมภูมิในกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิเท่ากับ 6,800 และเรย์โนนัมเบอร์ของเจ็ตรวมสุทธิเท่ากับ 6,800 และในงานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของความถี่และ Duty Cycle ในการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์ ซึ่งได้ทำการทดลองที่ค่าความถี่เท่ากับ 1 และ 5 *Hz* และค่า Duty Cycle เท่ากับ 25, 50, 75 และ 100% (Duty cycle = 100% คือการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบคงตัว) ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับกรณีเจ็ตปฐมภูมิที่ไม่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิเข้าผสม ซึ่งเป็นการไหลแบบเจ็ตอิสระ

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ในเชิงวิชาการ

เพื่อขยายความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณลักษณะการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบคงตัวและแบบพัลส์เข้าผสมตามแนวเส้นรอบวง รวมถึงผลของความถี่และ Duty cycle ในการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์ และจะเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ในเชิงประยุกต์

เพื่อนำความรู้ความเข้าใจนี้ไปเป็นแนวทางในการพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในหัวฉีดของ Burner หรือในการผสมสารเคมีของหัวฉีดผสมสารเคมี และอาจนำไปใช้เป็นแนวทางในการควบคุมการไหล (Flow Control) ในแบบต่างๆ