บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การไหลแบบเจ็ตในกระแสลมขวางเป็นการไหลพื้นฐานที่พบได้ทั่วไปในอุปกรณ์ต่าง ๆ ทางวิศวกรรม เช่น ใน Combustor, Mixing chamber ซึ่งใช้ในการฉีดเชื้อเพลิงเข้าผสมกับอากาศในกระบวนการเผาไหม้, ใน Gas Turbine ซึ่งใช้ในการระบายความร้อนออกจากใบพัด และในเครื่องบินแบบ V/STOL (Vertical Short Take Off and Landing) (ใช้ในช่วงที่มีการขึ้นลงในแนวดิ่ง) เหตุผลหนึ่งที่มีผู้สนใจศึกษาวิจัยเรื่องเจ็ตในกระแสลมขวางมากก็เนื่องจากการไหลลักษณะนี้มีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ในการผสมของไหลสองชนิด เช่นและโดยเฉพาะ อากาศกับเชื้อเพลิง, สารเคมี ฯลฯ

ในบางกรณีการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง ลักษณะของกระแสลมขวางอาจเป็นการไหลในพื้นที่จำกัด (Confined) เช่นการไหลในท่อ (Pipe Flow) หรือ การไหลในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง (Swirling Pipe Flow) ซึ่งลักษณะการไหลแบบนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปผสมกับอากาศสำหรับกระบวนการเผาไหม้ ใน Combustor และในการผสมสารเคมี เป็นต้น เนื่องจากความสำคัญของการผสมต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ จะส่งผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานและการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม งานวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นที่การศึกษาคุณลักษณะการผสมในการไหลแบบ เจ็ตที่ฉีดตั้งฉากเข้าไปในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง (Jet In Swirling Pipe Flow, JISPF)

ในขั้นพื้นฐานการไหลแบบเจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง ประกอบด้วยคุณลักษณะต่างๆของ เจ็ต (Jet), เจ็ตในกระแสลมขวาง (Jet In Crossflow, JICF), เจ็ตในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีพื้นที่จำกัด (JICCF) และการไหลในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง (Swirling Pipe Flow, SPF)

สำหรับการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF) นั้นได้มีการศึกษาคุณลักษณะต่างๆของการไหล 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)

สำหรับการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีพื้นที่จำกัด (JICCF) นั้น ได้มีการศึกษาหาคุณลักษณะต่างๆ ในหลายแง่มุมเช่น การดึงกระแสลมขวางเข้าไปผสม (Entrainment) ในเจ็ต เช่น Kroll et al. (2000) ผลของ Velocity ratio (อัตราส่วนความเร็วของเจ็ตต่อความเร็วของกระแสลมขวาง) ต่อเส้นทางการไหลของเจ็ต เช่น Stoy and Ben-Haim (1973) ผลของสภาวะที่ไม่คงตัว (Unsteadiness) เช่น Raud et al. (1999) ตลอดจนอัตราการลดลงของความเร็วในแนวแกนของเจ็ต เช่น Ahmed et al. (1985) และลักษณะของการฉีดเจ็ต เช่น Kroll et al. (2000)

นอกจากนี้ยังมีผู้ศึกษาลักษณะการไหลในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง (SPF) ในแง่ของคุณสมบัติต่างๆของการไหล เช่น Anwer and So (1989) หรืออัตราการสลายตัวของการไหลในสามทิศทาง (ความเร็วในแนวแกน ความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับเส้นรอบวง และความเร็วในแนวรัศมีท่อ) เช่น Weske and Sturov (1974) ผลของ Swirl ของ Co-flow ต่ออัตราการผสมและการสลายตัวของ เจ็ต เช่น Ahmed et al. (1985)

สำหรับการไหลแบบเจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควงนั้น ประกอบไปด้วยผลของการฉีดเจ็ตเข้าไปในกระแสลมขวางแบบตั้งฉาก ผลของพื้นที่ที่จำกัดของกระแสลมขวาง และผลของการไหลแบบหมุนควงของกระแสลมขวาง ซึ่งล้วนมีแนวโน้มที่จะทำให้ลักษณะการกระจายตัวตลอดจนลักษณะการผสมกันระหว่าง Jet fluid และ Crossflow fluid ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามยังมีผู้ศึกษาเรื่องเจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควงน้อย และที่น้อยไปกว่าคือ การศึกษาในแง่มุมของผลขององค์ประกอบของการฉีดเจ็ต เช่น ตำแหน่ง มุม และจำนวนเจ็ตเข้าไปในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควงต่อการผสม ซึ่งลักษณะการไหลและลักษณะการฉีดเจ็ตแบบต่างๆนี้ จะมีคุณสมบัติการไหลที่น่าสนใจ และจากความรู้ความเข้าใจและข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยในหัวข้อนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อการหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมและการเผาไหม้ ดังนี้จึงเป็นที่มาของงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.2 งานวิจัยในอดีต

ในขั้นพื้นฐานของการไหลแบบเจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง (Jet In Swirling Pipe Flow, JISPF) ประกอบด้วยคุณลักษณะต่างๆของเจ็ต (Jet), เจ็ตในกระแสลมขวาง (Jet In Crossflow, JICF), เจ็ตในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีพื้นที่จำกัด (JICCF) และการไหลในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง (Swirling Pipe Flow, SPF) มีผลงานในอดีตโดยสังเขป ดังนี้

1.2.1 เจ็ต (Jet)

Rajaratnam (1976) ได้แบ่งลักษณะของเจ็ตอิสระ (Free jet) ออกเป็น 3 บริเวณดังรูปที่ 1.1 ได้แก่ 1) บริเวณ Potential core ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วสม่ำเสมอ ยังไม่ได้รับผลของ

Shear layer ที่ปากเจ็ต 2) บริเวณ Flow development ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการพัฒนาของ Shear layer ที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ต และบรรยากาศ โดยบริเวณนี้ครอบคลุมจากบริเวณปากเจ็ตถึงบริเวณปลายของ Potential core และ 3) บริเวณ Fully developed flow ซึ่งเป็นบริเวณที่มีคุณสมบัติ Similarity ดังผลการทดลองของ Corrsin (1946), Hinze and Zijnen (1949), Albertson et al. (1950) และ Abramovich (1963) จากการวิเคราะห์โดยการใช้คุณสมบัติ Similarity ดังกล่าว Townsend (1956) และ Tennekes and Lumley (1972) พบว่าการขยายตัว (Spread rate) ของ Turbulent jet ซึ่งแสดงโดยความหนาของเจ็ตแปรตามระยะทางตามแนวแกนเจ็ต และความเร็วในแนวแกนของเจ็ตแปรผกผันกับระยะทางตามแนวแกนเจ็ตอีกด้วย

การผสม (Entrainment) ของเจ็ต

กรณีการดึงอากาศภายนอกเข้ามาผสมของเจ็ต (Entrainment) นั้น 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

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)), การขยายตัวของเจ็ต (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 1.2 ได้แก่ 1) บริเวณ Potential core ซึ่งเป็นบริเวณกึ่งกลางของ Shear layer ของเจ็ตในช่วงต้น ซึ่งมีค่าความดันรวมสม่ำเสมอ 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 1.3 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 1.4 (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) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เป็นกลไกสำคัญในการผสมโดยเฉพาะในบริเวณ 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 1.3 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 และผลการทดลองแสดงในรูปที่1.5 (จากรูป $\alpha = r_u$) รวมทั้งยังแสดงผลของ Trajectory ตามแนวแกนของเจ็ต (ξ) (แนวแกนของเจ็ต (ξ) นิยามเป็น จุดภายในเจ็ตที่มีความเร็วสูงสุด) ดังรูปที่ 1.6

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 1.7 โดยเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิ นิยามเป็นตำแหน่งของจุดที่มีความเร็วและอุณหภูมิสูงที่สุดบนระนาบสมมาตรตามลำดับ พบว่า ที่อัตราส่วนโมเมนตัมเดียวกัน เส้นทางของอุณหภูมิอยู่ต่ำกว่าเส้นทางของความเร็ว และยังพบว่า อัตราส่วนโมเมนตัมเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและส่งผลต่อเส้นทางของความเร็วและ

อุณหภูมิ 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 1.8 (จากรูป $r = r_{eff}$) พบว่าเส้นทางของ Scalar concentration ซึ่งนิยามจากตำแหน่งของจุดที่มี Concentration มากที่สุดบนระนาบสมมาตร 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 โดยปากเจ็ตอยู่สูงจากระดับ

พื้น 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 นอกจากนี้ยังมีผู้ศึกษาเส้นทางของเจ็ตในกระแสลมขวางในกรณีที่มีเจ็ตมากกว่าหนึ่งตัวอีก เช่น 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) ของปริมาณต่างๆตามแนวแกนเจ็ตไม่ว่าจะเป็นความเร็ว, อุณหภูมิ และ Scalar concentration ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ มีความเชื่อมโยงกับการผสม

Pratte and Baines (1967) พบความสัมพันธ์ของความหนาของเจ็ตในแนว Spanwise (Δz) ในพิกัด Cartesian ดังรูปที่ 1.9 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 1.10 โดยทดลองถึงระยะตามแนวแกนเจ็ต (ξ) ประมาณ 70 ξ/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 โดยให้

ความร้อนกับเจ็ตจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในอุโมงค์น้ำในช่วง 28 ถึง 32 °C พบว่าอุณหภูมิส่วนเกินซึ่งนิยามจาก $(T - T_{cf})/(T_j - T_{cf})$ สูงสุดบนระนาบสมมาตรแปรตาม $(x/d)^{-0.5}$ ดังรูปที่ 1.11 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ramsey and Goldstein (1970) และ Andreopoulos (1983)

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาการลดลงของ Scalar concentration ตามแนวแกนเจ็ตโดยใช้ $r_{eff}^2 d$ scale ดังรูปที่ 1.12ก (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 1.12ข 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

1.2.3 เจ็ตในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีพื้นที่จำกัด (JICCF)

เส้นทาง (Trajectory) ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีพื้นที่จำกัด

Stoy and Ben-Haim, (1973) ศึกษาเส้นทางของเจ็ตในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีพื้นที่จำกัด (JICCF) โดยการวิเคราะห์จากสมการและทำการทดลองใน Channel Flow ขนาดกว้าง 6 นิ้ว สูง 1.5 นิ้ว Profile ที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ Fully developed turbulent flow และพบความสัมพันธ์ของ Trajectory ในบริเวณ near field ดังรูปที่ 1.13 และสมการ จุดตัด (Impingement Point) (วิเคราะห์โดยใช้จุดตัดระหว่างเส้นทางของเจ็ตกับผนังด้านบน) คือ $x/d_{j0} = 19.6\,(V_c / V_j)^{1.82}$ สำหรับ $0.13 < V_c / V_j < 0.40$ ดังรูปที่ 1.14 (x คือแกนพิกัดจากเจ็ตไปทาง Downstream, z คือ แกนพิกัดตามความสูงของ channel, d_{j0} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต, L คือความกว้างของ Channel, V_j คือ ความเร็วที่กึ่งกลางปากทางออกของเจ็ต และ V_c คือ Bulk velocity ของกระแสลมขวาง)

Leong et al.(1995) ศึกษาเส้นทางของเจ็ตในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีพื้นที่จำกัด (JICCF) โดยการฉีดเจ็ตเข้าไปในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 80 มิลลิเมตร สำหรับกรณีที่เจ็ตมีจำนวนมากกว่าหนึ่งตัว ตามแนวเส้น รอบวง ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 2.5 และอัตราส่วนโมเมนตัมเท่ากับ 57 พบว่าเมื่อจำนวนเจ็ตมากขึ้น ระยะการเจาะทะลุจะลดลง และระยะการเจาะทะลุที่ทำให้เกิดการผสมที่ดีที่สุดคือครึ่งหนึ่งของรัศมี

สำหรับกรณีอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง Raud et al., (1999) ทดลองโดยการฉีดเจ็ตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 14 มิลลิเมตร เข้าไปในกระแสลมที่มีหน้าตัดเป็นรูปขวางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 60 × 60 มิลลิเมตร พบว่าผลจากความไม่มีเสถียรภาพ (Unsteady) ของกระแสลมขวางจะทำให้เส้นทางของเจ็ตมีการเปลี่ยนแปลง โดยถ้ากระแสลมขวางถูกเร่งความเร็วขึ้นจะทำให้เส้นทางของเจ็ตเอียงไปในทาง Downstream มากขึ้น ในทางกลับกัน ถ้ากระแสลมขวางถูกหน่วงความเร็ว จะทำให้เส้นทางของเจ็ตเอียงไปในทาง Downstream น้อยลง Holdeman et al. (1973) และ Holdeman (1993) ทดลองโดยการฉีดเจ็ตเข้าไปในกระแสลมที่มีหน้าตัดเป็นรูปขวางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่าระยะการเจาะทะลุและรูปร่างตาม Centerplane จะมีลักษณะคล้ายๆกันเมื่อระยะห่างระหว่าง Orifice แปรผกผันกับรากที่สองของอัตราส่วนโมเมนตัมสำหรับกรณีที่ Orifice เป็นรูปสี่เหลี่ยม

การผสม (Entrainment) ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีพื้นที่จำกัด (JICCF)

กรณีการผสม (Entrainment) ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีพื้นที่จำกัด (JICCF) ก็มีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีของเจ็ตในกระแสลมขวางแต่มีผลของพื้นที่และ Configuration ต่างๆที่สามารถปรับเปลี่ยนได้เข้ามาเกี่ยวข้อง Raud et al., (1999) พบว่าเมื่อของไหลในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีพื้นที่จำกัด (Confined Crossflow) ถูกเร่ง/หน่วงความเร็วจะทำให้เส้นทางของเจ็ตสั้นและจะทำให้การผสมดีขึ้น Kroll et al. (2000), Holdeman et al (1996) พบว่าการผสมไม่เป็นฟังก์ชันของจำนวน Orifice, อัตราส่วนตามยาวต่อความกว้างของ Orifice (Aspect ratio) และมุมการฉีดของ Orifice แต่การผสมที่ดีจะขึ้นกับ Momentum Flux Ratio ควบคู่กับจำนวน Orifice ที่เหมาะสม

1.2.4 การไหลแบบหมุนควงในท่อ (SPF)

การศึกษาคุณลักษณะของการไหลแบบหมุนควง

Anwer and So, (1989) ทำการทดลองหาผลการไหลแบบหมุนควงที่สมมาตรตามแนวแกนในท่อตรง โดยใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) ในการสร้างการไหลแบบหมุนควงซึ่งมีลักษณะเป็น Solid Body Rotation พบว่า Circumferential Shear Strain ที่สูงขึ้นในชั้น Viscous Layer อันเนื่องมาจากการหมุนมีผลทำให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพของการไหล ซึ่งทำให้มีการเพิ่มความเป็น Turbulence ของการไหลตลอดหน้าตัดท่อ Weske and Sturov (1974) ศึกษาผลของการไหลแบบหมุนควงต่อคุณสมบัติของ Turbulence โดยใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) ในการสร้างการหมุนควง พบว่าระยะที่ใช้ในการสลายตัวของปริมาณของ Turbulence มีค่าประมาณ 100 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

อย่างไรก็ตามส่วนมากการศึกษาการไหลแบบ Swirling Pipe Flow ส่วนใหญ่นั้นเป็นการศึกษาการไหลที่มีความสมมาตรตามแนวแกน กล่าวคือทั้งความดันและความเร็วของการไหลมีความสมมาตรตามแนวแกนท่อ ในทางตรงกันข้ามการไหลแบบเจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง (JISPF) นั้นจะพบว่าเมื่อการไหลแบบหมุนควงในท่อที่มีความสมมาตรตามแนวแกนไหลผ่านเจ็ต จะสูญเสียความสมมาตรทั้งความเร็วและความดันไป โดยจะเกิดเป็นบริเวณ Wake ที่มีความเร็วและความดันต่ำหลังเจ็ต ในแง่นี้ Kobkanjanakorn and Bunyajitradulya, (1998) ได้ศึกษาการไหลแบบหมุนควงที่ไม่สมมาตรตามแนวแกน พบว่าการสลายตัวของความไม่สม่ำเสมอของความดันรอบท่อมีลักษณะประมาณเป็นฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลกับระยะทางการไหล และความไม่สม่ำเสมอของความดันจะมีค่าลดลงเป็น 5 % ของความดันจลน์ที่ระยะประมาณ $30D$ โดยที่ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ

1.2.5 เจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง

เจ็ตมีทิศทางเดียวกับของไหล (Jet in Confined Swirling Co-Flow, JICSCF)

สำหรับในกรณีการผสมของเจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง โดยเจ็ตและของไหลมีทิศทางเดียวกัน (JICSCF) Ahmed et al., (1985) พบว่า Swirl ของ Co-flow มีผลทำให้ เจ็ตมีการกระจายตัว (Spread rate) และมีการสลายตัว (Decay rate) ของความเร็วสูง อันมีสาเหตุมาจากแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการไหลแบบหมุนควง So et al., (1984,1985) พบว่าเจ็ตมีการกระจายตัวอย่างรวดเร็วและสลายตัวที่ระยะประมาณ $30d$ โดยที่ d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเจ็ต

เจ็ตมีทิศตั้งฉาก (Lateral Jets) กับของไหล (Jet in Swirling Pipe Flow, JISPF)

Sharif and Busnaina (1989) ศึกษาผลของการฉีดเจ็ตเข้าไปในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควงโดยการคำนวณและเปรียบเทียบกับการทดลองของ Sander and Lilley (1983), Ferrell and Lilley (1985) และ Ong and Lilley (1986) ที่อัตราส่วนความเร็ว (u_f/u_{cf}) เท่ากับ 2, 4 และ 6 ในการทำให้เกิดการหมุนควงใช้ Guide Vane มุม 0, 45 และ 70 องศา พบว่าระยะการเจาะทะลุตามแนวแกน แนวรัศมีและการเอียงไปตามเส้นรอบวงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็วของเจ็ตกับการไหลแบบหมุนควง โดยเจ็ตจะเอียงไปตามเส้นรอบวงมากขึ้นเมื่อค่าการหมุนควงมากขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการศึกษาถึงลักษณะการผสมของเจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง โดยเจ็ตมีทิศทางการฉีดแบบตั้งฉากกับของไหลที่มีการหมุนควง (Jet In Swirling Pipe Flow, (JISPF)) นั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก โดยงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนมากจะมี

ลักษณะเป็น JICSCF หรือถ้ามีลักษณะเป็น JISPF ก็จะมีการฉีดเจ็ตเพียงแถวเดียว กอปรกับแนวทางการออกแบบห้องเผาไหม้ยุคใหม่ เพื่อให้มีมลพิษน้อย แนวทางหนึ่ง คือการออกแบบห้องเผาไหม้ให้เป็นแบบ Staged Combustor ซึ่งจะต้องมีการฉีดอากาศหรือเชื้อเพลิงเพิ่มเป็นช่วงตามแนวทิศทางการไหล เพื่อลดอุณหภูมิการเผาไหม้ลง อันเป็นการป้องกันการเกิด NO_x ซึ่งเป็นก๊าซมลพิษ (NO_xจะเกิดขึ้นมากในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง) ดังนี้ ประเภทของห้องเผาไหม้ที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ เช่น Rich-burn/Quick-mix/Lean-burn (RQL) Staged Combustor จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการออกแบบห้องเผาไหม้ในอนาคต ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จะศึกษาถึงลักษณะการผสมของ JISPF เพื่อดูผลของจำนวนเจ็ต (เจ็ตหนึ่งตัวและสองตัว) ผลของระยะห่างระหว่างเจ็ตตัวที่หนึ่งและตัวที่สอง และผลของการหมุนควงของกระแสลมขวางที่มีต่อการผสม ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ น่าจะเป็นประโยชน์ทางด้านวิชาการในแง่การเพิ่มความรู้ความเข้าใจของผลขององค์ประกอบต่างๆ (จำนวนเจ็ต ระยะห่างระหว่างเจ็ต และการหมุนควงของกระแสลมขวาง) ต่อการผสม และเป็นประโยชน์ในด้านการประยุกต์การออกแบบห้องเผาไหม้ ท่อผสมสารเคมี ฯลฯ

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

จากการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นว่า การศึกษาเกี่ยวกับการไหลแบบเจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควงน้อย และที่น้อยไปกว่า คือ การศึกษาในแง่มุมของผลขององค์ประกอบของการฉีดเจ็ต เช่น จำนวน มุม และ ตำแหน่ง เข้าไปในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควงต่อการผสม ซึ่งลักษณะการไหลและลักษณะการฉีดเจ็ตแบบต่างๆนี้ จะมีคุณสมบัติการไหลที่น่าสนใจ โดยจากความรู้ความเข้าใจและข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยในหัวข้อนี้ น่าจะเป็นประโยชน์ต่อการหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมและการเผาไหม้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของจำนวนเจ็ต (หนึ่งตัวและสองตัว), ผลของการวางตำแหน่งของเจ็ตตัวที่สองแบบเรียงแถว และผลของการหมุนควงต่อคุณลักษณะการผสมของเจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะการผสมของการไหลแบบเจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง โดยจะพิจารณาจากปริมาณบ่งชี้ต่างๆคือ การกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นหน้าตัด อัตราการลดลงของอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละหน้าตัด (Decay rate) อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่ำสุดในแต่ละหน้าตัด (Increase rate) อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัด (Average increase rate) และเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด (Trajectory) ของเจ็ตตามแนวแกนการไหล

1.4 แนวทางการทำวิจัย

ในช่วงต้นของการศึกษาได้ทำการศึกษาเบื้องต้นดังแสดงในภาคผนวก ก เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของงานวิจัย พารามิเตอร์ที่เหมาะสมและข้อบกพร่องต่างๆที่อาจมีผลต่อการทดลอง

และนำผลที่ได้ไปใช้ช่วยในการออกแบบชุดทดลอง เช่น การออกแบบขนาดสเกล และการปรับสภาวะของการไหลที่เหมาะสม รวมทั้งยังช่วยในการออกแบบการทดลอง เช่น การกำหนดช่วงของพารามิเตอร์และขอบเขตในการทดลองที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยให้ความร้อนกับเจ็ตอากาศจนมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าอุณหภูมิของกระแสลมขวางประมาณ 60 องศาเซลเซียส และวัดอุณหภูมิเป็นหน้าตัดตามแนว Downstream (x) โดยใช้ Thermocouple เป็นเครื่องมือวัด ทั้งนี้เพื่อศึกษาคุณลักษณะการผสมเฉพาะหน้าตัด (Local characteristic) ได้แก่ การกระจายตัวของอุณหภูมิและการพัฒนาตัวของเจ็ตตามแนวการไหล รวมถึงคุณลักษณะการผสมโดยรวม (Global characteristic) อันได้แก่ อัตราการลดลงของอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละหน้าตัด (Decay rate) อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่ำสุดในแต่ละหน้าตัด (Increase rate) อัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของอุณหภูมิในแต่ละหน้าตัด (Average increase rate) และเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด (Trajectory) ของเจ็ตตามแนวแกนการไหล และเนื่องจากในการศึกษาวิจัยนี้จะมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเจ็ตอากาศและกระแสลมขวาง ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นของเจ็ตอากาศมีค่าไม่เท่ากับความหนาแน่นของกระแสลมขวาง ดังนั้นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะดังกล่าวของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย อัตราส่วนความหนาแน่น (r_ρ) จำนวนเจ็ต (n) อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r_{eff}) อัตราส่วนโดยมวล ($r_{\dot{m}}$) Swirl number (Sn) ระยะห่างระหว่างเจ็ต (S) เรย์โนนัมเบอร์เจ็ต (Re_j) เรย์โนนัมเบอร์กระแสลมขวาง (Re_{cf}) (การคำนวณค่า Parameter ต่างๆในการทดลองแสดงในภาคผนวก ข และแสดงค่าในตาราง ข1) และ Densimetric Froude number (Fr)

ในการศึกษาการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีการไหลแบบหมุนควงนั้น พารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการไหลลักษณะนี้คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r_{eff}) ซึ่งนิยามเป็นรากที่สองของอัตราส่วนระหว่างโมเมนตัมของเจ็ตต่อโมเมนตัมของกระแสลมขวางดังสมการ

$$r_{eff} = \left(\frac{\rho_j \overline{u_j}^2}{\rho_{cf} (\overline{u_{cf}}^2 + w_R^2)} \right)^{1/2} \qquad (1.7)$$

เมื่อ $\overline{u_j}$ คือความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-average) ในแนวแกนของเจ็ต

$\overline{u_{cf}}$ คือความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-average) ในแนวแกนของกระแสลมขวาง

w_R คือความเร็วในแนวสัมผัสของกระแสลมขวางที่ขอบท่อที่ได้มาจากการ fit curve ของความเร็วในแนวสัมผัสมาที่ขอบท่อ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ρ_j คือค่าความหนาแน่นของเจ็ตอากาศ

ρ_{cf} คือค่าความหนาแน่นของกระแสลมขวาง

สำหรับการศึกษาส่วนใหญ่ในอดีตที่มีอุณหภูมิของเจ็ตอากาศและกระแสขวางเท่ากันนั้น ($\rho_j = \rho_{cf}$) ค่า r_{eff} ในสมการที่ 1.7 จะลดรูปลงเป็น $\left(\frac{\overline{u_j}^2}{(\overline{u_{cf}}^2 + w_R^2)} \right)^{1/2}$ ซึ่งก็คืออัตราส่วนความเร็ว (r_{eff}) นอกจากนี้สำหรับในกรณีที่กระแสลมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควง ($w_R = 0$) r_{eff}จะมีค่าเท่ากับ r_u นั่นเอง

ในการศึกษานี้ได้กำหนดให้คงที่คือ อัตราส่วนความหนาแน่น ($r_\rho = \rho_j / \rho_{cf}$) ประมาณ 0.83 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r_{eff}) ประมาณ 6.0 และอัตราส่วนโดยมวลของกระแสลมขวางต่อเจ็ต ($r_{\dot{m}}$) นิยามโดย

$$r_{\dot{m}} = \frac{\dot{m}_{cf}}{\dot{m}_j} \tag{1.8}$$

เมื่อ $\dot{m}_{cf}$ คืออัตราการไหลโดยมวลของกระแสลมขวาง

$\dot{m}_j$ คืออัตราการไหลโดยมวลรวมของเจ็ต

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยมวลคงที่คือ 2.55

สำหรับในการศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะการผสมข้างต้น พารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงระดับของการหมุนควงได้มีผู้นิยามในหลายลักษณะ ที่นิยมใช้คือค่า Swirl Number (Sn) ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนของฟลักซ์ตามแนวแกนเจ็ตของโมเมนตัมเชิงมุม (Axial flux of angular momentum, G_θ) ต่อผลคูณของรัศมีท่อซึ่งเป็น Length Scale ของการไหลกับฟลักซ์ตามแนวแกนของโมเมนตัมเชิงเส้นตามแนวแกน (Axial flux of axial momentum, G_x) ดังสมการที่ 1.9

$$Sn = \frac{\int_0^R uwr^2 dr}{R\int_0^R u^2 r dr} = \frac{G_\theta}{RG_x} \tag{1.9}$$

เมื่อ u คือความเร็วในแนวแกนของกระแสลมขวางที่ตำแหน่งรัศมี

w คือความเร็วในแนวสัมผัสของกระแสลมขวางที่ตำแหน่งรัศมี

R คือรัศมีของท่อ

นอกจากนี้ยังมีการแสดงระดับการหมุนควงในอีกลักษณะหนึ่ง คือแสดงโดยค่า Swirl ratio (Sr) โดยนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสของกระแสลมขวางที่ขอบท่อที่ได้มาจากการ fit curve ของความเร็วในแนวสัมผัสมาที่ขอบท่อกับความเร็วเฉลี่ยในแนวแกนของกระแสลมขวาง โดยสำหรับกรณีของท่อหมุนในงานวิจัยนี้ ความเร็วในแนวสัมผัสของกระแสลมขวางที่ขอบท่อ (w_R) หาโดยการ fit curve ของความเร็วในแนวสัมผัสมาที่ขอบท่อ ดังนั้นค่า Swirl ratio (Sr) จึงแสดงดังสมการ

$$Sr = \frac{w_R}{\overline{u_{cf}}} \tag{1.10}$$

เมื่อ w_R คือความเร็วในแนวสัมผัสของกระแสลมขวางที่ขอบท่อที่ได้มาจากการ fit curve ของความเร็วในแนวสัมผัสมาที่ขอบท่อ

$\overline{u_{cf}}$ คือความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ในแนวแกนของกระแสลมขวาง

เนื่องจากวิธีการในการทำให้เกิดการหมุนควงนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการหมุนท่อเจ็ต (Rotating pipe) ซึ่งมีความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการใช้การติดใบพัดในการหมุนกวนของไหล หรือการฉีดของไหลตามแนวสัมผัส กอปรกับเพื่อความสะดวกในการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้ Swirl ratio (Sr) เป็นพารามิเตอร์ที่บอกระดับการหมุนควงของเจ็ต

นอกจากนี้ในการศึกษาวิจัยยังได้มีการให้ความร้อนกับเจ็ตอากาศ ทำให้มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเจ็ตและกระแสลมขวาง ดังนั้นจึงพิจารณาผลของแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นจากค่า Densimetric Froude number (Fr) ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวของเจ็ตอากาศกับแรงเฉื่อยของกระแสลมขวาง ดังสมการ

$$Fr = \left[\frac{(\rho_{cf} - \rho_j)gd}{\rho_{cf} u_{cf}^2}\right]^{1/2} \tag{1.11}$$

และค่า Fr/r ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวของเจ็ตอากาศกับแรงเฉื่อยของเจ็ตอากาศ ดังสมการ

$$Fr/r = \left[\frac{(\rho_{cf} - \rho_j)gd}{\rho_j u_j^2}\right]^{1/2} \tag{1.12}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับการศึกษาการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมขวางในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองที่อัตราส่วนความหนาแน่น ($r_\rho = \rho_j / \rho_{cf}$) ประมาณ 0.83 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r_{eff}) มีค่าคงที่ที่ประมาณ 6.0 และ อัตราส่วนโดยมวลคงที่คือ 2.55โดยมีค่า Reynolds number ของเจ็ต (Re_j) ในกรณี *S0rd00* ประมาณ 7,600 กรณี *S0rd05* และ *S0rd10* ประมาณ 5,400 กรณี *S18rd00* ประมาณ 11,000 และกรณี *S18rd05* และ *S18rd10* ประมาณ 7,800 และมีค่า Reynolds number ของกระแสลมขวาง (Re_{cf}) ประมาณ 5,700 (พารามิเตอร์ต่างๆ ได้จากการคำนวนการวิเคราะห์แบบตัวแปรไร้มิติ ในภาคผนวก ข และแสดงค่าในตาราง ข1) และทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของจำนวนเจ็ต ระยะห่างระหว่างเจ็ต และการไหลแบบหมุนควงของกระแสลมขวางที่มีต่อคุณลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ โดยในทุกกรณีการทดลองจะมีค่า Fr ประมาณ 0.09 และมีค่า Fr/r ประมาณ 0.002 นั่นก็คือ ผลเนื่องจากแรงลอยตัวของเจ็ตร้อนจะมีค่าประมาณ 9 % ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของกระแสลมขวางและมีค่าประมาณ 0.2 % ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของเจ็ต

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ในเชิงวิชาการ

เพื่อขยายความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของการฉีดและการวางตำแหน่งของเจ็ตตัวที่สองที่มีต่อลักษณะการผสมของเจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง และจะเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอื่นๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ในเชิงประยุกต์

เพื่อนำความรู้ความเข้าใจนี้ไปเป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ในกระบวนการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ทั่วไปและโดยเฉพาะห้องเผาไหม้แบบ Staged Combustor หรือการผสมสารเคมีและอาจนำไปใช้เป็นแนวทางในการควบคุมการไหล (Flow control) ในแบบต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย