บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การไหลแบบเจ็ทในกระแสลมขวางเป็นการไหลพื้นฐานที่พบอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การฉีดเชื้อเพลิงเข้าผสมกับอากาศในกระบวนการเผาไหม้ภายใน Combustor, การระบายความร้อนบริเวณพื้นผิว (Film cooling) ของใบพัดใน Gas turbine, การผสมสารเคมีในถังกวน และยังพบในการใช้งานทางด้านอากาศยาน เช่น การควบคุมการขึ้นลงตามแนวดิ่งของเครื่องบินแบบ V/STOL (Vertical Short Take Off and Landing) นอกจากนี้ยังพบในการใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อมและมลภาวะ เช่น การระบายความร้อนจากท่อน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมสู่แหล่งน้ำ และการระบายอากาศเสียจากปล่องควัน โดยแสดงลักษณะที่พบในการใช้งานต่างๆดังรูปที่ 1.1

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงคุณลักษณะของเจ็ทในกระแสลมขวางซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาคุณลักษณะด้านการผสม เช่น งานวิจัยของ Pratte and Baines (1967), Smith and Mungal (1998) และ Yuan and Street (1998) โดยได้มีการพิจารณาและเปรียบเทียบคุณลักษณะของการผสมดังกล่าวจากปริมาณบ่งชี้ต่างๆ เช่น การแผ่ขยายของเจ็ท, การลดลงของความเร็วเฉลี่ย และระดับความปั่นป่วนของการไหล นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับเส้นทางของเจ็ทที่พุ่งทะลุเข้าไปในกระแสลมขวาง ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลโดยตรงในการออกแบบลักษณะของห้องเผาไหม้

เนื่องจากการไหลแบบนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อน จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของการไหลแบบเจ็ทในกระแสลมขวาง (Fric and Roshko, 1994 ; Yuan et al., 1999) เพื่อให้เกิดความเข้าใจในลักษณะและที่มาของรูปแบบการไหล ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมการไหลและการปรับปรุงประสิทธิภาพการผสม

งานวิจัยจำนวนมากที่ผ่านมาพบว่าการเปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มต้นทั้งในกรณีของเจ็ทอิสระ (Free jet) และเจ็ทในกระแสลมขวางมีผลกระทบอย่างมากต่อโครงสร้างการไหล ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อคุณลักษณะของการผสมและการพัฒนาตัวของเจ็ท ทั้งนี้งานวิจัยที่เกี่ยวกับเจ็ทอิสระ เช่น การติด Vortex generator ชนิด Tab บนขอบปากเจ็ท (Bradbury and Khadem, 1975 ; Zaman et al., 1994 ; Bohl and Foss, 1999) การเพิ่มการไหลแบบหมุนควง (Swirling flow) ให้กับเจ็ทอิสระ (Naughton et al., 1997 ; Feyedelem and Sarpkaya, 1997 ; Wangjiraniran et al., 1999) และงานวิจัยที่เกี่ยวกับเจ็ทในกระแสลมขวางเช่น การเพิ่มการไหลแบบหมุนควงให้กับ

เจ็ท (Kavsaoglu and Schetz, 1989 ; Yoshizako et al., 1991 ; Niederhaus et al.,1997 ; Wangjiraniran, 2001) และการติด Vortex generator ลงไปบนขอบปากเจ็ท (Liscinsky et al., 1995 ; Zaman and Foss, 1997) เป็นต้น

จากแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มต้นของเจ็ทในกระแสลมขวางทั้งสองแนวทางที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงได้เกิดแนวคิดที่จะทำการติด Tab แบบอยู่กับที่บนขอบปากเจ็ทซึ่งหมุนควงในกระแสลมขวางขึ้น เพื่อที่จะศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มในลักษณะนี้ โดยได้ทำการทดลองแนวคิดเบื้องต้นนี้แล้ว และได้ค้นพบปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการไหลที่น่าสนใจ และน่าจะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมโครงสร้างการไหล ซึ่งจะได้นำเสนอต่อไปในบทของผลการศึกษาเบื้องต้น ทั้งนี้การที่เราสามารถควบคุมโครงสร้างการไหลได้นั้น จะเป็นประโยชน์ในหลายด้าน เช่นด้านการควบคุมตำแหน่งและทิศทางการไหลของเจ็ท ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาการออกแบบในงานทางด้านอากาศพลศาสตร์ต่างๆ และในด้านการพัฒนาประสิทธิภาพของการผสมของสารเคมีในกระบวนการผลิตต่างๆ หรือการผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศในห้องเผาไหม้เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ อันจะนำมาซึ่งการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

1.2.1 เจ็ทในกระแสลมขวาง

การศึกษาเจ็ทในกระแสลมขวางนั้นมีผู้ศึกษาคุณลักษณะต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นลักษณะโครงสร้าง (Flow structure) เช่น Fric and Roshko (1994), เส้นทางของเจ็ท (Trajectory) เช่น Pratte and Baines (1967), การผสม (Mixing and entrainment) เช่น Yuan and Street (1998), การขยายตัวของเจ็ท (Spread rate) เช่น Pratte and Baines (1967) และการลดลงของปริมาณต่างๆตามแนวแกนเจ็ท (Decay rate) เช่น Smith and Mungal (1998)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อคุณลักษณะดังกล่าว (Parametric study) โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความเร็วของเจ็ทและกระแสลมขวาง (r_v) เช่น การศึกษาของ Pratte and Baines (1967) และอัตราส่วนระหว่างโมเมนตัมของเจ็ทและกระแสลมขวาง (r_m) โดยเฉพาะกรณีที่มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเจ็ทและกระแสลมขวาง เช่นการศึกษาของ Kamotani and Greber (1972)

ลักษณะและโครงสร้างของเจ็ทในกระแสลมขวาง

Rajaratnam (1976) ได้แบ่งลักษณะของเจ็ทในกระแสลมขวางออกเป็น 3 บริเวณดังรูปที่ 1.2 ได้แก่ 1) บริเวณ Potential core ซึ่งเป็นบริเวณกึ่งกลางของ Shear layer ของเจ็ทในช่วงต้น ซึ่งมีค่าความดันรวมสม่ำเสมอ โดย Keffer and Baines (1963) พบว่าที่อัตราส่วนความเร็วมากกว่า 4 นั้น แกนของ Potential core จะยังคงอยู่ในแนวแกนของเจ็ท ในขณะที่เมื่ออัตราส่วนความเร็ว (r_v) น้อยกว่า 4 นั้น แกนของ Potential core จะเริ่มเลื่อนไปตามทิศทางของกระแสลมขวาง นอกจากนี้ Pratte and Baines (1967) ยังพบว่าที่อัตราส่วนความเร็วสูงๆ ความยาวของ Potential core ของเจ็ทในกระแสลมขวางจะมีขนาดเข้าใกล้กรณีของเจ็ทอิสระ และต่อจาก Potential core การไหลจะพัฒนาตัวเข้าสู่ 2) บริเวณที่มีการเลี้ยวเบนมากที่สุด (Zone of maximum deflection) ซึ่งเป็นบริเวณที่มี Pressure gradient, อัตราการผสม (Entrainment rate) และการเปลี่ยนทิศทางของเจ็ทมากที่สุด ต่อจากนั้นจะเข้าสู่ 3) บริเวณ Vortex zone ซึ่งจะเห็นโครงสร้างของ Vortical structure อย่างชัดเจน นอกจากนี้ Pratte and Baines (1967) ยังพบโครงสร้างดังกล่าวที่ระยะทางถึง 1000d จากปากเจ็ท

Fric and Roshko (1994) ได้สรุปโครงสร้างของ Vortical sturcture ที่เกิดขึ้นในเจ็ทในกระแสลมขวางโดยแบ่งเป็น 4 ลักษณะดังรูปที่ 1.3 ได้แก่ 1) เจ็ท Shear layer vortices ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Vortex ring ของเจ็ท โดยเกิดจากการแยกตัว (Separation) ของ Shear layer บริเวณปากเจ็ท 2) Horseshoe vortices โดยเป็นการม้วนตัวของกระแสลมขวางในบริเวณชั้นขอบเขตที่พื้นรอบปากเจ็ท ซึ่งเกิดจากการที่กระแสลมขวางได้รับผลของ Adverse pressure gradient ที่เกิดจากการกีดขวางการไหลโดยเจ็ทที่พุ่งออกมา ประกอบกับผลของความหนาของชั้นขอบเขตของพื้นบริเวณปากเจ็ท 3) Wake vortices ซึ่งมีลักษณะคล้าย Wake ของการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก โดยมีแหล่งกำเนิดมาจาก Boundary layer ของกระแสลมขวางที่ผนังพื้น และ 4) Counter-rotating vortex pair (CVP) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เป็นกลไกสำคัญในการผสมโดยเฉพาะในบริเวณ Far field

นอกจากนี้ Yuan et al. (1999) ได้พบโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field 3 ลักษณะดังรูปที่ 1.4ก ได้แก่ 1) Hanging vortices ซึ่งเป็นการม้วนตัวของกระแสลมขวางทางด้านข้างเข้ามาในตัวเจ็ท โดยมีแกนการม้วนตัวตามทิศทางของผลรวมระหว่างความเร็วเจ็ทและกระแสลมขวาง ($\bar{u}_{mean}$) ดังรูปที่ 1.4ข ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวเกิดจาก ความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ทกับกระแสลมขวางในทิศทางตั้งฉากกับ $\bar{u}_{mean}$ ($\bar{u}_{nj}$ และ $\bar{u}_{ncf}$) หรือที่เรียกว่า Skewed mixing layer ดังรูปที่ 1.4ค ประกอบกับการได้รับผลของการพา (Convection) จาก $\bar{u}_{mean}$ 2) Spanwise rollers ซึ่งมีลักษณะเดียวกับการม้วนตัวของ Vortex ring ของเจ็ทอิสระ

แต่เนื่องจากผลของกระแสลมขวางทำให้คุณสมบัติตามเส้นรอบวงที่ขอบเจ็ทไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะด้านข้างเจ็ทซึ่งความเร็วของกระแสลมขวางจะถูกเร่งและหน่วงเมื่อผ่านตัวเจ็ท ทำให้พบลักษณะของ Spanwise rollers เฉพาะด้านหน้าและด้านหลังเจ็ท ดังรูปที่ 1.4ง และ 3) Vertical streaks ซึ่งมีแกนการม้วนตัวในแนวดิ่ง โดยเกิดจากการเปลี่ยนทิศทางของ Spanwise rollers ด้านหน้า เนื่องจาก ผลของ Perturbation และ Gradient ของความเร็วในแนวดิ่งตามแนว Downstream ($\partial v/\partial x$)

Kelso et al. (1996) เสนอว่า CVP เกิดจาก Shear layer ใกล้ปากทางออกของเจ็ท ซึ่งมีลักษณะคล้าย Vortex ring ใน Free jet ที่เกิดการเอียงและพับตัว ดังรูปที่ 1.5 โดยแขนของ Vortex ring ด้านใต้ลมซึ่งพับตัวแล้วจะมีการวางตัวในทิศทางตามแนวการไหลของเจ็ท และเป็นต้นกำเนิด Circulation ของ CVP ต่อมา Vortex ซึ่งของแขน Vortex ring ดังกล่าวจะพัฒนาตัวจนเกิด Vortex breakdown ขึ้นและกลายเป็น CVP ในที่สุด

Cortelezzi and Karagozian (2001) ได้ทำการใช้วิธี Transient numerical simulation แบบ 3D-Vortex method ในการจำลองการไหลของเจ็ทในกระแสลมขวาง เพื่อทำการศึกษากลไกการเกิด CVP โดยใช้ Model การการเกิด CVP ของ Kelso et al. (1996) ซึ่งให้ความสำคัญกับ Vortex ring ที่ปากเจ็ทซึ่งเกิดการพับตัวบริเวณ Near field จากผลการ Simulation ทำให้ได้ลักษณะโครงสร้างของเจ็ทในกระแสลมขวางบริเวณ Near filed ที่ค่อนข้างสอดคล้องกับ Kelso et al. (1996) ดังรูปที่ 1.6

Lim et al. (2001) ทำการทดลองโดยศึกษา Large-scale Structure ของเจ็ทในกระแสลมขวางในบริเวณของ Shear layer ใกล้ปากเจ็ท พบว่า CVP น่าจะเกิดจาก Vortex Loop ซึ่งไม่ได้เกิดจากการพับตัวของ Vortex ring โดย Vortex Loop นั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Cylindrical vortex sheet หรือ Jet column ดังรูปที่ 1.7

ในการศึกษาการไหลแบบเจ็ทในกระแสลมขวาง ประเด็นหนึ่งที่ได้รับความสนใจคือลักษณะโครงสร้างและกลไกในการเกิด CVP เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีผลต่อคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ทอย่างมาก โดยที่ผ่านมามีแนวคิดหลักเกี่ยวกับต้นกำเนิดของ CVP สอดคล้องกันคือเกิดจาก Shear layer ของเจ็ท (Moussa et al., 1977; Andreopoulos, 1984,1985; Andreopoulos and Rodi, 1984; Sykes et al., 1986 และ Coelho and Hunt, 1989) อย่างไรก็ตามรายละเอียดเกี่ยวกับกลไกในการเกิด CVP ยังมีความแตกต่างกัน โดย Haven (1996) เสนอว่า CVP เกิดจาก Voriticity ที่ขอบเจ็ทด้านข้าง ได้รับผลของ Gradient ของความเร็วในแนวดิ่งทำให้ Vorticity ดังกล่าวเปลี่ยนทิศทางและพัฒนาตัวเป็น CVP และเมื่อไม่นานนี้ Yuan et al. (1999) เสนอว่า CVP เกิดจากการที่ Hanging vortices ซึ่งเกิดจาก Skewed mixing layer ที่ขอบเจ็ทด้านข้าง

ได้รับผลของ Adverse pressure gradient ทำให้เกิด Vortex Breakdown และพัฒนาตัวกลายเป็น CVP

การผสมของเจ็ทในกระแสลมขวาง

การศึกษาการผสมสำหรับเจ็ทในกระแสลมขวางนั้นมีความซับซ้อนค่อนข้างมากเนื่องจากการไหลมีลักษณะเป็น 3 มิติ โดยการดึงกระแสลมขวางเข้าไปในตัวเจ็ท (Entraiment) จะเป็นกลไกสำคัญในการผสม ซึ่งการศึกษาที่ผ่านมาจะพิจารณาจากปริมาณบ่งชี้ต่างๆได้แก่ การขยายตัวของเจ็ท (Spread rate) และการลดลง (Decay rate) ของปริมาณต่างๆตามแนวแกนเจ็ทไม่ว่าจะเป็น ความเร็ว, อุณหภูมิ และ Scalar concentration ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ มีความเชื่อมโยงกับการผสม

Sherif and Pletcher (1989) ได้ศึกษาการลดลงของอุณหภูมิของเจ็ทน้ำในอุโมงค์น้ำโดยใช้ Cold film anemometer ในการวัดอุณหภูมิ ที่อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 1, 4 และ 7 โดยให้ความร้อนกับเจ็ทจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในอุโมงค์น้ำในช่วง 28 ถึง 32 °C พบว่าอุณหภูมิส่วนเกินซึ่งนิยามจาก $(T - T_{cf})/(T_j - T_{cf})$ สูงสุดบนระนาบสมมาตรแปรตาม $(x/d)^{-0.5}$ ดังรูปที่ 1.8 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ramsey and Goldstein (1970) และ Andreopoulos (1983)

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาการลดลงของ Scalar concentration ตามแนวแกนเจ็ทโดยใช้ r^2d scale ดังรูปที่ 1.9ก พบว่าการลดลงตามแนวแกนเจ็ทสามารถแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ Near field และ Far field โดยมีจุดแบ่งที่ $s/r^2d = 0.3$ และเมื่อใช้ rd scale ดังรูปที่ 1.9ข พบว่าบริเวณ Near field มีอัตราการลดลงแปรตาม $(s/rd)^{-1.3}$ ซึ่งสูงกว่ากรณีของเจ็ทอิสระที่มีอัตราการลดลงแปรตาม $(s/rd)^{-1}$ ในขณะที่บริเวณ Far field มีอัตราการลดลงแปรตาม $(s/rd)^{-2/3}$ ซึ่งต่ำกว่าในช่วงแรกและกรณีของเจ็ท แสดงถึงการผสมที่ดีในช่วง Near field และมีการผสมลดลงในช่วง Far field ทำให้สรุปได้ว่า CVP ที่มีการพัฒนาตัวเต็มที่ในบริเวณ Far field นั้น ไม่ช่วยเพิ่มการผสมของเจ็ทในกระแสลมขวาง ในขณะที่บริเวณ Near field ซึ่งเป็นบริเวณที่ CVP กำลังพัฒนาตัวจะมีการผสมมากกว่า

Yuan et al. (1999) พบว่ากลไกของการผสมสำหรับเจ็ทในกระแสลมขวางนั้นได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงของ Large coherent structure ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการเกิด Turbulent mixing โดยจากรูปที่ 1.4ง ในช่วงต้นของการผสม ($y/d<3$) โครงสร้างของ Spanwise rollers ที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวสัมผัส (Interface) ระหว่างเจ็ทและกระแสลมขวาง ทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale ต่อมาในบริเวณที่เจ็ทเริ่มมีการโค้งตัว กระแสลมขวางจะถูกดึงเข้าไปในเจ็ทอากาศ (Entrain) ทำให้เกิดช่องว่างภายในเจ็ท

อากาศ (Gap) ซึ่งจะทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale เช่นเดียวกัน และเมื่อเจ็ทอากาศพัฒนาตัวไปจนถึงบริเวณ Vortex zone โครงสร้างของ CVP จะเป็นกลไกสำคัญของการผสม โดยกระแสลมขวางจะถูกดึงเข้าไปในตัวเจ็ท (Entrain) ตามทิศทางการหมุนวนของ CVP

1.2.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มต้นที่มีต่อเจ็ทอิสระ

สำหรับงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมาเกี่ยวกับการติด Vortex generator บนปากเจ็ทอิสระ เช่น Reeder and Samimy (1996) ได้ทำการศึกษาเจ็ทน้ำความเร็วต่ำที่มีการติดตั้ง Tab รูปสามเหลี่ยมบริเวณปากทางออกของ Nozzle รูปวงกลม โดยการติดตั้ง Tab นี้มีทั้งหมด 2 แบบ คือ แบบ Delta tabs (Pitch angle = 135^{o}) และแบบ Inverted delta tabs (Pitch angle = 45^{o}) ดังรูปที่ 1.10(ก-ข) จากผลการทดลองที่ได้พบว่าการใช้ Tab ทำให้รูปร่างของเจ็ทเปลี่ยนแปลงไปเป็นอย่างมาก โดย Tab แต่ละอันจะทำให้เกิด Counter-rotating streamwise vortices ที่มีกำลังสูง รวมทั้งทำให้ Reynold stress มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้สามารถดึงเอาของไหลจากภายนอกมาผสมกับของไหลภายในเจ็ทได้มากขึ้นและยังพบว่ามี Streamwise vortices ชุดที่ 2 ที่มีกำลังต่ำกว่าและมีลักษณะคล้าย Horseshoe vortex เกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ๆ Tab ซึ่งช่วยทำให้ Mixing layer มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ Tab นอกจากนี้สำหรับ Inverted delta tabs นั้นพบว่าจะทำให้เกิด Streamwise vortices ชุดที่ 3 ขึ้นที่บริเวณปลายยอดของ Tab ดังรูปที่ 1.10(ค-ง)

Zaman et al. (1994) ได้ทำการศึกษาผลของ Vortex generator แบบ Tab ซึ่งติดอยู่บนขอบปากทางออกของเจ็ทอิสระ โดยทำการทดลองทั้งในกรณีที่เจ็ทเป็นแบบ Subsonic และ Supersonic ซึ่งมี Mach number เท่ากับ 0.3 และ 1.63 ตามลำดับ และ Tab เป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีมุมยอดเท่ากับ 90^{o} และมีลักษณะการติดตั้ง Tab อยู่ 2 แบบ คือแบบ Delta tab และแบบ Triangular tab หรือ Inverted delta โดย Blockage ratio ของ Tab แต่ละอันเท่ากับ 2% ของพื้นที่ปากเจ็ท

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Delta tab จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อโครงสร้างการไหลมากที่สุด โดยที่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการไหลนั้นมีลักษณะคล้ายกันทั้งในกรณีเจ็ทแบบ Supersonic และ Subsonic และพบว่าเจ็ทที่มีการติด Delta tab จะมี Entrainment rate มากกว่าเจ็ทที่ไม่มีการติด Delta tab เนื่องจาก Delta tab จะทำให้พื้นที่ขอบของ Mixing layer เพิ่มขึ้นซึ่งจะช่วยทำให้เจ็ทสามารถดึงอากาศจากภายนอกเข้าไปผสมได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ติด Delta tab แต่เมื่อติด Delta tab มากกว่า 4 อันแล้ว Entrainment rate จะลดลง

จากผลการวัด Vorticity พบว่า Delta tab และ Triangular tab แต่ละอันเป็นต้นกำเนิดของ Pair of counter-rotating streamwise vortices ดังแสดงในรูปที่ 1.11และรูปที่ 1.12 ตาม

ลำดับ ทั้งนี้ Vortices ที่เกิดขึ้นจาก Triangular tab จะมีลักษณะเดียวกับ Delta tab และจากการเปรียบเทียบกำลัง (Strength) ของ Vorticity พบว่าการติด Tab 2 อันเท่ากันนั้น การติด Delta tab จะให้ Vorticity ที่มีความแข็งแรงมากกว่า Triangular tab

กลไกที่สำคัญของการผสมในกรณีที่มีการติด Delta tab และ Triangular tab บนขอบปากเจ็ทอิสระคือ Pair of counter-rotating streamwise vortices ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Tab แต่ละอัน ทำให้พื้นที่ขอบของ Mixing layer เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ช่วยเพิ่มการผสมระหว่างอากาศภายนอกกับภายในเจ็ทให้ดียิ่งขึ้น

Zaman et al. (1994) ได้ทำการวัดความดันสถิตย์ตามแนวแกน Streamwise บนผนังด้านในของปากเจ็ทในแนวเดียวกับที่มีการติด Tab ดังแสดงในกราฟรูปที่ 1.13ก พบว่าการติด Tab ที่ปากเจ็ท ทำให้ค่าความดันสถิตย์ที่ผนังในตำแหน่งใกล้ปากเจ็ทเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และจากการวัดความดันสถิตย์บนผนังของเจ็ทในแนวเส้นรอบวง ณ ตำแหน่งที่ห่างจากปากเจ็ทมาทาง Upstream เป็นระยะทาง 0.2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางปากเจ็ท เทียบกับค่ามุมตามแนวเส้นรอบวง โดยให้มุม $\Psi = 0^{o}$ เป็นตำแหน่งที่อยู่แนวเดียวกับ Tab ดังแสดงในกราฟรูปที่ 1.13ข พบว่าค่าความดันสถิตย์จะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งซึ่งอยู่ในแนวเดียวกันกับ Tab และค่าความดันสถิตย์จะลดลงอย่างช้าๆ ในลักษณะสมมาตรกันทั้งสองข้างของ Tab โดยที่การกระจายตัวของความดันสถิตย์บนผนังของเจ็ททางด้าน Upstream ของ Tab ในลักษณะนี้จะเรียกว่า "Pressure hill" ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นต้นกำเนิดของ Streamwise vorticity

จากการพิจารณาสมการ Navier-Stokes สำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ที่บนผนังของเจ็ทใกล้ปากทางออกที่ติด Tab ดังแสดงในรูปที่ 1.14 พบว่าสามารถลดรูปสมการได้จากเงื่อนไข No-slip และไม่คิดแรงเนื่องจาก Body force และเมื่อคิดเฉพาะองค์ประกอบตามแนวแกน z จะได้สมการดังนี้

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} = \nu\frac{\partial \omega_x}{\partial y}$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า Pressure hill ซึ่งก็คือ Pressure gradient ตามแนวแกน z (แนวเส้นรอบวง) ทำให้เกิด Streamwise vorticity , ω_x ขึ้นมาได้

1.2.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มต้นที่มีต่อเจ็ทในกระแสลมขวาง

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ทอิสระ และพบว่าการเปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มต้นที่ปากเจ็ทอิสระมีผลต่อคุณลักษณะต่างๆ อย่างมาก จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่ปากเจ็ทในกระแสลมขวางรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการ

ศึกษาผลของรูปร่างของปากเจ็ท เช่น งานวิจัยของ Wu et al.(1988), Sivadas et al. (1997) และ Findlay et al. (1999) ผลของสภาวะที่ไม่คงตัว (Unsteady) เช่น งานวิจัยของ Raud et al. (1999), Eroglu and Breidenthal (2001) ผลจากการเพิ่มการไหลแบบหมุนควง (Swirling flow) ให้กับเจ็ทในกระแสลมขวาง เช่น Kavsaoglu and Schetz (1989), Niederhaus et al. (1997), และ Wangjiraniran (2001) รวมทั้ง ผลจากการติด Vortex generator บริเวณปากเจ็ท ดังเช่นงานวิจัยของ Zaman and Foss (1997) ซึ่งทั้งงานวิจัยของ Wangjiraniran (2001) และ Zaman and Foss (1997) นั้นเป็นแนวทางของงานวิจัยนี้

Sivadas et al. (1997) ได้ศึกษาผลของรูปร่างของปากเจ็ทที่มีต่อเส้นทางและการขยายตัวของเจ็ท โดยใช้ปากเจ็ทรูปสี่เหลี่ยมที่มีอัตราส่วนรูปร่าง (Aspect-ratio) ต่างๆ พบว่าปากเจ็ทรูปสี่เหลี่ยมทำให้เจ็ทอากาศทะลุเข้าไปในกระแสลมขวางได้น้อยลงและการขยายตัวของเจ็ทเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปากเจ็ทรูปวงกลม ซึ่งแสดงถึงการผสมที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มความยาวของด้านที่ปะทะกับกระแสลมขวาง ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างเจ็ทอากาศและกระแสลมขวาง

สำหรับการศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ทในกระแสลมขวางนั้น พารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญคือ ค่า Swirl ratio (*Sr*) ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสที่ขอบเจ็ทกับความเร็วในแนวแกนเฉลี่ยของเจ็ท โดยมีวิธีการที่ทำให้เจ็ทเกิดการหมุนควงในหลายลักษณะ เช่น การให้ของไหลผ่าน Guide vane, การติดใบพัดในการหมุนกวนของไหล และการฉีดของไหลในแนวสัมผัส โดยมีรายละเอียดของการศึกษาดังนี้

Kavsaoglu and Schetz (1989) ได้ศึกษาผลของการหมุนควงและปริมาณความปั่นป่วนที่มีต่อความดันสถิตย์บนพื้นผิวรอบปากเจ็ทและความเร็วของเจ็ทในกระแสลมขวาง ที่อัตราส่วนความเร็ว (r_v) เท่ากับ 2.2, 4 และ 8 โดยมีปริมาณความปั่นป่วน 3% สำหรับกรณีความปั่นป่วนต่ำ และ 10-16% สำหรับกรณีความปั่นป่วนสูง ในการทดลองใช้ Screen เป็นตัวควบคุมปริมาณความปั่นป่วน และทำการเปลี่ยนค่า Swirl ratio (*Sr*) ไป 2 ค่าคือเท่ากับ 0.4 และ 0.58 โดยใช้การฉีดอากาศจากด้านข้างในการทำให้เกิดการหมุนควง จากผลการทดลองพบว่าเจ็ทที่มีความปั่นป่วนสูงนั้น ทำให้พื้นที่ผิวซึ่งครอบคลุมบริเวณที่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (Negative pressure) ลดลง ดังผลการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 1.15ก และ ข และยังทำให้เจ็ทมี Penetration ลดลงด้วย และเมื่อพิจารณาผลของการหมุนควงพบว่า ผลของการหมุนควงดังกล่าวจะมีมากในสภาวะที่มีอัตราส่วนความเร็ว (r_v) ต่ำ และปริมาณความปั่นป่วนสูง โดยเฉพาะที่บริเวณใกล้ปากเจ็ท และยังพบอีกด้วยว่าเจ็ทที่มีการหมุนควงทำให้ความดันสถิตย์ที่พื้นผิวมีความไม่สมมาตรมากขึ้น ดังผลการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 1.15ก และ ค และยังทำให้เจ็ทมี Penetration ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการหมุนควงอีกด้วย แต่ถึงกระนั้นก็ตามก็ยังคง

มีลักษณะที่สำคัญอยู่ประการหนึ่งที่เกิดร่วมกันทั้งในกรณีไม่มีการหมุนควง และมีการหมุนควงคือ ความดันสถิตย์บริเวณพื้นด้านหน้าเจ็ทที่กระแสลมขวางมาปะทะกับเจ็ทจะมีความดันสถิตย์สูงกว่าบริเวณพื้นด้านหลังของเจ็ท

Niederhaus et al. (1997) ได้ศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ทน้ำในอุโมงน้ำ โดยใช้ Planar laser-induced fluorescence (PLIF) โดยศึกษาปริมาณ Scalar concentration ที่อัตราส่วนความเร็วในช่วง 4.9 ถึง 11.1 และค่า Swirl number (*Sn*) ในช่วง 0 ถึง 0.17 โดยใช้ใบพัดกวนเจ็ทอากาศเพื่อให้เกิดการหมุนควง สำหรับสภาวะเริ่มต้นที่ปากเจ็ทนั้น ความเร็วในแนวแกนมีรูปร่างเป็นแบบ Top hat และความเร็วในแนวสัมผัสมีรูปร่างเป็น Solid body ที่บริเวณกลางเจ็ท ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ในกรณีที่เจ็ทมีการหมุนควง ลักษณะของ CVP เปลี่ยนไปจากลักษณะที่สมมาตรในกรณีที่เจ็ทไม่มีการหมุนควงไปเป็นลักษณะที่ Vortex ด้านหนึ่งของ CVP มีขนาดโตขึ้นในขณะที่อีกด้านหนึ่งมีขนาดลดลง ทำให้ CVP มีรูปร่างคล้าย Comma ดังรูปที่ 1.16 โดยผลดังกล่าวจะมากขึ้นตามค่า Swirl number นอกจากนี้ยังศึกษาพบว่าเส้นทางและการขยายตัวของปริมาณ Scalar concentration นั้นมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลอุณหภูมิ

Zaman and Foss (1997) ได้ทำการทดลองศึกษาผลกระทบของ Vortex generator แบบ Tab รูปสามเหลี่ยมที่มีต่อ Penetration depth ของเจ็ทในกระแสลมขวาง พบว่า Tab ที่วางบนขอบปากเจ็ทด้านที่ปะทะกับกระแสลมขวาง (Windward) จะทำให้ Penetration depth ลดลงอย่างชัดเจน ทั้งในกรณีที่ค่า Momentum-flux ratio , $J = (\rho_j V_j / \rho_{cf} V_{cf})^2$ เท่ากับ 21.1 และ 54.4 (คิดเป็นค่า Effective jet-to-crossflow momentum ratio หรืออัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4.6 และ 7.4 ตามลำดับ ซึ่งค่า 4.6 นั้นจะค่อนข้างใกล้เคียงกับการทดลองในงานวิจัยนี้) โดยจากการวัดค่าความเร็วเฉลี่ยบนหน้าตัดต่างๆ ที่ตั้งฉากกับแกน Streamwise จะได้ผลการทดลองดังนี้

รูปที่ 1.17 และ รูปที่ 1.18 แสดง Contour ของความเร็วเฉลี่ย ที่หน้าตัดตั้งฉากกับแกน Streamwise โดยมี Momentum-flux ratio เท่ากับ 21 และ 54 ตามลำดับ พบว่ากรณีที่ติด Delta tab หรือ Triangular Tab บนขอบปากเจ็ทด้าน Windward จะทำให้ Contour ของความเร็วเฉลี่ยอยู่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่ติด Tab และ ติด Tab ที่ตำแหน่งอื่นๆ

รูปที่ 1.19(ก-ข) แสดงรูปผลการทดลองเปรียบเทียบ Contour ของความเร็วเฉลี่ยในหลายๆ หน้าตัด และ Streamwise vorticity isosurface ค่าหนึ่งซึ่งเป็นตัวแทนการพัฒนาตัวของ CVP ระหว่างกรณีที่ไม่มีการติด Tab กับกรณีที่มีการติด Triangular Tab ที่ตำแหน่ง Windward โดยทำการทดลองที่ Momentum-flux ratio เท่ากับ 21 และ 54 ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการติด Triangular Tab ที่ตำแหน่ง Windward จะทำให้ตำแหน่ง Contour ของความเร็วเฉลี่ยในทุกๆ

หน้าตัดลดความสูงลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Penetration depth ลดลงนั่นเอง และจากผลการคำนวณ Streamwise vorticity ที่หน้าตัดต่างๆ แล้วนำเฉพาะค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่งซึ่งสามารถเป็นตัวแทน CVP ได้ในหลายๆ หน้าตัด มาทำการสร้าง Isosurface จะพบว่าในกรณีที่ติด Tab นั้น Isosurface จะมีขนาดเรียวเล็กลงมากกว่าในกรณีที่ไม่ติด Tab ซึ่งหมายความว่า CVP มีกำลัง (Strength) น้อยกว่าและลดลงเร็วกว่านั่นเอง

รูปที่ 1.20 แสดงเส้นทางของความเร็วเฉลี่ยมากที่สุดบนระนาบสมมาตร พบว่าเส้นทางในกรณีที่ติด Triangular tab บนขอบปากเจ็ทด้าน Windward จะอยู่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่ติด Tab

รูปที่ 1.21 แสดงผลการคำนวณค่า Circulation รอบแกนซึ่งขนานกับแกน Streamwise บนด้านหนึ่งของระนาบสมมาตร ($z = 0$) ซึ่งสามารถเป็นตัวแทนค่าความแข็งแรงของ CVP ข้างหนึ่งได้ พบว่ากรณีที่มีการติด Tab แล้วจะทำให้ค่า Circulation น้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติด Tab

จากผลการทดลองข้างต้นซึ่งพบว่า Tab ทำให้ความแข็งแรงของ CVP ลดลง และเนื่องจากการที่ได้ทราบมาก่อนแล้วว่า CVP มีต้นกำเนิดมาจาก Vortices บริเวณขอบปากเจ็ท ดังนั้นจึงได้ตั้งสมมติฐานว่า Vortices ที่เป็นต้นกำเนิดของ CVP น่าจะถูกลดกำลังลงก่อนที่จะเกิดการพัฒนาตัวเป็น CVP โดยกลไกที่เป็นตัวลดกำลัง Vortices นี้คือ Pair of vortices ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากการติด Tab ที่ปากเจ็ทโดยจะมีทิศทางการหมุนตรงกันข้ามกับ Vortices ที่เป็นต้นกำเนิดของ CVP นั่นเอง

รูปที่ 1.22 ซึ่งแสดงค่าความดันสถิตย์ที่ทำการ Normalize แล้วเทียบกับระยะทางตามแนวแกน Streamwise และแนวแกน Spanwise พบว่าค่าความดันสถิตย์ที่บริเวณขอบปากเจ็ทในตำแหน่ง Leeward จะมีค่าความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันสถิตย์ที่ตำแหน่ง Windward และจากผลการทดลองในงานวิจัยที่ผ่านมาของ Bradbury and Wood (1965) และ McMahon and Mosher (1969) ซึ่งมีสภาวะการทดลองใกล้เคียงกันกับการทดลองนี้ พบว่าการกระจายตัวของความดันสถิตย์ที่พื้นผิวบริเวณโดยรอบปากเจ็ทในกรณีที่ไม่ติด Tab มีลักษณะดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 1.23 ซึ่งนอกจากจะพบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองนี้แล้ว ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Kavsaoglu and Schetz (1989) และ Lincinsky (1995) อีกด้วย โดยพบว่าความดันสถิตย์บริเวณ Windward นั้นมีค่าสูงกว่าด้าน Leeward

เนื่องมาจากกลไกหลักอย่างหนึ่งของการเกิด Pair of vortices ซึ่งมีสาเหตุมาจากการวาง Tab รูปสามเหลี่ยมที่ขอบปากเจ็ทอิสระนั้นก็คือ Pressure hill ที่เกิดขึ้นบริเวณขอบปาก เจ็ทอิสระด้านในซึ่งอยู่ตรงกับบริเวณที่มีการติด Tab และประกอบกับค่าความดันสถิตย์ที่วัดได้จากบริเวณพื้นรอบขอบปากเจ็ทในกระแสลมขวาง ทำให้สามารถตั้งข้อสมมุติฐานได้ว่า เมื่อทำการติด Tab ที่

ตำแหน่ง Leeward นั้นถึงแม้ว่าจะเกิด Pressure hill ด้านในขอบปากเจ็ท แต่ก็จะถูกหักล้างโดยผลการกระจายตัวของความดันสถิตย์ซึ่งมีค่าต่ำบริเวณขอบปากเจ็ทด้านนอก ซึ่งมีผลทำให้ Pressure hill ที่เกิดขึ้นมี Pressure gradient สูงไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Pair of vortices ที่มีกำลังพอที่จะหักล้างหรือเสริมกำลังของ Vortices ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของ CVP ได้ ดังนั้นการติด Tab ที่ตำแหน่ง Leeward ของขอบปากเจ็ทจึงไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของการไหลมากนัก ในทางตรงกันข้ามถ้าทำการติด Tab ด้าน Windward ซึ่ง Pressure hill ที่เกิดขึ้นด้านในปากเจ็ทจะเสริมกับการกระจายตัวของค่าความดันสถิตย์ที่มีค่าสูงบริเวณพื้นขอบปากเจ็ทด้านนอกส่งผลให้เกิด Pair of vortices ที่มีกำลังเพียงพอที่จะหักล้างกับกำลังของ Vortices ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของ CVP ได้ ดังนั้นการติด Tab รูปสามเหลี่ยมบนขอบปากเจ็ทด้าน Windward จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ Penetration depth ลดลง

Wangjiraniran (2001) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของความเร็วในการหมุนควงซึ่งแสดงโดยค่า Swirl ratio (Sr) ที่มีต่อคุณลักษณะของอุณหภูมิและการผสมของเจ็ทในกระแสลมขวาง โดยทดลองที่ค่า Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.82 ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่ที่ 4.1 ในช่วง x/rd = 0.25-2 ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณ Near field และ Far field โดยใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) ในการทำให้เกิดการหมุนควง ซึ่งมีผลรวมของค่า Circulation รอบเจ็ทไม่เท่ากับศูนย์ (Non-zero circulation) ในขณะที่วิธีการทำให้เกิดการหมุนควงอื่นๆ เช่น ใช้ใบพัดกวนเจ็ทอากาศ (Niederhaus et al.,1997) และการฉีดของไหลจากด้านข้าง (Kavsaoglu and Schetz, 1989) จะมีผลรวมของค่า Circulation รอบปากเจ็ทเท่ากับศูนย์ (Zero circulation)

รูปที่ 1.24(ก-ข) แสดงการกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ตามลำดับ พบว่าการหมุนควงทำให้ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิบนหน้าตัดตั้งฉากกับแนวแกนการไหลมีความไม่สมมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการหมุนควง โดยจะพบบริเวณที่มีอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงทางด้านที่ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ทอากาศมีทิศทางเดียวกับความเร็วของกระแสลมขวาง (ด้าน Suction) ในขณะที่พบบริเวณที่มีอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่ำทางด้านที่ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ทอากาศมีทิศทางตรงกันข้ามกับความเร็วของกระแสลมขวาง (ด้าน Pressure)

นอกจากนี้ยังพบว่าความไม่สมมาตรดังกล่าวเพิ่มขึ้นตามความเร็วในการหมุนควง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการหมุนควงจะมีผลต่อลักษณะของความไม่สมมาตรภายในเจ็ท แต่การหมุนควงดังกล่าวไม่มีผลต่อตำแหน่ง และรูปร่างภายนอกของเจ็ทซึ่งแสดงโดยเส้นขอบเขตของบริเวณระดับอุณหภูมิต่ำรอบเจ็ท อีกทั้งยังพบว่า ในช่วงของพารามิเตอร์ที่ศึกษานั้น การหมุนควงส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อคุณลักษณะโดยรวมของเจ็ท เช่น การขยายตัวของเจ็ท (Spread rate) และรูปร่างและ

ตำแหน่งของขอบเจ็ทดังกล่าวข้างต้น และส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อคุณลักษณะบนระนาบสมมาตรแนวตั้ง (ระนาบ *x-y*) ดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของเส้นทางของอุณหภูมิสูงสุดบนระนาบสมมาตร (Centerplane trajectory), เส้นทางของจุดศูนย์กลางอุณหภูมิ (Centroid trajectory), และ การลดลงของอุณหภูมิสูงสุดบนระนาบสมมาตร (Centerplane decay) และการลดลงของอุณหภูมิสูงสุด (Maximum decay) ในทางตรงกันข้าม พบว่าการหมุนควงส่งผลที่มีนัยสำคัญต่อคุณลักษณะของเจ็ทบนระนาบแนวนอน (ระนาบ *x-z*) ดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของเส้นทางของจุดศูนย์กลางอุณหภูมิบนระนาบแนวนอน ซึ่งพบการเบี่ยงเบนออกจากแนวของระนาบสมมาตรแนวตั้งมากขึ้น เมื่อความเร็วในการหมุนควงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.25

จากผลที่ได้ทำให้สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า ผลเช่นนี้ควรจะเกิดขึ้นมาจากกลไกและการพัฒนาของ Skew shear layer ที่ขอบด้านข้างทั้งสองของเจ็ท โดยเฉพาะอย่างยิ่งบนด้าน Suction ซึ่งความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ทมีทิศทางเดียวกันกับความเร็วของกระแสลมขวาง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการลดลงของ Skew angle และความแตกต่างของความเร็วที่ทำให้เกิด Shear layer หรืออีกนัยหนึ่งก็คือความแข็งแรงของ Shear layer ลดลงนั่นเอง โดยจะส่งผลให้การพัฒนาของ Shear layer ช้าลง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศภายในและภายนอกเจ็ทช้าลง ส่งผลให้เกิดบริเวณที่มีอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงขึ้นตรงกันข้ามกับด้าน Pressure ซึ่งความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ทอยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของความเร็วของกระแสลมขวาง ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของ Skew angle และความแตกต่างของความเร็ว หรืออีกนัยหนึ่งก็คือความแข็งแรงของ Shear layer เพิ่มขึ้นนั่นเอง โดยจะส่งผลให้การพัฒนาของ Shear layer เร็วขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศภายในและภายนอกเจ็ทได้เร็วขึ้น ส่งผลให้เกิดบริเวณที่มีอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่ำลง ทั้งนี้สามารถแสดงได้ดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของ Shear layer ที่ขอบด้านข้างของปากเจ็ททั้งสอง (β) เปรียบเทียบกับค่า Swirl ratio ต่างๆ ได้ดังกราฟรูปที่ 1.26

จากผลงานวิจัยของ Wangjiraniran (2001) จึงได้มีแนวคิดที่จะลดบริเวณที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นแบบไม่สมมาตรบนด้าน Suction นี้ลงหรือกำจัดให้หมดไป โดยได้ตั้งข้อสมมติฐานที่ว่าโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่หมุนควงในกระแสลมขวางนั้น ยังคงมี Vortical structure แบบ CVP อยู่ เนื่องมาจากการพัฒนาของ Shear layer ที่ด้านข้างทั้งสองของปากเจ็ทเช่นเดียวกับกรณีของเจ็ทที่ฉีดตั้งฉากในกระแสลมขวางโดยปรกติ แต่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในทางไม่สมมาตรไปบ้าง ซึ่งสิ่งที่พอจะเป็นหลักฐานยืนยันได้ในระดับหนึ่งคือ

ผลจากการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เห็นได้อย่างชัดเจนว่า รูปร่างขอบนอกของเจ็ทที่หน้าตัดต่างๆ นั้นยังคงมีลักษณะเป็นรูปไต (Kidney shape) ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มความเร็วรอบของการหมุนควงจนกระทั่ง Swirl ratio มีค่าสูงถึง 0.82 แล้วก็ตาม และจากผลงานวิจัยของ Zaman and Foss (1997) ที่พบว่าเมื่อมีการติด Vortex generator ชนิด Tab รูปสามเหลี่ยมที่ขอบปากเจ็ทในตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งในกรณีของเจ็ทในกระแสลมขวางปรกติ คือที่ตำแหน่ง Windward จะทำให้ความแข็งแรงของ Vortices ที่เป็นต้นกำเนิดของ CVP ลดลง

ดังนั้นจึงได้เกิดแนวทางในการควบคุมโครงสร้างของการไหลสำหรับเจ็ทที่มีการหมุนควงในกระแสลมขวาง โดยให้ความสำคัญในการควบคุม Shear layer ตามแนวเส้นรอบวงของขอบปากเจ็ท ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ Tab รูปสามเหลี่ยมติดแบบอยู่กับที่ ตรงตำแหน่งต่างๆ ที่ขอบปากเจ็ท เพื่อศึกษาผลกระทบที่จะมีต่อโครงสร้างการไหล

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มต้นที่มีต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ทร้อนที่หมุนควงในกระแสลมขวางโดยการใช้ Tab รูปสามเหลี่ยมซึ่งติดแบบอยู่กับที่ตรงตำแหน่งต่างๆ บนขอบปากเจ็ท และศึกษาโครงสร้างการไหลโดยการวิเคราะห์จากการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ย

1.4 แนวทางการทำวิจัย

ในช่วงต้นของการวิจัยได้ทำการศึกษาเบื้องต้นดังแสดงในภาคผนวก ก โดยได้ใช้อุปกรณ์และวิธีการทดลองเหมือนกันกับงานวิจัยของ Wangjiraniran (2001) แต่ได้ติด Tab แบบอยู่กับที่เพิ่มลงไปบนขอบปากเจ็ทที่มีการหมุนควง และทำการเปลี่ยนตำแหน่งการติด Tab ไปโดยรอบปากเจ็ท 4 ตำแหน่งเพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างการไหล ทั้งนี้ผลจากการศึกษาขั้นต้นดังกล่าวได้นำไปเผยแพร่ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16 ภายใต้ชื่ออ้างอิง Sathapornnanon, S. and Bunyajitradulya, A. (2002)

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการเปลี่ยนตำแหน่งที่ติด Tab รูปสามเหลี่ยมไปโดยรอบขอบปากเจ็ท 8 ตำแหน่ง และจะทำการทดลองที่ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่ประมาณ 4.0 ทั้งในกรณีที่เจ็ทมีการหมุนควงที่ค่า Swirl ratio เท่ากับ 0.52 และในกรณีที่เจ็ทไม่มีการหมุนควงอีกด้วย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยให้ความร้อนกับเจ็ทอากาศจนมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าอุณหภูมิของกระแสลมขวางประมาณ 50 องศาเซลเซียส และวัดอุณหภูมิเป็นหน้าตัดตามแนว Downstream (x) โดยใช้ Thermocouple เป็นเครื่องมือวัด ทั้งนี้ก็เพื่อศึกษาคุณลักษณะการผสมเฉพาะหน้าตัด (Local characteristic) ได้แก่ การกระจายตัวของอุณหภูมิและการพัฒนาตัวของ

เจ็ทตามแนวการไหล โดยพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะดังกล่าว คืออัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Smith and Mungal, 1998) ซึ่งนิยามจากรากที่สองของอัตราส่วนระหว่างโมเมนตัมของเจ็ทต่อโมเมนตัมของกระแสลมขวางดังสมการ

$$r = \left(\frac{\rho_j \overline{u}_j^{-2}}{\rho_{cf} \overline{u}_{cf}^{-2}} \right)^{1/2} \tag{1.1}$$

เมื่อ $\overline{u}_j$ คือความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-average) ในแนวแกนของเจ็ท

$\overline{u}_{cf}$ คือความเร็วของกระแสลมขวาง

ρ_j ความหนาแน่นของเจ็ทอากาศ

ρ_{cf} ความหนาแน่นของกระแสลมขวาง

และพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงระดับของการหมุนคือค่า Swirl ratio (Sr) โดยนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ขอบเจ็ทกับความเร็วเฉลี่ยในแนวแกนเจ็ท โดยสำหรับกรณีของท่อหมุนในงานวิจัยนี้ ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ขอบเจ็ทนั้นมีค่าเท่ากับความเร็วในแนวสัมผัสของท่อหมุน ดังนั้นค่า Swirl ratio (Sr) จึงแสดงดังสมการ

$$Sr = \frac{w_R}{\overline{u}_j} = \frac{w_P}{\overline{u}_j} \tag{1.2}$$

เมื่อ w_R คือความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ขอบเจ็ท

w_P คือความแนวในแนวสัมผัสของท่อหมุน

$\overline{u}_j$ คือความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ในแนวแกนเจ็ท

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นความรู้ ความเข้าใจ และข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับผลกระทบของการติด Tab บนขอบปากเจ็ทที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่หมุนควงในกระแสลมขวาง ซึ่งความรู้ความเข้าใจและข้อมูลพื้นฐานที่ได้จะเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับการควบคุมการไหล (Flow control) ของเจ็ทในกระแสลมขวาง โดยการควบคุมโครงสร้าง ตำแหน่งและทิศทางการไหลของเจ็ทในกระแสลมขวาง อันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาทางด้านประสิทธิภาพของการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศในกระบวนการเผาไหม้ การผสมกันของสารเคมีในกระบวนการผลิตต่างๆ หรือทางด้านอากาศพลศาสตร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย