

ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างและการเหนี่ยวนำการผสม ของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Effects of Azimuthal Control Jets on Structure and Entrainment

of a Jet in Crossflow

<u>ธเนศน์ วิทยาประภากร</u>์ และ อศิ บุญจิตราดุลย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร 10330 *ติดต่อ: E-mail: Taned_Witayaprapakorn@hotmail.co.th, เบอร์โทรศัพท์: (662) 218-6645, เบอร์โทรสาร: (662) 218-6645

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างและการเหนี่ยวนำการผสม ของเจ็ตในกระแสลมขวาง การทดลองทำที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลระหว่างเจ็ตหลักต่อกระแสลมขวางเท่ากับ 3.9 โดยทำการทดลองสองกรณีคือ กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเซิงมุมเท่ากับ ±15° การทดลองจะใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry เป็นเครื่องมือวัดความเร็ว และเพื่อให้สามารถหา อัตราการใหลเชิงปริมาตรในส่วนที่เป็นเจ็ตและศึกษาโครงสร้างของเจ็ตเท่านั้น จึงใส่อนุภาคติดตามการใหลในเจ็ต หลักเท่านั้น แต่ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ความเร็วที่ได้จากการวัดจึงมาจากบริเวณที่มีองค์ประกอบของอากาศที่มา จากเจ็ตหลักเท่านั้น ผลการทดลอง พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมจะมีผลทำให้เจ็ตขยายตัวออกด้านข้างมากขึ้น ในขณะ ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ตกับผนังลดลง (เจ็ตต่ำลง) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ควบคุม นอกจากนั้นยังพบว่าการฉีด เจ็ตควบคุมมีผลทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตลดลงเล็กน้อย ที่ตำแหน่ง *x*/*rd* = 0.5 และ 0.75 อย่างไรก็ตามเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปถึง *x*/*rd* = 1 และ 1.5 พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมมีผลทำให้อัตราส่วนการเหนียวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตลดลงเล็กน้อย ที่ดำแหน่ง *x*/*rd* = 1 **ดำหลัก**: เจ็ตในกระแสลมขวาง, เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง, การเหนียวนำกรผสม, อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ

การผสมเชิงปริมาตร, ประสิทธิผลของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

Abstract

Effects of azimuthal control jets on the structure and entrainment of a jet in crossflow (JICF) are investigated. The experiment is conducted with the jet with the effective velocity ratio equal to 3.9. In the controlled case (I15), azimuthal control jets are deployed steadily at the azimuthal position $\pm 15^{\circ}$. Stereoscopic particle image velocimetry (SPIV) is used for velocity field measurements. In order to identify the jet structure and extent in the cross planes and to determine the jet volume flowrate through the cross planes, tracer particles are seeded into the main jet only – and not into the crossflow. As a result, the SPIV registers valid velocity vectors only at the points at which the local fluid volume contains some main jet fluids, and not at the points at which it contains only pure crossflow fluid. The results show that the deployment of the azimuthal control jets results in increase in the spanwise extent of the jet, and decreases in wall separation and jet penetration. In addition, the results show that the application of the control jets results in slight decrease in volumetric entrainment ratio at x/rd = 0.5 and 0.75. However, as



the jet develops further downstream to x/rd = 1 and 1.5, it results in the increase in the volumetric entrainment ratio and the increase in the volumetric entrainment ratio is maximum at 9% at x/rd = 1. *Keywords:* jet in crossflow, azimuthal control jets, entrainment, volumetric entrainment ratio, effectiveness

1. บทนำ

เจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF) คือ กระแสการไหล ของเจ็ตที่ถูกฉีดเข้าไปตั้งฉากกับกระแสลมขวาง ซึ่ง เป็นการไหลพื้นฐานที่พบในงานทางวิศวกรรมเช่น การฉีดเชื้อเพลิงเข้าผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้ การระบายความร้อนบริเวณผิวของใบพัดของแก๊ส เทอร์ไบน์ ด้วยเทคนิค Film cooling การบังคับและ ควบคุมอากาศยานขึ้นลงในแนวดิ่ง (Vertical Short Take-off and Landing (V/STOL)) และการกระจาย ของมลพิษจากปล่องควันตามโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเจ็ตในกระแสลม ขวาง โดยการศึกษาแบ่งออกได้เป็นสองแนวทางหลัก ดังนี้

กลุ่มแรก การศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตในกระแส ลมขวาง เช่น การศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ต (Kamotani and Greber [1]), การศึกษาการผสมกัน ระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวาง (Smith and Mungal [2], Chongsiripinyo *et al.* [3] และ Watakulsin *et al.* [4]), การศึกษาเส้นทางเดินและการผสม (Yuan and Street [5]) และการศึกษาโครงสร้างที่มีปฏิ สัมพันธ์กันระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวาง (Kelso *at el.* [6], Yuan *et al.* [7], Lim *et al.* [8] และ Sau *et al.* [9])

กลุ่มสอง การศึกษาการปรับแต่งและการควบคุม เส้นทางเดินและการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่นการควบคุมด้วย Vortex generator tab (Zaman and Fross [10] และ Bunyajitradulya and Sathapornnanon [11]) การ ควบคุมด้วยวิธีหมุนควง (Swirling) (Wangjiraniran and Bunyajitradulya [12], Bunyajitradulya and Sathapornnanon [11], Limdumrongtum *et al.* [13], Liscinsky et al. [14], Niederhaus et al. [15]
และ Denev et al. [16]) การควบคุมด้วย Pulsing
(M'Closkey et al. [17]) และการควบคุมด้วยเจ็ต
ควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jet)
(Kornsri et al. [18])

ในประเด็นของการศึกษาคุณลักษณะและ โครงสร้าง Smith and Mungal [2] พบว่าถึงแม้ โครงสร้าง Counter – rotating vortex pair (CVP) จะ เป็นกลไกหลักของการผสมใน Far field ก็ตาม แต่ก็ ไม่ทำให้การผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF) นั้น ดีกว่าเจ็ตอิสระ (Free jet) แต่การก่อตัวของ CVP ที่ Near field ต่างหากที่เป็นกลไกสำคัญ ที่ทำให้การผสม ของ JICF นั้นดีกว่า Free jet จากศึกษาของ Yuan et al. [7] และ Bunyajitradulya and Sathapornnanon [11] ชี้แนะว่าการก่อตัวของ Large-scale vortical structure มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับ Flow shear layer ที่พัฒนาตัวรอบปากทางออกของเจ็ต

จากการศึกษาเหล่านี้ Kornsri et al. [18] จึงเกิด แนวคิดที่จะปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ต ในกระแสลมขวาง โดยการกระตุ้นการพัฒนาตัวของ Flow shear layer ที่บริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ต ด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง จากผลการศึกษา Kornsri et al. พบว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณ ด้านหน้า จะทำให้เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตต่ำลง และต่ำสุดเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม ±15° และเมื่อนำผลของ Yuan and Street [5] มาวิเคราะห์ ต่อ ผลการวิเคราะห์ชี้แนะว่าเส้นทางเดินของเจ็ตที่ ต่ำลงชี้แนะถึงการเหนี่ยวนำการผสมที่ดีขึ้น ดังนี้ เมื่อ นำผลของ Kornsri et al. มาพิจารณาประกอบกับการ วิเคราะห์ผลของ Yuan and Street นี้ จะชี้แนะว่าการ สุดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง ±15° น่าจะทำให้การ เหนี่ยวนำการผสมดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ JICF **TSF-2001**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27 👖 16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี



Crossflow, without tracer particles



รูปที่ 1. ชุดการทดลองและรูปแบบการติดตั้ง SPIV

อนึ่ง งานวิจัยนี้ จะนิยามบริเวณที่เป็นเจ็ตว่าเป็น บริเวณที่มีองค์ประกอบของอากาศที่มาจากเจ็ตหลัก เท่านั้น

เทคนิคและหลักการในการประเมินหา อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

การทดลองประกอบด้วยอุโมงค์ลมซึ่งมีหน้าที่ สร้างกระแสลมขวาง (Crossflow) ภายใต้สภาวะ ความเร็วที่สม่ำเสมอ ณ. บริเวณหน้าตัดทดสอบ (Test section) เจ็ตหลัก (Main jet) จะถูกฉีดเข้าไปตั้งฉาก กับกระแสลมขวาง ดังรูปที่ 1 ซึ่งเจ็ตหลักจะมีการใส่ อนุภาคติดตามการไหลและใช้ SPIV เพื่อวัดความเร็ว 2.1. เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเพื่อระบุ บริเวณที่เป็นเจ็ตเท่านั้น

ในการทดลองวัดความเร็วโดย PIV โดยทั่วไปนั้น ทั้งเจ็ตหลักและกระแสลมขวางจะถูกใส่อนุภาคติดตาม การไหลทั้งสองส่วน ซึ่งจะมีข้อดีคือ สามารถแสดง สนามความเร็วได้อย่างต่อเนื่อง จากบริเวณที่เป็นเจ็ต สู่บริเวณที่เป็นกระแสลมขวางดังแสดงในรูปที่ 2 ก อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้มีความต้องการหาอัตรา

อย่างไรก็ตาม ข้อวิเคราะห์ข้างต้นนี้เป็นเพียงผล การทำนายทางคณิตศาสตร์เท่านั้น จึงเกิดเป็น แรงจูงใจและวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ กล่าวคือ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะประเมินความมี ประสิทธิผลของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำ การผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยใช้เครื่อง Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ในการวัดความเร็ว และเพื่อให้สามารถหาอัตราการ ใหลเชิงปริมาตรในส่วนที่เป็นเจ็ตและศึกษาโครงสร้าง ในส่วนเฉพาะของเจ็ตเท่านั้น จึงใส่อนุภาคติดตามการ ใหลในเจ็ตหลักเท่านั้น แต่ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ดังนี้ จึงทำให้สามารถแยกแยะบริเวณที่เป็นเจ็ตและกระแส ลมขวางออกจากกันได้ และความเร็วที่วัดได้จึงเป็น ้ความเร็วในบริเวณที่มีองค์ประกอบของอากาศที่มา จากเจ็ตหลักเท่านั้น ดังนี้ จึงสามารถนำความเร็ว ดังกล่าวมาหากัตราการไหลเชิงปริมาตรในส่วนของ เจ็ตและอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ของเจ็ตได้ ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดในส่วนต่อไป

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27 N 16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี



รูปที่ 2. ตัวอย่างสนามความเร็วบนระนาบ y - z ที่วัดได้จาก SPIV (ไม่ได้แสดงผลของ V_x) เมื่อ ก) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตหลักและในกระแสลมขวาง ข) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักเท่านั้น

การไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตและอัตราส่วนการ เหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ต ซึ่งมีความ จำเป็นที่จะต้องหาความเร็วในบริเวณที่เป็นเจ็ตเท่านั้น การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนเจ็ตหลักและ กระแสลมขวางจึงไม่เหมาะสม เนื่องจากจะทำให้ไม่ สามารถแยกแยะบริเวณเจ็ตและบริเวณกระแสลม ขวางออกจากกันได้อย่างชัดเจน ในงานวิจัยนี้จึงใส่ อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักเท่านั้น แต่ จะไม่ใส่ในกระแสลมขวาง จึงทำให้สนามความเร็วที่วัด ได้ด้วย SPIV เป็นสนามความเร็วในบริเวณเจ็ตเท่านั้น ส่วนความเร็วในบริเวณกระแสลมขวาง SPIV จะวัดได้ ว่ามีค่าความเร็วเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่มีอนุภาค ติดตามการไหลอยู่ ดังแสดงในรูป 2ข

2.2. การประเมินหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการ ผสมเชิงปริมาตร

อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่ ระนาบตั้งฉากกับกระแสลมขวาง ณ. ตำแหน่ง x และ เวลาใดๆ นิยามเป็น

$$E = \frac{Q_j}{Q_o} \tag{1}$$

เมื่อ Q_j คือ อัตราการใหลเชิงปริมาตรในบริเวณของ เจ็ตที่ผ่านระนาบตั้งฉากกับกระแสลมขวาง ณ. ตำแหน่ง x และเวลาใดๆ, Q_o คือ อัตราการไหลเชิง ปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ต โดยที่ Q_j สามารถหา ได้จาก

$$Q_j(x,t) = \int_{A_j(x,t)} \vec{V_x(x,t)} dA$$
(2)

เมื่อ V_x คือ ความเร็วตามแนวแกน x, A_j(x,t) คือ พื้นที่ของเจ็ต โดยระบบแกนพิกัดมีจุดกำเนิดอยู่ที่ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของปากทางออกของเจ็ตหลัก (ดังรูปที่ 1) และให้แกน x มีทิศทางตามกระแสลม ขวาง, y มีทิศทางตามทิศทางความเร็วของเจ็ตหลัก ที่ปากทางออก และ z มีทิศทางตามกฏมือขวา

สมการที่ 2 เป็นการอินทิเกรตสนามความเร็ว V_x ในบริเวณที่เป็นเจ็ตเท่านั้น ซึ่งในการคำนวณ ถ้า ความเร็วที่วัดได้ด้วย SPIV ในบริเวณที่เป็นกระแสลม ขวางไม่เป็นศูนย์ (ดังรูปที่ 2ก) จะทำให้ต้องกำหนด ขอบเขตของเจ็ตขึ้นมาก่อน ซึ่งการกำหนดขอบเขต ของเจ็ตนี้จะมีความยุ่งยากซับซ้อนและมีความไม่ แน่นอนในนิยาม (arbitrariness) ในระดับหนึ่ง แต่ด้วย เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต หลักอย่างเดียวดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้ความเร็ว V_x ในบริเวณกระแสลมขวางที่วัดได้จาก SPIV จะมีค่า เป็นศูนย์ ดังนี้เมื่อประยุกต์สมการที่ (2) ใช้กับค่า ความเร็วที่วัดได้ด้วย SPIV ด้วยเทคนิคการใส่อนุภาค

16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี

ดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้สามารถเขียนสมการที่ 2 ใหม่ ได้เป็น

$$Q_{j}(x,t) = \int_{A_{j}(x,t)} V_{x}(\vec{x},t) dA = \int_{A} V_{x,j}(\vec{x},t) dA \quad (3)$$

เมื่อ V_{x,j} คือ ความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน x ซึ่งมี ค่าเป็นศูนย์ เมื่อจุดความเร็วอยู่ในบริเวณของกระแส ลมขวาง และ A คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดซึ่งรวมถึง บริเวณที่เป็นของเจ็ตและกระแสลมขวาง

อนึ่ง เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะ ในเจ็ตหลักดังกล่าวข้างต้น นอกเหนือจากจะทำให้ สามารถกำหนดบริเวณของเจ็ต (A_j) ได้ชัดเจนขึ้น และลดความไม่แน่นอนในการกำหนดขอบเขตของเจ็ต ลงได้แล้ว ในเชิงการคำนวณ Q_j จากสมการที่ 3 จะ คำนวณได้สะดวกมากขึ้นกว่าการคำนวณจากสมการที่ 2 เนื่องจากสามารถอินทิเกรตสนามความเร็ว V_{x,j} (ซึ่งจะมีค่าเป็นศูนย์ในบริเวณกระแสลมขวาง) ไปบน พื้นที่ทั้งหมดซึ่งรวมทั้งพื้นที่ของเจ็ตและกระแสลม ขวางที่วัดได้ด้วย SPIV ได้เลย

เมื่อพิจารณาหาอัตราการใหลเชิงปริมาตรของเจ็ต เฉลี่ยตามเวลาทั้งหมด (\overline{Q}_i) จากสมการที่ 3 จะได้ว่า

$$\overline{Q}_{j}(x,t) = \int_{A} \overline{V}_{x,j}(\vec{x},t) dA$$
(4)

เมื่อ $\overline{V}_{x,j}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตเทียบกับเวลา ทั้งหมด ดังนั้น จึงสามารถหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ การผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตเฉลี่ยเทียบกับเวลา ทั้งหมด (\overline{E}) ได้เป็น

$$E = \frac{\overline{Q}_j}{Q_o} \tag{5}$$

เมื่อ \overline{Q}_{j} สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4 อนึ่ง เพื่อความสะดวกจะละเครื่องหมาย โดยให้เข้าใจว่า $E = Q_{j}/Q_{o}$ หมายถึงปริมาณเฉลี่ยเทียบกับเวลา ทั้งหมดตามสมการที่ 5 อนึ่ง ในการคำนวณ Q_j จากผลการวัดด้วย SPIV ซึ่งจะมีจำนวนเวกเตอร์จำกัดจะคำนวณจาก

$$Q_{j} = \sum_{ii} \left(\overline{V}_{ij} \Delta A \right) \tag{6}$$

โดยที่ \overline{V}_{ij} คือความเร็วเฉลี่ยเทียบกับเวลาทั้งหมดที่ ตำแหน่ง *ij* บนเมตริกซ์ของสนามความเร็วที่วัดได้, ΔA คือพื้นที่ของแต่ละอิลิเมนต์ของจุดความเร็ว *ij* ซึ่งในการทดลองนี้จะมีค่าสม่ำเสมอเท่ากันหมดทุกอิลิ เมนต์

3. การทดลอง

3.1. ชุดทดลอง

ชุดทดลองในงานวิจัยนี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัย พลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยชุดทดลองจะมีความ คล้ายคลึงกับชุดทดลองของ Kornsri *et al.* [18] ซึ่งจะ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ

อุโมงค์ลมทำหน้าที่สร้างกระแสลมขวาง ซึ่งมี ขนาดหน้าตัดทดสอบขนาด 50 × 50 ตาราง เซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร

เจ็ตหลักมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (*d*) เท่ากับ 22.5 มิลลิเมตร และส่วนของท่อตรงก่อนออกสู่ปาก ทางออกของเจ็ตมีความยาว 44*d* เพื่อทำให้รูปร่าง ความเร็ว (Velocity Profile) ของเจ็ตที่ปากทางออก เป็นแบบพัฒนาตัวเต็มที่ (Fully developed) โดย อากาศจะถูกดูดจากบรรยากาศของห้องผ่าน Blower และมีการติดตั้ง Six-Jet Atomizer (TSI[™] model 9306A) เพื่อทำการฉีดละออง glycerol solution ความ เข้มข้น 5 % โดยปริมาตรที่บริเวณตันทางก่อนอากาศ จะใหลเข้าสู่ท่อเจ็ตหลัก เพื่อทำหน้าที่เป็นอนุภาค ติดตามการไหล การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27 💦



รูปที่ 3. ชุดเจ็ตควบคุม (Kornsri *et al.* [18])

ชุดเจ็ตควบคุม (ซึ่งเหมือนกับ Kornsri *et al.* ทุก ประการ) จะมีรูฉีดเจ็ตควบคุมฉีดตามแนวรัศมีเข้าสู่ เจ็ตหลัก โดยเจ็ตควบคุมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในเท่ากับ 1 มิลลิเมตรและฉีดที่ตำแหน่งระดับต่ำ กว่าปากทางออกของเจ็ตหลัก 3 มิลลิเมตร ในการฉีด เจ็ตควบคุมจะฉีด 2 ตัวที่มุม ±15° ดังรูปที่ 3 การวัด และควบคุมอัตราการใหลของเจ็ตควบคุมจะใช้ชุด rotameter และวาล์ว โดยเฉพาะกับเจ็ตควบคุมแต่ละ ตัว (ดังรูปที่ 1)

3.2. Stereoscopic Particle Image Velocimetry

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ระบบ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ของบริษัท TSI ซึ่งประกอบด้วยเลเซอร์ Nd:YAG ยี่ห้อ New Wave™ (model Solo 200XT) มีกำลังสูงสุด 200 mJ/pulse ที่ ้ความยาวคลื่น 532 nm โดยลำแสงเลเซอร์จาก Laser จะถูกส่งผ่านแขนส่งต่อลำแสงเลเซอร์ (Laser Light Arm, model 610015) ที่ปากทางออกของแขนส่งต่อ ลำแสงเลเซอร์จะต่อกับชุดเลนส์สร้างแผ่นระนาบ เลเซอร์ (Light sheet optics, model 610021-SIL, -25 mm cylindrical and +500 mm spherical) โดย ้ลำแสงเลเซอร์จะออกมาในลักษณะเป็นแผ่นระนาบ ดัง แสดงในรูปที่ 1 ระนาบแสงเลเซอร์ (Laser sheet) จะ

16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี ให้แสงสว่างแก่ละออง glycerol solution ซึ่งทำหน้าที่ เป็นอนุภาคติดตามการใหลในเจ็ตหลัก ซึ่งละออง glycerol solution จะกระเจิงแสงออกมาเมื่อแสง เลเซอร์ตกกระทบ ภาพการกระเจิงแสงจะถูกบันทึก โดยกล้อง CCD (PowerView Plus11MP, model 630062) ที่มีความละเอียด 4008 พิกเซล × 2672 พิก เซล, ขนาดพิกเซล 9×9 ไมโครเมตร², ขนาด CCD 36.07 \times 24.05 มม², และไดนามิกเรนจ์ 12 บิท จำนวน สองตัว ซึ่งแต่ละตัวจะติดตั้งด้วยเลนส์ Tokina 100 mm f2.8D Macro โดยที่จะมีชุดควบคุมส่วนกลาง (synchronizer, model 610035) ทำหน้าที่ประสาน ระบบกล้อง, แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ และ คอมพิวเตอร์ให้ทำงานสัมพันธ์กัน สำหรับการ บันทึกภาพ จะบันทึกภาพด้วยความถี่ 2.07 Hz เพื่อให้ได้สนามความเร็วจำนวน 2,000 สนาม (2,000 คู่ภาพ) โดยจะใช้ซอฟท์แวร์ TSI[™] Insight 4G ทำการ ประมวลผลเพื่อหาเวกเตอร์ความเร็วจากคู่ภาพ ในการ ประมวลผลจะใช้ Interrogation area เริ่มต้นเท่ากับ

64 พิกเซล × 64 พิกเซล และสุดท้ายเท่ากับ 32 พิก

เซล × 32 พิกเซล ซึ่ง Interrogation area จะ

Overlap กันที่ 50 % Spatial resolution ของสนาม

้ความเร็วที่ได้จะมีขนาดตั้งแต่ 1.09 ×1.09 มม² ที่

x/rd = 0.5 จนถึง 1.27 × 1.27 มม² ที่ x/rd = 1.5ทุกกรณี จะมีสนามเวคเตอร์ความเร็วของเจ็ตที่วัดได้

3.3. สภาวะการทดลอง

ไม่ต่ำกว่า 10.000 เวกเตอร์

การทดลองทำที่ความเฉลี่ยที่ปากทางออกของเจ็ต (V_a) เท่ากับ 16.9 ± 0.8 เมตรต่อวินาที ความเร็ว กระแสลมขวาง (V_{ct}) เท่ากับ 4.3 ± 0.2 เมตรต่อ และอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลระหว่าง วินาที เจ็ตหลักต่อกระแสลมขวาง ($r=\sqrt{
ho_{j}V_{o}^{2}}/
ho_{cf}V_{cf}^{2}$. เมื่อ ho_{j} และ ho_{cf} คือ ความหนาแน่นของเจ็ตและ กระแสลมขวางตามลำดับ) เท่ากับ 3.9 ± 0.3 ทำการ ทดลองในกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีที่ ฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ ±15° (I15) ที่ อัตราส่วนอัตราการใหลเชิงมวลระหว่างเจ็ตควบคุม รวมสองตัวต่อเจ็ตหลักเท่ากับ 2 %, เรโนลส์นัมเบอร์



รูปที่ 4. รูปร่างความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ต

ของกระแสลมขวาง ($\mathrm{Re}_{d} = V_{d} d / v_{d}$, v_{d} คือ ความหนึดคิเนเมติกของกระแสลมขวาง) เท่ากับ 5,900 และรูปร่างความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออกเมื่อ ไม่มีกระแสลมขวางเป็นแบบพัฒนาตัวเต็มที่แบบ ปั้นป่วน ผลการวัดรูปร่างความเร็วเฉลี่ยของเจ็ต เริ่มต้นแสดงในรูปที่ 4 พบว่ารูปร่างความเร็ว ใกล้เคียงกับรูปร่างสมการ Power law ที่มี n = 8 สำหรับการวัดความเร็วของเจ็ตด้วย SPIV จะวัดบน ระนาบหน้าตัดขวาง (ระนาบ yz) ที่ตำแหน่ง x/rd = 0.5, 0.75, 0.1 และ 1.5 ในการทดลองจะมีการใส่ อนุภาค glycerol solution 5 % เพื่อใช้เป็นอนุภาค ติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักเท่านั้น

4. ผลการทดลอง

4.1. การประเมินการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยและ อัตราการไหลเชิงปริมาตร

เพื่อประเมินว่าในการเก็บข้อมูลเพื่อมาประมวลผล ควรใช้จำนวนสนามความเร็วเท่าไร จึงได้เก็บข้อมูล สนามความเร็วเบื้องต้น 2,000 สนาม (ที่ความถี่ 2.07 Hz) และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้า ของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด (*e*,) ซึ่งนิยามเป็น

$$e_{v} = \frac{\sum_{ij} \left| \overline{V_{ij}}(N_{2}) - \overline{V_{ij}}(N_{1}) \right|}{M_{1}}$$
(7)



รูปที่ 5. การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ย



รูปที่ 6. การลู่เข้าของอัตราการไหลเชิงปริมาตร

เมื่อ $\overline{V}_{ij}(N)$ คือ ความเร็วเฉลี่ยเมื่อใช้สนามความเร็ว N สนาม, M_1 คือจำนวนจุดทั้งหมดที่มีความเร็วเจ็ต ของ N_1 สนาม ซึ่ง \overline{V}_{ij} คำนวณได้จาก

$$\overline{V}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} V_{ij,n}$$
(8)

โดยที่ V_{ij,n} คือความเร็วที่ตำแหน่ง *ij* ณ. เวลา *n* และ N คือจำนวนสนามความเร็วทั้งหมดภายในเวลา ที่เก็บข้อมูล

รูปที่ 5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้า ของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด (e,) แปรตามจำนวน N₂ สนาม พบว่าเมื่อเฉลี่ยสนามความเร็วมากกว่า 1,600 สนามขึ้นไป ทุกกรณี e, จะมีค่าไม่เกิน 0.02 เมตรต่อ วินาที คิดเป็น 0.5 % ของความเร็วกระแสลมขวาง

การประเมินการลู่เข้าของอัตราการไหลเชิง ปริมาตรของเจ็ต จะประเมินจากเปอร์เซ็นต์ความ

16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี **2013** (V/V_{cf} = $\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}/V_{cf}$) พบว่าทั้งกรณี JICF และ I15 นั้นเมื่อเข้าใกล้ขอบเจ็ตความเร็วเฉลี่ย ไร้มิตินี้จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งผลการกระจายตัวของ ความเร็วเฉลี่ยนี้จะแตกต่างจากผลการทดลองอื่นที่ใส่ อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตหลักและในกระแสลม ขวาง ในกรณีหลังนี้ จะพบว่าเมื่อเข้าใกล้ขอบเจ็ต ผลรวมความเร็วเฉลี่ยจะมีค่าเข้าใกล้ความเร็วของ กระแสลมขวางหรือ ความเร็วเฉลี่ยไร้มิตินี้จะมีค่าเข้า



รูปที่ 7. การกระจายตัวของผลรวมความเร็ว เฉลี่ยต่อความเร็วกระแสลมขวาง V/V_{cf} ที่ตำแหน่ง x/rd = 0.5

คลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของอัตราการไหลเชิง ปริมาตรของเจ็ต (e_o) ซึ่งนิยามเป็น

$$e_{Q} = \left| \frac{Q_{j}(N_{2}) - Q_{j}(N_{1})}{Q_{j}(N_{1})} \right| \times 100\%$$
(9)

เมื่อ $Q_j(N)$ คือ อัตราการไหลของเจ็ตเฉลี่ยเมื่อใช้ สนามความเร็ว N สนาม ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 6

รูปที่ 6 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ต (e₀) แปรตาม จำนวน N₂ สนาม พบว่าเมื่อเฉลี่ยสนามความเร็ว มากกว่า 1,600 สนามขึ้นไป ทุกกรณีจะมี e₀ ไม่เกิน 0.3 %

ด้วยผลข้างต้น ในงานวิจัยนี้ การคำนวณปริมาณ เฉลี่ยทั้งหมดจะใช้จำนวนสนามความเร็ว 2,000 สนาม 4.2. ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตที่ใกล้ขอบเจ็ต

รูปที่ 7 แสดงถึงการกระจายตัวของผลรวม ความเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสลมขวาง ใกล้หนึ่ง ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ ใน กรณีของการทดลองนี้ ซึ่งใส่อนุภาคติดตามการไหลใน เจ็ตหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง จะพบว่า เมื่อ เดินทางจากใจกลางของเจ็ตไปสู่ขอบเจ็ต ความถี่เชิง เวลาในการที่จะพบเจ็ต (หรือพบอนุภาคติดตามการ ไหล) ณ ตำแหน่งใด ๆ ต่อช่วงเวลาทั้งหมดที่เฉลี่ยจะ ลดลง (less frequent occurrence of jet) และเข้าใกล้ ศูนย์เมื่อเข้าใกล้ขอบเจ็ต ทำให้เมื่อเฉลี่ยความเร็วของ เจ็ตไปตามเวลาทั้งหมด ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตเทียบ กับเวลาทั้งหมดจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเข้าใกล้ขอบ เจ็ต ถึงแม้ว่าความเร็วขณะใด ๆของเจ็ตที่บริเวณขอบ เจ็ตอาจมีค่าสูงก็ตาม ดังนี้การกระจายตัวของความเร็ว เฉลี่ยของเจ็ตนี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความ น่าจะเป็นเชิงเวลาของการพบเจ็ตที่จุดใด ๆ ซึ่งจะ กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.3. ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ

ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต ณ จุดใด ๆ (*φ_{ij}*) นิยามเป็น

$$\phi_{ij} = \frac{(N_V)_{ij}}{N} \tag{10}$$

เมื่อ $(N_V)_{ij}$ คือระยะเวลาที่พบเจ็ต (หรือพบอนุภาค ติดตามการไหล, ความเร็วเจ็ตไม่เป็นศูนย์สัมบูรณ์) ณ จุด *ij* และ N คือระยะเวลาที่เฉลี่ยทั้งหมด

รูปที่ 8 แสดงการกระจายตัวของความน่าจะเป็น เชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ จากผลการทดลอง พบว่า ทั้งกรณี JICF และ I15 จะมีความน่าจะเป็นที่จะ พบเจ็ตมากบริเวณตรงกลางของเจ็ต โดยความน่าจะ เป็นของการพบเจ็ตที่มากกว่า 0.5 จะมีพื้นที่ประมาณ



รูปที่ 8. การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเซิง เวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ ที่ตำแหน่ง x/rd = 0.5

37% และ 30% ของพื้นที่ทั้งหมดของเจ็ต สำหรับกรณี JICF และ I15 ตามลำดับ เมื่อเข้าใกล้ขอบเจ็ตความ น่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งเป็นผลทำ ให้ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตที่ใกล้ขอบเจ็ตในรูปที่ 7 มีค่า เข้าใกล้ศูนย์ด้วย

4.4. ผลของเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างความเร็วของ เจ็ต

รูปที่ 9 แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ย ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง $(V_x/V_{cf},$ แสดงด้วยเส้น contour) และเวกเตอร์ ความเร็วบนระนาบต่อความเร็วกระแสลมขวาง $(\vec{V}_{yz}/V_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/V_{cf})$ ผลการทดลองพบว่า ใน กรณี JICF ที่ตำแหน่ง x/rd = 0.5 การกระจายตัว ของ V_x/V_{cf} จะมีรูปร่างเป็นพระจันทร์เสี้ยว โดยมี Local Peak เป็นรูปร่างเป็นพระจันทร์ซึ่งอยู่สูงกว่าจุด หมุนของ $ec{V}_{yz}/V_{cf}$ ทางด้านล่าง

เมื่อฉีดเจ็ตควบคุม (กรณี I15) ที่ตำแหน่ง x/rd = 0.5 และ 1 พบว่าผลของเจ็ตควบคุมจะทำให้ V_x/V_{cf} แผ่กระจายตัวออกด้านข้างมากขึ้นและระยะห่าง ระหว่างเจ็ตกับพื้นจะน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kornsri *et al.* โดย Local Peak จะแยกออกเป็นสองลูกซ้าย-ขวา อย่างชัดเจน บริเวณที่มีความเร็ว V_x/V_{cf} สูงด้านบนที่ เคยพบในกรณี JICF จะหายไป และ Local Peak ของ V_x/V_{cf} จะอยู่สูงกว่าจุดหมุนของ \vec{V}_{yz}/V_{cf} ซึ่งอยู่ ทางด้านล่างเช่นเดียวกับกรณี JICF

4.5. ผลของเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสม

รูปที่ 10 แสดงอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม เชิงปริมาตรที่เฉลี่ยตามเวลาทั้งหมด (*E*) พบว่ากรณี I15 จะมี *E* ที่น้อยกว่าว่ากรณี JICF ในช่วง x/rd =0.5 และ 0.75 แต่จะมากกว่าในช่วงในช่วง x/rd = 1 และ 1.5 โดยอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของทั้ง สองกรณีจะมีค่าประมาณ 3 ที่ x/rd = 0.5 และ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงประมาณ 5.5 ที่ x/rd =1.5

เมื่อนำผลของ E ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลของ Yuan and Street [5] พบว่า กรณี JICF ของงานวิจัย นี้จะมีค่า E ที่น้อยกว่าของ Yuan and Street ประมาณ 25% ที่ตำแหน่ง x/rd =1 และ 1.5 อนึ่ง Yuan and Street ศึกษา JICF ด้วยแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์โดยใช้ Large-eddy Simulation สำหรับ JICF ที่มี r เท่ากับ 3.3 และ Re_{cf} = 2,100 และ Yuan and Street นิยามขอบเจ็ตเพื่อนำมาหาอัตรา การไหลของเจ็ตจากระดับของความเข้มข้นของ ปริมาณสเกล่า (scalar concentration) การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27 👖 16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี





JICF

รูปที่ 9. การกระจายตัวของความเร็วไร้มิติโดยเส้น Contour แสดง $V_{_x}/V_{_{cf}}$ และเวกเตอร์แสดง $ec{V}_{_{yz}}/V_{_{cf}}$

เพื่อประเมินประสิทธิผลของการใช้เจ็ตควบคุมต่อ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ต จึงนิยามประสิทธิผลนี้เป็น



รูปที่ 10. อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

 $r_e = E_{I15}/E_{JICF} = Q_{I15}/Q_{JICF}$ (11) รูปที่ 11 แสดงประสิทธิผลของการใช้เจ็ตควบคุม กรณี I15 พบว่า r_e มีค่าเท่ากับ 0.99 <u>+</u> 0.03, 0.97 <u>+</u> 0.04, 1.09 <u>+</u> 0.04 และ 1.04 <u>+</u> 0.04 ที่ตำแหน่ง x/rd = 0.5, 0.75, 1 และ 1.5 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็น ว่าการฉีดเจ็ตควบคุมส่งผลให้เจ็ตมีการเหนี่ยวนำการ ผสมลดลง 1% และ 3% ที่ตำแหน่ง x/rd = 0.5 และ 0.75 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปถึง x/rd = 1 และ 1.5 การฉีดเจ็ตควบคุมมีผลทำให้การ เหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้น 9% และ 4% ตามลำดับ

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอ บวงต่อโครงสร้างและการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27 N 16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี



รูปที่ 11. ประสิทธิผลของการใช้เจ็ตควบคุมที่ <u>+</u> 15[°] ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการ ผสมเชิงปริมาตร

ในกระแสลมขวาง ในการทดลองได้วัดความเร็วบน ระนาบหน้าตัดตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส ลมขวางด้วย Stereoscopic Particle Image Velocimetry ที่มีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะ ในส่วนของเจ็ตหลักเท่านั้น ความเร็วที่ได้จากการวัด จึงมาจากส่วนที่เป็นเจ็ตเท่านั้น การทดลองทำที่ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลระหว่างเจ็ตหลักต่อ กระแสลมขวางเท่ากับ 3.9 โดยทำการทดลองสอง กรณีคือ กรณีไม่ควบคุม (JICF) และกรณีควบคุมโดย การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ ±15° (I15) ที่อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลระหว่างเจ็ตควบคุม รวมต่อเจ็ตหลักเท่ากับ 2 % และเรโนลส์นัมเบอร์ของ กระแสลมขวางเท่ากับ 5,900

ผลการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างการไหลหลัก พบว่ามีผลทำให้เจ็ตขยายตัวออกด้านข้างมากขึ้น ในขณะที่ระยะห่างระหว่างเจ็ตกับผนังจะลดลง (เจ็ต ด่ำลง) สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kornsri *et al*.

ผลการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสม พบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมมีผลทำให้การเหนี่ยวนำการ ผสมลดลง 1% และ 3% ที่ตำแหน่ง *x/rd* = 0.5 และ 0.75 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปถึง *x/rd* = 1 และ 1.5 การฉีดเจ็ตควบคุมมีผลทำให้การ เหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้น 9% และ 4% ตามลำดับ ในเชิงประยุกต์ ผลการทดลองชี้แนะว่า ในการ ออกแบบอุปกรณ์หัวฉีดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อาจ ออกแบบโดยใช้เจ็ตควบคุม และเลือกพารามิเตอร์ของ หัวฉีดให้เหมาะสม เพื่อให้การผสมเสร็จสิ้นในช่วง ระยะทาง 1-1.5*rd*

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุน โครงการวิจัย เงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล ประจำปี งบประมาณ พ.ศ. 2556-2557 (งบประมาณแผ่นดิน) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สัญญาเลขที่ GRB_APS_ ๒๑_๕๖_๒๑_๐๙ และผู้วิจัยขอขอบคุณบุคคลซึ่งมี ส่วนช่วยให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงดังต่อไปนี้ นายชนัตถ์ ดูร์พิพัฒน์, นายชยากร วิโรจนกูฏ, นางสาว เอษณีย์ เทวานุรักษ์, นายอภิเชฏฐ์ ศรีเมฆารัตน์, นาย ศุภกร สุวรรณ และ นางสาว ธิดา คริสทีน เพีชรศิริ

7. เอกสารอ้างอิง

- Kamotani, Y., and Greber, I., 1972,
 "Experiments on a turbulent jet in a crossflow," AIAA J., Vol. 10, No. 11, pp. 1425-1429.
- [2] Smith, S. H., and Mungal, M. G., 1998, "Mixing, structure and scaling of the jet in crossflow," J. Fluid Mech., Vol. 357, pp. 83-122.
- [3] Chongsiripinyo, K., Limdumrongtum, Ρ., Pimpin, A., and Bunyajitradulya, A., 2008, "Investigation of mixing structure in the near field of a jet in crossflow," Proceedings of The Twenty-Second Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 15-17 October 2008, University, Thammasat Rangsit Campus, Pathum Thani, Thailand.
- [4] Watakulsin, P., Woraboot, G.,
 Saengnumpong, W., Sangnimnuan, A.,
 Pimpin, A., and Bunyajitradulya, A., 2010,

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27 N

16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี



"Effect of Effective Velocity Ratio on the Near-Field Mixing Structures of a Jet in Crossflow," The First TSME International Conference on Mechanical Engineering, 20-22 October, 2010, Ubon Ratchathani, Thailand.

- [5] Yuan, L. L. and Street, R. L., 1998, "Trajectory and entrainment of a round jet incrossflow," Physics of Fluids, Vol. 10, No. 9, pp. 2323-2335.
- [6] Kelso, R. M., Lim, T. T., and Perry, A. E., 1998, "New Experimental Observations of Vortical Motions in Transverse Jets," Phys. Fluids, Vol. 10, No. 9, pp. 2427-2429.
- [7] Yuan, L. L., Street, R. L., and Ferziger, J. H., 1999, "Large-eddy simulations of a round jet in crossflow," J. Fluid Mech., Vol. 379, pp. 71-104.
- [8] Lim, T. T., New, T. H., and Lou, S. C., 2001,
 "On the development of large-scale structures of a jet normal to a crossflow," Phys. Fluids, Vol. 13, No. 3, pp. 770-775.
- [9] Sau, A., Sheu, T. W. H., Hwang, R. R., and Yang,W. C., 2004, "Three-dimensional simulation of square jets in cross-flow," Phys. Rev. E, Vol. 69, CID066302.
- [10] Zaman, K. B. M. Q., and Foss, J. K., 1997, "The effect of vortex generators on a jet in a cross-flow," Phys. Fluids, Vol.9, No. 1, pp. 106-114.
- [11] Bunyajitradulya, A., and Sathapornnanon, S., 2005, "Sensitivity to tab disturbance of the mean flow structure of nonswirling jet and swirling jet in crossflow", Phys. Fluids 17, 045102.
- [12] Wangjiraniran, W. and Bunyajitradulya, A., 2001, "Temperature distribution in non-zero

circulation swirling jet in crossflow," Proceedings of The Fifteenth Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, November 28-30, 2001, Bangkok, Thailand, Vol. 1, pp. TF104-TF116.

- [13] Limdumrongtum, P., Chongsiripinyo, K., Nontiwatwanich,P., Pimpin, A. and Bunyajitradulya, A., "Investigation of Mixing Structure in The Near Field of Swirling Jets in Crossflow," The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand November 4 – 7, 2009, Chiang Mai.
- [14] Liscinsky, D. S., True, B., and. Holdeman, J.
 D., "Effects of initial conditions on a single jet in crossflow," Proceedings of the 31st Joint Propulsion Conference, San Diego, 10–12 July 1995, AIAA Paper No. 95-2998, 1995.
- [15] Niederhaus, C. E., Champagne, F. H., and Jacobs, J. W., 1997, "Scalar transport in a swirling transverse jet," AIAA J., Vol. 35, No. 11, pp. 1697-1704.
- [16] Denev, J. A., Fröhlich, J., and Bockhorn, H., 2009, "Large eddy simulation of a swirling transverse jet into a crossflow with investigation of scalar transport," Phys. Fluids 21, 015101.
- [17] M'Closkey, R. T., King, J. M., Cortelezzi, L., and Karagozian, A. R., 2002, "The actively controlled jet in Crossflow," J. Fluid Mech., Vol.452, pp. 325-335.
- [18] Kornsri, P., Pimpin, A., and Bunyajitradulya, A., "A Scheme for The Manipulation and Control of A Jet in Crossflow: The Use of Azimuthal Control Jets," The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand November 4 – 7, 2009, Chiang Mai.