

ผลของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการปรับแต่งควบคุมการเหนี่ยวนำ
การผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Effects of Azimuthal Position of Azimuthal Control Jets on Manipulation and
Control of Entrainment of Jets in Crossflow

เชาวน์วัฒน์ เต็กฮวด และ อติ บุญจิตราดุลย์*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

*ติดต่อ: asi.b@chula.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 02 218 6645, เบอร์โทรสาร: 02 218 6645

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง ในการนี้ เพื่อให้สามารถประเมินอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ได้โดยตรงการทดลองนี้จึงใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับการใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตหลักเท่านั้น แต่ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง การทดลองทำให้อัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพของเจ็ตต่อกระแสลมขวาง (r) เท่ากับ 4 ในการฉีดเจ็ตควบคุมจะทำการฉีดเจ็ตควบคุมเป็นคู่ที่ตำแหน่งเชิงมุม ($\pm \theta$) ต่างๆตามแนวเส้นรอบวงที่อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) เท่ากับ 0.04 (หรือ 4%) ผลการทดลองพบว่า 1) การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้านหน้าลม (windward, $\theta < 90^\circ$) จะไปยับยั้ง (suppress) การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง ทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตในกระแสลมขวางนั้นลดลงจากกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ตควบคุม 2) ในทางตรงข้าม การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้านท้ายลม (leeward, $\theta > 90^\circ$) จะไปส่งเสริม (promote) การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง ทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตในกระแสลมขวางนั้นเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ตควบคุม 3) เมื่อเพิ่มตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมจากทางด้าน windward ($\pm 15^\circ$) ไปทางด้าน leeward ($\pm 165^\circ$) อย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตในกระแสลมขวางมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามมุมฉีด

คำหลัก: เจ็ตในกระแสลมขวาง, เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง, การเหนี่ยวนำการผสม, ประสิทธิภาพ

Abstract

Effects of azimuthal position of control jets on entrainment of jets in crossflow (JICF) are investigated. In order to determine the volumetric entrainment ratio (E) directly, Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) with jet-fluid only seeding scheme is employed. The experiments are conducted for a baseline JICF with effective velocity ratio (r) of 4. For the cases of controlled JICF (cJICF), a pair of steady control jets is employed at various azimuthal angles ($\pm \theta$) and at a fixed control jets to main jet mass flowrate ratio of 0.04 (or 4%). The results show the followings. 1) Windward injection ($\theta < 90^\circ$) suppresses entrainment, resulting in the reduction in entrainment of cJICF when compared to JICF. 2) On the contrary, leeward injection ($\theta > 90^\circ$) promotes entrainment, resulting in the increase in entrainment of cJICF when compared to JICF. 3) As the azimuthal position of the control jets changes from extreme windward to extreme leeward, entrainment continuously increases with the azimuthal position.

Keywords: jet in crossflow, azimuthal control jets, entrainment, effectiveness

1. บทนำ

เจ็ตในกระแสลมขวาง (Jet in Crossflow) คือ ลักษณะการไหลเมื่อฉีดเจ็ตเข้าไปปะทะกับกระแสลมขวางในแนวตั้งฉาก เมื่อเจ็ตปะทะกับกระแสลมขวาง จะเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวางทำให้เกิดเป็นโครงสร้างการไหลวอร์เท็กซ์รูปแบบต่างๆขึ้น นอกเหนือจากนั้น เจ็ตและโครงสร้างการไหลของเจ็ตนี้จะเหนี่ยวนำเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมในตัวเจ็ต คุณลักษณะนี้เรียกว่า การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) ซึ่งจะถูกบ่งบอกในเชิงปริมาณด้วย อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Volumetric entrainment ratio, E) นิยามเป็น อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ผ่านหน้าตัดเจ็ตในระนาบขวางที่ตำแหน่งท้ายลมใดๆ (Q_j) ต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรเริ่มต้นของเจ็ตที่ปากทางออกเจ็ต (Q_0), $E = Q_j / Q_0$

เจ็ตในกระแสลมขวางนั้นมีการประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรมต่างๆ เช่น การฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้ การปล่อยควันออกจากปล่องควันซึ่งมีลมพัดผ่าน เป็นต้น ซึ่งในงานทางวิศวกรรมดังกล่าว การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตจะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ดังนั้นแล้วหากสามารถหาเทคนิคในการควบคุมการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางได้อย่างเหมาะสมในสภาวะของภาระต่างๆ กันได้ ก็จะทำให้มีศักยภาพในการออกแบบห้องเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้มากขึ้น สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงภาระที่กว้างขึ้น และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง ดังนั้นจึงมีความพยายามศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเจ็ตในกระแสลมขวางและเทคนิคการควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวางให้มีพฤติกรรมเป็นไปตามต้องการอย่างต่อเนื่อง

ในแง่การควบคุมการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต Witayaprapakorn and Bunyajitradulya [2] และ Witayaprapakorn [3] (ดูประกอบ Bunyajitradulya [4]) ได้ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่ไปกับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลในส่วนของเจ็ตหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง เพื่อหาอัตราการไหลของเจ็ตและอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

(E) โดยตรง โดยได้ศึกษาเกี่ยวกับเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ (r) เท่ากับ 4 และทำการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 15^\circ$ และตำแหน่ง $\pm 135^\circ$ โดยคงค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ที่ 2% พบว่าเมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 135^\circ$ ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) มีค่าสูงกว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 15^\circ$ และกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

ต่อมา Chaikasettin *et al.* [5] ได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพเท่ากับ 4 โดยทำการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 135^\circ$ เพียงตำแหน่งเดียว เนื่องจากเป็นตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมที่งานก่อนหน้าพบว่าทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) มีค่าสูงกว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 15^\circ$ และกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม พบว่า เมื่อเพิ่มการฉีดเจ็ตควบคุมจาก $r_m = 2\%$ เป็น 4% จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม Chaikasettin *et al.* ยังคงศึกษาผลของตำแหน่งของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงเพียงตำแหน่งเดียว เท่านั้น

ต่อมา Wangkiat *et al.* [1] ศึกษาผลของการประยุกต์ใช้เจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมกับเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ (r) สูงขึ้น โดยทำการทดลองฉีดเจ็ตควบคุมกับเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพเท่ากับ 12 ซึ่งเป็นเจ็ตในกระแสลมขวางที่สามารถจัดอยู่ใน High- r flow regime (Smith and Mungal [6], ในขณะที่เจ็ตในกระแสลมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพเท่ากับ 4 เช่นในงานวิจัยนี้สามารถจัดอยู่ใน Low- r flow regime) ในขณะเดียวกันเพื่อให้สามารถประเมินผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมได้ละเอียดและชัดเจนยิ่งขึ้นกว่างานก่อนหน้า จึงทำการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งที่ละเอียดขึ้น ผลการศึกษาพบว่าการกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งด้านหน้าลม (windward) จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม

ของเจ็ตในกระแสมขวางน้อยกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม แต่การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งด้านท้ายลม (leeward) จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม นอกเหนือจากนั้นยังพบว่า เมื่อเพิ่มตำแหน่งมุมฉีดจากด้านหน้าลมไปด้านท้ายลม จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสมขวางมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมมากที่สุดคือ $\pm 165^\circ$ นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบว่า เมื่อเปรียบเทียบเจ็ตในกระแสมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4 และ 12 ใน rd สเกลแล้ว ถึงแม้ว่าเจ็ตในกระแสมขวางที่มี r สูงกว่าคือที่ 12 จะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมที่มากกว่าเจ็ตในกระแสมขวางที่มี r ต่ำกว่าคือที่ 4 แต่การประยุกต์ใช้เจ็ตควบคุมกับเจ็ตในกระแสมขวางที่มี r สูงกว่า จะมีประสิทธิภาพซึ่งวัดด้วยค่าประสิทธิภาพของการฉีดเจ็ตควบคุม (η) ที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการประยุกต์ใช้เจ็ตควบคุมกับเจ็ตในกระแสมขวางที่มี r ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม Wangkiat *et al.* [1] ศึกษาผลของตำแหน่งของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางสำหรับเจ็ตที่อยู่ใน High- r flow regime เท่านั้น

งานวิจัยที่ผ่านมาทำให้เรามีข้อมูล ความรู้ และความเข้าใจเกี่ยวกับเจ็ตในกระแสมขวาง และ โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้เจ็ตควบคุมเพื่อปรับเปลี่ยน ควบคุม และเพิ่ม (หรือลด) การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูล ความรู้ ความเข้าใจ และภาพรวมของการประยุกต์ใช้เจ็ตควบคุมเพื่อปรับเปลี่ยน ควบคุม และเพิ่ม (หรือลด) การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางที่สมบูรณ์ และชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเฉพาะผลของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตที่อยู่ใน Low- r flow regime งานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้น

รอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลใน Low- r flow regime ที่ r เท่ากับ 4

2. หลักการและเทคนิคในการประเมินหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

สำหรับหลักการและเทคนิคในการประเมินหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้หลักการและเทคนิคเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้า (Wangkiat *et al.* [1], Chaikasettin *et al.* [5] และ Bunyajitradulya [4]) กล่าวคือ ใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับการใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวาง เพื่อให้สามารถแยกแยะบริเวณของเจ็ต (Jet-fluid mixture) ออกจากบริเวณกระแสมขวางบริสุทธิ์ได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตเฉลี่ยเทียบกับเวลา $Q_j(x)$ ที่ผ่านหน้าตัดเจ็ตในระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x ใดๆ ได้อย่างชัดเจน และจะนำไปสู่การหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (เฉลี่ยเทียบกับเวลา) E ซึ่งนิยามเป็น

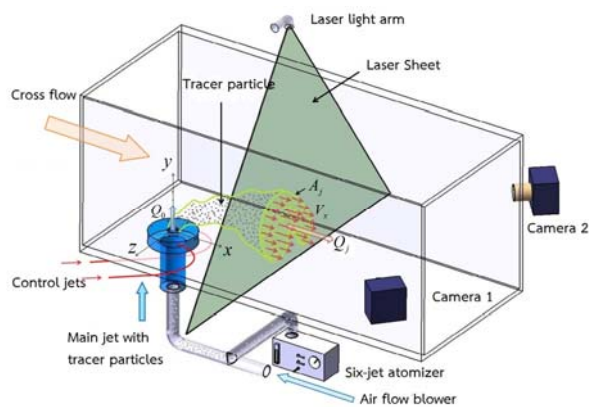
$$E(x) = \frac{Q_j(x)}{Q_0} \quad (1)$$

โดย Q_0 คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ตได้อย่างชัดเจน อนึ่ง ในกรณีฉีดเจ็ตควบคุม Q_0 จะหมายถึงอัตราการไหลเชิงปริมาตรทั้งหมดที่ออกมาจากปากเจ็ตซึ่งรวมอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่มาจากคู่อัดเจ็ตควบคุมด้วย ในงานนี้ผู้อ่านสามารถค้นหารายละเอียดเพิ่มเติมได้จากงานดังกล่าวข้างต้น

3. การทดลอง

3.1. ชุดทดลอง

ชุดทดลองในงานวิจัยนี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยชุดทดลองจะถือเป็นชุดเดียวกับชุดทดลองของ Chaikasettin *et al.* [5] ในรูปที่ 1 แต่มีการ



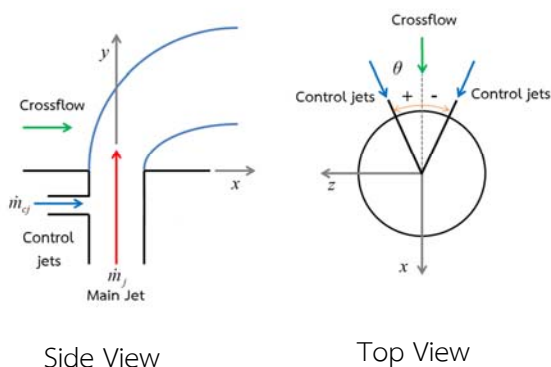
รูปที่ 1 ชุดการทดลองและการติดตั้ง SPIV
(Chaikasetsin *et al.* [18])

ปรับเปลี่ยนชุดเจ็ทหลักและเจ็ทควบคุม โดยชุดทดลองนี้จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังต่อไปนี้

อุโมงค์ลมทำหน้าที่สร้างกระแสลมขวาง เป็นแบบเปิด (open-circuit) และเป่า (Blower type) ซึ่งมีขนาดหน้าตัดทดสอบ 50×50 ตารางเซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร

เจ็ทหลักมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) เท่ากับ 12.57 มิลลิเมตร โดยอากาศจะถูกดูดจากบรรยากาศของห้องผ่าน Blower และมีการติดตั้ง Six-Jet Atomizer เพื่อทำการฉีดสารละลาย glycerol ความเข้มข้น 5% โดยปริมาตรที่บริเวณต้นทางก่อนอากาศจะไหลเข้าสู่ท่อเจ็ทหลัก เพื่อทำหน้าที่เป็นอนุภาคติดตามการไหล ส่วนของท่อเจ็ทหลักจะเป็นท่อตรงยาว $77d$ ก่อนออกจากปากทางออกของเจ็ทเพื่อให้รูปร่างความเร็ว (Velocity Profile) ของเจ็ทที่ปากทางออกเป็นแบบการไหลในท่อแบบปั่นป่วนที่พัฒนาตัวเต็มที่ (Fully developed turbulent pipe flow)

ชุดเจ็ทควบคุม (แสดงเชิงหลักการในรูปที่ 2) จะมีรูป



รูปที่ 2 รูปชุดเจ็ทควบคุม

ฉีดเจ็ทควบคุมตามแนวรัศมีเข้าสู่เจ็ทหลัก โดยเจ็ทควบคุมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และฉีดที่ตำแหน่งระดับต่ำกว่าปากทางออกของเจ็ทหลัก 3 มิลลิเมตร ในการฉีดเจ็ทควบคุมในงานวิจัยนี้จะฉีดแบบคงตัว (steady) เป็นคู่ที่ตำแหน่งเชิงมุมต่างๆกัน

3.2. Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) และการวัดความเร็ว

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ระบบ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ของบริษัท TSI ซึ่งประกอบด้วยเลเซอร์ Nd:YAG ซึ่งมีกำลังสูงสุด 200 mJ/pulse ที่ความยาวคลื่น 532 nm โดยลำแสงเลเซอร์จากเลเซอร์จะถูกส่งผ่านแขนส่งต่อลำแสงเลเซอร์ซึ่งจะต่อกับชุดเลนส์สร้างแผ่นระนาบเลเซอร์ โดยลำแสงเลเซอร์จะออกมาเป็นแผ่นระนาบ ความหนาประมาณ 3 มม ดังแสดงในรูปที่ 1 ระนาบแสงเลเซอร์ (Laser sheet) จะให้แสงสว่างแก่ละออง glycerol solution ซึ่งทำหน้าที่เป็นอนุภาคติดตามการไหล ซึ่งละออง glycerol solution จะกระเจิงแสงออกมาเมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบ ภาพการกระเจิงแสงจะถูกบันทึกโดยกล้อง CCD จำนวนสองตัว โดยแต่ละตัวจะติดตั้งเลนส์ Tokina 100 mm f2.8D Macro สำหรับการบันทึกภาพ จะบันทึกภาพด้วยความถี่ 1.04 Hz เพื่อให้ได้สนามความเร็วจำนวน 1,000 สนาม (1,000 คู่ภาพ) โดยจะใช้ซอฟต์แวร์ TSITM Insight 4G ทำการประมวลผลเพื่อหาเวกเตอร์ความเร็วจากคู่ภาพ Spatial resolution ของสนามความเร็วที่ได้จะมีขนาดตั้งแต่ $0.97 \times 0.97 \text{ มม}^2$ ที่ $x/rd = 0.5$ จนถึง $1.04 \times 1.04 \text{ มม}^2$ ที่ $x/rd = 1.5$ และจะมีสนามเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทที่วัดได้ไม่ต่ำกว่า 10,000 เวกเตอร์

สำหรับการวัดรูปร่างความเร็วเริ่มต้นของเจ็ทหลักที่ปากทางออกของเจ็ท จะวัดขณะปิดกระแสลมขวาง โดยใช้ Pitot probe เป็นเครื่องมือวัด และวัดความเร็วที่ตำแหน่งตามแนวเส้นกึ่งกลางที่ปากทางออกของเจ็ท หลังจากนั้นจะนำรูปร่างความเร็วไปหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรและความเร็วเฉลี่ยโดยพื้นที่ของเจ็ท (u_j) ตามลำดับ สำหรับความเร็วกระแสลมขวาง (u_{cf}) จะวัดด้วย Pitot-static probe

3.3 เงื่อนไขและสภาวะการทดลอง

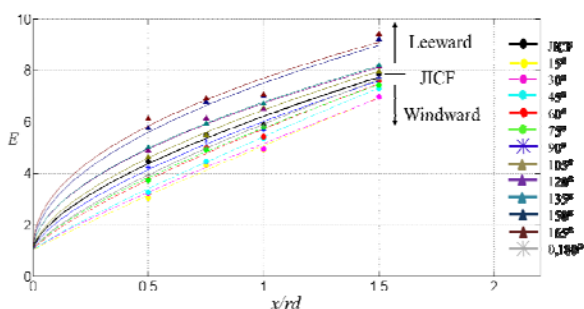
การทดลองทำกับเจ็ตในกระแสมุมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r เท่ากับ 4 (ความเร็วเฉลี่ยโดยพื้นที่ของเจ็ตมีค่าเป็น 16.22 เมตรต่อวินาที และความเร็วกระแสมุมขวางมีค่า 4.03 เมตรต่อวินาที) โดยมีเลขเรย์โนลด์ของเจ็ต ($Re_j = u_j d / \nu_j$) เท่ากับ 12,400 เลขเรย์โนลด์ของกระแสมุมขวาง ($Re_{cf} = u_{cf} d / \nu_{cf}$) เท่ากับ 3,100 ความเร็วเริ่มต้นของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ตเป็นการไหลในท่อแบบปั่นป่วนและพัฒนาตัวเต็มที่กระแสมุมขวางมีความเร็วสม่ำเสมอ และชั้นขอบเขตของกระแสมุมขวางที่พื้นเป็นลามินาร์

การทดลองทำทั้งกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีที่ฉีดเจ็ตควบคุมแบบคงตัว (steady) ที่ตำแหน่งเชิงมุมจากมุม $\pm 15^\circ$ ถึง $\pm 165^\circ$ โดยเพิ่มมุมขึ้นทีละ 15° และ กรณีคู่สมมาตรอีก 1 คู่ คือที่ตำแหน่ง 0° และ 180° โดยคงค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมทั้งหมด (รวม 2 ตัว) ต่อเจ็ตหลัก (r_m) ที่ 4%

เพื่อความสะดวกในการอ้างอิงกรณีการทดลอง จะใช้ตัวย่อ JICF แสดงกรณีเจ็ตในกระแสมุมขวางที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม, CJICF แสดงกรณีเจ็ตในกระแสมุมขวางที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมโดยทั่วไป และ $I\theta$ สำหรับกรณีเจ็ตในกระแสมุมขวางที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ $\pm \theta$ โดยเฉพาะเจาะจง

4. ผลการทดลอง

4.1 การพัฒนาตัวของการเหนี่ยวนำการผสมและผลของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสม



รูปที่ 3 การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรตามระยะทางการไหล

รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ตามระยะทางการไหลจากบริเวณ near field ไปยังบริเวณ far field พบว่าทุกกรณี (JICF และ CJICF) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตในกระแสมุมขวางจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะทางการไหล และสามารถประมาณได้ด้วยสมการ power law

$$E = 1 + a(x/d)^b \quad (2)$$

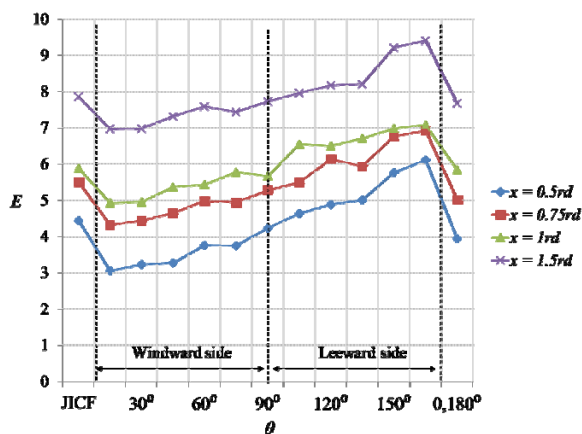
อนึ่ง การเบี่ยงเบนจาก power law ในบางกรณีและบางระนาบจะมีปรากฏอยู่บ้าง การประมาณนี้จึงเป็นการประมาณอย่างหยาบเท่านั้น

นอกเหนือจากนั้น พบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมด้าน windward ($\theta < 90^\circ$) จะมีผลทำให้ E ลดลงเมื่อเทียบกับ JICF หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมด้าน windward จะมีผลไปยับยั้ง (suppress) การเหนี่ยวนำการผสมเมื่อเทียบกับกรณี JICF ในทางตรงกันข้าม การฉีดเจ็ตควบคุมด้าน leeward ($\theta > 90^\circ$) จะมีผลทำให้ E เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ JICF หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมด้าน leeward จะมีผลไปส่งเสริม (promote) การเหนี่ยวนำการผสมเมื่อเทียบกับกรณี JICF

ผลของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมด้าน windward/leeward ต่อการ suppress/promote การเหนี่ยวนำการผสมนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง E และมุมฉีด θ ในรูปที่ 4

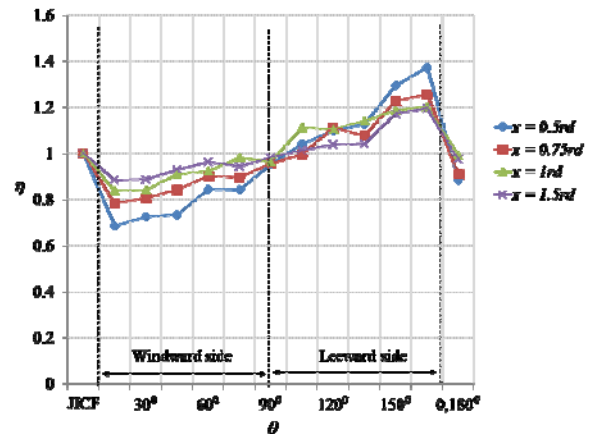
รูปที่ 4 แสดงผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของทุกกรณีและทุกระนาบการไหล แนวโน้มโดยรวม (มีการเบี่ยงเบนบ้างในบางกรณี หรือ บางระนาบ) พบว่า

- Windward injection ($\theta < 90^\circ$): การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน windward จะส่งผลให้ E ของ cJICF ลดลงจากกรณี JICF หรืออีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมจะไปยับยั้ง (suppress) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF
- Leeward injection ($\theta > 90^\circ$): ในทางตรงกันข้าม การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน leeward จะส่งผลให้ E ของ cJICF เพิ่มขึ้นจากกรณี JICF หรืออีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมจะไปส่งเสริม (promote) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF
- นอกจากนี้ ยังพบว่า เมื่อเพิ่มตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมจากทางด้าน windward $\pm 15^\circ$ ไปทางด้าน leeward $\pm 165^\circ$ อย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสขวางมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุม
- ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสลมขวางมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมลดลงจนมีค่าต่ำสุดคือ $\pm 15^\circ$ ในขณะที่ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสลมขวางมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดคือ $\pm 165^\circ$ โดยตัวอย่างค่า E ดังกล่าวมีดังนี้
 $x/rd = 0.5$:
 $E_{I15} = 3.05 < E_{JICF} = 4.45 < E_{I165} = 6.11$
 $x/rd = 1.5$:
 $E_{I15} = 6.97 < E_{JICF} = 7.86 < E_{I165} = 9.41$
- ผลของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมในงานวิจัยนี้ที่ศึกษาสำหรับ



รูปที่ 4 ผลของตำแหน่งเชิงมุมฉีดเจ็ตควบคุมต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

JICF ที่ Low- r flow regime คือ r เท่ากับ 4 จะสอดคล้องกับผลของงานวิจัยของ Wangkiet *et al.* [1] ที่ศึกษาสำหรับ JICF ที่ High- r flow regime คือ r เท่ากับ 12



รูปที่ 5 ผลของตำแหน่งเชิงมุมฉีดเจ็ตควบคุมต่อค่าประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสม

4.2 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมต่อค่าประสิทธิภาพของการฉีดเจ็ตควบคุมในการเหนี่ยวนำการผสม

เพื่อที่จะประเมินหาประสิทธิภาพของการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ต จึงนิยามค่าประสิทธิภาพของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ต (η) เป็น

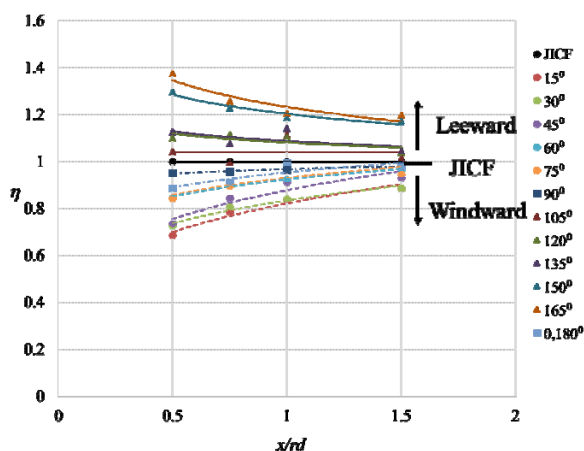
$$\eta = \frac{E_{cJICF}}{E_{JICF}} \quad (3)$$

โดย ตัวห้อย JICF และ cJICF หมายถึงของกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมและฉีดเจ็ตควบคุม ตามลำดับ และเพื่อให้สามารถประเมินผลของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมต่อประสิทธิภาพของการฉีดเจ็ตควบคุมในการเหนี่ยวนำการผสมได้ชัดเจนขึ้น รูปที่ 5 จึงแสดงผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อค่าประสิทธิภาพของการฉีดเจ็ตควบคุมในการเหนี่ยวนำการผสม (η) พบว่า แนวโน้มโดยรวม ผลของตำแหน่งเชิงมุม ($\pm \theta$) ต่อค่าประสิทธิภาพของการฉีดเจ็ตควบคุมในการเหนี่ยวนำการผสม (η) โดยนิยาม จะเป็นไปในทางเดียวกับผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (E) กล่าวคือ

- Windward injection: การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน windward จะมีผลไปยับยั้ง (suppress) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF ทำให้ $\eta < 1$
- Leeward injection: การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน leeward จะมีผลไปส่งเสริม (promote) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF ทำให้ $\eta > 1$
- เมื่อเพิ่มตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมจากทางด้าน windward $\pm 15^\circ$ ไปทางด้าน leeward $\pm 165^\circ$ อย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้ η มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุม
- η จะมีค่าเบี่ยงเบนจาก 1 (ค่าของกรณี Baseline JICF) มากในกรณีที่ตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมค่อนข้างไปทางปลายสุดของทั้งสองฝั่ง คือ windward ($\pm 15^\circ$) หรือ leeward ($\pm 165^\circ$) ในขณะที่ เมื่อตำแหน่งการฉีดเลื่อนเข้าสู่ $\pm 90^\circ$ ค่า η จะเข้าใกล้ 1 กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเข้าใกล้ $\pm 90^\circ$ จะไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมมากนัก
- ตำแหน่งมุมฉีดเจ็ตควบคุมที่ทำให้ η สูงสุดคือ $\pm 165^\circ$ โดยที่

$$x/rd = 0.5: \eta = 1.37; \quad x/rd = 1.5: \eta = 1.20$$

รูปที่ 6 แสดงการพัฒนาตัวของค่าประสิทธิภาพของการฉีดเจ็ตควบคุมในการเหนี่ยวนำการผสม (η) ตาม



รูปที่ 6 การพัฒนาตัวของค่าประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสม (η) ตามระยะทางการไหล

ระยะทางการไหล พบว่า ที่ตำแหน่งมุมฉีดใดๆ เจ็ตควบคุมจะมีผลมากในบริเวณ near field ($x/rd = 0.5$) (η เบี่ยงเบนไปจาก 1 มาก) แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะทางการไหล ผลของเจ็ตควบคุมจะลดลงตามระยะทางการไหล (η เข้าสู่ค่า 1)

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) ของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยมีเป้าหมายรองเพื่อหาตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมที่ทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ของเจ็ตในกระแสลมขวาง และค่าประสิทธิภาพของการฉีดเจ็ตควบคุมในการเหนี่ยวนำการผสม (η) สูงที่สุด (หรือต่ำที่สุด) เพื่อให้สามารถวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้โดยตรงการทดลองนี้จึงใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับการใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง การทดลองทำที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพของเจ็ตต่อกระแสลมขวาง (r) เท่ากับ 4 โดยทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมจากมุม $\pm 15^\circ$ ถึง $\pm 165^\circ$ โดยเพิ่มมุมขึ้นทีละ 15° และ กรณีคู่สมมาตรอีก 1 คู่ คือที่ตำแหน่ง 0° และ 180° โดยคงค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ที่ 4%

ผลการศึกษาพบว่า

- Windward injection: การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน windward ($\theta < 90^\circ$) จะมีผลในการยับยั้ง (suppress) การเหนี่ยวนำการผสม ทำให้ E ของ cJICF ลดลงจากกรณี JICF และทำให้ $\eta < 1$
- Leeward injection: การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน leeward ($\theta > 90^\circ$) จะมีผลในการส่งเสริม (promote) การเหนี่ยวนำการผสม ทำให้ E ของ cJICF เพิ่มขึ้นจากกรณี JICF และทำให้ $\eta > 1$
- เมื่อเพิ่มตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมจากทางด้าน windward $\pm 15^\circ$ ไปทางด้าน leeward $\pm 165^\circ$ อย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้ E และ η มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุม

- η จะมีค่าเบี่ยงเบนจาก 1 (ค่าของกรณี Baseline JICF) มากในกรณีที่ตำแหน่งการฉีดคอนไปทางปลายสุดของทั้งสองฝั่ง (windward/leeward) ในขณะที่เมื่อตำแหน่งการฉีดเลื่อนเข้าสู่ $\pm 90^\circ$ ค่า η จะเข้าใกล้ 1 กล่าวคือ การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเข้าใกล้ $\pm 90^\circ$ จะไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมมากนัก
- ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้ E และ η มีค่าต่ำสุดคือ $\pm 15^\circ$ ในขณะที่ตำแหน่งเชิงมุมที่ทำให้ E และ η มีค่าสูงสุดคือ $\pm 165^\circ$
- ค่าประสิทธิผลของการฉีดเจ็ตควบคุม (η) สูงที่สุดสำหรับทุกกรณีและทุกระนาบที่ทำการทดลอง คือ 1.37 ซึ่งเกิดในกรณีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 165^\circ$ และวัดที่ตำแหน่งใกล้ปากทางออกของเจ็ตที่สุดที่ทำการทดลอง คือ $x/rd = 0.5$
- ที่ทุกตำแหน่งมุมการฉีด เจ็ตควบคุมจะมีผลมากในบริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ต (η เบี่ยงเบนไปจาก 1 มาก) แต่จะมีผลน้อยลง (η ใกล้เคียงค่า 1) เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะทางการไหล
- ผลของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมต่อ E และ η ที่ศึกษาสำหรับ JICF ที่ low- r flow regime ($r = 4$) ในงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Wangkiat *et al.* [1] ที่ศึกษาสำหรับ JICF ที่ high- r flow regime ($r = 12$)

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยส่วนหนึ่งจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ 2557 ตามสัญญาเลขที่ GRB_APS_๒๓_๕๗_๒๑_๐๑ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wangkiat, S., Khemakanon, S., Kengkarnpanich, A., and Bunyajitradulya, A. (2015). Effects of the azimuthal positions of the azimuthal control jets on structures and entrainment of a jet in crossflow at high effective velocity ratio 12, paper presented in the Sixth TSME International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME6), December 16-18, 2015, The Regent Cha-am beach Resort, Hua-Hin, Paper No TSF006.
- [2] Witayaprapakorn, T. and Bunyajitradulya, A. (2013). Effects of azimuthal control jets on structure and entrainment of a jet in crossflow, paper presented in the *Twenty-Seventh Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, Chonburi, Thailand.
- [3] Witayaprapakorn, T. (2013). Effects of azimuthal control jets on the entrainment of a jet in crossflow, Master thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.
- [4] Bunyajitradulya, A. (2015). Evaluation of the volumetric entrainment ratio of a jet in crossflow and its evolution, Thai Government GRB_APS_23_57_21_01 Research Project Report, Thai Government Research Fund FY 2557.
- [5] Chaikasetsin, S., Sushewakhul, T., Panusittikorn, P., and Bunyajitradulya, A. (2014). Effects of azimuthal control jets to main jet mass flowrate ratio on the entrainment of a jet in crossflow, paper presented in the Fifth TSME International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME5), December 17-19, 2014, The Empress, Chiang Mai, Paper No TSF05.
- [6] 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.