

การจำลองการไหลในช่องลมที่มีการปรับมุมฉีดและความเร็วการฉีดจากด้านข้าง The simulation of channel air flow with different inclined injection angle and velocity

นราธิป สุขโข¹ พ.ต. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง² และ อุดมเกียรติ นนทแก้ว¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ถ.พิบูลสงคราม บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทร 0-2913-2500 E-mail: narathip.sukkho@airliquide.com

² กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า อ.เมือง จ.นครนายก 26001

โทร 0-3739-3487 ต่อ 62307 E-mail: asuksang@hotmail.com

Narathip Sukkho¹, Maj. Anotai Suksangpanomrung² and Udomkiat Nonthakaew¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

1518 Pibulsongkram Rd, Bangsue Bangkok 10800 Thailand

Tel: 0-29132500 Ext. 8303 Fax: 0-25870026 press 111 E-mail: narathip.sukkho@airliquide.com

² Department of Mechanical Engineering, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy

Maung, Nakorn-Nayok, 26001, Tel/Fax: 037-393487, E-mail: asuksang@crma.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะเป็นการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องลมที่มีช่องฉีดขนาดเล็กติดและทำมุมกับผนังของช่อง การไหลร่วมกับแบบจำลอง k-ε การคำนวณจะเป็นแบบ 2 มิติในสภาวะไม่คงตัว วัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีผลต่อการไหลแบบผสมผสานในเขตการไหลย้อนกลับและเขตการไหลเหนี่ยวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มุมฉีดและความเร็วในการฉีด โดยงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนมุมฉีดตั้งแต่ 10 ถึง 80 องศา ที่ความเร็วของการฉีดต่างๆ กัน

จากการคำนวณพบว่าที่ประมาณมุมมากกว่า 75 องศา จะไม่เกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้นที่ทางเข้าช่องลม และที่มุมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 องศา จะไม่เกิดกระแสหมุนวนที่หน้าช่องฉีด การเพิ่มขนาดของกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามมุมฉีดที่ลดลง ยกเว้นที่มุมฉีดน้อยกว่า 20 องศา ในส่วนของความสัมพันธ์ของความเร็วที่ฉีดต่อกระแสเหนี่ยวนำในแต่ละมุมฉีดพบว่าเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น

Abstract

This paper presents the computational of turbulent flow inside the main channel, which was induced by the high speed jet injecting from a sided-inlet duct. The k-ε turbulent modeling is used for predicting the flow and the simulation is performed in two-dimensional unsteady flow. The objective of this research is to study the effect of the angle of the sided-inlet duct and the jet

velocity to the main flow characteristics. In this research, the angle between 10 to 80 degrees is considered with various jet velocity.

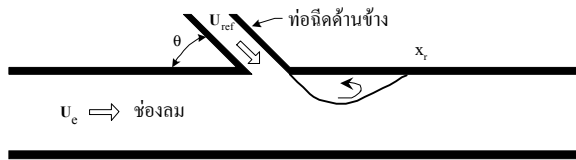
From the calculation, we found that if the angle is more than 75 degree, the induced flow in the main channel is not occurred and at the angle of less than 30 degree, the recirculation flow is not appear in the main channel. The rate of the induced flow is linearly increased with the decreased of the angle of the sided-inlet duct. At the angle of less than 20 degree, we found that further decrease in the angles, do not increase any rate of induced flow at all. The jet velocity is also related to the induced flow.

1. บทนำ

ในการฉีดอากาศผ่านช่องเล็ก ๆ ที่ทำมุมกับช่องลมจะส่งผลให้เกิดการดูดอากาศจากภายนอกที่อยู่ด้านหน้าของช่องลมเข้าสู่ช่องลม การฉีดอากาศผ่านช่องด้านข้างนี้จึงเป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลภายในช่องลมขึ้น และเกิดการผสมผสาน (mixing) กันด้วยขนาดและทิศทางของความเร็วของกระแสทั้งสอง ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงเส้นไปสู่โมเมนตัมเชิงมุมและการเปลี่ยนแปลงของความดันก่อให้เกิดการไหลย้อนกลับ (recirculation flow) ขึ้นภายในช่องลม ก่อนที่กระแสการไหลจะเริ่มเข้าสู่การไหลสภาวะคงตัวในด้านท้ายของช่องลม การผสมผสาน (mixing) กันด้วยขนาดและทิศทางของความเร็วของกระแสทั้งสองจะก่อให้เกิดการไหลย้อนกลับ (recirculation flow) หรือ

separation bubble ดังรูปที่ 1 ขึ้นภายในช่องลมด้านหลังจากปากท่อออกของช่องท่อฉีดด้านข้าง ดังการทดลองของ Liou et al. (1999) [1] อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้วการไหลที่เกิดขึ้นจากการผสมผสานของกระแสทั้งสองจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนนี้ยากต่อการคำนวณและการทำนายผลที่จะได้ ดังนั้นจึงได้มีการทำการคำนวณเชิงตัวเลขขึ้น เนื่องจากการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนได้มีการพัฒนาไปอย่างมาก เพื่อให้การทำนายผลใกล้เคียงกับผลที่สมควรเป็นมากที่สุด ดังในงานวิจัย [2] และ [3]

สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องลมที่มีช่องท่อฉีดขนาดเล็กติดและทำมุมขนาดต่างกับผนังของช่องการไหล โดยใช้แบบจำลอง k-ε เป็นแบบจำลองในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนในช่องการไหลหลัก งานวิจัยชิ้นนี้มุ่งเน้นที่จะนำเสนอผลกระทบต่าง ๆ ที่มีต่อการไหลแบบผสมผสานในเขตการไหลแบบย้อนกลับและเขตการไหลเหนี่ยวนำ โดยจะศึกษาถึงตัวแปรในส่วนของมุมฉีด ความเร็วของการฉีด และธรรมชาติของการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในช่องลม ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาออกแบบและควบคุมการไหลที่ต้องการ



รูปที่ 1 การไหลภายในช่องลมที่ถูกเหนี่ยวนำจากท่อฉีดด้านข้าง

2. สมการการไหลและแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

2.1 สมการควบคุมการไหล

สมการของการไหลที่พิจารณานี้เป็นสมการการไหลสำหรับการไหลในสภาวะไม่คงตัวและที่อัดตัวไม่ได้ คือ

สมการการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + (v + v_t) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

2.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k-ε

แบบจำลอง standard k-ε สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนหาได้จากการแก้สมการ turbulent kinetic energy และสมการ dissipation ต่อไปนี้

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (3)$$

และ

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

ค่าคงที่ของสมการ (3) และ (4) เป็นดังนี้ $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$

ค่า k และ ε ที่ได้จากสมการ (3) และ (4) ถูกนำไปคำนวณหาค่า eddy viscosity (μ_t) ดังสมการ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

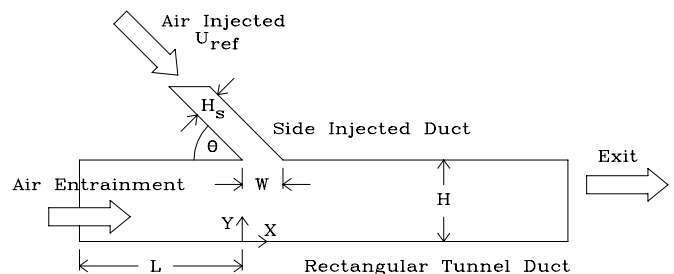
โดย C_μ เป็นค่าคงที่มาตรฐานของแบบจำลอง k-ε รายละเอียดต่างๆ ของแบบจำลอง k-ε ศึกษาได้จาก [4] และ [5]

3. วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

รูปทรงของปัญหาที่นำมาวิเคราะห์นี้ได้มาจากการทดลองของ Liou et al. (1999) [1] โดยขนาดและรูปทรงที่จำลองสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) สำหรับการไหลใน 2 มิติเป็นดังรูปที่ 2 โดยค่าของขนาดต่างๆ ถูกแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดของช่องการไหลและมุมของช่องฉีด

H (mm)	H _s (mm)	θ	W (mm)	L (mm)
40	10	10 - 80	14.1	320



รูปที่ 2 ขนาดและรูปทรงของช่องการไหลใน 2 มิติ

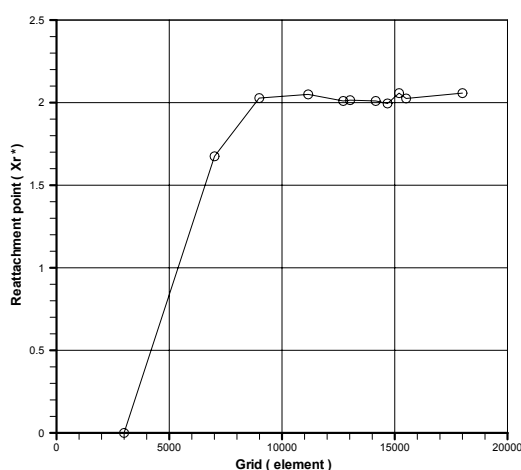
ในการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการไหลนี้ความเร็วเฉลี่ยของการฉีดอากาศ (U_{ref}) เข้าที่ท่อฉีดด้านข้างมีค่าเท่ากับ 33.4, 44.5 และ 55.6 m/s ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าคงที่ของเรย์โนลด์ (Re : $Re = \rho U_{ref} H / \mu$) เท่ากับ 2.14×10^4 , 2.86×10^4 และ 3.56×10^4 ตามลำดับ ของไหลที่ใช้ในการคำนวณสมมติว่าเป็นอากาศโดยที่คุณสมบัติของอากาศที่ใช้คือที่อุณหภูมิ $25^\circ C$ ซึ่งมีค่าความหนืดเท่ากับ 1.85×10^{-5} Ns/m² และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.184 kg/m³ การเลือกใช้กริดสำหรับการคำนวณในครั้งนี้พิจารณาจากจุดการตกกระทบของกระแสการไหลในช่องการไหลหลักหรือ (reattachment point) ใช้สัญลักษณ์ Xr^* ต่อจำนวนกริด ดังแสดงในรูปที่ 3 จำนวนกริดที่เหมาะสมในการคำนวณคือ 362×39 ตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ โดยมีจุดกำเนิดอยู่ที่ผนังด้านล่างของช่องลม ระยะตามแนวแกน x เท่ากับ 320 มิลลิเมตร นับจากทางขวาสุดของช่องลม ส่วนค่าช่วงเวลาในการคำนวณ (time step size) มีค่าเท่ากับ 10^{-4} วินาที คงที่ตลอดการคำนวณ

การแก้ปัญหาการไหลนี้สำหรับงานวิจัยนี้ โปรแกรม CFD สำเร็จรูป Fluent v.6 ถูกใช้ในการคำนวณ งานวิจัยชิ้นนี้ได้ดำเนินการศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดจากการปรับมุมฉีดและความเร็วในการฉีด โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนหลักคือ

- การศึกษาโดยวิธีการปรับมุมฉีด ได้แก่ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70 และ 80 องศา
- การศึกษาโดยวิธีการปรับความเร็วของการฉีด ได้แก่ 33.4, 44.5 และ 55.6 เมตรต่อวินาที

รวมทั้งสิ้น 36 กรณีศึกษา

ค่า discretizing schemes ที่ใช้ในการคำนวณสำหรับเทอม convection และเทอม diffusion นั้นใช้เป็น QUICK scheme เป็นตัวแบ่งแยก สมการการอนุรักษ์ของมวลและโมเมนตัมถูกแก้ด้วยวิธีการ SIMPLEC algorithm เพื่อใช้ในการแยกความสัมพันธ์ที่มีต่อกันระหว่างความเร็วและความดัน

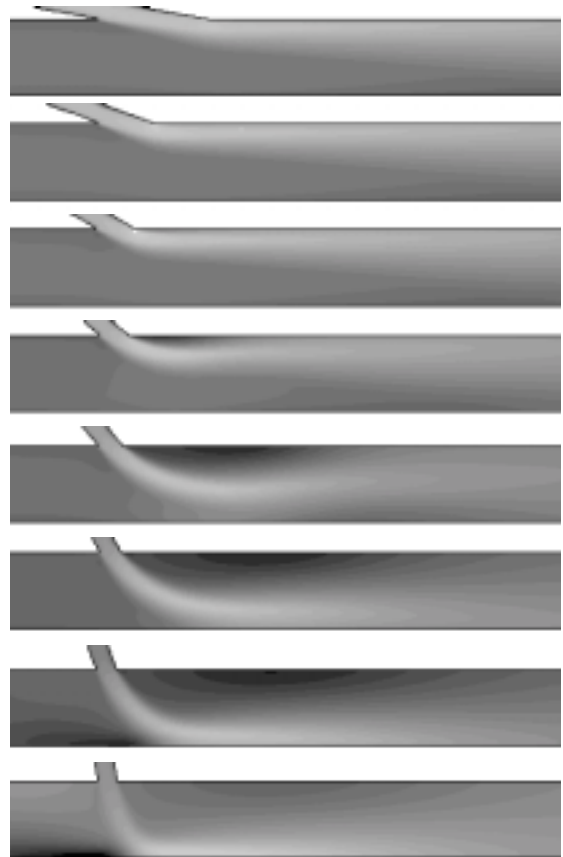


รูปที่ 3 ขนาดของกริดเทียบกับจุดการตกกระทบของกระแสการไหล (Xr^*) ที่มุมฉีด 45 องศา ความเร็วการฉีด 44.5 เมตรต่อวินาที

4. ผลการคำนวณและการวิจารณ์

4.1 ลักษณะการไหลภายในช่องลมจากการปรับมุมฉีด

การจำลองการไหลใน 2 มิติ โดยมีการปรับมุมฉีดและความเร็วของการฉีดเพื่อศึกษาผลกระทบของการเกิดกระแสเหนี่ยวนำที่หน้าช่องฉีด ผลการคำนวณที่ได้ พบว่ามุมของการฉีดมีผลต่อลักษณะของการไหลภายในช่องลม ที่มุมมากกว่าตั้งแต่ 30 องศาจะเริ่มเกิดกระแสย้อนกลับที่หน้าช่องฉีด โดยตำแหน่งของจุดการตกกระทบของกระแสการไหล (Xr^*) จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของมุมที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 จากการศึกษาลักษณะการไหลในเบื้องต้นที่มุมมากกว่า 30 องศาพบว่าเมื่อเริ่มต้นของการไหล กระแสการเหนี่ยวนำยังไม่เกิดขึ้นในช่องลม กระแสการไหลความเร็วสูงจากช่องฉีดจะไหลไปในสองทิศทางคือ ส่วนหนึ่งจะมีการไหลย้อนกลับไปทางด้านหน้าของช่องลม และส่วนหลักจะไหลไปทางด้านท้ายของช่องลม เมื่อเวลาผ่านไปกระแสการไหลหลักเกิดการตกกระทบกับผนังและก่อให้เกิดเขตการไหลหมุนวน ซึ่งส่งผลให้ค่าความดันที่บริเวณนี้มีค่าต่ำ ประกอบกับค่าความเร็วสูงที่ถูกฉีดมาจากช่องฉีดจึงส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในช่องลมในเวลาต่อมา

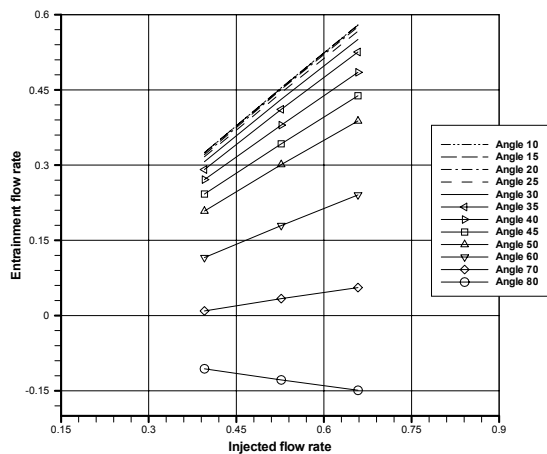


รูปที่ 4 แสดงลักษณะการไหลที่เวลา 0.3 วินาที ความเร็วการฉีด 44.5 เมตรต่อวินาที ที่มุมฉีด 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 ตามลำดับ

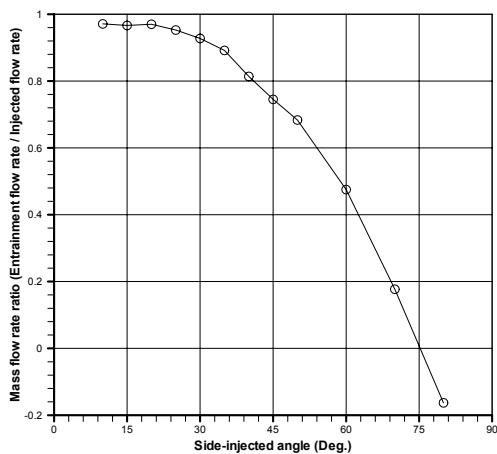
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของมุมฉีดที่ความเร็วการฉีดต่าง ๆ กับขนาดของกระแสเหนี่ยวนำที่หน้าช่องลม ที่มุมฉีดน้อยกว่า 50 องศาพบว่าอัตราการเหนี่ยวนำมีค่าแปรผันโดยตรงตามอัตราการฉีด เมื่อขนาดของมุมเพิ่มขึ้นอัตราการฉีดมีผลน้อยต่ออัตราการเหนี่ยวนำจน

กระทั่งเมื่อขนาดของมุมมากกว่า 75 องศาโดยประมาณ อัตราการเหนียวน้ำไม่เกิดขึ้นที่ช่องลม กระแสการไหลจากช่องฉีดจะไหลไปใน 2 ทิศทางของช่องลมซึ่งจากการไหลในลักษณะนี้จะไม่ก่อให้เกิดกระแสเหนียวน้ำที่หน้าช่องลม

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดของกระแสเหนียวน้ำที่ได้จากการเฉลี่ยที่ความเร็วการฉีดต่างๆ เทียบกับมุมของการฉีด พบว่าขนาดของกระแสเหนียวน้ำที่จะเพิ่มขึ้นตามมุมฉีดที่ลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะว่าขนาดของเขตการไหลหมุนวนมีค่าสั้นและความสูงของเขตการไหลหมุนวนมีค่าต่ำที่ค่ามุมฉีดต่ำ ทำให้การไหลที่เกิดจากการเหนียวน้ำและการไหลจากช่องฉีดสามารถไหลผ่านได้ง่าย ที่มุมฉีดประมาณ 20 องศา อัตราการเหนียวน้ำของไหลเข้าสู่ช่องลมมีค่าสูงสุดประมาณ 95% เมื่อเทียบกับอัตราการฉีดที่ช่องฉีด ซึ่งที่ค่ามุมฉีดนี้จัดได้ว่าเป็นมุมที่ให้ประสิทธิภาพการเหนียวน้ำที่ดีที่สุด และเมื่อลดค่ามุมฉีดให้น้อยลงกว่านี้ เราไม่พบการเปลี่ยนแปลงในค่าขนาดของกระแสเหนียวน้ำมากนัก จากรูปที่ 6 สังเกตได้ว่าที่มุม 75 องศา อัตราการเหนียวน้ำของไหลเข้าสู่ช่องลมมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของมุมฉีดที่ความเร็วการฉีดต่าง ๆ กับขนาดของกระแสเหนียวน้ำ



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดของกระแสเหนียวน้ำ(เฉลี่ย) กับมุมของการฉีด

4.2 ลักษณะการไหลภายในช่องลมจากการปรับความเร็วการฉีด

การจำลองการไหลใน 2 มิติ โดยมีการปรับความเร็วในการฉีดที่มุมฉีดต่างๆ พบว่าค่าความเร็วที่ใช้มีผลกระทบต่อรูปแบบของการไหลน้อยมากเมื่อเทียบกับผลกระทบจากมุมฉีดดังแสดงในรูปที่ 7 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าความเร็วที่ใช้ในช่องฉีดมีค่าน้อย ส่งผลให้การไหลที่หน้าช่องฉีดไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนมุมฉีด เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความเร็วในการฉีดกับกระแสเหนียวน้ำที่เกิดขึ้นในแต่ละมุมฉีดพบว่าความสัมพันธ์เชิงเส้น โดยปริมาณกระแสเหนียวน้ำจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วการฉีดที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5

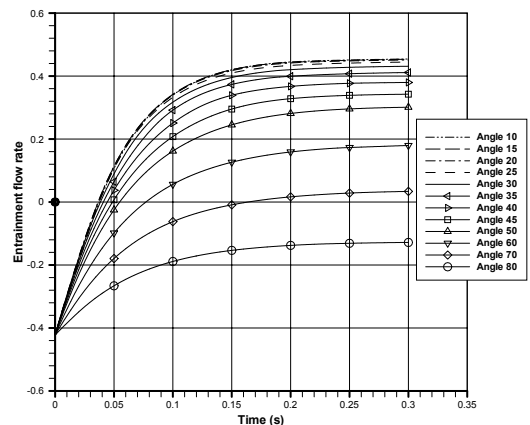


รูปที่ 7 แสดงลักษณะการไหลที่เวลา 0.3 วินาที ที่มุมฉีด 45 องศา ความเร็วการฉีด 33.4, 44.5 และ 55.6 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

4.2 อัตราการเหนียวน้ำภายในช่องลม

ในการคำนวณการไหลครั้งนี้เป็นการคำนวณในสภาวะไม่คงตัวที่ขึ้นอยู่กับเวลา อย่างไรก็ตามจากการคำนวณพบว่าการไหลจะเป็นแบบไม่คงตัวในบางส่วนของ การไหล ถ้าพิจารณาจากเส้นสายธารการไหลแล้วพบว่าการไหลมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่สภาวะคงตัว ในทุก ๆ มุมและความเร็วของการฉีดที่เราพิจารณา

รูปที่ 8 แสดงถึงความสัมพันธ์ของเวลาและกระแสการเหนียวน้ำที่เกิดขึ้น กระแสเหนียวน้ำนี้วัดจากอัตราการไหลเข้าโดยรวมที่บริเวณทางเข้าของช่องลม จากการคำนวณพบว่าอัตราการเหนียวน้ำของของไหลมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยเวลาของอัตราการเหนียวน้ำที่เข้าสู่สภาวะคงตัวจะแตกต่างกันตามมุมและความเร็วที่ฉีด จากรูปนี้เห็นได้ชัดว่าขนาดของกระแสเหนียวน้ำขึ้นอยู่กับมุมฉีดที่ใช้ ซึ่งที่มุมน้อยกว่าประมาณ 20 องศา ขนาดของกระแสเหนียวน้ำจะมีค่าคงที่ในช่องลม



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของเวลาและกระแสการเหนียวน้ำ ที่มุมฉีดต่าง ๆ ความเร็วของการฉีด 44.5 เมตรต่อวินาที

5. สรุปและข้อแนะนำ

1. เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการคำนวณพบว่ารูปแบบของปัญหาการคำนวณ ถ้าพิจารณาเฉพาะอัตราการเหนี่ยวนำของกระแสในช่องลมแล้วพบว่าเป็นแบบสภาวะคงตัวในทุกๆกรณีศึกษา อย่างไรก็ตามการไหลยังคงจัดว่าเป็นแบบสภาวะไม่คงตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีการผสมผสานกันที่หน้าช่องฉีด
2. เมื่อพิจารณาปริมาณกระแสที่ฉีดกับปริมาณกระแสเหนี่ยวนำที่ได้พบว่าสัดส่วนที่ดีที่สุดอยู่ที่ประมาณ 0.95 ที่มุมฉีดประมาณ 20 องศา หรือสามารถกล่าวได้ว่ากระแสเหนี่ยวนำเกิดมากที่สุดที่มุมฉีดที่ไม่ก่อให้เกิดกระแสหมุนวนหน้าช่องฉีด
3. จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขโดยการใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนโดยมีการปรับมุมการฉีดและความเร็วของการฉีดนั้น ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของมุมฉีดกับรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในช่องลม ซึ่งเราพบว่ามุมฉีดมีผลอย่างมากต่อลักษณะการไหล และปริมาณกระแสเหนี่ยวนำ แต่ในส่วนของความเร็วที่ฉีดนั้นไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วที่ฉีดกับรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในช่องลมได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความเร็วที่ใช้มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นและจำนวนค่าของความเร็วที่ใช้ยังมีน้อยจนไม่สามารถสร้างความสัมพันธ์ต่างๆ ได้
4. ในการกำหนดกรณีศึกษา ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ได้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือการปรับเปลี่ยนมุมของการฉีดและความเร็วในการฉีด อีกกรณีศึกษาที่น่าสนใจและคาดว่าจะมีผลต่อการไหลภายในช่องลม คือศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดช่องฉีดและขนาดช่องลม ซึ่งหากผนวกความสัมพันธ์ในส่วนนี้เข้ากับความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังที่ได้ทำการวิจัยมา น่าจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาออกแบบและควบคุมการไหลกระแสเหนี่ยวนำได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณขั้นสูง (ศคส.) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ โปรแกรมการคำนวณ และเครื่องคอมพิวเตอร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Liou T.M., Liao C.C., Chen S.H., and Lin H.M., "Study on Side-Jet Injection Near a Duct Entry With Various Injection Angle", ASME Journal of Fluid Engineering, Vol. 121, pp.580-587, 1999.
- [2] สมชาย ศรีพัฒนพิพัฒน์ สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด เสถียรพงศ์ หุยนันท์ และ พงษ์เจต พรหมวงศ์ "การทำนายเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนในช่องที่มีการฉีดทำมุมด้านข้าง" สัมมนาวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง

ประเทศไทย ครั้งที่ 15 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เล่มที่ 1 หน้าที่ CM-14-CM19, 2001.

[3] นราธิป สุขโข พ.ต. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง อุดมเกียรติ นนท์แก้ว และ พงษ์เจต พรหมวงศ์ "การจำลองแบบลาร์จเอ็ดดี้ สำหรับการไหลในช่องลมที่มีการฉีดทำมุมด้านข้าง" สัมมนาวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บทความที่ TF131 หน้า 129 –133, 2003

[4] Ferziger J.H., and Milovan Peric, "Computational Methods for Fluid Dynamics", Second Edition, Springer-Verlag. 1999

[5] Fluent Incorporated "Fluent 5 User's Guide Volume 2", (July 1998)