การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัด ขอนแก่น

# การประยุกต์ใช้แบบจำลองความปั้นป่วนชนิด $k-\omega$ ในการไหลที่มีอนุภาคเคลื่อนที่ Application of $k-\omega$ Turbulence Model for Particle-Laden Flows

นารีรัตน์ ศิริบุญลักษณ์กุล<sup>1</sup>, เอกชัย จันทสาโร<sup>2</sup> และ วรางค์รัตน์ จันทสาโร<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพ

โทร: (+662)9428555 ต่อ 1829, Email: fengvrj@ku.ac.th

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

ໂทร: (+6644)224412, Email: junta@sut.ac.th

Nareerat Siriboonluckul<sup>1</sup>, Ekachai Juntasaro<sup>2</sup> and Varangrat Juntasaro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkhen, Bangkok 10900, Thailand,

Phone: (+662)9428555 ext 1829, Email: fengvrj@ku.ac.th

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand, Phone: (+6644)224410-2, Email: junta@sut.ac.th

### บทคัดย่อ

การไหลที่มีอนุภาคเคลื่อนที่เป็นการไหลที่พบมากในงานทางด้าน ้วิศวกรรม เช่น การไหลในห้องเผาไหม้ซึ่งมีการเคลื่อนที่ของอนภาค เชื้อเพลิง และการไหลของอากาศภายในและภายนอกตึกที่มีสิ่งเจือปน เป็นต้น ซึ่งลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่นั้นเป็นการไหลแบบ ปั่นป่วน ดังนั้นแบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลจึงมีความสำคัญ ต่อการใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อจำลอง ปรากฏการณ์การไหลดังกล่าว โดยแบบจำลองความปั่นป่วนของการ ใหลที่นิยมใช้ในซอฟต์แวร์ CFD สำเร็จรูปเป็นแบบจำลองที่ไม่ได้คิด ผลกระทบของอนุภาคต่อความปั่นป่วนของการไหล ทำให้การวิเคราะห์ การไหลที่มีอนุภาคโดยใช้ซอฟต์แวร์ CFD สำเร็จรูปนั้นไม่สามารถ อธิบายพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นจริงได้ถูกต้องนัก งานวิจัยนี้จึง มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาแบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลที่คิด ผลกระทบของอนุภาคต่อความปั่นป่วน โดยกรณีศึกษาที่ใช้ในงานวิจัย ้นี้คือ Mixing Layer ที่มีอนุภาคเคลื่อนที่ ในซอฟต์แวร์สำเร็จรูปนั้นจะมี ส่วนที่ผู้ใช้สามารถเขียนชุดคำสั่งเองได้ เพื่อพัฒนาโปรแกรมให้มี ประสิทธิภาพมากขึ้น ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรม FLUENT เพื่อให้สามารถวิเคราะห์การไหลที่มีอนุภาคเคลื่อนที่อยู่ได้อย่างถูกต้อง โดยมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด  $k-\mathcal{E}$  โดย เพิ่มพจน์เนื่องจากอนุภาค เข้าไปในสมการพลังงานจลน์ของความ ปั่นป่วน (k) และสมการอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของความ ปั่นป่วน (*E*) โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Garcia และ Crespo [1] นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ทำการพัฒนาแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด *k*−*w* โดยคิดผลเนื่องจากอนภาค และเปรียบเทียบกับแบบจำลอง ชนิด  $k-\mathcal{E}$  เพื่อหาแบบจำลองที่ให้ความถูกต้องมากที่สุดในการ จำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่มีอนุภาคเคลื่อนที่

#### Abstract

Particle-laden flows are found in many engineering applications, for examples, flows containing fuel particles in combustion chamber and flows of dusted air inside and outside of a building. Since the flows in these cases are often turbulent, an accurate turbulence model is essential for computational fluid dynamics (CFD) study of this type of flows. The turbulence models provided in commercial CFD software packages usually do not include the influence of particles on turbulent flows. Thus, an analysis with these models cannot accurately explain the real behaviors of particle-laden flows. This study, therefore, focuses on developing a turbulence model that takes into account the effects of particles. The case study considered is a mixing layer. Several software packages provide a user defined function (UDF) to extend the software capabilities. In this work, the UDF in FLUENT software is programmed to incorporate the effects of particles on turbulence in order to allow the software to accurately model the particle-laden flows. The main focus is on the  $k - \mathcal{E}$  turbulence model. Additional source terms, based on Garcia and Crespo [1], representing particle effects are integrated into the turbulent kinetic energy (k) and the dissipation rate of turbulent kinetic energy ( $\mathcal{E}$ ) equations. In addition, the  $k - \mathcal{O}$ turbulence model for particle-laden flow is developed and then compared with the model based on  $k - \mathcal{E}$  model to find the most accurate model for particle-laden flows simulation.

## 1. บทนำ

แบบจำลองความปั่นป่วนที่สร้างขึ้นโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิง ้ คำนวณสามารถใช้ในการอธิบายการไหลที่มีอนุภาคได้ไม่ถูกต้องตาม ้ลักษณะการไหลจริง เนื่องจากการวิเคราะห์การไหลในปัจจุบันนั้นยังคง ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่ไม่มีผลของอนุภาคเข้ามาเกี่ยวข้องใน สมการที่ใช้ทำนายการไหลที่มีอนุภาค ทำให้มีการพัฒนาแบบจำลอง ความปั่นป่วนเพื่ออธิบายการไหลที่มีอนุภาคได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้นโดย เพิ่มพจน์ของการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากอนุภาคในสมการที่ใช้ใน การวิเคราะห์การไหล กรณีศึกษาที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือการไหลที่มี อนุภาคใน Mixing Layer เนื่องจากเป็นลักษณะการไหลที่สามารถใช้ อธิบายการไหลที่มีความซับซ้อนได้ดีและไม่ยุ่งยากในการวิเคราะห์ อีก ทั้งยังมีผลการทดลองและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากงานวิจัยอื่น เพื่อยืนยันความถูกต้องอีกด้วย งานวิจัยนี้ใช้เงื่อนไขต่างๆ ตามการ ทดลองของ Hishida et al. [2] เป็นการวิเคราะห์การไหลแบบไม่อัดตัว สองมิติ อนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 42 μm ความหนาแน่น 2590 kg/m<sup>3</sup> เคลื่อนที่ด้วยอัตราการไหลโดยมวล (Mass Flow Rate) 7.5 g/s ความเร็วของอากาศที่ทางเข้า U1 = 13 และ U2 = 4 m/s ค่า Intensity ในทิศทางการไหลอยู่ที่ 0.9% Turbulence และ 2% ตามลำดับ

แบบจำลองความปั่นป่วนที่นิยมใช้โดยทั่วไปในปัจจุบันคือ แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard  $k-\mathcal{E}$  เนื่องจากความถูก ต้องที่ได้จากแบบจำลองชนิดนี้สามารถอธิบายลักษณะการไหลที่ไม่มี อนุภาคได้ดี สำหรับการไหลที่มีอนุภาคแบบจำลองความปั้นป่วนชนิดนี้ ก็ยังสามารถอธิบายลักษณะการใหลได้แต่ไม่ถูกต้องเท่าที่ควร ดังนั้น เพื่อให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นในการจำลองการไหลที่มีอนุภาค Garcia และ Crespo [1] จึงได้เสนอแบบจำลองที่มีผลเนื่องจากอนุภาค เพิ่มเติมเข้าไปในสมการ k และ E ทั้งนี้ Garcia และ Crespo [1] พบว่า แบบจำลองที่นำเสนอสามารถจำลองการไหลที่มีอนุภาคใน Jet ได้เป็น ้อย่างดี แต่สำหรับ Mixing Layer นั้นยังไม่สามารถชี้ชัดถึงความถูกต้อง ได้ เพียงแต่เสนอความคิดเห็นว่าค่าที่แตกต่างไปอาจจะมีผลมาจาก ค่าคงที่ที่ใช้ในสมการ k และ E ซึ่งเหมาะสมกับการไหลแบบ Jet เท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\mathcal{E}$  เพิ่มเติมคือแบบจำลองความปั้นป่วน  $k-\mathcal{E}$  ชนิด RNG และ Realizable และทำการเสนอแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard  $k-\omega$  เพิ่มเติมขึ้นเพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่มีความ เหมาะสมมากกว่าในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่มีอนุภาค เคลื่อนที่ ทั้งนี้ได้ทำการเพิ่มพจน์เนื่องจากผลเนื่องจากอนุภาค ใน สมการ k และ arrho แล้วจึงเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่าง แบบจำลองทั้งหมด เพื่อหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมในการ อธิบายการไหลแบบปั่นป่วนที่มีอนุภาคเคลื่อนที่

เพื่อให้การคำนวณมีความถูกต้องจะต้องทำการวิเคราะห์ความ ละเอียดกริดและกำหนดการลู่เข้าที่ค่าความผิดพลาดให้เหมาะสม ไม่เช่นนั้นค่าที่คำนวณได้จะไม่สามารถนำไปวิเคราะห์การไหลได้ เนื่องจากผลการคำนวณที่ได้จะยังไม่เข้าสู่สมดุลและหากมีการใช้กริดที่ มีความละเอียดมากขึ้นก็ต้องกำหนดการลู่เข้าที่ค่าความผิดพลาดให้ลด น้อยลงไปอีก ซึ่งจะทำให้เสียเวลาในการคำนวณเป็นอย่างมาก การ เลือกใช้วิธีผลต่างในการคำนวณสำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิธี QUICK เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องและเสถียรมากกว่าวิธี First Order Upwind ทั้งใช้ระยะเวลาในการคำนวณน้อยกว่าอีกด้วย

### 2. สมการควบคุม

พฤติกรรมการไหลของของไหลสามารถอธิบายได้ด้วยสมการหลัก 3 สมการคือ สมการกฎทรงมวล (Continuity Equation) สมการ โมเมนตัม (Momentum Equation) และสมการพลังงาน (Energy Equation) สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะสามารถอธิบายพฤติกรรม ของการไหลได้โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน งานวิจัยนี้สนใจ แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard, RNG, Realizable *k* – *E* และ Standard *k* – Ø สำหรับการไหลที่มีอนุภาคสามารถอธิบายได้ โดยเพิ่มสมการอัตราส่วนโดยมวลของอนุภาค (Conservation for Mass Fraction of Particles) เข้าไปในการคำนวณ

### สมการกฎทรงมวล (Continuity Equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho v_j \right) = 0 \tag{1}$$

สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_{j}} \left( \rho v_{j} v_{j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[ \mu_{t} \left( \frac{\partial v_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial v_{j}}{\partial x_{i}} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \right] - \frac{\partial \rho}{\partial x_{i}} + \rho g_{i}$$
(2)

### สมการอัตราส่วนโดยมวลของอนุภาค (Conservation for Mass Fraction of Particles)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho_{\mathbf{v}_j} \mathbf{v}_{\mathbf{p}} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_{\mathbf{v}}} \frac{\partial \mathbf{v}_{\mathbf{p}}}{\partial x_j} \right) \quad \left[ \Re \mathbb{I} \Re \mathbb{I} \Re \right] \quad \sigma_{\mathbf{v}} = 0.7$$
(3)

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์อนุภาค

- อนุภาคมีขนาดเล็กมากจึงไม่คิดผลของแรงโน้มถ่วง
- อัตราส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคมีค่าน้อยเพียงพอที่จะทำให้
   ไม่เกิดการชนกันระหว่างอนุภาค จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
   โมเมนตัมระหว่างอนุภาคกับอนุภาค

### แบบจำลองความปั้นป่วนชนิด $\mathbf{k}-\mathcal{E}$

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิดนี้มี 3 แบบคือ Standard, RNG และ Realizable โดยที่แต่ละแบบจะมีสมการ *k* เหมือนกัน ต่างกันตรง สมการ *E* ซึ่งในแต่ละแบบจะมีการกำหนดตัวแปรและค่าคงที่ต่างกันไป

### สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy Equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho_{v_j k} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P - \rho \varepsilon - \rho \varepsilon_p$$
(4)

 สมการอัตราการแพร่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Dissipation Rate Equation)

# Standard $\mathbf{k} - \mathcal{E}$ Model [3] $\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho \mathbf{v}_j \mathcal{E} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\mathcal{E}}} \right) \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_j} \right) + \left( c_{\mathcal{E}^{\dagger}} \mathcal{P} - c_{\mathcal{E}^{\dagger}} \rho \mathcal{E} \right) \frac{\mathcal{E}}{\mathbf{k}} - \mathbf{s}_{\mathcal{E}}$

$$P = \mu_{t} \frac{\partial v_{i}}{\partial x_{j}} \left( \frac{\partial v_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial v_{j}}{\partial x_{i}} \right) \qquad \mu_{t} = c_{\mu} \rho \frac{k^{2}}{\varepsilon}$$

 $c_{\mu}=0.09\ c_{\varepsilon 1}=1.44\ c_{\varepsilon 2}=1.92\ \sigma_{k}=1.0\ \sigma_{\varepsilon}=1.3$ 

RNG  $k - \mathcal{E}$  Model [4]

$$\frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(\rho v_{j}\varepsilon\right) = \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(\left(\mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_{j}}\right) + \left(c_{\varepsilon 1}P - c_{\varepsilon 2}^{*}\rho\varepsilon\right)\frac{\varepsilon}{k} - s_{\varepsilon}$$
(6)

$$c^{*}_{_{\mathcal{E}^{2}}} \equiv c_{_{\mathcal{E}^{2}}} + \frac{c_{\mu}\rho\eta^{3}\left(1-\eta/\eta_{_{0}}\right)}{1+\beta\eta^{^{3}}}$$

$$\begin{split} \eta &\equiv {\rm Sk}\,/\,{\rm \mathcal{E}} \quad,\quad \eta_0 = 4.38 \quad,\quad \beta = 0.012 \\ {\rm C}_{{\rm \mathcal{E}}1} = 1.42 \quad,\quad {\rm C}_{{\rm \mathcal{E}}2} = 1.68 \quad,\quad {\rm C}_{\mu} = 0.00845 \end{split}$$

### Realizable $k - \mathcal{E}$ Model [5]

$$\begin{split} &\frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(\rho v_{j}\varepsilon\right) = \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(\left(\mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_{j}}\right) + \rho c_{1}s\varepsilon - \rho c_{2}\frac{\varepsilon^{2}}{\kappa + \sqrt{v\varepsilon}} - s_{\varepsilon} \\ &c_{1} = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right] \quad , \quad \eta = s\frac{\kappa}{\varepsilon} \quad , \quad s \equiv \sqrt{2s_{ij}s_{ij}} \\ &c_{\mu} = \frac{1}{A_{0} + A_{s}\frac{kU^{*}}{\varepsilon}} \quad , \quad u^{*} \equiv \sqrt{s_{ij}s_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \\ &\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_{k} \quad , \quad \Omega_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_{k} \\ &A_{0} = 4.04 \quad , \quad A_{s} = \sqrt{6}\cos\phi \\ &\phi = \frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6}w\right) \quad , \quad w = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{s}} \\ &\tilde{s} = \sqrt{s_{ij}s_{ij}} \quad , \quad s_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} + \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}}\right) \\ &c_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad , \quad c_{2} = 1.9 \quad , \quad \sigma_{\kappa} = 1.0 \quad , \quad \sigma_{\varepsilon} = 1.2 \end{split}$$

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard  $k-\omega$  [6]

Turbulent Kinetic Energy Equation

$$\frac{\partial}{\partial x_{j}} \left( \rho v_{j} k \right) = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{k}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \right] + P - Y_{k} - S_{k}$$
(8)

### Specific Dissipation Rate Equation

(5)

(7)

$$\frac{\partial}{\partial x_{j}} \left( \rho v_{j} \omega \right) = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left( \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\omega}} \frac{\partial \omega}{\partial x_{j}} \right) + \frac{\alpha}{v_{t}} P - Y_{\omega} - S_{\omega}$$
(9)  
$$\mu_{t} = \frac{\rho k}{\omega} \qquad Y_{k} = \rho \beta^{*} k \omega \quad , \quad Y_{\omega} = \rho \beta \omega^{2}$$
$$S_{k} = \frac{3}{2} c_{o} \beta^{*} \rho Y_{p} k \omega \quad , \quad S_{\omega} = \frac{3}{2} c_{o} c_{\varepsilon 3} Y_{p} \left( \beta^{*} \omega \right)^{2}$$
$$\sigma_{k} = 2.0 \quad , \quad \sigma_{\omega} = 2.0 \quad , \quad \beta^{*} = 0.09 \quad , \quad c_{0} = 3 \quad , \quad c_{\varepsilon 3} = 0.9$$

### 3. วิธีการคำนวณ

การวิเคราะห์งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม FLUENT ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ ใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) ในการวิเคราะห์ เชิงตัวเลข วิธีการผลต่าง (Differencing Scheme) ที่ใช้ในการหาค่า ความดันคือ SIMPLE นอกนั้นใช้การหาค่าแบบ QUICK โดยค่าเริ่มต้น ที่ทางเข้าสำหรับสมการ *k*, *E* และ *@* สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (10)-(12) ตามลำดับ

$$k = \frac{3}{2} \left( u_{avg} T_j \right)^2 \tag{10}$$

$$\mathcal{E} = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\ell} ; \quad \ell = 0.07L$$
 (11)

$$\omega = \frac{k^{1/2}}{c_{\mu}^{1/4}\ell}$$
(12)

การแบ่งกริดควรให้ช่วงตรงกลางมีความละเอียดมากเนื่องจากสิ่งที่ สนใจคือการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณระหว่างชั้นชิดผิว ส่วนบริเวณใกล้ ผนังของ Mixing Layer กำหนดให้คำนวณแบบ Standard Wall Function หรือ Non-Equilibrium Wall Function พบว่าให้ผลการ คำนวณเหมือนกันที่บริเวณตรงกลาง แตกต่างกันที่บริเวณใกล้ผนัง เล็กน้อยแต่เนื่องจากไม่มีผลการทดลองเปรียบเทียบจึงไม่สามารถระบุ ได้ว่าควรเลือกใช้แบบใดจึงเหมาะสมมากที่สุด เพื่อตรวจสอบเรื่อง อิทธิพลของจำนวนกริด (Grid Independence) พบว่าขนาดของกริดที่ เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 1 และแบบจำลองทั้งหมดกำหนดการลู่เข้าที่ ค่าความผิดพลาด 10<sup>-4</sup>

ตารางที่ 1 ขนาดของกริดที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน

Turbulence Model	Grid Independence
Standard $k - \mathcal{E}$	130x225
RNG $k - \mathcal{E}$	130x225
Realizable $k - \mathcal{E}$	156x300
Standard $k - \omega$	162x450

### 4. ผลและการวิเคราะห์

ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard, RNG และ Realizable **k** – *E* เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ของ Hishida et al. [2] ดังรูปที่ 1 และ 2 แสดงผลของ Turbulent Distribution ใน Mixing Layer โดยค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน เขียนอยู่ในรูปของ (2k/3)<sup>1/2</sup> ทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติเทียบกับความต่าง ของความเร็ว U<sub>1</sub>-U<sub>2</sub> ที่ระยะ x = 200 และ 250 มิลลิเมตร



รูปที่ 2 Transversal distribution of velocity fluctuation at x = 250.

ทั้งนี้พบว่าแบบจำลอง Standard และ RNG มีค่าใกล้เคียงกัน โดย สามารถจำลองการไหลได้พอสมควรเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ในขณะเดียวกันแบบจำลอง Realizable นั้นให้ผลที่ดีกว่าแบบ Standard และ RNG แต่ข้อเสียของการเลือกใช้แบบ Realizable คือ ด้องใช้จำนวน Grid Independence ที่สูงกว่าและใช้ระยะเวลาในการ คำนวณนานกว่าแบบ Standard และ RNG





particle source term in k and  $\mathcal{E}$  equations at x = 200.



รูปที่ 4 Transversal distribution of velocity fluctuation added

particle source term in k and  $\mathcal{E}$  equations at x = 250.



รูปที่ 5 Transversal distribution of fluid mean velocity at x = 200.



ฐปที่ 6 Transversal distribution of fluid mean velocity at x = 250.



รูปที่ 7 Transversal distribution of velocity fluctuation added

particle source term in k and  $\mathcal{O}$  equations at x = 200.



รูปที่ 8 Transversal distribution of velocity fluctuation added

particle source term in k and  $\mathcal{O}$  equations at x = 250.



รูปที่ 9 Transversal distribution of fluid mean velocity at x = 200. (Standard k-w Model)



(Standard k-w Model)

เมื่อทำการเพิ่มพจน์เนื่องจากอนุภาค –  $\rho \varepsilon_{\rho}$  และ –  $s_{e}$ เข้าไปใน สมการ k และ E จากรูปที่ 3 และ 4 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงาน จลน์ของความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลของ Garcia และ Crespo และเมื่อเทียบกับผลการทดลองพบว่าแนวโน้มของค่าพลังงาน จลน์ของความปั่นป่วนมีความสอดคล้องเพียงด้านที่มีความเร็วสูง เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยในทิศ ทางการไหลดังรูปที่ 5 และ 6 พบว่าการพัฒนาแบบจำลองสามารถ อธิบายได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard  $k - \omega$  เป็นแบบจำลอง ที่สามารถนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะการไหลได้ไม่ดีเท่าที่ควร โดย เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองแล้วพบว่าให้ผลไม่ค่อยสอดคล้องกับ การทดลองมากนัก ดังรูปที่ 7 และ 8 การไหลในด้านที่มีความเร็วสูงมี ความสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน ชนิด  $k - \mathcal{E}$  แต่สำหรับด้านที่มีความเร็วต่ำกลับไม่สามารถจำลองการ ไหลได้เลย และเมื่อทำการเพิ่มพจน์เนื่องจากอนุภาค  $-S_k$  และ  $-S_\omega$ เข้าไปในสมการ k และ  $\omega$  พบว่ามีพฤติกรรมเช่นเดียวกับการเพิ่มพจน์ เนื่องจากอนุภาคเข้าไปในสมการ k และ  $\mathcal{E}$ กล่าวคือได้กราฟที่มี ลักษณะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน จากรูปที่ 9 และ 10 พบว่าแบบจำลอง ความปั้นป่วนชนิด Standard  $k - \omega$  ไม่สามารถจำลองการกระจาย ด้วของความเร็วในทิศทางการไหลได้เช่นกัน

### **5**. สรุป

การศึกษาการไหลใน Mixing Layer ขณะที่ยังไม่มีพจน์ เนื่องจากอนภาคในสมการ พบว่าแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนชนิด  $k-\mathcal{E}$  ทั้งแบบ Standard, RNG และ Realizable สามารถอธิบายการ ใหลได้พอสมดวร โดยที่แบบ Realizable  $k-\mathcal{E}$  ให้ผลใกล้เคียงกับผล การทดลองมากที่สุดจากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งหมด แต่ก็ใช้ ระยะเวลาในการคำนวณมากที่สุด เมื่อทำการเพิ่มพจน์เนื่องจากอนุภาค ในแบบจำลองความปั้นป่วนชนิด Standard  $k-\mathcal{E}$  สามารถอธิบาย ้ความเร็วของการไหลใน Mixing Layer ได้ดียิ่งขึ้น ขณะเดียวกันกลับ พบว่าแบบจำลองความปั้นป่วนชนิด Standard k-arphi สามารถ อธิบายพฤติกรรมการไหลที่มีอนุภาคได้เฉพาะด้านที่มีความเร็วสูง เท่านั้น จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้ทั้งหมดจะเห็นว่า แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด  $\mathbf{k}-\mathbf{\varpi}$  สามารถจำลองการไหลได้ไม่ดี เท่าที่ควรเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั้นป่วนชนิด  $k-\mathcal{E}$  ใน ส่วนของแบบจำลองความปั้นป่วนชนิด Realizable  $k-\mathcal{E}$  และ แบบจำลองความปั้นป่วนขนิด Standard  $k-\mathcal{E}$  ของ Garcia และ Crespo [1] ทางผู้วิจัยเห็นว่ามีความเหมาะสมที่จะทำการพัฒนาต่อไป เพื่อให้สามารถอธิบายการไหลที่มีอนุภาคใน Mixing Layer ได้มากขึ้น โดยทำการปรับปรุงค่าคงที่ที่ใช้ในสมการ k และ  ${\cal E}$ 

### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำหรับ ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ โดยฝ่ายวิชาการ สำนักงาน กองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และ คอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

### 7. เอกสารอ้างอิง

 J. Garcia and Crespo A. "A Turbulent Model for Gas-Particle Jets", Journal of Fluids Engineering, 2000, Vol. 122, pp.505-509.
 K. Hishida, Ando A and Maeda M. "Experiments on Particle Diapersion in a Turbulent Mixing Layer", Int. J, Multiphase Flow, 1992, Vol. 18, No. 2, pp.181-194.

[3] B. E. Launder and Spalding D. B. "Lectures in Mathematical Models of Turbulence", Academic Press, London, England, 1972.
[4] D. Choudhury. "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling", Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107, 1993.

[5] T.-H. Shih, Liou W. W, Shabbir A, Yang Z, and Zhu J. "A New Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows
Model Development and Validation", Computers Fluids, 1995, Vol. 24, No. 3, pp. 227-238.

[6] D. C. Wilcox. "Turbulence Modeling for CFD", DCW Industries, Inc. La Canada, California, 1993.