การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17
15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี

การจำลองเชิงตัวเลขของเจ็ตแบบปั่นป่วนในบริเวณจำกัดขอบเขตโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม
Numerical Simulation of Confined Turbulent Jets Using Finite Volume Method

คมกฤษณ์ ชัยโย และ สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร. 0-2218-6637 โทรสาร 0-2252-2889 E-mail: fmespt@eng.chula.ac.th

Khomgris Chaiyo and Sompong Putivisutisak
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University, Pathumwan, Bangkok 10330 Thailand
Tel: 0-2218-6637 Fax: 0-2252-2889 E-mail: fmespt@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบสมมาตรรอบแกนของเจ็ตแบบปั่นป่วนในบริเวณจำกัดขอบเขต โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุมร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-ε และ k-ε-γ การวางกริดในระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุมนี้เป็นแบบเยื้องกัน โดยกริดมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วและค่า Turbulent shear stresses ที่คำนวณได้จะถูกเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองที่มีอยู่แล้ว ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่าผลที่ได้จากแบบจำลอง k-ε และ k-ε-γ นั้นมีความใกล้เคียงกัน รวมทั้งมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลอง

Abstract

This paper presents a finite volume simulation of confined axisymmetric turbulent jets with a non-uniform staggered grid. Two turbulence models, the k-ε and k-ε-γ, are used to approximate the turbulence effects. The resulting velocity profiles and Reynolds stresses are compared with the experimental data. It is found that both turbulence models give similar solution and agree well with the measurements.

1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการไหลของเจ็ตอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการไหลแบบเจ็ตนี้เป็นลักษณะการไหลที่มีการพบเห็นได้ทั่วไป และมีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในงานด้านทางวิศวกรรม เช่น การผสมในหัวฉีด การจ่ายอากาศของหัวจ่ายในระบบปรับอากาศ ฯลฯ นอกจากนั้นลักษณะการไหลแบบเจ็ตยังพบได้ในระบบหรือส่วนที่วิศวกร และบุคคลทั่วไปอาจยังไม่ตระหนักถึงความสำคัญ ซึ่งอาจมีสาเหตุจากการที่เจ็ตเหล่านี้เป็นที่พบเห็นได้โดยทั่วไปอย่างมากจนเกิดความเคยชิน เช่น การปล่อยน้ำเสีย หรือน้ำหล่อเย็นลงสู่แม่น้ำ การปล่อยควันสู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นการไหลในลักษณะของเจ็ตเช่นกัน

ในงานวิจัยที่ผ่านมานั้น Rajaratnam [1] ได้ทำการศึกษาลักษณะของ Circular jet พบว่าสามารถแบ่งลักษณะของเจ็ตได้ 3 บริเวณ คือ 1) Potential core region ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วสม่ำเสมอ 2) Flow development region ซึ่งอยู่ใกล้ทางออกของเจ็ต และ 3) บริเวณที่การไหลมีการพัฒนาของ Shear layer

Antonia and Bilger [2] ทำการทดลองเพื่อศึกษาการไหลของเจ็ตในกระแสลมตาม (Coflow jet) โดยใช้อุโมงค์ลมที่มี Hot wire anemometer สำหรับวัดค่าของความเร็ว โดยในการทดลองใช้อัตราส่วนความเร็วต่ออากาศด้านนอก ($\lambda = u_j/u_i$) มีค่าเท่ากับ 2 และ 3.5 จากผลการทดลองพบลักษณะซิมิลาริตี้ของ Mean velocity และ Turbulence intensity เมื่อ x/d มีค่าตั้งแต่ 38 และ 152 ตามลำดับ

Razinsky and Brighton [3] ได้ทำการเสนอแบบจำลองทางทฤษฎีสำหรับปัญหา Nonseparated mixing ของ Confined jet ซึ่งประกอบด้วยเจ็ตที่มีความเร็วสูงในท่อกลมหน้าตัดคงที่ และต่อมา Zhu and Shih [4] ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของ Confined jets ในท่อทรงกระบอกกลม โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน 2 แบบจำลอง คือ แบบจำลอง RNG (Renormalization group based k-ε model) และ แบบจำลอง RSM (Reynolds stress equation model) เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง RSM กับผลการทดลอง พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องมากกว่าในกรณีที่ใช้แบบจำลอง k-ε ส่วนในกรณี RNG นั้นผลการคำนวณที่ได้แทบจะไม่มีความแตกต่างจากแบบจำลอง k-ε เลย ในปีเดียวกัน Zhu and Shih [5] ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของ Confined jet แบบปั่นป่วนอัดตัวไม่ได้ โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณี ตามระดับของ Recirculation คือ กรณีที่ไม่มี มีขนาดปานกลาง และมีขนาดใหญ่ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน k-ε

และแบบจำลอง RRSAE (Realizable Reynolds stress algebraic equation model) ร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม จากผลการคำนวณที่ได้ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าแบบจำลอง RRSAE ให้ผลการคำนวณที่มีความถูกต้องดีกว่าแบบจำลอง k-ε

ในบทความนี้ จะทำการศึกษาคุณลักษณะของการไหลของเจ็ดแบบปั่นป่วนในบริเวณจำกัดขอบเขต (Confined coflow jet) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน 2 แบบจำลอง คือ แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-ε และแบบจำลองความปั่นป่วน k-ε-γ (ซึ่ง Wang and Derksen [6] กล่าวว่าเป็นแบบจำลองที่สามารถใช้คำนวณค่า Turbulent shear stress ของปัญหาการไหลในท่อกลมได้ดีกว่าแบบจำลอง Standard k-ε) จากนั้นจะนำผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไฟไนต์วอลุมที่พัฒนาขึ้น [7] ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Razinsky and Brighton [8]

2. ทฤษฎีการคำนวณ

การไหลในที่นี้เป็นแบบปั่นป่วนในระบบพิกัดทรงกระบอก 2 มิติ (x, r) โดยมีสมมติฐานว่าการไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ที่สภาวะคงตัว และคุณสมบัติของของไหลมีค่าคงที่ เนื่องจากค่าของตัวแปรในการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่าไม่คงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นจึงใช้หลักการ Reynolds decomposition แยกส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยกับส่วนที่สั่น (Fluctuation) ซึ่งจะได้สมการความต่อเนื่องและสมการ โมเมนตัม ดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho V)}{\partial x}=0 \tag{1}$$

สมการ x – โมเมนตัม

$$\frac{\partial(\rho UU)}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho UV)}{\partial x}=-\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial U}{\partial x}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\mu\frac{\partial U}{\partial r}\right) -\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho\overline{u'u'}\right)-\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho\overline{u'v'}\right) \tag{2}$$

สมการ r – โมเมนตัม

$$\frac{\partial(\rho UV)}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho VV)}{\partial r}=-\frac{\partial P}{\partial r}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial V}{\partial x}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\mu\frac{\partial V}{\partial r}\right) -\mu\frac{V}{r^2}-\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho\overline{u'v'}\right)-\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho\overline{v'v'}\right) \tag{3}$$

จาก Boussinesq's approximation กำหนดค่าของ Reynolds stress ($\tau_{ij}=-\rho\overline{u_i'u_j'}$) คือพจน์ $-\rho\overline{u'u'}$, $-\rho\overline{u'v'}$ และ $-\rho\overline{v'v'}$ ในสมการ (2) และ (3) ดังนี้

$$\tau_{ij}=-\frac{2}{3}k\delta_{ij}+\mu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) \tag{4}$$

โดยที่ μ_t คือ Eddy viscosity เมื่อแทนค่า Reynolds stress นี้ลงในสมการโมเมนตัม (สมการ (2) และ (3)) จะได้สมการโมเมนตัมที่ใช้ในการคำนวณ ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial(\rho UU)}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho UV)}{\partial x}=-\frac{\partial}{\partial x}\left(P+\frac{2}{3}k\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left[(\mu+\mu_t)\frac{\partial U}{\partial x}\right] +\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r(\mu+\mu_t)\frac{\partial U}{\partial r}\right] \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho UV)}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho VV)}{\partial r}=-\frac{\partial}{\partial r}\left(P+\frac{2}{3}k\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left[(\mu+\mu_t)\frac{\partial V}{\partial x}\right] +\frac{1}{\mathrm{r}}\frac{\partial}{\partial r}\left[r(\mu+\mu_t)\frac{\partial V}{\partial r}\right]-\frac{V}{r^2} \tag{6}$$

1) แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-ε [9]

สมการ Transport ของ Turbulence kinetic energy, k และ Dissipation rate, ε สำหรับพิกัดทรงกระบอก คือ

$$\frac{\partial(\rho Uk)}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho Vk)}{\partial r}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x}\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial r}\right]-P_k-\rho\varepsilon \tag{7}$$

$$\frac{\partial(\rho U\varepsilon)}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho V\varepsilon)}{\partial r}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right] -C_{\varepsilon1}P_k\frac{\varepsilon}{k}-C_{\varepsilon2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{8}$$

เมื่อ

$$\mu_t=\frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \tag{9}$$

$$P_k=\mu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \tag{10}$$

ส่วนค่าคงที่ต่าง ๆ ในแบบจำลอง k-ε มีค่าดังนี้

$$C_\mu=0.09,\ C_{\varepsilon1}=1.44,\ C_{\varepsilon2}=1.92,\ \sigma_k=1.0,\ \sigma_\varepsilon=1.3$$

2) แบบจำลองความปั่นป่วน k-ε-γ [6,10]

สมการ Transport ของ k นั้นยังคงเหมือนสมการ (7) ในขณะที่สมการ Transport ของ ε และ γ (Intermittency factor) คือ

$$\frac{\partial(\rho U\varepsilon)}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho V\varepsilon)}{\partial r}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right] -C_{\varepsilon1}P_k\frac{\varepsilon}{k}-C_{\varepsilon2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+C_{\varepsilon3}\Gamma\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{11}$$

และ

$$\frac{\partial(\rho U\gamma)}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho V\gamma)}{\partial r}=\frac{\partial}{\partial x}\left[(1-\gamma)\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\gamma}\right)\frac{\partial\gamma}{\partial x}\right]+\frac{1}{\mathrm{r}}\frac{\partial}{\partial r}\left[r(1-\gamma)\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\gamma}\right)\frac{\partial\gamma}{\partial r}\right]+S_\gamma \qquad (12)$$

เมื่อ

$$S_\gamma = C_{\gamma 1}\gamma(1-\gamma)\frac{P_k}{\gamma}+C_{\gamma 2}\rho\frac{k^2}{\varepsilon}\left[\left(\frac{\partial\gamma}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial\gamma}{\partial r}\right)^2\right]-C_{\gamma 3}\rho\gamma(1-\gamma)\frac{\varepsilon}{k}\Gamma \qquad (13)$$

$$\Gamma=\left(k^{2.5}/\varepsilon\right)U_i/\left(U_kU_k\right)^{1/2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right)\left(\frac{\partial\gamma}{\partial x_j}\right) \qquad (14)$$

$$\mu_t=\rho C_\mu\left\{1+C_{\mu\gamma}\frac{k^3}{\varepsilon^2}\left(\frac{1-\gamma}{\gamma^3}\right)\left[\left(\frac{\partial\gamma}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial\gamma}{\partial r}\right)^2\right]\right\}\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (15)$$

และค่าคงที่ต่าง ๆ ในแบบจำลอง k-ε-γ มีค่าดังต่อไปนี้

$\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $\sigma_\gamma=1.0$,

$C_{\varepsilon 1}=1.35$, $C_{\varepsilon 2}=1.80$, $C_{\varepsilon 3}=0.10$,

$C_{\gamma 1}=1.60$, $C_{\gamma 2}=0.15$, $C_{\gamma 3}=0.16$,

$C_\mu=0.09$, $C_{\mu\gamma}=0.10$

จากสมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในแบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 2 แบบจำลอง สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการ Transport ทั่วไปของตัวแปร ϕ (ซึ่งแทนค่าลักษณะของการไหล U, V, k, ε และ γ) ได้ดังนี้

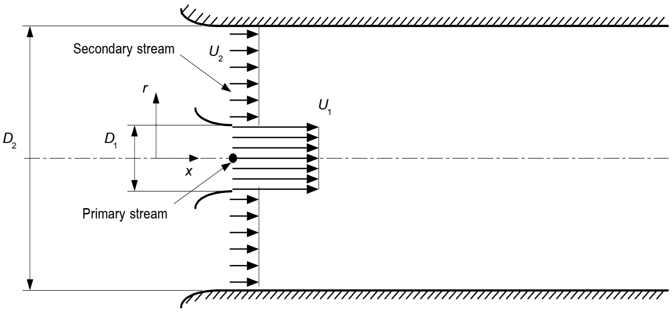
$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U\phi)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho V\phi)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\Gamma_\phi\frac{\partial\phi}{\partial r}\right)+S_\phi \qquad (16)$$

เมื่อ Γ_ϕ คือ Diffusion coefficient และ S_ϕ คือ Source term สำหรับการคำนวณจะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุมร่วมกับ Non-uniform staggered grid โดยเริ่มจากการดิสครีไทซ์สมการของตัวแปรต่าง ๆ ที่จัดอยู่ในรูปแบบสมการ (16) ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยโดยทำการอินทิเกรตตลอดทั้งปริมาตรควบคุมเพื่อเปลี่ยนรูปแบบของสมการ Transport ดังกล่าวมาเป็นสมการพีชคณิตในรูปแบบทั่วไปดังนี้

$$a_P\phi_P=a_N\phi_N+a_S\phi_S+a_E\phi_E+a_W\phi_W+S_\phi \qquad (17)$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ a_P, a_N, a_S, a_E และ a_W ในสมการ (17) ได้มาจากการประมาณค่าพจน์ของการแพร่กระจายด้วย Central differencing scheme และพจน์การพาด้วย Hybrid scheme [11] สำหรับการแก้ระบบสมการพีชคณิตนี้ จะใช้วิธี TDMA ร่วมกับการใช้ลำดับขั้นตอนวิธี SIMPLE [12] ในการคำนวณความเร็วและความดัน เพื่อให้ค่าของความเร็วที่คำนวณได้จากสมการโมเมนตัมนั้นมีความสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง

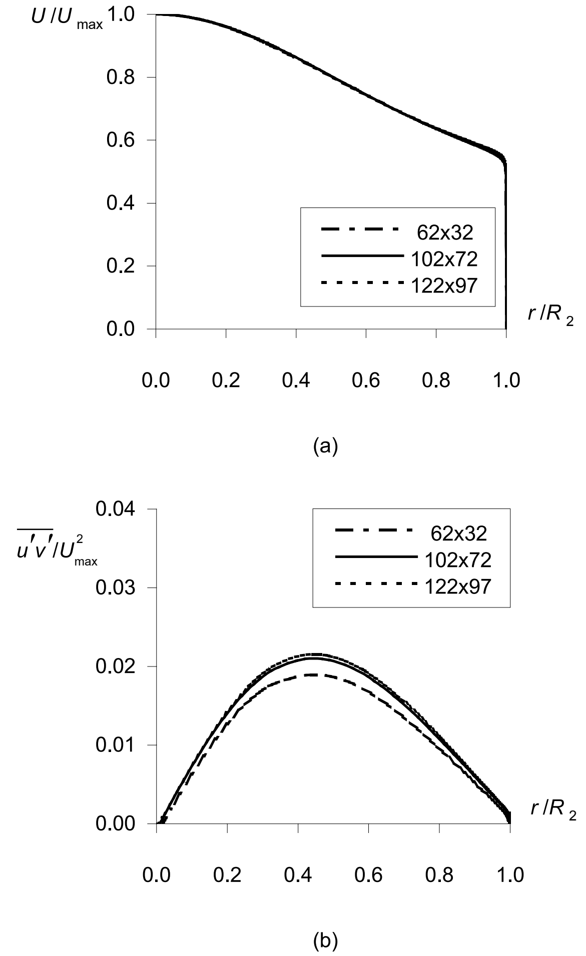
3. ลักษณะของปัญหา



รูปที่ 1 โดเมนของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนของ Confined coflow jet

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยจะทำการศึกษาลักษณะของการไหลของเจ็ตแบบปั่นป่วนในบริเวณจำกัดขอบเขต โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน 2 แบบจำลอง คือ แบบจำลอง Standard k-ε และ k-ε-γ โดยแยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ R_2/R_1 = 3 ($\mathrm{Re}=3.88\times10^5$) และ R_2/R_1 = 6 ($\mathrm{Re}=7.76\times10^5$) เมื่อกำหนดให้ U_1/U_2 = 10 และ $\mathrm{Re}=\rho U_1D_2/\mu$

ในที่นี้จะสมมติว่าของไหลเป็นอากาศที่มีความหนาแน่น ρ เท่ากับ 1.19 kg/m^3 และมีความหนืดสัมบูรณ์ μ เท่ากับ 1.84x10^{-5} N.s/m^2 สำหรับเงื่อนไขขอบ จะกำหนดให้ความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบสม่ำเสมอ และใช้เงื่อนไขขอบแบบสมมาตรที่บริเวณกึ่งกลางท่อ รวมทั้งทดสอบความเป็น Grid-independent ของการคำนวณกับกริดที่แตกต่างกันสามขนาด สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-ε รูปที่ 2 แสดงผลการคำนวณของความเร็วและ Turbulent shear stress ที่ตำแหน่ง x = 10R_2 สำหรับ R_2/R_1 = 3 จากการใช้จำนวนกริดที่แตกต่างกันสามขนาดคือ 62×32, 102×72 และ 122×97 จากกราฟจะเห็นว่าผลที่ได้จากการใช้กริดขนาด 102×72 และ 122×97 มีความใกล้เคียงกันมากจึงเลือกใช้กริดขนาด 102×72 ในการคำนวณ สำหรับการทดสอบความเป็น Grid-independent ของผลลัพธ์ในกรณีที่ R_2/R_1 = 6 ก็ใช้วิธีแบบเดียวกันในการคำนวณ (ไม่ได้แสดงรูปในที่นี้) ซึ่งจากจำนวนกริดสามขนาดคือ 62×42, 102×82 และ 122×102 พบว่ากริดขนาด 102×82 ให้ผลลัพธ์ที่มีลักษณะ Grid-independent แล้ว (สำหรับในกรณีที่ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน k-ε-γ ผลของการทดสอบในเรื่อง Grid-independent มีความคล้ายคลึงกันกับในกรณีของแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-ε จึงไม่ได้แสดงรูปในที่นี้ ซึ่งได้เลือกใช้กริดขนาด 102×72 สำหรับกรณีที่ R_2/R_1 = 3 และใช้กริดขนาด 102×82 สำหรับกรณีที่ R_2/R_1 = 6)



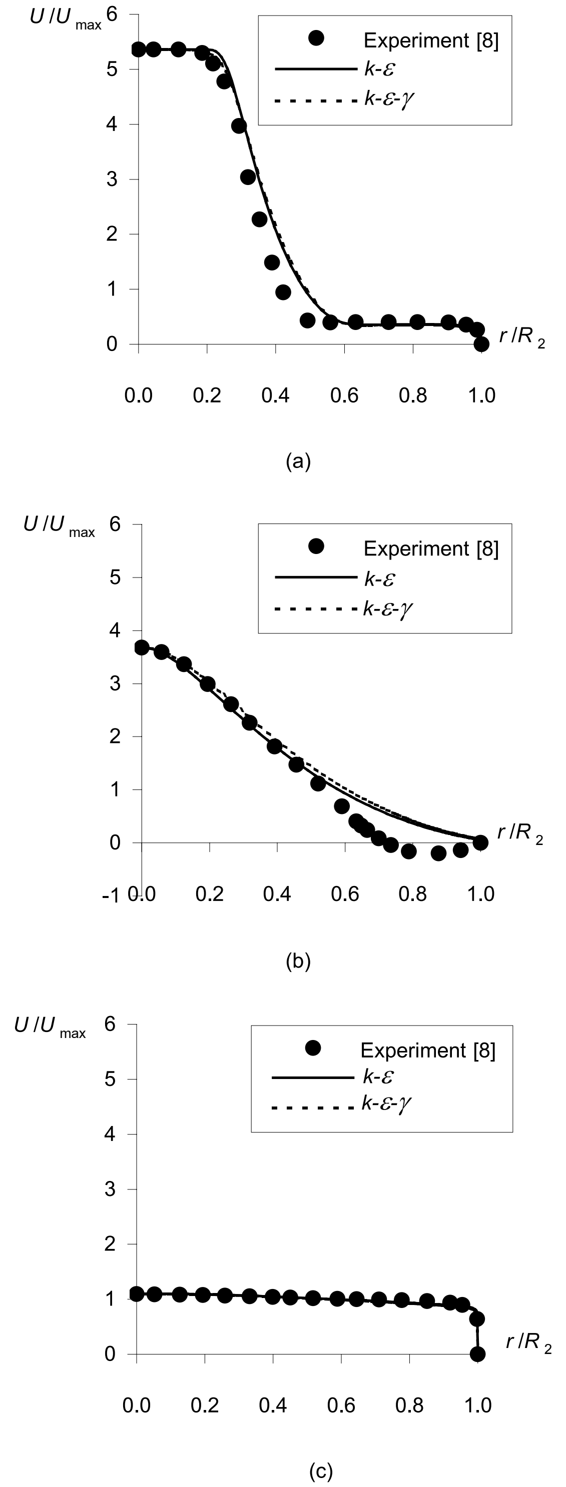
รูปที่ 2 การเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ตำแหน่ง x = 10R_2 ที่ได้จากการใช้จำนวนกริดที่แตกต่างกันสามขนาดในกรณีที่ R_2/R_1 = 3

(a) การกระจายตัวของความเร็ว

(b) Turbulent shear stress

4. ผลการคำนวณ

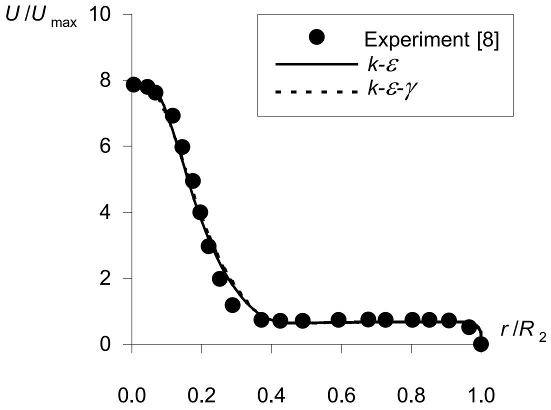
ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-ε และ k-ε-γ ในกรณี R_2/R_1 = 3 ที่ตำแหน่ง x = 4R_2/3, x = 16R_2/3 และ x = 40R_2/3 ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Razinsky and Brighton [8] ดังแสดงในรูปที่ 3 สำหรับค่าอัตราส่วนขนาด R_2/R_1 = 3 และความเร็ว U_1/U_2 = 10 พบว่าการไหลของ Confined coflow jet เกิดการไหลหมุนวน ซึ่งช่วงบริเวณก่อนที่จะเกิดการไหลหมุนวนและช่วงหลังการเกิดการไหลหมุนวน (ช่วงที่กำลังพัฒนาเป็น Fully developed flow) ที่ตำแหน่ง x = 4R_2/3 และ x = 40R_2/3 พบว่าผลการคำนวณที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง แต่ในช่วงบริเวณที่เกิดการไหลหมุนวน เช่น ที่ตำแหน่ง x = 16R_2/3 ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 2 แบบจำลอง ยังไม่มีความถูกต้องเท่าที่ควร



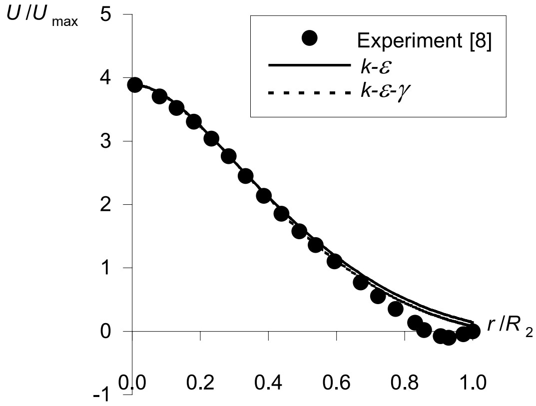
รูปที่ 3 ลักษณะการกระจายตัวของความเร็ว กรณี R_2/R_1 = 3

(a) ที่ตำแหน่ง x = 4R_2/3 (b) ที่ตำแหน่ง x = 16R_2/3

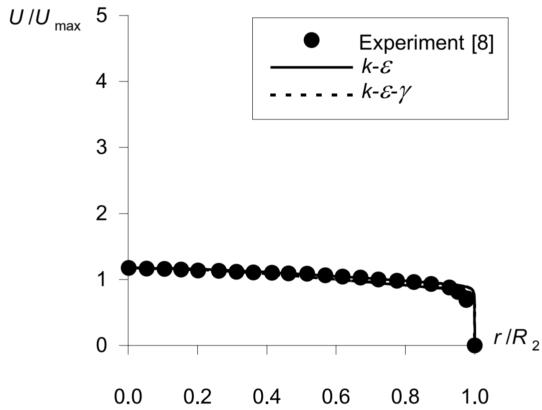
(c) ที่ตำแหน่ง x = 40R_2/3



(a)

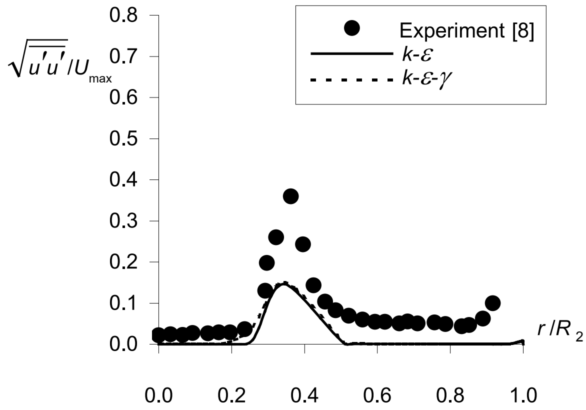


(b)

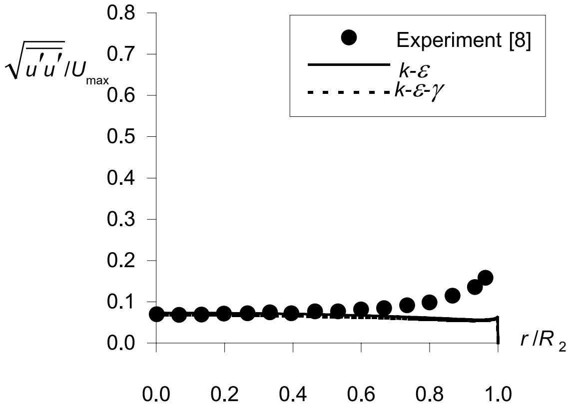


(c)

รูปที่ 4 ลักษณะการกระจายตัวของความเร็ว กรณี R_2/R_1 = 6
(a) ที่ตำแหน่ง x = $4R_2/3$ (b) ที่ตำแหน่ง x = $16R_2/3$
(c) ที่ตำแหน่ง x = $40R_2/3$



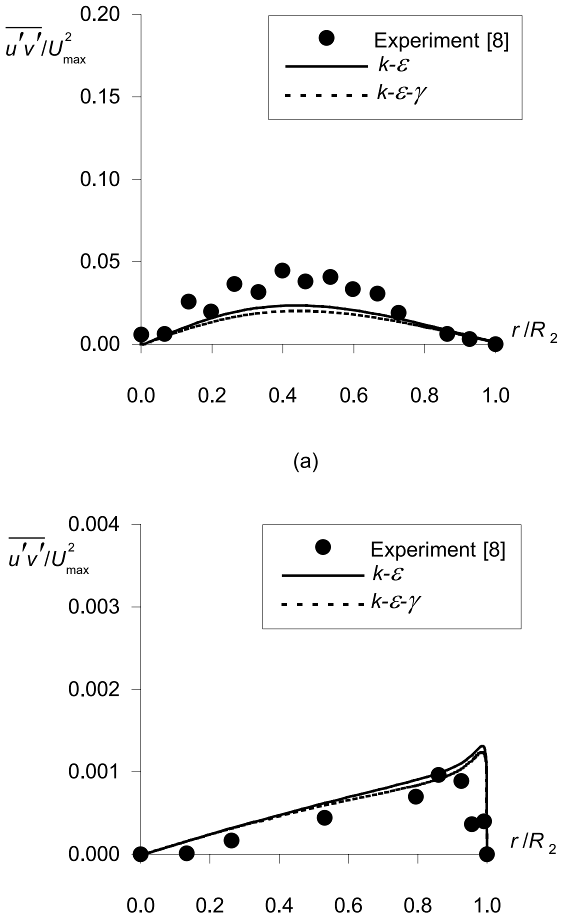
(a)



(b)

รูปที่ 5 ลักษณะการกระจายตัวของค่า Axial turbulence intensity กรณี R_2/R_1 = 3
(a) ที่ตำแหน่ง x = $2R_2/3$ (b) ที่ตำแหน่ง x = $30R_2$

เมื่อเพิ่มอัตราส่วนขนาด R_2/R_1 = 3 มาเป็น R_2/R_1 = 6 จะพบว่าปริมาณการไหลหมุนวนจะน้อยลง ทำให้ผลการคำนวณลักษณะการกระจายตัวของความเร็วที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกับผลการทดลองดีขึ้น อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่าความเร็วที่ได้จากการคำนวณก็ยังไม่แสดงผลของ Adverse pressure gradient ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4 ส่วนในรูปที่ 5 และ 6 แสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า Axial turbulence intensity และ Turbulent shear stress สำหรับกรณี R_2/R_1 = 3 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จะพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 2 แบบจำลอง ให้ผลการคำนวณที่ไม่ดีนัก แม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จะมีแนวโน้มในทางเดียวกันกับผลการทดลองก็ตาม ทั้งนี้ความผิดพลาดอาจเกิดมาจากหลายสาเหตุ อาทิเช่น ความคลาดเคลื่อนที่มาจากการใช้ Wall function ตรงบริเวณการไหลหมุนวน หรืออาจเกิดมาจากการที่ประมาณพจน์ของ Turbulent stress ด้วย Boussinesq's approximation ที่ไม่ได้รวมผลของการเกิด Vorticity เข้าไป เป็นต้น



(a)

(b)

รูปที่ 6 ลักษณะการกระจายตัวของค่า Turbulent shear stress intensity กรณี $R_2/R_1 = 3$
(a) ที่ตำแหน่ง $x = 10R_2$ (b) ที่ตำแหน่ง $x = 30R_2$

5. สรุปผล

จากการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-ε และ k-ε-γ ในการทำนายลักษณะของเจ็ตแบบปั่นป่วนในบริเวณจำกัดขอบเขตนั้น พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทั้งสองนี้ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทั้งสองนี้มีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดลองในเรื่องของลักษณะการกระจายความเร็ว แต่สำหรับในส่วนของ Axial turbulence intensity และ Turbulent shear stress นั้นผลการคำนวณที่ได้ ยังไม่มีความถูกต้องเท่าที่ควรเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โดยผ่านทางทุนเมธีวิจัยอาวุโสสำหรับศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ

เอกสารอ้างอิง

[1] Rajaratnam, N., (1976), "Turbulent Jets," Elsevier Scientific Publishing Company, New York.

[2] Antonia, R. A., and Bilger, R. W., (1973), "An Experimental Investigation of an Axisymmetric Jet in a Co-flowing Air Stream," *J. Fluid Mech.*, Vol. 61, pp. 805-822.

[3] Razinsky, E., and Brighton, J. A., (1972), "A Theoretical Model for Nonseparated Mixing of a Confined Jet," *J. Basic Eng.*, Series D, Vol. 93, No. 3, pp. 551-558.

[4] Zhu, J., and Shih, T. H., (1994), "Computation of Confined Coflow Jets with 3 Turbulence Models," *Int. J. Numer. Meth. Fluids* , Vol. 19, pp. 939-956.

[5] Zhu, J., and Shih, T. H., (1994), "A Numerical Study of Confined Turbulence Jets," *J. Fluids Eng.*, Vol. 116, pp. 702-706.

[6] Wang, Y. Q., and Derksen, R. W., (1999), "Prediction of Developing Turbulent Pipe Flow by Modified k-ε-γ Model," *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 2, pp. 268-270.

[7] Putivisutisak, S., (2002), " A Computer Programme for Solving General Engineering Flows," Mech. Eng. Dept., Chulalongkorn University, Report No. 165-Mechanical-2543.

[8] Razinsky, E., and Brighton, J. A., (1971), "Confined Jet Mixing for Nonseparated Conditions," *J. Basic Eng.*, Series D, Vol. 93, No. 3, pp. 333-349.

[9] Launder, B. E., and Spalding, D. B., (1974), "The Numerical Computation of Turbulent Flows," *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, Vol. 3, pp. 269-289.

[10] Dewan, A. and Arakeri, J. H., (2000), "Use of k-ε-γ Model to Predict Intermittency in Turbulent Boundary-Layers," *J. Fluids Eng.,* Vol. 122, pp. 542-546.

[11] Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., (1995), "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method," Longman Scientific & Technical, London.

[12] Patankar, S. V., (1980), "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemishpere Publishing Corporation, New York.