การทำนายการไหลแบบปั่นป่วนที่มีการฉีดกระทบ

Prediction of Turbulent Flow of a Confined Impinging Jet

เมืองแก้ว ยุตัน ชนาธิป ชัยดิลกพัฒนากุล พงษ์เจต พรหมวงศ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถ.ฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพ 10520
โทรศัพท์ 66-2326-4197 โทรสาร 66-2326-4198 E-mail: kppongje@kmitl.ac.th

Muangkaew Yutan Chanatip Chaidilokpattanakul Pongjet Promvonge
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520
Tel. 662-326-4197 ext 104, Fax 662-326-4198, E-mail: kppongje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการทำนายการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ที่มีการฉีดของไหลกระทบในพื้นที่จำกัด (Confined Impinging Jet) โดยนำวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume) ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ model และ Reynolds stress model (RSM) โดยใช้รูปแบบผลต่างอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งมาคำนวณ คือ upwind scheme ผลลัพธ์ของการทำนายรูปร่างของความเร็วตามแนวรัศมีถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่วัดโดย laser Doppler velocimetry (LDV) ผลการคำนวณปรากฏว่า RSM สามารถทำนายได้ดีกว่า $k-\varepsilon$ model

Abstract

The paper presents the numerical simulation of steady incompressible turbulent flow of a confined impinging jet. A finite volume approach with standard $k-\varepsilon$ turbulence model including a Reynolds stress model (RSM) is used in predicting the impinging jet flows together with a first order upwind numerical scheme. The predicted results of radial velocity profiles are compared with available laser Doppler velocimetry (LDV) experimental data. The computations show that the RSM performs better than the $k-\varepsilon$ model in comparison with measurements

1.บทนำ

การฉีดของไหลเข้าไปในช่องปิด (confined channel) เพื่อศึกษาการไหลปั่นป่วนที่เกิดขึ้น ซึ่งมีผลต่อการถ่ายเทมวล ความร้อน และการหล่อเย็นแล้วยังถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่เราต้องการอบชุบชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนอิเลคทรอนิค ใบพัดกังหันและอื่นๆ ซึ่งเป็นการศึกษาปัญหาที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องที่ผ่านมาเนื่องจากคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันความสามารถยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ จึงได้คิดค้น turbulence model แบบต่างๆ ขึ้นเพื่อช่วยวิเคราะห์ทำนายการไหลที่เกิดขึ้น ในบทความนี้จะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ model และ RSM ที่มีผลต่อการไหลแบบปั่นป่วนในการฉีดกระทบในช่องปิด โดยใช้ program code ที่เขียนขึ้นมาพัฒนาต่อจาก TEACH-T code [9] และนำผลการคำนวณที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองของ Fitzgerald and Garmella.(1997) [4]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมการพื้นฐานของการไหล

ในบทความนี้เป็นการวิเคราะห์การไหลแบบอัดตัวไม่ได้, ไม่มีการถ่ายเทความร้อน, เป็นการไหลแบบมีความหนืด มีสมการที่ใช้อยู่คือสมการการอนุรักษ์มวล กับสมการโมเมนตัม โดยเขียนสมการดังกล่าวอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยของเวลา (time-averaged) ซึ่งแสดงในรูปแบบ tensor ดังนี้

สมการอนุรักษ์มวล

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

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{t}_{ij} + \tau_{ij}\right) \qquad (2)$$

ค่าความเค้นเฉลี่ยเนื่องจากความหนืด, $\bar{t}_{ij}$ จะประมาณเป็น

$$\bar{t}_{ij} \cong \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \qquad (3)$$

โดย μ คือ laminar viscosity ส่วนค่าความเค้นเฉลี่ยของ Reynolds stress, τ_{ij} จะเขียนอยู่ในรูป

$$\tau_{ij} = -\rho\overline{u_i' u_j'} \tag{4}$$

ค่า τ_{ij} ซึ่งยังไม่ทราบค่า ดังนั้นจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลอง $k-\varepsilon$ model ในการหาค่า τ_{ij}

ใน $k-\varepsilon$ model เทอม Reynolds stresses จะถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ mean strain rate โดย eddy viscosity ซึ่งค่า eddy viscosity จะกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับ turbulent kinetic energy,(k) และ dissipation rate (ε) โดยใช้ Boussinesq's approximation [7,8] คือ

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3}\delta_{ij}(\rho k) + \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{5}$$

โดยที่ $\mu_t = \rho C_\mu k^2/\varepsilon$ คือ turbulent eddy viscosity

สมการของ turbulent kinetic energy (TKE) k จะอยู่ในรูป [7,8]

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_e}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G - \rho\varepsilon \tag{6}$$

สมการ dissipation rate ของ turbulent kinetic energy [7,8] จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + \frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}G - C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon) \tag{7}$$

ซึ่ง G แทน generation rate of turbulent kinetic energy ขณะที่ $\rho\varepsilon$ เป็น destruction rate โดย G จะเป็น

$$G = \mu_e\left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right] \tag{8}$$

ค่าขอบเขตสำหรับค่าต่างๆ ของ turbulent ที่ใกล้ผนังสามารถหาได้จาก wall function โดยมีค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับสมการต่างๆที่ผ่านมามีดังนี้คือ $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92$ และ $C_\mu = 0.09$ เป็นค่าคงที่ [6] ซึ่งโดย $\mu_e = \mu_t + \mu$

2.2 Reynolds Stress Model (RSM)

Reynolds-averaged transport equations สามารถแก้หาค่าสำหรับ τ_{ij} , [7,8] แล้วจัดรูปของสมการต่างๆได้ใหม่เป็น

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial(u_k \tau_{ij})}{\partial x_k} = -G_{ij} - \Phi_{ij} + D_{ij} + \varepsilon_{ij} \tag{9}$$

$$G_{ij} = \rho P_{ij} = -\left(\rho\overline{u_i' u_k'}\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \rho\overline{u_j' u_k'}\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)$$

$$\Phi_{ij} = -C_1\frac{\rho\varepsilon}{k}\left(\overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3}k\delta_{ij}\right) - C_2\left(G_{ij} - \frac{2}{3}G\delta_{ij}\right)$$

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k}\left((\frac{\mu_e}{\sigma_T})\frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k}\right)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3}\rho\varepsilon\delta_{ij}$$

ซึ่งโดยที่ G_{ij} = local production, Φ_{ij} = local pressure strain, D_{ij} = net diffusive transport, ε_{ij} = local dissipation tensor โดยที่ C_1 = 2.5, และ C_2 = 0.55 เป็นค่าคงที่ [7].

2.3 รูปแบบทั่วไปของสมการควบคุม

จากสมการเชิงอนุพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้นทุกสมการสามารถเขียนในรูปแบบมาตรฐานที่ประกอบด้วยเทอม Convection, Diffusion, และ Source terms [5,6] สำหรับการไหลในพิกัดทรงกระบอกแบบสองมิติได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{1}{r}(r\rho v\phi) - \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\phi x}\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\Gamma_{\phi r}\frac{\partial \phi}{\partial r}\right) = S_\phi \tag{10}$$

โดยที่ ϕ เป็นค่าตัวแปรใดๆตามสมการ $\Gamma_{\phi x}$ และ $\Gamma_{\phi r}$ จะเปลี่ยนแปลงตามค่า ϕ และ S_ϕ เป็น source term

สำหรับรายละเอียดของค่า $\Gamma_{\phi x}$, $\Gamma_{\phi r}$ และ S_ϕ ที่ค่า ϕ ต่างๆ จะหาได้จากเอกสารอ้างอิง [1,2,3]

2.4 Discretization ของสมการ

Discretization สมการข้างต้นได้โดยการอินทิเกรตสมการควบคุมตลอดทั้งปริมาตรควบคุม ที่มีการแบ่งออกเป็นกริด ทำให้ได้ระบบสมการอย่างง่ายดังต่อไปนี้

$$a_P\phi_P = a_E\phi_E + a_W\phi_W + a_N\phi_N + a_S\phi_S + S \tag{11}$$

สมการที่(11) นี้จะได้มาจากสมการ discretised diffusion term ของสมการควบคุม โดยใช้ central differencing scheme ส่วน convection term ของสมการควบคุมนั้นจะไม่สามารถ discretise ได้โดยตรงในการวิเคราะห์นี้ต้องอาศัย upwind scheme เข้าช่วย

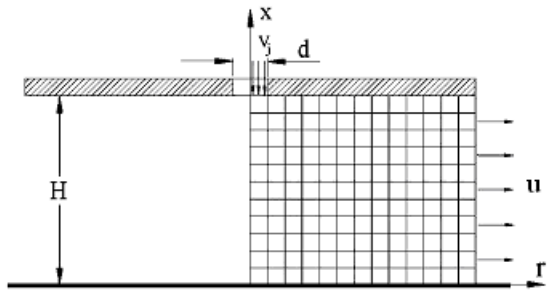
2.4.1 กระบวนการหาคำตอบ

การคำนวณในที่นี้ สมการค่าเฉลี่ยของเวลา (time averaged Navier-Stokes equation) ในสมการที่ (1), (2) สมการ turbulent kinetic energy (TKE) ในสมการที่ (6), สมการ dissipation rate ของ turbulent kinetic energy ในสมการ (7), สมการ (4) สำหรับ

$k-\varepsilon$ model หรือสมการ (9) สำหรับ RSM จะถูกแก้สมการโดยอาศัยวิธีการเชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีการปริมาตรสืบเนื่อง โดยจะใช้ SIMPLE algorithm [5, 6] ในการแยกความสัมพันธ์ที่มีต่อกันระหว่างความดันกับความเร็วและยังใช้ในกระบวนการทำซ้ำ ส่วน upwind scheme จะใช้ในการ discretise เทอม convection และเทอม diffusion จะถูก discretise โดย central differencing scheme บนกริดที่แบ่งแบบ staggered ในการแก้ระบบสมการที่เกิดขึ้นจะใช้เทคนิคของวิธีการ TDMA (tri diagonal matrix algorithm) แบบ line by line sweeping ในการหาคำตอบ [5, 6]

3. ลักษณะของปัญหา

Fitzgerald and Garmella [4] ทำการศึกษาปัญหาการไหลฉีดกระทบ โดยการวิเคราะห์นี้ได้มาจากการทดลอง ซึ่งเป็นการทดลองโดยใช้ laser doppler velocimetry (LDV) ในการหาค่าต่างๆ จากในรูปที่ 1 ซึ่งจะมีค่า H/d = 2,3 และ d = 6.35 mm. r = 69.85 mm. เงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณดังต่อไปนี้ โดยของไหลที่ฉีดคือ perfluorinated dielectric liquid (FC 77), และได้กำหนดอุณหภูมิไว้ที่ 20°C ซึ่งเป็นค่าที่แสดงบอกถึงคุณสมบัติของของไหลที่ใช้คือ $(\rho = 1789\,kg/m^3, \nu = 0.86\times10^{-6}\,m^2/s)$ ที่ $\mathrm{Re}_D = 13{,}000$



รูปที่ 1 ลักษณะของการฉีดกระทบ และ computational domain

ในการคำนวณการทำนายการไหลในที่นี้จะใช้เงื่อนไขของ axisymmetric ฉะนั้น computational domain จะใช้เพียงครึ่งเดียว โดยในการคำนวณแบ่งโดเมนออกเป็นกริดขนาด 80x110 จุดต่อ (80 ตามแนวแกน x และ 110 ตามแนวแกน r) ในที่นี้จะสนใจการจำลองในช่วงจุด r/d = 0 ถึง 4.00 และ x/d = 0 ถึง 0.5 :ซึ่งผลที่ได้จะเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง และ contour plot ของ stream function ที่ทำนายได้ จะถูกเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองในช่วงบริเวณ r/d = 0 ถึง 11 ส่วนที่ x/d = 0 ถึง 2 และที่ x/d = 0 ถึง 3

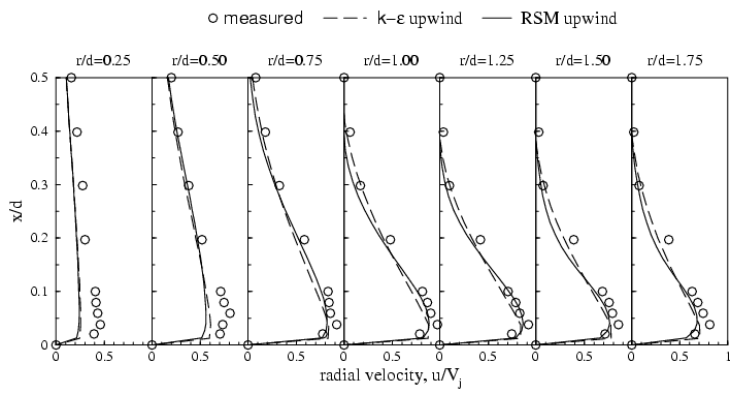
4. ผลการคำนวณและวิเคราะห์

ผลจากการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนที่มีการไหลฉีดกระทบโดยอาศัยสมการเชิงตัวเลขร่วมกับ $k-\varepsilon$ model และ RSM ถูกนำมาแสดงในรูปของความเร็วตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งต่างๆ กับระยะความสูงของช่องการไหลออกที่แตกต่างกันดังในรูปที่ 2 และ 5 รวมทั้ง contour plot และ vector plot ในรูปที่ 3, 4, 6, 7 และ 8

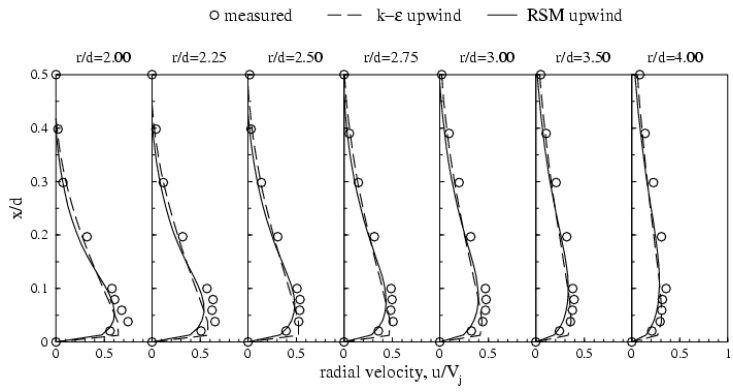
รูปที่ 2(a), (b) และ รูปที่ 5(a), (b) แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณความเร็วเฉลี่ยตามแนวรัศมี u/V_j ที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model และ RSM ที่ตำแหน่งช่วง r/d = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.50, 2.75, 3.00, 3.50, และ 4.00 โดยเทียบสัดส่วนที่ x/d = 2 ซึ่งในรูปที่ 2(a), (b) เปรียบเทียบกับค่าผลที่ได้จากการทดลองที่ระยะ H/d = 2 จะเห็นได้ว่าค่าที่ทำนายได้โดย RSM นั้นใกล้เคียงกับผลการทดลองที่บริเวณช่วงโค้งใกล้ผนังที่ระยะ x/d = 0 ถึง 0.1 ส่วนที่ห่างจากผนังออกไปที่ระยะ x/d = 0.1 ถึง 0.5 ค่าการทำนายโดย $k-\varepsilon$ model มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าและจะเป็นลักษณะแบบนี้เกี่ยบตลอดทุกช่วงตำแหน่งหลังจากเมื่อเลยผ่านช่วงที่ r/d = 0.5 ที่ผ่านมา รูปที่ 5 (a), (b) แสดงการเปรียบเทียบที่ระยะ H/d = 3 บอกได้ว่าลักษณะความสูงของเส้นกราฟความเร็วจะลดลงต่ำกว่าของรูปที่ 2(a), (b)

รูปที่ 3 และ 4 แสดง contour plot ของ stream function ที่ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model และ RSM ซึ่ง contour plot ที่นำมาแสดงนี้จะอยู่ในบริเวณพื้นที่ระยะความสูงที่ x/d = 0 ถึง 2 และช่วง r/d = 0 ถึง 11 ของทั้ง 2 models จะเห็นได้ว่าระยะการเกิดศูนย์กลางการหมุนวน (recirculation) จากของทั้ง 2 models จะแตกต่างกันโดยเห็นได้อย่างชัดเจนเลยว่าศูนย์กลางการหมุนวนของ $k-\varepsilon$ model จากรูปที่ 3 จะอยู่ที่ r/d = 5.9 และ x/d = 0.85 ส่วนของ RSM จากรูปที่ 4 เกิดศูนย์กลางการหมุนวน 2 จุดคือ r/d = 7 และ x/d = 1 และที่ r/d = 9.8 และ x/d = 0.7

รูปที่ 5(a), (b) แสดงระยะความสูงของช่องการไหลที่ H/d = 3 จะเห็นได้ว่าลักษณะความสูงที่เส้นกราฟของปริมาณความเร็วลดลงต่ำกว่าของรูปที่ 2(a), (b) เล็กน้อย แต่ในรูปที่ 5(a), (b) ผลการทำนายของทั้ง 2 models จะให้การทำนายใกล้เคียงกันกับผลการทดลองตั้งแต่ระยะความสูง x/d > 0.1 ที่เลยห่างจากผนังด้านล่างขึ้นไปและส่วนที่ระยะใกล้ผนังตั้งแต่ตำแหน่งช่วง r/d = 0.75 เป็นต้นไปจนถึง r/d = 4.00 ผลของทั้ง 2 models จะให้การทำนายต่ำกว่าผลที่ได้จากการทดลอง ส่วน contour plot ของ stream function แสดงไว้ในรูปที่ 6, 7 และ 8 โดยรูปที่ 6 และ 7 มีระยะความสูง x/d = 0 ถึง 3 และช่วง r/d = 0 ถึง 11 ส่วนรูปที่ 8 จากของผลการทดลองอยู่ที่ x/d $\approx$1 ถึง 2 และช่วง r/d = –0.5 ถึง 11 ซึ่งผลจากการทำนายของแต่ละ model โดยของ $k-\varepsilon$ model จากรูปที่ 6 ศูนย์กลางที่เกิดการหมุนวน (recirculation) อยู่ที่ช่วง r/d = 8.75 และ x/d = 1.23 ส่วนของ RSM จากรูปที่ 7 อยู่ที่ช่วง r/d = 9.35 และ x/d = 1.19 โดยที่ของผลจากการทดลองที่แสดงไว้ในรูปที่ 8 อยู่ที่ r/d = 9.3 และ x/d = 1.25 อย่างไรก็ตามจากที่ได้แสดงไว้ที่รูปต่างๆตามลำดับที่ผ่านมาทั้งผลจากการคำนวณและการทดลอง สามารถบอกได้ว่าค่าที่ทำนายได้โดย $k-\varepsilon$ model มีค่าความแม่นยำใกล้เคียงน้อยกว่า RSM ประมาณ 20-30 % เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้

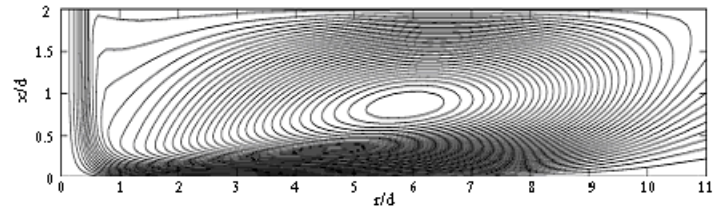


(a)

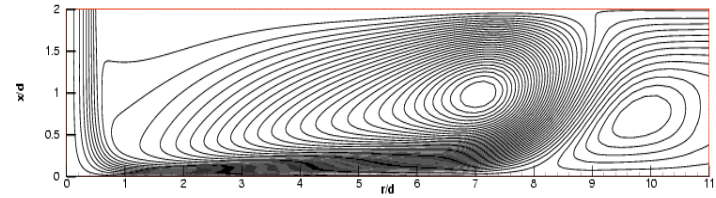


(b)

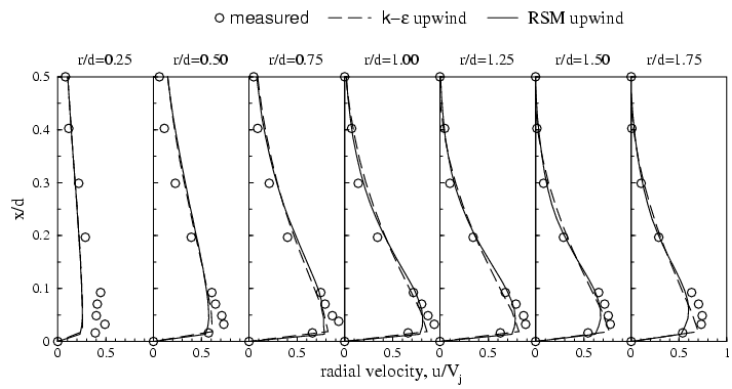
รูปที่ 2 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวรัศมี ที่ H/d = 2 ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model, RSM model และ ผลจากการทดลอง [4] (a) ช่วง r/d = 0.25 – 1.75, (b) ช่วง r/d = 2.00 – 4.00



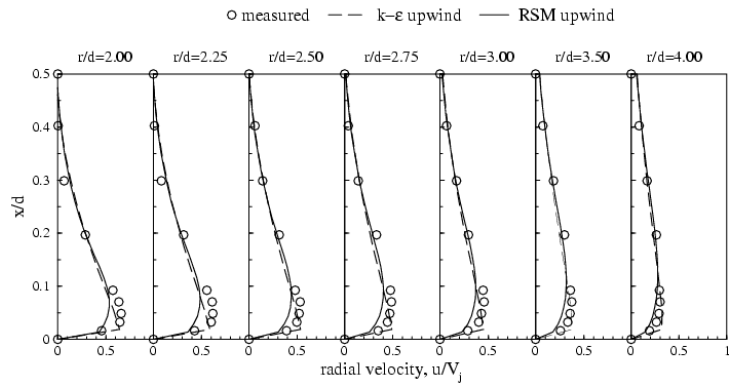
รูปที่ 3 contour plot ของ stream function ที่ H/d = 2 ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model



รูปที่ 4 contour plot ของ stream function ที่ H/d = 2 ทำนายโดย RSM

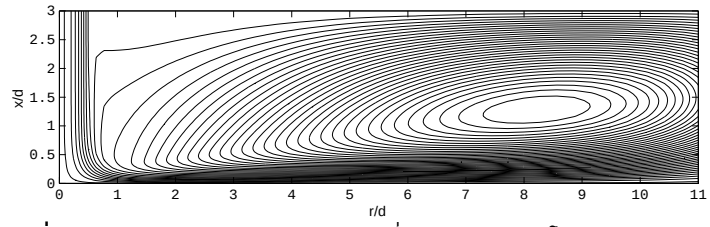


(a)

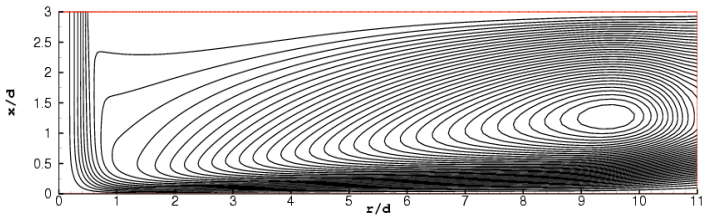


(b)

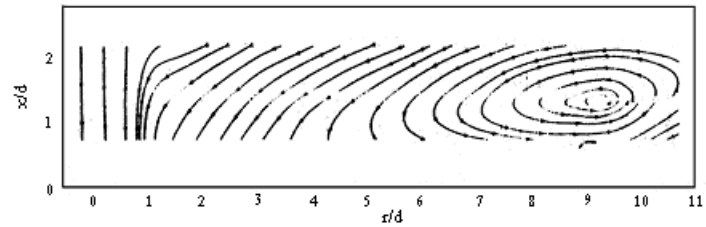
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วตามแนวรัศมี ที่ H/d = 3 ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model, RSM model และ ผลจากการทดลอง [4] (a) ช่วง r/d = 0.25 – 1.75, (b) ช่วง r/d = 2.00 – 4.00



รูปที่ 6 contour plot ของ stream function ที่ H/d = 3 ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model



รูปที่ 7 contour plot ของ stream function ที่ H/d = 3 ทำนายโดย RSM



รูปที่ 8 contour plot ของ stream function จากผลการทดลอง [4]

5. สรุป

ผลการทำนายการไหลแบบปั่นป่วนที่มีการฉีดกระทบในพื้นที่จำกัดโดยใช้ $k-\varepsilon$ model และ RSM ในการคำนวณนี้มีผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายการไหลของทั้ง 2 models และเปรียบเทียบกับการทดลอง พบว่าจากค่าที่แสดงของระยะความสูงของช่องการไหลออกของทั้ง 2 models คือที่ระยะ H/d = 2 และ 3 ที่ของการทำนายโดย RSM จะให้การทำนายใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า $k-\varepsilon$ model เมื่อมองโดยภาพรวม ส่วนที่ช่วงของความเร็วตามแนวรัศมีที่เริ่มต้นออกจากบริเวณแกนกลางที่หัวฉีดฉีดกระทบที่ผนังด้านล่างช่วง r/d = 0.25 ผลจากการทำนายทั้ง 2 models จะให้ค่าที่ได้แตกต่างจากผลการทดลองเล็กน้อย โดยมาจากที่เราใช้ข้อสมมุติฐานตอนต้นให้ไม่มีความเร็วเกิดขึ้นที่ในช่วง r/d = 0

6. เอกสารอ้างอิง

[1] พงษ์เจต พรหมวงศ์ และ ปริญญา รวมภัคดีกุล, “การศึกษาสนามการไหลเชิงตัวเลขของการฉีดกระทบ”,สัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13, 2542, เล่ม 1, หน้า 146-151

[2] เมืองแก้ว ยุตัน และ พงษ์เจต พรหมวงศ์, “การศึกษาสนามการไหลเชิงตัวเลขของการฉีดกระทบ”,การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16, 2545, หน้า 217-222

[3] P. Promvonge, S. Sripattanapipat, M. Yutan, “Numerical Simulation of Turbulent Flow of a Confined Impinging Jet”, The 7th ANSCSE, 24–26 March 2003, pp. 54-59

[4] J.A. Fitzgerald and S.V. Garmella, “A Study of the flow field of a confined and submerged impinging jet”, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 41, (1997), pp. 1025-1034.

[5] Patankar S.V., “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere, (1980), Washington, D.C.

[6] Versteeg H.K. and Malalasekera W., “An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method”, Longman Scientific & Technical, Longman Group Limited, (1995), England

[7] Wilcox C.D., “Turbulent Modelling for CFD”, DCW Industries, Inc., (1993), California

[8] Gatski T.B., “Turbulent Flows: Model Equations and Solution Methodology”, in Handbook of Computational Fluid Mechanics, Edited by Roger Peyret, Academic Press Ltd, (1986), London

[9] Gosman, A.D. and Ideriah, F.J.K., “Teaching Elliptic Axisymmetry Characteristics Heuristically-Turbulence”, (TEACH-T), (1976), Imperial College, London