

การประเมินแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k- ω SST สำหรับการไหลแบบ Wall Bounded Flows ภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส 3 มิติ Evaluation of k- ω SST Turbulence Model for Wall Bounded Flows in a 3D Square Duct

สืบสกุล กุรุรัตน์¹, เอกชัย จันทสาโร² และ วรางค์รัตน์ จันทสาโร¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000

Email: sagga18@yahoo.com

Suabsakul Gururatana¹, Ekachai Juntasaro² and Varangrat Juntasaro¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Bangkok 10900, Thailand,

²School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand,

Email: sagga18@yahoo.com

บทคัดย่อ

การไหลแบบ wall bounded flows เป็นรูปแบบการไหลที่พบบ่อยมากในงานด้านวิศวกรรม เช่น การไหลของอากาศภายในท่อลมของระบบปรับอากาศ การไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น ในปัจจุบันเครื่องมือจำเป็นที่ช่วยในการออกแบบของวิศวกรนั้นคือ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) และเนื่องจากการไหลส่วนใหญ่เป็นแบบปั่นป่วนดังนั้นความถูกต้องของซอฟต์แวร์ CFD จึงขึ้นอยู่กับความสามารถของแบบจำลองความปั่นป่วนในการจำลองการไหลให้ใกล้เคียงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด โดยแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k- ω SST เป็นแบบจำลองซึ่งเป็นที่นิยมใช้มากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากให้การจำลองที่ถูกต้องกว่า แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k- ϵ สำหรับการไหลแบบ free shear flows เช่นปัญหาทางอากาศพลศาสตร์ อย่างไรก็ตาม จากการตรวจสอบเอกสารยังไม่พบกลุ่มวิจัยใดทำการทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k- ω SST กับ การไหลแบบ wall bounded flows ใน 3 มิติที่เกิด secondary flow เลงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะทดสอบความสามารถของแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k- ω SST ในการจำลองการไหลที่เกิด secondary flow สำหรับกรณีศึกษาที่ใช้ในการทดสอบคือ การไหลภายในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งจะใช้ข้อมูลจากการจำลองเชิงตัวเลขโดยตรงซึ่งเป็นข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือในระดับเดียวกับผลการทดลองมาใช้ในการเปรียบเทียบผลการศึกษา ผลที่ได้พบว่าพฤติกรรมของการเข้าสู่ของแบบจำลองชนิด k- ω SST มีการลู่เข้าที่เร็วและมีการแกว่งน้อยกว่าแบบจำลองชนิด k- ϵ คำสำคัญ แบบจำลองความปั่นป่วน , ท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

Abstract

Wall-bounded flows are often founded in engineering works such as the air flow in a duct of the air-conditioning system and the fluid flow in a heat exchanger. Computational fluid dynamics (CFD) is now recognized as an essential design tool for engineers. Most practical flows are turbulent. and the accuracy of the CFD software depends on the performance of turbulence models employed in the software. Nowadays k- ω SST model becomes popular in the CFD software because it can predict the free-shear flows such as aerodynamic problems better than the k- ϵ model. It is found from the literature review that there is no research group use the k- ω SST model to capture the secondary flows in 3D wall-bounded flow problem before. This paper aims to evaluate the performance of the k- ω SST model in predicting the secondary flows in 3D wall-bounded flows. The test case used in this work is the 3D flow in a straight square duct which often found in an air-conditioning system. The Direct numerical simulation (DNS) data of the fully-developed turbulent flow in a straight square duct are used to evaluate the performance of the k- ω SST model. It is found that the accuracy of the k- ω SST model is comparable to the k- ϵ model but the convergence behavior is much better.

Keywords: Turbulence Model , Straight Square Duct

บทนำ

การไหลแบบ wall bounded flows เป็นรูปแบบที่พบบ่อยมากในงานด้านวิศวกรรม เช่น การไหลภายในท่อลมของระบบปรับอากาศ การไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น ในงานวิจัยนี้สนใจการไหลภายในท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส กรณีศึกษานี้สามารถพบได้ทั่วไปในระบบท่อลมของงานปรับอากาศโดยทั่วไป การไหลภายในท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมนี้จะมีลักษณะพิเศษเกิดขึ้นคือ มีการไหล 2 รูปแบบเกิดขึ้นพร้อมกัน ได้แก่ primary flow และ secondary flow

primary flow เป็นการไหลในทิศทางหลักที่ของไหลเคลื่อนที่ไป ส่วน secondary flow จะเป็นการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นบริเวณมุมของท่อในทิศทางตั้งฉากกับ primary flow จำนวนของ secondary flow ที่เกิดขึ้นนี้มีจำนวน 2 วงการหมุนต่อ 1 มุมของท่อ ดังรูปที่ 1. แสดงการเกิด secondary flow โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยตรง (Direct numerical simulation , DNS) secondary flow นั้นนอกจากจะพบในท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแล้วยังพบได้ในท่อตรงที่หน้าตัดไม่เป็นวงกลม เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมคางหมู ได้อีกด้วย ส่วนท่อที่มีการโค้งงอนั้นพบได้ทั้งท่อหน้าตัดวงกลมและหน้าตัดไม่เป็นวงกลม จากการตรวจเอกสารพบว่า secondary flow ได้มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการพาความร้อนระหว่างของไหลภายในและภายนอกท่อ ซึ่งถ้าสามารถทำนายการเกิด secondary flow ได้ถูกต้องนั้นหมายถึงการกำหนดปริมาณการถ่ายเทความร้อนภายในท่อให้เพิ่มมากขึ้นหรือลดลงตามลักษณะงานที่ต้องการ อันจะเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิตในงานด้านวิศวกรรม

การทำนายการเกิด primary flow และ secondary flow นั้น การทำการทดลองจำลองการไหลนั้นมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics ,CFD) ได้มีบทบาทสำคัญเนื่องจากช่วยลดต้นทุน ระยะเวลาในการออกแบบ สำหรับการไหลในงานด้านวิศวกรรมโดยทั่วไปนั้นพบว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน สิ่งที่มีผลต่อความถูกต้องของผลการศึกษาได้แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Models) โดยแบบจำลองความปั่นป่วนในปัจจุบันมีหลายแบบ เช่น k-ε ,Spalart and Allmaras ,k-ω , Reynolds Stress Models เป็นต้น แบบจำลองความปั่นป่วนที่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ k-ε ซึ่งให้ค่าความถูกต้องผลในการคำนวณเป็นที่น่าพอใจ ,ใช้ระยะเวลาในการคำนวณไม่มาก และการเขียนโปรแกรมในการคำนวณไม่ซับซ้อน

ในปี ค.ศ.1994 Menter [1] ได้เสนอแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k-ω Shear Stress Transport (SST) เพื่อใช้แก้ปัญหาทางด้านอากาศพลศาสตร์ เริ่มแรก Menter [1] ได้สร้างแบบจำลองที่ชื่อว่า Baseline k-ω Model (BSL Model) โดยการรวมกันของแบบจำลองชนิด k-ε และ k-ω จากนั้นได้ทำการปรับปรุงค่า

Eddy viscosity (μ_t) เนื่องจาก Eddy viscosity จาก Baseline Model มีค่าสูงเกินความเป็นจริง Menter [1] จึงได้ทำการจำกัดค่าของ Eddy viscosity ไม่ให้สูงเกินความเป็นจริง

งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่ประเมินแบบจำลองชนิด k-ω SST โดยนำมาทดสอบกับการไหลผ่านท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อศึกษาความสามารถของแบบจำลองในการจำลองการเกิด secondary flow ที่มุมท่อนี้ และจากการตรวจเอกสารพบว่า ค่า Turbulent Prandtl number ของ k และ ω ในแบบจำลองชนิด k-ω SST มี 3 กลุ่มวิจัยได้นำเสนอค่า ทางผู้วิจัยจึงนำค่าจาก 3 กลุ่มวิจัยมาประเมินในงานนี้ด้วย

ทฤษฎีและหลักการ

สมการการเคลื่อนที่สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

สมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วนนั้น ประกอบไปด้วยสมการการอนุรักษ์มวล และสมการโมเมนตัม เช่นเดียวกับการไหลแบบราบเรียบ แต่ด้วยลักษณะที่ต่างกันของการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ที่ทำให้สมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วนต่างจากสมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบราบเรียบ โดยสมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วนมีความซับซ้อนมากกว่าเนื่องจากความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในการไหล ในทางวิศวกรรม สิ่งที่น่าสนใจส่วนใหญ่คือค่าเฉลี่ยของการไหล ดังนั้นในงานวิจัยนี้ นักวิจัยใช้วิธีการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds Averaging) มาใช้กับสมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วน เพื่อแปลงสมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วนให้อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย โดยสมมติฐานของงานวิจัยนี้ได้แก่ เป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้ ,ไม่มีการถ่ายเทความร้อน และเป็นสภาวะคงตัว สามารถเขียนเป็นสมการในรูปเทนเซอร์ได้ดังนี้

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

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (2)$$

โดยที่ μ คือสัมประสิทธิ์ความหนืด , ρ คือความหนาแน่น

สมการโมเมนตัมที่ถูกเฉลี่ยด้วยวิธีการของเรย์โนลด์ ต่างจากสมการโมเมนตัมที่ยังไม่ได้ถูกเฉลี่ย เนื่องจากมีพจน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้วิธีการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ คือ พจน์ความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds

stresses) $\overline{u_i' u_j'}$ ซึ่งพจน์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นพจน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น โดยพจน์ความเค้นเรย์โนลด์ มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการตามสมมุติฐานของ Boussinesq [2] ดังนี้

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

โดยที่ค่า Eddy viscosity (μ_t) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงาน

จลน์ของความปั่นป่วน (k) และค่าอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (ε) สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k- ε

โดยสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho k u_i \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (5)$$

สมการอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \varepsilon u_i \right) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \\ &+ \left(C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) \right) \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

โดยที่

$$G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \text{Pr}_T} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (8)$$

สำหรับค่าคงที่ต่างๆในสมการจะค่าคงที่ของ Launder and Sharma [3] ดังนี้

$$C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_{\varepsilon 3} = 1$$

$$\sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_T = 0.9$$

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k- ω SST

แบบจำลอง k- ω SST ของ Menter [1] สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (k) เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho k u_i \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \sigma_k \mu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \beta^* k \omega \quad (9)$$

สมการอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนจำเพาะ (ω) เขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \omega u_i \right) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \sigma_\omega \mu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) \\ &- \frac{\alpha}{v_t} \overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \beta \omega^2 \\ &+ 2 \left(1 - F_1 \right) \rho \sigma_{\omega, 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (10)$$

โดยที่ค่า Eddy viscosity แสดงดังนี้

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \frac{1}{\max \left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{\Omega F_2}{a_1 \omega} \right]} \quad (11)$$

โดยที่

$$\Omega = \sqrt{\Omega_{ij} \Omega_{ij}} \quad (12)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

(13)

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (14)$$

$$\Phi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho \omega y^2} \right] \quad (15)$$

โดยพจน์ความเค้นเรย์โนลด์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการตามสมมุติฐานของ Boussinesq [2] ดังสมการ (3)

ค่าคงที่ในสมการได้แก่ $\beta^*, \sigma_k, \sigma_\omega$ หาได้จาก สมการที่ (16) โดยที่ค่า θ เป็นค่าคงที่ใดๆที่ใช้ในสมการ, θ_1 เป็นค่าคงที่ที่มาจากแบบจำลองชนิด k- ω , θ_2 เป็นค่าคงที่ที่มาจากแบบจำลองชนิด k- ϵ ค่า

$$(\theta) = F_1 (\theta_1) + (1 - F_1) (\theta_2) \quad (16)$$

โดยที่

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (17)$$

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{k}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \left(\frac{4pk}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega,y}^+ y^2} \right) \right] \quad (18)$$

$$D_{\omega,y}^+ = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right] \quad (19)$$

สำหรับค่าคงที่อื่นๆในสมการมีดังนี้

$$\beta_1 = 0.075, \beta_2 = 0.0828, a_1 = 0.31, \alpha^* = 1$$

วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการประเมินแบบจำลองความปั่นป่วนโดยใช้กรณีศึกษา 2 กรณีได้แก่ การไหลผ่านระนาบคู่ขนานใน 2 มิติ และการไหลผ่านท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสใน 3 มิติ ซึ่งการไหลผ่านระนาบคู่ขนานใน 2 มิติ ใช้ขนาดตาม Kim et al. [4] ดังรูปที่ 2. ที่ $Re_m = 5600$ โดยที่ $Re_m = 2\delta U_m / \nu$, δ คือความสูงครึ่งระนาบคู่ขนาน, U_m คือความเร็วเฉลี่ยของของไหลก่อนเข้าท่อ, ν คือสัมประสิทธิ์ความหนืด สำหรับการไหลผ่านท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสใน 3 มิติ ใช้ขนาดตาม Gavrilakis [5] ดังรูปที่ 3. ที่ $Re_m = LU_m / \nu$ โดยที่ L คือระยะความกว้างของหน้าตัดท่อ การประเมินแบบจำลองความปั่นป่วนจะทำการใช้กรณีศึกษาทั้งสองจำลองการไหลโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k- ϵ และ k- ω SST ซึ่งแบบจำลองชนิด k- ω SST จะมีการปรับเปลี่ยนค่า Turbulent Prandtl number ของ k และ ω อีกจำนวน 3 รูปแบบดังตารางที่ 1. ในการประเมินแบบจำลองความปั่นป่วนในงานวิจัยนี้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยตรง ซึ่งมีความน่าเชื่อถือระดับเดียวกับผลการทดลองถูกนำมาใช้ในการประเมินผลการศึกษา

ผลการศึกษา

ผลการจำลองการไหลผ่านระนาบคู่ขนานใน 2 มิติ ดังรูปที่ 4. แสดง Mean Streamwise Velocity Profile หรือ primary flow (u/u_0) และความกว้างของระนาบ ($\log y^+$) จากรูปเห็นได้ว่าแบบจำลองทั้งสองแบบให้ผลการศึกษาที่ใกล้เคียงกัน ลักษณะการไหลของแบบจำลองทั้งสองแบบมีรูปแบบที่ใกล้เคียงกับ DNS โดยแบบจำลองชนิด k- ω SST set 1 มีค่าใกล้เคียงกับ DNS มากกว่าแบบจำลองแบบอื่น

ผลการจำลองการไหลผ่านท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสใน 3 มิติ ดังรูปที่ 5, 6 และ 7. แสดง Mean Streamwise Velocity Profile (u/u_0) และความสูงของหน้าตัดท่อ (y/h) ณ ตำแหน่งความกว้างของท่อ (z/h) ที่ 0.14, 0.5 และ 0.9 ตามลำดับ โดยที่ $z/h=0.14$ เป็นตำแหน่งที่ใกล้กับผนังของท่อที่สุด และที่ 0.9 เป็นตำแหน่งที่ใกล้กับกึ่งกลางท่อที่สุด จากรูปเห็นได้ว่าแบบจำลองทั้งสองแบบมีผลการศึกษาที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งลักษณะการไหลของแบบจำลองทั้งสองแบบมีรูปแบบคล้ายคลึงกับลักษณะการไหลของ DNS โดยแบบจำลองชนิด k- ω SST มีค่าใกล้เคียง DNS มากกว่า k- ϵ เล็กน้อย ที่ตำแหน่งที่ 0.14 ค่าของ primary flow จะมีค่าต่ำกว่าที่ตำแหน่งอื่นเล็กน้อย เนื่องจากผลกระทบจากการหมุนวนของ secondary flow ทำให้ primary flow มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย รูปที่ 8, 9 และ 10. แสดง Mean Spanwise Velocity Profile หรือ secondary flow (w/u_0) และความสูงของหน้าตัดท่อ (y/h) ณ ตำแหน่งความกว้างของท่อ (z/h) ที่ 0.14, 0.5 และ 0.9 ตามลำดับ ผลการจำลองจาก DNS ตำแหน่งที่ 0.14, 0.5 พบว่ามีความเร็วติดลบแสดงถึง การหมุนวนของของไหลที่เกิดขึ้นที่บริเวณใกล้มุมของท่อ แต่ผลจากแบบจำลองทั้งสองไม่เกิดความเร็วติดลบมีเพียงความเร็วในทิศทางบวกแสดงว่าแบบจำลองทั้งสองแบบสามารถจำลองการเกิด secondary flow ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

สรุปผลการศึกษา

จากผลการไหลผ่านระนาบคู่ขนานใน 2 มิติ และท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส พบว่าแบบจำลองทั้ง k- ω SST และ k- ϵ ให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกัน การจำลองการเกิด primary flow ได้น่าพอใจ ส่วน secondary flow จำลองได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ด้านพฤติกรรมการลู่เข้าของสมการพบว่าแบบจำลองชนิด k- ω SST มีพฤติกรรมการลู่เข้าที่รวดเร็วและมีการแกว่งของค่า Residuals น้อยกว่า k- ϵ มาก ข้อดีจากการลู่เข้าของสมการที่รวดเร็วและมีการแกว่งที่น้อยนี้ทำให้แบบจำลอง k- ω SST มีความเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายการเกิด secondary flow ต่อไป

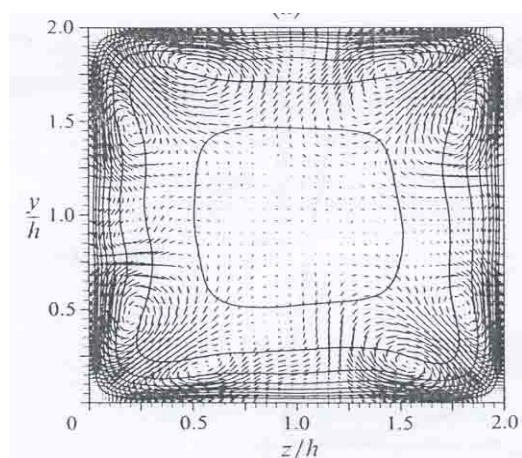
กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ Professor Dr. Gilmar Mompean สำหรับข้อมูล DNS ของการไหลภายในท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

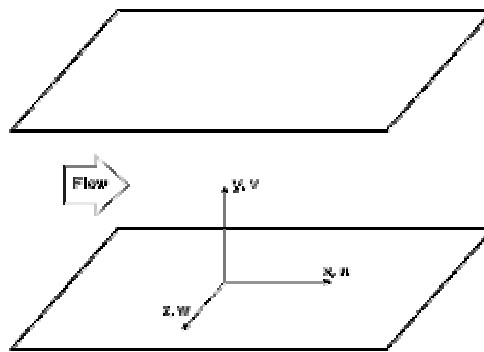
เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", AIAA Journal, Vol.32, August 1994, pp. 1598-1605

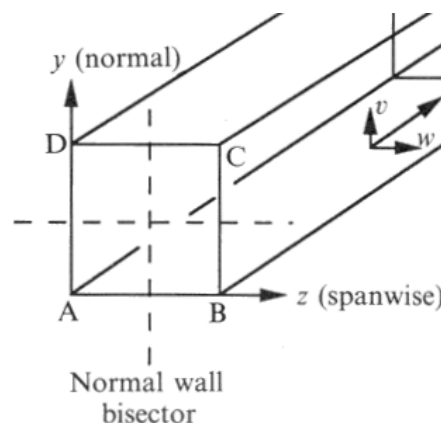
- [2] J. Boussinesq, "Theory de L'ecoulement Tourbillant, "Memoires Presentes Par Divers Savants Sciences Mathematique at Physiques, Academie de Sciences, 1877, Vol. 23, pp.46-50.
- [3] B. E. Launder and B. I. Sharma , "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow near spinning Disc ", Letter in Heat and mass transfer , Vol. 1,1974, pp. 131-138
- [4] J. Kim, P. Moin, and R. Moser, "Turbulent statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number," Journal of Fluid Mechanics, 1987, Vol. 177, pp. 133-166.
- [5] E. Gavrilakis , " Numerical Simulation of Low-Reynolds number Turbulence Flow Through a Straight Square Duct", Journal of Fluid Mechanics ,244 ,1992, pp.101-129
- [6] H.K. Versteeg and W. Malalasekera , "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method." 1995, Longman Scientific & Technical.
- [7] D. E. Wilcox , " Turbulence Modeling for CFD" ,1993, DWC Industries Inc.
- [8] V. Juntasaro, S. Gururatana, J. Buranarote and S.. Juntasaro. "A New Reynolds-Stress Expression Based on DNS Data in Non-Linear Eddy-Viscosity Turbulence Model For Complex Flows." The Fourth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP 4), June 27-29 ,2005, Virginia, U.S.A.
- [9] วรารัตน์ จันทสาโร , สิบสกุล คุรุรัตน์ , จิรโรจน์ บุรณะโรจน์ และ เอกชัย จันทสาโร. "การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของสมการความเค้นเรย์โนลด์สในแบบจำลองความปั่นป่วนชนิดไม่เชิงเส้นสำหรับ CFD." การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่18 , 2547.,ขอนแก่น



รูปที่ 1. แสดง secondary flow ในท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส
จำลองโดย DNS ของ Gavrilakis [5]



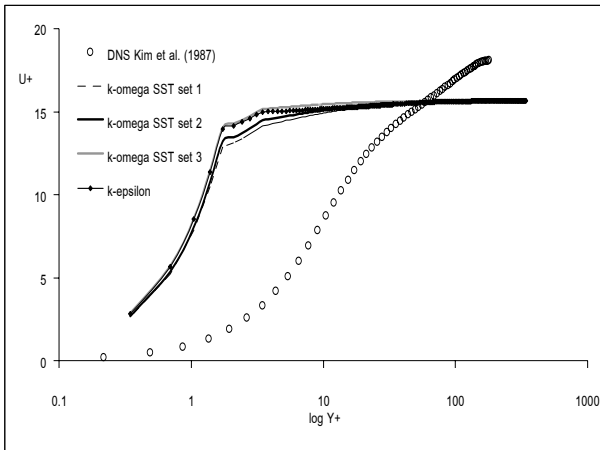
รูปที่ 2. แสดงระนาบคู่ขนานใน 2 มิติ ของ Kim et al.[4]



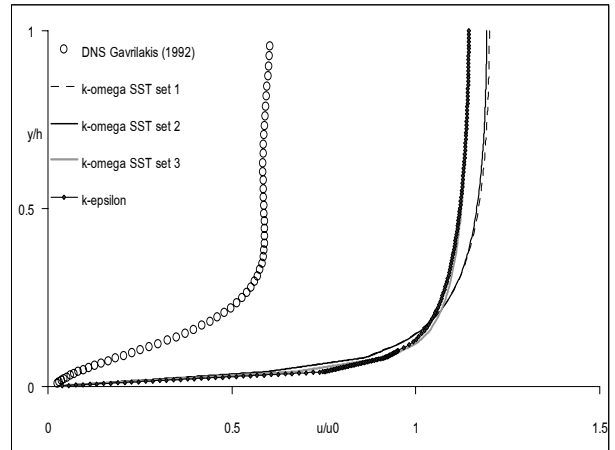
รูปที่ 3. แสดงท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ใน 3 มิติ
ของ Gavrilakis [5]

ตารางที่ 1. แสดงค่า Turbulent Prandtl number ของ k และ ω ต่างๆ
ใน แบบจำลองชนิด k- ω SST

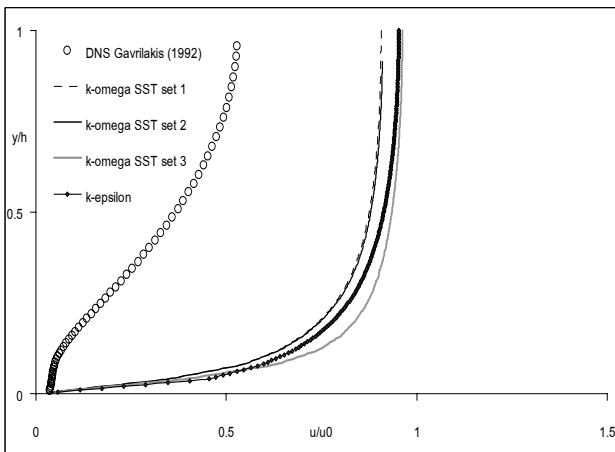
Model	Turbulent Prandtl number for k ($\sigma_{k,1}$)	Turbulent Prandtl number For k ($\sigma_{k,2}$)	Turbulent Prandtl number for ω ($\sigma_{\omega,1}$)	Turbulent Prandtl number for ω ($\sigma_{\omega,2}$)
k- ω SST set 1	0.5	1	0.5	0.856
k- ω SST set 2	0.85	1	0.5	0.856
k- ω SST set 3	1.176	1	2	1.168



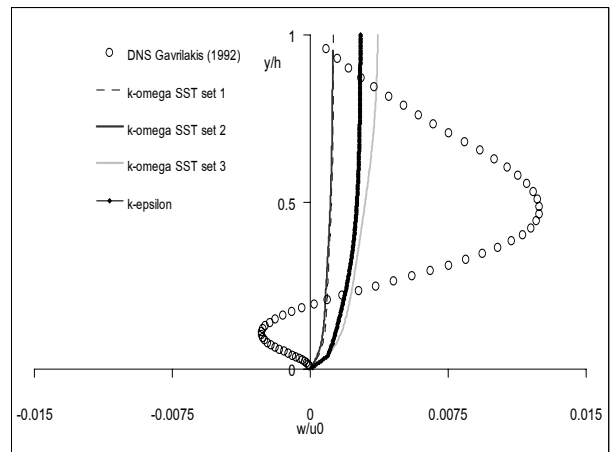
รูปที่ 4. แสดง Mean Streamwise Velocity Profile ของ
ระนาบคู่ขนานใน 2 มิติ



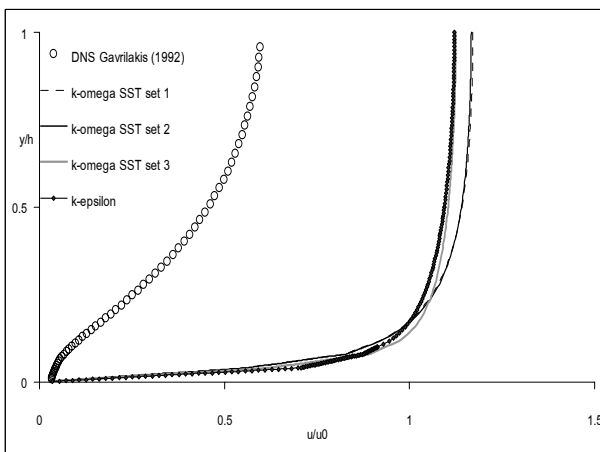
รูปที่ 7. แสดง Mean Streamwise Velocity Profile ของ
ท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ตำแหน่ง $z/h=0.9$



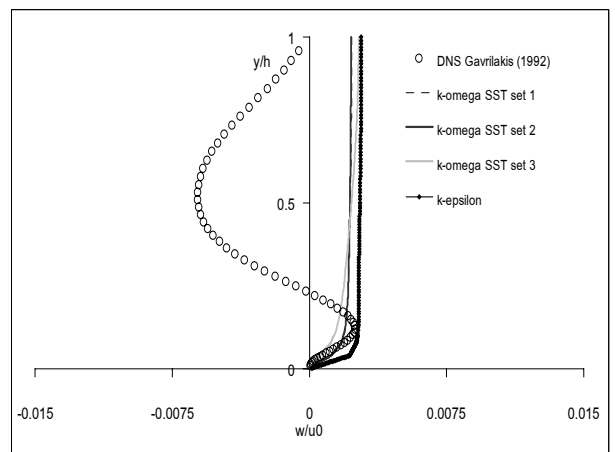
รูปที่ 5. แสดง Mean Streamwise Velocity Profile ของ
ท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ตำแหน่ง $z/h=0.14$



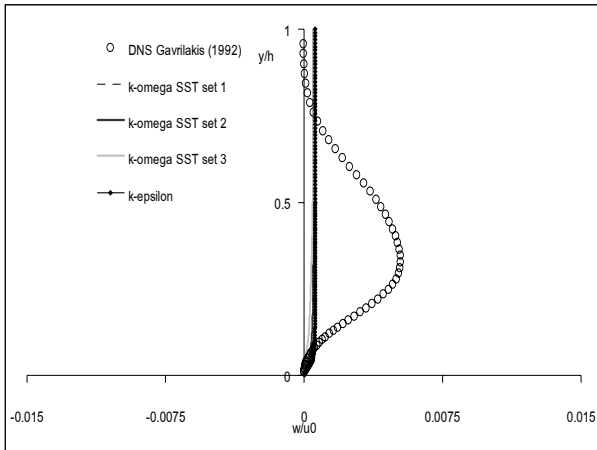
รูปที่ 8. แสดง Mean Spanwise Velocity Profile ของ
ท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ตำแหน่ง $z/h=0.14$



รูปที่ 6. แสดง Mean Streamwise Velocity Profile ของ
ท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ตำแหน่ง $z/h=0.5$



รูปที่ 9. แสดง Mean Spanwise Velocity Profile ของ
ท่อตรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ตำแหน่ง $z/h=0.5$



รูปที่ 10. แสดง Mean Spanwise Velocity Profile ของ
ท่อตรงหน้าตดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ตำแหน่ง $z/h=0.9$