



แบบจำลองเชิงตัวเลข Nonlinear Turbulence Model แบบใหม่ โดยใช้ Ansys Fluent User Defined Function Numerical Simulation of the New Nonlinear Turbulence Model Using the Ansys Fluent User Defined Function

กล้า ไส้ทองดี¹, วรากรณ์ จันทสาโร^{1*} และ เอกชัย จันทสาโร²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร 10900

²Department of Mechanical and Process Engineering, The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering (TGGs), King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB),
1518 Pracharat 1 Rd., Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

*fengvrj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

เทคโนโลยี Computational Fluid Dynamics (CFD) ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในหลายทศวรรษที่ผ่านมา เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการคำนวณและให้ความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือการพัฒนาแบบจำลองความปั่นป่วนให้สามารถจำลองการไหลได้สมจริง แบบจำลองความปั่นป่วนของ [1] เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ได้ถูกทำการทดสอบด้วยวิธี Priori Test ในกรณีของ Fully-Developed Turbulent Channel Flow ที่ Reynolds Number ต่างๆ พบว่าให้ผล Gradient ของ Reynolds Shear Stress และ Mean Velocity Profile ที่แม่นยำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทดสอบความสามารถของแบบจำลองความปั่นป่วนที่พัฒนาขึ้นนี้กับปัญหาการไหลที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้บทความนี้แสดงถึงวิธีการ Implement แบบจำลองความปั่นป่วนนี้ลงในซอฟต์แวร์ Ansys Fluent โดยใช้วิธี User-Defined Function (UDF) และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับข้อมูล Direct Numerical Simulation (DNS) [2] ซึ่งเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในท่อตรงที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบใหม่นี้ สามารถจำลอง Turbulence Induced Secondary Flows ได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์ปัจจุบัน

คำหลัก: แบบจำลองความปั่นป่วน; User Defined Function (UDF); พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

Abstract

Computational Fluid Dynamics (CFD) technology has been developed continuously for decades to reduce computational cost and increase accuracy. The development of turbulence model is one of the key issues for the CFD technology to predict flows more realistically. The turbulence model of [1] has already been tested by Priori Test Method in case of fully-developed turbulent channel flow at various Reynolds Numbers. It is found that the model is able to predict the gradients

of Reynolds shear stress and the mean velocity profiles accurately. Therefore, the present work is aimed to validate this turbulence model in more complex flows. Furthermore, the paper shows the detailed procedure on how to implement a new turbulence model into Ansys Fluent software by using User-Defined Function (UDF). The results of the implemented turbulence model are validated with the data from the Direct Numerical Simulation (DNS) for turbulent flows in a straight square duct [2, 7]. It is found that the implemented turbulence model can predict turbulence-induced secondary flows more realistically compared to the existing turbulence models in CFD commercial software.

Keywords: Turbulence Model; User Defined Function (UDF); Computational Fluid Dynamics (CFD)

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยี CFD (Computational Fluid Dynamics) ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถจำลองการไหลของของไหล (flow simulation) ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาและต้นทุนในการทดสอบและออกแบบ แต่ปัจจุบัน CFD ก็ยังมีข้อจำกัดต่างๆ ที่มีผลกับความแม่นยำหรือความสมจริงในการจำลองของของไหล เช่น ในส่วนของการสร้าง mesh, แบบจำลองความปั่นป่วน (turbulence model) และ numerical method เป็นต้น

ในปัจจุบันมีซอฟต์แวร์ CFD สำเร็จรูปที่สามารถจำลองและวิเคราะห์การไหลได้แม่นยำยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองความปั่นป่วนที่มีในซอฟต์แวร์สำเร็จรียังมีแต่ชนิดที่เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งทำให้ไม่สามารถจำลองการไหลที่มีความซับซ้อนและต้องการความแม่นยำสูงได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาแบบจำลองความปั่นป่วนที่สามารถจำลองการไหลแบบ turbulence-induced secondary flows ได้ถูกต้อง ซึ่งปัจจุบันแบบจำลองความปั่นป่วนในซอฟต์แวร์สำเร็จรียังไม่สามารถจำลองการไหลชนิดนี้ได้

Craft et al. [3] ได้นำเสนอแบบจำลองความปั่นป่วน cubic ซึ่งสามารถจำลองการไหลที่มี streamline curvature สูง หรือ การไหลที่เป็น secondary flows ได้ โดย [4] ได้ศึกษาการจำลองการหมุนของใบจักรเรือ โดยการ implement แบบจำลอง

ความปั่นป่วน cubic ในซอฟต์แวร์ และปรับค่า model constants ของแบบจำลอง พบว่าให้ผลที่แม่นยำกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบเชิงเส้นและยังสามารถจับการเกิด cavitation ได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองที่ได้ก็ยังคงให้ความถูกต้องไม่เป็นที่พอใจ

Juntasaro [1] เสนอว่าการเพิ่มพจน์ higher order กว่า พจน์ cubic เข้าไปในแบบจำลองความปั่นป่วน น่าจะทำให้สามารถเพิ่มความถูกต้องในการจำลองขึ้นได้ โดย Juntasaro [1] พบว่า Rivlin-Ericksen Viscoelastic Model [5, 6] เป็นสมการ higher order และมีรูปแบบสมการคล้ายคลึงกับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) Juntasaro [1] จึงทำการปรับปรุงและทดสอบโมเดลสมการของ Rivlin-Ericksen [6] กับแบบจำลอง channel flow ด้วยวิธี priori test พบว่าให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบ DNS (Direct Numerical Simulation)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะทำการ implement แบบจำลองความปั่นป่วน higher-order (Higher-order turbulence model) ที่พัฒนาจาก Juntasaro [1] เข้าไปในซอฟต์แวร์ Ansys Fluent ผ่านทาง User-Defined Function (UDF) โดยกรณีศึกษาที่นำมาทดสอบคือ square duct และ rotating square duct ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่เกิดการไหลที่มีลักษณะเป็น turbulence-induced secondary flows

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน cubic (Cubic turbulence model)

Craft et al. [3] ได้เสนอแบบจำลองความปั่นป่วนไม่เชิงเส้น ที่สามารถวิเคราะห์และจับการไหลแบบ secondary flows ได้ โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = -k \alpha_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (1)$$

เมื่อ δ_{ij} คือ Kronecker delta ($\delta_{ij} = 1$ ถ้า $i = j$ และ $\delta_{ij} = 0$ ถ้า $i \neq j$) และ α_{ij} คือ Reynolds-stress anisotropy tensor

$$\begin{aligned} \alpha_{ij} = & -\frac{\mu_t}{k} S_{ij} \\ & + C_1 \frac{\mu_t}{\varepsilon} \left(S_{ik} S_{jk} - \frac{1}{3} S_{kl} S_{kl} \delta_{ij} \right) \\ & + C_2 \frac{\mu_t}{\varepsilon} (\Omega_{ik} S_{jk} + \Omega_{jk} S_{ik}) \\ & + C_3 \frac{\mu_t}{\varepsilon} \left(\Omega_{ik} \Omega_{jk} - \frac{1}{3} \Omega_{kl} \Omega_{kl} \delta_{ij} \right) \\ & + C_4 \frac{\mu_t k}{\varepsilon^2} (S_{ki} \Omega_{ij} + S_{kj} \Omega_{ji}) S_{kl} \\ & + C_5 \frac{\mu_t k}{\varepsilon^2} \left(\Omega_{il} \Omega_{lm} S_{mj} + S_{il} \Omega_{lm} \Omega_{mj} \right. \\ & \quad \left. - \frac{2}{3} S_{il} \Omega_{lm} \Omega_{mj} \delta_{ij} \right) \\ & + C_6 \frac{\mu_t k}{\varepsilon^2} S_{ij} S_{kl} S_{kl} \\ & + C_7 \frac{\mu_t k}{\varepsilon^2} S_{ij} \Omega_{kl} \Omega_{kl} \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ μ_t คือ eddy viscosity, k คือ turbulent kinetic energy, ε คือ turbulent dissipation rate

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon + E_1 + E_2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + f_{\varepsilon 1} C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - f_{\varepsilon 2} C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + E_1 + E_2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

เมื่อ G_k คือ production term ของ turbulent kinetic energy, $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ คือ model constants, $f_{\varepsilon 1}, f_{\varepsilon 2}$ คือ damping function, E_1, E_2 คือ extra term, C_μ และ f_μ คือ damping function

$$\begin{aligned} C_\mu = & \frac{0.3}{1 + 0.35 (\max(\tilde{S}, \tilde{\Omega}))^{1.5}} \\ & \times \left(1 - \exp \left(\frac{-0.36}{\exp - 0.75 \max(\tilde{S}, \tilde{\Omega})} \right) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$f_\mu = 1 - \exp \left(-(\text{Re}_t / 90)^{1/2} - (\text{Re}_t / 400)^2 \right) \quad (8)$$

เมื่อ Re_t คือ turbulent Reynolds number, \tilde{S} คือ nondimensional strain rate, $\tilde{\Omega}$ คือ nondimensional vorticity, S_{ij} คือ mean strain rate tensor, Ω_{ij} คือ mean vorticity, Ω_k คือ rotation rate ของ coordinate system และ ε_{ijk} คือ alternating tensor

$$\text{Re}_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} \quad (9)$$

$$\tilde{S} \equiv \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{1/2 S_{ij} S_{ij}} \quad (10)$$

$$\tilde{\Omega} \equiv \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{1/2 \Omega_{ij} \Omega_{ij}} \quad (11)$$

$$S_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

$$\Omega_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \varepsilon_{ijk} \Omega_k \quad (13)$$

2.2 General Rivlin-Ericksen constitutive relation for turbulent flow [1]

$$\begin{aligned} (-\rho \overline{u'_i u'_j})_{,j} &= (\alpha_2 (A_2)_{ij})_{,j} + (\alpha_3 (A_1)_{ik} (A_1)_{kj})_{,j} \\ &+ (\alpha_4 (A_2)_{ik} (A_2)_{kj})_{,j} \\ &+ (\alpha_5 ((A_1)_{ik} (A_2)_{kj} + (A_2)_{ik} (A_1)_{kj}))_{,j} \\ &+ \left(\alpha_6 \left((A_1)_{ik} (A_1)_{kl} (A_2)_{lj} + (A_2)_{ik} (A_1)_{kl} (A_1)_{lj} \right) \right)_{,j} \\ &+ \left(\alpha_7 \left((A_2)_{ik} (A_2)_{kl} (A_1)_{lj} + (A_1)_{ik} (A_2)_{kl} (A_2)_{lj} \right) \right)_{,j} \end{aligned} \quad (14)$$

เมื่อ A_1 คือ velocity gradient matrix, A_2 คือ acceleration gradient matrix, α_2 ถึง α_7 คือ model coefficients และ $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ คือ Reynolds stress

2.3 แบบจำลองความปั่นป่วน higher-order (Higher-order turbulence model)

นำสมการของ Rivlin-Ericksen model ที่ไม่ได้ อยู่ในรูปของ Gradient มาบวกกับสมการของ Cubic model ซึ่งมีหน่วยเป็น $\frac{kg}{m^3}$ และเนื่องจากพจน์ของ α_3 ของ Rivlin-Ericksen model เป็นพจน์เดียวกับ C_1 ของ Cubic model จึงตัดพจน์ของ α_3 ออก สามารถเขียนได้ดังนี้

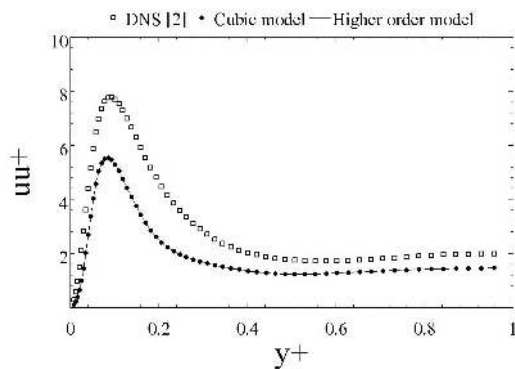
$$\begin{aligned} \alpha_{ij} &= -\frac{\mu_t}{k} S_{ij} \\ &+ C_1 \frac{\mu_t}{\varepsilon} \left(S_{ik} S_{jk} - \frac{1}{3} S_{kl} S_{kl} \delta_{ij} \right) \\ &+ C_2 \frac{\mu_t}{\varepsilon} (\Omega_{ik} S_{jk} + \Omega_{jk} S_{ik}) \\ &+ C_3 \frac{\mu_t}{\varepsilon} \left(\Omega_{ik} \Omega_{jk} - \frac{1}{3} \Omega_{kl} \Omega_{kl} \delta_{ij} \right) \\ &+ C_4 \frac{\mu_t k}{\varepsilon^2} (S_{ki} \Omega_{ij} + S_{kj} \Omega_{ji}) S_{kl} \\ &+ C_5 \frac{\mu_t k}{\varepsilon^2} \left(\Omega_{il} \Omega_{lm} S_{mj} + S_{il} \Omega_{lm} \Omega_{mj} - \frac{2}{3} S_{il} \Omega_{lm} \Omega_{mj} \delta_{ij} \right) \\ &+ C_6 \frac{\mu_t k}{\varepsilon^2} S_{ij} S_{kl} S_{kl} \\ &+ C_7 \frac{\mu_t k}{\varepsilon^2} S_{ij} \Omega_{kl} \Omega_{kl} \\ &+ \alpha_2 (A_2)_{ij} \\ &+ \alpha_4 (A_2)_{ik} (A_2)_{kj} \\ &+ \alpha_5 ((A_1)_{ik} (A_2)_{kj} + (A_2)_{ik} (A_1)_{kj}) \\ &+ \alpha_6 \left((A_1)_{ik} (A_1)_{kl} (A_2)_{lj} + (A_2)_{ik} (A_1)_{kl} (A_1)_{lj} \right) \\ &+ \alpha_7 \left((A_2)_{ik} (A_2)_{kl} (A_1)_{lj} + (A_1)_{ik} (A_2)_{kl} (A_2)_{lj} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

3. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

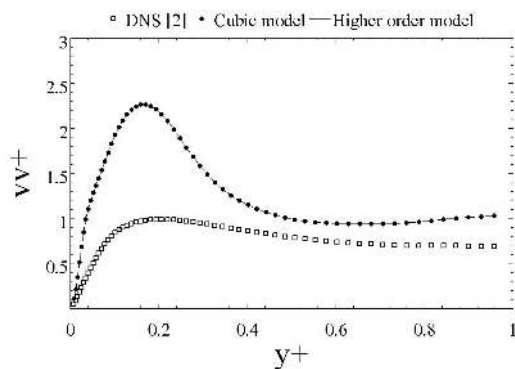
3.1 ทดสอบ model เบื้องต้น (priori test)

ทำการเขียนโค้ดทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วน เบื้องต้นด้วยภาษาซี โดยใช้ข้อมูล DNS [2]

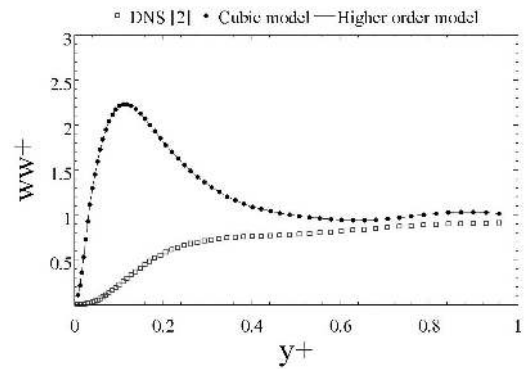
ซึ่งผลการทดสอบนี้จะได้อ่าน Reynolds stress (uu , vv , ww , uv , uw , vw) เทียบกับข้อมูล DNS [2] แสดงดังรูปที่ 1-6 ซึ่งพบว่าผลจากการทดสอบเบื้องต้นของแบบจำลองความปั่นป่วน cubic model และ higher-order model มีแนวโน้มและใกล้เคียงกับข้อมูล DNS และสามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่า higher-order model มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็น turbulence model เพื่อทดสอบกับแบบจำลอง square duct



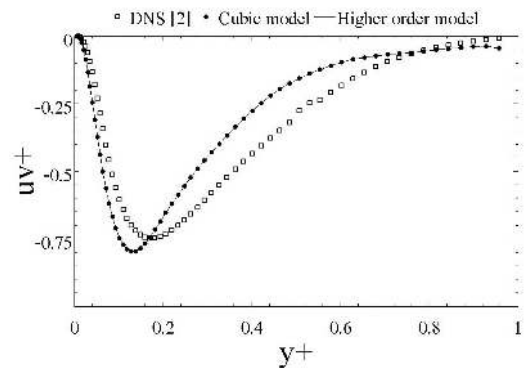
รูปที่ 1 แสดง Reynolds stress (uu) ระหว่างผล Rivlin-Ericksen viscoelastic Model กับ ข้อมูล DNS [2]



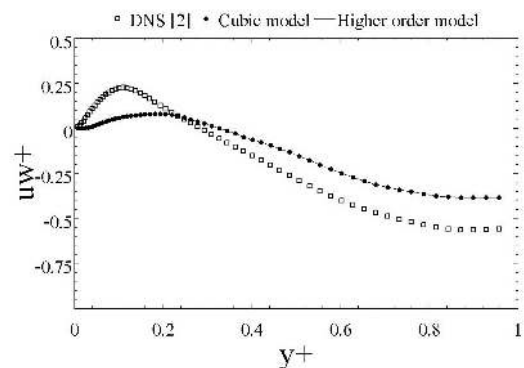
รูปที่ 2 แสดง Reynolds stress (vv) ระหว่างผล Rivlin-Ericksen viscoelastic Model กับ ข้อมูล DNS [2]



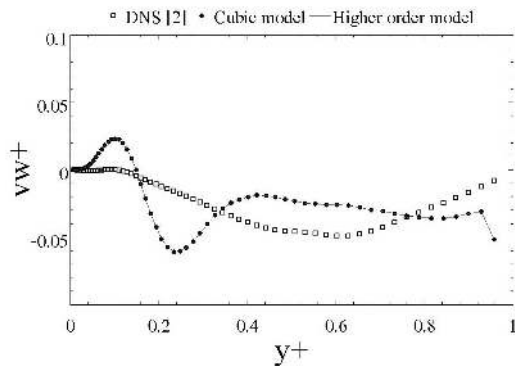
รูปที่ 3 แสดง Reynolds stress (ww) ระหว่างผล Rivlin-Ericksen viscoelastic Model กับ ข้อมูล DNS [2]



รูปที่ 4 แสดง Reynolds stress (uv) ระหว่างผล Rivlin-Ericksen viscoelastic Model กับ ข้อมูล DNS [2]



รูปที่ 5 แสดง Reynolds stress (uw) ระหว่างผล Rivlin-Ericksen viscoelastic Model กับ ข้อมูล DNS [2]



รูปที่ 6 แสดง Reynolds stress (vw) ระหว่างผล
Rivlin-Ericksen viscoelastic Model กับ ข้อมูล DNS
[2]

3.2 ศึกษา Macro และเขียนโค้ด UDF

UDF Macro

การเขียนโค้ด UDF ทุกครั้งต้องเรียก udf.h (header file) เพื่อที่จะสามารถใช้ Macro ของ UDF ได้ สามารถเขียนได้ดังนี้

```
#define "udf.h"
```

ซึ่ง #define ก็สามารรถกำหนดค่าคงที่อื่นๆ ได้เช่น

```
#define C_1 -0.1
```

ซึ่งหมายความว่าตัวแปร C_1 มีค่าเท่ากับ -0.1

DEFINE_SOURCE

Macro ที่ใช้กำหนด source term ในงานวิจัยนี้จะใช้ Macro นี้เพื่อกำหนด source term ของ ความเร็ว (u, v, w), turbulent kinetic energy (k) และ turbulent dissipation rate (ϵ) ตามสมการที่ (4), (5) และ (6)

DEFINE_TURBULENT_VISCOSITY

Macro ที่ใช้กำหนดฟังก์ชันของ turbulent viscosity (μ_t) ตามสมการที่ (3)

DEFINE_ADJUST

Macro ที่ใช้สำหรับปรับค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สำหรับ คำนวณค่า Reynolds stress ($\overline{u_i u_j}$) ตามสมการที่ (15)

นอกจากนี้ยังมีการเข้าถึงตัวแปรต่างๆ ที่ Ansys Fluent ได้กำหนดไว้แล้วเพื่อให้่ายต่อการเขียนโค้ดและใช้เขียนในงานวิจัยนี้สามารถดูได้ตามตารางที่ 1 และสามารถเขียนเป็นโค้ดสมการได้ตามรูปที่ 7

ตารางที่ 1 Variable Macros ที่ใช้ในงานวิจัย

Variable Macros	Description
C_R(c,t)	Density
C_P(c,t)	Pressure
C_U(c,t)	U-velocity
C_V(c,t)	V-velocity
C_W(c,t)	W-velocity
C_K(c,t)	Turbulent kinetic energy (k)
C_D(c,t)	Turbulent dissipation rate (ϵ)
C_UDSI(c,t)	i-th UDS scalars
C_UDMI(c,t,i)	i-th UDM scalars
C_DUDX(c,t)	Velocity derivative
C_DUDY(c,t)	Velocity derivative
C_DUDZ(c,t)	Velocity derivative
C_DVDX(c,t)	Velocity derivative
C_DVDY(c,t)	Velocity derivative
C_DVDZ(c,t)	Velocity derivative
C_DWDX(c,t)	Velocity derivative
C_DWDY(c,t)	Velocity derivative
C_DWDZ(c,t)	Velocity derivative
C_MU_L(c,t)	Laminar viscosity

	Source term	
	Equation	Code
X velocity (u)	$-\rho \times \left((\overline{u'u'})_{,j} + (\overline{u'u'})_{,j} + (\overline{u'u'})_{,k} \right)$	$-C_R(c,t) * (C_UDSI_G(c,t,UU)[0] + C_UDSI_G(c,t,UV)[1] + C_UDSI_G(c,t,UW)[2])$
Y velocity (v)	$-\rho \times \left((\overline{u'u'})_{,j} + (\overline{u'u'})_{,j} + (\overline{u'u'})_{,k} \right)$	$-C_R(c,t) * (C_UDSI_G(c,t,UV)[0] + C_UDSI_G(c,t,VV)[1] + C_UDSI_G(c,t,VW)[2])$
Z velocity (w)	$-\rho \times \left((\overline{u'u'})_{,j} + (\overline{u'u'})_{,j} + (\overline{u'u'})_{,k} \right)$	$-C_R(c,t) * (C_UDSI_G(c,t,UW)[0] + C_UDSI_G(c,t,VW)[1] + C_UDSI_G(c,t,WW)[2])$
turbulent kinetic energy (k)	$-\rho \times \left(\begin{aligned} &(\overline{u'u'})_{,j} u_{i,j} + (\overline{u'u'})_{,j} u_{j,j} + (\overline{u'u'})_{,k} u_{k,j} \\ &+ (\overline{u'u'})_{,j} u_{i,j} + (\overline{u'u'})_{,j} u_{j,j} + (\overline{u'u'})_{,k} u_{k,j} \\ &+ (\overline{u'u'})_{,k} u_{i,k} + (\overline{u'u'})_{,k} u_{j,k} + (\overline{u'u'})_{,k} u_{k,k} \end{aligned} \right)$	$-C_R(c,t) * (C_UDSI(c,t,UU)*C_DUDX(c,t) + C_UDSI(c,t,UV)*C_DUDY(c,t) + C_UDSI(c,t,UW)*C_DUDZ(c,t) \\ + C_UDSI(c,t,UV)*C_DUDY(c,t) + C_UDSI(c,t,VV)*C_DUDY(c,t) + C_UDSI(c,t,VW)*C_DUDY(c,t) \\ + C_UDSI(c,t,UW)*C_DUDZ(c,t) + C_UDSI(c,t,VW)*C_DUDZ(c,t) + C_UDSI(c,t,WW)*C_DUDZ(c,t));$
Turbulent dissipation rate (ε)	$-C_{\epsilon 1} \times \frac{\epsilon}{k} \times \rho \times \left(\begin{aligned} &(\overline{u'u'})_{,j} u_{i,j} + (\overline{u'u'})_{,j} u_{j,j} + (\overline{u'u'})_{,k} u_{k,j} \\ &+ (\overline{u'u'})_{,j} u_{i,j} + (\overline{u'u'})_{,j} u_{j,j} + (\overline{u'u'})_{,k} u_{k,j} \\ &+ (\overline{u'u'})_{,k} u_{i,k} + (\overline{u'u'})_{,k} u_{j,k} + (\overline{u'u'})_{,k} u_{k,k} \end{aligned} \right)$	$-c_{\epsilon 1} \epsilon * C_D(c,t) * C_K(c,t) * C_R(c,t) \\ * (C_UDSI(c,t,UU)*C_DUDX(c,t) + C_UDSI(c,t,UV)*C_DUDY(c,t) + C_UDSI(c,t,UW)*C_DUDZ(c,t) \\ + C_UDSI(c,t,UV)*C_DUDY(c,t) + C_UDSI(c,t,VV)*C_DUDY(c,t) + C_UDSI(c,t,VW)*C_DUDY(c,t) \\ + C_UDSI(c,t,UW)*C_DUDZ(c,t) + C_UDSI(c,t,VW)*C_DUDZ(c,t) + C_UDSI(c,t,WW)*C_DUDZ(c,t));$

รูปที่ 7 แสดงตารางการเขียนโค้ดสมการของ source term

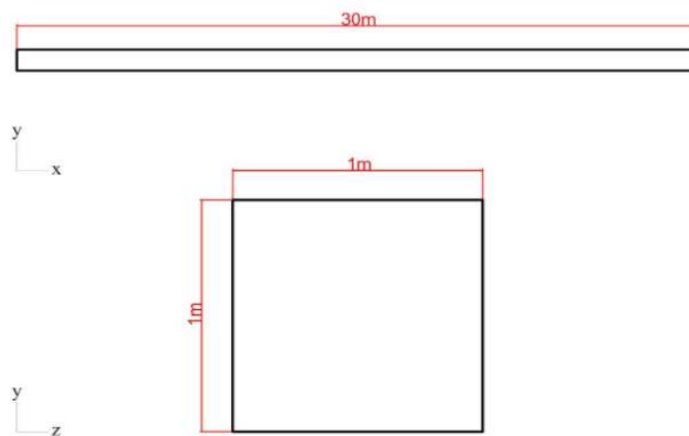
3.3 ทดสอบ UDF กับซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Ansys Fluent

ขอบเขตงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์และ implement แบบจำลองความปั่นป่วน cubic และแบบจำลองความปั่นป่วน higher-order โดยแบ่งเป็น 4 cases ตามตารางที่ 2

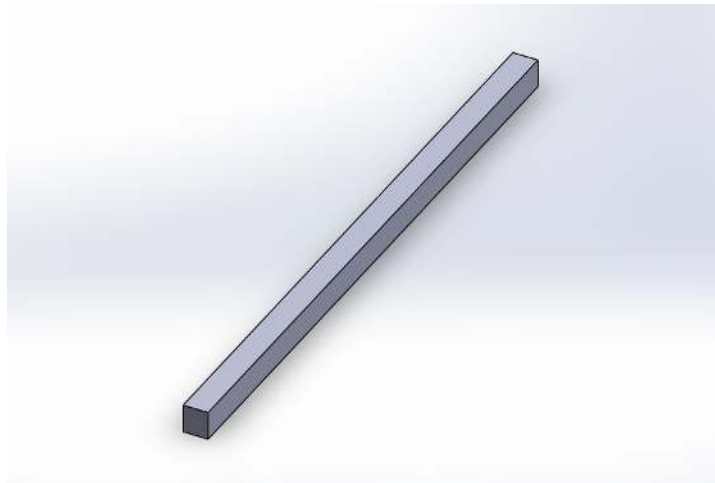
ตารางที่ 2 แสดงค่า Reynolds number ที่ใช้ในการวิเคราะห์

case	Ro_r	Re_r	Re_b	Reference
1	-	-	4410	[2]
2	0	300	-	[7]
3	0.3	300	-	[7]
4	0.9	300	-	[7]

สร้างแบบจำลอง square duct ตามรูปที่ 8



(a)



(b)

รูปที่ 8 แสดงแบบจำลอง square duct

(a) แสดงขนาดของแบบจำลอง

(b) แสดงภาพแบบจำลอง

และสร้าง mesh ด้วยโปรแกรม mesh ของ Ansys ตามรูปที่ 9 โดยใช้จำนวน mesh 80601

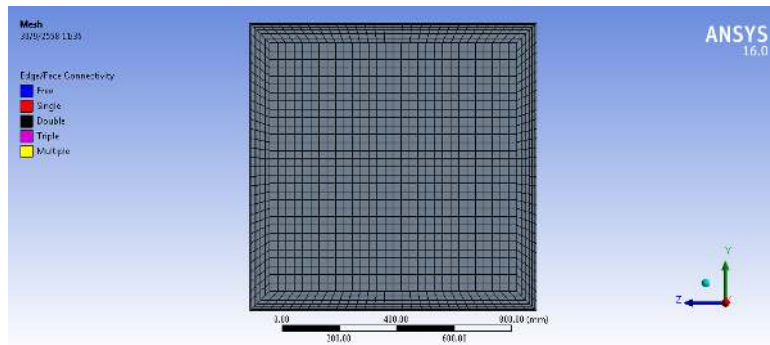
จากนั้นก็นำไฟล์ mesh มาวิเคราะห์และคำนวณในโปรแกรม Fluent โดยจะแบ่ง 2 กรณี

1. การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน cubic
2. การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน higher-order

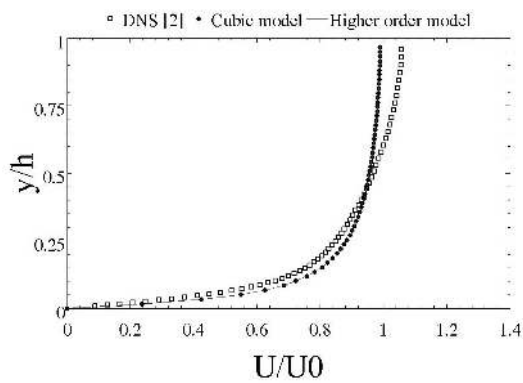
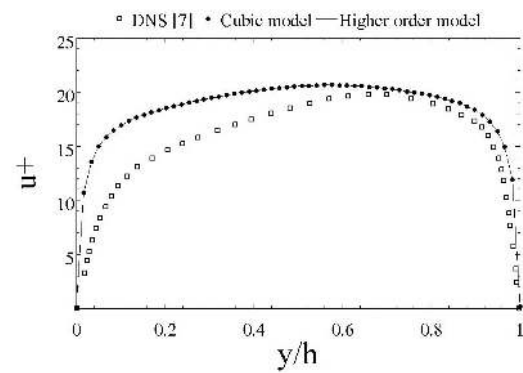
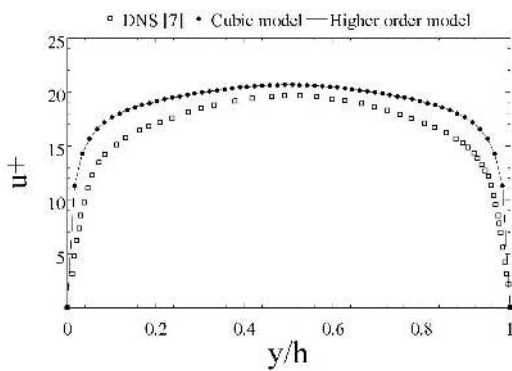
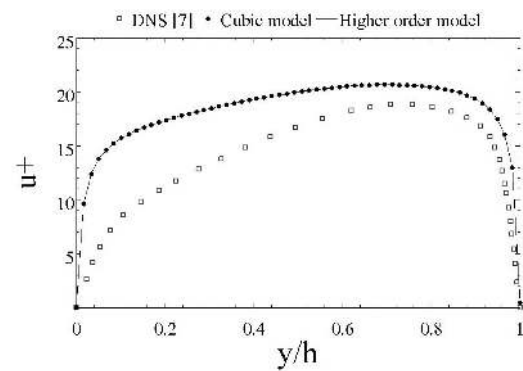
14 แต่เมื่อเพิ่ม Rotating number เท่ากับ 0.3 และ 0.9 พบว่าที่ตำแหน่งในแนวแกน y กราฟจะอยู่บนเส้นเดียวกับแบบจำลองความปั่นป่วน cubic ตามรูปที่ 12 และ 13 ส่วนในแนวแกน z พบว่ากราฟของแบบจำลองความปั่นป่วน higher-order ใกล้เคียงกับกราฟของ DNS มากกว่าแบบจำลอง cubic ตามรูปที่ 15 และ 16

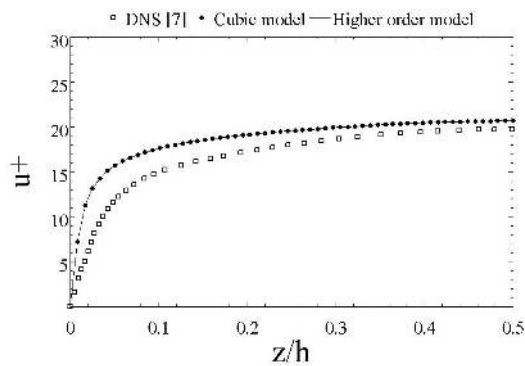
4. ผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ที่ตำแหน่ง fully developed ด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน cubic พบว่าการทดสอบกับแบบจำลอง square duct ทั้ง 4 กรณี มีผลใกล้เคียงกับข้อมูล DNS และการ implement ด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน higher-order พบว่าที่ Rotating number เท่ากับ 0.0 กราฟอยู่บนเส้นเดียวกับแบบจำลองความปั่นป่วน cubic ตามรูปที่ 10, 11 และ

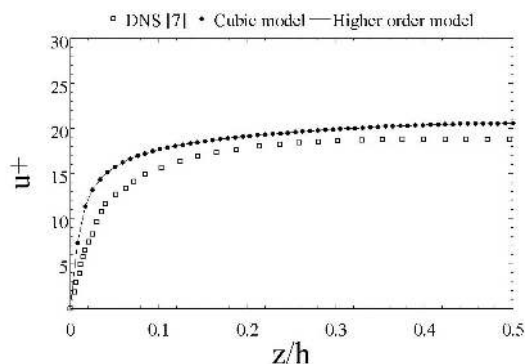


รูปที่ 9 แสดงการสร้าง Mesh ด้าน inlet, outlet

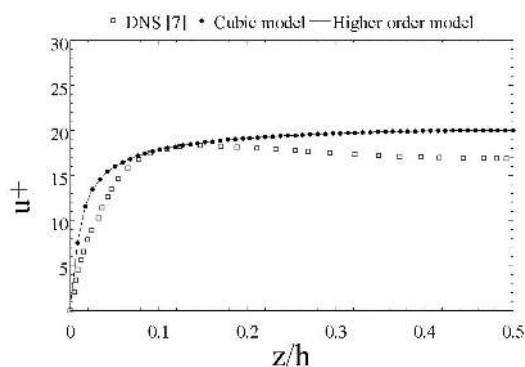
รูปที่ 10 แสดงกราฟ velocity profile ที่ $z/h=0.5$ รูปที่ 12 แสดงกราฟของ u^+ ที่ตำแหน่ง y ต่างๆ ที่ $Ro_\tau = 0.3$ รูปที่ 11 แสดงกราฟของ u^+ ที่ตำแหน่ง y ต่างๆ ที่ $Ro_\tau = 0$ รูปที่ 13 แสดงกราฟของ u^+ ที่ตำแหน่ง y ต่างๆ ที่ $Ro_\tau = 0.9$



รูปที่ 14 แสดงกราฟของ u^+ ที่ตำแหน่ง z ต่างๆ ที่ $Ro_\tau = 0$



รูปที่ 15 แสดงกราฟของ u^+ ที่ตำแหน่ง z ต่างๆ ที่ $Ro_\tau = 0.3$



รูปที่ 16 แสดงกราฟของ u^+ ที่ตำแหน่ง z ต่างๆ ที่ $Ro_\tau = 0.9$

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน higher-order ให้ผลเช่นเดียวกับแบบจำลองความปั่นป่วน cubic ที่ Rotating number เท่ากับ 0.0 และจะให้ผลที่แม่นยำกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน cubic เมื่อเพิ่ม Rotating number แบบจำลองความปั่นป่วนที่ higher-order สูงขึ้นจะทำให้การจำลองการไหลมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการไหลที่เป็น secondary flow

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Juntasaro, V. and Juntasaro E. (2015). A new Reynolds-stress constitutive relation for turbulent channel flows, The Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow. Busan, Korea.
- [2] Gavrilakis, S. (1992). Numerical simulation of low-Reynolds-number turbulent flow through a straight square duct, J. Fluid Mech. 244, 101–129.
- [3] Craft, T.J., Launder, B.E., and Suga, K. (1996). Development and application of a cubic eddy-viscosity model of turbulence, Int. J. Heat Fluid Flow, 17, pp. 108–115.
- [4] Kaewkhaw, P., Tiaple, Y., Dechaumphai, P. and Juntasaro, V. (2011). Application of nonlinear turbulence models for marine propulsors, Journal of Fluids Engineering, Vol. 133/031101-1.



[5] Rivlin, R.S. (1955). Further remarks on the stress-deformation relations for isotropic materials, Journal of Rational Mechanics Analysis. 4, 681-702.

[6] Rivlin, R.S., Ericksen, J.L. (1955). Stress-deformation relations for isotropic materials, Journal of Rational Mechanics Analysis, 4, 323-425.

[7] Dai, Y.J., Huang, W.X., Xu, C.X., and Cui, G.X. (2015). Direction numerical simulation of turbulent flow in a rotating square duct, Physics of Fluids 27, 065104.