

# การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์ที่มีระดับการหมุนวนต่ำ

## : กรณีเครื่องกำเนิดการไหลหมุนวนแบบท่อหมุน

### Numerical Simulation of Weak Swirl Turbulent Flows

#### : The case of a Rotating-Pipe Swirl Generator Case

ทรงฤทธิ์ ดันชัชวาล ปุมยศ วัลลิกุล และ บัณฑิต พงษ์ธรรมสาร

ศูนย์วิจัยการเผาากของเสีย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800 , E-mail: [pyy@kmitnb.ac.th](mailto:pyy@kmitnb.ac.th)

Songrit Tanchatchawan, Pumyos Vallikul and Bundit Fungtammasan

The Waste Incineration Research Center (WIRC) , Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering , King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

Bangkok 10800 , Thailand

Tel : (662)9132500 Ext.8321 , Fax : (662)5870026 Ext. 111

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองเชิงตัวเลขการไหลเทอร์บิวเลนซ์ผ่านเครื่องกำเนิดการหมุนวนแบบท่อหมุนรอบแนวแกนโดยแบ่งการคำนวณออกเป็นสองบริเวณที่ต่อเนื่องกันคือ บริเวณการไหลภายในท่อ และ บริเวณการไหลภายนอกท่อที่เป็นการไหลเฉือนอิสระ ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในบริเวณแรกตรงปากทางออกของท่อใช้เป็นเงื่อนไขทางเข้าของการจำลองในบริเวณที่สอง โดยใช้แบบจำลองเทอร์บิวเลนซ์แบบ RNG  $k - \epsilon$  และแบบ RSM (Reynolds Stress Model) ผลการจำลองการไหลภายในท่อหมุนพบว่าเป็นการหมุนวนแบบอ่อน เมื่อนำผลลัพธ์ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีอยู่พบว่า แบบจำลอง RSM ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแบบ RNG  $k - \epsilon$  สำหรับการไหลในท่อ ผลลัพธ์ที่ปากทางออกของท่อสามารถใช้เป็นเงื่อนไขทางเข้าของการคำนวณในส่วนการไหลเฉือนอิสระ ผลการจำลองที่บริเวณปรับตัวเต็ม (fully developed) ด้วยแบบจำลอง RNG  $k - \epsilon$  สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองเป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามในบริเวณรอยต่อระหว่างปากทางออกของท่อกับนอกท่อ แบบจำลองทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่ไม่สอดคล้องกับการทดลอง

#### Abstract

Numerical simulation of turbulent flow through an axially-rotating-pipe swirl generator is advanced to two juxtaposition-simulated regions: one within the rotating pipe and the other - the free shear flow - outside the pipe. The resulting profiles from the first region at the pipe exit are applied as the inlet conditions for the second region. Two turbulence models, renormalization group (RNG)  $k - \epsilon$  and the Reynolds Stress (RSM), are used. Results show that the rotating pipe generates weak swirl.

Comparisons with existing experimental data show that the RSM model yields a better solution than the RNG  $k - \epsilon$  for the flow within the pipe. It also confirms that the simulated profiles at pipe exit can be used as the inlet condition for the free shear flow calculation. In the fully developed region of the free shear flow, on the other hand, the simulation results using RNG  $k - \epsilon$  model are in excellent agreement with the experimental data. However neither model handles the flow within the transition region satisfactorily.

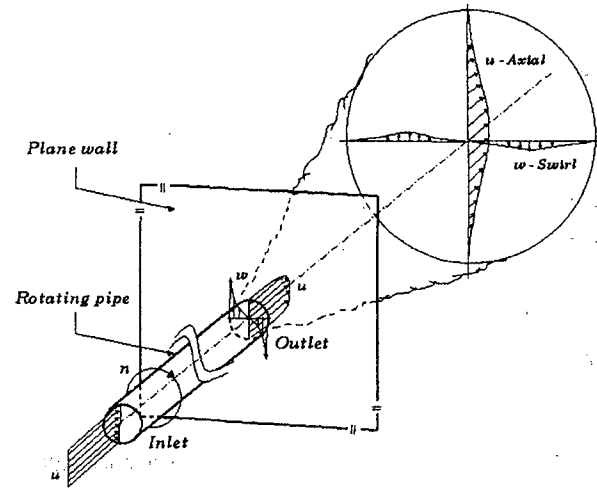
#### 1. บทนำ

การไหลหมุนวนเทอร์บิวเลนซ์ (turbulent swirling flows) เป็นการไหลที่ซับซ้อนซึ่งพบมากในอุปกรณ์อุตสาหกรรมหลายๆประเภท ทั้งที่มีการเผาไหม้และไม่มีการเผาไหม้ อาทิเช่น อุปกรณ์ดักฝุ่นแบบไซโคลนเตาเผา และบ่มแบบเจ็ท เป็นต้น ซึ่งลักษณะการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แต่ละประเภทย่อมมีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะการใช้งานและการสร้างการไหลหมุนวนที่แตกต่างกัน [1,2]

การไหลหมุนวนเทอร์บิวเลนซ์ที่เกิดจากการไหลผ่านท่อหมุนนั้นว่าเป็นวิธีการสร้างการไหลหมุนวนแบบพื้นฐานและง่ายต่อการควบคุม จึงมักนิยมใช้เป็นกรณีศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบและประเมินผลในเรื่องของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องรวมทั้งศักยภาพของการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลที่เกิดขึ้น [3-5] ดังนั้นการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลผ่านเครื่องกำเนิดการหมุนวนแบบท่อหมุนและผลของการไหลที่เกิดขึ้นตามมาจึงเป็นพื้นฐานที่สำคัญเพื่อนำไปสู่การจำลองการไหลที่มีความซับซ้อนมากขึ้นต่อไป

ในงานวิจัยนี้ได้จำลองการไหลตลอดกระบวนการของการไหลหมุนวนเทอร์บิวเลนซ์จากเครื่องกำเนิดการหมุนวนแบบท่อหมุนรอบแนว

แกนสกรูไหลแบบเฉือนอิสระ (free shear flow) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยใช้แบบจำลองเทอร์บีวเลนซ์ RNG  $k - \varepsilon$  และ RSM โดยแบ่งขอบเขตการคำนวณออกเป็น 2 ส่วนที่ต่อเนื่องกัน ส่วนแรกเป็นการจำลองการไหลหมุนวนภายในท่อหมุน อีกส่วนหนึ่งเป็นการจำลองการไหลแบบเจ็ทหมุนวน (swirling jet) ซึ่งอยู่ในบริเวณการไหลเฉือนอิสระ ผลการจำลองที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีมาก่อน [3] [5] ทั้งนี้ข้อมูลจากการจำลองจะใช้ประกอบในการประเมินความเหมาะสมของวิธีการจำลองและแบบจำลองเทอร์บีวเลนซ์



รูปที่ 1 การไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดการหมุนวนแบบท่อหมุนรอบแนวแกน

## 2. การคำนวณการไหลเทอร์บีวเลนซ์

### 2.1 สมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม

สมการที่ใช้สำหรับปัญหาการไหลเทอร์บีวเลนซ์ ซึ่งเป็นการไหลแบบคงตัวและอัดตัวไม่ได้ ประกอบด้วยสมการความต่อเนื่องและสมการเนเวียร์-สโตก (Navier-Stokes) ของปริมาณเฉลี่ย

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \rho \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') \quad (2)$$

จากระบบสมการดังกล่าว เพื่อให้ปัญหาเป็นแบบปิด (closure problem) จึงต้องใช้แบบจำลองเทอร์บีวเลนซ์ในการหาค่า ความเค้นเรโนลด์ (Reynolds stresses,  $-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'$ )

### 2.2 แบบจำลองเทอร์บีวเลนซ์

แบบจำลอง RNG  $k - \varepsilon$

ในการหาค่าความเค้นเรโนลด์จะทำการอนุมานค่าของ Boussinesq สมการที่ใช้หาค่าความเค้นเรโนลด์สามารถแสดงได้ดังนี้ [6]

$$-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho k) \quad (3)$$

โดยที่  $\mu_t$  คือ ค่าความหนืดเทอร์บีวเลนซ์ ซึ่งหาได้จาก

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} ; C_\mu = 0.0845 \quad (4)$$

รูปของสมการที่ใช้ในการหาค่าของ  $k$  (พลังงานจลน์เทอร์บีวเลนซ์) และ  $\varepsilon$  (อัตราการสูญเสียของเทอร์บีวเลนซ์) เป็นดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\text{ค่า } \mu_{eff} = \mu + \mu_t ; C_{2\varepsilon} = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} ; \eta = S \frac{k}{\varepsilon} ;$$

$$\eta_0 = 4.38 \quad \text{และ} \quad \beta = 0.012$$

สำหรับค่า  $G_k$  (อัตราการเกิดพลังงานจลน์ของเทอร์บีวเลนซ์) หาได้จากสมการ

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (7)$$

$$\text{โดยที่ } S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} ; S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

แบบจำลอง RSM (Reynolds Stress Model)

สำหรับสมการที่ใช้ในการหาค่า Reynolds Stress ( $-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'$ ) ของแบบจำลอง RSM แสดงได้ดังนี้ [7]

$$\frac{D}{Dt} \bar{u}_i' \bar{u}_j' = P_{ij} + \psi_{ij} - \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij} + D_{ij}^r + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i' \bar{u}_j' \quad (8)$$

ซึ่งพจน์แรกทางขวามือของสมการคือ ผลคูณความเค้น ( $P_{ij}$ ) โดยที่

$$P_{ij} = - \left( \bar{u}_i' \bar{u}_j' \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \bar{u}_j' \bar{u}_i' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (9)$$

ส่วนพจน์ ความเครียดจากความเค้น ( $\psi_{ij}$ ) สามารถประมาณได้จาก

$$\psi_{ij} = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left( \bar{u}_i' \bar{u}_j' - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) - C_2 \left( P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right) \quad (10)$$

$$\text{โดยที่ } k = \bar{u}_i' \bar{u}_i' / 2 \quad \text{และ} \quad P = P_{ii} / 2$$

สำหรับพจน์ การแพร่ของเทอร์โมวีสเลนซ์ ( $D_t'$ ) คำนวณได้จาก

$$D_t' = \frac{\partial}{\partial x_i} \mu_i \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{u_i' u_i'} \quad (11)$$

ตัวแปร  $\mu_i$ ,  $k$  และ  $\varepsilon$  มีความสัมพันธ์ในแบบเดียวกันกับที่ใช้ในแบบจำลอง standard  $k-\varepsilon$  สำหรับค่าคงที่ในสมการซึ่งเลือกใช้ตาม [8] มีค่าดังนี้  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $C_1 = 1.8$  และ  $C_2 = 0.6$

ในส่วนของการคำนวณเชิงตัวเลขได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume) ด้วยซอฟต์แวร์ FLUENT [8] ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และใช้ QUICK [9] เพื่อช่วยในการดิสครีตพจน์ของการพา สำหรับพจน์ของความดันและความเร็วซึ่งคู่ควบกันอยู่ได้ใช้วิธี SIMPLE [10] ในการแก้ปัญหา

### 3. ลักษณะของปัญหา

การไหลแบบหมุนวนโดยใช้ท่อหมุนนั้น เกิดจากการให้อากาศไหลภายในท่อซึ่งถูกขับให้หมุนรอบแกนแล้วปล่อยให้พุ่งสู่อากาศหนึ่งนอกท่อที่ไม่จำกัดขอบเขต (unconfined) การไหลลักษณะดังกล่าวทั้งภายในและภายนอกท่อได้มีผู้ทำการศึกษาด้วยการวัดโปรไฟล์ความเร็วที่เกิดขึ้น เช่น Imao และ คณะ [5] ได้วัดโปรไฟล์การหมุนวนเฉพาะภายในท่อหมุน ส่วน Rose [3] ได้ทำการวัดโปรไฟล์ของปริมาณต่างๆเฉพาะนอกท่อหมุนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นในการทดลองลักษณะเดียวกัน [11, 12] ผลการศึกษาทั้งสองดังกล่าวมักใช้อ้างอิงในการเปรียบเทียบผลการจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษานี้ก็เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามการศึกษากลับนี้เป็นความพยายามในการจำลองการไหลแบบหมุนวนตลอดกระบวนการตั้งแต่ต้นน้ำ (upstream) ภายในท่อหมุนจนถึงปลายน้ำ (downstream) นอกท่อหมุนโดยจะนำผลลัพธ์การจำลองที่ปากทางออกของท่อหมุนเป็นเงื่อนไขขอบทางเข้าสำหรับการจำลองสภาวะนอกท่อหมุน

การจำลองการไหลสองส่วนต่อเนื่องกันเช่นนี้เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองโดยรวมอีกนัยหนึ่งด้วย ข้อมูลการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขจะเป็นตัวกำหนดการเลือกใช้แบบจำลองเทอร์โมวีสเลนซ์ที่เหมาะสมของการไหลแต่ละกรณี

#### 3.1 การไหลแบบหมุนวนภายในท่อหมุน

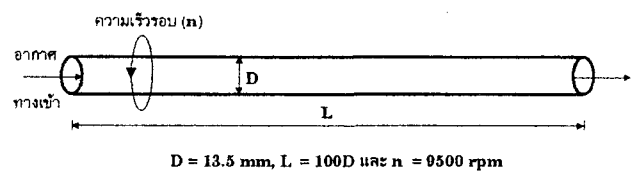
การจำลองการไหลแบบหมุนวนภายในท่อหมุนได้กำหนดเงื่อนไขดังนี้ อากาศซึ่งมีความเร็วเฉพาะในแนวแกนและมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ (uniform) ไหลเข้าท่อซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.5 mm มีความยาวท่อเป็น 100 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางและหมุนรอบแกนด้วยความเร็วรอบ 9500 rpm [3] ด้วยอัตราการไหล 0.112 m<sup>3</sup>/min. ดังแสดงในรูปที่ 2

เมื่อพิจารณาปัญหาเป็นแบบสมมาตรตามแนวแกน จะได้ขอบเขตการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 3 ปริมาณที่สนใจในการจำลองการไหลแบบหมุนวนภายในท่อหมุนคือโปรไฟล์ของปริมาณต่างๆ ( $\overline{u}$ ,  $\overline{w}$ ,  $\overline{u'u'}$ , ฯลฯ) ค่าที่คำนวณได้ตรงปากทางออกของท่อจะนำไปเป็นเงื่อนไข

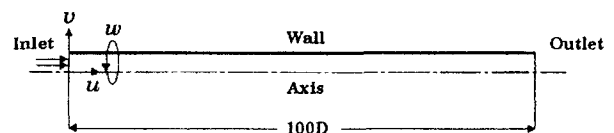
ไขเริ่มต้นเพื่อทำการจำลองการไหลแบบเจ็ทหมุนวนต่อไป (ดูหัวข้อ 3.2) ตัวเลขการหมุนวน (swirl number) ที่ทางออกที่คำนวณได้จากนิยามซึ่งได้แก่อัตราส่วนของฟลักซ์ (flux) ตามแนวแกนของโมเมนตัมเชิงมุมต่อฟลักซ์ตามแนวแกนของโมเมนตัมตามแนวแกน [13] ดังนี้

$$S = \frac{\int_0^R \overline{w u r^2} dr}{R \int_0^R \overline{u} r dr} \quad (12)$$

ทั้งนี้  $S$  เป็นดัชนีบอกระดับการหมุนวน เมื่อ  $S < 0.5$  การหมุนวนเป็นแบบ "หมุนวนอ่อน" และเมื่อ  $S > 0.5$  การไหลวนเป็นแบบ "หมุนวนแรง" [1,2]



รูปที่ 2 การไหลของอากาศผ่านท่อหมุน



รูปที่ 3 แสดงขอบเขตการคำนวณการไหลแบบหมุนวนภายในท่อหมุน

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการคำนวณการไหลในท่อหมุนแสดงในตารางที่ 1 ที่ทางเข้ากำหนดให้ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน ( $\overline{u}_0$ ) มีค่าเท่ากับ 11.62 m/s ค่าความความเข้ม เทอร์โมวีสเลนซ์ 5 % ค่าความยาว characteristic เท่ากับรัศมีของท่อและ ค่าพลังจลน์ของเทอร์โมวีสเลนซ์คำนวณได้จาก

$$k = \frac{3}{2} (\overline{u_0'})^2 \quad (13)$$

ค่า  $\overline{u_0'}$  (สำหรับการใช้แบบจำลอง RSM) มีค่าเป็น 0 เมื่อ  $i \neq j$  และเป็น  $2/3 k$  เมื่อ  $i = j$   
อัตราการผลิตของเทอร์โมวีสเลนซ์เป็นดังนี้

$$\varepsilon = C_\mu \frac{3}{4} \frac{k^{3/2}}{l} ; l = 0.07 L \quad (14)$$

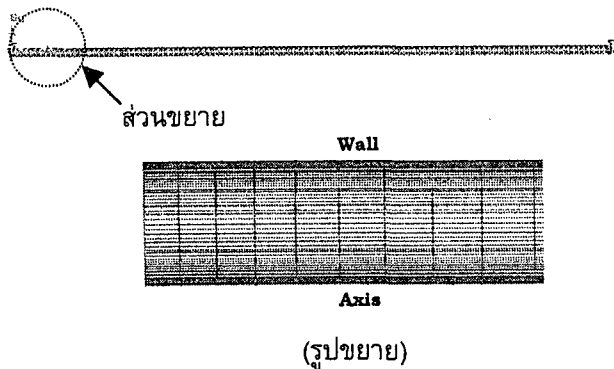
ที่ผนังท่อกำหนดให้อากาศเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนด้วยความเร็วเดียวกับท่อ ที่ทางออกท่อให้ความดันสถิตย (เกจ) เป็นศูนย์ ที่

ใกล้ผนังให้ใช้ฟังก์ชันผนังมาตรฐาน (standard wall functions) ที่เหมาะสมมาตรฐานให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆในทิศทางตั้งฉากกับแกนสมมาตรเป็นศูนย์ สำหรับที่ทางออกท่อ ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการกำหนดค่าความดันเป็น 2 แบบคือ (1) กำหนดให้ความดันสถิตย (เกจ) เป็นศูนย์ และ (2) กำหนดให้การกระจายของความดันในแนวรัศมีสมดุลกับผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางอันเนื่องมาจากความเร็วในแนวสัมผัส (เฉพาะกรณีใช้ RSM เป็นแบบจำลองเทอร์บิวเลนซ์)

กริด (grid) ที่ใช้ในการคำนวณเป็นแบบสี่เหลี่ยมมีจำนวน 50 x 120 (กว้าง X ยาว) โดยมีจำนวนหนาแน่นบริเวณทางเข้า-ออกของท่อ บริเวณแกนหมุน และบริเวณผนังท่อ ดังแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 1 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการคำนวณการไหลแบบหมุนวนภายในท่อหมุน

| ตำแหน่ง        | เงื่อนไข                                                                                |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| ทางเข้า        | $U_o = 11.62 \text{ m/s}$ , $I = 5\%$<br>และ $L = R$                                    |
| แกนสมมาตร      | $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$                                                  |
| ผนังท่อ        | $n = 9500 \text{ rpm}$                                                                  |
| บริเวณใกล้ผนัง | ฟังก์ชันผนังมาตรฐาน                                                                     |
| ทางออก         | (1) $p_{\text{static}} = 0$<br>(2) $\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\rho w^2}{r}$ |



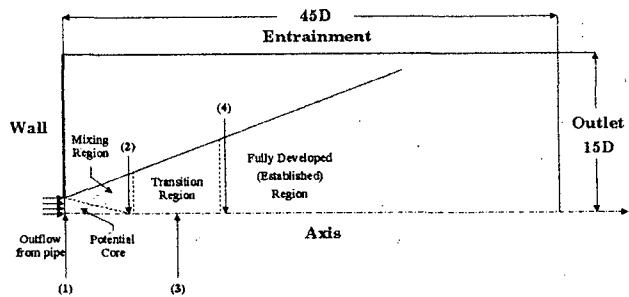
รูปที่ 4 ลักษณะกริดที่ใช้ในการคำนวณการไหลในท่อหมุน

### 3.2 การไหลแบบเจ็ทหมุนวน

ในการจำลองการไหลแบบเจ็ทหมุนวนได้กำหนดให้อากาศภายนอกเป็นอากาศนิ่ง และการไหลของเจ็ทสมมาตรตามแนวแกน ซึ่งจะได้ขอบเขตการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 6 ผลการคำนวณที่ระยะห่างจากทางออกตามแนวแกนที่ระยะ 0.235D, 4.5D, 9D และ 15D (ระยะ (1), (2), (3) และ (4)) ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 5 ได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Rose

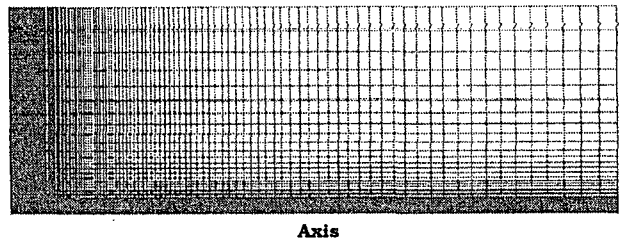
เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองการไหลแบบเจ็ทหมุนวนแสดงดังตารางที่ 2 ที่ทางเข้ากำหนดให้ใช้ผลการคำนวณที่ได้จากการจำลองการไหลแบบหมุนวนภายในท่อหมุนตรงปากทางออกของท่อ ที่บริเวณ

ใกล้ผนังห้องกำหนดให้ใช้ ฟังก์ชันผนังมาตรฐาน ที่เหมาะสมมาตรฐานกำหนดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆในทิศทางตั้งฉากกับแกน ที่ขอบเขตเหนี่ยวนำ (entrainment boundary) กำหนดให้ความดันสถิตย ค่าพลังงานจลน์ของเทอร์บิวเลนซ์และอัตราการผลิตสลายของเทอร์บิวเลนซ์เป็นศูนย์ และที่ขอบเขตไกลจากทางออกท่อตามแนวแกน ให้ความดันสถิตย (เกจ) เป็นศูนย์เช่นกัน



รูปที่ 5 ขอบเขตการคำนวณเจ็ทหมุนวน

สำหรับกริดที่ใช้ในการคำนวณการไหลแบบเจ็ทหมุนวนเป็นกริดแบบสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกันกับปัญหาข้างต้น มีจำนวน 150 x 120 (กว้าง X ยาว) โดยมีจำนวนกริดหนาแน่นบริเวณทางเข้า และ บริเวณแกนหมุน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ลักษณะกริดที่ใช้ในการคำนวณการไหลแบบเจ็ทหมุนวน

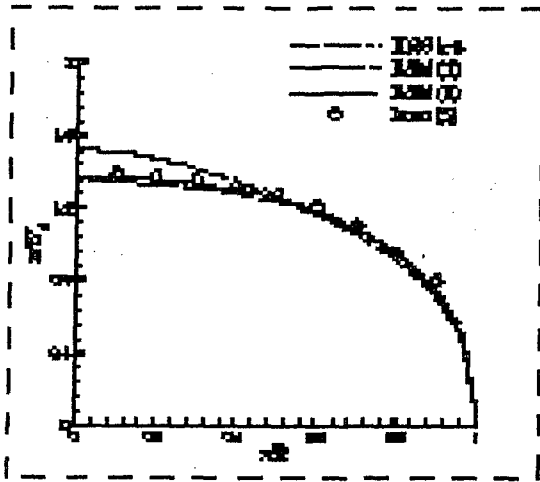
ตารางที่ 2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการคำนวณการไหลแบบเจ็ทหมุนวน

| ตำแหน่ง                       | เงื่อนไข                                                                             |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ทางเข้า                       | ผลการคำนวณตรงปากทางออกของท่อจากการจำลองการไหลแบบหมุนวนภายในท่อหมุนโดยใช้แบบจำลอง RSM |
| แกนสมมาตร                     | $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$                                               |
| บริเวณใกล้ผนัง                | ฟังก์ชันผนังมาตรฐาน                                                                  |
| ขอบเขตเหนี่ยวนำ (entrainment) | $p_{\text{static}} = 0$ , $k = 0$ และ $\epsilon = 0$                                 |
| ทางออกตามแนวแกน               | $p_{\text{static}} = 0$                                                              |

#### 4. ผลการจำลองเชิงตัวเลข

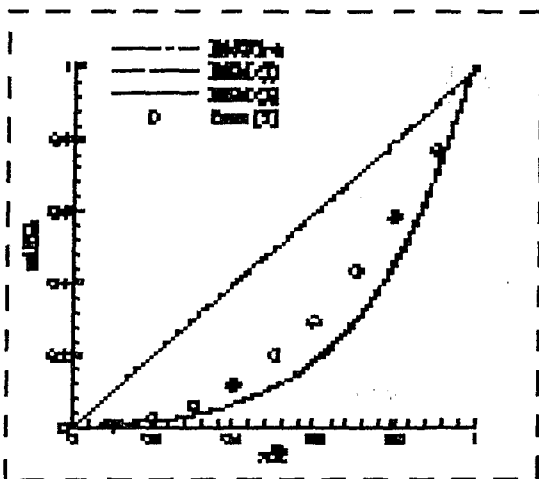
##### 4.1 ผลการจำลองการไหลแบบหมุนวนภายในท่อหมุน

ผลการคำนวณที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Imao [16] พบว่าโปรไฟล์ของความเร็วในแนวแกนกับระยะตามแนวรัศมีที่ได้จากการใช้ RSM เป็นแบบจำลองเทอร์โมวีสสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าการใช้ RNG  $k - \varepsilon$  ดังแสดงในรูปที่ 7 และผลของการกำหนดเงื่อนไขขอบความดันแบบที่ (1) และ (2) ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 ให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกันมาก



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วในแนวแกนที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดลองของ Imao

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในรูปที่ 8 ซึ่งแสดงโปรไฟล์ของความเร็วในแนวสัมผัสกับผลการทดลองพบว่าการใช้แบบจำลอง RNG  $k - \varepsilon$  ไม่สามารถแสดงถึงส่วนโค้งที่เกิดขึ้นในโปรไฟล์ความเร็วได้ ส่วนการใช้ RSM ทั้งการกำหนดเงื่อนไขขอบแบบที่ (1) และ (2) พบว่าได้แนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการทดลอง และเมื่อคำนวณตัวเลขการหมุนวน ( $S$ ) โดยใช้ผลจากการจำลองแบบหลังนี้พบว่ามีความเท่ากับ 0.23 ซึ่งตรงกับผลการคำนวณโดย Pratte และ Keffer [4]



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วในแนวสัมผัสที่ได้

จากการคำนวณกับผลการทดลองของ Imao

จากผลการเปรียบเทียบพบว่าการใช้ RSM จำลองการไหลแบบหมุนวนภายในท่อหมุนให้ผลที่ดีกว่าการใช้แบบจำลอง RNG  $k - \varepsilon$  ดังนั้นในการคำนวณเชิงหมุนวนนอกท่อจึงได้นำผลการคำนวณโดยใช้ RSM เป็นค่าเริ่มต้น

##### 4.2 ผลการจำลองการไหลแบบเจ็ทหมุนวน

รูปที่ 9 แสดงผลการจำลองโปรไฟล์ความเร็วตามแนวแกนและแนวสัมผัส ( $u$  และ  $w$ ) ที่ระยะ  $x/D = 0.235, 4.5, 9$  และ  $15$  ส่วนรูปที่ 10 แสดงโปรไฟล์ความเข้มเทอร์โมวีสที่ระยะเดียวกัน ที่  $x/D = 0.235$  ซึ่งอยู่ในช่วงแกนศักย์ (potential core) จะเห็นได้ว่าการใช้แบบจำลอง Standard  $k - \varepsilon$  และ RSM ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองในกรณีของ  $u$  แต่ให้ผลที่ต่ำกว่าผลการทดลองในกรณีของ  $w$  อย่างไรก็ตามรูปร่างโปรไฟล์มีลักษณะสอดคล้องกับผลการทดลองทั้งนี้ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการจำลองที่ปากทางออกของท่อหมุนดังแสดงในรูปที่ 8

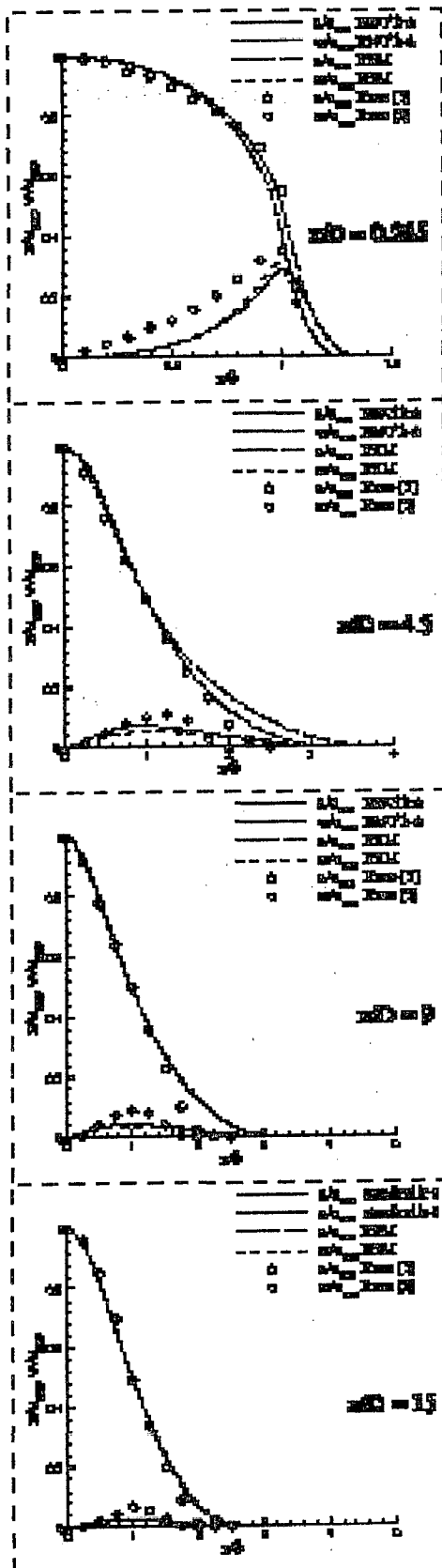
สำหรับโปรไฟล์ความเข้มเทอร์โมวีสนั้นพบว่าทั้งแบบจำลอง RNG  $k - \varepsilon$  และ RSM ให้ผลที่คลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง โดยเฉพาะที่บริเวณที่  $r/b$  เท่ากับ 1 ซึ่งถือว่าเป็นบริเวณขอบของการแผ่กระจายของเจ็ท และเป็นบริเวณที่มีค่าความเค้นเฉือนและความเข้มเทอร์โมวีสสูงสุด

ที่ระยะ  $4.5D$  ซึ่งอยู่ในบริเวณการผสม (mixing region) กรณี RNG  $k - \varepsilon$  ให้ผลการจำลองความเร็ว  $u$  ที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่ากรณี RSM และทั้งสองกรณีให้ผลการจำลองความเร็ว  $w$  ที่ใกล้เคียงกันแต่ค่าที่ได้ก็ยังคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง ส่วนโปรไฟล์ของความเข้มเทอร์โมวีสนั้นพบว่าทั้ง RNG  $k - \varepsilon$  และ RSM ยังคงให้ผลที่คลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง

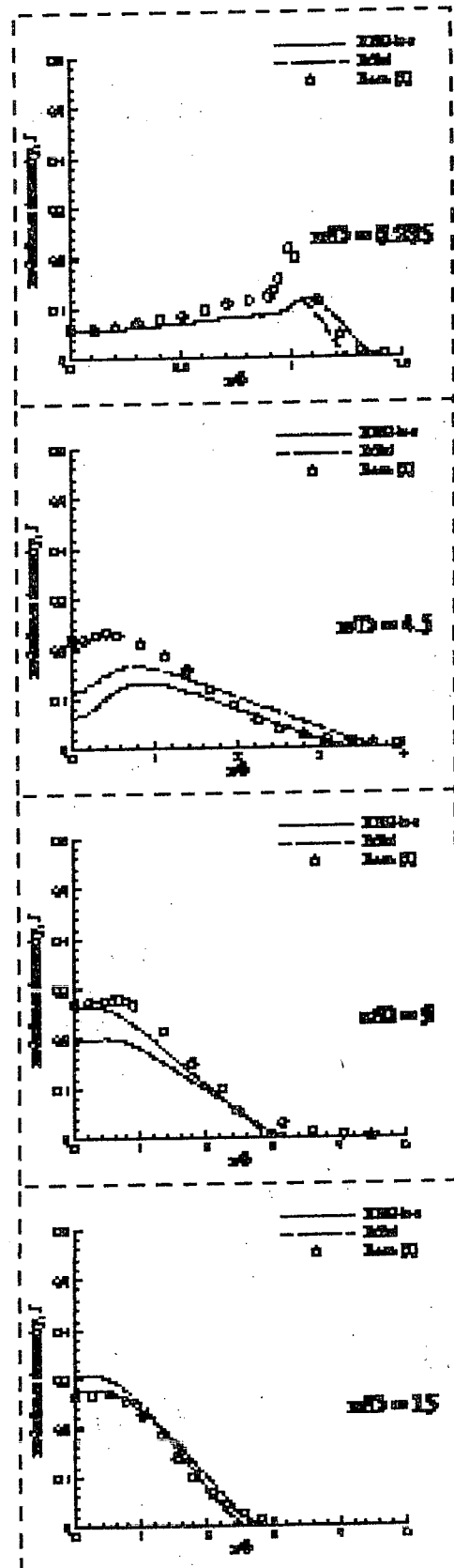
ที่ระยะ  $9D$  ซึ่งอยู่ในบริเวณการเปลี่ยนผ่าน (transition region) พบว่าทั้งแบบจำลอง RNG  $k - \varepsilon$  และ RSM ให้ผลของความเร็ว  $u$  ที่สอดคล้องกับผลการทดลองเฉพาะในบริเวณขอบเขตการแผ่ของเจ็ท ส่วนความเร็ว  $w$  มีค่าน้อยและต่ำกว่าผลการวัดจริง ในขณะที่การจำลองโปรไฟล์ของความเข้มเทอร์โมวีส RSM ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า RNG  $k - \varepsilon$

ที่ระยะ  $15D$  ซึ่งอยู่ในบริเวณที่ปรับตัวเต็มที่ แบบจำลอง RNG  $k - \varepsilon$  และ RSM ให้ผลของความเร็ว  $u$  ที่สอดคล้องกับการทดลอง ส่วนความเร็ว  $w$  ก็ยังคงต่ำกว่าผลการทดลอง ในกรณีความเข้มเทอร์โมวีส RNG  $k - \varepsilon$  ให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่า RSM

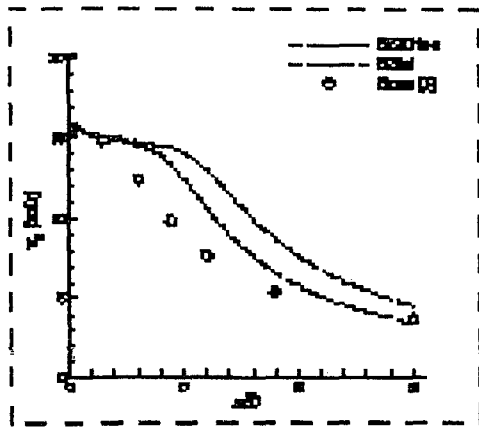
รูปที่ 11 และ 12 แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาดของความเร็ว  $u$  ตามแนวแกนและการแผ่กระจายของเจ็ทซึ่งตามนิยามของ Rose คือ ความกว้างของเจ็ท  $b$  ที่ระยะใดจากปากทางออกของท่อหมุนโดยที่  $b$  มีค่าเท่ากับระยะ  $r$  ที่ขนาดของความเร็ว  $u$  มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของ  $u_{max}$  ที่ระยะนั้นๆ ซึ่งพบว่า แบบจำลอง RSM ให้แนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่า RNG  $k - \varepsilon$  อย่างไรก็ตามแบบจำลองทั้งสองให้ผลที่คลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลอง



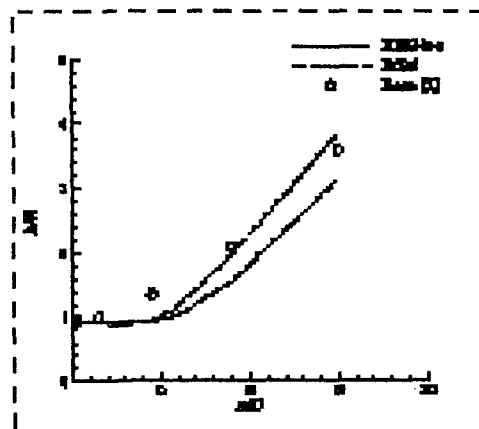
รูปที่ 9 โปรไฟล์ความเร็วตามแนวแกนและตามแนวสัมผัส  
ที่ระยะห่างจากปากทางออกของท่อ  $x/d = 0.235$ ,  
4.5, 9 และ 15 เปรียบเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 10 โปรไฟล์ความเข้มเทอร์โมสแตทซ์ที่ระยะห่างจากปาก  
ทางออกของท่อ  $x/d = 0.235$ , 4.5, 9 และ 15  
เปรียบเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 11 เปรียบเทียบความเร็ว  $u_0$  ตามแนวแกนระหว่าง ผลการคำนวณกับผลการทดลอง



รูปที่ 12 เปรียบเทียบการแผ่กระจายของเจ็ตที่ได้จากการ คำนวณกับผลการทดลองของ

## 5. สรุป

การจำลองเชิงตัวเลขตลอดกระบวนการของการไหลเทอร์ไบน์ เลนซ์หมุนวนโดยเริ่มตั้งแต่การไหลภายในท่อกำเนิดการหมุนวนสู่การไหลภายนอกที่เป็นการไหลแบบเจ็ตหมุนวน (หรือการไหลเฉือนอิสระ) ให้ผลสรุปดังนี้

1. การใช้แบบจำลอง RSM เหมาะกว่า RNG  $k - \epsilon$  ในการจำลองการไหลภายในท่อ

2. สำหรับการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านท่อหมุน การกำหนดเงื่อนไขขอบตรงปากทางออกของเครื่องกำเนิดการหมุนวนโดยกำหนดให้การกระจายความตามแนวรัศมีสมดุลกับผลของแรงเหวี่ยง หนีศูนย์กลางเนื่องมาจากความเร็วในแนวสัมผัสให้ผลที่แตกต่างจากการกำหนดให้ความดันมีค่าคงที่เพียงเล็กน้อย

3. สำหรับการไหลแบบเจ็ตหมุนวนอย่างอ่อน ( $S=0.23$ ) การจำลองด้วย RNG  $k - \epsilon$  ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่า RSM โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่ปรับตัวเต็มรูป ( $x/D=15$ ) ในขณะที่บริเวณ

แกนศกย์ที่โปรไฟล์การไหลยังคงอยู่ภายใต้อิทธิพลของการไหลในท่อแบบจำลองทั้งสองให้ผลที่ดีใกล้เคียงกัน

3. ความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มเทอร์ไบน์เลนซ์ (รูปที่ 10) เป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของการเปลี่ยนแปลงขนาดของความเร็ว  $u_0$  ตามแนวแกนเป็นสำคัญ (รูปที่ 11)

4. ที่บริเวณการผสมและบริเวณการเปลี่ยนผ่าน แบบจำลองทั้งสองแสดงค่าที่คลาดเคลื่อนจากการทดลอง อย่างไรก็ตามแนวโน้มของโปรไฟล์การไหลยังคงสอดคล้องกับการทดลอง

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก บัณฑิตวิทยาลัยและคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การคำนวณครั้งนี้ใช้เครื่องคำนวณสมรรถนะสูง (Digital Workstation) ที่ศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ด้วย software FLUENT

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. M. Beer and N. A. Chigier "Combustion Aerodynamics." Applied Science, London and Halsted-Wiley, New York, 1972.
- [2] A. K. Gupta, D. G. Lilley and N. Syred "Swirl Flows", Abacus Press, 1984.
- [3] W. G. Rose "A Swirling Round Turbulent Jet. Part I: Mean Flow Measurements". ASME Journal of Applied Mechanics. Series E, 29 (December 1962): 615-625.
- [4] B. D. Pratte, B. D. and J. F. Keffer "The Swirling Turbulent Jet." ASME Journal of Basic Engineering. Series D, 94 (December 1972): 739-748.
- [5] S. Imao, M. Itoh and T. Harada "Turbulent Characteristics of the flow in an axially rotating pipe." International Journal of Heat and Fluid Flow, 17 (1996): 444-451.
- [6] V. Yakhot and S. A. Orszag "Renormalization Group Analysis of Turbulence: I. Basis Theory." Journal of Scientific Computing, vol 1(1), 1986: 1-54.
- [7] B. E. Launder, G. J. Reece and W. Rodi "Progress in Development of a Reynolds Stress Turbulence Closure" Journal of Fluid Mechanics, vol. 68(3), 1975: 537-566.
- [8] Fluent 5 User's Guide. (1998). Fluent Incorporated, Lebanon, NH 03766 USA.
- [9] B. P. Leonard and Mokhtari. "ULTRA-SHARP Nonoscillatory Convection Schemes for High-Speed Steady Multidimensional Flow." NASA TM 1-2568 (ICOMP-90-12), NASA Lewis Research Center, 1990.
- [10] S. V. Patankar and D. B. Spalding "A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in

Three-dimensional Parabolic Flows" International Journal of Heat and Mass Transfer, 15 (1972): 1787.

- [11] I. Wygnanski and H. E. Fiedler. "Some Measurements in self Preserving Jet." Journal of Fluid Mechanics, 38 (1969): 577-612.

- [12] W. Rodi "A New Method of Analyzing Hot-Wire Signals in Highly Turbulent Flows and Its Evaluation in Round Jets." Disa Information, No. 17, 1975.

- [13] S. Hogg and M. A. Leschziner "Second-moment-closure Calculation of Strongly Swirling Confined Flow with Large Density Gradients." International Journal of Heat and Fluid Flow, 10, No.1 (March 1989): 16-27.

### สัญลักษณ์

|                         |                                                                              |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $b$                     | ค่าของรัศมีที่ขนาดของความเร็วในแนวแกนเป็นครึ่งของความเร็วสูงสุดในแนวเดียวกัน |
| $C_1, C_2$              | ค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง Pressure strain                                    |
| $C_{1E}, C_{2E}, C_\mu$ | ค่าคงที่ของแบบจำลองเทอร์บิวเลนซ์                                             |
| $D$                     | เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ                                                         |
| $D_{ij}$                | อัตราการผลิตการกระจายสุทธิต่อส่วนประกอบความเค้น ( $\overline{u'_i u'_j}$ )   |
| $I$                     | ความเข้มเทอร์บิวเลนซ์                                                        |
|                         | $\frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{U_0}$ ; กรณีการไหลภายในท่อ                       |
|                         | $\frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{u_{max}}$ ; กรณีการไหลแบบเจ็ทหมุนวน              |
| $k$                     | พลังงานจลน์ของเทอร์บิวเลนซ์                                                  |
| $L$                     | ความยาวท่อ                                                                   |
|                         | ค่าลักษณะเฉพาะความยาว                                                        |
| $l$                     | สเกลความยาว                                                                  |
| $n$                     | ความเร็วรอบ (rpm)                                                            |
| $P$                     | Production rate ของพลังงานเทอร์บิวเลนซ์                                      |
| $P_{ij}$                | Production rate ของส่วนประกอบความเค้น ( $\overline{u'_i u'_j}$ )             |
| $\overline{p}$          | ความดันเฉลี่ย                                                                |
| $R$                     | รัศมีท่อ                                                                     |
| $r$                     | ระยะตามแนวรัศมี                                                              |
| $t$                     | เวลา                                                                         |
| $S$                     | ค่าการหมุนวน                                                                 |

$$U_0$$

$$\overline{u_i}$$

$$\overline{u}, \overline{w}$$

$$\overline{u'u'}, \overline{v'v'}, \overline{w'w'}$$

$$\overline{u'v'}, \overline{v'w'}, \overline{u'w'}$$

$$u_{max}, w_{max}$$

### สัญลักษณ์กรีก

$$\delta_{ij}$$

$$\varepsilon$$

$$\sigma_i, \sigma_e$$

$$\psi_{ij}$$

$$\mu$$

$$\rho$$

ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกนที่ทางเข้าท่อ

ความเร็วเฉลี่ย (tensor notation)

ในทิศทาง  $x_i$

ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน

และ แนวสัมผัส

ส่วนประกอบของ Reynolds stress

tensor ( $\overline{u'_i u'_j}$ )

ค่าที่มากที่สุดของความเร็วเฉลี่ย

ตามแนวแกนและแนวสัมผัส

Kronecker delta

อัตราการผลิตการกระจายสุทธิต่อ

ค่าคงที่ของแบบจำลองเทอร์บิวเลนซ์

ความสัมพันธ์ pressure strain

ของส่วนประกอบความเค้น ( $\overline{u'_i u'_j}$ )

ความหนืดจลนศาสตร์

ความหนาแน่น