

อิทธิพลของเงื่อนไขที่ทางเข้าต่อการทำนายพฤติกรรมการไหลผ่านแผ่นออริฟิส

Effect of Inlet Conditions on Prediction of Orifice Plate Flow Behaviors

สุวัจน์ชัย ศรีสถิตย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ถ. เชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

โทรสาร 66(2) 988-3666 ต่อ 241, E-mail: suwatcha@mut.ac.th

พงษ์เจต พรหมวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ. ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 66(2) 326-9987, โทรสาร 66(2) 326-9053, E-mail: kppongje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการนำวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume) มาประยุกต์ร่วมกับ standard $k-\varepsilon$ turbulence model เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของการกำหนดความเร็วที่ทางเข้าที่มีต่อผลการทำนายการไหลแบบปั่นป่วนผ่านแผ่นออริฟิสขนาด d/D เท่ากับ 0.75 เมื่อ Re_{D_h} เท่ากับ 54700 โดยที่ทางเข้านั้นจะกำหนดเป็นความเร็วแบบสม่ำเสมอ, ความเร็วตาม $1/7^{th}$ Power law และความเร็วตามผลการทดลองที่วัดจริง จากนั้นจะมีการเพิ่มอิทธิพลของความเข้มข้นของความปั่นป่วน (turbulence intensity) กับความเร็วทั้ง 3 แบบข้างต้น เมื่อนำผลการจำลองที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Nail [3] ที่วัดด้วย 3D-LDV แล้วพบว่า การกำหนดความเร็วทั้งสามลักษณะให้ผลการทำนายที่แม่นยำใกล้เคียงกัน แต่เมื่อใดที่ขาดข้อมูลของเงื่อนไขที่ทางเข้าแล้วควรเลือกกำหนดความเร็วแบบ $1/7^{th}$ Power law profile ก่อนการกำหนดความเร็วแบบสม่ำเสมอ โดยที่ไม่ต้องมีการรวมเอาอิทธิพลของความเข้มข้นของความปั่นป่วนไว้ และหากต้องการความสะดวกต่อการกำหนดขนาดของ velocity profile ก็ควรเลือกแบบความเร็วสม่ำเสมอเป็นเงื่อนไขที่ทางเข้า แต่ควรที่จะกำหนดอิทธิพลของความเข้มข้นของความปั่นป่วนไว้ด้วยสำหรับกรณีนี้ ซึ่งจะให้ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดลดลง แต่มีข้อเสีย คือ จำนวนการทำซ้ำ (iteration) นั้นจะมากขึ้นสำหรับกรณีที่ความเร็วที่ทางเข้าเป็นไปตามผลการทดลองที่วัดจริงนั้นก็ให้ผลการทำนายที่ดีพอสมควร แต่ไม่อาจเปรียบเทียบได้กับสองกรณีแรก เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งคาดว่ามาจาก numerical error

Abstract

In this paper, the finite volume approach with the standard $k-\varepsilon$ turbulence model is presented to investigate the effect of inlet conditions on the prediction of orifice plate flow behaviors.

The orifice plate considered in this work has d/D around 0.75 and Re_{D_h} around 54700. Three of the inlet velocity profiles, the uniform profile, $1/7^{th}$ Power law profile, and the experimental profile are applied in this work and also the turbulent intensity is included with these three profiles. The computational results are compared with 3D-LDV experimental results of Nail [3]. The comparison shows that without inlet velocity data, the $1/7^{th}$ Power law profile, which excludes the turbulent intensity effect, should be used. While it will be easier to apply the inlet in uniform profile which includes the turbulent intensity effect. The result showed that the uniform profile could decrease the average error; however it used more iterations than the $1/7^{th}$ Power law profile. For the experimental profile, it cannot compare with these two cases because it has slightly higher mass flow rate. This effect may be caused by the numerical error.

1. บทนำ

ปัญหาของนักวิจัยด้านการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (computational fluid dynamics, CFD) ที่มักจะพบบ่อยอยู่เสมอ คือ การกำหนดเงื่อนไขที่ทางเข้าสู่โดเมนการไหล โดยที่ไม่ทราบข้อมูลที่แท้จริง ทำให้ผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่ได้มีความผิดพลาดจากค่าการทดลองมาก บทความนี้จึงได้นำเสนอวิธีการกำหนดเงื่อนไขที่ทางเข้าสู่โดเมนการไหลเป็นความเร็ว 3 ลักษณะ คือ ความเร็วสม่ำเสมอ (uniform profile), ความเร็วตาม $1/7^{th}$ Power law ($1/7^{th}$ Power law profile) และความเร็วตามผลการทดลองที่วัดจริง (experimental profile) เพื่อศึกษาว่าการกำหนดความเร็วในลักษณะใดที่ควรจะเป็นทางเลือกสำหรับนักวิจัยด้าน CFD หากขาดข้อมูลของเงื่อนไขที่ทางเข้าดังกล่าวแล้ว

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nail [3] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านแผ่นออริฟิส โดยการวัดการกระจายตัวของความเร็วและความดันภายในโดเมนการไหลด้วยเทคนิค LDV (laser doppler velocimeter) ใน 3 มิติ ซึ่งมีตำแหน่งที่วัดทั้งสิ้นกว่า 700 จุดตลอดความยาวของชุดทดลอง ซึ่งแต่ละตำแหน่งนั้นจะเก็บบันทึกความเร็วทั้ง 3 แกนรวมทั้งสิ้น 4096 ชุดข้อมูล จากนั้นนำไปทำ Time average เพื่อให้ได้ปริมาณพื้นฐาน (basic quantities) และปริมาณอนุพันธ์ (derived quantities) งานวิจัยชิ้นนี้ถือว่าได้ให้รายละเอียดเชิงการทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของอากาศด้านหลังออริฟิสมากกว่าในอดีต ซึ่งได้ทำการวัดด้วย LDV ใน 1 และ 2 มิติเท่านั้น ซึ่งเป็นของ Bates [11] และ Shen et al. [12] ตามลำดับ โดยการทดลองของ Bates ได้แสดงให้เห็นพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านออริฟิสขนาด $\beta = 0.5$ ที่ Re เท่ากับ 3.38×10^4 ถึง 9.15×10^4 ผลที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้คือ การแบ่งลักษณะการไหลด้านหลังแผ่นออริฟิสออกเป็น 3 ช่วง คือ 1. บริเวณ central core 2. บริเวณ shear layer และ 3. บริเวณการไหลย้อนกลับที่ชั้นชิดผนัง ส่วนผลการทดลองของ Shen et al. ได้พบว่าด้านหน้าแผ่นออริฟิสไม่พบการหมุนวนของน้ำ แต่จะพบด้านหลังแผ่นออริฟิสแทน เมื่อ Re เท่ากับ 1.4×10^5 โดยออริฟิสที่ใช้มีมุมปากทำมุม 30° กับระนาบของแผ่น Shen et al. ได้เสนอไว้ว่าการทดลองกับออริฟิสที่มีมุมน้อยๆ กว่านี้จะทำให้ยากต่อการวัด สำหรับงานวิจัยด้าน CFD เกี่ยวกับเรื่องออริฟิสมีมากพอสมควร ผู้ทำวิจัยจึงได้นำเสนอในส่วนที่ขาดอยู่ คือ เรื่องการกำหนดลักษณะของอิทธิพลของความเร็วที่ทางเข้าที่มีต่อการทำนายพฤติกรรมการไหลของของไหลด้านหลังออริฟิส

2.2 สมการพื้นฐานของการไหล

สมมุติฐานของการไหลที่พิจารณาในบทความนี้ คือ เป็นการไหลชนิดหนืดในสองมิติแบบสมมาตรของของไหลที่อัดตัวไม่ได้ที่สภาวะคงตัว และไม่มีการผลิตความร้อนขึ้นภายใน สำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนจะทำการเฉลี่ยค่าคุณสมบัติของการไหลในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อให้ค่าคุณสมบัติการไหลในส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (fluctuating parts) มีค่าเป็นศูนย์ ให้เหลือเพียงส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ย (mean part) เท่านั้น โดยจะเริ่มวิเคราะห์ที่สมการการอนุรักษ์มวล และสมการการอนุรักษ์โมเมนตัมดังนี้

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

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}) \quad (2)$$

โดยที่ $\bar{\tau}_{ij}$ ใช้แทน mean viscous stress tensor และ τ_{ij} คือ average Reynolds stress tensor ซึ่งมีนิยามตามสมการ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} \quad (4)$$

เมื่อ μ_t คือ laminar viscosity จากสมการที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นมี τ_{ij} เป็นตัวไม่ทราบค่า หากจะแก้ระบบสมการนี้จำเป็นต้องใช้แบบจำลองความปั่นป่วน (turbulence model) เข้ามาช่วยด้วย ซึ่งในที่นี้ใช้ standard $k-\varepsilon$ turbulence model

2.3 รูปแบบทั่วไปของสมการควบคุม

สมการควบคุมของทุกโดเมนการไหลใน 2 มิติแบบสมมาตรสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไป โดยแบ่งเป็น convection, diffusion และ source term ดังสมการ

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho v r \varphi) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\varphi x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\varphi y} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = S_\varphi \quad (5)$$

โดย φ แทนตัวแปรอิสระใดๆ ส่วน $\Gamma_{\varphi x}, \Gamma_{\varphi y}, \Gamma_{\varphi r}$ เป็น exchange coefficient ของ φ และ S_φ คือ source term

2.4 Standard $k-\varepsilon$ turbulence model

สำหรับ $k-\varepsilon$ model นั้นจะสร้างความสัมพันธ์ของ Reynolds stress กับ turbulent kinetic energy k และ turbulent kinetic energy dissipation rate ε ตามสมมุติฐานของ Boussinesq ดังนี้

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho k) + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

เมื่อ $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ คือ turbulent eddy viscosity ส่วนสมการของ k และสมการของ ε เขียนได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (8)$$

เทอม $\rho \varepsilon$ คือ destruction ของ turbulent kinetic energy generation rate (G) เมื่อ G มีนิยามเป็น

$$G = \mu_{eff} \left(\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (9)$$

ค่าคงที่สำหรับใช้ในสมการ ตลอดจนความหมายของสัญลักษณ์ได้แสดงไว้ในรายการสัญลักษณ์แล้ว

2.5 กระบวนการแก้ปัญหา

กระบวนการแก้ปัญหาจะเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนเทคนิค time-averaged กับสมการ Navier–Stokes, สมการ k และสมการ ε แล้วแก้ระบบสมการโดยวิธีปริมาตรสืบเนื่องควบคู่กับ turbulence model ทั้งนี้ทุกๆ สมการจะจัดให้อยู่ในรูปทั่วไปตามสมการ (5) ซึ่งจะมีการ discretise ทั้ง diffusion term และ convection term ลงบน staggered grid ด้วย FOU scheme แล้วใช้ SIMPLE algorithm แยกความสัมพันธ์กันของความเร็วกับความดัน การแก้ระบบสมการจะอาศัยการทำซ้ำที่เรียกว่า TDMA แบบ line-by-line สุดท้ายจะได้การกระจายตัวของความเร็วและความดันทั่วทั้งโดเมนการไหล

2.6 เงื่อนไขที่ทางเข้า

บทความนี้ได้เสนอการกำหนดเงื่อนไขที่ทางเข้าเป็นความเร็ว 3 ลักษณะ คือ ความเร็วสม่ำเสมอ, ความเร็วตาม $1/7^{\text{th}}$ Power law และความเร็วตามผลการทดลองที่วัดจริง และได้มีการเพิ่มการกำหนดอิทธิ

พลของความเข้มข้นของความปั่นป่วน (turbulent intensity, I) กับความเร็วทั้ง 3 ลักษณะด้วย เมื่อ I มีนิยามตามสมการ (10)

- ความเร็วสม่ำเสมอ: profile ของความเร็วเป็นตามสมการ (11)
- ความเร็วตาม $1/7^{\text{th}}$ Power law: profile ของความเร็วเป็นตามสมการ (12)
- ความเร็วตามผลการทดลองที่วัดจริง: กรณีนี้ profile ของความเร็วจะได้จากการวัดจากการทดลองของ Nail [3]

$$I = \frac{u'}{U_{av}} \approx 0.16 \left(\text{Re}_{D_h} \right)^{-1/8} \quad (10)$$

$$u(r) = \left(\frac{\mu}{\rho D} \right) \text{Re}_{D_h} \quad (11)$$

$$u(r) = U_{\max} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{1/7} \quad (12)$$

รายการสัญลักษณ์

Variable, Constant			
B	orifice thickness	v	velocity in r direction
$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$	constant in ε equation, ($= 1.44, 1.92$)	x	axial co-ordinate
C_μ	constant in k equation, ($= 0.09$)	Greek symbol	
d	orifice diameter	β	ratio of pipe to orifice diameter, (d/D)
D	pipe diameter	δ_{ij}	Kronecker delta tensor
Err_{av}	average error	ε	turbulent kinetic energy dissipation
G	turbulent kinetic energy generation rate	θ	orifice bevel angle
k	turbulent kinetic energy	φ	generalized dependent variable
I	turbulent intensity	$\Gamma_{\varphi x}, \Gamma_{\varphi y}, \Gamma_{\varphi r}$	exchange coefficient for φ in x, y, r direction
ℓ_t	turbulent length scale	μ_ℓ, μ_t	laminar viscosity, Eddy viscosity
L	pipe length	μ_{eff}	effective viscosity, ($= \mu_\ell + \mu_t$)
p	pressure	ρ	density
r	radial co-ordinate	σ_k	turbulent Prandtl number for k , ($= 1.0$)
R	pipe radius	σ_ε	turbulent Prandtl number for ε , ($= 1.3$)
Re_{D_h}	Reynolds number based on hydraulic diameter D_h	τ_{ij}	Reynolds stress tensor
S	general source term	Subscripts	
t_{ij}	viscous stress tensor	eff	effective
u'_i	fluctuating velocity in x_i direction	t	turbulent
u	velocity in x direction	i, j, k	Cartesian indices
$\bar{u}_{cal,i}$	simulation average velocity	up	upstream
$\bar{u}_{exp,i}$	experimental average velocity	dn	downstream
U_{av}	average velocity	Superscripts	
$U_{\max}$	maximum centerline velocity	$'$	fluctuating part properties
		$—$	mean part properties, mean value

2.7 เงื่อนไขที่ผนัง, ทางออก และแกนสมมาตร

เงื่อนไขที่ผนังจะกำหนดให้มีความเร็วเป็นศูนย์ และบริเวณใกล้ผนังจะใช้กฎของผนัง (law of the wall) เพื่อให้การทำนายแม่นยำขึ้น อย่างไรก็ตามในที่นี้จะสนใจการกระจายตัวของความเร็ว และความดันในบริเวณที่ห่างจากผนัง ซึ่งจะไม่ได้รับอิทธิพลของความหนืดในชั้นขีดผิว (boundary layer) สำหรับเงื่อนไขที่ทางออกนั้นจะกำหนดให้ความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ เงื่อนไข แกนสมมาตร คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของการไหลเทียบกับแกนที่ตั้งฉากกับแกนสมมาตรเป็นศูนย์ เมื่อกำหนดให้เส้นแกนสมมาตรคือเส้นแกนท่อ (pipe line) นั้นเอง

2.8 ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดการทำนาย

ค่าเฉลี่ยของความเร็ว $\bar{u}_{cal,i}$ และ $\bar{u}_{exp,i}$ จะมีความสัมพันธ์ตาม (13) และ (14) ตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดการทำนาย (Err_{av}) และความผิดพลาดสูงสุด (Err_{max}) คำนวณจากสมการ (15) และ (16) ดังนี้

$$\bar{u}_{cal,i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{cal}} (u_{cal,i})^2}{N_{cal}}} \quad ; N_{cal} = 60 \quad (13)$$

$$\bar{u}_{exp,i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{exp}} (u_{exp,i})^2}{N_{exp}}} \quad ; N_{exp} = 20 \quad (14)$$

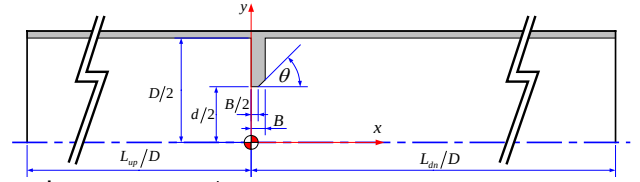
$$Err_{av} = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{\bar{u}_{exp,i} - \bar{u}_{cal,i}}{\bar{u}_{exp,i}} \right|}{N} \times 100 \quad ; N = 1, 2, \dots, 6 \quad (15)$$

$$Err_{max} = \max(Err_i) \quad ; i = 1, 2, \dots, 6 \quad (16)$$

โดยที่ N คือ จำนวนตำแหน่งที่มีการวัดความเร็วด้านหลังออริฟิส ส่วน N_{cal} และ N_{exp} คือ จำนวนจุดในแนวรัศมีที่ใช้ในการจำลอง และจำนวนจุดในแนวรัศมีที่มีการวัด ซึ่งเท่ากับ 60 และ 20 ตามลำดับ

3. คุณสมบัติของอากาศและโดเมนการไหล

บทความนี้จะพิจารณาการไหลของอากาศผ่านออริฟิสที่มี β ซึ่งเป็นอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิสต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเป็น 0.75 โดยใช้อากาศที่อุณหภูมิ 300 K ซึ่งมี μ เท่ากับ 1.845×10^{-5} Pa·s และไหลที่อัตรา 4.03×10^{-2} kg/s และ Re_{D_h} เท่ากับ 54700 สำหรับโดเมนการไหลที่พิจารณาได้แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดตามตารางที่ 1



รูปที่ 1 โดเมนการไหลที่พิจารณา

ตารางที่ 1 ข้อมูลของโดเมนการไหล

Parameter	Value	Units
D	0.0508	m
d	0.0381	m
B	0.0032	m
θ	45.0	°
L_{up}/D	1.5	—
L_{dn}/D	8.0	—

4. ผลการจำลองและการวิจารณ์

ผลการจำลองที่ได้จะเป็นการเปรียบเทียบ u/U_{max} ที่ตำแหน่งต่างๆ หลังจากไหลผ่านออริฟิสแล้ว (downstream location) ซึ่งได้แก่ x/R เท่ากับ 0.25, 0.50, 1.0, 2.0, 4.0 และ 8.0 ตามลำดับแล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Nail ซึ่งวัดด้วย 3D-LDV (Laser Doppler Velocimeter) จากนั้นจะแสดง stream function contour และ Vector plot โดยผลการจำลองจะแยกเป็นกรณีดังนี้

รูปที่ 2 ได้แสดงอิทธิพลของการกำหนดความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบต่างๆ ดังได้กล่าวแล้ว พบว่าโดยรวมแล้วผลการทำนาย u/U_{max} ของการกำหนดความเร็วที่ทั้งสามแบบนี้จะให้แนวโน้มค่อนข้างเหมือนกัน และสอดคล้องกับค่าการทดลองเป็นอย่างดีเมื่อ x/R ไม่เกิน 1.0 ส่วนที่ตำแหน่ง $2.0 \leq x/R \leq 8.0$ การทำนายจะผิดพลาดมากขึ้นเล็กน้อย อันเนื่องมาจากบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีการหมุนวนสูงนั่นเอง และที่ตำแหน่งนี้เองมีข้อสังเกตอีกคือ หากกำหนดความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบสมมาตรจะให้ผลการทำนายแบบ under prediction เล็กน้อย ในขณะที่ถ้าเป็นความเร็วตาม $1/r^{1/2}$ Power law และความเร็วจากผลการทดลองจะให้ผลการทำนายแบบ over prediction เล็กน้อยเมื่อ r/R ไม่เกิน 0.5 แต่หากพิจารณาที่ r/R มากกว่า 0.5 แล้ว การกำหนดความเร็วทั้งสามแบบจะให้ผลการทำนายแบบ under prediction เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความผิดพลาด Err_{av} และแสดงข้อมูลเชิงตัวเลขสำหรับการทำนายการไหลในแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในผลดังตารางที่ 2 แยกตามแต่ละกรณี

การคำนวณค่าความผิดพลาดสะสม (cumulative error) จะใช้สมการ (15) ซึ่งจากตารางที่ 2 จะสังเกตว่าความผิดพลาดสะสมใน 3 ตำแหน่งแรกด้าน downstream มีค่ายังไม่สูงนัก และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นไปอีก 2 ตำแหน่งถัดมา ซึ่งบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีการหมุนวนค่อนข้างสูง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า velocity gradient สูงนั่นเอง ส่วนที่ตำแหน่งสุดท้ายซึ่งเป็นตำแหน่งที่เข้าสู่ downstream fully developed แล้วทำให้ผลการจำลองมีความถูกต้อง สอดคล้องกับค่าการทดลองของ Nail จึงมีค่าความผิดพลาดสะสมน้อยลง

รูปที่ 3 เป็นการกำหนดอิทธิพลของความเข้มข้นของความปั่นป่วนให้กับความเร็วที่ทางเข้าทั้งสามแบบข้างต้น ผลการจำลองที่ได้คือลักษณะของ velocity profile คล้ายคลึงมากกับกรณีที่ไม่มีกำหนดอิทธิพลของความเข้มข้นของความปั่นป่วน (รูปที่ 2) แต่เส้นกราฟของทั้งสามกรณีจะค่อนข้างที่จะทับมากกว่าและสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับค่าการทดลอง และที่ตำแหน่ง x/R เท่ากับ 2.0 และ r/R มากกว่า 0.5 ก็ยังเป็นตำแหน่งที่มีความผิดพลาดของการทำนายสูงสุดเช่นเดียวกับรูปที่ 2 และที่ตำแหน่ง x/R เท่ากับ 8.0 จะสังเกตความผิดพลาดของการทำนาย velocity profile ของการกำหนดความเร็วทั้งสามแบบนี้

รูปที่ 4(ก) เป็น Vector plot เมื่อกำหนดความเร็วเป็นแบบสม่ำเสมอจะสังเกตการหมุนวนของความเร็วได้บริเวณกว้างด้าน downstream ที่ตำแหน่ง x/R ประมาณ 2.0 ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการทำนาย u/U_{max} ในรูปที่ 2 และ 3 เมื่อเลยจุดนี้ไปจะพบว่า velocity profile จะค่อยๆ ปรับตัวเข้าสู่ downstream fully developed อีกครั้งหนึ่ง จากรูปที่ 4(ก) นี้จะสังเกตเห็นตำแหน่งของ reattachment

ได้ชัดเจนที่ x/R ประมาณ 2.5 ส่วนรูปที่ 4(ข) เป็นการแสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของความปั่นป่วนซึ่งจะสังเกตว่า velocity profile มีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมโดยที่ขนาดของความเร็วจะปรับตัวเข้าสู่ downstream fully developed ช้ากว่าและตำแหน่งของ reattachment เปลี่ยนมาอยู่ที่ x/R ประมาณ 3.1

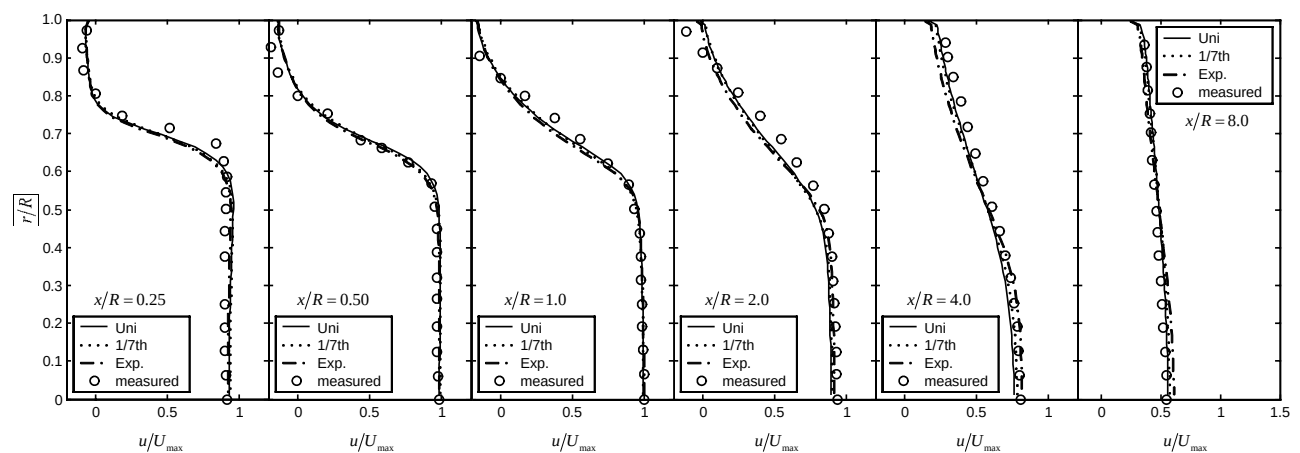
รูปที่ 5 แสดง stream function contour เมื่อเปรียบเทียบกันจะสังเกตว่าอิทธิพลของการกำหนดความเข้มข้นของความปั่นป่วนให้กับความเร็วที่ทางเข้า (รูปที่ 5(ข)) นั้นจะทำให้สังเกตการหมุนวนด้าน downstream ได้ชัดเจนและเกินเป็นบริเวณกว้างกว่ากรณีที่ความเร็วไม่ได้กำหนดอิทธิพลของความเข้มข้นของความปั่นป่วนไว้ (รูปที่ 5 (ก))

เมื่อเป็นกรณีของความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบ $1/7^{th}$ Power law และความเร็วจากการทดลองจะให้ผลการทำนายใกล้เคียงกันมากกับรูปที่ 4 และรูปที่ 5 สำหรับ Vector plot และ stream function contour ตามลำดับ ดังนั้นจึงไม่ได้แสดงรูปไว้ในที่นี้

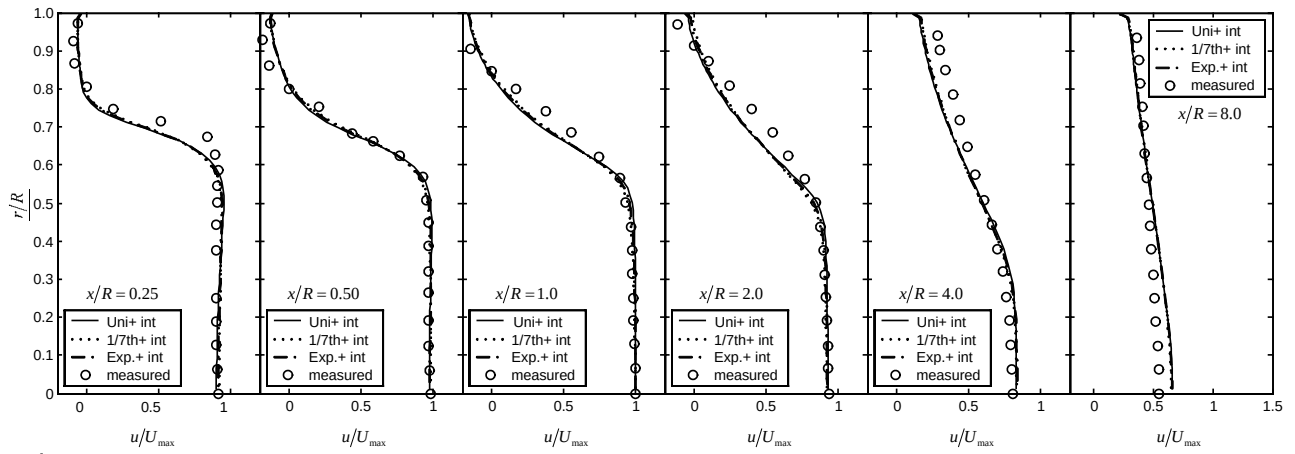
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบข้อมูลเชิงตัวเลขในแต่ละกรณี

Inlet velocity profile	$\dot{m}, (\text{kg/m}^3)$	Iter.	Cumulative of Err_{av} at $x/R, (\%)$						$Err_{av}, (\%)$	$* Err_{max}, (\%)$
			0.25	0.50	1.0	2.0	4.0	8.0		
Uniform profile	4.03×10^{-2}	1800	9.7	9.4	10.6	12.4	13.4	11.6	11.6	17.9
$1/7^{th}$ Power law profile	4.03×10^{-2}	2000	9.8	9.6	10.9	12.6	13.4	11.5	11.5	17.8
Experimental profile	5.02×10^{-2}	1500	11.4	11.0	11.9	13.1	13.6	11.7	11.7	16.7
Uniform profile + Turb. Int.	4.03×10^{-2}	1850	11.8	11.2	11.8	12.6	12.8	10.9	10.9	14.9
$1/7^{th}$ Power law profile + Turb. Int.	4.03×10^{-2}	1800	11.7	11.4	12.3	13.3	13.5	11.4	11.4	16.4
Experimental profile + Turb. Int.	5.02×10^{-2}	1480	11.7	11.3	12.0	12.9	13.2	11.1	11.1	15.7

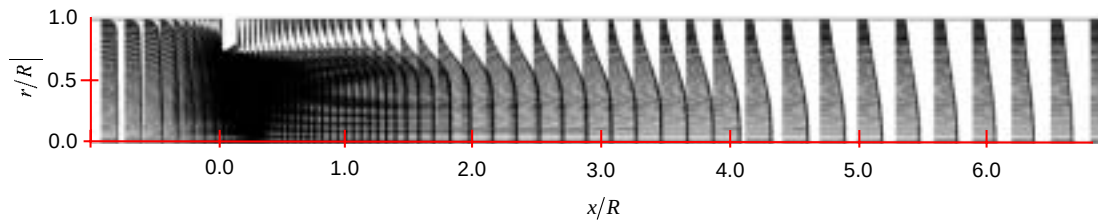
* ตำแหน่งที่เกิด Err_{max} ของทุกกรณีเกิดที่ $x/R = 2.0$



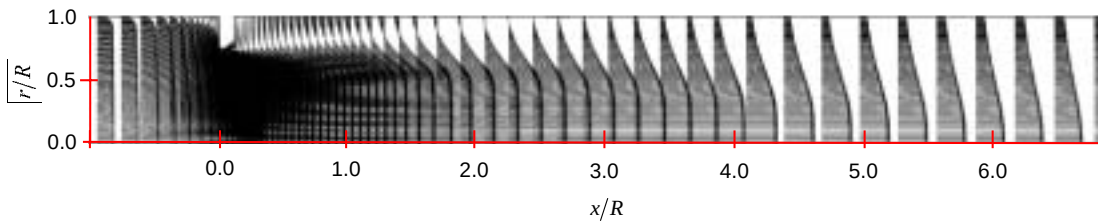
รูปที่ 2 เปรียบเทียบผลการทำนาย u/U_{max} ที่ x/R ค่าต่างๆ เมื่อมีการกำหนดความเร็วที่ทางเข้าเป็นความเร็วสม่ำเสมอ, ความเร็วตาม $1/7^{th}$ Power law และความเร็วตามผลการทดลองที่วัดจริง



รูปที่ 3 เปรียบเทียบผลการทำนาย $u/U_{\max}$ ที่ x/R ค่าต่างๆ เมื่อมีการกำหนดความเร็วที่ทางเข้าเป็นความเร็วสม่ำเสมอ+ turbulent intensity, ความเร็วตาม $1/7^{\text{th}}$ Power law+ turbulent intensity และความเร็วตามผลการทดลองที่วัดจริง+ turbulent intensity

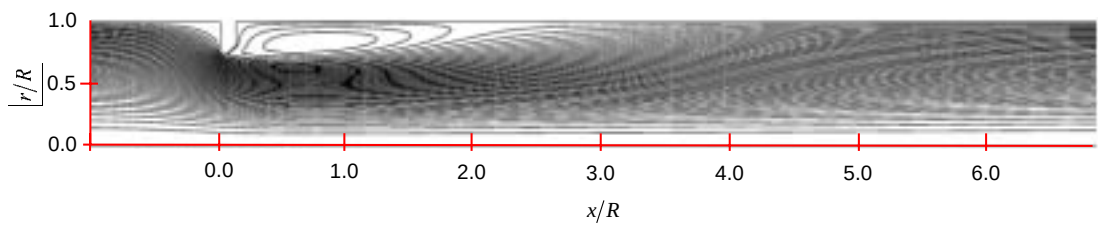


(ก) Uniform profile

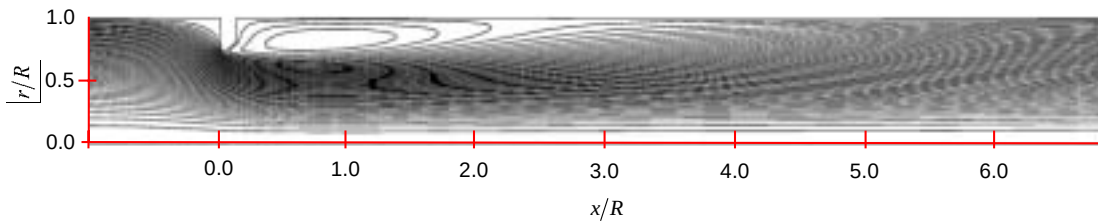


(ข) Uniform profile + Turbulent intensity

รูปที่ 4 Vector plot ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model



(ก) Uniform profile



(ข) Uniform profile + Turbulent intensity

รูปที่ 5 Stream function contour plot ทำนายโดย $k-\varepsilon$ model

5. สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการจำลองที่ได้สามารถสรุปเป็นข้อสังเกตได้ดังนี้

1. การกำหนดความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบสม่ำเสมอ และแบบ $1/7^{\text{th}}$ Power law profile จะให้ผลการทำนาย u/U_{max} ใกล้เคียงกัน ส่วนการกำหนดความเร็วแบบตามผลการทดลองที่วัดได้จริงนั้นจะให้ค่าความผิดพลาดที่สูงกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจาก numerical error ทำให้ค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงกว่าสองกรณีแรก ดังนั้นหากต้องการที่จะทราบผลการทำนายที่แท้จริงควรต้องกำหนดค่าของลักษณะ profile เพื่อให้มีค่าอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากัน
2. ค่า Err_{max} จะเกิดที่ตำแหน่งที่มีการหมุนวนสูง ในที่นี้ คือ ที่ตำแหน่ง x/R เท่ากับ 2.0 และจากรูปที่ 4 และ 5 จะพบว่าตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่ใกล้กับ reattachment point ดังนั้น velocity gradient จึงสูงกว่าบริเวณอื่นๆ ดังนั้นควรจะมีการแบ่งกริดบริเวณนี้ให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้การแบ่งกริดดังกล่าวต้องคำนึงถึงขนาดของกริดที่จะทำให้ปริมาตรควบคุมที่อยู่ติดๆ กันมีขนาดใกล้เคียงกัน เพื่อให้เกิดความต่อเนื่อง และลดปัญหาอันเนื่องมาจากการลู่ออกจากคำตอบที่ควรจะเป็น
3. จากตารางที่ 2 พบว่าค่าความเข้มข้นของความปั่นป่วนนั้นมีผลทำให้การทำนายดีขึ้นเล็กน้อยสำหรับกรณีความเร็วสม่ำเสมอและความเร็วตามผลการทดลองที่วัดได้จริง แต่แทบไม่ได้มีผลต่อการกำหนดความเร็วแบบ $1/7^{\text{th}}$ Power law profile
4. ข้อดีของการกำหนดค่าความเข้มข้นของความปั่นป่วน คือ การประหยัดเวลาในการคำนวณ ซึ่งสังเกตได้จากตารางที่ 2 สำหรับการกำหนดความเร็วทั้งแบบ $1/7^{\text{th}}$ Power law profile และแบบตามผลการทดลองที่วัดได้จริงจำนวนรอบของการคำนวณจนลู่เข้านั้นลดลง แต่กลับเพิ่มขึ้นเมื่อมีการกำหนดความเร็วแบบสม่ำเสมอ ดังนั้นสำหรับกรณีที่ต้องการให้ได้ผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่รวดเร็วขึ้น ควรมีการกำหนดอิทธิพลของความเข้มข้นของความปั่นป่วนให้กับความเร็วที่ทางเข้าด้วย
5. ตำแหน่งด้าน upstream ในที่นี้กำหนดให้มีเพียง x/R เท่ากับ -3.0 เท่านั้น งานวิจัยที่ควรจะทำต่อ คือ ศึกษาถึงผลกระทบของตำแหน่งด้าน upstream ที่เหมาะสมเมื่อมีการกำหนดค่าความเข้มข้นของความปั่นป่วนให้กับความเร็วที่ทางเข้า เพื่อจะได้ทราบว่าความผิดพลาดของผลการทำนายนั้นได้รับผลกระทบมาจากตำแหน่งด้าน upstream ที่ไม่เหมาะสมหรือเป็นผลโดยตรงจากค่าความเข้มข้นของความปั่นป่วนเป็นต้น
6. โดยภาพรวมแล้วถือว่าการกำหนดความเร็วทั้งสามลักษณะให้ผลการทำนายที่แม่นยำใกล้เคียงกัน หากขาดข้อมูลของเงื่อนไขที่ทางเข้าแล้วควรเลือกกำหนดความเร็วแบบ $1/7^{\text{th}}$ Power law profile โดยที่ไม่ต้องมีการกำหนดอิทธิพลของความเข้มข้นของความปั่นป่วน ก่อนที่จะเลือกกำหนดความเร็วแบบสม่ำเสมอ แต่ถ้าต้องการให้สะดวกต่อการกำหนดขนาดของ velocity profile ก็ควรเลือกแบบความเร็วสม่ำเสมอเป็นเงื่อนไข

ไขที่ทางเข้าแต่ควรที่จะกำหนดอิทธิพลของความเข้มข้นของความปั่นป่วนไว้ด้วย ซึ่งกรณีนี้จะให้ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดลดลง แต่มีข้อเสีย คือ จำนวนการทำซ้ำ (iteration) นั้นจะมากขึ้น นั่นคือ การเสียเวลาเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีที่เป็นการวัดได้จริงจากผลการทดลองนั้นก็ควรกำหนดอิทธิพลของความเข้มข้นของความปั่นป่วนไว้ด้วยเช่นเดียวกันเพื่อให้ผลการทำนายที่แม่นยำขึ้น แต่อาจจะยังเปรียบเทียบผลการทำนายกับการกำหนดความเร็วแบบสม่ำเสมอ หรือแบบ $1/7^{\text{th}}$ Power law profile ไม่ได้เนื่องจาก อัตราการไหลเชิงมวลสูงกว่าเล็กน้อยดังได้กล่าวแล้ว ดังนั้นจึงเป็นข้อเตือนใจอย่างหนึ่งถึงอิทธิพลของ numerical error ที่อาจเกิดขึ้นทำให้ค่าอัตราการไหลเชิงมวลไม่เป็นไปอย่างที่ควรจะเป็น

7. การกำหนดอิทธิพลของความเข้มข้นของความปั่นป่วนนั้นได้ช่วยให้ผลการทำนายดีขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ข้อดีคือได้ช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณสำหรับกรณีที่กำหนดความเร็วแบบ $1/7^{\text{th}}$ Power law profile และความเร็วตามผลการทดลองที่วัดได้จริง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนแก่งานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wilcox, D. C., Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc., La Canada, California, 1998.
- [2] Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., "An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method," 1st ed., Longman Scientific & Technical, Malaysia, 1995.
- [3] Nail, G. H., "A Study of 3 – Dimensional Flow Through Orifice Meters," Ph.D. Thesis, Texas A&M University, May, 1991.
- [4] Schlichting, H., "Boundary – layer theory," 7th ed. McGraw – Hill, New York, USA, 1979.
- [5] Launder, B. E. and Spalding, D. B., Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England, 1972.
- [6] Boussinesq, J., "Théorie de l'écoulement tourbillant," [Theory of Turbulent Flow] [Memories presents par diverse savants à l'academie des sciences de l'institut de France] Vol. 23, p. 46 (1877).
- [7] Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemisphere, Washington, D.C., 1980.
- [8] Fox, R. W. and McDonald, A. T., "Introduction to Fluid Mechanics," 5th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1998.

- [9] White, F. M., "Viscous fluid flow," 2nd ed., McGraw – Hill, Singapore, 1991.
- [10] Schetz, J. A. "Boundary Layer Analysis," Prentice-Hall, Inc. A Simon & Schuster Company, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1993.
- [11] Bate, C. J., "Laser Doppler Anemometry Measurement of the Flow through an Orifice Plate," Proc. Second Symp. On Flow: Its Measurement and Control in Science and Industry, St. Louis, March 23-26, 1981.
- [12] Shen, X., Yan., Y., Gao, J. and Ding, Z., "Turbulent Velocity Measurement in Orifice Pipe Flow with an Improved On-Axis 2-D LDV System," Fourth International Symposium on Application of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July 11-14, 1988.