

การทำนายลักษณะเฉพาะการไหลแบบปั่นป่วนของเจ็ตพุ่งชนแบบหลายช่อง
โดยใช้หัวฉีดกลม

PREDICTION OF TURBULENT FLOW CHARACTERISTICS OF
THE MULTI-CHANNEL IMPINGING JETS USING CIRCULAR NOZZLES

เมืองแก้ว ยุตัน

อาจารย์, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี
248 ซอยเพชรเกษม 110 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160,
ting_yutan@yahoo.com

Muangkaew Yutan

Lecturer, Division of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University,
248 Soi Petkasem 110 Khet Nong Khaem, Bangkok 10160, Thailand,
ting_yutan@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการทำนายการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) ที่มีการฉีดของไหลของเจ็ตพุ่งชนที่อัดตัวไม่ได้เข้ากระทบบนพื้นที่จำกัด (confined impinging jet) โดยนำวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume) ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน standard $k-\epsilon$ model และ reynolds stress model (RSM) ในการวิเคราะห์ เป็นปัญหา 2 มิติแบบสมมาตร โดยมีการคำนวณใช้โปรแกรม computational fluid dynamics (CFD) ansys fluent 2024 r1 โดยใช้รูปแบบผลต่างอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งมาคำนวณ คือ first order upwind (FOU) scheme เพื่อศึกษาผลลัพธ์การทำนายลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกน เส้นทางการไหล ลักษณะเวกเตอร์ความเร็ว และทิศทางการหมุนของช่องการไหล 2 แบบที่ขนาดหัวฉีด $d = 10$ และ 13.3 มม แล้วถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองที่มีอยู่แล้วซึ่งวัดโดย วิธี hot-wire anemometer ผลจากการทำนายและวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ที่ขนาดหัวฉีด $d = 10$ มม แบบ standard $k-\epsilon$ model ทำนายได้เฉลี่ย 89.67% ส่วน RSM 87.43% และขนาดหัวฉีด $d = 13.3$ มม ได้เฉลี่ย 93.97% ส่วน RSM 91.31% เมื่อเทียบกับผลการทดลอง แสดงว่า standard $k-\epsilon$ model มีความสอดคล้องแม่นยำได้ใกล้เคียงดีกว่า RSM บนความเร็วตามแนวแกน

คำสำคัญ: เจ็ตพุ่งชน พลศาสตร์การคำนวณเชิงตัวเลข แบบจำลองความปั่นป่วน มาตรฐาน $k-\epsilon$ โมเดล RSM โมเดล

ABSTRACT

This paper presents the prediction of a mathematical model for the simulations of turbulent flow in steady incompressible flow of confined multiple impinging jets. A finite volume method with standard $k-\varepsilon$ turbulence model including a Reynolds stress model (RSM) is used in predicting the impinging jet flows together with a first order upwind (FOU) Scheme. 2D axisymmetric to numerical schemes on the prediction by the computational fluid dynamics (CFD) program ANSYS FLUENT 2024 R1, to study the predicted results of the characteristics of axial velocity, velocity path way, vector velocity profiles and direction of rotation of the flow channel in 2 types at nozzle sizes $d = 10$ and 13.3 mm. are compared with hot-wire anemometer experimental data. The computations and analysis results show that at nozzle size $d = 10$ mm, the standard $k-\varepsilon$ model predicts an average of 89.67 %, while the RSM 87.43%, and at nozzle size $d = 13.3$ mm, the average is 93.97 %, while the RSM 91.31 %. When compared with the measurement results, it shows that the standard $k-\varepsilon$ model performs close better accuracy than the RSM on axial velocity.

KEYWORDS: impinging jets, computational fluid dynamics, turbulence model, standard $k-\varepsilon$ model, RSM model.

1. บทนำ

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยการใช้เจ็ตพุ่งชนและทำให้เกิดการไหลหมุนวนหรือสร้างความปั่นป่วนของการไหล โดยใช้กลุ่มของอากาศไหลปะทะผนังด้านใน ให้การถ่ายเทความร้อนที่สูง เพื่อระบายความร้อนในระบบการทำงาน ถูกนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านวิศวกรรม เช่น แผงระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การอบแห้งสิ่งทอและพื้นผิวที่เปียกอื่น ๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อน Lee et al [1, 2] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลที่มองเห็นแบบพื้นที่จำกัด ของการพุ่งชนเป็นกลุ่มแบบราบเรียบในระดับขนาดสเกลมิลลิเมตร มีการการตรวจสอบขณะที่พุ่งชนกับผนังที่มีอุณหภูมิคงที่เป็นวิธีเชิงทดลองและเชิงตัวเลขของลักษณะการไหลที่แตกต่างกัน Nuntadusit et al [3] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยกลุ่มเจ็ตหมุนควงพุ่งชนโดยการใส่แผ่นบิตที่อัตราส่วน 3×3 ที่อัตราการบิต y/W ระยะห่างระหว่างปากท่อเจ็ตถึงผนังพุ่งชน L/D ที่ค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 20,000 ระยะห่างระหว่างท่อเจ็ตกับท่อเจ็ต S/D เท่ากับ 2, 4, 6 และ 8 ผลของระยะห่างของท่อเจ็ตกับท่อเจ็ต S/D เท่ากับ 4 จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด Caggese et al [4] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนสำหรับการพุ่งชนผนังแบบพื้นที่จำกัด โดยจำลอง การทดสอบประกอบด้วยการกำหนด

ช่องแคบรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสของ $X/D = Y/D = 5$ ซึ่งทดสอบที่ระยะห่างระหว่างช่องแคบที่แตกต่างกันสามแบบ ($Z/D = 0.5, 1$ และ 1.5) ได้รับการกระจายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั่วพื้นผิวสำหรับแผ่นที่ถูกพองขึ้นด้วยวิธีแบบจำลอง CFD โดยใช้เทคนิคผลึกเหลวชั่วคราว Yousefi-Lafouraki et al [5] ศึกษาวิธีเชิงตัวเลขของการสร้างเอนโทรปีเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานของไหลดำเนินการบนเจ็ตพองขึ้นแบบพื้นที่จำกัด ผลการวิจัยพบว่าการสร้างเอนโทรปีส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่ที่พื้นผิวการพองขึ้นปะทะ การสร้างเอนโทรปีทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตามเศษส่วนของปริมาตรที่เพิ่มขึ้นและมุมที่มาบรรจบกัน Alabdaly and Ahmed [6] ศึกษาวิธีเชิงตัวเลขการถ่ายเทความร้อนแบบการพาโดยไหลแบบลามินาร์ของกลุ่มเจ็ตที่พองขึ้นปะทะที่พื้นที่จำกัดด้วยนาโนฟลูอิดได้รับการตรวจสอบเชิงตัวเลขตลอดในช่วงของเลขเรย์โนลด์ที่ 200-1,000 มีช่วงกลมสองซึ่งถูกติดตั้งบนพื้นผิวเป้าหมายด้านล่าง ซึ่งหนึ่งตั้งอยู่ตรงจุดหยุดนิ่ง (stagnation point) ด้านขวาและอีกซึ่งหนึ่งตั้งอยู่ตรงจุดหยุดนิ่งทางด้านซ้าย ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่าเลข nusselt เฉลี่ย ส่งผลต่อด้านประสิทธิภาพ การสร้างเอนโทรปีและตลอดถึงแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นตามเศษส่วนปริมาตรอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้น Kempers et al [7] ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะการทดลองของไมโครเจ็ตแบบไฮบริดที่กระทบกับฮีตซิงก์ไมโครแซนแนลที่ผลิตขึ้นโดยใช้สารเติมแต่งโลหะปริมาณมากในการผลิต การศึกษานี้ได้มีการสร้างและทดสอบฮีตซิงก์ต้นแบบที่อัตราการไหลความร้อนสูงเกินถึง $1,000 \text{ W/cm}^2$ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันระหว่างการทำนายเชิงตัวเลขและผลการทดลอง เมื่อพิจารณาจากสมรรถนะเชิงความร้อนไฮดรอลิก โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถมีค่าการนำความร้อนโดยรวมได้ประมาณ $330 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$ มีแรงดันตก 160 kPa ที่อัตราการไหล 0.5 L/min สำหรับน้ำเข้าที่ 20°C และฮีตซิงก์ไมโครเจ็ตแบบไฮบริดยังแสดงอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพได้ถึง 6 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแลกเปลี่ยนความร้อนไมโครแซนแนลที่มีการออกแบบที่สมดุล Diop et al [8] ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยเจ็ตพองขึ้นในปริมาณหมอกเพียงไม่กี่หยด เพื่อใช้การทำความเย็นและการทำให้แห้ง ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มีการวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ มากมายที่มีผลต่อความร้อนและความเข้มข้นของมวลที่รูปแบบต่าง ๆ เช่น $X/D = 4, 7, 9$ ที่ความเร็ว 15 m/s ผลการทดลองบ่งชี้ว่าอัตราค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น 21% และ 32% ในกรณีของ $M = 3 \text{ mg/s}$ และ 6 mg/s ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมหมอก Selimefendigil et al [9] ศึกษาการระบายความร้อนด้วยเจ็ตพองขึ้นของนาโนเจ็ตหลายช่องของพื้นผิวร้อนรูปไซน์โดยใช้กระบอกสูบหมุนที่ทำงานภายใต้สนามแม่เหล็ก กระบอกสูบหมุนคู่ที่ให้การทำความเย็นเพิ่มเติมจะถูกนำมาใช้ในขณะที่ใช้วิธีไฟน์ดเอนเมนต์ที่เลือกที่มีน้ำหนักของ Galerkin เพื่อแก้สมการควบคุม ผลกระทบของ Re (Re ของการหมุน ระหว่าง -1000 ถึง 1000), Ha (ความแรงของ MG-F ระหว่าง 0 ถึง 30), ความเอียงของ MG-F (ระหว่าง 0 ถึง 90) และอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่เย็นลงของกระบอกสูบที่ทำงาน (dT ระหว่าง 0 ถึง 10) ต่อประสิทธิภาพการทำความเย็น ผลกระทบของการทำความเย็น

ต่ำกว่าปกติจะมีประสิทธิภาพมากเมื่อการหมุนทำงานในขณะที่ Nu เพิ่มขึ้นถึง 37.9% ที่ $Rew = -1000$ เมื่อไม่มีกระบอกสูบการใช้ MG-F จะลดค่าเฉลี่ย Nu ลงประมาณ 15.4% กรณีประสิทธิภาพการทำความเย็นที่ดีที่สุดในกรณีที่ไม่มี MG-F กับกระบอกสูบจะได้ที่ $Rew = -1000$ และ $dT = 10$ Ajeel et al [10] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการลดลงของความดันในเจ็ตที่พุ่งชนหลายตัวโดยใช้ของไหลนาโนไฮบริดที่เป็นนวัตกรรมใหม่โดยพิจารณาใช้การพุ่งชนแนวเฉียงในโครงสร้างเจ็ตพุ่งชนหลายลำด้วย Al_2O_3-Cu น้ำ ใช้เป็นของไหลทำงาน ที่มีเศษส่วนปริมาตรต่างกัน เช่น 0.1%, 0.33%, 0.75% และ 1.0% มีค่าเรย์โนลด์สของเจ็ตแตกต่างกันไปตั้งแต่ 8,000 ถึง 24,000 และมีมุมเจ็ต 5 แบบ ($\beta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) และความสูงของเจ็ตที่ขยายออกมี 3 แบบ $E_j = 0.2H, 0.4H$ และ $0.6H$ ถูกนำมาใช้ ส่งผลให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันลดลงของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การถ่ายเทความร้อนที่มีการศึกษาทั้งแบบวิธีเชิงตัวเลขและทดลอง โดยการใช้หัวฉีดที่เป็นแบบกลุ่มเจ็ตหรือเจ็ตเดี่ยวพุ่งชนผนังแบบพื้นที่จำกัด มีลักษณะรูปแบบและทิศทางมุมและชนิดของของไหลการฉีดแตกต่างกัน ที่จะให้สมรรถนะเชิงความร้อนมากขึ้นและสิ่งที่มีผลต่อความถูกต้องของผลการศึกษา จะขึ้นอยู่กับชนิดของแบบจำลองความปั่นป่วน (turbulence models) โดยแบบจำลองความปั่นป่วนในปัจจุบันมีหลายแบบ เช่น $(k-\varepsilon)$ Spalart and Allmaras $(k-\omega)$ reynolds stress models (SST $k-\omega$) (RNG $k-\varepsilon$) และ large eddy simulation (LED) มีอธิบายในเอกสาร [11] เป็นต้น แบบจำลองความปั่นป่วนที่เป็นที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันคือ $k-\varepsilon$ ซึ่งให้ค่าความถูกต้องผลในการคำนวณเป็นที่น่าพอใจ ใช้ระยะเวลาในการคำนวณไม่มาก และง่ายกว่าในการตั้งค่าและใช้คำนวณไม่ซับซ้อนใช้งานการไหลทั่วไป ส่วนแบบจำลอง (SST $k-\omega$) ได้ถูกปรับปรุงและพัฒนาขึ้นมาใหม่ด้วยการผสมผสานข้อดีระหว่าง $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ และส่วนแบบจำลอง reynolds stress model (RSM) ใช้งานการไหลซับซ้อน มีการหมุน การไหลหลายแกน และมีความแม่นยำสูง

จากหลักการดังกล่าวในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะทำการประเมินผลของแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ ในลักษณะของผลการศึกษาต่าง ๆ เทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM เพื่อค้นหาหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ที่มีความซับซ้อนมากกว่าต่อผลการทดลองจริง ดังนั้นจึงได้นำเสนอการคำนวณเชิงตัวเลขศึกษาพฤติกรรมลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนถึงผลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดต่างกัน (d) สัดส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีด (S/d) และสัดส่วนระยะห่างระหว่างปากทางออกของหัวฉีดเจ็ตถึงผนังที่เจ็ตพุ่งชน (H/d) ของพื้นที่จำกัดที่จะให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ว่ามีผลต่อการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 2 model คือ standard $k-\varepsilon$ model และ RSM ที่จะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนอย่างไร นำมาใช้ในการศึกษา

ตัวแปรต่าง ๆ ภายในขอบเขตที่กำหนดผ่านโปรแกรม [11] โดยอาศัยการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบสองมิติ ผลการคำนวณที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ตารางที่ 1 รายการสัญลักษณ์

XD ตำแหน่งใด ๆ ที่ระยะห่างระหว่างปากทางออกของเจ็ตถึงผนังที่เจ็ตพุ่งชนต่อขนาดเส้นศูนย์กลางของเจ็ต, x/d	v' fluctuating velocities in direction x, m/s $\overline{\rho u'_i u'_j}$ reynolds stresses
HD ระยะห่างระหว่างปากทางออกของเจ็ตถึงผนังที่เจ็ตพุ่งชนต่อขนาดเส้นศูนย์กลางของเจ็ต, H/d	u time-averaged velocity in r-direction, m/s v time-averaged velocity in x-direction, m/s
SH ระยะห่างระหว่างเจ็ตต่อระยะห่างระหว่างปากทางออกของเจ็ตถึงผนังที่เจ็ตพุ่งชน, S/H	t_{ij} viscous stress tensor x axial co-ordinate, m
SD ระยะห่างระหว่างเจ็ตต่อขนาดเส้นศูนย์กลางของเจ็ต, S/d	Greek Symbols δ_{ij} kronecker delta tensor ε dissipation Φ generalized dependent variable Γ_ϕ exchange coefficient μ, μ_t dynamic viscosity, eddy-viscosity, kg/s-m μ_e effective viscosity, ($= \mu_t + \mu$) ρ ความหนาแน่น, kg/m^3 σ_ϕ schmidt หรือ prandtl numbers ของค่า ϕ τ_{ij} reynolds stress tensor
H ระยะห่างระหว่างปากทางออกของเจ็ตถึงผนังที่เจ็ตพุ่งชน, m	
S ระยะห่างระหว่างเจ็ต, m	
d ขนาดเส้นศูนย์กลางของเจ็ต, (หัวฉีด), m	
$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ constants in the dissipation rate equation	
C_μ ค่าคงที่ใน $k-\varepsilon$ turbulence model	
G stress generation	
k turbulence kinetic energy	Subscripts e effective t turbulence i, j, k cartesian indices
ΔP_0 stagnation pressure relative to ambient, Pa	
P ความดันเฉลี่ย, Pa	
P_e Pelect number ($(\rho u \delta x / \Gamma_\phi)$)	Superscripts and Overbars $'$ fluctuating quantity in time-averaging $\overline{\quad}$ mean quantity
r radial co-ordinate, m	
Re_D reynolds number	
s general source term	
u' fluctuating velocities in direction r, m/s	

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ของการไหล

การคำนวณเชิงตัวเลขของการไหล มีสมมติฐานดังนี้ เป็นการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วน และอัดตัวไม่ได้, ไม่มีการถ่ายเทความร้อน, ไม่คิดผลของแรงโน้มถ่วง เป็นการไหลแบบมีความหนืด มีสมการที่ใช้คือสมการความต่อเนื่อง และสมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยเขียนสมการดังกล่าวอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยของเวลา (time-averaged) ซึ่งแสดงในรูปแบบ tensor ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

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

สมการนาเวียร์-สโตกส์

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

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

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

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

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} \quad (4)$$

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

ใน standard $k-\varepsilon$ model เทอม reynolds stresses จะถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ mean strain rate โดย eddy-viscosity ที่ซึ่งค่า eddy-viscosity จะกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับ turbulent kinetic energy (k) และ dissipation rate (ε) โดยใช้ Boussinesq's approximation [12,13] คือ

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

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

สมการของ turbulent kinetic energy (TKE) k จะอยู่ในรูป [12,13]

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

สมการ dissipation rate ของ turbulent kinetic energy [12,13] จะได้

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

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

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

ค่าขอบเขตสำหรับค่าต่างๆ ของ turbulent ที่ใกล้เคียงสามารถหาได้จาก wall function โดยมีค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับสมการต่างๆ ที่ผ่านมามีดังนี้คือ $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ และ $C_\mu = 0.09$ เป็นค่าคงที่ ซึ่งโดย $\mu_e = \mu_t + \mu$

2.2 Reynolds stress model (RSM)

จาก Reynolds-averaged transport equations สามารถแก้หาค่าสำหรับ τ_{ij} [12,13] แล้วจัดรูปของสมการต่าง ๆ ได้ใหม่เป็น

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

$$G_{ij} = \rho P_{ij} = - \left(\overline{\rho u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{\rho u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (10)$$

$$\Phi_{ij} = -C_1 \frac{\rho \varepsilon}{k} \left(\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - C_2 \left(G_{ij} - \frac{2}{3} G \delta_{ij} \right) \quad (11)$$

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\frac{\mu_e}{\sigma_T} \right) \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) \quad (12)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \rho \varepsilon \delta_{ij} \quad (13)$$

โดยที่ G_{ij} = local production, Φ_{ij} = local pressure strain, D_{ij} = net diffusive transport, ε_{ij} = local dissipation tensor โดย $C_1 = 2.5$, และ $C_2 = 0.55$ เป็นค่าคงที่ [12]

2.3 รูปแบบทั่วไปของสมการควบคุม

จากสมการเชิงอนุพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้นทุกสมการสามารถเขียนในรูปแบบมาตรฐานที่ประกอบด้วยเทอม convection, diffusion, และ source terms [14,15] สำหรับการไหลในสองมิติได้ดังต่อไปนี้

ค่าคงที่ใน turbulence model มีค่าดังนี้โดยที่ $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\mu_e = \mu_t + \mu$

$$G = \mu_e \left(2 \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 \right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{1}{r} (r \rho v \phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi x} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = S_\phi \quad (15)$$

โดยที่ ϕ เป็นค่าตัวแปรใด ๆ ตามสมการ $\Gamma_{\phi x}$ และ $\Gamma_{\phi r}$ จะเปลี่ยนแปลงตามค่า ϕ และ S_ϕ เป็น source term สำหรับรายละเอียดของค่า $\Gamma_{\phi x}$, $\Gamma_{\phi r}$ และ S_ϕ ที่ค่า ϕ ต่าง ๆ จะถูกแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสรุปของสมการควบคุม

Conservation of	ϕ	$\Gamma_{\phi x}$	$\Gamma_{\phi r}$	S_ϕ
Mass	1	0	0	0
R-momentum	u	μ_e	μ_e	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(p + \frac{2}{3} pk \right) - \frac{2\mu_e u}{r^2}$
	v	μ_e	μ_e	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(p + \frac{2}{3} pk \right)$
Turbulent kinetic energy	k	μ_e / σ_k	μ_e / σ_k	$G - \rho \varepsilon$
TKE dissipation Rate	ε	$\mu_e / \sigma_\varepsilon$	$\mu_e / \sigma_\varepsilon$	$(C_{\varepsilon 1} G) \frac{\varepsilon}{k} - (C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}$

2.4 Discretization ของสมการ

Discretization สมการข้างต้นได้โดยการอินทิเกรตสมการควบคุมตลอดทั้งปริมาตรควบคุม ที่มีการแบ่งออกเป็นกริด ทำให้ได้ระบบสมการอย่างง่ายดังต่อไปนี้

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + S \quad (16)$$

สมการที่ (11) นี้จะได้มาจากสมการ discretised diffusion term ของสมการควบคุม โดยใช้ central differencing scheme ของสมการควบคุมนั้นจะไม่สามารถ discretise ได้โดยตรงในการวิเคราะห์นี้ต้องอาศัย upwind scheme [15] เข้าช่วย

Upwind scheme เป็นการประมาณค่า convection flux ที่ผิวของปริมาตรควบคุมโดยการใช้ค่าที่ upstream สามารถเขียนเป็นรูปของสมการเชิงเส้นได้เป็น

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P & \rho u_e > 0 \\ \phi_E & \rho u_e < 0 \end{cases} \quad (17)$$

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

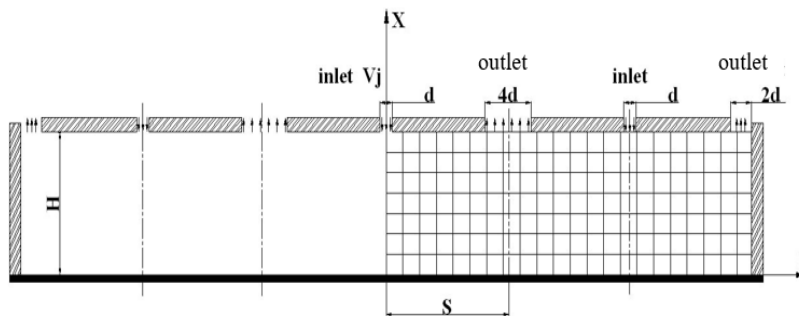
3.1 ลักษณะขอบเขตของการแก้ปัญหา

ปัญหาที่นำมาวิเคราะห์นี้ได้มาจากการทดลอง ซึ่งเป็นการทดลองโดยการฉีดของไหลจากหัวฉีดหลายช่องพุ่งชนของ Saad et al [16] หาค่าต่าง ๆ จากในรูปที่ 1 โดยของไหลที่ฉีดคืออากาศที่อุณหภูมิ 26 °C ความเร็วเฉลี่ยของการฉีด $V_j = 16.576$ m/s มีค่า $Re = 11,000$ $\rho = 1.225$

kg/m^3 และ $\mu = 1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$, ในการจำลองกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ต (d) = 10, 13.3 mm. ระยะห่างระหว่างเจ็ต (S) = 80, 79.8 mm, ระยะห่างระหว่างปากทางออกของเจ็ตถึงผนังที่เจ็ตพุ่งชน (H) = 160, 212.8 mm, เมื่อคิดเป็นสัดส่วนเทียบกันจะได้ดังต่อไปนี้, $SD = S/D = 8, 6$, $HD = H/d = 16, 16$, $SH = S/H = 0.5, 0.375$ ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่าขนาดพิกัดที่ใช้ในการทดลอง

d(mm)	S/d	H/d	S/H
10	8	16	0.5
13.3	6	16	0.375



รูปที่ 1 ลักษณะของการฉีดของกลุ่มเจ็ตพุ่งชน และ Computational Domain

ในการวิเคราะห์จำลองการไหลในที่นี่จะใช้เงื่อนไขของ symmetry แบบ 2 มิติ ที่ทางเข้าเป็นแบบป้อนค่าความเร็ว (velocity inlet) ทางออกเป็นแบบความดันบรรยากาศ เงื่อนไขขอบที่ผนังท่อผนังด้านข้าง ผนังด้านบนและล่างเป็นแบบไม่ลื่นไถล ความเร็ว u และ v ตามผนังทั้ง 4 ด้านมีค่าเป็นศูนย์และใช้ wall function ในการประมาณค่าตำแหน่งที่ใกล้ผนัง และมีการใช้ mesh สำหรับ $y+ \approx 1.6$ ที่ติดกับบริเวณใกล้ผนัง เพื่อแก้ปัญหาชั้นความหนาแบบราบเรียบ ($y+ < 5$) ดังแสดงในรูปที่ 1 ฉะนั้น computational domain จะใช้เพียงครึ่งเดียว โดเมนและเมชที่ใช้ในการคำนวณจำนวน 38,400 เมช ในที่นี้จะสนใจการจำลองในช่วงจุด $x/d = 0$ ถึง 12 และ $v/V_j = 0$ ถึง 1.2 ซึ่งผลที่ได้จะเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง [16] และยังแสดงผลของ contour plot เป็น stream function และของ vector plot ด้วย

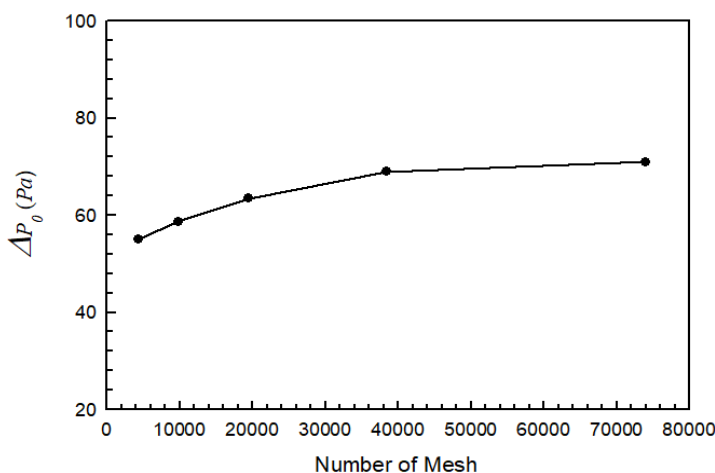
3.2 กระบวนการหาคำตอบ

การคำนวณในที่นี้ สมการค่าเฉลี่ยของเวลา (time averaged Navier-Stokes) ในสมการที่ (1), (2) สมการ turbulent kinetic energy (TKE) ในสมการที่ (6), สมการ dissipation rate ของ turbulent kinetic energy ในสมการ (7), สมการ (4) สำหรับ standard $k-\varepsilon$ model หรือสมการ (9) สำหรับ RSM จะถูกแก้สมการโดยอาศัยวิธีการเชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีการปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยจะใช้ SIMPLE algorithm [14,15] ในการแยกความสัมพันธ์ที่มีต่อกันระหว่างความดันกับความเร็ว และยังใช้ในกระบวนการทำซ้ำ ส่วน upwind scheme จะใช้ในการ discretise เทอม convection และ เทอม diffusion จะถูก discretise โดย central differencing scheme บนกริดที่แบ่งแบบ staggered ในการแก้ระบบสมการที่เกิดขึ้นจะใช้เทคนิคของวิธีการ TDMA (tri diagonal matrix algorithm) แบบ line by line sweeping ในการหาคำตอบ [12,15] คอมพิวเตอร์ที่ใช้ Gen 12th Intel(R) core i7 processor (14 threads) 20 core CPU 2.70 GHz RAM 16 GB

4. ผลการวิเคราะห์และอภิปราย

4.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของจำนวนเมช

ทำได้โดยการเพิ่มจำนวนเมชไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งการเพิ่มจำนวนเมชไม่ส่งผลต่อค่าที่วิเคราะห์ จากแบบจำลองซึ่งในที่นี้จะวิเคราะห์จากค่าความดัน ΔP_0 (Pa) ที่จุด stagnation pressure เมื่อใช้จำนวนเมช 5 ค่าคือ 4,293 เมช 9,825 เมช 19,494 เมช 38,400 เมชและ 74,000 เมช จากผลการเปรียบเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าความดัน ΔP_0 (Pa) มีค่าความแตกต่างน้อยลงเมื่อใช้จำนวนเมชมากขึ้น สรุปได้ว่าการเลือกใช้จำนวนเมช 38,400 ก็เพียงพอสำหรับการจำลอง

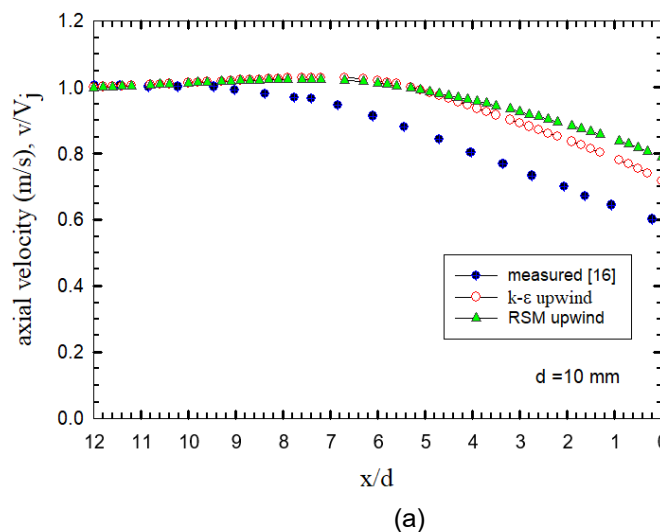


รูปที่ 2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของจำนวนเมชที่ใช้สำหรับค่าความดัน ΔP_0 (Pa)

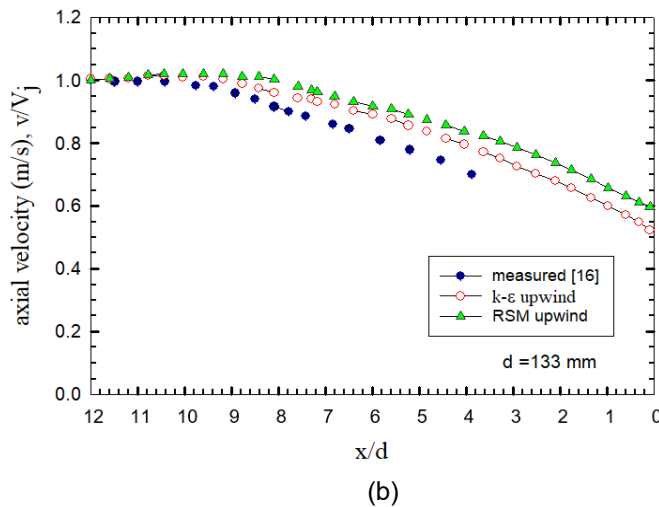
ผลจากการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนที่มีการไหลเจ็ตพุ่งชนโดยอาศัยสมการเชิงตัวเลขร่วมกับ standard $k-\varepsilon$ model และ RSM ถูกนำมาแสดงในรูปของโปรไฟล์ความเร็วตามแนวแกนกลาง v/V_j ที่กรณีขนาด $d = 10$ mm, ที่ $s/d = 8$, $H/d = 16$, $s/H = 0.5$ และกรณีขนาด $d = 13.3$ mm, ที่ $s/d = 6$, $H/d = 16$, $s/H = 0.375$ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ (x/d) กับระยะความสูง(H) ของช่องการไหลออกที่แตกต่างกัน ($2d, 4d$) และมีการเปรียบเทียบผลการคำนวณความเร็วเฉลี่ย u/V_j ตามแนวรัศมี (r/d) ดังที่จะแสดงต่อไป

รูปที่ 3(a), (b) ผลการทำนายระหว่าง standard $k-\varepsilon$ model และ RSM เทียบกับผลการทดลองที่ใช้ upwind scheme ร่วมกันทำนาย โดยพิจารณากรณีขนาด $d = 10$ และ 13.3 mm จากรูปที่ 3(a) กรณี $d = 10$ mm แสดงโปรไฟล์ของความเร็วทางออกของเจ็ตจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวค่าของผลจากการทำนาย standard $k-\varepsilon$ model และ RSM ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนผิดพลาดจากผลการทดลองทั้ง 2 models แต่ standard $k-\varepsilon$ model ให้ผลการทำนายใกล้เคียงสอดคล้องกับผลการทดลองในช่วงระยะ $x/d = 10 - 12$ ซึ่งความเร็ว v/V_j ที่ออกมาจากแกนกลางหัวเจ็ตยังมีค่าขนาดคงที่สม่ำเสมอ เมื่อผ่านบริเวณนี้ไปค่าความเร็วจะให้เส้นกราฟเบี่ยงเบนห่างออกจากผลการทดลองและจากนั้นยังห่างเพิ่มมากขึ้นอีกตามลำดับจนถึงตลอดค่าที่ช่วงของความเร็วค่อยๆลดลงจนถึงที่ $x/d = 0$ ซึ่งที่จุดนี้มีค่าความเร็ว $v/V_j = 0.715$ และของ RSM $v/V_j = 0.78$ ส่วนการทดลองได้ $v/V_j = 0.6$ และในส่วนนี้ จากรูปที่ 4(a),(b) และ 5(a),(b) เส้นแสดงการไหล stream function และ vector ของความเร็วที่พุ่งออกมาจากหัวเจ็ตคู่ที่ผนังด้านบน มีทิศทางแนวแกนกลางไม่เป็นแนวเส้นตรงและเกิดการกระจายแยกออกด้านข้างก่อนที่จะพุ่งชนกระทบผนังด้านล่างและยังทำให้เส้นสายธารกระแสการไหลหมุนวนไม่เป็นระเบียบของสนามการไหล มาประกอบในการวิเคราะห์สันนิษฐานว่าคงเนื่องมาจากคือจากจุดตำแหน่งความเร็วที่หัวเจ็ตทำการฉีดของไหลพุ่งตรงไปเป็นความเร็วตามแนวแกนกลางออกไปบริเวณพื้นที่โล่งซึ่งของไหลทำการไหลได้อย่างสะดวกและอิสระ มีการแยกตัวของการไหลไม่มากและด้วยความเร็วที่สูงก็เพียงพอใช้ได้เฉพาะกับการไหลที่ปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ของ standard $k-\varepsilon$ model ดีกับการไหลห่างจากผนัง แต่ไม่แม่นยำบริเวณใกล้ผนัง โดยที่ใช้ในการคำนวณผลเพียงแค่ 2 สมการเท่านั้น ส่วนแบบ RSM ใช้กับการไหลที่ซับซ้อนมีการไหลกระแสความเร็วหมุนเวียนสูง ตามแนวรัศมีและแนวสัมผัส คำนวณโดยใช้ความเค้นเรย์โนลด์ส (reynolds stress) โดยทั่วไป 7 สมการ ดังนั้นจากรูปแบบลักษณะปัญหาแบบนี้และผลที่ได้จากการจำลองทั้ง 2 model จะเห็นได้ว่าผลการจำลองโดยของ standard $k-\varepsilon$ model ค่าความเร็วจะมีความแม่นยำสอดคล้องใกล้เคียงเฉลี่ย 89.67% ส่วน RSM 87.43% เมื่อเทียบกับผลการทดลอง [16] และรูปที่ 3(b) กรณี $d = 13.3$ mm โปรไฟล์ความเร็วแกนกลางของเจ็ตหลังจากที่เริ่มต้นการฉีดออกมา จะให้ค่าความผิดพลาดเพิ่มมากขึ้นทั้ง 2 models จากช่วงระยะ $x/d = 0 - 12$ แต่เมื่อข้อมูลจากการทดลองที่มีอยู่แค่ช่วง $x/d = 0 - 4$ โดยที่ตำแหน่ง $x/d = 4$ ค่าความเร็วของ

$k-\varepsilon$, $v/V_j = 0.8$ และ RSM, $v/V_j = 0.84$ ส่วนการทดลองได้ $v/V_j = 0.7$ และจากรูปที่ 6(a),(b) และ 7(a),(b) เส้นแสดงการไหล stream function และ vector ของความเร็วที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดคู่ที่ผนังด้านบน มีทิศทางแนวแกนกลางไม่เป็นแนวเส้นตรงที่มีขนาดใหญ่และเกิดการกระจายแยกออกด้านข้างไม่ค่อยเป็นระเบียบก่อนที่จะพุ่งชนกระทบผนังด้านล่างมากกว่ากรณีแรก จากการวิเคราะห์ก็ควรจะสันนิษฐานจากสมการการคำนวณของโมเดลเหมือนกรณีแรกและส่วนหนึ่งคงเนื่องจากขนาด d ระยะ S และ H ที่มากกว่ากรณีแรก ทำให้ระยะการฉีดจากหัวฉีดมายังผนังที่ถูกฉีดกระทบที่ไกลกว่าเดิมซึ่งผลที่เกิดขึ้นมีผลต่อพฤติกรรมของลักษณะการไหลของของไหลของสนามการไหล และอีกเหตุผลหนึ่งคงเพราะการสร้างเมชที่มีความละเอียดมากขึ้น จำนวนจุดต่อมากขึ้นผลต่างที่เกิดขึ้นจากตัวแปรอิสระ (DOF) จะสามารถแก้ปัญหาได้ผลลัพธ์ที่ลู่เข้าสู่คำตอบได้ดีมากกว่าจำนวนเมชที่หยาบกว่า จากผลการจำลองทั้งสองแบบจำลองความปั่นป่วนทำให้เห็นถึงรูปแบบและลักษณะของรูปแบบการไหลของของไหลก่อนเข้าและออกสู่สภาวะบรรยากาศของตลอดจนโปรไฟล์การไหลของของไหลที่เกิดการหมุนวนเป็นวงกลมตลอดจนการแยกตัวของเวกเตอร์การไหลภายในพื้นที่จำกัด และพบว่าผลการจำลองของ standard $k-\varepsilon$ model จะมีความแม่นยำสอดคล้องใกล้เคียงเฉลี่ย 93.97% ส่วน RSM 91.31% เมื่อเทียบกับการทดลอง [16]



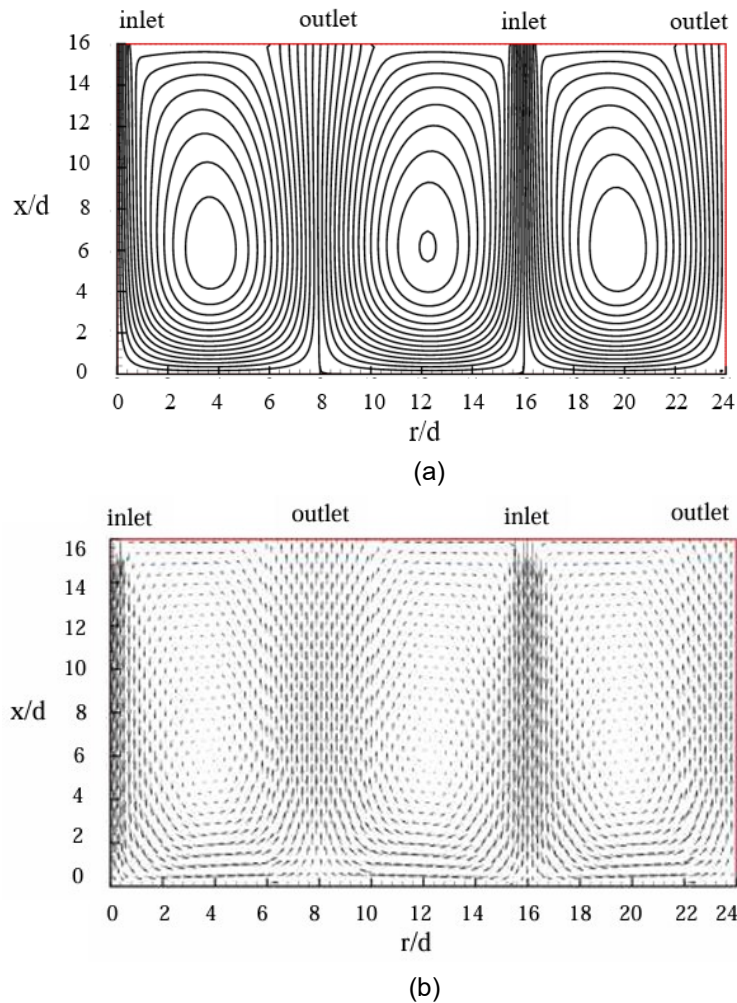
รูปที่ 3 กราฟแสดงโปรไฟล์การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกนกลางของเจ็ต ผลจากการคำนวณของ standard $k-\varepsilon$ model และ RSM เปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง[16] โดย (a) ขนาด $d = 10$ mm, ที่ $s/d=8$, $H/d=16$, $s/H=0.5$ (b) ขนาด $d = 13.3$ mm, $s/d=6$, $H/d=16$, $s/H=0.375$



รูปที่ 3 กราฟแสดงโปรไฟล์การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกนกลางของเจ็ต ผลจากการคำนวณของ **standard $k-\varepsilon$ model** และ **RSM** เปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง[16] โดย (a) ขนาด $d = 10$ mm, ที่ $s/d=8$, $H/d=16$, $s/H=0.5$ (b) ขนาด $d = 13.3$ mm, $s/d=6$, $H/d=16$, $s/H=0.375$ (ต่อ)

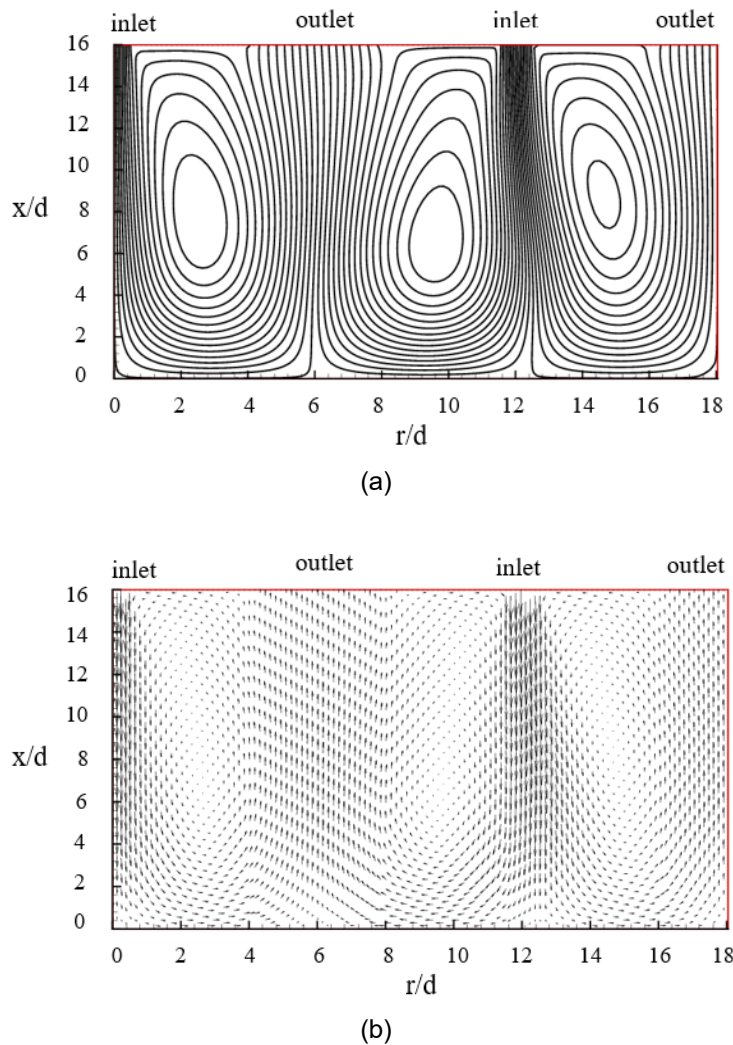
เส้นแสดงการไหล stream function และ vector plot ของความเร็วรูปที่ 4(a), (b) ถึงรูปที่ 7(a), (b) ที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดคู่ที่ผิวผนังด้านบน มีทิศทางแนวแกนกลางไม่เป็นแนวเส้นตรงก่อนที่จะพุ่งชนกระบอกผนังด้านล่างฝั่งตรงข้ามและยังทำให้เส้นสายธารกระแสการไหลหมุนวนไม่เป็นระเบียบทั้ง 3 วง จะมีจุดศูนย์กลางตำแหน่งการหมุนวนแตกต่างกัน เนื่องมาจากการไหลของเจ็ตออกมาจากหัวฉีดแล้วพุ่งชนพื้นผิวที่จุดศูนย์กลาง(stagnation point) เกิดขึ้นอย่างรุนแรง หลังจากนั้นเจ็ตจะไหลบนพื้นผิวรอบจุดหยุดนิ่ง ภายในบริเวณนี้จะเกิดความเร่งของการไหลเนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของเจ็ตอย่างกะทันหันหลังจากการชนและเกิดกระแสไหลออกไปด้านข้างและจะเกิดการชนกันของเจ็ตผนังที่ติดกันเนื่องจากหัวฉีดมี 2 หัวและจะรวมตัวกันเปลี่ยนเป็นการไหลย้อนขึ้นไปผนังด้านบนมีทางออก 2 ช่องทาง ส่วนกระแสการไหลที่ออกไม่ได้จะเกิดกระแสไหลวนที่จะเข้ามาผสมกับการไหลของเจ็ตก่อนพุ่งชนพื้นผิวอีกครั้ง

รูปที่ 4(a), (b) เส้นสายธารกระแสการไหลของ steam function และ vector plot ของความเร็วเป็นผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ standard $k-\varepsilon$ model ขนาดที่ $d = 10$ mm จะมีการหมุนวนหลักทั้ง 3 วง มีจุดศูนย์กลางตำแหน่งการหมุนวนอยู่ที่ประมาณ $x/d = 6.4$, 6.3 , 6.42 ที่ $r/d = 3.6$, 12.2 , 19.7



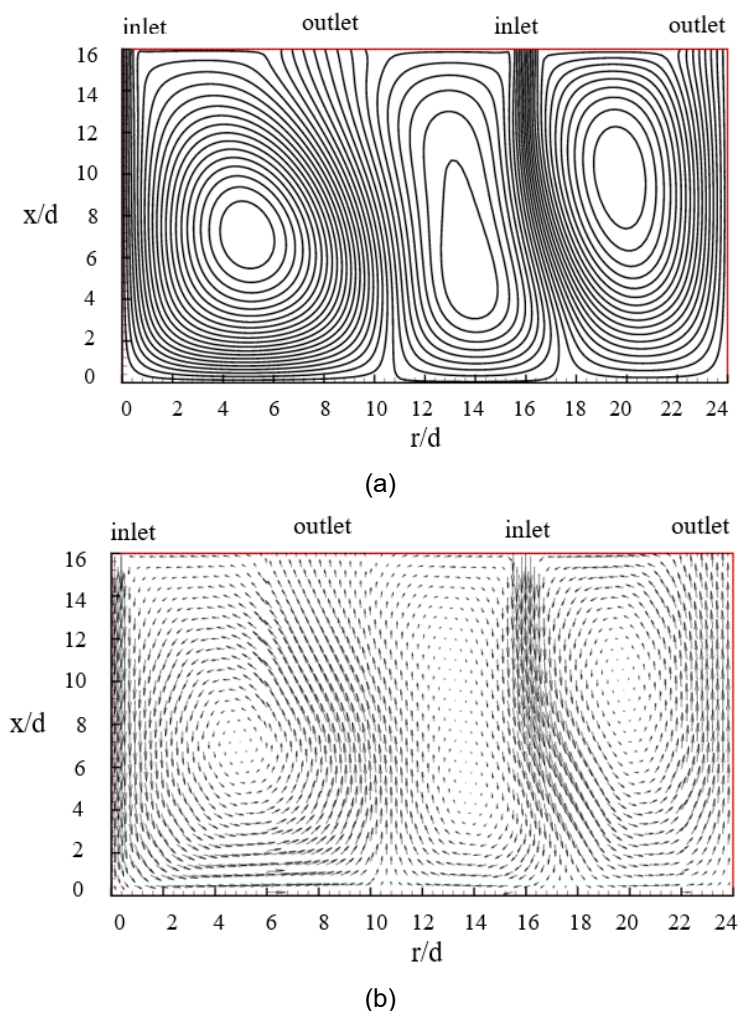
รูปที่ 4 (a) contour plot ของ stream function (b) vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ standard $k-\epsilon$ model ขนาด $d = 10$ mm ที่ $s/d=8$, $H/d=16$, $s/H=0.5$

รูปที่ 5(a), (b) เส้นสายธารการไหลของ steam function และ vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ standard $k-\epsilon$ model ขนาดที่ $d = 13.3$ mm จะมีการหมุนวนหลักทั้ง 3 วง มีจุดศูนย์กลางตำแหน่งการหมุนวนอยู่ที่ประมาณ $x/d = 8, 7, 8.82$ ที่ $r/d = 2.41, 9.6, 14.6$



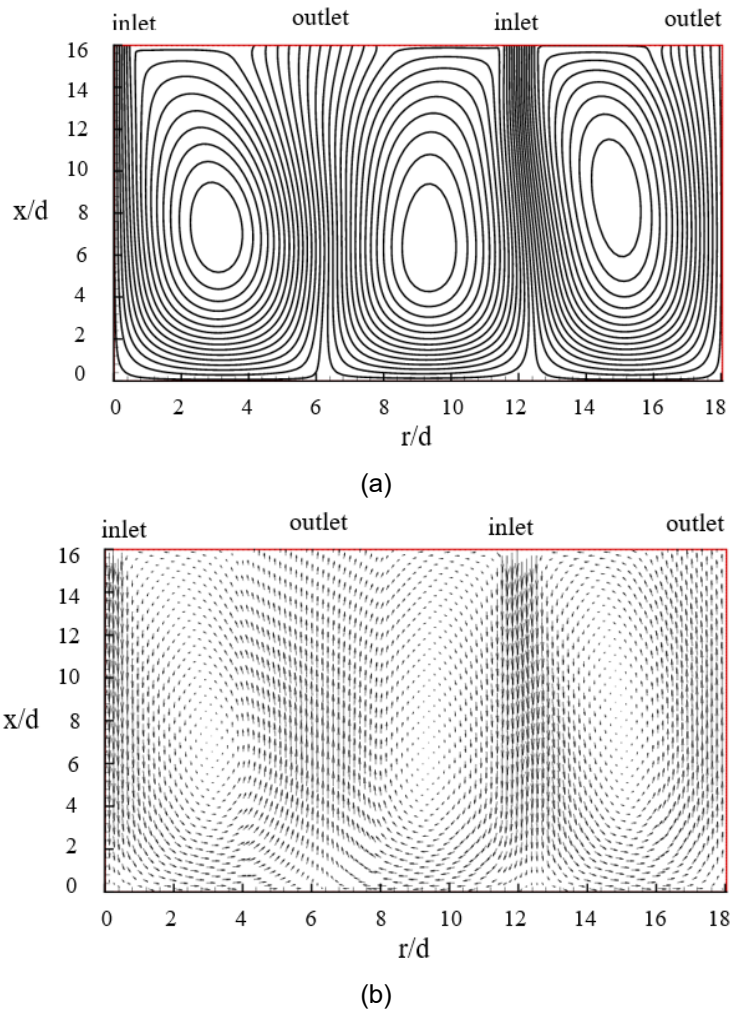
รูปที่ 5 (a) contour plot ของ stream function (b) vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ standard $k-\varepsilon$ model ขนาด $d = 13.3$ mm ที่ $s/d=6$, $H/d=16$, $s/H=0.375$

รูปที่ 6(a), (b) เส้นสายธารการไหลของ steam function และ vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ RSM ขนาดที่ $d = 10$ mm จะมีการหมุนวนหลักทั้ง 3 วง มีจุดศูนย์กลางตำแหน่งการหมุนวนอยู่ที่ประมาณ $x/d = 7.3, 6.4, 10$ ที่ $r/d = 4.81, 13.6, 19.6$



รูปที่ 6 (a) contour plot ของ stream function (b) vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ RSM ขนาด $d = 10$ mm ที่ $s/d = 8$, $H/d = 16$, $s/H = 0.5$

รูปที่ 7(a), (b) เส้นสายธารการไหลของ steam function และ vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ RSM ขนาดที่ $d = 13.3$ mm จะมีการหมุนวนหลักทั้ง 3 วง มีจุดศูนย์กลางตำแหน่งการหมุนวนอยู่ที่ประมาณ $x/d = 7.4, 6.7, 8.8$ ที่ $r/d = 3, 9.4, 14.82$



รูปที่ 7 (a) contour plot ของ stream function (b) vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ RSM ขนาด $d = 13.3 \text{ mm}$ ที่ $s/d=6$, $H/d=16$, $s/H=0.375$

จากรูปที่ 4(a), (b) ถึง 7(a), (b) กระแสการไหลของ steam function และ vector plot ที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดคู่ที่ผิวผนังด้านบน มีทิศทางเส้นสายธารสำหรับการไหลเป็นกลุ่มกระจายลงมาตามแนวแกนกลางและพุ่งชนกระแทกผนังด้านล่างทำให้เส้นสายธารเกิดการกระจายแยกออกไปด้านข้างเป็น 2 กระแสทิศทาง ผีเสื้อด้านซ้ายจะไหลไปตามผนังด้านล่างและไปปะทะชนกับกระแสการไหลอีกฝั่งหนึ่งที่มีทิศการไหลตรงข้ามกันของอีกหัวฉีดหนึ่ง ทำให้เกิดการผสมกันของของไหลระหว่างบริเวณผิวผนังและมีการไหลย้อนออกห่างจากผิวผนังขึ้นไปทิศทางข้างบน อีกทั้งยังเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนทำให้เกิดการผสมกระแสการไหลมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นไหลออกไปยังช่อง

ทางออกผิวผนังด้านบน ส่วนที่ไหลออกไปทันทีจะวนกลับมารวมกับกระแสสายธารที่ออกจากหัวฉีดต่อไป ส่วนกระแสการไหลฝั่งด้านขวาจะไหลไปปะทะชนผิวผนังด้านข้างและถูกบังคับให้กระแสการไหลมีทิศทางไหลขึ้นไปข้างบนไหลออกไปยังช่องทางออกผิวผนังด้านบน ดังนั้นจะเกิดปรากฏการณ์กระแสการไหลแบบหมุนวนหลายวงรอบจุดศูนย์กลางเหมือนกันทั้ง 2 model กรณีที่ $d = 10$ และ 13.3 mm .

จากผลการจำลองเชิงตัวเลขทางด้านพลศาสตร์ของไหลของเจ็ตพุ่งชนของแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองชนิด แบบความปั่นป่วน RSM จะให้คลาดเคลื่อนมากกว่า $k-\varepsilon$ model ไม่มากนักเมื่อเทียบกับการทดลอง [16]

5. สรุปผลการวิจัย

การเสนอการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน สำหรับการทำนายการไหลโดย standard $k-\varepsilon$ model และ RSM กรณีที่ $d = 10$ และ 13.3 mm เทียบกับผลการทดลอง แบบกลุ่มเจ็ตพุ่งชนในภาพรวมดังต่อไปนี้

1) พบว่าแบบจำลองการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ ให้ค่าผลการทำนายสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ standard $k-\varepsilon$ model สอดคล้องใกล้เคียงดีกว่า RSM

2) สังเกตได้ว่าบริเวณก่อนและหลังจุดกระทบของการไหล กรณี $d = 10 \text{ mm}$ แบบ standard $k-\varepsilon$ model จะให้เส้นสายธารกระแสการไหลพุ่งตามแนวแกนกลางตรงจากหัวฉีดและช่องทางออกได้ตรงตำแหน่งเข้าออกขอบเขตระบบและเกิดการไหลแบบหมุนวนซึ่งยังเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนได้ดีกว่าแบบ RSM

3) กรณี $d = 13.3 \text{ mm}$ บริเวณก่อนและหลังจุดกระทบของการไหล ทั้ง 2 model จะให้เส้นสายธารกระแสการไหลพุ่งกระจายตอนปลายไม่ตรงตามแนวแกนจากหัวฉีดและเกิดกระแสการไหลแบบหมุนวนหลายวงขนาดไม่เท่ากันมีตำแหน่งศูนย์กลางจำนวน 3 จุด ซึ่งจะส่งผลต่อการหล่อเย็นบริเวณตำแหน่งพื้นผิวของการถ่ายเทความร้อน

4) แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ standard $k-\varepsilon$ model สอดคล้องได้ใกล้เคียงดีกว่า RSM ที่ช่วงจุดบริเวณตามแนวแกนสันนิษฐานว่าคงเนื่องมาจากคือจุดวางตำแหน่งที่หัวฉีดทำการฉีดของไหลพุ่งตรงไปเป็นความเร็วตามแนวแกนกลางออกไปบริเวณพื้นที่โล่งซึ่งมีความซับซ้อนหรือการแยกตัวของการไหลไม่มากและด้วยความเร็วที่สูงเพียงพอใช้ได้เฉพาะกับการไหลที่ปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์เท่านั้นของ standard $k-\varepsilon$ model ที่ใช้แก้สมการพลังงานจลน์ k และการกระจายของความปั่นป่วน ε ส่วนแบบ RSM ใช้กับการไหลที่ซับซ้อนมีการไหลกระแสความเร็วหมุนเวียนสูงตามแนวรัศมีและแนวสัมผัส คำนวณโดยใช้ความเค้นเรย์โนลด์ส (reynolds stress) โดยตรง และการคำนวณอาศัยสมการการขนส่ง (transport equations) สำหรับความเค้นเรย์โนลด์สแต่ละส่วน

References

- [1] Lee DH, Bae JR, Park HJ, Lee JS, Ligrani P. Confined, milliscale unsteady laminar impinging slot jets and surface nusselt numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2011;54(11-12): 2408-18. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.021.
- [2] Lee DH, Park HJ, Ligrani P. Milliscale confined impinging slot jets Laminar heat transfer characteristics for an isothermal flat plate. *Milliscale confined impinging slot jets Laminar heat transfer characteristics for an isothermal flat plate* 2012;55(9-10): 2249-60. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.01.041.
- [3] Nuntadusit C, Wea-hayee M, Bunyajitraduya A, Eiamsa-aed S. Heat transfer enhancement by multiple swirling impinging jet with twister tape swirl generator. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2012;39(1):102-7. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.10.003.
- [4] Caggese O, Gnaegi G, Hannema G, Terzis A, Ott P. Experimental and numerical investigation of a fully confined impingement round jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2013;65: 873-82. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.043.
- [5] Yousefi-Lafouraki B, Ramiar A, Mohsenian S. Entropy generation analysis of a confined slot impinging jet in a converging channel for a shear thinning nanofluid. *Applied Thermal Engineering* 2016;105: 675-85. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.067.
- [6] Alabdaly IK, Ahmed MA. Numerical investigation on the heat transfer enhancement using a confined slot impinging jet with nanofluid. *Propulsion and Power Research* 2019;8(4):351-61. doi: 10.1016/j.jprr.2019.06.004.
- [7] Kempers R, Colenbrander J, Tan W, Chen R, Robinson AJ. Experimental characterization of a hybrid impinging microjet-microchannel heat sink fabricated using high-volume metal additive manufacturing. *International Journal of Thermofluids* 2020; 5-6:100029. doi: 10.1016/j.ijft.2020.100029.
- [8] Diop SN, Dieng B, Warore A, Mbodj S. A study on heat transfer characteristics by impinging jet within a few amounts of mist. *International Journal of Thermofluids* 2022; 13:100130. doi: 10.1016/j.ijft.2021.100130.
- [9] selimefendugil F, Ghachem K, Alwadai N, Alshammari BM, Kolsi L. Multiple slot nano-jet impingement cooling of a sinusoidal hot surface by using active rotating cylinders under magnetic field. *Case Studies in Thermal Engineering* 2023;47:103007. doi: 10.1016/j.csite.2023.103007.

- [10] Ajeel RK, Fayyadh SN, Ibrahim A, Sultan SM, Najeh T. Comprehensive analysis of heat transfer and pressure drop in square multiple impinging jets employing innovative hybrid nanofluids. *Results in Engineering* 2024;21:101158. doi: 10.1016/j.rineng.2024.101858.
- [11] ANSYS, Inc. Ansys fluent tutorial guide 2024 R1. Canonsburg (PA): ANSYS, Inc.; 2024.
- [12] Wilcox DC. Turbulent modeling for CFD. California: DCW Industries; 1993.
- [13] Gatski TB. Turbulent flows: model equations and solution methodology. In: Peyret R, editors. *Handbook of Computational Fluid Mechanics*. London: Academic Press; 1996. p. 339-415.
- [14] Patankar SV. Numerical heat transfer and fluid flow. Washington D.C.: Hemisphere; 1980.
- [15] Versteeg HK, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the volume method. Harlow: Longman Scientific & Technical; 1995.
- [16] Saad NR, Polat S, Douglas WJM. Confined multiple impinging slot jets without crossflow effects. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 1992;13(1): 2-14.

ประวัติผู้เขียนบทความ



เมืองแก้ว ยุตัน อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี โทรศัพท์ 087-5155965
E-mail: ting_yutan@yahoo.com
งานวิจัยที่สนใจ: Computational Fluid Dynamics Heat exchanger
Combustion การออกแบบเครื่องจักรกล และ พลังงาน

Article History:

Received: June 22, 2025

Revised: June 30, 2026

Accepted: July 10, 2026