

การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทแบบสมมาตรตามแกนที่ตกกระทบบนพื้นผิวรอยบุ๋ม Flow characteristics of an axisymmetric impinging jet on a dimpled surface

จักรพันธ์ ธารวงมยingsukul¹ และ กุลยา กนกจาร์วิจิต^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

โทร 0-5526-1000 ต่อ 4230 โทรสาร 0-5526-1062 *อีเมล์ koonlayak@nu.ac.th

Chakkraphan Thawongmingsukul¹ and Koonlaya Kanokjarvijit^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University,

Phitsanulok 65000, Thailand. Tel: 0-5526-1000 ext 4230 Fax: 0-5526-1062 *E-mail: koonlayak@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) ในการหาผลเฉลยของสมการนาเวีย-สโตกส์แบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Navier-Stokes Equations) กับการจำลองของเจ็ทแบบราบเรียบ (Laminar Jet) และสมมาตรตามแกนตกกระทบบนบนพื้นผิวรอยบุ๋ม เพื่อศึกษาผลกระทบของ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ในช่วง 400 ถึง 1400, ระยะห่างจากหัวฉีดไปยังแผ่นเป้าหมาย (H/D) ในช่วง 2 ถึง 8 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเจ็ท และ ความลึกของรอยบุ๋มที่ทดสอบ (d/D_d) เท่ากับ 0.15 และ 0.25 โดยจะแสดงผลเป็นสนามความเร็ว (Velocity Field) จากนั้นนำผลไปช่วยอธิบาย ผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ตกกระทบบนพื้นผิวรอยบุ๋มแบบเจ็ทหลังตกกระทบบนสามารถไหลออกสู่บรรยากาศได้ โดยอิสระ (Minimum Crossflow) ของ Kanokjarvijit และ Martinez-Botas [1, 2] เมื่อเปรียบเทียบกับสนามการไหลของพื้นผิวเรียบ ขอบของรอยบุ๋มทำหน้าที่ยกตัวของสนามการไหลและเริ่ม (restart) ขึ้นขอบเขตของของไหลหลังการตกกระทบบ และยังทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความเร็วยังของไหล เมื่อพิจารณาความเร็วบริเวณรอยบุ๋ม และขอบรอยบุ๋มจะเพิ่มขึ้นเมื่อ (1) ตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น (2) ระยะ H/D; ลดลง และ/หรือ ความลึกของรอยบุ๋ม (d/D_d) ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง Kanokjarvijit และ Martinez-Botas [1, 2]

คำสำคัญ: เจ็ท, รอยบุ๋ม, สมการนาเวีย-สโตกส์

Abstract

This study is to examine the flow characteristics of a 2D axisymmetric impinging jet on a dimpled plate by using finite element with Navier-Stokes Equations. The tested parameters were Reynolds number ranging from 400 to 1400, jet-to-plate spacing ranging from 2 to 8 jet diameters and dimple depth of 0.15 and 0.25 dimple projected diameter. The results are presented in velocity fields, and help explain the experimental

heat transfer results of four-way spent air exit (minimum crossflow) of Kanokjarvijit and Martinez-Botas [1, 2]. Comparing with the results of a flat plate, the velocity field over the dimpled plate suggested that the dimple edge lifted and restarted the boundary layer that was formed after impinging and the dimple edge increased the velocity of fluid. The higher velocities inside the dimple and around the dimple edge were found when (1) Reynolds number was increased (2) jet-to-plate spacing was narrow and/or (3) shallow dimple. These agreed with the heat transfer results [1, 2]

Keywords: Jet Impinging, Dimple, Navier-Stokes Equations

สัญลักษณ์

d	ความลึกของรอยบุ๋ม (m)
D_j	เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด(เจ็ท) (m)
D_d	เส้นผ่าศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (m)
H	ระยะความสูงจากหัวฉีดถึงแผ่นเป้าหมาย (m)
p	ความดัน (Pa)
r	ระยะตามแนวรัศมี (m)
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์, $Re = \rho U_j D_j / \mu$
t	เวลา (s)
U	ความเร็ว (m/s), $U = (U_r^2 + U_z^2)^{1/2}$
U_j	ความเร็วที่ออกจากหัวฉีด(เจ็ท) (m/s)
U_r	ความเร็วตามแนวรัศมี (m/s)
U_z	ความเร็วตามแนวตั้ง (m/s)
\mathbf{U}	เวกเตอร์ความเร็ว, Velocity Vector
z	ระยะตามแนวตั้ง (m)
μ	ความหนืดพลวัต, dynamic viscosity (kg/m.s)
ρ	ความหนาแน่น (kg/m ³)

1. บทนำ

การไหลของเจ็ทไปตกกระทบบนแผ่นเป้าหมาย (Jet Impingement) เป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนรูปแบบหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง และเป็นที่ยอมรับหลายในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการออกแบบการถ่ายเทความร้อนของก๊าซเทอร์โบ เช่น ในผนังภายในของบริเวณปลายส่วนหัว (Leading Edge) ของใบพัด และผนังด้านนอกของห้องเผาไหม้ ซึ่งการไหลของเจ็ทไปตกกระทบบนแผ่นเป้าหมายได้ศึกษากันอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น Huber และ Viskanta [3] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทอากาศ (Air Jet Array) ที่ตกกระทบบนแผ่นเรียบ Gardon และ Akfirat [4] ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นเป้าหมาย (Jet-to-Plate Spacing) ต่อการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ Obot และ Trabold [5] ได้ศึกษาผลกระทบของ Crossflow scheme ที่มีต่อผลการถ่ายเทความร้อน

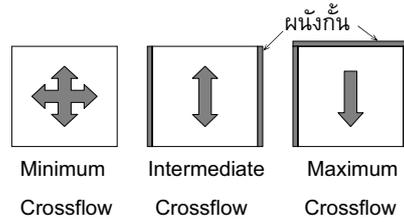
พื้นผิวรอยนูนเป็นที่รู้จักอย่างดีบนลูกกอล์ฟ ซึ่งจากการศึกษาของ Bearman และ Harvey [6] พบว่ารอยนูนบนลูกกอล์ฟมีคุณลักษณะช่วยลดแรงลาก (Drag) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้พื้นผิวรอยนูนกับการไหลในแนวขนาน พบว่ารอยนูนช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเป็น 1.6 ถึง 2 เท่าของการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวเรียบ [7 ถึง 10]

Kanokjaruvijit และ Martinez-Botas [1, 2] ได้ทำการทดลองศึกษา การถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบบนกลุ่มเจ็ทอากาศ (Air Jet Array) ลงบนพื้นผิวรอยนูน โดยพิจารณาผลกระทบต่างๆ เช่น ทิศทางการไหลของเจ็ทหลังการตกกระทบบน (Crossflow Scheme) รูปที่ 1, ตัวเลขเรย์โนลด์, ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นเป้าหมาย, ความลึกของรอยนูน, อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดและเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยนูน, รูปร่างทางเรขาคณิตของรอยนูน, ตำแหน่งการตกกระทบบนของเจ็ท พบว่าการบังคับการไหลของเจ็ทหลังการตกกระทบบนให้มีปริมาณมาก (Maximum Crossflow) จะช่วยเสริมการทำงานของรอยนูน เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนของแผ่นรอยนูนสูงกว่าแผ่นเรียบถึง 70% (กรณี $Re = 11500$, $H/D_j = 2$ และ $d/D_d = 0.15$)

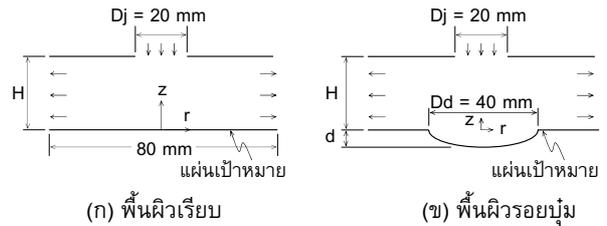
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะเฉพาะของการไหลของเจ็ท เป็นแบบการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Jet) เพื่อช่วยในการอธิบายผลการถ่ายเทความร้อนของ Kanokjaruvijit และ Martinez-Botas [1, 2] ในเบื้องต้น โดยใช้กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการหาผลเฉลยของสมการนาเวีย-สโตกส์แบบอัดตัวไม่ได้ โดยพิจารณาเพียงหนึ่งเจ็ทที่สมมาตรตามแกนตกกระทบบนรอยนูนเดียว แบบเจ็ทหลังตกกระทบบนสามารถไหลออกสู่บรรยากาศได้โดยอิสระ (Minimum Crossflow) ผลกระทบที่ศึกษาได้แก่ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง 400 ถึง 1400, ระยะห่างจากหัวฉีดไปยังแผ่นเป้าหมาย (H/D_j) ในช่วง 2 ถึง 8 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเจ็ท และความลึกของรอยนูนที่ทดสอบ (d/D_d) เท่ากับ 0.15 และ 0.25

2. พารามิเตอร์ที่ศึกษา

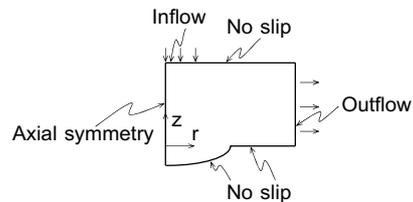
การศึกษาพิจารณาพารามิเตอร์การไหลของเจ็ทตกกระทบบนแผ่นเป้าหมายดังรูปที่ 2 โดยกำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีด (D_j) เท่ากับ 20 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของรอยนูน (D_d) เท่ากับ 40 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นเป้าหมายเท่ากับ 80 มิลลิเมตร พิจารณาของ



รูปที่ 1 รูปแบบทิศทางไหลออกของเจ็ทหลังการตกกระทบบน



(ก) พื้นผิวเรียบ (ข) พื้นผิวรอยนูน
รูปที่ 2 พารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 3 การกำหนดขอบเขตของแบบจำลอง

ไหลเป็นอากาศอุณหภูมิ 300 K, ความหนาแน่น (ρ) 1.1774 kg/m³, ความหนืดพลวัต (Dynamic Viscosity, μ) 1.8462 x 10⁻⁵ kg/m.s

3. สมการควบคุมการไหล

สมการที่ใช้สำหรับปัญหาการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ประกอบด้วยสมการนาเวีย-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations) และสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 U = \rho \frac{DU}{Dt} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (2)$$

4. การคำนวณเชิงตัวเลข

การคำนวณเชิงตัวเลข จะประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) ด้วยโปรแกรม COMSOL 3.2b โดยใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบ Direct (UMFPACK) โดยมีค่าความสัมพัทธ์ผลต่างความผิดพลาด (Relative Tolerance) เท่ากับ 1.0E-6 และจำนวนครั้งที่มากที่สุดในการทำซ้ำ (Maximum Number of Iterations) เท่ากับ 25 ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาและค่าต่างๆ เป็นวิธีที่เหมาะสมในการหาผลเฉลยของสมการนาเวีย-สโตกส์แบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Navier-Stokes Equations) และสภาวะการไหลแบบคงตัว [11] จากการศึกษาจะจำลองการไหลของเจ็ทแบบสมมาตรตามแกน และกำหนดขอบเขตของแบบจำลองดังรูปที่ 3

ซึ่งได้สมการกำหนดสภาวะขอบเขตสำหรับโปรแกรม COMSOL 3.2b ดังนี้

Inflow $U = U_j$ (3)

No slip $U = 0$ (4)

Outflow $\mu \nabla^2 U = 0$ (5)

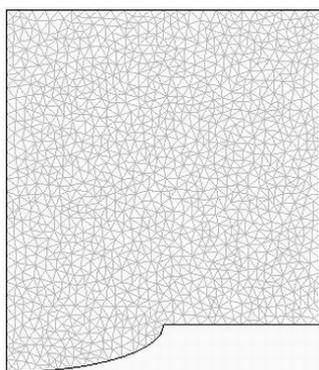
Axial symmetry $r = 0$ (6)

และสร้างกริด (Grid) แบบสามเหลี่ยมไร้ระเบียบกระจายทั่วทั้งโดเมน แสดงดังรูปที่ 4 โดยจำนวนกริดแสดงตามตารางที่ 1

5. ผลการคำนวณและการวิจารณ์

5.1 การเปรียบเทียบความเร็วจากการศึกษา กับผลการทดลอง

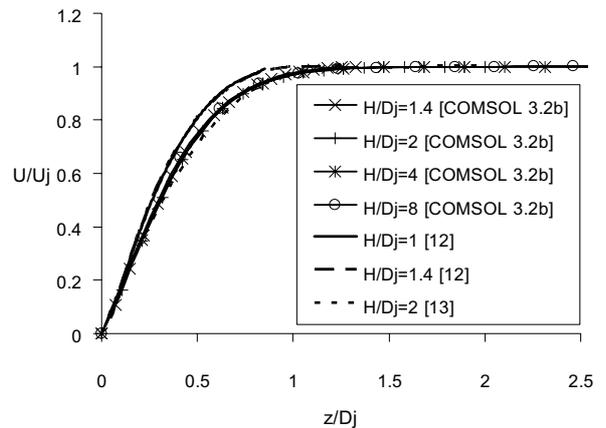
จากการประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) ด้วยโปรแกรม COMSOL 3.2b โดยการเปรียบเทียบความเร็วของเจ็ทที่ตำแหน่งแกนสมมาตร ($r = 0$ m) ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1400 พบว่าความเร็วจากการศึกษา กับการทดลองของ Bergthorson และคณะ [12] และ Baydar [13] มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงตามรูปที่ 5 โดยความคลาดเคลื่อนมีค่ามากที่สุด 6 เปอร์เซ็นต์ โดยอาจเกิดจาก การกำหนดความเร็วบริเวณทางเข้าของโปรแกรมเป็นแบบความเร็วสม่ำเสมอ (Uniform Velocity) ซึ่งแตกต่างจากการทดลอง [12, 13] หรือ ความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากค่าที่สภาวะต่างๆ เช่น ค่าอุณหภูมิ ค่าความดัน จากการทดลอง [12, 13] แตกต่างจากการศึกษา



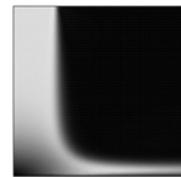
รูปที่ 4 ลักษณะของกริด (Grid) แบบสามเหลี่ยมไร้ระเบียบ

ตารางที่ 1 จำนวนกริดที่บริเวณโดเมนการคำนวณ

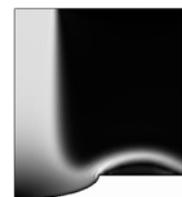
H/D _j	พื้นผิวเรียบ	พื้นผิวรอยนูน d/D _d = 0.15	พื้นผิวรอยนูน d/D _d = 0.25
2	3112	2534	2231
4	5307	4683	4391
8	10733	10019	9667



รูปที่ 5 เปรียบเทียบความเร็วจากการศึกษา กับผลการทดลอง [12, 13] ที่ตกกระทบพื้นผิวเรียบที่ตำแหน่งแกนสมมาตร ($r = 0$ m), $Re = 1400$

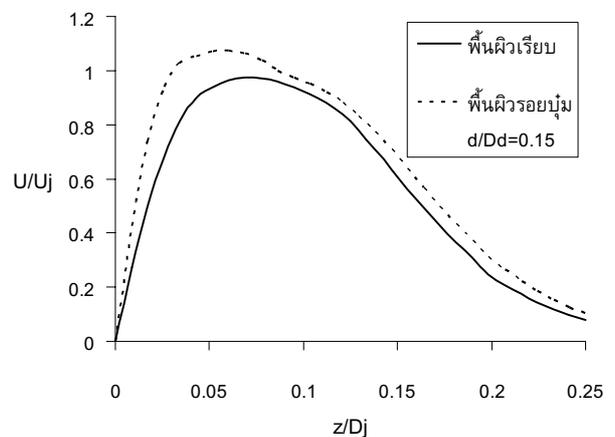


(ก) พื้นผิวเรียบ



(ข) พื้นผิวรอยนูนที่ $d/D_d = 0.15$

รูปที่ 6 สนามการไหลที่ค่า $Re = 1400$, $H/D_j = 2$



รูปที่ 7 เปรียบเทียบความเร็วที่ $Re = 1400$, $H/D_j = 2$, $r = 0.02$ m (ขอบรอยนูน)

5.2 การเปรียบเทียบผลของการตกกระทบพื้นผิวเรียบและพื้นผิวรอยนูน

สนามการไหลหลังจากตกกระทบพื้นผิวเรียบ จะเคลื่อนตัวแนบไปกับพื้นผิวเรียบ แต่สำหรับพื้นผิวรอยนูน จะเกิดการยกตัวของสนามการไหลและเริ่มขึ้นขอบเขตการไหลที่ตำแหน่งขอบของรอยนูน ($r = 0.02$ m) ดังแสดงตามรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาความเร็วที่ตำแหน่งขอบของรอยนูน ตามรูปที่ 7 พบว่า ความเร็วที่เกิดจากการตกกระทบพื้นผิวรอยนูนจะมีค่ามากกว่าพื้นผิวเรียบ โดยค่า U/U_j สูงสุดของพื้นผิวรอยนูนเท่ากับ 1.07 ที่ตำแหน่ง z/D_j เท่ากับ 0.06 ส่วนค่า U/U_j สูงสุดของพื้นผิวเรียบมี

ค่าเท่ากับ 0.97 ที่ตำแหน่ง z/D_j เท่ากับ 0.075 แสดงให้เห็นว่าขอบของรอยบวมจะทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความเร็ว เมื่อพิจารณาผลของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ตกกระทบพื้นผิวเรียบ จะดีกว่าตกกระทบพื้นผิวรอยบวม [1,2] เนื่องจากสนามการไหลหลังจากตกกระทบพื้นผิวเรียบจะเคลื่อนที่แนบไปกับพื้นผิวเรียบ ซึ่งส่งผลให้เจ็ทสามารถถ่ายเทโมเมนตัมกับพื้นผิว แต่สำหรับพื้นผิวรอยบวมจะเกิดการยกตัวของสนามการไหล เป็นเหตุให้เจ็ทหลังตกกระทบมีการถ่ายเทโมเมนตัมแก่อากาศที่อยู่บริเวณรอบๆ (Ambient Air) ดังนั้นเมื่อเจ็ทตกกระทบพื้นผิวเรียบอีกครั้งหลังจากการยกตัวของสนามการไหล ที่ตำแหน่ง Downstream เจ็ทจึงเหลือโมเมนตัมน้อยในการถ่ายเทกับพื้นผิว

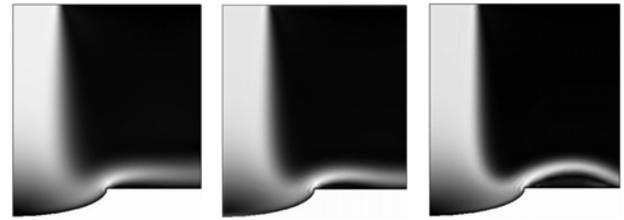
จากการศึกษาครั้งนี้ทำให้ทราบว่า ขอบของรอยบวมจะทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความเร็ว เพราะฉะนั้นหากเปลี่ยนทิศทางการถ่ายเทโมเมนตัมของเจ็ทที่ตกกระทบพื้นผิวรอยบวม ด้วยการเพิ่มขนาดของการไหลในแนวขนานกับพื้นผิว (Parallel Flow หรือ Channel Flow) เพื่อผลักดันสนามการไหลไหลออกไปในทิศตามแนวรัศมี (r) มากขึ้น ซึ่งน่าจะช่วยเพิ่มการถ่ายเทโมเมนตัมแก่พื้นผิวได้มากขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงทิศทางดังกล่าว สามารถกระทำได้โดยการบังคับให้เจ็ทหลังตกกระทบไหลออกทางเดียว (Maximum Crossflow) หรือ 2 ทาง (Intermediate Crossflow) แทนที่จะไหลออกอย่างอิสระ (Minimum Crossflow) ดังที่ Kanokjaruvijit และ Martinez-Botas ได้ศึกษาการทดลอง พบว่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ตกกระทบพื้นผิวรอยบวมจะสูงกว่าพื้นผิวเรียบ [1, 2]

5.3 ผลกระทบของตัวเลขเรย์โนลด์ (Re)

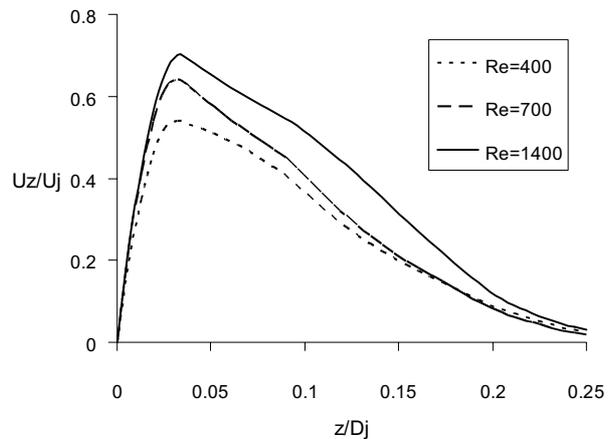
เมื่อเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ส่งผลให้โมเมนตัมของเจ็ทเพิ่มขึ้น ทำให้เมื่อตกกระทบพื้นผิวรอยบวม สนามการไหลที่ออกจากขอบรอยบวมมีลักษณะยกตัวสูงขึ้นจากพื้นผิวเรียบที่อยู่ติดอยู่กับขอบรอยบวม ดังแสดงดังรูปที่ 8 หรือพิจารณาจากรูปที่ 9 จะพบว่า เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ความเร็วในแนวตั้ง (U_z) ที่ขอบรอยบวมมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการยกตัวสูงขึ้นของสนามการไหล ซึ่งให้ผลเหมือนกับรูปที่ 8 และเมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนอธิบายได้ว่า เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น เจ็ทมีค่าโมเมนตัมสูงขึ้น ทำให้มีการถ่ายเทบริเวณตกกระทบพื้นผิวรอยบวมมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง [1, 2]

5.4 ผลกระทบของระยะห่างจากหัวฉีดไปยังแผ่นเป้าหมาย (H/D_j)

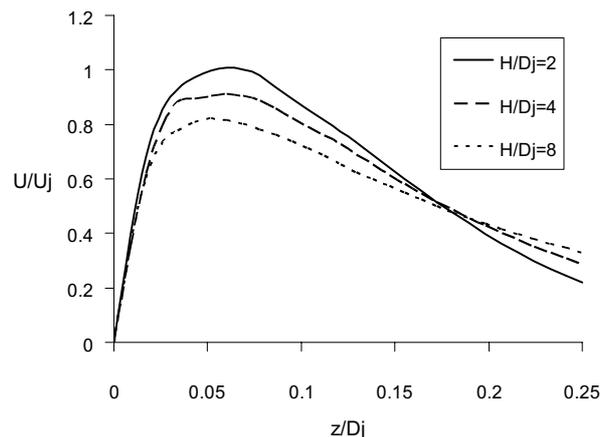
ความเร็วที่เกิดจากการตกกระทบพื้นผิวรอยบวม ที่ตำแหน่งขอบรอยบวม $r = 0.02$ m (รูปที่ 10) และที่ตำแหน่ง $r = 0.015$ m (รูปที่ 11) จะมีค่าลดลงเมื่อระยะ H/D_j มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากเมื่อระยะ H/D_j มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีการสูญเสียโมเมนตัมให้แก่อากาศรอบข้างของเจ็ทก่อนตกกระทบมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทโมเมนตัมของเจ็ทที่บริเวณตกกระทบมีค่าลดลง ความเร็วของเจ็ทบริเวณที่ตกกระทบจึงมีค่าลดลง ส่งผลให้การยกตัวของสนามการไหลที่ขอบรอยบวมลดลง ดังแสดงตามรูปที่ 12 และเมื่อพิจารณาที่ระยะ $z/D_j < 0.175$ จากรูปที่ 10 และ 11 ซึ่งเป็นระยะที่ใกล้กับผิวของแผ่นเป้าหมาย และความเร็วบริเวณนี้จะมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นที่ระยะ H/D_j ที่ต่ำ ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจึงดีกว่าที่ระยะ H/D_j สูง สอดคล้องกับการทดลอง [1, 2] แต่เมื่อพิจารณาที่ระยะ $z/D_j > 0.175$ จากรูปที่ 10 และ



(ก) Re = 400 (ข) Re = 700 (ค) Re = 1400
รูปที่ 8 สนามการไหลที่ $d/D_a = 0.15$, $H/D_j = 2$

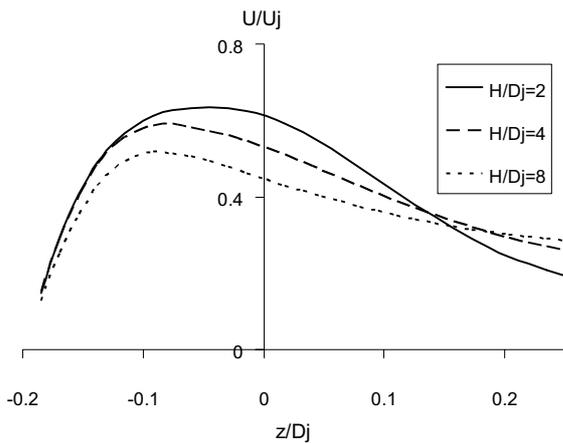


รูปที่ 9 เปรียบเทียบความเร็วตามแนวตั้ง (U_z) ที่ $d/D_a = 0.15$, $H/D_j = 2$, $r = 0.02$ m (ขอบรอยบวม)

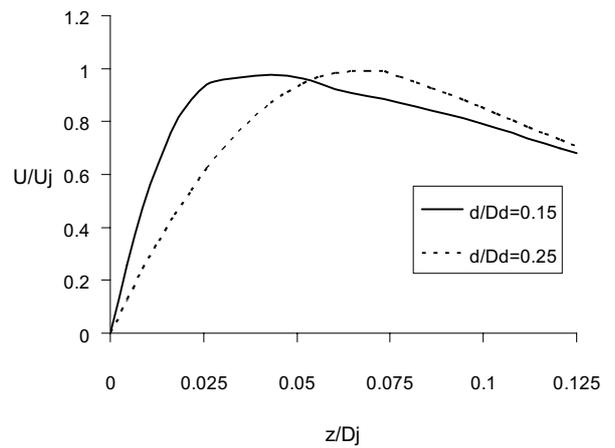


รูปที่ 10 เปรียบเทียบความเร็วจากผลของ H/D_j ที่ $Re = 400$, $d/D_a = 0.15$, $r = 0.02$ m (ขอบรอยบวม)

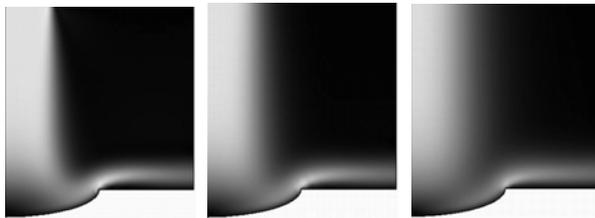
11 ความเร็วจะลดลงเมื่อระยะ H/D_j ลดลง อธิบายได้ว่า ที่ระยะ H/D_j ต่ำ อัตราการถ่ายเทโมเมนตัมจะสูงมากในช่วงต้น และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะ z/D_j เพิ่มขึ้น ซึ่งจะแตกต่างกับระยะ H/D_j ที่มีค่าสูง จะมีอัตราการถ่ายเทโมเมนตัมไม่สูงมากในช่วงต้น และอัตราการถ่ายเทโมเมนตัมจะลดลงอย่างช้าๆ เมื่อระยะ z/D_j เพิ่มขึ้น



รูปที่ 11 เปรียบเทียบความเร็วจากผลของ H/D_j ที่ $Re = 400$, $d/D_d = 0.15$, $r = 0.015$ m (บริเวณภายในรอยนูนใกล้ขอบรอยนูน)

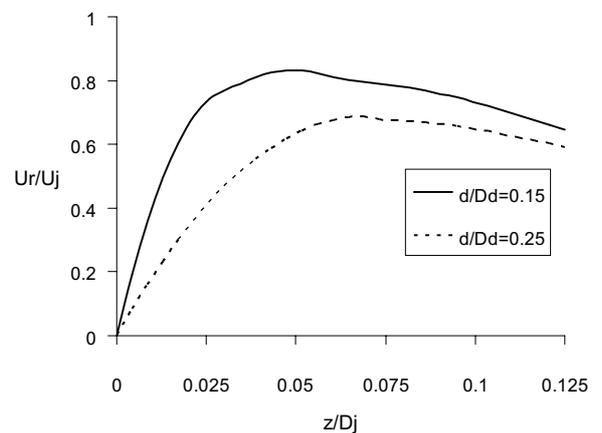


รูปที่ 13 เปรียบเทียบผลของค่า d/D_d ที่ $Re = 700$, $H/D_j = 8$, $r = 0.02$ m (ขอบรอยนูน)



(ก) $H/D_j = 2$ (ข) $H/D_j = 4$ (ค) $H/D_j = 8$

รูปที่ 12 สนามการไหลบริเวณพื้นผิวรอยนูน
 ที่ $d/D_d = 0.15$, $Re = 400$



รูปที่ 14 ความเร็วตามแนวรัศมี (Radial Velocity, U_r)
 ที่ $Re = 700$, $H/D_j = 8$, $r = 0.02$ m (ขอบรอยนูน)

5.5 ผลกระทบของความลึกของรอยนูน (d/D_d)

เมื่อพิจารณาความเร็วที่เกิดจากการตกกระทบพื้นผิวรอยนูน ที่ตำแหน่งขอบของรอยนูน ($r = 0.02$ m) ตามรูปที่ 13 ความเร็วสูงสุดของแผ่นรอยนูน $d/D_d = 0.15$ เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $z/D_j = 0.043$ มีค่า $U/U_j = 0.975$ ส่วนความเร็วสูงสุดของแผ่นรอยนูน $d/D_d = 0.25$ จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $z/D_j = 0.065$ มีค่า $U/U_j = 0.99$ ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวพบว่า ที่แผ่นรอยนูน $d/D_d = 0.25$ จะมีค่าความเร็วสูงสุดมากกว่าที่แผ่นรอยนูน $d/D_d = 0.15$ เพียงเล็กน้อย แต่ตำแหน่งความเร็วสูงสุดจะเกิดที่ระยะ z/D_j มากกว่า ดังนั้นความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสำหรับแผ่นรอยนูน $d/D_d = 0.15$ จึงสูงกว่าแผ่นรอยนูน $d/D_d = 0.25$ เนื่องจากความเร็วบริเวณใกล้พื้นผิวมีค่าสูงกว่า จึงมีการถ่ายเทโมเมนตัมกับพื้นผิวได้มากกว่า

พิจารณารูปที่ 14 ความเร็วตามแนวรัศมี (U_r) บริเวณขอบรอยนูนของแผ่นรอยนูน $d/D_d = 0.15$ มีค่าสูงกว่าแผ่นรอยนูน $d/D_d = 0.25$ เนื่องจากความโค้ง (Curvature) ของแผ่นรอยนูน $d/D_d = 0.15$ มีค่าน้อยกว่าแผ่นรอยนูน $d/D_d = 0.25$ เป็นเหตุให้เจ็ทหลังตกกระทบยกตัวสูงขึ้นน้อยกว่าแผ่นรอยนูนที่ลึกกว่า และชิดไปกับพื้นผิวเรียบที่อยู่ติดกับขอบรอยนูนมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 15 ดังนั้นกรณีของแผ่นรอยนูน $d/D_d = 0.25$ เมื่อเจ็ทหลังตกกระทบถูกยกตัวสูงขึ้น ส่งผลให้โมเมนตัมส่วนหนึ่งถูกถ่ายเทให้กับอากาศที่อยู่รอบๆ แทนที่จะถ่ายเทโมเมนตัมให้แก่พื้นผิวเรียบโดยตรง โดยแตกต่างกับแผ่นรอยนูน d/D_d



(ก) $d/D_d = 0.15$ (ข) $d/D_d = 0.25$

รูปที่ 15 สนามการไหลบริเวณพื้นผิวรอยนูนที่ $Re = 700$, $H/D_j = 8$

$= 0.15$ ซึ่งมีโอกาสถ่ายเทโมเมนตัมกับพื้นผิวเรียบได้ดีกว่า ผลของสนามการไหลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการถ่ายเทความร้อน [1,2] ซึ่งรายงานไว้ว่า แผ่นรอยนูน $d/D_d = 0.15$ ให้ผลของการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นรอยนูน $d/D_d = 0.25$

6.สรุป

จากการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทแบบสมมาตรตามแกน ที่ตกกระทบพื้นผิวรอยนูน แบบเจ็ทหลังตกกระทบแล้วสามารถไหลออกสู่บรรยากาศได้โดยอิสระ (Minimum Crossflow) โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) ในการหาผลเฉลยของสมการนาเวีย-สโตกส์แบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Navier-Stokes Equations) กับการจำลองของเจ็ทแบบราบเรียบ (Laminar Jet) ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง 400-1400, ระยะห่างจากหัวฉีดไปยังแผ่นเป้าหมาย (H/D_i) ในช่วง 2 - 8 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเจ็ท และความลึกของรอยนูนที่ทดสอบ (d/D_a) เท่ากับ 0.15 และ 0.25 พบว่า สนามการไหลหลังการตกกระทบพื้นผิวเรียบจะแตกต่างกับการตกกระทบพื้นผิวรอยนูน โดยสนามการไหลหลังตกกระทบพื้นผิวเรียบจะเคลื่อนตัวแนบไปกับพื้นผิวเรียบ แต่สำหรับพื้นผิวรอยนูนจะเกิดการยกตัวของสนามการไหล และเริ่มขึ้นขอบเขตการไหลที่ตำแหน่งขอบรอยนูน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความเร็วหลังเจ็ทตกกระทบที่ตำแหน่ง $r = 0.02$ m (ขอบรอยนูน) พบว่า ความเร็วของเจ็ทหลังตกกระทบพื้นผิวรอยนูนมีค่าสูงกว่าตกกระทบพื้นผิวเรียบ แสดงให้เห็นว่ารอยนูนทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความเร็วของของไหล แต่การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ตกกระทบพื้นผิวรอยนูนจะมีค่าต่ำกว่าตกกระทบพื้นผิวเรียบ เนื่องจากสนามการไหลหลังจากตกกระทบพื้นผิวเรียบ จะเคลื่อนที่แนบไปกับพื้นผิวเรียบ แต่สำหรับพื้นผิวรอยนูนจะเกิดการยกตัวของสนามการไหล เมื่อพิจารณาความเร็วที่สูงขึ้นที่ตำแหน่งขอบรอยนูน จะเป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาแบบเจ็ทหลังตกกระทบแล้วไหลออกสู่บรรยากาศได้ทางเดียว (Maximum Crossflow) หรือแบบไหลออกสู่บรรยากาศได้สองทาง (Intermediate Crossflow) ในการศึกษาต่อไป ซึ่งให้ผลการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น [1, 2]

ในการศึกษานี้สามารถสรุปผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ดังที่กล่าวข้างต้นได้ดังต่อไปนี้

1. ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โมเมนตัมของเจ็ทเพิ่มขึ้น ทำให้เมื่อตกกระทบพื้นผิวรอยนูน สนามการไหลที่ออกจากขอบรอยนูน มีลักษณะยกตัวสูงขึ้นจากพื้นผิวเรียบที่อยู่ติดอยู่กับขอบรอยนูน

2. ระยะห่างจากหัวฉีดไปยังแผ่นเป้าหมาย (H/D_i) เมื่อระยะ H/D_i มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความเร็วของเจ็ทภายในรอยนูนและที่ขอบรอยนูนมีค่าลดลง ทำให้สนามการไหลที่ออกจากขอบรอยนูนยกตัวน้อยลง เนื่องจากเมื่อระยะ H/D_i มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีการสูญเสียโมเมนตัมให้แก่อากาศรอบข้างของเจ็ทก่อนตกกระทบมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทโมเมนตัมของเจ็ทที่บริเวณตกกระทบมีค่าลดลง

3. ความลึกของรอยนูน (d/D_a) สำหรับแผ่นรอยนูนที่ตื้นกว่า (d/D_a = 0.15) เจ็ทหลังตกกระทบจะยกตัวสูงขึ้นน้อยกว่าแผ่นรอยนูนที่ลึกกว่า และชิดไปกับพื้นผิวเรียบที่อยู่ติดกับขอบรอยนูนมากกว่า เนื่องจากจะมีความโค้ง (Curvature) ของแผ่นรอยนูน $d/D_a = 0.15$ มีค่าน้อยกว่าแผ่นรอยนูน $d/D_a = 0.25$

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kanokjaruvijit, K., Martinez-Botas, R.F., 2005, Jet impingement on a dimpled surface with different crossflow schemes, Int J Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp.161-170.
- [2] Kanokjaruvijit, K., Martinez-Botas, R.F., 2007, Heat transfer and pressure investigation of dimple impingement, J Turbomachinery, Jan 2007, (In press).
- [3] Huber, A.M., Viskanta, R., 1994, Convective heat transfer to a confined impinging array of jets with spent air exits, J Heat Transfer, August 1994, Vol. 116, pp.570-576.
- [4] Gardon, R., Akfirat, J.C., 1965, The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets, Int J Heat and Mass Transfer, Vol. 8, pp.1261-1272.
- [5] Obot, N.T., Trabold, T.A., 1987, Impingement heat transfer within arrays of circular jets: Part 1: effects of minimum, intermediate and complete crossflow for small and large spacings, J Heat Transfer, Vol. 109, Nov 1987 pp.872-879.
- [6] Bearman, P.W., Harvey, J.K., 1976, Golf ball aerodynamics, Aeronautical Quarterly, May (1976), pp.112-122.
- [7] Kesarev, V.S., Kozlov, A.P., 1993, Convection Heat transfer in turbulized flow past a hemispherical cavity, Heat Transfer Research, Vol. 25, No. 2, pp.156-160.
- [8] Banker, R.S., Gotovskii, M., Belen'kiy, M., Fokin, B., 2003, Heat transfer and pressure loss for flows inside converging and diverging channels with surface concavity shape effects, Proceedings of the 4th International Conference Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology, Sep.29-Oct.3, Crete Island, Greece.
- [9] Moon, H.K., O'Connell, T., Glezer, B., Channel height effect on heat transfer and friction in a dimpled passage, ASME Paper, 99-GT-163.
- [10] Chyu, M.K., Yu, Y., Ding, H., Down, J.P., Soechting, F.O., 1997, Concavity enhanced heat transfer in an internal cooling passage, ASME Paper, 97-GT-437.
- [11] Chemical Engineering Module User's Guide version COMSOL 3.2, September 2005, COPYRIGHT 1994-2004 by COMSOL AB.
- [12] Bergthorson, J.M., Goodwin, D.G., Dimotakis, P.E., 2004. Experiments and modeling of impinging jets and premixed stagnation flames. 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, The University of Sydney, Sydney, Australia, December 13-17.
- [13] Baydar, E., 1999. Confined impinging air jet at low Reynolds numbers, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 19, pp.27-33.