การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแบบสมมาตรตามแกนที่ตกกระทบพื้นผิวรอยบุ๋ม

Heat transfer of an axisymmetric impinging jet on a dimpled surface

จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล[1] และ กุลยา กนกจารุวิจิตร[1*]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000
โทร 0-5526-1000 ต่อ 4230 โทรสาร 0-5526-1062 [1*]อีเมล์ koonlayak@nu.ac.th

Chakkraphan Thawonngamyingsakul[1] and Koonlaya Kanokjaruvijit[1*]
[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University,
Phitsanulok 65000, Thailand. Tel: 0-5526-1000 ext 4230 Fax: 0-5526-1062 [1*]E-mail: koonlayak@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) ในการหาผลเฉลยของระบบสมการนาเวีย-สโตกส์แบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Navier-Stokes Equation System) จากการจำลองเจ็ทแบบราบเรียบ (Laminar Jet) แบบสมมาตรตามแกน 2 มิติ ตกกระทบลงบนพื้นผิวรอยบุ๋ม เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเป้าหมาย ในรูปของค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) และค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉลี่ย (Average Nusselt Number) โดยศึกษาผลกระทบของ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ในช่วง 400 ถึง 1200 ระยะห่างจากเจ็ทถึงแผ่นเป้าหมาย (H/D_j) ในช่วง 2 ถึง 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ท ความลึกของรอยบุ๋ม (d/D_d) ในช่วง 0.1 ถึง 0.2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางตามภาพฉายของรอยบุ๋ม และ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ทต่อเส้นผ่านศูนย์กลางตามภาพฉายของรอยบุ๋ม (D_j/D_d) ในช่วง 0.25 ถึง 1 จากการศึกษาพบว่า การถ่ายเทความร้อนของแผ่นรอยบุ๋มจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ (1) ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) เพิ่มขึ้น (2) ความลึกของรอยบุ๋ม (d/D_d) มีค่าลดลง และ/หรือ (3) ตำแหน่งขอบรอยบุ๋มอยู่ไกลจากเจ็ทที่ตกกระทบ สำหรับระยะห่างจากเจ็ทถึงแผ่นเป้าหมาย (H/D_j) มีผลน้อยมากต่อการถ่ายเทความร้อนสำหรับเจ็ทแบบราบเรียบ นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนของแผ่นรอยบุ๋มกับแผ่นเรียบ พบว่า การถ่ายเทความร้อนของแผ่นรอยบุ๋มต่ำกว่าแผ่นเรียบ เนื่องจากแผ่นรอยบุ๋มมีพื้นที่สัมผัสของไหลมากกว่าแผ่นเรียบ เป็นเหตุให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมฟลักซ์น้อยกว่า

คำสำคัญ : เจ็ท, รอยบุ๋ม, สมการนาเวีย-สโตกส์, การถ่ายเทความร้อน

Abstract

This study is to examine heat transfer of a 2D axisymmetric impinging jet on a dimpled plate by using finite element with Navier-Stokes equation system. The results are presented in terms of local Nusselt numbers and average Nusselt numbers. The tested parameters are Reynolds number (Re) ranging from 400 to 1200, jet-to-plate spacing (H/D_j) ranging from 2 to 8 jet diameters, dimple depth (d/D_d) ranging from 0.1 to 0.2 dimple diameters and ratio of jet diameter to dimple diameter (D_j/D_d) ranging from 0.25 to 1. The heat transfer augmentation is found when (1) Reynolds number is increased (2) dimple depth is decreased and/or (3) dimple edge is far from impingement zone. However, the jet-to-plate spacing did not affect the heat transfer of the laminar jet. Additionally, the comparison of the heat transfer of a dimpled plate to a flat plate, which is used as a baseline case, shows that the dimple leads to heat transfer reduction due to its additional wetted area.

Keywords: Jet Impingement, Dimple, Navier-Stokes Equation, Heat Transfer

1. บทนำ

สำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อนนั้นถือได้ว่ามีความสำคัญอย่างมากต่องานอุตสาหกรรม การไหลของเจ็ทไปตกกระทบลงบนแผ่นเป้าหมาย (Jet Impingement) เป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนรูปแบบหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง และเป็นที่แพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมหลอมโลหะ อุตสาหกรรมก๊าซเทอร์ไบน์ เป็นต้น ซึ่งการไหลของเจ็ทไปตกกระทบลงบนแผ่นเป้าหมาย ได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย โดยรูปแบบการศึกษามีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป แต่สิ่งสำคัญของการศึกษาก็เพื่อพัฒนาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเป้าหมายให้มีค่าสูงสุดหรือดีที่สุด Gardon และ Akfirat [1] ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นเป้าหมาย (Jet-to-Plate Spacing) ต่อการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ Obot และ Trabold [2] ได้ทำการทดลอง เพื่อศึกษาผลกระทบของ Crossflow scheme ที่มีผล

ต่อการถ่ายเทความร้อน ที่เกิดจากการตกกระทบของกลุ่มเจ็ทอากาศ (Air Jet Array) ลงบนพื้นผิวเรียบ

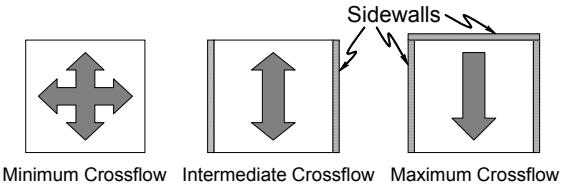
พื้นผิวรอยบุ๋มเป็นที่รู้จักอย่างดีบนลูกกอล์ฟ ซึ่งจากการศึกษาของ Bearman และ Harvey [3] พบว่ารอยบุ๋มบนลูกกอล์ฟมีคุณลักษณะช่วยลดแรงลาก (Drag Force) เพิ่มแรงยก (Lift Force) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้พื้นผิวรอยบุ๋มกับการไหลในแนวขนาน พบว่ารอยบุ๋มช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเป็น 1.5 - 2.1 เท่าของการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวเรียบ [4], [5] และ [6]

Kanokjaruvijit และ Martinez-Botas [7], [8] ทำการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของกลุ่มเจ็ทอากาศ (Air Jet Array) ลงบนพื้นผิวกลุ่มรอยบุ๋ม โดยพิจารณาผลกระทบต่างๆ ได้แก่ ทิศทางการไหลของเจ็ทหลังการตกกระทบ (Crossflow Scheme) ดังแสดงในรูปที่ 1 ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ระยะระหว่างเจ็ทกับแผ่นเป้าหมาย (H/D_j) ความลึกของรอยบุ๋ม (d/D_d) และขนาดของรอยบุ๋มเปรียบเทียบกับขนาดของเจ็ท (D_j/D_d) พบว่าการบังคับการไหลของเจ็ทหลังการตกกระทบให้มีปริมาณมาก (Maximum Crossflow) เป็นการเสริมการทำงานของรอยบุ๋ม ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของแผ่นรอยบุ๋มสูงกว่าแผ่นเรียบ 68 % (ที่ค่า Re = 11500, H/D_j = 8, d/D_d = 0.29, D_j/D_d = 0.577) จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล และ กุลยา กนกจารุวิจิตร [9] ทำการศึกษาถึงลักษณะการไหลของเจ็ทแบบราบเรียบ แบบสมมาตรตามแกน 2 มิติ ตกกระทบพื้นผิวรอยบุ๋ม

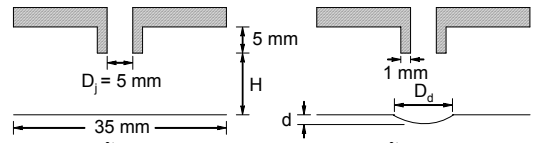
จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการตกกระทบของเจ็ทแบบราบเรียบ 2 มิติสมมาตรตามแกนลงบนพื้นผิวรอยบุ๋ม หลังตกกระทบเจ็ทสามารถออกสู่บรรยากาศได้โดยอิสระ ด้วยการใช้กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยอาศัยซอฟต์แวร์เชิงพานิชย์ COMSOL 3.3 ในการหาผลเฉลยของระบบสมการนาเวีย-สโตกส์แบบอัดตัวไม่ได้ โดยพิจารณาการตกกระทบของเจ็ทลงบนพื้นผิวเรียบ ซึ่งผลการถ่ายเทความร้อนและการไหลจะนำมาเปรียบเทียบกับผลของเจ็ทตกกระทบลงบนรอยบุ๋ม นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลกระทบต่างๆ ได้แก่ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง 400 ถึง 1200 ระยะห่างจากหัวฉีดไปยังแผ่นเป้าหมาย (H/D_j) ในช่วง 2 ถึง 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ท ความลึกของรอยบุ๋ม (d/D_d) ในช่วง 0.1 ถึง 0.2 และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ทต่อเส้นผ่านศูนย์กลางตามภาพฉายของรอยบุ๋ม (D_j/D_d) ในช่วง 0.25 ถึง 1

2. พารามิเตอร์ที่ศึกษา

พารามิเตอร์ที่พิจารณาในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 2 โดยกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (D_j) เท่ากับ 5 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเป้าหมายเท่ากับ 35 mm ความหนาของหัวฉีดเท่ากับ 1 mm ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux) ของแผ่นเป้าหมายมีค่าคงที่เท่ากับ 500 W/m^2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของเจ็ทอากาศวัดที่อุณหภูมิ 303 K ได้แก่ ความหนาแน่น (ρ) 1.165kg/m^2 ความหนืดพลวัต (μ) 1.864x10^{-5} kg/(m.s) ความจุความร้อนจำเพาะ (c_p) 1005 J/(kg.K) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) 0.02637 W/(m.K) ตัวเลขเรย์โนลด์นิยามจาก $Re = \rho U D_j/\mu$ โดยที่ U คือความเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งทางออกของหัวฉีด



รูปที่ 1 รูปแบบทิศทางการไหลออกของเจ็ทหลังการตกกระทบ [7], [8]



(ก) พื้นผิวเรียบ (ข) พื้นผิวรอยบุ๋ม

รูปที่ 2 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

3. สมการที่เกี่ยวข้อง (Governing Equations)

สมการควบคุมปัญหาการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และปัญหาการถ่ายเทความร้อน ประกอบด้วย สมการความต่อเนื่อง สมการนาเวีย-สโตกส์หรือสมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน ดังแสดงในสมการ (1), (2) และ (3) ตามลำดับ โดยมีสมมติฐาน ได้แก่ พิจารณาที่สภาวะคงตัว การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ คุณสมบัติของไหลมีค่าคงที่ และของไหลเป็นแบบนิวทอเนียน (Newtonian Fluid)

$$\frac{1}{r}\frac{\partial(ru_r)}{\partial r}+\frac{\partial u_z}{\partial z}=0 \qquad (1)$$

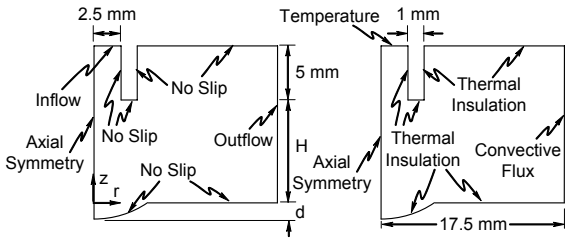
แกน r : $$u_r\frac{\partial u_r}{\partial r}+u_z\frac{\partial u_r}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial r}\right)+\frac{\mu}{\rho}\left(\nabla^2 u_r-\frac{u_r}{r^2}\right) \qquad (2.1)$$

แกน z : $$u_r\frac{\partial u_z}{\partial r}+u_z\frac{\partial u_z}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial r}\right)+\frac{\mu}{\rho}(\nabla^2 u_z) \qquad (2.2)$$

$$\rho c_p\left(u_r\frac{\partial T}{\partial r}+u_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)-k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)=Q \qquad (3)$$

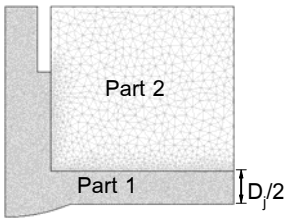
4. การคำนวณเชิงตัวเลข

การหาคำตอบเชิงตัวเลขของสมการ (1) ถึง (3) อาศัยกระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ COMSOL 3.3 ซึ่งใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบ Direct (UMFPACK) โดยค่า Relative Tolerance เท่ากับ 1.0x10^{-6} ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมในการหาผลเฉลยของระบบสมการนาเวีย-สโตกส์แบบอัดตัวไม่ได้ ที่สภาวะการไหลแบบคงตัว [10] การศึกษานี้จะจำลองการไหลของเจ็ทแบบสมมาตรตามแกน 2 มิติ และกำหนดขอบเขตของแบบจำลองดังรูปที่ 3 จากนั้นแบ่งโดเมนการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 จะครอบคลุมชั้นขอบเขตของของไหล และส่วนที่ 2 ครอบคลุมบริเวณอากาศแวดล้อมนอกชั้นขอบเขตของของไหล รูปที่ 4 แสดงการสร้างกริดแบบสามเหลี่ยมไร้ระเบียบ โดยส่วนที่ 1 มีความหนาแน่นของกริด 107.12 กริด/มม^2 และส่วนที่ 2 ความหนาแน่นของกริดเท่ากับ 9.68 กริด/มม^2 ทั้งนี้เพื่อให้การคำนวณของคอมพิวเตอร์ลู่เข้าค่าๆ หนึ่ง (Convergence) และประหยัดหน่วย ความจำและเวลาในการคำนวณ



(ก) ปัญหาการไหล (ข) ปัญหาการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 3 การกำหนดขอบเขตของแบบจำลอง



รูปที่ 4 การแบ่งโดเมนการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน และการสร้างกริดที่กระจายอย่างเท่าๆ กันในทั้ง 2 โดเมน

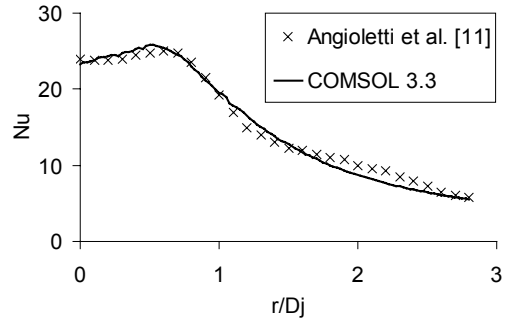
5. ผลการคำนวณและการอธิปรายผล

5.1 การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนจากการศึกษากับผลการทดลอง (Validation)

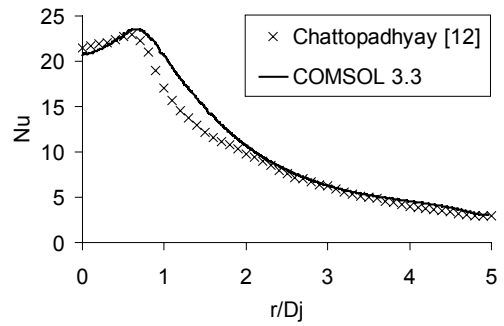
การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเป้าหมาย ในรูปของค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉพาะที่ จากการใช้กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ COMSOL 3.3 กับผลการทดลองของ Angioletti และคณะ [11] และ Chattopadhyay [12] แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางด้วยกัน โดยค่าความแตกต่างจากการศึกษากับการทดลองของ Angioletti และคณะ [11] มีค่า 1.0443% และ 9.4928 % สำหรับการทดลองของ Chattopadhyay [12]

5.2 การเปรียบเทียบผลของการตกกระทบพื้นผิวเรียบและพื้นผิวรอยบุ๋ม

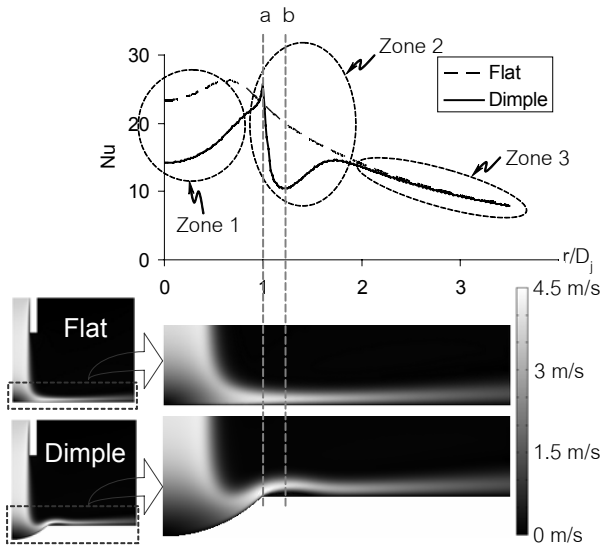
เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนสำหรับการตกกระทบของเจ็ทลงบนแผ่นเรียบและแผ่นรอยบุ๋ม ในรูปของค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉพาะที่ (Nu) จากรูปที่ 7 พบว่า บริเวณตกกระทบ (บริเวณที่ 1) การถ่ายเทความร้อนของแผ่นเรียบมีค่ามากกว่าแผ่นรอยบุ๋ม เนื่องจากพื้นผิวที่สัมผัสของไหล (Wetted Area) ของแผ่นเรียบมีค่าน้อยกว่าแผ่นรอยบุ๋ม ส่งผลให้โมเมนตัมฟลักซ์สำหรับแผ่นเรียบมีค่าสูงกว่า สำหรับที่ตำแหน่งขอบรอยบุ๋ม (หน้าตัด a) การถ่ายเทความร้อนของแผ่นรอยบุ๋มจะมีค่าสูงกว่าแผ่นเรียบเนื่องจากมีความเร็วสูงกว่า ถัดจากขอบรอยบุ๋ม การถ่ายเทความร้อนของแผ่นรอยบุ๋มจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดการยกตัวของสนามการไหล ส่งผลให้เกิดการไหลย้อนกลับ (Back Flow) แสดงดังรูปที่ 8 ทำให้เกิดการแยกตัวของชั้นขอบเขตการไหล (Boundary Layer Separation) ออกจากผิวเรียบที่อยู่ถัดจากรอยบุ๋ม สำหรับบริเวณที่ 3 การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากสนามการไหลของทั้งสองพื้นผิวไหลแนบไปกับพื้นผิวเหมือนกัน และความเร็วมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉพาะที่กับผลการทดลองของ Angioletti และคณะ [11] ที่ค่า Re = 1000, H/D_j = 4.5

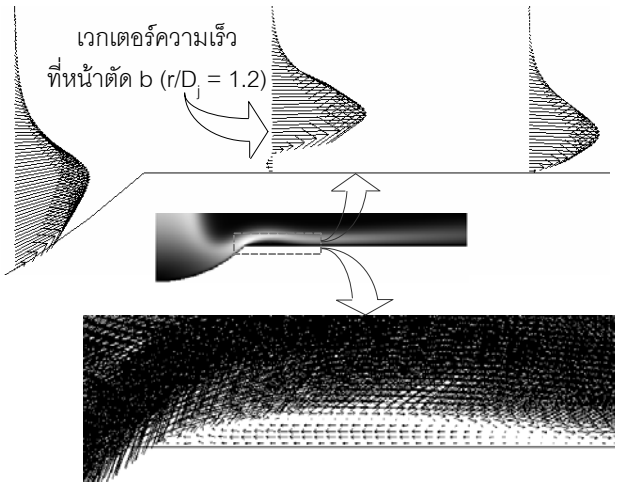


รูปที่ 6 ค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉพาะที่กับผลการทดลองของ Chattopadhyay [12] ที่ค่า Re = 1000, H/D_j = 2



รูปที่ 7 ค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉพาะที่และสนามการไหล ที่ค่า Re = 1200, H/D_j = 2, d/D_d = 0.2, D_j/D_d = 0.5

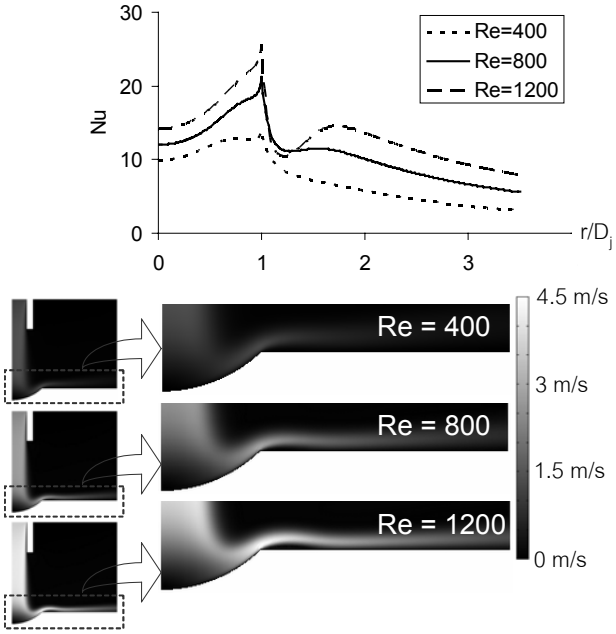
สำหรับการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย ในรูปของค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉลี่ย ที่เกิดจากการตกกระทบของเจ็ทลงบนแผ่นเรียบมีค่า 16.6586 ส่วนแผ่นรอยบุ๋มมีค่า 15.4247



รูปที่ 8 เวกเตอร์ความเร็วบริเวณการยกตัวของสนามการไหล
ที่ค่า Re = 1200, H/D_j = 2, d/D_d = 0.2, D_j/D_d = 0.5

5.3 ผลกระทบของตัวเลขเรย์โนลด์ (Re)

รูปที่ 9 แสดงผลกระทบของ Re ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของแผ่นรอยบุ๋ม พบว่า ที่ค่า Re = 1200 เกิดการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด ตามมาด้วย Re = 800 และ Re = 400 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อค่า Re สูงขึ้น โมเมนตัมของเจ็ทสำหรับการตกกระทบมีค่าสูงขึ้น สังเกตได้จากแถบสีความเร็วมีค่าสูงขึ้น สำหรับค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่ค่า Re = 400, 800 และ 1200 ให้ค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉลี่ย 7.2909, 10.7526 และ 13.0669 ตามลำดับ



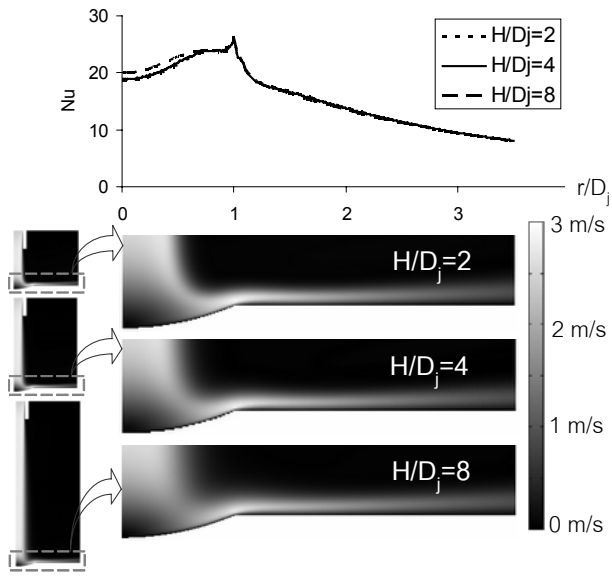
รูปที่ 9 ค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉพาะที่และสนามการไหล
ที่ค่า H/D_j = 2, d/D_d = 0.2, D_j/D_d = 0.5

5.4 ผลกระทบของระยะห่างจากหัวฉีดไปยังแผ่นเป้าหมาย (H/D_j)

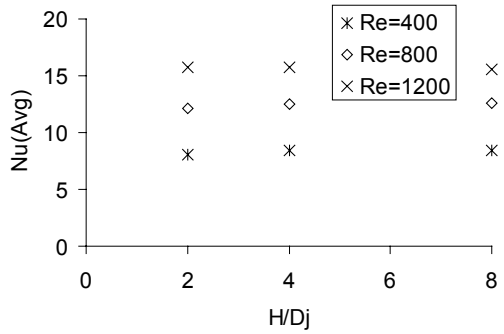
รูปที่ 10 แสดงผลกระทบของค่า H/D_j ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของแผ่นรอยบุ๋ม พบว่าการถ่ายเทความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสามค่า เนื่องจากการถ่ายเทโมเมนตัมของเจ็ทที่กำลังตกลงมากับอากาศแวดล้อม (Ambient) มีค่าน้อยมาก ส่งผลให้โมเมนตัมบริเวณตกกระทบมีค่าไม่แตกต่างกัน สังเกตจากสนามการไหลและแถบสีความเร็วมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยในรูปของค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉลี่ย (Nu_{Avg}) ที่ H/D_j ค่าต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 11

5.5 ผลกระทบของความลึกของรอยบุ๋ม (d/D_d)

การถ่ายเทความร้อนจากการตกกระทบของเจ็ทลงบนแผ่นรอยบุ๋มที่ความลึกของรอยบุ๋ม d/D_d ที่ค่า 0.1, 0.15 และ 0.2 แสดงดังรูปที่ 12 พบว่า ที่บริเวณตกกระทบ (บริเวณที่ 1) การถ่ายเทความร้อนจากการตกกระทบลงบนแผ่นรอยบุ๋ม d/D_d = 0.2 มีค่าต่ำสุด และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า d/D_d ลดลง เนื่องจากเจ็ทตกกระทบลงบนแผ่นรอยบุ๋มที่ลึกกว่ามีพื้นที่สัมผัสกับของไหลมากกว่า ทำให้การถ่ายเทโมเมนตัมจากการตกกระทบต่อพื้นที่มีค่าน้อยกว่า สำหรับบริเวณยกตัวของสนามการไหล (บริเวณที่ 2) การถ่ายเทความร้อนสำหรับพื้นผิวรอยบุ๋ม d/D_d = 0.2 มีค่าต่ำสุด และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า d/D_d ลดลง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้



รูปที่ 10 ค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉพาะที่และสนามการไหล
ที่ค่า Re = 1200, d/D_d = 0.1, D_j/D_d = 0.5



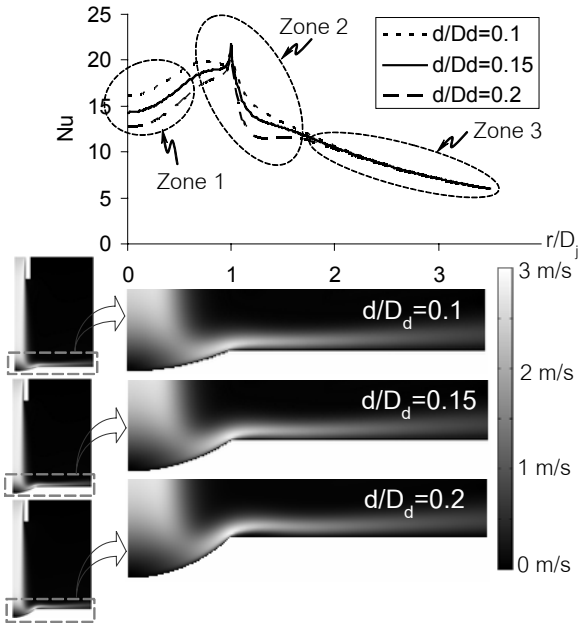
รูปที่ 11 ค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉลี่ย ที่ค่า d/D_d = 0.1, D_j/D_d = 0.5

จากการที่เจ็ทตกกระทบลงบนแผ่นรอยบุ๋มที่ลึกกว่า จะถูกผลักให้ออกจากรอยบุ๋ม ซึ่งมีความโค้ง (Curvature) สูงกว่า ส่งผลให้เกิดการยกตัวของสนามการไหลที่สูงกว่า เป็นเหตุให้เจ็ทถ่ายเทโมเมนตัมให้กับอากาศแวดล้อมมากกว่าถ่ายเทให้กับแผ่นเป้าหมาย สำหรับบริเวณที่ 3 การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากสนามการไหลของทุกค่าของ d/D_d ไหลแนบไปกับพื้นผิวเหมือนกัน และความเร็วมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเป้าหมายเฉลี่ย ในรูปของค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉลี่ยมีค่าลดลงเมื่อค่า d/D_d มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่า 12.4660, 11.9389 และ 11.1354 สำหรับค่า d/D_d = 0.1, 0.15 และ 0.2 ตามลำดับ

5.6 ผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ทและเส้นผ่านศูนย์กลางตามภาพฉายของรอยบุ๋ม (D_j/D_d)

ผลกระทบของค่า D_j/D_d ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน แสดงดังรูปที่ 13 จากรูปสังเกตได้ว่า ลักษณะของกราฟของการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ (1) การตกกระทบของเจ็ทภายในรอยบุ๋ม ซึ่งเกิดขึ้นกับแผ่นรอยบุ๋ม D_j/D_d = 0.25 และ 0.5 และ (2) การตกกระทบของเจ็ทครอบคลุมรอยบุ๋มทั้งหมด ซึ่งเกิดขึ้นกับแผ่นรอยบุ๋ม D_j/D_d = 0.5 และ 1

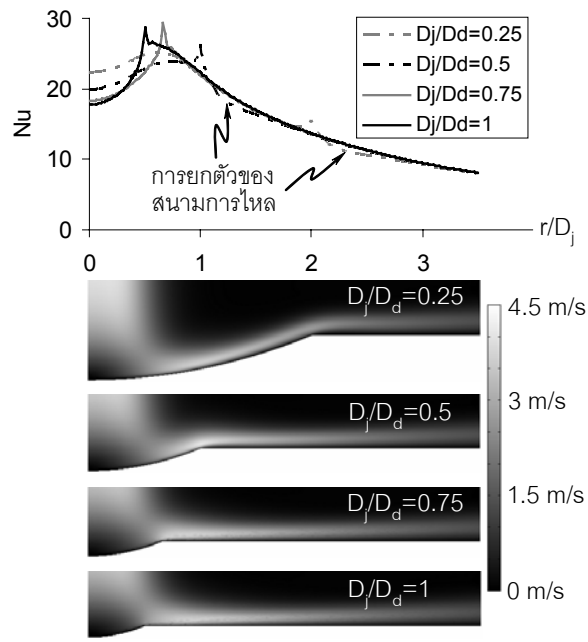
ลักษณะที่ (1) แผ่นรอยบุ๋ม D_j/D_d = 0.25 ให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณตกกระทบสูงกว่าแผ่นรอยบุ๋ม D_j/D_d = 0.5 เนื่องจากโมเมนตัมฟลักซ์มีค่าสูงกว่า หลังจากนั้นจะเกิดการยกตัวของสนามการไหลตั้งแต่ตำแหน่งขอบรอยบุ๋ม ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างรวดเร็วโดยบริเวณการยกตัวของสนามการไหล การถ่ายเทความร้อนของแผ่นรอยบุ๋ม D_j/D_d = 0.25 จะลดลงน้อยกว่า เนื่องจากเจ็ทตกกระทบได้กลายเป็นเจ็ทผนัง (Wall Jet) ซึ่งมีโมเมนตัมน้อยลง เป็นเหตุให้เกิดการยกตัวน้อยกว่าแผ่นรอยบุ๋ม D_j/D_d = 0.5



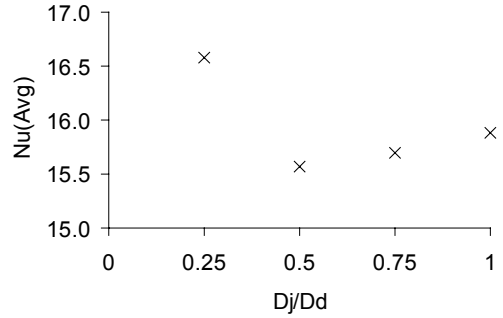
รูปที่ 12 ค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉพาะที่และสนามการไหล
ที่ค่า Re = 800, H/D_j = 4, D_j/D_d = 0.5

ลักษณะที่ (2) สังเกตได้ว่า แผ่นรอยบุ๋ม D_j/D_d = 0.75 และ 1 ตำแหน่งขอบรอยบุ๋มอยู่ภายในบริเวณเจ็ทตกกระทบ การถ่ายเทความร้อนในบริเวณตกกระทบจะลดลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะที่ (1) ทั้งนี้เนื่องจากเจ็ทที่กำลังตกลงมามีโมเมนตัมสูง ซึ่งเมื่อเจ็ทตกกระทบครอบคลุมบริเวณรอยบุ๋มนั้น ทำให้ความพยายามในการออกจากรอยบุ๋มของเจ็ทเป็นไปอย่างรุนแรงกว่า เป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียโมเมนตัมสูงกว่า หลังจากบริเวณตกกระทบ เจ็ทจะไหลแนบไปกับพื้นผิว ส่งผลให้ไม่เกิดการลดลงอย่างรวดเร็วของการถ่ายเทความร้อนเหมือนลักษณะที่ (1) หรือกล่าวได้ว่า ไม่เกิดการยกตัวของสนามการไหล

สำหรับการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย ในรูปของค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉลี่ย แสดงดังรูปที่ 14 พบว่าแผ่นรอยบุ๋ม D_j/D_d = 0.5 มีค่าต่ำสุด และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ D_j/D_d มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากค่า 0.5 หรือกล่าวได้ว่า การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งขอบรอยบุ๋มอยู่ไกลจากเจ็ทที่ตกกระทบมากขึ้น



รูปที่ 13 ค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉพาะที่และสนามการไหล
ที่ค่า Re = 1200, H/D_j = 8, d/D_d = 0.1



รูปที่ 14 ค่านัสเซิลนัมเบอร์เฉลี่ย ที่ค่า Re = 1200, H/D_j = 8, d/D_d = 0.1

6. สรุป

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแบบสมมาตรตามแกน 2 มิติตกกระทบพื้นผิวรอยบุ๋ม โดยที่เจ็ทหลังตกกระทบแล้วไหลออกสู่บรรยากาศได้โดยอิสระ ด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการหาผลเฉลยของระบบสมการนาเวีย-สโตกส์แบบอัดตัวไม่ได้กับการจำลองของเจ็ทแบบราบเรียบ ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง 400 ถึง 1200 ระยะห่างจากเจ็ทถึงแผ่นเป้าหมาย (H/D_j) ในช่วง 2 ถึง 8 ความลึกของรอยบุ๋ม (d/D_d) ในช่วง 0.1 ถึง 0.2 และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ทต่อเส้นผ่านศูนย์กลางตามภาพฉายของรอยบุ๋ม (D_j/D_d) ในช่วง 0.25 ถึง 1 และทำการเปรียบเทียบกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทตกกระทบลงบนพื้นผิวเรียบกับรอยบุ๋ม พบว่าการถ่ายเทความร้อนบริเวณตกกระทบของแผ่นรอยบุ๋มมีค่าต่ำกว่าแผ่นเรียบ เนื่องจากแผ่นรอยบุ๋มมีพื้นที่สัมผัสเจ็ทที่ตกลงมามากกว่า ทำให้โมเมนตัมฟลักซ์น้อยกว่าแผ่นเรียบ แต่บริเวณขอบรอยบุ๋ม การถ่ายเทความร้อนของแผ่นรอยบุ๋มมีค่าสูงกว่าแผ่นเรียบ เนื่องจากมีความเร็วสูงกว่าจากความพยายามในการไหลออกจากรอยบุ๋มอย่างรุนแรง เมื่อถึงบริเวณยกตัวของสนามการไหลในบริเวณใกล้ๆ กับขอบรอยบุ๋ม การถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการยกตัวของสนามการไหลส่งผลให้เกิดการไหลย้อนกลับ ที่เป็นเหตุให้เกิดการแยกตัวของชั้นขอบเขตการไหล นอกจากนั้นของไหลยังสูญเสียโมเมนตัมให้กับอากาศแวดล้อม แทนที่จะสามารถถ่ายเทโมเมนตัมกับแผ่นเป้าหมายได้โดยตรงเหมือนกับกรณีของแผ่นเรียบ หลังบริเวณที่เกิดยกตัวของสนามการไหล การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการตกกระทบแผ่นรอยบุ๋มมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นเรียบ เนื่องจากสนามการไหลไหลแนบไปกับพื้นผิวเหมือนกัน และความเร็วมีค่าใกล้เคียงกัน

ในการศึกษานี้สามารถสรุปผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ดังที่กล่าวข้างต้นได้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) เพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเมนตัมของเจ็ทมีค่าเพิ่มขึ้น

2. ระยะห่างจากเจ็ทถึงแผ่นเป้าหมาย (H/D_j) มีผลกระทบน้อยมากต่อการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการถ่ายเทโมเมนตัมของเจ็ทที่กำลังตกลงมากับอากาศแวดล้อมมีค่าน้อย ส่งผลให้โมเมนตัมฟลักซ์บริเวณตกกระทบมีค่าไม่แตกต่างกัน

3. เมื่อความลึกของรอยบุ๋ม (d/D_d) เพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อรอยบุ๋มมีความลึกมากขึ้น พื้นที่สัมผัสกับของไหลก็มากขึ้นตาม ดังนั้นโมเมนตัมต่อพื้นที่บริเวณตกกระทบมีค่าลดลง นอกจากนั้นความลึกที่มากขึ้นหมายถึงความโค้งที่มากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้สนามการไหลที่ออกจากขอบรอยบุ๋มมีการยกตัวสูงขึ้น และเกิดการไหลย้อนกลับ

4. อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ทต่อเส้นผ่านศูนย์กลางตามภาพฉายของรอยบุ๋ม (D_j/D_d) ผลการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับตำแหน่งของขอบรอยบุ๋ม โดยการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งขอบรอยบุ๋มอยู่ไกลจากเจ็ทที่ตกกระทบมากขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

[1] 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.

[2] 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.

[3] Bearman, P.W., Harvey, J.K., 1993, Control of circular cylinder flow by the use of dimples, AIAA Journal, Vol. 31, No. 10, pp.1753-1756.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Kanokjaruvijit, K., Martinez-Botas, R.F., 2005, Jet impingment on a dimpled surface with different crossflow schemes, Int J Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp.161-170.

[8] Kanokjaruvijit, K., Martinez-Botas, R.F., 2007, Heat transfer and pressure investigation of dimple impingement, J Turbomachinery, July 2007, (In press).

[9] จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล และ กุลยา กนกจารุวิจิตร, 2549, การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทแบบสมมาตรตามแกนที่ตกกระทบพื้นผิวรอยบุ๋ม, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, นครราชสีมา

[10] Chemical Engineering Module User's Guide version COMSOL 3.2, September 2005, COPYRIGHT 1994-2004 by COMSOL AB.

[11] Chattopadhyay, H., 2004, Numerical investigations of heat transfer from impinging annular jet, Int J Heat and Mass Transfer, Vol.47, pp.3197-3201.

[12] Angioletti, M., ,E., Ruocco, G., 2005, CFD turbulentmodelling of jet impingement and its Validation by particle image velocimetry and mass transfer measurements, International Journal of Thermal Sicences, Vol.44, pp.349-356.