

การศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตสำหรับการไหล ผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงสี่เหลี่ยมในช่องทางไหล

A Numerical Study of Conjugate Heat Transfer for Flow past a Rectangular Obstacle in Channel

จिरายุส สมจินดา* และ สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 0-2218-6637 โทรสาร 0-2252-2889 E-mail: yus_somjinda@hotmail.com

Jirayus Somjinda* and Sompong Putivisutisak

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Pathumwan, Bangkok 10330 Thailand Tel: 0-2218-6637 Fax: 0-2252-2889 E-mail: yus_somjinda@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงสี่เหลี่ยมที่วางอยู่ที่ผิวด้านล่างของช่องทางไหล โดยวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออัตราการไหลและการถ่ายเทความร้อน เช่น เรย์โนลด์ส นัมเบอร์ พรันด์ทิล นัมเบอร์ และอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การนำความร้อน พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับตัวแปรทั้งสามกล่าวคือ เมื่อค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยตัวแปรที่มีผลมากที่สุดคืออัตราส่วนสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และเมื่อค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าตั้งแต่ 100 ขึ้นไป สิ่งกีดขวางจะมีอุณหภูมิคงที่จนไม่มีผลของการนำความร้อนในของแข็ง (เกรเดียนท์ของอุณหภูมิในของแข็งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์)

Abstract

This paper presents a numerical investigation for conjugate heat transfer of flow over a rectangular obstacle which mounted on the lower channel wall. Parameters affecting the flow and heat transfer phenomena such as Reynolds number, Prandtl number, and thermal conductivity ratio are studied. It is found that all three parameters affect the heat transfer rate, i.e. heat transfer rate increases with the increasing of each parameter. If the thermal conductivity ratio is more than 100, the obstacle temperature can be regarded as a constant. Hence, there is no conduction in the solid part (temperature gradient approaching zero).

1. บทนำ

ปัญหาการถ่ายเทความร้อนเป็นปัญหาที่มีผู้สนใจศึกษากันเป็นจำนวนมากเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนมักเกี่ยวข้องกับงานทางวิศวกรรมหลายประเภท เช่น การถ่ายเทความร้อนออกจากครีบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การถ่ายเทความร้อนออกจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การถ่ายเทความร้อนของรอยเชื่อมออกสู่อากาศ การระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซ และการระบายความร้อนของเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นต้น จะเห็นว่าการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่จะเป็นการถ่ายเทความร้อนจากของแข็งไปสู่ของไหลทั้งสิ้น โดยในอดีตเพื่อให้ปัญหามีความง่ายต่อการคำนวณจึงทำการตั้งสมมติฐานให้อุณหภูมิหรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวของแข็งมีค่าคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วอุณหภูมิหรือฟลักซ์ความร้อนที่บริเวณดังกล่าวอาจมีค่าไม่คงที่ ทำให้การคำนวณการถ่ายเทความร้อนมีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณมีความถูกต้องมากขึ้นจึงต้องพิจารณาการนำความร้อนในของแข็งและการพาความร้อนในของไหลควบคู่กัน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่าการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต

ปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตเริ่มจากการศึกษาปัญหาของการไหลผ่านแผ่นราบโดยใช้วิธีเชิงวิเคราะห์ เช่น Luikov [1], Payvar [2] และ Pozzi and Lupo [3] ศึกษาปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตของแผ่นราบโดยวิเคราะห์การนำความร้อนในของแข็งเพียง 1 มิติ ทำให้ทราบถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งในส่วนของแข็งและของไหล ต่อมา Rizk et al. [4] และ Vynnycky et al. [5] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตของแผ่นราบเช่นกันแต่ได้รวมผลของการนำความร้อนตามแนวแกนไว้ด้วยทำให้ทราบถึง

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ฟลักซ์ความร้อน และนั้สเซลที่นั้มเบอร์ที่ผิวรอยต่อในกรณีต่างๆ

อย่างไรก็ตาม เมื่อต้องการวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนขึ้นทำให้การใช้วิธีเชิงวิเคราะห์ทำได้ยาก จึงมีการพัฒนาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้ในการคำนวณและนำไปประยุกต์ใช้กับงานในหลายๆแขนง เช่น Young and Vafai [6] ได้วิเคราะห์การระบายความร้อนของสิ่งกีดขวางในช่องทางไหลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาถึงผลกระทบของเรย์โนลด์นั้มเบอร์ อัตราส่วนสัมพันธ์การนำความร้อน วิธีการให้ความร้อน และรูปร่างของสิ่งกีดขวาง ว่ามีผลอย่างไรต่อการถ่ายเทความร้อน Chiu et al. [7] ได้แสดงรายละเอียดของผลการทดลองและผลจากวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ของปัญหาการไหลในช่องทางไหลที่มีแผ่นราบได้รับความร้อนจากด้านล่าง พบว่าผลจากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่คิดผลของการนำความร้อนจะเห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจนทั้งในส่วนของคุณภูมิและอัตราการถ่ายเทความร้อน Liaqat and Baytas [8] เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตกับกรณีพิจารณาให้อุณหภูมิที่ขอบมีค่าคงที่ของปัญหาการพาความร้อนแบบอิสระในรูปครึ่งวงกลม พบว่าผลของคอนจูเกตจะเกิดขึ้นเมื่อผนังนำความร้อนมีความหนาและอัตราส่วนสัมพันธ์การนำความร้อนมีค่าน้อย Pratumwal [9] ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตโดยใช้วิธีการประมาณค่าสัมพันธ์ที่ผิวรอยต่อด้วยวิธีค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิค โดยศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติต่างๆต่อการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตและศึกษาผลกระทบของแรงลอยตัวเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่มีต่อการไหล Kanna and Das [10] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตกับปัญหาการไหลผ่าน Backward-facing step โดยศึกษาผลของตัวแปรสี่ตัวคือ เรย์โนลด์นั้มเบอร์ ฟรันด์เทิลนั้มเบอร์ อัตราส่วนสัมพันธ์การนำความร้อน และความหนาของชั้นของแข็ง ว่ามีผลอย่างไรต่อนั้สเซลที่นั้มเบอร์ นั้สเซลที่นั้มเบอร์เฉลี่ย และอุณหภูมิที่ผิวรอยต่อ Jahangeer et al. [11] ศึกษาถ่ายเทความร้อนในชั้นส่วนของเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้โซเดียมเหลวเป็นตัวหล่อเย็น โดยใช้สมการชั้นขอบเขต (Boundary layer equation) ร่วมกับระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่อง ทำให้ทราบถึงช่วงการใช้งานของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อขีดจำกัดของอุณหภูมิ

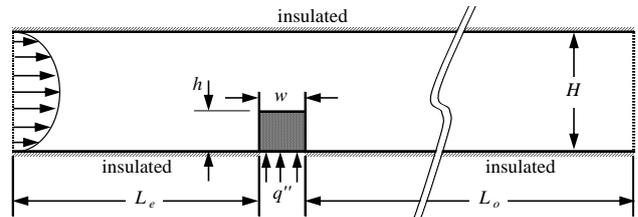
นอกจากการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ากับปัญหาต่างๆแล้วก็ยังมีการพัฒนาเทคนิควิธีต่างๆในการคำนวณเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น Divo and Kassab [12] ได้พัฒนาวิธี Radial basis function meshless method และประยุกต์ใช้กับปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตในลักษณะต่างๆเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากโปรแกรมสำเร็จรูป พบว่าการใช้วิธีดังกล่าวจะใช้กริดในการคำนวณน้อยลงโดยที่ยังให้ผลการคำนวณที่มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี Wang et al. [13] ได้พัฒนาอัลกอริทึม Lattice Boltzmann เพื่อประยุกต์ใช้กับการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตร่วมกับการประมาณค่าที่บริเวณผิวรอยต่อของของแข็ง-ของไหลด้วยวิธี Half lattice division ซึ่งการคำนวณด้วยวิธีดังกล่าวนี้ทำให้หน่วยความจำที่ใช้ในการคำนวณลดลงเป็นอย่างมาก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์วอลุ่มสำหรับการคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตโดยใช้หลักการที่ว่าปริมาณความร้อนที่เข้าและออกจากทั้งของแข็งและของ

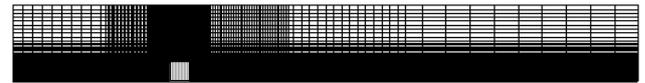
ไหลที่ผิวรอยต่อของทั้งคู่ต้องมีค่าเท่ากัน โดยปัญหาที่นำมาเป็นกรณีศึกษาคือปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงสี่เหลี่ยมหน้าความร้อนที่วางอยู่ที่ผิวด้านล่างของช่องทางไหล ซึ่งปัญหานี้เป็นปัญหาที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานในสาขาต่างๆได้อย่างหลากหลาย โดยเฉพาะกับการระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องควบคุมอุณหภูมิสูงสุดไม่ให้เกิดขีดจำกัดของอุปกรณ์เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

2. ปัญหาและสมการที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะของปัญหาได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยพิจารณาให้เป็นการไหลแบบราบเรียบอัดตัวไม่ได้ในสภาวะคงตัวผ่านช่องทางไหลในสองมิติ คุณสมบัติต่างๆของของไหลมีค่าคงที่และไม่คิดผลจากแรงลอยตัวเนื่องจากอุณหภูมิ



รูปที่ 1 ลักษณะของปัญหา



รูปที่ 2 กริดในโดเมนการคำนวณ

จากสมมติฐานข้างต้นทำให้สมการเชิงอนุพันธ์ที่เป็นตัวกำกับลักษณะทางกายภาพของการไหลและการถ่ายเทความร้อนคือ สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน ลดรูปเป็น

สมการความต่อเนื่อง

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

สมการโมเมนตัม

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

สมการพลังงาน

$$\rho c_p \left(u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

โดยทั้งสามสมการจะถูกคำนวณไปพร้อมๆกันทั้งโดเมนในเวลาเดียวกัน

3. เงื่อนไขขอบ

เงื่อนไขขอบสำหรับปัญหานี้ประกอบไปด้วย

เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า เป็นการไหลแบบพัฒนาเต็มที่โดยมีรูปร่างความเร็วตามสมการที่ (4) และมีอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด

$$u(y) = 6y(1 - y) \quad (4)$$

$$v = 0 \quad (5)$$

$$T = 0 \quad (6)$$

เงื่อนไขขอบที่ทางออก กำหนดให้ตัวแปรทุกตัวกับเว้นความดันมีเกรเดียนต์ตามที่ทิศทางไหลเป็นศูนย์

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

เงื่อนไขขอบที่ผนัง ความเร็วที่ผนังทุกจุดมีค่าเป็นศูนย์ สำหรับผนังด้านบนและด้านล่างของช่องการไหลกำหนดให้เป็นฉนวนยกเว้นบริเวณที่เป็นสิ่งกีดขวาง

$$u_{wall} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

เงื่อนไขขอบที่ผิวรอยต่อ กำหนดให้ฟลักซ์ความร้อนที่ออกจากของแข็งมีค่าเท่ากับฟลักซ์ความร้อนที่เข้าสู่ของไหล

$$-k_s \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = -k_f \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_f \quad (10)$$

สำหรับผนังด้านล่างของสิ่งกีดขวางกำหนดให้ได้รับฟลักซ์ความร้อนที่ $q'' = 1 \text{ W/m}^2$

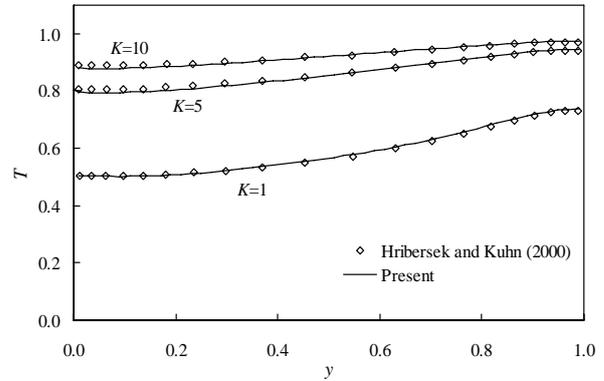
4. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและการตรวจสอบความถูกต้อง

สมการเชิงอนุพันธ์ข้างต้นจะถูกแปลงเป็นสมการพีชคณิตเพื่อนำไปเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มและใช้ขั้นตอนวิธี SIMPLE [14] ในการแก้ปัญหาสมการไหลเพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความดันที่สอดคล้องกัน กริดที่ใช้เป็นกริดแบบเยื้องในพิกัดคาร์ทีเซียน โดยขนาดของกริดที่ใช้หลังจากทดสอบความเป็นอิสระของกริดแล้วคือ 200x75 ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าขนาดของกริดจะมีความละเอียดมากที่สุดที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างของแข็ง (สิ่งกีดขวาง) กับของไหล และจะมีขนาดใหญ่ขึ้นที่บริเวณห่างออกไป

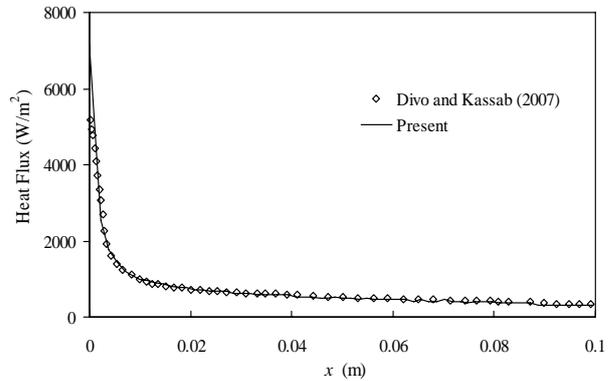
ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมในส่วนของการไหลกับผลการทดลองของ Tropea and Gackstatter [15] และ Carvalho et al. [16] พบว่ารูปร่างของความเร็วที่ได้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีในทุกๆกรณี ซึ่งผลการคำนวณดังกล่าวไม่นำมาแสดงในที่นี้

ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมในส่วนของการถ่ายเทความร้อนกับปัญหาการพาความร้อนแบบอิสระในช่องปิดที่มีผนังนำความร้อนของ Hribersek and Kuhn [17] และปัญหาการพาความร้อนแบบบังคับในช่องทางไหลที่มีผนังนำความร้อนของ Divo and Kassab [12] ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ โดยในรูปที่ 3 เป็นการ

เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวรอยต่อและรูปที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบฟลักซ์ความร้อนที่ผิวรอยต่อ ซึ่งจากรูปทั้งสองจะเห็นว่าผลที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกันกับงานวิจัยก่อนหน้าเป็นอย่างดี



รูปที่ 3 อุณหภูมิที่ผิวรอยต่อของปัญหาการพาความร้อนแบบอิสระที่มีผนังนำความร้อนกรณีค่า K ต่างๆกัน



รูปที่ 4 ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวรอยต่อของปัญหาการพาความร้อนแบบบังคับที่มีผนังนำความร้อน

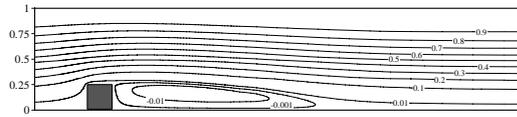
5. ผลการคำนวณ

5.1 ผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

ผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่อสมการไหลกรณี $Pr = 0.72$ ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5 โดยเป็นการเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลที่ $Re = 200, 800, 1400$ และ 2000 ซึ่งจะเห็นว่าระยะการหมุนวนบริเวณหลังสิ่งกีดขวางจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 6 แสดงผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่อหน้าสัมประสิทธิ์ที่ผิวรอยต่อสำหรับกรณี $200 \leq Re \leq 2000$ จะเห็นว่าในช่วงแรกหน้าสัมประสิทธิ์ที่ผิวรอยต่อมีค่าต่ำที่บริเวณมุมล่างด้านซ้ายและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่บริเวณใกล้มุมบนด้านซ้าย หลังจากนั้นหน้าสัมประสิทธิ์ที่ผิวรอยต่อที่บริเวณผิวด้านบนจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและต่อมาจึงลดลงอย่างช้าๆ และที่บริเวณผิวด้านขวาหน้าสัมประสิทธิ์ที่ผิวรอยต่อก็จะลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งจนมีค่าต่ำที่สุดและมีค่าเกือบจะคงที่ไปจนสุดผิวรอยต่อที่มุมล่างด้านขวา โดยจะเห็นว่าเมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้น หน้าสัมประสิทธิ์ที่ผิวรอยต่อก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นั่นคือสามารถระบายความร้อนออกจากสิ่งกีดขวางได้มากขึ้นนั่นเอง



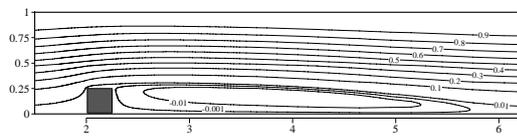
น) Re = 200



ข) Re = 800

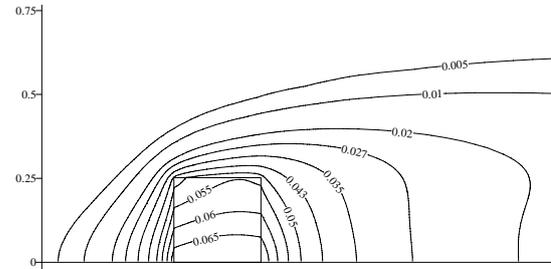


ค) Re = 1400

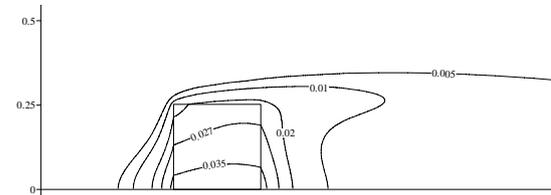


ง) Re = 2000

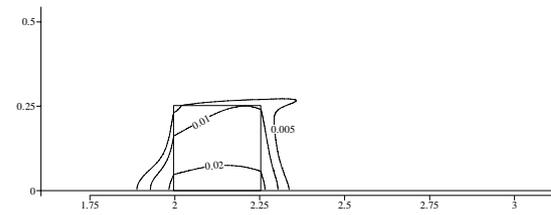
รูปที่ 5 เส้นกระแสการไหลที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆกัน



น) Pr = 0.072

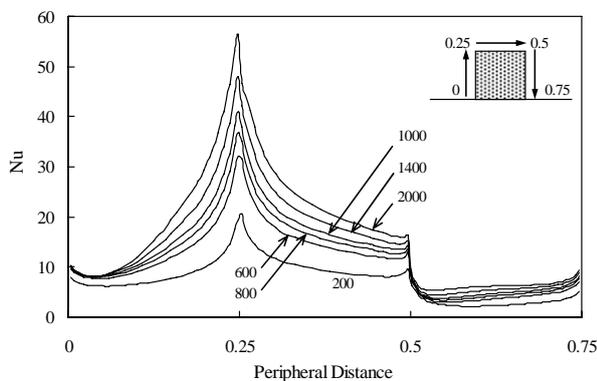


ข) Pr = 0.72



ค) Pr = 7.2

รูปที่ 7 ผลของพรีนัมเบอร์ต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิไร้มิติ



รูปที่ 6 นัสเซลท์นัมเบอร์ที่ผิวรอยต่อกรณี $200 \leq Re \leq 2000$

5.2 ผลของพรีนัมเบอร์

ผลของพรีนัมเบอร์ต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิไร้มิติ กรณี $Re = 1000$ ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าเมื่อพรีนัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal boundary layer) บางลง โดยจะขยับลงมาทางด้านล่างของช่องทางไหลดังจะเห็นได้จากในรูป ก) เส้นอุณหภูมิคงที่ที่สั้นที่สุดซึ่งมีค่า 0.005 จะขยับลงมาชิดกับสิ่งกีดขวางมากกว่าเมื่อพรีนัมเบอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในรูป ข) และ ค) ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนโดยการพาที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นตามค่าพรีนัมเบอร์ และเมื่อของไหลสามารถพาความร้อนได้มากขึ้นนั้นก็สามารถดึงความร้อนออกจากสิ่งกีดขวางได้เพิ่มขึ้นเช่นกันจึงทำให้อุณหภูมิในสิ่งกีดขวางมีค่าลดลง

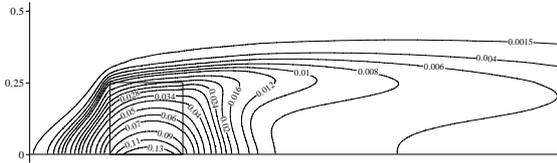
5.3 ผลของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตค่อนข้างมากดังที่แสดงในรูปที่ 8 และตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อค่า K เพิ่มขึ้น อุณหภูมิภายในสิ่งกีดขวางจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยในกรณี $K = 1$ อุณหภูมิไร้มิติสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ 0.1518 และลดลงเป็น 0.0415 ในกรณี K เพิ่มขึ้นสิบเท่า และเมื่อค่า $K = 100$ อุณหภูมิไร้มิติสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ 0.0249 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณี $K = 1000$ และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิจะเห็นว่าในกรณีที่ $K = 100$ และ $K = 1000$ อุณหภูมิในสิ่งกีดขวางมีการกระจายตัวน้อยมากจนกล่าวได้ว่าอุณหภูมิทั่วทั้งสิ่งกีดขวางมีค่าคงที่เท่ากันทำให้การนำความร้อนในของแข็งไม่มีการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต ซึ่งก็เสมือนกับการพาความร้อนโดยทั่วไปที่มีเงื่อนไขขอบเป็นค่าอุณหภูมิคงที่นั่นเอง

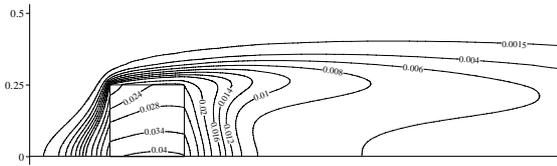
จากการกระจายตัวของอุณหภูมิที่กล่าวมาจะเห็นว่าสอดคล้องกับค่า นัสเซลท์นัมเบอร์ที่ผิวรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 9 โดยจะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้นัสเซลท์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยนั่นคือสามารถถ่ายเทความร้อนออกจากสิ่งกีดขวางได้มากขึ้นอุณหภูมิจึงมีค่าลดลง และเมื่อค่า K มีค่าตั้งแต่หนึ่งร้อยขึ้นไป ค่า นัสเซลท์นัมเบอร์จะไม่มีเปลี่ยนแปลง สำหรับกรณี $K = 1$ สิ่งกีดขวางจะประพฤติตัวเสมือนกับเป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับการไหลของของไหล กล่าวคือ ในกรณีนี้ค่าความต้านทานความร้อนมีค่ามากทำให้ความร้อนถ่ายเทจากของแข็งไปสู่ของไหลได้น้อย ดังนั้น การกระจายตัวของ นัสเซลท์นัมเบอร์จึงมีความแตกต่างออกไปจากกรณีอื่น

ตารางที่ 1 ค่าอุณหภูมิไร้มิติสูงสุดกรณี $K = 1, 10, 100$ และ 1000

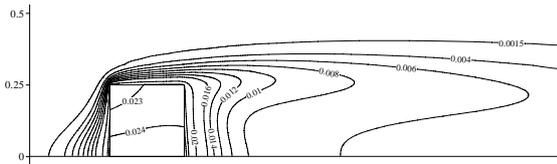
K	1	10	100	1000
θ_{max}	0.1518	0.0415	0.0249	0.0208



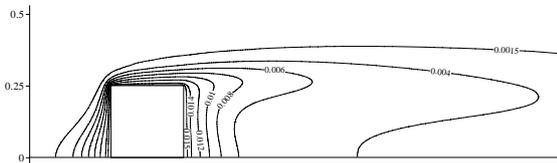
ก) $K = 1$



ข) $K = 10$

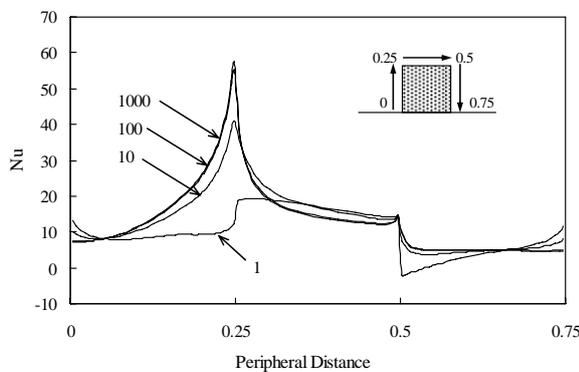


ค) $K = 100$



ง) $K = 1000$

รูปที่ 8 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ค่า K ต่างๆกัน



รูปที่ 9 ผลของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่อไนส์เซลท์ นัมเบอร์ (ค่า $K = 1, 10, 100$ และ 1000)

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตของการไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ได้รับความร้อนจากผิวด้านล่างของช่องการไหล โดยศึกษาถึงผลของเรย์โนลด์ นัมเบอร์ ไนส์เซลท์ นัมเบอร์ และอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การนำความร้อนว่ามีผลกระทบต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนอย่างไร ซึ่งจากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

1) เมื่อเรย์โนลด์ นัมเบอร์ เพิ่มขึ้น ไนส์เซลท์ นัมเบอร์ ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

2) เมื่อพรีนตเทิล นัมเบอร์ มีค่าเพิ่มขึ้น ชั้นขอบเขตความร้อนจะบางลง ของไหลสามารถถึงความร้อนออกจากสิ่งกีดขวางได้เพิ่มขึ้นเป็นผลให้อุณหภูมิมีค่าต่ำลง

3) อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตเมื่อ $K < 100$ โดยถ้ามีค่าเกินไปจากนี้เกรเดียนท์อุณหภูมิภายในของแข็งจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับตัวแปรทั้งสาม กล่าวคือ เมื่อตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยตัวแปรที่มีผลมากที่สุดคืออัตราส่วนสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และเมื่อค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าตั้งแต่ 100 ขึ้นไป สิ่งกีดขวางจะมีอุณหภูมิคงที่จนไม่มีผลของการนำความร้อนในของแข็ง (เกรเดียนท์อุณหภูมิในของแข็งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์)

คำอธิบายสัญลักษณ์

- H = ความสูงของช่องทางไหล, 1 m
- h = ความสูงของสิ่งกีดขวาง, 0.25 m
- w = ความกว้างของสิ่งกีดขวาง, 0.25 m
- L_e = ระยะทางช่วงขาเข้าของช่องทางไหล, 2 m
- L_o = ระยะทางช่วงขาออกของช่องทางไหล, 8 m
- q'' = ฟลักซ์ความร้อน, 1 W/m²
- k_s = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสิ่งกีดขวาง, W/mK
- k_f = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล, W/mK
- K = อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, k_s / k_f
- θ = อุณหภูมิไร้มิติ, $k_f (T - T_e) / q'' H$
- Re = เรย์โนลด์ นัมเบอร์, $2 \rho_f \bar{u} H / \mu_f$
- Pr = พรีนตเทิล นัมเบอร์, $\mu c_p / k$
- Nu = ไนส์เซลท์ นัมเบอร์, $\frac{1}{\theta_w} \frac{\partial \theta_f}{\partial n}$

เอกสารอ้างอิง

1. Luikov, A.V., Conjugate Convective Heat Transfer Problems. International Journal of Heat and Mass Transfer 17 (1974): 257-265.
2. Payvar, P., Convective Heat Transfer to Laminar Flow over a Plate of Finite Thickness. International Journal of Heat and Mass Transfer 20 (1977): 431-433.

3. Pozzi, A. and Lupo, M., The Coupling of Conduction with Forced Convection Over Flat Plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 32 (1989): 1207-1214.
4. Rizk, T.A., Kleinstreuer, C. and Ozisik, M.N., Analytic Solution to the Conjugate Heat Transfer Problem for Flow past a Heated Block. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 35 (1992): 1519-1525.
5. Vynnycky, M., Kimura, S., Kanav, K. and Pop, I., Forced Convection Heat Transfer from a Flat Plate : the Conjugate Problem. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 41 (1998): 45-59
6. Young, T.J. and Vafai, K., Convective Cooling of a Heated Obstacle in a Channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 41 (1997): 3131-3148.
7. Chiu, W.K.S., Richards, C.J. and Jaluria Y., Experimental and Numerical Study of Conjugate Heat Transfer in a Horizontal Channel Heated From Below. *Journal of Heat Transfer* 123 (2001): 688-697.
8. Liaqat, A., and Baytas A. C., Numerical Comparison of Conjugate and Non-Conjugate Natural Convection for Internally Heated Semi-Circular Pools. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 22 (2001): 650-656.
9. Pratumwal, Y., Finite Volume Method for Analysis of Conjugate Heat Transfer. Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, 2002.
10. Kanna, P.R. and Das, M.K., Conjugate Heat Transfer Study of Backward-Facing Step Flow – A Benchmark Problem. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (2006): 3929-3941.
11. Jahangeer, S., Ramis M.K., and Jilani, G., Conjugate Heat Transfer Analysis of a Heat Generating Vertical Plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50 (2007): 85-93.
12. Divo, E. and Kassab, A. J., An Efficient Localized Radial Basis Function Meshless Method for Fluid Flow and Conjugate Heat Transfer. *Journal of Heat Transfer* 129 (2007): 124-136.
13. Wang, J., Wang, M. and Li, Z., A Lattice Boltzmann Algorithm for Fluid-Solid Conjugate Heat Transfer. *International Journal of Thermal Sciences* 46 (2007): 228-234.
14. Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.
15. Tropea, C.D., and Gackstatter, R., The Flow Over Two-Dimensional Surface-Mounted Obstacles at Low Reynolds Numbers. *Journal of Fluids Engineering* 107 (1985): 489-494.
16. Carvalho, M.G., Durst, F., and Pereira, J.C.F., Predictions and Measurements of Laminar Flow Over Two-Dimensional Obstacle. *Applied Mathematical Modelling* 11 (1987): 23-34.
17. Hribersek, M., and Kuhn, G., Conjugate Heat Transfer by Boundary-Domain Integral Method. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 24 (2000): 297-305.