

การจำลองแบบการถ่ายโอนความร้อนแบบคอนจูเกตของชิปเดี่ยวในระบบวงจรที่หนาแน่น Simulation of Conjugate Heat Transfer of a Single Electronic Chip in a Compact PCB System

กนกรัตน์ ไชยสุทธิ และ เด่นพงษ์ สูดภักดี

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002
โทรศัพท์ +66-43-244296, โทรสาร +66-43-245878, E-mail : chechaz@hotmail.com, denpong@kku.ac.th

Kanokrat Chaiyasut and Denpong Soodphakdee

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002, Thailand., Tel. +66-43-244296, Fax: +66-43-245878, E-mail : chechaz@hotmail.com, denpong@kku.ac.th

บทคัดย่อ

ระบบระบายความร้อนมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพในการทำงานและอายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จากที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มฟังก์ชันการทำงานและขนาดที่เล็กกะทัดรัดทำให้ประเด็นทางความร้อนได้รับการสนใจมากขึ้น การระบายความร้อนด้วยอากาศเป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากทำได้ง่าย งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนแบบคอนจูเกตในระบบวงจรที่มีความหนาแน่นเช่นระบบวงจรในคอมพิวเตอร์กระเป๋าหิ้ว เนื่องจากวงจรมีความหนาแน่นมากเป็นผลให้พฤติกรรมของการถ่ายโอนความร้อนมีความซับซ้อน เพราะฉะนั้นการถ่ายโอนการความร้อนและการไหลจึงมีความแตกต่างจากคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลแบบตั้งโต๊ะระเบียบวิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณถูกนำมาใช้ในการจำลองแบบการถ่ายโอนความร้อนแบบคอนจูเกต โดยจำลองแบบหน่วยประมวลผลของคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กติดตั้งในช่องที่มีความสูง 1 เซนติเมตร แบบ 2 มิติ ทำการวิเคราะห์การพาความร้อนแบบผสมและการพาความร้อนแบบบังคับ ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ผลการศึกษาจะนำเสนอในรูปของสหสัมพันธ์ของการถ่ายโอนความร้อนและการไหลและการจำลองแบบพฤติกรรมของการถ่ายโอนความร้อนแบบคอนจูเกตในรูปแบบกราฟิก

Abstract

Cooling system has an influence on performance, reliability and life-time of electronic equipment. Thermal issue of high functional and compactness trends of the devices is more concerned in nowadays. Air cooling has been widely used since its ease. This study investigates conjugate heat transfer in compact PCB system i.e. portable equipments. The compact packaging of high heat flux equipment of portable computer

results complex heat transfer behavior and hence heat transfer and flow phenomenon are different from those of desktop PCs. Conjugate heat transfer simulation was investigated numerically using CFD code. A single chip of notebook CPU mounted in 1cm-height space was chosen to conduct 2D, laminar mixed and forced convection simulations. The heat transfer and flow correlations are presented as well as graphical representation of conjugate heat transfer phenomena

1. บทนำ

พัฒนาการอย่างก้าวกระโดดของเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำส่งผลให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีฟังก์ชันการทำงานมากขึ้นโดยที่ขนาดเล็กลง แต่ปัญหาทางความร้อนก็มีความรุนแรงมากขึ้นเป็นเงาตามตัวเนื่องจากความร้อนมีผลต่ออายุการใช้งานและประสิทธิภาพในการทำงาน ปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตเป็นปัญหาการพาความร้อนจากพื้นผิวของแข็งสู่ของไหลโดยพิจารณาทั้งการนำความร้อนในของแข็งและการพาความร้อนสู่ของไหลที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ในทางปฏิบัติการถ่ายโอนความร้อนล้วนแต่เป็นปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตโดยธรรมชาติ ซึ่งในบางปัญหาอาจไม่คิดผลของการคอนจูเกตเพื่อให้ปัญหาง่ายขึ้น ปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตพบมากในงานระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยอากาศ ในบอร์ดหรือแผ่นพิมพ์วงจรมีชิปและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนติดตั้งกระจายอยู่ ความร้อนสามารถถ่ายโอนออกไปทั้งโดยการพาความร้อนสู่อากาศและการนำความร้อนไปตามบอร์ด การวิเคราะห์ทางความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยคำนึงผลของการคอนจูเกตซึ่งใกล้เคียงกับงานจริงจะช่วยให้การออกแบบระบบระบายความร้อน การจัดวางและการบรรจุมีความเหมาะสมขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับระบบ

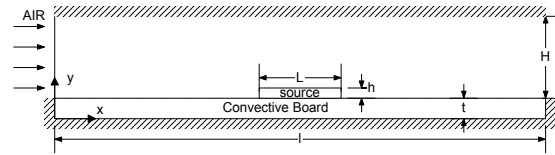
วงจรที่มีความหนาแน่นเช่นอุปกรณ์จำพวกคอมพิวเตอร์กระแสไฟฟ้าซึ่งมีขนาดพื้นที่ที่จำกัด

แบบจำลองปัญหาแหล่งความร้อนอยู่ในช่องขนาน ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตในงานการระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยอากาศเป็นจำนวนมาก การวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายโอนความร้อนแบบคอนจูเกตทำได้ด้วยการทดลอง การใช้ระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ และการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยความซับซ้อนของสมการประกอบกับประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์สูงขึ้นทำให้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้รับความนิยมและมีการพัฒนาเทคนิคการแก้ปัญหาอย่างต่อเนื่อง การค้นพบและพัฒนาระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD) ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาทำให้การวิเคราะห์ออกแบบระบบทางความร้อนทำได้สะดวกและประหยัดเวลามากขึ้น ซึ่งมีการพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ระเบียบวิธีทางพลศาสตร์การไหลเป็นจำนวนมากและได้รับการยอมรับกันทั่วไป

จากการสำรวจงานวิจัยในอดีตพบว่าแบบจำลองของแต่ละงานวิจัยมีความแตกต่างกันตามลักษณะรูปทรง การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและรูปแบบของการไหล โดยมีความพยายามให้ใกล้เคียงกับปัญหาจริงขึ้นเรื่อยๆ เริ่มจากปัญหาแหล่งความร้อนแบบแผ่นบางฝังอยู่ในช่องขนาน Sugavanam *et al.* [1] ศึกษาแหล่งความร้อนเป็นแผ่นบาง 1 อันฝังอยู่บนบอร์ดศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของบอร์ดและเรย์โนลด์ส้นัมเบอร์ต่อการถ่ายโอนความร้อนแบบคอนจูเกตใน 2 มิติ ใน 3 มิติศึกษาโดย Gorski *et al.* [2] ซึ่งพบว่าในกรณีที่มีบอร์ดมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำผลการวิเคราะห์ใน 2 มิติและ 3 มิติมีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะเห็นความแตกต่างมากขึ้นเมื่อบอร์ดมีค่าการสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งความแตกต่างนี้จะลดลงเมื่อความเร็วอากาศมีค่ามากขึ้น ต่อมาเพื่อให้การไหลมีความซับซ้อนเหมือนจริงขึ้นมีงานวิจัยจำนวนมากทำการศึกษาค้นคว้าแหล่งความร้อนมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมหลายอันวางในช่องการไหลทั้งใน 2 มิติ [3] และ 3 มิติ [4] ซึ่งงานวิจัยที่กล่าวมานี้ส่วนใหญ่ให้เงื่อนไขความร้อนป้อนเข้าเป็นค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งให้ผลแตกต่างกับกรณีแหล่งความร้อนที่เป็นความร้อนต่อหน่วยปริมาตรซึ่งมีการศึกษาผลของชนิดของแหล่งความร้อนโดย Nigen, J. *et al.* [5] ซึ่งโดเมนของแหล่งความร้อนประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด Park *et al.* [6] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความสูงของช่องขนานที่มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนแบบคอนจูเกตโดยที่แหล่งความร้อนมีรายละเอียดมากขึ้นและกล่าวถึงแนวโน้มที่ระบบวงจรต่าง ๆ จะรวมอยู่ในชิปเดียวมากขึ้นหรือที่เรียกว่า System on Chip (SoC) ซึ่งในอนาคตระบบวงจรอาจมีแค่หน่วยความจำกับหน่วยประมวลผล 1 อันที่ถือเป็นแหล่งความร้อนขนาดใหญ่ของระบบก็ว่าได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับระบบวงจรที่มีความหนาแน่นเช่นอุปกรณ์จำพวกคอมพิวเตอร์กระแสไฟฟ้าที่มีขนาดพื้นที่ที่จำกัดซึ่งพฤติกรรมการถ่ายโอนความร้อนและการไหลมีความแตกต่างจากการไหลในบริเวณขนาดใหญ่กว่า จุดมุ่งหมายในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือเพื่อศึกษาการถ่ายโอนความร้อนแบบคอนจูเกตในช่วงการพาแบบบังคับและการพาแบบผสมโดยจำลองแบบจากหน่วยประมวลผลของคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กติดตั้งในช่องสี่เหลี่ยม

2. ลักษณะของปัญหา

โดเมนของปัญหาดังรูปที่ 1 เป็นการแสดงปัญหาใน 2 มิติ ของช่องขนานความสูง H และความยาว l โดยแผ่นขนานด้านล่างเป็นบอร์ดที่นำความร้อนได้ซึ่งมีความหนา t ซึ่งผนังด้านบนของบอร์ดมีการหุ้มฉนวน และไม่คิดการถ่ายโอนความร้อนของแผ่นขนานด้านบน แหล่งความร้อนมีความสูง h และความยาว L วางอยู่บนบอร์ด ในการศึกษานี้พิจารณาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องขนานโดยทางเร็วที่ทางเข้าเป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ



รูปที่ 1 ลักษณะของปัญหา

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุ

ชื่อ	วัสดุ	ρ (kg/m^3)	k ($W/m.K$)	C_p ($J/kg.K$)	q'' (W/m^2)
ชิป	ซิลิกอน	2,330	153	712	302,313
บอร์ด	FR4	1,920	1,300	0.25,0.89	-

3. สมการควบคุมและกระบวนการวิธีเชิงตัวเลข

โดเมนปัญหาประกอบด้วยส่วนที่เป็นของไหลและของแข็ง สมการควบคุมของปัญหามีดังต่อไปนี้ สมการที่(1) – (4) เป็นสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงานของของไหล สมการที่ (5) เป็นสมการอนุรักษ์พลังงานของของแข็ง

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) \quad (2)$$

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) \quad (3)$$

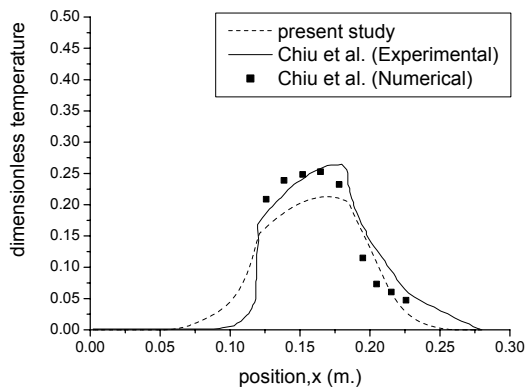
$$\rho C_p (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}) = k(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) \quad (4)$$

$$0 = k(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) + q'' \quad (5)$$

โดยมีสมมติฐานคือพิจารณาที่สภาวะการไหลคงตัวในช่วงการไหลแบบราบเรียบใน 2 มิติ อากาศเป็นของไหลไม่อัดตัว สมบัติของอากาศคงที่และไม่ขึ้นกับทิศทาง ในช่วงการพาแบบผสมคิดผลของแรงลอยตัวโดยใช้วิธีประมาณค่าความหนาแน่นของ Boussinesq และไม่คิดผลของการแผ่รังสี ในการคำนวณใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์คอนโทรลวอลุ่ม (Finite Control Volume) ในการเปลี่ยนรูปสมการอนุพันธ์เป็นระบบสมการพีชคณิต ใช้วิธี SIMPLEX สำหรับหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็ว โดยใช้โปรแกรม FLUENT 6 ในการวิเคราะห์ ซึ่งได้

ทำการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยใช้กรณีศึกษาจากงานของ Chiu *et al.* [7] ซึ่งทำการศึกษาคำนวณโดยการทดลองและการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณกรณีศึกษาโดยใช้โปรแกรม รูปที่ 2 เป็นผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันในระดับที่น่าพอใจจึงสามารถนำโปรแกรมดังกล่าวมาใช้งานได้

ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความมั่นใจในการใช้ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหล ได้ศึกษาความเป็นอิสระของกริด (Grid independent study) เพื่อเลือกขนาดกริดที่มีความเหมาะสมต่อปัญหาทั้งในด้านความถูกต้องของผลเฉลย เวลาและทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณ โดยการเพิ่มจำนวนเซลล์ขึ้นเรื่อยๆจนค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้น ผิวของชิปมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 2% ในการศึกษานี้เลือกใช้กริดชนิดสี่เหลี่ยมสม่ำเสมออัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของเซลล์ 4:1 ตลอดโดเมนจำนวนประมาณ 90,000 เซลล์ และใช้กฎทรงมวลและสมดุลพลังงานในการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณแต่ละครั้ง



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบผลการศึกษาของ Chiu *et al.* กับผลการคำนวณโดยโปรแกรมทางพลศาสตร์การไหล

4. ผลการศึกษา

ในการศึกษาคำนวณครั้งนี้สนใจลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบคอนจูเกชันบนบอร์ดที่นำความร้อนได้ในช่วงการพาความร้อนแบบบังคับและแบบผสม ซึ่งประเด็นที่ได้รับความสนใจในทางปฏิบัติของงานระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยอากาศได้แก่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน และอุณหภูมิสูงสุดของแหล่งความร้อน

ทำการคำนวณในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่า $0.128 \leq Re \leq 2,561$ (โดย $Re = 2UH/v$) และอุณหภูมิอากาศเข้าของอากาศ $T_a = 25^\circ C$ สมบัติของอากาศ $k = 0.02551 \text{ W/m} \cdot K$, $\rho = 1.184 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 1.007 \text{ kJ/kg} \cdot K$ และ $\mu = 1.849 \text{ kg/m} \cdot s$ กำหนดให้ขนาดต่างๆ ของโดเมนปัญหาในรูปที่ 1 มีค่าดังนี้ $H = 1 \text{ ซม.}$, $l = 30 \text{ ซม.}$, $t = 0.2 \text{ ซม.}$, $h = 0.0854 \text{ ซม.}$ และ $L = 1.162 \text{ ซม.}$

รูปที่ 3-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Temperature rise) ค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (Surface heatflux) และค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉพาะที่ ($Nu = hL/k$) ตรงบริเวณรอยต่อ

ระหว่างของแข็งกับของไหลที่ $Re = 0.128, 12.8$ และ $1,280$ ตามลำดับ เส้นทางการถ่ายโอนความร้อนจากชิปที่สนใจคือการพาความร้อนสู่อากาศโดยตรงทางพื้นผิวและการนำความร้อนไปตามบอร์ดแล้วถ่ายโอนสู่อากาศ

ที่ $Re=1,280$ ในรูปที่ 3 อุณหภูมิของบอร์ดเริ่มมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศเข้าตั้งแต่ระยะ $x = 0.075 \text{ m}$. และอุณหภูมิสูงสุดอยู่ในบริเวณผิวบนของชิปที่ระยะ $0.1 \leq x \leq 0.1162 \text{ m}$. หลังจากนั้นก็จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่ง แสดงว่าความร้อนจากชิปมีการถ่ายโอนไปตามบอร์ดทางด้านหน้าแล้วถ่ายโอนสู่อากาศ ซึ่งสอดคล้องกับกราฟการเปลี่ยนแปลงของความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ในรูปที่ 4 และสังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ไปทางด้านหลังของบอร์ดเกิดขึ้นในระยะสั้นๆ หลังชิปและระยะหลังจากนั้นก็มีค่าเป็นศูนย์และคงที่จนสุดปลายของบอร์ด ดังนั้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทางด้านหลังของบอร์ดจึงไม่ได้เป็นผลมาจากการพาความร้อนจากบอร์ดสู่อากาศ ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 5 ที่ค่า Nu ในบริเวณดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์

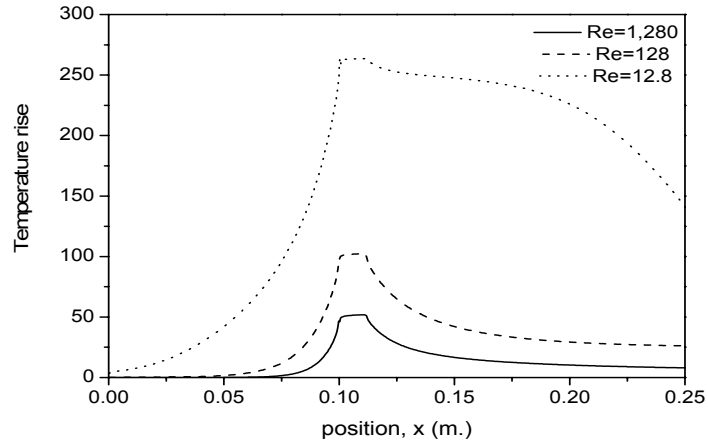
ที่ $Re=128$ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่บริเวณผิวบนของชิปมีค่าลดลงแต่บริเวณรอบๆ ชิปมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความเร็วอากาศมีการลดลง การระบายความร้อนด้วยการพาแบบบังคับต่ำลง ดังนั้นการถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อนในบอร์ดและในอากาศจึงมีมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่และอุณหภูมิมีการกระจายตัวออกไปที่ในระยะที่กว้างขึ้นซึ่งจะเห็นในบอร์ดทางด้านหน้าได้ชัดกว่าบอร์ดทางด้านหลัง

ที่ $Re=12.8$ เมื่อเปรียบเทียบกับ 2 กรณีแรกแล้วการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่บริเวณบอร์ดทางด้านหน้าของชิปมีค่าสูงที่สุดและมีค่าต่ำสุดในบริเวณผิวบนของชิปและบอร์ดทางด้านหลัง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความร้อนถ่ายโอนไปตามบอร์ดทางด้านหน้าได้ง่ายกว่าบอร์ดทางด้านหลัง ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่า Nu และสังเกตได้ว่ามีค่า Nu ติดลบในบริเวณบอร์ดทางด้านหลังซึ่งหมายถึงอากาศที่ร้อนกว่ามีการถ่ายโอนความร้อนไปสู่อากาศที่เย็นกว่า

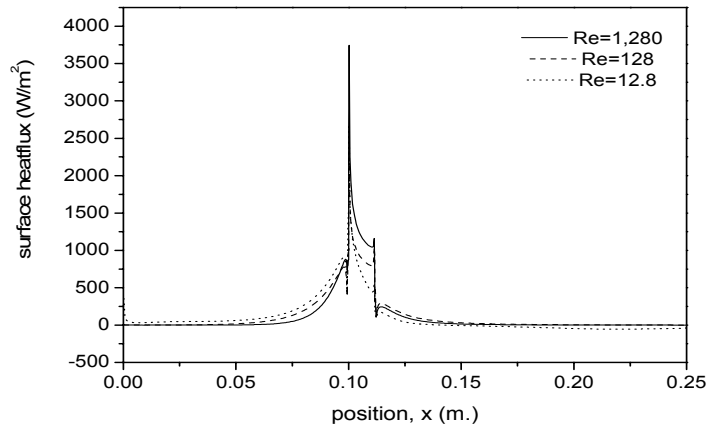
สำหรับปัญหาการถ่ายโอนความร้อนที่ไม่คิดผลของการคอนจูเกชันโดยทั่วไปแล้วพิจารณาในช่วงการไหลที่ $Re/Gr^{0.5} < 1$ เป็นการพาแบบอิสระ (โดย $Gr = g\beta\Delta T L^3/v^2$ และ $\overline{Nu} = hL/k_s$) และการแบ่งช่วงของการพาความร้อนทำได้โดยการใช้ 5 % deviation rule by Sparrow [8] โดยพลอตค่า \overline{Nu} ที่การไหลค่าต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนผิวชิป (\overline{Nu}) กับค่า $Re/Gr^{0.5}$ แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งมีเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและกราฟที่ได้จากสหสัมพันธ์ในสมการ (6) ซึ่งการวิเคราะห์หาสหสัมพันธ์ทำได้โดยการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลและสหสัมพันธ์มีค่าไม่เกิน 1% และ ค่า \overline{Nu} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อ $Re/Gr^{0.5}$ มีค่าต่ำกว่า 1 และความชันของกราฟมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อ \overline{Nu} มีค่ามากขึ้นเมื่อ $Re/Gr^{0.5}$ มีค่ามากขึ้น

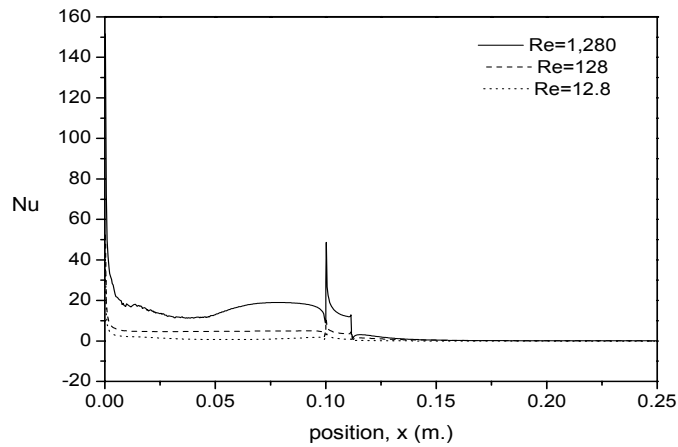
$$\overline{Nu} = (0.0556 + 60.152 \cdot \frac{Re}{Gr^{0.5}})^{0.374} \quad (6)$$



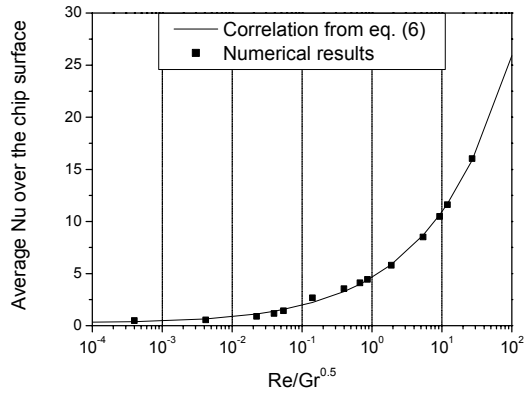
รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตรงบริเวณรอยต่อระหว่างของแข็งและของไหลที่อุณหภูมิขาเข้า $T_a = 25^\circ\text{C}$



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของค่าฮีฟลักซ์ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างของแข็งและของไหลที่อุณหภูมิขาเข้า $T_a = 25^\circ\text{C}$

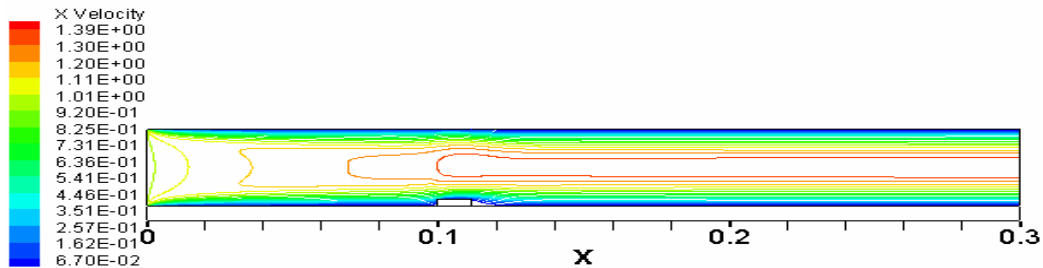


รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของค่า Nu ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างของแข็งและของไหลที่อุณหภูมิขาเข้า $T_a = 25^\circ\text{C}$

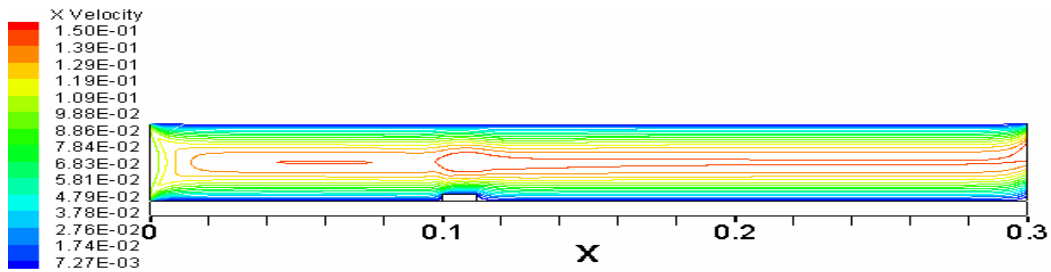


รูปที่ 7-9 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วนในแกน x ที่ Re = 0.128, 12.8 และ 1,280 ตามลำดับ รูปที่ 7 และ 8 ล้าการไหลมีลักษณะคงที่ขนานไปตามทิศทางของการไหลเป็นผลของการไหลในช่วงพหุความร้อนแบบบังคับ รูปที่ 9 ความเร็วมีค่าติดลบใน 2 บริเวณคือทางออกของช่องขนาน (ด้านติดกับผนังล่าง) และบริเวณใกล้ๆผนังด้านบนในระยะก่อนจะถึงชิป ซึ่งจะสังเกตเห็นลักษณะเป็นเซลล์ของการไหลที่หมุนวนจำนวน 2 เซลล์ ล้าการไหลมีทิศทางเบี่ยงขึ้นไปทางด้านบนและไหลออกในด้านที่ติดกับผนังด้านบนซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอยตัวเริ่มมีผลมากขึ้นของการไหลในช่วงการพหุความร้อนแบบผสม

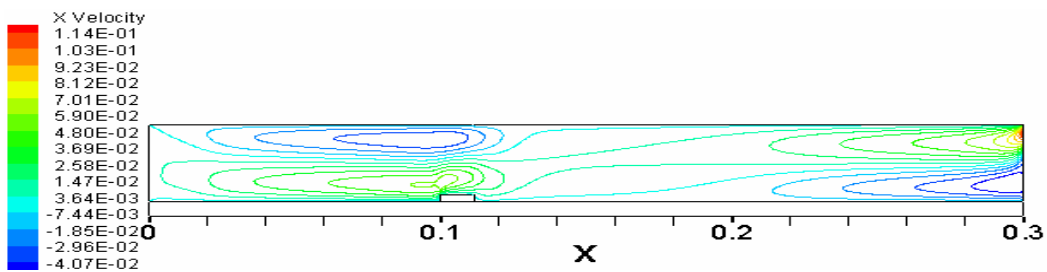
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า \overline{Nu} บนผิวชิปกับ $Re/Gr^{0.5}$ ที่อุณหภูมิอากาศเข้าของอากาศ $T_a = 25^\circ C$



รูปที่ 7 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วน Re = 1,280



รูปที่ 8 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วน Re = 128



รูปที่ 9 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วน Re = 12.8

5. สรุป

รายงานฉบับนี้เป็นการศึกษาปัญหาใน 2 มิติของการถ่ายโอนความร้อนแบบคอนจูเกตจากชิปเดี่ยวที่อยู่ในช่องขนานโดยแผ่นล่างคือบอร์ดที่นำความร้อนได้ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ผลจากการคำนวณโดยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลแสดงกราฟของการจำลองแบบการไหลและการถ่ายโอนความร้อนในช่วง $0.128 \leq Re \leq 2,561$ ซึ่งได้ทำการสังเกตพฤติกรรมของอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ และค่าตัวเลขที่นัมเบอร์ซึ่งมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอตรงบริเวณรอยต่อระหว่างของแข็งกับของไหลโดยขึ้นอยู่กับ การไหลและสามารถประมาณช่วงการพาความร้อนแบบบังคับและการพาความร้อนแบบผสมได้คร่าวๆ สหสัมพันธ์ของการไหลและการถ่ายโอนความร้อนนำเสนอโดยความสัมพันธ์ของตัวแปรไรมันัสเซลที่นัมเบอร์ เรย์โนลด์ที่นัมเบอร์และแกรชอฟนัมเบอร์

6. เอกสารอ้างอิง

1. Sugavanam, R., Ortega, A. and Choi, C. Y., 1995, "A Numerical Investigation of Conjugate Heat Transfer from a Flush Heat Source on a Conductive Board in Laminar Channel Flow," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.38, pp. 2969-2984.
2. Korski, M. A. and Plumb, O. A., 1992, "Conjugate heat transfer from an isolated heat source in a plane wall," in *ASME HTD-210, Fundamentals of Forced Convection Heat Transfer* (M. A. Ebadian and P. H. Oosthuizen), NY:ASME, pp.99-105.
3. Choi, C.Y., Kim, S. J., and Ortega, A., 1994, "Effects of Substrate Conductivity on Convective Cooling of Electronic Component," *Trans. Of ASME*, Vol.116, pp. 198-205.
4. Ortega, A., 1996, "Conjugate Heat Transfer in Forced Air Cooling of Electronic Equipments," in *Air cooling Technology for Electronic Equipments* (J. K. Kim and S. W. Lee, eds.), Boca Raton, FL:CRC Press, pp.103-171.
5. Nigen, J.S. and Amon, C.H., 1995, "Effect of material composition and localized heat generation on time-dependent conjugate heat transport," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp.1565-1576.
6. Park, S. H., Kim, K. H., Hong, T., and Nakayama, W., 1999, "Conjugate Heat Transfer from a Surface-Mounted Heat Source Through the Plate Substrate," *Inter.Pack*.
7. Chiu, W. K. S., Richards, C. J., and Jaluria, Y., 2001, "Experimental and Numerical Study of Conjugate Heat Transfer in a Horizontal Channel Heated from Below," *Trans. Of ASME*, Vol.123, pp. 688-697.
8. Choi, C.Y., and Kim, S. J., 1996, " Conjugate mixed convection in a channel : modified five percent deviation rule," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp.1223-1234.