

การเพิ่มความสามารถของการ ถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์

Enhancement of Heat Transfer in Electronic Equipment

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ ที่มีต่อพฤติกรรมการไหลและอัตราการถ่ายเทความร้อนของชิพ ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง เพื่อหาแนวทางในการลดความร้อนที่เกิดขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re_b) ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล (Blockage ratio; Br) และค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพ (S/W) การศึกษาได้ใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล กระทำการคำนวณในสภาวะการไหลคงตัว (Steady flow) ค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง $100 < Re_b < 400$ ผลการศึกษา พบว่า การปรับเพิ่มค่า Re_b , Br และ S/W ที่สภาวะการไหลคงตัวในขอบเขตที่เหมาะสม ช่วยส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพดีขึ้นได้

คำหลัก: ชิพ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การถ่ายเทความร้อน การคำนวณเชิงตัวเลข

Abstract

The purpose of this research is to study the parameters affecting on the behavior of flow and heat transfer of chips. The parameters considered are the Reynolds number (Re_b), the blockage ratio (Br), which is defined as the ratio of the thickness of the chip to the height of the computational domain and the ratio of chip spacing to the chip length (S/W). The calculations are performed in a steady laminar flow by varying the Reynolds number $100 \leq Re_b \leq 400$. The results show that increasing Re_b , Br , and S/W affect the behavior of flow and the enhancement of the heat transfer coefficient of the chip.

Keywords: Chip, Electronic equipment, Heat transfer enhancement, Numerical method.

1. บทนำ

ชิพ(Chip) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการปลดปล่อยความร้อนสูง ความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิพมีค่ามากหรือน้อยนั้น นอกจากขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ชิพต้องการแล้ว ยังมีระยะเวลาการทำงาน การรับความร้อนจากแผงวงจรอื่นที่ติดกันและจากอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมรอบๆ ถ้าการจัดการในเรื่องของความร้อนที่เกิดขึ้นไม่มีประสิทธิภาพดีเพียงพอ อาจทำให้อายุการใช้งานของชิพล้นลงหรือเกิดความเสียหายต่อชิพได้ จึงจำเป็นต้องหาแนวทางแก้ไขความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาหาแนวทางแก้ไขความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิพ เช่น J. Davalath, et al. (1) ศึกษาการพาความร้อนแบบบังคับ โดยใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขคำนวณหาผลการถ่ายเทความร้อนจากชิพจำนวน 3 ตัว ภายใต้สภาวะการไหลคงตัว C. W. Leung, et al. (2) ได้ใช้โมเดลจำลองทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนของชิพ 12 ตัว H.W. Wu, et al. (3) ศึกษาถึงผลของการติดตั้งแผ่นบังคับทิศทาง การไหลของอากาศเหนือแผงชิพตัวแรกจากชิพจำนวน 5 ตัว เพื่อหาผลที่มีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในสภาวะการไหลไม่คงตัว น้านด์ ไซติวิครุต (4) ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของการจัดวางชิพแบบแถวตรง 90 องศา และแบบเฉียงทำมุม 45 องศา กับทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศ โดยทำการทดลองภายในอุโมงค์ลมความเร็วต่ำ

สำหรับงานวิจัยนี้เน้นศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ช่วยส่งเสริมให้อากาศสามารถถ่ายเทความร้อนบนชิพได้ดีขึ้น ได้แก่ ค่าตัวเลขเรย์-โนลด์ ($Re_b = U_o B/\nu$) (ความยาวจำเพาะเป็นความ-สูงของชิพ) ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล ($Br = B/H$) และค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพ (S/W) โดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล บนพื้นฐานวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method) การคำนวณกระทำในสภาวะการไหลคงตัว

2. ทฤษฎีการคำนวณ

การคำนวณในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการของ QUICK ในการประมาณเทอมการพาและเทอมการแพร่ กระบวนการหาคำตอบใช้วิธี SIMPLE และใช้วิธีการจัดวางตัวแปรแบบ Staggered grid

2.1 สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน

สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน สำหรับใช้ในการคำนวณ ได้สมมติให้อากาศเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ชนิดนิวโทเนียน การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว พิจารณาการคำนวณโดยการพาความร้อนแบบบังคับ ($Gr_b/Re^2 < 1.0$) ไม่พิจารณาผลกระทบของการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งได้สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อนดังนี้

สมการเชิงอนุพันธ์ของความต่อเนื่อง

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

สมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัม

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

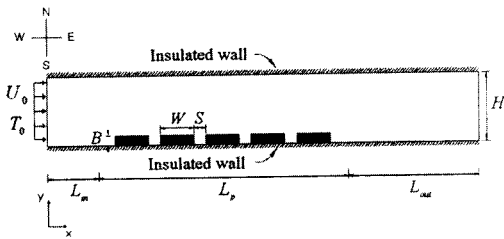
สมการเชิงอนุพันธ์ของพลังงาน

$$\frac{\partial u_i T}{\partial x_i} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} \quad (3)$$

เมื่อ $\alpha = k/\rho c_p$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อน (Diffusivity coefficient)

สำหรับค่าเงื่อนไขขอบเขตการคำนวณ กำหนดให้ สภาวะทางเข้า อากาศไหลเข้าอย่างสม่ำเสมอ (Uniform flow) และมีค่าตัวเลขพรันด์เทิล (Prandtl number) คงที่เท่ากับ 0.712 สภาวะทางออกใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตแบบ Constant pressure boundary ค่าเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังเป็น No-slip condition กำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตบนผนังแบบจำลอง สำหรับการคำนวณด้านพลังงานเป็น Adiabatic boundary condition และกำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ที่ผิวชิพมีค่าคงที่

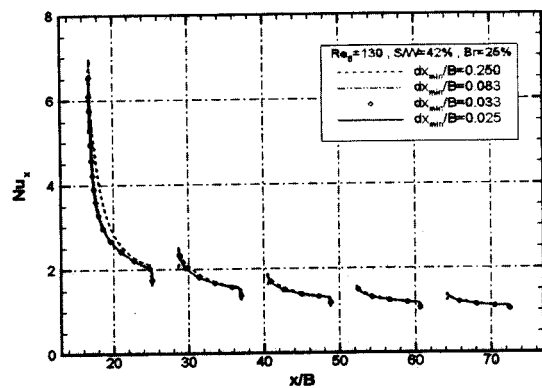
3. การกำหนดปัญหา



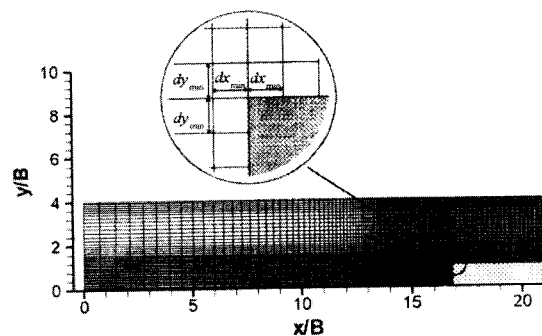
รูปที่ 1 แบบจำลองการไหล (Computational domain)

การคำนวณได้กระทำบนแบบจำลองการไหล ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่ $L_{in} = 3B$, $L_p = 83.3B$, $L_{out} = 30B$ สำหรับใช้ในการคำนวณการไหลใน 2 มิติ สำหรับการคำนวณในสภาวะการไหลคงตัวนี้ ได้ใช้วิธีการจัดวางกริดในแบบจำลองการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) สำหรับขนาดของกริดนั้น ผลจากการศึกษา Grid Independent ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าขนาดของกริดที่เหมาะสมคือ $dx_{min}/B = 0.033$ ซึ่ง dx_{min} เป็นขนาดกริดเล็กที่สุดภายในแบบจำลองการไหล และมีขนาดเท่ากับ dy_{min} เฉพาะที่บริเวณมุมและบนผนังโดยรอบของชิพ ซึ่งกริดในบริเวณที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าต่อน้อย จะปรับให้มีขนาดใหญ่ขึ้นในอัตราที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 3 ส่วนในรูปที่ 4 แสดงผลจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลองในสภาวะการไหลคงตัว พบว่าชิพตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 4 ของการคำนวณใน 3 มิติ มีแนวโน้มค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์ ($Nu_{\mu} = hH/k$) ที่สอดคล้องกับผลการทดลอง (4) โดยผลการคำนวณใน 3 มิติมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์ของชิพตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 4 แตกต่างจากการทดลองประมาณ 12%, 2%, 3% และ 4% ตามลำดับ ส่วนในชิพตัวที่ 5 นั้นผลการคำนวณพบว่าชิพตัวที่ 5 มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์ต่ำกว่าชิพตัวที่ 4 แต่การทดลองให้ผลที่ตรงกันข้ามทั้งนี้อาจเป็นเพราะการทดลองได้ติดตั้งพัดลมดูดอากาศไว้ที่ตำแหน่งด้านท้ายของชิพตัวที่ 5 และอาจติดตั้งใกล้จึงส่งผลกระทบทำให้ชิพตัวที่ 5 มีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์สูงกว่าชิพตัวที่ 4 สำหรับผล

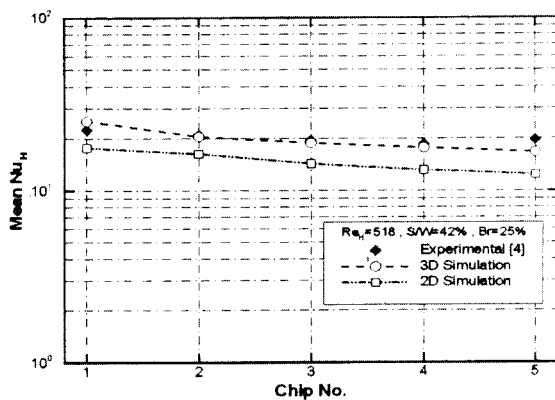
การคำนวณใน 2 มิติ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์น้อยกว่าการคำนวณใน 3 มิติ โดยมีความแตกต่างกันจากชิพตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 5 อยู่ที่ประมาณ 30%, 20%, 24%, 25% และ 26% ตามลำดับนั้น เป็นเพราะธรรมชาติของปัญหาการไหล 2 มิติ ที่ขาดผลกระทบของการถ่ายเทความร้อนจากพื้นที่ด้านแกน อย่างไรก็ตาม การคำนวณใน 2 มิติยังมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการคำนวณใน 3 มิติและผลการทดลอง ผลการตรวจสอบนี้ทำให้ยืนยันได้ว่าแบบจำลองการไหล 2 มิติ 3 มิติ รวมทั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ มีความถูกต้องในระดับที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณได้



รูปที่ 2 ผลกระทบของกริดที่มีต่อค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่



รูปที่ 3 การจัดวางกริดบนแบบจำลองการไหลในบริเวณด้านทางเข้า



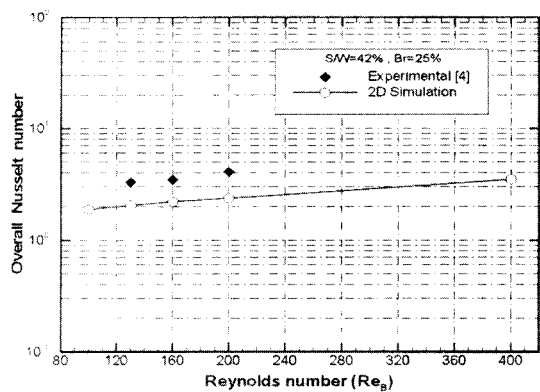
รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองในสภาวะการไหลคงตัว

4. ผลการคำนวณและการวิเคราะห์

4.1 การคำนวณผลกระทบบค่าตัวเลขเรย์โนลด์

การคำนวณผลกระทบบค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งได้กระทำการคำนวณอยู่ในสภาวะการไหลคงตัว มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง $100 < Re_b < 400$ ซึ่งเป็นช่วงที่พลังงานของการไหลไม่มากเพียงพอ ทำให้เกิดความไม่เสถียรของการไหลขึ้น ทำให้เกิดพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้น สามารถพิจารณาเป็นการไหลแบบคงตัวหรือการไหลไม่ขึ้นอยู่กับเวลาได้

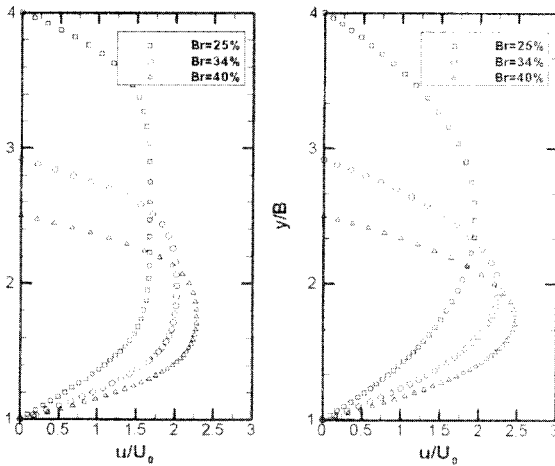
สำหรับผลของการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ผลการคำนวณได้พบว่าการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ทำให้ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวม ($\overline{Nu}_{overall} = \overline{h}_{overall} B/k$) เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่ ซึ่งผลการคำนวณมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการทดลอง(4) ดังแสดงในรูปที่ 5 ส่วนการที่ผลการคำนวณมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมต่ำกว่าการทดลองนั้น เพราะเกิดจากการใช้แบบจำลองการไหล 2 มิติ ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ส่งผลดีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของชิพ ซึ่งถ้าพิจารณาเพิ่มค่าตัวเลขเรย์จาก 100 เป็น 400 ชิพจะมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมเพิ่มขึ้น 46%



รูปที่ 5 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลท์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบบค่า Re_b

4.2 ผลกระทบบของค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล

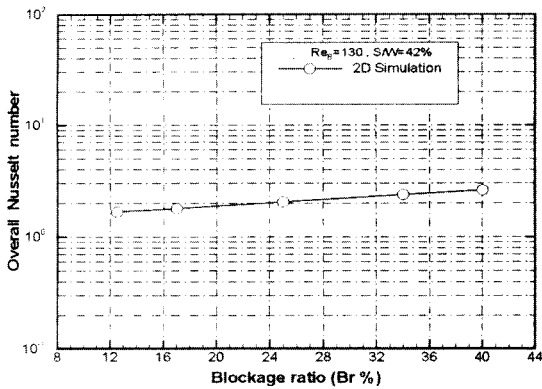
ผลกระทบบของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล (Br) ในสภาวะการไหลคงตัวนี้ พบว่าทำให้การกระจายตัวของความเร็ว (Profile) เหนือผนังของชิพเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น ดังแสดงในรูป 6 (A) และ (B) ซึ่งเป็นค่าความเร็วเหนือผนังชิพตัวที่ 1 และตัวที่ 5 ตามลำดับ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางตามความยาวของชิพ ในรูปที่ 6 นี้บ่งบอกว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า Br มีผลทำให้ค่า u/U_o ที่ตำแหน่งบนผนังของชิพแต่ละตัวนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเท่ากัน ทั้งนี้เป็นไปตามสมการความต่อเนื่องของการไหล และพบว่าลักษณะการกระจายตัวของความเร็วเหนือผนังของชิพตัวที่ 1 ค่อยๆ เปลี่ยนเป็นรูปแบบของพาราโบลา (Parabola) จนกระทั่งการกระจายตัวของความเร็วเหนือผนังของชิพตัวที่ 5 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว ซึ่งแสดงว่า การไหลได้เข้าสู่การไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์ (Fully developed flow) แล้ว



(A) ที่ $x/B = 21$

(B) ที่ $x/B = 68.3$

รูปที่ 6 การกระจายตัวของความเร็วในการคำนวณผลกระทบจากค่าที่ค่า, $Re_\theta = 130$, $S/W = 42\%$



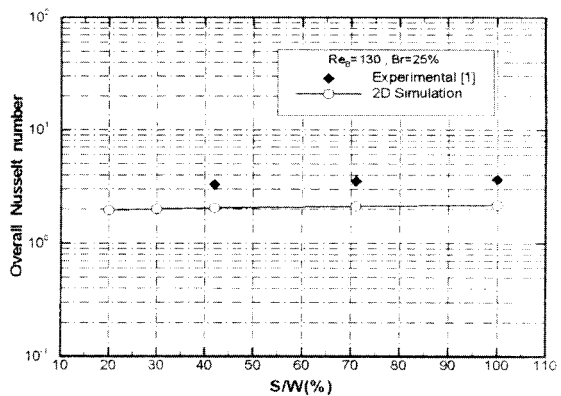
รูปที่ 7 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลต์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า

สำหรับผลของค่า Br ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของชิพนั้นการคำนวณพบว่าการเพิ่มค่า Br ทำให้ชิพมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลต์โดยรวมเพิ่มขึ้น นั่นคือ ถ้าค่า Br เพิ่มขึ้น 26.4%, 50%, 63.2% และ 69% ชิพจะมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลต์โดยรวมเพิ่มขึ้น 6.5%, 18.5%, 30% และ 36% ตามลำดับ ดังแสดงใน รูปที่ 7 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มค่า Br ทำให้ความเร็วภายในแบบจำลองการไหลมีค่าสูงขึ้น ซึ่งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของชิพ โดยผลการคำนวณนี้มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง(5) อย่างไรก็ดีตาม การเพิ่มค่า Br ควรอยู่ในขอบเขตที่

ไม่มากเกินไปเพราะการเพิ่มมากเกินไปนั้น ทำให้มีค่าความชันของความดันของการไหล (dp/dx) สูงขึ้นประมาณ 52% ถ้าค่า Br มีค่าเพิ่มขึ้น 26.4% และสูงขึ้นประมาณ 70% ถ้าค่า Br เพิ่มขึ้น 37.5% ทั้งนี้เพราะการเพิ่มค่า Br ทำให้ของไหลไหลผ่านช่องระหว่างผนังที่มีพื้นที่น้อยได้ยากขึ้น จึงต้องใช้พลังงานของการไหลที่สูงขึ้น เพื่อขับเคลื่อนของไหลให้ไหลผ่านเข้าสู่ส่วนการถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งชิพอยู่

4.3 ผลกระทบของค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพ

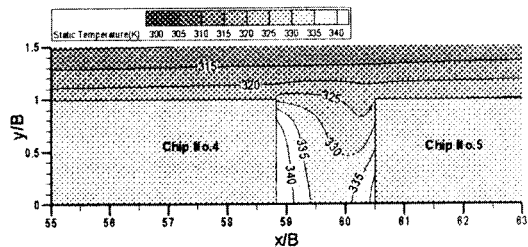
ในรูปที่ 8 แสดงผลของค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลต์โดยรวมในการคำนวณค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพ ต่อความยาวของชิพ (S/W) ซึ่งพบว่า การเพิ่มค่า S/W สามารถช่วยเพิ่มค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลต์โดยรวมให้มีค่าสูงขึ้นได้ ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลอง(4) นั่นคือ ถ้าค่า S/W เพิ่มขึ้น 33.3%, 52.3% 72% และ 80% จะมีค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลต์โดยรวมเพิ่มขึ้น 2.2%, 4.5%, 8% และ 10.1% ตามลำดับ ในขณะที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ไม่ได้เปลี่ยนแปลง เพราะการเพิ่มค่า เป็นการเพิ่มพื้นที่ว่างระหว่างชิพ ซึ่งทำให้อากาศที่หมุนอยู่ระหว่างพื้นที่นี้มีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้สามารถพาความร้อนได้ดีกว่าอากาศหมุนในช่องแคบๆ ซึ่งชิพสามารถถ่ายเทความร้อนให้แก่กันได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 9



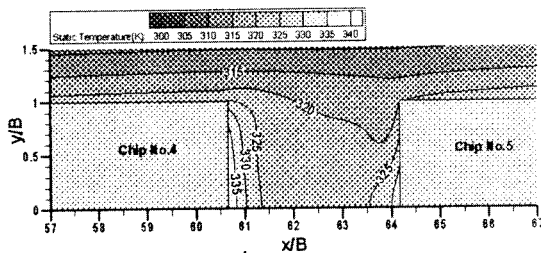
รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซลต์โดยรวมของการคำนวณผลกระทบค่า S/W

5. สรุปผล

ผลการคำนวณการพาความร้อนในสภาวะคงตัว จากชิพจำนวน 5 ตัว พบว่าการปรับเพิ่มค่าตัวเลข เรย์โนลด์ ค่าอัตรา



(A) ที่ $S/W = 20\%$



(B) ที่ $S/W = 42\%$

รูปที่ 9 การกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่ระหว่างชิพตัวที่สี่และตัวที่ห้าที่ค่า $Re_B = 130$, $Br = 25\%$

ส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล (Br) และค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพ (S/W) ช่วยส่งผลให้

ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพเพิ่มสูงขึ้นได้ และจากผลการคำนวณนี้แสดงให้เห็นว่าควรพิจารณาเลือกค่าตัวเลขเรย์โนลด์ เป็นค่าพารามิเตอร์อันดับแรกในการพิจารณาออกแบบ สำหรับค่าพารามิเตอร์อันดับต่อมาคือค่า Br แต่ควรอยู่ในขอบเขตที่เหมาะสมเพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่บริเวณการถ่ายเทความร้อนที่มีชิพติดตั้งอยู่ได้ทั่วถึง ส่วนการเพิ่มค่า S/W ที่สภาวะการไหลคงตัวถึงแม้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชิพได้ แต่อยู่ในอัตราที่ไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์อื่นๆ อีกทั้งการเพิ่มค่า S/W มักถูกจำกัดด้วยพื้นที่ของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วย สำหรับผลการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนา และออกแบบการจัดวางชิพบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ในกรณีจัดวางชิพแบบแถวเรียงตรงกันให้มีความเหมาะสมได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า และ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย ☺

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Davalath, and Y. Bayazitoglu, "Forced Convection Cooling Across Rectangular Blocks," Journal of Heat Transfer, Vol. 109, 1987, pp. 321-328.
- [2] C.W. Leung, H.J. Kang, and S.D. Probert, "Horizontal simulated printed circuit board assembly in fully developed laminar flow convection", Applied Energy. Vol.56, No.1 ,1997, pp. 71-91.
- [3] H.-W. Wu, S.W. Wang, and S.W. Perng, "The Effective Installation of an Inclined Plate for the Enhancement of Forced Convection over Rectangular sources", Heat and Mass Transfer, Vol.33, No.5-6 1998, pp. 431-438.
- [4] น้ามนต์ โชติวิศรุต. การพาความร้อนของชุดแผงจัดตู้ร้อนที่ทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลและเรียงตัวในแนวเดียวกัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546.
- [5] J. Hachohen, T.W. Chiu, and A.A. Wragg, "Forced and free convection heat transfer coefficients for a model printed circuit board channel geometry," Experimental Thermal and fluid science. 1995; 10: 327-334.
- [6] H. K. Versteeg, and W. Malalasekera, "An introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Volume Method", Longman Scientific & Technical, Malaysia, 1995.
- [7] John D. Anderson, Jr. "Computational Fluid Dynamics the Basic with Applications", McGraw-Hill, New York, 1995.
- [8] N. Djilali, "Forced laminar convection in an array of stacked plates," Numerical Heat Transfer. Vol.25, 1994 , pp. 393-408.
- [9] Suhas V. Pantankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, New York, 1980.
- [10] Yunus A. Cengel, "Heat Transfer": A Practical Approach. McGraw-Hill, New York, 1998.

DL

IB

TP

UA

AF

AF

005

107

4 397

573

901

1619

5889

127

MADRID

KUCHING

NEW YORK

BARCELONA

LISSABON

SAN FRANCISCO

PARIS CH.

LYON

CHICAGO

HONGKONG