

ปัจจัยในการพาความร้อนของชิพ บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

Parameters Affecting on Convective Heat Transfer of Chips on Electronic Circuit Board

สุริยนต์ ชมดี¹ ดร.อดิพงษ์ นันทพันธ์² ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์³

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัด เชียงใหม่ 50200^{1,3}

โทรศัพท์ 053-944144

กองศูนย์ฝึกอบรมแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง 52220²

โทรศัพท์ 05-425-6932 โทรสาร 05-425-6907

Suriyon Chomdee¹ Atipoang Nuntaphan² Tanongkiat Kiatsirirot³

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University 50200^{1,3}

Tel. 053-944144 E-mail : tsus_ltdpart@hotmail¹, taonong@dome.eng.cmu.ac.th³

Mae Moh Training Center Electricity Generating Authority of Thailand Mae Moh, Lampang 52220²

Tel. 05-425-6932 Fax. 05-425-6907 E-mail : mmmatp@egat.or.th²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ ในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบปัจจัยที่มีผลต่อการพาความร้อนของชิพที่มีจัดเรียงแบบแถวตรง(In-Line)บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์(PCB) ซึ่งได้แก่ ความเร็วของอากาศ (V, m/s) ค่าอัตราส่วนความสูงของช่องอากาศต่อความสูงของชิพจำลอง (H/B) และ ค่าอัตราส่วนระยะห่างชิพกับความยาวชิพ (S/Cx) โดยพิจารณาถึงผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน(h) และ อุณหภูมิของชิพ (T_j) (Junction Temperature) การทดสอบกระทำภายในอุโมงค์ลมที่สามารถควบคุมระดับความเร็วลม ชิพที่ใช้ถูกจำลองจากอลูมิเนียมที่มีลวดความร้อนอยู่ภายใน อุณหภูมิของชิพตรวจวัดโดยกล้องอินฟราเรด ในการจัดวางชิพที่มี การปลดปล่อยความร้อนจากชิพ(Q) สูง เป็นตัวแรกที่ระบายความร้อนสู่อากาศจะทำให้ค่า อุณหภูมิ Hot Spot บนแผงวงจรมีค่าต่ำสุด

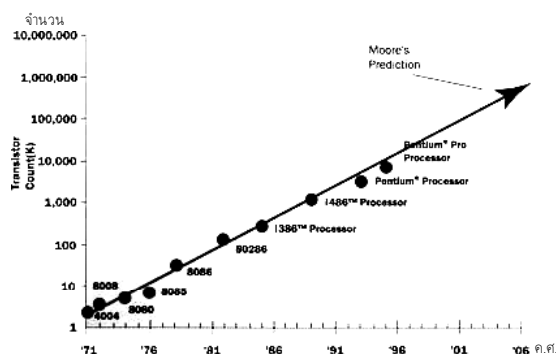
Abstract

This paper shows comparative experimental studies of the parameters affecting on convective heat transfer of in-line chips on electronic printed circuit board (PCB). The parameters considered are air velocity (V, m/s), ratio of air channel to the chip height (H/B) and ratio of chip spacing to the chip length (S/C_x). The heat transfer effects are convective heat transfer coefficient (h) and chip junction temperature (T_j). The experiments are carried out in a small wind tunnel. The experiment chips are made of aluminum with electrical heater embedded inside. The chip temperatures are monitored directly with an infrared scanner. For the chips having different heat dissipations, the highest heat

flux chip should be allocated closest to the entering air, thus the hot spot on the PCB would be lowest.

1.บทนำ

ปัจจุบันการออกแบบให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลง และการเพิ่มความสามารถในการทำงานให้สูงขึ้น เป็น 2 ประเด็นใหญ่ที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดการรวมตัวของความร้อน สิ่งที่ชัดเจนคือการรวบรวมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กหลาย ๆ วงจรเข้าไว้ด้วยกันเป็นวงจรหลัก หรือที่เรียกกันว่า IC (Integrated Circuits) รูปที่ 1 เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับการทำนายจำนวน Transistor ภายใน IC ของหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) มีการประมาณว่าจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัวในทุก ๆ 18 เดือน [Azar (2000)]



รูปที่ 1 กราฟการทำนายจำนวน Transistor ที่บรรจุอยู่ใน IC (Intel CPU) [ที่มา: Azar (2000)]

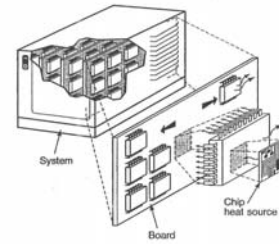
เมื่อมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากบรรจุไว้ภายในทำให้เกิดความหนาแน่นของความร้อนภายใน IC ตัวนั้นๆ ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ได้รับการจัดการที่ดี จะส่งผลให้ Junction Temperature (T_j) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิทำงานที่ถูกออกแบบมาจากโรงงานผู้ผลิต และเมื่อนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ มาประกอบกันเข้าไว้ในแผงวงจร จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ ต้องทำการศึกษาถึง การจัดการทางด้านความร้อน (Thermal Management)

แนวทางในการจัดการกับปัญหาทางด้านความร้อน ในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น Water Cooling , Micro-Refrigerator Cooling , Heat Pipe Cooling , Thermoelectric Cooling ซึ่งนำมาใช้แทนวิธีการระบายความร้อนด้วยอากาศ เนื่องจากคุณสมบัติของอากาศที่มีข้อด้อยคือ ความหนาแน่น ความจุความร้อนจำเพาะ และ ค่าการนำความร้อนที่ต่ำ แต่ถึงอย่างไร การระบายความร้อนด้วยอากาศ ก็ยังมีจุดเด่น คือ อุปกรณ์ และ ค่าบำรุงรักษาที่ต่ำอีกทั้งสามารถดำเนินการได้สะดวก ดังนั้นวิธีนี้จึงยังเป็นตัวเลือกลำดับแรกในการระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการพาความร้อนของชิปที่มีจัดเรียงแบบแถวตรง (In-Line) บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์(PCB) ซึ่งได้แก่ ความเร็วของอากาศ (V , m/s) ค่าอัตราส่วนความสูงของช่องอากาศ ต่อ ความสูงของชิปจำลอง(H/B) และ ค่าอัตราส่วนระยะห่างชิปกับความยาวชิป (S/C_x) โดยการทดสอบอยู่ภายใต้สภาวะการทำงานจริงของระบบ ซึ่งการทดสอบกระทำภายในอุโมงค์ลมที่สามารถควบคุมระดับความเร็วลม ชิปที่ใช้จำลองจากอลูมิเนียมที่มีลวดความร้อนอยู่ภายใน อุณหภูมิของชิปตรวจวัดโดยกล้องอินฟราเรด ซึ่งนำผลมาคำนวณร่วมกับอุณหภูมิของอากาศเหนือชิป ได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของชิปแต่ละตัว

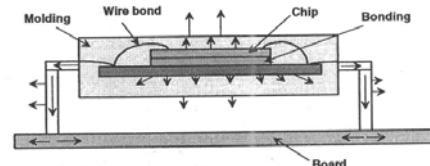
2. โครงสร้างระบบทางอิเล็กทรอนิกส์

โครงสร้างของระบบทางอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก โดยที่ ส่วนที่ 1 คือ Chip ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายความร้อน (Heat Source) ซึ่งเป็นต้นเหตุของปัญหาในการจัดการด้านความร้อน ส่วนที่ 2 เป็นส่วนของ Board ซึ่งเป็นที่ติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ และ ในส่วนที่ 3 เป็นส่วนของ ระบบ (System) ซึ่งเป็นที่ติดตั้ง Board โดยที่ภายในจะมีส่วนของระบบจ่ายไฟ

รูปที่ 2 เป็นการแสดงโครงสร้างของระบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งฉายภาพของส่วนต่าง ๆ ภายในระบบ เมื่อพิจารณาตัว Chip ที่เป็นแหล่งจ่ายความร้อนนั้น ยังมีส่วนประกอบต่าง ๆ ที่มาเป็นส่วน ห่อหุ้ม และ รองรับตัว Chip นั้นไว้ ซึ่งมีส่วนช่วยในการถ่ายเทความร้อนออกจากตัว Chip สู่สิ่งแวดล้อม โดยที่ โครงสร้าง และ การถ่ายเทความร้อนของ Chip แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 ภาพฉายโครงสร้างของระบบทางอิเล็กทรอนิกส์
[ที่มา: Azar(1997)]



รูปที่ 3 โครงสร้าง และ การถ่ายเทความร้อนของ Chip
[ที่มา:Azar(1997)]

3. การถ่ายเทความร้อนจากชิปสู่อากาศ

การถ่ายเทความร้อนรูปแบบต่าง ๆ ออกจากชิปที่ติดตั้งอยู่บนแผงวงจร สามารถจำแนกได้เป็น 3 กรณีคือ การนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งกว่า 80% ของการถ่ายเทความร้อนบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อยู่ในกรณีการพาความร้อนจึงพิจารณากรณีนี้เป็นสำคัญ

เมื่อมีการระบายความร้อนจากชิปไปสู่อากาศที่ไหลผ่านนั้น อากาศจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนที่อากาศได้รับกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นสามารถประมาณได้จาก

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (1)$$

โดยที่ Q คือ อัตราความร้อนจากลวดความร้อนที่ให้แก่ชิปตัวที่พิจารณา (W)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนของอากาศ (J/kg K)

ΔT คือ ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างตำแหน่ง 2 ตำแหน่งที่อากาศไหลผ่าน ($^{\circ}\text{K}$)

ทั้งนี้ในขณะที่อากาศไหลผ่านชิปที่มีอุณหภูมิสูงนั้น ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากชิปไปสู่อากาศในรูปแบบของการพาความร้อนซึ่งสามารถประมาณค่าของความร้อนดังสมการ 2

$$Q = hA(T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

หรือที่เรียกว่ากฎการเย็นของนิวตัน (Newton's law of cooling)

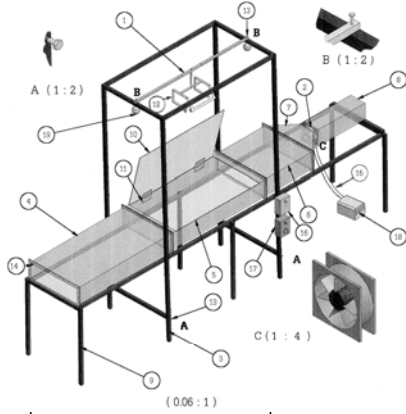
โดยที่ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)

A คือ พื้นที่ผิวของชิปที่สัมผัสของไหล(m^2)

T_s คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ย ของชิป ($^{\circ}\text{C}$)

T_{∞} คือ อุณหภูมิของอากาศที่วัดเฉลี่ยเหนือชิป ($^{\circ}\text{C}$)

4. อุโมงค์ลม และ อุปกรณ์ในการทดสอบ

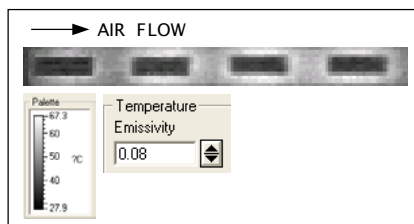


รูปที่ 4 ลักษณะของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบ

อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 4 สามารถควบคุมความเร็วของการไหล และ ปรับระดับความสูงของช่องอากาศได้ ส่วนประกอบสำคัญ มีอยู่ 3 ส่วนคือ ช่วงด้านทางเข้า (Up-stream Section, 4) ได้ติดตั้งตะแกรงรังผึ้ง (Flow Straightener, 14) เพื่อช่วยให้การไหลมีความสม่ำเสมอ ช่วงบริเวณทดสอบ (Test Section, 5) ในส่วนนี้เป็นส่วนที่ทำการติดตั้งแผง PCB และชิพจำลองที่จะทำการทดสอบ ตำแหน่งที่ 10 ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล เพื่อตรวจวัดและเก็บข้อมูลของอุณหภูมิอากาศบริเวณเหนือชิพ ตำแหน่งที่ 18 ติดตั้งกล้อง Infrared Scanner ดังรูปที่ 5 ซึ่งใช้หลักการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ โดยที่ก่อนการถ่ายภาพอุณหภูมิ ได้สอบเทียบค่าอุณหภูมิโดยกำหนดสภาพการแผ่รังสีความร้อน (Emissivity) ที่ผิววัสดุของชิพ (อลูมิเนียมฟลอยด์มันวาว) กับ ค่าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ล ซึ่งค่าที่ถูกตั้งคือ 0.08 ผลจากการถ่ายภาพจะแสดงในรูปโทนสีของอุณหภูมิดังรูปที่ 6 และค่าอุณหภูมิในแต่ละจุดบน PCB ช่วงด้านทางออก (Down-stream Section) จะทำการติดตั้งพัดลมดูดอากาศ (Suction Fan) ที่สามารถปรับระดับความเร็วลมได้

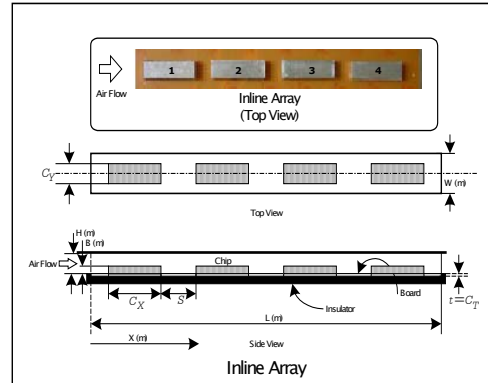


รูป 5 กล้องถ่ายภาพอินฟราเรด



รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิชิพจาก กล้อง Infrared Scanner

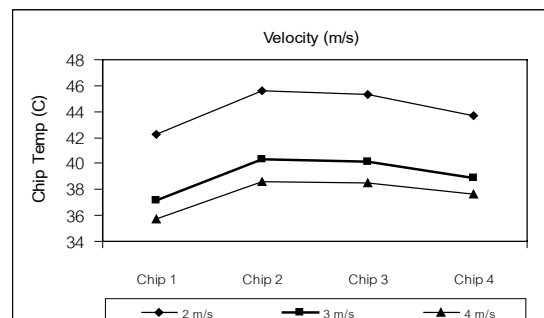
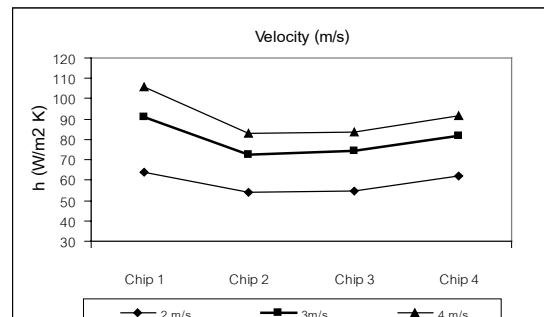
ชิพซึ่งเป็นแหล่งจ่ายความร้อน มีมิติเท่ากับ 1.8cm.×5.8cm.×0.6 cm. จำนวน 4 ตัว ทำการจัดวางแบบ Inline Array บนแผ่น PCB ขนาด 3.6cm.×36cm.×0.3cm. ด้านล่างของ PCB หุ้มฉนวนอย่างดีเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ดังรูปที่ 7



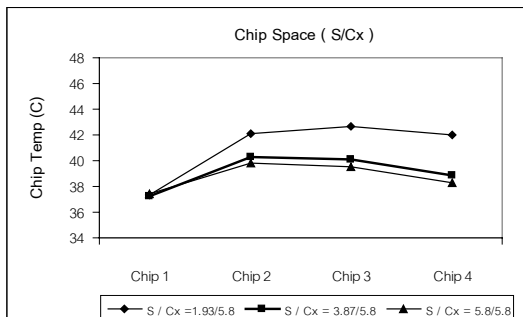
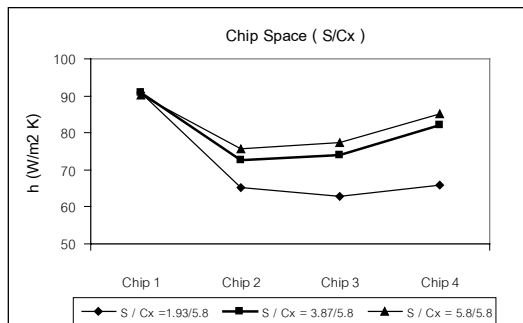
รูปที่ 7 การจัดวาง Chip ในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

5. ผลการศึกษา

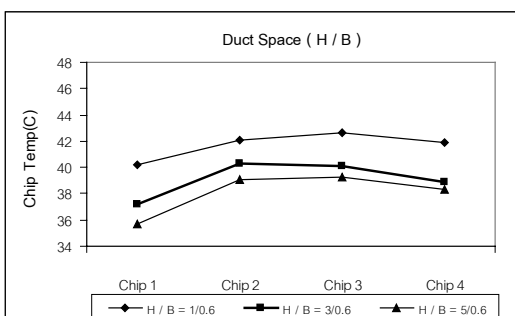
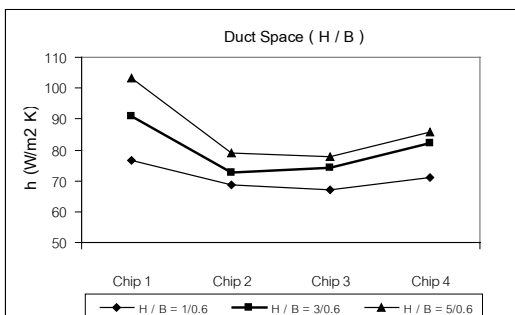
ในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบนั้นจะใช้กรณีนี้ที่ อุณหภูมิของอากาศขาเข้ามีค่า 25°C ค่า $V = 3 \text{ m/s}$, $H/B = 3/0.6 \text{ cm}$, $S/C_x = 3.87/5.8 \text{ cm}$, $Q = 2 \text{ W}$ และ เป็นฐานในการพิจารณา เพื่อปรับตัวแปรต่าง ๆ ที่จะศึกษาในแต่ละกรณี



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า h และ T_s เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของอากาศ $H/B = 3/0.6$ และ $S/C_x = 3.87/5.8$



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า h และ T_s เมื่อมีการเปลี่ยน S/C_x เมื่อความเร็วลมที่ทางเข้า 3 m/s



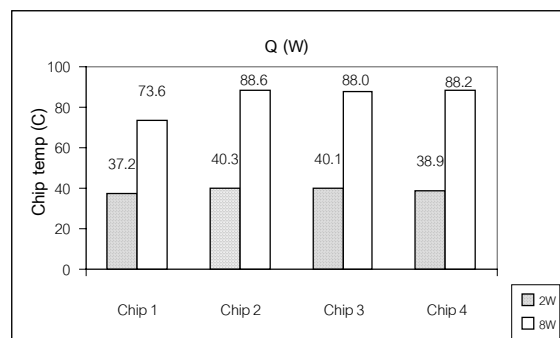
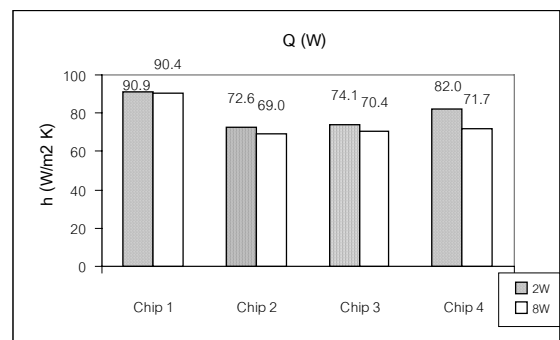
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า h และ T_s เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า H/B เมื่อความเร็วลมที่ทางเข้า 3 m/s

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยทางด้านระดับของความเร็วมวล ดังรูปที่ 8 พบว่าระดับความเร็วมวล มีค่าแปรผกผัน กับ อุณหภูมิของชิพ นั่นคือ V ที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มค่า Reynolds Number ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงขึ้น และ เมื่อพิจารณาความเร็วมวลในช่วง 2 ถึง 3 m/s จะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอัตราที่สูงมาก แต่ถ้าย่อย

ช่วงดังกล่าว ไปแล้วผลของเปลี่ยนแปลงจะมีค่าไม่มากนัก อีกทั้งตำแหน่งชิพตัวที่ 2 และ 3 จะมี ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำกว่าตัวแรก เนื่องจากเกิดการหมุนวนของอากาศด้านหลังชิพตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่อากาศรอบๆ ไม่สะดวก ทำให้อุณหภูมิของชิพสูงขึ้น ส่วนในตัวของชิพตัวที่ 4 การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นเนื่องจากไม่มีการหมุนวนของอากาศรอบบริเวณท้ายชิพ

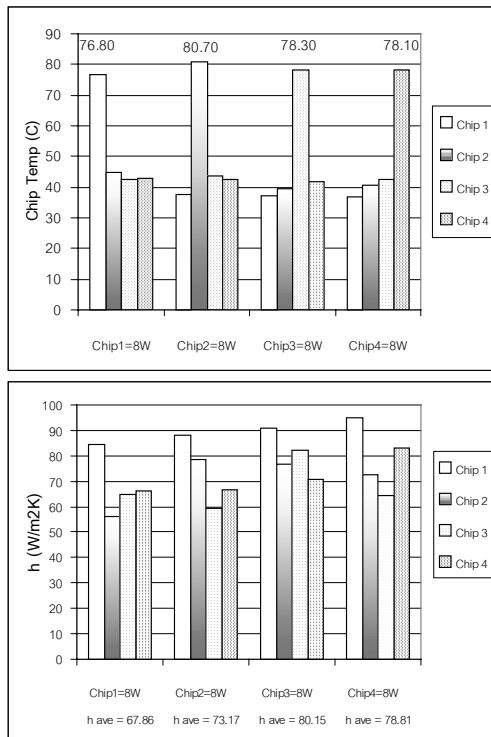
ในการออกแบบระบบทางอิเล็กทรอนิกส์ ให้มีขนาดเล็ก และ กะทัดรัดนั้น ย่อมทำให้แผงวงจรมีขนาดเล็กลงตาม ซึ่งทำให้ชิพบนแผงวงจรมีความหนาแน่นสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงระยะห่างในจัดวางชิพนั้น พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างชิพมีค่าน้อยลงดังรูปที่ 9 จะส่งผลให้อุณหภูมิของชิพมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการรวมตัวของความร้อนที่หมุนวนอยู่บริเวณหลังชิพ ทำให้ความสามารถในการพาความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมยากยิ่งขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างชิพ ให้มากขึ้นเรื่อยๆ ก็มิได้ช่วยเพิ่ม ค่า h ได้มากนัก ดังนั้นระยะห่างในการจัดวางชิพ ที่เหมาะสม จึงเป็นอีกหนึ่งประเด็นที่สำคัญ

ระดับความสูงความช่องอากาศ เป็นอีกปัจจัยที่ช่วยให้ระบบมีขนาดกะทัดรัด จากรูปที่ 10 พบว่าเมื่อ H/B ลดลงจะทำให้อุณหภูมิของชิพ มีค่าสูงขึ้นซึ่งเป็นผลจากค่าอัตราการไหลของอากาศที่ลดลง ทำให้ความสามารถในการพาความร้อนลดต่ำลง



รูปที่ 11 ค่า h และ T_s เมื่อมีการปรับอัตราการปลดปล่อยความร้อน Q

รูปที่ 11 แสดงผลของค่า h และ T_j เมื่อชิพทุกตัวมีการปลดปล่อยความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 2 W เป็น 8 W ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของชิพเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่ออัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงขึ้น ในชิพ ตัวที่ 1 ถึง 3 เนื่องจากการหมุนวนของอากาศร้อนหลังชิพตัวดังกล่าวสูง แต่เมื่อพิจารณาในตำแหน่งชิพตัวที่ 4 ซึ่งมีการพาความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมสะดวกขึ้น กรณีที่อัตราการปลดปล่อยความร้อน 8 W ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าต่ำกว่า กรณี 2 W อย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 12 ผลของการวางตำแหน่งชิปที่มี heat flux สูง ต่อ T_j และ h

เมื่อการปลดปล่อยความร้อนของชิปบางตัวมีค่าสูง การจัดวางตำแหน่งของชิปลงบนแผงวงจรให้เหมาะสม มีความสำคัญในการควบคุมอุณหภูมิ Hot Spot ของแผงวงจร รูปที่ 12 แสดงผลกระทบจากการจัดวางชิป 1 ตัวที่มีการปลดปล่อยความร้อนสูง 8 W ลงบนแผงวงจร ในตำแหน่งต่างๆ เปรียบเทียบกับชิปตัวอื่นๆ ที่มีขนาด 2 W จากการทดสอบ พบว่าการจัดวางชิป 8 W ลงในตำแหน่งด้านหน้าของกระแสการไหล (ตำแหน่ง Chip 1) มีผลทำให้อุณหภูมิ hot spot ของแผงวงจรต่ำที่สุด และมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สูงกว่าการจัดวางในตำแหน่งอื่น ๆ

6. สรุปผลการศึกษา

เมื่อพิจารณาถึงผลการศึกษาพบว่า แนวโน้มของการเกิด Hot Spot ของชิป บนแผงวงจรจะเกิดที่บริเวณชิปตัวที่ 2 และ 3 เนื่องจากการจัดวางแบบ In-line หลังชิปตัวที่ 1 2 และ 3 จะเกิดการหมุนวนของอากาศร้อน ทำให้ความสามารถในการพาความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมยากขึ้นกว่าบริเวณอื่น ๆ

จากผลของการวางชิปที่มีค่า Q สูงลงบนแผงวงจร มีสองแนวทางที่ควรพิจารณานั้นคือ ในกรณีการวางชิปไว้ที่ตำแหน่งแรกของอากาศเข้าที่มีอุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิ Hot Spot ของชิปตัวดังกล่าวจะมีค่าต่ำที่สุด แต่จะยังผลให้อุณหภูมิอากาศในกระแสการไหลมีค่าสูงขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ของระบบต่ำกว่ากรณีอื่น ๆ และในอีกหนึ่งแนวทางที่ควรพิจารณาคือ การจัดวางชิปในตำแหน่งบริเวณท้ายของกระแสการไหล โดย อุณหภูมิ Hot Spot ของชิปไม่เกินระดับที่จะสร้างความเสียหาย จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบมีค่าสูง

ดังนั้นในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชิปอยู่เป็นจำนวนมาก ผลของการจัดวางตำแหน่งของชิปลงบน PCB ให้มีความเหมาะสมจะสามารถช่วยให้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูง และ ช่วยควบคุมระดับอุณหภูมิ Hot Spot ซึ่งส่งผลถึงการเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบอิเล็กทรอนิกส์

7. รายการสัญลักษณ์

- A = พื้นที่การถ่ายเทความร้อนของชิป (m^2)
- C_p = ค่าความจุความร้อนของอากาศ (J/kgK)
- h = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2K)
- H/B = อัตราส่วนของช่องอากาศต่อความสูงของชิป
- $\dot{m}$ = อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)
- Q = อัตราการปลดปล่อยความร้อนของชิป (W)
- S/C_x = อัตราส่วนระยะห่างของชิปต่อความยาวชิป
- T_j = อุณหภูมิจุดเชื่อมต่อ ($^{\circ}C$)
- T_s = อุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวชิป ($^{\circ}C$)
- T_{∞} = อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยเหนือชิป ($^{\circ}C$)
- ΔT = อุณหภูมิแตกต่างระหว่างชิปกับอากาศ (K)
- V = ความเร็วอากาศ (m/s)

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

9. เอกสารอ้างอิง

1. สุริยนต์ ชมดี ,อดิพงศ์ นันทพันธ์, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2544) “การศึกษาปัจจัยในการจัดการด้านความร้อนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์” เอกสารการประชุมวิชาการการถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ศูนย์ฝึกอบรมแม่เมาะ, หน้า 1 – 5.
2. Suriyon, C. , Nammont, C., Tanongkiat, K.(2002) “Effects of Chip Allocation on Convective Cooling in Printed Circuit Board”, Proc. the 9th Tri-University International Joint Seminar & Symposium ,China , pp. 200-203.
3. Azar, K. (2000).“The history of power dissipation”, *Electronics Cooling Magazine*, Jan 2000. , pp. 57-80.
4. Azar, K.(1997): “Heat Transfer from Component” ,*Thermal Measurements in Electronics Cooling* . CRC Press.,New York , pp. 17-20. 1997.
5. Ralph, R.(2001) : “Introduction to Thermal Design of Electronic Equipment” *Thermal Design of Electronic Equipment*. CRC Press ,London , pp. 1-7.