

การวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อน
โคมไฟถนนแอลอีดี ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

**ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN
FIN HEAT SINK OF LED STREET LAMP
USING 3-D FINITE ELEMENT METHOD**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2015**

การวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อน
โคมไฟถนนแอลอีดี ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร. กิตติ อรรถกิตตมงคล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. เผด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร. ธนัชชัย กุลวรรณิขพงษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปีจางค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศุภลักษณ์ ราชโสภา : การวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อน
โคมไฟถนนแอลอีดี ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (ANALYSIS OF
TEMPERATURE DISTRIBUTION IN FIN HEAT SINK OF LED STREET LAMP
USING 3-D FINITE ELEMENT METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.เผด็จ เผ่าละออ, 93 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อนโคมไฟถนนแอลอีดี ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับที่สอง (second order partial differential equation) การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในครีบบระบายความร้อนที่ทำหน้าที่ระบายความร้อนของหลอดแอลอีดีชิปในโคมไฟถนนแอลอีดี โดยวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งการวิเคราะห์ครีบบระบายความร้อนที่แตกต่างกันออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบแผ่นครีบบที่ครีบบมีลักษณะโค้ง แบบแผ่นครีบบที่ครีบบมีลักษณะตรง และแบบแผ่นครีบบที่ครีบบมีลักษณะเป็นซี่ โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขปริมาณของแผ่นครีบบเท่ากัน เพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแผ่นครีบบระบายความร้อน รวมถึงการวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิของแผ่นครีบบระบายความร้อนในแต่ละแบบ โดยแผ่นครีบบที่ระบายความร้อนได้ดีจะทำให้อุณหภูมิของหลอดแอลอีดีชิปมีค่าต่ำสุด พร้อมทั้งนำผลที่ได้จากการจำลองเทียบกับผลการวัดของอุณหภูมิจากการทดสอบจริง ซึ่งผลที่ปรากฏนั้นมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SUPALUK RACHSO : ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION
IN FIN HEAT SINK OF LED STREET LAMP USING 3-D FINITE
ELEMENT METHOD. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PADEJ
PAO-LA-OR, Ph.D., 93 PP.

LED STREET LAMP/HEAT SINK/TEMPERATURE/3-D FINITE ELEMENT
METHOD

This thesis propose mathematical model of temperature in fin heat sink of LED street lamp that performed in a second-order partial differential equation. The simulation that was applied to the developed 3-D finite element method using MATLAB program displayed graphic of temperature that occurred within fin heat sink. It served cooling of LED chips in the LED street lamp. This study presents the thermal analysis of 3 kinds of heat sinks ,which are curved plate fin heat sink, straight plate fin heat sink, and pin fin heat sink, with different characteristics. The 3 kinds of heat sink are compared under the equal volume condition in order to compare the distribution of temperature and analyze the characteristics within the fin heat sink in each model. The good model will perform better in controlling the LED chip temperature. As discussed, the simulation results presented the good agreement with the temperature measurement results.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคลากรและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายบริหารซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ผู้ให้คำปรึกษาแนะนำและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดรวมถึง ได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์นอกจากนี้ยังมีความเป็นกันเองแก่ผู้วิจัยและเป็น ที่ปรึกษาที่ดีในทุกเรื่องและเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลายๆด้าน

ขอขอบคุณ คุณอานนท์ อิศรมงคลรักษ์ คุณอารักษ์ บุญมาตย์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือดูแล และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการศึกษา รวมทั้งการเผยแพร่ผลงานวิจัย

ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือใน การทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านจริยธรรมและ วิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อคำฮัก ราชโส และคุณแม่บุญเรือง ราชโส ที่ให้ความรักกำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมาโดย ตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ศุภลักษณ์ ราชโส

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฅ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	3
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 สรุป	11
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	12
3.1 บทนำ	12
3.2 หลอดไฟแอลอีดี	12
3.2.1 ส่วนประกอบหลอดไฟแอลอีดี	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 หลักการทำงานของหลอดแอลอีดี.....	15
3.2.3 ครีประบายความร้อน.....	15
3.3 ทฤษฎีความร้อน.....	17
3.3.1 ความร้อน.....	17
3.3.2 กลไกการถ่ายโอนความร้อน.....	21
3.3.3 การนำความร้อน.....	21
3.3.4 การพาความร้อน.....	22
3.3.5 การแผ่รังสีความร้อน.....	22
3.4 ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	23
3.5 สรุป.....	32
4 การคำนวณอุณหภูมิของคอมไฟถนนแอลอีดีด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	33
4.1 บทนำ.....	33
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิของคอมไฟถนนแอลอีดี.....	33
4.3 การคำนวณอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	34
4.3.1 การออกแบบอิลลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา.....	34
4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	42
4.3.3 การสร้างสมการอิลลิเมนต์.....	43
4.3.4 การประกอบสมการอิลลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ.....	51
4.3.5 การแก้ระบบสมการเพื่อหาค่าผลเฉลย.....	51
4.4 สรุป.....	52
5 ผลการจำลองอุณหภูมิของคอมไฟถนนแอลอีดี.....	53
5.1 บทนำ.....	53
5.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์.....	53
5.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล.....	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4 ผลการจำลองอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อนพร้อมวิเคราะห์ผล.....	57
5.4.1 กรณีพิจารณาแผ่นครีบบที่ครีบบผิวบนมีลักษณะโค้ง.....	57
5.4.2 กรณีพิจารณาแผ่นครีบบที่ครีบบผิวบนมีลักษณะตรง.....	59
5.4.3 กรณีพิจารณาแผ่นครีบบที่ครีบบมีลักษณะเป็นซี่.....	61
5.5 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อพิจารณาแผ่นครีบบแต่ละแบบ.....	63
5.6 สรุป.....	64
6 ผลการทดสอบจริงของคอมไฟลอนนแอลอีดี.....	66
6.1 บทนำ.....	66
6.2 ขั้นตอนและวิธีการในการทดสอบจริง.....	66
6.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบจริง.....	69
6.4 สรุป.....	71
7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	72
7.1 สรุป.....	72
7.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต.....	73
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. คุณลักษณะและคุณสมบัติของคอมไฟลอนนแอลอีดีที่ใช้ในงานวิจัย.....	77
ภาคผนวก ข. ภาพแสดงเครื่องมือและการวัดอุณหภูมิของคอมไฟลอนนแอลอีดี.....	83
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
3.1 ลักษณะข้อมูลของอิทธิพล.....	25
3.2 ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ.....	26
5.1 พารามิเตอร์ของอุณหภูมิและขนาดที่ใช้ในการจำลองผล.....	57
5.2 การเปรียบเทียบการกระจายตัวในลักษณะต่าง ๆ ของอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาแผ่นครีปแต่ละแบบ.....	64
5.3 ค่าพื้นที่ผิวที่สัมผัสอากาศของแผ่นครีประบายความร้อนแต่ละแบบ.....	65
6.1 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบจริง.....	72

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	ส่วนประกอบของหลอดแอลอีดี.....13
3.2	ส่วนประกอบของโคมไฟแอลอีดี.....14
3.3	ปริมาตรควบคุมและทิศทางการถ่ายโอนความร้อนแบบ 3 มิติ.....18
3.4	กลไกการถ่ายโอนความร้อน.....21
3.5	รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 6 อิลลิเมนต์ 8 จุดต่อ เมื่อพิจารณา อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า.....25
3.6	การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า.....26
4.1	โคมไฟถนนแอลอีดี.....35
4.2	แอลอีดีโมดูล รุ่น HPML AD G13-street lighting.....35
4.3	ค่ามิติต่าง ๆ ของแอลอีดีโมดูล.....36
4.4	ส่วนประกอบของแอลอีดีโมดูล.....36
4.5	ส่วนประกอบของแอลอีดีชิป.....37
4.6	โครงสร้างแผ่นครีบบนที่ครีบบนมีลักษณะโค้ง.....38
4.7	โครงสร้างแผ่นครีบบนที่ครีบบนมีลักษณะตรง.....38
4.8	โครงสร้างแผ่นครีบบนที่ครีบบนมีลักษณะเป็นซี่.....39
4.9	การแบ่งอิลลิเมนต์และจุดต่อของแผ่นครีบบนที่ครีบบนมีลักษณะโค้ง.....39
4.10	การแบ่งอิลลิเมนต์และจุดต่อของแผ่นครีบบนที่ครีบบนมีลักษณะตรง.....40
4.11	การแบ่งอิลลิเมนต์และจุดต่อของแผ่นครีบบนที่ครีบบนมีลักษณะเป็นซี่.....40
4.12	ภาพการขยายการแบ่งอิลลิเมนต์ของแผ่นครีบบนระบายความร้อน.....41
4.13	ภาพการขยายการแบ่งอิลลิเมนต์ของแอลอีดีชิป.....41
5.1	แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณอุณหภูมิ.....54
5.2	การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ของโคมไฟถนนแอลอีดีในกรณีพิจารณา แผ่นครีบบนที่ครีบบนมีลักษณะโค้ง.....58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ตรงแผ่นครีปในกรณีพิจารณา แผ่นครีปที่ครีปผิวบนมีลักษณะโค้ง.....	58
5.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ตรงแอลอีดีชิปในกรณีพิจารณา แผ่นครีปที่ครีปผิวบนมีลักษณะโค้ง.....	59
5.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ของโคมไฟถนนแอลอีดีในกรณีพิจารณา แผ่นครีปที่ครีปผิวบนมีลักษณะตรง.....	60
5.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ตรงแผ่นครีปในกรณีพิจารณา แผ่นครีปที่ครีปผิวบนมีลักษณะตรง.....	60
5.7 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ตรงแอลอีดีชิป ในกรณีพิจารณา แผ่นครีปที่ครีปผิวบนมีลักษณะตรง.....	61
5.8 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ของโคมไฟถนนแอลอีดีในกรณีพิจารณา แผ่นครีปที่ครีปมีลักษณะเป็นซี่.....	62
5.9 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ตรงแผ่นครีปในกรณีพิจารณา แผ่นครีปที่ครีปมีลักษณะเป็นซี่.....	62
5.10 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ตรงแอลอีดีชิปในกรณีพิจารณา แผ่นครีปที่ครีปมีลักษณะเป็นซี่.....	63
6.1 โคมไฟถนนแอลอีดีที่ใช้ในการทดสอบจริงขณะยังไม่จ่ายไฟ.....	67
6.2 โคมไฟถนนแอลอีดีที่ใช้ในการทดสอบจริง.....	67
6.3 โคมไฟถนนแอลอีดีที่ใช้ในการทดสอบจริงในขณะที่จ่ายไฟ.....	68
6.4 แผนภาพในการทดสอบของโคมไฟถนนแอลอีดี.....	69
6.5 แผ่นวงจรของแอลอีดีโมดูล เมื่อถอดฝาเลนส์ออก.....	70
6.6 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างผลการจำลอง และผลการทดสอบจริง.....	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันหลอดแอลอีดี (LED) ได้มีบทบาทอย่างมากสำหรับระบบส่องสว่าง ด้วยประสิทธิภาพที่สูง มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถควบคุมปรับเปลี่ยนได้ด้วยเทคโนโลยีที่ล้ำหน้าของระบบส่องสว่าง ทำให้สามารถใช้ทดแทนระบบส่องสว่างแบบดั้งเดิม มาเป็นระบบส่องสว่างที่ประหยัด และปรับเปลี่ยนความสว่างสีของแสงได้ตามต้องการ ไม่ว่าจะเป็นแสงสีขาวหรือสีใด ๆ ที่สำคัญตอบโจทย์การประหยัดพลังงานได้เป็นอย่างดี ในการจัดการความร้อนระบบส่องสว่างของโคมไฟถนนแบบแอลอีดีถือเป็นสิ่งสำคัญ ที่จะมั่นใจได้ว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ให้แสงในระดับที่เหมาะสม คงที่ และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุด ซึ่งจะต้องวิเคราะห์ลักษณะของความร้อนและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นอย่างละเอียด ความร้อนที่ปล่อยออกมาจากแอลอีดีชิป (LED chip) ในขณะที่จ่ายพลังงานเพื่อให้แสงสว่างนั้น จำเป็นต้องมีการออกแบบฮีตซิงก์ หรือครีบบระบายความร้อน (heat sink) เพื่อจัดการความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโคมไฟให้มีอุณหภูมิแอลอีดีชิปต่ำที่สุดซึ่งจะช่วยลดความร้อนที่สูญเสียในระบบลง เพื่อที่จะทำให้ระบบแสงสว่างแสดงประสิทธิภาพสูงสุดออกมา

การถ่ายเทความร้อน โดยใช้แผ่นครีบบระบายความร้อนเพื่อถ่ายเทความร้อนบนชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ออกสู่ภายนอก ซึ่งในการวิเคราะห์อุณหภูมิที่กล่าวมานั้น โดยปกติจะสามารถอธิบายได้ในรูปของสมการอนุพันธ์ (differential equation) หรือ สมการอินทิกรัล (integral equation) เป็นไปได้ยากที่จะหาผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation : PDE) วิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และได้รับความนิยมแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method : FEM) โดยวิทยานิพนธ์นี้จะวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อนโคมไฟถนนแอลอีดีทั้ง 3 แบบ ที่มีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันแต่มีปริมาตรเท่ากัน ซึ่งต้องอาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3-D FEM) มาใช้ในการดำเนินการ

ไฟไนต์เอลิเมนต์ เริ่มวิวัฒนาการมาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ.1950 ปัจจุบันเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและ

มีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนท์ออลลิเมนต์ได้ง่าย และรวดเร็วขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีไฟไนท์ออลลิเมนต์มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมแทบทุกสาขา ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะจัดแบ่งพื้นที่ของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยที่ประกอบขึ้นจากโหนด โดยเชื่อมต่อกันด้วยกริด สำหรับปัญหา 3 มิติ นิยมใช้ชิ้นส่วนย่อยที่เป็นรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (linear tetrahedral) เพื่อประมาณโดเมนของปัญหาได้ ซึ่งข้อดีของระเบียบวิธีนี้คือ สามารถหาผลเฉลยของระบบที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ นอกจากนี้ยังง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่อาจมีหลายลักษณะ หลายรูปแบบผสมกันอยู่ภายในระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธีไฟไนท์ออลลิเมนต์มาใช้ในการดำเนินการ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อน โคมไฟถนนแอลอีดีทั้ง 3 แบบ ได้แก่ แบบแผ่นครีบบที่ครีบบวนมีลักษณะโค้ง แบบแผ่นครีบบที่ครีบบวนมีลักษณะตรง และแบบแผ่นครีบบที่ครีบบมีลักษณะเป็นซี่ ที่มีลักษณะรูปทรงต่างกันแต่มีปริมาตรเท่ากัน ด้วยการพัฒนาวิธีไฟไนท์ออลลิเมนต์ขึ้นเอง โดยการระบายความร้อนของครีบบในลักษณะต่าง ๆ จะมีผลกระทบโดยตรงต่ออุณหภูมิของแอลอีดีชิปที่ต้องการศึกษา พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงในทางปฏิบัติ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) พัฒนาโปรแกรมไฟไนท์ออลลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับคำนวณค่าอุณหภูมิและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อน โคมไฟถนนแอลอีดี ให้สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ
- 2) วิเคราะห์ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแผ่นครีบบระบายความร้อน โคมไฟถนนแอลอีดีทั้ง 3 แบบ ได้แก่ แบบแผ่นครีบบที่ครีบบวนมีลักษณะโค้ง แบบแผ่นครีบบที่ครีบบวนมีลักษณะตรง และแบบแผ่นครีบบที่ครีบบมีลักษณะเป็นซี่ ที่มีลักษณะรูปทรงที่ต่างกันแต่มีปริมาตรเท่ากัน พร้อมทั้งนำผลที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงในทางปฏิบัติ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) ในแบบจำลองกำหนดให้หลอดแอลอีดีชิปมีรูปทรงสี่เหลี่ยมและมีลักษณะเรียบ
- 2) พื้นที่ในการทดสอบมีค่าอุณหภูมิโดยรอบคงที่และปราศจากค่าความชื้นในอากาศ
- 3) กำหนดให้หลอดแอลอีดีชิปมีแหล่งกำเนิดความร้อนเท่ากันตลอดพื้นที่

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) พัฒนาโปรแกรม FEM สำหรับวิเคราะห์การกระจายตัวของความร้อนภายในครีบริบายความร้อนของโคมไฟถนนแอลอีดีในแต่ละแบบ โดยการระบายความร้อนของครีบริบายในลักษณะต่าง ๆ จะมีผลกระทบโดยตรงต่ออุณหภูมิของแอลอีดีชิป
- 2) ใช้ FEM แบบ 3 มิติเป็นเครื่องมือในการจำลองผลเพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิ
- 3) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลองในทางทฤษฎีกับผลการทดสอบจริงในทางปฏิบัติด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิของครีบริบายความร้อนโคมไฟถนนแอลอีดี
- 2) ได้โปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการพัฒนาโปรแกรม FEM ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงในการวิเคราะห์อุณหภูมิของครีบริบายความร้อนโคมไฟถนนแอลอีดี
- 3) ได้ทราบถึงคุณลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในครีบริบายความร้อนแต่ละแบบ โดยการระบายความร้อนของครีบริบายในลักษณะต่าง ๆ จะมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิของแอลอีดีชิป

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท 3 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขตและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทาง และระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการสำรวจสืบค้นจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ หลอดไฟแอลอีดี ทฤษฎีความร้อนซึ่งประกอบด้วยความรู้ทางด้านความร้อน กลไกการถ่ายโอนความร้อน และระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ

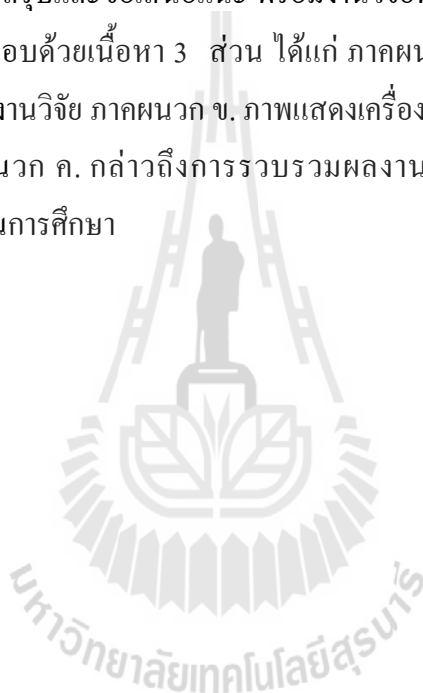
บทที่ 4 มีเนื้อหาว่าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณค่าอุณหภูมิของโคมไฟถนนแอลอีดี และอธิบายขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิที่กระจายตัวภายในครีบริบายความร้อน

บทที่ 5 อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลอุณหภูมิพร้อมแสดงผลการจำลองอุณหภูมิภายในแผ่นครีบบระบายความร้อนของโคมไฟถนนแอลอีดีแต่ละแบบ ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ พร้อมพิจารณาความร้อนที่แอลอีดีชิปที่เป็นผลมาจากครีบบระบายความร้อนแต่ละแบบที่มีรูปทรงแตกต่างกัน โดยกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ประยุกต์ใช้ในการจำลองผล รวมถึงอธิบายโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

บทที่ 6 อธิบายถึงขั้นตอนการทดสอบจริงของโคมไฟถนนแอลอีดี และนำผลอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบนั้นมาเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ พร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อ

ภาคผนวก ประกอบด้วยเนื้อหา 3 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก. คุณสมบัติของโคมไฟถนนแอลอีดีที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ภาคผนวก ข. ภาพแสดงเครื่องมือและการวัดอุณหภูมิของโคมไฟถนนแอลอีดี และภาคผนวก ค. กล่าวถึงการรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในขณะดำเนินการศึกษา



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาโปรแกรมไฟในทออลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับคำนวณค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแผ่นครีบบระบายความร้อนของ โคมไฟถนนแอลอีดีที่มีผลต่อความร้อนของแอลอีดีชิป ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัย และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ได้แก่ ฐานข้อมูล IEEE IEE และ ScienceDirect เป็นต้น งานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในเรื่องการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแผ่นครีบบระบายความร้อนของ โคมไฟถนนแอลอีดีตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 โดยจัดลำดับการเรียบเรียงจากงานที่มีผู้ได้ดำเนินการก่อนไปสู่งานที่ใหม่กว่าได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1995	Babus, Akintinde and Probert	ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองการถ่ายความร้อนด้วยอากาศของกลุ่มครีบบนแผงที่วางตั้งอยู่บนฐาน และวางฐานให้อากาศไหลผ่านในแนวนอน ซึ่งอากาศเป็นการไหลแบบบังคับ และมีอัตราการไหลคงที่ในการทดลองได้เปลี่ยนความเร็วลม วัสดุที่ใช้ทำแผ่นครีบบนแผงระหว่างครีบบ โดยครีบบนแผงที่ได้ทำจากอะลูมิเนียมผสม

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1999	Sarver and Whalley	<p>จะทำให้การถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทความร้อนโดยมีการไหลของอากาศที่ดีที่สุดขึ้นอยู่กับการจัดวางแถวของครีบบ และวัสดุที่ใช้ในการทำครีบบ</p> <p>ได้ทำการออกแบบครีบบระบายความร้อนของ IGBT โดยวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ 2 มิติ และแบบ 3 มิติ เพื่อที่จะใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองอย่างง่ายให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด และแสดงผลกระทบที่มีผลต่ออุปกรณ์อื่น ๆ ที่มาจากอุณหภูมิ</p>
2004	Arik, Becker, Weaver and Petroski	<p>ได้วิเคราะห์การจัดการความร้อนในหลอดไฟแอลอีดี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และให้ความส่องสว่างมากขึ้น โดยออกแบบให้มีความต้านทานความร้อนระหว่างรอยต่อกับฐานของแผงระบายความร้อนให้ต่ำซึ่งได้อาศัยหลักการถ่ายเทความร้อน</p>
2007	Chau, Lin, Yen and Yang	<p>ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนของไดโอดเปล่งแสงที่มีความร้อนมาจากสนามไฟฟ้า และศึกษาแหล่งความร้อนที่เกิดจากขั้วไฟฟ้า ผลจากระยะห่างของครีบบระบายความร้อน ซึ่งได้ข้อสรุปว่า สิ่งที่มีบทบาทสำคัญที่ทำให้เกิดความร้อนมากที่สุด คือ ชนิดของขั้วไฟฟ้าช่วงรอยต่อ ซึ่งงานวิจัยนี้แก้ไขด้วยการติดตั้งพัดลมเพื่อจัดการความร้อน โดยอาศัยหลักการพาความร้อนแบบบังคับ</p>
2008	Bougataya, Lakhsasi, Norman, Prytula, Blaquiere and Savaria	<p>ได้ดำเนินการศึกษาการลดความเครียดเหนี่ยวนำทางความร้อน และ ป้องกัน การเกิด ความ ร้อน เกิน (overheat) ภายในแผงวงจรเวเฟอร์โดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ค่าความร้อน และใช้เงื่อนไขขอบเขตความร้อน เพื่อคาดการณ์การกระจายอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นในแผงวงจรเวเฟอร์ที่สภาวะคงตัวเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับแผงวงจรเวเฟอร์</p>
2009	Dai, Wang, Fang, Tang and Shi	<p>ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน และปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของแม่เหล็ก HTS สำหรับแบบจำลองระบบไฟฟ้า</p>

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2010	Deng and Liu	<p>ในสภาวะกระแสเกิน ซึ่งวิเคราะห์ผ่านสมการความร้อน โดยใช้ระเบียบไฟไนท์อีลิเมนต์ แม่เหล็กจะถูกระบายความร้อนโดยเครื่องทำความเย็นซึ่งถ่ายเทความร้อนระหว่างแม่เหล็กและแผ่นระบายความร้อนโดยวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้ผลดังนี้</p> <ul style="list-style-type: none"> - ระบบจะมีความเสถียรภาพเมื่อกระแสเกินไม่มากกว่า 160 A - แผ่นระบายความร้อนติดกับน้ำสัมผัสมากยิ่งช่วยระบายได้ดีและเพิ่มเสถียรภาพของแม่เหล็ก HTS ด้วย - ปรับปรุงระบบทำความเย็นด้วยการเพิ่มช่องว่างระหว่างการเชื่อมต่อ - คุณลักษณะของแม่เหล็กจะดีขึ้น เมื่อกำหนดค่าที่เหมาะสมในการระบายความร้อน <p>ได้ศึกษาการจัดการระบบระบายความร้อนของหลอดไฟแอลอีดีกำลังสูง โดยใช้สาร โลหะเหลวเป็นสารช่วยในการหล่อเย็น ได้วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิผ่านความต้านทานความร้อนด้วยไฟไนท์อีลิเมนต์ ซึ่งพบว่าหากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น จะทำให้มีการระบายความร้อนดีขึ้นตามซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานอีกด้วย</p>
2011	Fengze, Daoguo and Guoqi	<p>ได้ศึกษาการวิเคราะห์การกระจายความร้อนในแผ่นครีระบายความร้อนที่มีหลอดแอลอีดีขนาด 9 วัตต์ ติดตั้งอยู่ โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองแผ่นครีระบายความร้อนออกเป็น 3 แบบที่มีลักษณะแตกต่างกันแต่อยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ได้แก่ ครีที่มีลักษณะเป็นแผ่น ครีที่มีลักษณะเป็นซี่วางในแนวเดียวกัน และครีที่มีลักษณะเป็นซี่วางสลับกัน โดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิในแผ่นครีระบายความร้อนและเปรียบเทียบทั้งสามแบบ ซึ่งพบว่า แบบแผ่นครีที่มีลักษณะเป็นซี่วางสลับกัน ทำให้อุณหภูมิที่รอยต่อลดได้ดีที่สุด</p>

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2011	Kailin, Guotao and Peng	ได้ดำเนินการศึกษาการกระจายความร้อนของ MCM-LED โดยได้สร้างแบบจำลอง MCM-LED พร้อมใส่ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุต่าง ๆ แล้วทำการวิเคราะห์บนพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนและวิธีการเชิงตัวเลข ความต้านทานความร้อนและอุณหภูมิรอยต่อของ MCM-LED ซึ่งคำนวณด้วยทฤษฎีความต้านทานความร้อนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองผล
2012	Bender, Iaronka, Costa, Prado and Marchesan	ได้ศึกษาความร้อนทางไฟฟ้า และเลนส์ของไดโอดเปล่งแสง (LEDs) บทความนี้ได้เสนอวิธีการออกแบบที่ดีที่สุด โดยจะคำนึงถึงความร้อนที่เกิดขึ้นที่รอยต่อที่เกิดจากหลอดแอลอีดีและออกแบบขนาดของครีบบระบายความร้อนด้วยการวิเคราะห์ผ่านสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งได้นำเสนอ 2 วิธี วิธีแรก คือ คำนวณค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบส่องสว่างทั้งหมด วิธีที่สอง คือ พิจารณาร่วมกันกับครีบบระบายความร้อน ซึ่งการออกแบบทั้งสองส่งผลในการยืดอายุการใช้งานตัวหลอดให้ดีขึ้น
2013	Iaronka, Bender and Marchesan	ได้ศึกษาการออกแบบการระบายความร้อน โคมไฟถนนแอลอีดีในการออกแบบได้ติดตั้งพัดลมในตำแหน่งที่ต่างกัน โดยจำลองการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ พร้อมนำมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นว่าเมื่อมีการติดตั้งพัดลมจะช่วยในการถ่ายเทความร้อนจะทำให้ครีบบระบายความร้อนและอุณหภูมิที่รอยต่อเย็นมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบจากปกติที่ไม่มีการติดตั้งพัดลมในโคมไฟถนน
2014	Subramani and Devarajan	ได้ดำเนินการทดสอบหลอดไฟแอลอีดีกำลังสูงในการใช้ฟิล์มบาง BN แทน TIM ซึ่งถูกเคลือบด้วยอะลูมิเนียมชั้นสเตรท เมื่อขับกระแสส่งผลให้เกิดความร้อนของหลอดแอลอีดี และจะสังเกตเห็นว่าค่าที่รอยต่อมีค่าต่ำลง ภายใต้เงื่อนไขที่ 700 mA ค่าความต้านทานความร้อนรวมของแอลอีดียังพบว่าอยู่ในระดับต่ำสำหรับฟิล์มบาง BN อีกทั้งดีกว่าแบบเปลือย

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2015	Yunpeng and Quan	ได้ดำเนินการทดสอบการกระจายตัวของความร้อนที่สภาวะคงตัวของหลอดแอลอีดีชิปกำลังสูง ซึ่งมีครีบบระบายความร้อนในการพาความร้อนแบบอิสระภายใต้อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 25 °C โดยสร้างแบบจำลองผลด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อคาดการณ์ค่าอุณหภูมิสูงสุดและการกระจายตัวของอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นในโคมไฟแอลอีดีนี้ ซึ่งพบว่าครีบบระบายความร้อนที่ใช้ในการทดสอบนี้สามารถควบคุมความร้อนที่รอยต่อของหลอดแอลอีดีไม่ให้เกินค่าอุณหภูมิที่กำหนดได้

จะเห็นได้ว่าการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะปรากฏแต่งงานวิจัยที่พิจารณาการคำนวณค่าของอุณหภูมิและวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อนของโคมไฟถนนแอลอีดีด้วยวิธีการต่าง ๆ แต่ไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่เน้นศึกษาการคำนวณด้วยการพัฒนาวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติขึ้นเอง เพื่อให้เห็นถึงการกระจายของอุณหภูมิอย่างละเอียดและชัดเจนมาก่อน จากวรรณกรรมและงานวิจัยที่ได้สรุปผ่านมา สามารถช่วยให้ผู้ที่กำลังดำเนินการศึกษาหรือพัฒนาเกี่ยวกับงานวิจัยนี้พอมองภาพออกอย่างกว้าง ๆ ได้ว่า มีคณะนักวิจัยผู้ใดได้ศึกษาสิ่งใดไปแล้วบ้าง แต่ยังไม่สามารถแยกเป็นหมวดหมู่ตามวิธีการดำเนินงานศึกษาได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในส่วนถัดไปนี้จึงได้ทำการเรียบเรียงและคัดสรรงานวิจัยหลัก ๆ ที่สำคัญ และมีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัดจากหลาย ๆ ผลงานที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1 โดยจะได้ กล่าวถึงโดยย่อ ดังนี้

งานวิจัยของ Babus และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองการถ่ายเทความร้อนด้วยอากาศของกลุ่มครีบบนที่วางตั้งอยู่บนฐาน และวางฐานให้อากาศไหลผ่านในแนวนอน อากาศเป็นการไหลแบบบังคับ และมีอัตราการไหลคงที่ ในการทดลองได้เปลี่ยนความเร็วลม วัสดุที่ใช้ทำครีบบ ระยะเวลาห่างระหว่างครีบบ โดยครีบบที่ทำจากอะลูมิเนียมผสมจะให้การถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทความร้อนโดยมีการไหลของอากาศที่ดีที่สุดขึ้นอยู่กับการจัดวางแนวของครีบบ และวัสดุที่ใช้ในการทำครีบบ งานวิจัยของ Arik และคณะ (2004) ได้วิเคราะห์การจัดการความร้อนในหลอดไฟแอลอีดี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และให้ความส่องสว่างมากขึ้น โดยออกแบบให้มีความต้านทานความร้อนระหว่างรอยต่อกับฐานของแผ่นระบายความร้อนให้ต่ำ ซึ่งได้อาศัยหลักการถ่ายเทความร้อน งานวิจัยของ Deng และคณะ

(2010) ได้ศึกษาการจัดการระบบระบายความร้อนของหลอดไฟแอลอีดีกำลังสูง โดยใช้สารโลหะเหลวเป็นสารช่วยในการหล่อเย็นได้วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิผ่านความต้านทานความร้อนด้วยไฟไนท์อิลลิเมนต์ ซึ่งพบว่าหากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น จะทำให้มีการระบายความร้อนดีขึ้นตามซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานอีกด้วย งานวิจัยของ Laronka และคณะ (2013) ได้ศึกษาการออกแบบการระบายความร้อนโคมไฟถนนแอลอีดีในการออกแบบได้ติดตั้งพัดลมในตำแหน่งที่ต่างกัน โดยจำลองโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติพร้อมนำมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นว่าเมื่อมีการติดตั้งพัดลมเพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อนจะทำให้ครีบบระบายความร้อนและอุณหภูมิที่รอยต่อเย็นมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบจากปกติที่ไม่มีการติดตั้งพัดลมในโคมไฟถนนแอลอีดี งานวิจัยของ Kailin และคณะ (2011) ได้ดำเนินการศึกษาการกระจายความร้อนของ MCM-LED โดยได้สร้างแบบจำลอง MCM-LED พร้อมใส่ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุต่าง ๆ แล้วทำการวิเคราะห์หบนพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนและวิธีการเชิงตัวเลขความต้านทานความร้อน และอุณหภูมิรอยต่อของ MCM-LED ซึ่งคำนวณด้วยทฤษฎีความต้านทานความร้อนโดยใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ในการจำลองผล งานวิจัยของ Fengze และคณะ (2011) ได้ศึกษาการวิเคราะห์การกระจายความร้อนในแผ่นครีบบระบายความร้อนที่มีหลอดแอลอีดีขนาด 9 วัตต์ ติดตั้งอยู่ โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองแผ่นครีบบระบายความร้อนออกเป็น 3 แบบที่มีลักษณะแตกต่างกันแต่อยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ได้แก่ ครีบบที่มีลักษณะเป็นแผ่น ครีบบที่มีลักษณะเป็นซี่วางในแนวเดียวกัน และครีบบที่มีลักษณะเป็นซี่วางสลับกัน โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิในแผ่นครีบบระบายความร้อนและเปรียบเทียบทั้งสามแบบ ซึ่งพบว่า แบบแผ่นครีบบที่มีลักษณะเป็นซี่วางสลับกันทำให้อุณหภูมิที่รอยต่อลดได้ดีที่สุด งานวิจัยของ Bender และคณะ (2012) ได้ศึกษาความร้อนทางไฟฟ้า และเลนส์ของไดโอดเปล่งแสง (LEDs) บทความนี้ได้เสนอวิธีการออกแบบที่ดีที่สุด โดยจะคำนึงถึงความร้อนที่เกิดขึ้นที่รอยต่อที่เกิดจากหลอดแอลอีดีและออกแบบขนาดของครีบบระบายความร้อนด้วยการวิเคราะห์ผ่านสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งได้นำเสนอ 2 วิธี วิธีแรกคือ คำนวณค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบส่องสว่างทั้งหมด วิธีที่สอง คือ พิจารณาร่วมกันกับครีบบระบายความร้อน ซึ่งการออกแบบทั้งสองส่งผลในการยืดอายุการใช้งานตัวหลอดให้ดีขึ้น และงานวิจัยของ Yumpeng และคณะ (2015) ได้ดำเนินการทดสอบการกระจายตัวของความร้อนที่สภาวะคงตัวของหลอดแอลอีดีชิปกำลังสูง ซึ่งมีครีบบระบายความร้อนในการพาความร้อนแบบอิสระ ภายใต้อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 25 °C โดยสร้างแบบจำลองผลด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เพื่อคาดการณ์ค่าอุณหภูมิสูงสุดและการกระจายตัวของอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นในโคมไฟนี้ ซึ่งพบว่า

ครีประบายความร้อนที่ใช้ในการทดสอบนี้สามารถควบคุมความร้อนที่รอยต่อของหลอดแอลอีดีไม่ให้เกินค่าที่กำหนดได้

2.3 สรุป

บทที่ 2 นี้ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการจากฐานข้อมูล IEEE IEE ScienceDirect และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันซึ่งจากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด จะเห็นได้ว่า ยังไม่มีคณະวิจัยใดได้เคยศึกษาและเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในครีประบายความร้อนของ โคมไฟถนนแอลอีดี ที่มีลักษณะรูปทรงที่แตกต่างกัน โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขปริมาณที่เท่ากัน ด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งพัฒนาโปรแกรมขึ้นเอง พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดสอบจริง



บทที่ 3

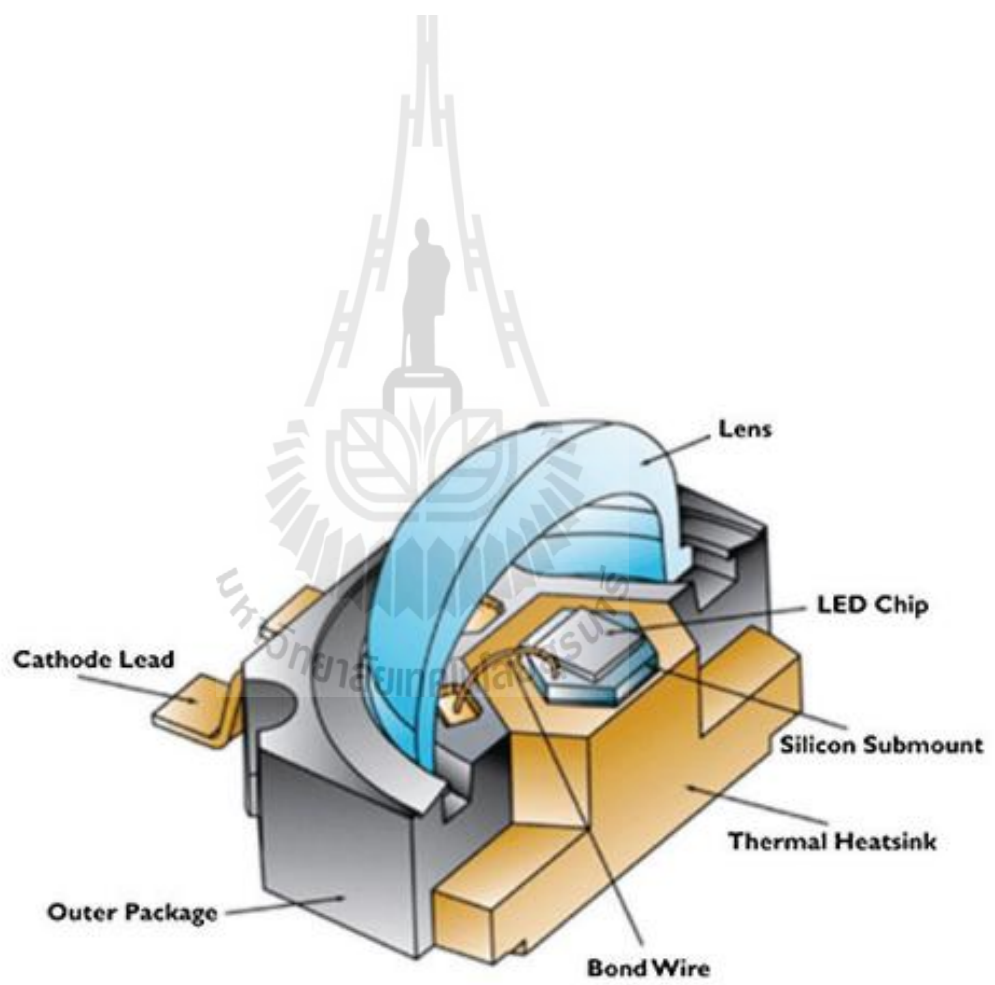
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นับว่ามีความสำคัญ และเป็นประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ และความเข้าใจในงานวิจัยสำหรับนำไปเป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 3 หัวข้อหลัก ได้แก่ หลอดไฟแอลอีดี ทฤษฎีความร้อน ซึ่งประกอบด้วยความรู้ทางด้านความร้อน กลไกการถ่ายโอนความร้อน และสุดท้ายระเบียบวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์แบบ 3 มิติ โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างถึงต่อการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อหามีความกระชับและชัดเจนยิ่งขึ้น

3.2 หลอดไฟแอลอีดี

หลอดแอลอีดี (light emitting diode, LED) หรือ ไดโอดเปล่งแสง เริ่มมาจากจุดกำเนิด คือ ไดโอดก่อน ไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดสองขั้วที่ออกแบบและควบคุมทิศทางการไหลของประจุไฟฟ้า โดยยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวและกั้นการไหลในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อกำลังไดโอดจึงมักจะหมายถึงไดโอดที่ผลิตมาจากสารกึ่งตัวนำ (semiconductor diode) ซึ่งก็คือ ผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ต่อกันได้ทางขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว ส่วนหลอดแอลอีดี หรืออาจเรียกว่า solid-state lighting (SSL) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทหนึ่ง จัดอยู่ในจำพวกไดโอดที่สามารถเปล่งแสงในช่วงสเปกตรัมแคบในรูปของอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (electroluminescence) สีของแสงที่เปล่งออกมานั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุกึ่งตัวนำที่ใช้ และเปล่งแสงได้ใกล้ช่วงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) ช่วงแสงที่มองเห็น (visible light) และช่วงอินฟราเรด (infrared) ผู้พัฒนาไดโอดเปล่งแสงขึ้นเป็นคนแรก คือ Nick Holonyak แห่งบริษัทเจเนรัลอิเล็กทริก (general electric company) โดยได้พัฒนาไดโอดเปล่งแสงในช่วงแสงสีแดงที่มองเห็น และสามารถใช้งานได้ในเชิงปฏิบัติเป็นครั้งแรก เมื่อ ค.ศ. 1962 จนกระทั่งช่วงทศวรรษที่ 1970 George Craford จึงได้คิดค้นแอลอีดีสีเหลือง (amber) ขึ้นเป็นครั้งแรกและได้พัฒนาความสว่างของหลอดแอลอีดีสีแดงและสีแดงอมส้มด้วย

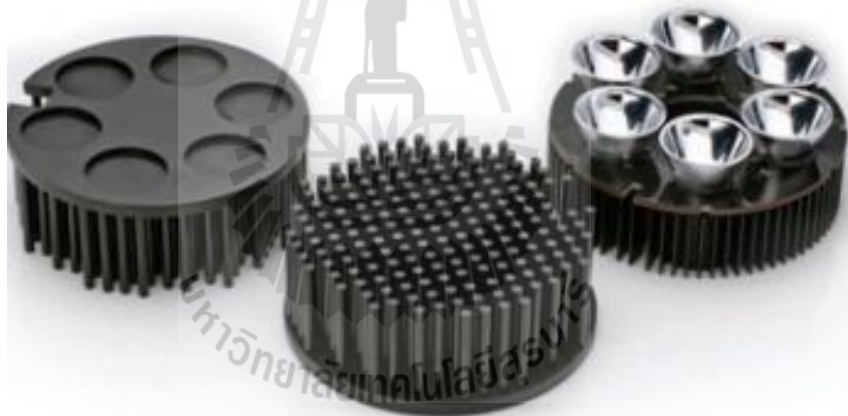




LED module



LED driver



LED heat sink

ความมืดสว่างของเม็ดแอลอีดี สีที่ซิงค์เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนจากหลอดแอลอีดี ซึ่งคุณภาพการระบายความร้อนขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ เช่น ทองแดง (มีคุณสมบัติระบายความร้อนดีที่สุด) ทองคำ และอลูมิเนียม ซึ่งนิยมใช้ที่สุด เป็นต้น

3.2.2 หลักการทำงานของหลอดแอลอีดี

เมื่อเปิดสวิตซ์ไฟกระแสไฟฟ้าจะผ่านไดร์เวอร์ เพื่อทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และเปลี่ยนจากความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงให้เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำ ประมาณ 2.5-3 โวลต์ แล้วจึงจ่ายเข้าตัวหลอดแอลอีดีชิป ซึ่งมีเพียงตัวนำแคโทดและแอโนดเท่านั้น โดยหลอดแอลอีดีจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้อยมากหรือประมาณ 20 มิลลิแอมป์ในตัวแอลอีดีชิปประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำขั้วประจุบวกชนิด P (positively changed material) ที่อยู่ห่างจากสารกึ่งตัวนำขั้วประจุลบชนิด N (negatively change dmaterial) เล็กน้อย จุดนี้เรียกว่า ช่วงรอยต่อ (junction) เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านหลอดแอลอีดี ตัวนำแอโนดจะไปดันขั้วประจุบวกและตัวนำแคโทด ไปดันขั้วประจุลบให้มาชนกัน เมื่อประจุบวกและประจุลบมาชนกันที่รอยต่อของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด ก็จะจับตัวกันและจะทำการคายพลังงานออกมาในรูปของแสงสว่างซึ่งเรียกว่า อิเล็กโทรลูมิเนสเซนซ์ (electroluminescence : EL) ทำให้เกิดแสงสว่างที่บริเวณด้านหน้าตัวหลอดแอลอีดี ซึ่งมีอุณหภูมิในการทำงานที่ประมาณ 25 องศาเซลเซียส ถ้าหากอุณหภูมิสูงเกินไปแสงสว่างที่ออกมาจะลดลงและเกิดแสงผิเคเฟี้ยน แสงจากหลอดแอลอีดีนั้นมีลักษณะพุ่งออกในทิศทางเดียว แต่ในกรณีที่ต้องการให้แสงกระจายออกในมุมแคบหรือกว้างเพิ่มขึ้นก็จะใช้อุปกรณ์ครอบหลอดแอลอีดีในลักษณะของเลนส์ (package) ไว้เพื่อบังคับทิศทางของการกระจายแสง หลอดแอลอีดีสามารถเปิดปิดได้ทันทีไม่ต้องใช้ระยะเวลาในการจุดติดเหมือนหลอดไส้ที่ต้องเผาไส้หลอดหรือหลอดดิสชาร์จที่ต้องปรับแรงดันก๊าซภายใน หลอดแอลอีดีสามารถปรับความเข้มของแสงได้ด้วยอุปกรณ์หรี่ไฟ (dimmer) โดยขึ้นอยู่กับรุ่นและอุปกรณ์ควบคุม

3.2.3 ครีระบายความร้อน

การระบายความร้อนด้วยอากาศนั้น เป็นการระบายความร้อนโดยอาศัยหลักการพาความร้อน เป็นการระบายความร้อนที่ไม่ต้องใช้อุปกรณ์เพิ่มเติมมาก ซึ่งการระบายความร้อนแบบนี้จะใช้กับอุปกรณ์ที่มีภาระทางความร้อนไม่มาก เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และแผงวงจรทางไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ โดยการติดครีระบายความร้อนเข้าไป ซึ่งการติดครีระบายความร้อนก็คือ การเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อน โดยการให้มีพื้นที่ของแหล่งกำเนิดความร้อนให้สัมผัสกับอากาศมากขึ้นนั่นเอง โดยการระบายความร้อนด้วยอากาศที่ใช้ครีระบายความร้อนนั้นแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1) แบบการพาความร้อนโดยอิสระ ซึ่งส่วนมากจะใช้กับแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีความร้อนไม่มาก เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จุดสังเกตสำหรับการระบายความร้อนแบบนี้ก็คือ จะมีเพียงครีบบระบายความร้อนแต่ไม่มีพัดลมที่จะช่วยเป่าบังคับลมให้ผ่านครีบบระบายความร้อนนั้น

2) แบบการพาความร้อนแบบบังคับ จะใช้กับอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีความร้อนออกมามาก เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า วงจรเพาเวอร์ของระบบควบคุมทางไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น ครีบบระบายความร้อนของอินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์และอุปกรณ์อื่น ๆ ซึ่งการระบายความร้อนด้วยอากาศแบบนี้ ส่วนใหญ่จะมีการติดใบพัดหรือพัดลมเพื่อเพิ่มปริมาณลมให้ไหลผ่านครีบบระบายความร้อนให้มาก และรวดเร็วขึ้น

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าครีบที่ใช้ในการระบายความร้อนแบบนี้ เป็นตัวเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อน ดังนั้นในการบำรุงรักษาเพื่อที่จะให้กลไกการระบายความร้อนแบบนี้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องปฏิบัติดังนี้ คือ

- หมั่นทำความสะอาดครีบบระบายความร้อนให้สะอาดอยู่เสมอเพราะการที่ครีบบระบายความร้อนสกปรกจะทำให้ประสิทธิภาพของการระบายความร้อนลดลง หรือระบายความร้อนได้น้อยลงนั่นเอง
- ระวังไม่ให้ครีบบระบายความร้อนชำรุดเสียหายเพราะจะทำให้ความสามารถในการระบายความร้อนลดน้อยลง
- ครีบบระบายความร้อนต้องยึดติดแน่นอยู่กับเครื่องจักรหรือแหล่งกำเนิดความร้อน และในกรณีที่ต้องติดตั้งครีบบระบายความร้อนใหม่ในการติดตั้งต้องยึดครีบบระบายความร้อนให้แน่นเพื่อประสิทธิภาพที่ดีในการระบายความร้อน
- ในระบบระบายความร้อนด้วยครีบที่ไหลลมเป่าหรือบังคับทิศทางการไหลของอากาศ ต้องไม่ให้มีอะไรมากีดขวางทางไหลของลม ทั้งทางดูดและทางเป่าเพราะเมื่อมีอะไรมาขวางทิศทางการไหลของลม จะทำให้ลมที่ไหลน้อยลง และประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนลดลงด้วย นอกจากนี้ยังต้องหมั่นตรวจสอบการหมุนและสภาพของใบพัดของพัดลมให้อยู่ในสภาพดีตลอดเวลาด้วย
- ในอุปกรณ์บางตัวที่ใช้พัดลมเพื่อระบายความร้อนออกจากครีบนั้น การระบายความร้อนที่ถูกต้องนั้น ต้องให้พัดลมเป่าลมเข้าหาครีบไม่ใช่ให้พัดลมดูดความร้อนออกจากครีบ เพราะการเป่าลมเข้าหาครีบจะเป็นการบังคับทิศทางและปริมาณลมให้ผ่านครีบได้มากกว่า

3.3 ทฤษฎีความร้อน

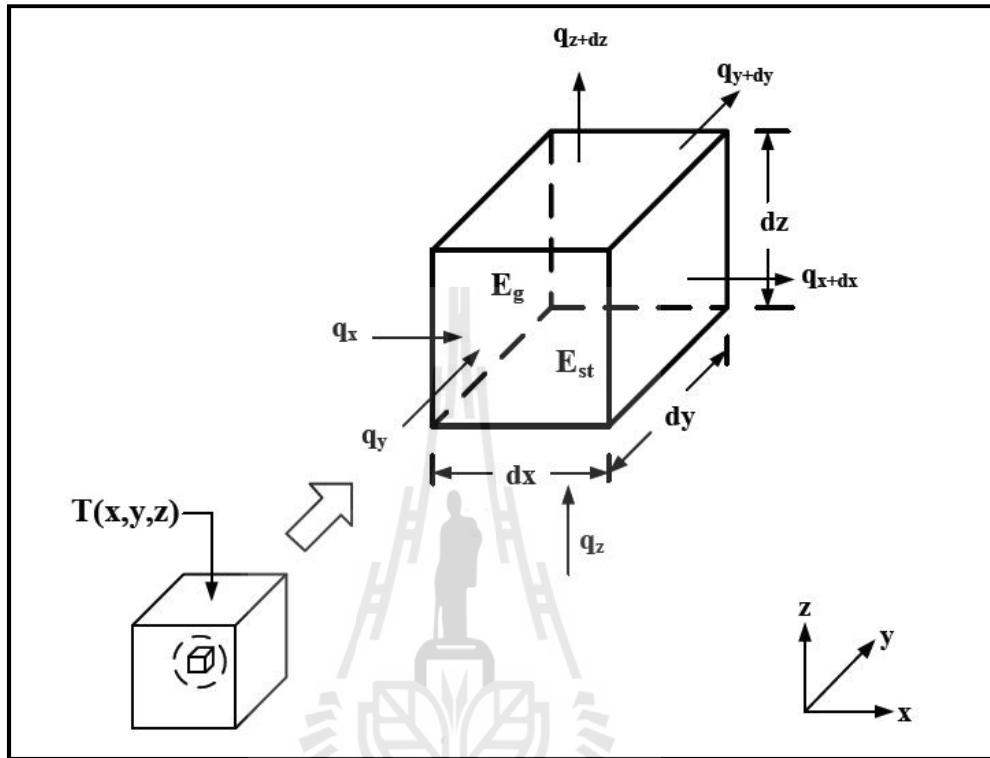
ในทางฟิสิกส์ความร้อน (heat : Q) หมายถึง พลังงานที่ถ่ายเทจากสสารหรือระบบหนึ่งไปยังสสารหรือระบบอื่น โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ (temperature) ในทางอุณหพลศาสตร์ จะใช้ปริมาณ TdS ในการวัดปริมาณความร้อน ซึ่งมีความหมายถึง อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุ (T) คูณกับอัตราการเพิ่มของเอนโทรปี (s) ในระบบเมื่อวัตถุที่พื้นผิวของวัตถุ ความร้อนสามารถไหลผ่านจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า หากต้องการให้ความร้อนถ่ายเทไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิเท่ากันหรือสูงกว่าจะทำได้ก็ต่อเมื่อใช้ heat pump เท่านั้น การสร้างแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสามารถทำได้จากปฏิกิริยาเคมี (เช่น การเผาไหม้) ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (เช่น ฟิวชันในดวงอาทิตย์) การเคลื่อนที่ของอนุภาคแม่เหล็กไฟฟ้า (เช่น เตาไฟฟ้า) หรือการเคลื่อนที่ทางกล (เช่นการเสียดสี) โดยที่อุณหภูมิเป็นหน่วยวัดปริมาณของพลังงานภายใน หรือเอนทาลปี ซึ่งเป็นพื้นฐานที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของวัตถุนั้น ๆ ความร้อนสามารถถ่ายเทระหว่างวัตถุได้ 3 วิธี คือ การแผ่รังสี การนำความร้อน และการพาความร้อน นอกจากนี้มีกระบวนการถ่ายเทความร้อนอีกแบบหนึ่งคือ ความร้อนแฝง ซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะ เช่น การเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว หรือจากของเหลวเป็นก๊าซ เป็นต้น

3.3.1 ความร้อน

แนวคิดของกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์นั้นเกี่ยวข้องกับกฎของการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) มีหลักการว่า “พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปหรือถูกถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายให้สูญสลายไปได้” ดังนั้นเมื่อพิจารณาการถ่ายโอนพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม จะพบว่าพลังงานรวมของระบบกับสิ่งแวดล้อมจะมีค่าคงที่ เช่น ในกระบวนการที่ระบบได้รับพลังงานจากสิ่งแวดล้อม ปริมาณพลังงานที่ระบบได้รับจะเท่ากับปริมาณพลังงานที่ระบบสูญเสีย ซึ่งสามารถแสดงการถ่ายโอนพลังงานของระบบใดๆ (สมชาย อัครทิวา และ ขวัญจิต วงษ์ชาติ, 2545) ได้ดังนี้

$$E_{in} - E_{out} = E_{st} - E_g \quad (3.1)$$

โดย	E_{in}	คือ พลังงานที่เข้าสู่ระบบ
	E_g	คือ พลังงานภายในหรือพลังงานก่อกำเนิด
	E_{out}	คือ พลังงานที่ออกจากระบบ
	E_{st}	คือ พลังงานที่สะสมในระบบ



$$E_{in} = q_x + q_y + q_z$$

$$q_x = -k_x dydz \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y = -k_y dx dz \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_z = -k_z dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.5)$$

เมื่อ k_x k_y และ k_z คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ในแนวแกน x y และ z ตามลำดับ ดังนั้นแทนสมการที่ (3.3) (3.4) และ (3.5) ลงในสมการที่ (3.2) จะได้สมการที่ (3.6)

$$E_{in} = -k_x dy dz \frac{\partial T}{\partial x} - k_y dx dz \frac{\partial T}{\partial y} - k_z dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.6)$$

ส่วนพลังงานที่ออกจากระบบ จะได้ดังนี้

$$E_{out} = (q_{x+dx}) + (q_{y+dy}) + (q_{z+dz}) \quad (3.7)$$

พลังงานความร้อนที่ออกจากระบบ q_{x+dx} q_{y+dy} และ q_{z+dz} เมื่อ q_x q_y และ q_z ไหลผ่านระยะ dx dy และ dz โดยอาศัยการกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์ จะได้ดังนี้

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (3.8)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (3.9)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (3.10)$$

ดังนั้นแทนสมการที่ (3.8) (3.9) และ (3.10) ลงในสมการที่ (3.7) จะได้

$$E_{out} = \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) + \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) + \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) \quad (3.11)$$

ส่วนพลังงานก่อกำเนิดจะเกิดขึ้น เมื่อมีการส่งถ่ายพลังงานเข้าไปในระบบ แล้วปลดปล่อยพลังงานในรูปของพลังงานเคมี พลังงานไฟฟ้า พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น สามารถแสดงในรูปสมการภายใต้ปริมาตรควบคุมที่ศึกษาในรูปแบบ 3 มิติ ได้ดังนี้

$$E_g = Q dx dy dz \quad (3.12)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อนที่ผลิตเอง (internal heat generation)

และพลังงานที่สะสมในระบบ เป็นการสะสมพลังงานในรูปต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานความร้อนสัมผัส ความร้อนแฝง พลังงานในรูปอื่น ๆ เช่น พลังงานจลน์ พลังงานศักย์ รวมไปถึงพลังงานทางเคมี ได้แก่ พลังงานพันธะ เป็นต้น แสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$E_{st} = \dots c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.13)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นมวล (mass density)

c คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity)

t คือ เวลา (time)

ดังนั้นแทนสมการที่ (3.6) (3.11) (3.12) และ (3.13) ลงในสมการที่ (3.1) จะได้

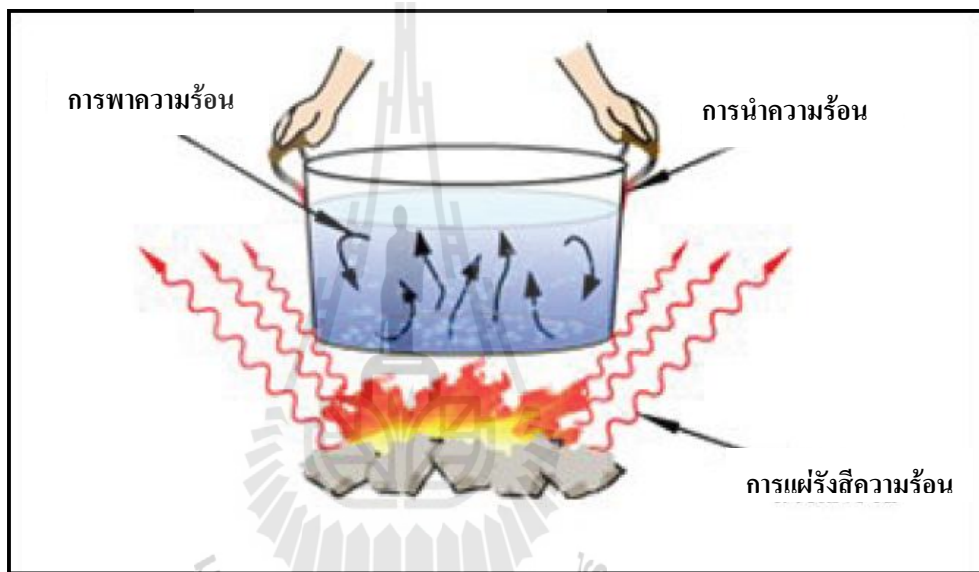
$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz = \dots c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz - Q dx dy dz \quad (3.14)$$

หรือจัดรูปใหม่โดยแทนสมการที่ (3.3) (3.4) และ (3.5) ลงในสมการที่ (3.14) จะได้

$$k_x dy dz \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} dx + k_y dx dz \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} dy + k_z dx dy \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} dz = \dots c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz - Q dx dy dz \quad (3.15)$$

หรือจัดให้อยู่ในรูปสมการความร้อน ดังนี้

$$k_x \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + Q = \dots c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.16)$$



$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

\dot{Q}_{cond}

- A คือ พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity)

3.3.4 การพาความร้อน

การพาความร้อนเป็นการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวของของแข็งกับของไหลที่มีการเคลื่อนที่ หรือกล่าวได้ว่าเป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของพลังงานจากแหล่งอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ โดยที่โมเลกุลตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปด้วย ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของลมที่ผ่านหน้าขดลวดความร้อน ลมดังกล่าวก็จะมีอุณหภูมิสูงตามไปด้วย ซึ่งการพาความร้อนมี 2 แบบ คือ การพาความร้อนอย่างไม่อิสระ (forced convection) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า เช่น การใช้พัดลมเป่าอากาศให้เกิดการเคลื่อนที่ผ่านถ้วยกาแฟร้อน เป็นต้น และการพาความร้อนอย่างอิสระ (free convection) เกิดขึ้นเมื่อของไหลเกิดการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงลอยตัว ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหลในบริเวณใกล้กับของแข็ง อันเป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหล โดยความร้อนจากถ้วยกาแฟจะทำให้อากาศมีความหนาแน่นต่ำลง (เบา) จึงเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน ขณะเดียวกันอากาศที่เย็นกว่ามีความหนาแน่นสูงกว่าจะเคลื่อนที่มาแทนที่

สมการในการหาอัตราการพาความร้อนจะปรากฏอยู่ในรูปกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's cooling law) ดังนี้

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (3.18)$$

- เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convection heat transfer coefficient) ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุ
 T_s คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ
 T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุ

3.3.5 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางความร้อน จะเคลื่อนที่ไปในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและจะเกิดขึ้นได้ดีในบริเวณที่เป็นสุญญากาศเมื่อพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนระหว่างวัตถุใด ๆ จะสามารถคำนวณการแผ่รังสีความร้อนได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma_s (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3.19)$$

เมื่อ ϵ คือ ค่าสภาพเปล่งรังสี (emissivity)
 T_s คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (stefan-boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ
 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

3.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

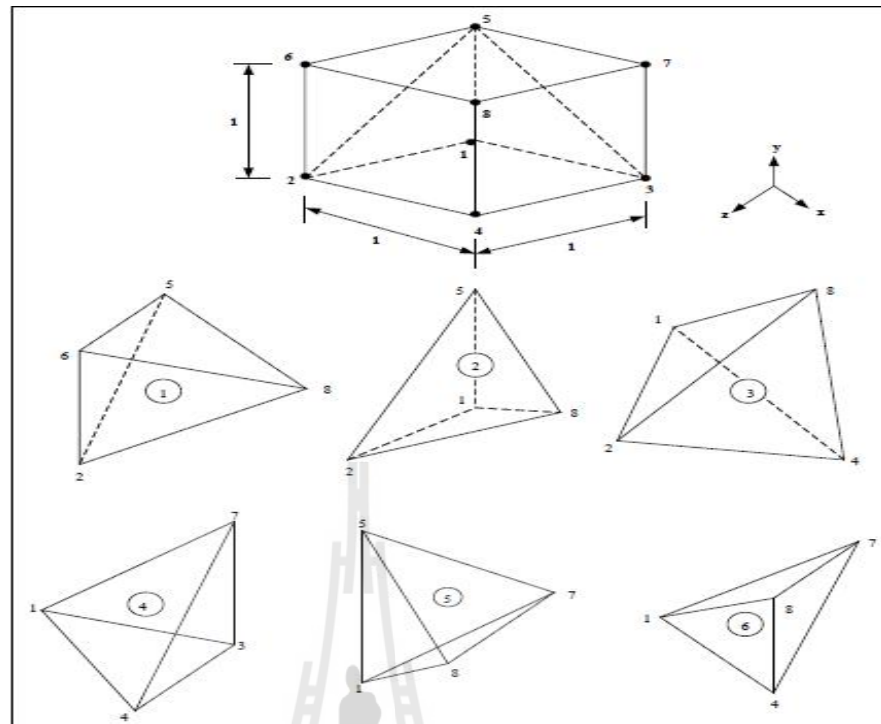
ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัล ในกรณีที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation : PDE) ส่วนใหญ่แล้วมักจะต้องหาผลเฉลยด้วยวิธีประมาณ เนื่องจากความซับซ้อนของสมการ วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี วิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมา คือ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม โดยแบ่งวัตถุของปัญหาที่สนใจออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยม ซึ่งตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่าง ๆ และขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่รู้ค่าจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เอง หากใช้ขนาดตารางสี่เหลี่ยมให้มีขนาดเล็กลงซึ่งหมายถึงต้องเพิ่มจำนวนตารางสี่เหลี่ยมให้มากขึ้นจะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของวัตถุดังกล่าวได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้จำนวนสมการผลต่างสี่เหลี่ยมมากขึ้นด้วย และกระบวนการในการแก้ปัญหาก็เป็นต้องการหน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้น รวมถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะสูงมากขึ้นตามไปด้วย ข้อดีของวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมคือ เป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหานั้น ๆ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมมีหลายประการ เช่น ความสะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (application of boundary conditions) และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับวัตถุซึ่งมีรูปร่างลักษณะซับซ้อน อย่างเช่น โครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่างๆ ของคอมไพเลอร์แอลอีดีบางชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กและซับซ้อน สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณอีกวิธีหนึ่ง ที่เรียกว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งนิยมเรียกคำย่อว่า FEM ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใด ๆ ก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงกว่า

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ แล้วสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และ

อิลลิเมนต์ต่าง ๆ จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่คำนวณหาค่าผลเฉลย สำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการคำนวณแบบ 3 มิติ

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลาย ๆ ส่วนที่เรียกว่าอิลลิเมนต์ โดยที่การกระจัด และแรงภายในแต่ละอิลลิเมนต์ ณ จุดที่อิลลิเมนต์ต่อโงกันจะต้องเข้ากันได้และสมดุล ซึ่งอิลลิเมนต์ต่าง ๆ นี้ จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของแต่ละงานว่าต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากเท่าใด ซึ่งถ้าพิจารณาแบบ 3 มิติ อาจอยู่ในรูปลักษณะของรูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) รูปทรงหกหน้า (hexahedron) รูปทรงแปดหน้า (octahedron) หรือ รูปทรงพีรามิด (pyramids) ก็ได้ ซึ่งในที่นี้จะใช้อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีจำนวน โหนดหรือจุดเชื่อมต่อที่น้อยที่สุด อีกทั้งรูปทรงสี่หน้าสามารถประกอบกันได้เป็นรูปทรงอื่น ๆ ที่กล่าวมาได้ง่าย โดยค่าผลเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนนับที่จะคำนวณออกมานั้น จะมีความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนอิลลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา นั้น ซึ่งขั้นตอน โดยทั่วไปของวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 6 ขั้นตอน (ปราโมทย์ เศษอำไพ, 2542)

1. แบ่งอิลลิเมนต์ย่อยให้กับระบบ แบ่งขอบเขตรูปร่างของระบบปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อย ๆ (discretization) โดยแต่ละอิลลิเมนต์จะมีความเป็นปริมาตรดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นรูปแสดงการแบ่งอิลลิเมนต์ของรูปร่างปัญหาแบบ 3 มิติ (ระนาบ xyz) โดยใช้อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) และเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างโปรแกรมการคำนวณสำหรับการป้อนข้อมูลของทุก ๆ อิลลิเมนต์ จึงขอยกตัวอย่างรูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วยอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าทั้งหมด 6 อิลลิเมนต์ 8 โหนด ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ต้องการ คือ หมายเลขของอิลลิเมนต์และหมายเลขของโหนด พร้อมทั้งค่าพิกัดของแต่ละโหนด ซึ่งสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

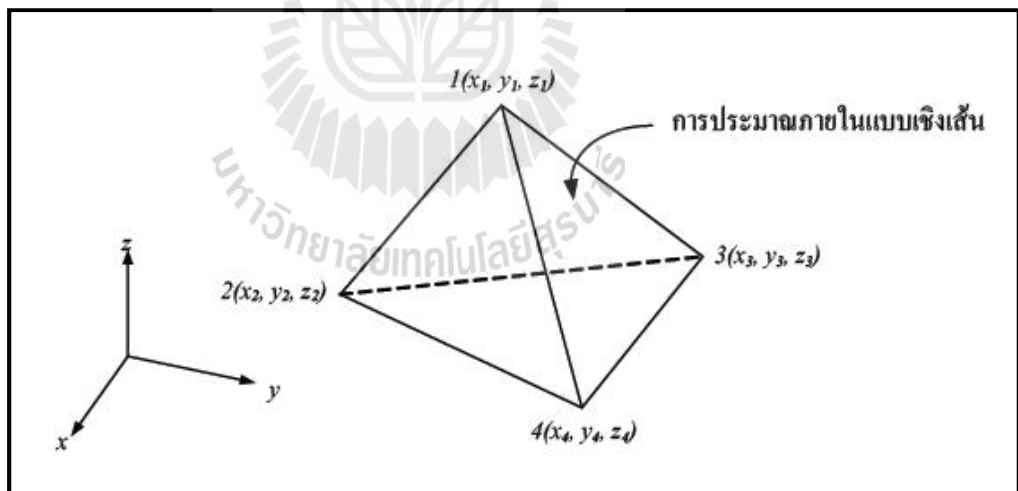


รูปที่ 3.5 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 6 อิลลิเมนต์ 8 จุดต่อ
เมื่อพิจารณาอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

ตารางที่ 3.1 ลักษณะข้อมูลของอิลลิเมนต์

หมายเลข อิลลิเมนต์	หมายเลขจุดต่อ			
	จุดต่อ <i>i</i>	จุดต่อ <i>j</i>	จุดต่อ <i>k</i>	จุดต่อ <i>l</i>
1	2	8	5	6
2	1	2	8	5
3	1	2	4	8
4	1	3	4	7
5	1	7	8	5
6	1	8	4	7

หมายเลขจุดต่อ	พิกัดแกนx	พิกัดแกนy	พิกัดแกนz
1	0	0	0
2	0	0	1
3	1	0	0
4	1	0	1
5	0	1	0
6	0	1	1
7	1	1	0
8	1	1	1



$$\tilde{e} = \Gamma + Sx + y + z$$

โดยที่ r , s , x และ y เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จากจุดต่อทั้งสี่ดังนี้

$$r_e(x_1, y_1, z_1) = r + sx_1 + xy_1 + yz_1$$

$$r_e(x_2, y_2, z_2) = r + sx_2 + xy_2 + yz_2$$

$$r_e(x_3, y_3, z_3) = r + sx_3 + xy_3 + yz_3$$

$$r_e(x_4, y_4, z_4) = r + sx_4 + xy_4 + yz_4$$

นำค่า r , s , x และ y ที่ได้จากการแก้สมการทั้งสี่ข้างต้น แทนค่ากลับลงไปในสมการที่ (3.20) จะได้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลลิเมนต์เป็น

$$r_e(x, y, z) = u_1 N_1 + u_2 N_2 + u_3 N_3 + u_4 N_4 \quad (3.21)$$

ซึ่ง N_n เมื่อ $n = 1, 2, 3$ และ 4 คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์

$$N_n = \frac{1}{6V} (a_n + b_n x + c_n y + d_n z) \quad (3.22)$$

โดยที่ $a_1 = x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3)$

$$a_2 = x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4)$$

$$a_3 = x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2)$$

$$a_4 = x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3)$$

$$b_1 = y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3)$$

$$b_2 = y_4(z_1 - z_3) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1)$$

$$b_3 = y_4(z_2 - z_1) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2)$$

$$b_4 = y_3(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)$$

$$c_1 = x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2)$$

$$c_2 = x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3)$$

$$c_3 = x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1)$$

$$c_4 = x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)$$

$$d_1 = x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3)$$

$$d_2 = x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1)$$

$$d_3 = x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2)$$

$$d_4 = x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)$$

และ V คือ ปริมาตรของแต่ละอิลลิเมนต์ หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$6V = \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

ความแม่นยำของผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมาี้มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำของปัญหามากน้อยเพียงใดด้วย

3. สร้างสมการของอิลลิเมนต์ (element formulation) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญของวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ อย่างเช่น กรณีสมการของอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า ที่ได้ยกมาเป็นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.6 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix}_e \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \\ u_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \\ f_l \end{bmatrix}_e \quad (3.24)$$

ซึ่งเขียนโดยย่อได้ว่า $[K]_e [u]_e = [f]_e$ โดย $[u]_e$ คือ เมทริกซ์ตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อและตัวห้อย e แสดงให้ทราบว่า เป็นเมทริกซ์ระดับอิลลิเมนต์ ซึ่งสมการของอิลลิเมนต์ดังกล่าวจำเป็นต้องถูกสร้างขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ การสร้างสมการของอิลลิเมนต์ ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (3.24) สามารถทำได้โดย

- วิธีการโดยตรง (direct approach) วิธีนี้สามารถใช้ได้เฉพาะกับปัญหาที่เข้าใจได้ง่าย ๆ อย่างเช่น ปัญหาต่าง ๆ ในรูปทรง 1 มิติ เท่านั้น ซึ่งไม่สามารถขยายเปลี่ยนแปลงเพื่อนำไปใช้กับปัญหาใน 2 หรือ 3 มิติ โดยทั่วไปได้
- วิธีการแปรผัน (variational approach) หลักการสำคัญของวิธีการนี้คือ จำเป็นจะต้องทำการหาหรือสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นแล้ว จะเป็นผลให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่กำลังสนใจอยู่ อย่างไรก็ตามวิธีการแปรผันเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในช่วงต้น ๆ ของการพัฒนาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับทางด้านโครงสร้าง และยังมีจุดอ่อนอีกคือ จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ ซึ่งปัญหาหลาย ๆ ชนิดในทางปฏิบัติสามารถสร้างสมการอนุพันธ์ขึ้นมาได้ แต่ไม่สามารถหาฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกันนั้นได้
- วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals) วิธีนี้จะใช้วิธีการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาโดยทั่ว ๆ ไป และถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน

4. นำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน (assembly) เป็นสมการรวมของระบบจากขั้นตอนที่ 1 หากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ โดยแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times n)} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} \quad (3.25)$$

หรือเขียนโดยย่อได้ดังนี้ $[K]_{\text{sys}}[u]_{\text{sys}} = [f]_{\text{sys}}$ จากสมการที่ (3.25) เมทริกซ์ $[K]_{\text{sys}}$ จะมีคุณสมบัติของความเป็นเมทริกซ์สมมาตร กล่าวคือ $[K]_{\text{sys}} = [K]_{\text{sys}}^T$ และมีคุณสมบัติของการจับกลุ่มกันของค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์บริเวณแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นแถบ

(banded matrix) จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางปฏิบัติที่จำเป็นต้องใช้จำนวน โหนดเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะก่อให้เกิดผลเฉลยที่เที่ยงตรง โดยสามารถพัฒนาให้เก็บเฉพาะค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ไว้ในหน่วยความจำเพื่อใช้ในการคำนวณเท่านั้น

การนำสมการย่อยของแต่ละอิเลลิเมนต์มาประกอบกันเข้าเป็นสมการรวมของระบบ จำเป็นต้องมีหลักการ ซึ่งหลักการที่จะกล่าวนี้ เป็นหลักการที่ง่าย สามารถทำได้โดยสะดวก เหมาะกับรูปร่างของปัญหาที่มีอิเลลิเมนต์ย่อยจำนวนมาก ๆ และหลักการนี้จะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมด้วย โดยสามารถทำความเข้าใจได้จากตัวอย่างรูปร่างของปัญหาดังรูปที่ 3.5 กล่าวคือ จะทำการสร้างสมการรวมของระบบซึ่งประกอบด้วย 6 อิเลลิเมนต์ 8 โหนด โดยจะแสดงการรวมของเมทริกซ์ $[K]_{sys}$ เพื่อเป็นตัวอย่าง

วิธีการนี้ทำได้โดยเขียนสมการของอิเลลิเมนต์ต่าง ๆ พร้อมทั้งกำกับหมายเลขของโหนดทางแฉวนอนและแฉวดิ่งของแต่ละอิเลลิเมนต์ให้ถูกต้อง โดยจากรูปที่ 3.6 $[K]_e$ ของอิเลลิเมนต์ที่ 1 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 2 8 5 และ 6 ส่วน $[K]_e$ ของอิเลลิเมนต์ที่ 2 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 2 8 และ 5 ส่วน $[K]_e$ ของอิเลลิเมนต์ที่ 3 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 2 4 และ 8 ส่วน $[K]_e$ ของอิเลลิเมนต์ที่ 4 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 3 4 และ 7 ส่วน $[K]_e$ ของอิเลลิเมนต์ที่ 5 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 7 8 และ 5 ส่วน $[K]_e$ ของอิเลลิเมนต์ที่ 6 ซึ่งเป็นอิเลลิเมนต์สุดท้ายประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 8 4 และ 7 โดยสามารถเขียนแสดงให้เห็นได้ดังนี้

$$[K]_{e1} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (2) & (8) & (5) & (6) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (2) \\ (8) \\ (5) \\ (6) \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$[K]_{e2} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (2) & (8) & (5) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (8) \\ (5) \end{matrix} & \begin{bmatrix} e_1 & f_1 & g_1 & h_1 \\ e_2 & f_2 & g_2 & h_2 \\ e_3 & f_3 & g_3 & h_3 \\ e_4 & f_4 & g_4 & h_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$[K]_{e3} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (2) & (4) & (8) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (4) \\ (8) \end{matrix} & \begin{bmatrix} i_1 & j_1 & k_1 & l_1 \\ i_2 & j_2 & k_2 & l_2 \\ i_3 & j_3 & k_3 & l_3 \\ i_4 & j_4 & k_4 & l_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$[K]_{e4} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (3) & (4) & (7) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (3) \\ (4) \\ (7) \end{matrix} & \begin{bmatrix} m_1 & n_1 & o_1 & p_1 \\ m_2 & n_2 & o_2 & p_2 \\ m_3 & n_3 & o_3 & p_3 \\ m_4 & n_4 & o_4 & p_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$[K]_{e5} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (7) & (8) & (5) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (7) \\ (8) \\ (5) \end{matrix} & \begin{bmatrix} q_1 & r_1 & s_1 & t_1 \\ q_2 & r_2 & s_2 & t_2 \\ q_3 & r_3 & s_3 & t_3 \\ q_4 & r_4 & s_4 & t_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$[K]_{e6} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (8) & (4) & (7) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (8) \\ (4) \\ (7) \end{matrix} & \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & w_1 & x_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 & x_2 \\ u_3 & v_3 & w_3 & x_3 \\ u_4 & v_4 & w_4 & x_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

เมื่อมีหมายเลขกำกับทั้งทางแฉวนอนและแฉวนตั้งกำกับสัมประสิทธิ์ทุกตัวของเมทริกซ์ของทุกอิลลิเมนต์แล้ว จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาใส่ลงในเมทริกซ์ระบบรวม $[K]_{sys}$ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ b_3 ซึ่งอยู่ในแฉวนอนที่ 5 แฉวนตั้งที่ 8 ของอิลลิเมนต์ย่อยที่ 1 จะไปปรากฏอยู่ในแฉวนอนที่ 5 แฉวนตั้งที่ 8 ของเมทริกซ์ระบบรวมดังแสดงในสมการ เป็นต้น

$$[K]_{\text{sys}} = \begin{bmatrix} & (1) & (2) & (3) & (4) & (5) & (6) & (7) & (8) \\ (1) & e_1+i_1+m_1+q_1+u_1 & f_1+j_1 & n_1 & k_1+o_1+w_1 & h_1+t_1 & 0 & p_1+r_1+x_1 & g_1+l_1+s_1+v_1 \\ (2) & c_2+i_2 & a_1+f_2+j_2 & 0 & k_2 & c_1+h_2 & d_1 & 0 & b_1+g_2+l_2 \\ (3) & m_2 & 0 & n_2 & o_2 & 0 & 0 & p_2 & 0 \\ (4) & i_3+m_3+u_3 & j_3 & n_3 & k_3+o_3+w_3 & 0 & 0 & p_3+x_3 & l_3+v_3 \\ (5) & e_4+q_4 & a_3+f_4 & 0 & 0 & c_3+h_4+t_4 & d_3 & r_4 & b_3+g_4+s_4 \\ (6) & 0 & a_4 & 0 & 0 & c_4 & d_4 & 0 & b_4 \\ (7) & m_4+q_2+u_4 & 0 & n_4 & o_4+w_4 & t_2 & 0 & p_4+r_2+x_4 & s_2+v_4 \\ (8) & c_3+i_4+q_3+u_2 & a_2+f_3+j_4 & 0 & k_4+w_2 & c_2+h_3+t_3 & d_2 & r_3+x_2 & b_2+g_3+l_4+s_3+v_2 \end{bmatrix}$$

5. ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) และเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ที่สอดคล้องกับปัญหาลงในสมการรวมของระบบเพื่อหาค่าผลเฉลย โดยการแก้สมการรวมของระบบเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่โหนด

6. คำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่ต้องการต่อไป เมื่อทราบค่าผลลัพธ์ที่โหนดต่าง ๆ แล้ว สามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์นี้ต่อไปได้

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอน จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีส่วนที่สำคัญที่สุดคือ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3 ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนด และในขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะนำไปพัฒนาขึ้นเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณต่อไป

3.5 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยอันได้แก่ หลอดไฟแอลอีดี cribระบายความร้อน ทฤษฎีความร้อนซึ่งประกอบด้วยความรู้ทางด้านความร้อน กลไกการถ่ายโอนความร้อน และสุดท้ายระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่อธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยได้กล่าวเฉพาะส่วนที่จะนำมาใช้ หรือส่วนที่จะถูกกล่าวอ้างถึงในบทต่อ ๆ ไป ทั้งนี้ เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้ดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

การคำนวณอุณหภูมิของคอมโพสิตไฟถนนแอลอีดีด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

4.1 บทนำ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method : FEM) เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหาสมการอนุพันธ์ย่อยที่สามารถหาผลเฉลยของปัญหาที่ซับซ้อนและจำลองรูปแบบลักษณะได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ซึ่งผลเฉลยที่ได้สามารถนำไปคำนวณปัญหาด้านอื่นต่อเนื่องกันได้อีกด้วย ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิคอมโพสิตไฟถนนแอลอีดี และขั้นตอนการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อใช้ในการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในคริสตัลความร้อนคอมโพสิตไฟถนนแอลอีดี

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิคอมโพสิตไฟถนนแอลอีดี

จากบทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้กล่าวถึงทฤษฎีของความร้อน โดยการถ่ายเทความร้อนจะแสดงอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวของอุณหภูมิสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในแบบ 3 มิติ จะแสดงได้ดังสมการที่ (4.1)

$$k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + Q = \dots c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1)$$

โดยที่	T	คือ	อุณหภูมิ (temperature)
	k	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity)
	c	คือ	ความร้อนจำเพาะ (specific heat)
	\dots	คือ	ความหนาแน่นมวล (mass density)
	Q	คือ	ปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้นเอง (internal heat generation)

โดยสมการจะปรากฏอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง ซึ่งปัญหาในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบสภาวะคงตัว (steady state heat transfer problem) ดังนั้น

$$\text{จะได้ว่า} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

จะเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิที่สภาวะคงตัว ได้ดังสมการที่ (4.2)

$$k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + Q = 0 \quad (4.2)$$

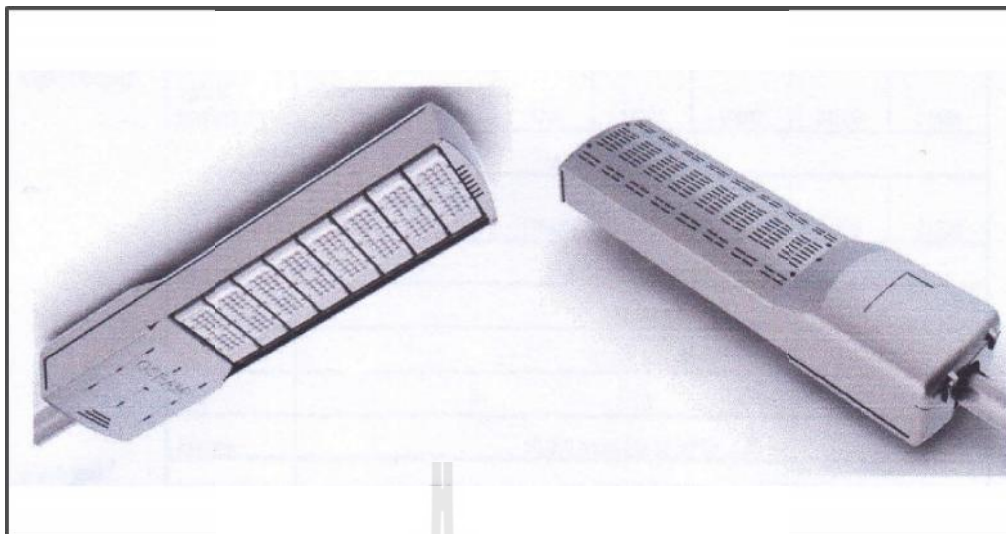
การหาผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับที่สองที่ปรากฏในสมการที่ (4.2) ซึ่งมีความยากและซับซ้อนอย่างมากในการแก้ปัญหา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการแก้สมการอนุพันธ์ย่อย

4.3 การคำนวณอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูง และมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วจน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการแก้ปัญหานี้ ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ ดังนี้ (สุกัญญา ทพศรี, 2555)

4.3.1 การออกแบบเอลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาโคมไฟถนนแอลอีดีของบริษัท OSRAM ซึ่งใช้แอลอีดีโมดูลรุ่น HPML AD G13-street lighting ที่ใช้กำลังไฟ 30 วัตต์ ติดกับแผ่นครีระบายความร้อน มีขนาดความยาว 220 มม. กว้าง 70 มม. และสูง 66 มม. และในแอลอีดีโมดูลจะประกอบด้วยแอลอีดีชิปจำนวน 28 ชิป แสดงดังรูปที่ 4.1-4.2 ค่ามิติต่าง ๆ ของแอลอีดีโมดูลที่ใช้ในการศึกษา แสดงดังรูปที่ 4.3 และได้ภาพการจำลองส่วนประกอบต่าง ๆ ของแอลอีดีโมดูลและส่วนประกอบของแอลอีดีชิป ดังรูปที่ 4.4-4.5 ตามลำดับ

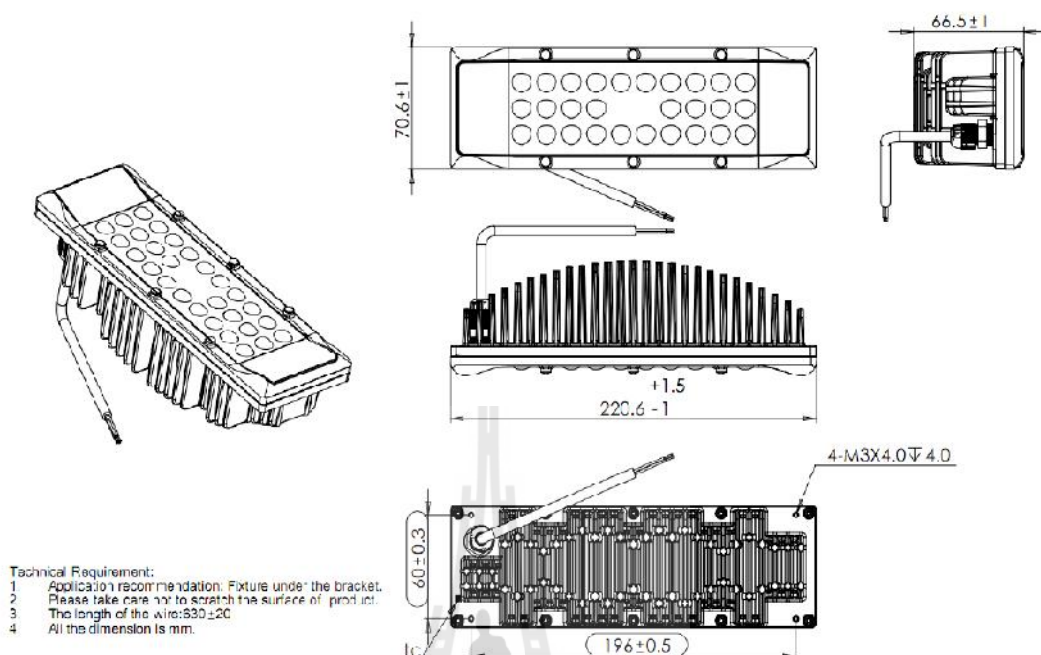


รูปที่ 4.1 โคมไฟถนนแอลอีดี

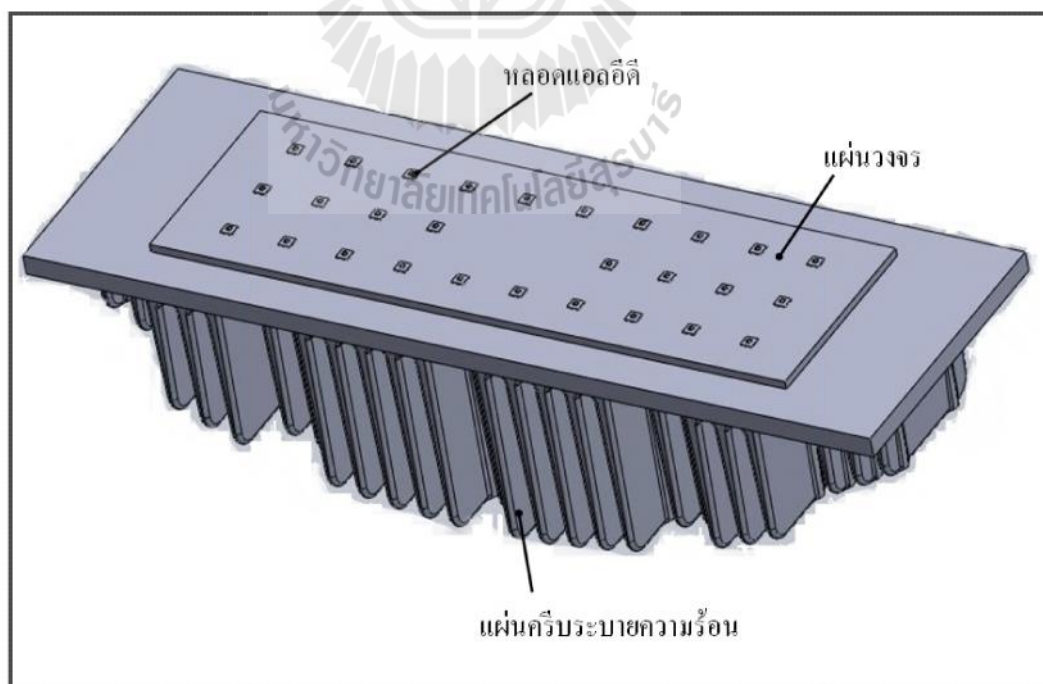


รูปที่ 4.2 แอลอีดีโมดูล รุ่น HPML AD G13-street lighting

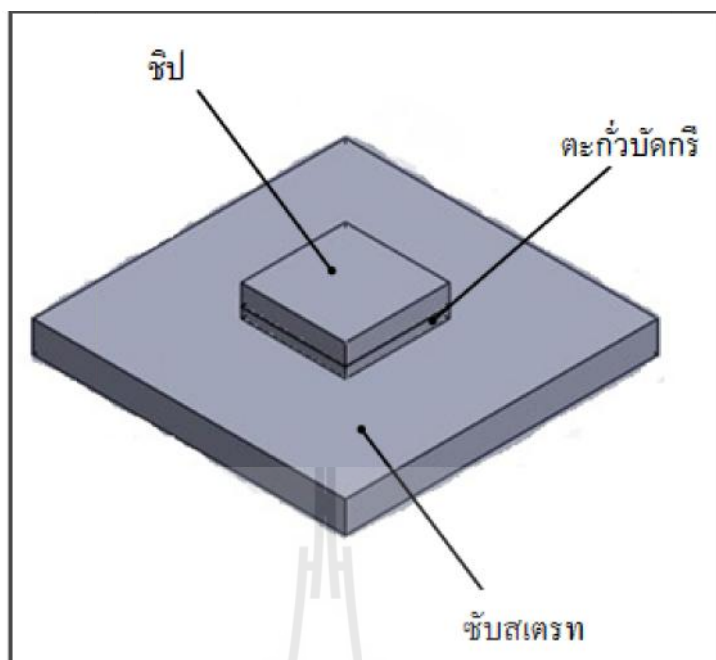
DRAWINGS



รูปที่ 4.3 ค่ามิติต่าง ๆ ของแอลอีดีโมดูล
(บริษัท OSRAM แอลอีดีโมดูลรุ่น HPML AD G13-street lighting)



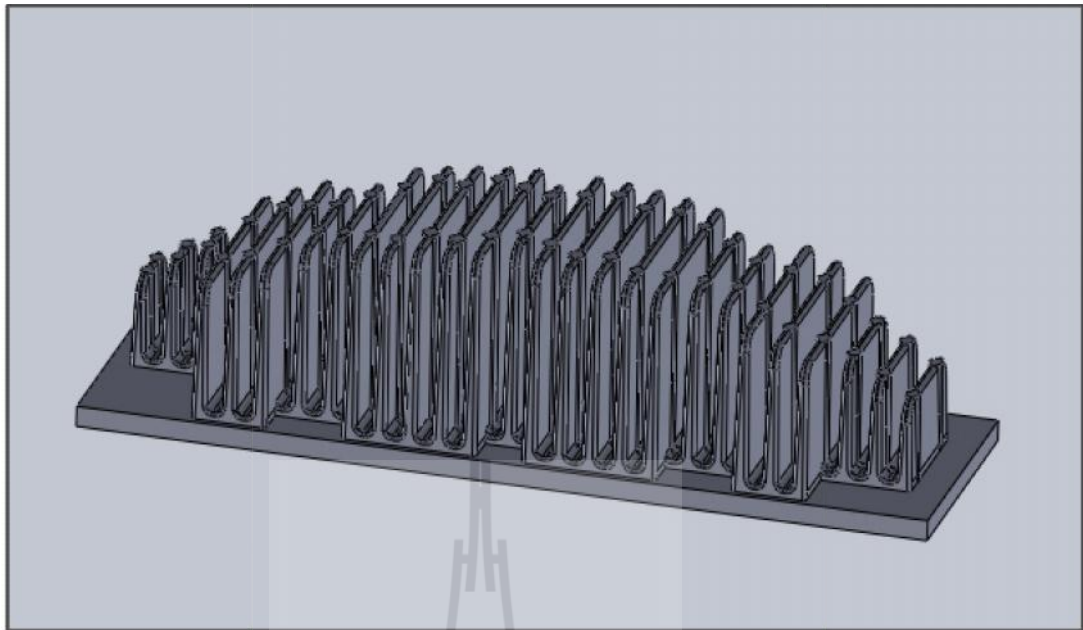
รูปที่ 4.4 ส่วนประกอบของแอลอีดีโมดูล



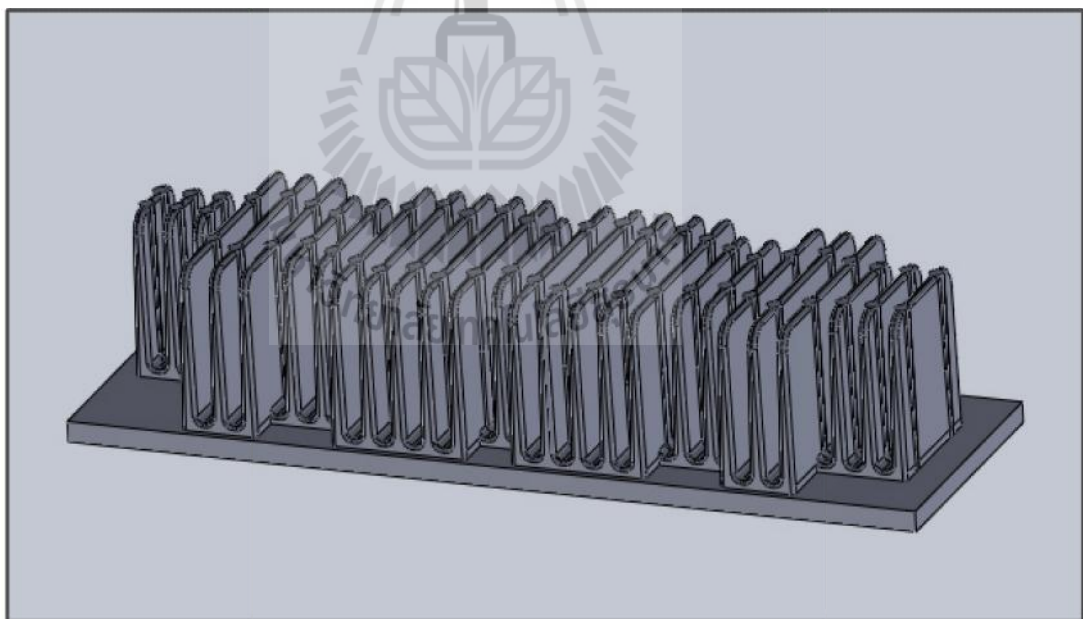
รูปที่ 4.5 ส่วนประกอบของแอลอีดีชิป

ในงานวิจัยนี้ได้นำแอลอีดีโมดูลดังกล่าว มาวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในคริสระบายความร้อน โดยได้ออกแบบคริสระบายความร้อน 3 แบบ ได้แก่ แบบแผ่นคริสทีคริสพิวบนมีลักษณะโค้ง แบบแผ่นคริสทีคริสพิวบนมีลักษณะตรง และแบบแผ่นคริสทีคริสพิวบนมีลักษณะเป็นซี่ ที่มีลักษณะรูปทรงที่แตกต่างกันเพื่อมาเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิและการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขปริมาณเท่ากันและใช้วัสดุชนิดเดียวกัน โดยการระบายความร้อนของคริสในลักษณะต่าง ๆ จะมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิของแอลอีดีชิปที่ต้องการศึกษาด้วย ซึ่งลักษณะโครงสร้างของแผ่นคริสระบายความร้อนทั้ง 3 แบบ ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6-4.8 ตามลำดับ

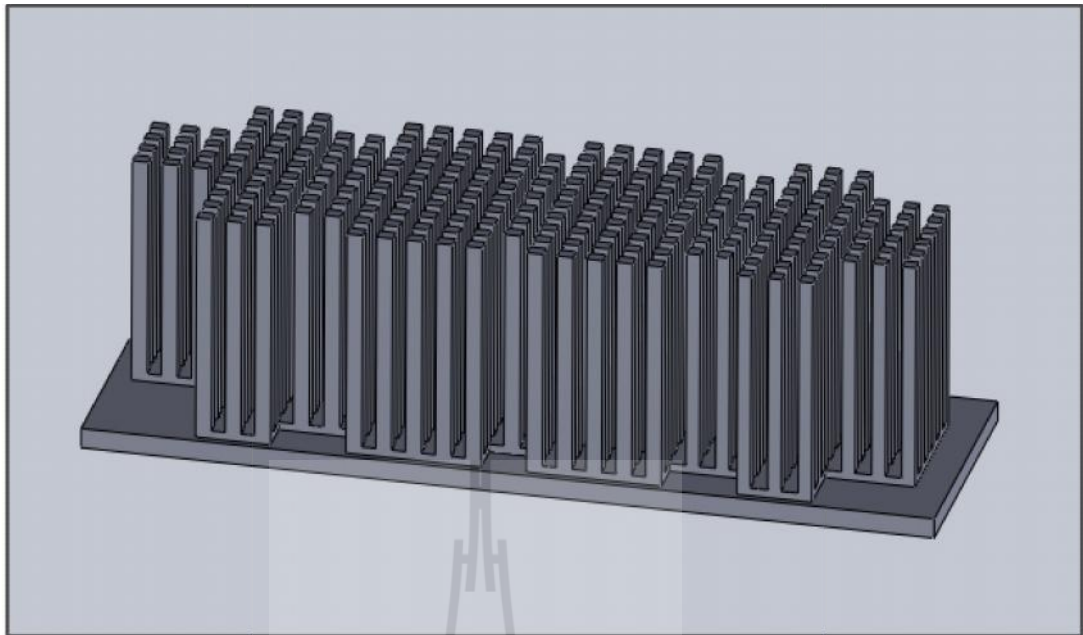
ในการออกแบบพื้นที่ศึกษาที่ใช้ในการจำลองผลค่าอุณหภูมิด้วยการใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ จะครอบคลุมทั่วทั้งหมของหลอดแอลอีดีและคริสระบายความร้อน ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.9 ซึ่งจากรูปเป็นการแบ่งเอลิเมนต์ด้วยรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (tetrahedron) ตลอดปริมาตรที่ศึกษา ด้วยโปรแกรมการสร้างกริดของ Solidworks โดยที่แผ่นคริสทีคริสพิวบนมีลักษณะโค้ง จะประกอบด้วยจำนวนจุดต่อ 55,771 จุดต่อและจำนวนเอลิเมนต์ 228,423 เอลิเมนต์ ส่วนแผ่นคริสทีคริสพิวบนมีลักษณะตรง ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.10 และแผ่นคริสทีคริสพิวบนมีลักษณะเป็นซี่ ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.11 ต่างก็มีจำนวนจุดต่อและจำนวนเอลิเมนต์ที่ประมาณเท่า ๆ กัน



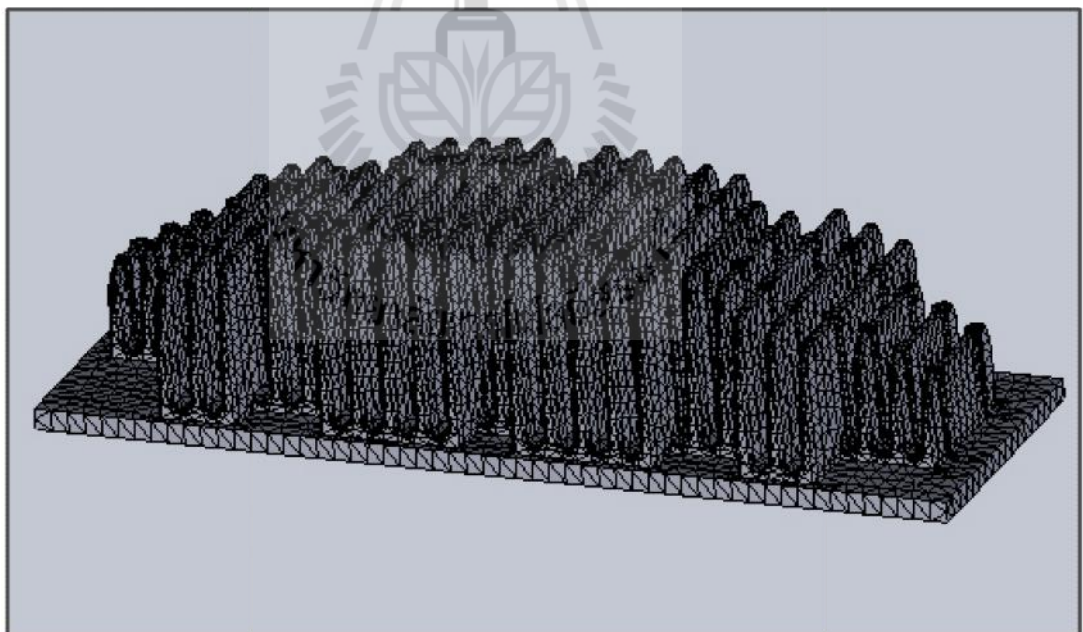
รูปที่ 4.6 โครงสร้างแผ่นครีบบนที่ครีบบนมีลักษณะโค้ง



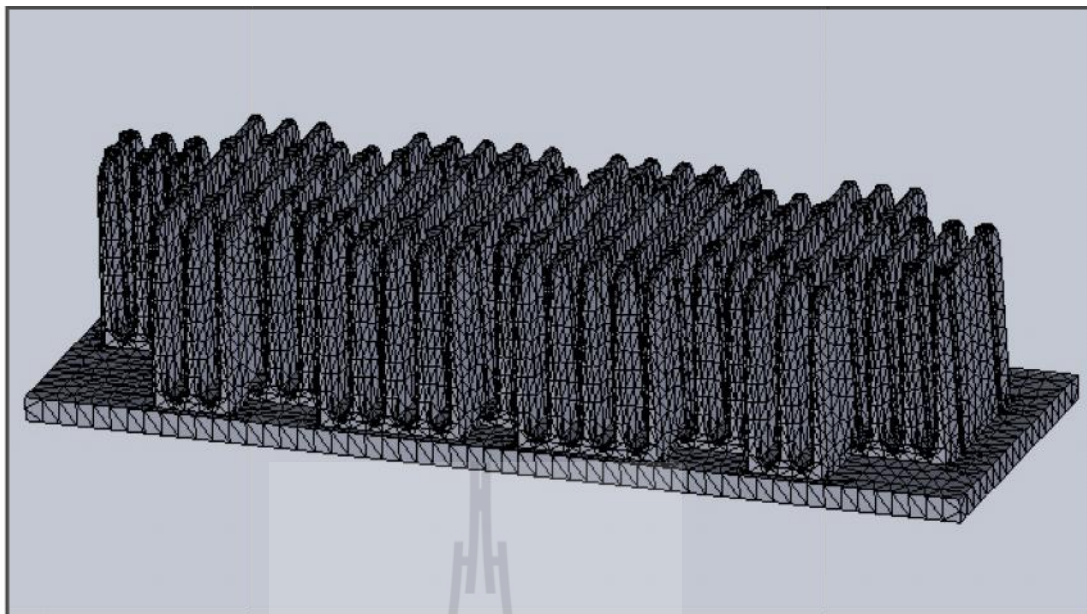
รูปที่ 4.7 โครงสร้างแผ่นครีบบนที่ครีบบนมีลักษณะตรง



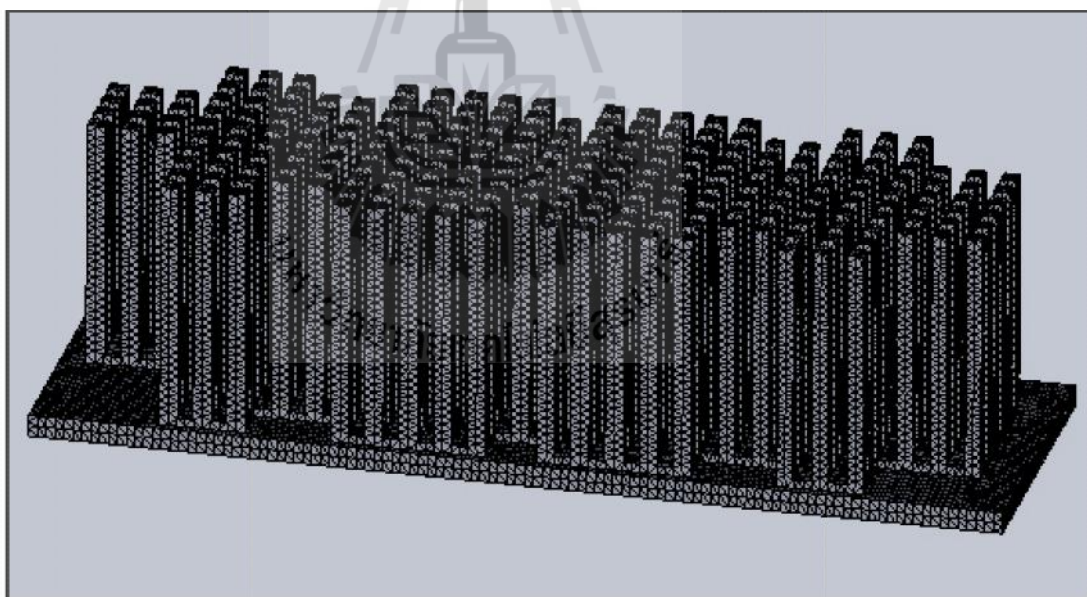
รูปที่ 4.8 โครงสร้างแผ่นคريبที่คريبมีลักษณะเป็นซี่



รูปที่ 4.9 การแบ่งอิลลิเมนต์และจุดต่อของแผ่นคريبที่คريبผิวบนมีลักษณะโค้ง



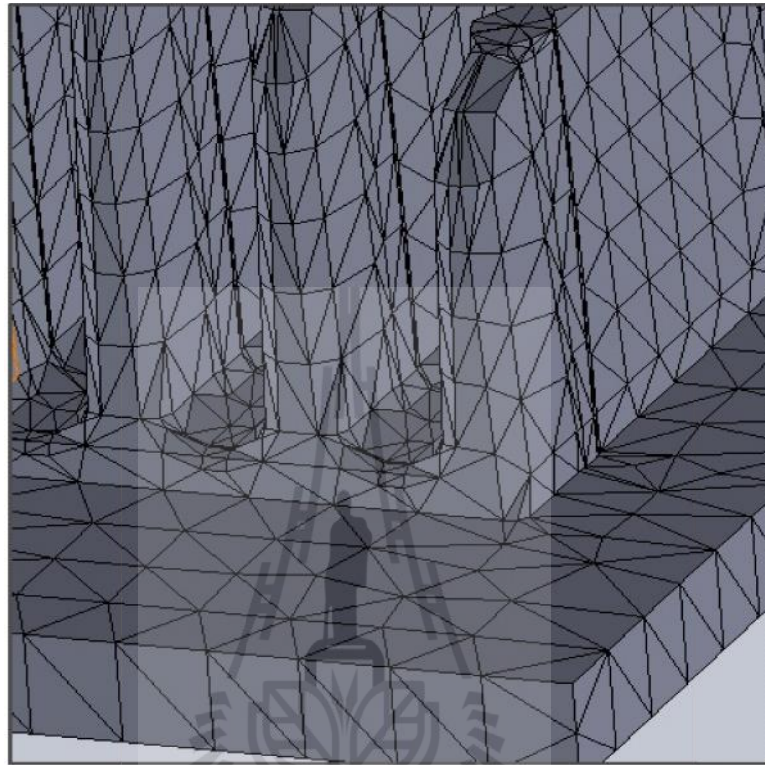
รูปที่ 4.10 การแบ่งอิลลิเมนต์และจุดต่อของแผ่นครีบบนมีลักษณะตรง



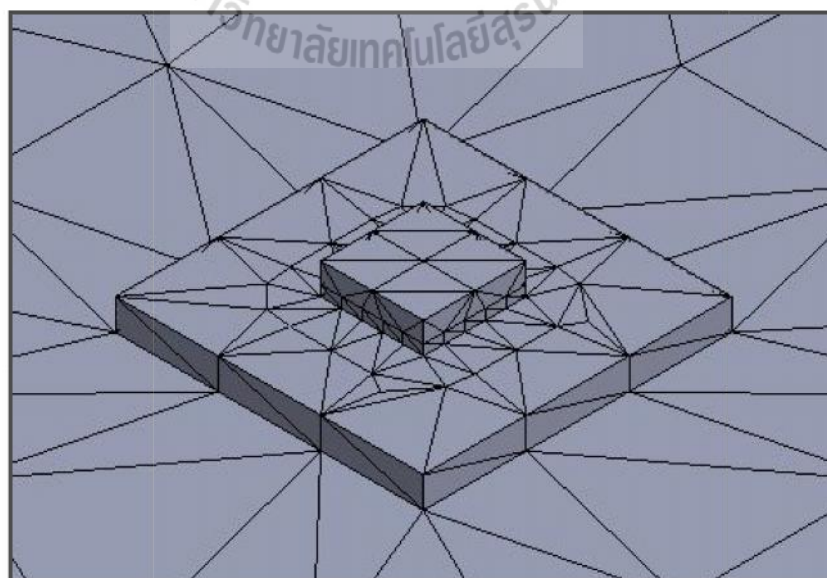
รูปที่ 4.11 การแบ่งอิลลิเมนต์และจุดต่อของแผ่นครีบบนมีลักษณะเป็นซี่

โดยแสดงให้เห็นถึงความละเอียดในการออกแบบกริดด้วยภาพการขยาย ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงภาพการขยายการแบ่งอิลลิเมนต์ของแผ่นครีบบนระบายความร้อนและ

รูปที่ 4.13 เป็นภาพการขยายในส่วนของแอลอีดีชิป โดยยกตัวอย่างเพียง 1 ชิป (จากทั้งหมด 28 ชิป) เพื่อให้เห็นถึงการเชื่อมต่อระหว่างจุดต่ออย่างชัดเจนยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.12 ภาพการขยายการแบ่งอีลิเมนต์ของแผ่นครีบบรรยากาศความร้อน



รูปที่ 4.13 ภาพการขยายการแบ่งอีลิเมนต์ของแอลอีดีชิป

4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

ขั้นตอนนี้เป็นการเลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยเมื่อสมมติลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้นในกรณีของอุณหภูมิที่เกิดภายในครีบบระบายความร้อนจะได้

$$T(x,y,z) = T_1N_1 + T_2N_2 + T_3N_3 + T_4N_4 \quad (4.3)$$

โดยที่ N_n คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ และ T_n คือ ผลลัพธ์ของค่าอุณหภูมิในแต่ละจุดต่อ 1 2 3 และ 4 ของอิลลิเมนต์ซึ่งในกรณีอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อจะได้

$$N_i = \frac{1}{6V}(a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (4.4)$$

V คือ ปริมาตรของรูปทรงสี่หน้าของแต่ละอิลลิเมนต์ ซึ่งหาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (4.5)$$

โดยที่

$$a_1 = x_4(y_2z_3 - y_3z_2) + x_3(y_4z_2 - y_2z_4) + x_2(y_3z_4 - y_4z_3)$$

$$a_2 = x_4(y_3z_1 - y_1z_3) + x_3(y_1z_4 - y_4z_1) + x_1(y_4z_3 - y_3z_4)$$

$$a_3 = x_4(y_1z_2 - y_2z_1) + x_2(y_4z_1 - y_1z_4) + x_1(y_2z_4 - y_4z_2)$$

$$a_4 = x_3(y_2z_1 - y_1z_2) + x_2(y_1z_3 - y_3z_1) + x_1(y_3z_2 - y_2z_3)$$

$$b_1 = y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3)$$

$$b_2 = y_4(z_3 - z_2) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1)$$

$$b_3 = y_4(z_3 - z_2) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2)$$

$$b_4 = y_3(z_3 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)$$

$$c_1 = x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2)$$

$$c_2 = x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3)$$

$$c_3 = x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1)$$

$$c_4 = x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)$$

$$d_1 = x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3)$$

$$d_2 = x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1)$$

$$d_3 = x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2)$$

$$d_4 = x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)$$

4.3.3 การสร้างสมการอิลลิเมนต์

ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ ซึ่งเป็นการสร้างสมการของอิลลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาต่าง ๆ สำหรับปัญหาความร้อนในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาความร้อนแบบสถานะคงตัวแบบ 3 มิติ จึงได้ค่าพจน์ที่ขึ้นกับเวลามีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งมีสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยดังแสดงด้วยสมการที่ (4.2) ที่แสดงก่อนหน้านี้ ดังนี้

$$k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + Q = 0 \quad (4.6)$$

สำหรับปัญหาความร้อนใน 3 มิติที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์นี้ จะใช้ประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals) ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.7) ซึ่งถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน และวิธีนี้ยังสามารถจำแนกแยกย่อยออกไปได้อีก เช่น ใช้วิธีกาลอร์กิน (Galerkin) ซึ่งเมตริกซ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้ ปกติแล้วจะมีความสมมาตรจึงก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้กับปัญหาคำนวณขนาดใหญ่

$$\int_{\Omega} W_n R d\Omega = 0 \quad n=1,2,3,4 \quad (4.7)$$

โดยเมื่อพิจารณาปัญหาความร้อนเป็นแบบ 3 มิติจะได้เศษตกค้าง R ดังสมการที่ (4.8)

$$k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + Q = R \quad (4.8)$$

สำหรับอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าจุดที่ไม่รู้ค่ามี 4 จุด ซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจึงต้องการ 4 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่รู้ค่านี้หมายถึงในสมการที่ (4.7) จะต้องมามีค่า $n = 1, 2, 3, 4$ และโดยวิธีกาลอรัลทินจะเลือก $W_n = N_n$ ดังนั้นเมื่อแทนค่า R ด้วยสมการ (4.8) ลงในสมการที่ (4.7) จะได้

$$\int_V N_n \left(k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + Q \right) dV = 0 \quad (4.9)$$

แล้วแตกพจน์ต่างๆออกมาเพื่อทำการพิจารณาจะได้

$$\int_V N_n \left(k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_V N_n (Q) dV = 0 \quad (4.10)$$

พจน์แรกของสมการที่ (4.10) แทนการนำความร้อน และพจน์ที่สองแทนปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้นได้เองภายในอิลลิเมนต์ สำหรับพจน์แรกซึ่งเป็นพจน์อนุพันธ์อันดับสองใช้วิธีการอินทิเกรตทีละส่วน โดยจะใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\int_{\Omega} u (\nabla \cdot \mathbf{V}) d\Omega = \int_{\Gamma} u (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) d\Gamma - \int_{\Omega} (\nabla u \cdot \mathbf{V}) d\Omega \quad (4.11)$$

ซึ่ง Γ คือ ขอบเขตของอิลลิเมนต์ Ω เมื่อเปรียบเทียบกับพจน์แรกของสมการที่ (4.10) จะได้

$$u = N_n$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$$

$$\mathbf{V} = k \frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{i} + k \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{j} + k \frac{\partial T}{\partial z} \mathbf{k}$$

และเนื่องจาก \mathbf{n} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับขอบเขตของอีลิเมนต์ Γ

$$\mathbf{n} = n_x \mathbf{i} + n_y \mathbf{j} + n_z \mathbf{k}$$

ดังนั้น $\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T}{\partial z} n_z$

$$u(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) = N_n \left(k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right)$$

$$\nabla u = \frac{\partial N_n}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \mathbf{k}$$

$$\nabla u \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial N_n}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} k \frac{\partial T}{\partial z}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.10) เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ จึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\int_{\Gamma} N_n \left(k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) d\Gamma - \int_V \left(k \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV$$

$$+ \int_V N_n Q dV = 0 \quad (4.12)$$

พจน์ที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตของอิลลิเมนต์คือพจน์แรก ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพคือ ปริมาณความร้อนตลอดขอบนอกของอิลลิเมนต์นั้น ๆ หากอิลลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่ในตำแหน่งขอบนอกของครีบบรรยากาศความร้อน ซึ่งมีเงื่อนไขขอบเขตการพาความร้อน เราจึงจำเป็นต้องแทนพจน์นี้ ด้วยเงื่อนไขการพาความร้อนดังสมการที่ (4.13)

$$q = h(T - T_\infty) \quad (4.13)$$

โดยที่ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
 T_∞ คือ อุณหภูมิอากาศรอบนอก

และเมื่อความร้อน (q) ที่ไหลออกจากขอบมีค่าเป็นลบ ดังนั้นจากสมการที่ (4.12) จะได้

$$\int_{\Gamma} N_n (-h(T - T_\infty)) d\Gamma - \int_V \left(k \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_V N_n Q dV = 0 \quad (4.14)$$

จากสมการที่ (4.14) จัดรูปใหม่จะได้สมการไฟไนท์อิลลิเมนต์สำหรับอิลลิเมนต์ ได้ดังนี้

$$\int_V \left(k \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_{\Gamma} N_n (hT) d\Gamma = \int_V N_n Q dV + \int_{\Gamma} N_n (h(T_\infty)) d\Gamma \quad (4.15)$$

และเนื่องจากสมการที่ (4.15) มีทั้งหมด 4 สมการเราสามารถเขียนสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (4.16) ดังนี้

$$\int_V \left(k \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{\partial T}{\partial x} + k \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{\partial T}{\partial y} + k \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} (hT) d\Gamma = \int_V [N]_{4 \times 1} Q dV + \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} (h(T_\infty)) d\Gamma \quad (4.16)$$

และจากสมการที่ (4.3) ซึ่งมีลักษณะการกระจายของอุณหภูมิ T โดยประมาณในแต่ละอิลลิเมนต์
เป็น

$$T(x, y, z) = [N]_{1 \times 4} [T]_{4 \times 1}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{\partial T}{\partial x} = \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} [T]_{4 \times 1} \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} [T]_{4 \times 1} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial T}{\partial z} = \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} [T]_{4 \times 1}$$

และสมการ (4.15) จึงกลายมาเป็น

$$\int_V \left(k \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + k \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + k \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV [T]_{4 \times 1} \quad (4.17)$$

$$+ \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} h [N]_{1 \times 4} d\Gamma [T]_{4 \times 1} = \int_V [N]_{4 \times 1} Q dV + \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} (h(T_{\infty})) d\Gamma$$

หรือเขียนสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลลิเมนต์ที่ประกอบด้วย 4 สมการ ได้ดังนี้

$$[[K_c] + [K_h]]_{4 \times 4} \{T\}_{4 \times 1} = \{Q_h\}_{4 \times 1} + \{Q_o\}_{4 \times 1} \quad (4.18)$$

โดย $[K_c]_{4 \times 4}$ คือ เมทริกซ์การนำความร้อน
 $[K_h]_{4 \times 4}$ คือ เมทริกซ์การพาความร้อน
 $\{Q_h\}_{4 \times 1}$ คือ โหลดเวกเตอร์การพาความร้อน
 $\{Q_o\}_{4 \times 1}$ คือ โหลดเวกเตอร์ปริมาตรความร้อนที่ผลิตขึ้นเอง

เมทริกซ์การนำความร้อน : $[K_c]_{4 \times 4}$

$$\text{จาก } [K_c]_{4 \times 4} = \int_V \left(k \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + k \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + k \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV \quad (4.19)$$

จากฟังก์ชันการประมาณภายในคั่งสมการที่ (4.4) จึงได้

$$\frac{\partial N_n}{\partial x} = \frac{b_n}{6V}, \quad \frac{\partial N_n}{\partial y} = \frac{c_n}{6V} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial N_n}{\partial z} = \frac{d_n}{6V} \quad n = 1,2,3,4 \quad (4.20)$$

แทนความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.20) ลงในสมการที่ (4.19) จะได้

$$[K_c]_{4 \times 4} = k \int \left(\frac{b_n b_m}{6V} + \frac{c_n c_m}{6V} + \frac{d_n d_m}{6V} \right) dx dy dz \quad n, m = 1,2,3,4 \quad (4.21)$$

$$= \frac{k}{36V^2} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \int dx dy dz$$

$$= \frac{k}{36V} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \quad n, m = 1,2,3,4$$

$$[K_c]_{4 \times 4} = \frac{k}{36V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ & b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ & & b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ \text{Sym} & & & b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

เมทริกซ์การพาความร้อน : $[K_h]_{4 \times 4}$

$$[K_h]_{4 \times 4} = \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} h [N]_{1 \times 4} d\Gamma \quad (4.23)$$

จากสมการที่ (4.23) และหากสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h มีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนบนปริมาตรของอิลลิเมนต์จึงกลายเป็น

$$[K_h]_{4 \times 4} = h \int N_n N_m dx dy dz \quad n, m = 1,2,3,4 \quad (4.24)$$

สมการที่ (4.24) นี้สามารถคำนวณโดยใช้สูตรเชิงตัวประกอบ (factorial formula) ในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรดังสมการที่ (4.25) เพราะเนื่องจาก $N_1=L_1, N_2=L_2, N_3=L_3$ และ $N_4=L_4$ จะได้

$$\int_v L_1^a L_2^b L_3^c L_4^d dv = \frac{a!b!c!d!}{(a+b+c+d+3)!} 6V \quad (4.25)$$

จากสมการที่ (4.24) สามารถพิจารณาแยกเป็น 2 กรณี คือ $L_n = L_m$ และ $L_n \neq L_m$ ในกรณี $L_n = L_m$ จะขอยกตัวอย่างพิจารณาจุดต่อที่ 1 ของรูปทรงสี่หน้าจะได้ $a=2$ และนอกนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (4.25) จะได้

$$\int_v L_1^2 dv = \frac{2!0!0!0!}{(2+0+0+0+3)!} 6V = \frac{12V}{5!} = \frac{2V}{20} \quad (4.26)$$

ในกรณีที่ $L_n \neq L_m$ จะขอยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ 1 และ 2 ของรูปทรงสี่หน้าจะได้ $a=b=1$ และนอกนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสมการที่ (4.25) จะได้

$$\int_v L_1^1 L_2^1 dv = \frac{1!1!0!0!}{(1+1+0+0+3)!} 6V = \frac{6V}{5!} = \frac{V}{20} \quad (4.27)$$

ที่จุดต่ออื่น ๆ ของรูปทรงสี่หน้าก็จะพิจารณาในลักษณะเช่นเดียวกัน ดังนั้นจากสมการที่ (4.24) จะได้

$$[K_h]_{4 \times 4} = \frac{hV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

โหลดเวกเตอร์การพาความร้อน : $\{Q_h\}_{4 \times 1}$

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} hT_{\infty} d\Gamma \quad (4.29)$$

เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนบนปริมาตรของอีลลิเมนต์ดังนั้นสมการที่ (4.29) จึงกลายเป็น

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = hT_{\infty} \int N_n dx dy dz \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (4.30)$$

สมการที่ (4.30) นี้สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตร ดังสมการที่ (4.25) โดยที่ $N_1=L_1$, $N_2=L_2$, $N_3=L_3$ และ $N_4=L_4$ ซึ่งจะขอยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ 1 ของรูปทรงสี่หน้า จะได้ $a=1$ และนอกนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (4.30) จะได้

$$\int_v L_1^1 dv = \frac{1!0!0!0!}{(1+0+0+0+3)!} 6V = \frac{6V}{24!} = \frac{V}{4} \quad (4.31)$$

ซึ่งที่จุดต่อ 2 3 และ 4 ของรูปทรงสี่หน้า ก็ได้ลักษณะเช่นเดียวกันนี้ ดังนั้นจากสมการที่ (4.30) จึงได้โพลเคเตอร์แสดงได้ดังนี้

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = \frac{hT_\infty V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

ส่วนการถ่ายเทความร้อนบริเวณขอบของอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ จะได้กล่าวถึงต่อไป

โพลเคเตอร์ของปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้นเอง : $\{Q_o\}_{4 \times 1}$

$$\{Q_o\}_{4 \times 1} = \int_v [N]_{4 \times 1} Q dv \quad (4.33)$$

หรือ

$$\{Q_o\}_{4 \times 1} = Q \int N_n dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, 4 \quad (4.34)$$

สมการที่ (4.34) ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรได้ดังนี้

$$\{Q_o\}_{4 \times 1} = \frac{QV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

นอกจากการถ่ายเทความร้อนบนปริมาตรของอิทธิเมนต์ที่แสดงไปแล้ว ยังมีการถ่ายเทความร้อนตลอดพื้นผิวขอบใดขอบหนึ่งของอิทธิเมนต์ และขอยกตัวอย่างพื้นผิวของอิทธิเมนต์ที่ประกอบด้วยจุดต่อ 2, 3 และ 4 ซึ่งพื้นผิวดังกล่าวมีพื้นที่เท่ากับ A การประดิษฐ์อิทธิเมนต์ที่สอดคล้องกับการถ่ายเทความร้อนตลอดพื้นผิวขอบดังกล่าว จะได้

$$[K_h]_{4 \times 4} = \frac{hA}{12} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$[Q_h]_{4 \times 1} = \frac{hT_\infty A}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

4.3.4 การประกอบสมการอิทธิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ

ขั้นตอนนี้เป็น การนำสมการของแต่ละอิทธิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมของระบบ โดยจากขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.3.1 ในระบบ 3 มิติ หากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิทธิเมนต์ย่อย ซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อจะก่อให้เกิดระบบสมการรวม ซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ ดังนั้นจึงได้สมการรวมของงานวิจัยนี้ คือ

$$([K_c]_{n \times n} + [K_h]_{n \times n})\{T\}_{n \times 1} = \{Q_h\}_{n \times 1} + \{Q_o\}_{n \times 1} \quad (4.38)$$

4.3.5 การแก้ระบบสมการเพื่อหาค่าผลเฉลย

การหาคำตอบของระบบสมการเชิงเส้นถือว่าเป็นเรื่องพื้นฐานที่สำคัญ ในขั้นตอนนี้เป็น การแก้สมการเชิงเส้นด้วยเมตริกซ์ จากสมการที่ (4.38) จึงสามารถแก้ระบบสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยได้ดังสมการที่ (4.39)

$$\{T\}_{n \times 1} = ([K_c]_{n \times n} + [K_h]_{n \times n})^{-1} (\{Q_h\}_{n \times 1} + \{Q_o\}_{n \times 1}) \quad (4.39)$$

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิของครีบริบายความร้อน โคมไฟถนนแอลอีดี โดยประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อกำหนดหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิ ด้วยการใช่วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลอ์ร์คิน รายละเอียดต่าง ๆ ในบทนี้จะนำไปสู่การประดิษฐ์โปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์ เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลระบบที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 5 ต่อไป



บทที่ 5

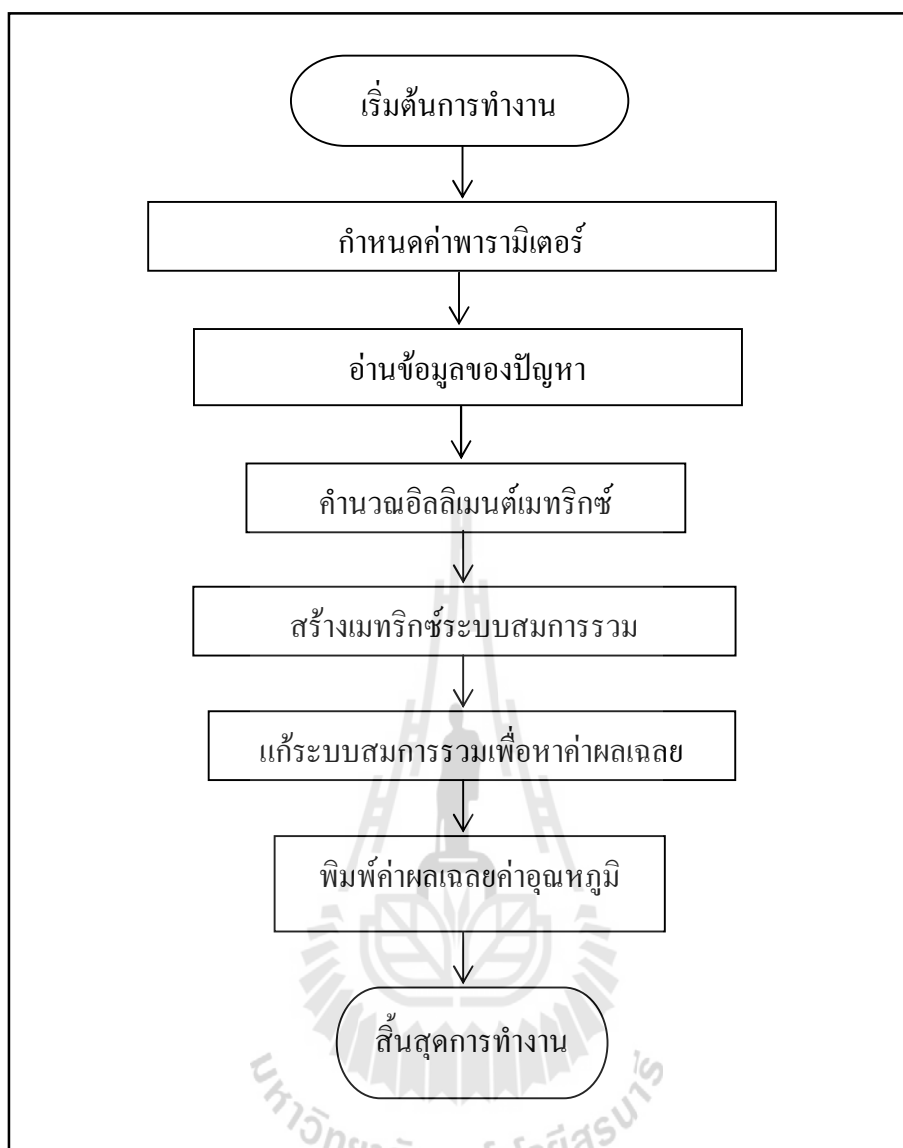
ผลการจำลองอุณหภูมิของโคมไฟถนนแอลอีดี

5.1 บทนำ

การจำลองผลของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อนโคมไฟถนนแอลอีดีทั้ง 3 แบบ ได้แก่ แบบแผ่นครีบบที่ครีบบมีลักษณะโค้ง แบบแผ่นครีบบที่ครีบบมีลักษณะตรง และแบบแผ่นครีบบที่ครีบบมีลักษณะเป็นซี่ ที่มีลักษณะรูปทรงแตกต่างกันด้วยปริมาตรที่เท่ากัน ในบทที่ 5 นี้จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองผลและอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยโปรแกรมทั้งหมดถูกออกแบบให้ทำงานบนพื้นฐานการใช้งานของ MATLAB พร้อมผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อนทั้ง 3 แบบที่ส่งผลโดยตรงต่อความร้อนที่แอลอีดีชิป

5.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

การคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในครีบบระบายความร้อนค่อนข้างคำนวณได้ยาก แต่ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับคำนวณค่าอุณหภูมิที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีราคาแพง ประมวลผลช้า และไม่มีความคล่องตัว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงประดิษฐ์ไฟไนท์เอลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB เพื่อคำนวณค่าอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อน สำหรับโครงสร้างของโปรแกรมคำนวณอุณหภูมิอาจแทนได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณอนุหภูมิ

จากแผนภูมิในรูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบโดยรวมเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละส่วน จะได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่าง ๆ เป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ : โปรแกรมจะเริ่มทำงานด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวัสดุต่าง ๆ ของคอมไฟลอนนแอลอีดี

ขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหา : จากนั้น โปรแกรมจะรับค่าข้อมูลอินพุตซึ่งแสดงถึงลักษณะของอิลลิเมนต์และจุดต่อจากเอาต์พุตไฟล์ ที่เกิดจากการสร้างกริดของโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Solidwork ที่ซึ่งรายละเอียดในไฟล์ประกอบด้วย จำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ หมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิลลิเมนต์ จำนวนและหมายเลขของอิลลิเมนต์ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณอิลลิเมนต์เมทริกซ์ : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำการคำนวณอิลลิเมนต์เมทริกซ์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (linear tetrahedral) ของทุกๆ อิลลิเมนต์ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.15) จากบทที่ผ่านมา หรือนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังสมการที่ (5.1) โดยที่ $\{T\}_{4 \times 1}$ คือเวกเตอร์คำตอบของสมการที่ทำการคำนวณในแต่ละรอบ

$$([K_c] + [K_h])_{4 \times 4} \{T\}_{4 \times 1} = \{Q_h\}_{4 \times 1} + \{Q_o\}_{4 \times 1} \quad (5.1)$$

สมการที่ (5.1) นี้จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของอิลลิเมนต์เมทริกซ์การนำความร้อน $[K_c]_{4 \times 4}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.19) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (5.2) เมทริกซ์การพาความร้อน $[K_h]_{4 \times 4}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.22) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (5.3) โหลดเวกเตอร์การพาความร้อน $\{Q_h\}_{4 \times 1}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.25) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (5.4) และโหลดเวกเตอร์ปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้นเอง $\{Q_o\}_{4 \times 1}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.28) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (5.5) เมทริกซ์เหล่านี้ จะถูกคำนวณทีละอิลลิเมนต์เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบเมทริกซ์สมการรวม

$$[K_c]_{4 \times 4} = \frac{k}{36V} \begin{bmatrix} bb_1 + c_1c_1 + d_1d_1 & bb_2 + c_1c_2 + d_1d_2 & bb_3 + c_1c_3 + d_1d_3 & bb_4 + c_1c_4 + d_1d_4 \\ & b_2b_2 + c_2c_2 + d_2d_2 & b_2b_3 + c_2c_3 + d_2d_3 & b_2b_4 + c_2c_4 + d_2d_4 \\ & & b_3b_3 + c_3c_3 + d_3d_3 & b_3b_4 + c_3c_4 + d_3d_4 \\ \text{Sym} & & & b_4b_4 + c_4c_4 + d_4d_4 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$[K_h]_{4 \times 4} = \frac{hV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = \frac{hT_\infty V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$\{Q_e\}_{4 \times 1} = \frac{QV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

ขั้นตอนที่ 4 สร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม : โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอีลีเมนต์เมทริกซ์ย่อย ๆ เข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวม ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.31) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (5.6) โดยมีหลักการ คือ หาหมายเลขจุดต่อที่แท้จริงของอีลีเมนต์ที่พิจารณาอยู่ แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของอีลีเมนต์เมทริกซ์นั้นลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมให้ถูกต้อง ดังแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 3.4 ของบทที่ 3 ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอีลีเมนต์ย่อย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวม ซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น n สมการ

$$([K_c]_{n \times n} + [K_h]_{n \times n})\{T\}_{n \times 1} = [Q]_{n \times 1} \quad (5.6)$$

ขั้นตอนที่ 5 แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย : โปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นของสมการที่ (5.6) เพื่อหาค่าอุณหภูมิของระบบสมการรวม

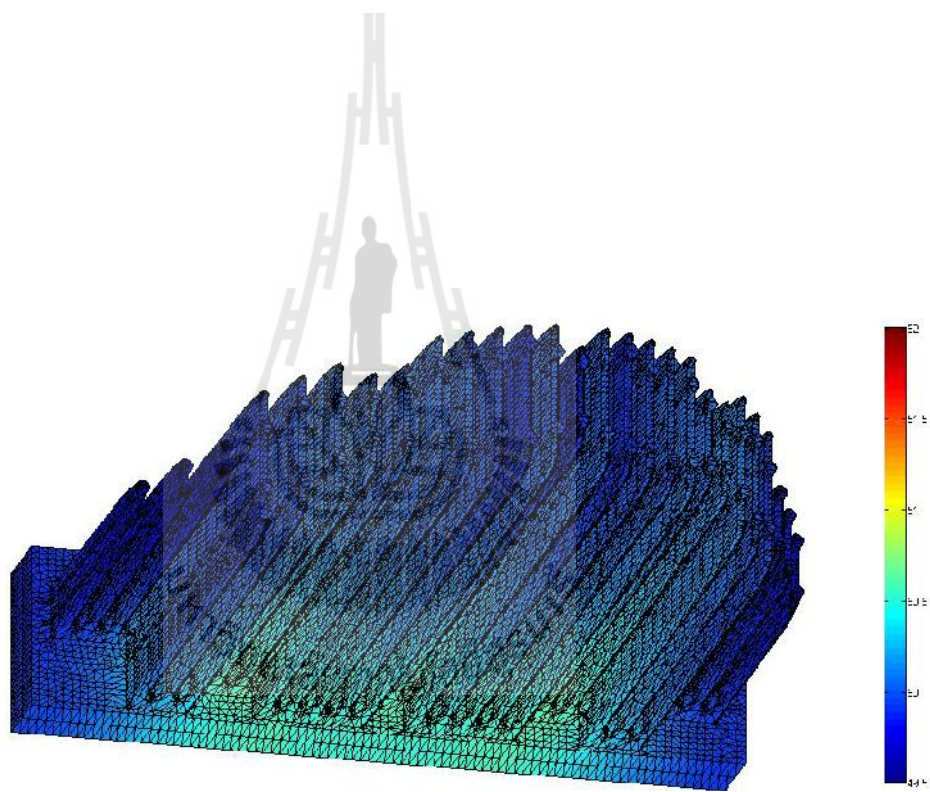
ขั้นตอนที่ 6 พิมพ์ค่าผลเฉลย : จากนั้นโปรแกรมจะพิมพ์ค่าผลเฉลยออกมาเป็นค่าอุณหภูมิในแต่ละจุดต่อของครีบริบายความร้อน โคมไฟถนนแอลอีดี

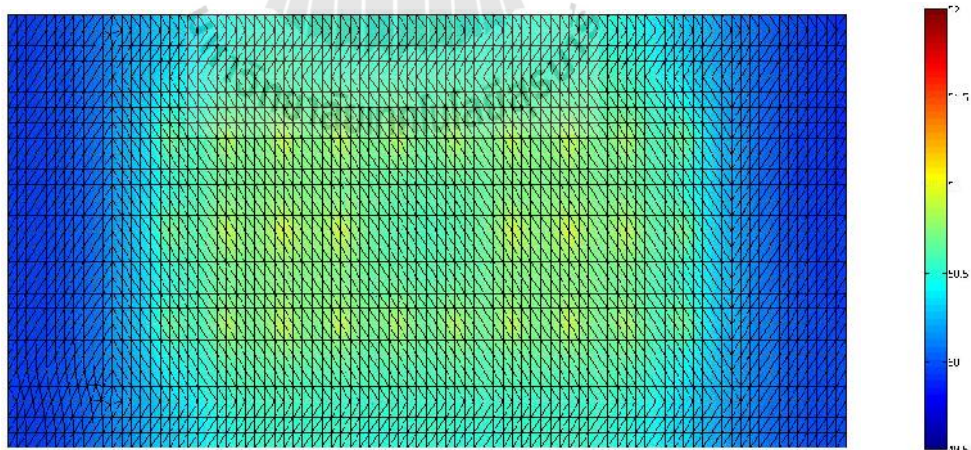
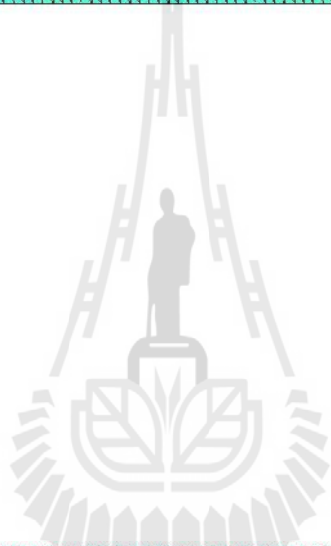
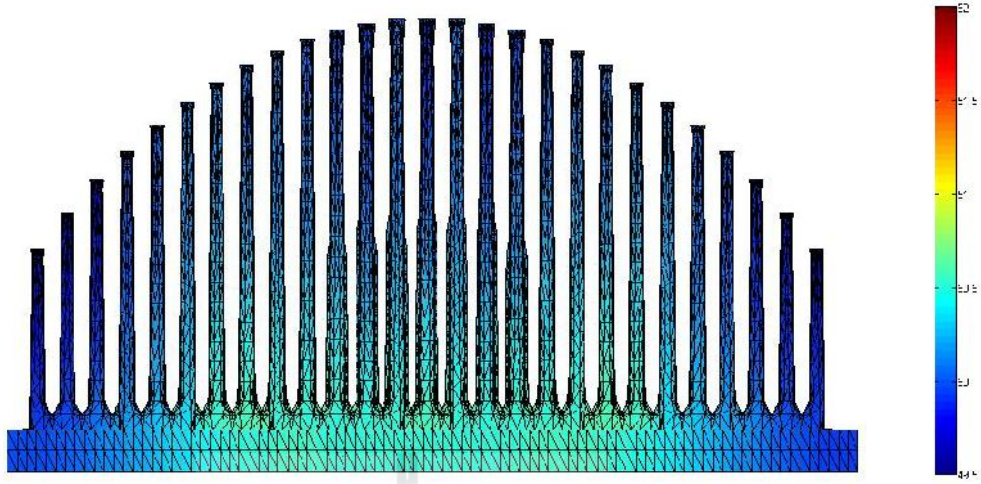
5.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

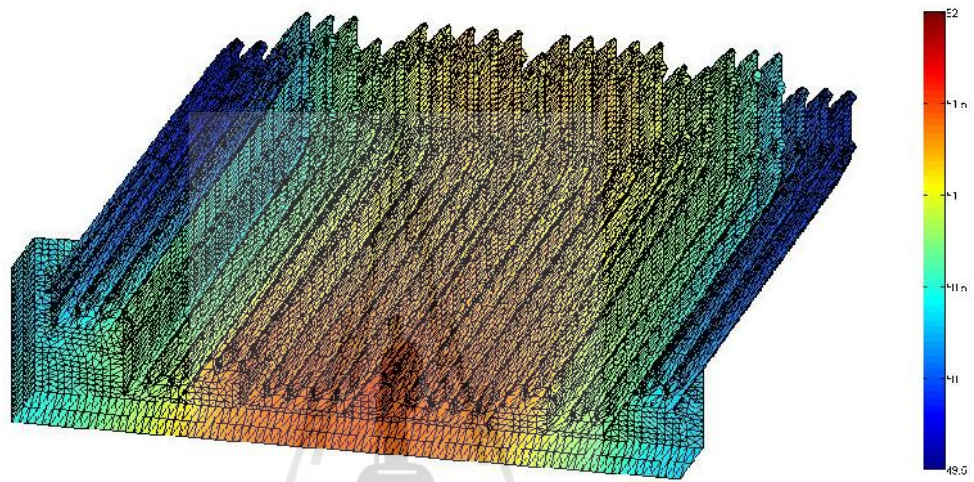
ค่าพารามิเตอร์ของโคมไฟถนนแอลอีดีที่ใช้ในการจำลองผลอุณหภูมิในโปรแกรมไฟไนท์อีลีเมนต์แบบ 3 มิติ แสดงได้ดังตารางที่ 5.1

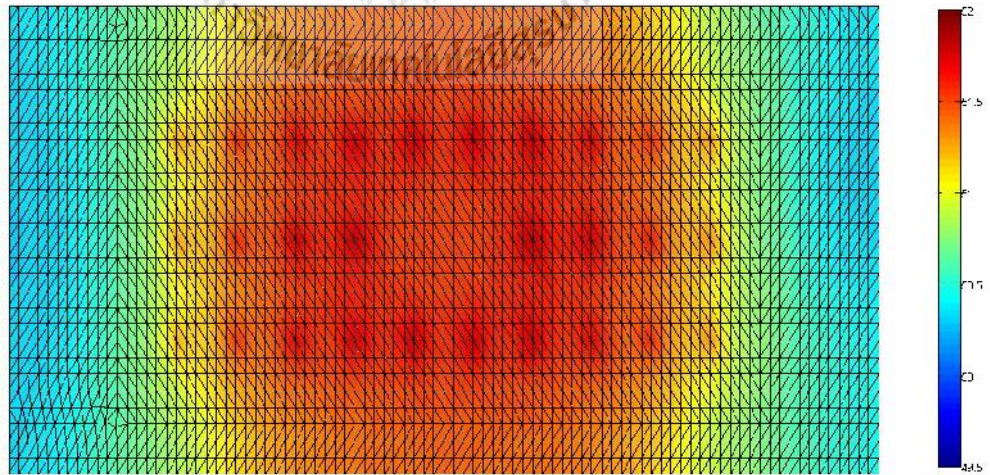
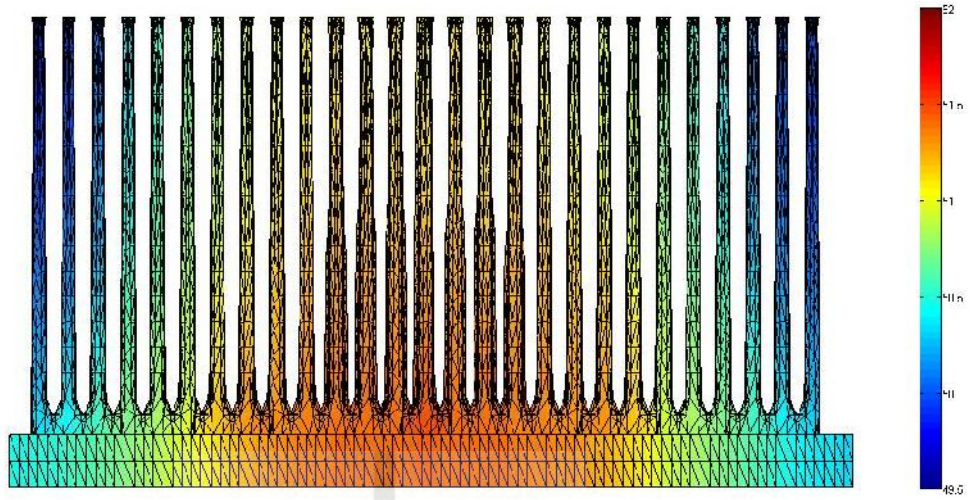
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของอุณหภูมิและขนาดที่ใช้ในการจำลองผล (Fengze, 2011)

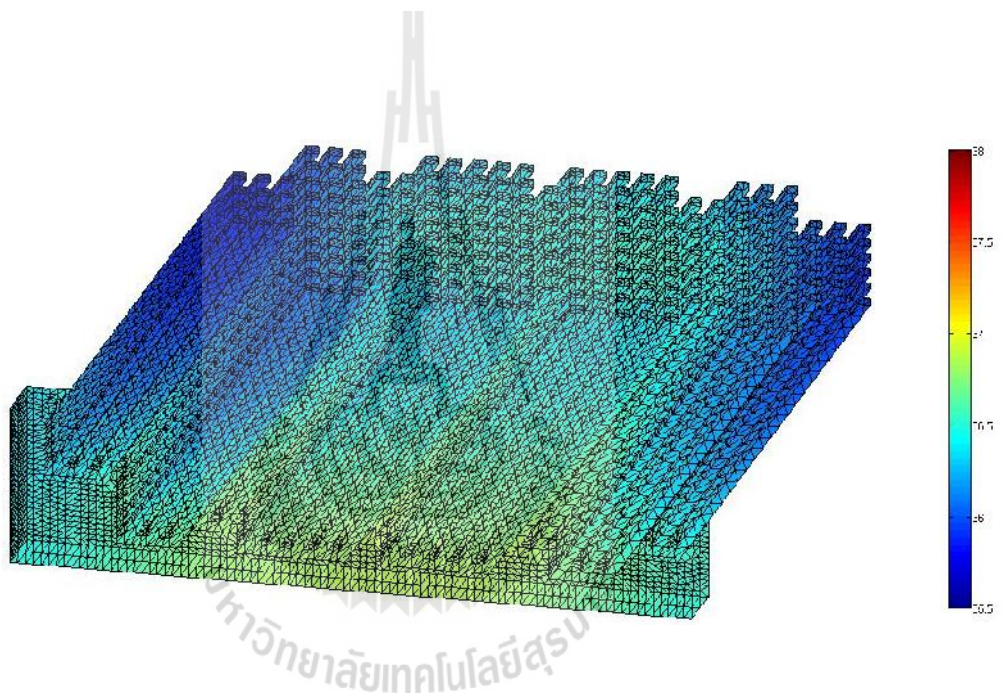
วัสดุที่ใช้	ความหนา	ขนาด	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน k (W / m ² ·°C)
ครีบริบายความร้อน (Al)	รายละเอียด ในรูปที่ 4.3	รายละเอียดในรูปที่ 4.3	216
แผ่นวงจร (MCPCB)	2 mm	50 mm × 165 mm	150
ฉนวนเซรามิก (Ceramic)	0.3 mm	3 mm × 3 mm	36
ตะกั่วบัดกรี (SnAgCu)	0.1 mm	1 mm × 1 mm	73
ซิลิกอน (SiC)	0.2 mm	0.9 mm × 0.9 mm	350

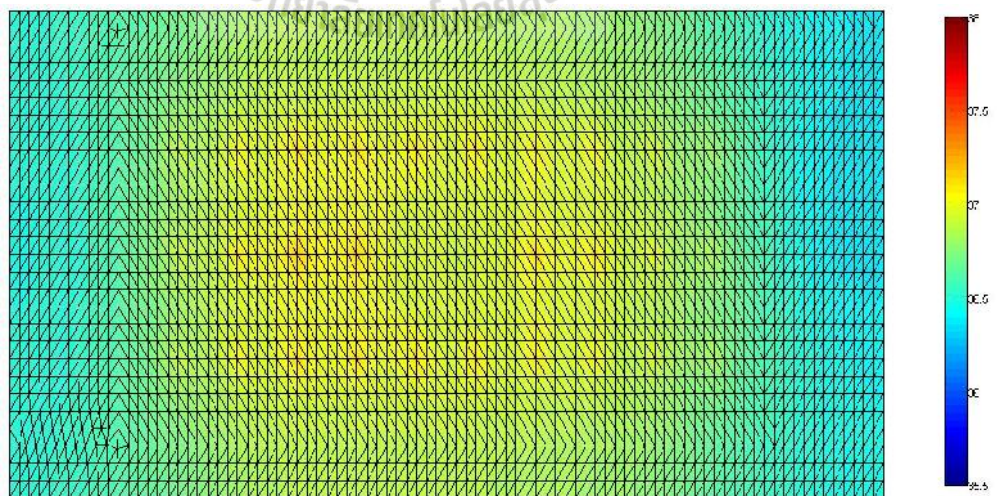
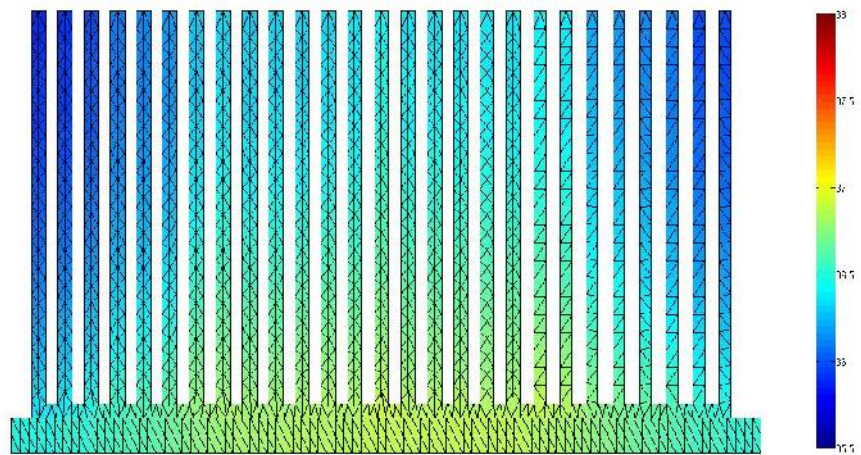












จากผลการจำลองรูปที่ 5.10 การกระจายตัวของอุณหภูมิของแอลอีดีชิปในกรณีพิจารณาแผ่นครีบบัที่ครีบบัมีลักษณะเป็นซี่ จะสังเกตเห็นว่ามีการระบายอุณหภูมิที่ดีที่สุด เนื่องจากมีการกระจายค่าอุณหภูมิหลังหลอดแอลอีดีได้ค่าอุณหภูมิประมาณใกล้เคียงกันและมีค่าอุณหภูมิต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสองแบบที่ได้กล่าวผ่านมา

5.5 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อพิจารณาแผ่นครีบบัแต่ละแบบ

จากผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของโปรแกรมไฟไนท์อีลีเมนต์แบบ 3 มิติ ของแผ่นครีบบัระบายความร้อนทั้ง 3 แบบ ซึ่งได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 5.4 จะนำมาเปรียบเทียบเพื่อศึกษาคุณลักษณะของครีบบัระบายความร้อนในแต่ละแบบ โดยที่ทั้ง 3 แบบ ถูกออกแบบให้มีลักษณะรูปทรงของครีบบัระบายความร้อนที่แตกต่างกันแต่มีเงื่อนไขปริมาตรต้องเท่ากันคือ ปริมาตร $20 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ในหัวข้อนี้จะได้เปรียบเทียบการกระจายตัวในลักษณะต่าง ๆ ของอุณหภูมิทั้ง 3 แบบ ซึ่งแสดงได้ในตารางที่ 5.2 โดยแบ่งออกเป็นของส่วนครีบบัระบายความร้อนและส่วนของแอลอีดีชิป พร้อมทั้งหาค่าพื้นผิวรวมที่สัมผัสอากาศของครีบบัระบายความร้อนแต่ละแบบ เพื่อนำมาวิเคราะห์ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบการกระจายตัวในลักษณะต่าง ๆ ของอุณหภูมิเมื่อพิจารณาแผ่นครีบบัแต่ละแบบ

ลักษณะแผ่นครีบบั	ครีบบัระบายความร้อน				แอลอีดีชิป			
	T_{\min} (°C)	T_{\max} (°C)	T_{avg} (°C)	SD	T_{\min} (°C)	T_{\max} (°C)	T_{avg} (°C)	SD
แผ่นครีบบัที่ครีบบัผิวบน มีลักษณะโค้ง	49.82	50.99	50.29	0.2323	55.84	57.10	56.61	0.2182
แผ่นครีบบัที่ครีบบัผิวบน มีลักษณะตรง	49.91	51.84	50.97	0.4159	56.43	57.94	57.38	0.2842
แผ่นครีบบัที่ครีบบัมีลักษณะ เป็นซี่	35.88	37.14	36.57	0.2530	39.31	40.21	39.81	0.1513

จากตารางที่ 5.2 ซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิในลักษณะต่าง ๆ ของครีบบัระบายความร้อนแต่ละแบบ จะสังเกตเห็นว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิกรณีแผ่นครีบบัที่ครีบบัมีลักษณะเป็นซี่ จะมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแบบอื่น ๆ ซึ่งดูได้จากค่าอุณหภูมิของแอลอีดีชิปที่ต่ำสุด และจะเห็นว่าแผ่นครีบบัที่

ครีบบนมีลักษณะโค้งจะมีการกระจายตัวสม่ำเสมอกว่าแผ่นครีบบนมีลักษณะตรง โดยพิจารณาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของครีบบนระบายความร้อนและของแอลอีดีชิปซึ่งมีค่าน้อยกว่า

ตารางที่ 5.3 ค่าพื้นที่ผิวที่สัมผัสอากาศของแผ่นครีบบนระบายความร้อนแต่ละแบบ

ลักษณะแผ่นครีบบน	พื้นที่ผิวที่สัมผัสอากาศ (m ²)
ครีบบนมีลักษณะโค้ง	0.1367
ครีบบนมีลักษณะตรง	0.1322
ครีบบนมีลักษณะเป็นซี่	0.2129

จากตารางที่ 5.3 จะสังเกตเห็นว่า แบบแผ่นครีบบนที่ครีบบนมีลักษณะเป็นซี่มีพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศมากที่สุดอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้มีการพาความร้อนออกสู่ภายนอกได้มาก จึงทำให้แอลอีดีชิปมีอุณหภูมิต่ำลงมาก หากพิจารณาแผ่นครีบบนที่ครีบบนมีลักษณะโค้งกับแผ่นครีบบนมีลักษณะตรงจะสังเกตเห็นว่า แผ่นครีบบนที่ครีบบนมีลักษณะโค้งมีพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศมากกว่า อันเนื่องมาจากแผ่นครีบบนถูกออกแบบให้มีความสูงที่ช่วงกลางแผ่น ซึ่งทำให้ความร้อนที่สะสมช่วงกลางแผ่นมีการแพร่กระจายความร้อนได้มากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิแอลอีดีช่วงกลางแผ่นครีบบนมีอุณหภูมิลดลงตามไปด้วย จากผลการจำลองทำให้ทราบว่าพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศของครีบบนระบายความร้อนเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่ช่วยในการระบายความร้อนและลดอุณหภูมิของแอลอีดี ส่วนปัจจัยลักษณะรูปทรงของครีบบนระบายความร้อนนั้น จะช่วยในการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ ดังนั้นการออกแบบโคมไฟถนนแอลอีดีที่ดีจึงควรเลือกตามความเหมาะสมของวัตถุประสงค์ในงานนั้น ๆ

5.6 สรุป

บทที่ 5 เป็นการอธิบายโปรแกรมจำลองผล และค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองผล พร้อมทั้งแสดงผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิของครีบบนระบายความร้อน โคมไฟถนนแอลอีดีในลักษณะต่าง ๆ และนำผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกัน โดยการจำลองผลด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งผลที่ได้นั้น แผ่นครีบบนที่ครีบบนมีลักษณะเป็นซี่มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดเนื่องจากอุณหภูมิของแอลอีดีต่ำที่สุด และทำให้ทราบว่าพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศของครีบบนระบายความร้อนเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่ช่วยในการระบายความร้อนและลด

อุณหภูมิของแอลอีดี ส่วนปัจจัยลักษณะรูปทรงของครีบริบายความร้อนนั้นจะช่วยให้การกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ



บทที่ 6

ผลการทดสอบจริงของโคมไฟถนนแอลอีดี

6.1 บทนำ

ในบทที่ 5 เป็นการอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลพร้อมผลการจำลองค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อน โคมไฟถนนแอลอีดี โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในการคำนวณหาค่าอุณหภูมิ เพื่อศึกษาคุณลักษณะของครีบบระบายความร้อนที่มีลักษณะรูปทรงที่แตกต่างกัน ดังนั้นสำหรับบทที่ 6 นี้ จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการทดสอบจริงของการกระจายค่าของอุณหภูมิ โดยจะเลือกเปรียบเทียบทดสอบแผ่นครีบบที่ครีบบีวบนมีลักษณะโค้งเท่านั้น เนื่องจากมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโคมไฟถนนแอลอีดีจากผู้ผลิตครบถ้วน ซึ่งจะใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการทดสอบ และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองผลจากบทที่ผ่านมา

6.2 ขั้นตอนและวิธีการในการทดสอบจริง

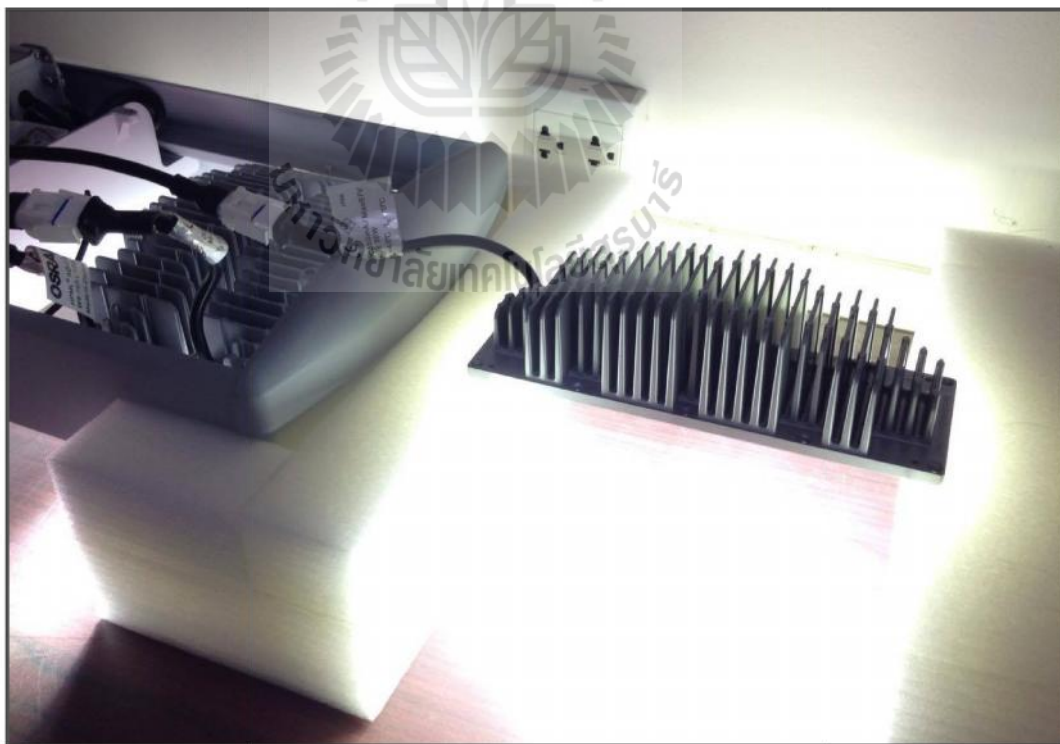
โคมไฟถนนแอลอีดีประกอบไปด้วย แอลอีดีโมดูลแบบติดกับครีบบระบายความร้อนจำนวน 3 ชิ้น รุ่น HPML AD G13-street lighting ของบริษัท OSRAM แสดงได้ดังรูปที่ 6.1-6.3 โดยเป็นลักษณะของครีบบระบายความร้อนที่ครีบบีวบนมีลักษณะโค้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับ 220 V 50 Hz คงที่ตลอดการทดสอบ



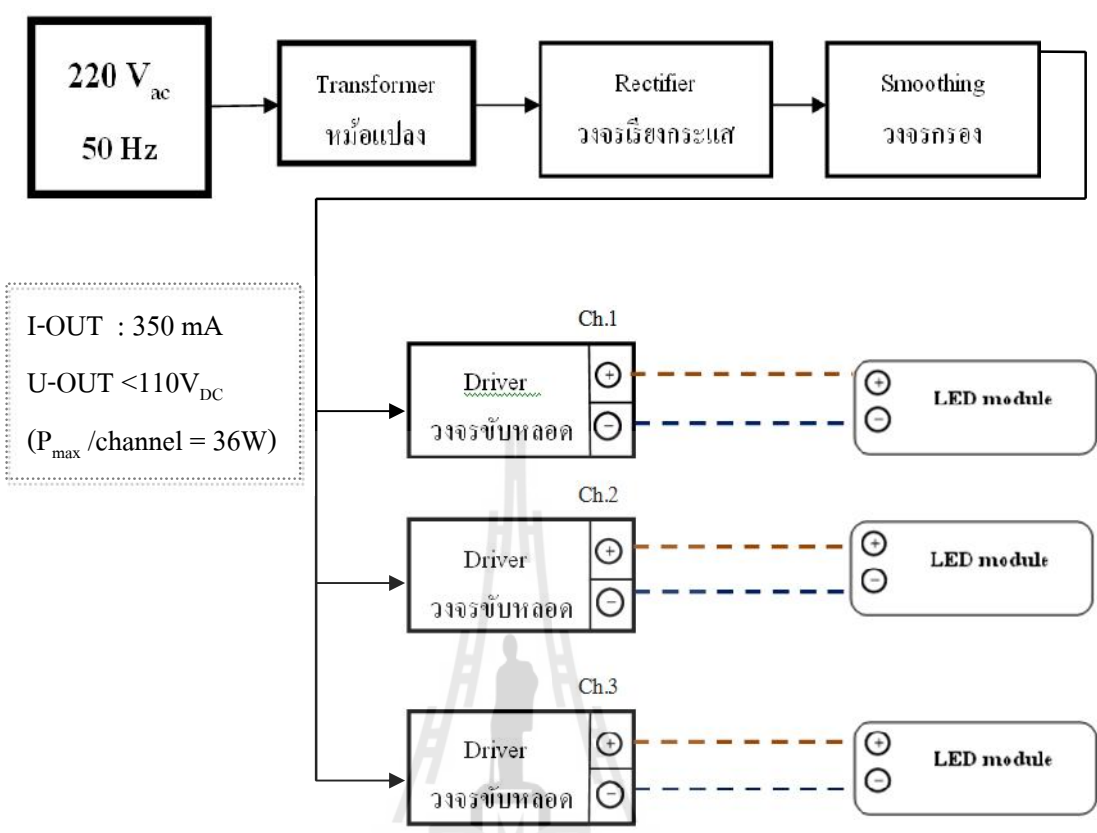
รูปที่ 6.1 โคมไฟถนนแอลอีดีที่ใช้ในการทดสอบจริงขณะยังไม่จ่ายไฟ



รูปที่ 6.2 ภาพคอมโพเนนต์แอลอีดีที่ใช้ในการทดสอบจริง



รูปที่ 6.3 ภาพคอมโพเนนต์แอลอีดีที่ใช้ในการทดสอบจริงในขณะที่จ่ายไฟ



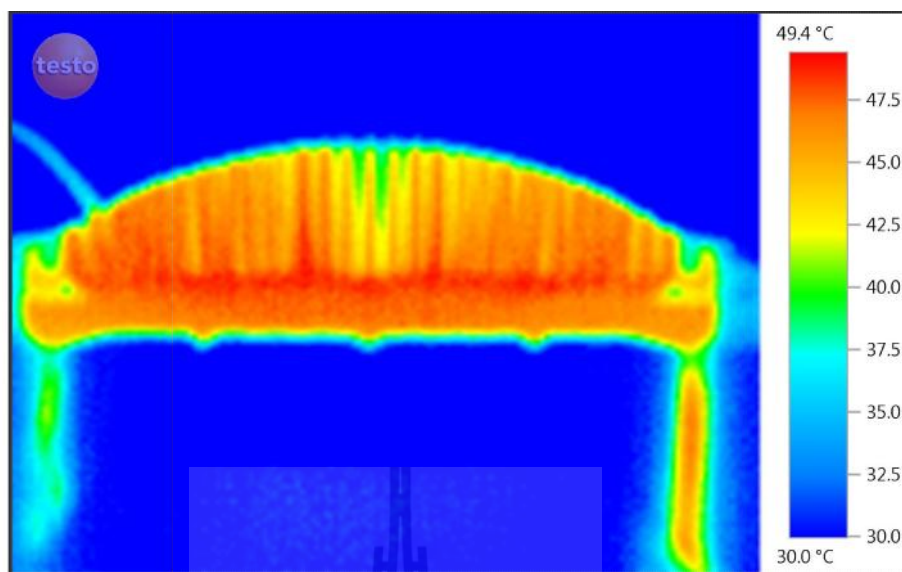


รูปที่ 6.5 แผงวงจรของแอลอีดีโมดูล เมื่อถอดฝาเลนส์ออก

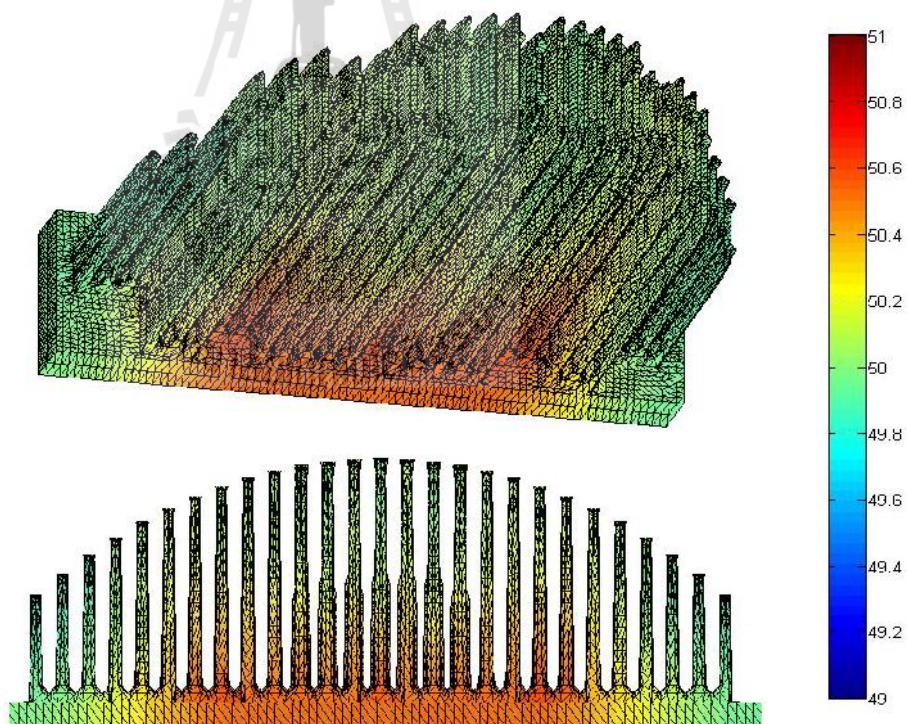
6.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบจริง

จากการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ในการคำนวณค่าอุณหภูมิภายในแผ่นคริสตระบายความร้อนของโคมไฟถนนแอลอีดี ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง เมื่อโปรแกรมทั้งหมดถูกออกแบบให้ทำงานบนพื้นฐานของโปรแกรม MATLAB นั้น ซึ่งการจำลองผลที่ได้นั้นได้แสดงไว้ในบทที่ 5 โดยในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบในทางปฏิบัติโดยจะใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิของคริสตระบายความร้อนของโคมไฟถนนแอลอีดี

โดยจะเปรียบเทียบทดสอบแผ่นคริสตระบายความร้อนที่คริสตระบายความร้อนที่มีลักษณะโค้งเท่านั้น เนื่องจากมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโคมไฟถนนแอลอีดีจากผู้ผลิตครบถ้วน เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง จากโปรแกรมวิเคราะห์การวัดอุณหภูมิ TESTO IRSoft software จะเห็นลักษณะการกระจายอุณหภูมิของคริสตระบายความร้อน ค่าอุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิเฉลี่ยและแสดงผลอุณหภูมิออกมาในลักษณะกราฟในบริเวณที่ต้องการทราบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง แสดงได้ดังรูปที่ 6.6 และแสดงค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของการจำลองและการทดสอบจริงได้ตามตารางที่ 6.1



ก. ภาพถ่ายทางความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อน



ข. ภาพที่ได้จากจำลองด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง

รูปที่ 6.6 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างผลการจำลอง
และผลการทดสอบจริง

จากรูปที่ 6.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบจริง จะพบว่าแนวโน้มของการกระจายอุณหภูมิมีความสอดคล้องกัน โดยมีการแพร่ความร้อนจากช่วงฐานของแผ่นครีบบระบายความร้อนผ่านไปยังปลายครีบบเพื่อถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอกด้วยการพาความร้อน และการกระจายตัวของอุณหภูมิจึงมีการกระจายทั่วทั้งแผ่นครีบบและมีการระบายความร้อนที่เกิดจากความร้อนสะสมของหลอดแอลอีดีที่เรียงตัวอยู่ใกล้กัน ซึ่งจะส่งผลให้หลอดแอลอีดีไม่เกิดอุณหภูมิสูงเกินที่หลอดจะรับได้ และค่าอุณหภูมิแต่ละหลอดใกล้เคียงกัน เพื่อให้หลอดแอลอีดีมีประสิทธิภาพดีและอายุการใช้งานที่ยาวนานยิ่งขึ้น

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิจากผลการจำลองและผลการทดสอบจริง

ค่าอุณหภูมิ	ผลการจำลอง	ผลการทดสอบจริง
อุณหภูมิสูงสุด (°C)	50.99	49.3
อุณหภูมิต่ำสุด (°C)	50.29	46.2

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบจริงของค่าอุณหภูมิสูงสุดและค่าเฉลี่ยของครีบบระบายความร้อน จะพบว่าจุดที่มีค่าอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่บริเวณที่มีแอลอีดีชิดอยู่ใกล้กัน เนื่องจากมีการสะสมความร้อน ส่งผลให้ครีบบระบายความร้อนบริเวณฐานนั้นมีอุณหภูมิสูง โดยสังเกตได้จากรูปที่ 6.6 ซึ่งจากตารางที่ 6.1 จะสังเกตเห็นว่า ค่าการจำลองผลด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเองนั้น มีค่าที่มากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ซึ่งอาจเป็นผลอันเนื่องมาจากปัจจัยภายนอกต่าง ๆ อาทิเช่น ปัจจัยทางด้านวัสดุ รวมไปถึงปัจจัยทางด้านสภาพสิ่งแวดล้อม เป็นต้น โดยค่าที่ใช้การจำลองผลเป็นค่าคุณสมบัติที่คงที่ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยต่าง ๆ เหมือนอย่างในทางปฏิบัติ แต่อย่างไรก็ดีเมื่อสังเกตจากผลการจำลองและการทดสอบจริงแล้วนั้น พบว่าค่าที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเองโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิตินั้น มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบจริง

6.4 สรุป

บทที่ 6 เป็นการอธิบายขั้นตอนและวิธีในการทดสอบจริงเพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อนคอมโพสิตไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งได้ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการทดสอบ และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเองที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลที่ได้จากการทดสอบ ในเชิงปฏิบัติ ซึ่งผลที่ได้พบเห็นว่า ค่าที่ได้จากการจำลองผลและค่าที่ได้จากการทดสอบในเชิงปฏิบัติมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อย และการจำลองผลอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในครีบริบายความร้อนของโคมไฟถนนแอลอีดี เพื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าอุณหภูมิ การจำลองผลในงานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้นเอง พร้อมตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมกับผลการทดสอบจริงในเชิงปฏิบัติ

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ถือเป็นรากฐานที่สำคัญในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ ในงานวิจัยการศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ในบทที่ 3 ทั้งเรื่องโคมไฟถนนแอลอีดี ครีบริบายความร้อน ทฤษฎีความร้อน ซึ่งประกอบด้วยความรู้ทางด้านความร้อนกลไกการถ่ายโอนความร้อน และระเบียบวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์แบบ 3 มิติ ต่างได้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย ส่วนการดำเนินงานในบทที่ 4 เป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองและอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตักังของกาลเลอร์กิน และได้สร้างกริดแบบ 3 มิติ โดยเลือกใช้โปรแกรม Solidworks ซึ่งงานวิจัยนี้จะแบ่งการวิเคราะห์ครีบริบายความร้อนที่มีลักษณะรูปทรงต่างกันออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบแผ่นครีบริบายที่ครีบริบายบนมีลักษณะโค้ง แบบแผ่นครีบริบายที่ครีบริบายบนมีลักษณะตรง และแผ่นครีบริบายที่ครีบริบายบนมีลักษณะเป็นซี่ โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขปริมาตรของแผ่นครีบริบายเท่ากัน

และส่วนในบทที่ 5 เป็นการอธิบายการคำนวณอุณหภูมิและโปรแกรมจำลองผลการกระจายของอุณหภูมิภายในครีบริบายความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์แบบ 3 มิติ พร้อมทั้งบอกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผล พร้อมทั้งผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในครีบริบายความร้อนโคมไฟถนนแอลอีดีแต่ละแบบ พร้อมนำผลทั้ง 3 แบบมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลที่ได้ก็นั้นแผ่นครีบริบายที่ครีบริบายบนมีลักษณะเป็นซี่ที่มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด

เนื่องจากอุณหภูมิของแอลอีดีต่ำที่สุด และทำให้ทราบว่าพื้นผิวสัมผัสอากาศของครีบบระบายความร้อนเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่ช่วยในการระบายความร้อนและลดอุณหภูมิของแอลอีดี ส่วนปัจจัยลักษณะรูปทรงของครีบบระบายความร้อนนั้นจะช่วยในการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ ในส่วนของบทที่ 6 จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีในการทดสอบจริงโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการทดสอบ เพื่อนำผลการทดสอบจริงที่ได้มาเปรียบเทียบกับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง ซึ่งผลที่ได้นั้นก็สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน

7.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

1. ประยุกต์นำระเบียบวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์ มาวิเคราะห์ปัญหาทางด้านอื่น ๆ อาทิเช่น วิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมอื่น เช่น ความชื้นที่มีผลกระทบต่อคอมโพสิตแอลอีดี พร้อมนำมาวิเคราะห์เกี่ยวกับอายุการใช้งานของคอมโพสิต

2. จากการศึกษาการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบระบายความร้อนในคอมโพสิตแอลอีดี ซึ่งได้ทำการศึกษาครีบบระบายความร้อน 3 แบบ ซึ่งในอนาคตอาจจะนำโปรแกรมไฟไนท์อีลีเมนต์แบบ 3 มิติ ไปใช้ในการออกแบบครีบบระบายความร้อนที่บรรลุจุดประสงค์ตามแบบที่ดีขึ้นต่อไปได้

รายการอ้างอิง

- ชวลิต ปัญญาอิสระ. (2555). การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิในหม้อแปลง
ไฟโวลต์อิเล็กทรอนิกส์แบบหลายชั้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ. วิทยานิพนธ์
มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2547). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ:
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2549). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ:
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เผด็จ เผ่าละออ. (2548). การออกแบบแนวใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสันสถานะร้อนโดยวิธี
ไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี.
- สุกัญญา ทัพศรี. (2555). การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิตลอดสายส่งกำลัง
ไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สมชาย อัครทิวา และขวัญจิต วงษ์ชาติ. (2545). เทอร์โมไดนามิกส์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ที่อป.
- อานนท์ อิศรมงคลรักษ์. (2552). การออกแบบอุปกรณ์กำลังสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อ
ผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานใต้สายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ. วิทยานิพนธ์
มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Arik, M., Becker, C., Weaver, S., and Petroski, J. (2004). Thermal Management of LEDs :
Package to System. **Third International Conference on Solid State Lighting**. : 64-75.
- Babus, R., F., Akintunde, K., and Probert, S., D. (1995). Thermal performance of a pin
finassembly. **In International Journal, Heat and Fluid Flow**. : 50-55.
- Bender, V.C., Iaronka, O., Costa, M.A.D., Prado, R.N.D., and Marchesan, T.B. (2012). An
optimized methodology for LED lighting Systems Designers. **Industry Applications
Society Annual Meeting**. : 1-8.
- Bougataya, M., Lakhsasi, A., Norman, R., Prytula, R., Blaquiere, Y., and Savaria, Y. (2008).
Steady State Thermal Analysis of a Reconfigurable Wafer-Scale Circuit

- Board. **Electric and Computer Engineering**. : 411-416.
- Chang, S., and Tsou, C. (2014). A Novel Silicon-Based LED Packaging Module With an Integrated Temperature Sensor. **IEEE transactions on components packaging and manufacturing technology**. : 769-776.
- Chau, S.W., Lin, C.H., Yeh, C.H., and YanG, C. (2007). Study on the cooling enhancement of LED heat sources via an electro hydrodynamic approach. **33 rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. : 2934-2937.
- Dai, T., Wang, L., Fang, X., Tang, Y., and Shi, J. (2009). Thermal analysis of the HTS magnet for simulated dynamic experiment of electric power systems in over-current state. **IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices**. : 263-266.
- Deng, Y., and Liu, J. (2010). A liquid metal cooling system for the thermal management of high power LEDs. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 37(7): 788-791.
- Fagan, M. J. (1992). **Finite Element Analysis** (1st ed.). England: Longman scientific and Technical.
- Fengze, H., Daoguo, Y., and Guoqi, Z. (2011). Thermal analysis of LED lighting system with different fin heat sinks. **Chinese Institute of Electronic**. 32(1): 1-3.
- Ghassemi, M., and Pasandeh, R. (2003). Thermal and electromagnetic analysis of an electromagnetic launcher. **IEEE Transaction on Magnetic**. 39(3): 1819-1822.
- Gong, Y.B., and Zhu, Z. (2014). Impact of the LED chips placement and heat sink design on the multi-chip LED bump performance by the thermal and Optical Simulation. **15th International Conference on Electronic Packaging Technology**. : 28-31.
- Iaronka, O., Bender, V.C., Marchesan, T.B., Costa, M.A. and Prado, R.N. (2013). An optimized methodology for LED lighting systems designers. **Industry Applications Society Annual Meeting IEEE** : 1-8.
- Iaronka, O., Bender, V.C., and Marchesan, T.B. (2013). Finite element analysis of a closed cooling system applied to thermal management of LED luminaires. **Power Electronics Conference** : 1153-1159.

- Iaronka, O., Bender, V.C., and Marchesan, T.B. (2013). Study on the thermal performance of LED luminaires using Finite element Method. **Industrial Electronics Society, 39th Annual Conference of the IEEE** : 6099-6104.
- Pan, K., Ren, G., Li, P., and Huang, P. (2011). Thermal Analysis of Multi-chip Module High Power LED Packaging. **International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging** . : 1124-1127.
- Sarvar, F., and Whalley, D.C. (1999). Thermal design of high power semiconductor packages for aircraft electronic systems. **The Institution of Electrical Engineers**.
- Subramani, S., and Devarajan, M. (2014). Thermal transient analysis of high-power green LED fixed on BN coated al substrates as heatsink. **IEEE Transactions on electron devices**. : 3213-3216.
- Tang, H., Yang, D., Zhang, G.Q., Liang, L., Jia, H., Zhang, Z., and Cai, M. (2012). Multi-physics modeling of LED-based luminaires under temperature and humidity environment. **13th International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging** . : 803-807.
- Wang, N., Wang, C.H., Lei, J.X. and Zhu, D.S. (2009). Numerical study on thermal management of LED packaging by using thermoelectric cooling. **9th International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging** . : 433-437.
- Yu, G., Kailin, P., Shujing, C., Fei, Y. and Tao, L. (2013). Reliability Analysis of RGB LED on Low-temperature Thermo-mechanical Coupling Field. **14th International Conference on Electronic Packaging Technology** . : 1099-1103.
- Yunpeng, M. and Quan, Z. (2015). Thermal analysis of high power LED light. **International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference** . : 2160-2163.
- Zeng, P., Yang, D., Tang, H. and Cai, M. (2013). Hygro-thermo-mechanical modeling of LED luminaires. **14th International Conference on Electronic Packaging Technology** . : 606-611.

ภาคผนวก ก

คุณลักษณะและคุณสมบัติของคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์กที่ใช้ในงานวิจัย



คุณลักษณะและคุณสมบัติของโคมไฟถนนแอลอีดีที่ใช้ในงานวิจัย

คุณลักษณะและคุณสมบัติของแอลอีดีโมดูลรุ่น HPML AD G13 street lighting จากบริษัท OSRAM ซึ่งใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก.1-ก.5



รูปที่ ก.1 คุณลักษณะและคุณสมบัติของแอลอีดีโมดูล (ส่วนที่ 1)

SPECIFICATION

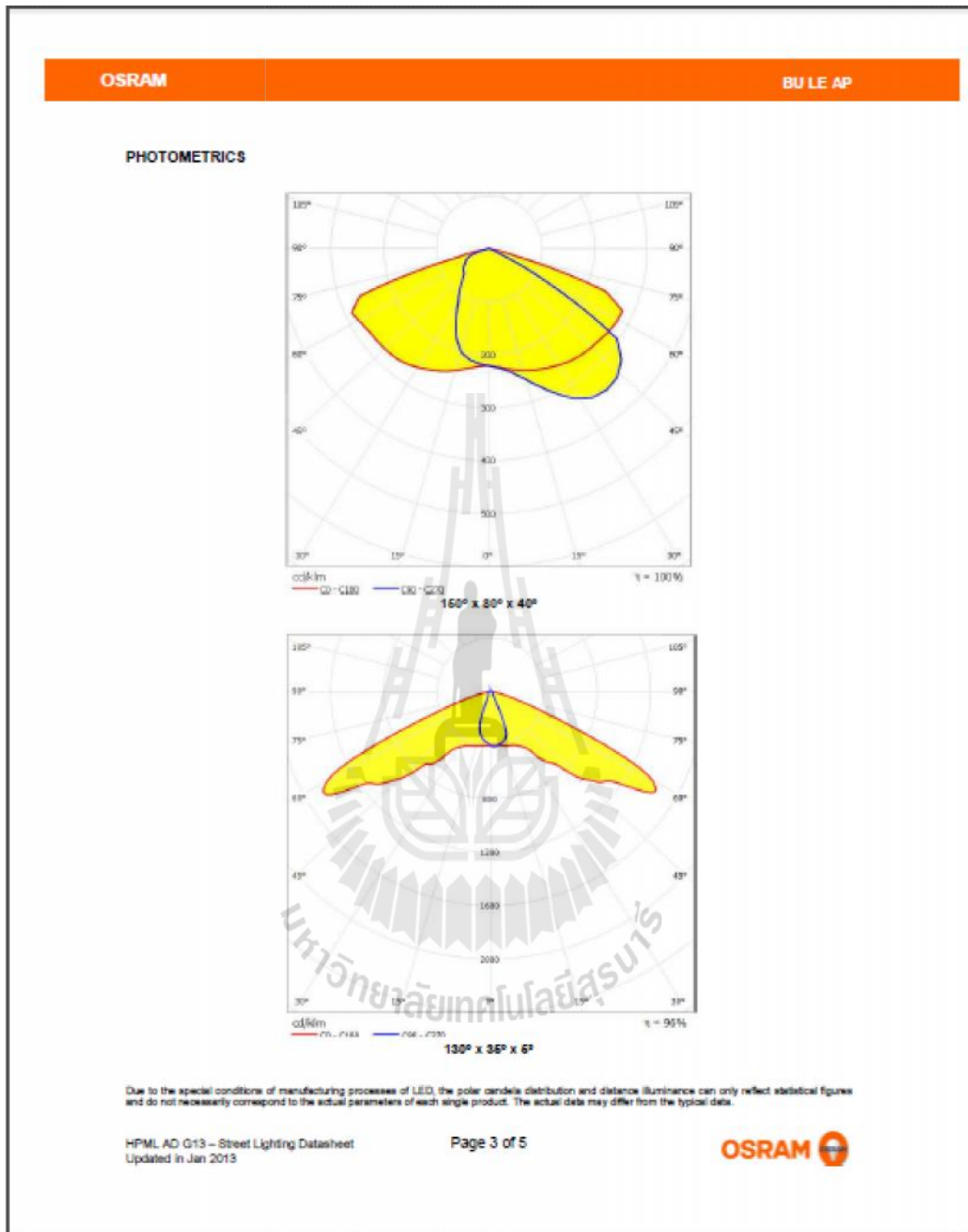
Parameter	HPML AD G13				
	3000K	4000K	5000K	6500K	
Light Output*	Typical luminous flux @350mA	2300lm	2700lm	3400lm	3400lm
	Typical luminous flux @400mA	2600lm	3000lm	3700lm	3700lm
	Beam Angle	150° x 80° x 40°		130° x 45° x 5°	
	CCT	3000K	4000K	5000K	6500K
	Typical CRI	80	70	70	70
Lifetime (T ₈₀ @ 25°C) (L70/B50)	>50,000 hours				
Electrical	Current input range	100~450mA		100~700mA	
	Maximum input voltage [#]	48Vdc (per each pair cable)			
	Power @350mA (typical)	30W		30W	
	Power @400mA (typical)	34.5W			
Recommended Driver	OSRAM OPTOTRONIC OTe 70/100-277/2x350 P, each driver supports 2pcs of HPML AD G13 OTe 90/220-240/4x400 E, each driver supports 2pcs of HPML AD G13 OTe 105/100-277/3x350 P, each driver supports 3pcs of HPML AD G13 OTe 140/100-277/4x350 P, each driver supports 4pcs of HPML AD G13				
ESD Protection	contact:4kV and air 8kV				
Mechanical	Dimension	220mmL x 70mmW x 66mmH			
	Mounting	screw fixing at side brackets			
	Optics	polycarbonate lens			
	Weight	370 g(±30g)			
Temperature	Ambient	-30 ... 45°C (T _a in free air)			
	Operating [#]	-30 ... 90°C (measure at T _c point)			
	Storage [#]	-30 ... 85°C (measure at T _c point)			
Standard Compliance	IP Rating	IP66			
	Standard	CE, IEC 62471; EN 62031; IEC 60598-1; EN 55015; EN 61547;			
	Flammability	IEC60598-1			
	Environment	RoHS			

* Due to the special conditions of manufacturing processes of LED, the typical data of technical parameters can only reflect statistical figures and do not necessarily correspond to the actual parameters of each single product. Actual lumen output can be varied due to many factors like lamp factor of LED, input current/voltage, thermal conditions, many other optical tolerances, and measurement tolerance. The data above is for reference only. Please contact Osram sales or marketing global for advice if customers has any specific demand on particular parameters.

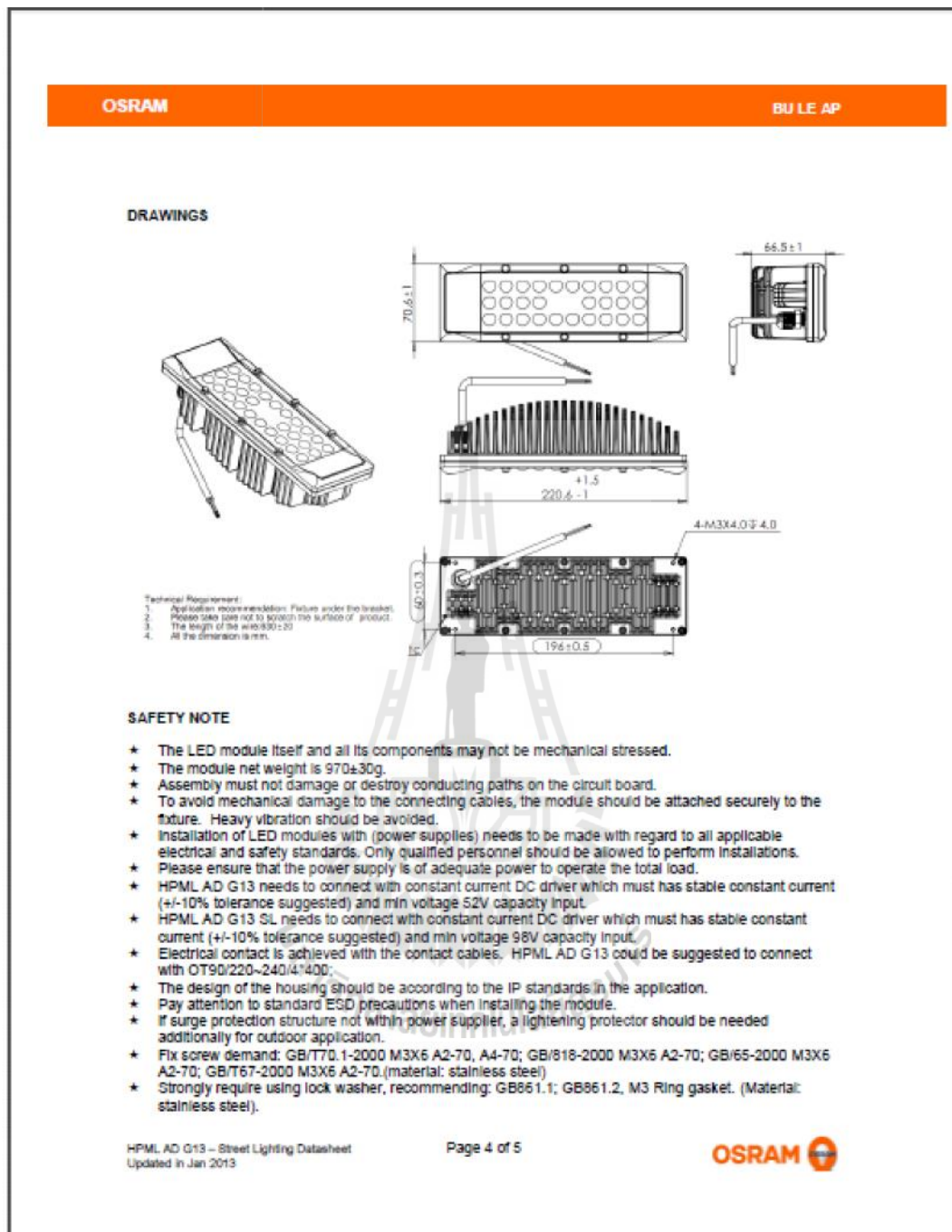
Exceeding maximum ratings for operating voltage will cause hazardous overload and will likely destroy the LED module.

Exceeding maximum ratings for operation and storage temperature will reduce expected lifetime or destroy the LED module. The temperature of the LED module needs to be measured at the T_c-point according to IEC60598-1 in a transiently constant status with a temperature sensor or a temperature sensitive label.

รูปที่ ก.2 คุณลักษณะและคุณสมบัติของแอลอีดีโมดูล (ส่วนที่ 2)

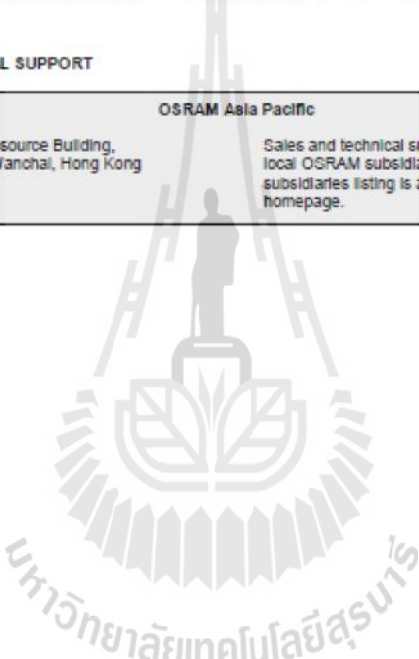


รูปที่ ก.3 คุณลักษณะและคุณสมบัติของแอลอีดีโมดูล (ส่วนที่ 3)



รูปที่ ก.4 คุณลักษณะและคุณสมบัติของแอลอีดีโมดูล (ส่วนที่ 4)


OSRAM		BU LE AP			
ORDERING CODE					
Product group	Product name	EAN-10	8-Unit	EAN-40	8-Unit
HPML AD	HPML AD G13 W4F 830 L150X80X40 46V 4X1 OSRAM	4008321838803	1	4008321838810	4
HPML AD	HPML AD G13 W4F 740 L150X80X40 46V 4X1 OSRAM	4008321838988	1	4008321838995	4
HPML AD	HPML AD G13 W4 765 L150X80X40 46V 4X1 OSRAM	4008321839169	1	4008321839176	4
HPML AD	HPML AD G13 8Q W4 765 L130X45X5 79V 4X1 OSRAM	4008321839213	1	4008321839220	4
OPTOTRONIC	OTe 90/220-240/4x400 E	4008321590657	1	4008321590664	6
OPTOTRONIC	OTe 90/220-240/4x350 E	4008321637345	1	4008321637352	6
OPTOTRONIC	OTe 70/100-277/2X350 P	4008321851512	1	4008321851529	6
OPTOTRONIC	OTe 105/100-277/3X350 P	4008321851499	1	4008321851506	6
OPTOTRONIC	OTe 140/100-277/4X350 P	4008321851475	1	4008321851482	6
SALES & TECHNICAL SUPPORT					
OSRAM Asia Pacific					
30 th Floor, China Resource Building, 26 Harbour Road, Wanchai, Hong Kong +852 3652 5678 www.osram.com			Sales and technical support is given by the local OSRAM subsidiaries. Complete subsidiaries listing is available at OSRAM homepage.		



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

HPML AD G13 – Street Lighting Datasheet
Updated in Jan 2013

Page 5 of 5



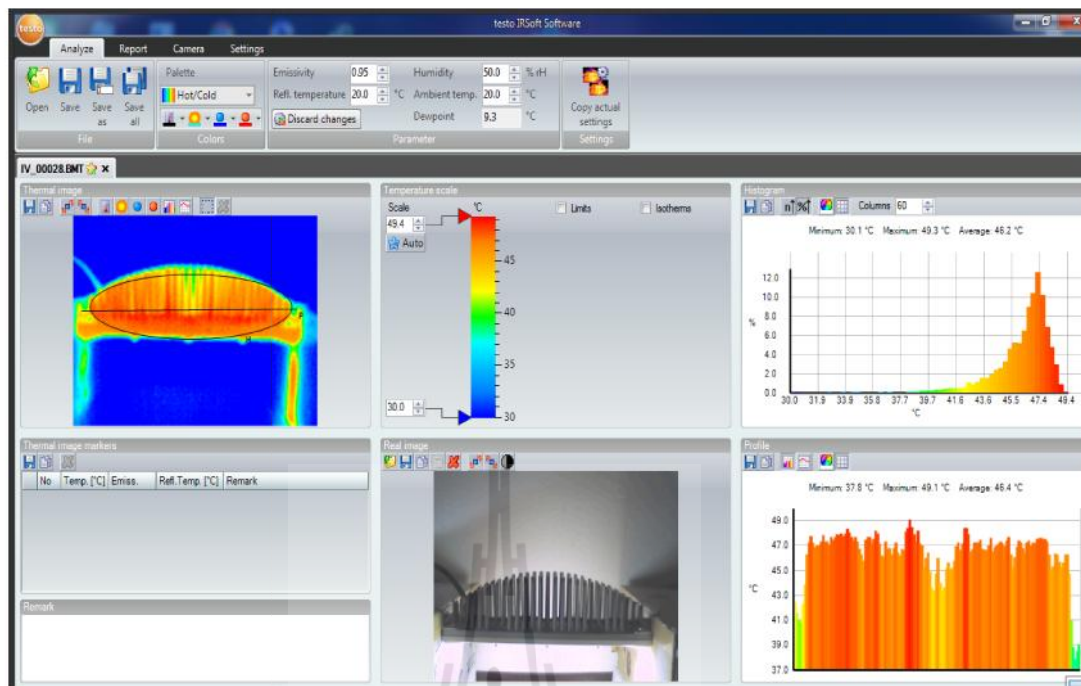
รูปที่ ก.5 คุณลักษณะและคุณสมบัติของแอลอีดีโมดูล (ส่วนที่ 5)

ภาคผนวก ข

ภาพแสดงเครื่องมือและการวัดอุณหภูมิของโคมไฟถนนแอลอีดี

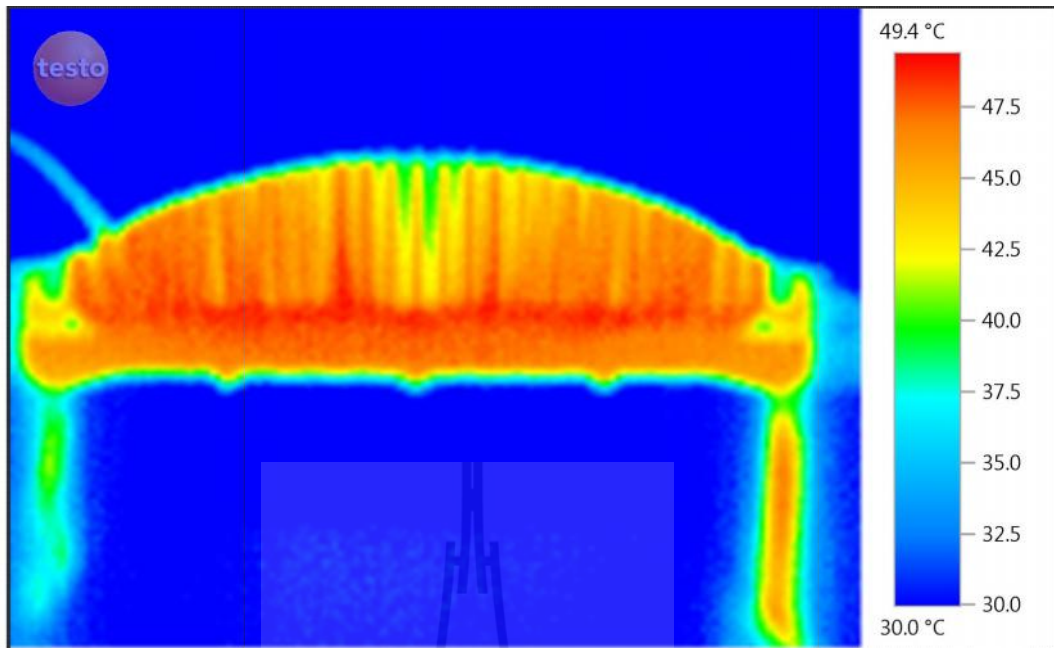




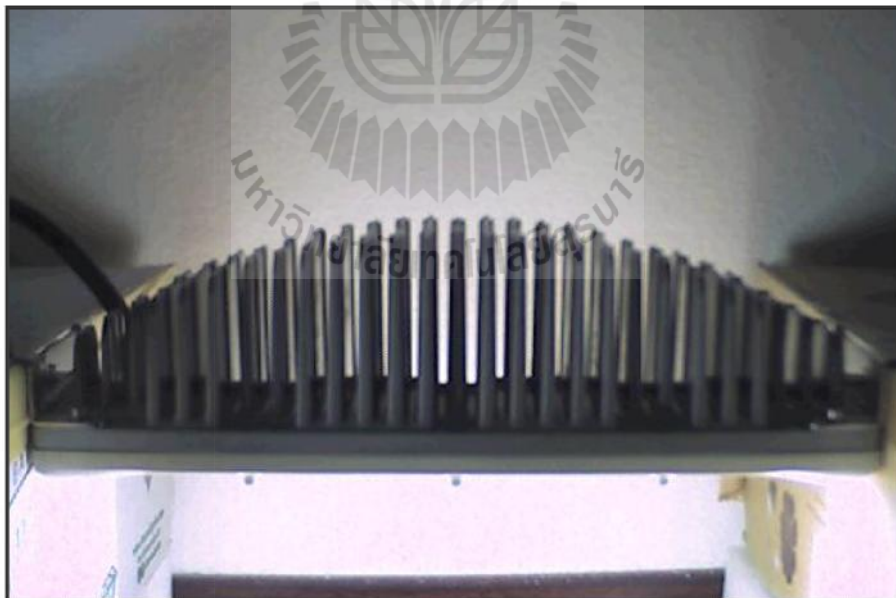


รูปที่ ข.2 โปรแกรมวิเคราะห์การวัดอุณหภูมิ TESCO IRSoft software

และโปรแกรมการวิเคราะห์การวัดอุณหภูมิ TESCO IRSoft software สามารถแสดงผลการวัดอุณหภูมิในลักษณะของภาพถ่ายทางความร้อนและภาพจริง และแสดงค่าอุณหภูมิในลักษณะแบบจุด และแบบกราฟได้ดังแสดงด้วยรูปที่ ข.3



ก. ภาพถ่ายทางความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อน
ของ โคมไฟถนนแอลอีดี



ข. ภาพถ่ายจริงของ โคมไฟถนนแอลอีดี

รูปที่ ข.3 ภาพถ่ายทางความร้อนและภาพถ่ายจริงจากกล้องถ่ายภาพความร้อน

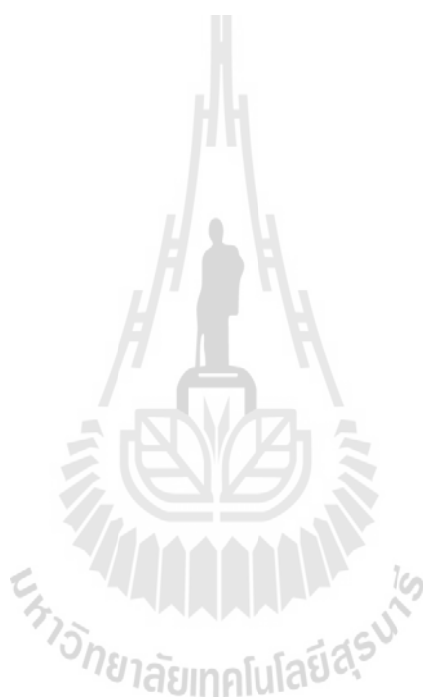
ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Rachso, S., and Pao-la-or, P. (2015). **Analysis of Temperature Distribution in Finned Heat Sink of LED Street Lamp Using 3-D Finite Element Method**, 9th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC), July 2015, Nakhon Ratchasima, Thailand.



ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN FINNED HEAT SINK OF LED STREET LAMP USING 3-D FINITE ELEMENT METHOD

Supaluk Rachso, Padej Pao-la-or
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND

ABSTRACT

This paper proposes a set of mathematical model of LED Street Lighting luminaire which performs in second-order partial differential equation. The paper simulate the distribution of temperature in finned heat sink of LED street lamp. The computer simulation is applied using 3-D finite element method that is developed by MATLAB program with the graphical performance of the temperature within LED Street Light Luminaire.

Keywords : LED Street Light Luminaire, temperature, 3-D finite element method (3-D FEM), Computer Simulation

1. INTRODUCTION

Light Emitting Diodes (LEDs) applied to street lighting are gaining much interest in the last years, they can provide energy saving, reliability and long lifetime (50-100khrs) resulting in low upkeep costs. The main portion of input energy into LED is turned into heat (around of 70-85%) (Chen, Tao and Hui, 2012). The device heating increases the junction temperature, which can lead to reliability problems such as low quantum efficiency, wavelength shifts, short lifetime, and even catastrophic failure (Tsu, Chen and Kang, 2008).

To analyze temperature of LED Street Lighting luminaire, temperature calculation: numerical approximation methods (e.g. finite difference: FD or finite element methods: FEM). With lack of accuracy, the first approach is not often used for this purpose, especially when nonlinearity of temperature is involved. The FEM is applicable to a broad range of solving

temperature problems due to its flexibility, and accuracy. Application of the FEM to LED Street Lighting luminaire is inclusive. In addition, this method is more efficient than the FD method due to flexibility and accuracy, and it can gain several advantages when it is applied to LED Street Lighting luminaire.

In this paper, a steady-state condition in an LED Street Lighting luminaire is used for test. This results in a set of partial differential equations (PDE). Section II presents the mathematical model of temperature in LED street lamp based on a set of Heat transfer equations, while Section III describes the 3-D FEM by using Galerkin approach applied to LED street lamp for the purpose of obtaining temperature distribution. The domain of study with the 3-D FEM can be discretized by using linear tetrahedron elements. The simulation conducted herein is based on the 3-D FEM method given in Section III. All the programming instructions are coded in MATLAB program environment. Information of the test example and simulation results are shown in Section IV. Finally, the last section provides the conclusion.

2. MODELING OF TEMPERATURE FOR THE SIMULATION

The following steady-state heat transfer equation with heat source show in Eq. (1), is used to obtain the temperature distribution in LED Street Light Luminaire (Lewis, Nithiarasu & Seetharamu, 2004).

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = 0 \quad (1)$$

where λ is thermal conductivity. The convective heat transfer coefficient (h) of heat sink is $10 \text{ W.m}^{-2}.\text{c}$. The thermal conductivity of packaging material is show in Table 1 (Wang, Lei & Zhu, 2009)

Table 1 Thermal conductivity of the LED packaging

	Thermal conductivity (W/m. ² .c)
LED chip	130
Soaking block	40
Substrate	200
Heat sink	240

Assuming that ambient temperature (T_a) is constant at $37 \text{ }^\circ\text{C}$ and heat source (Q) of LED chip is $200,000 \text{ W.m}^{-2}$

3. 3D-FEM FOR LED STREET LIGHT LUMINAIRE

3.1 Discretization

This paper conducts the simulation study by considering the LED Street Lighting luminaire, as shown in Fig. 1. Also



Fig. 1 LED Street Lamp (LEDs mounted on the heat sink)

The domain of study with the 3D-FEM can be discretized by using linear tetrahedron elements. This can be accomplished by using Solid Work for 3D grid generation. Fig. 2-3 displays detail and grid representation of LED street lamp. The region domain consists of 38,280 nodes and 146,826 elements.



Fig. 2 Detail of LED street lamp



Fig. 3 Discretization of LED street lamp

3.2 Finite element formulation

An equation governing each element is derived from heat transfer equations directly by using Galerkin approach, which is the particular weighted residual method for which the weighting functions are the same as the shape function. The shape function for 3D-FEM used in this research is the application of 4-node tetrahedron element (three-dimensional linear element) (Bhatti, 2006) and (Kattan, 2007). According to the method, the temperature is expressed as follows

$$T(x, y, z) = T_1N_1 + T_2N_2 + T_3N_3 + T_4N_4 \quad (2)$$

where N_i , $i = 1, 2, 3, 4$ is the element shape function and the T_i , $i = 1, 2, 3, 4$ is the approximation of the temperature at each node (1, 2, 3, 4) of the elements, which is

$$N_i = \frac{1}{6V}(a_i + b_ix + c_iy + d_iz)$$

where V is the volume of the tetrahedron element, which is expressed as

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$$

and

$$\begin{aligned} a_1 &= x_1(y_2z_1 - y_1z_2) + x_1(y_2z_2 - y_1z_3) + x_2(y_1z_4 - y_2z_1) \\ a_2 &= x_1(y_1z_1 - y_2z_2) + x_1(y_1z_3 - y_2z_4) + x_2(y_2z_1 - y_1z_4) \\ a_3 &= x_1(y_1z_2 - y_2z_3) + x_2(y_1z_1 - y_2z_4) + x_2(y_2z_4 - y_1z_2) \\ a_4 &= x_1(y_2z_1 - y_1z_2) + x_2(y_1z_3 - y_2z_4) + x_2(y_2z_2 - y_1z_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= y_1(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_1) \\ b_2 &= y_1(z_1 - z_2) + y_1(z_3 - z_4) + y_2(z_4 - z_1) \\ b_3 &= y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_1 - z_4) + y_2(z_4 - z_1) \\ b_4 &= y_1(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_1 &= x_1(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_2(z_4 - z_2) \\ c_2 &= x_1(z_1 - z_2) + x_1(z_3 - z_4) + x_1(z_4 - z_1) \\ c_3 &= x_1(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1) \\ c_4 &= x_1(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_1(z_3 - z_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_1 &= x_1(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_1) \\ d_2 &= x_1(y_1 - y_2) + x_1(y_3 - y_4) + x_2(y_4 - y_1) \\ d_3 &= x_1(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2) \\ d_4 &= x_1(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) \end{aligned}$$

The method of the weighted residual with Galerkin approach is then applied to the differential equation, refer to (1), where the integrations are performed over the element domain V .

$$\int_V \left(\lambda \frac{\partial \delta T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda \frac{\partial \delta T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \lambda \frac{\partial \delta T}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_V N_n (hT) dV = \int_V N_n Q dV + \int_V N_n (hT_\infty) dV$$

, or in the compact matrix form

$$[K_c] + [K_h][T] = \{Q_h\} + \{Q_Q\} \quad (3)$$

$[K_c] =$

$$\int_V \left(\lambda \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{n \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times n} + \lambda \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{n \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times n} + \lambda \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{n \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times n} \right) dV$$

$$= \frac{\lambda}{26V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 \\ b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 \\ \text{Sym} & \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 & \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[K_h] = h \int_V N_n N_m dx dy dz = \frac{hV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[Q_h] = hT_\infty \int_V N_n dx dy dz = \frac{hT_\infty V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[Q_Q] = Q \int_V N_n dx dy dz = \frac{QV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

For one element containing 4 nodes, the expression of the FEM approximation is a 4×4 matrix. With the account of all elements in the system of n nodes, the system equation is sizable as an $n \times n$ matrix.

4. 3D – FEM Simulation Result

The FEM-based simulation conducted in this paper is coded with MATLAB programming for calculation of temperature dispersion. To utilize a graphical feature of MATLAB, the graphical representation for temperature, contour of temperature distribution are presented in Fig. 4

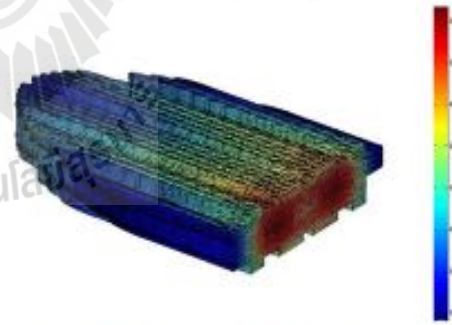


Fig.4 Simulates Temperature distribution in heat sink ($^{\circ}C$)

From Fig.4 shows the temperature distribution of LED street light by using 3D FEM program which is developed. It can be noticed that the temperature distribution will happen from the LED junction at the

highest level of temperature to the LED street light heat sink. Based on the article, LED junction temperature (T_j) is 47.95 °c.

5. CONCLUSION

This article investigated the temperature that took place in LED street light. The sample model from computer applied the 3D FEM which developed by MATLAB. The result showed that the temperature will distribute itself from the LED Chip junction which is the highest temperature part to heat sink, including the average, standard deviation in heat sink and LED junction temperature which it will be able to use in temperature distribution analysis.

REFERENCES

- Bhatti , M.A., *Advanced Topics in Finite Element Analysis of Structures*, John Wiley & Sons, USA, 2006.
- Chen, H.T., Tao, X.H. and Hui, S.Y.R., Estimation of Optical Power and Heat-Dissipation Coefficient for the Photo-Electro-Thermal Theory for LED Systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, pp. 2176-2183, 2012.
- Kattan , P.I., *MATLAB Guide to Finite Elements* (2nd edition), Springer Berlin Heidelberg, USA, 2007.
- Lewis, R.W., Nithiarasu, P. and Seetharamu, K.N. *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*, John Wiley & Sons, USA, 2004.
- Tsai, M.Y., Chen, C.H. and Kang, C.S., Thermal analyses and measurements of low-Cost COP package for high-power LED,* in 58th Elect. Comp. and Technology Conference, 2008, pp. 1812-1818.
- Wang, N., Wang, C.H., Lei, J.X. and Zhu, D.S. (2009). Numerical study on thermal management of LED packaging by using thermoelectric cooling. 09th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging. : 433-437



Supaluk Rachso is a pursuing master degree of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND. She received B.Eng. (2012) in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand.



Padej Pao-la-or is a lecturer of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND. He received B.Eng. (1998), M.Eng. (2002) and D.Eng. (2006) in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand. His fields of research interest include a broad range of power systems, electrical drives, FEM simulation and artificial intelligent techniques.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวศุภลักษณ์ ราชโส เกิดเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2534 ที่โรงพยาบาลค่ายสุรนารี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนมารีย์วิทยา อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2556 ภายหลัง การศึกษาได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ปฏิบัติงานเป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 7 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน (2) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 (4) ปฏิบัติการแปลงผันพลังงาน กลไฟฟ้า (5) ปฏิบัติการ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (6) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 และ (7) การใช้โปรแกรมแมทแลบสำหรับ วิศวกรรมไฟฟ้า

ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ดังปรากฏ รายละเอียดในภาคผนวก ก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี