

การออกแบบแนวใหม่พร้อมสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนต้นแบบโดยใช้  
พลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยวิธีไฟไนท์อิเลิเมนต์แบบ 3 มิติ



นางสาวอิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2561

**NEW DESIGNS OF SOLAR THERMAL PROTOTYPE  
BY 3-D FINITE ELEMENT METHOD**

**Issaraporn Amornsawatwattana**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Doctor of Engineering in Electrical Engineering  
Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2018**

การออกแบบแนวใหม่พร้อมสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนต้นแบบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์  
ด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

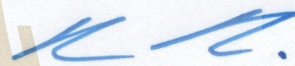
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.เพด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.ธนัตชัย กุลรวรานิชพงษ์)

กรรมการ



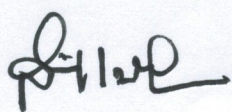
(รศ. ดร.อนันท์ อุนศิริไธย์)

กรรมการ



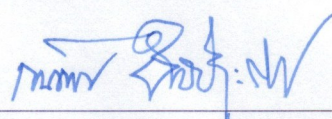
(ผศ. ดร.กীরติ สุตักษณ์)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา : การออกแบบแนวใหม่พร้อมสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อน  
ต้นแบบ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ (NEW DESIGNS  
OF SOLAR THERMAL PROTOTYPE BY 3-D FINITE ELEMENT METHOD)  
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ, 175 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดย  
ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับที่สอง การจำลองผลด้วย  
คอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB  
พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงาน  
แสงอาทิตย์ วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เป็นวิธีการแก้สมการเชิงตัวเลขในรูปแบบสมการอนุพันธ์ย่อย  
ที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง รวมถึงใช้ในการจำลอง  
ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิ วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์สามารถแก้ปัญหาทางที่ขึ้นกับเวลาที่ปรากฏใน  
แบบจำลองอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยได้ประยุกต์ใช้การ  
ประมาณค่าแบบย้อนหลัง วิทยานิพนธ์นี้ได้นำประโยชน์ของวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ มาใช้  
ในการคำนวณค่าความร้อนภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำงานเมื่อ  
แสงอาทิตย์ส่องลงมายังอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ จากนั้น  
ค่าอุณหภูมิจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ จากชั้นกระจกมายังชั้นของท่อน้ำตามลำดับ เนื่องจากการสะสมความ  
ร้อนทุก ๆ เวลาที่แสงแดดส่องมายังอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และการถ่ายเท  
ความร้อนของชั้นแผ่นฉนวนกันรังสีมายังท่อน้ำ ซึ่งท่อน้ำจะถ่ายเทความร้อนมายังน้ำทำให้อุณหภูมิ  
สูงสุดบริเวณน้ำ จากนั้นชั้นของฟอยล์และโฟมจะทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนออก  
สู่ภายนอก ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้วิเคราะห์และออกแบบแนวใหม่พร้อมสร้างอุปกรณ์ต้นแบบโดยใช้  
อุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นใหม่ซึ่งมีแผงพาราโบลากรวมแสง เพื่อทำให้น้ำ  
มีอุณหภูมิสูงขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา อิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร. เผด็จ เผ่าละออ

ISSARAPORN AMORNSAWATWATTANA : NEW DESIGN OF SOLAR  
THERMAL PROTOTYPE BY 3-D FINITE ELEMENT METHOD.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PADEJ PAO-LA-OR, Ph.D., 175 PP.

SOLAR THERMAL/NEW DESIGN/TEMPERATURE/3-D FINITE ELEMENT  
METHOD (3-D FEM)/PARABOLIC CONCENTRATION

This thesis proposed mathematical model of temperature in solar thermal. The model shown in second-order partial differential equation. The simulation applied 3-D finite element method, which develops in programming of MATLAB, and can be shown the result of temperature in solar thermal. Finite Element Method is one among popular numerical methods that is able to handle partial differential equation in various forms. At present, the finite element method has been widely applied in most engineering fields. Even for problems of temperature distribution, the finite element method is able to estimate solution of Maxwell's equations which appeared in temperature model of solar thermal. To solve this time-dependent system, a step-by-step numerical integration of the backward difference algorithm is applied. This thesis utilizes the advantages of the 3-D finite element method for handling the heat calculation in solar thermal. Solar thermal which work at temperature is higher up from glass layer to absorber then go to layer of water respectively due to heat accumulation when sunlight touch solar thermal and heat transfusion from absorber to pipe which pipe will transfer the heat to water. So the water gets maximum temperature. After that, foil and foam will be an insulator by not let the heat out. This

thesis analyze and new designs of solar thermal prototype with parabolic concentration for increase temperature of water.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature อสิภากรท์ อมาตย์สุตาร์ท

Advisor's Signature *[Handwritten Signature]*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคลากรและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดรวมถึงได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงาน วิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ยังมีความเป็นกันเองแก่ผู้วิจัย และเป็นທີ່ปรึกษาที่ดีในทุกเรื่อง และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิต

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง อาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับผลงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัชชัย กุลรวานิชพงษ์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้คำปรึกษาแนะนำประโยชน์ต่องานวิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.อนันท์ อุ่นศิริไธส อาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้คำปรึกษาแนะนำประโยชน์ต่องานวิจัยและช่วยเหลือผู้วิจัยเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุกฤษณ์ อาจารย์สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะกับผลงานวิจัย

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ กลุ่ม FEM และบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ให้ความช่วยเหลือดูแล และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการศึกษา รวมทั้งการเผยแพร่ผลงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณครูทุกท่านที่ให้ความรู้ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ คุณปู่ฐานะพงศ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา คุณย่าละเมียด อมรสวัสดิ์วัฒนา คุณย่าทองล้วน อมรสวัสดิ์วัฒนา คุณพ่อนิกร อมรสวัสดิ์วัฒนา และคุณแม่บังอร อมรสวัสดิ์วัฒนา ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

อิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	3
<b>2 ปฏิศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>5</b>
2.1 บทนำ	5
2.2 ปฏิศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2.1 งานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ	5
2.2.2 งานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย	12
2.3 สรุป	16
<b>3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>17</b>
3.1 บทนำ	17
3.2 พลังงานแสงอาทิตย์	17



## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

3.2.1	ปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มของแสงอาทิตย์.....	17
3.2.2	การวัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์.....	18
3.2.3	ชนิดของรังสีแสงอาทิตย์.....	19
3.2.4	สิ่งที่มีผลต่อการผลิตน้ำร้อนของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์.....	19
3.2.5	ข้อควรปฏิบัติของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนเพื่อทำให้น้ำร้อนขึ้น.....	20
3.3	อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์.....	20
3.3.1	ส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์.....	21
3.3.2	อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ.....	23
3.5	ทฤษฎีความร้อน.....	26
3.5.1	ความร้อน.....	26
3.5.2	กลไกการถ่ายโอนความร้อน.....	30
3.6	วิธีไฟในที่อลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	32
3.7	สรุป.....	41
4	<b>การคำนวณอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยระเบียบวิธีไฟในที่อลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....</b>	<b>42</b>
4.1	บทนำ.....	42
4.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงาน แสงอาทิตย์.....	42
4.3	การคำนวณอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟในที่อลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	43
4.3.1	การออกแบบอลลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา.....	43
4.3.2	ฟังก์ชันการประมาณภายในอลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	49
4.3.3	การสร้างสมการอลลิเมนต์.....	50
4.3.4	การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว.....	58
4.3.5	การประกอบอลลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ.....	59

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.6 การประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาค่าผลเฉลย	59
4.4 สรุป	60
<b>5 ผลการจำลองพร้อมเปรียบเทียบอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน</b>	
<b>โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้น</b>	<b>61</b>
5.1 บทนำ	61
5.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	61
5.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล	66
5.4 ผลการจำลองอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีและแบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลากรวมแสง	68
5.4.1 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี ซึ่งเป็นภาพรวมของอุปกรณ์ทั้งหมด โดยเน้นในสภาวะคงตัว	68
5.4.2 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกระจกในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี โดยเน้นในสภาวะคงตัว	70
5.4.3 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิต่อน้ำในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี โดยเน้นในสภาวะคงตัว	71
5.4.4 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิแผ่นดูดกลืนรังสีในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี โดยเน้นในสภาวะคงตัว	72
5.4.5 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิฟอยล์ในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี โดยเน้นในสภาวะคงตัว	73
5.4.6 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิโพมในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี โดยเน้นในสภาวะคงตัว	74
5.4.7 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิน้ำในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสีที่แปรตามเวลา	75

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4.8	ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์มีแผงพาราโบลิกรวมแสง ซึ่งเป็นภาพรวมของอุปกรณ์ทั้งหมด โดยเน้นในสภาวะคงตัว.....	88
5.4.9	ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกระจกในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง โดยเน้นในสภาวะคงตัว.....	90
5.4.10	ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิต่อน้ำในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง โดยเน้นในสภาวะคงตัว.....	91
5.4.11	ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง โดยเน้นในสภาวะคงตัว.....	92
5.4.12	ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิพอยด์ในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง โดยเน้นในสภาวะคงตัว.....	92
5.4.13	ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิโฟมในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง โดยเน้นในสภาวะคงตัว.....	93
5.4.14	ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิน้ำในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง ที่แปรตามเวลา.....	94
5.5	การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้น.....	108
5.6	สรุป.....	109
6	<b>การออกแบบและสร้างพร้อมผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนต้นแบบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์.....</b>	<b>111</b>
6.1	บทนำ.....	111
6.2	การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบจริง.....	111
6.2.1	การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี.....	111

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนต้นแบบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง	113
6.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบจริงของอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้น	118
6.3.1 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 1 ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์พร้อมเปรียบเทียบ	119
6.3.2 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 2 ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์พร้อมเปรียบเทียบ	121
6.3.3 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 3 ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์พร้อมเปรียบเทียบ	124
6.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบจริง	127
6.5 สรุป	136
7 สรุปและข้อเสนอแนะ	138
7.1 สรุป	138
7.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต	139
รายการอ้างอิง	140
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก คุณลักษณะของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ของบริษัท ทีปเปิ้ล อี เอ็นเนอร์ยี พลัส จำกัด	145
ภาคผนวก ข ภาพเครื่องมือและการวัดอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์	154
ภาคผนวก ค บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	159
ประวัติผู้เขียน	175

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ.....	6
2.1 ผลงานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย.....	13
3.1 ลักษณะข้อมูลของอิทธิพล.....	34
3.2 ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ.....	35
5.1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์.....	68
5.2 การเปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้น.....	109
6.1 การออกแบบแผงพาราโบลิกรวมแสง.....	115
6.2 ผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี และอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสงพร้อมเปรียบเทียบ.....	126
6.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบจริง ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี.....	135
6.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบจริง ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง.....	135

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	เครื่องมือวัดความเข้มแสงอาทิตย์ไพรานอมิเตอร์.....18
3.2	การเคลื่อนที่ของรังสีตรงและรังสีกระจาย.....19
3.3	ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในแต่ละเดือน.....20
3.4	ลักษณะทั่วไปและส่วนประกอบของระบบทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์.....22
3.5	ส่วนประกอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์.....24
3.6	ปริมาตรควบคุมและทิศทางการถ่ายโอนความร้อนแบบ 3 มิติ.....27
3.7	รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 6 อิลลิเมนต์ 8 โหนด เมื่อพิจารณา อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า.....34
3.8	การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า.....35
4.1	ส่วนประกอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสีและการแบ่งอิลลิเมนต์.....46
4.2	ส่วนประกอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสงและการแบ่งอิลลิเมนต์.....48
4.3	ภาพขยายการแบ่งอิลลิเมนต์และจุดต่อของท่อทองแดง.....48
5.1	แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณอุณหภูมิ.....62
5.2	รายละเอียดและพิกัดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี.....66
5.3	รายละเอียดและพิกัดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง.....67
5.4	การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบ มีแผ่นดูดกลืนรังสี ซึ่งเป็นภาพรวมของอุปกรณ์ทั้งหมดโดยเน้นในสถานะคงตัว.....69
5.5	การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) กระจกในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงาน แสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี โดยเน้นในสถานะคงตัว.....70

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) ชั้นท่อน้ำในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี โดยเน้นในสภาวะคงตัว .....	71
5.7 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) แผ่นดูดกลืนรังสีในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี โดยเน้นในสภาวะคงตัว .....	72
5.8 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) ฟอยล์ในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี โดยเน้นในสภาวะคงตัว .....	73
5.9 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) โฟมในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี โดยเน้นในสภาวะคงตัว .....	74
5.10 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) น้ำในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี ที่แปรตามเวลา .....	87
5.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิสูงสุด ( $^{\circ}\text{C}$ ) ซึ่งเป็นน้ำขาออกที่นำไปใช้งานในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสีที่แปรตามเวลา .....	88
5.12 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) ในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง ซึ่งเป็นภาพรวมของอุปกรณ์ทั้งหมด โดยเน้นในสภาวะคงตัว .....	89
5.13 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) กระจกในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง โดยเน้นในสภาวะคงตัว .....	90
5.14 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) ชั้นท่อน้ำในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง โดยเน้นในสภาวะคงตัว .....	91
5.15 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) อากาศในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง โดยเน้นในสภาวะคงตัว .....	92
5.16 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) ฟอยล์ในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง โดยเน้นในสภาวะคงตัว .....	93
5.17 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) โฟมในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง โดยเน้นในสภาวะคงตัว .....	94

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) น้ำในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง ที่แปรตามเวลา.....	107
5.19 การกระจายตัวอุณหภูมิสูงสุด ( $^{\circ}\text{C}$ ) ซึ่งเป็นน้ำขาออกที่นำไปใช้งานในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสงที่แปรตามเวลา.....	108
6.1 อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี.....	112
6.2 อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสีพร้อมมิดิ.....	113
6.3 ส่วนประกอบของพาราโบลา.....	114
6.4 การออกแบบแผงพาราโบลิกรวมแสง.....	116
6.5 แผงพาราโบลิกรวมแสง.....	116
6.6 อุปกรณ์ทำน้ำร้อนต้นแบบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง.....	117
6.7 อุปกรณ์ทำน้ำร้อนต้นแบบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสงพร้อมมิดิ.....	118
6.8 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 1 ซึ่งเป็นรูปถ่ายทางความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อนของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี.....	119
6.9 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 1 ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี.....	120
6.10 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 1 ซึ่งเป็นรูปถ่ายทางความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อนของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง.....	120
6.11 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 1 ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง.....	121
6.12 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 2 ซึ่งเป็นรูปถ่ายทางความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อนของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี.....	122
6.13 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 2 ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี.....	122
6.14 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 2 ซึ่งเป็นรูปถ่ายทางความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อนของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง.....	123



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.15 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 2 ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัด ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง.....	123
6.16 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 3 ซึ่งเป็นรูปถ่ายทางความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อน ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี.....	124
6.17 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 3 ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัด ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี.....	125
6.18 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 3 ซึ่งเป็นรูปถ่ายทางความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อน ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง.....	125
6.19 ผลการทดสอบจริงครั้งที่ 3 ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัด ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง.....	126
6.20 ผลการจำลองและผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงาน แสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี.....	131
6.21 ผลการจำลองและผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงาน แสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง.....	134

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ทราบโดยทั่วกันว่าดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของโลก มีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในด้านแสงสว่าง ด้านไฟฟ้า และด้านความร้อน ซึ่งการนำความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้นั้นจะให้ความอบอุ่นและสามารถทำน้ำร้อนให้แก่ที่พักอาศัยหรือโรงแรมได้ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะเป็นประเทศในเขตร้อน แต่ก็พบว่าตามบ้านพักอาศัยหรือโรงแรมทั่ว ๆ ไป มีการติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนกันเป็นจำนวนมาก โดยเครื่องทำน้ำร้อนที่ได้รับความนิยมใช้ในบ้านพักอาศัย คือเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า ซึ่งถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากอุปกรณ์หนึ่ง ในงานวิจัยนี้จะเป็นการแนะนำอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (solar thermal) นอกจากนี้จะเป็นอุปกรณ์ประหยัดพลังงานแล้วยังเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จะวิเคราะห์และออกแบบพร้อมสร้างอุปกรณ์ต้นแบบโดยใช้อุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นใหม่แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

การกระจายตัวของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์นั้น ปกติแล้วจะสามารถอธิบายได้ในรูปของสมการอนุพันธ์ (differential equation) หรือสมการอินทิกรัล (integral equation) เป็นไปได้ยากที่จะหาผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate solution) ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข อีกทั้งสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้น จึงทำให้การคำนวณเชิงตัวเลขสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว สำหรับวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation : PDE) วิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและได้รับความนิยมแพร่หลายในปัจจุบันได้แก่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method : FEM) โดยเฉพาะงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งต้องอาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติในการดำเนินการ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มวิวัฒนาการมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งเป็นที่นิยมมากในงานวิจัยในปัจจุบัน เนื่องจากคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพที่สูงและมี

หน่วยเก็บความจำขนาดใหญ่ ทำให้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์สามารถคำนวณง่ายและเร็วขึ้น ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะจัดแบ่งพื้นที่ของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยที่ประกอบขึ้นจากโนด โดยเชื่อมต่อกันด้วยกริดสำหรับวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ นิยมใช้ชิ้นส่วนย่อยที่เป็นรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (linear tetrahedral) เพื่อประมาณ โดเมนของปัญหา ซึ่งข้อดีของไฟไนท์อิลลิเมนต์ก็คือ สามารถแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในขอบเขตที่ซับซ้อน นอกจากนี้ยังง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่อาจมีหลายแบบผสมกันอยู่ในระบบ เพราะฉะนั้นจึงต้องนำวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์มาใช้ในการวิจัยนี้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 พัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับคำนวณค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

1.2.2 วิเคราะห์และออกแบบระบบที่พัฒนาใหม่ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

1.2.3 สร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนต้นแบบ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้นที่สามารถทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จริงกับการจำลองผล

## 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1.3.1 แผงพาราโบลิกรวมแสงที่ผ่านการออกแบบเป็นอย่างดี ส่งผลทำให้น้ำของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้น

## 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 กำหนดให้น้ำไหลเข้าที่ตลอดเวลา

1.4.2 กำหนดให้ค่าความเข้มแสงไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

## 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 พัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์ปัญหาอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

1.5.2 วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิเป็นแบบ 3 มิติ

1.5.3 ดำเนินการคำนวณและพัฒนางานองค์ความรู้เพื่อการออกแบบระบบที่พัฒนาขึ้นใหม่ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น

1.5.4 สร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนต้นแบบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ที่ได้จากการออกแบบระบบใหม่ที่สามารถทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จริงกับการจำลองผล

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับการศึกษาการกระจายตัวอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

1.6.2 ได้โปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงในการวิเคราะห์อุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ตลอดจนสามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบการเรียนการสอนด้านอุณหภูมิ และอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้

1.6.3 ได้หลักการและแนวคิดสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

1.6.4 ได้อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบ ที่สามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นได้

## 1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท 3 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

**บทที่ 1** เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขตและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

**บทที่ 2** กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการสำรวจสืบค้น จะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

**บทที่ 3** เสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วย 4 หัวข้อหลัก ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ทฤษฎีความร้อนซึ่งประกอบด้วยความรู้ทางด้านความร้อน กลไกการถ่ายโอนความร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิ และสุดท้ายการคำนวณอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

**บทที่ 4** มีเนื้อหาว่าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ และขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เพื่อคำนวณหาค่าอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

**บทที่ 5** อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลของอุณหภูมิ พร้อมผลการจำลองและเปรียบเทียบอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้น และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

**บทที่ 6** อธิบายถึงขั้นตอนการออกแบบและสร้างพร้อมการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนต้นแบบ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และนำผลอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบจริงนั้นมาเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

**บทที่ 7** เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะพร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อ

**ภาคผนวก ก** แสดงคุณลักษณะของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ของบริษัท ทริปเปิ้ล อี เอ็นเนอร์ยี พลัส จำกัด

**ภาคผนวก ข** ภาพเครื่องมือและการวัดอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

**ภาคผนวก ค** การรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในขณะดำเนินการศึกษา



## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับคำนวณค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนต้นแบบที่พัฒนาขึ้นใหม่โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ที่สามารถทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จริงกับการจำลองผล ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัย ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ ฐานข้อมูล จาก IEEE IEE และ ScienceDirect เป็นต้น งานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อไป

#### 2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันสามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 งานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ และตารางที่ 2.2 งานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย ซึ่งจัดลำดับการเรียบเรียงจากงานที่มีผู้ได้ดำเนินการก่อนไปสู่งานที่ใหม่กว่าดังต่อไปนี้

##### 2.2.1 งานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ

งานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์จากต่างประเทศนั้น เริ่มต้นจากได้มีการค้นพบวิธีการนำเอาแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์โดยใช้ความร้อนแก่ของเหลวและเริ่มมีการทดลองผลิตน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ ในเวลาต่อมามีผู้สนใจในการทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้นจากเดิม ทำให้มีการวิจัย พัฒนา ออกแบบ และการทดสอบอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ยังมีข้อจำกัด คือ จะเป็น

ระบบที่ใช้เฉพาะที่อยู่อาศัยเท่านั้น จนเมื่อประมาณ 30 ปีที่แล้วมีการตระหนักถึงการลดลงของปิโตรเลียมจึงได้เริ่มทำการวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างแพร่หลาย

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1964	Kudret	ได้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพของแผงรับรังสี โดยใช้ Bond Material เช่น ผงถ่าน ผงอะลูมิเนียม และผงทองแดง ละเอียดใส่ลงไประหว่างแผ่นดูดกลืนรังสี ทำให้สามารถจะเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นดูดกลืนรังสีเมื่อเทียบกับแผ่นดูดกลืนรังสีที่ไม่ใช้ Bond Material
1964	Whillier	ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่า Bond Conductance ที่บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นดูดกลืนรังสีกับท่อที่มีของไหล เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการบัดกรีบริเวณรอยต่อกับการยึดท่อติดกับแผ่นดูดกลืนรังสีโดยไม่บัดกรี สรุปทางปฏิบัติอาจจะสมมุติบริเวณที่มีการบัดกรีมีค่า Bond Conductance สูงกว่าบริเวณที่ไม่บัดกรี นอกจากนี้ยังได้ทดลองหาค่า Bond Conductance เปรียบเทียบระหว่างแผ่นดูดรังสี 2 แบบ คือ แผ่นเหล็กอาบสังกะสีและแผ่นทองแดง ซึ่ง 2 แบบขึ้นรูปให้เป็นร่องแล้วใช้ลวดติดกับท่อเหล็ก
1978	Beograd	ได้ทำการทดลองหาสมรรถนะของแผงรับรังสีแบบแผ่นเรียบที่ใช้ผลิตน้ำร้อน โดยใช้ Styrocel และ Tedlar 200 วางในลักษณะต่าง ๆ บนแผ่นดูดกลืนรังสี เพื่อลดการสูญเสียความร้อนที่ด้านบนของแผ่นรับรังสีแบบแผ่นเรียบ จากการทดลองนั้นพบว่า Styrocel สามารถที่จะลดการสูญเสียความร้อนได้ดี และทำให้ประสิทธิภาพแผงรับรังสีสูงกว่า

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1978	McCluney and Merrigar	ได้ศึกษาปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และได้เสนอแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าปัญหาที่มากที่สุดคือ อุณหภูมิของน้ำไม่ได้ตามต้องการ โดยมีสาเหตุจากหลายประการ เช่น แผงรับรังสี ระบบท่อ ถังเก็บน้ำร้อน และอุปกรณ์ในการควบคุมต่าง ๆ
1980	Duffie and Beckman	ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมการพื้นฐานของการสูญเสียความร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ซึ่งเป็นสมการต้นแบบและมีการดัดแปลงให้เหมาะสมขึ้นโดย Malhotra et al ได้แก้ไขจุดบ่งพร่องของสมการ เช่น ข้อจำกัดของมุมตรง ข้อจำกัดของมุมเอียง ระยะห่างระหว่างแผ่นดูดกลืนรังสีกับแผ่นปิดโปร่งแสงด้านหน้าของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์
1981	Lenel and Mudd	ได้เสนอแนะทางเลือกในการใช้วัสดุชนิดต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และได้แสดงถึงข้อดีและข้อเสียของวัสดุเหล่านั้น นอกจากนี้ยังได้สรุปถึงอุปกรณ์ทำน้ำร้อนที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในปัจจุบันที่มีราคาสูงเพราะเกิดจากการใช้วัสดุที่แพง เช่น ทองแดง อะลูมิเนียม และเหล็ก ซึ่งสามารถลดราคาลงมาโดยใช้โพลีเมอร์แทน เช่น พีวีซี และพีวีซี-บี
1983	Arobindo	ได้ทำการทดลองหาสมรรถนะของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้แผงรับรังสีแบบแผ่นเรียบที่เพิ่มผิวโค้งรับรังสี ซึ่งพบว่าสมรรถนะของระบบจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ภาระความร้อน อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และค่ารังสีแสงอาทิตย์



ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1983	Fanney and Klein	ได้สรุปไว้ว่าสมรรถนะของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับการออกแบบและสภาพภูมิอากาศที่ตั้ง นอกจากนั้นยังได้ทำการทดลองและวิเคราะห์ถึงศักยภาพตลอดทั้งปีของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบบังคับ (forced circulation SDHW systems) โดยใช้ ASHRAE standard 95-1981
1983	Mathur and Bansal	จากการศึกษาพบว่า ปัญหาที่พบมากในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน คือการไหลย้อนกลับของน้ำร้อนจากถังเก็บไปยังแผงรับรังสีตอนกลางคืน ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนจำนวนมากกับอากาศรอบ ๆ อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์
1991	Esbensen	ได้ทำการศึกษาถึงอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้อัตราการไหลของน้ำต่ำ และใช้ถังแบบแยกชั้นน้ำร้อน โดยมีพื้นที่ของแผงรับแสงอาทิตย์ 44 m <sup>2</sup> พบว่าเมื่อใช้วิธีการนี้ จะทำให้ Thermal Performance เพิ่มขึ้นประมาณ 20%
1997	Rama, Subba, Reddy and Gorla	ได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพและค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และแบบ 2 มิติ เพื่อเปรียบเทียบผล ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และแบบ 2 มิติ จะมีประสิทธิภาพและค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกัน
1999	Omma	พัฒนาระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมสำหรับโฮมสเตย์ เพื่อลดการใช้พลังงาน มีอัตราการผลิตน้ำร้อน 250 ลิตรต่อวัน อุณหภูมิทำน้ำร้อนได้ไม่ต่ำกว่า 45 °C ระยะเวลาคืนทุน 8.16 เดือน

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2005	Joe, and Coventry	<p>ดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนแบบรางพาราโบลิก ผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนแบบรางพาราโบลิกประมาณ 58% ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าประมาณ 11% และประสิทธิภาพรวมประมาณ 69% ซึ่งรูปร่างของกระจกและช่องว่างระหว่างกระจกด้านบนของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนนั้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพทางไฟฟ้า</p>
2008	Ucar, and Inalli	<p>ได้พิจารณาถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิและความร้อนของพื้นที่กักเก็บพลังงานจากระบบผลิตน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยจะใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์ข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้คืออุณหภูมิและความร้อนของน้ำในการเก็บรักษาที่ล้อมรอบด้วยพื้นที่ทรายจะสูงกว่าพื้นดินประเภทอื่น ๆ พื้นที่กักเก็บน้ำที่เหมาะสมคือ 50 m<sup>2</sup> ซึ่งน้ำมีอุณหภูมิสูงถึง 89 °C ใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในการเขียนโปรแกรม</p>
2008	Ling, Jie, Ze, and Yu	<p>ดำเนินการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยดำเนินการเปลี่ยนชนิดของท่อทำน้ำ ซึ่งจะใช้ท่อทองแดงและท่ออะลูมิเนียม เพื่อเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิในน้ำ ผลลัพธ์ที่ได้คือน้ำในท่อทองแดงนั้นจะมีความร้อนสูงกว่าน้ำในท่ออะลูมิเนียม เนื่องจากค่าการนำความร้อนของทองแดงมีค่ามากกว่าค่าการนำความร้อนของอะลูมิเนียม ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวจะใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในการเขียนโปรแกรม</p>

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2013	Tabor, and Zeimer	ได้ศึกษาอุปกรณ์ทำความร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ผิวสะท้อนทำด้วยอะลูมิเนียมแบบทอครึ่งซีก ซึ่งซีกบนเป็นวัสดุโปร่งแสง ส่วนซีกล่างเป็นแผ่นอะลูมิเนียมสะท้อนแสง และมีตัวคูครึ่งสี่วงตลอดตามแนวยาว อุปกรณ์แบบนี้จะทำให้มีอุณหภูมิปานกลางประมาณ 60 °C
2013	Wibulswas, and Nigam	ได้พัฒนาอุปกรณ์ทำความร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งทำการเพิ่มผิวสะท้อนแสงไปในระบบ โดยใช้กระจกใส 2 ชั้น ไว้ด้านบนและด้านล่างของแผ่นคูครึ่งสี่ และใช้อะลูมิเนียมพอลิคลอไรด์บนตัวสะท้อนรังสีที่เป็นเหล็กไร้สนิมพบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบที่ใช้กระจกใส 2 ชั้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้กระจกใสชั้นเดียวจะเพิ่มมากขึ้นถึง 12.5%
2013	Russel	ได้สร้างผิวสะท้อนรังสีรูปครึ่งวงกลม โดยใช้แผ่นกระจกเงาชิ้นเล็ก ๆ หลาย ๆ ชิ้นวางตามยาวของโครงครึ่งวงกลมที่เตรียมไว้ เมื่อรังสีตกกระทบผิวสะท้อนรังสีที่ทำด้วยกระจกเงา จะทำให้เพิ่มความเข้มรังสีแสงอาทิตย์บนผิวคูครึ่งสี่มากขึ้น อุปกรณ์ชนิดนี้ตัวคูครึ่งสี่จะมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลมเพื่อให้ได้รับรังสีมากที่สุดในช่วงเวลาต่าง ๆ ซึ่งระบบนี้จัดอยู่ในระบบอุณหภูมิปานกลางประมาณ 60 °C
2014	Unbel	การวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้เอทานอล เป็นสารแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีแผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบติดตั้งแผงคอนเดนเซอร์จำนวน 4 แผง โดยใช้สารเอทานอลเป็นสารทำงานไหลเวียนภายในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับน้ำในสภาพที่เดือดกลายเป็นไอ ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2013	Marwa, and Yvan	ดำเนินการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยศึกษาอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนในแต่ละเดือน พบว่าอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนในช่วงเดือนมีนาคม เมษายน พฤษภาคม จะมีค่ามากที่สุด ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวจะใช้วิธีไฟไนท์ดิฟเฟอเรนซ์ในการเขียนโปรแกรม
2014	Ajith	พิจารณาถึงอุณหภูมิและความร้อนของน้ำภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ งานวิจัยดังกล่าวจะใช้วิธีไฟไนท์ดิฟเฟอเรนซ์ในการเขียนโปรแกรม โดยดำเนินการเปลี่ยนขนาดของท่อเป็นขนาดต่าง ๆ ผลลัพธ์ที่ได้ขนาด 20 mm. <sup>2</sup> จะมีความเหมาะสมที่สุดใน
2015	Michael , Monica, and Roland	ได้ศึกษาเกี่ยวกับแรงลมของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก โดยค่าไหลของลมจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป และนอกจากนี้ยังศึกษามุมที่แตกต่างกันเพื่อดูผลกระทบของลมที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งไหลของลมนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศ และการออกแบบรูปร่างของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้จะใช้วิธีไฟไนท์ดิฟเฟอเรนซ์ในการเขียนโปรแกรม
2016	Chuan, and Yuting	พิจารณาถึงประสิทธิภาพของอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยใช้วิธีไฟไนท์ดิฟเฟอเรนซ์ในการวิเคราะห์ ซึ่งจะวิเคราะห์อุณหภูมิของช่องระบายอากาศ แผ่น ไซ้ค้อฟ ฝาครอบกระจก และแผงฉนวนความร้อน ซึ่งอุณหภูมิของของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิโดยรอบและความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2016	Bongsong	ได้ดำเนินการจำลองอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นเอง เพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในน้ำกับอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ทั่วไป และได้ทำการทดสอบจริงโดยใช้กล้องวัดภาพความร้อนเพื่อเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนที่จำลองขึ้นและอุปกรณ์ทำน้ำร้อนที่ใช้ทั่วไป ผลลัพธ์ที่ได้คืออุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นเองมีอุณหภูมิสูงกว่าอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ทั่วไปถึง 10 °C
2016	Winnie, and Jonson	ได้วิเคราะห์และศึกษาอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยการเปลี่ยนความหนาของตัวดูดกลืนรังสี เพิ่มความหนาของกระจกและลดความหนาของท่อน้ำ เพื่อทำให้อุณหภูมิน้ำมีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คืออุณหภูมิของน้ำสูงถึง 53.4 °C ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ในการเขียนโปรแกรม
2017	Michael , Monica, and Roland	ได้วิเคราะห์เกี่ยวกับสภาพแวดล้อมของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยค่าโหลดของลมจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป และนอกจากนี้ยังศึกษาแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันเพื่อดูผลกระทบของลมที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งโหลดของลมนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ และการออกแบบรูปร่างของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

### 2.2.2 งานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

ประเทศไทยนั้นได้มีการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นเวลานานและทำอย่างกว้างขวางในหลายหน่วยงาน ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

พ.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2522	กอบสิน ทวีสิน	ได้ศึกษาเกี่ยวกับแรงลมของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา โดยค่าไหลของลมจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป และนอกจากนี้ยังศึกษามุมที่แตกต่างกันเพื่อดูผลกระทบของลมที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งไหลของลมนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศ และการออกแบบรูปร่างของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้จะใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในการเขียนโปรแกรม
2523	จุลละพงษ์ จุลละโพธิ์	ได้ศึกษาเกี่ยวกับเครื่องทำน้ำร้อนแบบแผง โดยใช้แผ่นดูดกลืนรังสีและระบบท่อ ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน เช่น ทองแดง อะลูมิเนียม เหล็ก เป็นต้น สรุปได้ว่าเครื่องทำน้ำร้อน โดยใช้แผ่นดูดกลืนรังสีและระบบท่อแบบอะลูมิเนียมนั้นให้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 35% และทำน้ำร้อนได้ 25-30 ลิตร/ชั่วโมง ที่อุณหภูมิการใช้งาน 50 °C
2523	พลทรัพย์ บุญวานิชย์	ศึกษาและวิจัยชุดรับรังสีแบบแผ่นเรียบของระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ซึ่งประกอบด้วยชุดรับรังสีแบบแผ่นทองแดง และแผ่นอะลูมิเนียม โดยใช้ท่อทองแดงขดไปมาบนแผ่นดูดรังสี เพื่อหาสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนทั้ง 2 แบบ พบว่าท่อทองแดงครีบทองแดงมีสมรรถนะสูงกว่าท่อทองแดงครีบบอะลูมิเนียม
2527	สมชัย อัครทิวา, และ ขวัญจิต วงษ์ชา	ได้ทำการทดสอบชุดรับรังสีที่มีผิวดูดรังสี ท่อทองแดงแบบเซอร์เพนไทน์ และครีบบอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ทาสีดำ โดยศึกษาต่อชุดรับรังสีแบบอนุกรมและขนาน พบว่าในการต่อแบบขนานไม่ควรต่อเกิน 6 ชุด โดยแต่ละชุดมีแผงรับรังสีต่อกัน 5 แผง แบบอนุกรม ถ้ามีการต่อชุดรับรังสีแบบขนานมากเกินไปจะทำให้การไหลของของไหลไม่สม่ำเสมอ เมื่อผ่านแผงรับรังสีในแต่ละชุด

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย (ต่อ)

พ.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2531	วาริรัตน์ ว่องงาม อนันต์	งานวิจัยนี้ได้ออกแบบตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบเพิ่มผิวสะท้อนรังสีที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา โดยใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นแผ่นคู่รังสีจำนวน 6 แผ่น ในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายสมรรถนะของตัวรับรังสีและอุปกรณ์ทำน้ำร้อน จากนั้นได้สร้างและทดสอบอุปกรณ์ทำน้ำร้อนเพื่อเปรียบเทียบผล
2553	รุ่งทิวี ผดากาล, และสุรัชย์ รคาคาร	ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้ทำการทดสอบระบบทำน้ำร้อนและผลที่ได้จากการทดสอบยังสามารถนำไปพัฒนาให้ระบบดียิ่งขึ้น โดยปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกับประสิทธิภาพของระบบ คือ อัตราการไหลของน้ำในระบบ และความเข้มแสงที่ระบบได้รับ ดังนั้นจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้เพื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลของน้ำกับความเข้มของแสงอาทิตย์ต่อประสิทธิภาพของระบบ
2554	จิรพงษ์ อินทรชิต	ได้ออกแบบและสร้างแผงผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุโพลีเมอร์ซึ่งมีราคาถูกกว่าโลหะ และมีน้ำหนักเบาไม่กัดกร่อน โดยใช้วัสดุโพลีเมอร์ คือ พีพี-อาร์ พีวีซี และพีวีซี-บี ผลลัพธ์ที่ได้คุณสมบัติของพีวีซี-บี มีอุณหภูมิสูงสุดรองมาเป็นพีวีซี และพีวีซี-บี ตามลำดับ และคำนวณด้วยโปรแกรม CFD
2554	ปริดา จันทวงษ์	งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการวิจัยโดยการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของชุดรับรังสีดวงอาทิตย์แบบที่ประกอบด้วยแผ่นทองแดงและท่อทองแดง กับแบบที่ประกอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมซึ่งทำจากอะโนไดซ์สีดำและท่อทองแดง ชุดรับรังสีทั้ง 2 แบบ จะประกอบกับถังสะสมความร้อน เป็นชุดเครื่องทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ จากการทดลองพบว่าแผ่นทองแดงมีประสิทธิภาพทางความร้อนมากกว่าชุดรับรังสีแบบแผ่นอะลูมิเนียม

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย (ต่อ)

พ.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2554	ปรีดา จันทวงษ์	งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการวิจัยโดยการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของชุดรับรังสีดวงอาทิตย์แบบที่ประกอบด้วยแผ่นทองแดงและท่อทองแดง กับแบบที่ประกอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมซึ่งทำจากอะโนไดซ์สีดำและท่อทองแดง ชุดรับรังสีทั้ง 2 แบบ จะประกอบกับถังสะสมความร้อน เป็นชุดเครื่องทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ จากการทดลองพบว่าแผ่นทองแดงมีประสิทธิภาพทางความร้อนมากกว่าชุดรับรังสีแบบแผ่นอะลูมิเนียม
2554	ศศิษา เรียมสุวรรณ	ได้เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำของระบบทำน้ำร้อนแบบใช้ปั๊มความร้อนกับใช้แผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ซึ่งวางหันไปทางทิศใต้ ทำมุม 15 องศา กับแนวระดับ ผลลัพธ์ที่ได้คือแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบนั้นจะมีอุณหภูมิน้ำสูงกว่าระบบทำน้ำร้อนแบบใช้ปั๊ม ใช้วิธีไฟไนท์คิฟเฟอร์เรนซ์ในการเขียนโปรแกรม
2554	สุคนธ์ อากุทธิ	ทำการศึกษาและวิจัยแผงรับรังสีแบบแผ่นเรียบ โดยการเพิ่มผิวโค้งรับรังสีของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ ซึ่งพัฒนาแผงรับรังสีจากแผ่นเรียบแบบธรรมดา โดยออกแบบให้รับรังสีได้ 2 ด้าน คือด้านบนโดยตรงและด้านล่างรับจากการสะท้อนของวัสดุผิวโค้งสะท้อนแสง
2559	ประวีณ ศรีเกิด	ได้ออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์และสร้างต้นแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้า และศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อน ได้แก่ ขนาด ตำแหน่งในการติดตั้ง จำนวนชั้นของแผ่นรับแสง ขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยน



ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย (ต่อ)

พ.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2560	เรวัฒน์ คำดี, อำไพศักดิ์ แหวน โคน, และพิสิษฐ์ คำสิงห์	ได้ออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องทำน้ำร้อนอย่างง่ายโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีแนวคิดที่จะมาประยุกต์ใช้กับบ้านที่ใช้สังกะสีมุงหลังคา โดยออกแบบชุดทดลองใช้ท่อทองแดงวางบนหลังคาสังกะสี ผลการทดสอบพบว่าในช่วงฤดูฝน เครื่องทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ชนิดไม่มีแผ่นกระจกปิด สามารถให้อุณหภูมิสูงถึง 45 °C และยังพบว่าระบบนี้เหมาะกับการใช้งานตามบ้านพัก
2561	พิสิษฐ์ คำสิงห์	ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของน้ำในท่อภายในแผงรับรังสีแบบไหลเวียนตามธรรมชาติ โดยอาศัยหลักการพัฒนารูปแบบใหม่ของแผงรับรังสี เช่น การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำภายในแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์
2561	กิตติพงศ์ พงษ์สิง	ได้กำหนดและสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแผ่นดูดกลืน PCM และเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแผ่นดูดกลืน PCM และเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ

### 2.3 สรุป

บทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมและงานวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากฐานข้อมูล IEEE IEE ScienceDirect และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งต่างประเทศและในประเทศ

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 บทนำ

การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนั้นว่ามีความสำคัญและเป็นประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในงานสำหรับนำไปเป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 4 หัวข้อหลัก ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ทฤษฎีความร้อน ซึ่งประกอบด้วยความรู้ทางด้านความร้อน กลไกการถ่ายโอนความร้อน และสุดท้ายระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างถึงการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อหา มีความกระชับและชัดเจนยิ่งขึ้น

#### 3.2 พลังงานแสงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นกลุ่มก๊าซร้อนรูปทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ  $1.39 \times 10^9$  เมตร และมีระยะห่างเฉลี่ยจากโลกประมาณ  $1.5 \times 10^{11}$  เมตร พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาดไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ อันจะทำให้เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม (อนุสรณ์ อินทองคุ้ม, 2556)

แสงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ เมื่อแสงอาทิตย์เดินทางมาถึงนอกชั้นบรรยากาศของโลกจะมีความเข้มแสงโดยเฉลี่ยประมาณ  $1,350 \text{ W/m}^2$  แต่ว่าจะลงมาถึงพื้นโลก พลังงานบางส่วนจะสูญเสียไปเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศต่าง ๆ ที่ห่อหุ้มโลก ปริมาณแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง จะมีปริมาณสูงสุดเมื่อพื้นที่นั้นตั้งฉากกับแสงอาทิตย์ ดังนั้นหากต้องการให้พื้นที่ใดได้รับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดต่อวัน ก็ต้องปรับพื้นที่รับแสงนั้น ๆ ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ ซึ่งจะเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตกเสมอ

##### 3.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มของแสงอาทิตย์

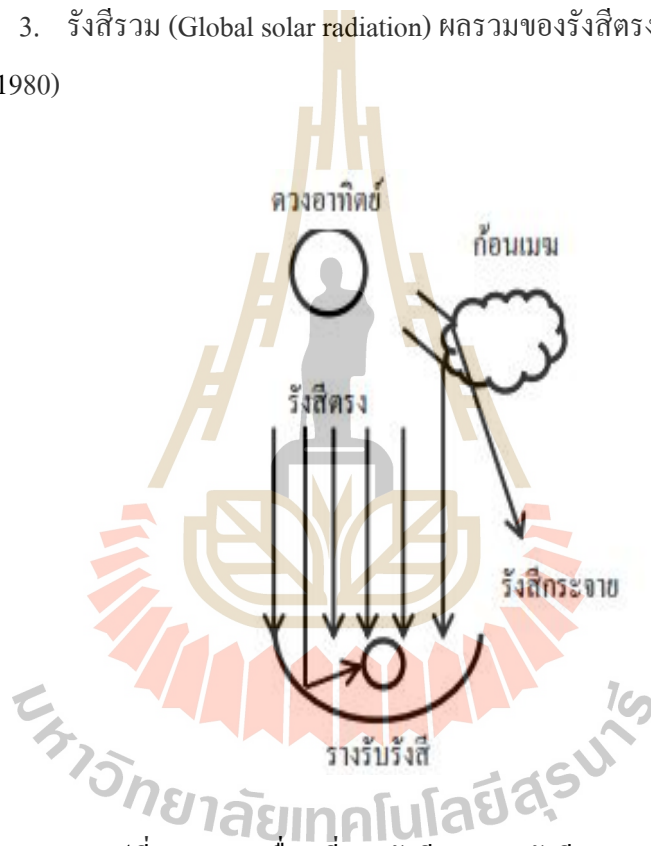
1. การสะท้อนออกสู่อวกาศเนื่องจากชั้นบรรยากาศ
2. การดูดซับโมเลกุลในชั้นบรรยากาศ เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน เป็นต้น



### 3.2.3 ชนิดของรังสีแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.2 เราสามารถแบ่งรังสีอาทิตย์ออกเป็น 3 ชนิด คือ

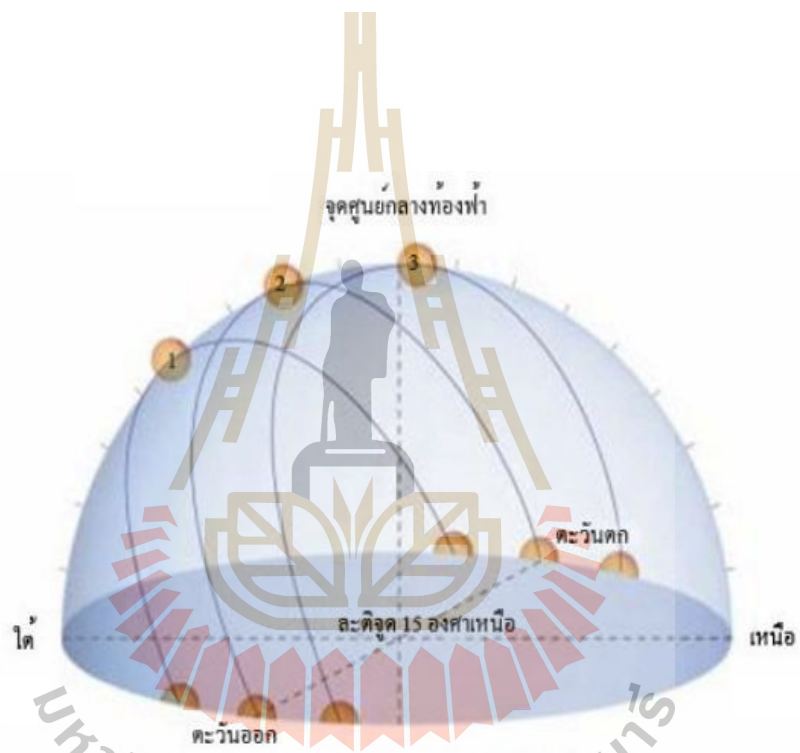
1. รังสีตรง (Direct radiation) คือรังสีที่เดินทางจากดวงอาทิตย์มายังโลกโดยไม่มี การเปลี่ยนทิศทาง
2. รังสีที่กระจาย (Diffuse radiation) รังสีแสงอาทิตย์สะท้อนบนผิวเมฆหรือพื้นผิวโลก หรือกระเจิงของโมเลกุลหรืออนุภาคในอากาศ ทำให้เกิดรังสีในทิศทาง ๆ แม้ว่าท้องฟ้า จะใสหรือไม่มีเมฆ แสงอาทิตย์ก็เกิดรังสีกระจายได้เนื่องจากโมเลกุลหรือฝุ่นใน
3. รังสีรวม (Global solar radiation) ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย (Duffie and Beckman, 1980)



รูปที่ 3.2 การเคลื่อนที่ของรังสีตรงและรังสีกระจาย

### 3.2.4 สิ่งที่มีผลต่อการผลิตน้ำร้อนของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

1. พื้นที่ของแผง แผงอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ยังมีขนาดใหญ่ จะสามารถผลิตน้ำร้อน ได้มากขึ้น
2. ความร้อนของแสงอาทิตย์ ยิ่งแสงอาทิตย์ตกลงบนแผงอุปกรณ์ทำน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์มาก จะทำให้น้ำร้อนมากขึ้น
3. ทิศทางการวางแผง ควรวางให้แผงอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์หัน ไปทางดวงอาทิตย์ จะทำให้น้ำร้อนมากขึ้น



1 = วันที่ 22 ธันวาคม , 2 = วันที่ 23 มีนาคมและวันที่ 21 กันยายน , 3 = วันที่ 22 มิถุนายน

ต่างกัน การเลือกวัสดุที่มีสมบัติเชิงแสงที่เหมาะสมมาสร้างเป็นระบบทำความร้อน ทำให้ใช้ประโยชน์ได้ในหลากหลายลักษณะ เช่น การผลิตน้ำร้อน การสร้างความอบอุ่นในอาคารบ้านเรือนในเขตหนาว กระบวนการอบแห้ง หรือการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำความร้อนเริ่มมีบันทึกเป็นหลักฐานครั้งแรกในปี ค.ศ. 1774 โดยนักเคมีชาวฝรั่งเศสชื่อ อังตวน ลาวัวซิเย (Antoine Lavoisier) ผู้ประดิษฐ์เครื่องจักรที่ใช้รวมแสงอาทิตย์เพื่อให้ความร้อนในการทดลองทางเคมี

### 3.3.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

ระบบการทำความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ต้องจัดให้มีการรับรังสีตรงที่มาจากแสงอาทิตย์ โดยการวางไว้บนหลังคาบ้านหรืออาคาร ขณะเดียวกันต้องมุมเอียงรับแสงอาทิตย์ให้ดีที่สุด ควรติดตั้งไปทางทิศใต้ทำมุมกับแสงอาทิตย์ 15 องศา

ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบประกอบด้วย แผงรับแสงอาทิตย์ ถังเก็บน้ำร้อน ระบบท่อ วาล์ว และปั๊ม ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.4 โดยแผงรับรังสีอาทิตย์จะทำหน้าที่รับรังสีจากดวงอาทิตย์ ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำหรือตัวกลางที่ไหลผ่านแผงรับรังสี โดยอาศัยเครื่องสูบน้ำ หมุนเวียน หรือการไหลโดยธรรมชาติ และเก็บสะสมพลังงานไว้ที่ถังเก็บน้ำร้อนขณะที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งโดยถ่ายเทให้กับน้ำหรือตัวกลางที่ไหลผ่าน เพื่อเก็บพลังงานไว้ที่ถังเก็บน้ำร้อน

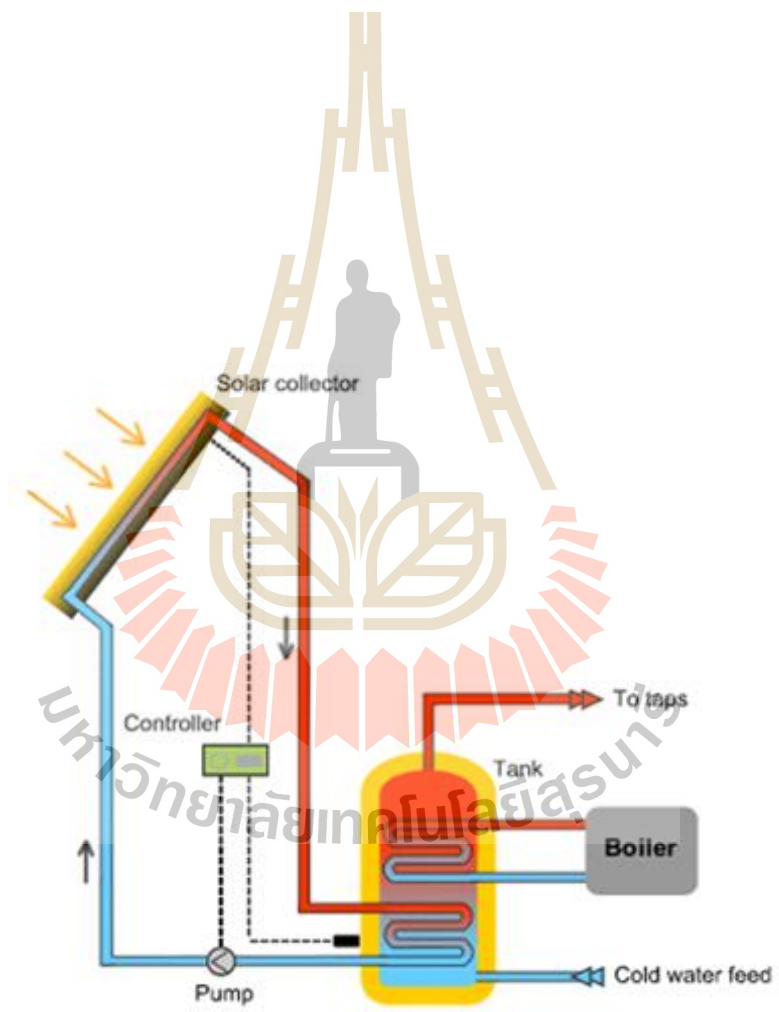
1. แผงรับแสงอาทิตย์ (solar thermal) ทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสีแสงอาทิตย์และแปลงเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ให้กับน้ำผ่านท่อทองแดง (ศศิญา เรืองสุวรรณ, 2554)

2. ถังเก็บน้ำร้อน (storage tank) ทำหน้าที่เก็บน้ำร้อนที่ผ่านมาจากแผงรับแสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยตัวถังนั้นจะมีฉนวนกันการสูญเสียความร้อน ถังน้ำร้อนนั้นสำคัญมากกับอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เพราะเป็นตัวเก็บน้ำร้อนเพื่อนำไปใช้งานได้ตามต้องการ ซึ่งถังเก็บน้ำร้อนมีหน้าที่หลักอยู่ 2 ประการ คือ

- ทำหน้าที่เก็บความร้อนไว้ใช้งาน
- ช่วยให้แผงรับแสงอาทิตย์ทำงานอย่างเต็มที่ โดยไม่ร้อนจัดจนเกินไป ซึ่ง

ถ้าร้อนเกินไปอาจทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลง

ถึงส่วนใหญ่ที่พบจะประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ คือ ตัวถังที่บรรจุน้ำอาจจะทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมหรือพลาสติก ฉนวนที่หุ้มถังทำจากใยแก้ว สังกะสีหุ้มภายนอก และชุดทำความร้อนเสริม



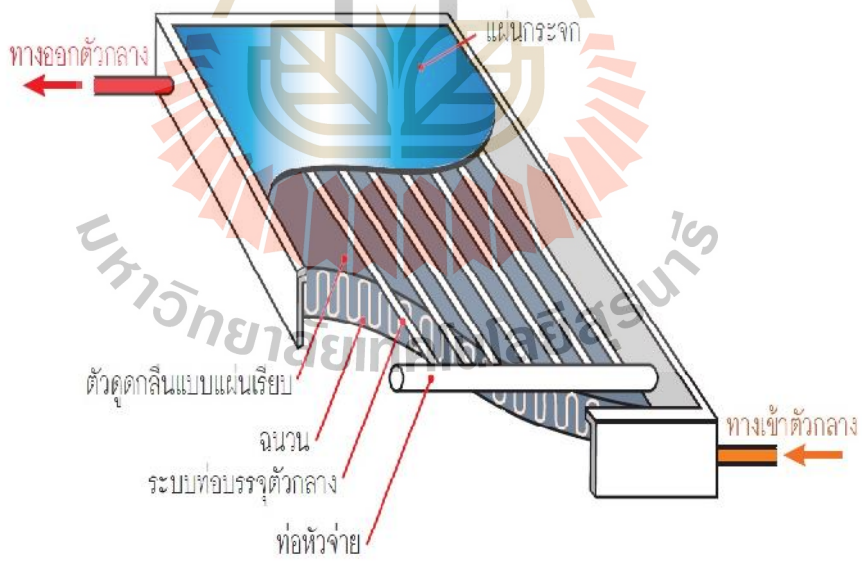
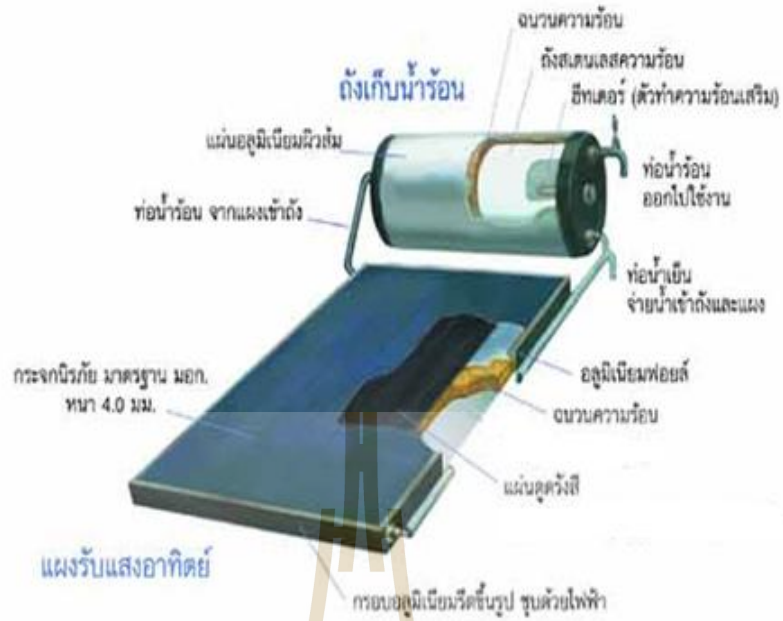
### 3.3.2 อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat plate collector)

ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์นี้มีลักษณะเป็นแผงโลหะ ประกอบด้วยตัวดูดกลืนที่เป็นแผ่นเรียบรับแสงทำด้วยอะลูมิเนียม ยังมีระบบท่อเชื่อมติดอยู่ด้านล่างหรือบนของแผ่นรับแสง ปิดทับด้วยกระจกหรือพลาสติกด้านบน แผ่นรับแสงเคลือบด้วยสารพิเศษที่มีคุณสมบัติเลือกรังสี ช่วยเพิ่มการดูดกลืนแสงอาทิตย์ทั้งจากรังสีตรงและรังสีกระจาย และลดอัตราการปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสง (emission) ตัวแผงโลหะด้านล่างและขอบทั้งสี่ด้านหุ้มด้วยฉนวนเพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากการนำความร้อน เมื่อแสงอาทิตย์ส่องเข้ามาในแผงโลหะ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดูดกลืนจะส่งผ่านให้ตัวกลางไหลอยู่ภายในท่อ เช่น น้ำหรือของเหลวชนิดอื่น โดยทั่วไปตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบสามารถนำมาใช้ผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 60-70 องศาเซลเซียส เช่น การผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ในอาคารบ้านเรือน หรือผลิตน้ำอุ่นสำหรับสระว่ายน้ำ เป็นต้น

หลักการทำงานของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบนี้ใช้หลักการทางธรรมชาติที่เรียกว่าเทอร์โมไซฟอน คือน้ำเย็นในส่วนล่างของถังเก็บน้ำจะไหลลงสู่ส่วนล่างของแผงรับแสงอาทิตย์ น้ำเย็นเหล่านี้จะได้รับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับแผง เมื่อน้ำร้อนมีอุณหภูมิสูงก็จะลอยตัวขึ้นเพราะมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำเย็น ไหลไปตามท่อทองแดงที่อยู่ในแผงไหลกลับเข้าไปสู่ถังเก็บน้ำ และลอยตัวขึ้นไปสู่ส่วนบนของถังเก็บน้ำร้อน เป็นน้ำร้อนที่พร้อมจะนำไปใช้ได้ต่อไป ซึ่งทางน้ำเข้าแผงที่เป็นน้ำเย็นควรต่ำกว่าทางน้ำออกแผงซึ่งเป็นทางน้ำร้อน และควรวางถังน้ำให้สูงกว่าแผง

ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบนี้ เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างมากในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ สามารถจำแนกได้หลายส่วน ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.5 ซึ่งแต่ละส่วนก็อาจจะทำจากวัสดุที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานดังต่อไปนี้ (ปริดา จันทวงษ์, 2542)





### 1. แผ่นกระจกหรือแผ่นปิดหน้าโปร่งแสง

วัสดุที่ใช้ทำจะต้องเป็นวัสดุโปร่งแสงมีหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนจากแผงรับรังสี ทั้งยังป้องกันฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกไม่ให้เข้าไปข้างในแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ วัสดุที่ใช้ผลิตแผ่นปิดหน้าโปร่งแสงมีหลายชนิดที่พบมากจะเป็นกระจกหรือพลาสติก ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการใช้งาน ราคา ประสิทธิภาพ หรือชนิดของแผ่นดูดกลืนรังสี ซึ่งกระจกทนต่ออุณหภูมิสูงกว่า ส่วนพลาสติกจะมีอายุการใช้งานที่สั้น เนื่องจากเมื่อใช้เป็นเวลานานแผ่นพลาสติกจะสูญเสียความโปร่งใส ทำให้ประสิทธิภาพลดลง แต่เมื่อพิจารณาด้านราคาพบว่าพลาสติกจะมีราคาถูกกว่ากระจกมาก ในปัจจุบันมีการนำกระจกนิรภัยมาใช้ในการผลิตแผ่นปิดหน้าโปร่งแสง เพราะมีความทนทาน เกิดการแตกร้าวยาก และไม่เปราะอันตรายเป็นเวลาแตก ซึ่งราคาก็จะสูงตามไปด้วย

### 2. แผ่นดูดกลืนรังสี (Absorber)

แผ่นดูดกลืนรังสีแบบแผ่นเรียบเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดที่สำคัญที่สุดในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ทำหน้าที่ในการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนไปสู่ของไหล เพื่อนำความร้อนที่ได้ไปใช้ทำน้ำร้อน ดังนั้นประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะทางที่ของไหลทำงานไหลผ่าน และการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการทำแผ่นดูดกลืนรังสี วัสดุที่ใช้ทำแผ่นดูดกลืนรังสีจะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี เช่น ทองแดง อะลูมิเนียม เหล็ก สแตนเลส ยางมะตอย วัสดุที่ใช้ทำจะถูกทาหรือเคลือบผิวด้วยสารต่างๆ เพื่อให้ดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ได้ดีขึ้น

ตัวดูดกลืนแบบแผ่นเรียบ เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับการค้นคว้า และพัฒนามากที่สุดในระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้ได้ดูดกลืนแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันสามารถผลิตตัวดูดกลืนแบบแผ่นเรียบที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงได้สูงถึง 90-98%

### 3. ระบบท่อบรรจุตัวกลาง

ส่วนใหญ่ท่อที่ใช้ในแผงรับรังสีแสงอาทิตย์จะใช้ ท่อทองแดง ท่อเหล็กอบสังกะสี หรือท่อเหล็กไร้สนิม เพราะจะทนต่ออุณหภูมิที่สูงของน้ำร้อน ทนต่อการกัดกร่อน สนิม และทนทานไม่ฉีกขาดง่าย วัสดุที่นิยมที่สุด คือ ทองแดง เนื่องจากมีคุณสมบัติในการนำความร้อนได้ดี สำหรับการติดตั้งท่อของไหลทำงานภายในแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ทำได้หลายรูปแบบ เช่น การเชื่อมท่อเข้ากับท่อรับน้ำ การทำลอนลึก

สำหรับวางท่อบนโลหะแผ่นราบ การใช้ทองแดงรีดขึ้นรูป สำหรับวัสดุอื่น ๆ เช่น พลาสติกหรือยางนั้นไม่นิยมนำมาใช้ เนื่องจากไม่ทนต่ออุณหภูมิสูง

#### 4. ฉนวนความร้อน (Insulation)

มีการใช้ฉนวนใยแก้ว โพลียูรีเทน หรือโฟม ในการทำฉนวนกันความร้อนภายในแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งใช้บุภายใต้แผ่นดูดกลืนรังสีและรอบ ๆ ก่อของแผงรับรังสี วัสดุที่ใช้จะเป็นฉนวนใยแก้ว โพลียูรีเทน หรือโฟม พร้อมด้วยฟอยล์ ซึ่งมีข้อดี คือกั้นการสูญเสียความร้อน สามารถทนอุณหภูมิได้นานและสูง แต่มีข้อเสียที่พบมากเช่นกัน คือ จะมีคุณสมบัติดูดความชื้น ซึ่งเมื่อมีหยดน้ำเกิดขึ้นภายในแผงรับรังสี จะทำให้ฉนวนใยแก้วเสื่อมสภาพการเป็นฉนวนเร็วขึ้น ยังมีวัสดุอีกประเภทหนึ่งที่ใช้ทำฉนวนได้ดีในแผงรับรังสี คือโพลียูรีเทน มีข้อดีคือ ไม่ดูดซึมน้ำ น้ำหนักเบา จึงเริ่มนิยมใช้กันมากขึ้น

#### 5. กรอบแผงรับรังสี

กรอบแผงรับรังสีนี้เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญเช่นเดียวกับอุปกรณ์อื่น ๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วัสดุประเภทอะลูมิเนียมรีดขึ้นรูป ชุบด้วยไฟฟ้าสีชาทอง ให้ความคงทนและสวยงามแต่อาจใช้วัสดุอื่น ๆ ได้ เช่น พลาสติกประเภท PVC หรือ โพลีโพรไพลีน แต่ปัจจัยที่ใช้เลือกวัสดุที่ทำกล่องแผงรับรังสี คือราคาของวัสดุ การเสื่อมสภาพของกล่องแผงรับรังสี การเกิดสนิม หรือการผุกร่อนของรอยเชื่อมต่าง ๆ ดังนั้นถ้าต้องการกล่องแผงรับรังสีที่มีราคาถูกอาจจะใช้พลาสติกที่กล่าวมาแล้ว แต่ต้องเลือกชนิดที่มีความทนทานและทนต่ออุณหภูมิสูง

#### 6. สารที่ใช้กันรั่วในแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

สารที่ใช้กันรั่วในแผงรับรังสีนี้ใช้เพื่อป้องกันการรั่วซึมในส่วนต่าง ๆ เช่น ระหว่างแผ่นปิดหน้าโปร่งแสงกับกล่องแผงรับรังสี ซึ่งวัสดุส่วนใหญ่จะเป็นซิลิโคน มีคุณสมบัติทนความร้อนสูง มีความยืดหยุ่นดี ทนต่อสภาพแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศ

### 3.5 ทฤษฎีความร้อน

#### 3.5.1 ความร้อน

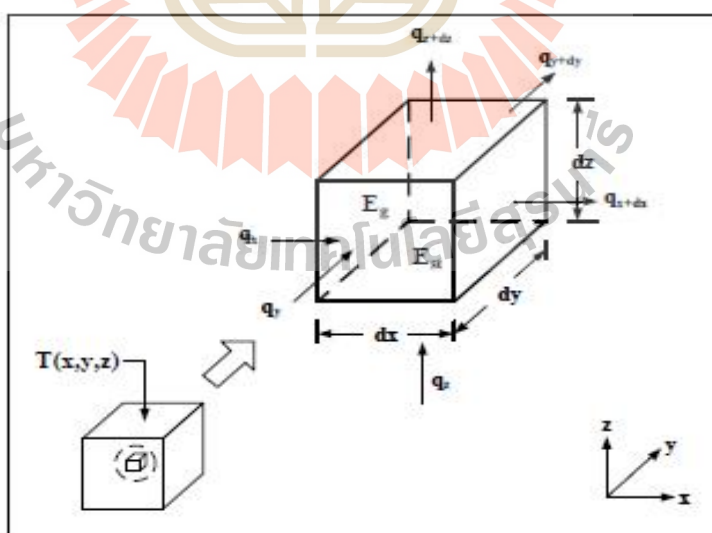
แนวคิดของกฎข้อที่หนึ่งนั้นเกี่ยวข้องกับกฎของการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) ซึ่งกล่าวว่า "ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ นั้น พลังงานจะไม่ถูก

สร้างขึ้นมาใหม่และไม่มีการสูญหายไป แต่สามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปอื่นได้” ดังนั้นเมื่อพิจารณาการถ่ายโอนพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม จะพบว่าพลังงานรวมของระบบกับสิ่งแวดล้อมจะมีค่าคงที่ เช่น ในกระบวนการที่ระบบได้รับพลังงานจากสิ่งแวดล้อม ปริมาณพลังงานที่ระบบได้รับจะเท่ากับปริมาณพลังงานที่ระบบสูญเสีย ซึ่งสามารถแสดงการถ่ายโอนพลังงานของระบบใด ๆ (สมชัย 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

ในการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนต้องกำหนดปริมาตรควบคุม (Control volume) เพื่อสร้างขอบเขตของสมมติฐานในการศึกษา ดังแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.6 (สุกัญญา, 2555)



รูปที่ 3.6 ปริมาตรควบคุมและทิศทางการถ่ายโอนความร้อนแบบ 3 มิติ

จากการกำหนดปริมาณความร้อนในรูปแบบ 3 มิติ พลังงานที่เข้าสู่ระบบจะได้ ดังนี้

$$E_{in} = q_x + q_y + q_z \quad (3-2)$$

พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ระบบ  $q_x$   $q_y$  และ  $q_z$  ขึ้นอยู่กับความชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ตามกฎของฟูริเยร์ (Fourier's law) ดังนี้

$$q_x = -k_x dydz \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3-3)$$

$$q_y = -k_y dxdz \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3-4)$$

$$q_z = -k_z dxdy \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3-5)$$

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)

$$E_{in} = -k_x dydz \frac{\partial T}{\partial x} - k_y dxdz \frac{\partial T}{\partial y} - k_z dxdy \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3-6)$$

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  $dz$  โดยอาศัยการกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์จะได้ ดังนี้

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (3-8)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (3-9)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (3-10)$$

ดังนั้น แทนสมการที่ (3-8) (3-9) และ (3-10) ลงในสมการที่ (3-7) จะได้

$$E_{out} = \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) + \left( q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) + \left( q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) \quad (3-11)$$

ส่วนพลังงานก่อกำเนิดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการส่งถ่ายพลังงานเข้าไปในระบบ แล้วปลดปล่อยพลังงานในรูปของพลังงานเคมี พลังงานไฟฟ้า พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น สามารถแสดงในรูปสมการภายใต้ปริมาตรควบคุมที่ศึกษาในรูปแบบ 3 มิติได้ดังนี้

$$E_g = Q dx dy dz \quad (3-12)$$

เมื่อ  $Q$  คือ ปริมาณความร้อนที่ผลิตเอง (Internal heat generation)

และพลังงานที่สะสมในระบบเป็นการสะสมพลังงานในรูปต่าง 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 ... คือ ความหนาแน่นมวล (Mass density)

$c$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity)

$t$  คือ เวลา (Time)

ดังนั้น แทนสมการที่ (3-6) (3-11) (3-12) และ (3-13) ลงในสมการที่ (3-7) 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

$$k_x \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + Q = \dots c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3-16)$$

### 3.5.2 กลไกการถ่ายโอนความร้อน

กลไกการถ่ายโอนความร้อนเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการคำนวณค่าอุณหภูมิ เป็นการถ่ายโอนพลังงานจากระบบที่มีการเชื่อมกันไปยังอุณหภูมิต่าง ๆ กันไป ขึ้นกับสภาวะแวดล้อม อาจเกิดขึ้นพร้อมกันหรือเกิดเฉพาะกลไกใดกลไกหนึ่งก็ได้ กลไกการถ่ายโอนความร้อนมี 3 แบบ คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) (สมชัย อัครทิวา และ บัญญัติ วงษ์ชาติ, 2545)

#### 1. การนำความร้อน

การนำความร้อนปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ สมการที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณการนำความร้อนถูกเสนอขึ้นปี ค.ศ. 1822 โดยนักวิทยาศาสตร์ฝรั่งเศสชื่อ โจเซฟ ฟูเรียร์ (Joseph Fourier) โดยรูปสมการดังนี้

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3-17)$$

เมื่อ  $\dot{Q}_{cond}$  คือ อัตราการนำความร้อน  
 $A$  คือ พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน

## 2. การพาความร้อน

การพาความร้อนเป็นการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวของของแข็งกับของไหลที่มีการเคลื่อนที่ หรือกล่าวได้ว่าเป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของพลังงาน จากแหล่งอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ โดยที่โมเลกุลตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปด้วย ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของลมที่ผ่านหน้าขดลวดความร้อน ลมดังกล่าวก็จะมีอุณหภูมิสูงตามไปด้วย ซึ่งการพาความร้อนมี 2 แบบ คือ การพาความร้อนอย่างไม่อิสระ (Forced convection) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า เช่น การใช้พัดลมเป่าอากาศให้เกิดการเคลื่อนที่ผ่านถ้วยกาแฟร้อน เป็นต้น และการพาความร้อนอย่างอิสระ (Free convection) เกิดขึ้นเมื่อของไหลเกิดการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงลอยตัว ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหลในบริเวณใกล้กับของแข็ง อันเป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหล โดยความร้อนจากถ้วยกาแฟจะทำให้อากาศมีความหนาแน่นต่ำลง (เบา) จึงเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน ขณะเดียวกันอากาศที่เย็นกว่า มีความหนาแน่นสูงกว่าจะเคลื่อนที่มาแทนที่

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

$T_\infty$  คือ อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุ



### 3. การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ความร้อนจะเคลื่อนที่ไปในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และจะเกิดขึ้นได้ดีในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ เมื่อพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนระหว่างวัตถุใด ๆ จะสามารถคำนวณการแผ่รังสีความร้อนได้ ดังนี้

$$\dot{Q}_{rad} = v_e t_s (T_s^4 - T_{\infty}^4) \quad (3-19)$$

เมื่อ  $v_e$  คือ ค่าสภาพเปล่งรังสี (Emissivity)

$t_s$  คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ

$$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

### 3.6 วิธีไฟในท้อลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

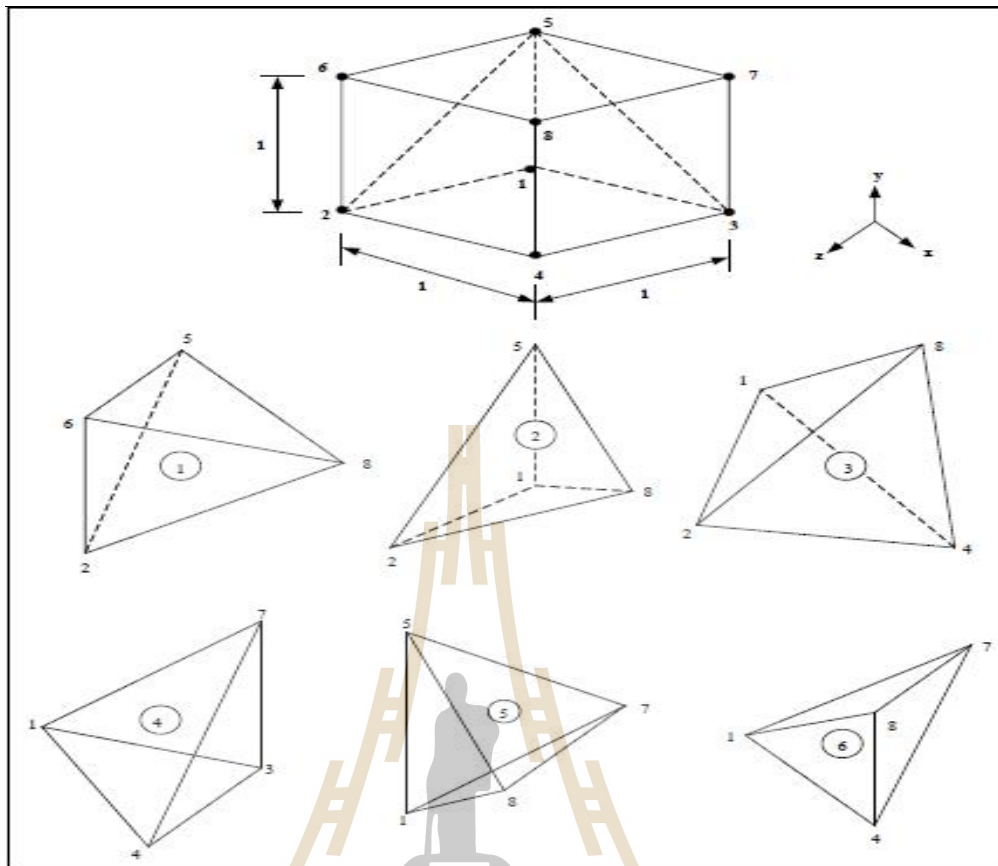
ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัล ในกรณีที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ส่วนใหญ่แล้วมักจะต้องหาผลเฉลยด้วยวิธีประมาณ เนื่องจากความซับซ้อนของสมการ วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี วิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม โดยแบ่งวัตถุของปัญหาที่สนใจออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยม ซึ่งตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่าง ๆ และขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่รู้ค่าจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เอง หากใช้ขนาดตารางสี่เหลี่ยมให้มีขนาดเล็กลงซึ่งหมายถึงต้องเพิ่มจำนวนตารางสี่เหลี่ยมให้มากขึ้นจะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของวัตถุดังกล่าวได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนสมการผลต่างสี่เหลี่ยมมากขึ้นด้วย และกระบวนการในการแก้ปัญหาก็เป็นต้องการหน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้นรวมถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะสูงมากขึ้นตามไปด้วย ข้อดีของวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมคือ เป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและการทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหานั้น ๆ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมมีหลายประการ เช่น ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับวัตถุซึ่งมีรูปร่างลักษณะซับซ้อน อย่างเช่น โครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณอีกวิธีหนึ่งที่เรียกว่า วิธีไฟไนท์

อิลลิเมนต์ ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใด ๆ ก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงกว่า

ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ แล้วสร้างสมการของแต่ละอิลลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และอิลลิเมนต์ต่าง ๆ จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อซึ่งเป็นตำแหน่งที่คำนวณหาค่าผลเฉลย สำหรับระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการคำนวณแบบ 3 มิติ

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ คือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลาย ๆ ส่วนที่เรียกว่าอิลลิเมนต์ โดยที่การกระจัด และแรงภายในแต่ละอิลลิเมนต์ ณ จุดที่อิลลิเมนต์ต่อโงกันจะต้องเข้ากันได้และสมดุล ซึ่งอิลลิเมนต์ต่าง ๆ นี้ จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของแต่ละงานว่าต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากเท่าใด ซึ่งถ้าพิจารณาแบบ 3 มิติอาจอยู่ในรูปลักษณะของรูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) รูปทรงหกหน้า (hexahedron) รูปทรงแปดหน้า (octahedron) หรือ รูปทรงพีรามิด (pyramids) ก็ได้ ซึ่งในที่นี้จะใช้อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีจำนวน โหนดหรือจุดเชื่อมต่อที่น้อยที่สุด อีกทั้งรูปทรงสี่หน้านี้สามารถประกอบกันได้เป็นรูปทรงอื่น ๆ ที่กล่าวมาได้ง่าย โดยค่าผลเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนนับที่จะคำนวณออกมานั้นจะมีความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาด และจำนวนอิลลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา นั้น ซึ่งขั้นตอน โดยทั่วไปของวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 6 ขั้นตอน (ปราโมทย์ เศษอำไพ, 2542)

1. แบ่งอิลลิเมนต์ย่อยให้กับระบบ แบ่งขอบเขตรูปร่างของระบบปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อย ๆ โดยแต่ละอิลลิเมนต์จะมีความเป็นปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นรูปแสดงการแบ่งอิลลิเมนต์ของรูปร่างปัญหาแบบ 3 มิติ (ระนาบ  $xyz$ ) โดยใช้อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) และเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างโปรแกรมการคำนวณสำหรับการป้อนข้อมูลของทุก ๆ อิลลิเมนต์ จึงขอยกตัวอย่างรูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วยอิลลิเมนต์ รูปทรงสี่หน้าทั้งหมด 6 อิลลิเมนต์ 8 โหนด ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ต้องการ คือ หมายเลขของอิลลิเมนต์และหมายเลขของโหนด พร้อมทั้งค่าพิคัดของแต่ละโหนด ซึ่งสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ (ปราโมทย์ เศษอำไพ, 2542)



รูปที่ 3.7 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 6 อิลลิเมนต์ 8 จุดต่อ  
เมื่อพิจารณาอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

ตารางที่ 3.1 ลักษณะข้อมูลของอิลลิเมนต์

หมายเลข อิลลิเมนต์	หมายเลขจุดต่อ			
	จุดต่อ $i$	จุดต่อ $j$	จุดต่อ $k$	จุดต่อ $l$
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

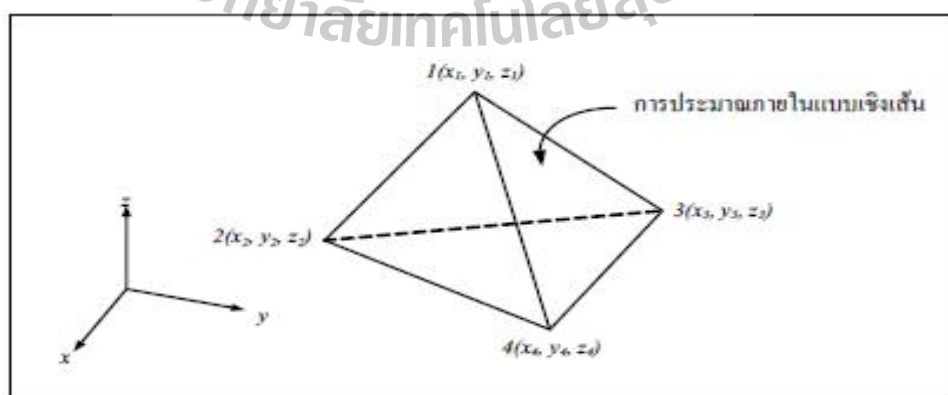
ตารางที่ 3.2 ลักษณะข้อมูลของตำแหน่งจุดต่อ

หมายเลขจุดต่อ	พิกัดแกน $x$	พิกัดแกน $y$	พิกัดแกน $z$
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

2. เลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ อย่างในกรณีอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าจะประกอบด้วย 4 จุดต่อที่มีตัวห้อย 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งเป็นการประมาณค่าภายในอิลลิเมนต์แบบเชิงเส้นดังแสดงในรูป 3.7 ตำแหน่งของจุดต่อ  $(x_n, y_n, z_n)$  เมื่อ  $n = 1, 2, 3$  และ 4 เป็นตำแหน่งของตัวที่ไม่ทราบค่า  $u_n$  โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลลิเมนต์  $u_e(x, y, z)$  เป็นแบบเชิงเส้น ดังนี้

$$u_e = r + sx + xy + \}z \quad (3-20)$$

โดยที่  $r$   $s$   $x$  และ  $\}$  เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จากจุดต่อทั้งสี่ดังนี้



รูปที่ 3.8 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

$$u_e(x_1, y_1, z_1) = \Gamma + Sx_1 + \lambda y_1 + \mu z_1$$

$$u_e(x_2, y_2, z_2) = \Gamma + Sx_2 + \lambda y_2 + \mu z_2$$

$$u_e(x_3, y_3, z_3) = \Gamma + Sx_3 + \lambda y_3 + \mu z_3$$

$$u_e(x_4, y_4, z_4) = \Gamma + Sx_4 + \lambda y_4 + \mu z_4$$

นำค่า  $\Gamma$ ,  $S$ ,  $\lambda$  และ  $\mu$  ที่ได้จากการแก้สมการทั้งสี่ข้างต้น แทนค่ากลับไปในสมการที่ (3-39) จะได้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลลิเมนต์เป็น

$$u_e(x, y, z) = u_1 N_1 + u_2 N_2 + u_3 N_3 + u_4 N_4 \quad (3-21)$$

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  $V$  คือปริมาตรของแต่ละอิลลิเมนต์ หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$6V = \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

ความแม่นยำของผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมา มี ความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำของปัญหามากน้อยเพียงใดด้วย

3. สร้างสมการของอิลลิเมนต์ (Element formulation) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ ของปัญหา ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญของวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ อย่างเช่นกรณีสมการ ของอิลลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมที่ได้ออกมาเป็นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.14 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 เมทริกซ์ตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ และตัวห้อย  $e$  แสดงให้ทราบว่าเมทริกซ์ระดับอิลลิเมนต์ ซึ่งสมการของอิลลิเมนต์ดังกล่าว จำเป็นต้องถูกสร้าง

ขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ การสร้างสมการของอิลลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (3-43) สามารถทำได้โดย

- วิธีการโดยตรง (Direct approach) วิธีนี้สามารถใช้ได้เฉพาะกับปัญหาที่เข้าใจได้ง่าย ๆ อย่างเช่น ปัญหาต่าง ๆ ในรูปทรง 1 มิติ เท่านั้น ซึ่งไม่สามารถขยายเปลี่ยนแปลงเพื่อนำไปใช้กับปัญหาใน 2 หรือ 3 มิติโดยทั่วไปได้

- วิธีการแปรผัน (Variational approach) หลักการสำคัญของวิธีการนี้คือ จำเป็นจะต้องทำการหาหรือสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นแล้ว จะเป็นผลให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่กำลังสนใจอยู่ อย่างไรก็ตามวิธีการแปรผันเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในช่วงต้น ๆ ของการพัฒนาวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องทางด้านโครงสร้าง และยังมีจุดอ่อนอีกคือ จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ ซึ่งปัญหาหลาย ๆ ชนิดในทางปฏิบัติสามารถสร้างสมการอนุพันธ์ขึ้นมาได้ แต่ไม่สามารถหาฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกันนั้นได้

- วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals) วิธีนี้จะใช้วิธีการสร้างสมการไฟไนต์อิลลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์อิลลิเมนต์สำหรับปัญหาโดยทั่วไป และถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่างๆในปัจจุบัน

4. นำสมการของแต่ละอิลลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน (Assembly) เป็นสมการรวมของระบบจากขั้นตอนที่ 1 หากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย  $n$  จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น  $n$  สมการ โดยแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times n)} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} \quad (3-25)$$

หรือเขียนโดยย่อได้ดังนี้  $[K]_{\text{sys}} [A]_{\text{sys}} = [f]_{\text{sys}}$  จากสมการที่ (3-44) เมทริกซ์  $[K]_{\text{sys}}$  จะมีคุณสมบัติของความเป็นเมทริกซ์สมมาตร กล่าวคือ  $[K]_{\text{sys}} = [K]_{\text{sys}}^T$  และมีคุณสมบัติของการจับกลุ่ม

กันของค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์บริเวณแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นแถบ (Banded matrix) จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางปฏิบัติที่จำเป็นต้องใช้จำนวนโหนดเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะก่อให้เกิดผลเฉลยที่เที่ยงตรง โดยสามารถพัฒนาให้เก็บเฉพาะค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ไว้ในหน่วยความจำเพื่อใช้ในการคำนวณเท่านั้น

การนำสมการย่อยของแต่ละอิเลลิเมนต์มาประกอบกันเข้าเป็นสมการรวมของระบบ จำเป็นต้องมีหลักการซึ่งหลักการที่จะกล่าวนี้เป็นหลักการที่ง่าย สามารถทำได้โดยสะดวก เหมาะกับรูปร่างของปัญหาที่มีอิเลลิเมนต์ย่อยจำนวนมาก ๆ และหลักการนี้จะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมด้วย โดยสามารถทำความเข้าใจได้จากตัวอย่างรูปร่างของปัญหาดังรูปที่ 3.14 กล่าวคือจะทำการสร้างสมการรวมของระบบซึ่งประกอบด้วย 6 อิเลลิเมนต์ 8 โหนด โดยจะแสดงการรวมของเมทริกซ์  $[K]_{sys}$  เพื่อเป็นตัวอย่าง

วิธีการนี้ทำได้โดยเขียนสมการของอิเลลิเมนต์ต่าง ๆ พร้อมทั้งกำกับหมายเลขของโหนดทางแฉกบนและแฉกตั้งของแต่ละอิเลลิเมนต์ให้ถูกต้อง โดยจากรูปที่ 3.14  $[K]_e$  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

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

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



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

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

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

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

เมื่อมีหมายเลขกำกับทั้งทางแฉกนอนและแฉกตั้งกำกับสัมประสิทธิ์ทุกตัวของเมทริกซ์ของทุกอิลลิเมนต์แล้ว จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาใส่ลงในเมทริกซ์ระบบรวม  $[K]_{sys}$  เช่น ค่าสัมประสิทธิ์  $b_3$  ซึ่งอยู่ในแฉกนอนที่ 5 แฉกตั้งที่ 8 ของอิลลิเมนต์ย่อยที่ 1 จะไปปรากฏอยู่ในแฉกนอนที่ 5 แฉกตั้งที่ 8 ของเมทริกซ์ระบบรวมดังแสดงในสมการ เป็นต้น

$$[K]_{\text{sys}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} & (1) & (2) & (3) & (4) & (5) & (6) & (7) & (8) \\ (1) & e_1+i_1+m_1+q_1+u_1 & f_1+j_1 & n_1 & k_1+o_1+w_1 & h_1+t_1 & 0 & p_1+r_1+x_1 & g_1+l_1+s_1+v_1 \\ (2) & c_2+i_2 & a_1+f_2+j_2 & 0 & k_2 & c_1+h_2 & d_1 & 0 & b_1+g_2+l_2 \\ (3) & m_2 & 0 & n_2 & o_2 & 0 & 0 & p_2 & 0 \\ (4) & i_3+m_3+u_3 & j_3 & n_3 & k_3+o_3+w_3 & 0 & 0 & p_3+x_3 & l_3+v_3 \\ (5) & e_4+q_4 & a_3+f_4 & 0 & 0 & c_3+h_4+t_4 & d_3 & r_4 & b_3+g_4+s_4 \\ (6) & 0 & a_4 & 0 & 0 & c_4 & d_4 & 0 & b_4 \\ (7) & m_4+q_4+u_4 & 0 & n_4 & o_4+w_4 & t_2 & 0 & p_4+r_5+x_4 & s_5+v_4 \\ (8) & c_3+i_4+q_3+u_2 & a_2+f_3+j_4 & 0 & k_4+w_2 & c_2+h_3+t_3 & d_2 & r_5+x_2 & b_2+g_3+l_4+s_5+v_2 \end{array} \end{array}$$

5. ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ที่สอดคล้องกับปัญหาในสมการรวมของระบบเพื่อหาค่าผลเฉลย โดยการแก้สมการรวมของระบบเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่โหนด

6. คำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการต่อไป เมื่อทราบค่าผลลัพธ์ที่โหนดต่าง ๆ แล้ว สามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์นี้ต่อไปได้

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอน จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีส่วนที่สำคัญที่สุดคือการสร้างสมการของเอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3 ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนด และในขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะนำไปพัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณต่อไป

### 3.7 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อันได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และทฤษฎีความร้อนซึ่งประกอบด้วยความรู้ทางด้านความร้อน กลไกการถ่ายโอนความร้อน และสุดท้ายระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่อธิบายถึงขั้นตอนต่างๆ ในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยได้กล่าวเฉพาะส่วนที่จะนำมาใช้หรือส่วนที่จะถูกกล่าวอ้างถึงในบทต่อไป ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้ดำเนินงานวิจัย

## บทที่ 4

### การคำนวณอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ

#### 4.1 บทนำ

ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหาสมการอนุพันธ์ย่อยที่สามารถหาผลเฉลยของปัญหาที่ซับซ้อนและจำลองรูปแบบลักษณะได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ซึ่งผลเฉลยที่ได้สามารถนำไปคำนวณปัญหาในด้านอื่นต่อเนื่องกันได้อีกด้วย ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และขั้นตอนการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อใช้ในการคำนวณอุณหภูมิที่กระจายตัวในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

#### 4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

จากบทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้กล่าวถึงทฤษฎีของความร้อน โดยการถ่ายเทความร้อนจะแสดงอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวของอุณหภูมิ สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบ 3 มิติจะแสดงสมการที่ (4-1) (Huebner, Dewhirst, Smith, and Byrom, 2001)

$$k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} - \dots c \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \dots c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4-1)$$

โดยที่	$T$	คือ	อุณหภูมิ (Temperature)
	$k$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity)
	$c$	คือ	ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)
	$\dots$	คือ	ความหนาแน่นมวล (Mass density)

$Q$	คือ	ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เอง (Internal heat generation)
$u$	คือ	ความเร็วในทิศทาง $x$
$v$	คือ	ความเร็วในทิศทาง $y$
$w$	คือ	ความเร็วในทิศทาง $z$

โดยสมการจะปรากฏอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง ซึ่งปัญหาการถ่ายเทความร้อนนี้เป็นแบบเชิงเส้นในสถานะชั่วคราว (Linear transient heat transfer problem) ซึ่งต้องใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติมาช่วยในการคำนวณ

### 4.3 การคำนวณอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น การคำนวณอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์มีความซับซ้อน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการแก้ปัญหา และจะประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินการต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (สุกัญญา ทัพศรี, 2555)

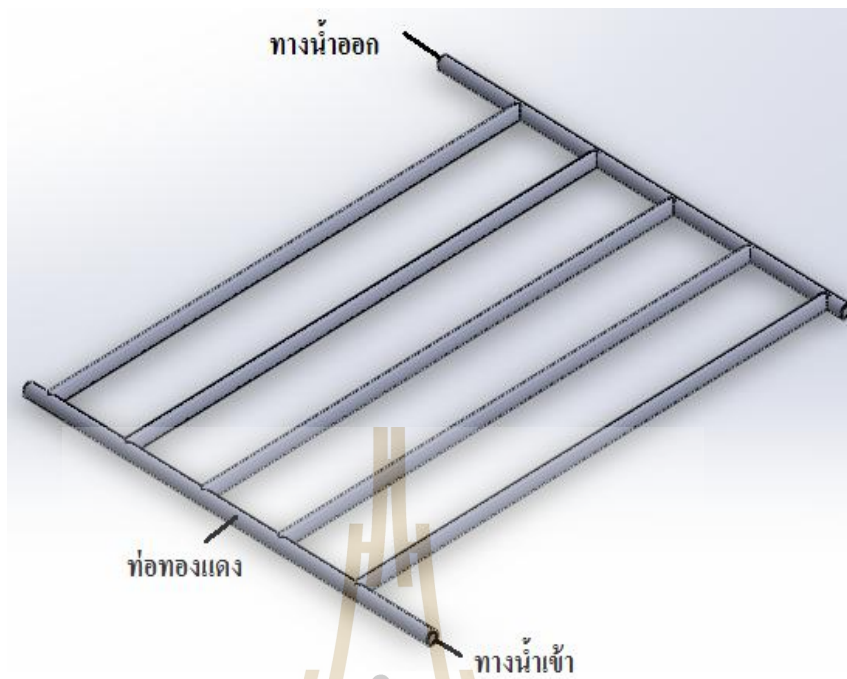
#### 4.3.1 การออกแบบเอลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลาย ๆ ส่วนที่เรียกว่าเอลิเมนต์ โดยที่การกระจัดและแรงภายในแต่ละเอลิเมนต์ ณ จุดที่เอลิเมนต์ต่อโงกันจะต้องเข้ากันได้และสมดุล ซึ่งเอลิเมนต์ต่าง ๆ นี้ จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของแต่ละงานว่าต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากเท่าใด ซึ่งถ้าพิจารณาแบบ 3 มิติอาจอยู่ในรูปลักษณะของรูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) รูปทรงหกหน้า (hexahedron) รูปทรงแปดหน้า (prisms) หรือ รูปทรงพีรามิด (pyramids) ก็ได้ ซึ่งในที่นี้จะใช้เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีจำนวนโนดหรือจุดเชื่อมต่อที่น้อยที่สุด อีกทั้งรูปทรงสี่หน้าสามารถประกอบกันได้เป็นรูปทรงอื่น ๆ ที่กล่าวมาได้เป็นอย่างดี โดยค่าผลเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนนับที่จะคำนวณออกมานั้นจะมีความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาด และจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2542)

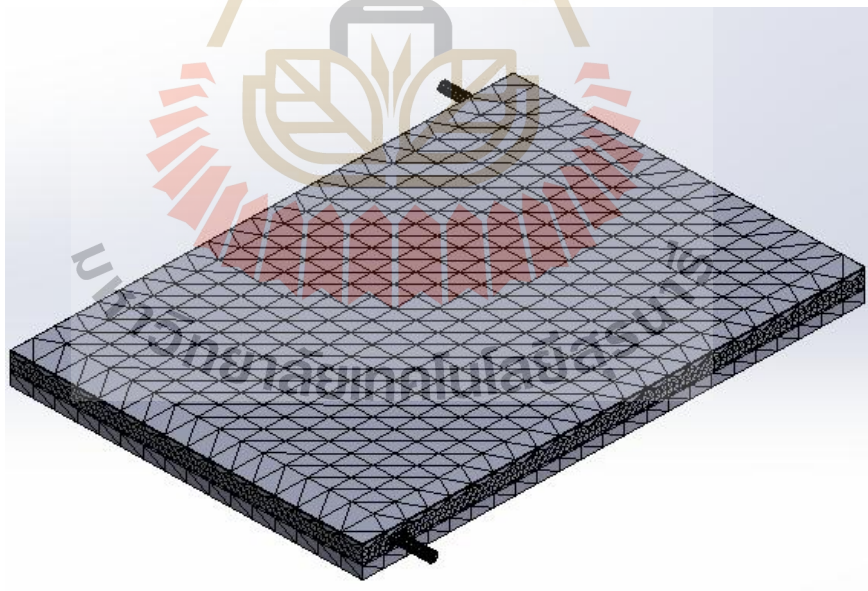
เริ่มจากการแบ่งพื้นที่ย่อยของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ ซึ่งในที่นี้จะใช้เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนเอลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้นซึ่งงานวิจัยนี้จะดำเนินการแบ่งพื้นที่ย่อย โดยอาศัยโปรแกรม

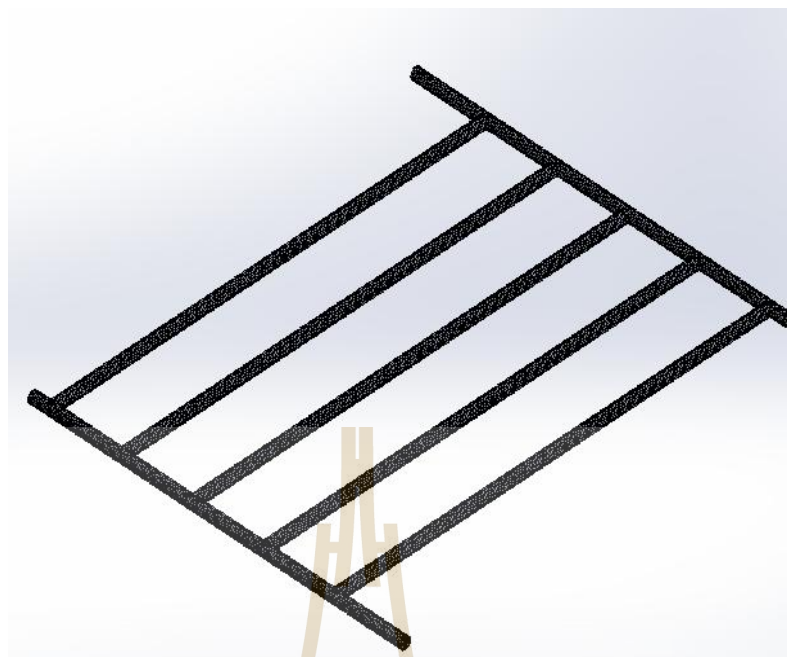
สำเร็จรูป SolidWorks และได้ผลลัพธ์ออกมาดังรูปที่ 4.1 ในการออกแบบพื้นที่ศึกษาที่ใช้ในการจำลองผลค่าอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะครอบคลุมทั่วทั้งหมดของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งจากรูปเป็นการแบ่งเอลิเมนต์ด้วยรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (tetrahedron) ตลอดปริมาตรอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ศึกษาด้วยโปรแกรมการสร้างกริดของ SolidWorks โดยที่อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี จะประกอบด้วยจำนวนจุดต่อ 47,329 จุดต่อ และจำนวนเอลิเมนต์ 266,569 เอลิเมนต์ ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.1 ส่วนอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลากรวมแสง จะประกอบด้วยจำนวนจุดต่อ 21,593 จุดต่อ และจำนวนเอลิเมนต์ 119,035 เอลิเมนต์ ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.2





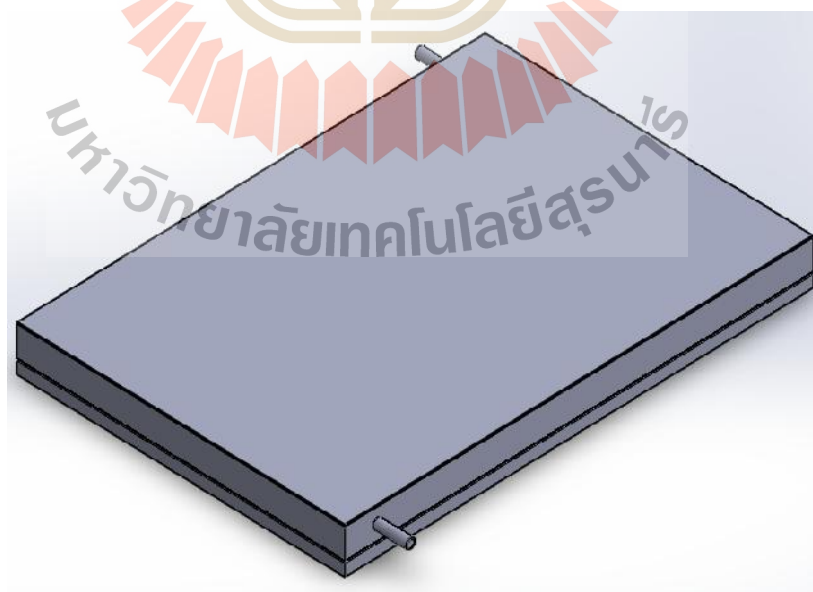
ก) ส่วนประกอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี

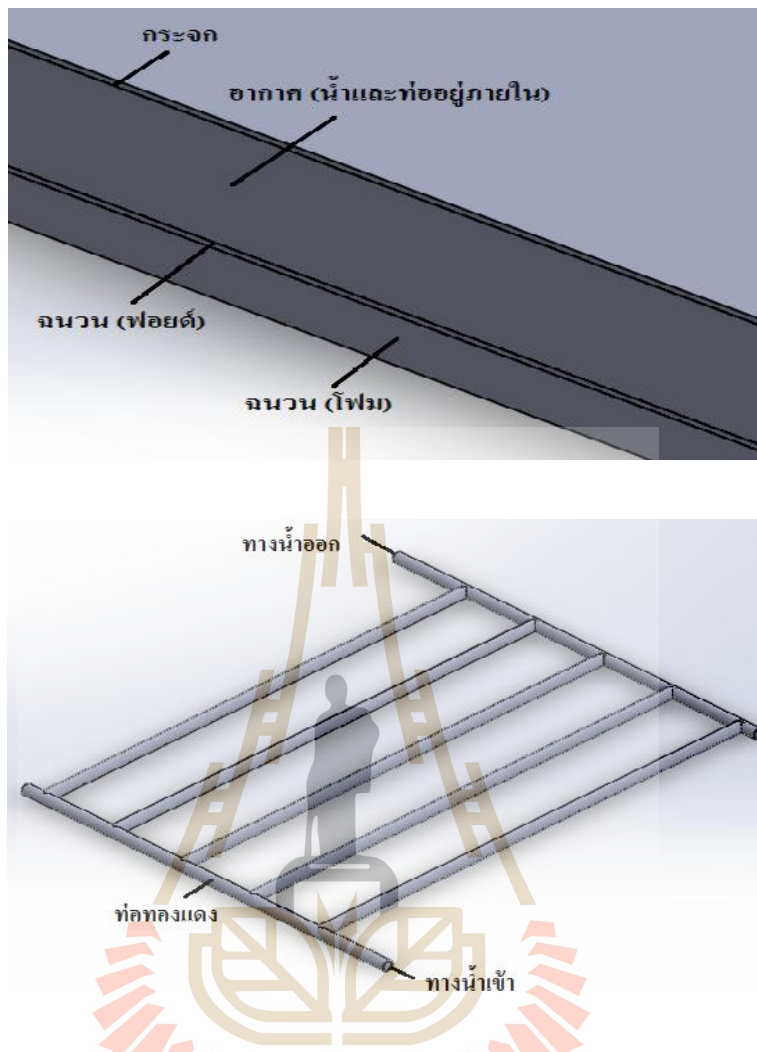




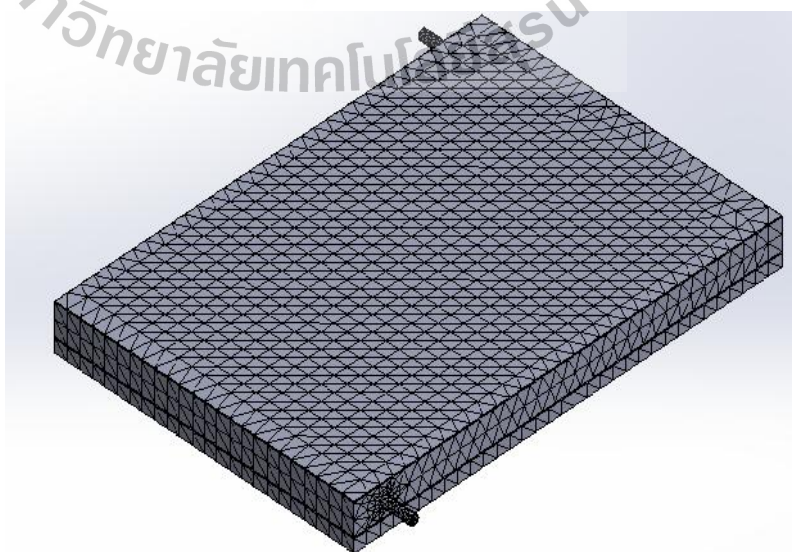
ข) การแบ่งอิลลิเมนต์ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี

รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสีและการแบ่งอิลลิเมนต์

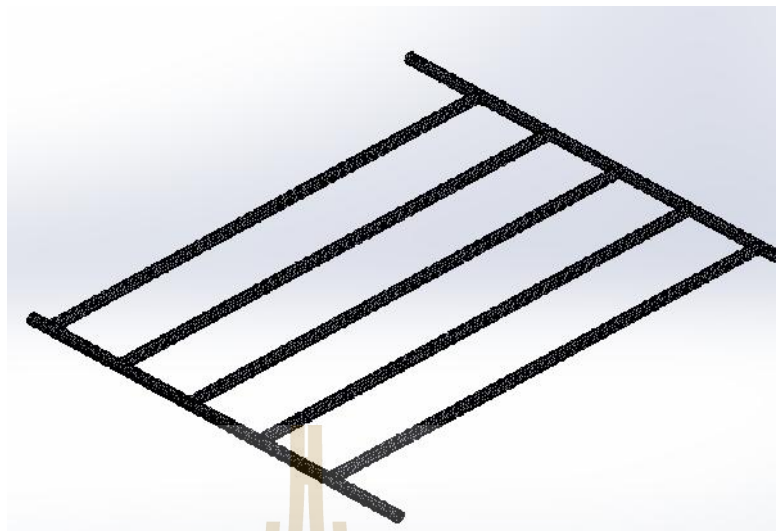




ก) ส่วนประกอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง



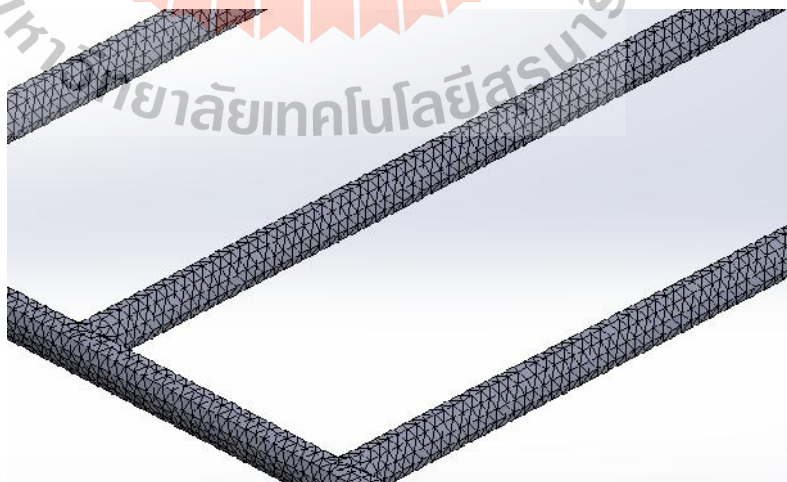




ข) การแบ่งอิลลิเมนต์ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์  
แบบมีแผงพาราโบลากรวมแสง

รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์  
แบบมีแผงพาราโบลากรวมแสงและการแบ่งอิลลิเมนต์

และจะแสดงให้เห็นถึงความละเอียดในการออกแบบกริดด้วยภาพขยาย ซึ่งแสดงภาพขยาย  
การแบ่งอิลลิเมนต์ของท่อทองแดงดังแสดงด้วยรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ภาพขยายการแบ่งอิลลิเมนต์และจุดต่อของท่อทองแดง

### 4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

ขั้นตอนนี้เป็นการเลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยเมื่อสมมติลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น ในกรณีอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์จะได้ดังสมการที่ (4-2)

$$T(x, y, z) = T_1 N_1 + T_2 N_2 + T_3 N_3 + T_4 N_4 \quad (4-2)$$

โดยที่  $N_n$  คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \text{ และ } 4$  และ  $T_n$  คือผลลัพธ์ของค่าอุณหภูมิในแต่ละจุดต่อ  $1, 2, 3, \text{ และ } 4$  ของอิลลิเมนต์ ซึ่งในกรณีอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อจะได้

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (4-3)$$

$V$  คือ ปริมาตรของรูปทรงสี่หน้าของแต่ละอิลลิเมนต์ ซึ่งหาได้จากคิเทอร์มินแนนต์ของ สัมประสิทธิ์ดังนี้

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (4-4)$$

โดยที่

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
 b_4 &= y_3(z_3 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) \\
 c_1 &= x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2) \\
 c_2 &= x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3) \\
 c_3 &= x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1) \\
 c_4 &= x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_1 &= x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3) \\
 d_2 &= x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1) \\
 d_3 &= x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2) \\
 d_4 &= x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)
 \end{aligned}$$

#### 4.3.3 การสร้างสมการของอิลลิเมนต์

ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ ซึ่งเป็นการสร้างสมการของอิลลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาต่าง ๆ สำหรับปัญหาความร้อนในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาความร้อนแบบเชิงเส้นในสถานะชั่วคราวแบบ 3 มิติ มีสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-1) ที่แสดงก่อนหน้านี้ดังนี้ (Huebner, Dewhirst, Smith, and Byrom, 2001)

$$\begin{aligned}
 &k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} - \dots c \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\
 &+ Q = \dots c \frac{\partial T}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{4-5}$$

จากสมการจัดรูปให้ด้านขวาของสมการเท่ากับศูนย์จะได้ดังสมการที่ (4-6) สำหรับปัญหาความร้อนใน 3 มิติที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์นี้จะใช้ประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกำลังด้วยวิธีการเลอรัคินเช่นเดียวกันกับปัญหาอุณหภูมิที่ผ่านมาดังแสดงด้วยสมการที่ (4-7)

$$\dots c \frac{\partial T}{\partial t} - \left( k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dots c \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) - Q = 0 \tag{4-6}$$

ซึ่ง  $R$  เรียกว่าเศษตกค้าง (Weight Residual) เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหา เศษตกค้าง  $R$  ที่เกิดขึ้นควรมีค่าต่ำที่สุด เพื่อผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่เที่ยงตรงมากที่สุด และในงานวิจัยนี้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างได้ใช้วิธีของกาลเลอร์กิน (Preston et al., 1988; Kim et al., 1999) ซึ่งวิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง  $R$  ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting function :  $W$ ) แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอีลลิเมนต์ ( $V$ ) และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_V W_n R dV = 0 \quad (4-7)$$

โดยเมื่อพิจารณาปัญหาความร้อน จะได้เศษตกค้าง  $R$  ดังสมการที่ (4-8)

$$R = \dots c \frac{\partial T}{\partial t} - \left( k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dots c \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) - Q \quad (4-8)$$

สำหรับอีลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า จุดที่ไม่รู้ค่ามี 4 จุด ซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจึงต้องการ 4 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่รู้ค่า นั่นหมายถึงในสมการที่ (4-7) จะต้องมีการ  $n = 1, 2, 3,$  และ 4 และโดยปกติจะเลือก  $W_n = N_n$  ซึ่งเรียกว่า บับโนฟ-กาลเลอร์กิน (Bubnov-Galerkin) ดังนั้นเมื่อแทนค่า  $R$  ด้วยสมการที่ (4-8) ลงในสมการที่ (4-7) จะได้สมการที่ (4-9)

$$\int_V N_n \left( \dots c \frac{\partial T}{\partial t} - k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dots c \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) - Q \right) dV = 0 \quad (4-9)$$

แล้วแตกพจน์ต่าง ๆ ออกมาเพื่อทำการพิจารณา จะได้

$$\begin{aligned} & \int_V N_n \dots c \frac{\partial T}{\partial t} dV - \int_V N_n k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dV \\ & + \int_V N_n \dots c \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV - \int_V N_n Q dV = 0 \end{aligned} \quad (4-10)$$

พิจารณาการอินทิเกรตที่ละพจน์ของสมการที่ (4-10) สำหรับพจน์แรกซึ่งเป็นพจน์อนุพันธ์อันดับสองใช้วิธีการอินทิเกรตทีละส่วน (integrate by parts) โดยจะใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\int_V u(\nabla \cdot \vec{V}) dV = \int_{\Gamma} u(\vec{V} \cdot \hat{n}) d\Gamma - \int_V (\nabla u \cdot \vec{V}) dV \quad (4-11)$$

$\Gamma$  คือ ขอบเขตของอิลลิเมนต์เมื่อเปรียบเทียบกับพจน์แรกของสมการที่ (4-10) จะได้

$$u = N_n$$

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

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

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

และเนื่องจาก  $\mathbf{n}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับขอบเขตของอิลลิเมนต์  $\Gamma$

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

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

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

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

$$\nabla u \cdot \vec{V} = k \left( \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4-10) เมื่อ  $n = 1, 2, 3$ , และ  $4$  จึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} & \int_V N_n \dots c \frac{\partial T}{\partial t} dV - \int_{\Gamma} N_n k \left( \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) d\Gamma + \int_V k \left( \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV \\ & + \int_V N_n \dots c \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV - \int_V N_n Q dV = 0 \end{aligned} \quad (4-12)$$

จากสมการที่ (4-12) จัดรูปใหม่จะได้สมการไฟไนท์อิลลิเมนต์สำหรับอิลลิเมนต์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \int_V N_n \dots c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V k \left( \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV \\ & + \int_V N_n \dots c \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_{\Gamma} N_n (hT) d\Gamma = \int_V N_n Q dV + \int_{\Gamma} N_n (hT_{\infty}) d\Gamma \end{aligned} \quad (4-13)$$

และเนื่องจากสมการที่ (4-13) มีทั้งหมด 4 สมการ เราสามารถเขียนสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (4-14) ดังนี้

$$\begin{aligned} & \int_V [N]_{4 \times 1} \dots c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V k \left( \left[ \frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{\partial T}{\partial x} + \left[ \frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{\partial T}{\partial y} + \left[ \frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV \\ & + \int_V [N]_{4 \times 1} \dots c \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} (hT) d\Gamma = \int_V [N]_{4 \times 1} Q dV + \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} (hT_{\infty}) d\Gamma \end{aligned} \quad (4-14)$$

และจากสมการที่ (4-14) จึงได้ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิ  $T$  โดยประมาณในแต่ละอิลลิเมนต์เป็น

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

ดังนั้น

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

และสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงกลายมาเป็น

$$\begin{aligned} & \int_V [N]_{4 \times 1} \dots c [N]_{1 \times 4} dV \left[ \dot{T} \right]_{4 \times 1} + \int_V k \left( \left[ \frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \left[ \frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[ \frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \left[ \frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[ \frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \left[ \frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV [T]_{4 \times 1} \\ & + \int_V [N]_{4 \times 1} \dots c \left( u \left[ \frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + v \left[ \frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + w \left[ \frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV [T]_{4 \times 1} + \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} h [N]_{1 \times 4} d\Gamma [T]_{4 \times 1} \\ & = \int_V [N]_{4 \times 1} Q dV + \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} (h T_{\infty}) d\Gamma \end{aligned} \quad (4-15)$$

หรือเขียนสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วย 4 สมการได้ดังนี้

$$[C]_{4 \times 4} \left\{ \dot{T} \right\}_{4 \times 1} + [K_c] + [K_v] + [K_h]_{4 \times 4} \{T\}_{4 \times 1} = \{Q_Q\}_{4 \times 1} + \{Q_h\}_{4 \times 1} \quad (4-16)$$

เมทริกซ์ของการจุความร้อน:  $[C]_{4 \times 4}$

$$[C]_{4 \times 4} = \int_V ([N]_{4 \times 1} \dots c [N]_{1 \times 4}) dV \quad (4-17)$$

จากสมการที่ (4-2) และหากความหนาแน่นมวล ... และความร้อนจำเพาะ C มีค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ (4-17) จึงกลายเป็น

$$[C]_{4 \times 4} = \dots c \int N_n N_m dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, \text{ และ } 4 \quad (4-18)$$

สมการที่ (4-18) นี้สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรเหมือนดังหัวข้อที่ผ่านมาจะได้

$$[C]_{4 \times 4} = \frac{\dots cV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

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

$$\text{จาก } [K_c]_{4 \times 4} = \int_V \left( k \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \end{bmatrix}_{4 \times 1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \end{bmatrix}_{1 \times 4} + k \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial y} \end{bmatrix}_{4 \times 1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial y} \end{bmatrix}_{1 \times 4} + k \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial z} \end{bmatrix}_{4 \times 1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial z} \end{bmatrix}_{1 \times 4} \right) dV \quad (4-20)$$

จากฟังก์ชันการประมาณภายในคังสมการที่ (4-2) จึงได้

$$\frac{\partial N_n}{\partial x} = \frac{b_n}{6V}, \quad \frac{\partial N_n}{\partial y} = \frac{c_n}{6V} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial N_n}{\partial z} = \frac{d_n}{6V} \quad n = 1, 2, 3, \text{ และ } 4 \quad (4-21)$$

แทนความสัมพันธ์ของสมการที่ (4-20) ลงในสมการที่ (4-21) จะได้

$$\begin{aligned} [K_c]_{4 \times 4} &= k \int \left( \frac{b_n b_m}{6V 6V} + \frac{c_n c_m}{6V 6V} + \frac{d_n d_m}{6V 6V} \right) dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, \text{ และ } 4 \quad (4-22) \\ &= \frac{k}{36V^2} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \int dx dy dz \\ &= \frac{k}{36V} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \quad n, m = 1, 2, 3, \text{ และ } 4 \end{aligned}$$

$$[K_c]_{4 \times 4} = \frac{k}{36V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ & b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ & & b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ \text{Sym} & & & b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix} \quad (4-23)$$

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



$$[K_h]_{4 \times 4} = \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} h [N]_{1 \times 4} d\Gamma \quad (4-24)$$

จากสมการที่ (4-24) และหากสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h$  มีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาการถ่ายเท ความร้อนบนปริมาตรของอีลลิเมนต์จึงกลายเป็น

$$[K_h]_{4 \times 4} = h \int N_n N_m dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, \text{ และ } 4 \quad (4-25)$$

สมการที่ (4-25) ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรจะได้

$$[K_h]_{4 \times 4} = \frac{hV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4-26)$$

เมทริกซ์ของความเร็ว:  $[K_v]_{4 \times 4}$

$$[K_v]_{4 \times 4} = \int_v \dots c \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix} \left\{ [uvw] \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix} \right\} dV \quad (4-27)$$

$$[K_v]_{4 \times 4} = \int \dots c \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix} \left\{ [uvw] \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix} \right\} dx dy dz \quad (4-28)$$

เมื่ออินทิเกรตเสร็จแล้วจะได้สมการที่ (4-29)

$$[K_v]_{4 \times 4} = \frac{\dots c}{36V} \begin{bmatrix} ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \end{bmatrix} \quad (4-29)$$

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

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} h T_{\infty} d\Gamma \quad (4-30)$$

หรือเมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนบนปริมาตรของอีลลิเมนต์ดั่งนั้นสมการที่ (4-30) จึงกลายเป็น

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = h T_{\infty} \int N_n dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, \text{ และ } 4 \quad (4-31)$$

สมการที่ (4-31) ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรได้ดังนี้

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = \frac{h T_{\infty} V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-32)$$

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

$$\{Q_o\}_{4 \times 1} = \int_{\Omega} [N]_{4 \times 1} Q d\Omega \quad (4-33)$$

หรือ

$$\{Q_o\}_{4 \times 1} = Q \int N_n dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, \text{ และ } 4 \quad (4-34)$$

สมการที่ (4-34) ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรได้ดังนี้

$$\{Q_o\}_{4 \times 1} = \frac{QV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-35)$$

#### 4.3.4 การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว

การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราวจะใช้วิธีความสัมพันธ์เวียนบังเกิด โดยจะมีลักษณะของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับค่า  $S$  ที่เลือกใช้ ดังแสดงในสมการที่ (4-36) โดย  $\Delta t$  คือค่าของช่วงเวลา (Time step) โดยถ้าเลือกใช้  $S=0$  จะเป็นวิธีของออยเลอร์ (Euler) ถ้า  $S=\frac{1}{2}$  เป็นวิธีของ แครงก์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson) ถ้า  $S=\frac{2}{3}$  เป็นวิธีของกาลเออร์กิน (Galerkin) และถ้า  $S=1$  จะเรียกว่าวิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง (Backward difference) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลังดังสมการที่ (4-37) เนื่องจากวิธีนี้ประกันการลู่เข้าของผลลัพธ์ และผลลัพธ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

$$S \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + (1/S) \left\{ \dot{T} \right\}^t = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (4-36)$$

$$\left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (4-37)$$

จากการเลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง สมการที่ (4-16) จึงพัฒนามาเป็นสมการที่ (4-38) จากนั้นแทนค่าสมการที่ (4-37) ลงในสมการที่ (4-38) จึงได้ผลลัพธ์ของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อพิจารณาปัญหาในสถานะชั่วคราว ดังสมการที่ (4-39)

$$[C] \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + [K] \{T\}^{t+\Delta t} = \{Q\}^{t+\Delta t} \quad (4-38)$$

$$\left( \frac{1}{\Delta t} [C] + [K] \right) \{T\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [C] \{T\}^t + \{Q\}^{t+\Delta t} \quad (4-39)$$

โดยที่  $[K] = [K_c] + [K_h] + [K_v]$

และ  $\{Q\} = \{Q_h\} + \{Q_e\}$

#### 4.3.5 การประกอบสมการอิลลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ

ขั้นตอนนี้เป็นการนำสมการของแต่ละอิลลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมของระบบ โดยจากขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.3.1 ในระบบ 3 มิติ หากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย  $n$  จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น  $n$  สมการ ดังนั้นจึงได้สมการรวมของงานวิจัยนี้เมื่อพิจารณาปัญหาแบบเชิงเส้นในสถานะชั่วคราว คือ

$$\left( \frac{1}{\Delta t} [C]_{n \times n} + [K]_{n \times n} \right) \{T\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [C]_{n \times n} \{T\}_{n \times 1}^t + \{Q\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} \quad (4-40)$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$([C]_{n \times n} + \Delta t [K]_{n \times n}) \{T\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} = [C]_{n \times n} \{T\}_{n \times 1}^t + \Delta t \{Q\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} \quad (4-41)$$

เมื่อ

$$[M]_{n \times n} = [C]_{n \times n} + \Delta t [K]_{n \times n}$$

$$[F]_{n \times 1} = [C]_{n \times n} \{T\}_{n \times 1}^t + \Delta t \{Q\}_{n \times 1}^{t+\Delta t}$$

ดังนั้นจึงได้สมการรวมของงานวิจัยนี้ คือ

$$[M]_{n \times n} \{T\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} = [F]_{n \times 1} \quad (4-42)$$

#### 4.3.6 การประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาค่าผลเฉลย

ขั้นตอนการหาค่าผลเฉลยของอุณหภูมิ  $T$  เริ่มจากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นให้แก่อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และเงื่อนไขขอบเขตบริเวณต่าง ๆ โดยงานวิจัยนี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในรอบแรกที่พิจารณาอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ คือ

อุณหภูมิเริ่มต้น  $T(t=0) = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิโดยรอบ (Ambient temperature)  $T_{\infty} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เองของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบ  
ดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี =  $241,428\text{ W/m}^3$

ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เองของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบ  
พัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลากรวมแสง =  $318,095\text{ W/m}^3$

อุณหภูมิของน้ำขาเข้า (Water inlet temperature) =  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

ความเร็วของน้ำ (Inlet water velocity) =  $50\text{ mm/sec}$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำ (convective heat transfer of water) =  $50\text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$   
(สุคนธ์ อาจฤทธิ, 2524)

$\Delta t = 1$  วินาที

#### 4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิ ได้ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลเลอร์กิน รายละเอียดต่าง ๆ ในบทนี้จะนำไปสู่การประดิษฐ์โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลและนำไปสู่การออกแบบระบบอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ต่อไป

## บทที่ 5

### ผลการจำลองพร้อมเปรียบเทียบอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้น

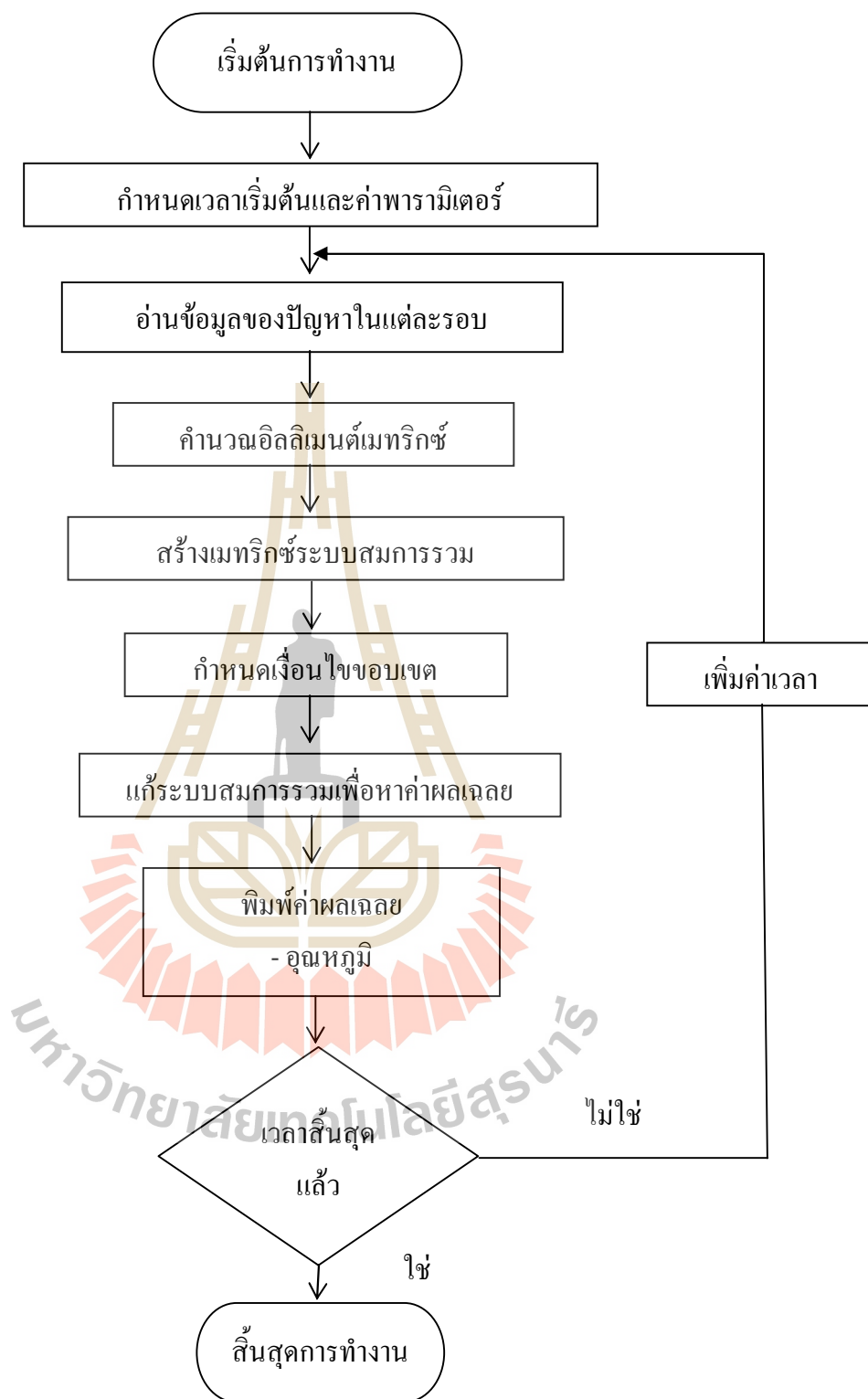
#### 5.1 บทนำ

ในบทที่ 5 เป็นการอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลพร้อมผลการจำลองค่าอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณค่าอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี และแบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลากรวมแสง โดยเป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณค่าอุณหภูมิ ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation : PDE) สำหรับการคำนวณอุณหภูมิในบทนี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในการวิเคราะห์ปัญหาในสถานะชั่วคราว และจะกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผลและอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยโปรแกรมทั้งหมดถูกออกแบบให้ทำงานบนพื้นฐานการใช้งานของ MATLAB

#### 5.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เกิดจากการประดิษฐ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB โดยกริดที่สร้างขึ้นเพื่อกำกับคุณลักษณะของจุดต่อและเอลิเมนต์ที่ป้อนให้แก่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เกิดจากการสร้างกริดโดยโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ SolidWork ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

การคำนวณอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาค่อนข้างคำนวณได้ยาก แต่ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงประดิษฐ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB เพื่อคำนวณอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับโครงสร้างของโปรแกรมคำนวณอุณหภูมิสามารถแทนได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณอุณหภูมิ

จากแผนภูมิในรูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบโดยรวมเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละส่วนจะได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่าง ๆ เป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดเวลาเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ : โปรแกรมจะเริ่มทำงานด้วยการกำหนดค่าเวลาเริ่มต้น  $t=0$  และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวัสดุต่าง ๆ ในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยงานวิจัยนี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของอุณหภูมิเริ่มต้น  $T(t=0) = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

ขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหาในแต่ละรอบ : จากนั้นโปรแกรมจะรับค่าข้อมูลอินพุตซึ่งแสดงถึงลักษณะของอิทธิพลและจุดต่อจากเอาต์พุตไฟล์ที่เกิดจากการสร้างกริดของโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ SolidWork ที่ซึ่งรายละเอียดในไฟล์ประกอบด้วยจำนวนและตำแหน่งของจุดต่อหมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิทธิพลจำนวนและหมายเลขของอิทธิพลเป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณอิทธิพลเมทริกซ์ : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะใช้การคำนวณอิทธิพลเมทริกซ์รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสของทุก ๆ อิทธิพลดังแสดงด้วยสมการที่ (4-40) จากบทที่ผ่านมา หรือนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังสมการที่ (5-1) โดยที่  $\{T\}_{4 \times 1}$  คือเวกเตอร์คำตอบของสมการที่ทำการคำนวณในแต่ละรอบ

$$\left( \frac{1}{\Delta t} [C]_{4 \times 4} + [K]_{4 \times 4} \right) \{T\}_{4 \times 1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [C]_{4 \times 4} \{T\}_{4 \times 1}^t + \{Q\}_{4 \times 1}^{t+\Delta t} \quad (5-1)$$

สมการที่ (5-1) นี้จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของอิทธิพลเมทริกซ์ของการจุความร้อน  $[C]_{4 \times 4}$  ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-19) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (5-2) อิทธิพลเมทริกซ์ของการแพร่กระจายความร้อน  $[K_c]_{4 \times 4}$  ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-23) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (5-3) เมทริกซ์ของการพาความร้อน  $[K_h]_{4 \times 4}$  ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-26) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (5-4) เมทริกซ์ของความเร็ว  $[K_v]_{4 \times 4}$  ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-29) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (5-5) โหลดเวกเตอร์การพาความร้อน  $\{Q_h\}_{4 \times 1}$  ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-32) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (5-6) และ โหลดเวกเตอร์ของปริมาณความร้อนที่ผลิตเอง  $\{Q_o\}_{4 \times 1}$  ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-35) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (5-7) เมทริกซ์เหล่านี้จะถูกคำนวณที่ละอิทธิพลเพื่อนำไปสร้างเป็นระบบเมทริกซ์สมการรวม



$$[C]_{4 \times 4} = \frac{...cV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

$$[K_c]_{4 \times 4} = \frac{k}{36V} \begin{bmatrix} bb_1+c_1c_1+d_1d_1 & bb_2+c_1c_2+d_1d_2 & bb_3+c_1c_3+d_1d_3 & bb_4+c_1c_4+d_1d_4 \\ & bb_2+c_2c_2+d_2d_2 & bb_3+c_2c_3+d_2d_3 & bb_4+c_2c_4+d_2d_4 \\ & & bb_3+c_3c_3+d_3d_3 & bb_4+c_3c_4+d_3d_4 \\ & & & bb_4+c_4c_4+d_4d_4 \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

Sym

$$[K_h]_{4 \times 4} = \frac{hV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

$$[K_v]_{4 \times 4} = \frac{...c}{36V} \begin{bmatrix} ub_1+vc_1+wd_1 & ub_2+vc_2+wd_2 & ub_3+vc_3+wd_3 & ub_4+vc_4+wd_4 \\ ub_1+vc_1+wd_1 & ub_2+vc_2+wd_2 & ub_3+vc_3+wd_3 & ub_4+vc_4+wd_4 \\ ub_1+vc_1+wd_1 & ub_2+vc_2+wd_2 & ub_3+vc_3+wd_3 & ub_4+vc_4+wd_4 \\ ub_1+vc_1+wd_1 & ub_2+vc_2+wd_2 & ub_3+vc_3+wd_3 & ub_4+vc_4+wd_4 \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = \frac{hT_\infty V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-6)$$

$$\{Q_o\}_{4 \times 1} = \frac{qV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

ขั้นตอนที่ 4 สร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม : โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอีลิเมนต์เมทริกซ์ย่อย ๆ เข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมดังแสดงด้วยสมการที่ (4-19) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (5-8) โดยมีหลักการคือหาหมายเลขจุดต่อที่แท้จริงของอีลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่แล้ว

ใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของอิลลิเมนต์เมทริกซ์นั้นลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมให้ถูกต้องดังแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 3.5 ของบทที่ 3 ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อย  $n$  จุดต่อจึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น  $n$  สมการ

$$\left( \frac{1}{\Delta t} [C]_{n \times n} + [K]_{n \times n} \right) \{T\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [C]_{n \times n} \{T\}_{n \times 1}^t + \{Q\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} \quad (5-8)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต : โปรแกรมจะทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการแก้ระบบสมการรวมโดยมีหลักการคือตัดแปลงระบบสมการรวมตามสมการที่ (5-8) ให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไข โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

โดยที่

อุณหภูมิเริ่มต้น  $T(t=0) = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิโดยรอบ (Ambient temperature)  $T_{\infty} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เองของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี =  $241,428 \text{ W/m}^3$

ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เองของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลากรวมแสง =  $318,095 \text{ W/m}^3$

อุณหภูมิของน้ำขาเข้า (Water inlet temperature) =  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ความเร็วของน้ำ (Inlet water velocity) =  $50 \text{ mm/sec}$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำ (convective heat transfer of water) =  $50 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$  (สุคนธ์ อาจฤทธิ์, 2524)

$\Delta t = 1$  วินาที

ขั้นตอนที่ 6 แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย : โปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นดังสมการที่ (5-8) เพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวม

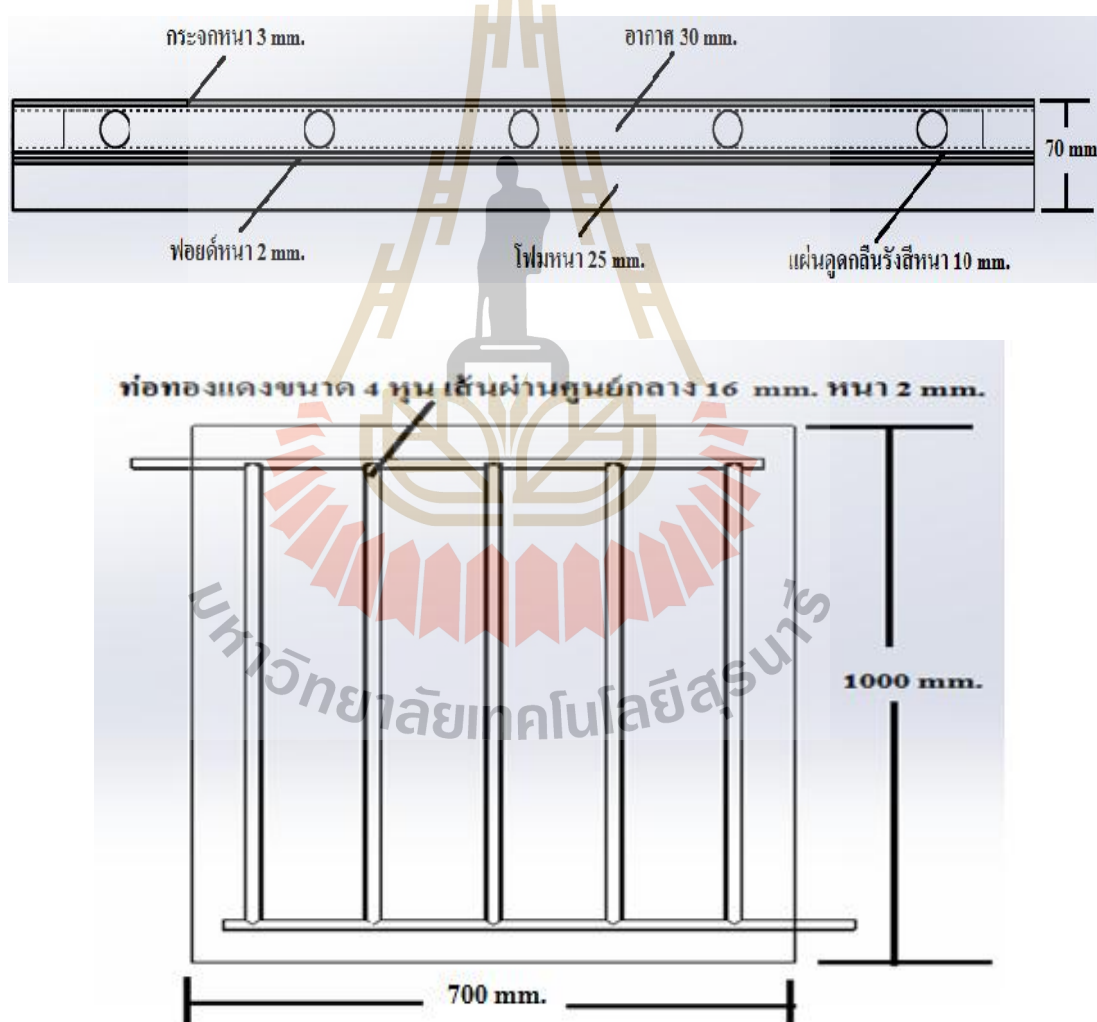
ขั้นตอนที่ 7 พิมพ์ค่าผลเฉลย : จากนั้น โปรแกรมจะพิมพ์ค่าผลเฉลยออกมาเป็นค่าอุณหภูมิในแต่ละจุดของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

ขั้นตอนที่ 8 เวลาสิ้นสุดแล้ว : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะพิจารณาถึงการคำนวณค่าในรอบถัดไป ถ้าหากเวลาที่กำหนดในการคำนวณยังไม่สิ้นสุดโปรแกรมก็จะย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2

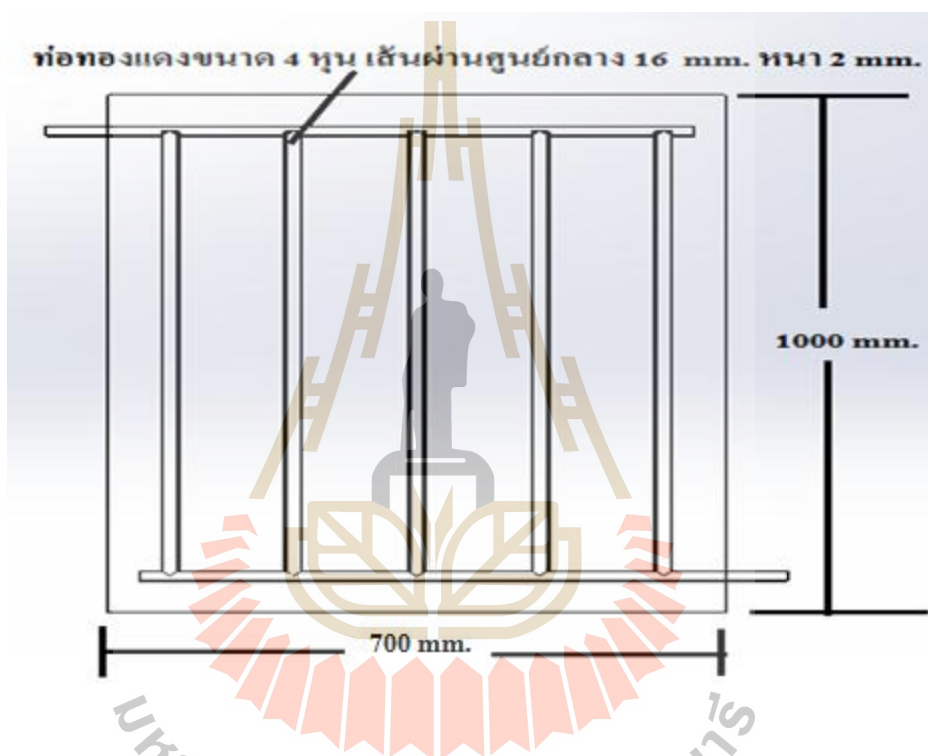
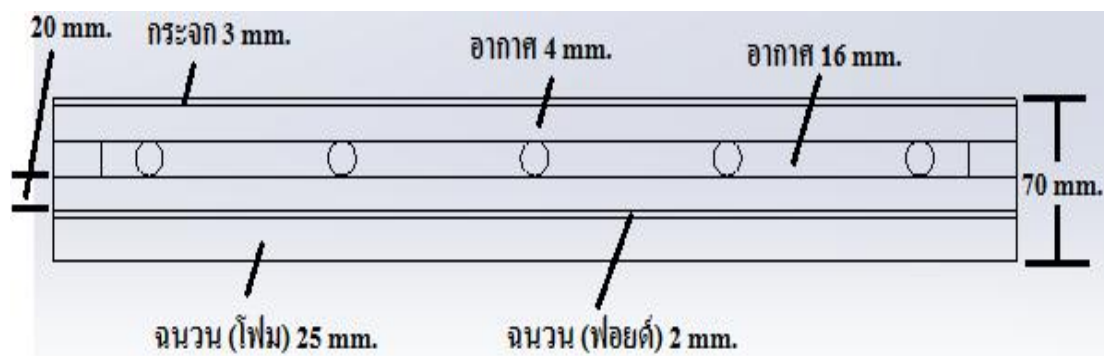
อ่านข้อมูลของปัญหาในแต่ละรอบ และกระทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 8 ดังเดิม แต่ถ้าหากสิ้นสุดเวลาที่กำหนดให้โปรแกรมก็จะหยุดการคำนวณเป็นอันจบการทำงานของโปรแกรม

### 5.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

รายละเอียดและพิกัดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และรายละเอียดและพิกัดต่าง ๆ อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสงแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 (บริษัททริปเปิ้ล อี เอ็นเนอร์ยี พลัส จำกัด)



รูปที่ 5.2 รายละเอียดและพิกัดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี



รูปที่ 5.3 รายละเอียดและพิกัดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

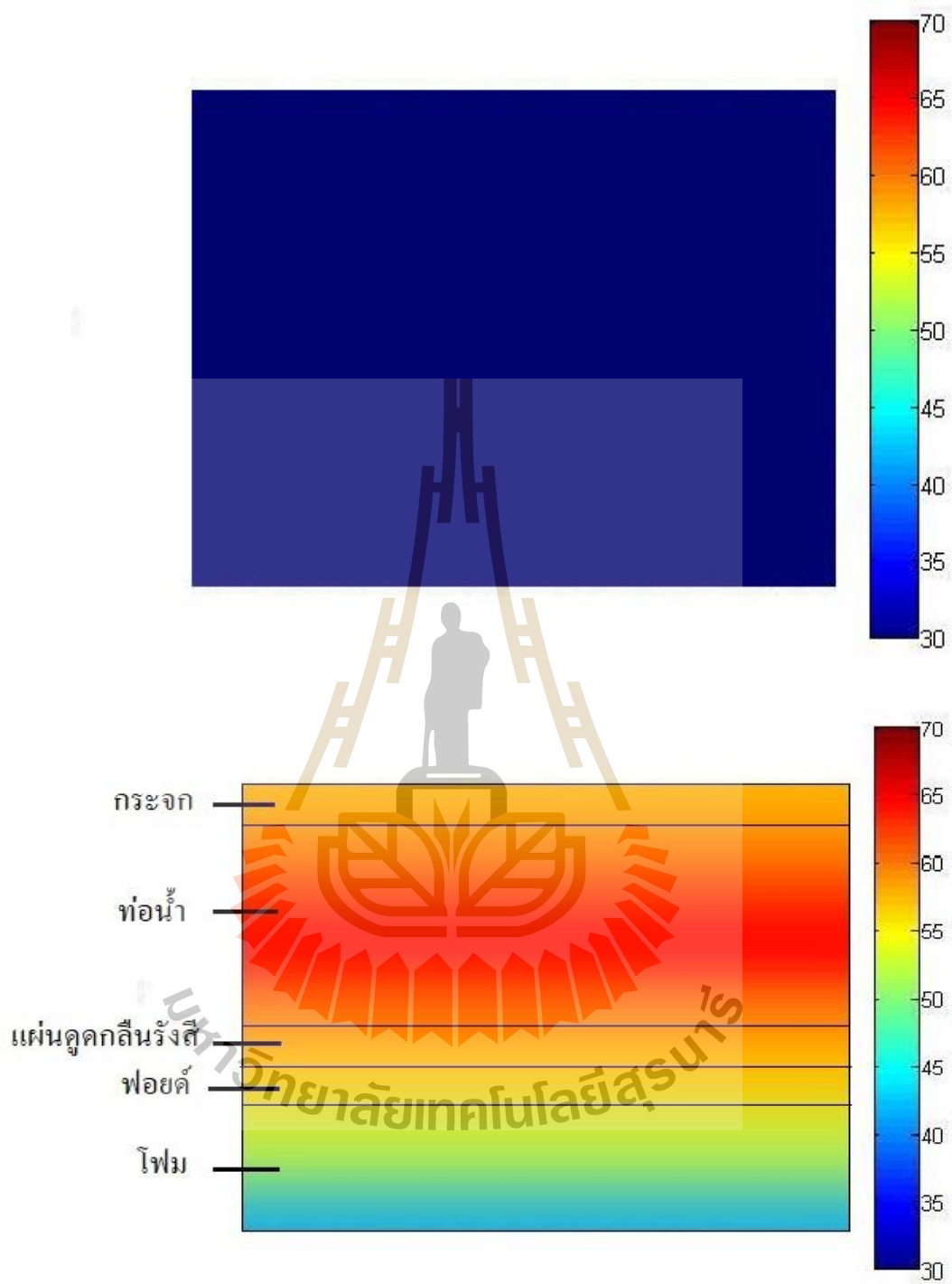
material	k (W/m <sup>2</sup> ·°C)	C (J/kg·°C)	(kg/m <sup>3</sup> )
กระจก	1.05	840	2600
แผ่นดูดกลืนรังสีทำจาก อะลูมิเนียม	205	896	2700
อากาศ	0.024	1005	1.2
ฉนวน (พอยด์)	0.0395	1200	2.6989
ฉนวน (โฟม)	0.031	1500	30
ท่อ (ทองแดง)	400	385	8700
น้ำ	0.6	4187	1000

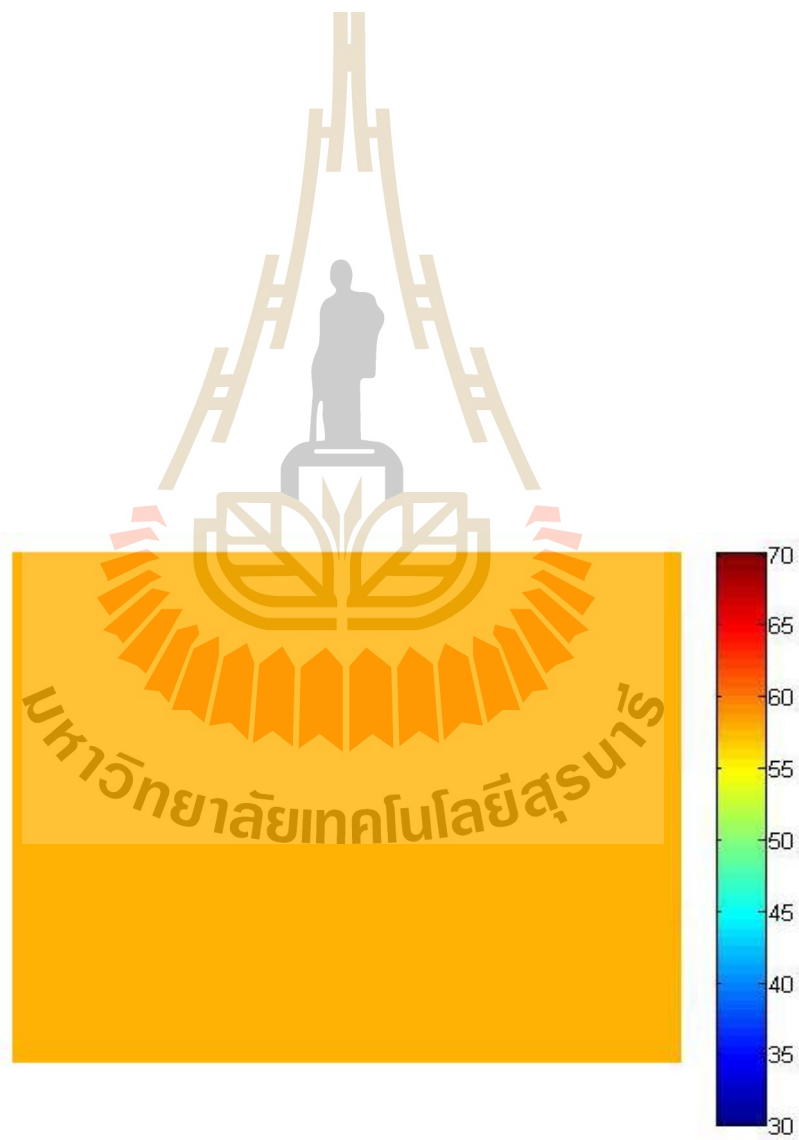
#### 5.4 ผลการจำลองอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบ ดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีและแบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง

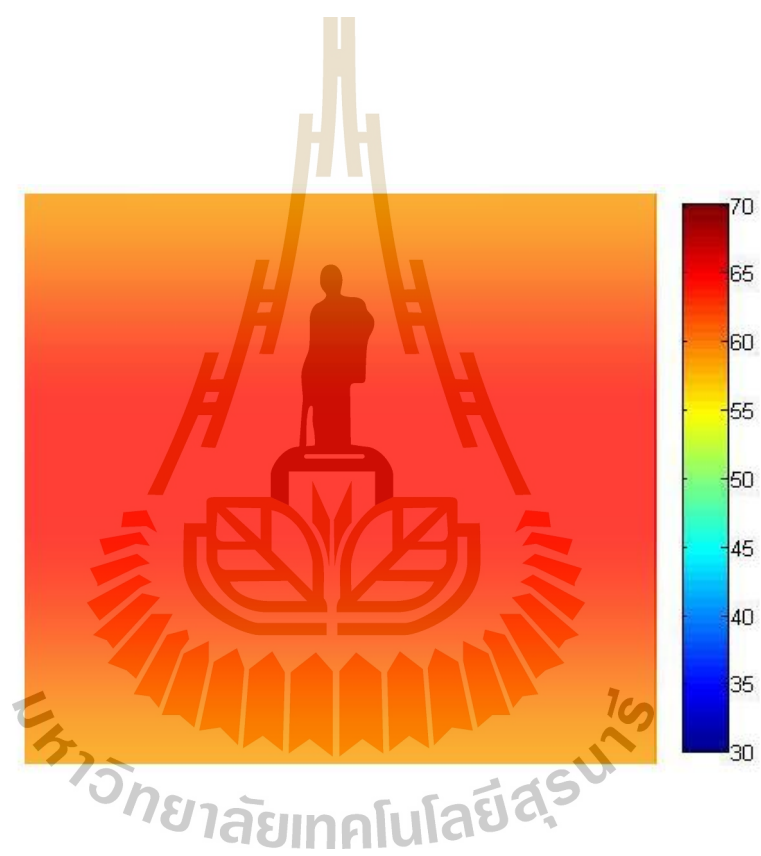
การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ใช้ MATLAB ในการพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบมีแผ่นดูดกลืนรังสีและแบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยจะจำลองผลดังนี้

##### 5.4.1 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี ซึ่งเป็นภาพรวมของอุปกรณ์ทั้งหมดโดยเน้นเฉพาะใน สถานะคงตัว

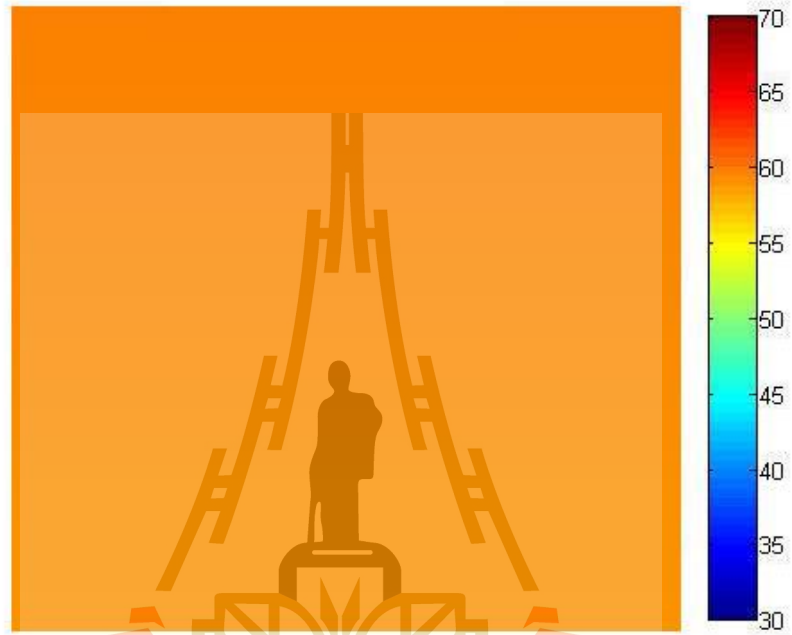
ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี ซึ่งเป็นภาพรวมของอุปกรณ์ทั้งหมดโดยเน้นเฉพาะในสถานะคงตัว แสดงได้ดังรูปที่ 5.4



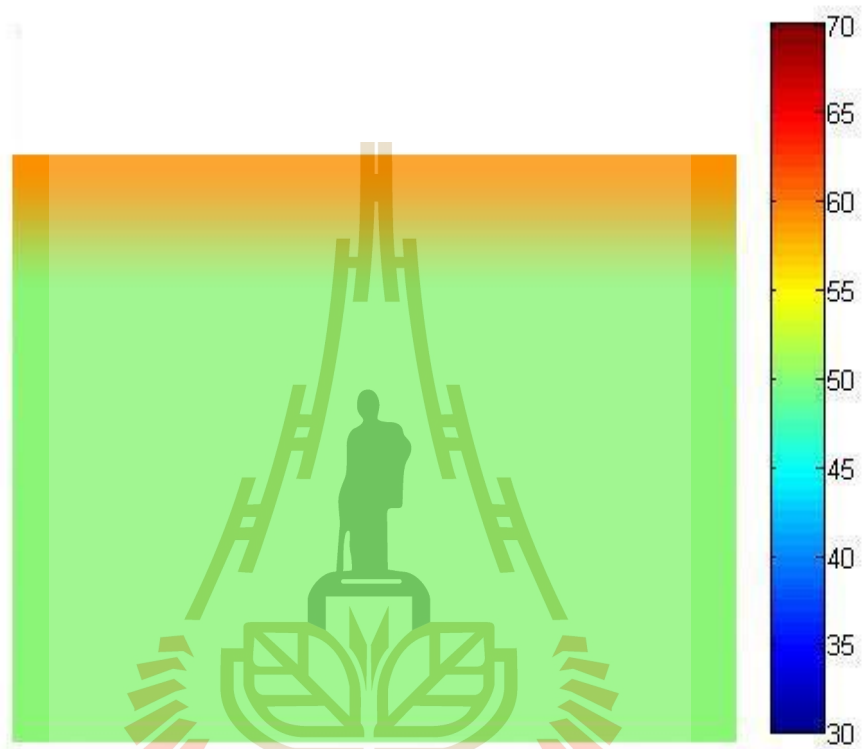




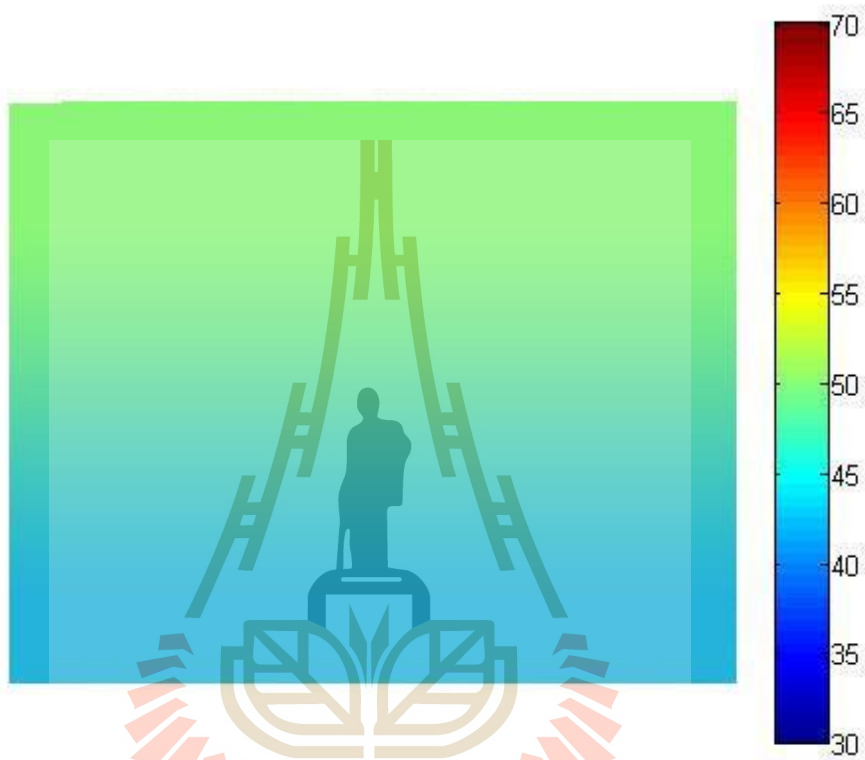




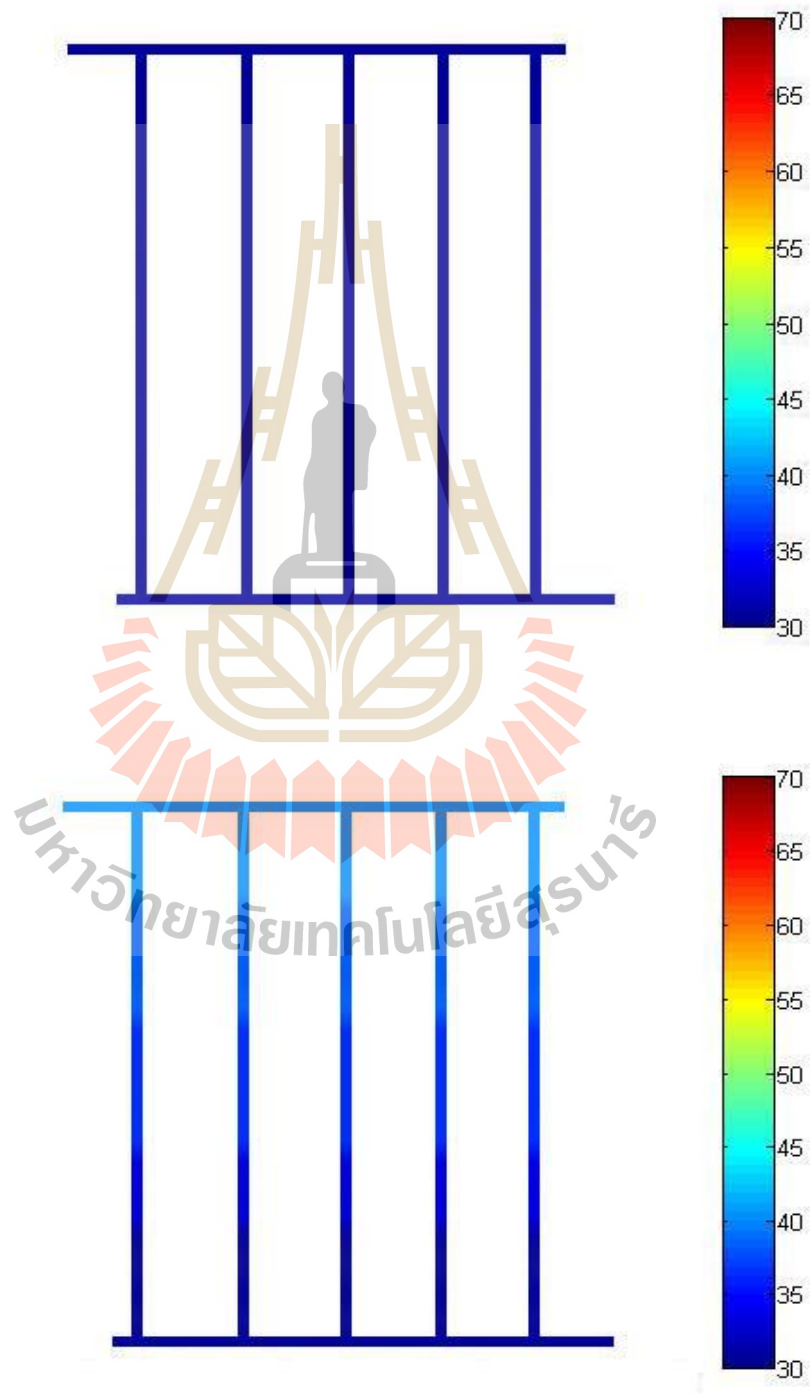
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

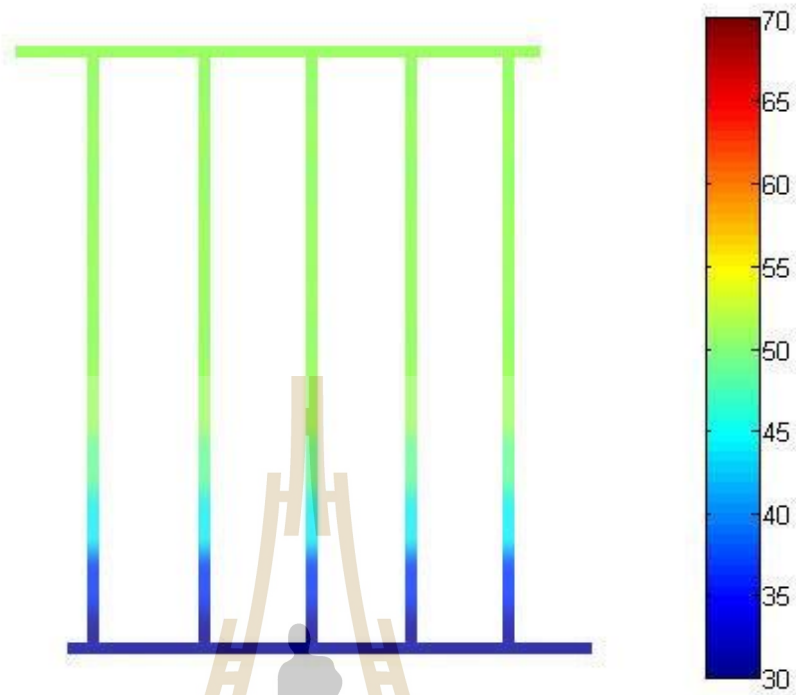


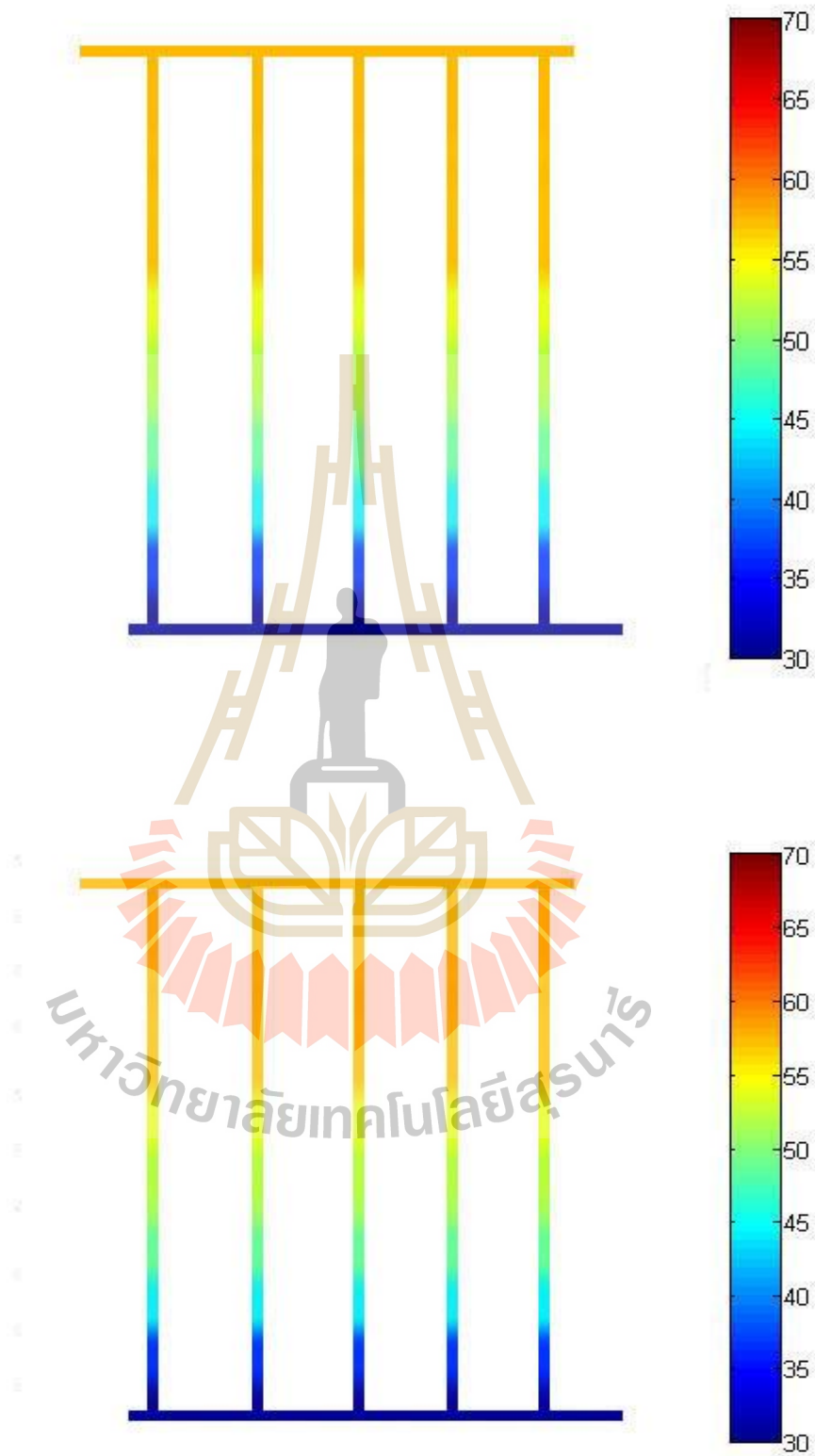
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

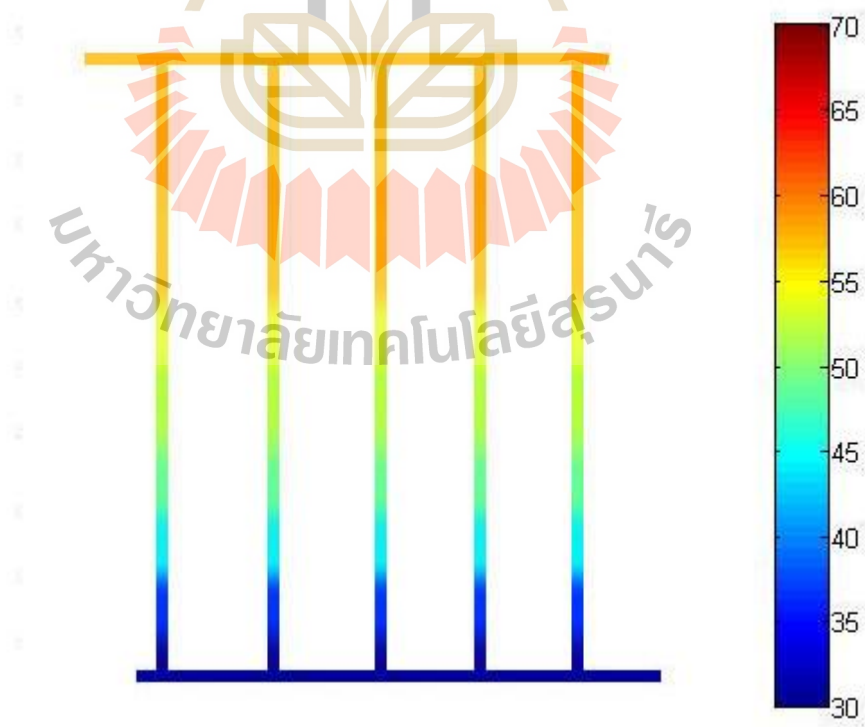
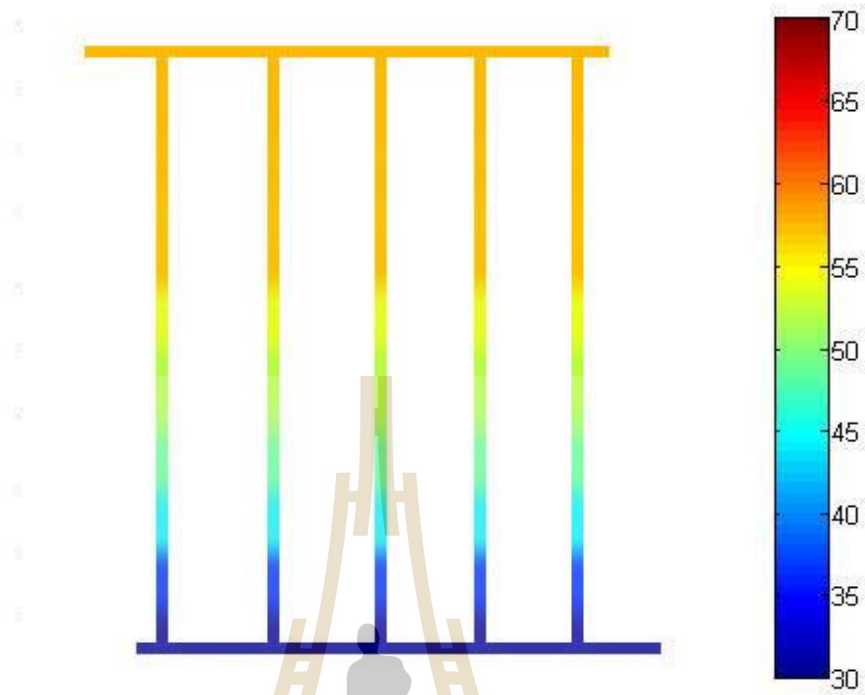


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

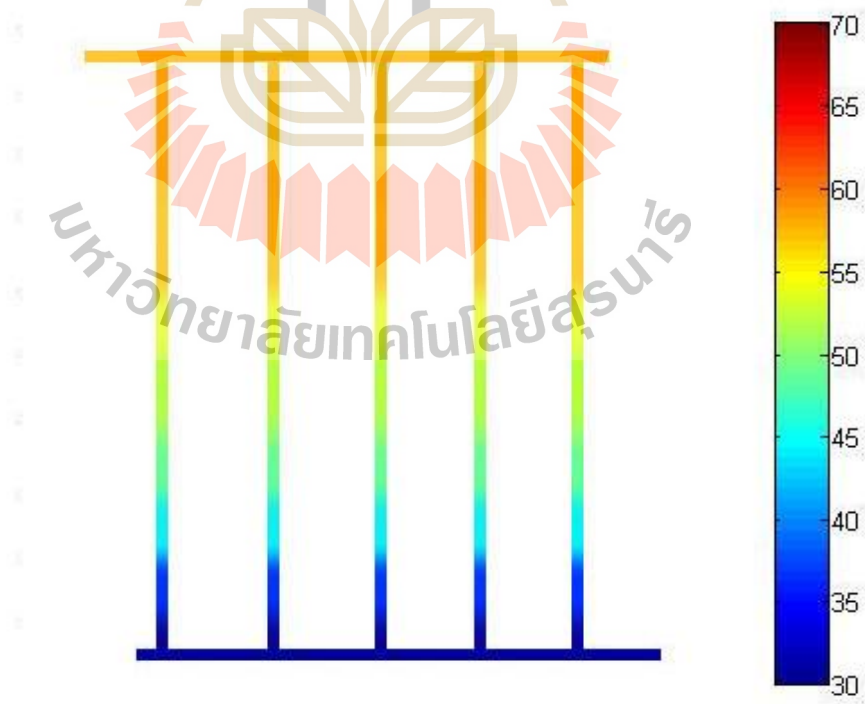
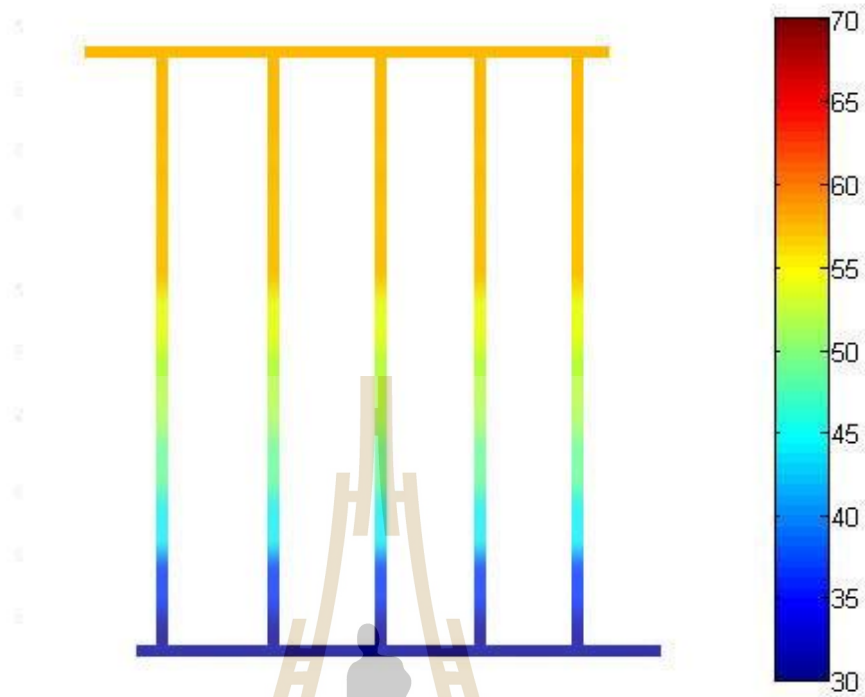




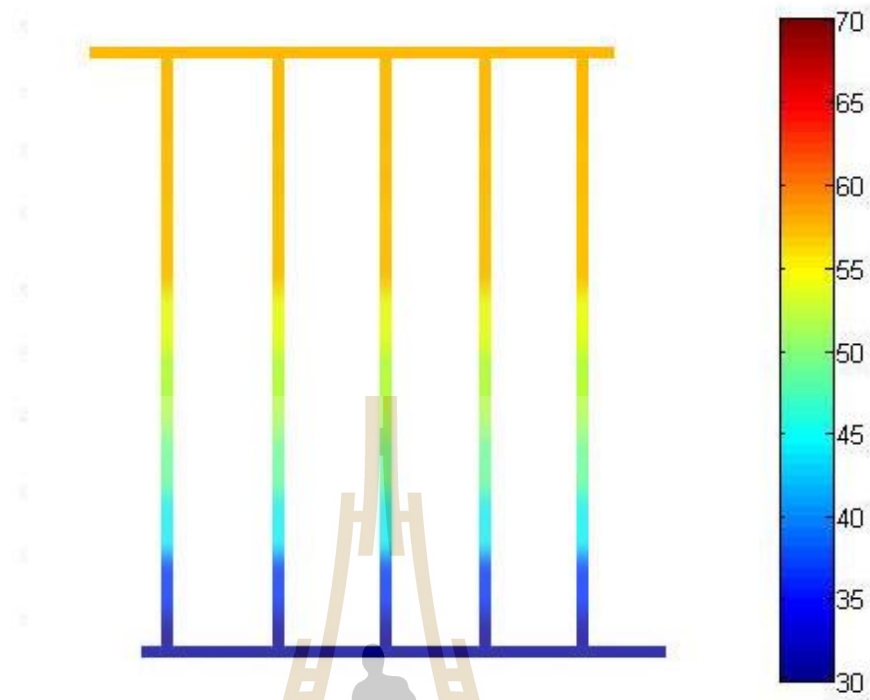


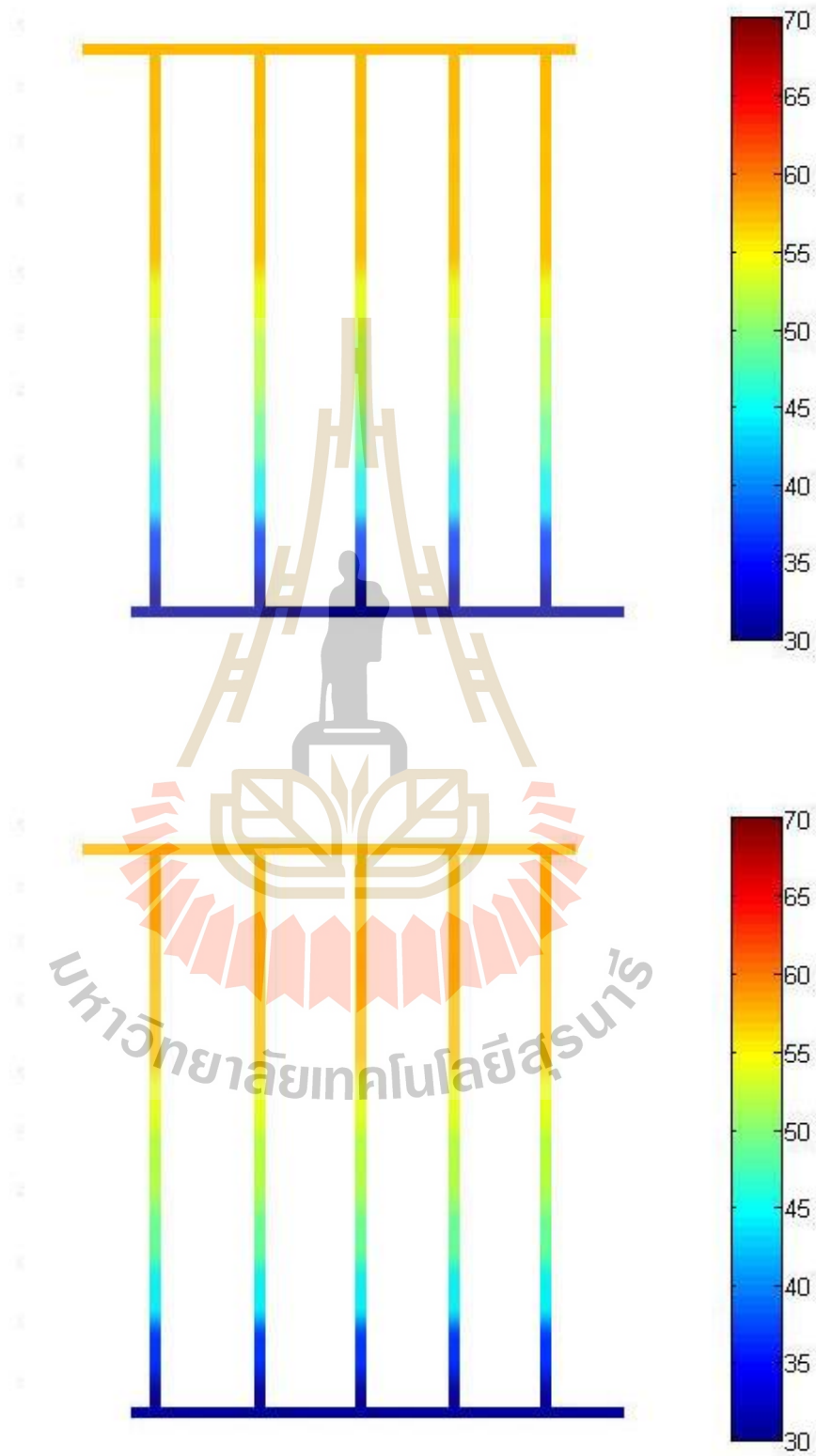


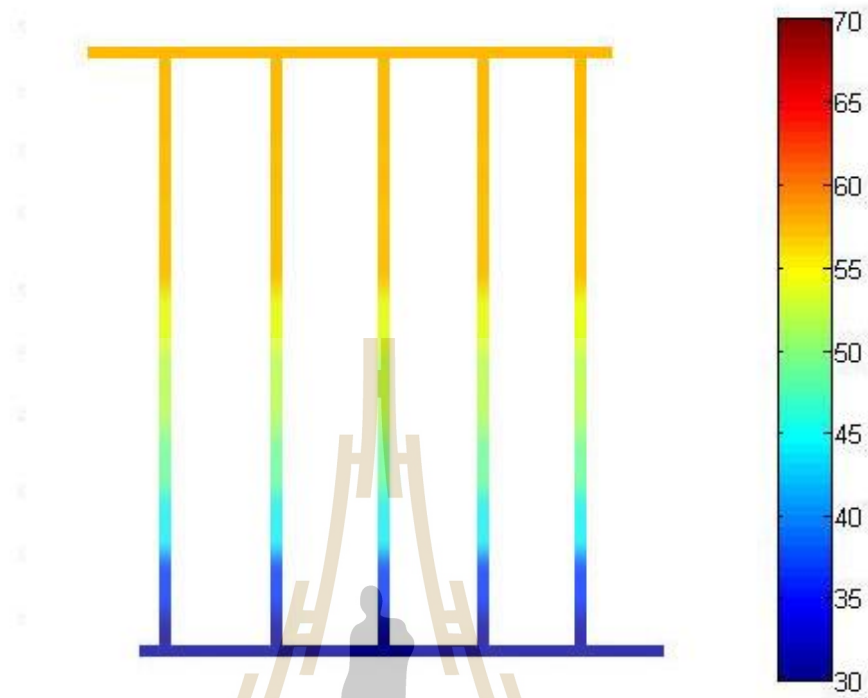
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



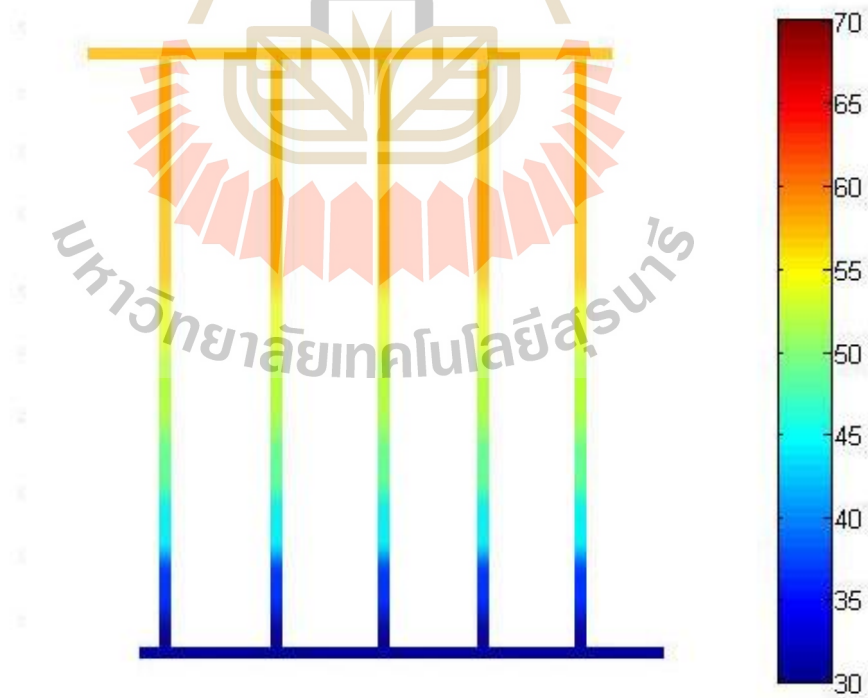
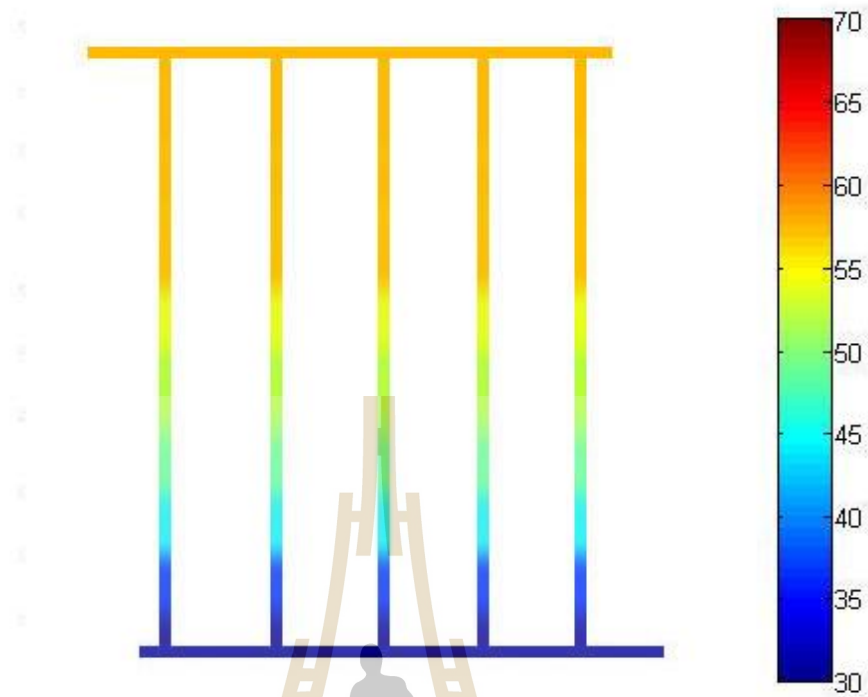


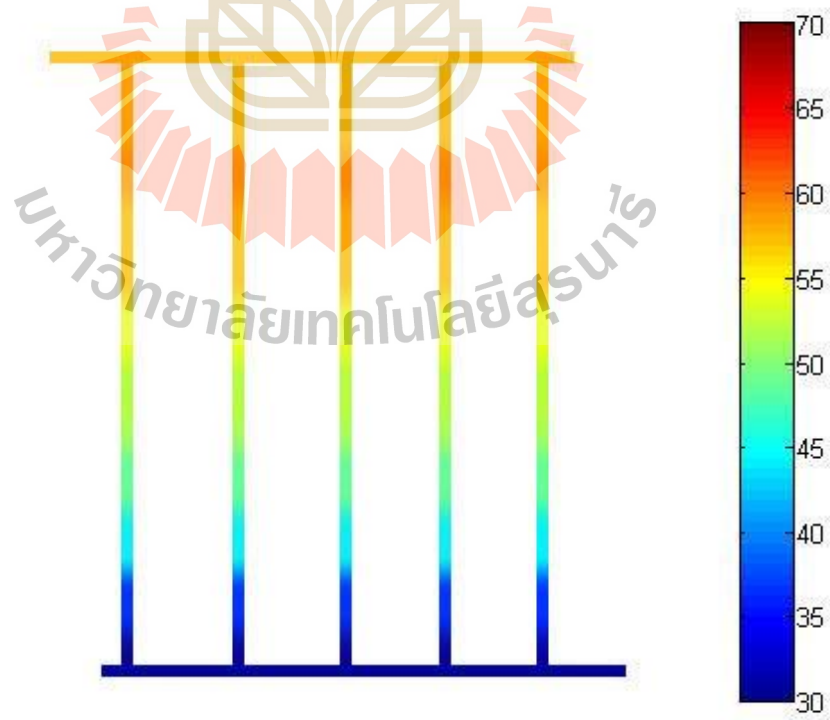
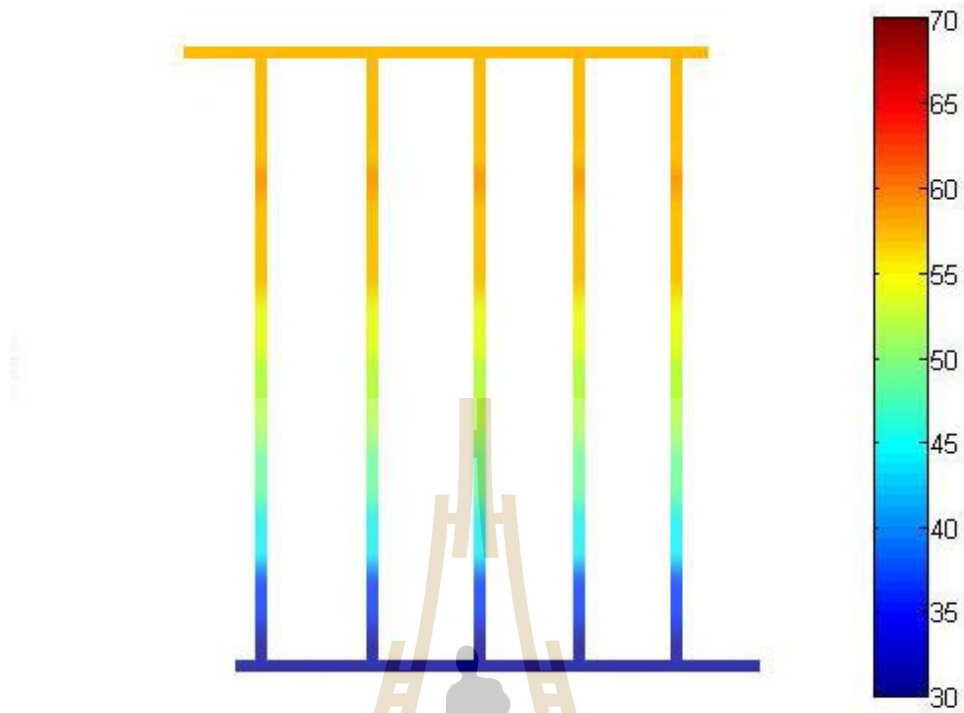






มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





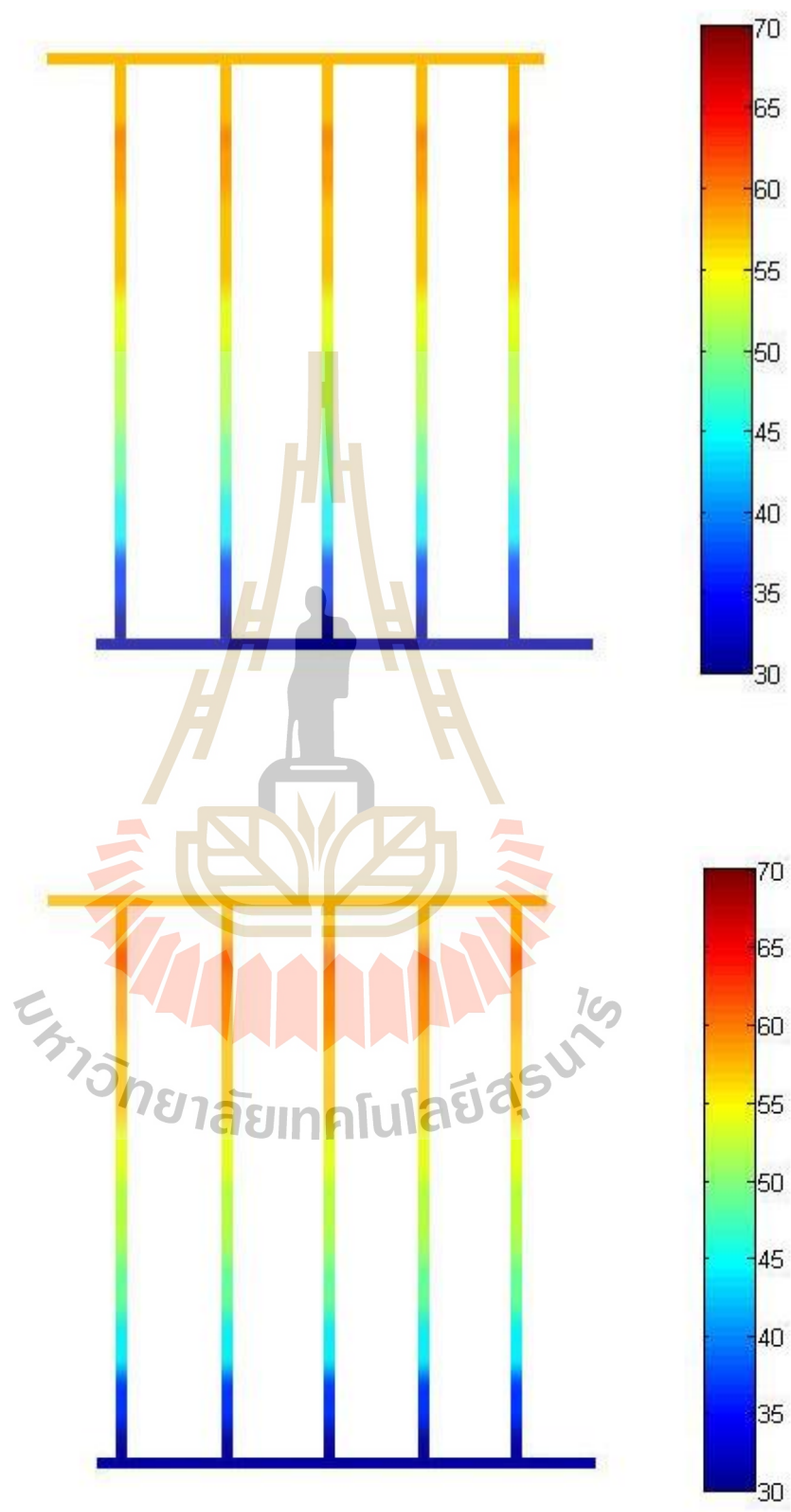
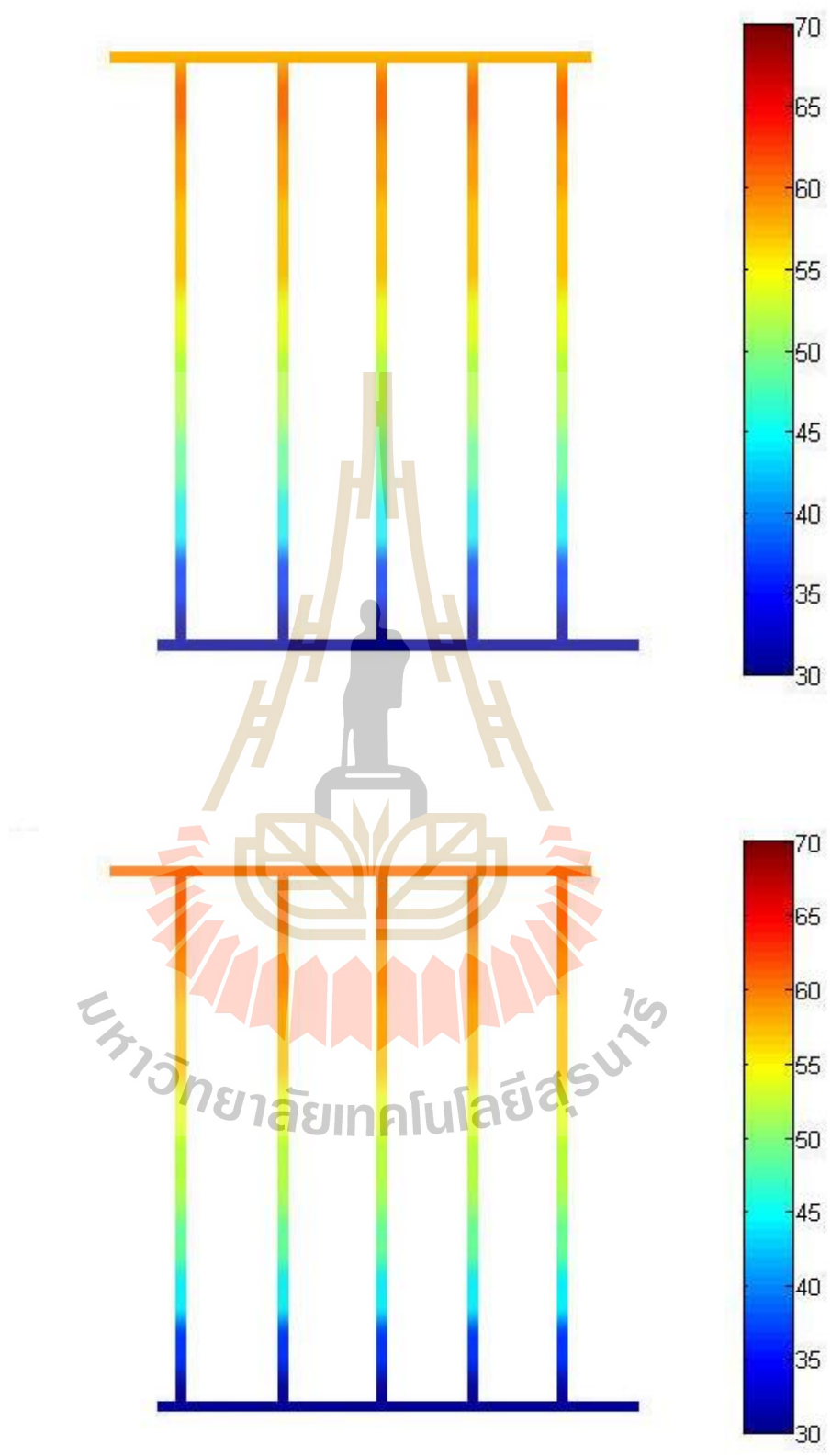
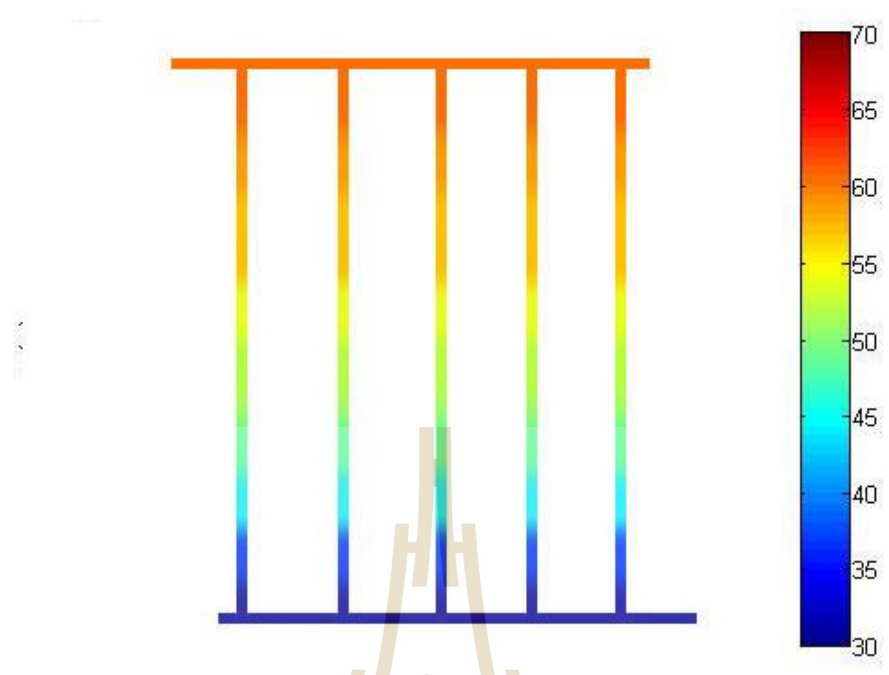


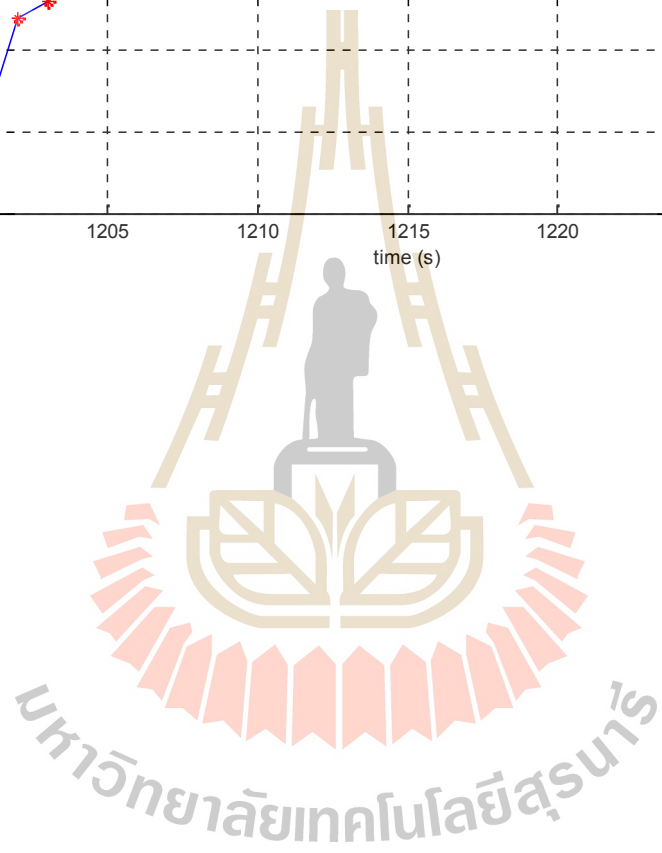
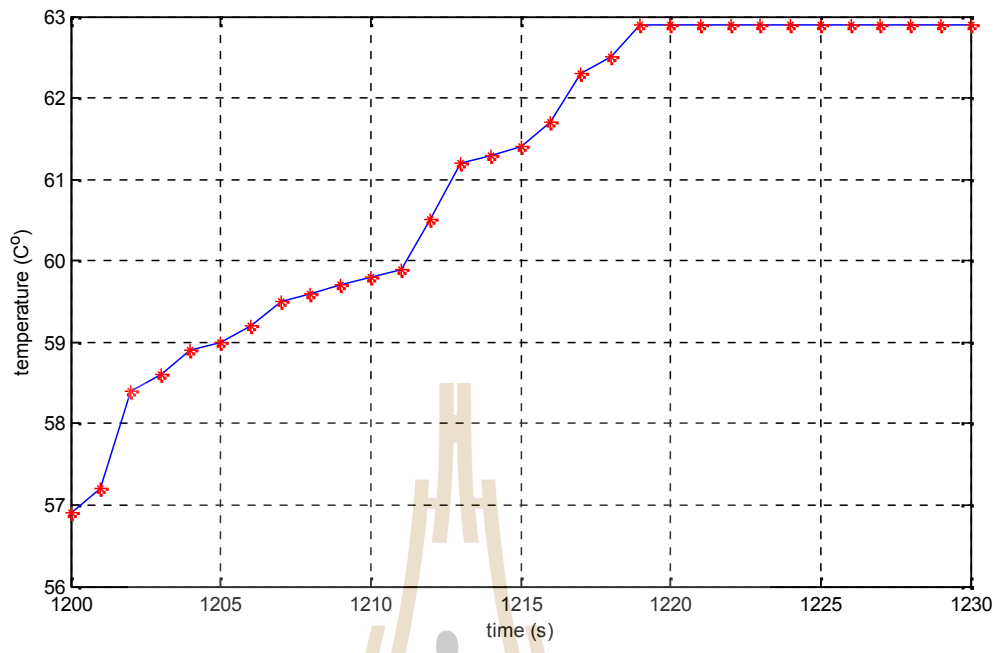
Figure 2

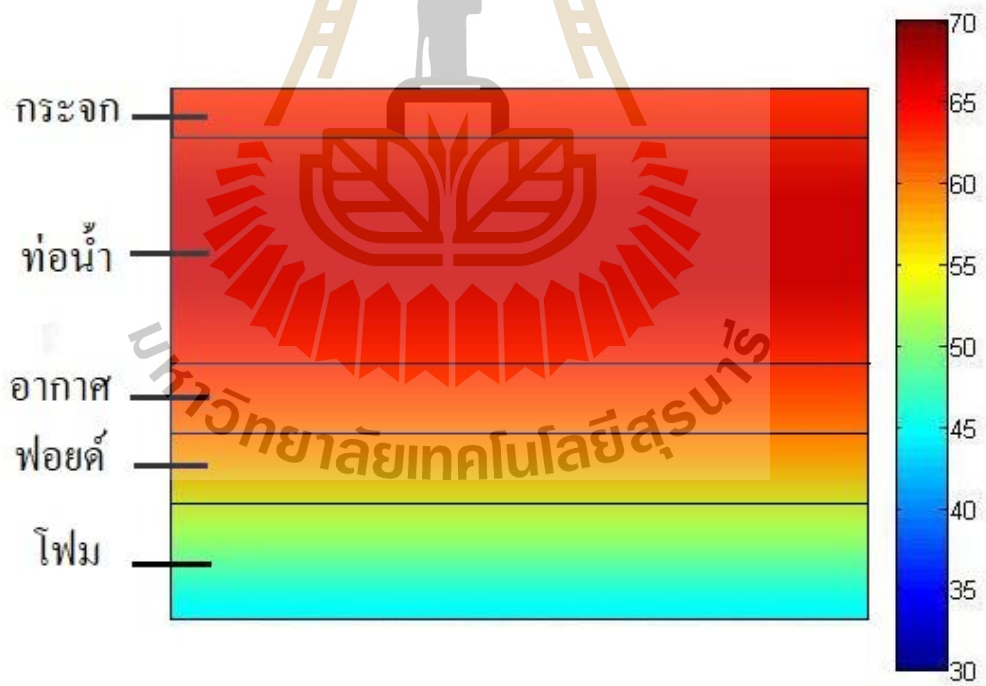
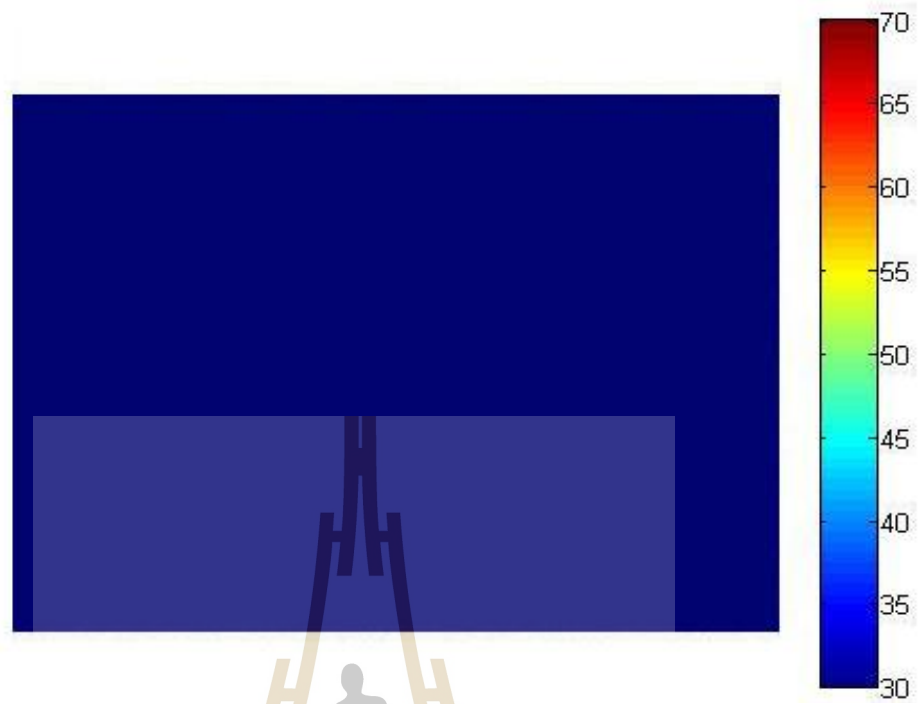


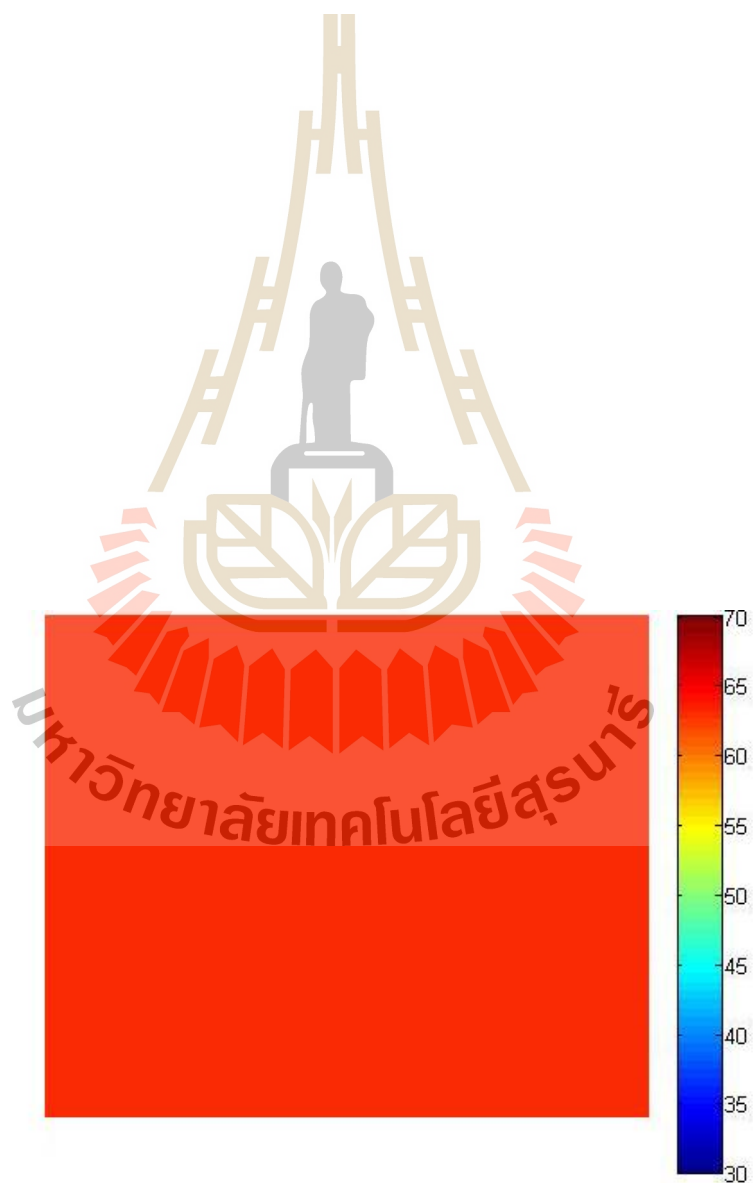
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

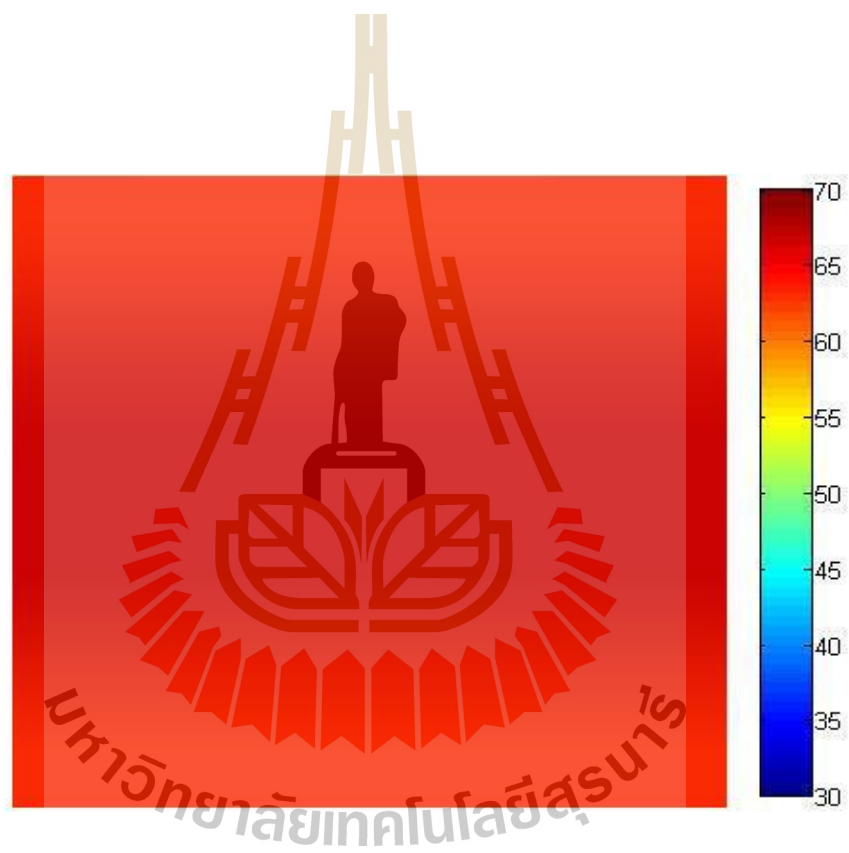


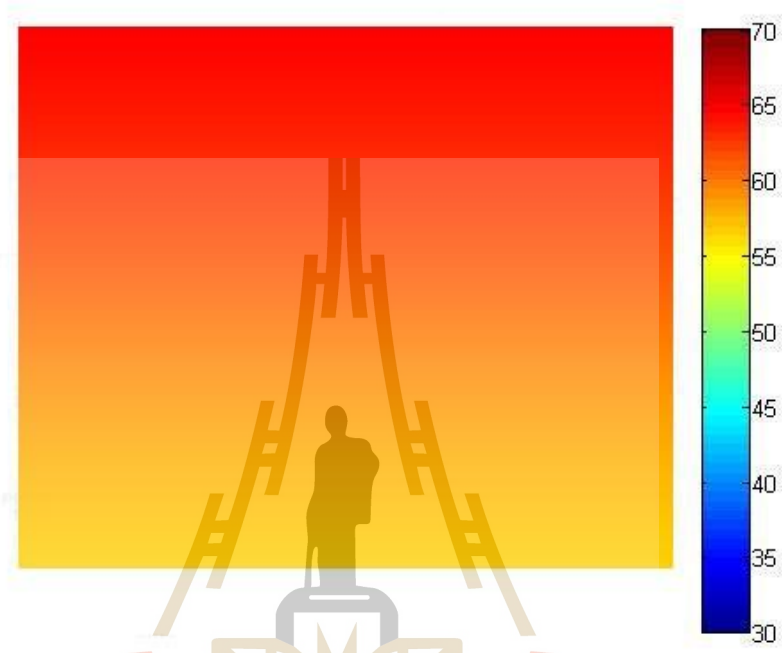




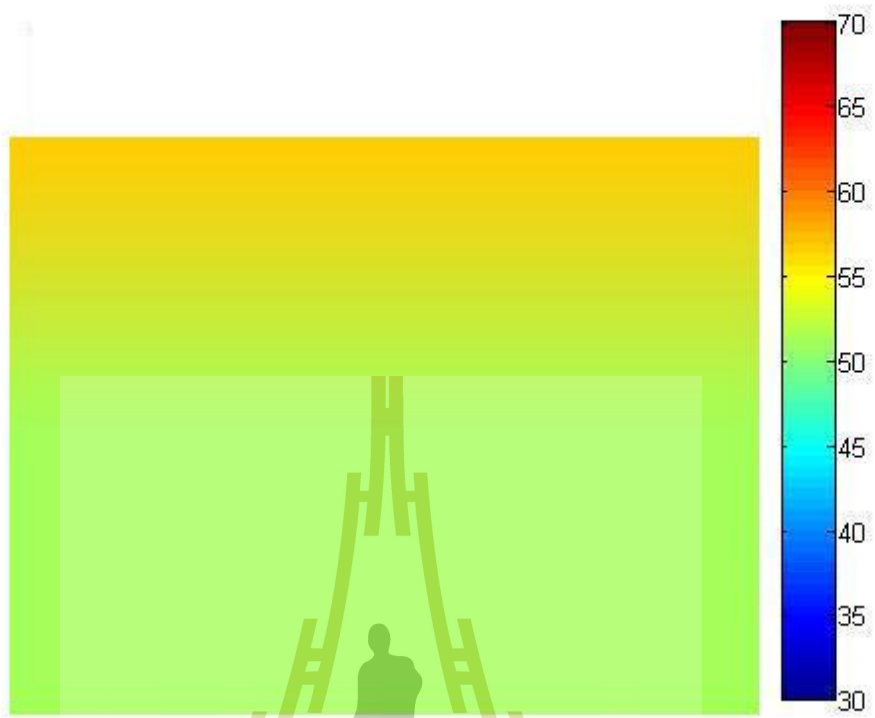


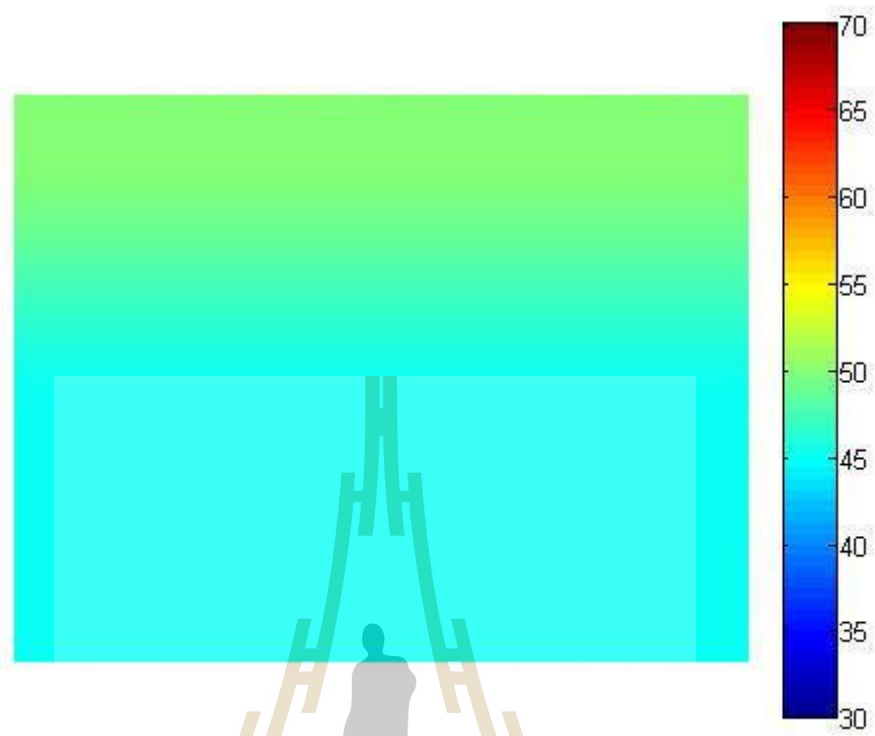


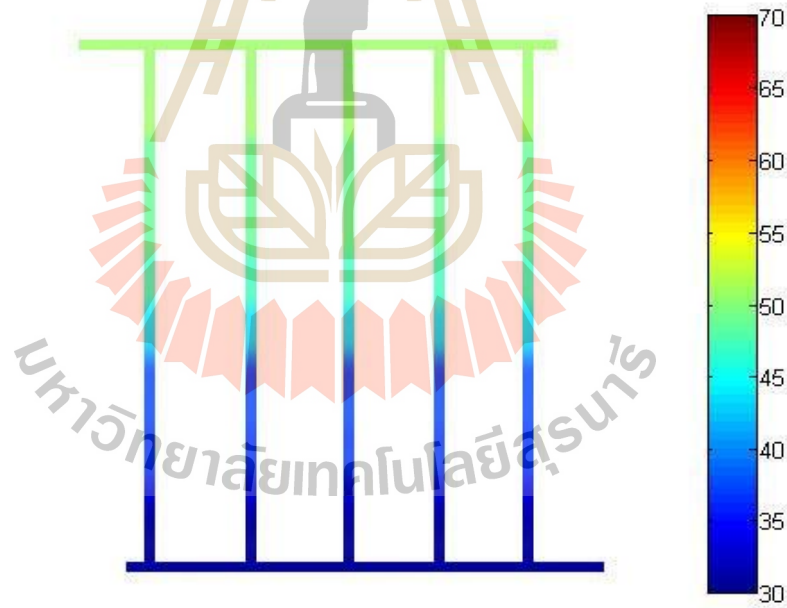
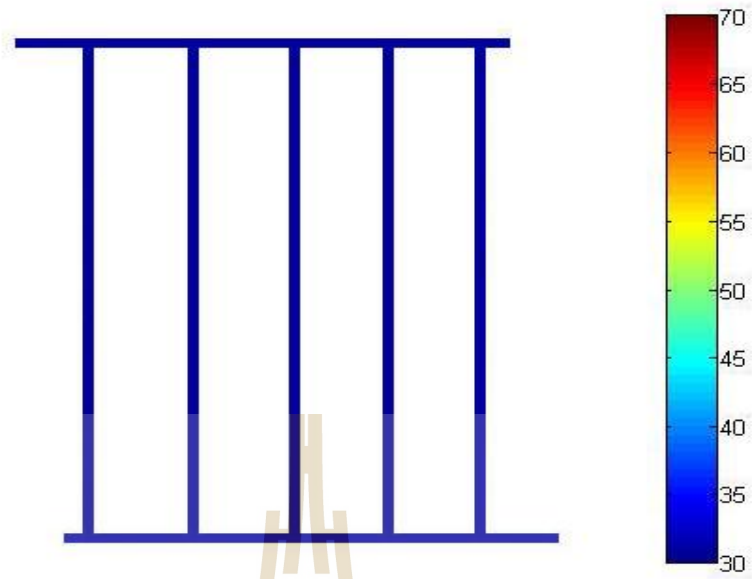




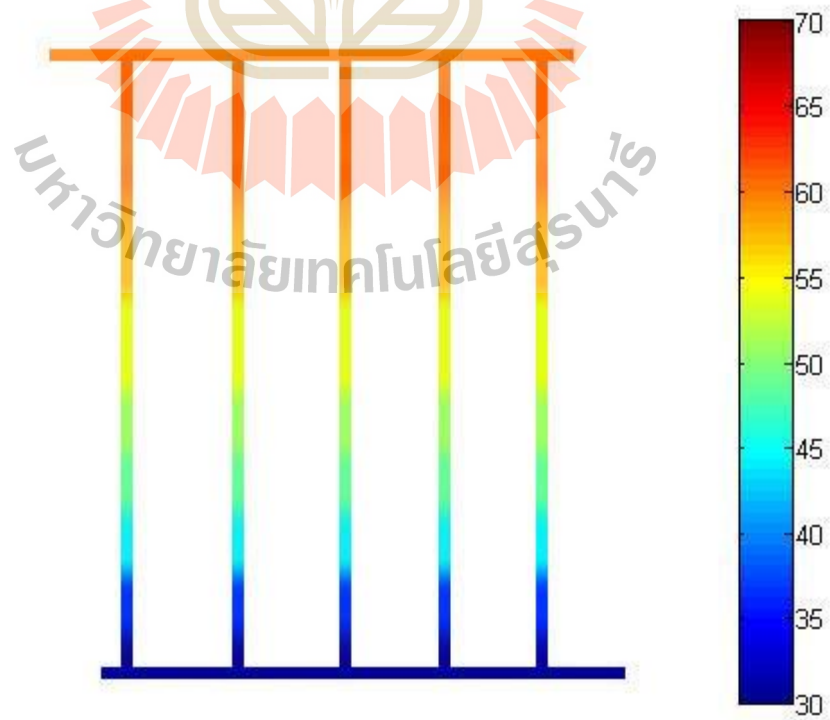
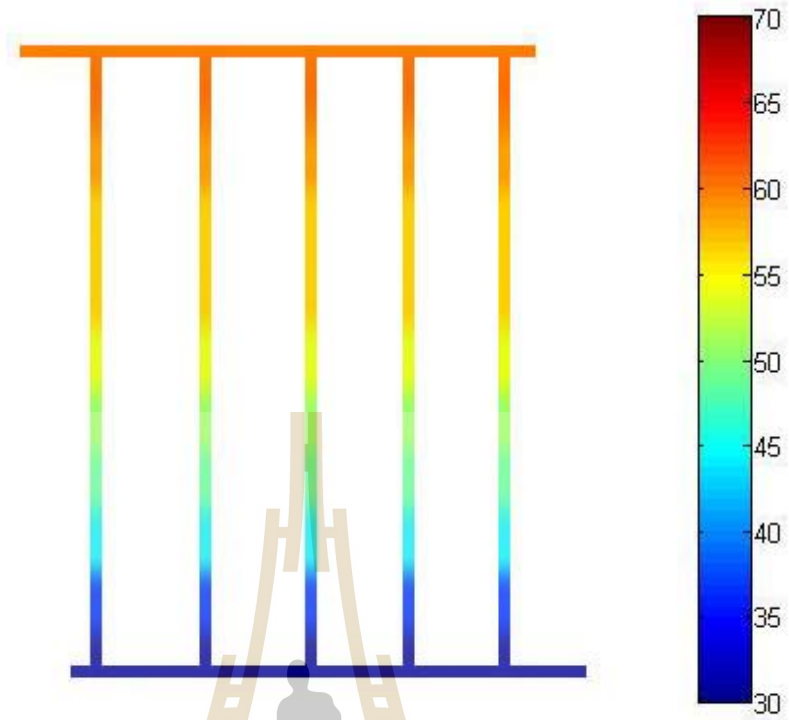
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

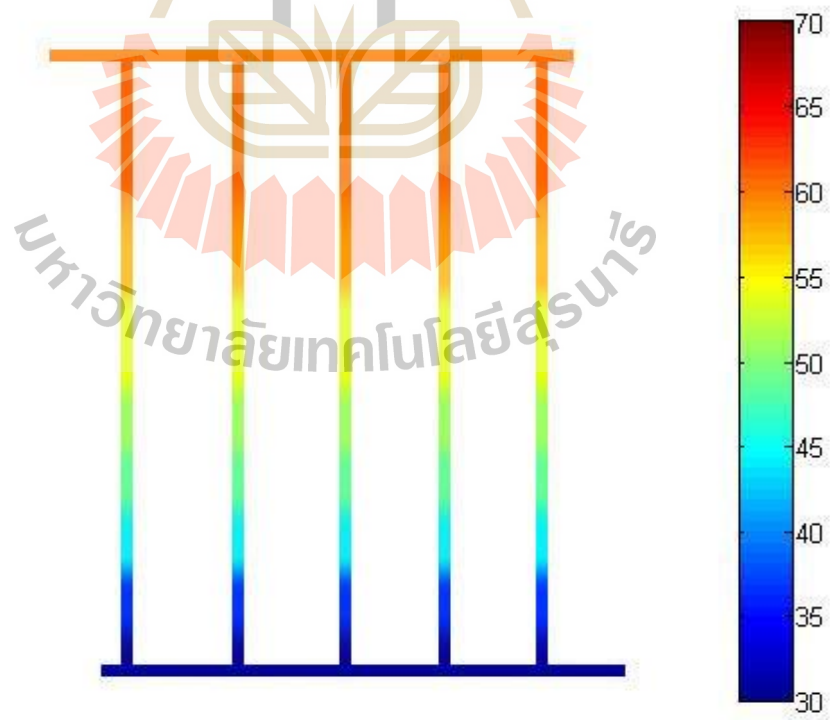
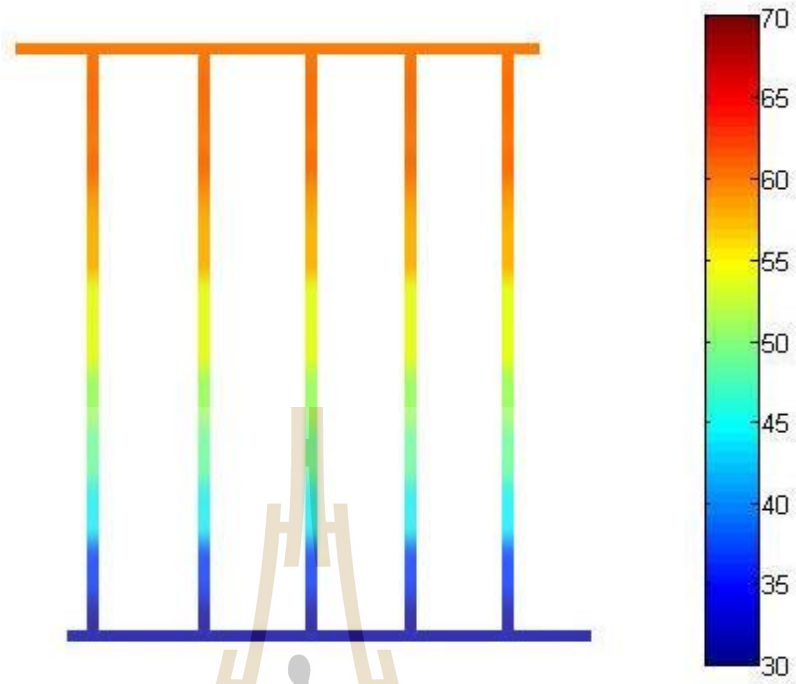


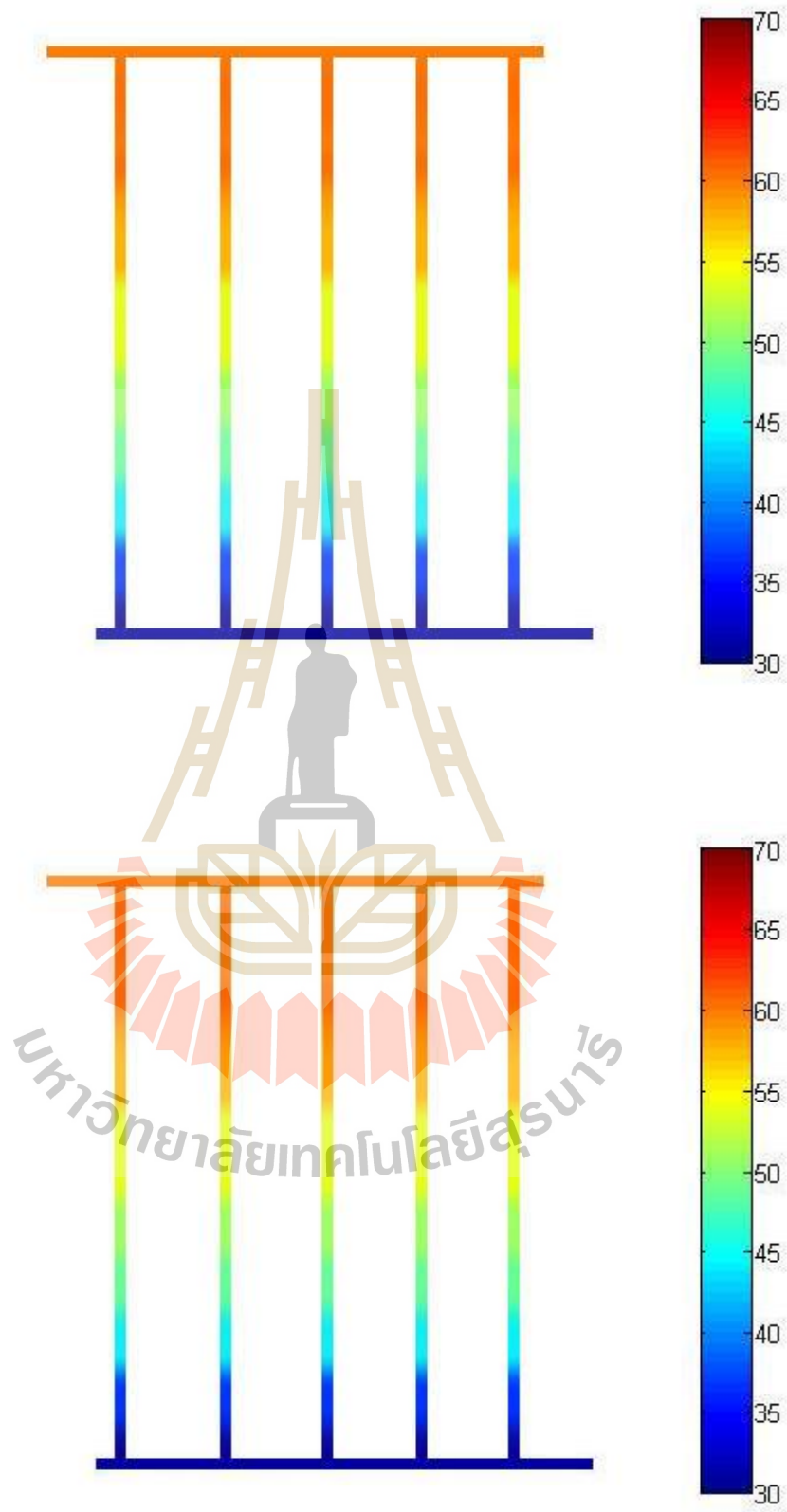


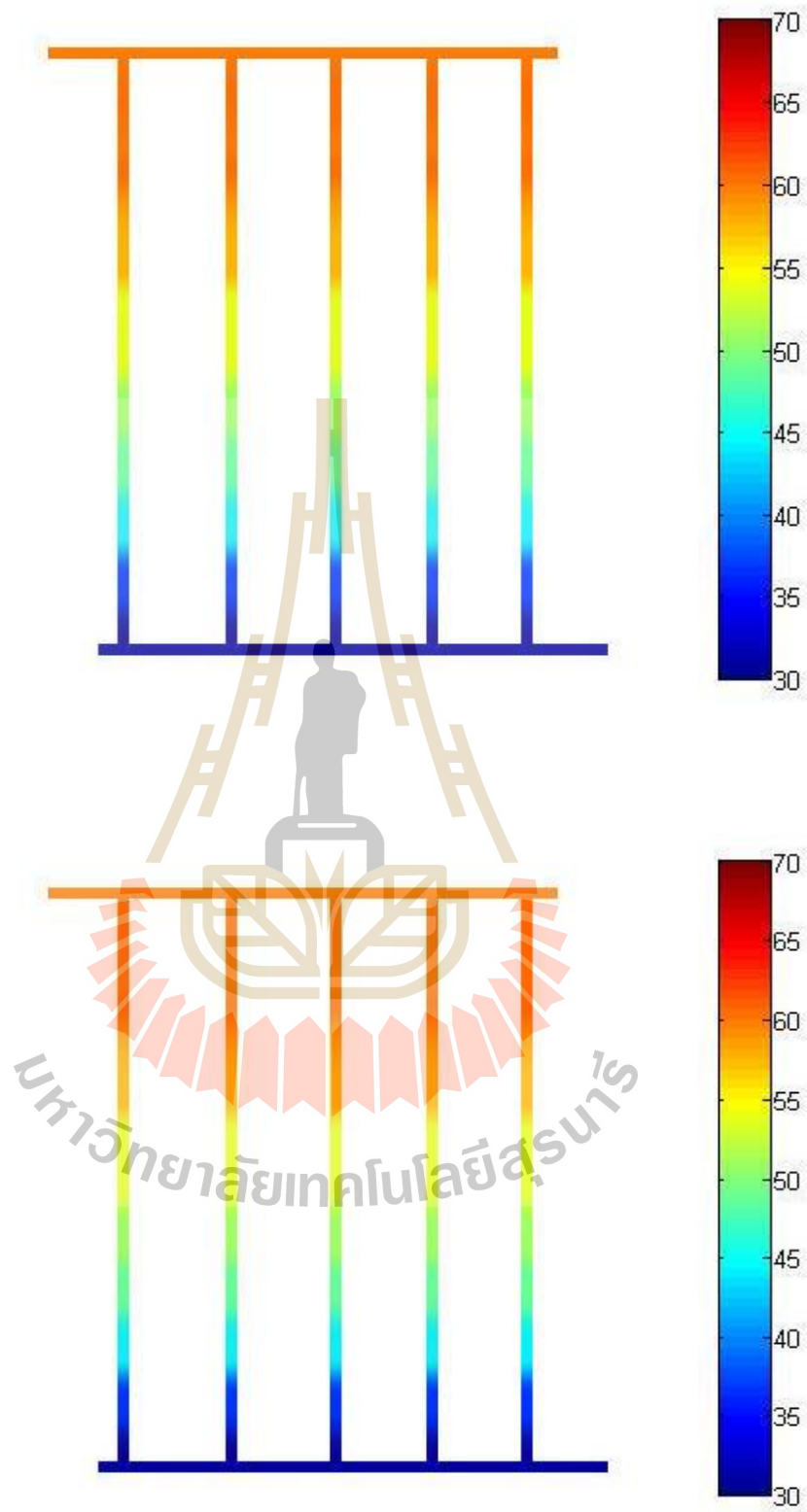


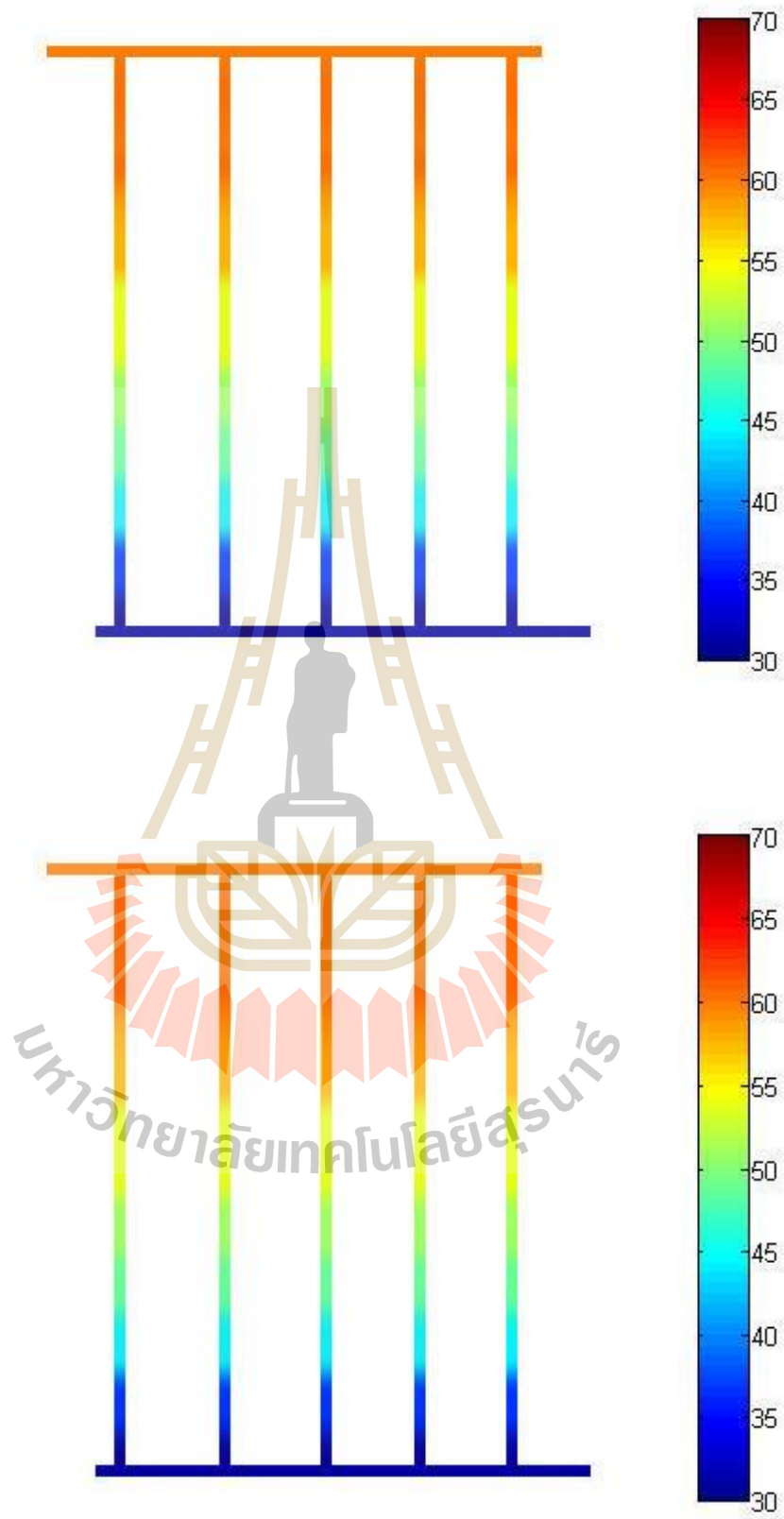


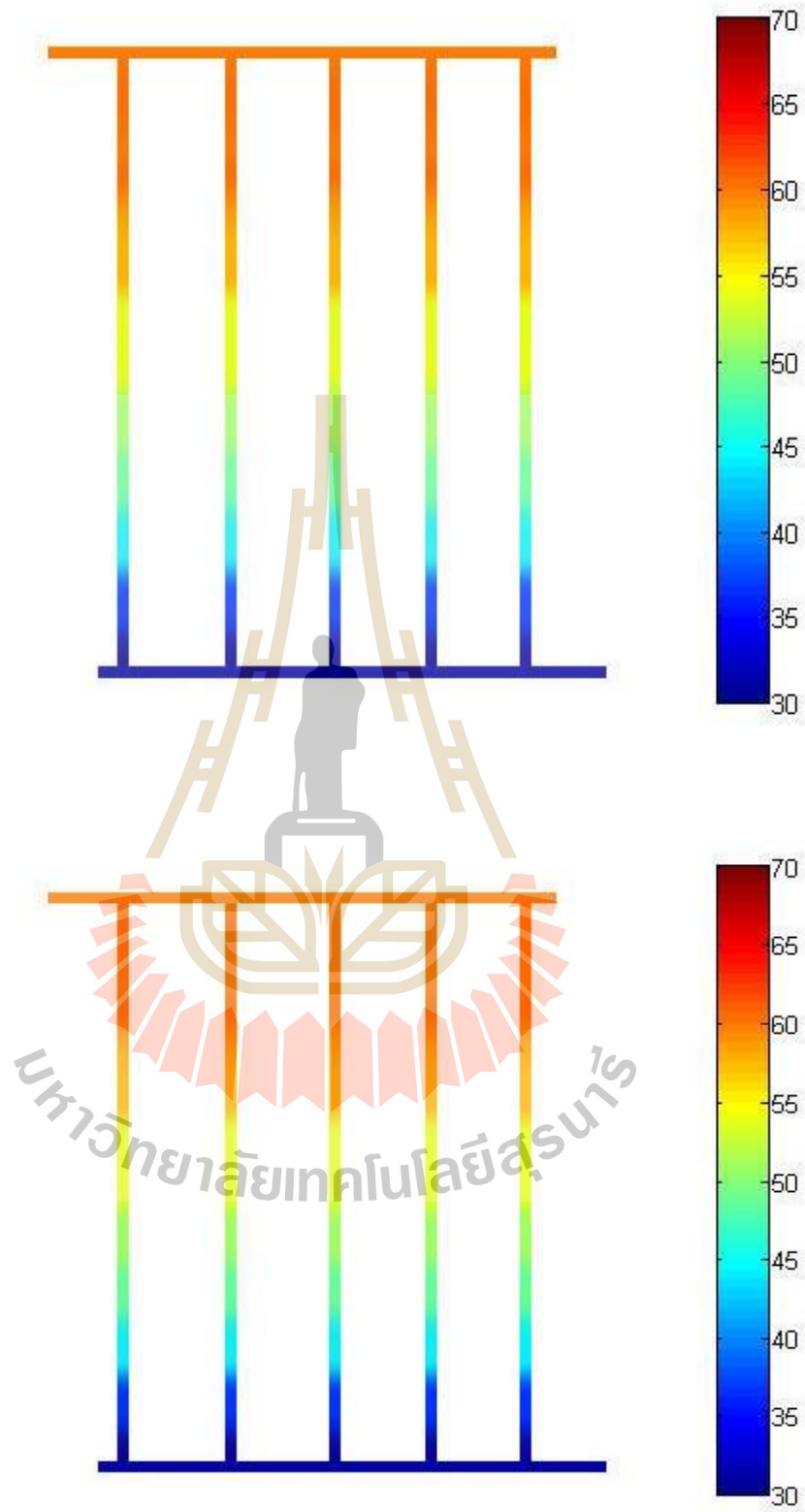


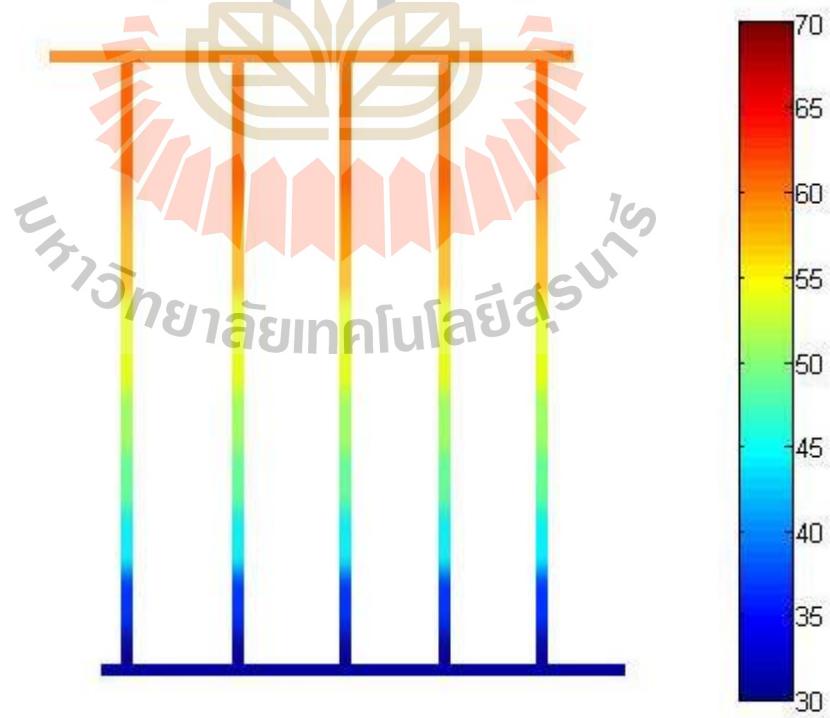
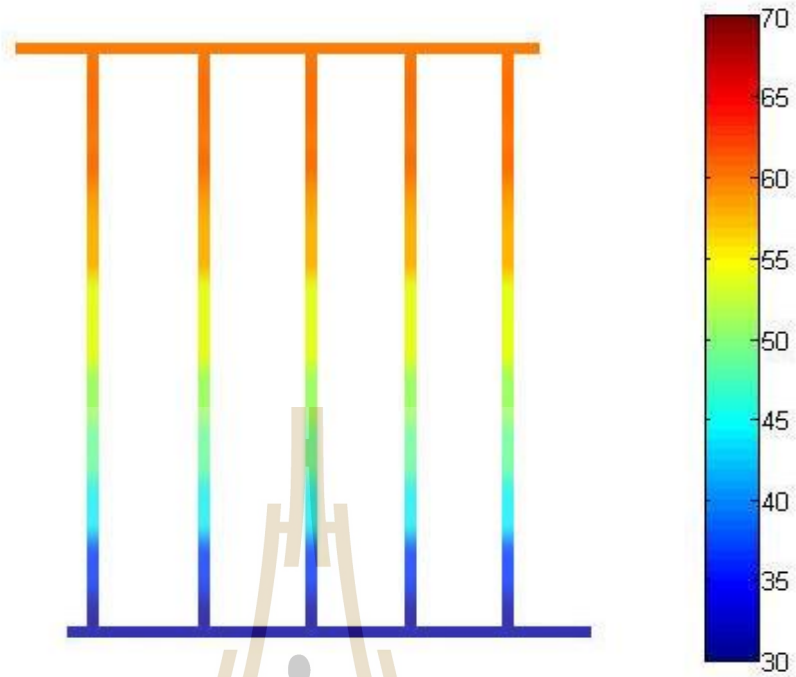


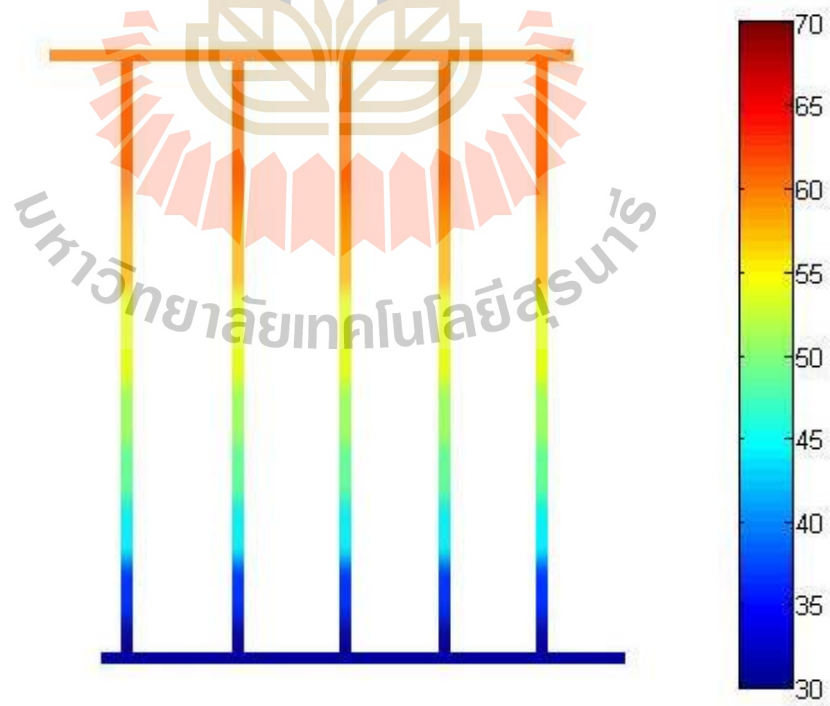
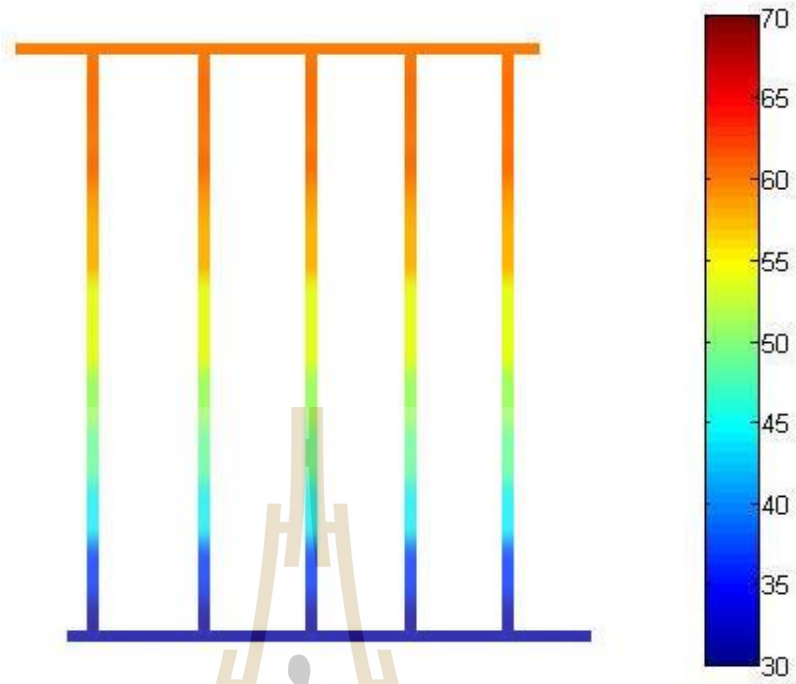






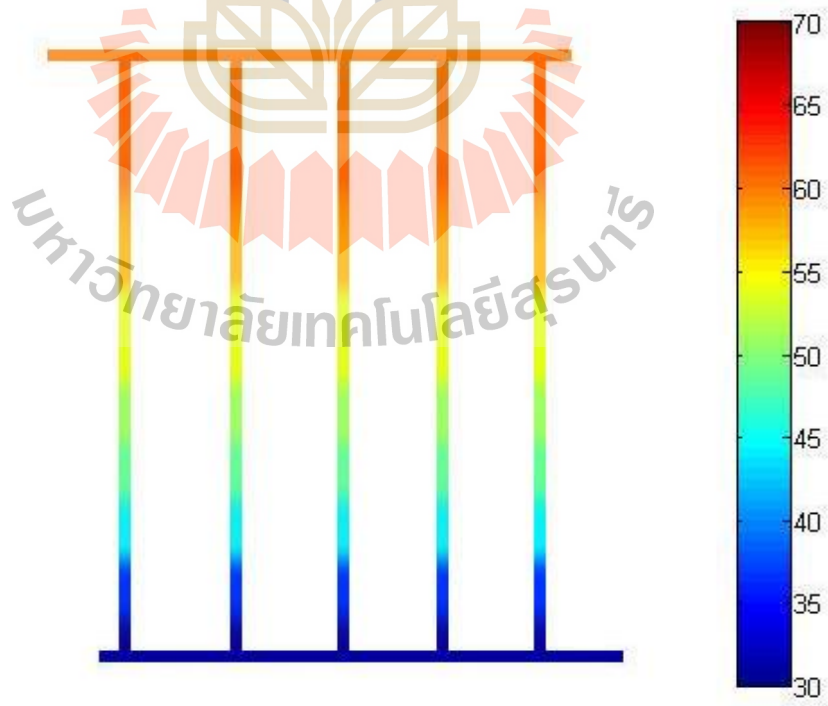
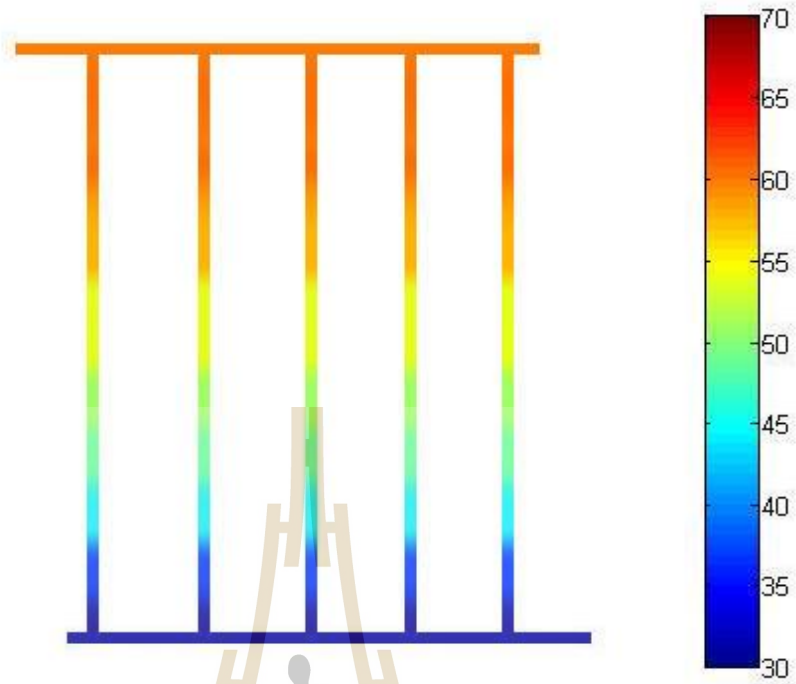


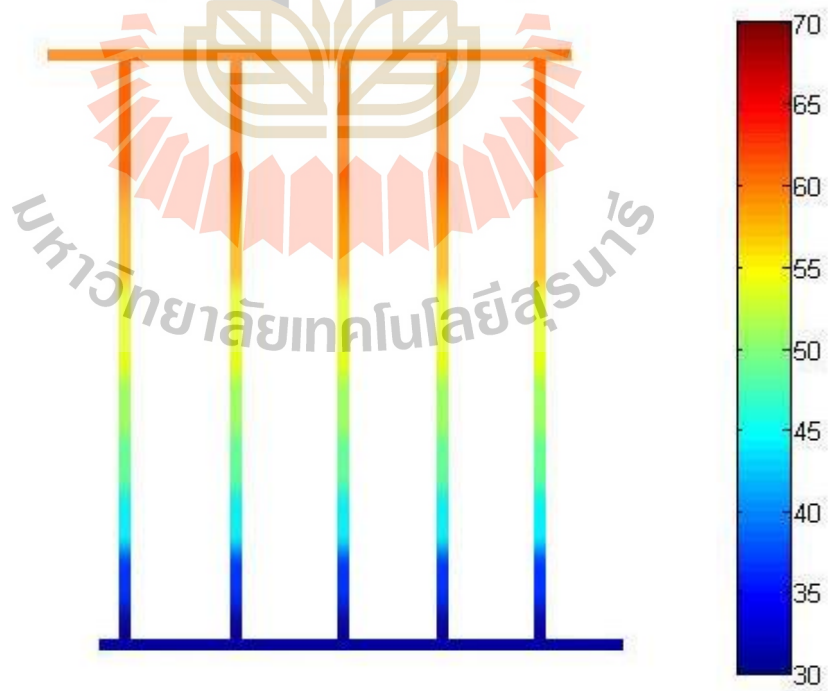
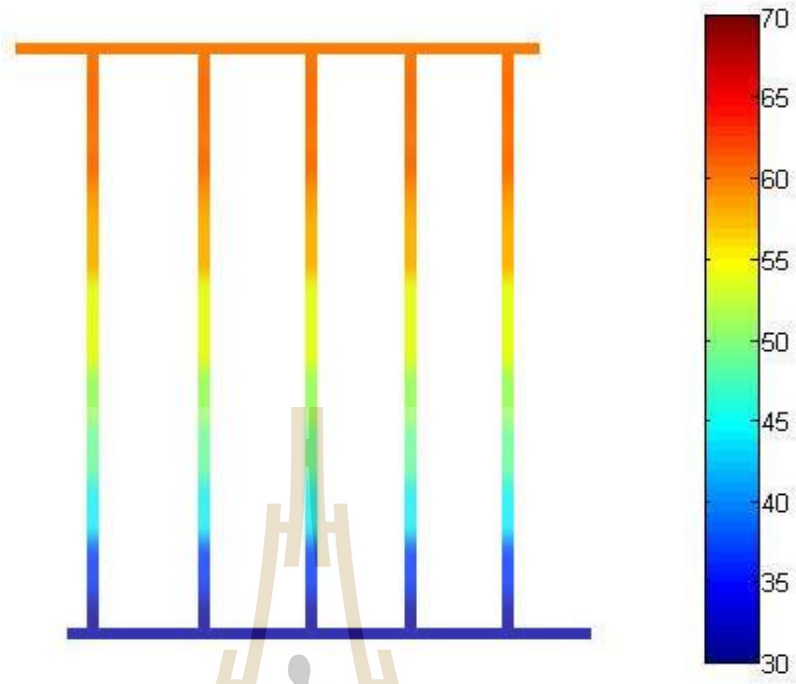


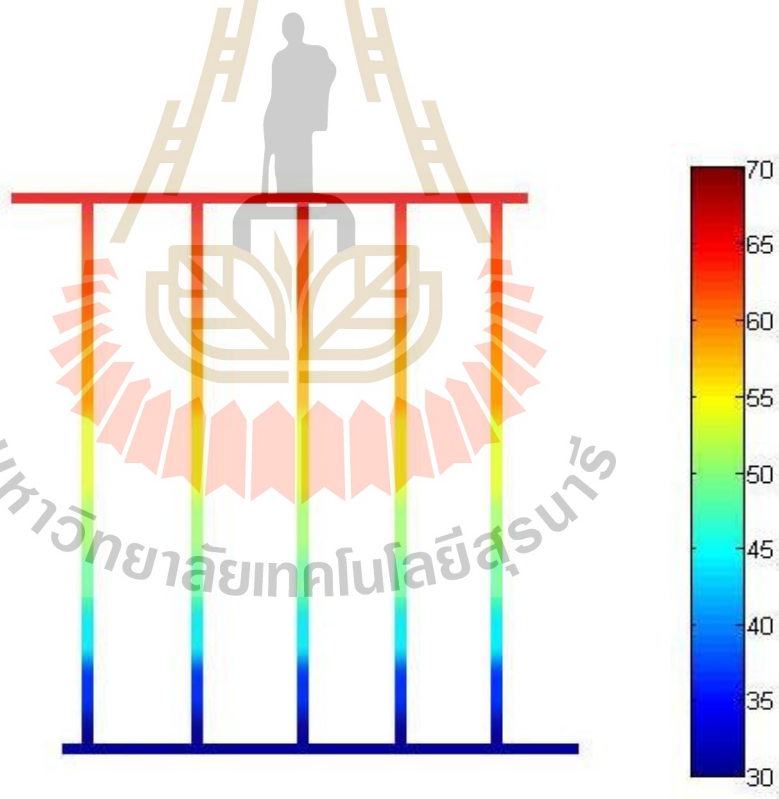
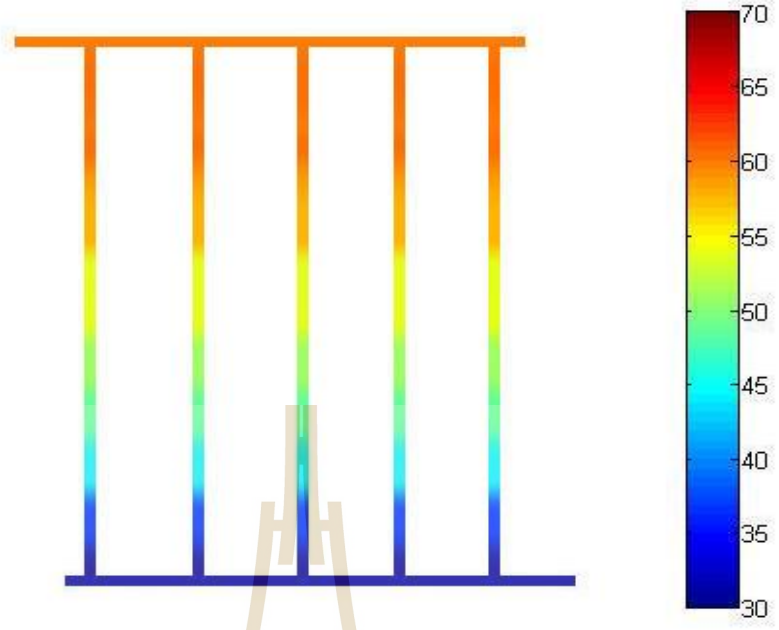


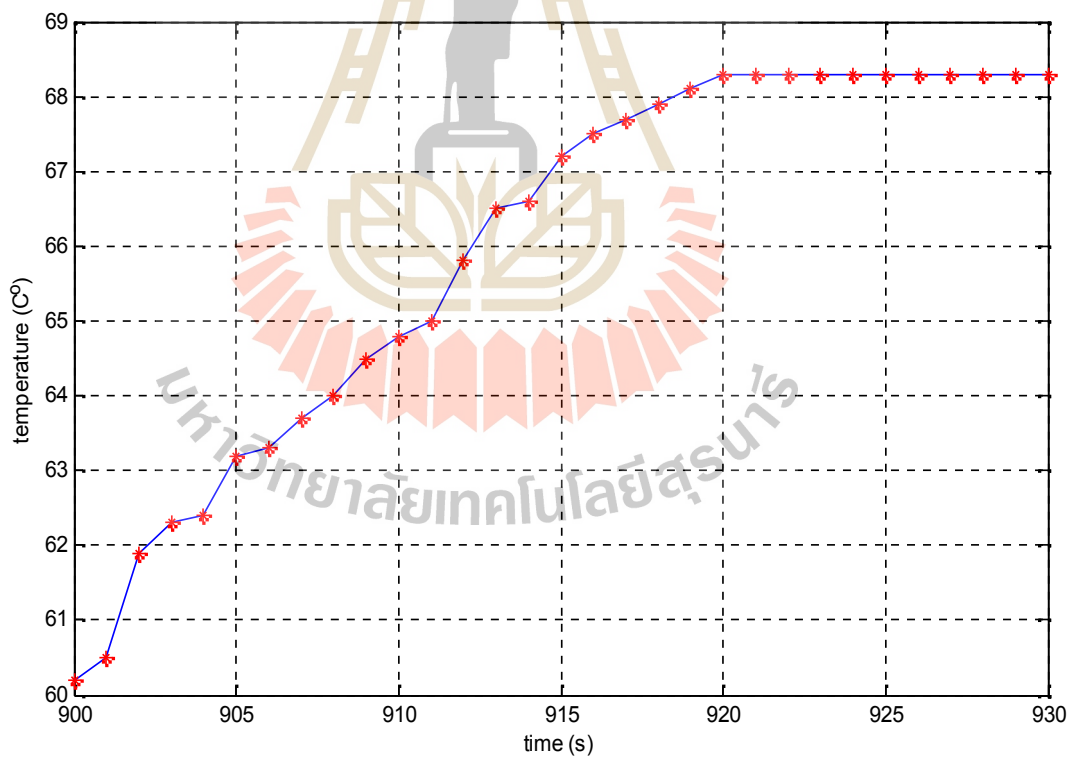
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี











จากรูปที่ 5.19 เป็นการกระจายตัวอุณหภูมิสูงสุดซึ่งเป็นน้ำขาออกที่นำไปใช้งานในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสงที่แปรตามเวลา โดยจะพิจารณาช่วงความร้อนเดินทางถึงท่อน้ำแล้วเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าความร้อนเริ่มเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เพราะน้ำได้รับการถ่ายความร้อนจากท่อโดยตรง ซึ่งตั้งแต่เวลาประมาณ 920 วินาทีเป็นต้นไป น้ำจะอยู่ในสภาพคงที่ เนื่องจากน้ำที่ร้อนแล้วไหลออกไปเรื่อย ๆ และน้ำเย็นใหม่นั้นไหลเข้ามาแทนที่ตำแหน่งเดิม

## 5.5 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้น

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี และอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบที่พัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง โดยจะพิจารณากระจก แผ่นดูดกลืนรังสี ชั้นท่อน้ำ ฟอยล์ และโพน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้น

ผลการจำลอง	อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี		อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง	
	T สูงสุด (°C)	T ต่ำสุด (°C)	T สูงสุด (°C)	T ต่ำสุด (°C)
กระจก	58.1	56.3	63.1	63.4
น้ำ	<b>62.9</b>	30	<b>68.3</b>	30
แผ่นดูดกลืนรังสี	61.4	57.7	-	-
ชั้นอากาศ	-	-	63.4	56.4
ฟอยล์	57.7	49.5	56.4	50.3
โพน	49.5	42.3	50.3	44.8

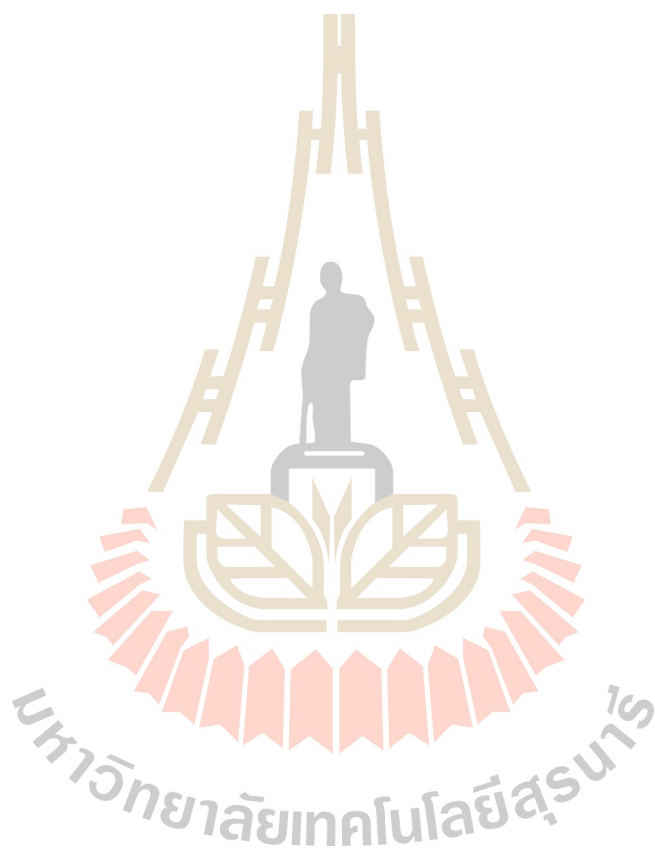
จากตารางที่ 5.2 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี และอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง โดยโปรแกรม FEM แบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นเอง จะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสงนั้น จะมีค่าสูงกว่าอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี เนื่องจากการเพิ่มแผงพาราโบลิกรวมแสงเข้าไปแทนแผ่นดูดกลืนรังสี ซึ่งจะรวมความร้อนไปยังท่อน้ำ ส่งผลทำให้ค่าปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เองของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง สูงกว่าปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เองของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี น้ำที่ได้จากการเพิ่มแผงพาราโบลิกรวมแสงจึงร้อนกว่าน้ำที่ใช้แผ่นดูดกลืนรังสี

## 5.6 สรุป

บทที่ 5 เป็นการอธิบายแนวทางการวิจัย โปรแกรมจำลองผล และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผล พร้อมทั้งผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี และแบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งโปรแกรมการจำลองผลอุณหภูมิ สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 5.1 จากผลรับของค่าอุณหภูมิจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ จากชั้นกระจก มาถึงชั้นของท่อน้ำ เนื่องจากการสะสมความร้อนทุก ๆ วินาทีที่แสงแดดส่องมายังอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และการถ่ายเทความร้อนของชั้นแผ่นดูดกลืนรังสีมายังท่อน้ำ ซึ่งท่อน้ำจะถ่ายเทความร้อนมายังน้ำ ทำให้อุณหภูมิสูงสุดบริเวณน้ำ จากนั้นชั้นของฟอยล์และโฟมจะทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอก ทำให้อุณหภูมินั้นจะค่อย ๆ ลดลงจากชั้นท่อน้ำลงมาชั้นของฟอยล์และโฟม จนอุณหภูมิมียุคใกล้เคียงกับอุณหภูมิโดยรอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

และจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสงนั้น จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี เนื่องจากการเพิ่มแผงพาราโบลิกรวมแสงเข้าไปแทนแผ่นดูดกลืนรังสี ซึ่งจะรวมความร้อนไปยังท่อน้ำ ส่งผลทำให้ค่าปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เองของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบ

ลึกรวมแสง สูงกว่าปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เองของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์  
แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี น้ำที่ได้จากแผงพาราโบลึกรวมแสงจึงร้อนกว่าน้ำที่ใช้แผ่นดูดกลืนรังสี



## บทที่ 6

### การออกแบบและสร้างพร้อมผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน ต้นแบบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

#### 6.1 บทนำ

ในบทที่ 5 เป็นการอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลพร้อมผลการจำลองค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในการคำนวณค่าอุณหภูมิ เพื่อศึกษาอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี และอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง สำหรับในบทที่ 6 นี้ เป็นการวิเคราะห์และออกแบบระบบพร้อมสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนต้นแบบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยเพิ่มแผงพาราโบลิกรวมแสงเข้าไปทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสีและอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนและเทอร์โมคัปเปิลในการทดสอบ พร้อมทั้งนำผลการทดสอบจริงที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากบทที่ 5

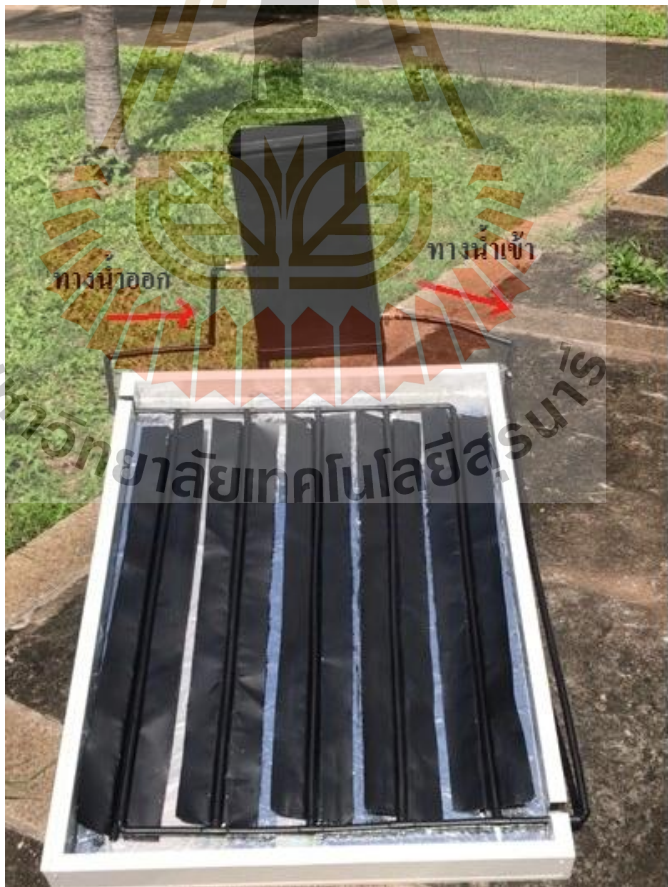
#### 6.2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบจริง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบระบบพร้อมสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี และอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง ดังต่อไปนี้

##### 6.2.1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี

อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี มีขนาดกว้าง 700 mm. ยาว 1000 mm. วางทำมุม 15 องศาจากแนวระดับ จะประกอบด้วยกระจกหนา 3 mm. มีหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนออก





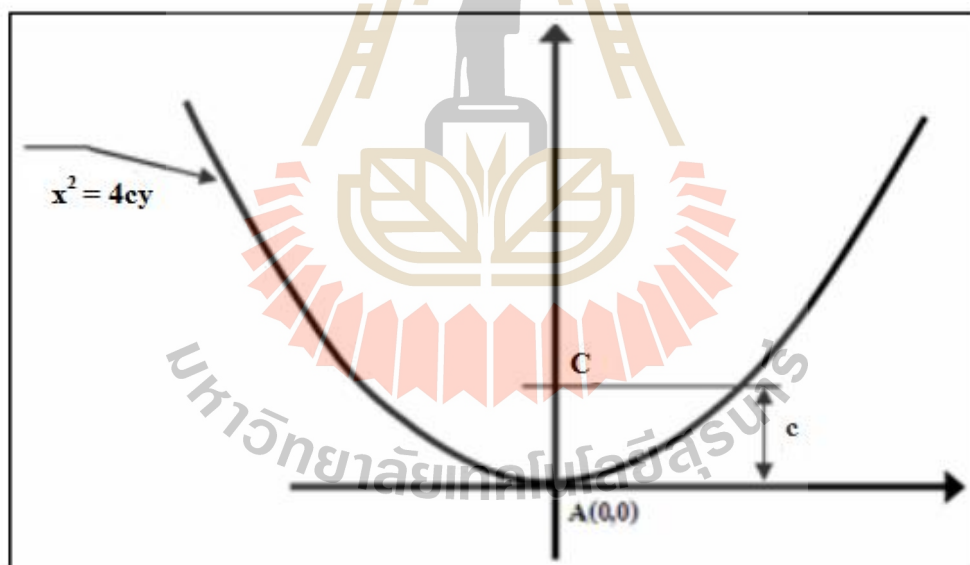


แสงซึ่งเป็นรังสีพาราโบลาที่รวมแสง โดยแสงจะสะท้อนตกไปยังท่อน้ำซึ่งเป็นตัวรับแสงชนิดโฟกัส เป็นเส้นเพราะเป็นท่อนยาว

แสงพาราโบลาที่รวมแสงนี้จะทำหน้าที่รับรังสีและสะท้อนไปรวมที่จุดโฟกัสเพื่อเพิ่มความเข้มของแสง ในการหาตำแหน่งของจุดโฟกัสนั้นเราใช้พื้นฐานของพาราโบลา สำหรับกรณีที่เป็นพาราโบลาที่สมมาตรแกน  $y$  สมการพาราโบลาเป็นดังสมการที่ (6-1) และรูปกราฟพาราโบลาแสดงได้ดังรูปที่ 6.3 (พฤษภา, 2551)

$$x^2 = 4cy \quad (6-1)$$

เมื่อ  $x$  คือ ระยะในแนวแกน  $x$   
 $y$  คือ ระยะในแนวแกน  $y$   
 $c$  คือ ระยะโฟกัส



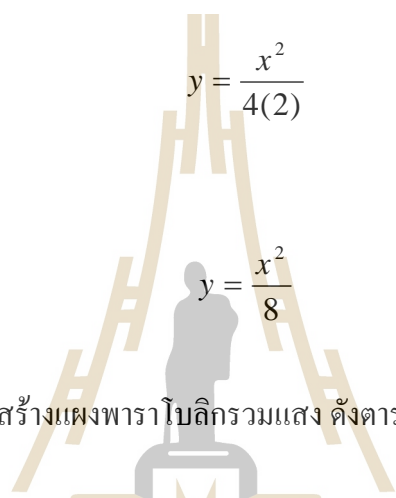
รูปที่ 6.3 ส่วนประกอบของพาราโบลา

การออกแบบแผงพาราโบลาที่รวมแสงจะได้จากการคำนวณสมการที่ (6-1) ดังนี้

$$x^2 = 4cy$$

$$y = \frac{x^2}{4c}$$

การออกแบบได้เลือกจุดโฟกัส  $c = 2$  cm เนื่องจากเป็นระยะโฟกัสที่เหมาะสม เพราะถ้าจุดโฟกัสอยู่สูงกว่า 2 cm จะทำให้แผงพาราโบลากรรมแสงใหญ่เกินไป ไม่สามารถวางในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้เพราะขอบจะทับกัน แต่ถ้าจุดโฟกัสต่ำกว่า 2 cm จะยุ่งยากต่อการสร้างแผงพาราโบลากรรมแสง

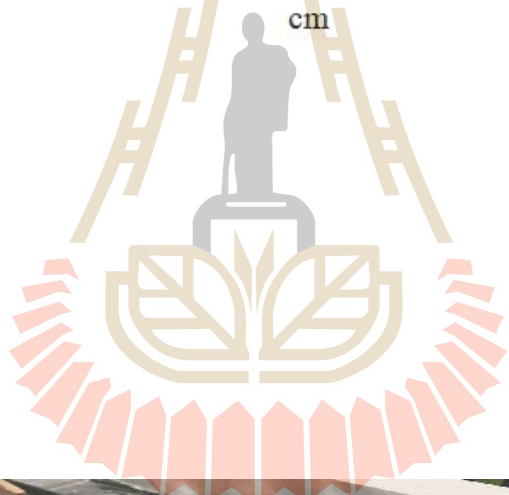
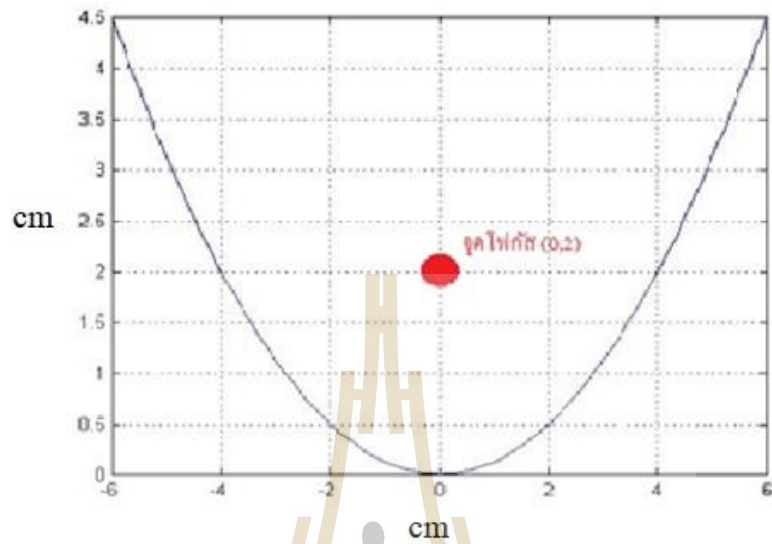


จะได้ค่า  $x$  และ  $y$  เพื่อนำไปสร้างแผงพาราโบลากรรมแสง ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 การออกแบบแผงพาราโบลากรรมแสง

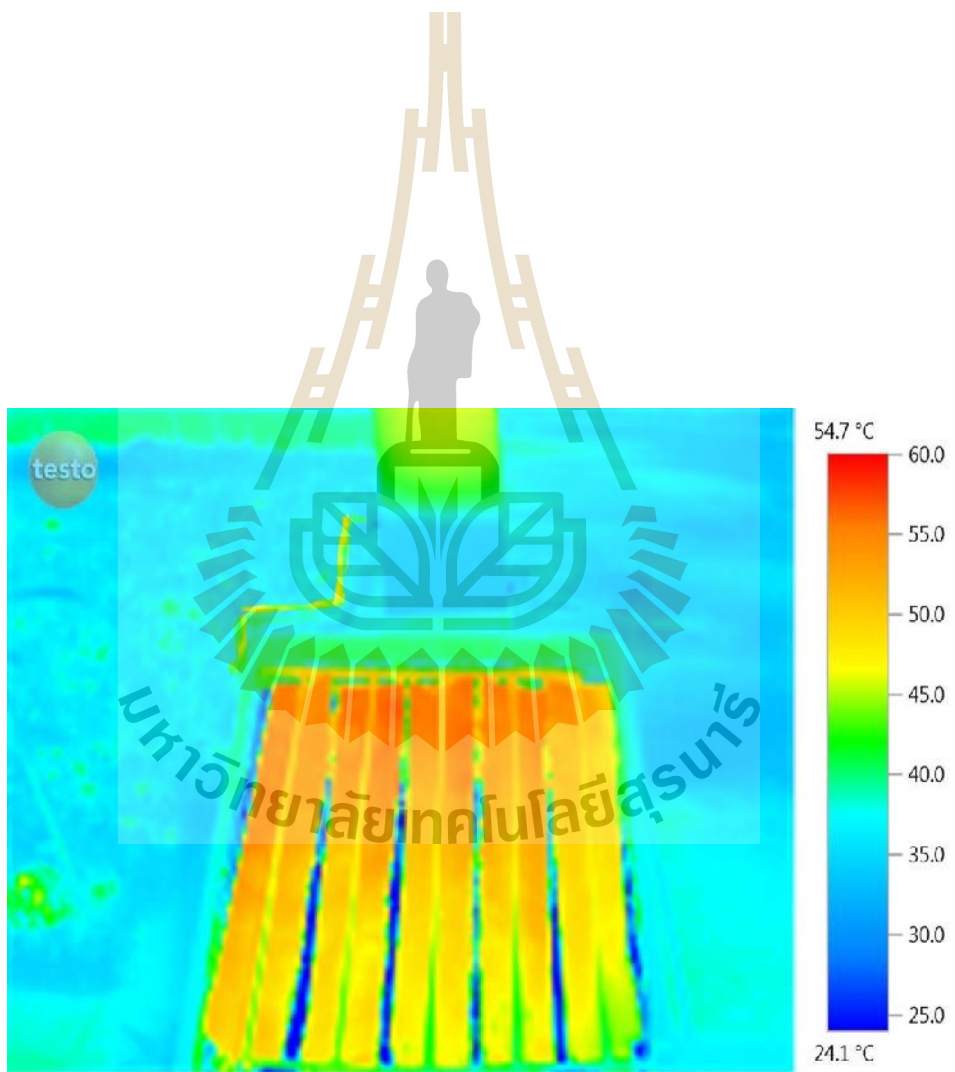
$x$ (cm)	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
$y$ (cm)	4.50	3.1250	2	1.1250	0.5	0.1250	0

$x$ (cm)	1	2	3	4	5	6
$y$ (cm)	0.1250	0.5	1.1250	2	3.1250	4.50

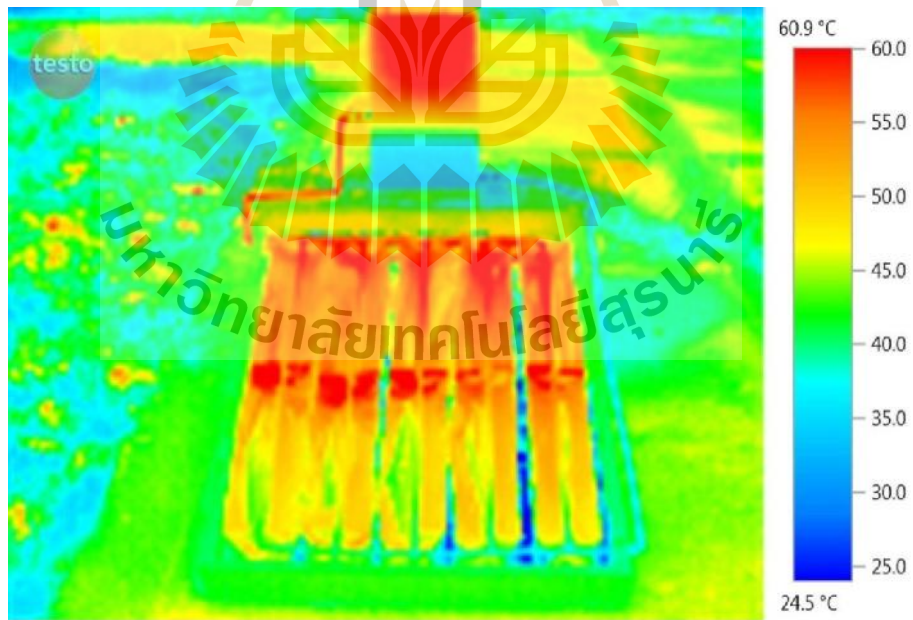




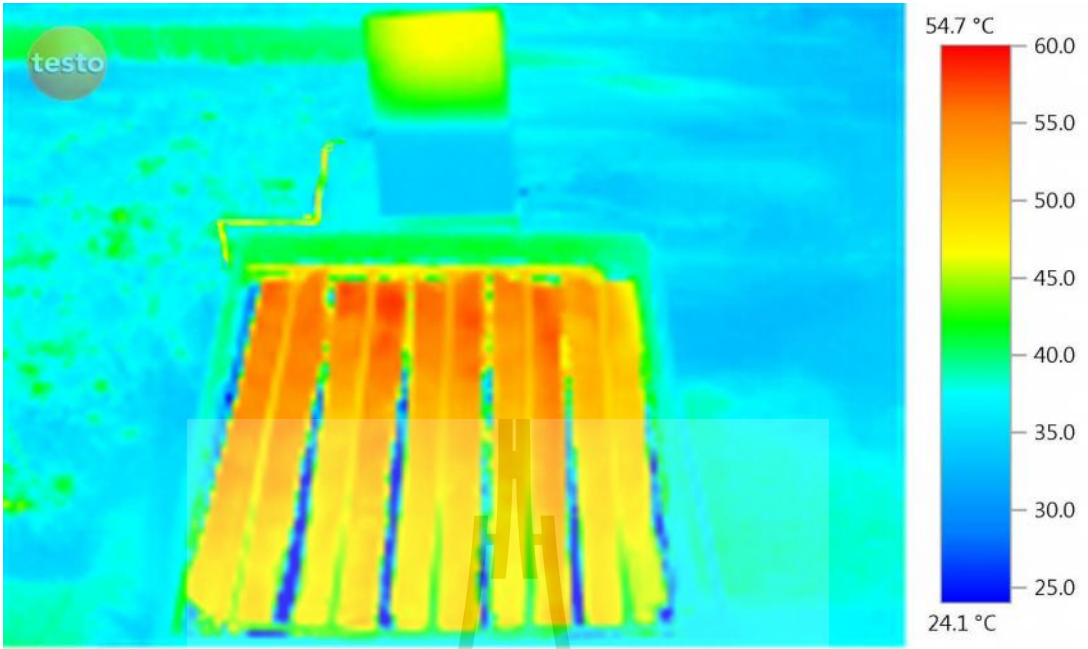


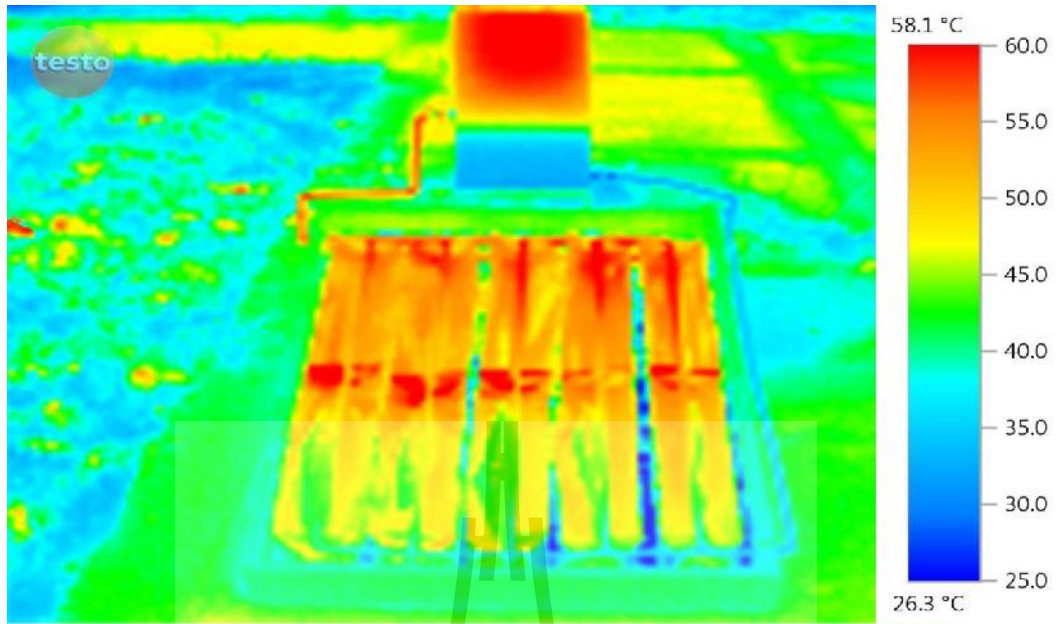


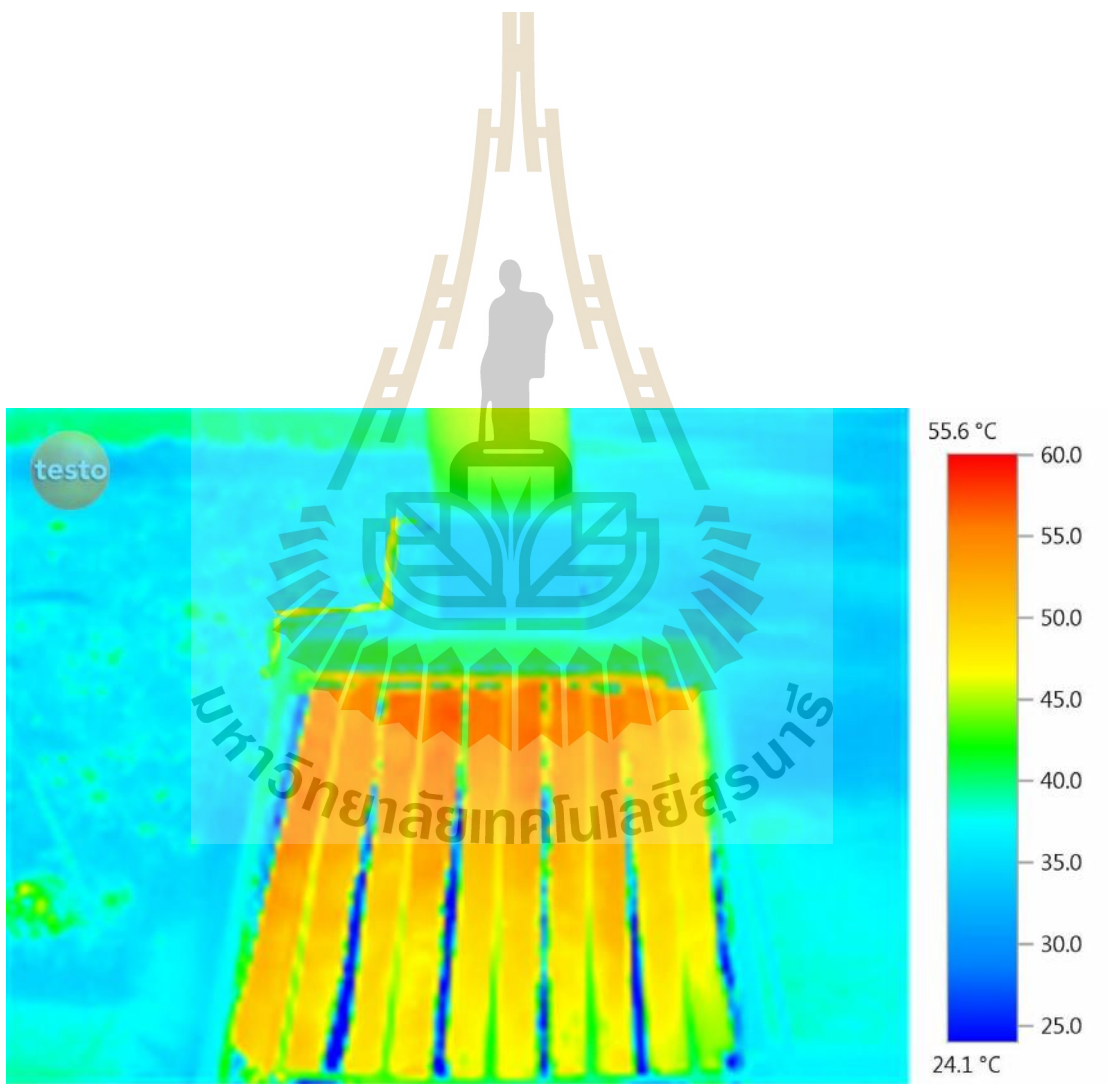


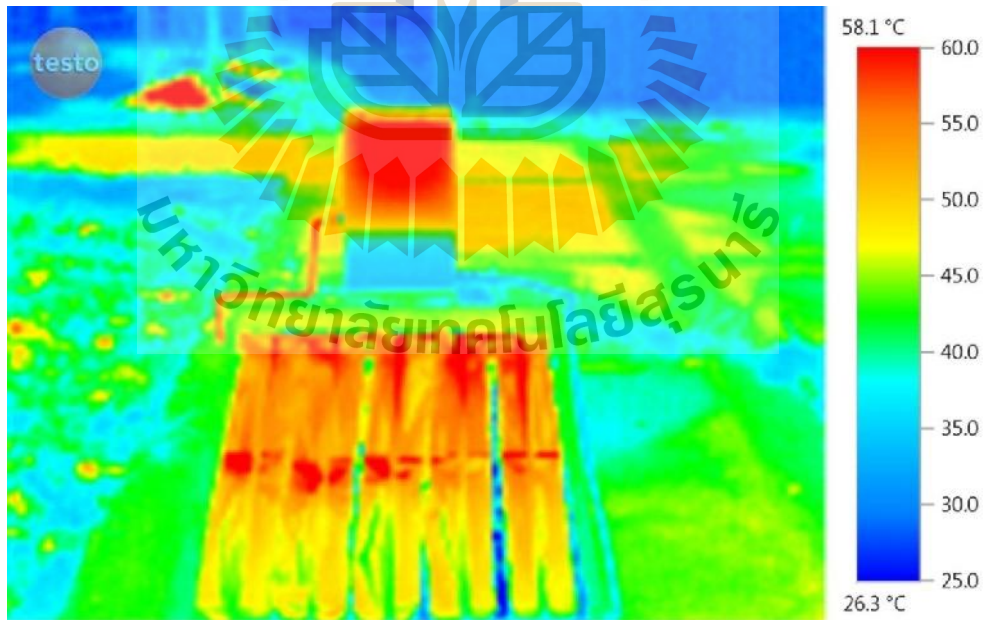














อุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงาน  
แสงอาทิตย์แบบมีแผ่น

อุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงาน  
แสงอาทิตย์แบบมีแผงพารา

ผลการทดสอบจริง  
(°C)

คูคกลิ่นรังสี

โบลีกรวมแสง

อุณหภูมิสูงสุดจาก  
กล้องถ่ายภาพ  
ความร้อน

อุณหภูมิน้ำ  
จากเทอร์  
โมคัปเปิล

อุณหภูมิสูงสุดจาก  
กล้องถ่ายภาพ  
ความร้อน

อุณหภูมิน้ำ  
จากเทอร์  
โมคัปเปิล

อุณหภูมิจากการวัด  
ครั้งที่ 1

54.7

55.2

60.9

64.5

อุณหภูมิจากการวัด  
ครั้งที่ 2

54.7

54.6

58.1

62.5

อุณหภูมิจากการวัด  
ครั้งที่ 3

55.6

54.4

58.1

60.2

อุณหภูมิเฉลี่ย

55

54.7

59.0

62.4

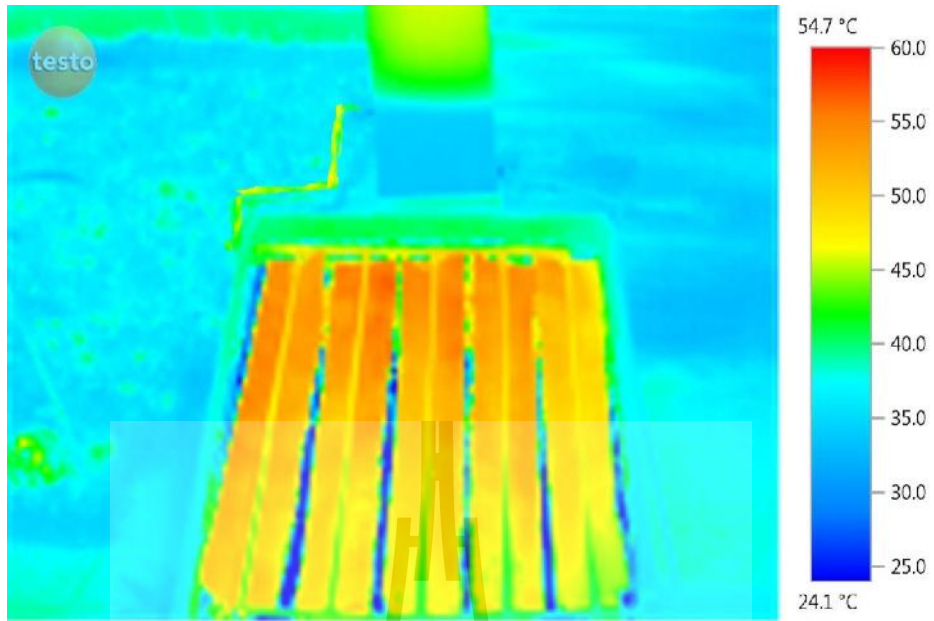
จากตารางที่ 6.2 แสดงผลการเปรียบเทียบผลจากการวัดอุณหภูมิของน้ำทั้ง 3 ครั้ง และอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนและเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิของน้ำ วัดที่เวลา 30 นาที พบว่าอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง สูงกว่าอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี เนื่องจากแผงพาราโบลิกรวมแสงเป็นตัวสะท้อนรังสีและรวมความร้อนไปยังจุดโฟกัสที่เป็นท่อน้ำ จึงทำให้น้ำที่ใช้งานมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากเดิม

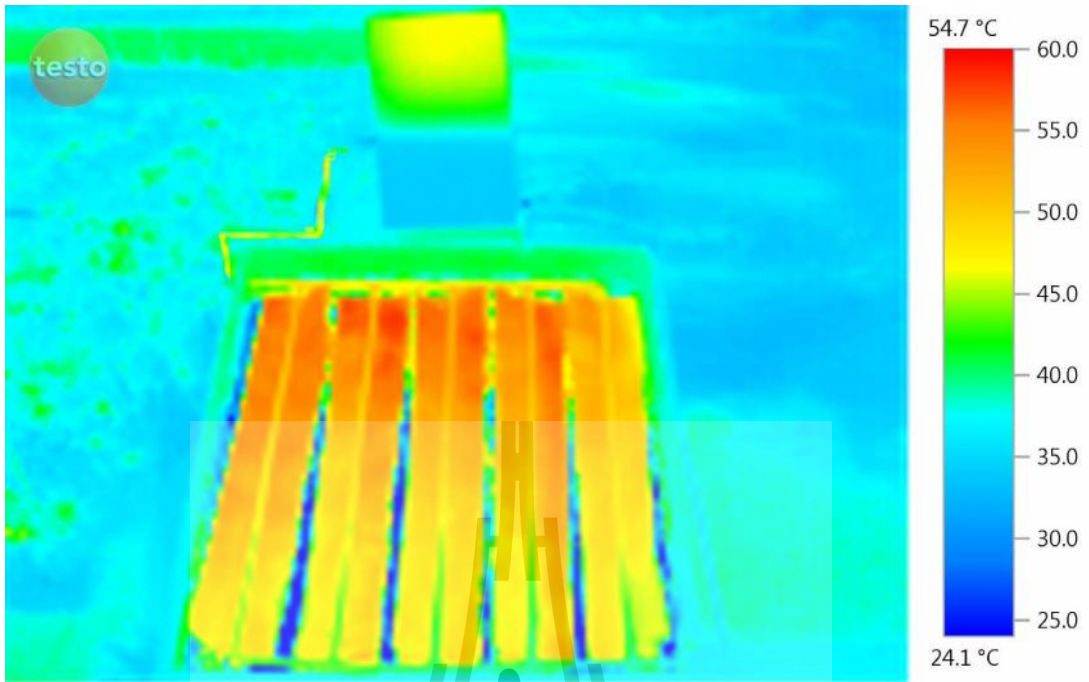
จากรูปที่ 6.8 รูปที่ 6.10 รูปที่ 6.12 รูปที่ 6.14 รูปที่ 6.16 และรูปที่ 6.18 แสดงรูปถ่ายทางความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยถ่ายภาพทั้งหมด 3 ครั้ง จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิด้านบนของท่อจะสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่างของท่อ และอุณหภูมิด้านบนของถังน้ำจะสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่างของถังน้ำ ซึ่งเป็นไปตามหลักการทางธรรมชาติที่เรียกว่าเทอร์โมไซฟอน เนื่องจากน้ำเมื่อได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์จะลอยตัวสูงขึ้นและมีความหนาแน่นน้อยลง จึงไหลขึ้นสู่ด้านบนของแผง น้ำเย็นก็จะเข้ามาแทนที่ และไหลเข้าสู่ถัง ซึ่งน้ำในถังด้านบนก็จะป็นน้ำร้อนซึ่งความหนาแน่นก็จะน้อยกว่าน้ำเย็นที่อยู่ด้านล่างถัง

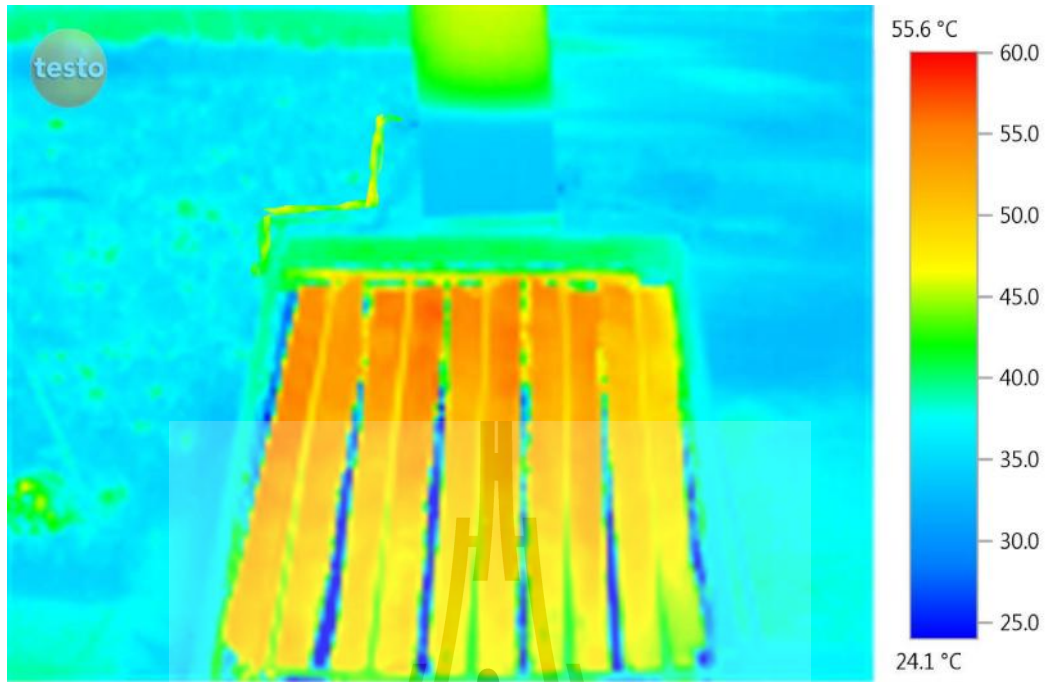
#### 6.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบจริง

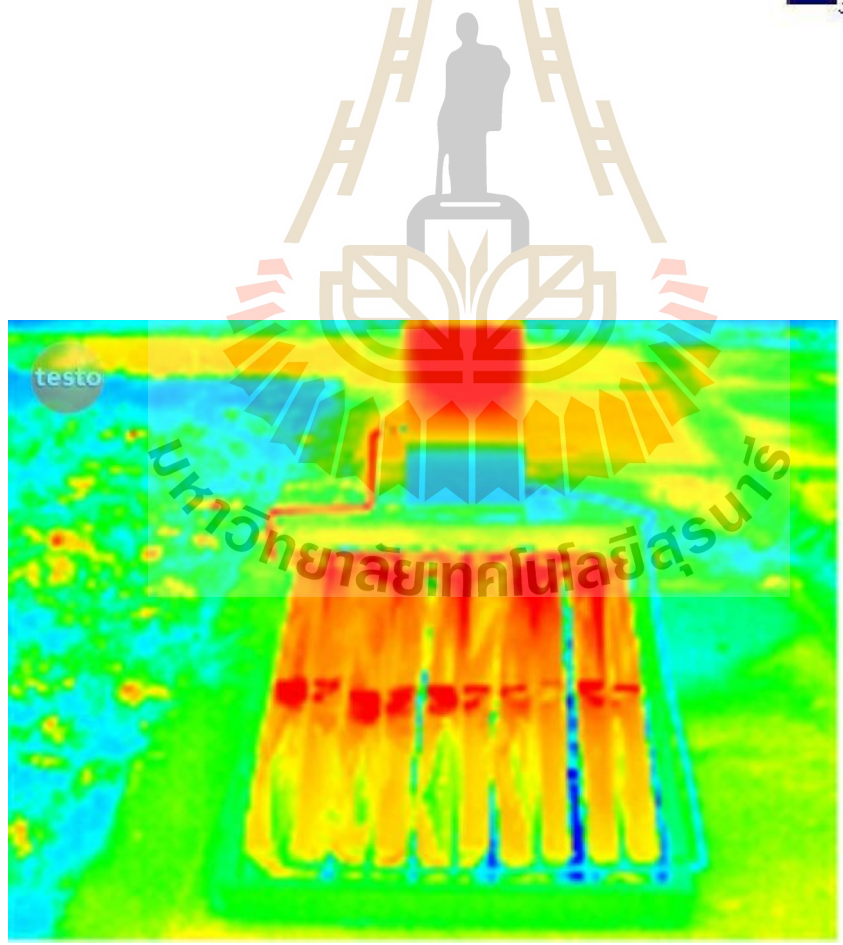
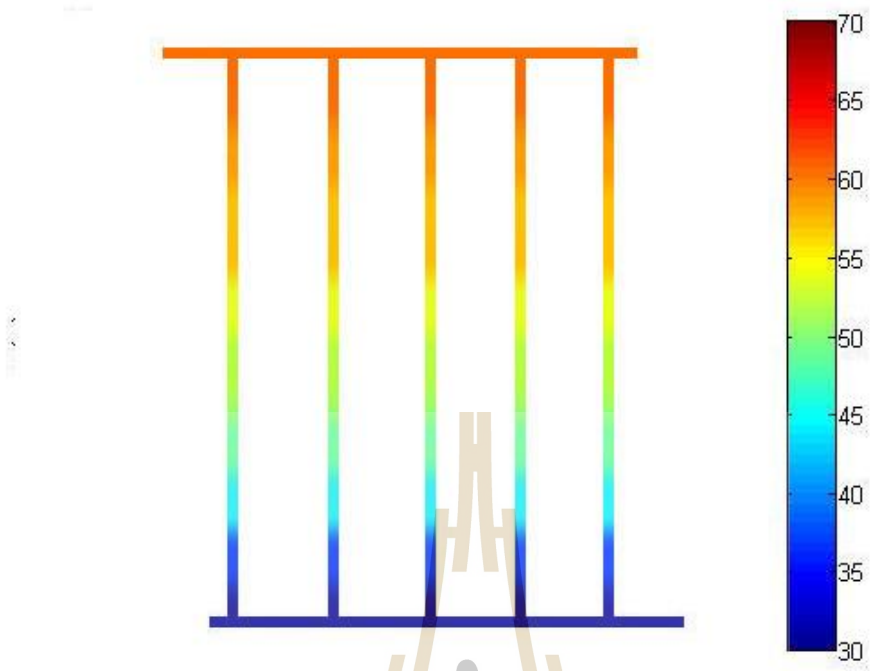
จากการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณค่าอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง เมื่อโปรแกรมทั้งหมดถูกออกแบบให้ทำงานบนพื้นฐานของโปรแกรม MATLAB นั้น ซึ่งการจำลองผลที่ได้นั้น ได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 5 โดยในหัวข้อนี้จะเป็นการนำผลการทดสอบจริงที่ได้จากการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน และเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิที่น้ำของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาเปรียบเทียบกับผลการจำลอง โดยผลการจำลองและผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี แสดงได้ดังรูปที่ 6.20 ผลการจำลองและผลการทดสอบจริงอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสงแสดงได้ดังรูปที่ 6.21 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิมะหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี แสดงได้ดังตารางที่ 6.3 และการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิมะหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง แสดงได้ดังตารางที่ 6.4

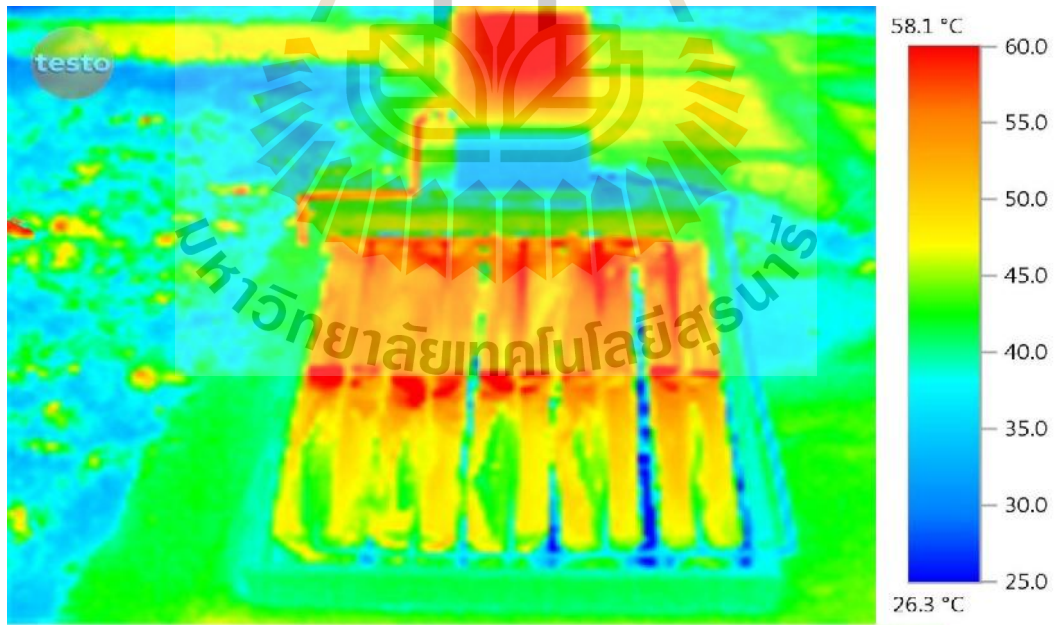


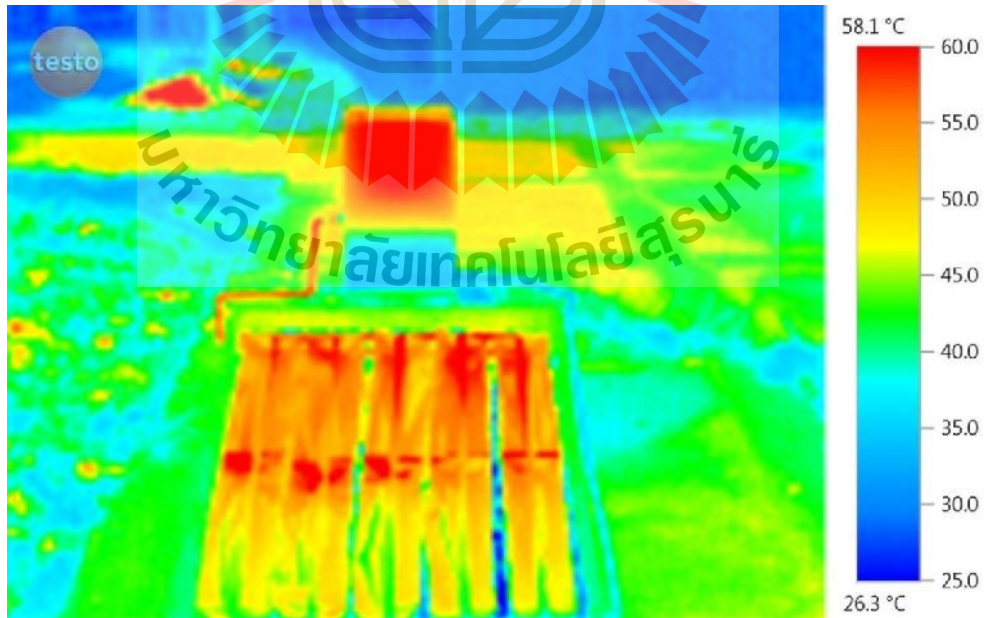


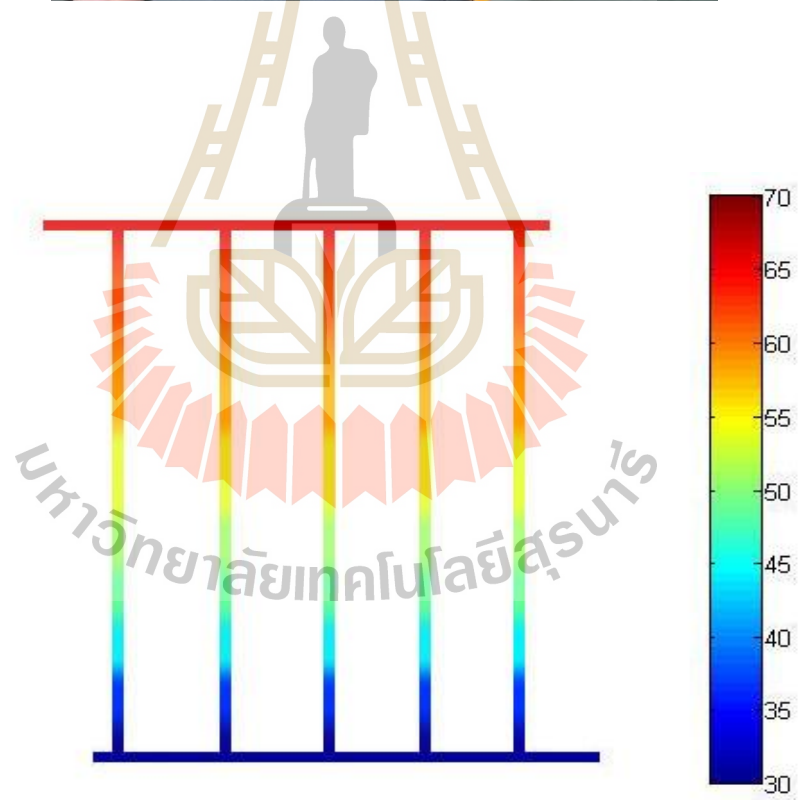












ตารางที่ 6.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำ  
น้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี

ค่าอุณหภูมิ (°C)	ผลการจำลอง	ผลการทดสอบจริง	
		อุณหภูมิสูงสุด จากกล้องถ่ายภาพความร้อน	อุณหภูมิน้ำจาก เทอร์โมคัปเปิล
อุณหภูมิ จากการวัดครั้งที่ 1	62.9	54.7	55.2
อุณหภูมิ จากการวัดครั้งที่ 2	62.9	54.7	54.6
อุณหภูมิ จากการวัดครั้งที่ 3	62.9	55.6	54.4
อุณหภูมิเฉลี่ย	62.9	55	54.7

ตารางที่ 6.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำ  
น้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลิกรวมแสง

ค่าอุณหภูมิ (°C)	ผลการจำลอง	ผลการทดสอบจริง	
		อุณหภูมิสูงสุด จากกล้องถ่ายภาพความร้อน	อุณหภูมิน้ำจาก เทอร์โมคัปเปิล
อุณหภูมิ จากการวัดครั้งที่ 1	68.3	60.9	64.5
อุณหภูมิ จากการวัดครั้งที่ 2	68.3	58.1	62.5
อุณหภูมิ จากการวัดครั้งที่ 3	68.3	58.1	60.2
อุณหภูมิเฉลี่ย	68.3	59.0	62.4

จากรูปที่ 6.20 รูปที่ 6.21 ตารางที่ 6.3 และตารางที่ 6.4 เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลอง  
และผลการทดสอบจริงของค่าอุณหภูมิโดยวัดทั้งหมด 3 ครั้ง และค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของอุปกรณ์

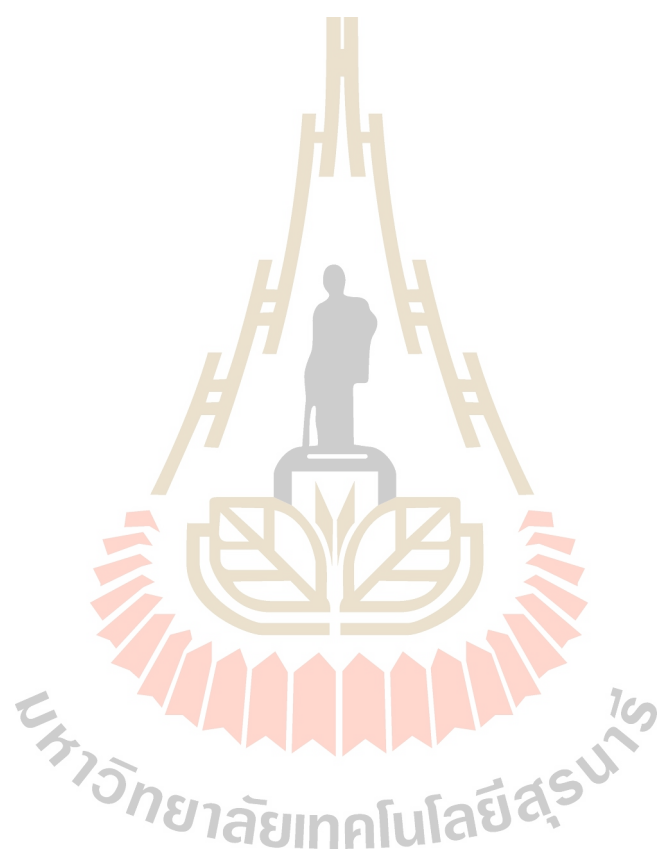


ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี และอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบแผงพาราโบลิกรวมแสง จะพบว่าอุณหภูมิด้านบนของท่อจะสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่างของท่อ ซึ่งเป็นไปตามหลักการทางธรรมชาติที่เรียกว่าเทอร์โมไซฟอน เนื่องจากน้ำเมื่อได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์จะลอยตัวสูงขึ้นและมีความหนาแน่นน้อยลง จึงไหลขึ้นสู่ด้านบนของแผง น้ำเย็นจะเข้ามาแทนที่ และไหลเข้าสู่ถัง จะสังเกตเห็นว่าค่าการจำลองผลด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเองนั้น จะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบจริงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยภายนอกต่าง ๆ อาทิ เช่น ปัจจัยทางด้านวัสดุ รวมไปถึงปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม เป็นต้น โดยค่าที่ใช้ในการจำลองผลเป็นค่าคุณสมบัติที่คงที่ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยต่าง ๆ เหมือนการทดสอบจริง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตผลการจำลองและผลการทดสอบจริงแล้วนั้น พบว่าค่าที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเองโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ นั้น มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบจริง

## 6.5 สรุป

บทที่ 6 เป็นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีและแบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง รวมถึงอธิบายขั้นตอนและวิธีการทดสอบจริงเพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนและเทอร์โมคัปเปิลในการทดสอบจริง และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบผลการทดสอบจริงระหว่างอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีและแบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง พบว่าอุณหภูมิหน้าของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง สูงกว่าอุณหภูมิหน้าของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี เนื่องจากแผงพาราโบลิกรวมแสงเป็นตัวสะท้อนรังสีและรวมความร้อนไปยังจุดโฟกัสที่เป็นท่อน้ำ จึงทำให้น้ำที่ใช้งานมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากเดิม และจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิด้านบนของท่อจะสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่างของท่อ และอุณหภูมิด้านบนของถังน้ำจะสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่างของถังน้ำ ซึ่งเป็นไปตามหลักการทางธรรมชาติที่เรียกว่าเทอร์โมไซฟอน เนื่องจากน้ำเมื่อได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์จะลอยตัวสูงขึ้นและมีความหนาแน่นน้อยลง จึงไหลขึ้นสู่ด้านบนของแผง น้ำเย็นก็จะเข้ามาแทนที่และไหลเข้าสู่ถัง ซึ่งน้ำในถังด้านบนก็จะเป็นน้ำร้อนซึ่งความหนาแน่นก็จะน้อยกว่าน้ำเย็นที่อยู่ด้านล่างถึง จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับ

ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเองที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งผลที่ได้นั้นพบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบจริงมีความสอดคล้องไปในทางเดียวกัน



## บทที่ 7

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยและการจำลองผลค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีและแบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลากรวมแสง เพื่อพิจารณาคูการกระจายตัวของอุณหภูมิ การจำลองผลใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์ออลลิเมนต์แบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้นเอง จากนั้นนำผลที่ได้จากการจำลองไปวิเคราะห์ห่ออกแบบพร้อมสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนต้นแบบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นใหม่เพื่อทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ถือเป็นรากฐานที่สำคัญในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ในงานวิจัย การศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในบทที่ 3 ทั้งเรื่องพลังงานแสงอาทิตย์ อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ทฤษฎีความร้อนซึ่งประกอบด้วยความรู้ทางด้านความร้อน กลไกการถ่ายโอนความร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิ และสุดท้ายการคำนวณอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์ออลลิเมนต์แบบ 3 มิติ ต่างได้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย ส่วนการดำเนินงาน ในบทที่ 4 เป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองและอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์ออลลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลเลอร์กิน ซึ่งได้สร้างกริดแบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม SolidWork ซึ่งงานวิจัยนี้ได้จำลองผลอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีและแบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลากรวมแสง ส่วนในบทที่ 5 เป็นการอธิบายโปรแกรมจำลองผล และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผล พร้อมทั้งผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นดูดกลืนรังสี และอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีแผงพาราโบลากรวมแสง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์ออลลิเมนต์แบบ 3 มิติ จากผลลัพธ์ที่ได้ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้

พลังงานแสงอาทิตย์แบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสงนั้น จะมีอุณหภูมิของน้ำที่ได้สูงกว่าอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี เนื่องจากการเพิ่มแผงพาราโบลิกรวมแสงเข้าไปแทนแผ่นดูดกลืนรังสี จะเกิดการรวมความร้อนไปยังท่อน้ำโดยตรง ส่งผลทำให้ค่าปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เองมีค่าสูงขึ้น น้ำที่ได้จากแผงพาราโบลิกรวมแสงจึงร้อนกว่าน้ำที่ใช้แผ่นดูดกลืนรังสี และในบทที่ 6 จะกล่าวถึงเป็นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีและแบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง รวมถึงอธิบายขั้นตอนและวิธีการทดสอบจริงเพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวในอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนและเทอร์โมคัปเปิลในการทดสอบจริง และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบผลการทดสอบจริงของอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีและแบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง พบว่าอุณหภูมิน้ำของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง สูงกว่าอุณหภูมิน้ำของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี เนื่องจากแผงพาราโบลิกรวมแสงเป็นตัวสะท้อนรังสีและรวมความร้อนไปยังจุดโฟกัสที่เป็นท่อน้ำ จึงทำให้น้ำที่ใช้งานมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากเดิม และจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิด้านบนของท่อจะสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่างของท่อ และอุณหภูมิด้านบนของถังน้ำจะสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่างของถังน้ำ ซึ่งเป็นไปตามหลักการทางธรรมชาติที่เรียกว่าเทอร์โมไซฟอน เนื่องจากน้ำเมื่อได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์จะลอยตัวสูงขึ้นและมีความหนาแน่นน้อยลง จึงไหลขึ้นสู่ด้านบนของแผง น้ำเย็นก็จะเข้ามาแทนที่ และไหลเข้าสู่ถัง ซึ่งน้ำในถังด้านบนก็จะป็นน้ำร้อนซึ่งความหนาแน่นก็จะน้อยกว่าน้ำเย็นที่อยู่ด้านล่างถัง และนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเองที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งผลที่ได้นั้นพบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบจริงมีความสอดคล้องไปในทางเดียวกัน

## 7.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

1. นำอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้นไปติดตั้งใช้งานจริง เพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ในระยะยาว

## รายการอ้างอิง

- กิตติพงษ์ พงษ์สิงห์ (2561). การสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแผ่นดูดกลืน PCM. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- กอบสิน ทวีสิน (2522). เครื่องทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์-การศึกษาเปรียบเทียบ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จรัส อินทร์ชัย (2551). โครงการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมและธุรกิจ. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. กระทรวงพลังงาน.
- จุลละพงษ์ จุลละโพธิ์ (2523). งานวิจัยและพัฒนาพลังงานหมุนเวียนที่มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. การสัมมนาเรื่องพลังงานหมุนเวียนและการประยุกต์ ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร. วันที่ 12-15 ตุลาคม 2523, หน้า 5.
- ชวลิต ปัญญาอิสระ (2555). การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ผลต่ออนุภูมิในหม้อแปลงไฟโอซิออลิเกทริกแบบหลายชั้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย (2533). การถ่ายเทความร้อน (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: ฟิสิกส์เซ็นเตอร์
- ปทุมพร วงศ์ใหญ่ (2558). ระบบควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ด้วยวิธีรบกวนและสังเกด. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ประวิทย์ ธิตะแก้ว และ ปรีดา วิบูลย์สวัสดิ์ (2554). สมรรถภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ประวีณ ศรีเกิด (2559). การออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ (2547). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ปราโมทย์ เศษอำไพ (2549). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีดา จันทวงษ์ (2542). การออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่ายเพื่อใช้ในบ้าน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เผด็จ เผ่าละออง (2548). การออกแบบแนวใหม่ขงมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสิ้นเปลืองโดยวิธีไฟไนท์อิเลเมนต์. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พงษ์ธร จริญญาภรณ์ (2534). เทอร์โมไดนามิกส์. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น
- พฤษภา ดินะโส. (2551). การวัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์จากตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลิกด้วยการวัดปริมาณความร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาลัยราชภัฏพระนคร.
- พลทรัพย์ บุญวานิชย์ (2523). เครื่องทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พิสิษฐ์ ลำสิงห์ (2561). การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของน้ำในท่อภายในแผงรับรังสีแบบไหลเวียนตามธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ภาณุศักดิ์ มูลศรี (2551). การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบต้นทุนวงจรชีวิตทางเศรษฐศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนแบบต่าง ๆ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- รุ่งทิว ผดากาล และสุรชัย รดาดาร (2553). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน.
- เรวัฒน์ คำดี, อำไพศักดิ์ แหวน โศก, และพิสิษฐ์ ลำสิงห์ (2560). การออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนโดยใช้ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วารินทร์ ว่องงามอนันต์ (2531). การออกแบบและทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนโดยใช้ตัวรับรังสีแบบเพิ่มผิวโค้งสะท้อนรังสี. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ศศิษา เรียมสุวรรณ (2554). การเปรียบเทียบระบบทำความร้อนแบบใช้ปั๊มความร้อนกับใช้แผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบสำหรับอาคารพักอาศัย. **วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.**

สุกัญญา ทัพศรี (2555). การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิรอบสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์. **วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**

สุคนธ์ อาจฤทธิ์ (2524). ชุดรับรังสีแสงอาทิตย์แผ่นราบเพิ่มผิวโค้งสะท้อนแสง. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.**

สมชัย อัครทิวา และขวัญจิต วงษ์ชาติ (2545). **เทอร์โมไดนามิกส์.** กรุงเทพฯ ๑: สำนักพิมพ์ท็อป.

สมนึก บุญญศาสตร์พันธ์ (2527). ระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิสูงด้วยตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.**

อนุสรณ์ อินทองคุ้ม (2556). สมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนด้วยแผงรับแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่ไม่ต้องอาศัยระบบติดตามดวงอาทิตย์. **วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.**

อิสราภรณ์ ออมสวัสดิ์วัฒนา (2558). การวิเคราะห์อุณหภูมิอาหารจากการทำงานของเตาไมโครเวฟหลากชนิด ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ. **วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**

Ajith,V. (2014). Integration of renewable energy into local and regional power supply. **World Energy Council.** 38(3):117–22.

Arobindo, K.D., (1983). Investigation of The Performance of a Reversed Flat Plate Collection and System. **Thesis, Master of Engineering, Energy Technology Division, Asian Institute of Technology.** pp. 1-208.

Beograd, R.J. (1978). My New Type of Flat Plate Collector. **Proceeding of The International Symposium Workshop on Solar Energy.** Egypt. 9(2): 25-29.

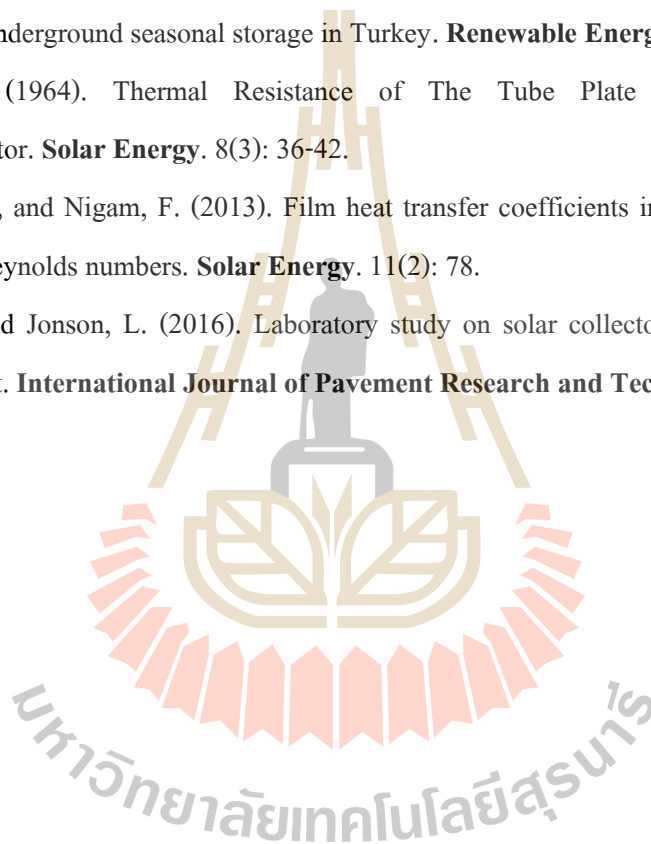
Chuan, C., and Yuting, M. (2016). Design tool for the thermal energy potential of asphalt pavements. **Proceedings of the 8th International IBPSA Conference.** 8(2): 745–752.

Duffie, J.A., and Beckman, W.A. (1980). **Solar Engineering and Thermal Processes.** New York. **John Willey & Sons.** pp. 30-85.

- Esbensen, T. (1991). Low-Flow Solar Hot Water System. **Solar World Congress**. 2(1): 1369-1371.
- Fanney, A.H., and Klein, S.A. (1983). Performance of Solar Domestic Hot Water System at The National Bureau of Standards-Measurements and Predictions. **Transaction of The ASME, Solar Energy Engineering**. 3(8): 23-29.
- Huebner, K.H., Dewhurst, D.L., Smith D.E., and Byrom T.G. (2001). **The finite element method for engineers** (4th ed.). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Joe, S. (2005). Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. **Coventry / Solar Energy**. 78(2): 211–222.
- Kim, B.T., Kwon, B.I., and Park, S.C. (1999). Reduction of electromagnetic force harmonics in asynchronous traction motor by adapting the rotor slot number. **IEEE Transactions on Magnetics**. 35 (5): 3742-3744.
- Kudret, M.S. (1964). Flat Plate Solar Collector Performance at High Temperature. **Solar Energy**. 8(2): 20-55.
- Lenel, U.R., and Mudd, P.R. (1981). A Review of Materials for Solar Heating Systems for Domestic Hot Water. **Solar Energy**. 3(2): 109-119.
- Ling, A., and Jie, M. (2008). Design Data for Solar Aided Space Heating System. **Middle East Technical University, Gaziantep Campus**.
- Marwa, M., and Yvan, B. (2013). Design, Construction and performance prediction of integrated solar roof collector using finite element analysis. **Construction and Building Materials**. 21(3): 1069-1078.
- Mathur, S.S. and Bansal, N.K. (1983). Domestic Thermosyphon Water Heater Systems. **Solar Water Heating System**. 1(1): 299-326.
- McCluney, R., and Merrigar, T. (1978). Homeowner's Guide to Solar Water Heater Troubles Shooting. **Solar Energy**. 1(2): 84-86.
- Michael, A., Monica, M., and Roland, W. (2015). Numerical simulation of wind loads on a parabolic trough solar collector using lattice Boltzmann and finite element methods. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. 146(2): 185-194.
- Preston, T.W., Reece, A.B. J., and Sangha, P.S. (1988). Induction motor analysis by time-stepping techniques. **IEEE Transactions on Magnetics**. 24 (1): 471-474.



- Rama, S., and Reddy, G. (1997). Finite element analysis of a flat plate solar collector. **Finite Elements in Analysis and Design**. 4(2): 283-290.
- Russel, Y. (2013). The effect of natural convection on viscous-flow heat transfer in horizontal tubes. **ChemEng Sci**. 17(2): 335.
- Tabor, and Zeimer. (2013). Circular cylinder non-tracking solar concentrator. **Solar Energy**. 45(3): 127-131.
- Ucar, A., and Inalli, N. (2008). Thermal and economical analysis of a central solar heating system with underground seasonal storage in Turkey. **Renewable Energy**. 30(2): 1005-1019.
- Whillier, A. (1964). Thermal Resistance of The Tube Plate Bond in Solar Heat Collector. **Solar Energy**. 8(3): 36-42.
- Wibulswas, A., and Nigam, F. (2013). Film heat transfer coefficients in solar collector tubes at low Reynolds numbers. **Solar Energy**. 11(2): 78.
- Winnie, K., and Jonson, L. (2016). Laboratory study on solar collector of thermal conductive asphalt. **International Journal of Pavement Research and Technology**. 4(2): 130-136.





ภาคผนวก ก

คุณลักษณะของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์  
ของบริษัท ทริปเปิ้ล อี เอ็นเนอร์ยี พลัส จำกัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## EEE-WTO-F42 SOLAR COLLECTOR



0% energy cost

95% high absorption

100% friendly our environment

### HOT WATER FROM THE SUN

Blue Full Plate of Ultra - Selective Sputtering เป็นรับแสงเคลือบด้วยสารพิเศษที่มีคุณสมบัติเลือกรังสีทำให้สารเคลือบยึดติดแน่นรับแสงได้ดีมากขึ้น ประสิทธิภาพการดูดรังสีความร้อนสูง

Ultrasonically Welded เชื่อมต่อ Header, Riser ด้วยระบบ Ultrasonically ขึ้นงานสม่ำเสมอและคงทน

SUS 304 ท่อน้ำร้อนหมุนเวียนในแผงรับแสงอาทิตย์จำนวน 10 แถว ทนต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนยืดอายุการใช้งาน

ความสามารถรับแรงดันที่สูงได้ถึง 10 bar



บริษัท ทริปเปิ้ล อี เอ็นเนอร์ยี พลัส จำกัด

55/3 หมู่ 5 ตำบลปลายบาง อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี 11130

TEL: (+66-2) 4036018-9, 089-777-4140 FAX: (+66-2) 4036017

www.eekaphatenergy.com

E-mail: info@eekaphatenergy.com



## EEE-WTO-F42 FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR

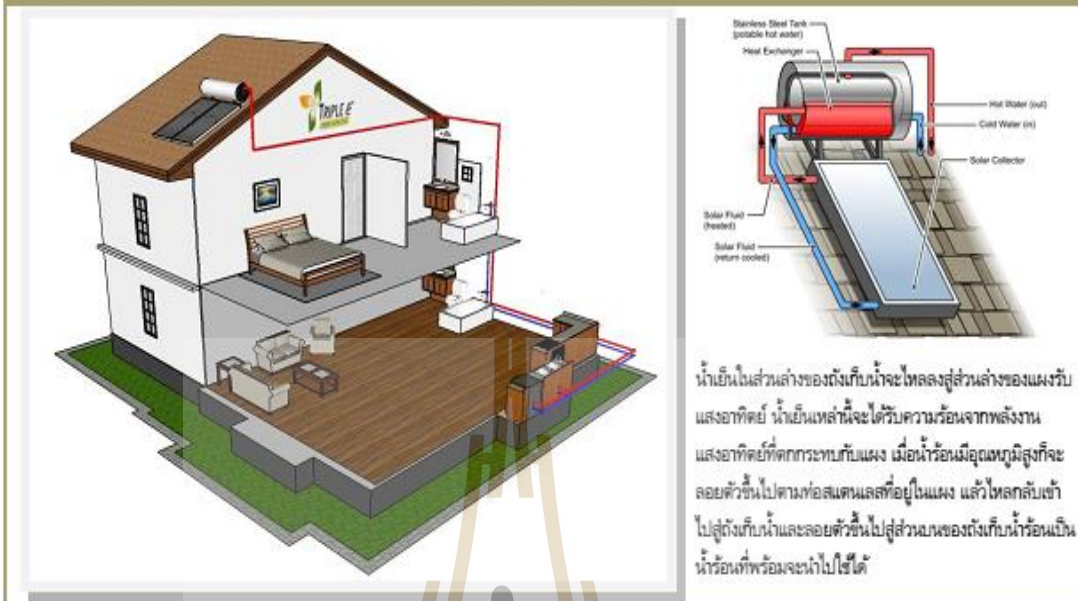
Absorption:  $\alpha \sim 95\%$ , Emission:  $\epsilon \sim 5\%$

Ultrasonically Welded

NO.	SPECIFICATION
1	<b>Glass:</b> 3.0mm Tempered Solar Glass
2	<b>Outer Casing:</b> Stainless SUS 304
3	<b>Strengthens the side frame:</b> The galvanized sheeting are made solid construction integrated toe casings
4	<b>Absorber Coating:</b> Highly-selective sputtering 0.95/0.05
5	<b>Absorber Plate:</b> Aluminum Full Plate Absorber
6	<b>Tubing Material:</b> 1/2" x 10pcs Stainless Tubes
7	<b>Piping Connection:</b> 3/4" Male Thread (Drain Hole ; Piping Connection)
8	<b>Tubing Material:</b> 1" Stainless Tubes
9	<b>Insulation Material:</b> 16 kg/cm <sup>3</sup> Wool Glass of 25mm
10	<b>Absorber type:</b> Patent M356884 M418270 bonding technology for absorber plate/tube Ultrasonically welded
11	<b>Hot Convection inhibitory pole:</b> Collect the hot air within the heat exchanger and separate the convection
<b>Overall Collector Dimensions:</b> 2005 x 1010 x 75 mm <b>Gross area:</b> 2.025 m <sup>2</sup> <b>Absorber area :</b> 1.89 m <sup>2</sup> <b>Maximum Working Pressure:</b> 1 Mpa <b>Fluid capacity:</b> 3.05 Litre <b>Net weight:</b> 36.8 kg	



### THERMOSIPHON SOLAR WATER HEATER



#### MAIN EQUIPMENT



“EEE-WTO-F42” Flat Plate Solar Collector

- Blue Full Plate of Ultra -Selective Sputtering แผ่นรับแสงเคลือบด้วยสารพิเศษที่มีคุณสมบัติเลือกรังสีด้วยวิธี Sputtering ทำให้สารเคลือบยึดติดแน่นรับแสงได้มากที่สุดผลให้ประสิทธิภาพการดูดรังสีความร้อนสูง
- Ultrasonically Welded เชื่อมต่อกับท่อ Header, Riser ด้วยระบบ Ultrasonically ทำให้ชิ้นงานสม่ำเสมอและคงทน
- ท่อน้ำร้อนหนุมนเวียนในแผงรับแสงอาทิตย์ใช้วัสดุ SUS 304 จำนวน 10 แถว ทนต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อน ยืดอายุการใช้งาน
- ความสามารถรับแรงดันที่สูงได้ถึง 10 bar
- ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพตัวรับรังสีดวงอาทิตย์จากกระทรวงพลังงาน



Storage Tank

- ตั้งชั้นนอกและชั้นในทำจาก สแตนเลส เกรด 304 แข็งแรง ทนทาน สวยงาม
- คุ้มครองโพสิทีฟเทอมป์และแจ็กเช็คสแตนเลส เกรด 304 ทำให้เก็บความร้อนได้นาน



Heater Backup

- มีฮีตเตอร์สำรอง กำลังไฟฟ้า 4 kW 220V วัสดุทำจากสแตนเลส สามารถตั้งให้ช่วงอุณหภูมิการทำงานของฮีตเตอร์โดยเทอร์โมสแตทในกรณีที่ไม่ได้มีแสงแดด
- เพิ่มความมั่นใจ สามารถใช้น้ำร้อนได้ตลอดเวลา 24 ชั่วโมง

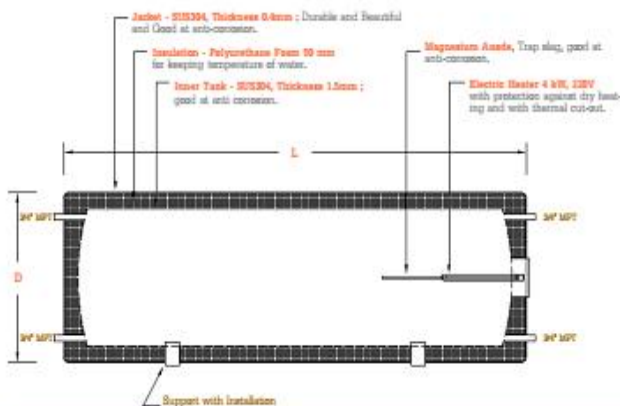


อุปกรณ์ Safety

- Temperature and Pressure Relief valves (T&P) ทำหน้าที่ลดแรงดันและอุณหภูมิที่เกินภายในถัง
- Air Vent ทำหน้าที่ไล่อากาศภายในถัง

SOLAR WATER HEATER		SWHT-125	SWHT-200	SWHT-300
				
		Overall system (Empty); kg	100	120
Weight	Overall system (Filled) ; kg	225	320	500
	Dimension : W x L (mm)	1,010 X 2,550	1,520 X 2,550	2,500 X 2,550
Solar Collector		EEE-WTO-F42		
Overall Data	Collector dimension (mm)	2005 x 1010 x 75		
	Gross area (m <sup>2</sup> )	2.025		
	Absorber area (m <sup>2</sup> )	1.89		
	Fluid capacity (Litre)	3.05		
Absorber	Header dimension (mm)	Stainless Steel SUS 304 3/4"		
	Welding	Ultrasonically Welded		
	Max. working pressure (Mpa)	1		
	Absorber material	Aluminium Full Plate		
	Absorber coating	Blue Full Plate Ultra -Selective Sputtering		
	Absorption	95%		
	Emittance	5%		
Insulation	Riser O.T.Y	10		
	Insulation material	Wool glass, Thickness 25 mm		
Glazing	Transmittance	87%		
	Material/ Thickness	Tempered Glass, Thickness 3.0 mm		
Casing	Frame	Stainless Steel SUS 304, Thickness 0.4mm		
	Back plate	Stainless Steel SUS 304		
Net weight	kg	36.8		

**Notes:** Hot Water Produces Consumption 140 Litre/Day based on the following condition: Water Inlet/Outlet temperature : 30°C / 60°C



### SUS304 STORAGE HOT WATER TANK

- ถังน้ำทันทรงตันทำจากสแตนเลส 304 แข็งแรง ทนทาน
- หุ้มฉนวนโพลียูรีเทนโฟมและแจ็กเก็ตสแตนเลส 304 เก็บความร้อนได้นาน

Capacity (Litres)	Dimension : D (mm)	Length : L (mm)	Weight (kg)
125	525	1020	30.5
200	525	1620	43.5
300	500	2500	66.5

## FORCE CIRCULATION SOLAR WATER HEATER



ใช้ปั๊มส่งจ่ายหม้อเรือนน้ำในถังเก็บไปรับความร้อนที่แผงรับแสงอาทิตย์ โดยมีระบบตรวจวัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างในถังเก็บและน้ำที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์เป็นตัวส่งสัญญาณไปยังชุดควบคุม (Temperature Control) เพื่อสั่งให้ปั๊มทำงาน

### MAIN EQUIPMENT



#### "EEE-WTO-F42" Flat Plate Solar Collector

- Blue Full Plate of Ultra -Selective Sputtering แผ่นรับแสงเคลือบด้วยสารพิเศษที่มีคุณสมบัติเลือกรังสีด้วยวิธี Sputtering ทำให้สารเคลือบยึดติดแน่นรับแสงได้ดีมากที่สุดผลไม่ประสิทธิภาพการดูดรังสีความร้อนสูง
- Ultrasonically Welded เชื่อมต่อกับท่อ Header, Riser ด้วยระบบ Ultrasonically ทำให้ชิ้นงานสม่ำเสมอและคงทน
- ท่อน้ำร้อนหม้อเรือนน้ำในแผงรับแสงอาทิตย์ใช้วัสดุ SUS 304 จำนวน 10 แถว ทนต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อน ยืดอายุการใช้งาน
- ความสามารถรับแรงดันที่สูงได้ถึง 10 bar
- ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพตัวรับรังสีดวงอาทิตย์จากกระทรวงพลังงาน

#### Storage Tank (Vertical / Horizontal)

- ตั้งชั้นนอกและชั้นในทำมาจาก สแตนเลส เกรด 304 แข็งแรง ทนทาน สวยงาม
- ทุ้มฉนวนโพลียูเรเทนโฟมและฉนวนจิกเกิดสแตนเลส เกรด 304 ทำให้เก็บความร้อนได้นาน



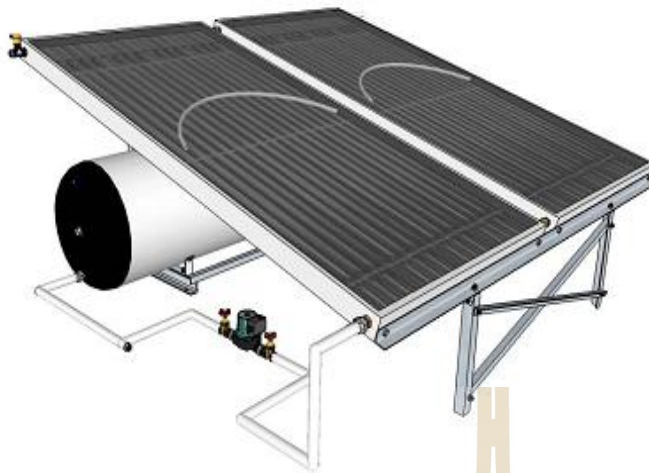
#### Automatic Temperature Control "CAREL"

- ควบคุมการทำงานของปั๊มหม้อเรือน โดยมีหัววัดอุณหภูมิที่ติดตั้งไว้ที่แผงและถังน้ำร้อนส่งสัญญาณสั่งให้ปั๊มทำงาน

#### Heater Backup

- มีฮีตเตอร์สำรอง กำลังไฟฟ้า 4 kW 220V วัสดุทำจากสแตนเลส สามารถตั้งให้ช่วงอุณหภูมิการทำงาน ของฮีตเตอร์โดยเทอร์โมสแตทในการตั้งที่ไม่มีแสงแดด เพิ่มความมั่นใจมีน้ำร้อนใช้ตลอด 24 ชั่วโมง





## FORCE CIRCULATION SOLAR WATER

EEE-WTO-F42 FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR	NO.	SPECIFICATION
<p><b>Overall Collector Dimensions:</b> 2005 x 1010 x 75 mm  <b>Gross area:</b> 2.025 m<sup>2</sup>, <b>Absorber area:</b> 1.89 m<sup>2</sup>, <b>Weight:</b> 36.8 kg  <b>Max. Working Pressure:</b> 1 Mpa, <b>Fluid capacity:</b> 3.05 Litre</p>	1	Glass: 3.0mm Tempered Solar Glass
	2	Outer Casing: Stainless SUS 304
	3	Strengthens the side frame: The galvanized sheeting are made solid construction integrated toe casings
	4	Absorber Coating: Highly-selective sputtering 0.95/0.06
	5	Absorber Plate: Aluminum Full Plate Absorber
	6	Tubing Material: 1/2" x 10pcs Stainless Tubes
	7	Piping Connection: 3/4" Male Thread (Drain Hole ; Piping Connection)
	8	Tubing Material: 1" Stainless Tubes
	9	Insulation Material: 16 kg/cm <sup>3</sup> Wool Glass of 25mm
	10	Absorber type: Patent M350884 M418270 bonding technology for absorber plate/tube Ultrasonically welded
	11	Hot Convection inhibitory pole: Collect the hot air within the heat exchanger and separate the convection

### SUS304 STORAGE HOT WATER TANK

- ถังน้ำทนแรงดัน มีทั้งทรงตั้งและทรงนอน ทำจากสแตนเลส 304 แข็งแรง ทนทาน
  - ทุ่นฉนวนโพลียูรีเทนโฟมและฉนวนกันความร้อนสแตนเลส 304 เก็บความร้อนได้นาน
  - ฮีตเตอร์สำรองกำลังไฟฟ้า 4 kW 220V วัสดุทำจากสแตนเลส
- ควบคุมการทำงานอัตโนมัติด้วยเทอร์โมสแตท  
 หนึ่งความมั่นใจ มีน้ำร้อนใช้ตลอด 24 ชั่วโมง
- แท่งแมกนีเซียม (Magnesium Anode) ป้องกันการกัดกร่อน, ลดการเป็นสนิมและช่วยยืดอายุถังน้ำร้อน



Capacity (Litre)		Diameter (mm)	Length (mm)	Weight (kg)
125	Horizontal	525	1020	30.5
200	Vertical / Horizontal	525	1620	43.5
300	Horizontal	500	2500	66.5
500	Vertical	700	1950	80.0



TRIPLE E ENERGY PLUS  
CO.,LTD.

**THERMOSIPHON** SOLAR WATER HEATER

REFERENCE PROJECTS



บริการครบวงจร

ออกแบบ จำหน่าย ติดตั้งและบริการหลังการขาย

ระบบทำน้ำร้อนประหยัดพลังงาน



บริษัท ทริปเปิ้ล อี เอ็นเนอร์ยี พลัส จำกัด

55/3 หมู่ 5 ตำบลปลายบาง อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี 11130

TEL: (+66-2) 4036018-9, 089-777-4140 FAX: (+66-2) 4036017

www.eekaphatenergy.com E-mail: info@eekaphatenergy.com

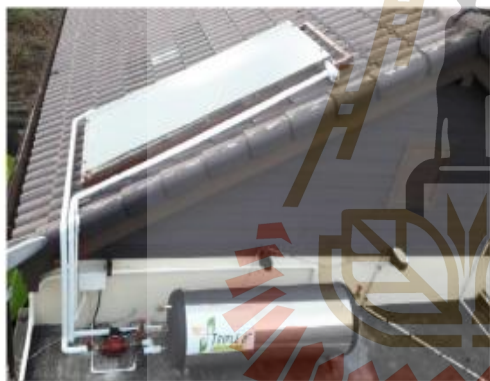


TRIPLE E ENERGY PLUS  
CO.,LTD.

**FORCE CIRCULATION** SOLAR WATER HEATER  
REFERENCE PROJECTS



บริการครบวงจร  
ออกแบบ จำหน่าย ติดตั้งและบริการหลังการขาย  
ระบบทำน้ำร้อนประหยัดพลังงาน



บริษัท ทริปเปิ้ล อี เอ็นเนอร์ยี พลัส จำกัด  
65/3 หมู่ 5 ตำบลปลายบาง อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี 11130  
TEL: (+66-2) 4036018-9, 089-777-4140 FAX: (+66-2) 4036017  
www.eakaphatenergy.com E-mail: info@eakaphatenergy.com





ภาคผนวก ข

ภาพเครื่องมือและการวัดอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน  
โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.1 เครื่องมือวัดความเข้มแสงอาทิตย์ไพรานอมิเตอร์

ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นที่ราบ สามารถวัดรังสีอาทิตย์จากทุกทิศทาง เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบที่เทอร์โมไพล์ (Thermopile) ความร้อนที่ได้จะถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าและแปลงค่าผ่านสมการให้เป็นหน่วยวัดต่อตารางเมตร ( $W/m^2$ ) ซึ่งอุปกรณ์นี้ใช้สำหรับการวัดรังสีรวมและรังสีกระจาย ซึ่งผลที่ได้จากกาจากการความเข้มแสงอาทิตย์วัดด้วยไพรานอมิเตอร์ แสดงได้ดังต่อไปนี้

- ความเข้มของแสงอาทิตย์ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี =  $507 W/m^2$

- ความเข้มของแสงอาทิตย์ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบลิกรวมแสง =  $668 W/m^2$

โดยปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เองของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ( $Q$ ) ได้จากการวัดความเข้มแสงอาทิตย์ด้วยไพรานอมิเตอร์แล้วนำไปหารด้วยปริมาตรของกระจกดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} Q &= \text{ความเข้มของแสงอาทิตย์} / (\text{ปริมาตรของกระจก}) \\ &= \text{ความเข้มของแสงอาทิตย์} / (0.7 \times 1 \times 0.003) \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$Q$  ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่มีแผ่นดูดกลืนรังสี =  $507 / (0.7 \times 1 \times 0.003) = 241,428 \text{ W/m}^2$

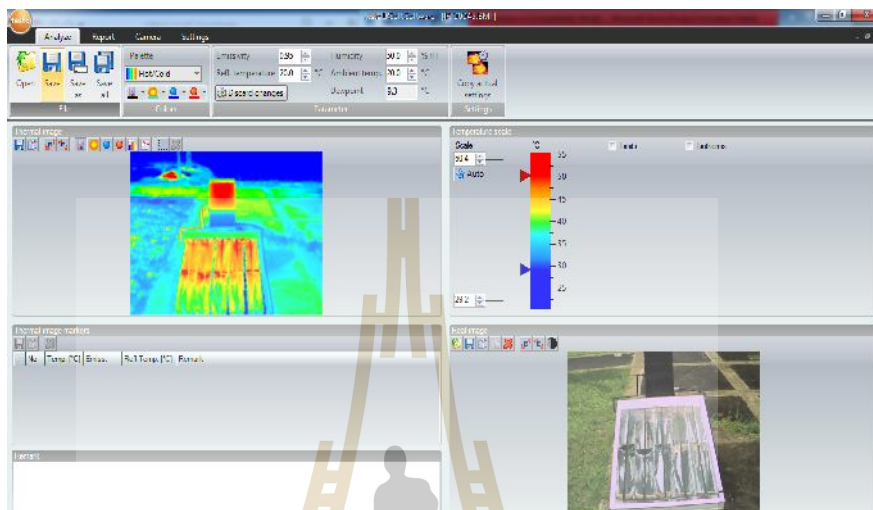
$Q$  ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบพัฒนาขึ้นใหม่ที่มีแผงพาราโบล  
 ลีกรวมแสง =  $668 / (0.7 \times 1 \times 0.003) = 318,095 \text{ W/m}^2$



รูปที่ ข.2 กล้องถ่ายภาพความร้อน

จากรูปที่ ข.2 แสดงกล้องถ่ายภาพความร้อน thermal imager testo 880 เป็นกล้องที่ถ่ายอุณหภูมิในลักษณะของภาพถ่ายทางความร้อนและภาพจริง โดยกล้องจะจับพลังงานรังสีอินฟราเรด (IR) ที่ถ่ายทอดออกมาจากวัตถุสู่สิ่งแวดล้อมและสร้างแถบสี วัตถุที่ร้อนกว่าจะแสดงสีสว่าง วัตถุที่เย็นกว่าจะแสดงสีมืด พลังงาน IR สร้างมาจากการสั่นสะเทือนของโมเลกุลและอะตอม และมีลักษณะคล้ายกับแสงสว่างที่มองเห็น ซึ่งสามารถสะท้อน หักเห ดูดซับ และ เปล่งแสง ยิ่งโมเลกุลเคลื่อนไหวมากก็จะทำให้อุณหภูมิของวัตถุสูงขึ้น

กล้องถ่ายภาพความร้อนมีความสามารถเก็บภาพความร้อนได้ในหน่วยความจำภายในและในการ์ดความจำ เมื่อผู้ใช้ถ่ายภาพเสร็จสามารถมองเห็นภาพ แก้ไข และดาวน์โหลดลงในคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์อุณหภูมิ TESCO IRSoft software ในการวิเคราะห์อุณหภูมิ



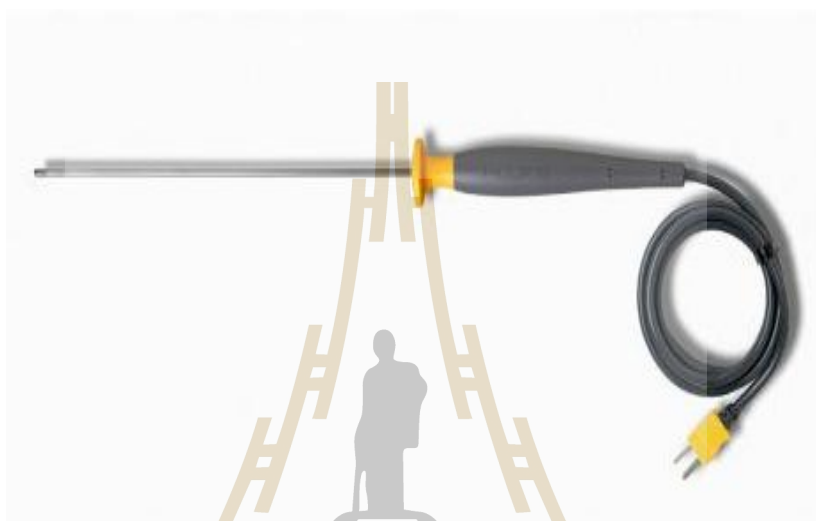
รูปที่ ข.3 โปรแกรมวิเคราะห์อุณหภูมิ TESCO IRSoft software

โปรแกรมการวิเคราะห์การวัดอุณหภูมิ TESCO IRSoft software สามารถแสดงผลการวัดอุณหภูมิในลักษณะของภาพถ่ายทางความร้อนและภาพจริง ดังแสดงได้ในรูปที่ ข.3



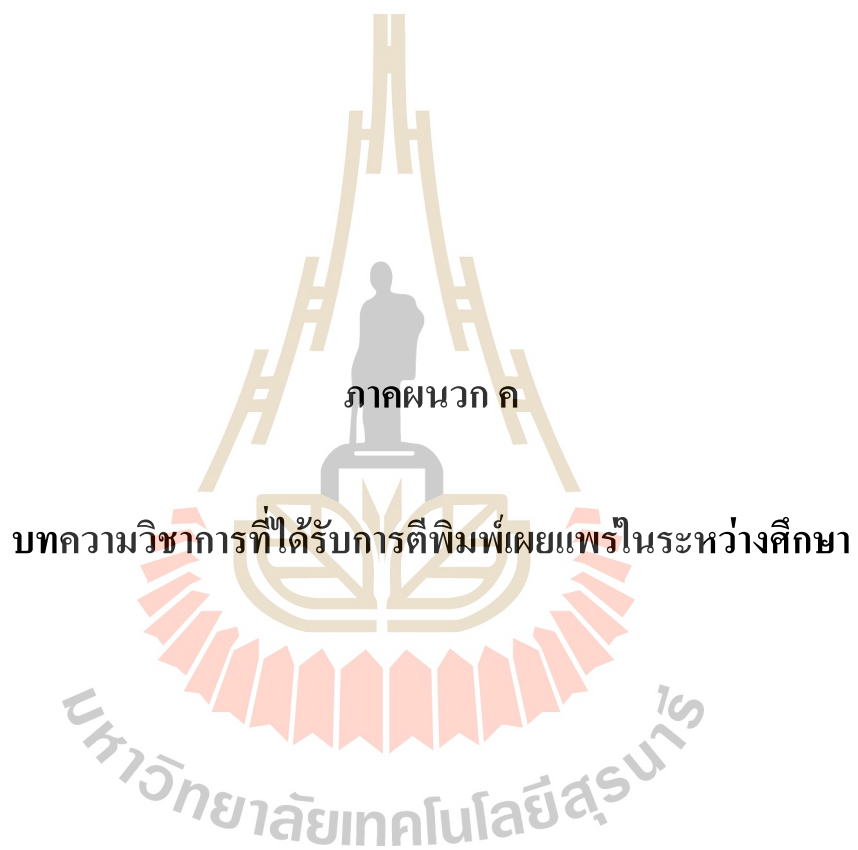
รูปที่ ข.4 เทอร์โมมิเตอร์

จากรูปที่ ข.4 แสดงเทอร์โมมิเตอร์ FLUKE 53 II thermometer สามารถบันทึกอุณหภูมิเฉลี่ย อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิต่ำสุด ใช้งานคู่กับเทอร์โมคัปเปิล Type K, J, T, E, N, R, และ S สามารถอ่านค่าเป็นเซลเซียส (°C), ฟาเรนไฮต์ (°F) หรือเคลวิน (K) มีความแม่นยำระดับ LAB :  $\pm(0.05\% + 0.3^{\circ}\text{C})$  มีเทอร์โมคัปเปิลโพรบหลายชนิดให้เลือกใช้ (Option) เช่น วัดอากาศ วัดของเหลว วัดพื้นผิว และวัดในอาหารแช่แข็ง ทั้ง Type K, J, และ T

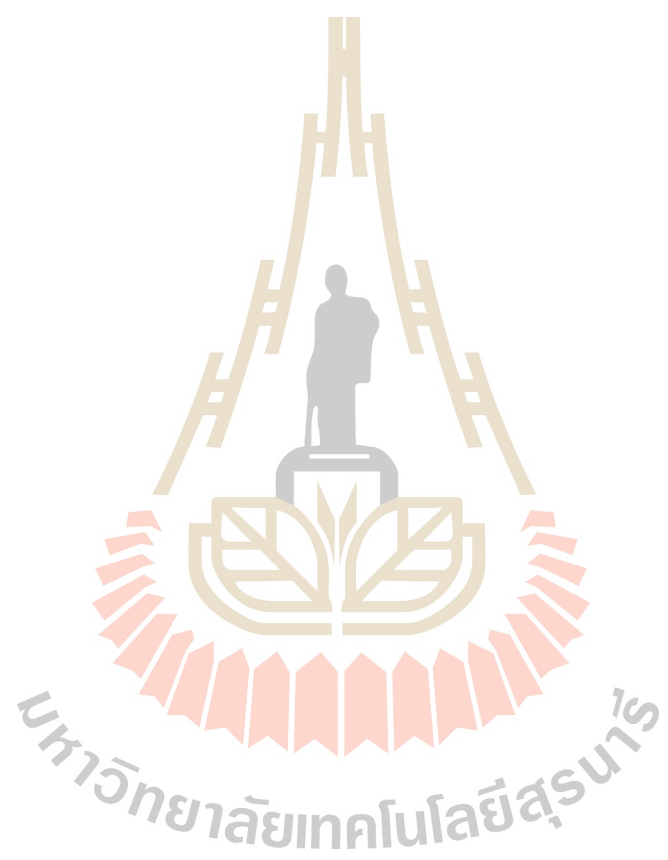


รูปที่ ข.5 เทอร์โมคัปเปิล

จากรูปที่ ข.5 แสดงเทอร์โมคัปเปิล Fluke 80PK-22 SureGrip™ Immersion Temperature Probe เป็นเทอร์โมคัปเปิล Type K สำหรับใช้วัดของเหลวและเจล ช่วงการวัดระหว่าง  $-40$  ถึง  $1090^{\circ}\text{C}$  หรือ  $-40$  ถึง  $1994^{\circ}\text{F}$  ใช้งานคู่กับ FLUKE 53 II thermometer



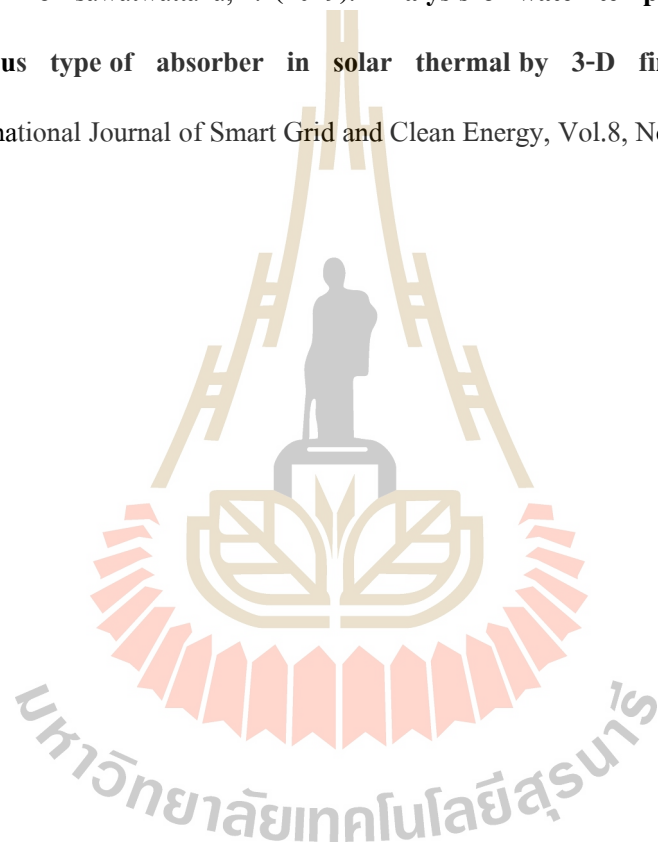




## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Amornsawatwattana, I., Pao-la-or, P. (2017). **Analysis of temperature in solar thermal by 3-D finite element method**, 5<sup>th</sup> International Electrical Engineering Congress (iEECON), Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017, pp. 1-4.

Pao-la-or, P., Amornsawatwattana, I. (2019). **Analysis of water temperature distribution in various type of absorber in solar thermal by 3-D finite element method**, International Journal of Smart Grid and Clean Energy, Vol.8, No.6, November 2019.



# Analysis of Temperature in Solar Thermal By 3-D Finite Element Method

Issaraporn Amornsawatwattana  
School of Electrical Engineering  
Institute of Engineering  
Suranaree University of Technology  
Nakhon Ratchasima, Thailand  
issaraporn5640386@gmail.com

Padej Pao-la-or  
School of Electrical Engineering  
Institute of Engineering  
Suranaree University of Technology  
Nakhon Ratchasima, Thailand  
padej@sut.ac.th

**Abstract**—This paper presents a mathematical model of temperature in solar thermal which are evinced in the second-order partial differential equation. The solar thermal analysis uses copper pipe, aluminium pipe, and anodized aluminium pipe to compare temperature distribution of water from three types of pipe. In a computer simulation, 3-D finite element method established in MATLAB program were applied for temperature investigation. The result was shown the graphical performance of the water temperature in various type of pipe.

**Keywords**— solar thermal; 3-D finite element method (3-D FEM); computer simulation; temperature

## I. INTRODUCTION

It is known that the sun is the important energy. There are many ways to use the solar energy in thermal form. Especially, using the solar energy to make heat water for household. Although, Thailand is in the warm zone but still there are so many household and hotels use water heater. This paper will present the way to make the solar collector which it help to save energy and reduce the global warming.

For the purpose of analyzing temperature in solar thermal, the numerical approximation methods such as finite difference (FD) or finite element methods (FEM) have been recently utilized for temperature calculation [1]. Additionally, in nonlinearity of temperature involvement, the first approach is not often used for this occasion due to the lack of accuracy [1]. Moreover, the FEM is suitable for solving temperature problems in a broad range due to its flexibility, and accuracy. Therefore, in term of effectiveness, the FEM method to the solar thermal is more applicable than the FD method due to advantages of flexibility and accuracy.

In this task, the distribution of temperature in solar thermal is examined. The outcomes are obtained with the aid of a set of partial differential equations (PDE). The mathematical model of temperature in solar thermal based on a set of heat transfer equations states in Section II while the 3-D FEM by using Galerkin approach applied to solar thermal for the purpose of obtaining temperature distribution explains in

Section III. The linear tetrahedron elements can be discretized the domain of study with the 3-D FEM. Section III contains the conducted simulation based on the 3-D FEM method. Section IV expresses the dimension and parameter of solar thermal. In MATLAB program environment, all instructions for programming temperature analysis are coded. In section V, the data on the test precedent and simulation results are shown for investigation. The last section finalizes the conclusion of the study.

## II. MODELING OF TEMPERATURE FOR THE SIMULATION

The following 3-D heat transfer equation as in (1) with the heat source is used to obtain the temperature distribution in solar thermal [2].

$$k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} - \rho c \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Where

$T$  is temperature (°C)  
 $k$  is thermal conductivity (W/K-m)  
 $c$  is the capacity of the specific heat (J/kg-k)  
 $\rho$  is the density of the mass (kg/m<sup>3</sup>)  
 $Q$  is internal heat generation (W/m<sup>3</sup>)

## III. 3D-FEM FOR SOLAR THERMAL

### A. Discretization

In discretization, linear tetrahedron elements have discretized the domain of the temperature distribution with the 3D-FEM. Solid Work for 3D grid generation can be accomplished this characteristic. Fig. 1. and Fig. 2. displays details and grid representation of solar thermal respectively. The Asphalt Solar Collector is indicated at the top and middle layers as shown in the part of Fig. 1. In the same part of the figure, the insulation is at the bottom layer. The pipe for the water is shown in another part of the Fig. 1. The 76,994 nodes and 442,008 elements were contained in the region domain.

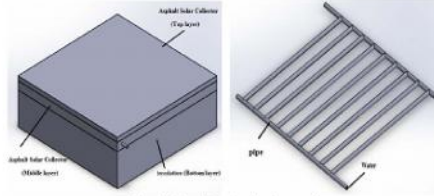


Fig. 1. Details of solar thermal

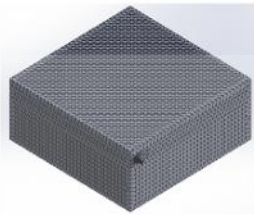


Fig. 2. Discretization of solar thermal

**B. Formulation of Finite Element**

In the particular method of weighted residual for the weighting functions which are the same as the shape function, Galerkin approach was used in heat transfer equations for governing each component from derived formula. In this research, the application of 4-node tetrahedron element (three-dimensional linear element) was employed in the shape function for 3D-FEM. According to the method, the temperature is expressed as follows equation as in (2) - (3) [3].

$$T(x, y, z) = T_1 N_1 + T_2 N_2 + T_3 N_3 + T_4 N_4 \quad (2)$$

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

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (3)$$

where  $V$  is the tetrahedron element volume, which is expressed as in equation (4).

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (4)$$

From Galerkin approach equation as referring in (1), the differential equation was then applied by using the weighted

residual method, where the element domain  $V$  as in (4) was performed by using the integrations as in (5) - (6) [4].

$$\int_V N_i \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V k \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_V N_i \rho c \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_V N_i (hT) dV = \int_V N_i Q dV + \int_V N_i (hT_s) dV \quad (5)$$

, or in the compact matrix form

$$[C]_{loc} \{ \dot{T} \}_{e1} + [K_c] + [K_v] + [K_b]_{loc} \{ T \}_{e1} = \{ Q_c \}_{e1} + \{ Q_b \}_{e1} \quad (6)$$

$$[C]_{loc} = \frac{\rho c V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$[K_c]_{loc} = \frac{k}{36V} \begin{bmatrix} bh_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & bh_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & bh_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & bh_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ bh_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & bh_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & bh_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ bh_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & bh_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ bh_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix}$$

Sym

$$[K_b]_{loc} = \frac{hV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$[K_v]_{loc} = \frac{\rho c}{24} \begin{bmatrix} uh_1 + vc_1 + wd_1 & uh_2 + vc_2 + wd_2 & uh_3 + vc_3 + wd_3 & uh_4 + vc_4 + wd_4 \\ uh_1 + vc_1 + wd_1 & uh_2 + vc_2 + wd_2 & uh_3 + vc_3 + wd_3 & uh_4 + vc_4 + wd_4 \\ uh_1 + vc_1 + wd_1 & uh_2 + vc_2 + wd_2 & uh_3 + vc_3 + wd_3 & uh_4 + vc_4 + wd_4 \\ uh_1 + vc_1 + wd_1 & uh_2 + vc_2 + wd_2 & uh_3 + vc_3 + wd_3 & uh_4 + vc_4 + wd_4 \end{bmatrix}$$

$$\{ Q_c \}_{e1} = \frac{hT_s V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\{ Q_b \}_{e1} = \frac{QV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

To simulate the solar thermal, the temperature distribution needs to be discretized as in (6). In (7) shows the continuation of discretization method. Consequently, in an interval of short time  $\Delta t$ , the time-dependent field is manipulated by discretizing the time. For endeavor on this task, forward difference method ( $\beta=0$ ), backward difference method ( $\beta=1$ ),

and Crank-Nicholson method ( $\beta=1/2$ ) are three basic methods used for the time discretization due to its convergence [5].

$$\beta \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + (1/\beta) \left\{ \dot{T} \right\}^t = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (8)$$

For this technique, (6) can be rewritten at time  $t+\Delta t$ . Thus, (6) becomes (9). Insert (7) into (9), (10) can be obtained.

$$[C] \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + [[K_c] + [K_h] + [K_v]] \{T\}^{t+\Delta t} = \{Q_o\} + \{Q_h\}^{t+\Delta t} \quad (9)$$

$$\left( \frac{1}{\Delta t} [C] + [[K_c] + [K_h] + [K_v]] \right) \{T\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [C] \{T\}^t + \{Q_o\} + \{Q_h\}^{t+\Delta t} \quad (10)$$

The FEM approximation expression is a  $4 \times 4$  matrix for one element containing four nodes. In the account of all elements in the system of  $n$  nodes, the equation of the system is sizable as the  $n \times n$  matrix.

IV. DIMENSION OF SOLAR THERMAL AND PARAMETER OF SOLAR THERMAL

The dimension of solar thermal is shown in Fig. 3 and parameter of solar thermal are provided in Table I and TABLE II.

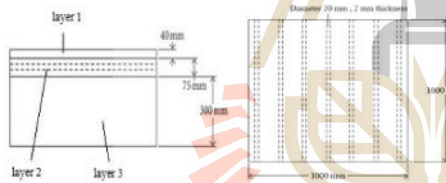


Fig. 3. Dimension of solar thermal [6]

TABLE I. PROPERTIES OF MATERIAL [6]

material	k (W/K·m <sup>2</sup> )	C (J/kg·k)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
HMA (layer 1)	1.83	920	2600
Base (layer 2)	1.83	920	2600
Subgrade (layer 3)	1.7	1800	2200
Copper pipe	400	385	8700
Aluminium pipe	205	896	2700
Anodized aluminium pipe	570	951	3200

TABLE II. INPUT DETAILS FOR THERMAL ANALYSIS IN FINITE ELEMENT [6]

Initial temperature	30°C
Internal heat generation	20,000 W/m <sup>3</sup>
Ambient temperature	30°C
Water inlet temperature	28°C
Inlet water velocity	50 mm/sec
convective heat transfer of water	20 kJ/kg

V. 3D – FEM SIMULATION RESULT

The FEM-based simulation conducted in this paper is coded with MATLAB programming for calculation of temperature distribution within solar thermal. To utilize a graphical feature of MATLAB, the graphical represent for temperature which varies with time is in Fig. 4 (copper pipe), Fig. 5 (aluminium pipe) and Fig. 6 (aluminium pipe) and the result when steady-state at 20 sec is presented in TABLE III.

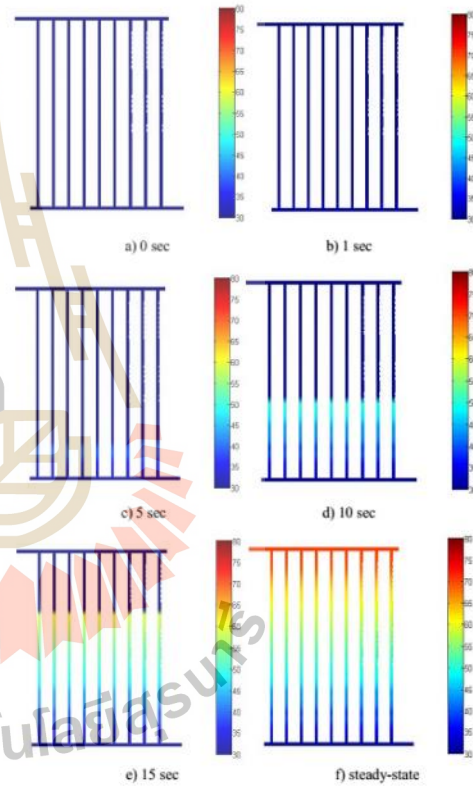


Fig. 4. Result of temperature distribution in water of copper pipe (°C)

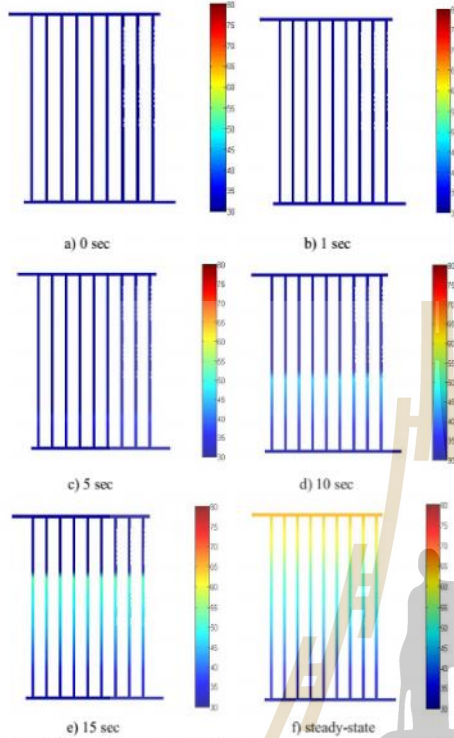


Fig. 5. Result of temperature distribution in water of aluminium pipe (°C)

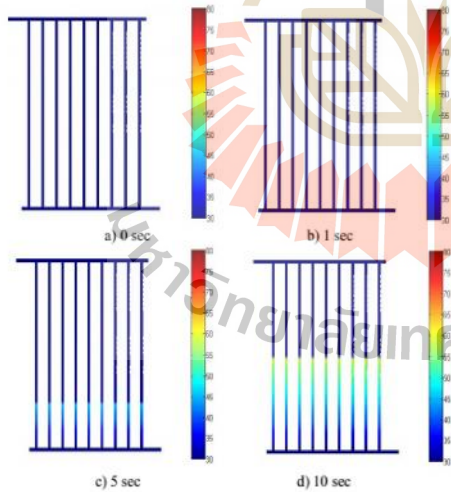


Fig. 6. Result of temperature distribution in water of anodized aluminium pipe (°C)

TABLE III: THE STEADY-STATE SIMULATION

Pipe	Copper pipe	aluminium pipe	anodized aluminium pipe
Max. temp. (°C)	72.01	65.74	79.65

From Fig. 4 (copper pipe), Fig. 5 (aluminium pipe), Fig. 6 (anodized aluminium pipe) and TABLE III show the result of temperature distribution in water using 3D-FEM. It can be seemed that the temperature in the anodized aluminium pipe has the maximum rate then the copper pipe and the least is an aluminium pipe. It conforms with S. Joe paper which mentioned that water temperature in the anodized aluminium pipe is 75 °C which is similar to water temperature rate in this article [7]. From the Fig. 4. a), Fig. 5 a), and Fig. 6 a) show Initial temperature (30 °C) which is the result from take boundary condition.

## VI. CONCLUSION

This article investigated the temperature that took place in solar thermal. The sample model from computer applied the 3D FEM which developed by MATLAB. It can be observed that the temperature in the anodized aluminium pipe has the maximum rate then the copper pipe and the least is an aluminium pipe.

## REFERENCES

- [1] P. Pao-la-or, S. Peaiyoung, T. Kulworawanichpong, and S. Sujitjorn, "Magnetic Field Simulation of an Induction Motor Using Nonlinear Time-Stepping Finite Element Method," 2<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2005), pp. 734 - 737, 2005.
- [2] R.W. Lewis, P. Nithiarasu, and K.N. Seetharamu, "Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow," John Wiley & Sons, USA, 2004.
- [3] M.A. Bhatti, "Advanced Topics in Finite Element Analysis of Structures," John Wiley & Sons, USA, 2006.
- [4] R.L. Kattari, "MATLAB Guide to Finite Elements (2nd edition)," Springer Berlin Heidelberg, USA, 2007.
- [5] M.A. Jabbar, H.N. Phyu, Z.J. Liu and C. Bi, "Modeling and numerical simulation of a brushless permanent-magnet dc motor in dynamic conditions by time-stepping technique," IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 40, No. 3, pp. 763-769, 2004.
- [6] J.B. Sheeba, A.K. Rohini, "Structural and Thermal Analysis of Asphalt Solar Collector Using Finite Element Method," Journal of Energy Volume, pp. 9, 2014.
- [7] S. Joe, "Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector," Solar Energy, pp. 211-222, 2005.

## Analysis of water temperature distribution in various type of absorber in solar thermal by 3-D finite element method

Padej Pao-la-or<sup>a</sup>, Issaraporn Amornsawatwattana<sup>b</sup>, a\*

<sup>a</sup>*School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*

### Abstract

This paper present mathematical model of temperature distribution in solar thermal which performs in second-order partial differential equation. Solar thermal analysis uses copper absorber, aluminum absorber, and anodized aluminum absorber to compare temperature distribution of water in pipe from three types of absorber. The paper simulation using 3-D finite element method that all the coded developed by MATLAB program and show the graphical represent for temperature which varies with time of glass, absorber, pipe, water, foil, and foam temperature in various type of absorber.

*Keywords: Solar thermal, 3-D finite element method (3-D FEM), computer simulation, temperature, absorber*

### 1. Introduction

It is well known that the sun is the vital energy. However, there are different ways to utilize the solar energy in thermal form. Mostly, for the household purposes, it used to energize water at various temperatures. Moreover, in Thailand, many household and hotels were still used water heater although it is in the warm zone as a tropical country. In this study, the method to produce the solar thermal which helps to conserve energy and minimize the global warming were presented.

Recently, for temperature calculation, the numerical approximation techniques such as finite difference (FD) or finite element methods (FEM) have been utilized in analyzation of solar thermal [1]. Furthermore, due to the lack of accuracy in nonlinear temperature involvement, the first approach is not frequently used for this occasion [1]. Nowadays, the FEM has become more appropriate for resolving temperature problems in a broad range due to its flexibility, and accuracy. Consequently, in term of potency, the FEM to the solar thermal is more applicable than the FD due to advantages of flexibility and efficiency [2]-[5].

Additionally, the temperature distribution in solar thermal is inspected. With the aid of a set of partial differential equations (PDE), the evaluations are acquired. In Section 2, the mathematical model of temperature in solar thermal based on a set of heat transfer equations are stated. The 3-D FEM by using

Galerkin approach applied from solar thermal to obtain temperature distribution is explained in Section III. Likewise, the linear tetrahedron elements have also been discretized the domain of disquisition on the 3-D FEM. Section 3 contains the carryout simulations initiated on the 3-D FEM method. Section 4 specifies the solar thermal dimensions and parameters. In programming temperature, MATLAB program is instructed for coded analysis to compare temperature distribution of water from three types of absorber when considered copper absorber [6], aluminum absorber [6], and anodized aluminum absorber [7], respectively. The data on the test precedent and simulation results are displayed in Section 5 for investigation. The last section concluded the conclusion of the study.

\* Manuscript received MM DD, 2018; revised MM DD, 2018.  
Corresponding author: Tel.: +66-44-22-4400, E-mail address: padej@sut.ac.th

## 2. Modeling of temperature for solar thermal

Equation (1) is shown 3-D heat transfer equation with the heat source is used to obtain the temperature distribution in solar thermal and Equation (1) is partial differential equations (PDE), so it uses FEM [8].

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \rho c \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Where,

$T$  is temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )

$k$  is thermal conductivity ( $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )

$c$  is the capacity of the specific heat ( $\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ )

$\rho$  is the density of the mass ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

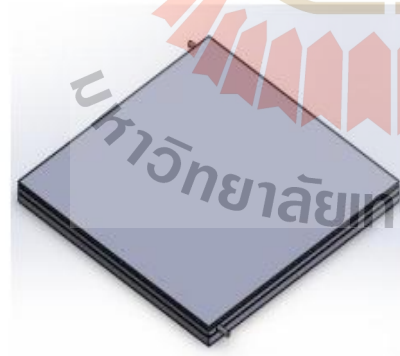
$Q$  is internal heat generation ( $\text{W}/\text{m}^3$ )

$u, v, w$  is axis velocity of water flow  $x, y, z$ , respectively ( $\text{m}/\text{sec}$ )

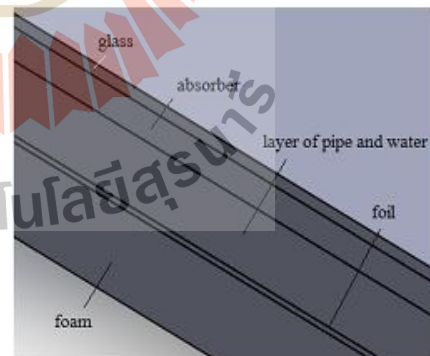
## 3. 3-D FEM for solar thermal

### 3.1. Discretization

The domain of study with the 3-D finite element method can be discretized by using linear tetrahedron elements. Solid Work for 3-D grid generation can be accomplished this characteristic. Fig. 1. displays details of solar thermal and Fig. 2. displays mesh of solar thermal and mesh of pipe and water. The solar thermal is indicated at the first layers is glass prevent dust and heat losing. The second layer is absorber which is absorbs solar radiation and converts it to be heat energy into the fluid. This layer for diagnose the property of each material which are copper absorber, aluminum absorber, and anodized aluminum absorber, respectively. The third layer is pipe and water. The absorber from second layer transfers heat to pipe then pipe transfers the heat to water. The fourth layer is foil, which is insulation and the last layer is foam, which is also insulation. The 76,994 nodes and 442,008 elements were contained in the region domain.



a) Details of solar thermal



b) Details of each layer



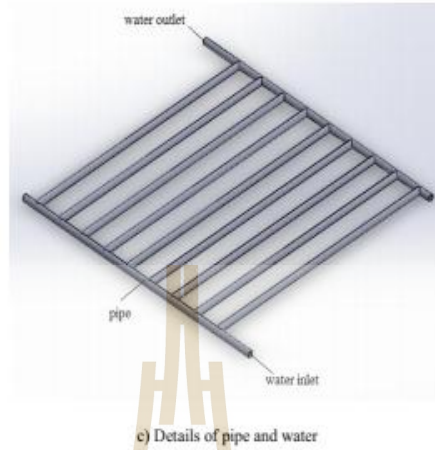


Fig. 1. Details of solar thermal

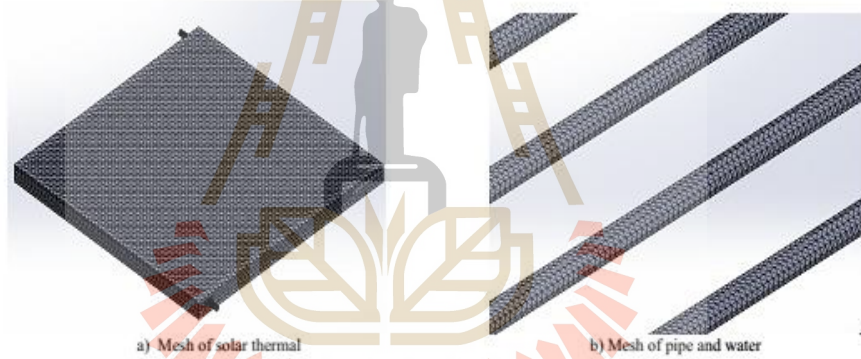


Fig. 2. Mesh of solar thermal

### 3.2. Formulation of finite element

In the particular method of weighted residual for the weighting functions that are similar in the shape function, Galerkin method was applied in heat transfer equations for controlling each component from the derived formula. For this paper, the 4-node tetrahedron element (three-dimensional linear element) was used for the shape function for 3-D finite element method. According to this method, in Equation (2) and Equation (3) are expressed corresponding with temperature [9].

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

Where,

$N_i, i = 1, 2, 3, 4$  is the element shape function. And the  $T_i, i = 1, 2, 3, 4$  is the temperature of each node (1, 2, 3, 4) of the elements, then

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (3)$$

Where,

$V$  is the volume of the tetrahedron element as in Equation (4).

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (4)$$

The positional coefficient defined by

$$\begin{aligned} a_1 &= x_4(y_2z_3 - y_3z_2) + x_5(y_4z_2 - y_2z_4) + x_2(y_3z_4 - y_4z_3) & b_1 &= y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3) \\ a_2 &= x_4(y_3z_1 - y_1z_3) + x_5(y_4z_1 - y_1z_4) + x_1(y_4z_3 - y_3z_4) & b_2 &= y_4(z_3 - z_2) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1) \\ a_3 &= x_4(y_1z_2 - y_2z_1) + x_5(y_4z_1 - y_1z_4) + x_1(y_2z_4 - y_4z_2) & b_3 &= y_4(z_3 - z_2) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2) \\ a_4 &= x_1(y_2z_1 - y_1z_2) + x_2(y_1z_3 - y_3z_1) + x_1(y_3z_2 - y_2z_3) & b_4 &= y_3(z_3 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) \\ c_1 &= x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2) & d_1 &= x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3) \\ c_2 &= x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3) & d_2 &= x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1) \\ c_3 &= x_1(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1) & d_3 &= x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2) \\ c_4 &= x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2) & d_4 &= x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) \end{aligned}$$

From Equation (1) is Galerkin approach equation as referring to the differential equation was then adapted by using the weighted residual method, in which element domain  $V$  as in Equation (4) was done by using the integrations as in Equation (5) [10].

$$\begin{aligned} & \int_V N_n \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V k \left( \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_V N_n \rho c \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_V N_n (hT) dV \\ &= \int_V N_n Q dV + \int_V N_n (hT_n) dV \end{aligned} \quad (5)$$

In the compact matrix form,

$$[C]_{k \times 4} \begin{Bmatrix} T \\ T \end{Bmatrix}_{k \times 4} + ([K_u] + [K_v] + [K_w])_{k \times 4} \begin{Bmatrix} T \end{Bmatrix}_{k \times 4} = \{Q\}_{k \times 4} + \{Q_h\}_{k \times 4} \quad (6)$$

$$[C]_{k \times 4} = \frac{\rho c V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[K_r]_{tot} = \frac{k}{36V} \begin{bmatrix} h_1b_1 + c_1c_1 + d_1d_1 & h_1b_2 + c_1c_2 + d_1d_2 & h_1b_3 + c_1c_3 + d_1d_3 & h_1b_4 + c_1c_4 + d_1d_4 \\ & h_2b_2 + c_2c_2 + d_2d_2 & h_2b_3 + c_2c_3 + d_2d_3 & h_2b_4 + c_2c_4 + d_2d_4 \\ & & h_3b_3 + c_3c_3 + d_3d_3 & h_3b_4 + c_3c_4 + d_3d_4 \\ \text{Sym} & & & h_4b_4 + c_4c_4 + d_4d_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[K_s]_{tot} = \frac{hV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[K_t]_{tot} = \frac{\rho C}{24} \begin{bmatrix} ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\{Q_s\}_{tot} = \frac{hT_a V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\{Q_e\}_{tot} = \frac{QV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Where,  
 $h$  is convective heat transfer (kJ/kg)  
 $T_a$  is ambient temperature (°C)

The simulation of solar thermal in temperature distribution needs to be discretized such as Equation (5) the continuation of discretization method shown in Equation (13). Therefore, the time-dependent field is improved by discretizing the time. For endeavor on this task, forward difference method ( $\beta=0$ ), backward difference method ( $\beta=1$ ), and Crank-Nicholson method ( $\beta=1/2$ ), the backward difference is used as shown in Equation (14) due to its convergence [11].

$$\beta \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + (1/\beta) \left\{ \dot{T} \right\}^t = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (13)$$

$$\left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (14)$$

The finite element estimate expression is a 4x4 matrix for one element containing four nodes. In the calculation of all elements in the system of  $n$  nodes,  $n \times n$  matrix as the sizable is the system equation.

#### 4. Dimension and parameter of solar thermal

The dimension of solar thermal is shown in Fig. 3. and parameter of solar thermal are provided in Table 1. And input details for thermal analysis are provided in Table 2. [6], [12].

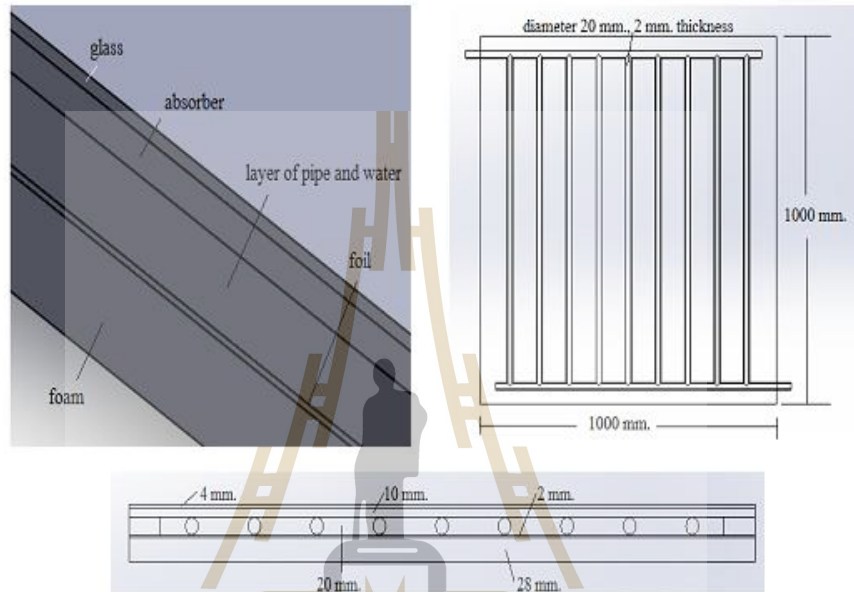


Fig. 3. Dimension of solar thermal

Table 1. Parameters of solar thermal simulation

Material	$k$ (W/m $\cdot$ °C)	$c$ (J/kg $\cdot$ °C)	$\rho$ (kg/m $^3$ )
Glass	1.05	840	2600
Absorber (copper)	400	385	8700
Absorber (aluminum)	205	896	2700
Absorber (anodize aluminum)	570	951	3200
Air	0.024	1005	1.2
Foil	0.0395	1200	2.6989
Foam	0.031	1500	30
Pipe (copper)	400	385	8700
Water	0.6	4187	100

Table 2. Input details for thermal analysis in finite element

Input details for solar thermal	
Initial temperature	30 °C
Ambient temperature	30 °C
Water inlet temperature	30 °C
Top layer temperature (glass)	40 °C
Inlet water velocity	50 mm/sec
Convective heat transfer of water	20 kJ/kg
$\Delta t$	1 sec
Axis velocity of water flow	-z

### 5. 3-D FEM simulation result

The FEM-based simulation conducted in the paper is coded with MATLAB programming for calculation of temperature distribution within solar thermal. To utilize a graphical feature of MATLAB, the graphical represent for temperature in Fig. 4., Fig. 6., and Fig. 8. show result when considered temperature distribution in solar thermal of copper absorber, aluminum absorber, and anodized aluminum absorber, respectively. Fig. 5., Fig. 7., and Fig. 9. show result of temperature distribution in water when considered copper absorber, aluminum absorber, and anodized aluminum absorber, respectively. Maximum and Minimum temperature in each layer of solar thermal when considered copper absorber, aluminum absorber, and anodized aluminum absorber are presented in Table 3., Table 4., and Table 5., respectively.

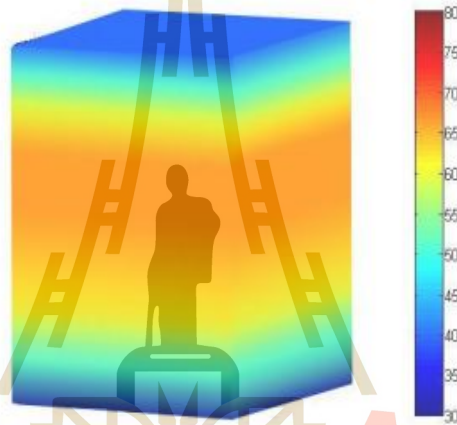


Fig. 4. Result of temperature distribution in solar thermal when considered copper absorber (°C)

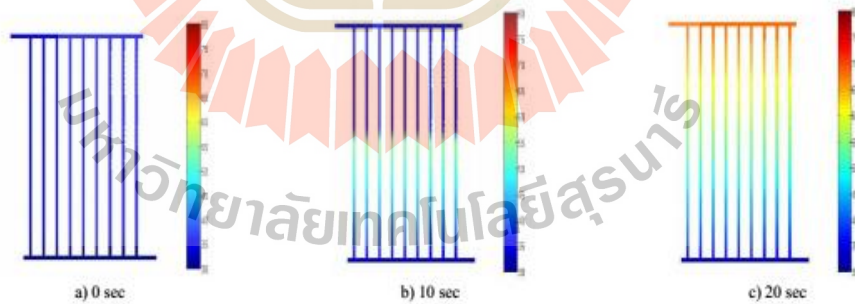


Fig. 5. Result of temperature distribution in water when considered copper absorber (°C)

Table 3. Maximum and minimum temperature in solar thermal when considered copper absorber

Results (°C)	glass	absorber	pipe	water	foil	foam
Max. temp.	44.32	61.17	62.14	<b>68.74</b>	62.45	58.09
Min. temp.	40	44.32	61.98	30	58.09	30

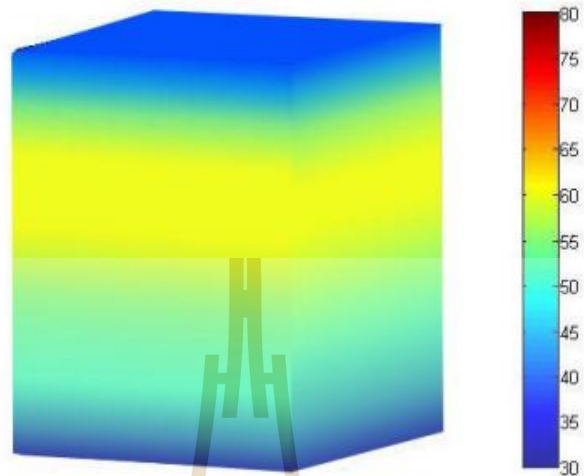


Fig. 6. Result of temperature distribution in solar thermal when considered aluminum absorber (°C)

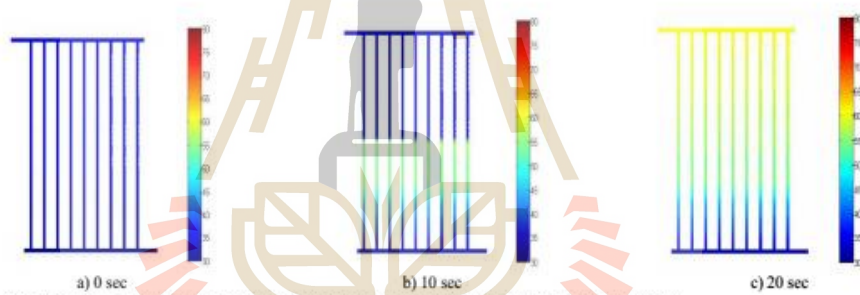


Fig. 7. Result of temperature distribution in water when considered aluminum absorber (°C)

Table 4. Maximum and minimum temperature in solar thermal when considered aluminum absorber

Results (°C)	glass	absorber	pipe	water	foil	foam
Max. temp.	42.12	53.27	57.14	<b>60.68</b>	56.48	55.12
Min. temp.	40	42.12	56.27	30	55.12	30

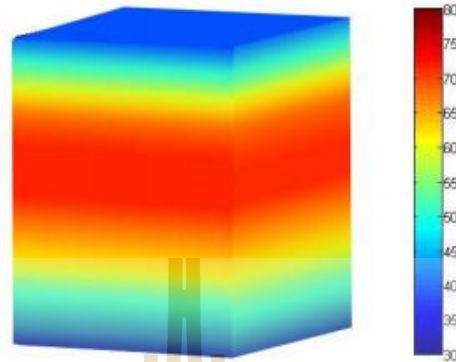


Fig. 8. Result of temperature distribution in solar thermal when considered anodize aluminum absorber (°C)

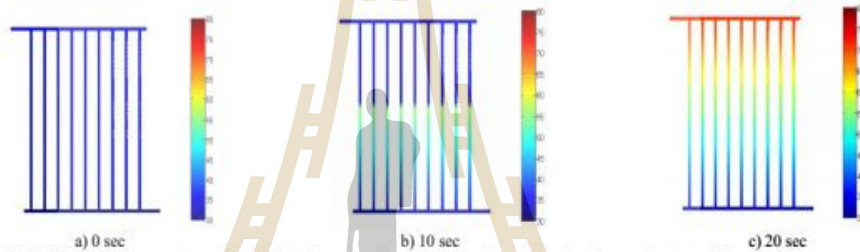


Fig. 9. Result of temperature distribution in water when considered anodize aluminum absorber (°C)

Table 5. Maximum and minimum temperature in solar thermal when considered anodize aluminum absorber

Results (°C)	glass	absorber	pipe	water	foil	foam
Max. temp.	52.36	65.72	62.39	<b>72.36</b>	66.41	60.87
Min. temp.	40	52.36	61.88	30	60.87	30

From Fig. 4., Fig. 6., and Fig. 8. present result of temperature distribution in solar thermal when considered copper absorber, aluminum absorber, and anodized aluminum absorber, respectively which show that the temperature is higher up from glass layer (40°C) to absorber then go to layer of water respectively due to heat accumulation when sunlight touch solar thermal and heat transfusion from absorber to pipe which pipe will transfer the heat to water. So the water gets maximum temperature. After that, foil and foam will be an insulator by not let the heat out then temperature will be lower from water pipe to foil and foam till the temperature rate is ambient temperature (30°C) of solar thermal.

From Fig. 5., Fig. 7., and Fig. 9. present result of temperature distribution in water when considered copper absorber, aluminum absorber, and anodized aluminum absorber, respectively, which show that when the water is released, the temperature is not changed much since the heat accumulation is not enough to transfer heat to absorber. But when heat accumulation can transfer heat to absorber, the water will be changed very fast. Water is steady state because water flow out continuously and new water will replace the old part. The temperature will be higher from the bottom zone that water inlet into above zone that water flow outlet because of heat accumulation in every time that water is flowing. From a) 0 sec, Fig. 5., Fig. 7., and Fig. 9., it is the first picture show when sunlight transfer the heat to water. Water outlet at steady state has maximum temperature is 68.74 °C, 60.68 °C, 72.36 °C when considered copper absorber, aluminum absorber, and anodized aluminum absorber, respectively. Which water outlet anodized aluminum absorber is the maximum temperature.

Form Table 3, Table 4, and Table 5 show maximum temperature and minimum temperature in each layer of solar thermal when considered copper absorber, aluminum absorber, and anodized aluminum absorber, respectively. The anodized aluminum absorber has the maximum water temperature. Next, the water temperature of copper absorber and the least is water temperature of aluminum absorber. Due to anodized aluminum has conductivity is the maximum rate then the copper and the least is aluminum.

## 6. Conclusion

This article investigated the temperature that took place in solar thermal. The sample model from computer applied the 3-D FEM which developed by MATLAB. This paper is time-dependent field which is improved by discretizing time. It can be observed that the temperature of the anodized aluminum absorber has the maximum water temperature. Next, the water temperature of copper absorber and the least is water temperature of aluminum absorber.

## Acknowledgements

This work was supported by School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

## References

- [1] Pao-la-or P, Peaiyoung S, Kulworawanichpong T, Sujitjorn S. Magnetic Field Simulation of an Induction Motor Using Nonlinear Time-Stepping Finite Element Method. *2<sup>nd</sup> International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2005)*, 2005; 734 – 737.
- [2] Pao-la-or P, Isaramongkolrak A, Kulworawanichpong T, Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV Power Transmission Systems. *Engineering Letters*, 2010; No.1, Vol. 1:1-9.
- [3] Pao-la-or P, Study of Magnetic Field Shielding Roof of Cabin Electricity Authority Resulting in Operators Working WSEAS Transaction on Power System, 2011; No. 6, Vol. 10:163-172.
- [4] Bunmat A, Pao-la-or P, Analysis of Magnetic Field Effects Operators Working a Power Transmission Line Using 3-D Finite Element Method. *18<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machine and System (ICEMS), Oct. 25-28, Pattaya City, Thailand.*:1187-1191.
- [5] Vacharakup S, Peerasaksophol M, Kulworawanichpong T, Pao-la-or P, Study of Natural Frequencies and Characteristics of Piezoelectric Transformers by Using 3-D Finite Element Method. *Applied Mechanics and Materials*, 2012; Vols. 110-116:61-66.
- [6] Sheeba JB, Rohini AK, Structural and Thermal Analysis of Asphalt Solar Collector Using Finite Element Method, *Journal of Energy*, 2014; Vols. 9.
- [7] Roos A, Georgson M, Tin-oxide-coated anodized aluminium selective absorber surfaces II. Aging and durability, *Journal of Energy*, March 1991; Vol. 22, Issue 1: 29-41.
- [8] Lewis RW, Nithiarasu P, Seetharamu KN, Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow, *John Wiley & Sons, US*, 2004.
- [9] Bhatti MA, Advanced Topics in Finite Element Analysis of Structures, *John Wiley & Sons, USA*, 2006.
- [10] Kattan PT, *MATLAB Guide to Finite Elements (2nd edition)*, Springer Berlin Heidelberg, USA, 2007.
- [11] Jabbar MA, Phyu HN, Liu ZJ, Bi C, Modeling and numerical simulation of a brushless permanent-magnet dc motor in dynamic conditions by time-stepping technique, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2004; Vol. 40, No. 3, 763-769.
- [12] Amornsawatwattana I, Pao-la-or P, Analysis of temperature in solar thermal by 3-D finite element method, *5<sup>th</sup> International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand*, March 2017; Vol: 2:208-211.



## ประวัติผู้เขียน

นางสาวอิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์พัฒนา เกิดเมื่อวันที่ 23 สิงหาคม 2533 ที่โรงพยาบาลวชิระ กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสิงห์บุรี อำเภอเมือง จังหวัดสิงห์บุรี เมื่อ พ.ศ. 2552

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาเมื่อ พ.ศ. 2556 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาเมื่อ พ.ศ. 2558 ภายหลังจากศึกษาได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาเอกสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ปฏิบัติงานเป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานตีพิมพ์ตีพิมพ์ปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ค.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี