

ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อใช้งานกับเปลือกอาคารและระบบ
ผนังสองชั้นระบายอากาศ

นายพรหมพิทักษ์ อัสรางชัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PERFORMANCE OF THERMOELECTRIC GENERATOR USING WITH BUILDING ENVELOPE AND AIRFLOW WINDOW SYSTEM

Mr. Prompitak Asarangchai



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Architecture Program in Architecture

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อใช้งานกับเปลือกอาคารและระบบผนังสองชั้น
ระบายอากาศ

โดย

นายพรหมพิทักษ์ อัสรางชัย

สาขาวิชา

สถาปัตยกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถนัย เศรษฐบุตุตร

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปิ่นรัชฎ์ กาญจนนัฐิติ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถนัย เศรษฐบุตุตร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ณรงค์วิทย์ อารีมิตร)

5773325025 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS: THERMOELECTRIC / RENEWABLE ENERGY / SEEBECK EFFECT

PROMPITAK ASARANGCHAI: PERFORMANCE OF THERMOELECTRIC GENERATOR USING WITH BUILDING ENVELOPE AND AIRFLOW WINDOW SYSTEM. ADVISOR: ASST. PROF. ATCH SRESHTHAPUTRA, Ph.D., 64 pp.

This research aims at investigating the performance of Thermoelectric Generator using the Seebeck Effect applied on building façade. The idea is that when solar radiation is absorbed on the windows, it will lead to temperature differences across the glass facade thus causing electric current if thermoelectric is installed on the glass window. This study is experimental using a test chamber of double glass facades installed on a real house. Four cases of experiments are passive and active airflow windows both equipped with black and white painted thermoelectric modules. The experimental data on two day during summer season in Bangkok show that the Active airflow window system using ventilation fan works well with both black and white painted TE modules. The performance of Active system is superior to the Passive ones. Black TE modules generate more electricity as they absorbed more solar radiation. The building energy simulations using the DOE-2 program was also performed in order to estimate the total annual energy production from the building façade equipped with TE modules. Simulated data show that Active airflow window with black TE module generate 1,052.75 W/m².year. Active airflow window with white TE modules, 520.02 W/m², Passive airflow window with black TE modules, 339.89 W/m².year, and Passive airflow window with white TE modules, 236.51 W/m².year.

Department: Architecture

Student's Signature

Field of Study: Architecture

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้หากขาดความอนุเคราะห์จากบุคคลดังต่อไปนี้

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร ที่คอยให้คำแนะนำรวมถึงชี้แนวทางในการปฏิบัติงานวิจัยทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติตั้งแต่เริ่มต้นงานวิจัยจนเสร็จสิ้น

ผศ.ดร.วรภัทร์ อิงค์โรจน์ฤทธิ์ และ รศ.พรรณชลัท สุริโยธิน ที่ปูพื้นฐาน ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือทางวิชาการต่างๆเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่เป้ง ตังเม เพื่อนๆและพี่ร่วมชั้นที่คอยให้กำลังใจ ให้คำแนะนำและช่วยเหลือกันมาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงได้



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 วิธีการศึกษา.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 ขอบเขตและข้อจำกัดของการศึกษา.....	5
บทที่ 2	6
ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การถ่ายเทความร้อนของวัตถุและเปลือกอาคาร.....	6
2.1.1 การนำความร้อน (Heat Conduction).....	7
2.1.2 การพาความร้อน (Heat Convection).....	8
2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation).....	8
2.2 การระบายความร้อนด้วยวิธีธรรมชาติ.....	8
2.2.1 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการระบายอากาศ (Ventilative cooling) ...	9
2.2.2 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการแผ่รังสี (Radiative cooling)	9
2.2.3 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการระเหยของน้ำ (Evaporative cooling)..	9
2.2.4 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการลดความชื้นในอากาศ (Dehumidification)	9

2.2.5 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติโดยการนำใช้คุณสมบัติของมวลสาร (Mass-effect cooling)	9
2.3 คุณสมบัติและปรากฏการณ์ต่างๆของ Thermoelectric Module	9
2.3.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect)	10
2.3.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)	11
2.3.3 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module)	13
2.3.3.1 โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	13
2.3.3.2 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	14
บทที่ 3	16
ระเบียบวิธีวิจัย	16
3.1 ศึกษาแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
3.2 ขั้นตอนการวิจัย	16
3.2.1 การทดลองที่ 1 ทดสอบความเป็นไปได้ของระบบกับเปลือกอาคาร	17
3.2.2 การทดลองที่ 2 เพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วยวิธีการใช้ Airflow Window	20
3.2.3 การทดลองที่ 3 ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation)	23
3.2.3.1 การวิเคราะห์ผลการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้ออกในแต่ละปี	24
3.2.3.2 การวิเคราะห์ผลการผลิตไฟฟ้าเมื่อทำการติดตั้งระบบในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งานช่องเปิดอาคาร	24
3.3 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล	24
3.4 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	27
3.5 แผนการวิจัย	27
บทที่ 4	28
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	28
4.1 ผลการทดลองที่ 1 ทดสอบความเป็นไปได้ของระบบกับเปลือกอาคาร	28

4.2 ผลการทดลองที่ 2 เพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วยวิธีการใช้ Airflow Window.....	30
4.3 ผลการทดลองที่ 3 ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation).....	41
4.3.1 การวิเคราะห์ผลการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้รวมในแต่ละปี.....	41
4.3.2 การวิเคราะห์ผลการผลิตไฟฟ้าเมื่อทำการติดตั้งระบบในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งานช่องเปิดอาคาร.....	46
บทที่ 5	52
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	52
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	52
5.1.1 สรุปผลการทดลองที่ 1 ทดสอบความเป็นไปได้ของระบบกับเปลือกอาคาร	52
5.1.2 สรุปผลการทดลองกับระบบ Airflow window	52
5.1.3 สรุปผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์	54
5.1.3.1 สรุปผลการจำลองผลการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้รวมในแต่ละปี.....	54
5.1.3.2 สรุปผลการจำลองผลการผลิตไฟฟ้าเมื่อทำการติดตั้งระบบในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งานช่องเปิดอาคาร.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
รายการอ้างอิง	57
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	64

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของวัสดุ.....	7
ตารางที่ 3.1 ช่วงระยะเวลาและแผนการวิจัย.....	27
ตารางที่ 4.1 อัตรา Heat transfer และ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบ.....	36
ตารางที่ 4.2 จำนวนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละกรณีทดลองเปรียบเทียบกับค่าความต่าง ของอุณหภูมิ.....	37
ตารางที่ 4.3 พลังงานไฟฟ้าเปรียบเทียบกับ Solar radiation และความต่างของอุณหภูมิใน.....	39
ตารางที่ 4.4 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละกรณีในระยะเวลา 1 ปี.....	46
ตารางที่ 4.5 การใช้พลังงานของอาคารและผลการผลิตพลังงานของระบบ TEG ในแต่ละกรณี.....	46
ตารางที่ 4.6 กรณี 100% ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละกรณีในระยะเวลา 1 ปี.....	47
ตารางที่ 4.7 กรณี 75% ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละกรณีในระยะเวลา 1 ปี.....	48
ตารางที่ 4.8 กรณี 50% ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละกรณีในระยะเวลา 1 ปี.....	49
ตารางที่ 4.9 กรณี 25% ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละกรณีในระยะเวลา 1 ปี.....	50
ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพของ Passive airflow window Thermoelectric Generator เมื่อติดตั้งในสัดส่วนต่างๆ.....	51
ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพของ Active airflow window Thermoelectric Generator เมื่อติดตั้งในสัดส่วนต่างๆ.....	51

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนของวัตถุ.....	6
ภาพที่ 2.2 วงจรการเกิดปรากฏการณ์ซีเบค.....	10
ภาพที่ 2.3 ภาพการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำที่มีอุณหภูมิสองด้านไม่เท่ากัน.....	11
ภาพที่ 2.4 วงจรการเกิดปรากฏการณ์เพลเทีย.....	11
ภาพที่ 2.5 แสดงการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียกับสารกึ่งตัวนำชนิด N	12
ภาพที่ 2.6 แสดงการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียกับสารกึ่งตัวนำชนิด P.....	12
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล.....	13
ภาพที่ 2.8 การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในรูปแบบ TEC.....	14
ภาพที่ 2.9 การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในรูปแบบ TEG.....	15
ภาพที่ 3.1 แสดง TEC1-12706 พัฒลระบบระบายอากาศในระบบ Air flow window	17
ภาพที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ เก็บข้อมูลอุณหภูมิ 12 Channels Temperature Recorder	18
ภาพที่ 3.3 แสดงตำแหน่งของห้องและตำแหน่งของตัววัดอุณหภูมิในการทดลองที่ 1.....	19
ภาพที่ 3.4 แสดงการติดตั้ง เทอร์โมอิเล็กทริก กับผนังที่บ ผนังกระจก	19
ภาพที่ 3.5 แสดงการทำงานของระบบ Airflow window.....	20
ภาพที่ 3.6 แสดงการติดตั้งกล่องทดลองบริเวณหน้าต่างทิศใต้ของอาคาร.....	21
ภาพที่ 3.7 แสดงตำแหน่งการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ Thermocouple Type K.....	21
ภาพที่ 3.8 โปรแกรม Visual DOE4.1.....	23
ภาพที่ 3.9 ผนังของอาคารจำลองจากโปรแกรม Visual DOE.....	23

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การคิดค้นแหล่งพลังงานที่สะอาด ประหยัด และยั่งยืน เป็นสิ่งที่มีความสำคัญและมีการคำนึงถึงอย่างมากในโลกยุคปัจจุบันเพราะทรัพยากรธรรมชาติเริ่มหาได้ยากและมีราคาสูง อีกทั้งปัญหาสภาวะโลกร้อนที่ตามมาจากการเผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิลก็ยิ่งทวีความรุนแรงขึ้นในทุกๆปี

จากปัญหาดังกล่าว มนุษย์ได้คิดค้นการแปลงพลังงานความร้อนให้เกิดเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วย Peltier effect หรือในทางกลับกันสามารถแปลงไฟฟ้าให้เป็นความร้อนด้วย Seebeck effect ได้ด้วยอุปกรณ์ที่ชื่อว่า เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric, TE) กระบวนการแปลงกระแสไฟฟ้ามาเป็นพลังงานความร้อน นั้นเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนในขั้วของสารกึ่งตัวนำภายในอุปกรณ์ ส่งผลให้ขั้วด้านหนึ่งของอุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริก ทำการดึงความร้อนจากผิวสัมผัสฝั่งหนึ่งและนำความร้อนผ่านตัวอุปกรณ์ไปสู่ผิวอีกฝั่ง จากการใช้ไฟฟ้าดึงความร้อนนี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำเป็นเครื่องทำความเย็นและเครื่องทำความร้อนในอุปกรณ์ต่างๆเช่น คอมพิวเตอร์ ตู้เย็น เป็นต้น

กระบวนการแปลงพลังงานความร้อนให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า (Seebeck effect) นั้นคือใช้ความร้อนที่เกิดขึ้นเองทั้งในธรรมชาติหรือกิจกรรมต่างๆของมนุษย์เช่น แสงอาทิตย์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ความร้อนจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องยนต์ จนไปถึงความร้อนที่แผ่ออกมาจากร่างกายของมนุษย์มาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า อุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริก นี้ประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) 2 ชนิด อยู่กันเป็นคู่ๆ N และ P และประกบด้วยวัสดุผิวเรียบที่มีความสามารถในการนำความร้อนได้ดี อุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริก จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จากการไหลของอิเล็กตรอนจากหน้าผิวฝั่งที่ร้อน ไปสู่ฝั่งที่เย็นกว่าทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและนำไปสู่การผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป

การผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนของอุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริก นี้ไม่มีการเผาผลาญเชื้อเพลิง ไม่ทำให้เกิดสารพิษที่เป็นอันตรายจากการเผาไหม้ ไร้เสียงเพราะไม่มีวัสดุอุปกรณ์ที่ต้อเคลื่อนไหว และตัวอุปกรณ์เองมีอายุการใช้งานยาวนานและสามารถถอดประกอบ รวมไปถึงการบำรุงรักษาที่ไม่ยุ่งยาก เนื่องจากไม่มีการใช้ของเหลวหรือสารทำความเย็นเพิ่มเติม

จากที่กล่าวมาข้างต้น อุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริก น่าจะเป็นตัวเลือกที่ดีในการผลิตพลังงานหรือลดการใช้พลังงานของระบบต่างๆได้ แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยขนาดและราคาของอุปกรณ์เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการทำความเย็นรวมของอุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริก เองยังถือว่าต่ำกว่าระบบทำความเย็นที่ใช้ในปัจจุบันอย่างเครื่องปรับอากาศที่ใช้สารทำความเย็น และประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริก ก็ยังน้อยกว่าระบบผลิตแบบเครื่องจักรที่ต้องเติมเชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่ทั้งนี้การพยายามศึกษาและทำวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ชิ้นนี้ให้มีคุณภาพสูงขึ้น ทั้งประสิทธิภาพการทำความเย็น การผลิตกระแสไฟฟ้าและ ความทนทานของตัววัสดุ เพื่อให้สามารถใช้ในระบบงานที่มีขนาดใหญ่ได้อย่างเต็มที่

จากการศึกษาบทความและงานวิจัยของ [1] Mohamed Hamid Elsheikh (2014) เรื่อง A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance งานวิจัยของ [2] Ritesh A. Khire (2005) และคณะเรื่อง Design of thermoelectric heat pump unit for active building envelope system และงานวิจัยของ [3] Constatinos Hadjistassou (2012) เรื่อง Designing high efficiency segmented thermoelectric generators พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ Thermoelectric generator นั้นมี 4 ปัจจัยสำคัญคือ

- i. คุณสมบัติของอุปกรณ์ Thermoelectric module คือ 1. Seebeck coefficient (S) หรือความสามารถในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมีความต่างของอุณหภูมิที่ผิวสัมผัส 2. Electric resistivity (Re) หรือสภาพการต้านทานไฟฟ้า และ 3. Thermal conductivity (K) หรือสภาพการนำความร้อนของตัว Thermoelectric module
- ii. ชนิด Material ของอุปกรณ์ Thermoelectric modules โดยวัสดุหลักที่นิยมนำมาใช้ในสร้างอุปกรณ์ TE คือ โลหะ เซรามิก โพลีเมอร์ และวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- iii. ความต่างของอุณหภูมิ ที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้าน ยิ่งมีค่าความต่างของอุณหภูมิมาก การไหลของอิเล็กตรอนจะมีมากขึ้นและส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น
- iv. ประสิทธิภาพของ heat sink หรือตัวระบายความร้อนออกจากระบบของ Thermoelectric modules ถ้าการระบายความร้อนมีประสิทธิภาพมาก จะสามารถทำให้ค่าความต่างของอุณหภูมิมีมากขึ้นและคงค่าความต่างของอุณหภูมิได้นานขึ้นอีกด้วย

งานวิจัยของ [4] S.A. Omer (1998) และคณะเรื่อง Design optimization of thermoelectric devices (1997) เป็นการทดลองเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติต่างๆ ในตัวของ Thermoelectric module ว่าค่า Electric resistivity (Re) และค่า Thermal conductivity (K) นั้นมีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้อย่างไรบ้าง โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ผิวด้านหนึ่งของอุปกรณ์ Thermoelectric module หลายๆชนิดที่มีค่าคุณสมบัติต่างกัน จากการวิจัยนี้พบว่า ยิ่งตัว Thermoelectric modules มีค่าการนำความร้อนสูงจะผลิตพลังงาน (Watt) ได้มากกว่าอุปกรณ์ TE ที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ กลับกันกับค่าความต้านทานไฟฟ้า Module ที่มีค่าการต้านทานไฟฟ้าต่ำจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์

Thermoelectric modules ที่มีค่าการนำความร้อนสูงนั้น จะมีการถ่ายเทความร้อนจากผิวสัมผัสฝั่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่ามายังฝั่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าได้อย่างรวดเร็วจนในที่สุด ค่าความต่างอุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลงทำให้เสียประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าไปรวดเร็วกว่าตัว Module ที่มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สามารถคงค่าความต่างของอุณหภูมิได้นานกว่าและสามารถผลิตพลังงานได้คงที่กว่านั่นเอง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ [5] Clemens Suter (2010) ที่ทำการทดลองวิจัยในลักษณะเดียวกันแต่เป็นการใช้แสงอาทิตย์ในการทำความร้อนในตัว Thermoelectric Module ก็ให้ผลด้านประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน

ระบบระบายความร้อนของ Thermoelectric Generator ก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญในการผลิตพลังงานไฟฟ้า การวิจัยของ [6] Stephen John (2014) เรื่อง High Efficient Seebeck Thermoelectric Device for Power System Design ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการ Natural Convection ที่ใช้เพียงการระบายความร้อนจากกระแสลมธรรมชาติและระบบระบายความร้อนแบบ Water Thermal Mass โดยพบว่าการใช้ระบบระบายความร้อนทั้ง 2 แบบนี้ สามารถเพิ่มค่าความต่างของอุณหภูมิได้มากขึ้นและนานขึ้นกว่าการไม่ใช้ระบบระบายความร้อน โดยระบบระบายความร้อนแบบ Natural convection สามารถคงค่าความต่างของอุณหภูมิได้นานกว่า และระบบการระบายความร้อนแบบ Water thermal mass จะทำให้ค่าความต่างของอุณหภูมิมากกว่า

การวิจัยของ [7] Jinsheng Xiao (2012), [8] Wei He (2012), [9] Daniel Kraemer (2012) ที่ทำการทดลองเกี่ยวกับการนำเลนส์รวมแสงจากดวงอาทิตย์ในลักษณะและใช้วัสดุต่างๆกันในแต่ละงานวิจัย เพื่อเก็บพลังงานความร้อนให้ได้มากที่สุด โดยสามารถทำให้อุณหภูมิช่วง 13:00น. – 15:00 น. สูงได้ถึง 120-150 องศาเซลเซียส ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่เพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบ Thermoelectric generator จากค่าความต่างของอุณหภูมิได้เช่นกัน

จากการทบทวนงานวิจัยข้างต้น จะเห็นได้ว่า ระบบ Thermoelectric generator นั้นมีศักยภาพและมีความสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้งานได้จริง โดยระบบ Thermoelectric generator นั้นมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบอื่น คือ Thermoelectric module ที่ใช้ในการทดลองที่กล่าวมาแล้วคือ TEC1-12706 มีขนาดเพียง 40mm X 40mm X 3.8mm ก็สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 0.5-0.7 Watt ที่ความต่างของอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส มีอายุการใช้งาน 10 ปีขึ้นไป และมีความสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยความสามารถของระบบดังที่กล่าวมานั้น ระบบ Thermoelectric generator สามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบขนาดเล็กในอาคารเช่น โคมไฟฟ้าขนาดเล็ก หรือเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ได้มาในตอนกลางวันและนำมาช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างช่วงตอนกลางคืนได้ และเป็นแหล่งพลังงานสะอาดอีกทางเลือกหนึ่งต่อจาก Solar Cell ที่ในขณะนี้ยังมีราคาค่อนข้างสูง อีกทั้งในเขตภูมิอากาศร้อนชื้นแบบในประเทศไทยยังมีอุณหภูมิภายนอกอาคารจากแสงแดดที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิผิวเปลือกอาคารภายนอกสูงขึ้นได้ถึง 50 องศาเซลเซียส ซึ่งง่ายต่อการทำให้เกิดค่าความต่างของอุณหภูมิภายใน-ภายนอกอาคาร

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ทำการศึกษาและทดลองประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อนของอุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริก และประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบ Airflow window ในรูปแบบของ Active และ Passive system
- 1.2.2 เพื่อสามารถนำอุปกรณ์ Thermoelectric Generator มาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยทฤษฎี Seebeck effect และจากความต่างของอุณหภูมิที่เกิดจากการใช้งานในพื้นที่ในอาคารปรับอากาศกับอุณหภูมิภายนอกได้
- 1.2.3 ศึกษาความสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากระบบ Thermoelectric Generator เมื่อใช้งานร่วมกับระบบ Airflow window รูปแบบต่างๆ
- 1.2.4 ศึกษาถึงความเหมาะสมของสัดส่วนระบบที่ติดตั้งบนพื้นผิวกระจกอาคาร

1.3 วิธีการศึกษา

- 1.3.1 ทบทวนเกณฑ์ วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 1.3.2 ศึกษาเรื่องของอุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริก ค่าตัวแปรทางไฟฟ้าในตัวอุปกรณ์และปรากฏการณ์ที่เกิดจากตัวอุปกรณ์ชนิดนี้
- 1.3.3 จำลองชุดระบบอุปกรณ์ให้สถานที่ห้องทดลองเพื่อศึกษาระบบ Airflow window และประเมินความเป็นไปได้ในการพัฒนาและนำค่าที่ได้ไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป
- 1.3.4 จำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ชุดอุปกรณ์เพื่อผลิตพลังงานใช้จริง โดยใช้อาคารสำนักงานเนื่องจากการใช้งานของอาคารส่วนใหญ่เป็นเวลาการวันที่ระบบ เทอร์โมอิเล็กทริก สามารถทำงานได้และสอดคล้องกับการช่วงเวลาการใช้ไฟฟ้าของอาคาร
- 1.3.5 วิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual DOE 4.1 ในด้านการใช้พลังงาน พลังงานที่ได้รับ และเทียบกับระบบผลิตพลังงานทดแทนอื่นๆเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ในด้านการผลิตพลังงาน อายุการใช้งาน การลงทุน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 พัฒนาทางเลือกในการใช้ระบบ Thermolectric Generator ประกอบกับการใช้ระบบ Airflow window ในการเป็นแหล่งพลังงานทดแทนในอาคาร
- 1.4.2 ได้แนวในการเลือกใช้อุปกรณ์ Thermolectric Generator ให้เกิดประโยชน์กับอาคารจริงได้
- 1.4.3 ทราบถึงประสิทธิภาพและขีดความสามารถของอุปกรณ์ Thermolectric Generator และระบบ Airflow window และเพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาต่อไป

1.5 ขอบเขตและข้อจำกัดของการศึกษา

- 1.5.1 ทำการทดลองด้วยอุปกรณ์ Thermolectric รุ่น TEC1-12706 เท่านั้น
- 1.5.2 ทำการทดลองกับสถานที่จริงคือห้องปรับอากาศ โดยเปิดระบบปรับอากาศที่ 25 องศาเซลเซียสเท่านั้น ตั้งแต่เวลา 8:00น. ถึงเวลา 18:00น. ติดตั้งชุดอุปกรณ์บนกระจกใสธรรมดาหนา 6 มิลลิเมตร และบนผนังก่ออิฐฉาบปูนหนา 10 เซนติเมตร
- 1.5.3 ทำการทดลองกับผนังและกระจกหน้าต่างทางทิศใต้เท่านั้น ไม่ได้ทดลองกับทิศอื่นโดยรอบอาคาร
- 1.5.4 ทำการทดลองในวันที่มีแดดจัดคือวันที่ 13 – 14 มีนาคม พ.ศ. 2558 เท่านั้นไม่ได้ครอบคลุมทุกฤดูกาลและสภาพอากาศ
- 1.5.5 การวิจัยครั้งนี้ไม่ได้คำนวณไปถึงเรื่องความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

บทที่ 2

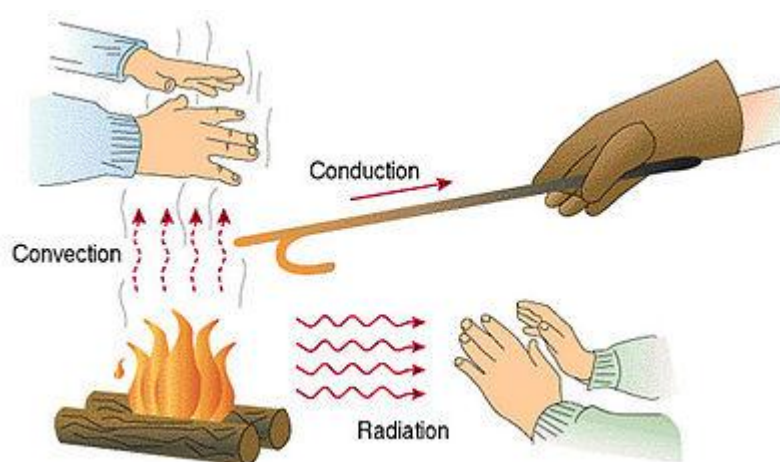
ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาประสิทธิภาพของ Thermoelectric Generator เมื่อใช้งานกับเปลือกอาคาร นั้นมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

- 2.1 การถ่ายเทความร้อนของวัตถุและเปลือกอาคาร
- 2.2 การระบายความร้อนด้วยวิธีธรรมชาติ
- 2.3 คุณสมบัติและปรากฏการณ์ต่างๆของ Thermoelectric Module
- 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การถ่ายเทความร้อนของวัตถุและเปลือกอาคาร

การการถ่ายเทความร้อนของวัตถุจะเกิดขึ้นเมื่อมีความต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นระหว่าง วัตถุกับ วัตถุ วัตถุกับสภาพแวดล้อม หรือเกิดระหว่างสภาพแวดล้อมกับสภาพแวดล้อมใกล้เคียง โดยการถ่ายเทความร้อนนั้น จะมีการถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ และจะไม่หยุดพฤติกรรมถ่ายเทจนกว่าวัตถุหรือสภาพแวดล้อมทั้งสองจะมีอุณหภูมิที่เท่ากัน (ตามกฎข้อที่ 1 ของทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์) ในอาคารสามารถถ่ายเทได้ใน 3 ลักษณะคือ การนำความร้อน, การพาความร้อน, การแผ่รังสีความร้อน



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนของวัตถุ

(ที่มา : <http://zaftec.co.th/> , 2558)

การถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร หมายถึงการถ่ายเทความร้อนจากวัสดุที่ใช้เป็นกรอบอาคารคือ ผนัง หลังคา พื้น หน้าต่าง และกระจกที่ปกคลุมตัวอาคารอยู่ กับสภาพแวดล้อมภายนอกเช่น ท้องฟ้า กระแสลม น้ำฝน และแสงแดด เป็นต้น โดยความร้อนที่เข้ามาในการอาคารจะใช้วิธีตามทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 3 ลักษณะคือ การนำความร้อน, การพาความร้อน, การแผ่รังสีความร้อน

2.1.1 การนำความร้อน (Heat Conduction)

การนำความร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของวัตถุ ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการถ่ายเทความร้อน การนำความร้อนเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ(คล้ายการนำไฟฟ้า) ในของแข็งที่การนำความร้อนจะนำจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปหาวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำ การถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนนี้จะเกิดขึ้นได้โดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน เช่น การเอามือไปจับกาน้ำร้อน จะทำให้ความร้อนจากกาน้ำถ่ายเทไปยังมือ จึงทำให้รู้สึกร้อน เป็นต้น วัสดุใดจะนำความร้อนดีหรือไม่ดี ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) โดยยิ่งวัสดุมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมาก ก็จะมีสามารถในการถ่ายเทความร้อนมาก

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k)ของวัสดุ

วัสดุ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน(k)(W/mK)
อากาศ (ที่ความดันบรรยากาศ)	0.026
อะลูมิเนียม	237
คอนกรีต	1.82
ทองแดง	401
เพชร	2300
น้ำแข็ง	2.2
กระดาษ	0.05
ไม้	0.1-0.35
เงิน	429

(ที่มา : Baily, M. (1994). A Survey of Thermodynamics, American Institute of Physics, New York,)

2.1.2 การพาความร้อน (Heat Convection)

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ ในสสารสองสถานะคือ ของเหลวและก๊าซ เนื่องจากเป็นสิ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้ การถ่ายเทความร้อนคือการที่ของไหลทำหน้าที่เป็นตัวกลาง พาโมเลกุลเหล่านั้นไปยังบริเวณอื่น โดยระหว่างการพาโมเลกุลนั้น ก็จะเกิดการถ่ายเทความร้อนกับวัตถุโดยรอบของไหลไปด้วยในตัว เช่น เมื่อกระแสลมผ่านผิวอาคารที่มีอุณหภูมิสูง ความร้อนที่โมเลกุลผิวอาคารจะถ่ายเทความร้อนให้กับโมเลกุลของกระแสด้วย เพราะฉะนั้นในทางเทคนิคแล้ว การพาความร้อนก็คือรูปแบบหนึ่งของการนำความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนนั่นเอง ตัวอย่างการพาความร้อนที่เกิดขึ้นกับเปลือกของอาคารเช่น ระหว่างกระแสลมกับเปลือกอาคาร ระห่างน้ำฝนที่มาสัมผัสเปลือกอาคาร

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation)

เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงานดังเช่นการนำความร้อนและการพาความร้อน การแผ่รังสีจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังโลกผ่านอวกาศได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง วัตถุที่มีความร้อนอยู่ในตัวเองก็สามารถแผ่ความร้อนออกมาได้เช่น เราจะรู้สึกร้อนเมื่อไปยืนใกล้กับกองไฟ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว วัตถุที่มีสีสว่างหรือมีผิวที่เป็นเงาเหมือนโลหะ จะสะท้อนการแผ่รังสีได้ดีแต่จะดูดกลืนรังสีได้น้อย เช่นอาคารที่มีการทาสีสว่างหรือกรุผิวอาคารด้วยวัสดุสะท้อนแสง จะมีอุณหภูมิที่น้อยกว่าวัสดุที่มีสีเข้มเนื่องจากวัสดุสีสว่างหรือเป็นเงานั้น มีการดูดกลืนรังสีที่น้อยกว่านั่นเอง

2.2 การระบายความร้อนด้วยวิธีธรรมชาติ

การระบายความร้อนออกจากอาคารด้วยวิธีการพึ่งพาธรรมชาติหรือ Passive cooling เป็นวิธีการระบายความร้อนออกจากเปลือกอาคารและทำให้อุณหภูมิภายในอาคารลดลงด้วยวิธีทางธรรมชาติ ซึ่งยังรวมถึงการใช้ปั๊มน้ำ พัดลมและอุปกรณ์กลต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนให้ดียิ่งขึ้น

จากหนังสือเรื่อง Passive and Low Energy of Building ของ Baruch Givoni การออกแบบเพื่อการระบายความร้อนหรือทำความเย็นให้อาคารจากวิธีทางธรรมชาตินั้นทำได้ 2 วิธีหลักๆ คือ ลดการถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคารจากการเพิ่มฉนวนกันความร้อน การออกแบบที่ลดการรับความร้อนจากแสงแดด และอีกวิธีหนึ่งคือ การเพิ่มระบายความร้อนออกจากอาคารโดยผ่านตัวนำความร้อนเช่น น้ำ อากาศ ไปยังสภาพแวดล้อมภายนอก โดยขยายเป็นกรณีย่อยๆได้ดังนี้

2.2.1 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการระบายอากาศ (Ventilative cooling)

แบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ การระบายอากาศภายในอาคาร โดยแทนที่ด้วยอากาศจากภายนอกที่เย็นกว่า หรือ สร้างการเคลื่อนที่ของอากาศให้ไหลผ่านผู้ใช้งานอาคาร เพื่อเพิ่มสภาวะน่าสบาย โดยการเพิ่มความเร็วลมในอาคาร

2.2.2 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการแผ่รังสี (Radiative cooling)

ถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวที่ร้อนกว่า ไปยังพื้นผิวที่เย็นกว่า สามารถใช้ได้ทั้งการระบายความร้อนออกจากอาคาร และการระบายความร้อนออกจากผู้ใช้งานอาคารโดยตรง

2.2.3 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการระเหยของน้ำ (Evaporative cooling)

ใช้การระเหยของน้ำเพื่อลดความเย็นให้แก่อาคาร เมื่อน้ำระเหย จะมีการใช้ความร้อนแฝงเพื่อเปลี่ยนสถานะ ความร้อนจึงถูกดึงออกไปจากอาคาร

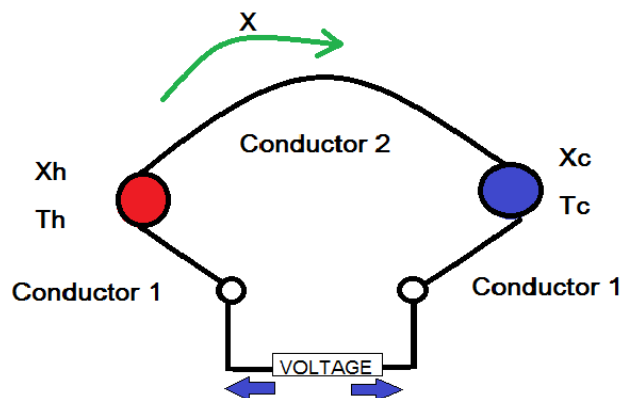
2.2.4 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการลดความชื้นในอากาศ (Dehumidification) เป็นการดึงความชื้นออกจากอากาศภายในอาคาร เพื่อให้ความชื้นสัมพัทธ์ลดต่ำลง ส่งผลให้การระเหยของน้ำมากขึ้น และดึงความร้อนออกไปได้มากขึ้น

2.2.5 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติโดยการใช้คุณสมบัติของมวลสาร (Mass-effect cooling) ใช้มวลสารอาคารกักเก็บความร้อนในช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูง และปล่อยความร้อนออกมาในช่วงเวลาที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งจะสามารถลดอุณหภูมิในช่วงเวลาที่มีความร้อนสูงสุดของวันได้

2.3 คุณสมบัติและปรากฏการณ์ต่างๆของ Thermoelectric Module

ปรากฏการณ์ Thermoelectric (thermoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนรูประหว่างพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า ความรู้เกี่ยวกับปรากฏการณ์ เทอร์โมอิเล็กทริก เริ่มต้นขึ้น ในปี ค.ศ.1821 โดย Thomas Johann Seebeck นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันค้นพบว่า เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณรอยต่อของตัวนำ (Conductor) สองชนิด จะเกิดแรงดันและเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นภายในตัวนำเมื่อเป็นวงจรมัด ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) ต่อมาในปี ค.ศ. 1834 Jean Chales Athanase Peltier นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสค้นพบว่า เมื่อนำตัวนำสองชนิดมาต่อกันแล้วทำ การจ่ายกระแสให้ไหลผ่านตัวนำ ที่รอยต่อระหว่างตัวนำทั้ง สองจะมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเกิดขึ้น ซึ่ง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

2.3.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect)

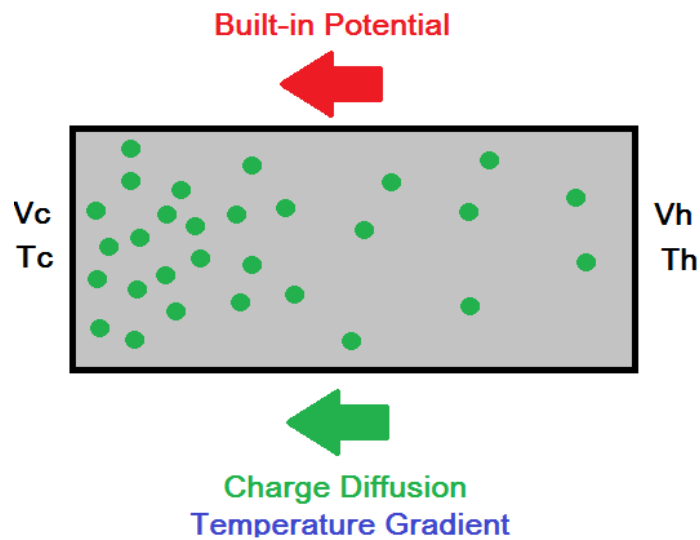


ภาพที่ 2.2 วงจรการเกิดปรากฏการณ์ซีเบค
(ที่มา: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก, 2555)

จากภาพที่ 2.1 เส้นลวดโลหะสองชนิด (Conductor 1 และ Conductor 2) ถูกเชื่อมต่อโดยจุดเชื่อมต่อ X_h ซึ่งมีอุณหภูมิสูง (T_h) และจุด X_c ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ (T_c) พาหะไฟฟ้า (Carrier) ในตัวนำ จะมีทิศทางการแพร่ (diffusion) ไปในทิศทางเดียวกันกับการถ่ายเทอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ตามทิศทาง x ที่บริเวณฝั่งด้านร้อนพาหะจะมีพลังงานสูง จึงพยายามแพร่ไปหาด้านที่เย็นกว่าเพื่อลดพลังงานลงทำให้พาหะไฟฟ้าอยู่ในภาวะสมดุล เนื่องจากลวดตัวนำทั้งสองเป็นโลหะต่างชนิดกัน จึงมีค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ (S) ไม่เท่ากัน และทำให้เกิดแรงดันคร่อมจุดเชื่อมต่อทั้งสองจุด

ค่า S จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ อุณหภูมิ โครงสร้างอะตอม และชนิดของตัวนำ ซึ่งหากใช้ตัวนำต่างชนิดจะได้ค่า S ที่ไม่เท่ากันทำให้ V ที่ได้จะมีค่าไม่เป็นศูนย์

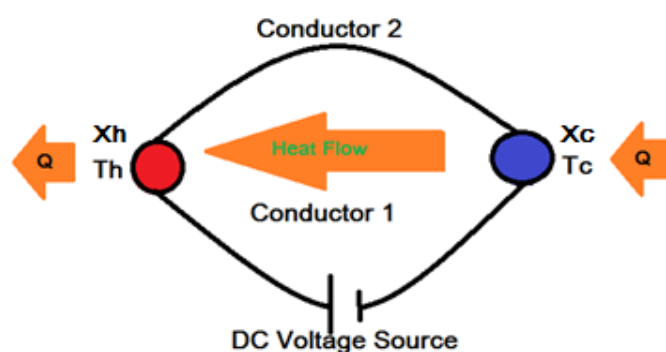
อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในยุคปัจจุบันจะใช้สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) มาผ่านกระบวนการโด๊ป (Doping) เพื่อให้ได้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) คือสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอน (ประจุลบ) เป็นพาหะข้างมาก และชนิดพี (P-type) คือสารกึ่งตัวนำที่มีโฮล (ประจุบวก) เป็นพาหะข้างมาก



ภาพที่ 2.3 ภาพการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำที่มีอุณหภูมิสองด้านไม่เท่ากัน
(ที่มา: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก, 2555)

พาหะข้างมากของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจะมีทิศทางการแพร่ (diffusion) เป็นไปตาม ภาพที่ 2.2 คือพาหะมีการไหลตามทิศทางการถ่ายเทอุณหภูมิจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ การแพร่ของพาหะข้างมากก็จะเกิดการไหลของกระแส กรณีพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอนกระแสก็จะไหลในทิศสวนทางกับการแพร่ ในภาพที่ 2.2 ไหลจากซ้ายไปขวา และถ้าหากพาหะข้างมากเป็นโฮล กระแสที่เกิดขึ้น จะไหลทิศทางเดียวกันกับทางแพร่ ในภาพที่ 2.2 จะไหลจากขวาไปซ้าย

2.3.2 ปรากฏการณ์เพลเทีย (Peltier Effect)



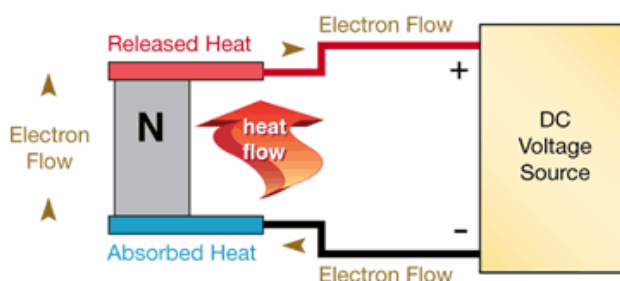
ภาพที่ 2.4 วงจรการเกิดปรากฏการณ์เพลเทีย
(ที่มา: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก, 2555)

เป็นปรากฏการณ์ การแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งตรงกันข้ามกับปรากฏการณ์ซีเบคปรากฏการณ์เพลเทียจะเกิดขึ้น เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงให้กับตัวนำสองชนิดที่ทำ การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าโดยพาหะในตัวนำ จะทำการเคลื่อนที่ซึ่งในขณะเดียวกันพาหะจะ

ทำการแพร่ความร้อนไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.3 DC Voltage Source ทำให้เกิดการแพร่ของพาหะจากจุด Xc ไปยังจุด Xh ทำให้อุณหภูมิที่จุด Xc มีค่าลดลงเท่ากับ T_c และทำให้อุณหภูมิที่จุด Xh มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ T_h

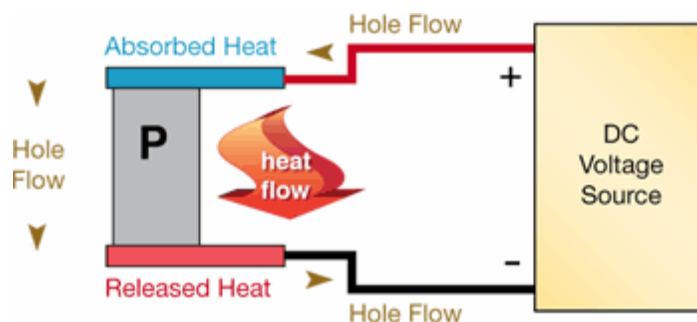
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแส ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพาหะและกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี โดยมีทิศทางการแพร่ความร้อนต่างกันดังนี้

- สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะข้างมากมีประจุเป็นลบ จากภาพที่ 2.4 เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบซึ่ง อยู่ด้านล่างเสมือนเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ด้านล่าง อิเล็กตรอนบริเวณนั้น มีพลังงานสูงและจะพยายามแพร่ไปด้านบนเพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุล ระหว่างที่อิเล็กตรอนแพร่ขึ้น ไปด้านบนนั้น ก็จะนำเอาความร้อนที่ถูกดูดเข้ามาบริเวณด้านเย็นขึ้นไปปล่อยออกบริเวณด้านร้อน



ภาพที่ 2.5 แสดงการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียกับสารกึ่งตัวนำชนิด N
(ที่มา: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก, 2555)

- สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) มีโฮลเป็นพาหะข้างมากมีประจุเป็นบวก จากภาพที่ 2.5 เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขั้วบวกซึ่งจะอยู่ข้างบนเสมือนเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับโฮลที่อยู่ด้านบน โฮลบริเวณนั้น จะมีพลังงานสูงและพยายามเคลื่อนที่ลงด้านล่างเพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุล พลังงานความร้อนที่ดูดซึมมาจากสิ่งแวดล้อมจะถูกโฮลพาไปปล่อยออกที่ด้านร้อน

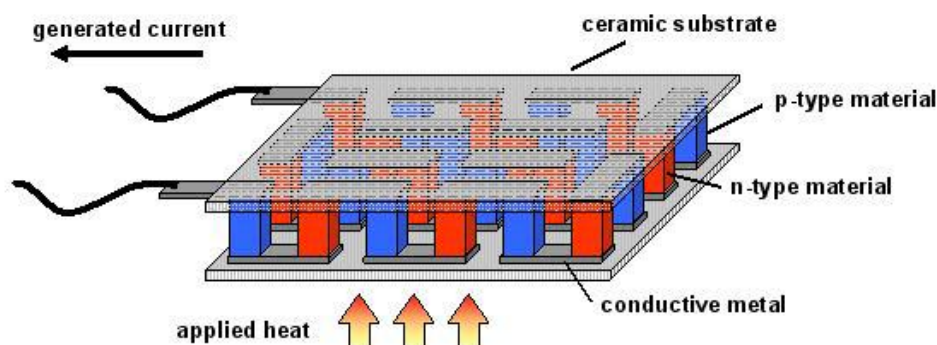


ภาพที่ 2.6 แสดงการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียกับสารกึ่งตัวนำชนิด P
(ที่มา: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก, 2555)

2.3.3 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module)

Thermoelectric Module เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการการทำงานของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ทำความเย็น (thermoelectric cooler) หรือถูกนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า (thermoelectric generator) วัสดุที่จะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีนั้น ตามหลักควรจะเป็นวัสดุที่มีค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่สูง หรือมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมาก ได้แก่ วัสดุประเภทโลหะกับสารกึ่งตัวนำเนื่องจากมีประจุไฟฟ้าอิสระมาก มีความต้านทานไฟฟ้า (R) ต่ำเป็นสื่อนำที่ดีเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียพลังงานโดยการเปลี่ยนคืนเป็นความร้อน ปัจจุบันเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น ยังถือว่ามีประสิทธิภาพ (efficiency) ที่ต่ำมาก และถือว่าต่ำที่สุดในบรรดาวิธีการเปลี่ยนรูปพลังงานจากความร้อนทั้งหมด แต่เนื่องจากมีข้อเด่นในเรื่องของขนาดที่เล็กมากและไม่มีชิ้นส่วนขยับทำให้ปราศจากมลพิษทางเสียง นำมันและการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ

2.3.3.1 โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

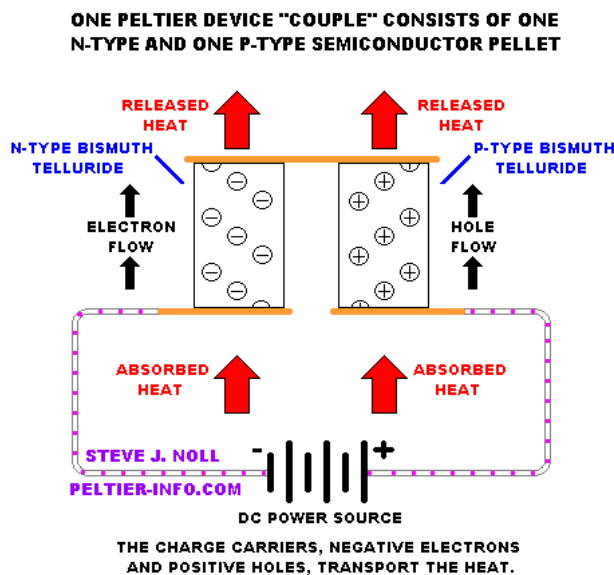


ภาพที่ 2.7 โครงสร้างภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
(ที่มา: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก, 2555)

จากภาพที่ 2.6 จะเห็นว่าสารกึ่งตัวนำชนิด N และชนิด P จะอยู่แบบเรียงกันเป็นคู่ มีโลหะนำไฟฟ้าเป็นจุดเชื่อมระหว่างแผ่นเซรามิกที่ประกบตัวโลหะนำไฟฟ้าอยู่ทั้งสองด้าน และมีขั้วสายไฟต่อที่บริเวณท้ายของตัวอุปกรณ์

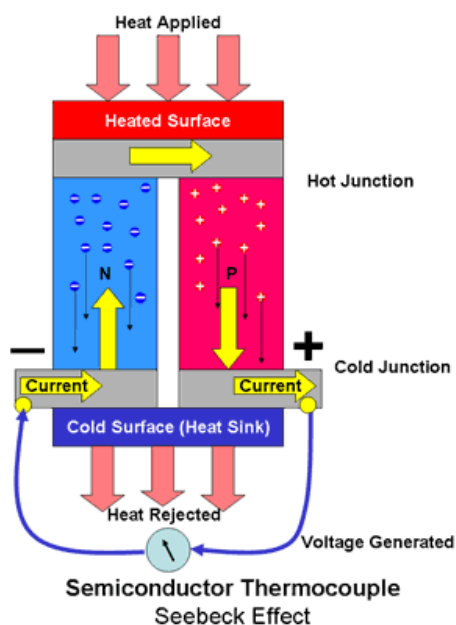
2.3.3.2 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล สามารถทำงานได้สองแบบดังนี้



ภาพที่ 2.8 การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในรูปแบบ TEC
(ที่มา: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก, 2555)

- Thermoelectric cooler (TEC) การทำงานของโหมคนี้พัฒนามาจากปรากฏการณ์เพลเทียร์ จากภาพที่ 2.7 เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับโมดูลซึ่งยกมาอธิบายเพียงหนึ่งคู่ P-N ในลักษณะนี้จะเป็นการลดพลังงานของพาหะข้างมากของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด กล่าวคือพาหะข้างมากของทั้งชนิด N-P จะแพร่จากด้านล่าง (Cool Junction) พร้อมกับดูดความร้อนขึ้นมาด้านบน (Hot Junction) ทำให้ด้านล่างจะมีอุณหภูมิต่ำ และด้านบนจะมีอุณหภูมิสูง โดยที่กระแสจะไหลออกจากขั้ว บวกของแหล่งจ่าย ไหลทิศทางเดียวกันกับพาหะข้างมากในชนิด P หรือโฮล ผ่านโลหะตัวนำเข้าไปไหลสวนทางกับทิศทางกับพาหะข้างมากในชนิด N หรืออิเล็กตรอน แล้วเข้าขั้ว ลบของแหล่งจ่ายในลักษณะทิศทวนเข็มนาฬิกา หากกลับข้างแหล่งจ่ายทิศของกระแสจะกลับข้าง ด้านร้อนจะอยู่ด้านล่าง และด้านเย็นก็จะอยู่ด้านบน



ภาพที่ 2.9 การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในรูปแบบ TEG
(ที่มา: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก, 2555)

- Thermoelectric generator (TEG) จะเป็นโหมดที่ใช้ความร้อนไปผลิตกระแสไฟฟ้า จากหลักของปรากฏการณ์ซีเบค โหมดนี้จะทำงานเมื่ออุณหภูมิของทั้งสองข้างของโมดูลเกิดความแตกต่างกัน ยกตัวอย่างการทำงาน จากภาพที่ 2.8 จะให้ความร้อนที่ด้านบนและระบายความร้อนออกที่ด้านล่างทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิโดยที่ด้านบนมีอุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้พาหะข้างมากบริเวณนั้น มีพลังงานสูงตามไปด้วย พาหะข้างมากจะแพร่ลงมาด้านล่างที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยพาหะข้างมาก อิเล็กตรอนของชนิด N จะทำให้เกิดกระแสสวนทางขึ้นด้านบน และพาหะโฮลของชนิด P จะทำให้เกิดกระแสทิศเดียวกันลงด้านล่าง เมื่อสารกึ่งตัวนำชนิด N และ P มีโลหะที่นำไฟฟ้ามาเชื่อมเป็นจุดต่อและทำให้เป็นวงจรปิด กระแสจะไหลได้ครบวงจรในทิศตามเข็มนาฬิกา หากทำการสลับข้างด้านที่ให้ความร้อนเป็นด้านล่าง และด้านระบายความร้อนเป็นด้านบนจะทำให้กระแสไหลกลับทิศทวนเข็มนาฬิกา

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ศึกษาแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของเปลือกอาคารตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลอง พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนที่เกิดบนเปลือกของอาคาร การระบายความร้อนโดยวิธีธรรมชาติของอาคาร ทฤษฎี และลักษณะการทำงานทางกายภาพของ Thermoelectric Module รวมไปถึงศึกษาวิธีการประยุกต์อุปกรณ์มาเป็น Thermoelectric Generator ได้แก่

- 3.1.1 ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนที่มีผลต่อเปลือกอาคาร ทิศทางของแสงแดด กระแสลม สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนบริเวณเปลือกอาคาร และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างอาคารทดลอง คือ กระจกใส หน้า 6 มิลลิเมตร วงกบและบานกรอบทำจากไม้เนื้อแข็ง และ ผนังก่ออิฐฉาบปูนหนา 10 เซนติเมตร
- 3.1.2 ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ Thermoelectric Modules ที่ใช้ในการทดลอง รวมไปถึงทฤษฎี Seebeck ซึ่งจำเป็นต่อกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพของ Thermoelectric Generator
- 3.1.3 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของอุปกรณ์ Thermoelectric Generator และนำข้อมูลมาตั้งสมมติฐานในการทำการทดลอง และการจำลองทางคอมพิวเตอร์

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องของการทำความเย็นในอาคารโดยวิธีธรรมชาติ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Thermoelectric Generator นำเอาข้อมูลต่างๆที่พบมาตั้งสมมติฐานการทดลองได้ดังต่อไปนี้

- สามารถนำอุปกรณ์ Thermoelectric Generator มาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า จากปรากฏการณ์ Seebeck effect โดยนำความต่างของอุณหภูมิที่เกิดจากการใช้งานในพื้นที่ในอาคารปรับอากาศกับอุณหภูมิภายนอกได้

- ค่าความต้านทานความร้อนของผนัง และค่าการนำความร้อนของผนัง มีผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ Thermoelectric Generator
- การเพิ่มค่าความต่างของอุณหภูมิในระบบจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของตัว Thermoelectric Generator เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับความร้อนของตัวอุปกรณ์
- การเพิ่มค่าความต่างของอุณหภูมิที่เป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบ ทำได้โดยการเพิ่มการระบายความร้อนที่ผิวสัมผัสด้านเย็นของระบบด้วยการใช้ระบบ Airflow Window และการเพิ่มความสามารถในการรับความร้อนที่ผิวสัมผัสด้านร้อนของระบบด้วยการทาสีเข้มบนผิว

3.2.1 การทดลองที่ 1 ทดสอบความเป็นไปได้ของระบบกับเปลือกอาคาร

กำหนดตัวแปรการทดลอง

ตัวแปรต้น	ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนและค่าความเป็นฉนวนของผนัง
ตัวแปรตาม	ความต่างของอุณหภูมิที่ผิวของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก อัตราการเพิ่ม-คายความร้อนของตัวเทอร์โมอิเล็กทริก
ตัวแปรควบคุม	อุณหภูมิอากาศภายในห้องที่ทำการทดลอง ชนิดของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ในการวิจัยนี้ใช้เป็น TEC1-12706 ชนิดของพัดลมระบายอากาศ ในการวิจัยนี้ใช้พัดลมขนาด 20.89 cfm



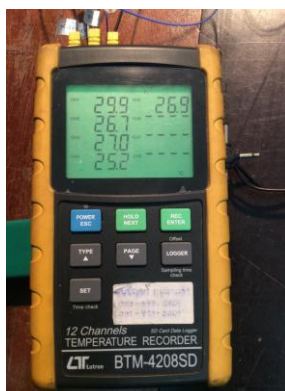
ภาพที่ 3.1 แสดง TEC1-12706 (ซ้าย) พัดลมระบายอากาศในระบบ Air flow window (ขวา)

จากปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของ Thermoelectric Generator นั้นคือคุณสมบัติของตัว TE วัสดุ ความต่างของอุณหภูมิและประสิทธิภาพของ heat sink โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้อุปกรณ์ TE คือรุ่น TEC1-12706 ซึ่งมีค่าคุณสมบัติและตัววัสดุต่างๆตามที่โรงงานผลิตระบุไว้ ดังนี้

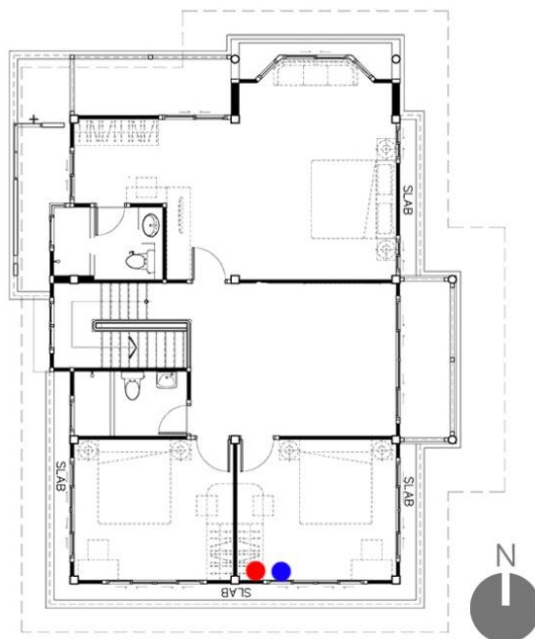
- ค่า I หรือกระแสไฟฟ้ามี่ค่า 6 amp
- ค่า V หรือแรงดันไฟฟ้ามี่ค่า 12 Volt
- ค่า Re หรือความต้านทานไฟฟ้า 2 Ohms
- ค่า S หรือ Seebeck coefficients
- ผิววัสดุเป็นเซรามิก มีตัว Semiconductor ด้านในเป็น Bismuth Tin (BiSn)
- มีขนาด 4 x 4 เซนติเมตร หนา 0.36 เซนติเมตร

ดังนั้นการทำการทดลองนี้จะให้ความสำคัญไปที่ปัจจัยความต่างของอุณหภูมิเป็นหลัก โดยทำการทดลองจากอาคารจริงที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวันกับผนัง 2 ชนิดที่พบได้ทั่วไปในอาคาร สำนักงานที่ใช้ระบบปรับอากาศคือ ผนังปูนที่มีค่าความต้านทานความร้อน (R) สูง มีค่าการนำความร้อน (K) ต่ำ กับผนังกระจกที่มีค่าการต้านทานความร้อน (R) ต่ำ มีค่าการนำความร้อน (K) ที่สูง และทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ เพื่อเก็บค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระบบ Thermoelectric Generator ต่อไป

อุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิคือ 12 Channels Temperature Recorder ต่อสายวัดอุณหภูมิชนิด Thermocouple Type K. ทำการเก็บข้อมูลตลอดทั้งวันเป็นเวลา 1 วัน เพื่อหาค่าความต่างของอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสด้านร้อน สัมผัสกับผิวกระจกด้านในของอาคาร และผิวสัมผัสด้านเย็น สัมผัสกับอากาศภายในห้อง ของตัว Thermoelectric Generator เป็นรายชั่วโมง ตั้งแต่ช่วงที่พระอาทิตย์ขึ้นนับเป็นช่วงเวลาที่เปลือกอาคารได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ คือเวลา 6:00น. ถึงเวลา 18:00น. รวมเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

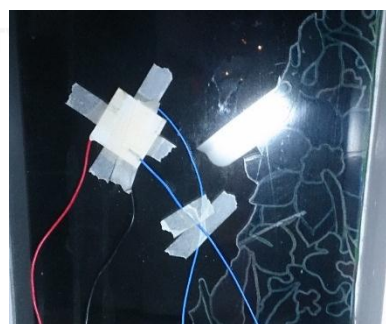
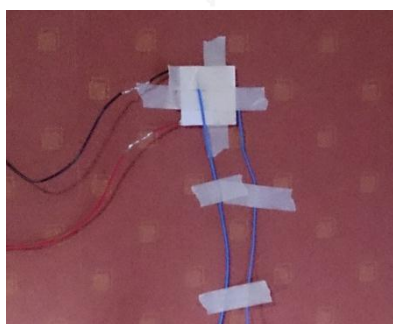


ภาพที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ เก็บข้อมูลอุณหภูมิ 12 Channels Temperature Recorder



ภาพที่ 3.3 แสดงตำแหน่งของห้องและตำแหน่งของตัววัดอุณหภูมิในการทดลองที่ 1

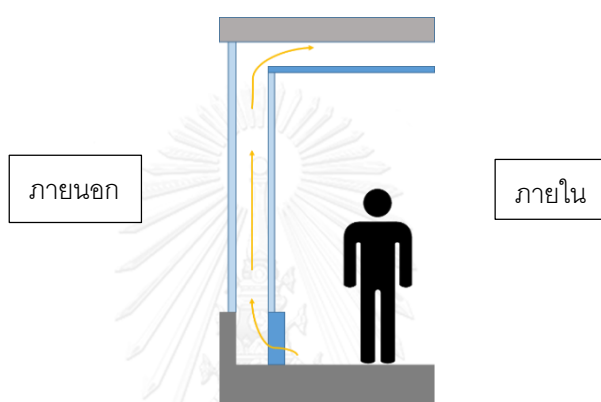
ในการทดลองที่ 1 นี้จะทำการทดลองนำร่องเพื่อหาความเป็นไปได้ในการใช้งาน Thermoelectric Generator จากค่าความต่างของอุณหภูมิของผนังทึบและผนังกระจกก่อนที่จะทำการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์ต่อไป โดยจุดสีแดงแทนตำแหน่งของตัวเทอร์โมอิเล็กทริก ที่ผนังปูนและจุดสีน้ำเงินแทนตำแหน่งของตัวเทอร์โมอิเล็กทริก ที่ผนังกระจก



ภาพที่ 3.4 แสดงการติดตั้ง เทอร์โมอิเล็กทริก กับผนังทึบ (ซ้าย) ผนังกระจก (ขวา)

3.2.2 การทดลองที่ 2 เพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วยวิธีการใช้ Airflow Window

จากทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและจากผลการทดลองนำร่องที่ผ่านมา ผู้ทำการวิจัยได้ตั้งสมมติฐานการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ Thermolectric Generator ว่าถ้าสามารถเพิ่มความสามารถในการคายความร้อนของระบบทางฝั่งเย็นและการเพิ่มอุณหภูมิของฝั่งร้อนได้จะทำให้ค่าความต่างของอุณหภูมิสูงขึ้นและนำไปสู่การผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามไปด้วย โดยทดลองหาสภาวะที่สัมพันธ์กับความร้อนของอุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริก และติดตั้งระบบ Airflow ในการเพิ่มการระบายความร้อนออกจากระบบด้วยการถ่ายเทอากาศดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 แสดงการทำงานของระบบ Airflow window

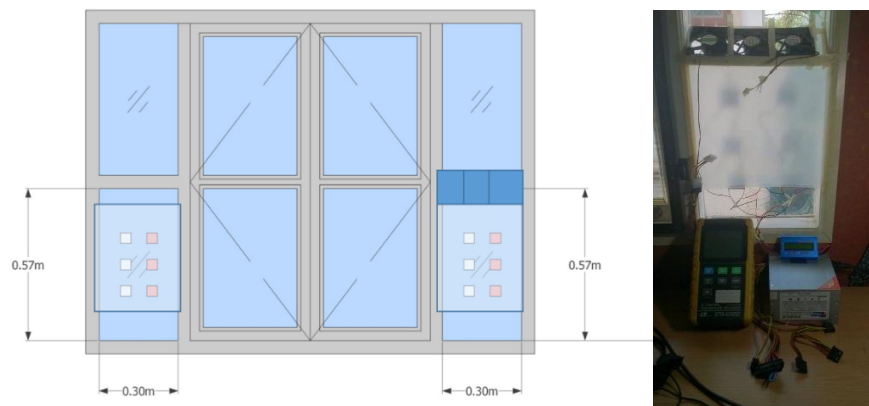
เริ่มทำการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยทำการติดตั้งกล่องทดลองกับกระจกทางทิศใต้ของอาคาร กรณีการทดลองแบ่งได้เป็นแบบ Passive airflow window และแบบ Active airflow window และในแต่ละกรณีการทดลองจะแบบได้ดังต่อไปนี้

กรณีทดลอง Passive airflow window ใช้ Stack-effect ในการเคลื่อนไหวของอากาศ

1. ติดตั้งบนผิวกระจกใสโดยไม่มีการทาสีบนแผ่น เทอร์โมอิเล็กทริก (ผิวเดิมสีขาว)
2. ติดตั้งบนผิวกระจกใสและทาสีดำบนแผ่น เทอร์โมอิเล็กทริก ด้านที่สัมผัสกับกระจกเพื่อเพิ่มการดูดกลืนความร้อนจากรังสีอาทิตย์

กรณีทดลอง Active airflow window ใช้พัดลมขนาด 20.89 cfm 3 ตัวในการระบายอากาศโดยมีค่า ACH ที่ 12

1. ติดตั้งบนผิวกระจกใสโดยไม่มีการทาสีบนแผ่น เทอร์โมอิเล็กทริก (ผิวเดิมสีขาว)
2. ติดตั้งบนผิวกระจกใสและทาสีดำบนแผ่น เทอร์โมอิเล็กทริก ด้านที่สัมผัสกับกระจกเพื่อเพิ่มการดูดกลืนความร้อนจากรังสีอาทิตย์



ภาพที่ 3.6 แสดงการติดตั้งกล่องทดลองบริเวณหน้าต่างทิศใต้ของอาคาร

การทดลองที่ 2 นี้มีทั้งหมด 4 กรณีการทดลอง ในทุกกรณีได้ทำการติดตั้งกล่องทดลองทิ้งไว้เป็นเวลา 2 วัน และทำการเก็บข้อมูลเป็นรายชั่วโมงตลอดการทดลอง โดยทุกกรณีเริ่มทดลองพร้อมกันเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ในแต่ละกรณีการทดลองจะติดตั้งอุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับตัวตัววัดเพื่อวัดกำลังไฟที่ได้จากระบบ Thermoelectric Generator และติดตั้งตัววัดอุณหภูมิ ตามตำแหน่งดังนี้



ภาพที่ 3.7 แสดงตำแหน่งการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ Thermocouple Type K.

หลังจากที่วัดค่าอุณหภูมิทั้ง 4 ตำแหน่งแล้ว นำมาคำนวณด้วยสมการคณิตศาสตร์เพื่อหาค่า Heat transfer (Q) และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (u) ของระบบ Airflow window ทั้ง 4 กรณีและนำค่าดังกล่าวไปจำลองลงในโปรแกรม Visual DOE 4.1 เพื่อทำการจำลองอาคารตัวอย่างต่อไป โดยสมการในการหาค่า Heat transfer (Q) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (u) มีดังนี้

สมการการหาค่า Heat transfer ของระบบ (Btu/h)

$$Q_{System} = Q_{Ventilation} + Q_{Conduction} \quad \text{_____ (1)}$$

$$Q_{Ventilation} = 1.08 \times cfm \times (T_{outlet} - T_{inlet}) \quad \text{_____ (2)}$$

และ $Q_{Conduction} = U \times (T_{outside} - T_{room}) \quad \text{_____ (3)}$

จากสมการ	ค่า cfm	คืออัตราการระบายอากาศลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (ft^3/min)
	ค่า T_{outlet}	คืออุณหภูมิอากาศเมื่อออกจากระบบ (F^o)
	ค่า T_{inlet}	คืออุณหภูมิอากาศเมื่อไหลเข้าระบบ (F^o)
	ค่า $T_{outside}$	คืออุณหภูมิอากาศภายนอก (F^o)
	ค่า T_{room}	คืออุณหภูมิอากาศในห้อง (F^o)

สมการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (u)

$$u = \frac{Q_{System}}{(T_{outside} - T_{room})} \quad \text{_____ (4)}$$

จากสมการ	ค่า Q_{System}	คือค่า Heat transfer ของระบบ (Btu/h)
	ค่า $T_{outside}$	คืออุณหภูมิอากาศภายนอก (F^o)
	ค่า T_{room}	คืออุณหภูมิอากาศในห้อง (F^o)

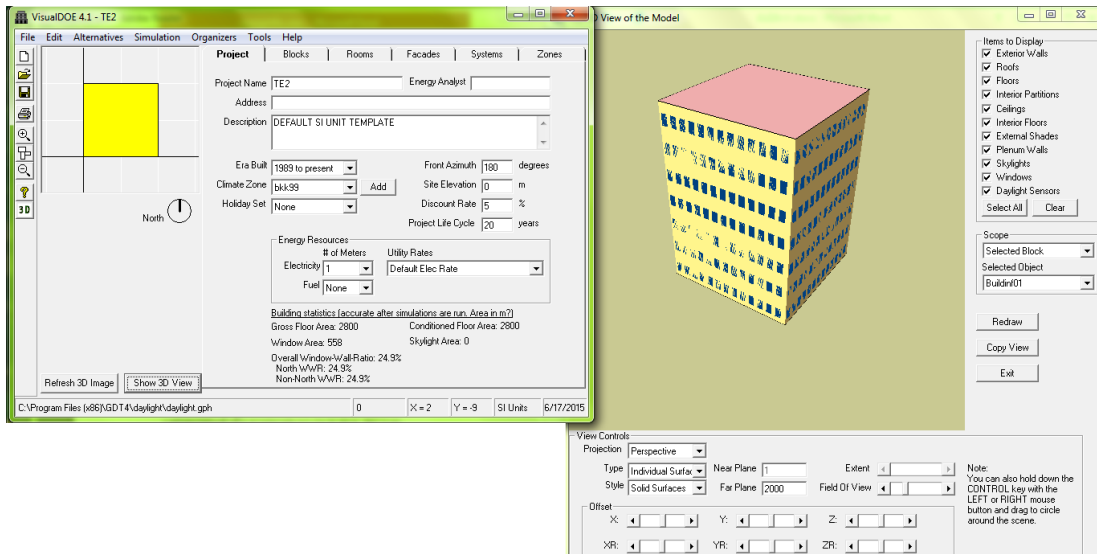
โดยในกรณีทดลองที่ 1 และ 2 ซึ่งใช้ระบบ Passive Ventilation แบบ Stack Effect สามารถหาอัตราการระบายอากาศ (cfm) ได้จากสมการ

$$cfm = 60 \times Cd \times A \times \sqrt{2 \times g \times (Hn - Hb) \left(\frac{T_{outlet} - T_{inlet}}{T_{inlet}} \right)} \quad \text{_____ (5)}$$

ค่า Cd	คือค่าสัมประสิทธิ์คงตัวของระบบที่ไม่มีสิ่งกีดขวางในช่องอากาศ คือ 0.65
ค่า A	คือพื้นที่หน้าตัดของปล่องอากาศ (ft^2)
ค่า g	คือแรงโน้มถ่วงของโลก (ft/s^2)
ค่า Hn	จุดที่มีความดันอากาศเท่ากับภายนอกปล่อง หรือ ครึ่งหนึ่งของความสูงปล่องอากาศ (ft)
ค่า Hb	คือความสูงของช่องอากาศเข้า (ft)
ค่า T_{outlet}	คืออุณหภูมิอากาศเมื่อออกจากระบบ (F^o)
ค่า T_{inlet}	คืออุณหภูมิอากาศเมื่อไหลเข้าระบบ (F^o)

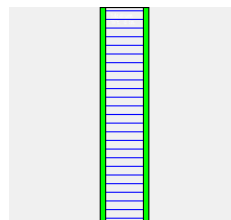
3.2.3 การทดลองที่ 3 ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation)

ทำการจำลองอาคารตัวอย่างขึ้นด้วยโปรแกรม Visual DOE 4.1 เป็นอาคารรูปแบบสำนักงาน ปรับอากาศ ทำงานช่วงเวลากลางวันเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ Thermoelectric Generator และเป็นการจำลองการติดตั้งระบบตามอัตราส่วนต่างๆ เพื่อหาความเหมาะสมของระบบต่อแสงสว่างและทัศนียภาพในอาคารต่อไป โดยอาคารจำลองมีลักษณะดังนี้



ภาพที่ 3.8 โปรแกรม Visual DOE4.1

ขนาดของอาคาร	อาคาร 7 ชั้น กว้าง 20 เมตร ยาว 20 เมตร สูง 21 เมตร
พื้นที่รวมของอาคาร	2800 ตารางเมตร
พื้นที่หน้าต่าง	558 ตารางเมตร
พื้นที่หน้าต่าง : ผนังทึบ (WWR)	24.9 %
ลักษณะหน้าต่าง	ระบบ Airflow window โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากการคำนวณในการทดลองที่ 2
ลักษณะผนัง	ผนังคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 10 เซนติเมตร



ภาพที่ 3.9 ผนังของอาคารจำลองจากโปรแกรม Visual DOE

3.2.3.1 การวิเคราะห์ผลการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้รวมในแต่ละปี

ใช้โปรแกรม Visual DOE 4.1 คำนวณปริมาณ Solar radiation ตลอดทั้งปีเป็นรายชั่วโมงที่ผิวอาคารด้านทิศใต้บริเวณที่ติดตั้งระบบ Thermoelectric Generator เพื่อนำมาคำนวณหาความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบในอาคารจำลองของทั้ง 4 กรณีการทดลองคือ Passive airflow window ผิวสัมผัสสีขาว, ดำ ระบบ Active airflow window ผิวสัมผัสสีขาว, ดำ และทำการเปรียบเทียบสัดส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้กับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอาคารตลอดทั้งปี เพื่อหาความสามารถของระบบ Thermoelectric Generator เมื่อนำไปติดตั้งจริง เปรียบเทียบกับอาคาร Base case ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (u) จากผลการทดลองที่ได้จากการทดลองที่ 2 มาจำลองลงในกระจกอาคารกรณีต่างๆ ดังนี้

- อาคาร Base case ไม่มีการติดตั้งระบบใดๆ
- กรณีทดลองที่ 1 Passive airflow window ผิวสัมผัสสีขาว
- กรณีทดลองที่ 2 Passive airflow window ผิวสัมผัสสีดำ
- กรณีทดลองที่ 3 Active airflow window ผิวสัมผัสสีขาว
- กรณีทดลองที่ 4 Active airflow window ผิวสัมผัสสีดำ

3.2.3.2 การวิเคราะห์ผลการผลิตไฟฟ้าเมื่อทำการติดตั้งระบบในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งานช่องเปิดอาคาร

การติดตั้งระบบ Thermoelectric Generator ลงบนกระจกอาคารเองนั้นก็เป็นการบดบังทัศนียภาพของผู้ที่ใช้งานและบดบังแสงสว่างที่จะเข้ามาในอาคารอีกด้วยในกรณีที่มีห้องทำงานหรือพื้นที่ใช้งานอยู่ทางทิศใต้ของอาคาร ดังนั้นการเลือกใช้ระบบ Thermoelectric Generator ให้มีสัดส่วนที่พอเหมาะจึงเป็นประเด็นสำคัญ โดยการวิเคราะห์ด้วยการใช้โปรแกรม Visual DOE 4.1 คำนวณค่าการผลิตพลังงานเปรียบเทียบอัตราส่วนที่เหมาะสมในการติดตั้งระบบ Thermoelectric Generator โดยคำนึงถึงแสงสว่างและการมองเห็นทัศนียภาพของผู้ใช้งานในอาคาร โดยแบ่งร้อยละของการติดตั้งระบบ Thermoelectric Generator ดังนี้

- 100% ติดตั้งระบบ TEG ปิดบังช่องหน้าต่างทั้งหมดของอาคารทางทิศใต้
- 75% ติดตั้งระบบ TEG ปิดบังช่องหน้าต่าง 3 ใน 4 ส่วนของอาคารทางทิศใต้
- 50% ติดตั้งระบบ TEG ปิดบังช่องหน้าต่างครึ่งหนึ่งของอาคารทางทิศใต้
- 25% ติดตั้งระบบ TEG ปิดบังช่องหน้าต่าง 1 ใน 4 ส่วนของอาคารทางทิศใต้

3.3 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล

- 3.3.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบระหว่างติดตั้งบนผนังกระจก และ ผนังทึบ จากการทดลองที่ 1 หากลักษณะผนังที่มีความเหมาะสมกับระบบในแง่ของการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อนำผลที่ได้มาทำการทดลองเพื่อประสิทธิภาพกับระบบ Airflow Window ต่อไป

- 3.3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ Thermolectric Generator เมื่อทำการติดตั้งกับระบบ Airflow Window ทั้งแบบ Passive และ Active รวมไปถึงการเพิ่มความสามารถในการดูดความร้อนของผิวฝั่งที่สัมผัสกระจกด้วยการทาสีเข้มด้วย นำผลที่ได้มาประเมินและวิเคราะห์ผลต่อไป
- 3.3.3 นำผลที่ได้จากการทำการทดลองที่ 1 และ 2 มาตั้งค่าในอาคารที่จำลองจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Visual DOE 4.1 และการใช้สมการทางคณิตศาสตร์และการใช้แผนภูมิเชิงเส้นเพื่อช่วยสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ระบบ Thermolectric Generator ผลิตได้กับพลังงานจาก Solar radiation เพื่อหาผลพลังงานที่ได้เมื่อใช้ในอาคารจริงต่อไป

โดยสมการที่ใช้ในการทดลองมีดังต่อไปนี้



V	แรงดันไฟฟ้า (Volt)	S	Seebeck coefficients (V/K)
I	กระแสไฟฟ้า (Amp)	P	พลังงานไฟฟ้า (Watts)
Re	ความต้านไฟฟ้า (Ohms)	T	อุณหภูมิ
R	Thermal Resistance ของผนัง (m ² ·K/W)	Th	อุณหภูมิผิวฝั่งร้อน
K	ค่าการนำความร้อนของผนัง (W/m ² ·K)	Tc	อุณหภูมิผิวฝั่งเย็น
U	ค่าการไหลของความร้อนในผนัง (W/m ² ·K)	Q _h	พลังงานความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Watts)
d	ความหนาของผนัง (m)	E	efficiency of the generator

การหาค่าแรงดันไฟฟ้าของ Thermolectric Generator หาได้จากสมการ

$$V = S \times \Delta T$$

การหาค่ากระแสไฟฟ้าของ Thermolectric Generator หาได้จากสมการ

$$I = \frac{S \Delta T}{R_e}$$

การหาค่าพลังงานไฟฟ้า หาได้จากสมการ

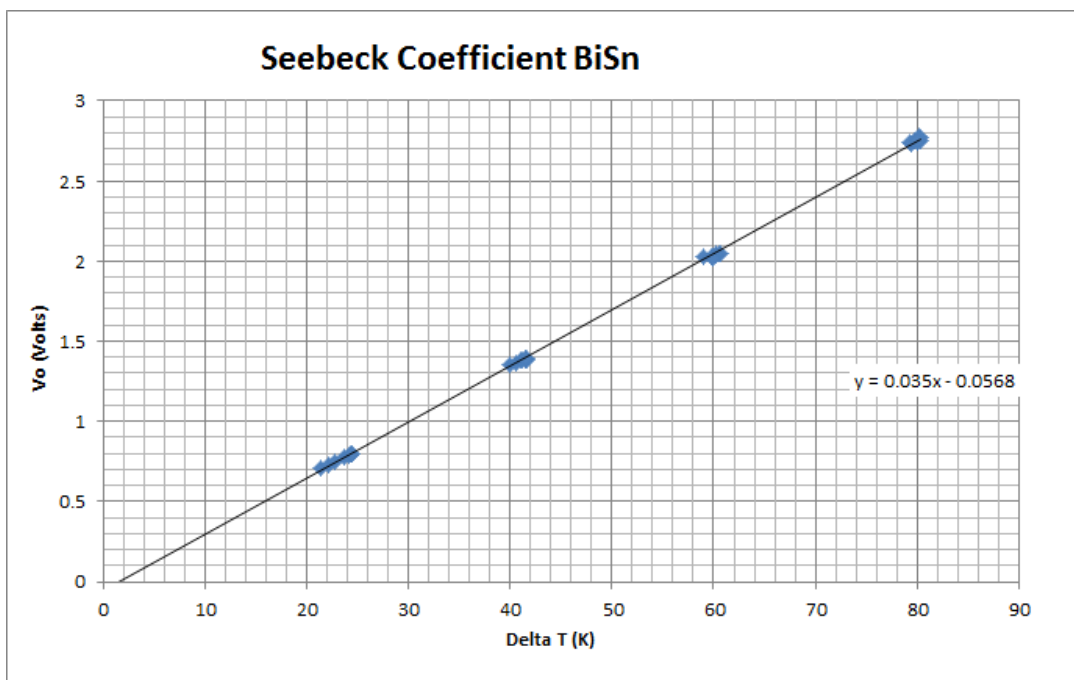
$$P = V \times I$$

การหาค่า Seebeck coefficients หาได้จากสมการ

$$S = \frac{V_o}{\Delta T}$$

จากสมการ ค่า V_o คือแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในตัวระบบเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น

ค่า ΔT คือค่าความต่างของอุณหภูมิในระบบ



แผนภูมิที่ 3.1 Seebeck Coefficient ของสารกึ่งตัวนำ Bismuth Tin (BiSn)

การหาค่าความร้อนที่เข้ามาในระบบ หาได้จากสมการ

$$Q_h = (S \times T_h \times I) - (0.5 \times I^2 \times R_e) + (K \times \Delta T)$$

การหาค่าความต้านทานความร้อนหาได้จากสมการ

$$R = \frac{d}{K}$$

การหาค่า Efficiency of the generator หาได้จากสมการ

$$E = \frac{V \times I}{Q_h} \times 100\%$$

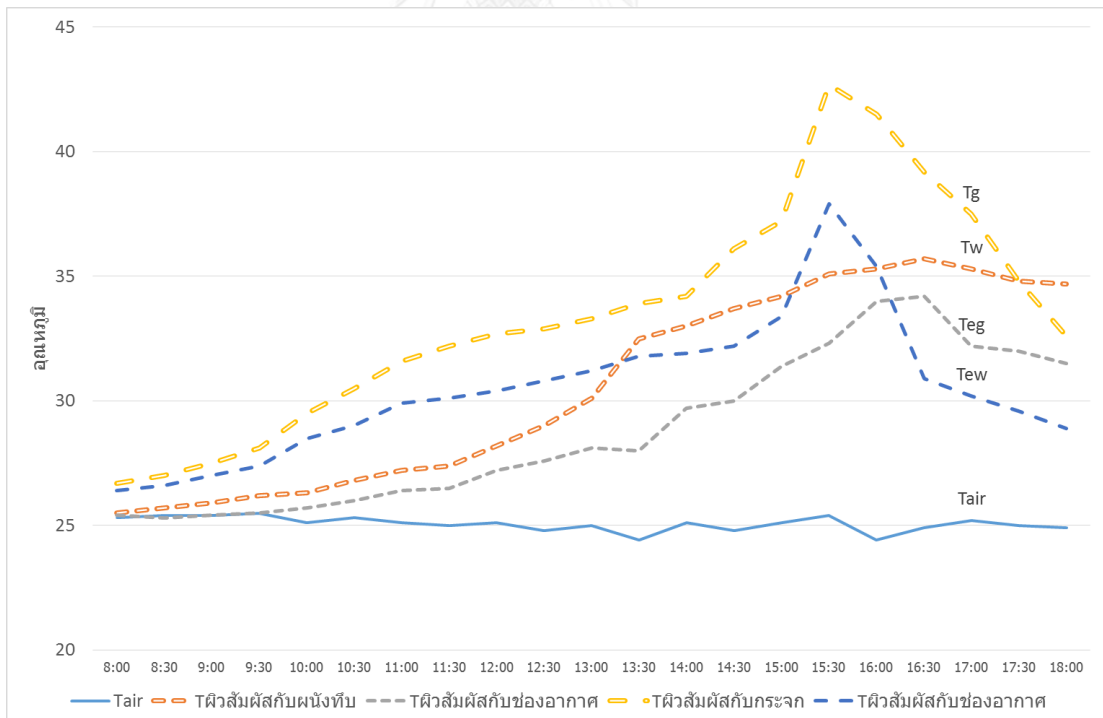
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดลองที่ 1 ทดสอบความเป็นไปได้ของระบบกับเปลือกอาคาร

แทนค่าตัวแปรต่างๆในการทดลองที่ 1 ดังนี้

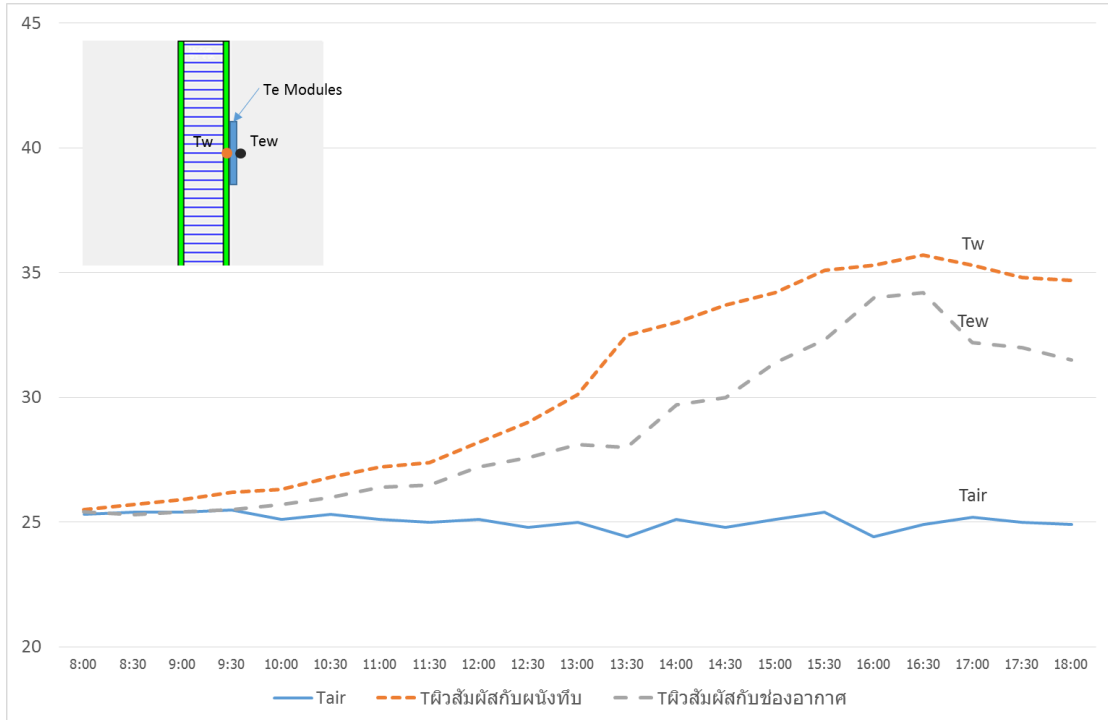
- T_{air} คืออุณหภูมิอากาศของห้องปรับอากาศ
- T_w คืออุณหภูมิผิวสัมผัสของ เทอร์โมอิเล็กทริก ฝั่งที่สัมผัสกับผิวผนังที่บด้านใน
- T_{ew} คืออุณหภูมิผิวสัมผัสของ เทอร์โมอิเล็กทริก ฝั่งที่สัมผัสกับอากาศในห้อง
- T_g คืออุณหภูมิผิวสัมผัสของ เทอร์โมอิเล็กทริก ฝั่งที่สัมผัสกับผิวผนังกระจกด้านใน
- T_{eg} คืออุณหภูมิผิวสัมผัสของ เทอร์โมอิเล็กทริก ฝั่งที่สัมผัสกับอากาศในห้อง



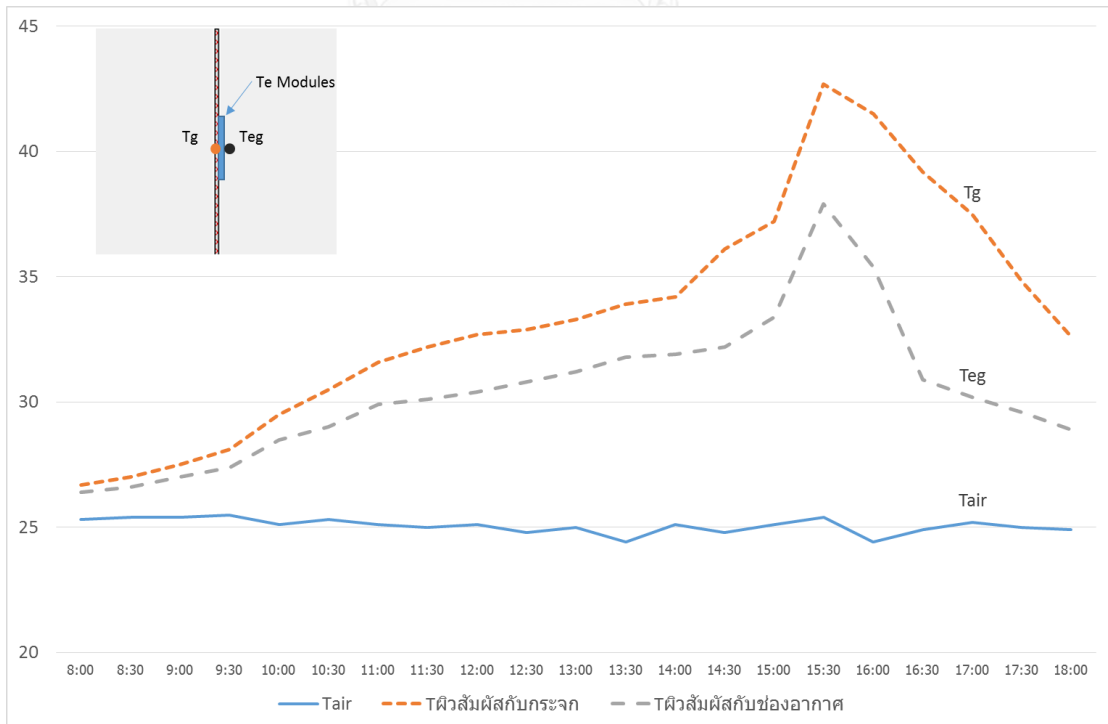
แผนภูมิที่ 4.1 อุณหภูมิตั้งแต่เวลา 8:00น.-18:00 ของผนังทั้งสองชนิด

จากแผนภูมิที่ 4.1 พบว่า อุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวผนังกระจกด้านใน คือ 42.7 องศาเซลเซียสเวลาประมาณ 15:30 น. อุณหภูมิต่ำสุดของผนังกระจกด้านในคือช่วงเช้าเวลา 8:00 น.

โดยมีอุณหภูมิอยู่ที่ 26.4 องศาเซลเซียส ทางด้านผนังที่บจะมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 35.7 องศาเซลเซียสในช่วงเวลา 16:30 น. และมีอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ที่ 25.4 องศาเซลเซียสตอนเวลา 8:00 น.

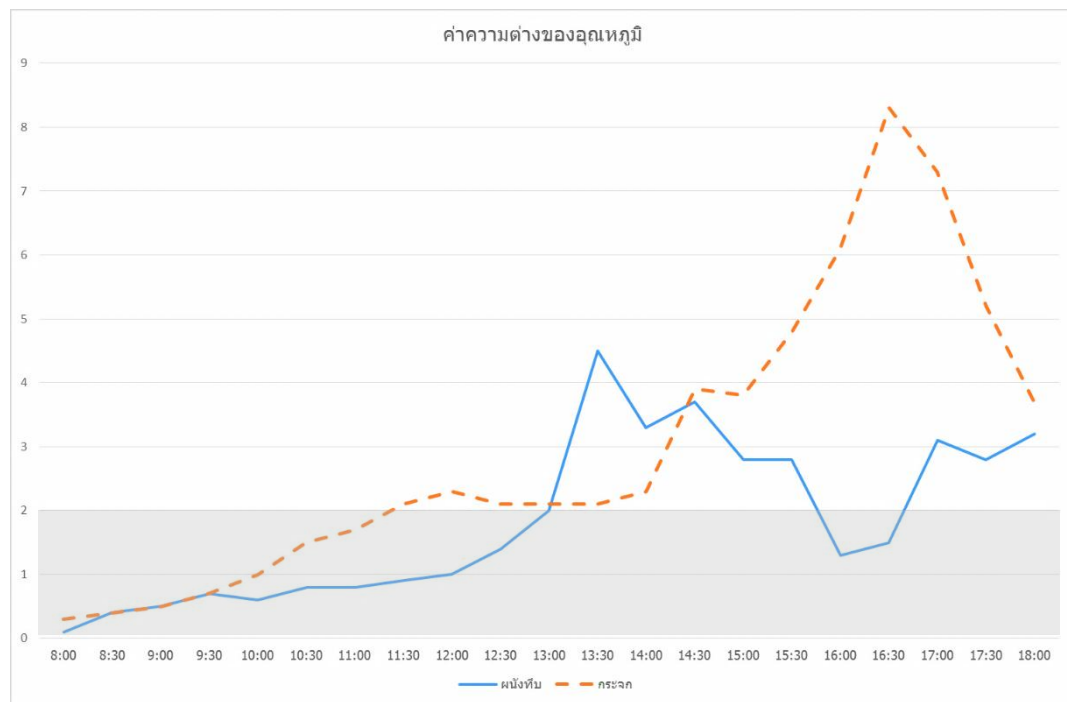


แผนภูมิที่ 4.2 อุณหภูมิของกรณีทดลองผนังที่บ



แผนภูมิที่ 4.3 อุณหภูมิของกรณีทดลองผนังกระจก

จากแผนภูมิที่ 4.2 และ 4.3 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิของฝั่งผนังทึบจะเพิ่มขึ้นได้น้อยและช้ากว่าอุณหภูมิฝั่งผนังกระจกอยู่มาก โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจุดสูงสุดที่เวลา 16:30 น. แต่ผนังทึบจะมีการคายความร้อนออกจากตัวผนังที่น้อยกว่าผนังกระจก สังเกตได้จากอุณหภูมิที่เวลา 18:00 น. จะอยู่ที่ 37.4 องศาเซลเซียสแต่ในช่วงเวลาเดียวกัน ที่ฝั่งผนังกระจกอุณหภูมิสามารถลงไปได้ถึง 32.6 องศาเซลเซียสทั้งๆที่มีอุณหภูมิสูงสุดมากกว่าผนังทึบคือ 42.7 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับการเพิ่มลดและอัตราการคายความร้อนของอุณหภูมิฝั่งที่สัมผัสอากาศภายในอาคาร



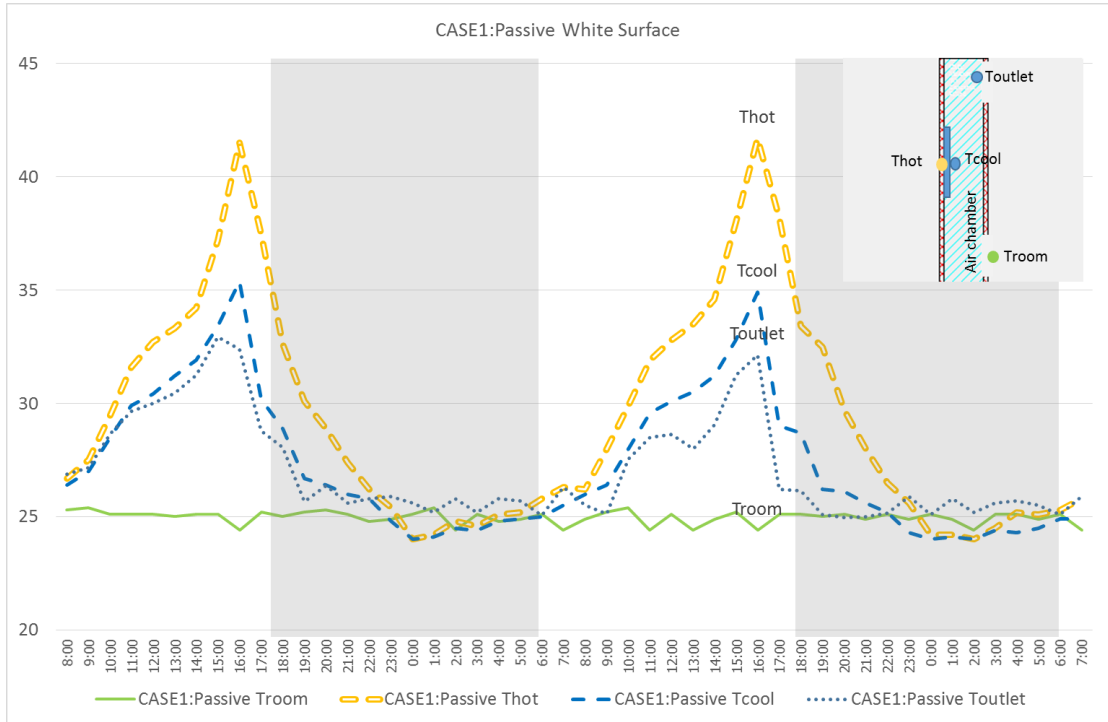
แผนภูมิที่ 4.4 ค่าความต่างของอุณหภูมิตามช่วงเวลาต่างๆ

จากแผนภูมิที่ 4.4 แถบสีทึบที่ขีดช่วง 0 ถึง 2 องศาเซลเซียสคือ ช่วงที่ตัวเทอร์โมอิเล็กทริกไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เลยจากการคำนวณโดยใช้ค่าจากสมการ Seebeck coefficients ของอุปกรณ์รุ่น TEC1-12706 ที่มีสารกึ่งตัวนำด้านในเป็น Bismuth Tin (BiSn) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ค่าความต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทางฝั่งผนังกระจกจะมีช่วงที่มากกว่า 2 องศาเซลเซียสหรือช่วงที่อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้นั้นมีอยู่ประมาณ 14 ชั่วโมง โดยมีค่าความต่างของอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 8.3 องศาเซลเซียส ส่วนฝั่งของผนังทึบ จะมีช่วงที่อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และมีความต่างอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 4.5 องศาเซลเซียส

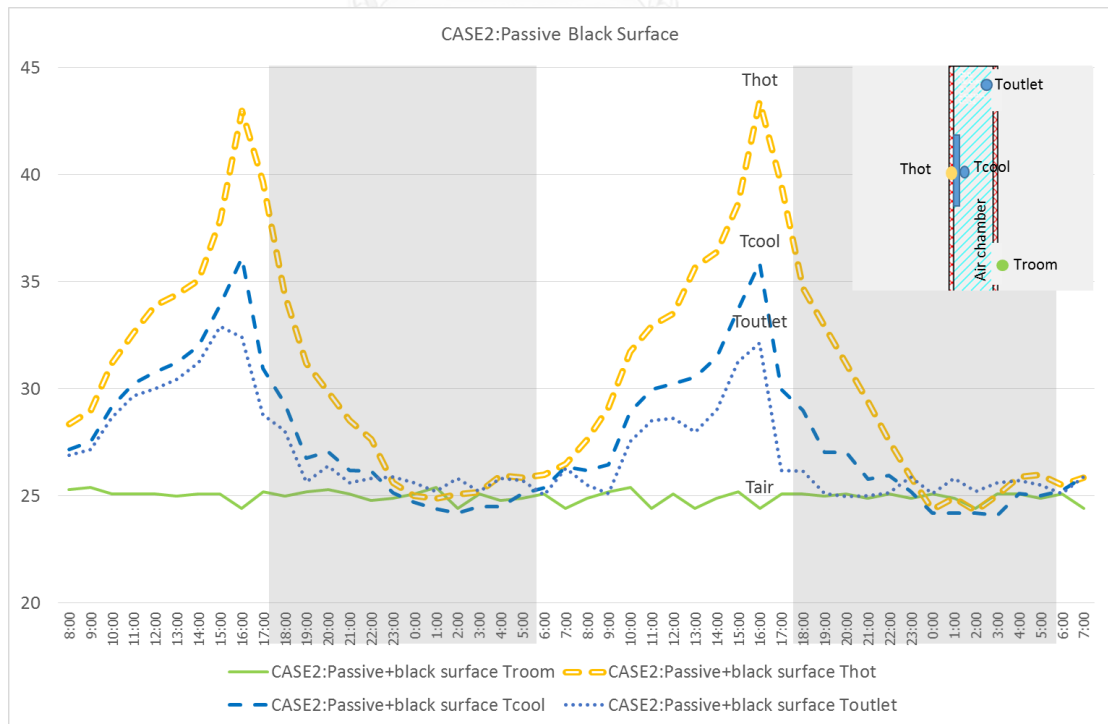
4.2 ผลการทดลองที่ 2 เพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วยวิธีการใช้ Airflow Window

จากการทำการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพทั้ง 4 กรณีทดลอง คือแบบใช้ Passive Airflow Window ผิวสัมผัสด้านร้อนทาสีขาว แบบใช้ Passive Airflow Window ผิวสัมผัสด้านร้อนทาสีดำ

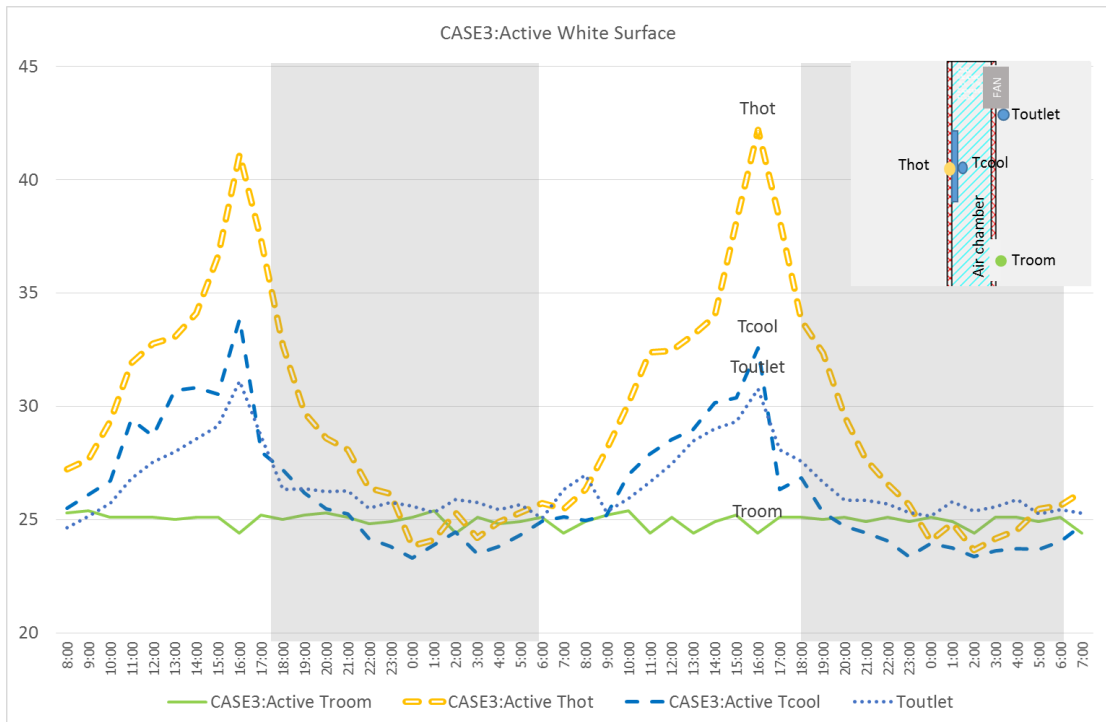
แบบ Active Airflow Window ผิวสัมผัสด้านร้อนทาสีขาว และแบบ Active Airflow Window ผิวสัมผัสด้านร้อนทาสีดำ โดยเขียนผลการวัดค่าอุณหภูมิได้เป็นแผนภูมิได้ดังนี้



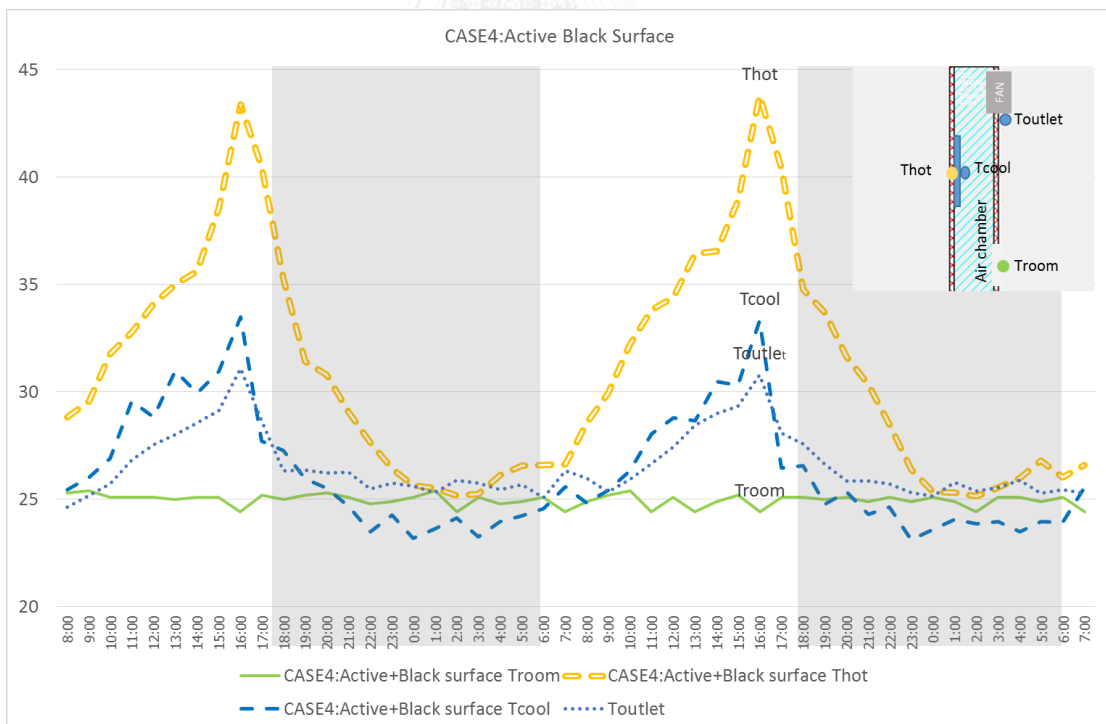
แผนภูมิที่ 4.5 ค่าอุณหภูมิกรณีทดลองที่ 1 Passive airflow ไม่ทาสีดำ



แผนภูมิที่ 4.6 ค่าอุณหภูมิกรณีทดลองที่ 2 Passive airflow ทาสีดำด้านที่สัมผัสกระจก



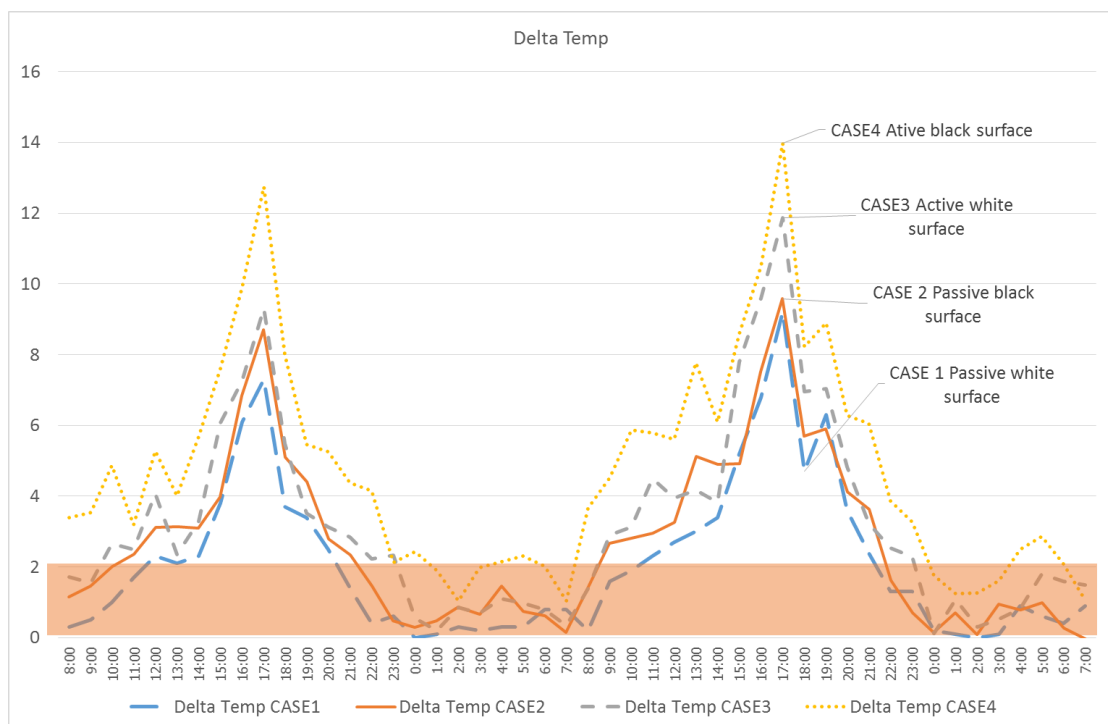
แผนภูมิที่ 4.7 ค่าอุณหภูมิกรณีทดลองที่ 3 Active airflow ไม่ทำสีดำ



แผนภูมิที่ 4.8 ค่าอุณหภูมิกรณีทดลองที่ 4 Active airflow ทำสีดำด้านที่สัมผัสกระจก

จากผลการทดลองที่ได้มาพบว่า ในกรณีทดลองที่ 2 และ 4 ที่ทำการทำสีดำบริเวณที่สัมผัสกับกระจกนั้น มีอุณหภูมิด้านที่ TE Modules สัมผัสกระจกสูงกว่ากรณีทดลองที่ 1 และ 3 ที่ไม่ได้ทำสี

ค่าอยู่ประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลาที่ร้อนที่สุดของวัน และ ในกรณีทดลองที่ 3 และ 4 ที่ใช้ระบบ Active airflow พบว่าอุณหภูมิผิวของ TE Modules ฝั่งช่องอากาศต่ำกว่ากรณีทดลองที่ 1 และ 2 (Passive airflow) อยู่ประมาณ 2.5-3 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลาที่ความร้อนขึ้นสูงสุดของวัน ในกรณีทดลองที่ 3 และ 4 (Active airflow) อุณหภูมิผิวของ TE Modules ฝั่งช่องอากาศยังมีการคายความร้อนออกจากผิวได้เร็วกว่ากรณีทดลองที่ 1 และ 2 ด้วย



แผนภูมิที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าความต่างของอุณหภูมิของทุกรณีการทดลอง

เมื่อนำผลการทดลองในแต่ละกรณีทดลองมาคำนวณเพื่อหาค่าความต่างของอุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ Thermoelectric Generator พบว่า

- กรณีทดลองที่ 1 มีช่วงที่ค่าความต่างของอุณหภูมิมากกว่า 2 องศาประมาณ 10 ชั่วโมงต่อวัน และมีค่าความต่าง ของอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 9.2 องศาเซลเซียส และกำลังไฟที่ผลิตได้สูงสุดอยู่ที่ 65 watt/ตารางเมตร
- กรณีทดลองที่ 2 มีช่วงที่ค่าความต่างของอุณหภูมิมากกว่า 2 องศาประมาณ 11 ชั่วโมงต่อวัน และมีค่าความต่าง ของอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 9.6 องศาเซลเซียส และกำลังไฟที่ผลิตได้สูงสุดอยู่ที่ 72.7 watt/ตารางเมตร

- กรณีทดลองที่ 3 มีช่วงที่ค่าความต่างของอุณหภูมิมากกว่า 2 องศาประมาณ 13 ชั่วโมงต่อวัน และมีค่าความต่าง ของอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 11.9 องศาเซลเซียส และกำลังไฟที่ผลิตได้สูงสุดอยู่ที่ 120.8 watt/ตารางเมตร
- กรณีทดลองที่ 4 มีช่วงที่ค่าความต่างของอุณหภูมิมากกว่า 2 องศาประมาณ 16 ชั่วโมงต่อวัน และมีค่าความต่าง ของอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 14 องศาเซลเซียส และกำลังไฟที่ผลิตได้สูงสุดอยู่ที่ 175.2 watt/ตารางเมตร

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของระบบ Thermoelectric Generator

จากค่าอุณหภูมิที่วัดได้ทั้งหมดในการทดลองที่ 2 นี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของระบบ Thermoelectric Generator ในแต่ละกรณีได้โดยใช้สมการที่ 3 การหาอัตราการระบายอากาศ (cfm) ดังนี้

$$cfm = 60 \times Cd \times A \times \sqrt{2 \times g \times (Hn - Hb) \left(\frac{T_o - T_i}{T_i} \right)}$$

$$cfm = 60 \times Cd \times A \times \sqrt{(32.152)(0.336)(0.0082)}$$

$$cfm = 60 \times 0.65 \times 0.164 \times \sqrt{0.178}$$

$$cfm = 60 \times 0.65 \times 0.164 \times 0.422$$

$$cfm = 2.72 \text{ ft}^3/\text{min}$$

หาค่า cfm ของระบบ Passive airflow window ในกรณีทดลองที่ 3 และ 4 ได้จากการใช้พัดลมดูดอากาศขนาด 20.89 cfm จำนวน 3 ตัวในการทำการทดลอง

นำค่า cfm มาคำนวณค่า Heat transfer และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (u) ของระบบได้จากสมการที่ 1 ถึง 4

$$Q_{System} = Q_{Ventilation} + Q_{Conduction} \quad \text{_____} \quad (1)$$

$$Q_{Ventilation} = 1.08 \times cfm \times (T_{outlet} - T_{inlet}) \quad \text{_____} \quad (2)$$

$$Q_{Conduction} = U \times (T_{outside} - T_{room}) \quad \text{_____} \quad (3)$$

$$u = \frac{Q_{System}}{(T_{outside} - T_{room})} \quad \text{_____} \quad (4)$$

กรณีทดลองที่ 1 Passive airflow window ผนังสัมผัสสีขาว

$$Q = 1.08 \times 2.72 \times 4.58 + 6.172 \times 2.30$$

$$Q = 27.65 \text{ Btu/h}$$

และหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$$u = \frac{27.65}{4.82}$$

$$u = 5.74 \text{ w/m}^2\text{k}$$

กรณีทดลองที่ 2 Passive airflow window ผนังสัมผัสสีดำ

$$Q = 1.08 \times 2.72 \times 4.59 + 6.172 \times 2.30$$

$$Q = 27.68 \text{ Btu/h}$$

และหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$$u = \frac{27.68}{4.7}$$

$$u = 5.89 \text{ w/m}^2\text{k}$$

กรณีทดลองที่ 3 Active airflow window ผนังสัมผัสสีขาว

$$Q = 1.08 \times 62.67 \times 0.24 + 6.172 \times 2.30$$

$$Q = 30.44 \text{ Btu/h}$$

และหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$$u = \frac{30.44}{11.24}$$

$$u = 2.71 \text{ w/m}^2\text{k}$$

กรณีทดลองที่ 4 Active airflow window ผนังสัมผัสสีดำ

$$Q = 1.08 \times 62.67 \times 0.31 + 6.172 \times 2.30$$

$$Q = 35.18 \text{ Btu/h}$$

และหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$$u = \frac{35.18}{12.871}$$

$$u = 2.73 \text{ w/m}^2\text{k}$$

จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของระบบ สามารถเขียนสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 อัตรา Heat transfer และ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบ

CASE	Heat transfer (Btu/h)	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (w/m^2k)
Passive airflow window ผิวสัมผัสสีขาว	27.65	5.74
Passive airflow window ผิวสัมผัสสีดำ	27.68	5.89
Active airflow window ผิวสัมผัสสีขาว	30.44	2.71
Active airflow window ผิวสัมผัสสีดำ	35.18	2.73

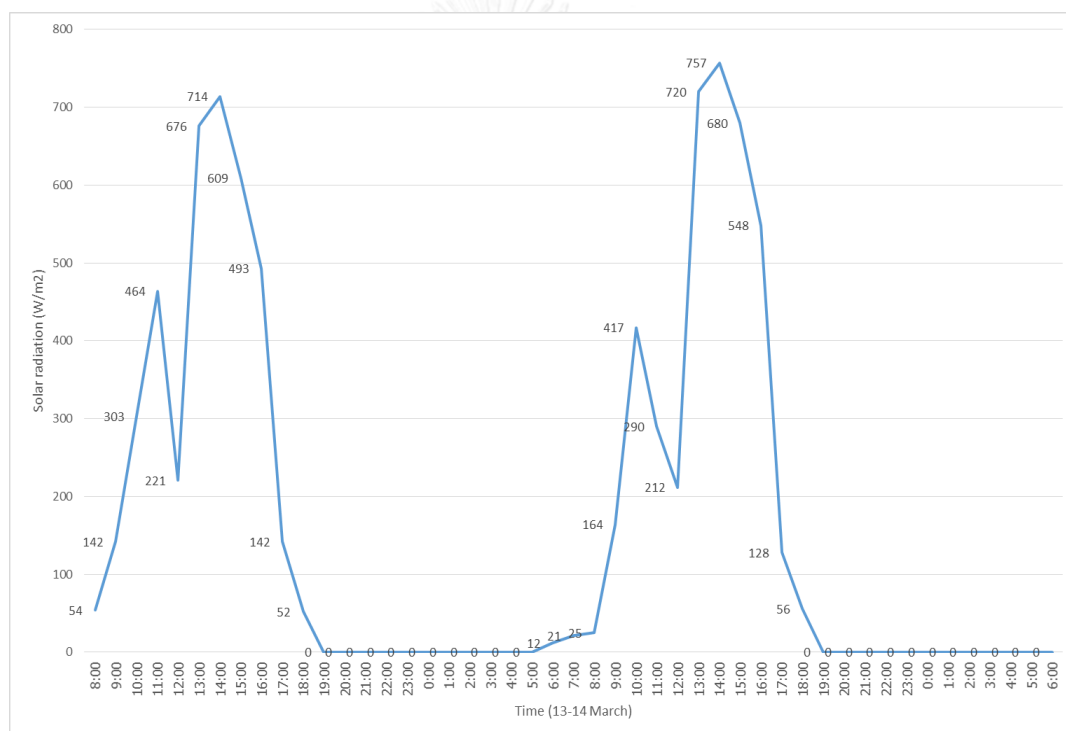


ตารางที่ 4.2 จำนวนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละกรณีทดลองเปรียบเทียบกับค่าความต่างอุณหภูมิ

CASE	Passive airflow window			Passive airflow window + black surface			Active airflow window			Active airflow window + black surface		
	watt/TE Modules (0.0016 ตาราง เมตร)	watt/ตารางเมตร	ΔT	watt/TE Modules (0.0016 ตารางเมตร)	watt/ตารางเมตร	ΔT	watt/TE Modules (0.0016 ตารางเมตร)	watt/ตารางเมตร	ΔT	watt/TE Modules (0.0016 ตารางเมตร)	watt/ตารางเมตร	ΔT
8:00	0.0000	0.000	0.3	0.0000	0.000	1.2	0.0000	0.000	1.7	0.0058	3.612	3.4
9:00	0.0000	0.000	0.5	0.0000	0.000	1.5	0.0000	0.000	1.6	0.0068	4.234	3.5
10:00	0.0000	0.000	1.0	0.0000	0.000	2.0	0.0019	1.205	2.6	0.0194	12.099	4.9
11:00	0.0000	0.000	1.7	0.0010	0.631	2.4	0.0014	0.861	2.5	0.0045	2.786	3.2
12:00	0.0008	0.527	2.3	0.0041	2.555	3.1	0.0111	6.926	4.1	0.0246	15.348	5.3
13:00	0.0004	0.261	2.1	0.0043	2.673	3.1	0.0010	0.612	2.4	0.0105	6.573	4.0
14:00	0.0008	0.527	2.3	0.0039	2.468	3.1	0.0051	3.178	3.3	0.0303	18.965	5.7
15:00	0.0087	5.444	3.8	0.0101	6.328	4.0	0.0365	22.826	6.1	0.0657	41.090	7.6
16:00	0.0368	23.020	6.1	0.0502	31.401	6.9	0.0586	36.633	7.3	0.1260	78.780	9.9
17:00	0.0592	37.014	7.3	0.0919	57.466	8.7	0.1086	67.853	9.3	0.2273	142.038	12.7
18:00	0.0079	4.955	3.7	0.0223	13.910	5.1	0.0273	17.038	5.5	0.0749	46.803	8.0
19:00	0.0058	3.627	3.4	0.0143	8.957	4.4	0.0066	4.135	3.5	0.0272	16.988	5.5
20:00	0.0014	0.884	2.5	0.0025	1.586	2.8	0.0041	2.582	3.1	0.0243	15.177	5.3
21:00	0.0000	0.000	1.4	0.0010	0.595	2.3	0.0027	1.681	2.8	0.0140	8.747	4.4
22:00	0.0000	0.000	0.4	0.0000	0.000	1.5	0.0007	0.409	2.2	0.0117	7.326	4.1
23:00	0.0000	0.000	0.6	0.0000	0.000	0.5	0.0009	0.565	2.3	0.0005	0.000	2.1
0:00	0.0000	0.000	0.0	0.0000	0.000	0.3	0.0000	0.000	0.5	0.0012	0.768	2.4
1:00	0.0000	0.000	0.1	0.0000	0.000	0.5	0.0000	0.000	0.2	0.0001	0.000	1.9
2:00	0.0000	0.000	0.3	0.0000	0.000	0.9	0.0000	0.000	0.9	0.0000	0.000	1.0
3:00	0.0000	0.000	0.2	0.0000	0.000	0.7	0.0000	0.000	0.7	0.0002	0.000	2.0
4:00	0.0000	0.000	0.3	0.0000	0.000	1.5	0.0000	0.000	1.1	0.0005	0.000	1.9
5:00	0.0000	0.000	0.3	0.0000	0.000	0.7	0.0000	0.000	1.0	0.0009	0.550	2.3
6:00	0.0000	0.000	0.8	0.0000	0.000	0.6	0.0000	0.000	0.8	0.0003	0.000	1.9
7:00	0.0000	0.000	0.8	0.0000	0.000	0.1	0.0000	0.000	0.3	0.0000	0.000	1.0
8:00	0.0000	0.000	0.2	0.0000	0.000	1.4	0.0000	0.000	1.4	0.0076	4.780	3.7
9:00	0.0000	0.000	1.6	0.0020	1.258	2.7	0.0030	1.877	2.9	0.0155	9.667	4.5
10:00	0.0001	0.000	1.9	0.0026	1.599	2.8	0.0042	2.608	3.1	0.0332	20.740	5.9
11:00	0.0008	0.527	2.3	0.0033	2.033	3.0	0.0151	9.446	4.5	0.0319	19.910	5.8
12:00	0.0021	1.332	2.7	0.0049	3.087	3.3	0.0099	6.170	3.9	0.0292	18.264	5.6
13:00	0.0035	2.178	3.0	0.0225	14.052	5.1	0.0120	7.478	4.2	0.0695	43.455	7.8
14:00	0.0058	3.627	3.4	0.0198	12.396	4.9	0.0089	5.588	3.8	0.0368	22.983	6.1
15:00	0.0235	14.695	5.2	0.0200	12.486	4.9	0.0698	43.647	7.8	0.0893	55.810	8.6
16:00	0.0493	30.781	6.8	0.0638	39.900	7.5	0.1171	73.176	9.6	0.1447	90.410	10.5
17:00	0.1055	65.935	9.2	0.1162	72.654	9.6	0.1933	120.787	11.9	0.2803	175.201	14.0
18:00	0.0174	10.874	4.7	0.0305	19.076	5.7	0.0524	32.732	7.0	0.0801	50.056	8.2
19:00	0.0402	25.123	6.3	0.0336	21.029	5.9	0.0541	33.804	7.0	0.0972	60.735	8.9
20:00	0.0072	4.489	3.6	0.0114	7.131	4.1	0.0188	11.761	4.8	0.0397	24.807	6.3
21:00	0.0011	0.694	2.4	0.0074	4.629	3.6	0.0048	2.988	3.2	0.0361	22.533	6.1
22:00	0.0000	0.000	1.3	0.0000	0.000	1.6	0.0015	0.941	2.5	0.0092	5.771	3.9
23:00	0.0000	0.000	1.3	0.0000	0.000	0.7	0.0008	0.518	2.3	0.0050	3.115	3.3
0:00	0.0000	0.000	0.2	0.0000	0.000	0.2	0.0000	0.000	0.1	0.0000	0.000	1.8
1:00	0.0000	0.000	0.1	0.0000	0.000	0.7	0.0000	0.000	1.1	0.0000	0.000	1.2
2:00	0.0000	0.000	0.0	0.0000	0.000	0.1	0.0000	0.000	0.3	0.0000	0.000	1.3
3:00	0.0000	0.000	0.1	0.0000	0.000	0.9	0.0000	0.000	0.5	0.0000	0.000	1.6
4:00	0.0000	0.000	0.9	0.0000	0.000	0.8	0.0000	0.000	0.8	0.0014	0.884	2.5
5:00	0.0000	0.000	0.6	0.0000	0.000	1.0	0.0000	0.000	1.8	0.0028	1.744	2.9
6:00	0.0000	0.000	0.4	0.0000	0.000	0.3	0.0000	0.000	1.6	0.0004	0.000	1.9
7:00	0.0000	0.000	0.9	0.0000	0.000	0.0	0.0000	0.000	1.5	0.0000	0.000	1.1

จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อนำผลประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้ามาเทียบกับแผนภูมิที่ 4.10 Solar radiation ที่วัดได้ในวันที่ทำการทดลองคือวันที่ 13 ถึงวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ.2558 จะพบว่า ในช่วงเวลา 13:00น.-16:00น. เป็นช่วงที่มีพลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์สูงที่สุด แต่ด้วยค่าความเป็นฉนวนของอาคารและค่าการนำความร้อนของวัสดุทำให้ช่วงเวลาที่ระบบ Thermoelectric Generator ผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุดนั้นเลื่อนออกไปเป็นเวลาประมาณ 15:00น.-17:00น.

จากสมมุติฐานการวิจัย Solar radiation นี้มีผลต่ออุณหภูมิที่ผิวของอาคารและเป็นตัวต้นกำเนิดของพลังงานในระบบ Thermoelectric Generator ที่ใช้พลังงานความร้อนจากผิวอาคารเป็นตัวแปรสำคัญในการผลิตพลังงานไฟฟ้าอีกด้วย ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการหาสมการค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้ กับ พลังงานความร้อนจาก Solar radiation เพื่อนำสมการที่ได้ไปใช้คำนวณต่อไปในการวิเคราะห์ผลการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้รวมในแต่ละปีต่อไป



แผนภูมิที่ 4.10 ค่า Solar radiation(วัดต่อตารางเมตร) ของวันที่ 13-14 มิถุนายน 2558

(ที่มา : <http://www.weatherwatch.in.th/>, 2558)

เมื่อนำผลของประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากตารางที่ 4.1 มาเปรียบเทียบกับค่า Solar radiation ของวันที่ทำการทดลองจากแผนภูมิที่ 4.10 และค่าความต่างของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองที่ 2 โดยทำการหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของสมการในทุกกรณีการทดลองเพื่อหาเส้นแนวโน้มและสมการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบ

Thermoelectric Generator กับค่า Solar radiation ที่ได้จากแสงอาทิตย์และผลจากค่าความต่างของอุณหภูมิ โดยผลของสมการคณิตศาสตร์ในแต่ละกรณีได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 พลังงานไฟฟ้าเปรียบเทียบกับ Solar radiation และความต่างของอุณหภูมิใน

CASE 1: Passive airflow wondow+ white surface							
วันที่ 13 มีนาคม 2558				วันที่ 14 มีนาคม 2558			
time	Energy (watt/m ²)	solar (watt/m ²)	D temp (C°)	time	Energy (watt/m ²)	solar (watt/m ²)	D temp (C°)
8:00	0.000	16	0.3	8:00	0.000	12	0.2
9:00	0.000	29	0.5	9:00	0.000	21	1.6
10:00	0.000	54	1.0	10:00	0.000	25	1.9
11:00	0.000	142	1.7	11:00	0.527	164	2.3
12:00	0.527	303	2.3	12:00	1.332	417	2.7
13:00	0.261	464	2.1	13:00	2.178	290	3.0
14:00	0.527	221	2.3	14:00	3.627	212	3.4
15:00	5.444	676	3.8	15:00	14.695	720	5.2
16:00	23.020	714	6.1	16:00	30.781	757	6.8
17:00	37.014	609	7.3	17:00	65.935	680	9.2
18:00	4.955	493	3.7	18:00	10.874	548	4.7
19:00	3.627	142	3.4	19:00	25.123	128	6.3
20:00	0.884	52	2.5	20:00	4.489	56	3.6
21:00	0.000	0	1.4	21:00	0.694	0	2.4
22:00	0.000	0	0.4	22:00	0.000	0	1.3
23:00	0.000	0	0.6	23:00	0.000	0	1.3
0:00	0.000	0	0.0	0:00	0.000	0	0.2
1:00	0.000	0	0.1	1:00	0.000	0	0.1
2:00	0.000	0	0.3	2:00	0.000	0	0.0
3:00	0.000	0	0.2	3:00	0.000	0	0.1
4:00	0.000	0	0.3	4:00	0.000	0	0.9
5:00	0.000	0	0.3	5:00	0.000	0	0.6
6:00	0.000	0	0.8	6:00	0.000	0	0.4
7:00	0.000	0	0.8	7:00	0.000	0	0.9

CASE 2: Passive airflow wondow+ black surface							
วันที่ 13 มีนาคม 2558				วันที่ 14 มีนาคม 2558			
time	Energy (watt/m ²)	solar (watt/m ²)	D temp (C°)	time	Energy (watt/m ²)	solar (watt/m ²)	D temp (C°)
8:00	0.000	16	1.2	8:00	0.000	12	1.4
9:00	0.000	29	1.5	9:00	1.258	21	2.7
10:00	0.000	54	2.0	10:00	1.599	25	2.8
11:00	0.631	142	2.4	11:00	2.033	164	3.0
12:00	2.555	303	3.1	12:00	3.087	417	3.3
13:00	2.673	464	3.1	13:00	14.052	290	5.1
14:00	2.468	221	3.1	14:00	12.396	212	4.9
15:00	6.328	676	4.0	15:00	12.486	720	4.9
16:00	31.401	714	6.9	16:00	39.900	757	7.5
17:00	57.466	609	8.7	17:00	72.654	680	9.6
18:00	13.910	493	5.1	18:00	19.076	548	5.7
19:00	8.957	142	4.4	19:00	21.029	128	5.9
20:00	1.586	52	2.8	20:00	7.131	56	4.1
21:00	0.595	0	2.3	21:00	4.629	0	3.6
22:00	0.000	0	1.5	22:00	0.000	0	1.6
23:00	0.000	0	0.5	23:00	0.000	0	0.7
0:00	0.000	0	0.3	0:00	0.000	0	0.2
1:00	0.000	0	0.5	1:00	0.000	0	0.7
2:00	0.000	0	0.9	2:00	0.000	0	0.1
3:00	0.000	0	0.7	3:00	0.000	0	0.9
4:00	0.000	0	1.5	4:00	0.000	0	0.8
5:00	0.000	0	0.7	5:00	0.000	0	1.0
6:00	0.000	0	0.6	6:00	0.000	0	0.3
7:00	0.000	0	0.1	7:00	0.000	0	0.0

CASE 3: Active airflow wondow+ white surface							
วันที่ 13 มีนาคม 2558				วันที่ 14 มีนาคม 2558			
time	Energy (watt/m ²)	solar (watt/m ²)	D temp (C°)	time	Energy (watt/m ²)	solar (watt/m ²)	D temp (C°)
8:00	0.000	16	1.7	8:00	0.000	12	1.4
9:00	0.000	29	1.6	9:00	1.877	21	2.9
10:00	1.205	54	2.6	10:00	2.608	25	3.1
11:00	0.861	142	2.5	11:00	9.446	164	4.5
12:00	6.926	303	4.1	12:00	6.170	417	3.9
13:00	0.612	464	2.4	13:00	7.478	290	4.2
14:00	3.178	221	3.3	14:00	5.588	212	3.8
15:00	22.826	676	6.1	15:00	43.647	720	7.8
16:00	36.633	714	7.3	16:00	73.176	757	9.6
17:00	67.853	609	9.3	17:00	120.787	680	11.9
18:00	17.038	493	5.5	18:00	32.732	548	7.0
19:00	4.135	142	3.5	19:00	33.804	128	7.0
20:00	2.582	52	3.1	20:00	11.761	56	4.8
21:00	1.681	0	2.8	21:00	2.988	0	3.2
22:00	0.409	0	2.2	22:00	0.941	0	2.5
23:00	0.565	0	2.3	23:00	0.518	0	2.3
0:00	0.000	0	0.5	0:00	0.000	0	0.1
1:00	0.000	0	0.2	1:00	0.000	0	1.1
2:00	0.000	0	0.9	2:00	0.000	0	0.3
3:00	0.000	0	0.7	3:00	0.000	0	0.5
4:00	0.000	0	1.1	4:00	0.000	0	0.8
5:00	0.000	0	1.0	5:00	0.000	0	1.8
6:00	0.000	0	0.8	6:00	0.000	0	1.6
7:00	0.000	0	0.3	7:00	0.000	0	1.5

CASE 4: Active airflow wondow+black surface							
วันที่ 13 มีนาคม 2558				วันที่ 14 มีนาคม 2558			
time	Energy (watt/m ²)	solar (watt/m ²)	D temp (C°)	time	Energy (watt/m ²)	solar (watt/m ²)	D temp (C°)
8:00	3.612	16	3.4	8:00	4.780	12	3.7
9:00	4.234	29	3.5	9:00	9.667	21	4.5
10:00	12.099	54	4.9	10:00	20.740	25	5.9
11:00	2.786	142	3.2	11:00	19.910	164	5.8
12:00	15.348	303	5.3	12:00	18.264	417	5.6
13:00	6.573	464	4.0	13:00	43.455	290	7.8
14:00	18.965	221	5.7	14:00	22.983	212	6.1
15:00	41.090	676	7.6	15:00	55.810	720	8.6
16:00	78.780	714	9.9	16:00	90.410	757	10.5
17:00	142.038	609	12.7	17:00	175.201	680	14.0
18:00	46.803	493	8.0	18:00	50.056	548	8.2
19:00	16.988	142	5.5	19:00	60.735	128	8.9
20:00	15.177	52	5.3	20:00	24.807	56	6.3
21:00	8.747	0	4.4	21:00	22.533	0	6.1
22:00	7.326	0	4.1	22:00	5.771	0	3.9
23:00	0.000	0	2.1	23:00	3.115	0	3.3
0:00	0.768	0	2.4	0:00	0.000	0	1.8
1:00	0.000	0	1.9	1:00	0.000	0	1.2
2:00	0.000	0	1.0	2:00	0.000	0	1.3
3:00	0.000	0	2.0	3:00	0.000	0	1.6
4:00	0.000	0	1.9	4:00	0.884	0	2.5
5:00	0.550	0	2.3	5:00	1.744	0	2.9
6:00	0.000	0	1.9	6:00	0.000	0	1.9
7:00	0.000	0	1.0	7:00	0.000	0	1.1

คำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ต่อ Solar radiation และ ค่าความต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์แบบ Multiple Regression โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ได้ผลดังนี้

- กรณีทดลองที่ 1 Passive airflow window ผิวสัมผัสสีขาว ได้ค่าสมการเชิงเส้นคือ $y = 5.5799(\Delta t) - 0.0078(\text{solar}) - 5.5496$ และมีค่า $R^2 = 0.76$
- กรณีทดลองที่ 2 Passive airflow window ผิวสัมผัสสีดำ ได้ค่าสมการเชิงเส้นคือ $y = 5.461(\Delta t) + 0.0007(\text{solar}) - 7.6471$ และมีค่า $R^2 = 0.77$
- กรณีทดลองที่ 3 Active airflow window ผิวสัมผัสสีขาว ได้ค่าสมการเชิงเส้นคือ $y = 7.7866(\Delta t) - 0.0007(\text{solar}) - 13.966$ และมีค่า $R^2 = 0.81$
- กรณีทดลองที่ 4 Active airflow window ผิวสัมผัสสีดำ ได้ค่าสมการเชิงเส้นคือ $y = 10.1121(\Delta t) + 0.0101(\text{solar}) - 27.614$ และมีค่า $R^2 = 0.85$

จากสมการเชิงเส้นที่ได้จากการคำนวณทั้ง 4 กรณีการทดลองสามารถนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ Thermoelectric Generator ในการทดลองที่ 3 ได้ต่อไป และจากแผนภูมิเส้นแนวโน้มที่ได้พบว่า ระบบที่มีความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าตอบสนองกับปริมาณ Solar radiation ได้ดีที่สุดคือระบบ Active airflow window ทาผิวสัมผัสสีดำ และระบบที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดคือระบบ Passive airflow window ผิวสัมผัสสีขาว

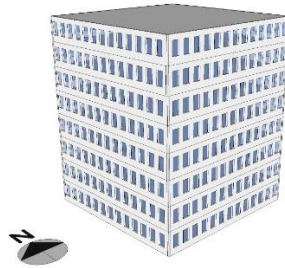
4.3 ผลการทดลองที่ 3 ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation)

4.3.1 การวิเคราะห์ผลการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้อรวมในแต่ละปี

ใช้โปรแกรม Visual DOE 4.1 คำนวณปริมาณ Solar radiation ตลอดทั้งปีเป็นรายชั่วโมงที่ผิวอาคารด้านทิศใต้ซึ่งทำการจำลองระบบ Thermoelectric Generator ไว้ เพื่อนำมาคำนวณหาความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของระบบในอาคารจำลองของทั้ง 4 กรณีการทดลองคือ Passive airflow window ผิวสัมผัสสีขาว, ดำ ระบบ Active airflow window ผิวสัมผัสสีขาว, ดำ ผนังเป็นคอนกรีตหนา 10 เซนติเมตร และทำการเปรียบเทียบสัดส่วนกับการใช้พลังงานในอาคารที่ได้ตลอดทั้งปี โดยอาคารที่ทำการจำลองนั้นตั้งค่าให้เป็นอาคารสำนักงานปรับอากาศ ทำงานช่วงระยะเวลากลางวัน 8:00น. – 17:00น. มีขนาด 20x20 เมตร สูง 7 ชั้น มีพื้นที่อาคารรวม 2,800 ตารางเมตร มีพื้นที่กระจกช่องเปิดโดยรวมที่ 558 ตารางเมตรตั้งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (u) ตามที่คำนวณได้ในแต่ละกรณีดังนี้

- อาคาร BASECASE ไม่มีการติดตั้งระบบใดๆ
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่กระจกอาคาร (u) = $6.172 \text{ w/m}^2\text{k}$
- กรณีทดลองที่ 1 Passive airflow window ผิวสัมผัสสีขาว
มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่กระจกอาคาร (u) = $5.74 \text{ w/m}^2\text{k}$
- กรณีทดลองที่ 2 Passive airflow window ผิวสัมผัสสีดำ
มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่กระจกอาคาร (u) = $5.89 \text{ w/m}^2\text{k}$
- กรณีทดลองที่ 3 Active airflow window ผิวสัมผัสสีขาว
มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่กระจกอาคาร (u) = $2.71 \text{ w/m}^2\text{k}$

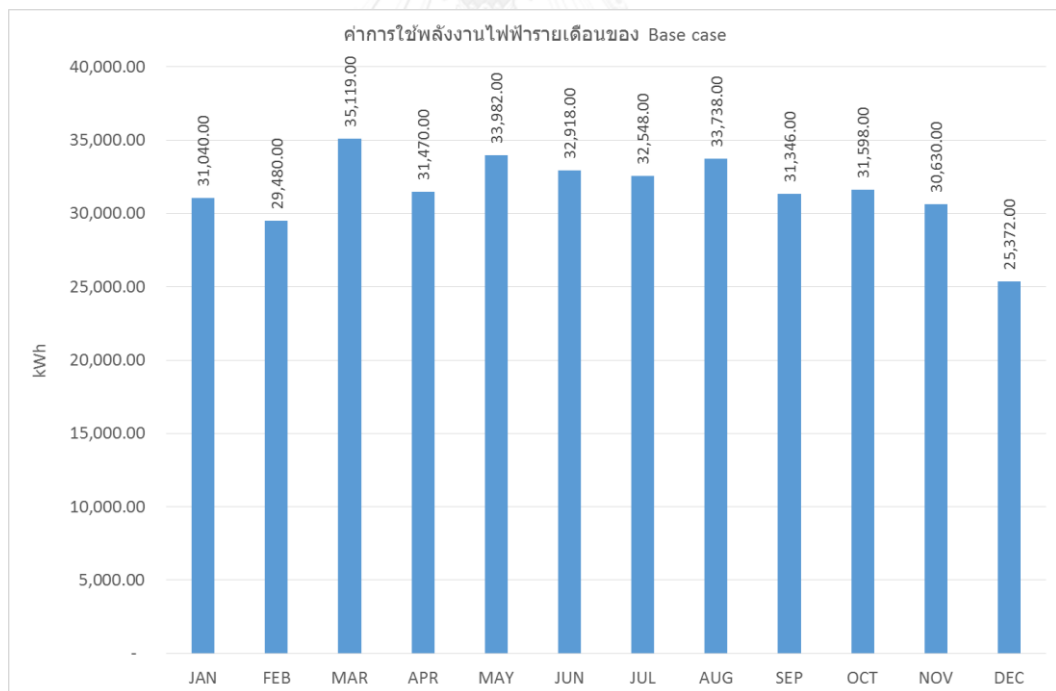
- กรณีทดลองที่ 4 Active airflow window ผิวสัมผัสสีดำ
มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่กระจกอาคาร (u) = $2.73 \text{ w/m}^2\text{k}$



ภาพที่ 4.1 อาคารจำลองโดยโปรแกรม Visual DOE4.1

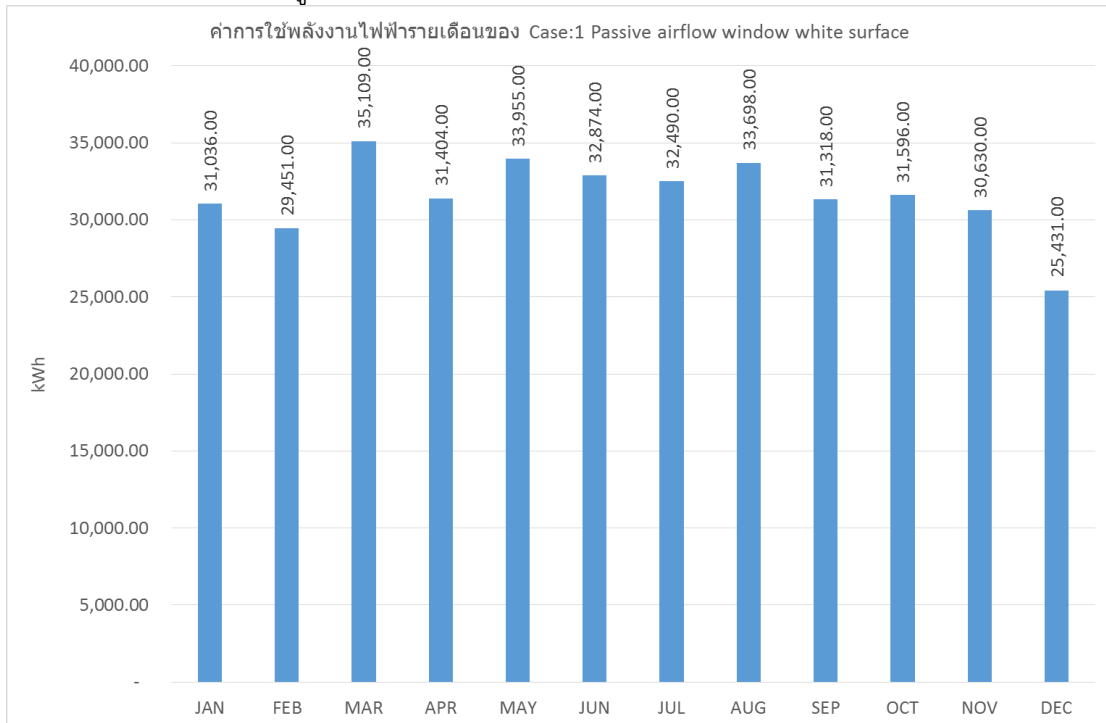
ใช้โปรแกรม Visual DOE 4.1 คำนวณผลรวมการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารทั้งจากระบบแสงสว่างและระบบปรับอากาศ ในรูปแบบของรายเดือน เป็นระยะเวลา 1 ปีแสดงดังแผนภูมิที่ 4.16 เปรียบเทียบกับอาคารจำลองในกรณีดังนี้

- อาคาร BASECASE มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมทั้งปีอยู่ที่ 409,673.kWh



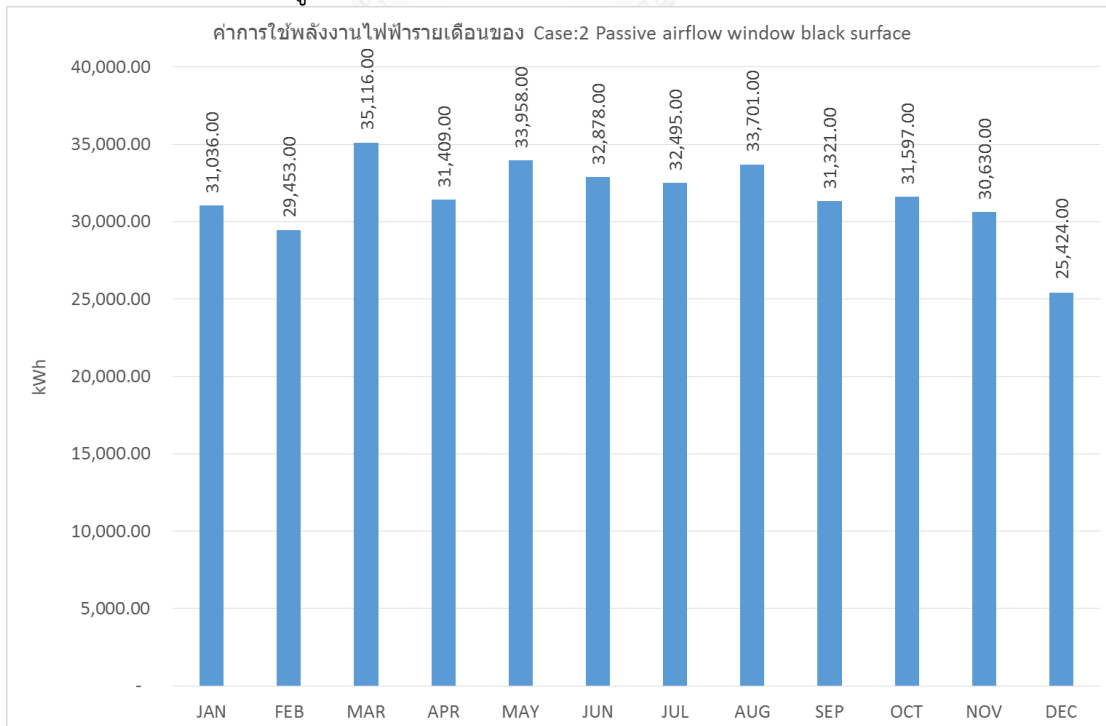
แผนภูมิที่ 4.10 ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนของอาคารจำลอง Base case

- กรณีทดลองที่ 1 Passive airflow window ผิวสัมผัสสีขาว มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมทั้งปีอยู่ที่ 378,990 kWh



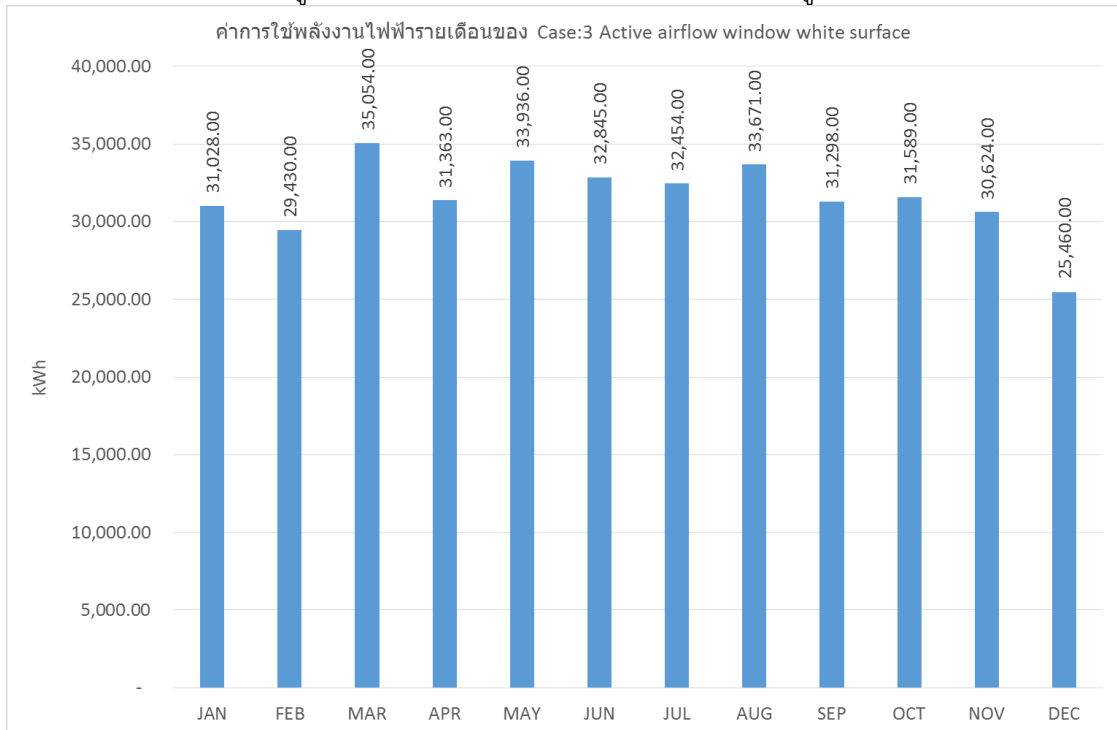
แผนภูมิที่ 4.11 ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนของอาคารจำลอง Case 1

- กรณีทดลองที่ 2 Passive airflow window ผิวสัมผัสสีดำ มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมทั้งปีอยู่ที่ 379,017 kWh



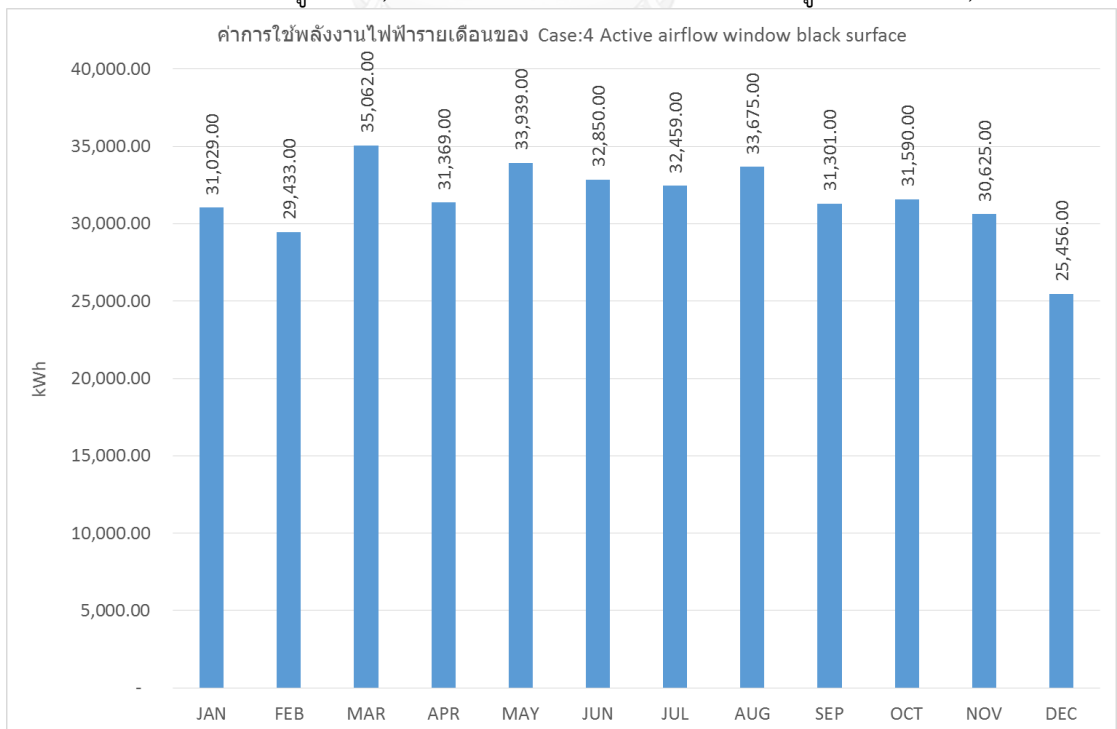
แผนภูมิที่ 4.12 ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนของอาคารจำลอง Case 2

- กรณีทดลองที่ 3 Active airflow window ผิวสัมผัสสีขาว มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมทั้งปีอยู่ที่ 378,751 kWh มีค่าการใช้ไฟฟ้าจากระบบดูดอากาศอีก 6,482.4 kWh



แผนภูมิที่ 4.13 ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนของอาคารจำลอง Case 3

- กรณีทดลองที่ 4 Active airflow window ผิวสัมผัสสีดำ มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมทั้งปีอยู่ที่ 378,786 kWh มีค่าการใช้ไฟฟ้าจากระบบดูดอากาศอีก 6,482.4 kWh



แผนภูมิที่ 4.14 ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนของอาคารจำลอง Case 4

และให้โปรแกรมทำการคำนวณปริมาณ Solar radiation ที่เป็นรายชั่วโมง ตลอดระยะเวลา 1 ปี หรือ 8,760 ชั่วโมง ดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ 6.1 เมื่อคำนวณค่า Solar radiation ตลอดทั้งปีในรายชั่วโมงได้แล้วนั้น นำผลที่ได้มาคำนวณด้วยสมการเชิงเส้นที่ได้จากการทดลองที่ 2 คือ

- กรณีทดลองที่ 1 Passive airflow window ผิวสัมผัสสีขาว ได้ค่าสมการเชิงเส้นคือ

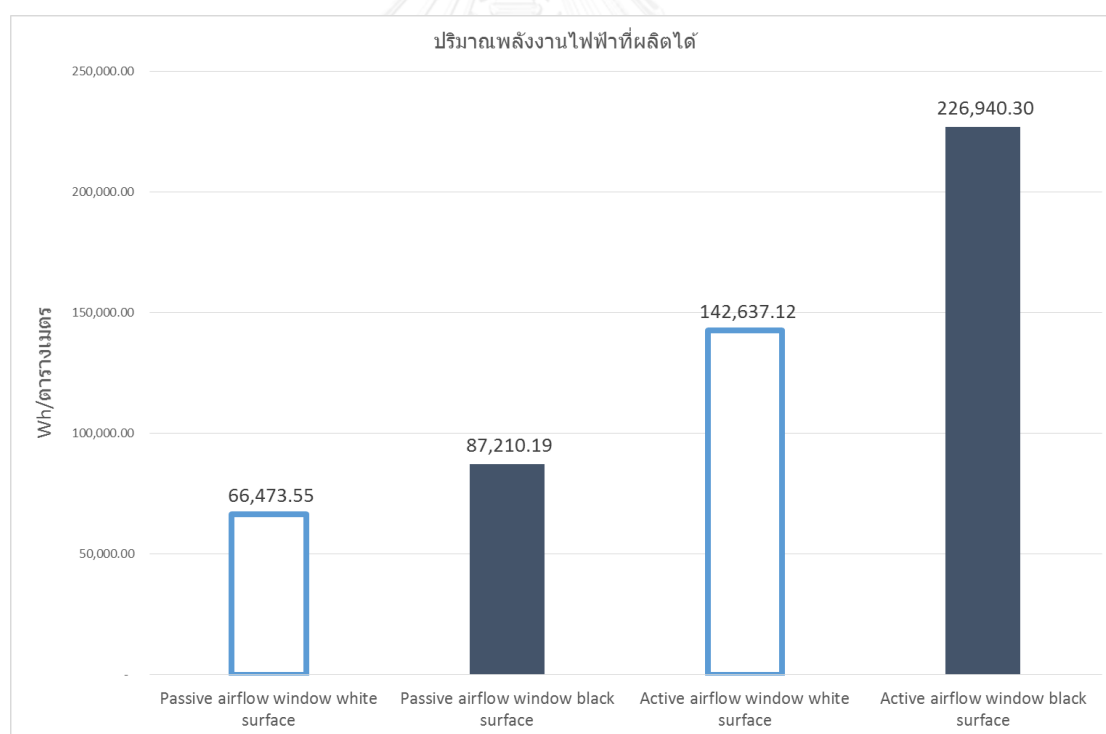
$$y = 5.5799(\Delta t) - 0.0078(\text{solar}) - 5.5496$$
- กรณีทดลองที่ 2 Passive airflow window ผิวสัมผัสสีดำ ได้ค่าสมการเชิงเส้นคือ

$$y = 5.461(\Delta t) + 0.0007(\text{solar}) - 7.6471$$
- กรณีทดลองที่ 3 Active airflow window ผิวสัมผัสสีขาว ได้ค่าสมการเชิงเส้นคือ

$$y = 7.7866(\Delta t) - 0.0007(\text{solar}) - 13.966$$
- กรณีทดลองที่ 4 Active airflow window ผิวสัมผัสสีดำ ได้ค่าสมการเชิงเส้นคือ

$$y = 10.1121(\Delta t) + 0.0101(\text{solar}) - 27.614$$

จากการคำนวณด้วยสมการเชิงเส้นในแต่ละกรณีเพื่อหาปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก ระบบ Thermoelectric Generator ทั้ง 4 กรณีการทดลองได้ผลลัพธ์ดังนี้



แผนภูมิที่ 4.15 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแต่ละกรณีทดลองในเวลา 1 ปี/ตารางเมตร

นำผลที่ได้ มาคำนวณหาพลังงานที่ผลิตได้ในอาคารจำลองโดยการคูณพื้นที่ของระบบ Thermoelectric Generator ที่ทำการติดตั้งลงบนเปลือกอาคารด้านทิศใต้คิดเป็นพื้นที่ 139.5 ตารางเมตร ได้ผลดังตารางที่ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละกรณีในระยะเวลา 1 ปี

CASE	kWh
Passive airflow window white surface	9,273.06
Passive airflow window black surface	12,165.82
Active airflow window white surface	19,897.88
Active airflow window black surface	31,658.17

นำผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปีของแต่ละกรณีการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.3 มาคำนวณกับพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ในอาคารเมื่อเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของกระจก (u) ที่ได้คำนวณไว้ในกรทดลองที่ 2 ตามตารางที่ 4.1 แบ่งตามรูปแบบของระบบได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 การใช้พลังงานของอาคารและผลการผลิตพลังงานของระบบ TEG ในแต่ละกรณี

CASE	u-value (w/ m ² k)	Energy use (kWh)	Energy product (kWh)	Summary Energy (kWh)	save from base case (kWh)	Energy save (%)
Base case	6.172	409,673.	-	-	-	-
Passive airflow window ผิวสัมผัสน้ำสีขาว	5.74	400,271	9,273.06	390,997.94	18,675.06	4.56
Passive airflow window ผิวสัมผัสน้ำสีดำ	5.89	401,782	12,165.82	389,616.18	20,056.82	4.90
Active airflow window ผิวสัมผัสน้ำสีขาว	2.71	377,386 + 6,482.4	19,897.88	363,970.52	45,702.48	11.16
Active airflow window ผิวสัมผัสน้ำสีดำ	2.73	377,432 + 6,482.4	31,658.17	352,256.23	57,416.77	14.02

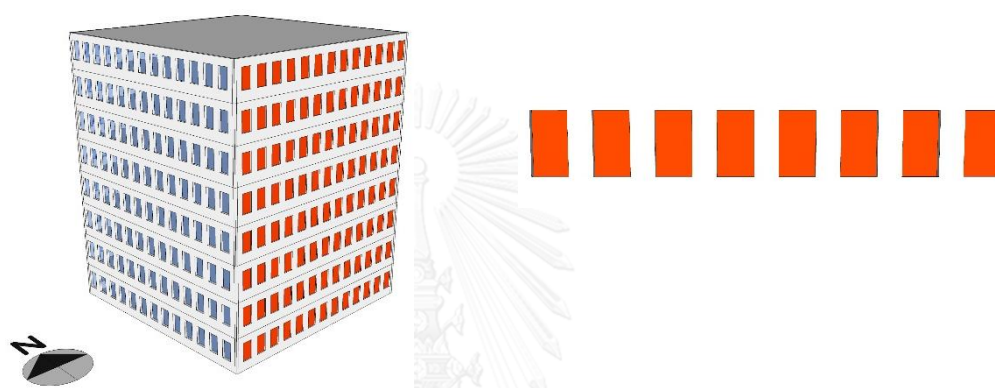
4.3.2 การวิเคราะห์ผลการผลิตไฟฟ้าเมื่อทำการติดตั้งระบบในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งานช่องเปิดอาคาร

ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองรูปแบบการติดตั้งระบบ Thermoelectric Generator ในอาคาร เพื่อศึกษาถึงผลกระทบในการติดตั้งระบบที่ต้องติดตั้งบนผิวช่องเปิดกระจกคือ การบดบังแสง

สว่างและทัศนียภาพที่เข้ามาในอาคาร โดยแบ่งร้อยละของการติดตั้งระบบ Thermoelectric Generator เป็น ติดตั้ง100%, 75%, 50%, 25%

ในแต่ละขนาดของระบบที่ติดตั้งลงในอาคารนั้น มีผลกับปริมาณแสงสว่างที่เข้ามาในอาคาร ยิ่งทำการติดตั้งระบบมากเท่าไร ปริมาณแสงสว่างภายในอาคารด้านทิศใต้ก็จะน้อยลงเท่านั้น ส่งผลให้มีปริมาณค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่างของอาคารสูงขึ้นตามไปด้วย

กรณีที่ 1 ติดตั้งระบบ TEG 100% ปิดบังช่องหน้าต่างทั้งหมดของอาคารทางทิศใต้



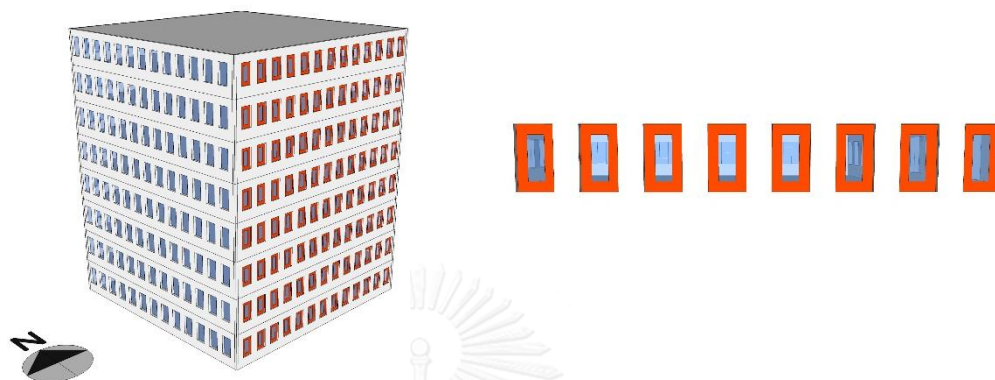
ภาพที่ 4.2 รูปอาคารจำลองเมื่อติดตั้งระบบ TEG 100%

เมื่อทำการติดตั้งระบบ Thermoelectric Generator ลงบนหน้าต่างกระจกของอาคารทางทิศใต้เป็นพื้นที่ 139.5 ตารางเมตรหรือ 100% โดยตั้งค่า Visible light transmittance (Tvis) และสัมประสิทธิ์การบังแดด (sc) ของช่องเปิดที่ 0 ทั้งคู่เพราะระบบปิดช่องเปิดทั้งหมดไม่มีแสงเข้าเสมือนผนังทึบ และจากสมการสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ Thermoelectric Generator ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.6 กรณี 100% ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละกรณีในระยะเวลา 1 ปี

CASE	kWh
Passive airflow window white surface	9,273.06
Passive airflow window black surface	12,165.82
Active airflow window white surface	19,897.88
Active airflow window black surface	31,658.17

กรณีที่ 2 ติดตั้งระบบ TEG 75% ปิดบังช่องหน้าต่าง 3 ใน 4 ส่วนของอาคารทางทิศใต้



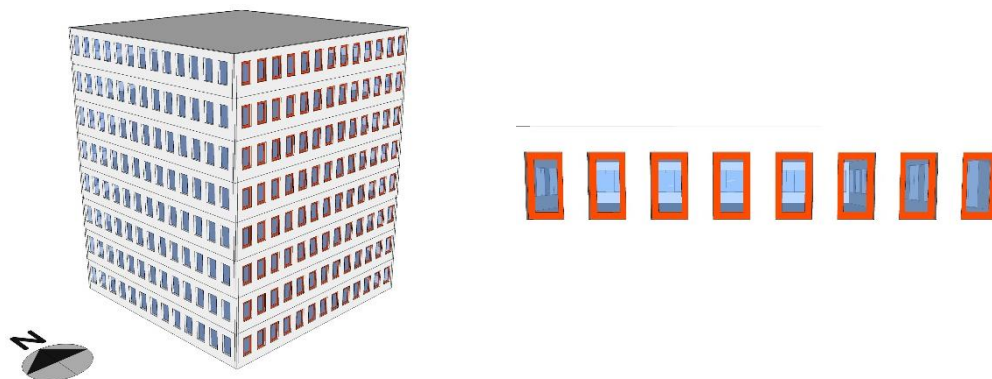
ภาพที่ 4.3 รูปอาคารจำลองเมื่อติดตั้งระบบ TEG 75%

เมื่อทำการติดตั้งระบบ Thermolectric Generator ลงบนหน้าต่างกระจกของอาคารทางทิศใต้เป็นพื้นที่ 104.625 ตารางเมตรหรือ 75% โดยตั้งค่า Visible light transmittance (Tvis) ที่ 0.175 และสัมประสิทธิ์การบังแดด (sc) ของช่องเปิดที่ 0.225 และจากสมการสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ Thermolectric Generator ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.7 กรณี 75% ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละกรณีในระยะเวลา 1 ปี

CASE	kWh
Passive airflow window white surface	6,954.80
Passive airflow window black surface	9,124.36
Active airflow window white surface	14,923.41
Active airflow window black surface	23,743.623

กรณีที่ 3 ติดตั้งระบบ TEG 50% ปิดบังช่องหน้าต่างต่างครึ่งหนึ่งของอาคารทางทิศใต้



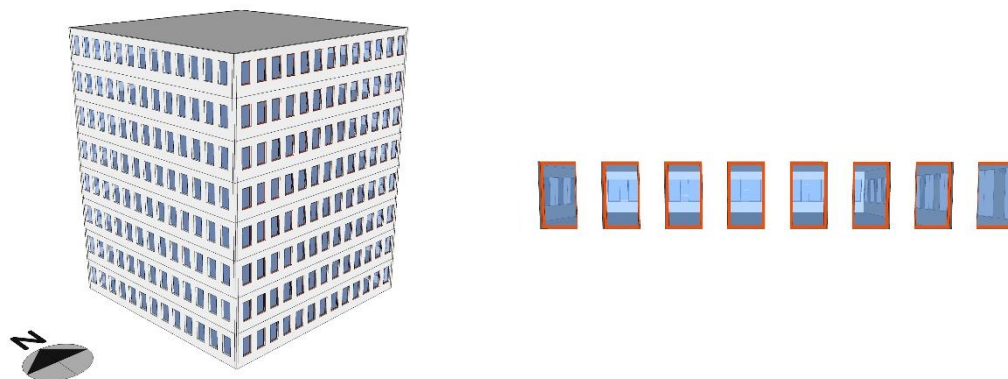
ภาพที่ 4.4 รูปอาคารจำลองเมื่อติดตั้งระบบ TEG 50%

เมื่อทำการติดตั้งระบบ Thermolectric Generator ลงบนหน้าต่างกระจกของอาคารทางทิศใต้เป็นพื้นที่ 69.75 ตารางเมตรหรือ 50% โดยตั้งค่า Visible light transmittance (T_{vis}) ที่ 0.35 และสัมประสิทธิ์การบังแดด (sc) ของช่องเปิดที่ 0.45 และจากสมการสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ Thermolectric Generator ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.8 กรณี 50% ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละกรณีในระยะเวลา 1 ปี

CASE	kWh
Passive airflow window white surface	4,636.53
Passive airflow window black surface	6,082.91
Active airflow window white surface	9,948.94
Active airflow window black surface	15,829.085

กรณีที่ 4 ติดตั้งระบบ TEG 25% ปิดบังช่องหน้าต่างต่าง 1 ใน 4 ส่วนของอาคารทางทิศใต้



ภาพที่ 4.5 รูปอาคารจำลองเมื่อติดตั้งระบบ TEG 25%

เมื่อทำการติดตั้งระบบ Thermolectric Generator ลงบนหน้าต่างกระจกของอาคารทางทิศใต้เป็นพื้นที่ 34.875 ตารางเมตรหรือ 25% โดยตั้งค่า Visible light transmittance (Tvis) ที่ 0.525 และสัมประสิทธิ์การบังแดด (sc) ของช่องเปิดที่ 0.675 และจากสมการสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ Thermolectric Generator ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.9 กรณี 25% ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละกรณีในระยะเวลา 1 ปี

CASE	kWh
Passive airflow window white surface	2,318.26
Passive airflow window black surface	3,041.45
Active airflow window white surface	4,974.47
Active airflow window black surface	7,914.54

จากนั้นนำผลที่ได้มาตั้งค่าลงในโปรแกรม Visual DOE 4.1 เพื่อหาผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยรวมของอาคารและค่าการผลิตพลังงานงานไฟฟ้าของระบบในแต่ละกรณี สรุปได้ดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 ประสิทธิภาพของ Thermolectric Generator เมื่อติดตั้งในสัดส่วนต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพของ Passive airflow window Thermoelectric Generator

	BASE CASE (u=6.172)	CASE 1 : Passive airflow window white surface (u=5.74)				CASE 2 : Passive airflow window black surface (u=5.89)			
ร้อยละการติดตั้ง	0	100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
sc	0.9	0	0.225	0.45	0.675	0	0.225	0.45	0.675
Tvis	0.7	0	0.175	0.35	0.525	0	0.175	0.35	0.525
Energy use (Wh)	409,673	400,271	402,507	404,338	408,272	401,782	404,259	406,368	408,680
Energy product (Wh)	-	9,273	6,954	4,636	2,318	12,165	9,124	6,082	3,041
Energy Saving (Wh)	-	18,675	14,120	9,971	3,719	20,056	14,538	9,387	4,034
Saving %	-	4.56%	3.45%	2.43%	0.91%	4.90%	3.55%	2.29%	0.98%

ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพของ Active airflow window Thermoelectric Generator

	BASE CASE (u=6.172)	CASE 3 : Active airflow window white surface (u=5.74)				CASE 4 : Active airflow window black surface (u=5.89)			
ร้อยละการติดตั้ง	0	100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
sc	0.9	0	0.225	0.45	0.675	0	0.225	0.45	0.675
Tvis	0.7	0	0.175	0.35	0.525	0	0.175	0.35	0.525
Energy use (Wh)	409,673	383,868	394,977	396,772	399,677	383,914	390,015	396,811	400,225
Energy product (Wh)	-	19,897	14,923	9,948	4,974	31,658	23,743	15,829	7,914
Energy Saving (Wh)	-	45,702	296,199	22,849	14,970	57,416	43,401	28,690	17,362
Saving %	-	11.16%	7.23%	5.58%	3.65%	12.55%	10.60%	7.00%	4.24%

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สรุปผลการทดลองที่ 1 ทดสอบความเป็นไปได้ของระบบกับเปลือกอาคาร

การทำการทดลองที่ 1 พบว่า ค่าความต่างของอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสทั้ง 2 ฝั่งของอุปกรณ์ Thermolectric ที่ติดตั้งบนผนังที่บั้นมีค่าน้อยมากต่างจากค่าความต่างของอุณหภูมิของตัวอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนผนังกระจกที่มีค่าความต่างของอุณหภูมิสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด เมื่อนำค่าความต่างของอุณหภูมิที่ได้มาพิจารณากับค่า Seebeck coefficients ของอุปกรณ์รุ่น TEC1-12706 ที่มีสารกึ่งตัวนำด้านในเป็น Bismuth Tin (BiSn) พบว่าอุปกรณ์รุ่นนี้จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เมื่อมีความต่างของอุณหภูมิมากกว่า 2 องศาเซลเซียสขึ้นไป ดังนั้นในการทำการวิจัยนี้สรุปได้ว่า

- ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ Thermolectric Generator นั้นจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อวัสดุที่ติดตั้งมีการนำความร้อน (k) และมีค่าการเป็นฉนวนความร้อนที่ต่ำ (r)
- เปลือกอาคารกระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร มีความสามารถในการเพิ่มค่าความต่างของอุณหภูมิตั้งแต่อากาศกับอากาศภายในอาคารได้ดีกว่าผนังที่หนา ทั้งในแง่ของอุณหภูมิสูงสุดที่เปลือกอาคารและ ระยะเวลาที่ระบบ Thermolectric Generator สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้

จากผลสรุปของการทดลองที่ 1 นี้ ในการทำการวิจัยต่อการทดลองที่ 2 และ 3 ทางผู้วิจัย จะทำการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ Thermolectric Generator เฉพาะที่ติดตั้งบนผิวกระจกเท่านั้น เพื่อเป็นการประหยัดเวลาการวิจัย และผิวกระจกยังให้ผลความแตกต่างด้านประสิทธิภาพที่จะทำการทดลองต่อไปได้ชัดเจนกว่าการเพิ่มประสิทธิภาพระบบที่ติดตั้งบนผนัง

5.1.2 สรุปผลการทดลองกับระบบ Airflow window

จากผลการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ Thermolectric Generator ทั้งจากการวัดอุณหภูมิและค่าพลังงานที่ได้จากวัตต์มิเตอร์ตามตารางที่ 4.1 สามารถสรุปได้ว่า

- ระบบ Thermolectric Generator ที่มีการทาสีดำบริเวณด้านที่สัมผัสความร้อน จะมีอุณหภูมิสูงกว่าไม่มีการทาสีประมาณ 2 องศาเซลเซียส

- การเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อนของระบบหรือการใช้ระบบ Airflow window ทั้งรูปแบบ Passive และ Active สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนออกจากระบบ Thermoelectric Generator ได้ โดยระบบ Active airflow ให้ผลดีกว่าระบบ Passive airflow ประมาณ 3 องศาเซลเซียส
- ระบบที่มีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดลองทั้ง 2 วัน คือระบบ Active airflow window แบบทาสีดำ โดยผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมได้ที่ $1,052.75 \text{ W/m}^2$ รองลงมาคือระบบ Active airflow window แบบสีขาว ผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมได้ 520.02 W/m^2 รองลงมาคือระบบ Passive airflow window แบบทาสีดำ ผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมได้ 339.89 W/m^2 และสุดท้ายคือระบบ Passive airflow window แบบสีขาว ผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมได้ 236.51 W/m^2
- ระบบในแต่ละกรณีมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน โดยระบบ Active airflow window จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าระบบ Passive airflow window เนื่องจากการระบายอากาศแบบอาศัยเครื่องกลช่วยสามารถดึงความร้อนออกจากระบบได้ดีกว่าวิธีธรรมชาติ ส่วนระบบที่มีการทาสีดำที่ผิวสัมผัสจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่าแบบผิวสัมผัสสีขาวเนื่องจากผิวสัมผัสที่มีสีเข้มทำให้ระบบดูดซับความร้อนได้ดีกว่าผิวสีอ่อน
- ระบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดคือ Active airflow window แบบสีขาว โดยมีค่าสัมประสิทธิ์อยู่ที่ $2.73 \text{ w/m}^2\text{k}$ รองลงมาคือ Active airflow window แบบสีดำ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์อยู่ที่ $2.71 \text{ w/m}^2\text{k}$ รองลงมาคือ Passive airflow window แบบสีขาว โดยมีค่าสัมประสิทธิ์อยู่ที่ $5.89 \text{ w/m}^2\text{k}$ และสุดท้ายคือ Passive airflow window แบบสีดำ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์อยู่ที่ $5.74 \text{ w/m}^2\text{k}$

โดยสรุปแล้ว ระบบ Thermoelectric Generator แบบ Active airflow window แบบทาสีดำมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุด และมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าระบบ Active airflow window แบบสีขาวอยู่ 2 เท่า ดีกว่าระบบ Passive airflow window แบบทาสีดำ อยู่ 3 เท่า และดีกว่าระบบ Passive airflow window แบบสีขาวอยู่ประมาณ 4 เท่าตัว แต่ในแง่ความเป็นฉนวนกันความร้อน ระบบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดคือ Active airflow window แบบสีขาว รองลงมาคือ Active airflow window แบบสีดำ รองลงมาคือ Passive airflow window แบบสีขาวและสุดท้ายคือระบบ Passive airflow window แบบสีดำ

5.1.3 สรุปผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

5.1.3.1 สรุปผลการจำลองผลการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้รวมในแต่ละปี

จากการพิจารณาปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ได้ของทั้ง 4 ระบบที่ทำการทดลองในอาคารที่ทำการจำลองจากโปรแกรม Visual DOE 4.1 สรุปได้ว่าระบบที่มีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดคือระบบ Active airflow window แบบทาสีดำที่ผิวด้านที่สัมผัสความร้อนโดยผลิตได้ 31,658.17 kWh ต่อปีหรือคิดเป็น 5.9% ของพลังงานไฟฟ้าที่อาคารใช้ รองลงมาคือระบบ Active airflow window แบบผิวสัมผัสความร้อนเป็นสีขาวโดยผลิตได้ 19,897.88 kWh ต่อปีหรือคิดเป็น 3.71% ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอาคาร ต่อมาเป็นระบบ Passive airflow window แบบทาสีดำที่ผิวด้านที่สัมผัสความร้อนโดยผลิตได้ 12,165.82 kWh ต่อปีหรือคิดเป็น 2.27% ของพลังงานไฟฟ้าที่อาคารใช้ และสุดท้ายคือ Passive airflow window แบบผิวสัมผัสความร้อนเป็นสีขาวโดยผลิตได้ 9,273.06 kWh ต่อปีหรือคิดเป็น 1.73% ของพลังงานไฟฟ้าที่อาคารใช้ จะเห็นได้ว่า ระบบ Active airflow window โดยรวมแล้วมีความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่าระบบ Passive airflow window อยู่เกือบเท่าตัว

5.1.3.2 สรุปผลการจำลองผลการผลิตไฟฟ้าเมื่อทำการติดตั้งระบบในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งานของเปิดอาคาร

จากการทดลองติดตั้งระบบในอัตราส่วนที่แตกต่างกันในอาคารคือ 100% ติดช่องเปิดที่ทั้งหมด 75% ติดช่องเปิดที่ 3 ใน 4 ส่วน 50% ติดช่องเปิดที่ครึ่งหนึ่งของทั้งหมดและ 25% ติดช่องเปิดที่ 1 ใน 4 ส่วนของช่องเปิดทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับอาคารจำลองที่ไม่ได้ทำการติดตั้งระบบ Thermoelectric Generator จากระบบ airflow แต่อย่างไรก็ตาม ซึ่งในแต่ละสัดส่วนของการติดตั้งระบบจะส่งผลถึงแสงสว่างที่เข้ามาภายในอาคารที่แตกต่างกัน จากการทดลองที่ 3 สามารถสรุปได้ดังนี้

- กรณีทดลองที่ 1 Passive airflow window แบบสีขาวเมื่อทำการติดตั้งแบบ 100%, 75%, 50%, 25% พบว่าระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าเมื่อเทียบจากอาคาร base case ที่ไม่ได้ทำการติดตั้งระบบ Thermoelectric Generator อยู่ที่ 4.56%, 3.45%, 2.43%, 0.91% ตามลำดับ
- กรณีทดลองที่ 2 Passive airflow window แบบสีดำเมื่อทำการติดตั้งแบบ 100%, 75%, 50%, 25% พบว่าระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าเมื่อเทียบจากอาคาร base case ที่ไม่ได้ทำการติดตั้งระบบ Thermoelectric Generator อยู่ที่ 4.9%, 3.55%, 2.29%, 0.98% ตามลำดับ
- กรณีทดลองที่ 3 Active airflow window แบบสีขาวเมื่อทำการติดตั้งแบบ 100%, 75%, 50%, 25% พบว่าระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าเมื่อเทียบจากอาคาร

base case ที่ไม่ได้ทำการติดตั้งระบบ Thermolectric Generator อยู่ที่ 11.16%, 7.23%, 5.58%, 3.65% ตามลำดับ

- กรณีทดลองที่ 4 Active airflow window แบบสี่ด้านเมื่อทำการติดตั้งแบบ 100%, 75%, 50%, 25% พบว่าระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าเมื่อเทียบจากอาคาร base case ที่ไม่ได้ทำการติดตั้งระบบ Thermolectric Generator อยู่ที่ 12.55%, 10.60%, 7.00%, 4.24% ตามลำดับ

จากผลการทดลองที่ 3 ทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า สัดส่วนการติดตั้งระบบ Thermolectric Generator นั้น ควรติดตั้งแบบเต็มช่องเปิด 100% จะได้ประสิทธิภาพสูงสุด โคนอาจจะเลือกติดตั้งในส่วนของเปลือกอาคารกระจกที่ไม่อยู่ในพื้นที่ใช้งานหลัก หรืออยู่ในพื้นที่ที่ไม่ต้องการแสงสว่างมาก หรือเลือกติดตั้งระบบบริเวณช่องเปิดอาคารที่สามารถเปิดปิดได้ เช่น ปิดทึบหนึ่แดดในช่วงเวลากลางวัน และปิดรับทัศนียภาพในเวลากลางคืน เป็นต้น

จากการทำวิจัยและทดลองทั้งหมดที่ทำมานั้น สรุปได้ว่า ระบบ Thermolectric Generator มีความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในอาคารและนำมาใช้งานได้ และสามารถนำมาต่อยอดไปสู่การเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่มีความสามารถใกล้เคียงกับระบบอื่นๆ อย่างเช่น Solar cell, Wind turbine ตัวระบบ Thermolectric Generator เองก็ไม่มี ความซับซ้อนในการใช้งานและมีความทนทานสูง แต่ทั้งนี้ ราคาต้นทุนของระบบ Thermolectric Generator ยังมีราคาแพงอยู่มากเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ ที่กล่าวมา

5.2 ข้อเสนอแนะ

- เนื่องจากข้อจำกัดทางเวลา การตั้งกล่องทดลองจึงทำได้ในช่วงเวลาสั้นๆ ไม่ครอบคลุมทุกสภาพอากาศและฤดูกาล ในการทดลองต่อไปควรตั้งกล่องทดลองให้ยาวนานขึ้นเพื่อศึกษาค่า Solar radiation ที่ระบบ Thermolectric Generator ได้รับในช่วงอื่นๆ ของปีด้วย
- การเพิ่มการระบายอากาศในส่วนของระบบ Active airflow ทำโดยการติดตั้งพัดลมระบายอากาศเท่านั้น แต่ความเป็นจริงแล้วยังมีวิธีเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายอากาศแบบอื่นๆ อยู่อีก เช่น การเพิ่มขนาดช่องเปิด, ความยาวของปล่องลม หรือการออกแบบปล่องลมให้มี Stack Effect Ventilation สูงขึ้น
- ยังคงต้องศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเปลือกอาคารชนิดอื่น ๆ นอกจากกระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร และผนังก่ออิฐฉาบปูน เพื่อหาความเป็นไปได้และความหลากหลายของระบบต่อไป

- การศึกษามีข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริก เนื่องจากมีราคาสูง และจำนวนที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้มีน้อย ต้องอาศัยการคำนวณพื้นที่เพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการแทน การทดลองครั้งต่อไปควรใช้อุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีปริมาณมากพอ รวมถึงการหาอุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพมากกว่ารุ่น TEC1-12706 ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้



รายการอ้างอิง

1. M. Hamid Elsheikh, D.A.S., *A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance*. 2014, Malaysia: Department of Mechanical Engineering, University of Malaya.
2. Ritesh A. Khire, A.M., S. Van Dessel, *Design of thermoelectric heat pump unit for active building envelope system*. 2005, Troy: Department of Mechanical and Aerospace Engineering.
3. C. Hadjistassou, E.K., J. Georgiou, *Designing high efficiency segmented thermoelectric generator*. 2012, Cyprus: University of Cyprus.
4. S.A. Omer, D.G.I., *Design optimization of thermoelectric devices for solar power generation* *Design optimization of thermoelectric devices for solar power generation*, ed. S.E.M.S. Cells. 1998.
5. C. Suter, P.T., A. Weidenkaff, A. Stenfeld, *Heat transfer and Geometric Analysis of Thermoelectric Converters*. 2010.
6. John, T.S., *High Efficient Seebeck Thermoelectric Device for Power System Design and Efficiency Calculation*. A Review of Potential Household Appliances. 2014: International Journal of Computer Applications.
7. Xiao J, Y.T., Li P, Zhai P, Zhang Q, *Thermal design and management for performance optimization of solar thermoelectric generator*. 2012: Appl Energy.
8. He W, S.Y., Wang YQ, Riffat SB, Ji J, *A study on incorporation of thermoelectric modules with evacuated-tube heat-pipe solar collectors*. 2012, Renew Energy.
9. Kraemer D, M.E.K., Chiesa M, Chen G, *Modeling and optimization of solar thermoelectric generator for terrestrial applications*. 2012, Solar Energy



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

គេហទំព័រព្រឹត្តិបត្រ

ថ្ងៃ/ខែ/ឆ្នាំ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31					
1:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
2:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
3:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
4:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
5:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
6:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
7:00 AM	22.1	50.4	59.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
8:00 AM	37.8	179.7	163.9	110.3	194.5	214.4	271.1	230.1	277.4	41	126.1	107.2	59.9	148.2	141.9	170.2	269	151.3	148.2	170.2	220.7	249	435	255.4	413	372	507.5	327.9	375.1	457.1	431.9	488.6	327.9	32.2		
9:00 AM	88.3	343.6	466.6	239.6	356.2	327.9	551.7	488.6	454	160.8	394.1	211.2	170.2	359.4	324.7	290	214.4	324.7	227	365.7	249	435	255.4	413	372	507.5	327.9	375.1	457.1	431.9	488.6	327.9	32.2			
10:00 AM	220.7	646.3	665.2	617.9	725.1	658.9	731.4	636.8	781.8	375.1	816.5	580.1	394.1	750.3	192.3	781.8	176.5	523.3	274.3	668.3	296.3	712.5	454	636.8	737.7	621	520.2	375.1	517	810.2	517	810.2	517	810.2		
11:00 AM	349.9	602.1	466.6	680.9	602.1	1018	709.3	646.3	797.6	535.9	832.3	961.5	321.6	983.6	882.7	829.1	318.4	1006	583.2	731.4	418.4	1006	583.2	731.4	418.4	1006	583.2	731.4	418.4	1006	583.2	731.4	418.4	1006		
12:00 PM	375.1	564.3	794.4	208.1	400.4	1025	816.5	580.1	930	652.6	119.8	1053	239.6	775.5	671.5	479.2	409.8	1009	794.4	630.5	611.6	1012	854.3	558	778.7	558	778.7	558	778.7	558	778.7	558	778.7			
1:00 PM	148.2	50.4	523.3	513.9	261.7	813.3	712.5	526.5	961.5	680.9	211.2	362.5	318.4	728.2	602.1	498.1	529.6	895.3	1062	561.1	397.2	747.1	863.8	592.7	551.7	740.8	816.5	838.6	775.5	617.9	617.9	617.9	617.9			
2:00 PM	113.5	94.6	116.6	907.9	126.1	819.6	857.5	838.6	709.3	327.9	983.6	611.6	220.7	731.4	794.4	800.7	104	431.9	419.3	347	315.2	464	857.5	737.7	501.2	308.9	583.2	633.6	413	274.3	274.3	274.3	274.3			
3:00 PM	104	78.8	286.9	750.3	614.7	800.7	662	526.5	841.7	327.9	983.6	611.6	220.7	731.4	794.4	800.7	104	431.9	419.3	347	315.2	464	857.5	737.7	501.2	308.9	583.2	633.6	413	274.3	274.3	274.3	274.3			
4:00 PM	179.7	72.5	126.1	573.8	605.3	687.2	480.8	696.7	491.8	236.4	375.1	163.9	274.3	586.4	759.7	665.2	189.1	602.1	63	100.9	211.2	346.8	277.4	671.5	431.9	400.4	457.1	482.3	356.2	305.8	649.4	649.4	649.4			
5:00 PM	135.6	100.9	56.7	349.9	91.4	507.5	312.1	454	359.4	141.9	107.2	182.8	286.9	359.4	520.2	425.6	176.5	447.7	41	151.3	230.1	189.1	85.1	381.5	255.4	208.1	233.3	390.9	264.8	286	406.7	406.7	406.7			
6:00 PM	78.8	56.7	22.1	198.6	82	145	37.8	176.5	182.8	94.6	85.1	138.7	88.3	192.3	236.4	182.8	97.7	154.5	28.4	63	148.2	100.9	63	158	44.1	18.9	6.3	22.1	88.3	88.3	88.3	88.3	88.3			
7:00 PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
8:00 PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9:00 PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10:00 PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11:00 PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

គេហទំព័រព្រឹត្តិបត្រ

ថ្ងៃ/ខែ/ឆ្នាំ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31					
1:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00 AM	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	
7:00 AM	100.9	82	107.2	73.7	47.3	122.9	66.2	53.6	85.1	59.9	66.2	75.7	88.3	69.4	63	69.4	37.8	44.1	44.1	44.1	44.1	82	41	82	37.8	66.2	47.3	50.4	34.7	47.3	78.8	78.8	78.8	78.8		
8:00 AM	346.8	249	318.4	186	220.7	223.8	283.7	179.7	173.4	145	230.1	189.1	299.5	189.1	249	353.1	126.1	104	145	145	312.1	145	337.3	236.4	242.7	151.3	132.4	327.9	72.5	286.9	305.8	305.8	305.8	305.8		
9:00 AM	592.7	409.8	450.8	368.8	435	340.5	242.7	186	327.9	315.2	419.3	293.2	476	397.2	422.4	586.4	343.6	293.2	337.3	349.9	368.8	592.7	469.7	400.4	268	545.4	126.1	510.7	561.1	542.2	510.7	759.7	759.7	759.7		
10:00 AM	800.7	662	740.8	643.1	469.7	447.7	296.3	646.3	699.9	337.3	431.9	775.5	523.3	636.8	788.1	394.1	602.1	457.1	699.9	384.6	674.6	570.6	507.5	504.4	507.5	504.4	507.5	504.4	507.5	504.4	507.5	504.4	507.5	504.4		
11:00 AM	974.1	737.7	545.4	548.5	617.9	570.3	280.6	630.5	542.2	794.4	469.7	721.9	665.2	879.5	583.2	756.6	302.6	813.3	728.2	740.8	425.6	810.2	747.1	529.6	365.7	860.6	769.2	885.8	573.8	933.1	933.1	933.1	933.1	933.1		
12:00 PM	971	510.7	454	507.5	397.2	1047	712.5	624.2	734.5	561.1	592.7	781.8	718.8	945.7	781.8	715.6	334.2	668.3	561.1	397.2	747.1	863.8	592.7	551.7	740.8	816.5	838.6	775.5	570.6	907.9	907.9	907.9	907.9	907.9		
1:00 PM	416.1	980.4	523.3	807	399	889	662	422.4	498.1	368.8	576.9	882.7	457.1	766.1	520.2	684.1	507.5	674.6	419.3	602.1	772.4	857.5	857.5	810.2	762.9	706.2	1012	699.9	1157	1024.6	1024.6	1024.6	1024.6	1024.6		
2:00 PM	204.9	756.6	523.3	479.2	740.8	819.6	457.1	435	331	167.1	476	819.6	397.2	892.2	167.1	800.7	409.8	680.9	469.7	413	709.3	942.6	592.7	693.5	1034	280.6	305.8	599	1008.8	1008.8	1008.8	1008.8	1008.8	1008.8		
3:00 PM	362.5	469.7	810.2	476	693.5	649.4	517	356.2	435	129.3	340.5	775.5	633.6	718.8	138.7	535.9	302.6	457.1	349.9	394.6	807	703	372	633.6	892.2	264.8	34.7	901.6	901.6	901.6	901.6	901.6	901.6	901.6		
4:00 PM	570.6	450.8	558	242.7	561.1	454	277.4	293.2	378.3	148.2	346.8	655.7	611.6	677.8	204.9	419.3	318.4	264.8	454	586.4	271.1	586.4	668.3	290	611.6	526.5	173.4	34.7	488.6	488.6	488.6	488.6	488.6	488.6		
5:00 PM	368.8	337.3	258.5	22.1	375.1	230.1	163.9	138.7	126.1	141.9	204.9	356.2	343.6	435	242.7	463.4	160.8																			

เดือนกรกฎาคม

เวลา/วันที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
1:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6:00 AM	59.9	69.4	47.3	44.1	50.4	41	69.4	63	41	69.4	56.7	56.7	56.7	47.3	34.7	44.1	69.4	18.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18.9	
7:00 AM	315.2	306.8	220.7	179.7	245.9	138.7	290	182.8	296.3	239.6	239.6	154.5	167.1	268	211.2	239.6	239.6	132.4	249	239.6	274.3	280.6	126.1	119.8	63	78.8	141.9	179.7	179.7	85.1	179.7		
8:00 AM	491.8	546.5	406.7	394.1	460.3	286.9	539.6	510.7	504.4	487.1	472.9	472.9	353.1	261.7	387.8	346.8	372	542.2	501.2	381.5	523.3	444.5	361.7	271.1	208.1	239.6	277.4	368.8	349.9	204.9	451.9		
9:00 AM	756.6	706.2	677.8	485.5	523.3	435	737.7	731.4	507.5	617.9	570.6	570.6	450.8	365.7	457.1	649.4	646.3	892.2	794.5	976.9	602	630.5	694.1	441.3	428.7	331	491.8	586.4	379.4	800.7	712.5		
10:00 AM	935.1	893.5	833.4	520.2	617.9	554.8	829.1	866.9	863.8	800.7	633.6	633.6	505.8	636.8	740.8	704.2	695.3	892.2	898.5	863.8	602	630.5	694.1	441.3	428.7	331	491.8	586.4	379.4	800.7	712.5		
11:00 AM	1040	1090	901.6	693.5	627.3	665.2	788.1	980.4	857.5	1035	794.4	406.7	879.5	649.4	614.7	1003	1100	983.6	810.2	1081	844.9	709.3	873.2	694.1	595.8	546.6	494.9	677.8	532.8	491.8	800.7		
12:00 PM	1040	1090	901.6	693.5	627.3	665.2	788.1	980.4	857.5	1035	794.4	406.7	879.5	649.4	614.7	1003	1100	983.6	810.2	1081	844.9	709.3	873.2	694.1	595.8	546.6	494.9	677.8	532.8	491.8	800.7		
1:00 PM	772.4	907.9	901.6	933.1	627.3	665.2	788.1	980.4	857.5	1035	794.4	406.7	879.5	649.4	614.7	1003	1100	983.6	810.2	1081	844.9	709.3	873.2	694.1	595.8	546.6	494.9	677.8	532.8	491.8	800.7		
2:00 PM	567.4	1059	860.6	1012	759.7	592.7	948.9	948.9	948.9	1034	797.6	851.2	851.2	851.2	851.2	851.2	1015	1040	1062	870.1	668.3	548.5	952	501.2	286.9	674.6	649.4	712.5	167.1	151.3	513.9		
3:00 PM	274.3	898.5	800.7	570.6	526.5	491.8	880.6	781.8	731.4	561.1	766.1	561.1	154.5	198.6	737.7	928.8	857.5	911.1	712.5	835.4	838.6	904.8	403.5	709.3	488.6	658.9	627.3	327.9	151.3	822.8			
4:00 PM	520.2	649.4	624.2	472.9	416.1	662	655.7	693.5	337.3	526.5	526.5	463.4	334.2	268	630.5	750.3	725.1	580.1	573.8	747.1	507.5	539.1	315.2	217.5	431.9	696.7	649.4	258.5	91.4	66.2	78.8		
5:00 PM	494.9	280.6	438.2	119.8	324.7	308.9	488.6	482.3	365.7	220.7	217.5	217.5	413	482.3	138.7	460.3	529.6	268	154.5	488.6	517	526.5	413	198.6	135.6	201.8	491.8	466.6	230.1	82	78.8		
6:00 PM	160.8	167.1	261.7	37.8	91.4	220.7	227	274.3	44.1	107.2	31.5	31.5	236.4	201.8	69.4	182.8	227	271.1	100.9	230.1	220.7	69.4	176.5	78.8	56.7	126.1	179.7	59.9	53.6	37.8	59.9		
7:00 PM	34.7	28.4	97.7	9.5	9.5	34.7	34.7	50.4	25.2	53.6	25.2	25.2	44.1	9.5	59.9	9.5	41	28.4	37.8	41	22.1	47.3	12.6	15.8	15.8	28.4	9.5	9.5	12.6	15.8	15.8		
8:00 PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9:00 PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10:00 PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11:00 PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

เดือนสิงหาคม

เวลา/วันที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
1:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00 AM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7:00 AM	22.1	12.6	18.9	31.5	25.2	18.9	25.2	25.2	47.3	25.2	18.9	22.1	25.2	31.5	63	59.9	34.7	34.7	12.6	53.6	28.4	41	6.3	31.5	59.9	18.9	18.9	18.9	15.8	53.6	15.8	53.6	
8:00 AM	91.4	97.7	88.3	186	72.5	88.3	122.9	148.2	264.8	148.2	78.8	104	138.7	223.8	283.7	271.1	242.7	135.6	182.8	97.7	233.3	220.7	154.5	104	192.3	236.4	116.6	119.8	122.9	129.3	324.7		
9:00 AM	353.1	252.2	274.3	264.8	312.1	132.4	321.6	460.3	507.5	340.5	186	186	315.2	535.9	668.3	570.6	504.4	558	476	223.8	447.7	182.8	308.9	249	283.7	419.3	283.7	390.9	327.9	413	504.4		
10:00 AM	570.6	290	422.4	504.4	576.9	63	636.8	665.2	703	463.4	334.2	305.8	788.2	690.4	545.4	759.7	693.5	804	690.4	365.7	551.7	331	365.7	226.4	567.4	668.3	526.5	517	502.2	662	662		
11:00 AM	599	346.8	889	699.9	621	63	889	734.5	662	762.9	457.1	504.4	693.5	860.6	838.6	945.7	895.3	807	942.6	431.9	781.8	810.2	441.3	517	384.6	756.6	699.9	731.4	614.7	605.3	791.3		
12:00 PM	425.6	507.5	791.3	558	785	91.4	721.9	911.1	699.9	1056	800.7	564.3	914.2	699.9	1012	873.2	857.5	1050	829.1	561.1	898.5	974.1	822.8	983.6	520.2	813.3	78.2	593.2	532.8	819.6	627.3		
1:00 PM	611.6	394.1	1021	372	665.2	145	876.4	1003	848	1072	611.6	737.7	841.7	785	1144	1066	807	1025	945.7	413	800.7	944.9	617.9	926.8	666.3	731.4	78.2	523.3	583.2	425.6	627.3		
2:00 PM	299.5	447.7	428.7	274.3	321.6	233.3	480.8	747.1	829.1	491.8	293.2	186	668.3	699.9	422.4	854.3	223.8	866.9	627.3	353.1	769.2	819.6	230.1	476	220.7	740.8	551.7	368.8	709.3	674.6	387.8		
3:00 PM	510.7	343.6	198.6	268	255.4	356.2	211.2	602.1	690.4	460.3	340.5	167.1	570.6	671.5	258.5	318.4	375.1	693.5	633.6	365.7	529.6	674.6	652.6	302.6	387.8	400.4	176.5	327.9	321.6	558	409.8		
4:00 PM	160.8	167.1	261.7	37.8	91.4	220.7	227	274.3	44.1	107.2	31.5	31.5	236.4	201.8	69.4	182.8	227	271.1	100.9	230.1	220.7	69.4	176.5	78.8	56.7	126.1	179.7	59.9	53.6	37.8	59.9		
5:00 PM	160.8	167.1	261.7	37.8	91.4	220.7	227	274.3	44.1	107.2	31.5	31.5	236.4	201.8	69.4	182.8	227	271.1	100.9	230.1	220.7	69.4	176.5	78.8	56.7	126.1	179.7	59.9	53.6	37.8	59.9		
6:00 PM	160.8	167.1	261.7	37.8	91.4	220.7	227	274.3	44.1	107.2	31.5	31.5	236.4	201.8	69.4	182.8	227	271.1	100.9	230.1	220.7	69.4	176.5	78.8	56.7	126.1	179.7	59.9	53.6	37.8	59.9		
7:00 PM	34.7	28.4	97.7	9.5	9.5	34.7	34.7	50.4	25.2	53.6	25.2	25.2	44.1	9.5	59.9	9.5	41	28.4	37.8	41	22.1	47.3	12.6	15.8	15.8	28.4	9.5	9.5					

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย พรหมพิทักษ์ อัสรางชัย เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษา
ชั้นมัธยมจากโรงเรียนอัสสัมชัญ สมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาชั้นปริญญาตรี สถาปัตยกรรม
ศาสตร์บัณฑิต คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2557 และเข้า
ศึกษาต่อในหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในสาขา
เทคโนโลยีสถาปัตยกรรมและสิ่งแวดล้อม ในปีการศึกษา 2557

