

การปรับปรุงอาคารตามเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน
ของประเทศไทยโดยคำนึงถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

RENOVATION OF BUILDINGS ACCORDING TO THAILAND BUILDING ENERGY
CODE (BEC) WITH REGARD TO THE ASPECTS OF ECONOMY AND ENERGY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-D-018-147

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RENOVATION OF BUILDINGS ACCORDING TO THAILAND BUILDING ENERGY
CODE (BEC) WITH REGARD TO THE ASPECTS OF ECONOMY AND ENERGY



SURAKIT THONGSUK

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023
KMITL-2023-EN-D-018-147

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงอาคารตามเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานของประเทศไทยโดยคำนึงถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
นักศึกษา	นายสุรกิจ ทองสุข
รหัสประจำตัว	61601183
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

บทคัดย่อ

การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดการใช้พลังงานของอาคารเป็นหนึ่งในวัตถุประสงค์สำคัญในการแก้ไขวิกฤตพลังงานอันเนื่องมาจากอัตราการขยายตัวของเมืองและจำนวนอาคารที่เพิ่มมากขึ้นในเขตเมือง การศึกษานี้เป็นการประเมินความเป็นไปได้ในการปรับปรุงอาคาร โดยคำนึงถึงด้านเศรษฐกิจและพลังงานของอาคารวิชาการที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย โดยเลือกให้เป็นกรณีศึกษา ปรับปรุงระบบต่าง ๆ ได้แก่ กรอบอาคาร ระบบไฟส่องสว่าง เครื่องปรับอากาศ ระบบไฟฟ้า และการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะทำการปรับปรุงและจัดการด้านการใช้พลังงานของอาคารเพื่อให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานการใช้พลังงานในอาคารของประเทศไทยเป็นมาตรฐานในการประเมินและใช้โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร (BEC) ในการคำนวณ ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุงใหม่ การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนและระยะเวลาคืนทุนที่รวดเร็วขึ้นแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงใหม่สามารถส่งผลให้การใช้พลังงานทั้งอาคารลดลงได้ถึง 55.44% ต่อปี ในด้านความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ โครงการปรับปรุงสามารถมีระยะเวลาคืนทุน 7.56 ปี โดยมี IRR 13.82% นอกจากนี้การปรับปรุงอาคารอาจส่งผลให้มีความจุสำรองของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับโหลดเครื่องจักรรถยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นการปรับปรุงอาคารเก่าให้เป็นอาคารประหยัดพลังงานจึงให้ประโยชน์ทั้งในด้านการลดการใช้ไฟฟ้าและลดต้นทุนด้านพลังงานให้กับเจ้าของโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Renovation of Buildings According to Thailand Building Energy Code (BEC) with Regard to The Aspects of Economy and Energy
Student	Mr. Surakit Thongsuk
Student ID.	61601183
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Atthapol Ngaopitakkul

ABSTRACT

Improving energy efficiency and reducing energy usage of buildings is one of the key objectives for solving the energy crisis due to the urbanization rate and increasing numbers of buildings in urban areas. This study evaluated the feasibility of building renovation in aspects of economy and energy. An academic building located in Bangkok, Thailand was selected for a case study. Sub-systems that were renovated consist of the building envelope, lighting system, air-conditioning unit, electrical system, and installed solar power generation system. From the energy perspective, Thailand's Building Energy Code was used as an evaluating standard, and the BEC software was employed for the calculations. The economic feasibility of the renovation was determined based on the internal rate of return and discounted payback period. It was demonstrated that the renovation can result in a reduction in the annual energy consumption of the entire building by up to 55.44%. As regards economic feasibility, the renovation project can achieve a payback period of 7.56 years with 13.82% IRR. In addition, the renovation of a building can lead to the spare capacity of the transformer for electric vehicle charger loads. Thus, the renovation of an old building into an energy-efficient building can afford benefits both in terms of electricity consumption reduction and decreased energy cost for the project owner.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล ที่ให้ความช่วยเหลือให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าและขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่โดยเฉพาะอย่างยิ่งห้องปฏิบัติการ 404 อาคารปฏิบัติการวิศวกรรม 2 (ECC)

ขอขอบคุณ ดร.สันติพันธ์ อนันต์วัฒนาพร ผศ.ดร.สันธิติ อยู่มาก และเพื่อนๆ น้อง ๆ นักศึกษาในห้องห้องปฏิบัติการ 404 ทุกท่าน ส าหรับความช่วยเหลือและค าแนะน าต่างๆที่มอบให้แก่ข้าพเจ้า

ส หรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุรกิจ ทองสุก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	7
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	8
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	8
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	8
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.1 เกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร.....	11
2.2 กรอบอาคารและปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน.....	16
2.3 การคำนวณค่าสมบัติเชิงอุณหภาพของระบบเปลือกอาคาร.....	19
2.4 การจัดการความร้อนภายในอาคาร.....	22
2.5 การออกแบบระบบแสงสว่าง.....	25
2.6 การออกแบบระบบไฟฟ้า.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	32
3.1 สํารวจและเก็บข้อมูลอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา.....	32
3.2 วิเคราะห์พลังงานสุทธิของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา.....	46
3.3 แนวทางการปรับปรุงอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา.....	47
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ผล.....	62
4.1 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังการปรับปรุงระบบต่าง ๆ.....	62
4.2 ผลการคำนวณพลังงานสุทธิของอาคารหลังทำการปรับปรุง.....	78
4.3 ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงอาคาร.....	79
4.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการเลือกลงทุนในระบบต่าง ๆ.....	82
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน.....	89
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และห้ามอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก ก.....	94
ภาคผนวก ข.....	100
ภาคผนวก ค.....	105
ภาคผนวก ง.....	110
ประวัติผู้เขียน.....	155



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอก.....	11
2.2 ค่าการถ่ายเทความร้อนของหลังคาอาคาร.....	12
2.3 ค่าก าลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุด.....	12
2.4 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานขั้นต่ำของเครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก.....	13
2.5 ค่าพลังไฟฟ้าต่อต้านความเย็นของเครื่องระบบปรับอากาศขนาดใหญ่.....	13
2.6 ก าหนดภาวะพิกัดโดยระบุอุณหภูมิและอัตราการไหลของน ำระบาย ความร้อนเข้า เครื่องควบแน่น.....	14
2.7 ก าหนดภาวะพิกัดโดยระบุอุณหภูมิใน ำระบายความร้อนเข้าและออกจากเครื่อง ควบแน่น.....	14
2.8 ค่าประสิทธิภาพและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำ ำน้ำอุ่น ำและหม้อต้ม ำร้อน.....	15
2.9 เครื่องท ำร้อนชนิดฮีตปั๊มแบบใช้อากาศเป็นแหล่งพลังงาน (air-source heat pump water heater).....	15
2.10 ขนาดต ำสุดของสายต่อหลักดินของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ.....	31
2.11 ขนาดต ำสุดของสายดินของบริกัณฑ์ไฟฟ้า.....	31
3.1 ข้อมูลของหลอดไฟเดิมนที่ติดตั้งอยู่ในอาคาร.....	34
3.2 ข้อมูลของเครื่องปรับอากาศเดิมนที่ติดตั้งอยู่ในอาคาร.....	36
3.3 โหลดรวมของตู้ Main Distribution Board (MDB) อาคารเรียนวิศวกรรมโยธา.....	38
3.4 โหลดรวมของชั้น 1 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมน.....	39
3.5 โหลดรวมของชั้น 2 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมน.....	40
3.6 โหลดรวมของชั้น 3 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมน.....	41
3.7 โหลดรวมของชั้น 4 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมน.....	42
3.8 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ทางการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ ก ำเพงเดิมน.....	44
3.9 คุณสมบัติของวัสดุกระจกที่ใช้อยู่เดิมน.....	44
3.10 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ทางการถ่ายเทความร้อนของวัสดุหลังคาเดิมน.....	45
3.11 รายงานค่าการอนุรักษ์พลังงานของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมน.....	46
3.12 ข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุปรับปรุงผนังทั้ง 3 กรณี.....	51
3.13 ส่วนประกอบและค่าการถ่ายเทความร้อนของวัสดุปรับปรุงผนังทั้ง 3 กรณี.....	52

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.14 ข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุปรับปรุงหลังคาทั้ง 3 กรณี.....	56
3.15 ส่วนประกอบและค่าการถ่ายเทความร้อนของวัสดุปรับปรุงหลังคาทั้ง 3 กรณี.....	56
3.16 คุณสมบัติของวัสดุกระจกที่นำมาปรับปรุงใหม่.....	60
4.1 ข้อมูลของหลอดไฟทดแทน.....	62
4.2 ตารางค่าความส่องสว่าง (Illuminance, E) บนบริเวณพื้นที่ท งาน ของห้อง CV-403 ของอาคารอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม.....	63
4.3 ตารางค่าความส่องสว่าง (Illuminance, E) บนบริเวณพื้นที่ท งาน ของห้อง CV-403 หลังทำการปรับปรุงระบบไฟฟ้าแสงสว่าง.....	63
4.4 ข้อมูลของเครื่องปรับอากาศทดแทน.....	66
4.5 โหลดรวมของตู้ Main Distribution Board (MDB) อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม.....	67
4.6 โหลดรวมของตู้ Main Distribution Board (MDB) อาคารเรียนวิศวกรรมโยธา หลังปรับปรุง.....	67
4.7 โหลดรวมของชั้น 1 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม.....	68
4.8 โหลดรวมของชั้น 1 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุง.....	68
4.9 โหลดรวมของชั้น 2 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม.....	69
4.10 โหลดรวมของชั้น 2 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุง.....	69
4.11 โหลดรวมของชั้น 3 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม.....	70
4.12 โหลดรวมของชั้น 3 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุง.....	70
4.13 โหลดรวมของชั้น 4 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม.....	71
4.14 โหลดรวมของชั้น 4 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุง.....	71
4.15 รายงานค่าการอนุรักษ์พลังงานหลังปรับปรุงด้วยวัสดุกระจก.....	77
4.16 รายงานค่าการอนุรักษ์พลังงานของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุง.....	78
4.17 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบไฟฟ้าแสงสว่างของอาคารเรียน วิศวกรรมโยธา.....	78
4.18 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบปรับอากาศของอาคารเรียน วิศวกรรมโยธา.....	79
4.19 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงเซอร์กิตเบรกเกอร์ของอาคารเรียน วิศวกรรมโยธา.....	79
4.20 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบไฟฟ้าทั้งหมดของอาคาร.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.21 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบกรอบอาคาร(ผนัง).....	80
4.22 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบกรอบอาคาร (หลังคา).....	81
4.23 ตารางค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	81
4.24 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบกรอบอาคารทั้งหมด.....	81
4.25 ตารางกระแสเงินสดในการปรับปรุงระบบไฟฟ้าทั้งหมด.....	83
4.26 ตารางกระแสเงินสดในการปรับปรุงระบบกรอบอาคารประเภทผนัง.....	84
4.27 ตารางกระแสเงินสดในการปรับปรุงระบบกรอบอาคารประเภทหลังคา.....	84
4.28 ตารางกระแสเงินสดในการปรับปรุงระบบกรอบอาคารประเภทกระจก.....	85
4.29 ตารางค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์.....	86
4.30 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงทุกระบบรวมไปถึงการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์.....	86
4.31 ตารางสรุปข้อมูลทางพลังงานและเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุงแต่ละระบบ.....	87

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของอาคารเรียน.....	3
2.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบ.....	16
2.2 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังโปร่งแสง.....	17
2.3 ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังในแต่ละด้าน.....	18
2.4 ผนังที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด.....	20
2.5 ผนังที่มีช่องว่างอากาศอยู่ภายใน.....	20
3.1 โคมไฟหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) T8 ห้องสหกรณ์เก่า ชั้น 1.....	32
3.2 โคมไฟหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) T5 ห้อง CV-201 ชั้น 2.....	33
3.3 โคมไฟหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) T8 ห้อง CV-403 ชั้น 4.....	33
3.4 เครื่องปรับอากาศเดิม ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ ชั้น 1.....	34
3.5 เครื่องปรับอากาศเดิม ห้องบรรยายรวม ชั้น 2.....	35
3.6 เครื่องปรับอากาศเดิม ห้อง CV-301 ชั้น 3.....	35
3.7 แผนภาพระบบไฟฟ้าจากตู้สวิตช์ประธานของอาคารโยธา.....	37
3.8 ตู้ Main Distribution Board (MDB) ชั้น 1.....	37
3.9 ผนังเดิมของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา.....	43
3.10 แบบจาลองผนังเดิม.....	43
3.11 แบบจาลองกระจกเดิม.....	44
3.12 หลังคาเดิมของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา.....	45
3.13 แบบจาลองหลังคาเดิม.....	45
3.14 แผนภาพสรุปขั้นตอนการดำเนินงานปรับปรุงอาคาร.....	47
3.15 การถ่ายเทความร้อนของผนังเดิมเวลา 14.00 น.....	50
3.16 การถ่ายเทความร้อนของผนังปรับปรุงกรณีที่ 1 เวลา 14.00 น.....	53
3.17 การถ่ายเทความร้อนของผนังปรับปรุงกรณีที่ 2 เวลา 14.00 น.....	53
3.18 การถ่ายเทความร้อนของผนังปรับปรุงกรณีที่ 3 เวลา 14.00 น.....	53
3.19 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุกรอบอาคารประเภทผนัง.....	54
3.20 การถ่ายเทความร้อนของหลังคาเดิมเวลา 14.00 น.....	55
3.21 การถ่ายเทความร้อนของหลังคาปรับปรุงกรณีที่ 1 เวลา 14.00 น.....	57
3.22 การถ่ายเทความร้อนของหลังคาปรับปรุงกรณีที่ 2 เวลา 14.00 น.....	57
3.23 การถ่ายเทความร้อนของหลังคาปรับปรุงกรณีที่ 3 เวลา 14.00 น.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.24 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุกรอบอาคารประเภทหลังคา.....	59
3.25 Schematic diagram ของระบบที่ออกแบบ.....	61
3.26 การกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อจำลองระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์แสงอาทิตย์ผ่านโปรแกรม HOMER Pro.....	61
4.1 แผนภาพค่าความส่องสว่าง (Illuminance, E) บนบริเวณพื้นที่ท งานของห้อง CV-403 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม.....	64
4.2 แผนภาพค่าความส่องสว่าง (Illuminance, E) บนบริเวณพื้นที่ท งานของห้อง CV-403 หลังการปรับปรุงระบบไฟฟ้าแสงสว่าง.....	65
4.3 ผนังเดิมติดฉนวนใยแก้ว.....	73
4.4 การถ่ายเทความร้อนของผนังเดิม เวลา 14.00 น.....	73
4.5 การถ่ายเทความร้อนของผนังเดิมติดฉนวนใยแก้ว เวลา 14.00 น.....	73
4.6 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของผนัง.....	74
4.7 หลังคาเดิมปูฉนวนใยแก้ว Stay Cool.....	75
4.8 การถ่ายเทความร้อนของหลังคาเดิม เวลา 14.00 น.....	75
4.9 การถ่ายเทความร้อนของหลังคาเดิมปูฉนวนใยแก้ว Stay Cool เวลา 14.00 น.....	76
4.10 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของหลังคา.....	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความต้องการไฟฟ้าทั่วโลกที่เพิ่มขึ้นกลายเป็นหนึ่งในความท้าทายที่สำคัญ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่ดูเหมือนจะเป็นอิสระ เช่น ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การเติบโตทางเศรษฐกิจ และความเป็นอิสระด้านพลังงาน จากข้อมูลจากสำนักงานพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency : IEA) การใช้พลังงานของอาคารต่างๆ เพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากเศรษฐกิจและจำนวนประชากรโลกยังคงเพิ่มขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพการใช้พลังงานจึงกลายเป็นประเด็นสำคัญและการเพิ่มประสิทธิภาพนี้ถือเป็นกุญแจสำคัญในการลดความต้องการพลังงานและบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมากขึ้น ซึ่งรวมถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร การขนส่ง และกระบวนการทางอุตสาหกรรม การจัดการกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศกำลังขับเคลื่อนนโยบายพลังงานมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่พัฒนาแล้ว สิ่งนี้นำไปสู่นโยบายที่มุ่งลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการส่งเสริมพลังงานสะอาด สำนักงานพลังงานระหว่างประเทศ นำเสนอแนวโน้มพลังงานทั่วโลกล่าสุดในรายงาน "World Energy Outlook 2021" พลังงานทดแทนเป็นแหล่งไฟฟ้าที่เติบโตเร็วที่สุด โดยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมมีความโดดเด่นเป็นพิเศษ ซึ่งพลังงานหมุนเวียนถูกกำหนดให้กลายเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าที่ใหญ่ที่สุดภายในสิ้นทศวรรษนี้

การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานเป็นสิ่งสำคัญในการลดความต้องการพลังงานและบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รายงานของสำนักงานพลังงานระหว่างประเทศ (IEA) ตั้งข้อสังเกตว่ามาตรการประสิทธิภาพพลังงานสามารถลดความต้องการพลังงานทั่วโลกได้มากถึง 20% ภายในปี พ.ศ. 2583 มีรายงานต่างๆ เกี่ยวกับภาคพลังงานของประเทศไทย แหล่งสำคัญประการหนึ่งคือสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน เผยแพร่รายงานสถานการณ์พลังงานของประเทศไทยอย่างสม่ำเสมอ รวมถึงการใช้พลังงานและการผลิต นโยบาย และแนวโน้มพลังงาน นอกจากนี้ องค์กรพัฒนาเอกชน (Non-Governmental Organization : NGO) ยังเผยแพร่รายงานเกี่ยวกับภาคพลังงานของประเทศไทย ตัวอย่างเช่น สถาบันทรัพยากรโลก (World Resources Institute : WRI) ได้เผยแพร่รายงานเกี่ยวกับการพัฒนาพลังงานทดแทนในประเทศไทย และหอการค้าไทย-สวีเดน ได้เผยแพร่รายงานเกี่ยวกับประสิทธิภาพการใช้พลังงานในประเทศ

สำหรับในส่วนของอาคารถือเป็นผู้บริโภคพลังงานและตัวปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญทั่วโลก จากข้อมูลของสำนักงานพลังงานระหว่างประเทศ (IEA) ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานในปี พ.ศ. 2562 อาคารและการก่อสร้างคิดเป็น 36% ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายและคิดเป็น 39% ของการปล่อย

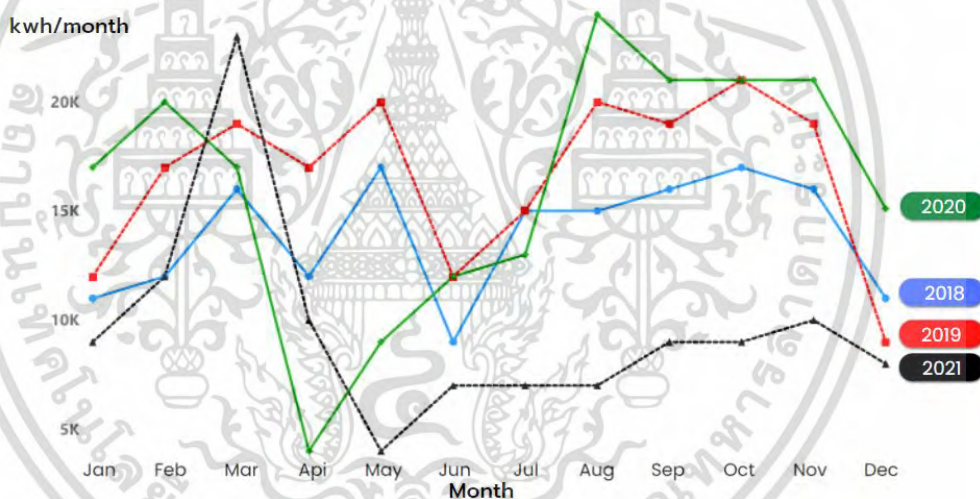
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในส่วนของอาคาร โดยการใช้ฉนวนกันความร้อน ระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศและระบายอากาศ (Heating, Ventilation, and Air-conditioning : HVAC) และแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น แผงโซลาร์เซลล์ เป็นต้น สำนักงานพลังงานระหว่างประเทศ (IEA) ประมาณการว่ามาตรการประสิทธิภาพพลังงานสามารถลดการใช้พลังงานในอาคารได้มากถึง 50% ภายในปี พ.ศ. 2593 ซึ่งเกณฑ์การประหยัดพลังงานมีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยการกำหนดมาตรฐานขั้นต่ำสำหรับประสิทธิภาพการใช้พลังงาน หลักปฏิบัติครอบคลุมด้านต่าง ๆ ของการออกแบบอาคาร การก่อสร้าง และการดำเนินงานที่อาจส่งผลต่อการใช้พลังงาน เช่น โครงสร้างอาคาร แสงสว่าง การทำความร้อน การทำความเย็น การระบายอากาศ และเครื่องใช้ไฟฟ้า การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ขณะเดียวกันก็ลดต้นทุนด้านพลังงานสำหรับเจ้าของและผู้พักอาศัยในอาคาร การปฏิบัติตามเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน (Building Energy Code : BEC) ถือเป็นข้อบังคับสำหรับอาคารใหม่ทั้งหมดและการปรับปรุงที่สำคัญในประเทศไทย และการไม่ปฏิบัติตามอาจส่งผลให้เกิดบทลงโทษและค่าปรับ นอกจากนี้เกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน ยังจัดให้มีกรอบการทำงานสำหรับการตรวจสอบพลังงานและการปรับปรุงอาคารที่มีอยู่ ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยรวมแล้วเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน เป็นเครื่องมือสำคัญในการส่งเสริมอาคารที่ยั่งยืนและประหยัดพลังงาน ซึ่งสามารถช่วยจัดการกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ลดต้นทุนด้านพลังงาน และปรับปรุงคุณภาพชีวิตของผู้พักอาศัยในอาคาร การสร้างอาคารใหม่หรือการปรับปรุงอาคารที่มีอยู่สามารถให้มูลค่าทางเศรษฐกิจได้มากขึ้นตามข้อกำหนดของเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงานเท่านั้น มูลค่าทางเศรษฐกิจของโครงการอาคารขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ รวมถึงขนาดและขอบเขตของโครงการ ทำเลที่ตั้งและความต้องการของตลาด ตลอดจนต้นทุนวัสดุและแรงงาน

การปฏิบัติตามเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและประหยัดต้นทุนในระยะยาว เนื่องจากอาคารจะได้รับการออกแบบและก่อสร้างโดยใช้เทคโนโลยีและแนวทางปฏิบัติที่ประหยัดพลังงานล่าสุด อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายล่วงหน้าในการสร้างอาคารใหม่อาจสูงกว่าค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นสำหรับการปรับปรุงอาคารที่มีอยู่ ในทางตรงกันข้าม การปรับปรุงอาคารที่มีอยู่ให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน ยังช่วยประหยัดพลังงานและต้นทุนอีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากอาคารได้รับการดัดแปลงด้วยเทคโนโลยีและวัสดุประหยัดพลังงาน นอกจากนี้การปรับปรุงอาคารที่มีอยู่ยังสามารถรักษาสถาปัตยกรรมที่มีคุณค่าทางประวัติศาสตร์หรือวัฒนธรรมที่เกี่ยวข้องกับอาคารบางประเภทได้ การตัดสินใจว่าจะสร้างใหม่หรือปรับปรุงอาคารที่มีอยู่นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการรวมถึงเป้าหมายเฉพาะของโครงการ ทรัพยากร

ที่มีอยู่ และข้อจำกัดใดๆ ในสถานที่และสถานที่ตั้ง โดยทั้งสองทางเลือกสามารถให้มูลค่าทางเศรษฐกิจ และประหยัดพลังงานได้หากดำเนินการอย่างถูกต้องและคำนึงถึงเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน

สถิติการใช้พลังงานรายเดือนช่วงปีพ.ศ. 2561-2564 ของอาคารที่เลือกเป็นกรณีศึกษา ข้อมูลการใช้พลังงานระบุว่าอาคารเรียนหลังนี้มีรูปแบบการใช้งานตามช่วงเวลาของปีการศึกษาของนักศึกษา ระดับปริญญาตรีที่มีจุดสูงสุดในเดือนเมษายนและพฤษภาคมเนื่องจากเป็นช่วงฤดูร้อนถัดไป การใช้พลังงานมีการเติบโตอย่างต่อเนื่องระหว่างปีพ.ศ. 2561 ถึง 2563 อย่างไรก็ตามมูลค่าลดลงอย่างมากในปี 2565 เนื่องจากการแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ซึ่งส่งผลให้มีการล็อกดาวน์และต้องทำงานจากที่บ้านเป็นระยะเวลาหนึ่ง การลดการใช้พลังงานนี้จะเห็นผลอย่างต่อเนื่องจนถึงระดับก่อนเกิดสถานการณ์โควิด-19 และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นอีก นอกจากนี้ราคาพลังงานจะสูงขึ้นมากในอนาคตอันเป็นผลมาจากภาวะเงินเฟ้อ ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารจึงจำเป็นต้องได้รับการแก้ไขเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ด้านการประหยัดพลังงานที่กำหนดโดยกระทรวงพลังงาน



รูปที่ 1. ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของอาคารเรียน

ฉนวนถือเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร ฉนวนช่วยลดปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการทำความร้อนหรือทำความเย็นอาคารโดยลดการถ่ายเทความร้อนระหว่างสภาพแวดล้อมภายในและภายนอก การศึกษาจำนวนมากแสดงให้เห็นว่าฉนวนที่เหมาะสมสามารถลดการใช้พลังงานของอาคารได้อย่างมาก โดยการป้องกันการสูญเสียความร้อนหรือการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง หลังคา และพื้น นอกจากนี้ การปรับปรุงอาคารด้วยฉนวนสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดการใช้พลังงานได้อย่างมาก มีการวิจัยที่สำคัญเกี่ยวกับเทคโนโลยีของฉนวนและผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร ตัวอย่างของหน้าต่าง แอร์เจลแบบเม็ดและเสาหินจำนวน 11 ตัวอย่างได้รับการคัดเลือกจากงานวิจัยต่างๆ แสดงคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางแสงและคุณลักษณะทางความร้อนของโครงสร้างกระจกและผลลัพธ์แสดงไว้ใน [1] การวิเคราะห์การนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนประกอบและโครงสร้างภายในด้วย โดยมีจุดมุ่งหมายในการกำหนดปริมาณวัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการลดต้นทุนด้านพลังงาน ซึ่งมีการนำไว้ใน [2] การกำหนดการจัดเก็บพลังงานความร้อนแบบไฮบริด (Thermal Energy Storage : TES) ใหม่พร้อมชั้นวัสดุที่เปลี่ยน เนื่องจากทั้งฉนวนและตัวกลางกักเก็บพลังงานมีฉนวนที่ดีกว่า และเพิ่มความจุจัดเก็บพลังงานความร้อนแบบไฮบริด เมื่อเทียบกับค่าการจัดเก็บพลังงานความร้อนแบบไฮบริดทั่วไป อุณหภูมิการถ่ายเทความร้อนขาเข้าถูกระบุว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการจัดเก็บพลังงานความร้อนแบบไฮบริด [3] การวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณบ่งชี้ว่าวัสดุฉนวนที่มีอยู่ในท้องถิ่นสามารถลดอุณหภูมิโดยรอบและรับประกันความสบายทางความร้อนที่ไม่แพง มีการวิเคราะห์ต้นทุน เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ [4] การวิเคราะห์ประเภทการก่อสร้างทั่วไป รวมกับข้อมูลสังหาริมทรัพย์ แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุฉนวน เช่น ซิลิกาแอโรเจลหรือ แผงฉนวนสุญญากาศสามารถสร้างผลกำไรได้ในเมืองใหญ่หลายแห่งทั่วโลก [5] ผนังอาคารคอนกรีตสองชั้นแบบใหม่ที่มีช่องว่างอากาศหลายช่องเป็นฉนวนความร้อน ช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนและใช้พลังงานในการปฏิบัติงานน้อยกว่าระบบซุ้มคอนกรีตแข็งและประกบ [6] เส้นใยมะพร้าวสามารถนำมาใช้เป็นทางเลือกจากธรรมชาติและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแทนวัสดุสังเคราะห์ เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวมีคุณสมบัติเกือบจะเหมือนกับโฟมพอลิสไตรีนที่ขยายตัว (Expanded Polystyrene Foam : EPS) และในบางกรณีสามารถใช้งานได้ทั่วโลกดียิ่งขึ้นอีกด้วย [7] ประโยชน์ของหลังคาสีเขียว เช่น การลดการใช้พลังงาน การปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคาร และการบรรเทาผลกระทบจากเกาะความร้อนในเมือง นำไปสู่การประหยัดพลังงานและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของการปรับปรุงอาคาร [8] การจำลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ Transient System Simulation Tool (TRNSYS) แสดงให้เห็นว่าฉนวนกันความร้อนสามารถปรับปรุงคุณภาพความร้อนของเปลือกอาคารและประหยัดพลังงานได้ [9] การใช้วัสดุและระบบชั้นสูงในการควบคุมพลังงานความร้อนในอาคารสามารถลดการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศและระบายอากาศ ได้โดยไม่กระทบต่อความสะดวกสบายด้านความร้อน [10] เทคโนโลยีฉนวนมีความสำคัญอย่างยิ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยลดการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร ช่วยรักษาอุณหภูมิภายในอาคารให้สบาย ลดความจำเป็นในการใช้ระบบทำความร้อนและความเย็น และลดการใช้พลังงานและต้นทุน ฉนวนที่เหมาะสมสามารถช่วยป้องกันปัญหาความชื้นและปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารได้ โดยรวมแล้ว การผสมผสานเทคโนโลยีฉนวนเข้ากับการออกแบบและการก่อสร้างอาคารถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการสร้างอาคารที่ยั่งยืนและประหยัดพลังงานมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีหมุนเวียน เช่น แผงโซลาร์เซลล์ กังหันลม และระบบความร้อนใต้พิภพ สามารถช่วยทำให้อาคารประหยัดพลังงานได้อย่างมาก และบรรลุสถานะพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ ด้วยการผลิตพลังงานทดแทนในสถานที่ อาคารต่างๆ สามารถลดการพึ่งพาพลังงานจากโครงข่ายซึ่งมักสร้างขึ้นโดยใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล การตรวจสอบผลกระทบของการกำหนดค่าการออกแบบที่แตกต่างกันในการเพิ่มปริมาณพลังงานหมุนเวียนที่สร้างโดยแผงโซลาร์เซลล์ (Photovoltaic : PV) ที่ติดตั้งบนด้านหน้าของอาคาร แสดงให้เห็นว่าปริมาณพลังงานหมุนเวียนที่สร้างขึ้นสูงสุดนั้นทำได้โดยการใช้การติดตามแกนแนวนอน บนพื้นผิวแข็งและหน้าต่างบนทิศตะวันออก [11] รูปแบบการปรับให้เหมาะสมแบบใหม่สำหรับการบูรณาการมาตรการด้านพลังงานหมุนเวียนเข้ากับกรณีศึกษาในชีวิตจริงที่มีอยู่ของอาคารการศึกษาเพื่อลดการใช้พลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงอาคารมีการนำเสนอใน [12] แบบจำลองระบบพลังงานที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายใหม่ที่ล้ำสมัย ซึ่งบูรณาการและเพิ่มประสิทธิภาพแหล่งพลังงานหมุนเวียน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลังงานแสงอาทิตย์ และชีวมวล และการนำกลยุทธ์การจัดการภาระด้านอุปสงค์ไปใช้เพื่อการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพได้รับการเสนอใน [13] ความสำคัญของการพิจารณาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่รวมและในการดำเนินงานเมื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของอาคารที่ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์โดยใช้วิธีการประเมินวงจรชีวิตได้รับการพิจารณาและนำไปใช้กับอาคารจริงและนำเสนอเป็นกรณีศึกษาใน [14] อาคารที่ใช้พลังงานใกล้เคียงเท่ากับศูนย์ (Near Zero Energy Building : nZEB) แบบใกล้สุทธิสามารถลดความต้องการพลังงานในภาคอาคารที่พักอาศัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพอากาศร้อนและแห้ง การใช้กระจกสองชั้นและฉนวนกันความร้อนมีผลกระทบที่สำคัญที่สุดในการลดความต้องการพลังงาน ดังที่แสดงใน [15] เทคโนโลยีหมุนเวียนสามารถช่วยให้อาคารบรรลุสถานะพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ โดยสร้างพลังงานได้มากเท่าที่ใช้ไปในหนึ่งปี ซึ่งช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอน และนำไปสู่การประหยัดต้นทุนอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาผ่านไป โดยรวมแล้ว การผสมผสานเทคโนโลยีหมุนเวียนเข้ากับการกำหนดค่าและการดำเนินงานของอาคารถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับภาคอาคารที่ยั่งยืนและประหยัดพลังงานมากขึ้น

เกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน เป็นเครื่องมือสำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร โดยให้ข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับการออกแบบ การก่อสร้าง และการดำเนินงานอาคารใหม่และที่มีอยู่ เพื่อให้มั่นใจได้ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการใช้ทรัพยากรพลังงานอย่างรอบคอบ การศึกษาก่อนหน้านี้ที่ใช้ไมโครดาต้าจาก American Community Survey (ACS) เพื่อประเมินผลกระทบของรหัสพลังงานในอาคารต่อค่าใช้จ่ายไฟฟ้าในครัวเรือน มีการใช้แนวทางเชิงประจักษ์สองวิธีในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งทั้งสองวิธีทำซ้ำและสร้างจากรรณกรรมก่อนหน้าในหัวข้อนี้ ข้อมูล ณ วันที่นำรหัสอาคารมาใช้ แสดงให้เห็นว่ารหัสพลังงานมีประสิทธิภาพปานกลาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลางในการลดค่าไฟฟ้าในครัวเรือน [16] ราคาพลังงานและอุณหภูมิมีอิทธิพลมากที่สุดต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ความเข้มงวดของรหัสที่อยู่อาศัยยังมีผลกระทบที่เป็นผลสืบเนื่องทางสถิติต่อการใช้พลังงาน [17] ตัวอย่างของแนวทางปฏิบัติที่ประเทศต่างๆ ได้นำมาใช้เพื่อช่วยในการดำเนินการตามรหัสพลังงานในอาคาร และแจ้งการออกแบบที่ดีขึ้นของสถาบัน สิ่งจูงใจ หรือการสนับสนุน เพื่อให้รหัสพลังงานในอาคารสามารถส่งมอบผลประโยชน์ที่เป็นไปได้ได้แสดงไว้ใน [18] ข้อเสนอแนะคือให้พิจารณาข้อกำหนดที่เข้มงวดมากขึ้นเกี่ยวกับการใช้พลังงานที่ระบุไว้ในเกณฑ์มาตรฐานอาคารของฟินแลนด์ นอร์เวย์ สวีเดน และรัสเซีย ตามที่แนะนำใน [19] ขอบเขตของการตรวจสอบ แนวทางปฏิบัติที่เปลี่ยนแปลง และนวัตกรรมทางเทคโนโลยีเป็นเครื่องมืออันทรงคุณค่าในการบังคับใช้รหัสพลังงานในอาคาร ผลที่ตามมาของการตรวจสอบเสมือนจริงรวมถึงการประหยัดเวลา และการประหยัดเงิน [20] ดังนั้น เกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของภาคอาคาร โดยให้แนวทางและมาตรฐานที่ต้องปฏิบัติตาม เพื่อให้แน่ใจว่าอาคารได้รับการออกแบบ ก่อสร้าง และดำเนินการโดยคำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานเป็นหลัก ด้วยการปฏิบัติตามข้อกำหนดของเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน อาคารสามารถลดการใช้พลังงานและต้นทุนที่เกี่ยวข้อง ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และปรับปรุงความสะดวกสบายและสุขภาพของผู้อยู่อาศัย

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สามารถสนับสนุนการกำหนดโซลูชันที่มีประสิทธิผลและเป็นไปได้ทางการเงินมากที่สุดสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร โดยการประเมินต้นทุนและประโยชน์ของการนำเทคโนโลยีและกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานไปใช้ การตรวจสอบความเป็นไปได้ในการปรับปรุงอาคารที่อยู่อาศัยที่มีอยู่ในกานาให้เป็นอาคารที่ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (NZEBS) โดยใช้การแทรกแซงด้านประสิทธิภาพพลังงานและแหล่งพลังงานหมุนเวียน พบว่าระยะเวลาคืนทุนสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถตอบสนองความต้องการพลังงานที่เหลืออยู่นั้นประมาณไว้ว่า 6-10 ปีตาม [21] เครื่องมือวิเคราะห์ต้นทุนวงจรชีวิตแบบยืดหยุ่น (Life-Cycle Cost Analysis, LCCA) จะประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจของสถานการณ์และมาตรการอนุรักษ์พลังงานต่างๆ และตัวชี้วัดต่างๆ รวมถึงมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR) และระยะเวลาคืนทุน ผลการวิจัยพบว่าแนวทางการปรับเปลี่ยนเป็นระยะอาจส่งผลให้ประหยัดพลังงานและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมากโดยมีระยะเวลาคืนทุนที่สมเหตุสมผล [22] มีมาตรการดัดแปลงเชิงรับที่แตกต่างกันสำหรับการปรับปรุงอาคารในอดีตเพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน ความคุ้มค่า และปรับปรุงความสะดวกสบายด้านความร้อน ศักยภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุดสามารถทำได้โดย

การรวมหน้าต่างฉนวนสุญญากาศ การลดการแทรกซึมของอากาศยิปซัม และแผงโพลีไอโซไซยานูเรต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผสมผสานการติดตั้งเพิ่มเติมที่แนะนำสามารถบรรลุการลดพลังงานหลักได้ 51.8% และระยะเวลาคืนทุนที่มีส่วนลด (Discount Payback Period, DPP) เป็นเวลา 18 ปี [23] การตรวจสอบการประเมินทางเศรษฐกิจของการปรับปรุงพลังงานเชิงลึกของอาคารอพาร์ทเมนท์ในฟินแลนด์แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงเพิ่มเติมอย่างคุ้มค่าสามารถจ่ายได้ภาษีจากพลังงานมากกว่าสร้างรายได้จากภาษีใหม่ผ่านการจ้างงานโดยตรง [24] การประเมินทางเศรษฐกิจของกลยุทธ์ที่เสนอในการสร้างอาคารมหาวิทยาลัยให้เป็นอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ (Zero Energy Building : ZEB) จะกำหนดกลยุทธ์การตัดแปลงที่ช่วยลดการใช้พลังงานของอาคารลง 18.02% สถานการณ์สมมติทั้งสามที่นำเสนอมีระยะเวลาคืนทุนที่มีสิทธิ์ตั้งแต่ 2 ถึง 10 ปี ระบบพลังงานทดแทนในสถานที่ให้คะแนนประสิทธิภาพ 0.92 เพื่อออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ [25] โดยสรุปการประเมินทางเศรษฐศาสตร์มีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร โดยการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ที่เกี่ยวข้องกับมาตรการประสิทธิภาพพลังงานต่างๆ อย่างครอบคลุม ยิ่งไปกว่านั้นยังทำให้สามารถระบุมาตรการวัดประสิทธิภาพพลังงานที่คุ้มค่าที่สุด และอำนวยความสะดวกในการพัฒนาแผนการทางการเงินที่มีประสิทธิภาพเพื่อให้บรรลุ อาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์

1.2 วัตถุประสงค์และความมุ่งหมายของการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการปรับปรุงอาคารเก่าให้เป็นอาคารอนุรักษ์พลังงานที่สอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานด้านพลังงานของประเทศไทย โดยพิจารณา 3 ประเด็น ได้แก่ ระบบกรอบอาคาร ระบบแสงสว่าง และระบบปรับอากาศ โดยใช้โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร (BEC) เพื่อประเมินประสิทธิภาพพลังงานของทั้งกรณีอาคารแบบเดิมและกรณีอาคารที่ปรับปรุงแล้ว นอกจากนี้ยังใช้ตัวชี้วัดทางเศรษฐกิจเพื่อกำหนดความคุ้มค่าในการลงทุนปรับปรุงอาคาร โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษามีดังนี้

1. เพื่อปรับปรุงอาคารโดยศึกษาคุณลักษณะทางความร้อนของส่วนประกอบวัสดุกรอบอาคาร และพิจารณาปรับปรุงประสิทธิภาพในแง่ของการถ่ายเทความร้อนให้เป็นที่ไปตามเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน
2. เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานและเปลี่ยนอุปกรณ์ในระบบแสงสว่าง และระบบปรับอากาศ ให้เป็นที่ไปตามเกณฑ์มาตรฐานอาคารอนุรักษ์พลังงาน
3. ประเมินพลังงานโดยรวมให้มีค่าตามที่กระทรวงพลังงานกำหนดในการปรับปรุงของอาคาร โดยใช้โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร (BEC) เพื่อปรับลดการใช้พลังงานของอาคารและลดโหลดสูงสุดของอาคารได้ ทำให้หม้อแปลงเดิมสามารถรองรับโหลดในอนาคต เช่น ที่ชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า (EV)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการปรับปรุงอาคารอนุรักษ์พลังงาน

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การศึกษานี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่าการปรับปรุงอาคารตามเกณฑ์อนุรักษ์พลังงานสามารถลดการใช้พลังงานในอาคารและค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานลงได้ โดยอาคารที่ตั้งอยู่ในประเทศไทยจะอยู่ในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น ซึ่งจะทำให้มีการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ตัวอาคารสูง และจะส่งผลต่อการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ วัสดุกรอบอาคารที่มีคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารต่ำจะช่วยลดการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศและการใช้พลังงานรวมของอาคาร ซึ่งปัจจัยทั้งหมดนี้จะสามารถประเมินความเหมาะสมของวัสดุกรอบอาคารและวัสดุโปรงใสประเภทกระจก อีกทั้งการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และระบบปรับอากาศ จะช่วยให้การใช้พลังงานรวมของอาคารมีค่าลดลง และมีพิกัดหม้อแปลงเหลือเพียงพอสำหรับการติดตั้งโหลดในอนาคต โดยใช้การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการประเมินความเป็นไปได้ในการลงทุน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยนี้จะใช้อาคารปฏิบัติการของคณะวิศวกรรมศาสตร์เป็นกรณีศึกษา โดยจะทำการศึกษาคณสมบัติของวัสดุกรอบอาคารทั้งแบบทึบ และแบบโปรงใส มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารที่ส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานของอาคาร จากนั้นทำการศึกษาและประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบภายในอาคาร เช่น ระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ เป็นต้น ด้วยโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร (BEC) และทำการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการปรับปรุงอาคารให้เป็นอาคารอนุรักษ์พลังงาน โดยอาคารที่ปรับปรุงสามารถลดโหลดสูงสุดได้ไม่น้อยกว่า 10 % และลดการใช้พลังงานต่อปีได้มาก 50%

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจากทั้งในประเทศและต่างประเทศ
2. สํารวจอุปกรณ์และรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานในระบบต่าง ๆ ของอาคาร เช่น วัสดุกรอบอาคาร ระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ เป็นต้น
3. ทำการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารปัจจุบันด้วยโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร (BEC)
4. ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัสดุกรอบอาคาร กระจก ผนัง และหลังคา

เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของวัสดุกรอบอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ปรับปรุงอุปกรณ์ในระบบแสงสว่างและระบบปรับอากาศของอาคาร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน
6. ทำการจัดเรียงโหลดในอาคารและประเมินความสามารถในการรองรับโหลดในอนาคต
7. พิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการปรับปรุงอาคารให้เป็นอาคารอนุรักษ์พลังงาน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุกรอบอาคารแบบทึบแสงและแบบโปร่งใสที่ส่งผลกระทบต่อถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารและเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานของระบบต่าง ๆ ของอาคาร เช่น ระบบส่องสว่าง ระบบปรับอากาศ เป็นต้น และการปรับปรุงอาคารเพื่อให้ลดการใช้พลังงาน การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการปรับปรุงอาคารให้เป็นอาคารอนุรักษ์พลังงาน ประโยชน์ในด้านการอนุรักษ์พลังงานและประโยชน์จากองค์ความรู้ใหม่ ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการอนุรักษ์พลังงาน

1. สามารถเรียนรู้และเข้าใจเกี่ยวกับการออกแบบและปรับปรุงอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานและให้เป็นไปตามที่กฎหมายกำหนด
2. สามารถออกแบบอาคารที่ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยการเลือกวัสดุกรอบอาคาร ที่มีคุณสมบัติและความเหมาะสมที่จะลดการนำความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร
3. ปรับปรุงการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าและแสงสว่างให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
4. เพื่อให้อาคารเก่าสามารถปรับปรุงเพื่อรองรับโหลดทางไฟฟ้าในอนาคตได้
5. เป็นส่วนช่วยลดอัตราการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติที่เป็นเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ผ่านการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคาร ส่งผลให้มีอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นสาเหตุหลักของสภาวะโลกร้อน และปัญหาสิ่งแวดล้อมลดน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การอนุรักษ์พลังงานกำลังเป็นสิ่งที่ยุทธศาสตร์หน่วยงานตระหนักและให้ความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะประเทศไทยนั้นมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของเศรษฐกิจ ซึ่งอาคารที่พักอาศัยและอาคารพาณิชย์ที่มีอัตราการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ก็เป็นตัวแปรหนึ่งในการบริโภคพลังงานเหล่านั้นด้วย จนทำให้ผู้ประกอบการหรือเจ้าของอาคารจำเป็นต้องคำนึงถึงการออกแบบอาคารหรือการปรับปรุงอาคารเพื่อให้ประหยัดพลังงานให้มากที่สุด ในส่วนภาครัฐก็มีการสนับสนุนและส่งเสริมเรื่องการอนุรักษ์พลังงานอย่างจริงจังและต่อเนื่อง และรณรงค์ให้อาคารที่เป็นส่วนราชการเน้นการออกแบบและปรับปรุงอาคารให้เป็นอาคารอนุรักษ์พลังงาน เพื่อให้เป็นต้นแบบในการนำไปปฏิบัติในการอนุรักษ์พลังงาน และยังมีส่งเสริมให้มีนำพลังงานสะอาดมาใช้งานเพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เช่น พลังงานลม หรือพลังงานจากแสงอาทิตย์แล้ว การอนุรักษ์พลังงานก็เป็นปัจจัยสำคัญไม่แพ้กันในเรื่องความยั่งยืนด้านพลังงาน การอนุรักษ์พลังงานหมายถึงการประหยัดหรือลดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น และยังรวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงานอีกด้วย นั่นหมายถึงการใช้พลังงานน้อยลงแต่ได้ผลลัพธ์เท่าเดิม โดยครอบคลุมทั้งการใช้พลังงานด้านแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ ด้วยเหตุนี้ภาครัฐจึงให้ความสำคัญและออกนโยบายการอนุรักษ์พลังงาน รวมถึงออกมาตรการด้านพลังงานที่สำคัญ ช่วงปลายปี พ.ศ. 2553 สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ภายใต้กระทรวงพลังงานได้จัดทำแผนอนุรักษ์พลังงานของประเทศไทย พ.ศ. 2554 – 2573 ภายใต้แผนดังกล่าว ประเทศไทยมีเป้าหมายที่จะลดความการใช้พลังงาน (Energy Intensity) ต่อ GDP ลงร้อยละ 25 ภายในปี พ.ศ. 2573 โดยเทียบกับปี พ.ศ. 2553 ต่อมาในปี พ.ศ. 2558 ได้มีการปรับปรุงแผนอนุรักษ์พลังงาน โดยขยายเป้าหมายด้านการพัฒนาประสิทธิภาพพลังงานให้ลดความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 ภายในปี พ.ศ. 2579 เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2553 ในประเทศไทยมีการใช้พลังงานในภาคอาคารค่อนข้างสูงโดยคิดเป็นร้อยละ 17.6 ของความต้องการพลังงานรวมของประเทศ ดังนั้นการออกแบบและปรับปรุงอาคารจึงมีส่วนสำคัญที่จะช่วยทำให้แผนอนุรักษ์พลังงานบรรลุตามเป้าหมายได้ โดยเกณฑ์การมาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร (Building Energy Code, BEC) นั้นจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารได้ตั้งแต่เริ่มต้นออกแบบอาคาร เนื่องจากเกณฑ์เกณฑ์การมาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานของอาคารจะมีการปรับปรุงเพื่อยกระดับมาตรฐานขั้นต่ำให้สอดคล้องกับเทคโนโลยีและประสบการณ์การอนุรักษ์พลังงานในอาคารที่จะมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต ดังนั้นการส่งเสริมการออกแบบอาคารอนุรักษ์พลังงานประสิทธิภาพสูง จะเป็นแนวทางเบื้องต้นให้กับเจ้าของอาคาร สถาปนิกและวิศวกร ในการออกแบบอาคารอนุรักษ์พลังงานประสิทธิภาพสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 เกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร

โดยกระทรวงพลังงาน ได้ออกกฎกระทรวงกำหนดเกณฑ์มาตรฐานการอนุรักษ์พลังงานในอาคารขึ้นมา ซึ่งมีผลบังคับใช้กับอาคารที่จะขออนุญาตก่อสร้างใหม่หรือดัดแปลงอาคาร โดยจะตรวจสอบการใช้พลังงานตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบเพื่อให้เป็นไปตามกฎหมายแล้วจึงอนุญาตให้ก่อสร้างได้ ซึ่งได้รับการบรรจุในกฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐานหลักเกณฑ์ และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552 กระทรวงพลังงาน ประกอบ ด้วยการออกแบบระบบรอบอาคาร ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ อุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่างๆ ของอาคาร

กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือ ขนาดของอาคาร และ มาตรฐาน หลักเกณฑ์และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552 กำหนดประเภทและขนาดของอาคารการก่อสร้างหรือดัดแปลงอาคารดังต่อไปนี้ หากมีขนาดพื้นที่รวมกันทุกชั้นในหลังเดียวกันตั้งแต่ 2,000 ตารางเมตรขึ้นไป ต้องมีการออกแบบเพื่อการอนุรักษ์พลังงานซึ่งได้กำหนดไว้ 9 ประเภทอาคาร ดังต่อไปนี้ สถานพยาบาลตามกฎหมายว่าด้วยสถานพยาบาล สถานศึกษา สำนักงาน อาคารชุดตามกฎหมายว่าด้วยอาคารชุด อาคารชุมนุมคนตามกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคาร อาคารโรงมหรสพตามกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคาร อาคารโรงแรมตามกฎหมายว่าด้วยโรงแรม อาคารสถานบริการตามกฎหมายว่าด้วยสถานบริการ อาคารห้างสรรพสินค้าหรือศูนย์การค้า จะต้องออกแบบให้ระบบต่างๆ ของอาคารเป็นไปตามข้อกำหนดในกฎกระทรวง อันประกอบไปด้วยมาตรฐานและหลักเกณฑ์ในการออกแบบอาคาร 6 ส่วน ได้แก่

- 1) ระบบรอบอาคาร (ผนัง, หลังคา) ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอก และหลังคาอาคาร (OTTV, RTTV) ในส่วนที่มีการปรับอากาศในแต่ละประเภทของอาคารต้องมีค่าไม่เกินดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอก

ประเภทอาคาร	ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร (วัตต์ต่อตารางเมตร)
(ก) สถานศึกษา สำนักงาน	50
(ข) โรงมหรสพ ศูนย์การค้า สถานบริการ ห้างสรรพสินค้า อาคารชุมนุมคน	40
(ค) โรงแรม สถานพยาบาล อาคารชุด	30

ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคารในส่วนที่มีการปรับอากาศ ให้คำนวณจากค่าเฉลี่ยที่ถ่วงน้ำหนักของค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคารแต่ละด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมกัน ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารในส่วนที่มีการปรับอากาศในแต่ละประเภทของอาคารต้องมีค่าไม่เกินดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ค่าการถ่ายเทความร้อนของหลังคาอาคาร

ประเภทอาคาร	ค่าการถ่ายเทความร้อนของหลังคาอาคาร (วัตต์ต่อตารางเมตร)
(ก) สถานศึกษา สำนักงาน	15
(ข) โรงแรมที่พัก ศูนย์การค้า สถานบริการ ห้างสรรพสินค้า อาคารชุมนุมคน	12
(ค) โรงแรม สถานพยาบาล อาคารชุด	10

อาคารที่มีการใช้งานพื้นที่หลายลักษณะ พื้นที่แต่ละส่วนต้องใช้ข้อกำหนดของระบบปรับอากาศตามลักษณะการใช้งานของพื้นที่แต่ละส่วนนั้น

2) ระบบไฟฟ้าและแสงสว่าง การใช้ไฟฟ้าส่องสว่างภายในอาคาร โดยไม่รวมพื้นที่จอดรถ การใช้ไฟฟ้าส่องสว่างภายในอาคาร ต้องให้ได้ระดับความส่องสว่างสำหรับงานแต่ละประเภทอย่างเพียงพอ และเป็นไปตามกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคารหรือกฎหมายเฉพาะว่าด้วยการนั้นกำหนด และอุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับใช้ส่องสว่างภายในอาคารต้องใช้กำลังไฟฟ้าในแต่ละประเภทของอาคารมีค่าไม่เกินดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 ค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุด

ประเภทอาคาร	ค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุด (วัตต์ต่อตารางเมตรของพื้นที่ใช้งาน)
(ก) สถานศึกษา สำนักงาน	14
(ข) โรงแรมที่พัก ศูนย์การค้า สถานบริการ ห้างสรรพสินค้า อาคารชุมนุมคน	18
(ค) โรงแรม สถานพยาบาล อาคารชุด	12

3) ระบบปรับอากาศ (ขนาดเล็ก, ขนาดใหญ่, แบบดูดกลืน) ประเภทและขนาดต่างๆ ของระบบปรับอากาศที่ติดตั้งในอาคาร ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ ค่าประสิทธิภาพการให้ความเย็นในรูปของอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานและค่าพลังไฟฟ้าต่อตันความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานขั้นต่ำของเครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก

ขนาดของเครื่องปรับอากาศ (วัตต์)	ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (วัตต์ต่อวัตต์)	อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (ปีที่ยุติชั่วโมงต่อวัตต์)
ไม่เกิน 12,000	3.22	11

หมายเหตุ: 1 ต้นความเย็น (RFT) เท่ากับ 12,000 ปีที่ยุติชั่วโมง (Btu/hr) หรือเท่ากับ 3516.7 วัตต์ความร้อน (W_{th})

สำหรับระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ต้องมีค่าพลังไฟฟ้าต่อต้นความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นและส่วนประกอบอื่นของระบบปรับอากาศดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.5 ค่าพลังไฟฟ้าต่อต้นความเย็นของเครื่องระบบปรับอากาศขนาดใหญ่

ประเภทของเครื่องทำน้ำเย็น สำหรับระบบปรับอากาศ		ขนาดความสามารถใน การทำความเย็นที่ภาระ พิกัดของเครื่องทำความ เย็น (ต้นความเย็น)	ค่าพลังไฟฟ้าต่อต้น ความเย็น (กิโลวัตต์ ต่อต้นความเย็น)
ชนิดการระบายความ ร้อน	แบบของเครื่องอัด		
ระบายความร้อนด้วย อากาศ	ทุกชนิด	น้อยกว่า 300	1.33
		มากกว่า 300	1.31
ระบายความร้อนด้วย น้ำ	แบบลูกสูบ	ทุกขนาด	1.24
	แบบโรตารี แบบสกรู หรือแบบสกรอลล์	น้อยกว่า 150	0.89
		มากกว่า 150	0.78
	แบบแรงเหวี่ยง	น้อยกว่า 500	0.76
		มากกว่า 500	0.62

ส่วนประกอบอื่นของระบบปรับอากาศที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยระบบระบายความร้อน ระบบจ่ายน้ำเย็น และระบบส่งลมเย็น ต้องมีค่าพลังไฟฟ้าต่อต้นความเย็น รวมกันไม่เกิน 0.5 กิโลวัตต์ต่อต้นความเย็น เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดกลืนต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำแล้วแต่กรณีดังต่อไปนี้ ทั้งนี้ การคิดค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะให้คิดเฉพาะค่าความร้อนเท่านั้น โดยไม่รวมกำลังไฟฟ้าในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 กำหนดภาวะพิกัดโดยระบุอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำระบาย ความร้อนเข้าเครื่อง
ควบแน่น

ชนิดของ เครื่องทำ น้ำเย็น แบบดูดกลืน	ภาวะพิกัด				ค่า สัมประสิทธิ์ สมรรถนะ
	ด้านน้ำเย็น		ด้านน้ำระบายความร้อน		
	อุณหภูมิ น้ำเย็นเข้า	อุณหภูมิ น้ำเย็นออก	อุณหภูมิ น้ำเข้าเครื่อง ควบแน่น	อัตราการไหล ของน้ำเข้า เครื่องควบแน่น	
	(องศาเซลเซียส)			(ลิตรต่อวินาทีต่อกิโลวัตต์)	
ก. ชั้นเดียว	12.0	7.0	32.0	0.105	0.65
ข. สองชั้น	12.0	7.0	32.0	0.079	1.10

ตารางที่ 2.7 กำหนดภาวะพิกัดโดยระบุอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าและออกจากเครื่อง
ควบแน่น

ชนิดของ เครื่องทำ น้ำเย็น แบบดูดกลืน	ภาวะพิกัด				ค่าสัมประสิทธิ์ สมรรถนะ
	ด้านน้ำเย็น		ด้านน้ำระบายความร้อน		
	อุณหภูมิ น้ำเย็นเข้า	อุณหภูมิ น้ำเย็นออก	อุณหภูมิ น้ำเข้าเครื่อง ควบแน่น	อุณหภูมิ น้ำออกจาก เครื่องควบแน่น	
	(องศาเซลเซียส)				
ก. ชั้นเดียว	12.0	7.0	32.0	37.5	0.65
ข. สองชั้น	12.0	7.0	32.0	37.5	1.10

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน และค่าพลังไฟฟ้าต่อตันความเย็นที่กำหนด
ไว้ในตารางที่ 2.5 ไม่ใช่บังคับกับระบบปรับอากาศที่ใช้แหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์

4) อุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน อุปกรณ์ผลิตน้ำร้อนที่ติดตั้งในอาคาร

สำหรับอุปกรณ์ผลิตน้ำร้อนที่ติดตั้งภายในอาคาร ต้องมีค่าประสิทธิภาพขั้นต่ำและค่าสัมประสิทธิ์
สมรรถนะขั้นต่ำดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 ค่าประสิทธิภาพและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำหม้อไอน้ำและหม้อต้มน้ำร้อน

ประเภท	ค่าประสิทธิภาพขั้นต่ำ (ร้อยละ)
(ก) หม้อไอน้ำที่ใช้ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง (oil fired steam boiler)	85
(ข) หม้อต้มน้ำร้อนที่ใช้ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง (oil fired hot water boiler)	80
(ค) หม้อไอน้ำที่ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง (gas fired steam boiler)	80
(ง) หม้อต้มน้ำร้อนที่ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง (gas fired hot water boiler)	80

ตารางที่ 2.9 เครื่องทำน้ำร้อนชนิดฮีตปั๊มแบบใช้อากาศเป็นแหล่งพลังงาน (air-source heat pump water heater)

ภาวะพิกัด				ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำ
ลักษณะการ ออกแบบ	อุณหภูมิ น้ำเข้า	อุณหภูมิ น้ำออก	อุณหภูมิ อากาศ	(องศาเซลเซียส)
	(ก) แบบที่ 1	30.0	50.0	
(ข) แบบที่ 2	30.0	60.0	30.0	3.0

5) การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร

เกณฑ์การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารต้องมีค่าการใช้พลังงานโดยรวมของอาคารดังกล่าวต่ำกว่าค่าการใช้พลังงานโดยรวมของอาคารอ้างอิงที่มีพื้นที่ การใช้งาน ทิศทาง และพื้นที่ของกรอบอาคารแต่ละด้านเป็นเช่นเดียวกับอาคารที่จะก่อสร้างหรือดัดแปลง และมีค่าของระบบกรอบอาคาร ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และระบบปรับอากาศ เป็นไปตามข้อกำหนดของแต่ละระบบ

6) การใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่างๆ ในอาคาร

เมื่อมีการใช้พลังงานหมุนเวียนในอาคาร ให้ยกเว้นการนับรวมการใช้ไฟฟ้าบางส่วนในอาคาร ในกรณีที่ระบบไฟฟ้าแสงสว่างของอาคารที่มีการออกแบบเพื่อใช้แสงธรรมชาติเพื่อการส่องสว่างภายในอาคารในพื้นที่ตามแนวกรอบอาคาร ให้ถือเสมือนว่าไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่างในพื้นที่ตามแนวกรอบอาคารนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กรอบอาคารและปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

1) ผนังทึบ สมรรถนะเชิงอุณหภาพของผนังทึบ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Coefficient of heat transfer หรือ U)

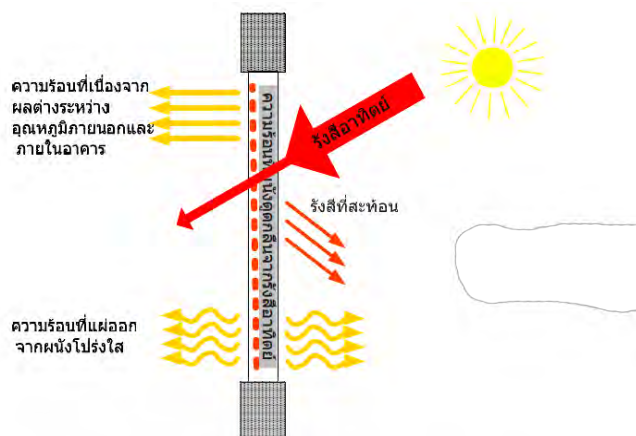
- ผนังอิฐฉาบปูนหรือซีเมนต์บล็อกฉาบปูน $U \approx 3-5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
- ผนังอิฐมวลเบา $U \approx 1-4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

โดยผนังทึบจะมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนตามแผนภาพในรูปที่ 2.1 สำหรับค่าการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร (U) ถ้ามีค่าต่ำ หมายความว่า การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารนั้นจะน้อย แต่หากค่าการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร (U) มีค่าสูง หมายความว่า การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารจะมาก



ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของผนังทึบ ซึ่งได้แก่ สีภายนอกอาคาร สีทาภายนอกอาคารมีผลต่อการดูดกลืนรังสีอาทิตย์และการถ่ายความร้อนเข้าสู่อาคาร ผนังสีอ่อนจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์น้อยกว่าผนังสีเข้ม และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผนังที่ใช้กันมีค่าในช่วง $0.3-0.8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ถ้าเป็นผนังที่มีฉนวนก็จะมีค่าสมบัตินำความร้อนต่ำ และช่วยลดค่า U ของผนังและหลังคา โดยผนังที่มีฉนวน $U = 0.3-1.0 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ขึ้นกับชนิดและความหนาฉนวน ผิวสะท้อนรังสีความร้อนของฉนวนลดการถ่ายเทความร้อนให้ต่ำลงอีก การเลือกใช้ฉนวนกับหลังคาของอาคารปรับอากาศมีความคุ้มค่าสูง สำหรับผนังทึบนั้นจะมีการคายความร้อนสู่บรรยากาศในช่วงเวลากลางคืน และผนังที่มีมวลอุณหภูมิต่ำสูงนั้นจะสามารถลดภาระการปรับอากาศสำหรับอาคารปรับอากาศเฉพาะช่วงเช้า เพราะในช่วงเวลาตอนเช้านั้นผนังทึบนี้จะไม่มีการถ่ายเทความร้อนออกมาในช่วงเวลาดังกล่าว แต่หากเป็นช่วงเวลาในช่วงบ่ายนั้น ภาระการปรับอากาศสูงขึ้นสำหรับระบบปรับอากาศในช่วงบ่าย

2) ผนังโปร่งแสง การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังโปร่งแสง (ผนังกระจก) โดยจะมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนตามแผนภาพในรูปที่ 2.2 หน้าต่างกระจกทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารได้สูง ความร้อนที่เกิดขึ้นซึ่งรวมผลของรังสีอาทิตย์ที่ถ่ายเทผ่านผนังโปร่งแสงเข้าสู่อาคารต่อหน่วยพื้นที่มีปริมาณ 5 เท่าของผนังทึบทั่วไป



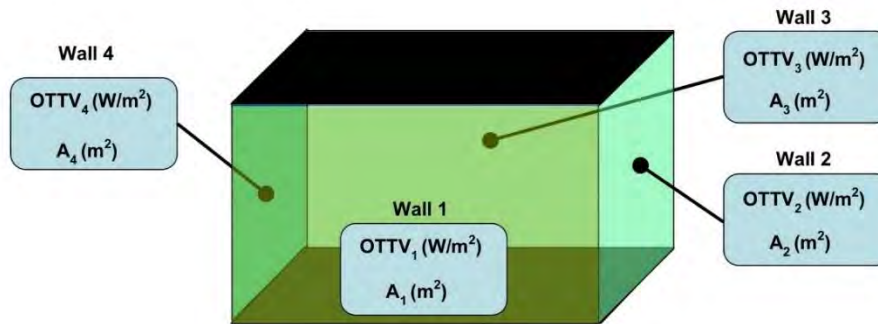
รูปที่ 2.2 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังโปร่งแสง ที่มา : <http://www2.dede.go.th>

รังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนไว้จะทำให้อุณหภูมิของกระจกสูงขึ้นและเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยส่วนหนึ่งเข้าสู่อาคารและอีกส่วนที่เหลือสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก พลังงานความร้อนที่เกิดจากการส่งผ่านรังสีอาทิตย์โดยตรงผ่านกระจก และความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้และถ่ายเทเข้าสู่อาคาร ยังมีความร้อนอีกส่วนหนึ่งถ่ายเทผ่านกระจก ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน อันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกและภายในอาคารในช่วงเวลากลางคืน ความร้อนสามารถถ่ายเทผ่านกระจกไปยังสิ่งแวดล้อมได้เช่นเดียวกับกรณีของผนังทึบ

2.2.1 ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง

ปัจจุบันลักษณะของกรอบอาคารมีความหลากหลายมากและขึ้นอยู่กับลักษณะการออกแบบ สำหรับปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคารนั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นอีกหลายอย่าง ดังนั้น การที่จะตรวจวัดเพื่อให้ทราบปริมาณความร้อนที่ผ่านกรอบอาคารเหมือนระบบอื่นๆ เช่น ระบบไอน้ำ เตาอุตสาหกรรม ฯลฯ จึงเป็นสิ่งที่แทบจะเป็นไปไม่ได้ยากดังนั้น จึงเลือกใช้วิธีการคำนวณเพื่อประเมินปริมาณความร้อนที่จะถ่ายเทเข้าสู่อาคาร รวมถึงวิเคราะห์สมรรถนะของกรอบอาคารทดแทน วิธีการหนึ่งซึ่งเป็นที่ใช้กันมานานอย่างต่อเนื่องและเป็นที่ยอมรับกันดี คือ การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังและหลังคาของกรอบอาคาร ดัชนีแสดงปริมาณความร้อนเฉลี่ยที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคาร (ครอบคลุมทั้งผนังทึบและผนังโปร่งแสง) ที่เป็นผลต่อภาวะการปรับอากาศของอาคาร ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (OTTV) คือ ดัชนีแสดงปริมาณความร้อนเฉลี่ยที่ถ่ายเทผ่านเปลือกอาคาร (ครอบคลุมทั้งผนังทึบและผนังโปร่งแสง) ที่เป็นผลต่อภาวะการปรับอากาศของอาคาร OTTV ของอาคารที่มีการปรับอากาศ คำนวณจากค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคารแต่ละด้าน OTTV_i รวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังในแต่ละด้าน

$$OTTV_i = (U_w)(1-WWR)(TD_{eq}) + (U_f)(WWR)(\Delta T) + (WWR)(SHGC)(SC)ESR \quad (2.1)$$

$$OTTV = \frac{(A_{w1})(OTTV_1) + (A_{w2})(OTTV_2) + \dots + (A_{wi})(OTTV_i)}{A_{w1} + A_{w2} + \dots + A_{wi}} \quad (2.2)$$

- โดย $OTTV_i$ คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านที่พิจารณา (W/m^2)
- U_w คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทึบ ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)
- WWR คือ อัตราส่วนพื้นที่ของหน้าต่างโปร่งแสงต่อพื้นที่ทั้งหมดของผนังด้านที่พิจารณา
- TD_{eq} คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า ($^\circ C$)
- U_f คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังโปร่งแสง/กระจก ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)
- ΔT คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร ($^\circ C$)
- $SHGC$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่าน ผนังโปร่งแสง หรือ กระจก
- SC คือ ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด
- ESR คือ ปริมาณรังสีอาทิตย์ตกกระทบที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังโปร่งแสง (W/m^2)
- A_{wi} คือ พื้นที่ผนังด้านที่พิจารณา (W/m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลัง

ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลัง (RTTV) มีวิธีการคำนวณเช่นเดียวกับค่า OTTV

$$RTTV_j = (U_r)(1-SRR)(TD_{eq}) + (U_s)(SRR)(\Delta T) + (SRR)(SHGC)(SC)(ESR) \quad (2.3)$$

$$RTTV = \frac{(A_{r1})(RTTV_1) + (A_{r2})(RTTV_2) + \dots + (A_{ri})(RTTV_i)}{A_{r1} + A_{r2} + \dots + A_{ri}} \quad (2.4)$$

โดย $RTTV_j$ คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังค่าที่พิจารณา (W/m^2)
 U_r คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหลังคาทึบ ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)
 SRR คือ อัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาโปร่งแสงต่อพื้นที่ทั้งหมดของหลังคาส่วนที่พิจารณา
 TD_{eq} คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า ($^\circ C$)
 U_s คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหลังคาโปร่งแสง ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)
 ΔT คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร ($^\circ C$)
 $SHGC$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านหลังคาโปร่งแสง
 SC คือ ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด
 ESR คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาโปร่งแสงและหลังคาทึบแสง (W/m^2)
 A_{ri} คือ พื้นที่หลังคาด้านที่พิจารณา (W/m^2)

2.3 การคำนวณค่าสมบัติเชิงอุณหภาพของระบบเปลือกอาคาร

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังทึบ (U_w) และผนังโปร่งแสง (U_f) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังทึบ (U_w) นั้นสามารถหาได้จาก

$$U_w = \frac{1}{R_T} \quad (2.5)$$

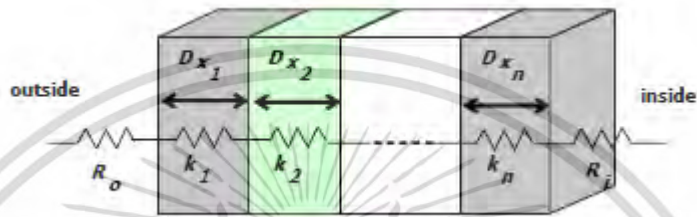
ค่าของความต้านทานความร้อน (R) หาได้ดังต่อไปนี้

$$R = \frac{\Delta x}{k} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดย Δx คือ ความหนาของวัสดุ (m)
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมของวัสดุ ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)
 R คือ ความต้านทานความร้อนของวัสดุ ($(m^2 \cdot ^\circ C)/W$)

สำหรับผนังที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิดดังรูปที่ 2.4 ค่าของความต้านทานความร้อนจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7



รูปที่ 2.4 ผนังที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด

$$R_T = R_o + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \dots + \frac{\Delta x_n}{k_n} + R_i \tag{2.7}$$

- โดย R_T คือ ความต้านทานความร้อนรวมของอาคาร
 R_o คือ ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอกอาคาร
 R_i คือ ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายในอาคาร
 Δx_n คือ ความหนาของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบเป็นผนังอาคาร
 k_n คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบเป็นผนังอาคาร

สำหรับผนังที่มีช่องว่างอากาศอยู่ภายในดังรูปที่ 2.5 ค่าของความต้านทานความร้อนจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8



รูปที่ 2.5 ผนังที่มีช่องว่างอากาศอยู่ภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_T = R_o + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \dots + R_o + \dots + \frac{\Delta x_n}{k_n} + R_i \quad (2.8)$$

โดย

R_o คือ ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่อยู่ภายในช่องว่างอากาศภายในผนัง
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังโปร่งแสง (U_f) นั้นสามารถหาได้จาก

$$U_f = \frac{1}{R_f} \quad (2.9)$$

โดย

R_f คือ ความต้านทานความร้อนรวมของอาคาร

$$R_f = R_i + \frac{\Delta x}{k_g} + R_o \quad (2.10)$$

โดย

R_i คือ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่พื้นผิวของผนังภายใน

R_o คือ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่พื้นผิวของผนังภายนอก

Δx_n คือ ความหนาของกระจกหรือผนังโปร่งแสง

k_n คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุกระจก

2.3.1 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (TDeq)

ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (TDeq) คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิซึ่งรวมผลการ
ดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผนังทึบ ซึ่งจะแปรผันตามสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (α) มวลสาร
ของวัสดุผนัง (Density-Specific Heat product, DSH) ทิศทางและมุมเอียงของผนัง

2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (SHGC)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (SHGC) แสดงอัตราส่วนของรังสีอาทิตย์
ที่ส่งผ่านวัสดุโปร่งแสงหรือโปร่งใสของช่องแสง (ของทั้งผนังและหลังคา) และก่อให้เกิดการถ่ายเท
ความร้อนเข้าภายในอาคาร โดยค่า SHGC รวมผลความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจกหรือวัสดุ
โปร่งแสงโดยตรงและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนไว้ในตัวกระจกหรือวัสดุ
โปร่งแสงเข้ามาภายในอาคาร

2.3.3 สัมประสิทธิ์การบังแดด (Shading Coefficient; SC)

สัมประสิทธิ์การบังแดด (Shading Coefficient; SC) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.11

$$SC = \frac{E_{ew}}{E_{et\theta}} \quad (2.11)$$

โดย

E_{ew} คือ รังสีอาทิตย์ที่ผ่านอุปกรณ์บังแดดมาตกกระทบบนหน้าต่าง/ผนังด้านที่พิจารณา

$E_{et\theta}$ คือ รังสีรวมของดวงอาทิตย์ทั้งหมดที่ตกกระทบหน้าต่างที่พิจารณาเสมือนหนึ่งไม่มีอุปกรณ์บังแดด

2.4 การจัดการความร้อนภายในอาคาร

การจัดการความร้อน คือ การควบคุมอุณหภูมิผ่านการใช้อุปกรณ์ต่างๆและมีการใช้วิธีการทำความเย็นหรือความร้อนเข้ามามีส่วนร่วม เพื่อให้ความสะดวกสบายแก่มนุษย์ รวมไปถึงการทำงานของระบบส่วนใหญ่ในปัจจุบันตั้งแต่อุปกรณ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันไปจนถึงอุตสาหกรรมการติดตั้ง ซึ่งในที่นี้ได้ใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.6 ได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และตัวเลขการจำลองซึ่งสามารถแสดงผลเกี่ยวกับข้อมูลอาคารที่เกิดจากกระบวนการสร้างแบบจำลอง (BIM) เพิ่มประสิทธิภาพในการใช้จำลองเพื่อการจัดการความร้อนและการตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนในที่ไม่จำเป็น เพื่อเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอาคารในอนาคตให้มีประสิทธิภาพ การจำลองยังคำนึงถึงองค์ประกอบทางฟิสิกส์ เช่น การแปรผันของอุณหภูมิ การนำความร้อน การขยายตัว การแผ่รังสี และการระบายความร้อนด้วยการพาความร้อน เพื่อทำหน้าที่เป็นโซลูชันการออกแบบที่ครอบคลุม สำหรับการใช้งานที่นำเสนอประเมินเกี่ยวกับแนวคิดการออกแบบอาคาร

2.4.1 กลไกของการถ่ายเทความร้อน

การควบคุมความร้อนต้องเข้าใจความแตกต่างของกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคาร การนำและการพาความร้อนที่เกิดขึ้นผ่านองค์ประกอบวัสดุที่บดบังแสง เช่น หลังคาและผนังในอาคาร วัสดุโปร่งใส เช่น หน้าต่างและกระจก การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่สามารถทำให้พื้นที่ต่างๆร้อนขึ้นได้ผ่านวัสดุต่างๆ เช่น ผนัง หน้าต่าง เป็นต้น ในขณะที่การพาความร้อนเกิดขึ้นในอากาศภายในอาคารผ่านการระบายอากาศ

2.4.2 การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นกลไกทางกายภาพที่การถ่ายโอนพลังงานภายใน (Internal energy) ผ่านการชนของอนุภาคในระดับจุลทรรศน์และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในวัตถุ อนุภาคที่มีการชนกันนี้ซึ่งรวมถึงโมเลกุล อะตอม และอิเล็กตรอน ถ่ายโอนพลังงานศักย์และจลน์อย่างไม่เป็นระเบียบในระดับจุลทรรศน์ การนำความร้อนเกิดขึ้นในทุกสถานะของสสาร ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว แก๊ส และคลื่น โดยมีสมการ เรียกว่า กฎฟูเรียร์ (Fourier's law) โดยกฎข้อนี้กล่าวว่า ความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อน (heat flux) เฉพาะบริเวณ มีค่าเท่ากับผลคูณของสภาพนำความร้อนของวัสดุ (k) และเกรเดียนต์ลบเฉพาะบริเวณของอุณหภูมิ ($-\nabla T$) ความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อน คือ ปริมาณของพลังงานที่ไหลผ่านหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา

$$q = -k \nabla T \quad (2.12)$$

โดย q คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อนเฉพาะบริเวณ (W/m^2)
 k คือ สภาพนำความร้อนของวัสดุ (W/m.K)
 ∇T คือ เกรเดียนต์อุณหภูมิ (K/m)

การแพร่ความร้อน ค่า ρc_p ที่พบในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน เรียกว่าความจุความร้อนของวัสดุ โดยทั้งค่าความจุความร้อนจำเพาะ (c_p) และค่าความจุความร้อนของวัสดุ (ρc_p) จะแสดงถึงความสามารถในการเก็บความร้อนของวัสดุ แต่ค่า c_p แสดงในหน่วยต่อมวล (J/kg.K) และค่า ρc_p แสดงในหน่วยต่อปริมาตร ($\text{J/m}^3.\text{K}$)

คุณสมบัติของวัสดุอีกประการหนึ่งที่ปรากฏในการวิเคราะห์การนำความร้อนชั่วคราวคือการกระจายความร้อน ซึ่งแสดงถึงความรวดเร็วในการกระจายความร้อนผ่านวัสดุ ถูกกำหนดดังสมการ

$$\alpha = \frac{\text{Heat conduction}}{\text{Heat Storage}} = \frac{k}{\rho c_p} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2.13)$$

ค่าการนำความร้อน k แสดงว่าวัสดุนำความร้อนได้ดีเพียงใด และความจุความร้อน ρc_p แสดงถึงปริมาณพลังงานที่วัสดุเก็บไว้ต่อปริมาตรต่อหน่วย ดังนั้นการกระจายความร้อนของวัสดุจึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถมองได้ว่าเป็นอัตราส่วนของความร้อนที่ไหลผ่านวัสดุต่อความร้อนที่เก็บไว้ต่อหน่วยปริมาตร วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูงหรือความจุความร้อนต่ำจะมีการกระจายความร้อนมากอย่างเห็นได้ชัด ยิ่งมีการกระจายความร้อนมากเท่าใด ความร้อนก็จะยิ่งกระจายเข้าสู่ตัวกลางเร็วขึ้นเท่านั้น ค่าการกระจายความร้อนเพียงเล็กน้อยหมายความว่าวัสดุดูดซับความร้อนเป็นส่วนใหญ่และมีความร้อนเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย

2.4.3 การพาความร้อน

การพาความร้อนที่พื้นผิวเกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหล และเป็นผลมาจากการถ่ายเทพลังงานโดยมวลหรือการเคลื่อนที่แบบมหภาค โดยการพาความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติหรือแบบอิสระ (Natural or Free Convection) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกใดๆทำให้ของไหลเคลื่อนที่แต่เกิดจากแรงลอยตัวของของไหลเอง และการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม เครื่องสูบลม เป็นต้น การพาความร้อนแบบบังคับหรือแบบอิสระจะพิจารณาเมื่อการไหลของของไหลเกิดโดยแรงพุงหรือวิธีการภายนอกตามลำดับ โดยมีสมการ ที่เรียกว่ากฎการระบายความร้อนของนิวตัน โดยที่มีพารามิเตอร์ h ($W/m^2.K$) เป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

$$q = -h(T_s - T_\infty) \quad (2.14)$$

โดย q คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อนเฉพาะบริเวณ (W/m^2)

T_s คือ อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

T_∞ คือ อุณหภูมิของของเหลว (K)

2.4.4 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน ดังเช่น การนำความร้อน และการพาความร้อน การแผ่รังสีสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านอากาศได้ วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า $-273^\circ C$ หรือ 0 K ย่อมมีการแผ่รังสี

วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงแผ่รังสีคลื่นสั้น วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำแผ่รังสีคลื่นยาว เช่น การตากปลาแห้ง ตากเสื้อผ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ้ากลางแจ้ง ทั้งนี้การแผ่รังสี คือการถ่ายโอนความร้อนโดยไม่ต้องผ่านตัวกลางใดๆ เช่น ความร้อนที่เกิดจากดวงอาทิตย์ถือเป็นความร้อนที่เกิดจากการถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสี โดยที่วัตถุแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนความร้อนจากการแผ่รังสีได้ไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสีของวัตถุและผิวของวัตถุสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q = \epsilon \sigma T_s^4 - \alpha G \quad (2.15)$$

โดย	q	คือ	ความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อนเฉพาะบริเวณ (W/m^2)
	ϵ	คือ	ความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุที่อุณหภูมิใด ๆ
	σ	คือ	ค่าคงที่ของสเตฟานโบลท์สมานน์ มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} ($W/m^2 \cdot K^4$)
	T_s	คือ	อุณหภูมิของพื้นผิว (K)
	α	คือ	ค่าการดูดซับของวัตถุ
	G	คือ	ค่าการแผ่รังสี (W/m^2)

2.5 ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

ระบบไฟฟ้าแสงสว่างในอาคารพาณิชย์เป็นระบบที่ใช้พลังงานเป็นอันดับสองรองจากระบบปรับอากาศดังนั้นประสิทธิภาพการให้แสงสว่างของหลอดไฟฟ้าและอุปกรณ์ประกอบ เช่น หลอดไฟและ บัลลาสต์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ดัชนีที่ใช้ชี้ประสิทธิภาพของการให้แสงของหลอดไฟฟ้ามักมีหน่วยเป็น ปริมาณฟลักซ์ของแสงต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้ (Lumen/Watt หรือ lm/W) และการกำหนดประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าแสงสว่างจะใช้วิธีกำหนดค่าขั้นสูงของกำลังไฟฟ้าของระบบแสงสว่างของแต่ละประเภทของพื้นที่หรือของทั้งอาคารโดยรวม (Lighting power density, LPD) แต่ในบางแห่งมีการกำหนดค่าขั้นต่ำของประสิทธิภาพของการให้แสงของหลอดไฟฟ้าที่ใช้ได้

2.5.1 การคำนวณโดยวิธีวัดต่อตารางเมตร

หลักสำคัญประการหนึ่งของการออกแบบระบบส่องสว่างก็คือ การประหยัดพลังงาน หมายถึงการมีแสงสว่างพอเพียงต่อการใช้งานแต่ใช้พลังงานน้อยที่สุด การออกแบบโดยวิธีวัดต่อตารางเมตร (watt per square meter method) นี้ จะกำหนดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ไม่ให้เกินค่าที่เหมาะสม ซึ่งเป็นไปตามพระราชกฤษฎีกา กำหนดอาคารควบคุม พ.ศ. 2535 ว่าด้วยเรื่องการใช้พลังงานในอาคารสามารถอ้างอิงได้จากกฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2563 วิธีวัดต่อตารางเมตรนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อตารางเมตรประยุกต์มาจากวิธีลูเมน มีขั้นตอนที่สั้นลงและมีความสะดวก มากขึ้น หลักการของวิธีนี้ มาจากปัญหาว่าจะติดตั้งโคมไฟกี่วัตต์ จึงจะทำให้มีแสงสว่างพอเพียงต่อการใช้งาน ซึ่งที่มาและ หลักการของวิธีนี้กล่าวไว้โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน มีวิธีการคำนวณดังนี้

$$\frac{W}{m^2} = \frac{E}{(LPW)CU \times MF}$$

เมื่อ

E คือ การความส่องสว่าง

LPW หรือ lm/w คือ หน่วยของประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอดที่จะติดตั้ง

CU คือ สัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ของดวงโคม (coefficient of utilization, CU)

MF คือ ตัวประกอบการบำรุงรักษา (maintenance factor, MF)

2.5.2 การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างนี้ ควรตระหนักที่ผู้ใช้อาคารต้องการที่ใช้ จุดประสงค์ในการใช้ประโยชน์จากระบบแสงสว่างเพื่อให้ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้อาคารได้ แต่การที่จะออกแบบเพื่อตอบสนองต่อผู้ใช้อาคารแล้ว ควรหาทราบการใช้แสงสว่างแต่ละระดับแสง สว่างของงาน ซึ่งจะไม่ยึดติดกับกฎเกณฑ์ทั่วไปของระบบแสงสว่าง และออกแบบตามความเหมาะสม ของงาน สภาพแวดล้อมต่างๆ จึงเป็นการจัดการเรื่องการใช้ประโยชน์ระบบแสงสว่างให้มี ประสิทธิภาพได้ดี โดยผู้ที่อยู่อาศัยไม่เกิดความรำคาญไปในตัวด้วยเองต่อมาในอีกส่วนปัจจัยหนึ่งที่ต้อง ตระหนัก คือความสบายในการมองเห็น ของผู้ใช้อาคารที่เหมาะสม ของระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และ ทัศนียภาพการมองเห็น ต้องไม่ให้เกิดความจำจากความเข้มแสงได้ ซึ่งก็ไม่ควรมีความแตกต่างความ เข้มแสงด้วย แนะนำให้ควรมีความสว่างอยู่ที่ระดับอัตราส่วนระหว่างความสว่างที่สว่างสุดกับความสว่างที่ ต่ำสุดในบริเวณหนึ่งต้องกว่า 10 ต่อ 1 การให้แสงสว่างอย่างอนุรักษ์พลังงาน เป็นการให้แสงสว่างที่ คำนึงแสงให้ตกกระทบโดยไม่มีแสงสูญเสียระหว่างที่ผ่านตัวกลางใดๆ จึงต้องให้เกิดประโยชน์สูงสุด จากประสิทธิภาพแหล่งแสงสว่างเองด้วย ซึ่งมีตัวช่วยในการเพิ่มการส่องสว่าง เช่น การเลือกสีผนัง หรือวัสดุผิวขาวเพื่อให้การเพิ่มความสว่างเอง ให้มีคุณภาพดี และการเลือกเลือกโคมไฟก็เป็นสิ่งที่ต้อง คำนึงให้สามารถใช้ไฟฟ้าในการเกิดแสงสว่างที่ดีที่สุด เป็นให้ใช้แหล่งแสงสว่างเหมาะสมทั้งทางด้าน เทคนิค และการใช้ประโยชน์ของผู้อยู่อาศัยภายในอาคารอีกด้วย การควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างควรมีการจัดการให้มีความชัดเจนไปในตัว โดยแบ่งเป็น ประเภทลักษณะของแต่ละโซนว่ามีการติดตั้งสวิทช์แก่ระบบแสงสว่างตามตำแหน่งต่าง ๆ ชัดเจน และ การที่จะติดตั้งต้องสังเกตแต่ละบริเวณมรแสงจากธรรมชาติมาอย่างน้อยเพียงใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 การใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง

อาคารประเทศไทยส่วนใหญ่อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบสว่างคิดเป็นร้อยละ 20 ของการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยทั้งหมดของอาคาร สำหรับบทที่ 2 จะอธิบายจากการศึกษา ของภาระทางไฟฟ้าที่มาจากความร้อนเครื่องใช้ไฟฟ้าของระบบแสงสว่าง ส่วนหนึ่งก็มาจากการปรับอากาศถึงร้อยละ 25 โดยการออกแบบครีเอทีฟถึงประสิทธิภาพของการให้แสงสว่าง อนุรักษ์พลังงาน และการนำแสงธรรมชาติมาประยุกต์ให้เกิดประโยชน์สูงสุดด้วย

2.5.3.1 การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างนี้ ควรตระหนักที่ผู้ใช้อาคารต้องการที่ใช้จุดประสงค์ในการใช้ประโยชน์จากระบบแสงสว่างเพื่อให้ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้อาคารได้ แต่การที่จะออกแบบเพื่อตอบสนองต่อผู้ใช้อาคารแล้ว ควรทราบการใช้แสงสว่างแต่ละระดับแสงสว่างของงาน ซึ่งจะไม่ยึดติดกับกฎเกณฑ์ทั่วไปของระบบแสงสว่าง และออกแบบตามความเหมาะสมของงาน สภาพแวดล้อมต่างๆ จึงเป็นการจัดการเรื่องการใช้ประโยชน์ระบบแสงสว่างให้มีประสิทธิภาพได้ดี โดยผู้ที่อยู่อาศัยไม่เกิดความรำคาญไปในตัวด้วยเอง ต่อมาในอีกส่วนปัจจัยหนึ่งที่ต้องตระหนัก คือ ความสบายในการมองเห็น ของผู้ใช้อาคารที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และทัศนียภาพการมองเห็น ต้องไม่ให้เกิดความจำจากความเข้มแสงได้ ซึ่งก็ไม่ควรมีความแตกต่างความเข้มแสงด้วยแนะนำให้ควรมีความสว่างอยู่ที่ระดับอัตราส่วนระหว่างความสว่างที่สว่างสุดกับความสว่างที่ต่ำสุดในบริเวณหนึ่งต้องกว่า 10 ต่อ 1 การให้แสงสว่างอย่างอนุรักษ์พลังงาน เป็นการให้แสงสว่างที่คำนึงแสงให้ตกกระทบโดยไม่มีแสงสูญเสียดังที่ผ่านตัวกลางใดๆ จึงต้องให้เกิดประโยชน์สูงสุดจากประสิทธิภาพแหล่งแสงสว่างเองด้วย เช่น การเลือกสีผนัง หรือวัสดุผิวขาวเพื่อให้การเพิ่มความสว่างเองให้มีคุณภาพดี และการเลือกเลือกโคมไฟก็เป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงให้สามารถใช้ไฟฟ้าในการเกิดแสงสว่างที่ดีที่สุด เป็นให้ใช้แหล่งแสงสว่างเหมาะสมทั้งทางด้านเทคนิค และการใช้ประโยชน์ของผู้อยู่อาศัยภายในอาคารอีกด้วย

การควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่างโดยแบ่งเป็นประเภทลักษณะของแต่ละโซนว่ามีการติดตั้งสวิตช์แก่ระบบแสงสว่างตามตำแหน่งต่าง ๆ ชัดเจน และการที่จะติดตั้งต้องสังเกตแต่ละบริเวณว่ามีแสงจากธรรมชาติมากน้อยเพียงใด

2.5.3.2 การใช้แสงธรรมชาติ

ในประเทศไทยมีแสงที่มาจากธรรมชาติสูง และเวลาใช้แสงสว่างมีความสม่ำเสมอเป็นอย่างมากตลอดทั้งปี ปัจจัยในการลดภาระทางความร้อนจากรังสีอาทิตย์ โดยใช้วัสดุโปร่งแสง คือกระจกที่มีคุณสมบัติการลดทอนการถ่ายเทความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์

2.6 การออกแบบระบบไฟฟ้า

2.6.1 วงจรย่อย

ขนาดตัวนำของวงจรย่อยต้องมีขนาดกระแสไม่น้อยกว่าโหลดสูงสุดที่คำนวณได้และต้องไม่น้อยกว่าพิกัดของเครื่องป้องกันกระแสเกินของวงจรย่อย และกำหนดให้ขนาดตัวนำของวงจรย่อยต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 2.5 ตร.มม. กรณีวงจรย่อยไฟฟ้าแสงสว่าง 3 เฟส 4 สาย ที่จ่ายโหลด 1 เฟส และเดินรวมในช่องเดินสายเดียวกัน อนุญาตให้ใช้ตัวนำนิวทรัลร่วมกันได้ โดยโหลดแต่ละเฟสต้องมีโหลดใกล้เคียงกันและขนาดตัวนำนิวทรัลไม่เล็กกว่าตัวนำเฟสยกเว้นโหลดที่มีฮาร์มอนิกส์สูง ข้อควรระวังหากสายนิวทรัลหลุดอาจทำให้เกิดแรงดันเกินได้

2.6.2 การป้องกันกระแสเกิน

- (1) อาคารที่มีความสูงเกิน 1 ชั้น ต้องแยกวงจรย่อยอย่างน้อยชั้นละ 1 วงจร
- (2) วงจรย่อยต้องมีการป้องกันกระแสเกิน โดยขนาดพิกัดเครื่องป้องกันกระแสเกินต้องสอดคล้องและไม่ต่ำกว่าโหลดสูงสุดที่คำนวณได้
- (3) การคำนวณโหลดสำหรับวงจรย่อย โหลดสำหรับวงจรย่อยต้องคำนวณตามที่กำหนดดังต่อไปนี้
- (4) วงจรย่อยต้องมีขนาดไม่น้อยกว่าผลรวมของโหลดทั้งหมดที่ต่ออยู่ในวงจรนั้น
- (5) โหลดแสงสว่างและโหลดของเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นที่ทราบแน่นอนให้คำนวณตามที่ดีติดตั้งจริง
- (6) โหลดของเตารับใช้งานทั่วไป ให้คำนวณโหลดจุดละ 180 โวลต์แอมแปร์ ทั้งชนิดเต้าเดี่ยว (Single) เต้าคู่ (Duplex) และชนิดสามเต้า (Triplex) กรณีติดตั้งชนิดตั้งแต่ 4 เต้า ให้คำนวณโหลดจุดละ 360 โวลต์แอมแปร์
- (7) โหลดของเตารับอื่นที่ไม่ได้ใช้งานทั่วไป ให้คำนวณโหลดตามขนาดของเครื่องใช้ไฟฟ้านั้นๆ

2.6.3 สายป้อน

- (1) ขนาดตัวนำของสายป้อน สายป้อนต้องมีขนาดกระแสไม่น้อยกว่าโหลดสูงสุดที่คำนวณได้และไม่น้อยกว่าขนาดพิกัดของเครื่องป้องกันกระแสเกินของสายป้อน และกำหนดให้ขนาดตัวนำของสายป้อนต้องไม่เล็กกว่า 4 ตร.มม.
- (2) การป้องกันกระแสเกิน สายป้อนต้องมีการป้องกันกระแสเกิน โดยขนาดพิกัดเครื่องป้องกันกระแสเกินต้องสอดคล้องและไม่ต่ำกว่าโหลดสูงสุดที่คำนวณได้
- (3) การคำนวณโหลดสำหรับสายป้อน โหลดของสายป้อนต้องคำนวณตามที่กำหนดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) สายป้อนต้องมีขนาดกระแสเพียงพอสำหรับการจ่ายโหลดและต้องไม่น้อยกว่าผลรวมของโหลดในวงจรย่อยเมื่อใช้ดีมานด์แฟกเตอร์

(5) โหลดแสงสว่าง อนุญาตให้ใช้ดีมานด์แฟกเตอร์ได้

(6) โหลดของเต้ารับอนุญาตให้ใช้ดีมานด์แฟกเตอร์ได้เฉพาะโหลดของเต้ารับที่มีการคำนวณโหลดแต่ละเต้ารับไม่เกิน 180 โวลต์แอมแปร์

(7) โหลดเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป อนุญาตให้ใช้ดีมานด์แฟกเตอร์ได้

(8) เต้ารับในอาคารที่อยู่อาศัยที่ต่อเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ทราบโหลดแน่นอนให้คำนวณโหลดจากเต้ารับที่มีขนาดสูงสุด 1 เครื่องรวมทับริยละเอียด 40 ของขนาดโหลดในเต้ารับที่เหลือ

(9) ดีมานด์แฟกเตอร์นี้ให้ใช้กับการคำนวณสายป้อนเท่านั้นห้ามใช้กับการคำนวณวงจรรย่อย

(10) ขนาดตัวนำนิวทรัล (Neutral) ขนาดตัวนำนิวทรัล ต้องมีขนาดกระแสเพียงพอที่จะรับกระแสไม่สมดุลสูงสุดที่เกิดขึ้น และต้องมีขนาดไม่เล็กกว่าขนาดสายดินของบริภัณฑ์ไฟฟ้าตามข้อ 4.20 กรณีระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ขนาดของตัวนำนิวทรัลมีข้อกำหนดดังนี้

(11) กรณีสายเส้นไฟมีกระแสของโหลดไม่สมดุลสูงสุดไม่เกิน 200 แอมแปร์ ขนาดกระแสของตัวนำนิวทรัลต้องไม่น้อยกว่าขนาดกระแสของโหลดไม่สมดุลสูงสุดนั้น

(12) กรณีสายเส้นไฟมีกระแสของโหลดไม่สมดุลสูงสุดมากกว่า 200 แอมแปร์ ขนาดกระแสของตัวนำนิวทรัลต้องไม่น้อยกว่า 200 แอมแปร์ บวกด้วยร้อยละ 70 ของส่วนที่เกิน 200 แอมแปร์

(13) ไม่อนุญาตให้คำนวณลดขนาดกระแสในตัวนำนิวทรัลในส่วนของโหลดไม่สมดุลที่ประกอบด้วยหลอดชนิดปล่อยประจุ (electric discharge) เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) เป็นต้น อุปกรณ์เกี่ยวกับการประมวลผลข้อมูล (data processing) หรืออุปกรณ์อื่นที่มีลักษณะคล้ายกัน ที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิก (harmonic) ในตัวนำนิวทรัล

หมายเหตุ - กระแสของโหลดไม่สมดุลสูงสุดคือค่าสูงสุดที่คำนวณได้จากโหลด 1 เฟส (single-phase load) ที่ต่อระหว่างตัวนำนิวทรัลและสายเส้นไฟเส้นใดเส้นหนึ่ง ในระบบไฟ 3 เฟส 4 สายที่จ่ายให้กับระบบคอมพิวเตอร์ หรือโหลดอิเล็กทรอนิกส์จะต้องเผื่อตัวนำนิวทรัลให้ใหญ่ขึ้นเพื่อรองรับกระแสฮาร์โมนิกด้วย ในบางกรณีตัวนำนิวทรัลอาจมีขนาดใหญ่กว่าสายเส้นไฟ

2.6.4 การป้องกันกระแสเกินสำหรับวงจรย่อยและสายป้อน

วงจรย่อยและสายป้อนต้องมีการป้องกันกระแสเกิน และเครื่องป้องกันกระแสเกินต้องมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

(1) เครื่องป้องกันกระแสเกินอาจเป็นฟิวส์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) พิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์หรือการผสมของทั้งสองอย่างนี้ จะนำมาต่อขนานกันไม่ได้ ยกเว้น เป็นผลิตภัณฑ์มาตรฐานที่ประกอบสำเร็จมาจากโรงงานผู้ผลิต และเป็นแบบที่ได้รับ ความเห็นชอบว่าเป็นหน่วย (unit) เดียวกัน

(3) ในกรณีติดตั้งเครื่องป้องกันกระแสเกินเพิ่มเติมสำหรับดวงโคมหรือเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆ เครื่องป้องกันกระแสเกินเพิ่มเติมเหล่านี้ จะใช้แทนเครื่องป้องกันกระแสเกินของวงจรย่อยไม่ได้และไม่จำเป็นต้องเข้าถึงได้ทันที

(4) เครื่องป้องกันกระแสเกินต้องสามารถป้องกันตัวนำทุกสายเส้นไฟและไม่ต้องติดตั้งใน 3 ตัวนำที่มีการต่อลงดิน ยกเว้น อนุญาตให้ติดตั้งเครื่องป้องกันกระแสเกินในตัวนำที่มีการต่อลงดินได้ ถ้าเครื่องป้องกันกระแสเกินนั้นสามารถตัดวงจรทุกเส้นรวมทั้งตัวนำที่มีการต่อลงดินได้พร้อมกัน

(5) เครื่องป้องกันกระแสเกินต้องไม่ติดตั้งในสถานที่ซึ่งทำให้เกิดความเสียหาย และต้องไม่อยู่ใกล้กับวัสดุที่ติดไฟง่าย

(6) เครื่องป้องกันกระแสเกิน ต้องบรรจุไว้ในกล่องหรืออย่างมิดชิด (เฉพาะด้ามสับของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ยอมให้โผล่ออกมาข้างนอกได้) ยกเว้น หากติดตั้งไว้ที่แผงสวิตช์หรือแผง ควบคุม ซึ่งอยู่ในห้องที่ไม่มีวัสดุติดไฟง่ายและไม่มีควัน เครื่องป้องกันกระแสเกินสำหรับ บ้านอยู่อาศัย ขนาดไม่เกิน 16 แอมแปร์ หนึ่งเฟส ไม่ต้องบรรจุไว้ในกล่องหรือตู้ก็ได้

(7) กล่องหรือผู้ที่บรรจุเครื่องป้องกันกระแสเกิน ซึ่งติดตั้งในสถานที่เปียกหรือชื้นต้องเป็น ชนิดที่ได้รับความเห็นชอบแล้ว และต้องมีช่องว่างระหว่างตู้กับผนังหรือพื้นี่รองรับไม่น้อยกว่า 5 มม.

(8) เครื่องป้องกันกระแสเกินต้องติดตั้งในที่ซึ่งสามารถปฏิบัติงานได้สะดวก มีที่ว่าง และแสงสว่างเพียงพอเพียง บริเวณหน้าแผงต้องมีที่ว่างเพื่อปฏิบัติงานไม่น้อยกว่าที่กำหนด

(9) ต้องติดตั้งเครื่องป้องกันกระแสเกินทุกจุดต่อแยก
ข้อยกเว้นที่ 1 กรณีเครื่องป้องกันกระแสเกินของสายป้อนสามารถป้องกันสายที่ต่อแยกได้ไม่ต้องติดตั้ง เครื่องป้องกันกระแสเกินทุกจุดต่อแยก

ข้อยกเว้นที่ 2 สายที่ต่อแยกจากสายป้อนเป็นไปตามทุกข้อดังนี้

- 1) ความยาวของสายที่ต่อแยกไม่เกิน 7.5 เมตร
- 2) ขนาดกระแสของสายที่ต่อแยกไม่น้อยกว่า 1 ใน 3 ของขนาดกระแสสายป้อน
- 3) จุดปลายของสายต่อแยกต้องมีเครื่องป้องกันกระแสเกิน 1 ตัว
- 4) สายที่ต่อแยกต้องติดตั้งในช่องเดินสาย

2.6.5 การต่อลงดิน

ขนาดสายต่อหลักดินของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ สายต่อหลักดินต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า ที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 2.10 กำหนดให้สายดินของบริภัณฑ์ไฟฟ้า ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่าที่ได้ กำหนดไว้ในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.10 ขนาดต่ำสุดของสายต่อหลักดินของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

ขนาดตัวนำประธาน (ตัวนำทองแดง) (ตร.มม.)	ขนาดต่ำสุดของสายต่อหลักดิน (ตัวนำทองแดง) (ตร.มม.)
ไม่เกิน 35	10*
เกิน 35 แต่ไม่เกิน 50	16
เกิน 50 แต่ไม่เกิน 95	25
เกิน 95 แต่ไม่เกิน 185	35
เกิน 185 แต่ไม่เกิน 300	50
เกิน 300 แต่ไม่เกิน 500	70
เกิน 500	95

ตารางที่ 2.11 ขนาดต่ำสุดของสายดินของบริภัณฑ์ไฟฟ้า

พิกัดหรือขนาดปรับตั้งของเครื่องป้องกันกระแส เกินไม่เกิน (แอมแปร์)	ขนาดต่ำสุดของสายดินของบริภัณฑ์ไฟฟ้า (ตัวนำทองแดง) (ตร.มม.)
20	2.5
40	4
70	6
100	10
200	16
400	25
500	35
800	50
1000	70
1250	95
2000	120
2500	185
4000	240
6000	400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในส่วนของบทนี้จะแสดงถึงผลการสำรวจระบบต่างๆ ของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา เพื่อประเมินการใช้พลังงานในอาคารด้วยโปรแกรม BEC เปรียบเทียบเกณฑ์มาตรฐานอาคารอนุรักษ์พลังงาน ในส่วนของวัสดุกรอบอาคาร ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และระบบปรับอากาศ

3.1 สำรวจและเก็บข้อมูลอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

ทำการศึกษาและสำรวจระบบต่าง ๆ ของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา โดยได้แบ่งหัวข้อการศึกษาดังนี้

3.1.1 ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

จากการสำรวจระบบไฟฟ้าแสงสว่างภายในอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมจาก พบว่าภายในอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมส่วนมาก ยังใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) ในหลายๆ พื้นที่ โดยตัวอย่างของหลอดไฟที่ใช้อาคารเดิมนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ถึง 3.3 ทำให้มีการใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าแสงสว่างที่สูงเพราะหลอดใช้พลังงานมาก อีกทั้งยังต้องเชื่อมต่อบัลลาสต์ในการทำงานและประสิทธิภาพของแสงบางพื้นที่อาจยังไม่เพียงพอต่อการใช้งาน



รูปที่ 3.1 โคมไฟหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) T8 ห้องสหกรณ์เก่า ชั้น 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 โคมไฟหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) T5 ห้อง CV-201 ชั้น 2



รูปที่ 3.3 โคมไฟหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) T8 ห้อง CV-403 ชั้น 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจำนวนหลอดและประสิทธิภาพสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าภายในอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมระบบแสงสว่างทั้งหมดเป็นหลอดไฟหลอดฟลูออเรสเซนต์จำนวน 474 หลอด โดยแต่ละหลอดยังมีค่าประสิทธิภาพที่อยู่ในเกณฑ์ปานกลางเนื่องจากการเปลี่ยนหลอดไฟในช่วงตามอายุการใช้งาน ทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์บางรุ่นเป็นรุ่นที่มีการผลิตใหม่

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของหลอดไฟเดิมที่ติดตั้งอยู่ในอาคาร

Luminaire	พลังงานที่ใช้ (W)	จำนวน	ประสิทธิภาพ (lm/W)	จำนวนลูเมนต่อหลอด (lm)
Fluorescent T5	28	474	71.42	2000
Fluorescent T8	18	167	58.33	1050
Fluorescent T8	36	18	90.27	3250

3.1.2 ระบบปรับอากาศภายในอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

จากการสำรวจระบบปรับอากาศภายในอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมพบว่า ภายในอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมยังใช้ระบบปรับอากาศที่การทำความเย็นของระบบปรับอากาศนั้นเสื่อมคุณภาพและมีการใช้ไฟมากกว่าปกติทำให้พลังงานที่ใช้มากขึ้น ตามเกณฑ์มาตรฐานของเกณฑ์พลังงานปี พ.ศ.2549 ที่ติดตั้งที่เครื่องปรับอากาศจะผลิตและจำหน่ายระบบปรับอากาศในปี พ.ศ.2549 เช่น เครื่องปรับอากาศของยี่ห้อ TRANE ที่เป็นรุ่นเก่าและใช้งานในอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา ที่ใช้น้ำยาหรือสารทำความเย็น R22 มีจุดเดือดอยู่ที่ -40.80°C เป็นต้น



รูปที่ 3.4 เครื่องปรับอากาศเดิม ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ ชั้น 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องปรับอากาศเดิม ห้องบรรยายรวม ชั้น 2



รูปที่ 3.6 เครื่องปรับอากาศเดิม ห้อง CV-301 ชั้น 3

จากการสำรวจอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา พบว่ามีเครื่องปรับอากาศเดิม รุ่นเก่าขนาดต่ำกว่า 15,000 BTU จำนวน 8 เครื่อง, ขนาด น้อยกว่า 28,000 BTU จำนวน 16 เครื่อง และ น้อยกว่า 38,000 BTU จำนวน 40 เครื่อง โดยตัวอย่างเครื่องปรับอากาศที่ทำการสำรวจสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ถึงรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงให้เห็นว่าภายในอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมส่วนใหญ่ นั้น ยังมีการใช้งานเครื่องปรับอากาศที่มีอายุมาก และระบบทำความเย็นของระบบปรับอากาศนั้นเสื่อมคุณภาพ ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าปกติ และมีค่า COP ที่น้อย

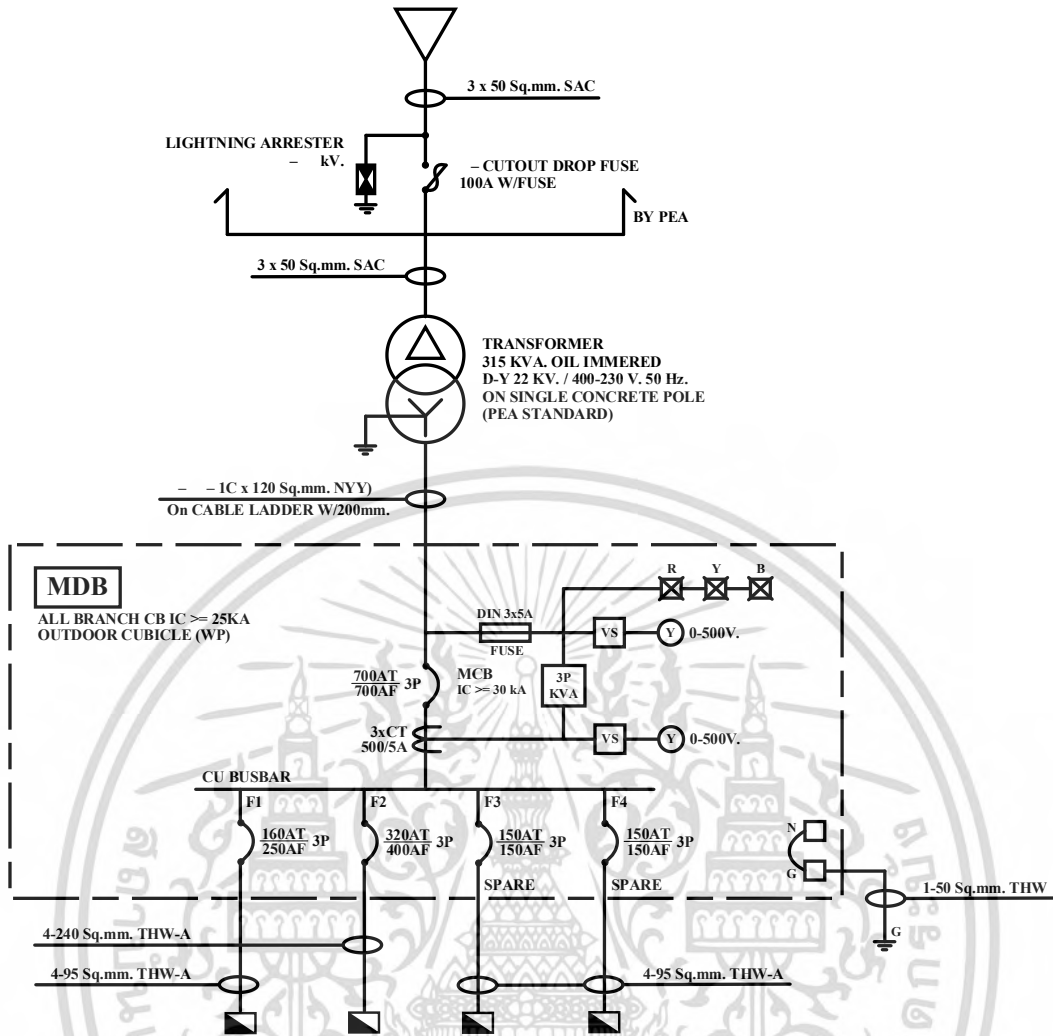
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของเครื่องปรับอากาศเดิมที่ติดตั้งอยู่ในอาคาร

ชนิด เครื่องปรับอากาศ	การทำความเย็น (BTU/h)	การใช้พลังงาน (kW)	SEER (BTU/h/W)	จำนวน
	15,000	0.700	12.850	8
แบบความเร็วคงที่	22,000	1.065	11.267	16
	38,000	1.570	11.460	40

3.1.3 ระบบไฟฟ้าของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

จากการสำรวจระบบไฟฟ้าเดิมของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม พบว่าอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมนั้น รับไฟฟ้ามาจากหม้อแปลง 250 kVA ผ่านเบรกเกอร์หลักขนาด 700AT ที่ตู้สวิตช์ประธาน (Main Distribution Board) ก่อนแยกจ่ายไปยังแผงไฟ (Distribution Board, DB) ในแต่ละชั้น โดยมีอุปกรณ์ไฟฟ้าบางอย่างที่เก่าและเสื่อมสภาพดังรูปที่ 3.8 และมีโหลดของตู้สวิตช์ประธานและแผงไฟของแต่ละชั้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.3 ถึงตารางที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แผนภาพระบบไฟฟ้าจากตู้สวิตช์ประธานของอาคารโยธา



รูปที่ 3.8 ตู้สวิตช์ประธาน ชั้น 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 โหลดรวมของผู้สวิตช์ประธานอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม

CAPACITY : 18 CIRCUIT		PANEL NO. MDB						LOCATION : 1st FLOOR			
MAIN : MCB 3P 500AT 50kA AT 480 VAC							MOUNTING : SURFACE MOUNTED				
CCT. NO.	DESCRIPTION	BREAKER			CONDUCTORS		CONDUIT		LOAD (VA)		
		POLE	AT	IC	SIZE (SQ.MM.)	TYPE	SIZE (INCH)	TYPE	PHASE A	PHASE B	PHASE C
1	Floor 1	3	160	36k	4x95,G-16	IEC01	3	IMC	29883		
3										30815	
5											26040
7	Floor 2	3	320	36k	4x240,G-25	IEC01	4	IMC	48008		
9										47908	
11											47934
13	Floor 3	3	150	36k	4x95,G-16	IEC01	2 1/2	IMC	26320		
15										25632	
17											27334
2	Floor 4	3	150	36k	4x95,G-16	IEC01	2 1/2	IMC	25368		
4										26518	
6											27984
8	SPARE										
10	SPARE										
12	SPARE										
14	SPARE										
16	SPARE										
18	SPARE										
TOTAL PHASE VA					389744				129579	130873	129292
MAIN CIRCUIT BREAKER		MCB 3P 700 AT									
MAIN FEEDER		12x150,G-50 sq.mm. , cable tray									

จากตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลการเชื่อมต่อของผู้สวิตช์ประธานไปยังแผงไฟของแต่ละชั้น โดยแต่ละชั้น จะมีขนาดเบรกเกอร์ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับโหลดที่เชื่อมต่ออยู่ โดยผู้สวิตช์ประธานยังมีพื้นที่รองรับให้สามารถเชื่อมต่อเบรกเกอร์ไปยังโหลดอื่นในอนาคตได้อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 โหลดรวมของชั้น 1 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม

CAPACITY : 18 CIRCUIT		PANEL NO. FLOOR 1st						LOCATION : 1st FLOOR				
MAIN : MCB 3P 160AT/250AF 25kA AT 415 VAC							MOUNTING : SURFACE MOUNTED					
CCT. NO.	DESCRIPTION	BREAKER			CONDUCTORS		CONDUIT		LOAD (VA)			
		POLE	AT	IC	SIZE (SQ.MM)	TYPE	SIZE (INCH)	TYPE	PHASE A	PHASE B	PHASE C	
1	CENTRAL	1	20	10k	2x4,G-2.5	IEC01	3/4	EMT	2995			
3	ห้องประชุม	1	50	10k	3x16,G-6	IEC01	1 1/4	EMT		7804		
5	ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์	1	63	10k	3x25,G-6	IEC01	1 1/4	EMT			11190	
7	ห้องสหกรณ์(เก่า)	1	63	10k	3x25,G-6	IEC01	1 1/4	EMT	11940			
9	ห้องเย็บเล่มใหม่	1	40	10k	4x10,G-4	IEC01	1 1/4	EMT		7061		
11	SPARE											
13									4778			
15	ห้องธุรการ	3	30	10k	4x10,G-4	IEC01	1 1/4	EMT		4850		
17											4850	
2									5200			
4	ห้องพักอาจารย์	3	40	10k	4x10,G-4	IEC01	1 1/4	EMT		7000		
6											5900	
8									4970			
10	ห้องทานอาหาร	3	30	10k	4x10,G-4	IEC01	1 1/4	EMT		4100		
12											4100	
14	SPARE											
16	SPARE											
18	SPARE											
TOTAL PHASE VA		86738						29883	30815	26040		
MAIN CIRCUIT BREAKER		MCB 3P 160 AT/250AF										
MAIN FEEDER		4x95,G-10 sq.mm. , IMC										

จากตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลการเชื่อมต่อของแผงไฟชั้นที่ 1 โดยพื้นที่ชั้นที่ 1 เป็นห้องประชุม ห้องสำนักงาน และที่พักอาจารย์ซึ่งมีการใช้ไฟไม่ค่อยมากแต่ด้วยจำนวนห้องที่มีมาก และโดยในบ้างห้องมีความต้องการไฟฟ้าเพียง 1 เฟสเท่านั้น ทำให้แผงมีพื้นที่เผื่อขยายโหลดในอนาคตไม่มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 โหลดรวมของชั้น 2 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม

CAPACITY : 8 CIRCUIT		PANEL NO. รวมชั้น 2					LOCATION : 2nd FLOOR				
MAIN : MCB 3P 320AT/250AF 36kA AT 415 VAC							MOUNTING : SURFACE MOUNTED				
CCT.	DESCRIPTION	BREAKER			CONDUCTORS		CONDUIT		LOAD (VA)		
NO.		POLE	AT	IC	SIZE (SQ.MM)	TYPE	SIZE (INCH)	TYPE	PHASE A	PHASE B	PHASE C
1	CENTRAL	2	20 AT	5 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	3177		
3	CV-201	2	50 AT	5 kA	2x10,G-6	IEC01	1	EMT		18140	
5	CV-202	2	75 AT	5 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT			14650
7	CV-204	2	100 AT	5 kA	2x50,G-10	IEC01	2 1/2	EMT	19461		
9	ห้องควบคุม ฉายภาพ	2	40 AT	5 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT		7550	
2	CV-203	2	75 AT	5 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT			15066
4	ห้องบรรยายรวม	4	125 AT	5 kA	4x70,G-16	IEC01	2 3/4	EMT	18570		
										18218	
											18218
6	SPARE	2	40 AT	5 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT	6800		
8	SPARE	2	20 AT	5 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT		4000	
TOTAL PHASE VA		143850							48008	47908	47934
BUS SYSTEM											
MAIN CIRCUIT BREAKER						MCB 320 AT/400 AF					
MAIN FEEDER						4x240,G-25 sq.mm. , 3 IMC					

จากตารางที่ 3.5 แสดงข้อมูลการเชื่อมต่อของแผงไฟชั้นที่ 2 โดยพื้นที่ชั้นที่ 2 เป็นห้องบรรยาย โดยมีห้องบรรยายรวมขนาดใหญ่ 1 ห้อง ซึ่งมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าค่อนข้างสูง ดังนั้นที่ชั้นจะมีเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวใหญ่และสายไฟที่มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับชั้นอื่น ๆ อีกทั้งแผงไฟที่ชั้น 2 มีขนาดเล็กจึงทำให้ไม่มีพื้นที่เหลือเพื่อการเชื่อมต่อโหลดโหลดในอนาคต

ตารางที่ 3.6 โหลดรวมของชั้น 3 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม

CAPACITY : 24 CIRCUIT		PANEL NO. รวมชั้น 3					LOCATION : 3rd FLOOR				
MAIN : MCB 3P 150AT/250AF 25kA AT 415 VAC		MOUNTING : SURFACE MOUNTED									
CCT.	DESCRIPTION	BREAKER			CONDUCTORS		CONDUIT		LOAD (VA)		
NO.		POLE	AT	IC	SIZE (SQ.MM)	TYPE	SIZE (INCH)	TYPE	PHASE A	PHASE B	PHASE C
1	CENTRAL	2	20 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	720		
3	CV-301	2	50 AT	10 kA	2x10,G-6	IEC01	1	EMT		11446	
5	CV-303	2	80 AT	10 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT			17334
7	CV-302	2	50 AT	10 kA	2x50,G-10	IEC01	2 1/2	EMT	7045		
9	ห้องโปรเจค	2	20 AT	10 kA	2x50,G-10	IEC01	2 1/2	EMT		4186	
11											
13											
15											
17											
19											
21											
23											
2	CV-304	2	50 AT	10 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT	8555		
4	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT		10000	
6	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT			10000
8	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	10000		
12											
16											
20											
24											
TOTAL PHASE VA					79286				26320	25632	27334
MAIN CIRCUIT BREAKER		MCB 3P 150 AT/250AF									
MAIN FEEDER		4x95,G-6 sq.mm. , 3 IMC									

จากตารางที่ 3.6 แสดงข้อมูลการเชื่อมต่อของแผงไฟชั้นที่ 3 โดยพื้นที่ชั้นที่ 3 ส่วนมากเป็นห้องบรรยาย และห้องทำวิจัยของนักศึกษา ดังนั้นความต้องการใช้ไฟฟ้าจึงมีขนาดไม่มากและการทำงานมีช่วงเวลาที่ชัดเจน แผงไฟชั้น 3 มีขนาด 24 วงจรและการใช้ไฟฟ้าของแต่ละห้องต้องการเพียง 1 เฟส ดังนั้นในชั้นนี้จึงมีวงจรเหลือสำหรับการเชื่อมต่อโหลดโหลดในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 โหลดรวมของชั้น 4 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม

CAPACITY : 24 CIRCUIT		PANEL NO. รวมชั้น 4					LOCATION : 2nd FLOOR				
MAIN : MCB 3P 150AT/250AF 25kA AT 415 VAC							MOUNTING : SURFACE MOUNTED				
CCT.	DESCRIPTION	BREAKER			CONDUCTORS		CONDUIT		LOAD (VA)		
NO.		POLE	AT	IC	SIZE (SQ.MM)	TYPE	SIZE (INCH)	TYPE	PHASE A	PHASE B	PHASE C
1	CENTRAL	2	20 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	612		
3	CV-401	2	80 AT	10 kA	2x10,G-6	IEC01	1	EMT		16518	
5	CV-402	2	80 AT	10 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT			17984
7	CV-403	2	50 AT	10 kA	2x50,G-10	IEC01	2 1/2	EMT	9454		
9											
11											
13											
15											
17											
19											
21											
23											
2	ห้องโปรเจค	2	50 AT	10 kA	4x70,G-16	IEC01	2 3/4	EMT	5302		
4	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT		10000	
6	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT			10000
8	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	10000		
12											
16											
20											
24											
TOTAL PHASE VA					79870				25368	26518	27984
MAIN CIRCUIT BREAKER		MCB 3P 150 AT/250AF									
MAIN FEEDER		4x95,G-6 sq.mm. , 3 IMC									

ในชั้นที่ 4 ก็มีลักษณะคล้ายชั้นที่ 3 ดังนั้นในตารางที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าแต่ละห้องมีความต้องการไฟฟ้าเพียง 1 เฟส และมีความต้องการไฟฟ้าไม่สูงมาก ดังนั้นในชั้นนี้จึงมีวงจรเหลือสำหรับการเชื่อมต่อโหลดโหลดในอนาคตค่อนข้างมาก

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าระบบไฟฟ้าของอาคารโยธาเดิมอาจจะต้องมีการปรับปรุง โดยเปลี่ยนอุปกรณ์และตู้ที่ชำรุด เพื่อป้องกันการเกิดลัดวงจร หรือความเสียหายในระบบไฟฟ้าของอาคาร อีกทั้งการจัดเรียงโหลดใหม่ อาจจะช่วยให้อาคารสามารถรองรับโหลดในอนาคตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ระบบกรอบอาคาร (OTTV) ของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

สำหรับระบบกรอบอาคารจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ผนัง และหลังคา ในส่วนของวัสดุกรอบอาคารผนัง จากการสำรวจวัสดุในการทำผนังและกระฉกเดิม พบว่ากำแพงของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมใช้อิฐมอญและปูนฉาบเป็นวัสดุในการสร้างกำแพงแต่ละชั้นดังแสดงในรูปที่ 3.9 และมีแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ผนังเดิมของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา



รูปที่ 3.10 แบบจำลองผนังเดิม

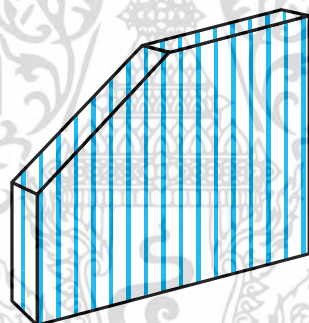
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 จะพบว่าผนังเดิมนั้นเป็นการก่ออิฐมอญแห้งตรงกลาง แล้วฉาบปูนฉาบ (ซีเมนต์+ทราย) ทั้งสองด้าน โดยวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างกำแพงมีค่าพารามิเตอร์ทางการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ทางการถ่ายเทความร้อนของวัสดุกำแพงเดิม

รายการ	องค์ประกอบ	ความหนา (cm.)	K (W/m ² .°C)	ρ (kg/m ³)	C _p (kJ/kg.°C)
ผนัง	อิฐมอญ	7	0.790	1,760	0.807
	ปูนฉาบ 2 ด้าน	1.5	0.840	1,860	0.720

สำหรับส่วนของกระจกนั้นอาคารเดิมใช้เป็นกระจกใส 6 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.9 ซึ่งมีการส่งผ่านความร้อนเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับส่วนประกอบที่ทึบแสง ดังนั้นความร้อนจากสิ่งแวดล้อมจึงสามารถถ่ายเทเข้าสู่อาคารได้อย่างมาก และส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศมีค่าเพิ่มสูงขึ้นได้



รูปที่ 3.11 แบบจำลองกระจกเดิม

ตารางที่ 3.9 คุณสมบัติของวัสดุกระจกที่ใช้อยู่เดิม

วัสดุ	ความหนา (m)	U-Value (W/m ² *K)	SHGC
กระจกใส	0.06	5.74	0.82

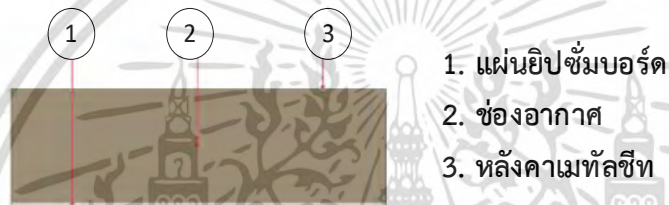
3.1.5 ระบบรอบอาคาร (RTTV) ของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

จากการสำรวจวัสดุในการทำหลังคาเดิม พบว่าหลังคาของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมใช้หลังคาเมทัลชีทและแผ่นยิปซัมบอร์ด โดยมีช่องว่างอากาศเป็นตัวคั่นกลางดังแสดงในรูปที่ 3.12 และมีแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 หลังคาเดิมของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา



รูปที่ 3.13 แบบจำลองหลังคาเดิม

จากรูปที่ 3.13 จะพบว่าหลังเดิมนั้นเป็นวางแผ่นยิปซัมบอร์ดลงบนฝ้าแล้วเว้นช่องว่างอากาศ จากนั้นจึงนำแผ่นหลังคาเมทัลชีทมาปิดทับ โดยวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างหลังคามีค่าพารามิเตอร์ทางการถ่ายเทความร้อนของวัสดุดังแสดงในตารางที่ 3.10 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าค่าการนำความร้อน ค่าความจุความร้อนจำเพาะ และค่าความหนาแน่น ส่งผลต่อการนำความร้อน โดยช่องว่างอากาศทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นความร้อน

ตารางที่ 3.10 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ทางการถ่ายเทความร้อนของวัสดุหลังคาเดิม

รายการ	องค์ประกอบ	ความหนา (cm.)	K (W/m ² .°C)	ρ (kg/m ³)	C _p (kJ/kg.°C)
หลังคา	หลังคาเมทัลชีท	0.03	47.600	7,840	0.500
	ช่องอากาศ	40	0.025	1.23	1,006
	แผ่นยิปซัม	1	0.191	880	1.090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิเคราะห์พลังงานสุทธิของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

จากการสำรวจอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ผลการสำรวจได้ถูกนำมาใส่ในโปรแกรม BEC เพื่อประเมินว่าอาคารภาควิชาวิศวกรรมโยธาเดิมนั้นเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานอาคารอนุรักษ์พลังงาน โดยผลการจำลองในระบบต่าง ๆ เทียบกับมาตรฐานอาคารอนุรักษ์พลังงานแสดงดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 รายงานค่าการอนุรักษ์พลังงานของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม

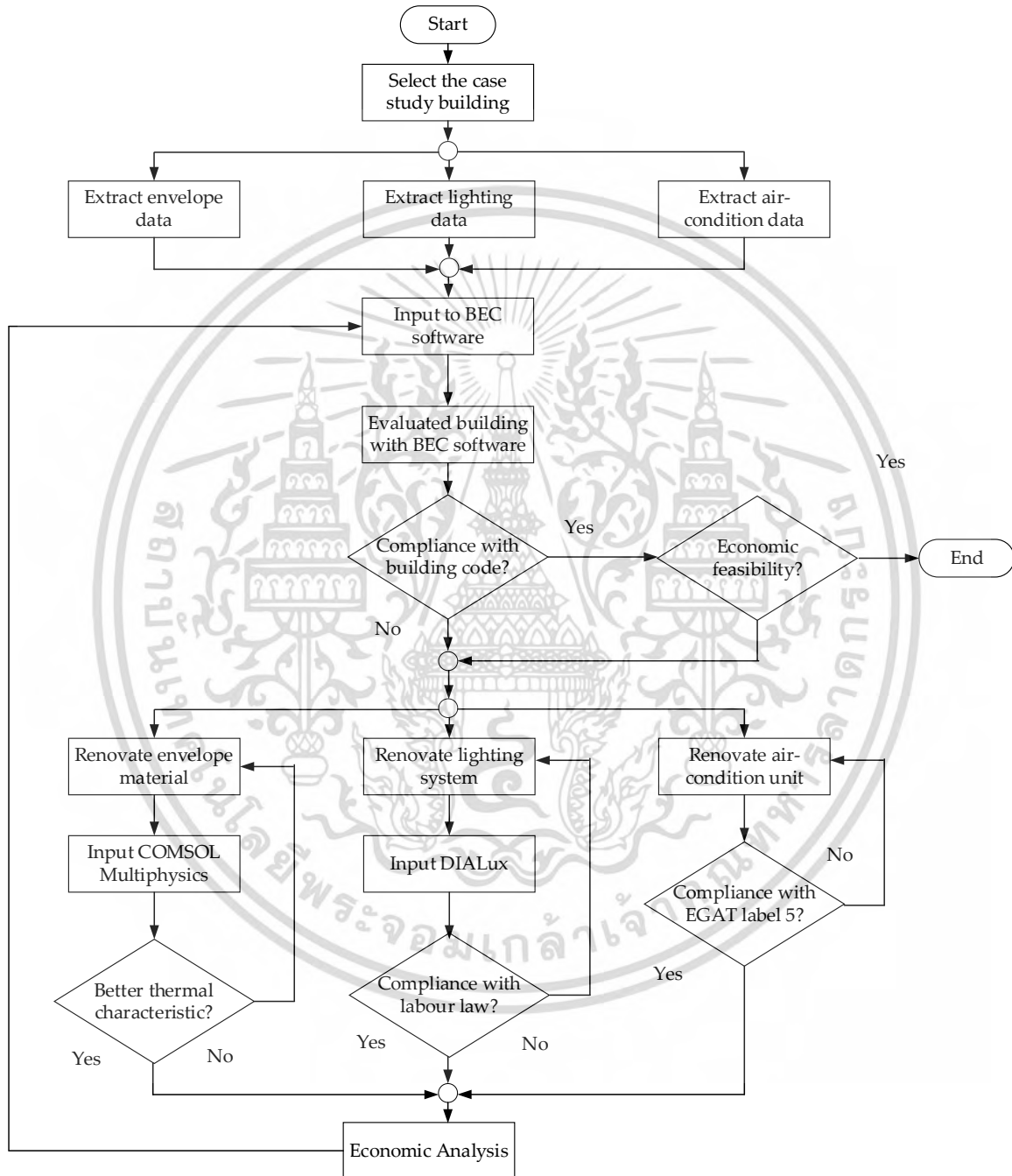
	อาคารก่อนปรับปรุง	มาตรฐาน	สถานะ
OTTV (W/m ²)	79.724	50	ไม่ผ่าน
RTTV (W/m ²)	23.117	10	ไม่ผ่าน
LPD (W/m ²)	9.88	10	ผ่าน
SEER (BTU/h/W)	4.39	12.85	ไม่ผ่าน
การใช้พลังงานรวม (kWh/yr.)	261,537.977	184,820.745	ไม่ผ่าน

จากตารางพบว่าการถ่ายเทความร้อนของผนังและหลังคาอาคาร (OTTV) ของอาคารโยธายังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากอาคารโยธาถูกสร้างขึ้นมาหลายปีและวัสดุที่เลือกใช้ยังเป็นวัสดุที่ยังไม่สามารถป้องกันความร้อนได้ดี รวมถึงรูปแบบโครงสร้างของอาคารโยธายังเป็นแบบเก่าไม่มีการไหลเวียนของอากาศหรือช่องว่างระบายอากาศ การหันหน้าอาคารยังหันหน้าไปทิศที่รับแดด ทำให้บางห้องได้รับความร้อนมากกว่าปกติ ค่าจากการจำลองโปรแกรมของการถ่ายเทความร้อนของผนังและหลังคาอาคาร เท่ากับ 79.724 W/m² และในส่วนของ การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านหลังคาอาคาร (RTTV) ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เพราะว่าอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังคายังเป็นแบบเก่ายังไม่สามารถกันความร้อนได้ดี ค่าที่ได้จากการจำลองโปรแกรมของค่าการถ่ายเทความร้อนรวมผ่านหลังคาอาคารส่วนปรับอากาศ เท่ากับ 23.117 W/m² ในส่วนของระบบแสงสว่างและระบบปรับอากาศของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาผ่านการจำลองโปรแกรม จะเห็นได้ว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่ถ้าเทียบจากการสำรวจพบว่าหลอดไฟยังเป็นรุ่นเก่าที่ไม่ใช่หลอดไดโอดเปล่งแสง (LED) และเครื่องปรับอากาศยังเป็นรุ่นเก่าที่ไม่มีฉนวนกันความร้อน 5 มาร์บประกันคุณภาพของเครื่องปรับอากาศ จึงเป็นเหตุว่าอาคารเรียนวิศวกรรมโยธามีการใช้ไฟฟ้ามาก ค่าไฟในแต่ละเดือนก็สูงมากขึ้นด้วยดูจากค่าของพลังงานสุทธิของอาคารที่ออกแบบ (Net Energy Consumption Evaluated Building) เท่ากับ 261,537.977 kWh/Year มีค่ามากกว่าค่าพลังงานสุทธิของอาคารอ้างอิง (Net Energy Consumption Reference Building) เท่ากับ 184,820.745 kWh/Year พบว่าค่าที่ได้การจำลองโปรแกรมของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธามากกว่าอาคารอ้างอิงจึงไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานอาคารอนุรักษ์พลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แนวทางการปรับปรุงอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

อาคารที่มีอยู่ในเกณฑ์อาคารอนุรักษ์พลังงานของประเทศไทย แต่ไม่ได้ออกแบบตามกฎหมาย เนื่องจากระยะเวลาการก่อสร้างก่อนวันที่กฎหมายบังคับใช้ได้ถูกเลือกเป็นกรณีศึกษา กระบวนการศึกษาสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนภาพสรุปขั้นตอนการดำเนินงานปรับปรุงอาคาร

โดยจากแผนภาพประกอบด้วยการเลือกอาคารกรณีศึกษาเพื่อจำลอง แผนผังชั้นของอาคารใช้เพื่อแยกจำนวนอุปกรณ์แสงสว่างและเครื่องปรับอากาศ รวมถึงส่วนประกอบของผนัง หลังคา และหน้าต่าง ข้อมูลเอกสาร ารนเป็นเอกสาร ารทสงวนเวลา ารทบการรเชง นเพอการรทกษ ารททนน เมอถูอูย เตเทนน เปเชบระเชยชนดำนกา ารค ารไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากอาคารปัจจุบันได้รับการประเมินโดยใช้โปรแกรม BEC เพื่อตรวจสอบว่าแต่ละระบบย่อยสอดคล้องกับเกณฑ์อาคารอนุรักษ์พลังงานหรือไม่ สำหรับเปลือกอาคาร การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของวัสดุปัจจุบันที่ใช้ในอาคารเดิมถูกจำลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics หลังจากนั้น วัสดุที่แตกต่างกันซึ่งมีคุณสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่าได้รับการประเมินในแง่ของการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน และได้รับเลือกเป็นกรณีการปรับปรุงใหม่ สำหรับระบบแสงสว่างสามารถนับจำนวนอุปกรณ์ได้โดยตรงจากแผนผังชั้นและประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ BEC เพื่อปรับปรุงระบบไฟส่องสว่างโปรแกรม DIALux ถูกนำมาใช้เพื่อจำลองซอฟต์แวร์ทดแทนเพื่อประเมินว่าสามารถให้คุณภาพแสงที่ใกล้เคียงกับซอฟต์แวร์ปัจจุบันได้หรือไม่ สามารถคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศแยกกันได้ และสามารถเลือกหน่วยที่มีประสิทธิภาพดีกว่ามาทดแทนได้ หลังจากกระบวนการปรับปรุงเสร็จสิ้น อาคารจะต้องได้รับการประเมิน BEC อีกครั้งเพื่อยืนยันว่าระบบย่อยทั้งหมดเป็นไปตามเกณฑ์อาคารอนุรักษ์พลังงาน สุดท้ายต้นทุนของกระบวนการปรับปรุงโดยรวมและกระแสเงินสดจากการลดต้นทุนด้านพลังงานจะถูกคำนวณเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของโครงการ นอกจากนี้ ความจุไฟฟ้าสำรองของหม้อแปลงที่เพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากการลดโหลดสามารถนำมาใช้เพื่อรองรับโหลดในอนาคตได้ กระบวนการศึกษาโดยรวมสามารถสรุปได้เป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 3.11

3.3.1 ระบบแสงสว่างภายในอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

ในด้านระบบไฟฟ้าแสงสว่างได้รับการออกแบบใหม่ โดยการเปลี่ยนหลอดไฟจากหลอด ฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) เป็นหลอดไฟไดโอดเปล่งแสง (LED) โดยใช้ชุดโคมไฟเดิม ซึ่งมีฉลากประหยัดพลังงานเบอร์ 5 (3 ดาว) ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานที่ดีที่สุด

โดยความแตกต่างระหว่างทั้งสองหลอด คือ หลอดไฟแอลอีดี (LED) ใช้พลังงานน้อยกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) มาก อีกทั้งหากลองนำหลอดแบบฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) T8 กับหลอดไดโอดเปล่งแสง (LED) T8 จะพบว่าหลอดไดโอดเปล่งแสง (LED) ประหยัดกว่าถึง 50% และหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) นั้นมักจะมีปัญหาหลอดขาด ขี้ดำ ส่วนหลอดไดโอดเปล่งแสง (LED) นั้นจะไม่พบปัญหานี้ ที่สำคัญสุดหลอดไดโอดเปล่งแสง (LED) ไม่มีสารเคมีที่เคลือบอยู่ภายในตัวหลอดไฟเหมือนอย่างหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) อีกทั้งยังได้มีการจำลองความส่องสว่างบนพื้นที่ใช้งานด้วยโปรแกรม DIALux เพื่อประเมินคุณภาพทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ระบบปรับอากาศภายในอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

ทำการเปลี่ยนเครื่องปรับอากาศใหม่ทั้งหมด โดยทำการเปลี่ยนเครื่องปรับอากาศจากเดิมที่เป็นรุ่นเก่าให้เป็นรุ่นที่เป็นระบบอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศรุ่นเก่านั้นเสื่อมคุณภาพและมีการใช้ไฟมากกว่าปกติทำให้ใช้พลังงานมากขึ้นด้วย เครื่องปรับอากาศที่เป็นรุ่นใหม่ั้นตามเกณฑ์มาตรฐานของเกณฑ์พลังงานปี พ.ศ. 2549 ที่ติดอยู่ที่เครื่องปรับอากาศจะผลิตและจำหน่ายระบบปรับอากาศในปี พ.ศ. 2549 เป็นเครื่องปรับอากาศระบบอินเวอร์เตอร์ทุกตัว ติดตั้งตามขนาดพื้นที่จริงของห้อง โดยรุ่นที่เลือกใช้เลือกที่เป็นรุ่นใหม่ฉลากเบอร์ 5 (3 ดาว) ทำให้ค่าไฟต่อปีลดลง คุณภาพการทำความเย็นใช้สารทำความเย็นเป็น R32 ที่มีจุดเดือดอยู่ที่ $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพราะยิ่งจุดเดือดต่ำยิ่งทำความเย็นได้ดี ราคาน้ำยาแอร์ถูกกว่ายี่ห้ออื่นมีราคาอยู่ที่ 300-400 บาท/กิโลกรัม และในกรณีที่น้ำยารั่วสามารถเติมได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนใหม่ทั้งหมด

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องปรับอากาศแบบเก่ากับเครื่องปรับอากาศที่มีอินเวอร์เตอร์ โดยเครื่องปรับอากาศที่ไม่มีอินเวอร์เตอร์ คอมเพรสเซอร์จะทำความเย็นให้เย็นกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ประมาณ 3-4 องศา เมื่ออุณหภูมิห้องเย็นกว่าอุณหภูมิที่กำหนด ระบบจะสั่งการตัดไฟคอมเพรสเซอร์ทันที และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกว่าที่ตั้งไว้ ระบบจะสั่งคอมเพรสเซอร์ให้ทำงานอีกครั้งเพื่อลดอุณหภูมิลงอีกครั้ง

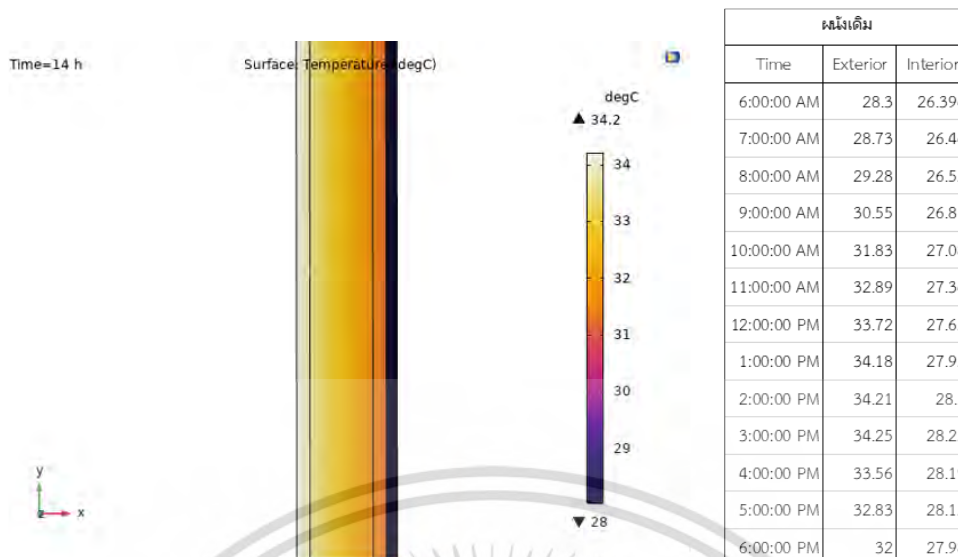
เครื่องปรับอากาศที่มีอินเวอร์เตอร์ ระบบจะเร่งความเร็วมอเตอร์คอมเพรสเซอร์เมื่อต้องการทำความเย็นตามที่กำหนด และลดรอบมอเตอร์ลงเมื่ออุณหภูมิห้องเย็นกว่าที่กำหนดเล็กน้อย ซึ่งคอมเพรสเซอร์ยังคงทำงานโดยลดรอบลงจนอยู่ในสถานะแทบจะหยุดหมุนเลยก็ได้ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกว่าที่ตั้งไว้ประมาณ 1-2 องศา คอมเพรสเซอร์จะค่อยเร่งการทำงานมากขึ้นเพื่อลดอุณหภูมิลง จึงทำให้อุณหภูมิโดยรวมในห้องใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ผู้ใช้งานตั้งไว้มากกว่าเครื่องปรับอากาศแบบไม่มีอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นในการปรับปรุงอาคารนี้จึงได้มีการเลือกใช้เครื่องปรับอากาศชนิดอินเวอร์เตอร์

3.3.3 ระบบไฟฟ้าของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

จากการปรับปรุงระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบปรับอากาศจะทำให้เกิดของไหลที่เชื่อมต่อกับอาคารมีค่าลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยอุปกรณ์ป้องกันและสายตัวนำบางตัวนั้น มีขนาดไม่สัมพันธ์กับขนาดของโหลดทางไฟฟ้า และยังมีความเก่าเกิดการชำรุดเสียหาย ดังนั้นจึงเสนอแนวทางให้เปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกันและสายตัวนำที่มีขนาดไม่สัมพันธ์กับขนาดของโหลดทางไฟฟ้าและจากที่ลดขนาดโหลดรวมของอาคารได้แล้วทำได้ติดตั้งระบบอัดประจุสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า (EV Charger) ไว้ที่ช่องสำรอง (Spare) ชั้นที่ 1 เพื่อปรับให้ขนาดโหลดนั้นยังสัมพันธ์กับหม้อแปลง

3.3.4 ระบบรอบอาคาร (OTTV) ของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

การปรับปรุงอาคารในส่วนของวัสดุรอบอาคารผนังจะมีการจำลองความร้อนผ่านโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.6 โดยเมื่อจำลองการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาของอาคารแบบเดิมในช่วงเวลา 14.00 น. โดยผลการจำลองจะแสดงดังรูปที่ 3.12 ภายใต้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 การถ่ายเทความร้อนของผนังเดิมเวลา 14.00 น.

จากผลการจำลองรูปที่ 3.15 พบว่าผนังเดิมนั้นมีการถ่ายเทความร้อนที่สูงสังเกตได้จากในเวลา 14.00 น. ความร้อนที่ถูกถ่ายเทในผนังยังมีความร้อนสูงอยู่ถึงแม้ในห้องจะมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิด้านในของผนังนั้นอยู่ที่ 28 องศาเซลเซียส แผนภาพสีแสดงให้เห็นว่าความร้อนภายนอกสามารถทะลุผ่านวัสดุได้โดยไม่มี ความต้านทาน ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวภายในสูง วัสดุปัจจุบันที่ใช้ในเปลือกอาคารประกอบด้วยปูนปลาสเตอร์และอิฐดินเหนียวแห้งซึ่งมีการนำความร้อนสูงและทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง ลักษณะทางความร้อนนี้ส่งผลโดยตรงต่อ OTTV ของเปลือกอาคาร

ดังนั้นจึงทำได้ออกแบบในส่วนของผนังอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา โดยได้เลือกรูปแบบผนังมาทั้งหมด 3 แบบ

กรณีที่ 1 ผนังเดิมติดฉนวนใยแก้ว ความหนาแน่น 12 กก.ต่อลบ.ม. 6.5 ซม.

กรณีที่ 2 ผนังเดิมติดแผ่นยิปซัมและฉนวนใยแก้ว ความหนาแน่น 12 กก.ต่อลบ.ม. 6.5 ซม.

กรณีที่ 3 ผนังคอนกรีตมวลเบาติดแผ่นยิปซัมและฉนวนใยแก้ว ความหนาแน่น 12 กก.ต่อลบ.ม. 6.5 ซม.

โดยคุณสมบัติของวัสดุกรอบอาคารที่นำมาปรับปรุงนั้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.12 โดยในกรณีที่ 1 นั้นจะใช้ผนังเดิมของอาคารแต่ติดฉนวนใยแก้วซึ่งมีค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ต่ำ โดยสามารถช่วยลดความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร ในกรณีที่ 2 จะมีการติดแผ่นยิปซัมร่วมกับฉนวนใยแก้ว ซึ่งแผ่นยิปซัมนั้นมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าวัสดุกรอบอาคารเดิมแต่ยังไม่ต่ำเท่าฉนวนใยแก้ว ในกรณีที่ 3 เป็นการเปลี่ยนวัสดุกรอบอาคารหลังด้วยการเปลี่ยนอิฐมวลเบาเป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาเท่ากันซึ่งมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าครึ่งหนึ่ง รวมทั้งมีการติดแผ่นยิปซัมร่วมกับฉนวนใยแก้ว เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานความร้อนรวมของกรอบอาคารประเภทผนังที่ปรับปรุง

แยกส่วนเป็นเอกสารที่ส่งมอบสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

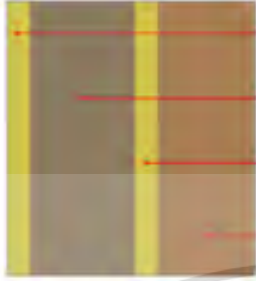


ตารางที่ 3.12 ข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุปรับปรุงผนังทั้ง 3 กรณี

ผนัง	องค์ประกอบ	ความหนา (cm.)	K (W/m ² .°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg.°C)
กรณีที่ 1	อิฐมวลเบา	7	0.79	1760	0.807
	ปูนฉาบ 2 ด้าน	1.5	0.84	1860	0.72
	ฉนวนใยแก้ว	6.5	0.042	12	0.96
กรณีที่ 2	อิฐมวลเบา	7	0.79	1,760	0.807
	ปูนฉาบ	1.5	0.84	1,860	0.72
	แผ่นยิปซัม	1.2	0.286	800	1.09
	ฉนวนใยแก้ว	6.5	0.042	12	0.96
กรณีที่ 3	คอนกรีตมวลเบา	7	0.476	1,280	0.84
	ปูนฉาบ	1.5	0.326	1,200	0.84
	แผ่นยิปซัม	1.2	0.286	800	1.09
	ฉนวนใยแก้ว	6.5	0.042	12	0.96

เมื่อนำวัสดุมาประกอบกันเป็นระบบกรอบอาคาร จะสามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อน (U-value) รวมของระบบกรอบอาคารประเภทผนังจากค่าความต้านทานรวมของวัสดุประกอบ โดยค่าการถ่ายเทความร้อนของกรอบอาคารปรับปรุงแต่ละกรณีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.13 โดยจากการคำนวณจะพบว่ากรอบอาคารในกรณีที่มีการติดตั้งฉนวนใยแก้วจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่ากรอบอาคารเดิมอย่างมีนัยยะสำคัญ อย่างไรก็ตามค่าการถ่ายเทความร้อนของแต่ละกรณีมีค่าไม่ต่างกันมาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการนำความร้อนของแผ่นยิปซัม หรือคอนกรีตมวลเบาไม่เด่นชัดเท่าฉนวนใยแก้ว

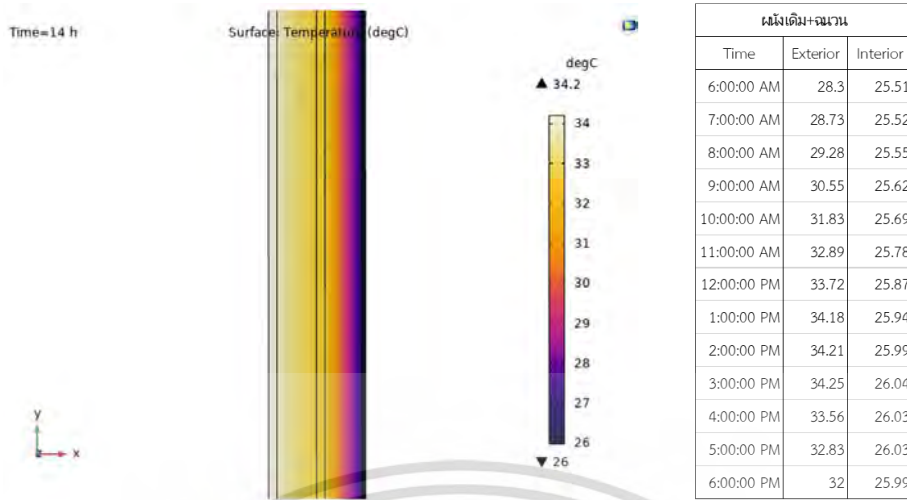
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.13 ส่วนประกอบและค่าการถ่ายเทความร้อนของวัสดุปรับปรุงผนังทั้ง 3 กรณี

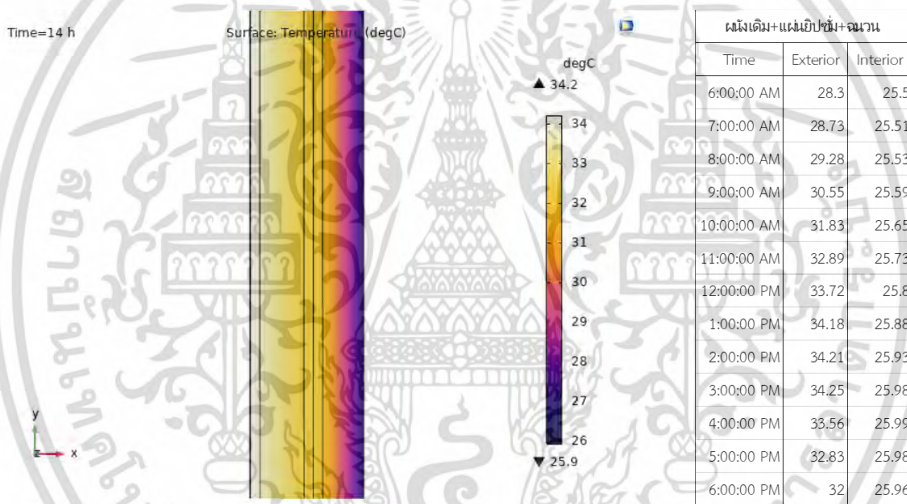
กรณี	องค์ประกอบ	ชั้นของวัสดุ	ความหนา (m.)	U-Value (W/m ² ·K)	
กรณีที่ 1		1	ปูนฉาบ	0.0075	0.534
		2	อิฐมอญ	0.0700	
		3	ปูนฉาบ	0.0075	
		4	ฉนวนใยแก้ว	0.0650	
กรณีที่ 2		1	ปูนฉาบ	0.0075	0.516
		2	อิฐมอญ	0.0700	
		3	ปูนฉาบ	0.0075	
		4	แผ่นยิปซัม	0.0120	
		5	ฉนวนใยแก้ว	0.0650	
กรณีที่ 3		1	ปูนฉาบ	0.0075	0.507
		2	คอนกรีตมวลเบา	0.0700	
		3	ปูนฉาบ	0.0075	
		4	แผ่นยิปซัม	0.0120	
		5	ฉนวนใยแก้ว	0.0650	

เมื่อทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาที่มีการปรับปรุงทั้ง 3 กรณี ผ่านโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.6 โดยตั้งเงื่อนไขให้เป็นสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพฯ ที่เวลา 14.00 น. และมีการวัดอุณหภูมิที่พื้นผิวภายในที่เป็นห้องปรับอากาศและภายนอกที่เป็นสิ่งแวดล้อมที่เวลาต่างๆ ตลอดทั้งวัน โดยผลการจำลองสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.16-3.18

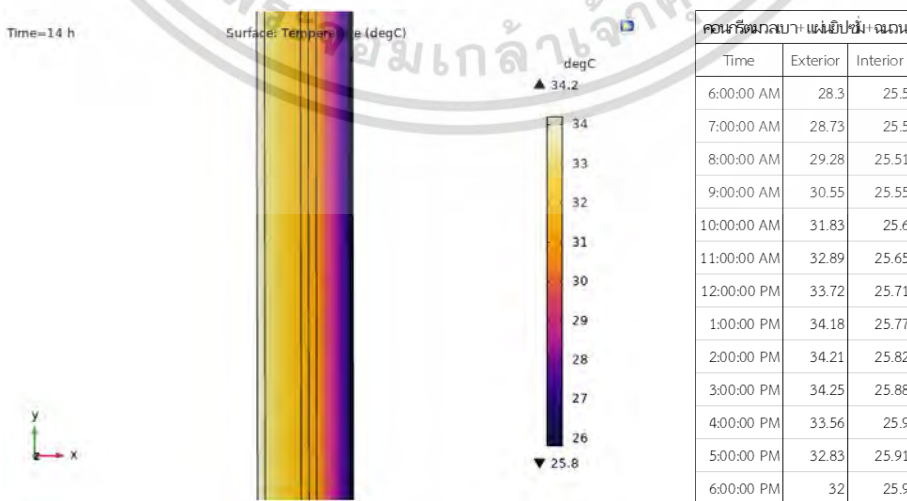
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 การถ่ายเทความร้อนของผนังปรับปรุงกรณีที่ 1 เวลา 14.00 น.



รูปที่ 3.17 การถ่ายเทความร้อนของผนังปรับปรุงกรณีที่ 2 เวลา 14.00 น.

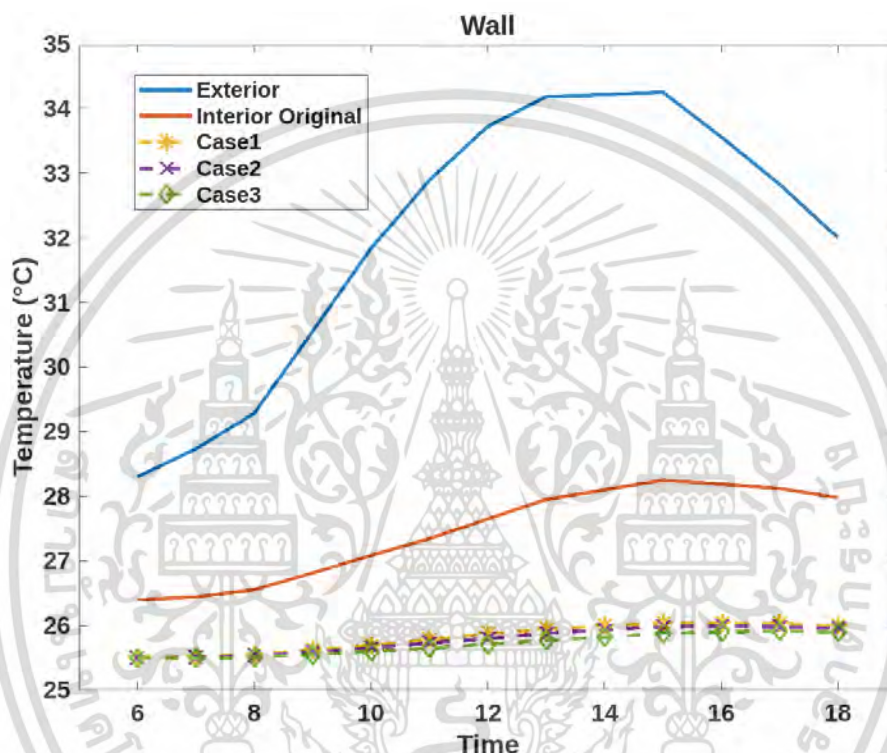


รูปที่ 3.18 การถ่ายเทความร้อนของผนังปรับปรุงกรณีที่ 3 เวลา 14.00 น.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองแผนภาพสีแสดงให้เห็นว่าความร้อนสามารถผ่านวัสดุผนังและแผ่นยิปซัมได้โดยอุณหภูมิจากสิ่งแวดล้อมมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ที่ชั้นของวัสดุฉนวนใยแก้วโดยอุณหภูมิจากภายนอกจะลดลงอย่างเฉียบพลัน เนื่องจากคุณสมบัติการต้านทานความร้อนโดยภายในห้องสามารถลดต่ำกว่า 26 องศา

โดยผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในเมื่อมีการปรับปรุงวัสดุรอบอาคารทั้ง 3 กรณีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 ผลการจำลองอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้รับทั้งภายนอกและภายในของผนังเดิมและโครงหลังคาที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ตลอดทั้งวัน

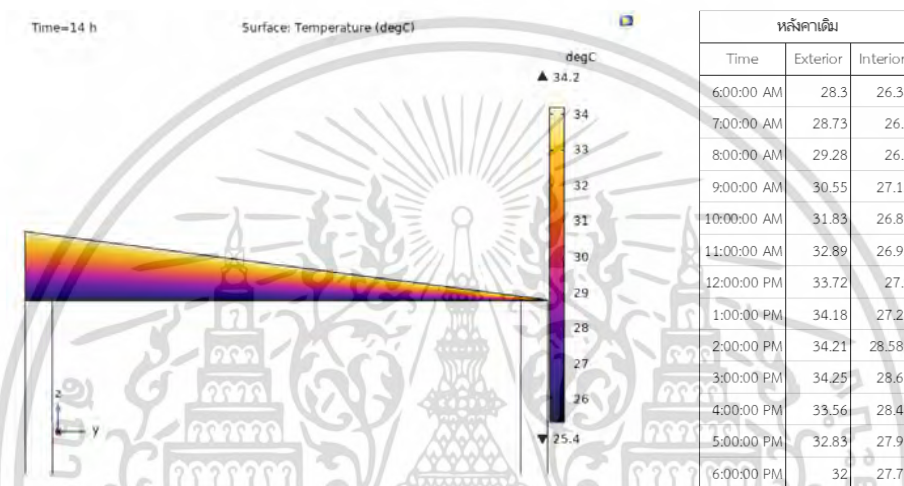


รูปที่ 3.19 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุรอบอาคารประเภทผนัง

ผลการวิจัยพบว่าผนังเดิมมีความต้านทานความร้อนต่ำกว่า ส่งผลให้อุณหภูมิภายในอาคารสูงขึ้น ในกรณีของการปรับปรุงใหม่ อุณหภูมิภายในจะลดลงอย่างมากในทั้งสามกรณี เนื่องจากมีฉนวนไฟเบอร์กลาสเพิ่มเติมที่ช่วยลดการส่งผ่านความร้อนของผนัง วัสดุเช่นแผ่นยิปซัมช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มเติม แต่ไม่ได้มีขนาดเท่ากับฉนวนไฟเบอร์กลาส ดังนั้น วัสดุผนังและส่วนประกอบของการปรับปรุงกรณีที่ 1 จึงถูกเลือกเพื่อใช้ในการปรับปรุงวัสดุรอบอาคารประเภทผนัง เนื่องจากติดตั้งง่ายกว่าและมีประสิทธิภาพแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ

3.3.5 ระบบปรับอากาศ (RTTV) ของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

สำหรับระบบปรับอากาศหลังคาผู้จัดทำได้ทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ผ่านโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.6 จากผลการจำลองรูปที่ 3.20 พบว่าหลังคาเดิมนั้นมีการถ่ายเทความร้อนที่สูงสังเกตได้จากในเวลา 14.00 น. ความร้อนที่ถูกถ่ายเทในหลังคายังมีความร้อนสูงอยู่โดยเฉพาะช่วงปลายที่มีช่องว่างอากาศน้อย ถึงแม้ในห้องจะมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิด้านในของหลังคาด้านปลายอยู่ที่ประมาณ 28.47 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.20 การถ่ายเทความร้อนของหลังคาเดิมเวลา 14.00 น.

ดังนั้นทำการออกแบบในส่วนของหลังคาอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา โดยได้เลือกรูปแบบหลังคาสามเหลี่ยม 3 แบบคือ

กรณีที่ 1 หลังคาเดิมปูฉนวนใยแก้ว Stay Cool

กรณีที่ 2 หลังคากระเบื้องคอนกรีต

กรณีที่ 3 หลังคากระเบื้องคอนกรีตปูฉนวนใยแก้ว Stay Cool

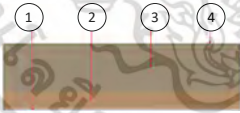
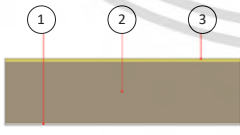
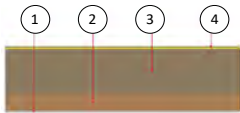
โดยคุณสมบัติของวัสดุกรอบอาคารที่นำมาปรับปรุงหลังคานั้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.14 โดยในกรณีที่ 1 นั้นจะใช้หลังคาเดิมของอาคารแต่ติดฉนวนใยแก้วซึ่งมีค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ต่ำเพิ่มเข้าไป ในกรณีที่ 2 จะมีการเปลี่ยนหลังคาเป็นกระเบื้องหลังคาคอนกรีต ซึ่งมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าหลังคาเมทัลชีทอย่างมีนัยยะสำคัญ ในกรณีที่ 3 จะมีการเปลี่ยนหลังคาเป็นกระเบื้องหลังคาคอนกรีตรวมทั้งมีการติดฉนวนใยแก้ว เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานความร้อนรวมของกรอบอาคารประเภทผนังที่ปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.14 ข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุปรับปรุงหลังคาทั้ง 3 กรณี

หลังคา	องค์ประกอบ	ความหนา (cm.)	K (W/m ² .°C)	ρ (kg/m ³)	C _p (kJ/kg.°C)
กรณีที่ 1	หลังคาเมทัลชีท	0.03	47.6	7,840	0.5
	ช่องอากาศ	40	0.025	1.23	1,006
	ฉนวนใยแก้ว	15	0.038	12	0.96
	แผ่นยิปซั่ม	1	0.191	880	1.09
กรณีที่ 2	กระเบื้องหลังคาคอนกรีต	1.9	0.993	2,400	0.79
	ช่องอากาศ	40	0.025	1.23	1,006
	แผ่นยิปซั่ม	1	0.191	880	1.09
กรณีที่ 3	กระเบื้องหลังคาคอนกรีต	1.9	0.993	2,400	0.79
	ช่องอากาศ	40	0.025	1.23	1,006
	ฉนวนใยแก้ว	15	0.038	12	0.96
	แผ่นยิปซั่ม	1	0.191	880	1.09

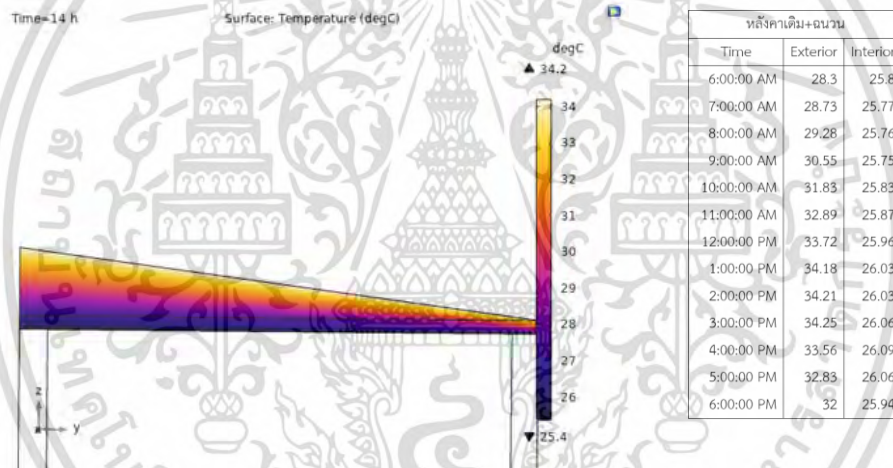
ตารางที่ 3.15 ส่วนประกอบและค่าการถ่ายเทความร้อนของวัสดุปรับปรุงหลังคาทั้ง 3 กรณี

กรณี	องค์ประกอบ	ชั้นของวัสดุ	ความหนา (m.)	U-Value (W/m ² .K)
กรณีที่ 1		หลังคาเมทัลชีท	0.03	0.215
		ช่องว่างอากาศ	0.400	
		ฉนวนใยแก้ว	0.150	
		แผ่นยิปซั่ม	0.03	
กรณีที่ 2		หลังคากระเบื้อง คอนกรีต	0.019	1.269
		ช่องว่างอากาศ	0.400	
		แผ่นยิปซั่ม	0.010	
Case 3		หลังคากระเบื้อง คอนกรีต	0.019	0.203
		ช่องว่างอากาศ	0.400	
		ฉนวนใยแก้ว	0.150	
		แผ่นยิปซั่ม	0.010	

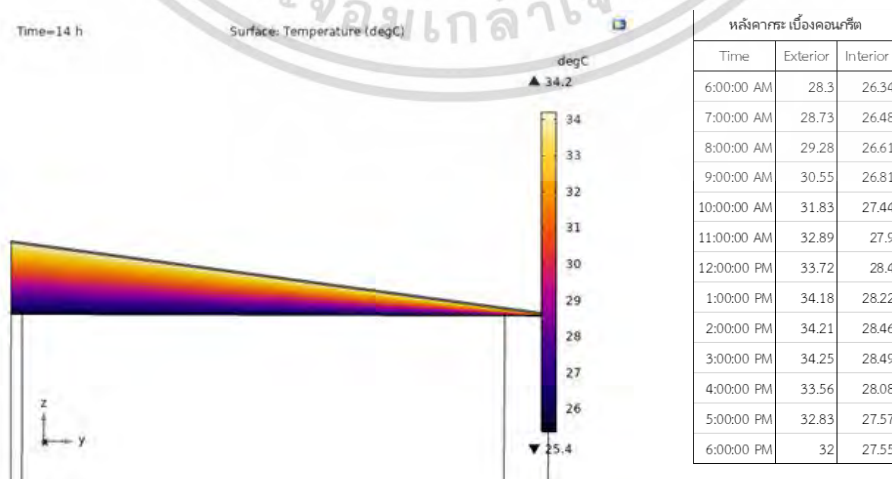
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำวัสดุมาประกอบกันเป็นระบบกรอบอาคารประเภทหลังคา จะสามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อน (U-value) รวมของระบบจากค่าความต้านทานรวมของวัสดุประกอบ โดยค่าการถ่ายเทความร้อนของกรอบอาคารปรับปรุงแต่ละกรณีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.15 โดยจากการคำนวณจะพบว่ากรอบอาคารในกรณีที่มีการติดตั้งฉนวนใยแก้วจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่ากรอบอาคารเดิมอย่างมีนัยยะสำคัญ นั้นทำให้ในกรณีที่ 2 ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนหลังคาจากหลังคาเมทัลชีทซึ่งมีค่าการนำความร้อนที่สูงมากเป็นหลังคากระเบื้องคอนกรีต แต่ด้วยความหนาของวัสดุที่มีค่าน้อยทำให้การลดลงของค่าการนำความร้อนนั้นมีผลเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนใยแก้ว

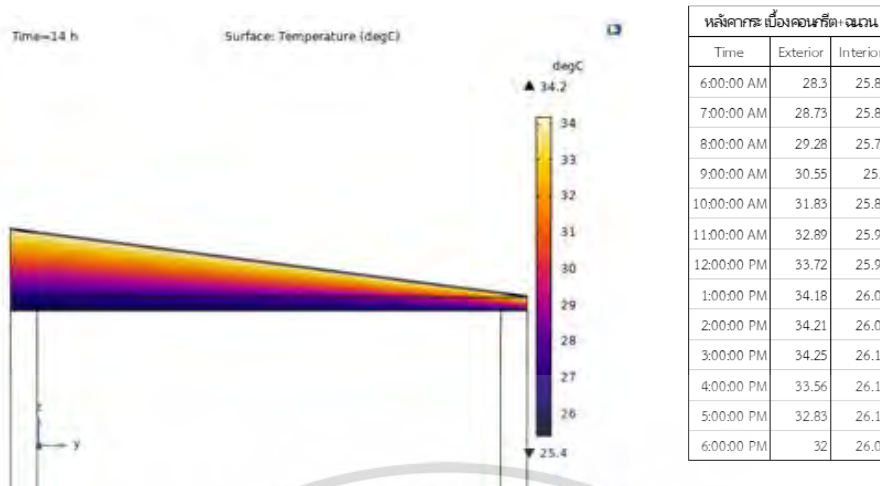
เมื่อทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาที่มีการปรับปรุงทั้ง 3 กรณี ผ่านโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.6 โดยตั้งเงื่อนไขให้เป็นสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพฯ ที่เวลา 14.00 น. และมีการวัดอุณหภูมิที่พื้นผิวภายในที่เป็นห้องปรับอากาศและภายนอกที่เป็นสิ่งแวดล้อมที่เวลาต่าง ๆ ตลอดทั้งวัน โดยผลการจำลองสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.21-3.23



รูปที่ 3.21 การถ่ายเทความร้อนของหลังคาปรับปรุงกรณีที่ 1 เวลา 14.00 น.



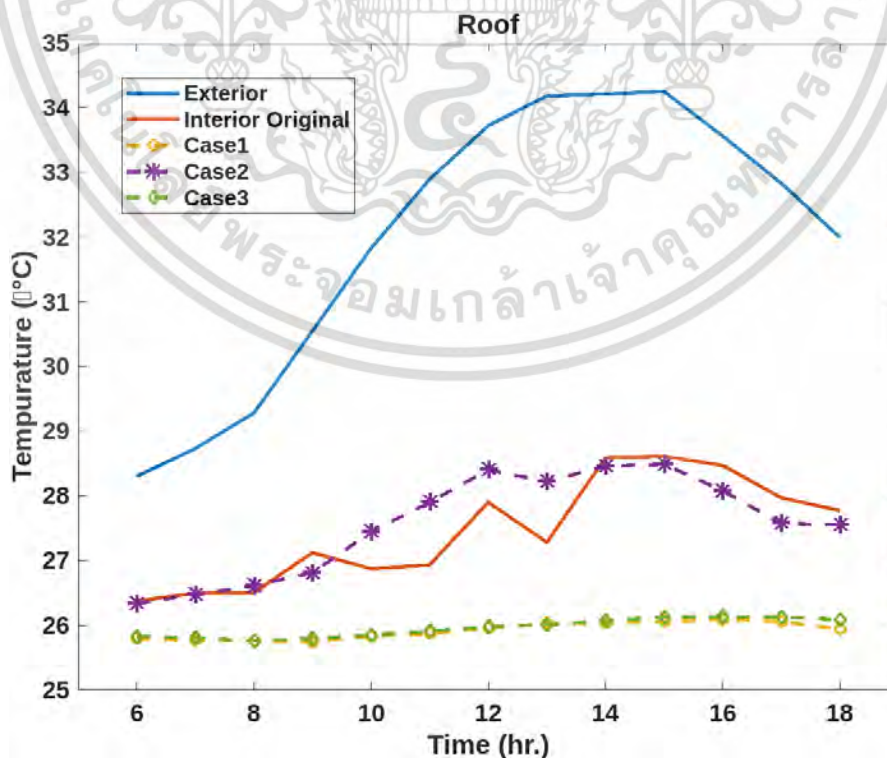
เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.22 การถ่ายเทความร้อนของหลังคาปรับปรุงกรณีที่ 2 เวลา 14.00 น. โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 การถ่ายเทความร้อนของหลังคาปรับปรุงกรณีที่ 3 เวลา 14.00 น.

ผลการจำลองแผนภาพสีแสดงให้เห็นว่าความร้อนสามารถผ่านวัสดุหลังคาและค่อย ๆ ลดลงเมื่อผ่านช่องว่างอากาศ แต่ที่ชั้นของวัสดุฉนวนใยแก้วโดยอุณหภูมิจากภายนอกจะลดลงอย่างเฉียบพลัน เนื่องจากคุณสมบัติการต้านทานความร้อนอย่างไรก็ตามตรงมุมที่มีช่องว่างอากาศต่ำจะยังคงมีค่าอุณหภูมิที่สูงอยู่

โดยผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในเมื่อมีการปรับปรุงวัสดุหลังคาทั้ง 3 กรณีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.24 ผลการจำลองอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้รับทั้งภายนอกและภายในของผนังเดิมและโครงหลังคาที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ตลอดทั้งวัน



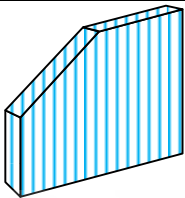
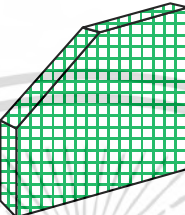
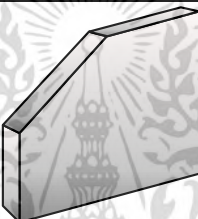
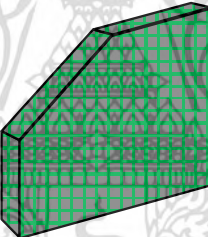
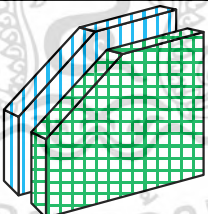
เอกสารนี้เป็นรูปที่ 3.24 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุกรอบอาคารประเภทหลังคา ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ในเชิงอุณหภูมิตั้งแต่มิที่ได้รับสำหรับทั้งภายนอกและภายในของหลังคาเดิมและกรณีหลังคาที่ได้รับการปรับปรุงต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 3.24 ผลการวิจัยพบว่าหลังคาเดิมมีความต้านทานความร้อนต่ำกว่า ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิภายในหลังคาสูงขึ้น อาคาร. หลังจากการปรับปรุงใหม่ อุณหภูมิภายในลดลงอย่างมากในกรณีที่มีการเพิ่มฉนวนไฟเบอร์กลาส ซึ่งช่วยลดการส่งผ่านความร้อนของหลังคา วัสดุเช่นกระเบื้องหลังคาช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มเติม แต่ไม่ได้อยู่ในระดับที่คล้ายกับฉนวนไฟเบอร์กลาส จึงเลือกวัสดุหลังคาและส่วนประกอบของการปรับปรุงกรณีที่ 1 มาใช้แทนกรอบอาคารประเภทหลังคา เนื่องจากติดตั้งง่ายกว่าการเติมฉนวนไฟเบอร์กลาสเพียงอย่างเดียว และประสิทธิภาพอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

3.3.6 ระบบกรอบอาคารกระจกของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

วิธีหนึ่งในการปรับปรุงค่า OTTV ของอาคาร คือการแทนที่วัสดุกรอบอาคารด้วยวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำกว่า (ค่า U) ดังนั้นการเปลี่ยนวัสดุกระจกจึงสามารถปรับปรุง OTTV ของอาคารได้อย่างมาก ลักษณะทางความร้อนที่สำคัญสองประการของวัสดุโปร่งใสคือค่า U และ SHGC ดังนั้นเคสที่ได้รับการปรับปรุงใหม่จะพิจารณาปัจจัยทั้งสองนี้เมื่อเลือกวัสดุทดแทน แก้วที่แตกต่างกันห้าชนิดที่ใช้ในตลาดประเทศไทยได้รับการคัดเลือกสำหรับการปรับปรุงใหม่ และสามารถสรุปคุณสมบัติของกระจกเหล่านี้ได้ในตารางที่ 3.18 แผนภาพที่แสดงแสดงองค์ประกอบของวัสดุกระจกที่มีมากกว่าหนึ่งชั้น ซึ่งรวมอยู่ในตารางด้วย วัสดุกระจกที่ใช้ในปัจจุบันสำหรับหน้าต่างของอาคารกรณีศึกษาคือกระจกใสหนา 6 มม. วัสดุกระจกดัดแปลงประกอบด้วยส่วนประกอบแก้วที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว 5 ชนิด ซึ่งมีป้ายกำกับประเภทกระจก 1-5 กระจกประเภทที่ 1 เป็นกระจกใสแต่มีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกันเล็กน้อย แก้วประเภท 2 มีค่า U คล้ายกับประเภท 1 โดยมี SHGC ต่ำกว่าเนื่องจากการเคลือบสีเขียว กระจกประเภท 3 เป็นกระจกสะท้อนความร้อนที่สามารถสะท้อนความร้อนจากแสงอาทิตย์จากภายในอาคารได้มาก ส่งผลให้ค่า U และค่า SHGC ลดลง กระจกประเภท 4 คล้ายกับกระจกประเภท 3 โดยมีการเคลือบสะท้อนแสงบนกระจกสีเขียวมหาสมุทร ดังนั้นค่า U และ SHGC จึงลดลงเล็กน้อย กระจกประเภท 5 เป็นกระจกสองชั้นโดยมีช่องว่างอากาศระหว่างแผง ให้ค่า U และ SHGC ที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุกระจกอื่น ๆ

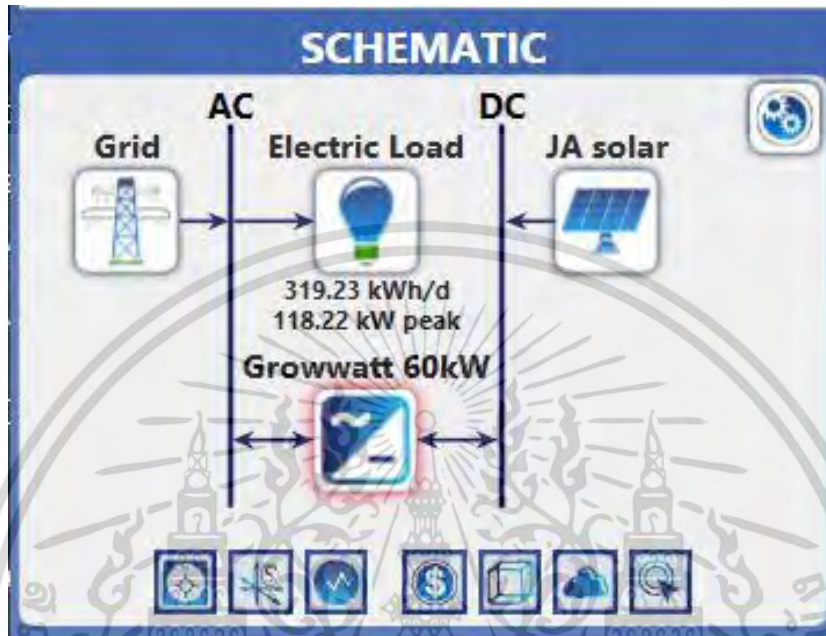
ตารางที่ 3.16 คุณสมบัติของวัสดุกระจกที่นำมาปรับปรุงใหม่

กรณี	วัสดุ	ส่วนประกอบ	ความหนา (m)	U-Value (W/m ² *K)	SHGC
1	กระจกใส		0.06	5.25	0.82
2	กระจกใสเขียว		0.06	5.25	0.60
3	กระจกสะท้อนแสง		0.06	4.65	0.46
4	กระจกสะท้อนแสงเขียว		0.06	3.99	0.28
5	กระจกสองชั้น		0.06-0.12- 0.06	1.66	0.25

3.3.7 การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน

อาคารที่จะปรับปรุงได้มีการทำการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ เพื่อให้พลังงานสุทธิของอาคารเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น โดยค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ที่ 140 kw ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2564 และ เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2563 และมีค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย 111.92 kw ดังนั้นจึงออกแบบระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ ให้เพียงพอต่อค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า โดยได้เลือกอินเวอร์เตอร์ขนาด 60 kw โดยอ้างอิงพลังงานสุทธิของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมจากโปรแกรม Building Energy Code (BEC) จึงทำการกำหนดขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานทั้งหมด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้โปรแกรม HOMER Pro มาวิเคราะห์ขนาดของอาร์เรย์ดังแสดงในรูปที่ 3.25 และ 3.26 โดยเลือก แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแบบ Solar Mono crystalline PV Module 535 W จำนวน 120 โมดูล



รูปที่ 3.25 Schematic diagram ของระบบที่ออกแบบ



รูปที่ 3.26 การกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อจำลองระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์แสงอาทิตย์ ผ่านโปรแกรม HOMER Pro

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ผล

บทนี้จะแสดงถึงอาคารโยธาหลังการปรับปรุงระบบต่างๆ ที่ได้รับการปรับปรุง โดยเปรียบเทียบค่าพลังงานสุทธิของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังการปรับปรุงระบบต่าง ๆ กับระบบเดิม โดยวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร Building Energy Code (BEC) และการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุงระบบต่าง ๆ

4.1 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังการปรับปรุงระบบต่าง ๆ

จากแนวทางในการปรับปรุงระบบต่างๆ ภายในอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม แนวทางที่ดีและคุ้มค่าที่สุดเพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงอาคารสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1.1 ระบบไฟฟ้าแสงสว่างหลังการปรับปรุง

การปรับปรุงระบบไฟฟ้าแสงสว่าง โดยการเปลี่ยนหลอดไฟเดิมจากหลอด ฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) มาใช้หลอดแอลอีดี (LED) โดยไม่มีการเปลี่ยนการจัดวางโคมไฟ ซึ่งจะทำให้ลดการใช้พลังงานและได้ประสิทธิภาพแสงที่ดีกว่า โดยข้อมูลของหลอดไฟที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของหลอดไฟทดแทน

Luminaire	พลังงานที่ใช้ (W)	จำนวน	ประสิทธิภาพ (lm/W)	จำนวนลูเมนต่อหลอด (lm)
LED Tube	18	474	116.66	2100
LED Tube	14	167	120.00	1680
LED Tube	24	18	150.00	3600

การจำลองประสิทธิภาพความส่องสว่างของห้อง CV-403 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมผ่านโปรแกรม DIALux evo ได้ผลการจำลองดังรูป 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

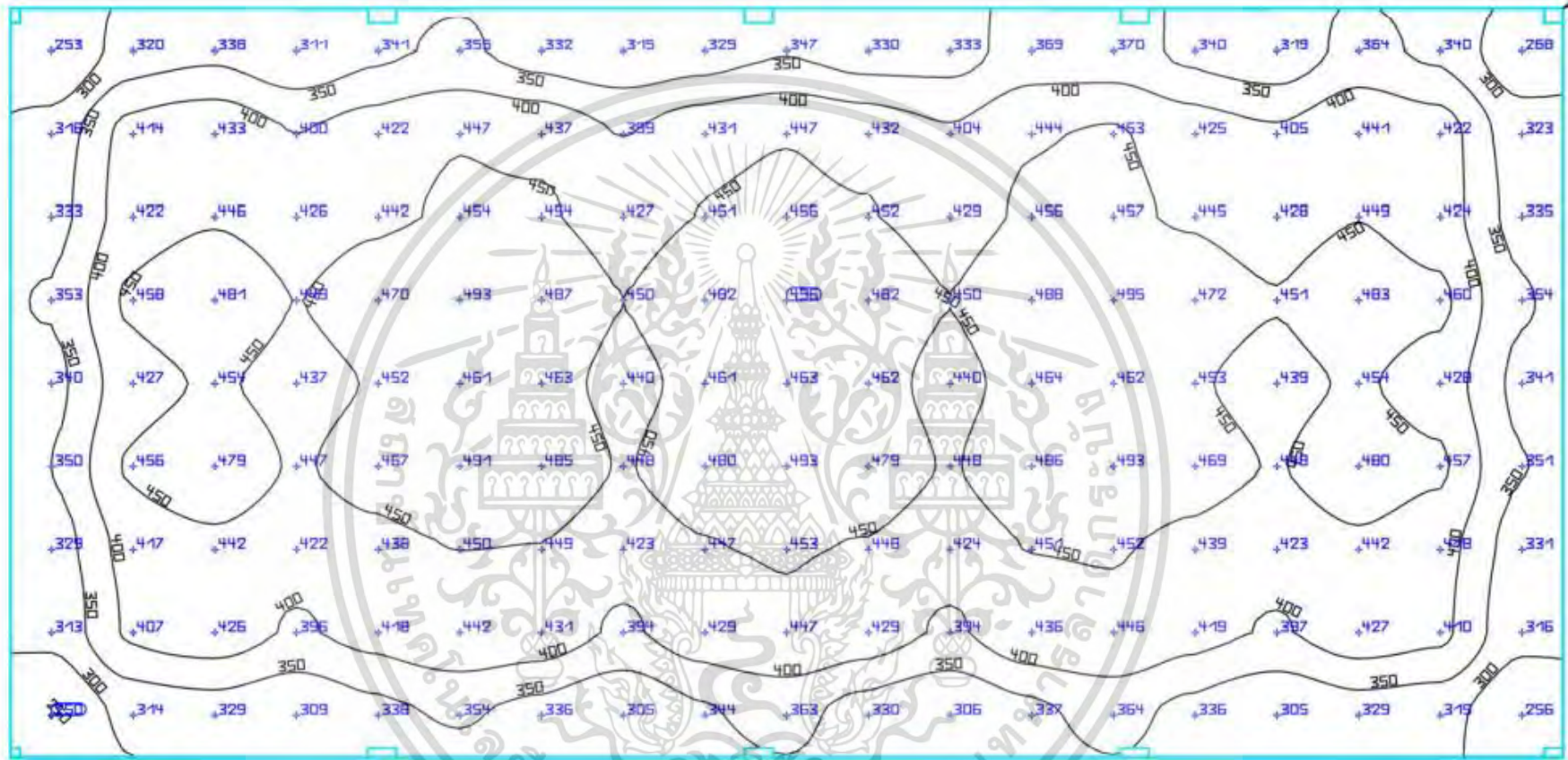
ตารางที่ 4.2 ตารางค่าความส่องสว่าง (Illuminance, E) บนบริเวณพื้นที่ทำงานของห้อง CV-403 ของอาคารอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม

Properties	E	E _{min}	E _{max}	g ₁	g ₂	Index
Calculation surface 1 Perpendicular illuminance Height: 0.900 m	410 lx	250 lx	496 lx	0.61	0.50	CG1

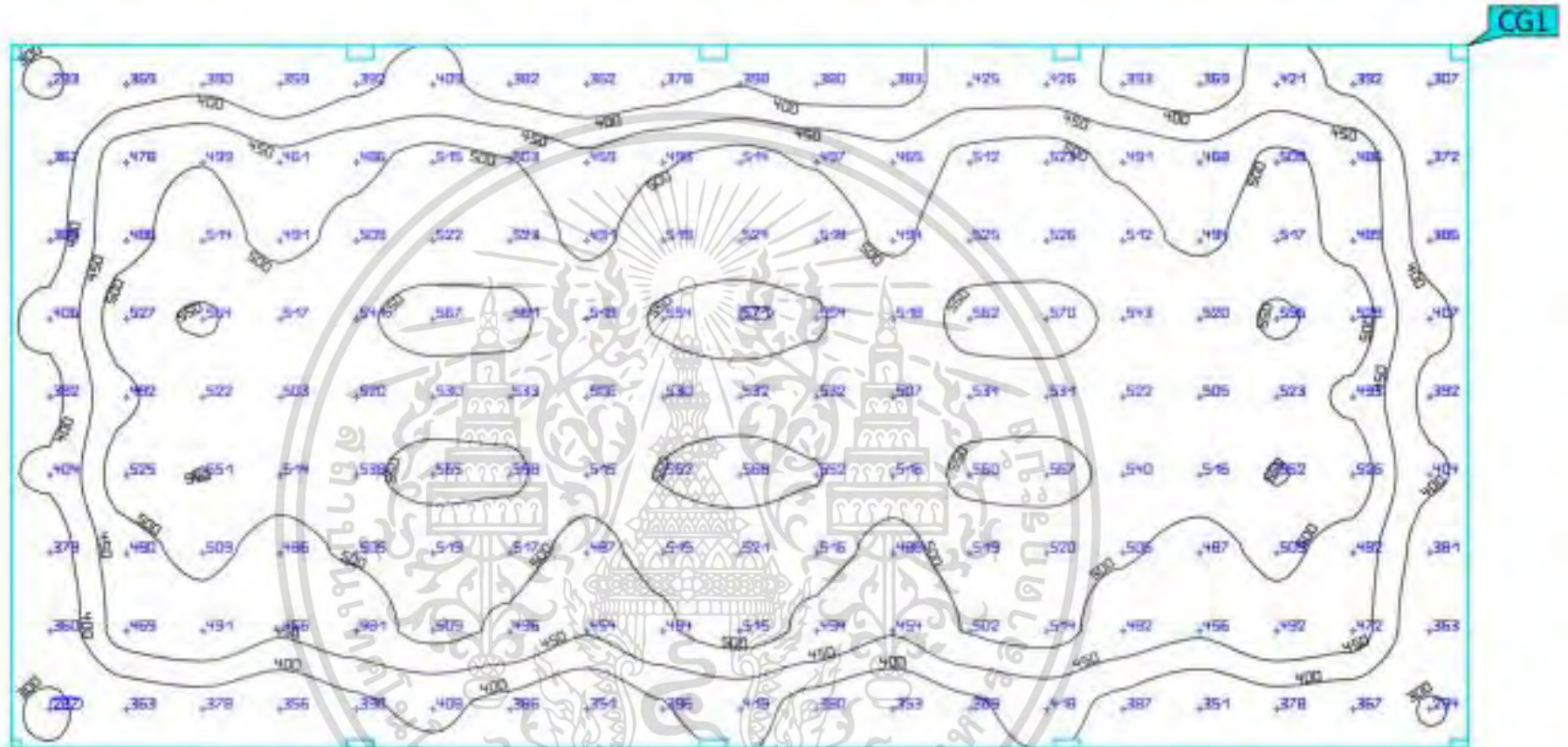
ตารางที่ 4.3 ตารางค่าความส่องสว่าง (Illuminance, E) บนบริเวณพื้นที่ทำงานของห้อง CV-403 หลังทำการปรับปรุงระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

Properties	E	E _{min}	E _{max}	g ₁	g ₂	Index
Calculation surface 1 Perpendicular illuminance Height: 0.900 m	472 lx	287 lx	571 lx	0.61	0.50	CG1

จากการจำลองประสิทธิภาพความส่องสว่าง ของห้อง CV-403 ขนาดพื้นที่ 126.405 ตารางเมตร พบว่าประสิทธิภาพความส่องสว่างบนบริเวณพื้นที่ทำงานของห้อง CV-403 มีค่าเท่ากับ 410 lx ซึ่งผ่านมาตรฐานความส่องสว่างที่ใช้ภายในห้องเรียนตามตารางเกณฑ์คุณภาพแสงสว่าง แต่หลอดที่ใช้ยังเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) ซึ่งใช้พลังงานมาก อีกทั้งยังต้องเชื่อมต่อบัลลาสต์ในการใช้งาน การจำลองประสิทธิภาพความส่องสว่างหลังเปลี่ยนหลอดไฟของห้อง CV-403 โดยเปลี่ยนหลอดไฟเป็นหลอดไดโอดเปล่งแสง (LED) พบว่าประสิทธิภาพความส่องสว่างบนบริเวณพื้นที่ทำงานของห้อง CV-403 มีค่าเท่ากับ 472 lx ซึ่งผ่านมาตรฐานความส่องสว่างที่ใช้ภายในห้องเรียนตามตารางเกณฑ์คุณภาพแสงสว่าง ผลลัพธ์แสดงให้เห็นการเปลี่ยนหลอดไฟสามารถลดการใช้พลังงานโดยยังคงรักษาคุณภาพทางได้ได้ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 สำหรับกรณีก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แผนภาพค่าความส่องสว่าง (Illuminance, E) บนบริเวณพื้นที่ทำงานของห้อง CV-403 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม



รูปที่ 4.2 แผนภาพค่าความส่องสว่าง (Illuminance, E) บนบริเวณพื้นที่ทำงานของห้อง CV-403 หลังการปรับปรุงระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

4.1.2 ระบบปรับอากาศหลังการปรับปรุง

การปรับปรุงระบบปรับอากาศ โดยการเปลี่ยนระบบปรับอากาศเดิมที่เป็นรุ่นเก่า มาใช้เป็นระบบปรับอากาศที่ใหม่ขึ้นมีระบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) และมีฉลากประหยัดไฟฟ้าเบอร์ 5 ซึ่งทำให้ลดการใช้พลังงานและได้ประสิทธิภาพการทำความเย็นที่ดีกว่าดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลของเครื่องปรับอากาศทดแทน

ชนิด เครื่องปรับอากาศ	การทำความเย็น (BTU/h)	การใช้พลังงาน (kW)	SEER (BTU/h/W)	จำนวน
อินเวอร์เตอร์	15,000	0.600	24.00	8
	22,000	0.930	22.50	16
	38,000	1.470	20.81	40

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเครื่องปรับอากาศแต่ละตัวจะมีค่าสมรรถนะของเครื่องปรับอากาศ Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) ไม่เท่ากัน ถ้าเป็นเครื่องปรับอากาศรุ่นเก่าจะมีค่า (SEER) น้อยกว่าเครื่องปรับอากาศรุ่นใหม่ เพราะที่ใช้กำลังไฟฟ้ามากกว่าเลยทำให้ค่าไฟฟ้าสูงมากตามด้วย จากตัวอย่างการคำนวณค่า SEER ของเครื่องปรับอากาศรุ่นเก่ามีค่าเท่ากับ 24 ในเครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก 10.724 และ SEER เท่ากับ 20.81 ในเครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่ จากการอ้างอิงจาก กฟผ.ได้กำหนดระดับประสิทธิภาพเครื่องปรับอากาศเป็น 5 ระดับ โดยใช้เกณฑ์ Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) ค่าประสิทธิภาพการทำความเย็นในการกำหนด จะเห็นได้ว่าเครื่องปรับอากาศรุ่นใหม่ที่น่ามาทดแทนมีประสิทธิภาพสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานประหยัดพลังงาน

4.1.3 ระบบไฟฟ้าโดยรวมของอาคารโยธาหลังการปรับปรุงระบบไฟฟ้า

การปรับปรุงระบบไฟฟ้า ทั้งระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบปรับอากาศ ทำให้โหลดลดลง ดังนั้นจึงได้ทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ป้องกัน และสายตัวนำบางตัว เพื่อให้สัมพันธ์กับขนาดของโหลดที่เปลี่ยนไป และเปลี่ยนบางตัวที่เสื่อมสภาพ โดยมีการปรับปรุงดังตารางโหลดต่อไปนี้

ตารางที่ 4.7 โหลดรวมของชั้น 1 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม

CAPACITY : 18 CIRCUIT		PANEL NO. FLOOR 1st						LOCATION : 1st FLOOR				
MAIN : MCB 3P 160AT/250AF 25kA AT 415 VAC							MOUNTING : SURFACE MOUNT					
CCT. NO.	DESCRIPTION	BREAKER			CONDUCTORS		CONDUIT		LOAD (VA)			
		POLE	AT	IC	SIZE (SQ.MM)	TYPE	SIZE (INCH)	TYPE	PHASE A	PHASE B	PHASE C	
1	CENTRAL	1	20	10k	2x4,G-2.5	IEC01	3/4	EMT	2995			
3	ห้องประชุม	1	50	10k	3x16,G-6	IEC01	1 1/4	EMT		7804		
5	ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์	1	63	10k	3x25,G-6	IEC01	1 1/4	EMT			11190	
7	ห้องสหกรณ์(เก่า)	1	63	10k	3x25,G-6	IEC01	1 1/4	EMT	11940			
9	ห้องเย็บเล็มไหม	1	40	10k	4x10,G-4	IEC01	1 1/4	EMT		7061		
11	SPARE											
13									4778			
15	ห้องธุรการ	3	30	10k	4x10,G-4	IEC01	1 1/4	EMT		4850		
17											4850	
2									5200			
4	ห้องพักอาจารย์	3	40	10k	4x10,G-4	IEC01	1 1/4	EMT		7000		
6											5900	
8									4970			
10	ห้องทานอาหาร	3	30	10k	4x10,G-4	IEC01	1 1/4	EMT		4100		
12											4100	
14	SPARE											
16	SPARE											
18	SPARE											
TOTAL PHASE VA		86738						29883	30815	26040		
MAIN CIRCUIT BREAKER		MCB 3P 160 AT/250AF										
MAIN FEEDER		4x95,G-10 sq.mm. , IMC										

ตารางที่ 4.8 โหลดรวมของชั้น 1 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุง

CAPACITY : 18 CIRCUIT		PANEL NO. FLOOR 1st						LOCATION : 1st FLOOR				
MAIN : MCB 3P 150AT/250AF 25kA AT 415 VAC							MOUNTING : SURFACE MOUNT					
CCT. NO.	DESCRIPTION	BREAKER			CONDUCTORS		CONDUIT		LOAD (VA)			
		POLE	AT	IC	SIZE (SQ.MM)	TYPE	SIZE (INCH)	TYPE	PHASE A	PHASE B	PHASE C	
1	CENTRAL	1	20	10k	2x4,G-2.5	IEC01	3/4	EMT		2126		
3	ห้องประชุม	1	40	10k	3x16,G-6	IEC01	1 1/4	EMT			7154	
5	ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์	1	50	10k	3x25,G-6	IEC01	1 1/4	EMT			10088	
7	ห้องสหกรณ์(เก่า)	1	50	10k	3x25,G-6	IEC01	1 1/4	EMT		9792		
9	ห้องเย็บเล็มไหม	1	30	10k	4x10,G-4	IEC01	1 1/4	EMT			6516	
11	SPARE											
13										5228		
15	ห้องธุรการ	3	25	10k	4x10,G-4	IEC01	1 1/4	EMT			4265	
17											3635	
2									5200			
4	ห้องพักอาจารย์	3	25	10k	4x10,G-4	IEC01	1 1/4	EMT			4361	
6											5225	
8									4970			
10	ห้องทานอาหาร	3	20	10k	4x10,G-4	IEC01	1 1/4	EMT			4800	
12											4800	
13	EV Charger	3	32	10k	4x10,G-4	IEC01	1 1/4	EMT		7333		
											7333	
											7333.33	
TOTAL PHASE VA		96418						31538	33798	31081.3		
MAIN CIRCUIT BREAKER		MCB 3P 150 AT/250AF										
MAIN FEEDER		4x95,G-10 sq.mm. , IMC										

ตารางที่ 4.9 โหลดรวมของชั้น 2 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม

CAPACITY : 8 CIRCUIT		PANEL NO. รวมชั้น 2					LOCATION : 2nd FLOOR				
MAIN : MCB 3P 320AT/250AF 36kA AT 415 VAC		MOUNTING : SURFACE MOUNTED									
CCT. NO.	DESCRIPTION	BREAKER			CONDUCTORS		CONDUIT		LOAD (VA)		
		POLE	AT	IC	IZE (SQ.MM)	TYPE	SIZE (INCH)	TYPE	PHASE A	PHASE B	PHASE C
1	CENTRAL	2	20 AT	5 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	3177		
3	CV-201	2	50 AT	5 kA	2x10,G-6	IEC01	1	EMT		18140	
5	CV-202	2	75 AT	5 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT			14650
7	CV-204	2	100 AT	5 kA	2x50,G-10	IEC01	2 1/2	EMT	19461		
9	ห้องควบคุม ฉายภาพ	2	40 AT	5 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT		7550	
2	CV-203	2	75 AT	5 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT			15066
4	ห้องบรรยายรวม	4	125 AT	5 kA	4x70,G-16	IEC01	2 3/4	EMT	18570		
										18218	
											18218
6	SPARE	2	40 AT	5 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT	6800		
8	SPARE	2	20 AT	5 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT		4000	
TOTAL PHASE VA					143850				48008	47908	47934
BUS SYSTEM											
MAIN CIRCUIT BREAKER		MCB 320 AT/400 AF									
MAIN FEEDER		4x240,G-25 sq.mm. , 3 IMC									

ตารางที่ 4.10 โหลดรวมของชั้น 2 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุง

CAPACITY : 8 CIRCUIT		PANEL NO. รวมชั้น 2					LOCATION : 2nd FLOOR					
MAIN : MCB 3P 160AT/250AF 36kA AT 415 VAC		MOUNTING : SURFACE MOUNTED										
CCT. NO.	DESCRIPTION	BREAKER			CONDUCTORS		CONDUIT		LOAD (VA)			
		POLE	AT	IC	IZE (SQ.MM)	TYPE	SIZE (INCH)	TYPE	PHASE A	PHASE B	PHASE C	
1	CENTRAL	2	16	5 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	2368			
3	CV-201	2	80	5 kA	2x10,G-6	IEC01	1	EMT		18654		
5	CV-202	2	63	5 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT			12540	
7	CV-204	2	70	5 kA	2x50,G-10	IEC01	2 1/2	EMT	15648			
9	ห้องควบคุม ฉายภาพ	2	32	5 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT		6560		
2	CV-203	2	63	5 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT			12516	
4	ห้องบรรยายรวม	4	50	5 kA	4x70,G-16	IEC01	2 3/4	EMT		9652		
											10720	
												10720
6	SPARE	2	40 AT	5 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT	6800			
8	SPARE	2	20 AT	5 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT		4000		
TOTAL PHASE VA					110178				34468	39934	35776	
BUS SYSTEM												
MAIN CIRCUIT BREAKER		MCB 160 AT/250 AF										
MAIN FEEDER		4x240,G-25 sq.mm. , 3 IMC										

ตารางที่ 4.11 โหลดรวมของชั้น 3 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม

CAPACITY : 24 CIRCUIT		PANEL NO. รวมชั้น 3					LOCATION : 3rd FLOOR				
MAIN : MCB 3P 150AT/250AF 25kA AT 415 VAC		MOUNTING : SURFACE MOUNTED									
CCT. NO.	DESCRIPTION	BREAKER			CONDUCTORS		CONDUIT		LOAD (VA)		
		POLE	AT	IC	ZE (SQ.MM)	TYPE	SIZE (INCH)	TYPE	PHASE A	PHASE B	PHASE C
1	CENTRAL	2	20 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	720		
3	CV-301	2	50 AT	10 kA	2x10,G-6	IEC01	1	EMT		11446	
5	CV-303	2	80 AT	10 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT			17334
7	CV-302	2	50 AT	10 kA	2x50,G-10	IEC01	2 1/2	EMT	7045		
9	ห้องโปรเจค	2	20 AT	10 kA	2x50,G-10	IEC01	2 1/2	EMT		4186	
11											
13											
15											
17											
19											
21											
23											
2	CV-304	2	50 AT	10 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT	8555		
4	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT		10000	
6	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT			10000
8	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	10000		
12											
16											
20											
24											
TOTAL PHASE VA					79286				26320	25632	27334
MAIN CIRCUIT BREAKER		MCB 3P 150 AT/250AF									
MAIN FEEDER		4x95,G-6 sq.mm. , 3 IMC									

ตารางที่ 4.12 โหลดรวมของชั้น 3 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุง

CAPACITY : 24 CIRCUIT		PANEL NO. รวมชั้น 3					LOCATION : 3rd FLOOR				
MAIN : MCB 3P 125AT/250AF 25kA AT 415 VAC		MOUNTING : SURFACE MOUNTED									
CCT. NO.	DESCRIPTION	BREAKER			CONDUCTORS		CONDUIT		LOAD (VA)		
		POLE	AT	IC	ZE (SQ.MM)	TYPE	SIZE (INCH)	TYPE	PHASE A	PHASE B	PHASE C
1	CENTRAL	2	20 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT		548	
3	CV-301	2	50 AT	10 kA	2x10,G-6	IEC01	1	EMT			7998
5	CV-303	2	80 AT	10 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT			15236
7	CV-302	2	50 AT	10 kA	2x50,G-10	IEC01	2 1/2	EMT		7824	
9	ห้องโปรเจค	2	20 AT	10 kA	2x50,G-10	IEC01	2 1/2	EMT			3732
11											
13											
15											
17											
19											
21											
23											
2	CV-304	2	50 AT	10 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT		8220	
4	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT			10000
6	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT			10000
8	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	10000		
12											
16											
20											
24											
TOTAL PHASE VA					73558				26592	21730	25236
MAIN CIRCUIT BREAKER		MCB 3P 125 AT/250AF									
MAIN FEEDER		4x95,G-6 sq.mm. , 3 IMC									

ตารางที่ 4.13 โหลดรวมของชั้น 4 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม

CAPACITY : 24 CIRCUIT		PANEL NO. รวมชั้น 4					LOCATION : 2nd FLOOR					
MAIN : MCB 3P 150AT/250AF 25kA AT 415 VAC		MOUNTING : SURFACE MOUNTED										
CCT. NO.	DESCRIPTION	BREAKER			CONDUCTORS		CONDUIT		LOAD (VA)			
		POLE	AT	IC	ZE (SQ.MM)	TYPE	SIZE (INCH)	TYPE	PHASE A	PHASE B	PHASE C	
1	CENTRAL	2	20 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	612			
3	CV-401	2	80 AT	10 kA	2x10,G-6	IEC01	1	EMT	16518			
5	CV-402	2	80 AT	10 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT		17984		
7	CV-403	2	50 AT	10 kA	2x50,G-10	IEC01	2 1/2	EMT	9454			
9												
11												
13												
15												
17												
19												
21												
23												
2	ห้องโปรเจค	2	50 AT	10 kA	4x70,G-16	IEC01	2 3/4	EMT	5302			
4	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT	10000			
6	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT		10000		
8	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	10000			
12												
16												
20												
24												
TOTAL PHASE VA		79870							25368	26518	27984	
MAIN CIRCUIT BREAKER		MCB 3P 150 AT/250AF										
MAIN FEEDER		4x95,G-6 sq.mm. , 3 IMC										

ตารางที่ 4.14 โหลดรวมของชั้น 4 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุง

CAPACITY : 24 CIRCUIT		PANEL NO. รวมชั้น 4					LOCATION : 4th FLOOR					
MAIN : MCB 3P 100AT/250AF 25kA AT 415 VAC		MOUNTING : SURFACE MOUNTED										
CCT. NO.	DESCRIPTION	BREAKER			CONDUCTORS		CONDUIT		LOAD (VA)			
		POLE	AT	IC	ZE (SQ.MM)	TYPE	SIZE (INCH)	TYPE	PHASE A	PHASE B	PHASE C	
1	CENTRAL	2	20 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	476			
3	CV-401	2	80 AT	10 kA	2x10,G-6	IEC01	1	EMT		11050		
5	CV-402	2	80 AT	10 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT			15504	
7	CV-403	2	50 AT	10 kA	2x50,G-10	IEC01	2 1/2	EMT	8184			
9												
11												
13												
15												
17												
19												
21												
23												
2	ห้องโปรเจค	2	50 AT	10 kA	4x70,G-16	IEC01	2 3/4	EMT	3804			
4	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x10,G-4	IEC01	3/4	EMT		10000		
6	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x35,G-6	IEC01	2	EMT			10000	
8	SPARE	2	50 AT	10 kA	2x4,G-4	IEC01	3/4	EMT	10000			
12												
16												
20												
24												
TOTAL PHASE VA		69018							22464	21050	25504	
MAIN CIRCUIT BREAKER		MCB 3P 100 AT/250AF										
MAIN FEEDER		4x95,G-6 sq.mm. , 3 IMC										

จากตารางที่ 4.5 ถึง 4.14 จะเห็นได้ว่าโหลดไฟฟ้าหลังการปรับปรุงระบบไฟฟ้ามีค่าลดลงในแต่ละชั้น โดยตรงส่วนที่เน้นสีเหลืองจะเป็นส่วนที่ทำการปรับปรุงระบบไฟฟ้าแสงสว่าง, ระบบปรับอากาศ, อุปกรณ์ป้องกัน, สายตัวนำและมีการเพิ่มระบบ EV Charger เพิ่มให้โหลดที่ปรับปรุงสัมพันธ์กับหม้อแปลงเดิม

โหลดรวมของตู้ Main Distribution Board (MDB) อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมมีค่า 389,744 VA โหลดรวมของตู้ Main Distribution Board (MDB) อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุงมีค่า 349,171 VA โดยหลังปรับปรุงสามารถลดโหลดรวมไปได้ 40,573 VA และขนาดของโหลดยังสัมพันธ์กับขนาดของหม้อแปลง

โหลดรวมของชั้น 1 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมมีค่า 86,738 VA โหลดรวมของชั้น 1 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุงมีค่า 96,418 VA โดยหลังปรับปรุงมีโหลดเพิ่มขึ้น 9,680 VA เนื่องจากมีการติดตั้งระบบ EV Charger ที่ห้องสำรอง (Spare) ของตู้โหลด

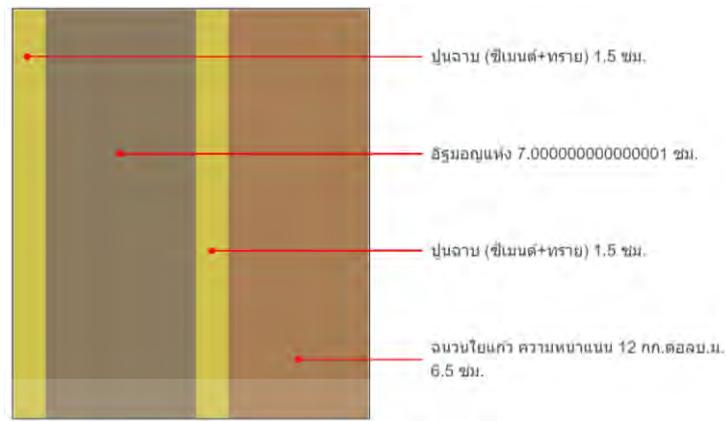
โหลดรวมของชั้น 2 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมมีค่า 143,850 VA โหลดรวมของชั้น 2 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุงมีค่า 110,178 VA โดยหลังปรับปรุงสามารถลดโหลดรวมไปได้ 33,672 VA

โหลดรวมของชั้น 3 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมมีค่า 79,286 VA โหลดรวมของชั้น 3 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุงมีค่า 73,558 VA โดยหลังปรับปรุงสามารถลดโหลดรวมไปได้ 5,728 VA

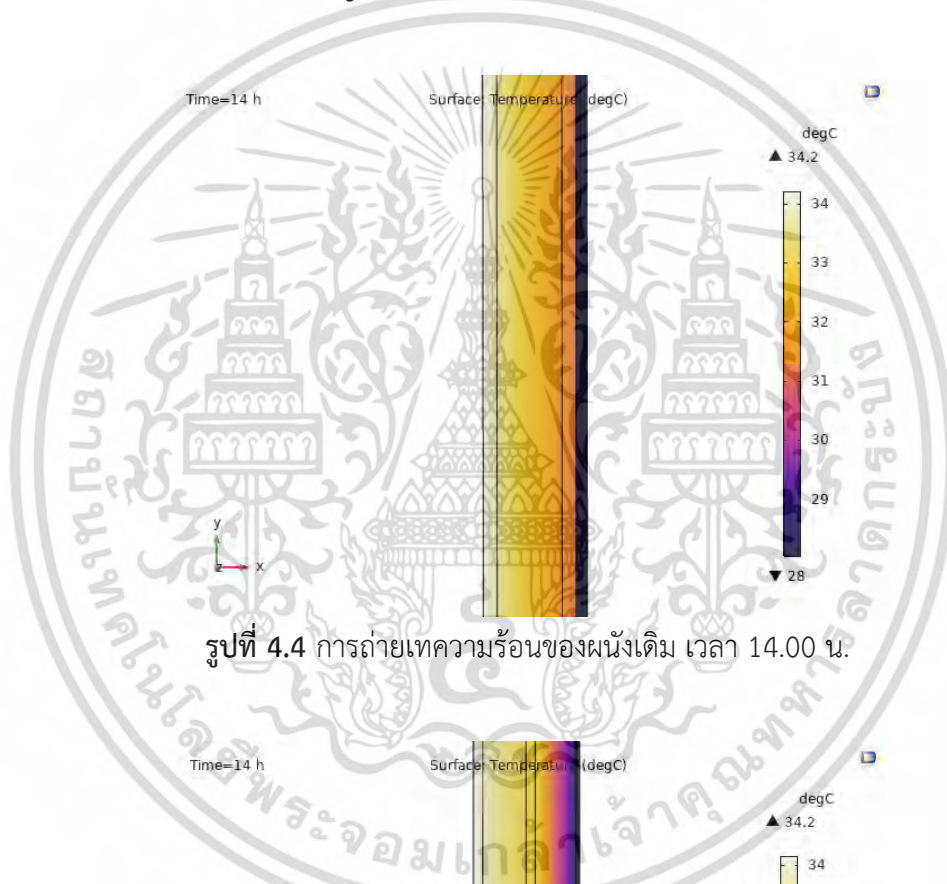
โหลดรวมของชั้น 4 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิมมีค่า 79,870 VA โหลดรวมของชั้น 4 อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุงมีค่า 69,018 VA โดยหลังปรับปรุงสามารถลดโหลดรวมไปได้ 10,852 VA

4.1.4 ระบบรอบอาคาร (OTTV) หลังการปรับปรุง

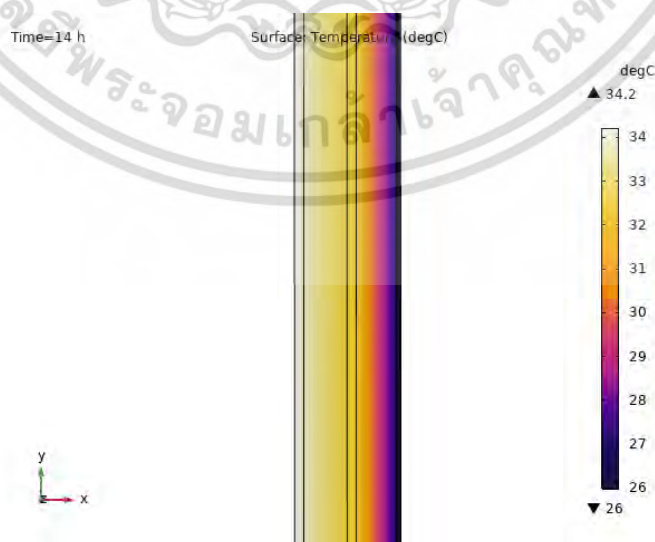
การปรับปรุงระบบรอบอาคาร (OTTV) โดยเลือกเป็นแนวทางที่ 1 การติดฉนวนใยแก้วเพิ่มหลังจากชั้นปูนฉาบที่ด้านในของผนังเดิม เพราะทั้ง 3 แนวทางมีค่าอุณหภูมิภายในและค่า OTTV ใกล้เคียงกัน จากการจำลองจากโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.6 และโปรแกรม Building Energy Code (BEC) แต่แนวทางที่ 1 เป็นการปรับปรุงที่ไม่ยุ่งยากและมีงบประมาณน้อยที่สุด



รูปที่ 4.3 ผนังเดิมติดฉนวนใยแก้ว

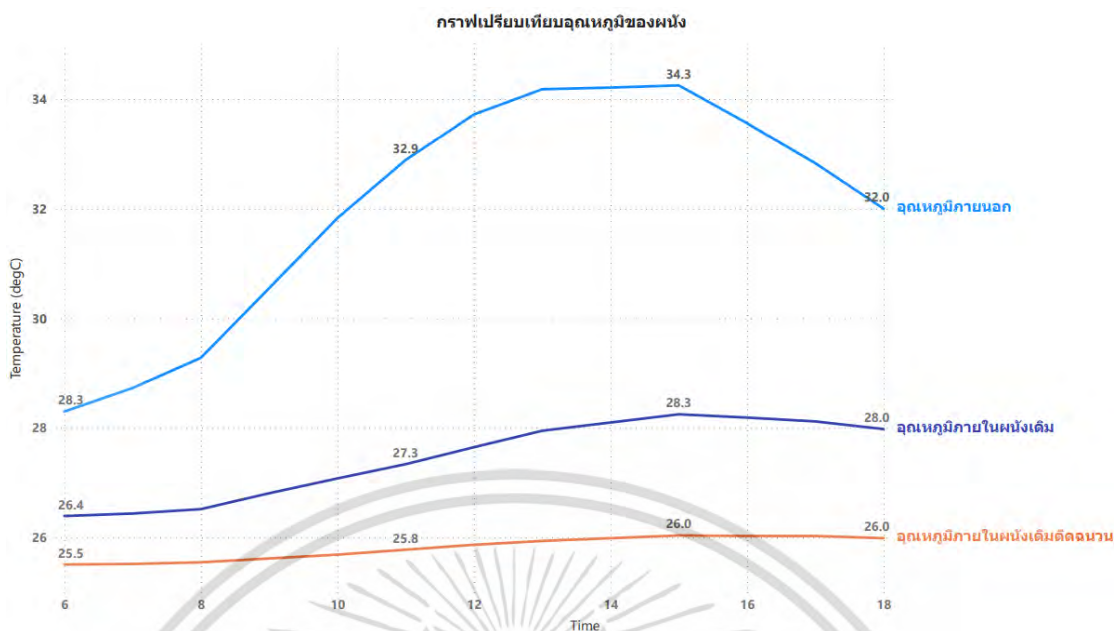


รูปที่ 4.4 การถ่ายเทความร้อนของผนังเดิม เวลา 14.00 น.



รูปที่ 4.5 การถ่ายเทความร้อนของผนังเดิมติดฉนวนใยแก้ว เวลา 14.00 น.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

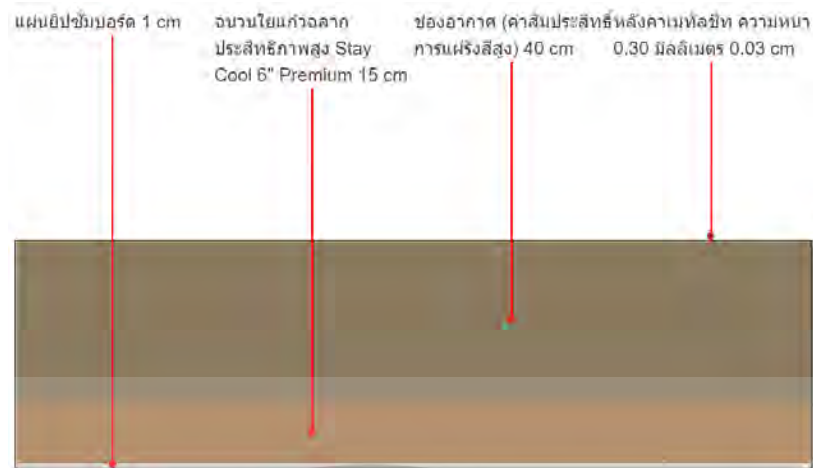


รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของผนัง

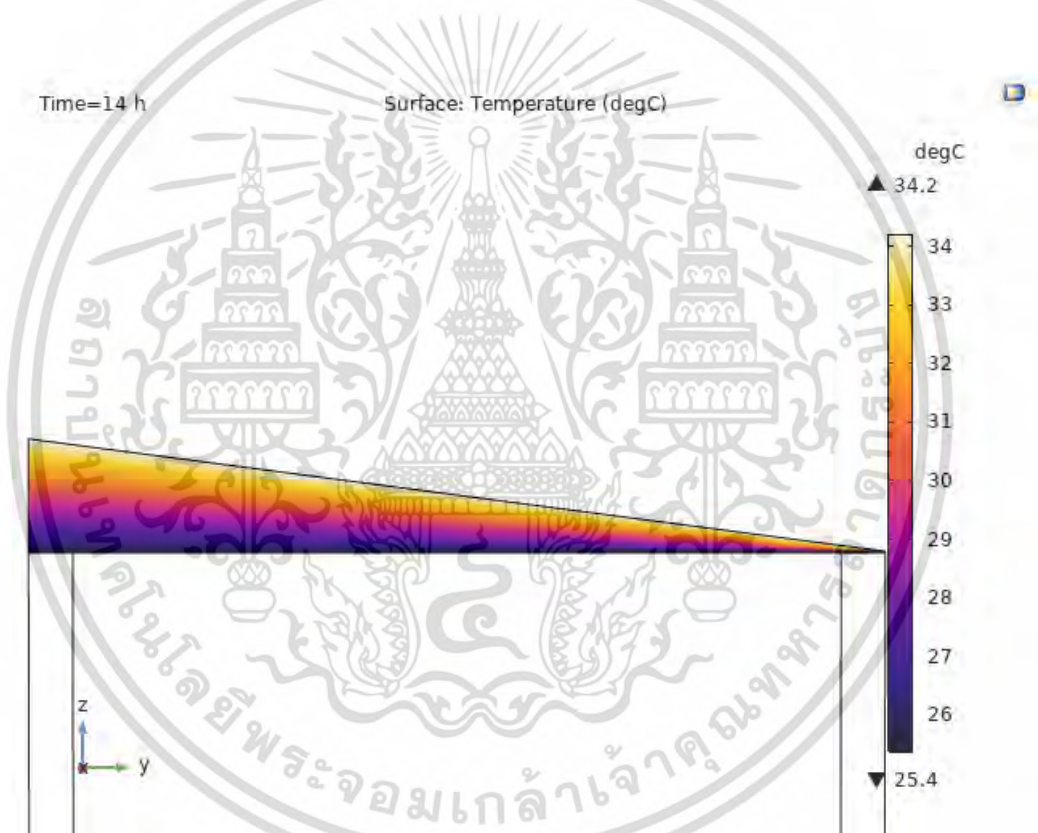
จากผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนผ่านโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.6 พบว่าการถ่ายเทความร้อนของผนังเดิมติดฉนวนใยแก้วนั้นมีความน้อยกว่าผนังเดิมมาก โดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าในเวลา 14.00 น. อุณหภูมิภายในผนังเดิมติดฉนวนใยแก้ว มีค่า 26 องศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าอุณหภูมิภายในผนังเดิมที่มีอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และรูปที่ 4.6 เห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในผนังเดิมติดฉนวนใยแก้ว มีความน้อยกว่าอุณหภูมิภายในผนังเดิมในเวลาเท่ากัน

4.1.5 ระบบปรับอากาศ (RTTV) หลังการปรับปรุง

การปรับปรุงระบบปรับอากาศ (RTTV) โดยเลือกเป็นแนวทางที่ 1 การปูฉนวนใยแก้วเพิ่มบนชั้นแผ่นยิปซัมบอร์ด เพราะมีค่าอุณหภูมิภายในและค่า RTTV ดีที่สุด จากการจำลองจากโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.6 และโปรแกรม Building Energy Code (BEC)

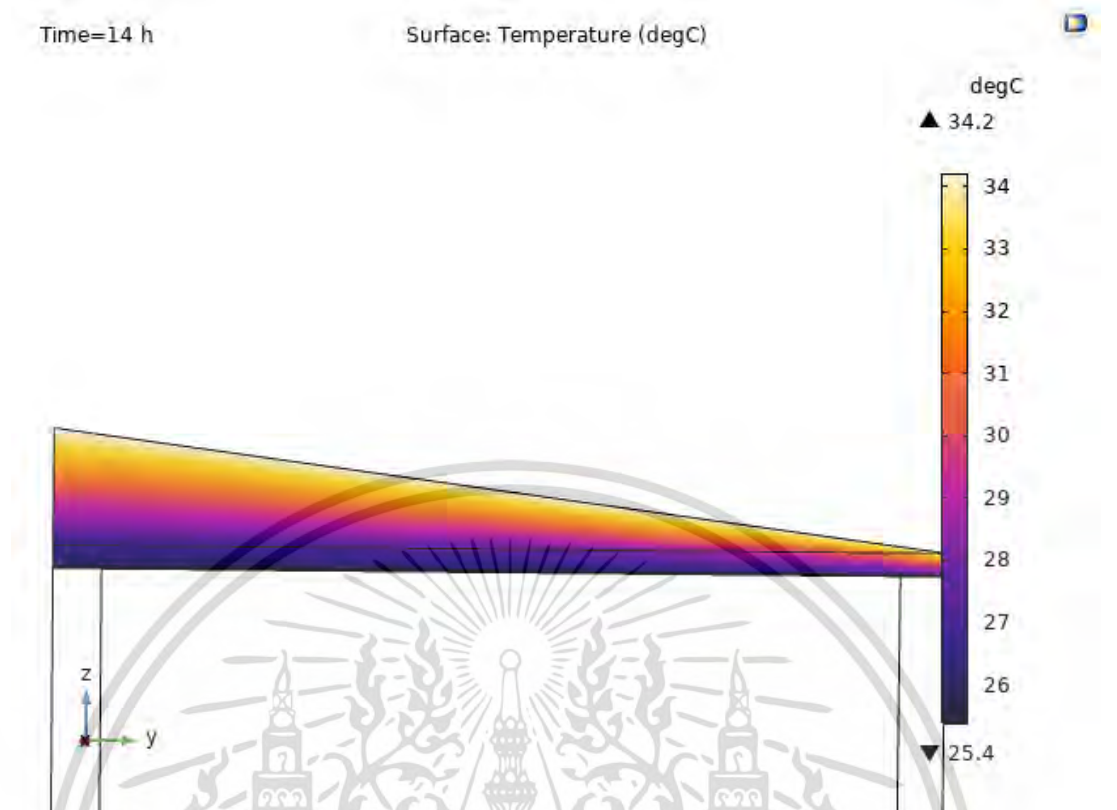


รูปที่ 4.7 หลังคาเติมปุฉนวนใยแก้ว Stay Cool

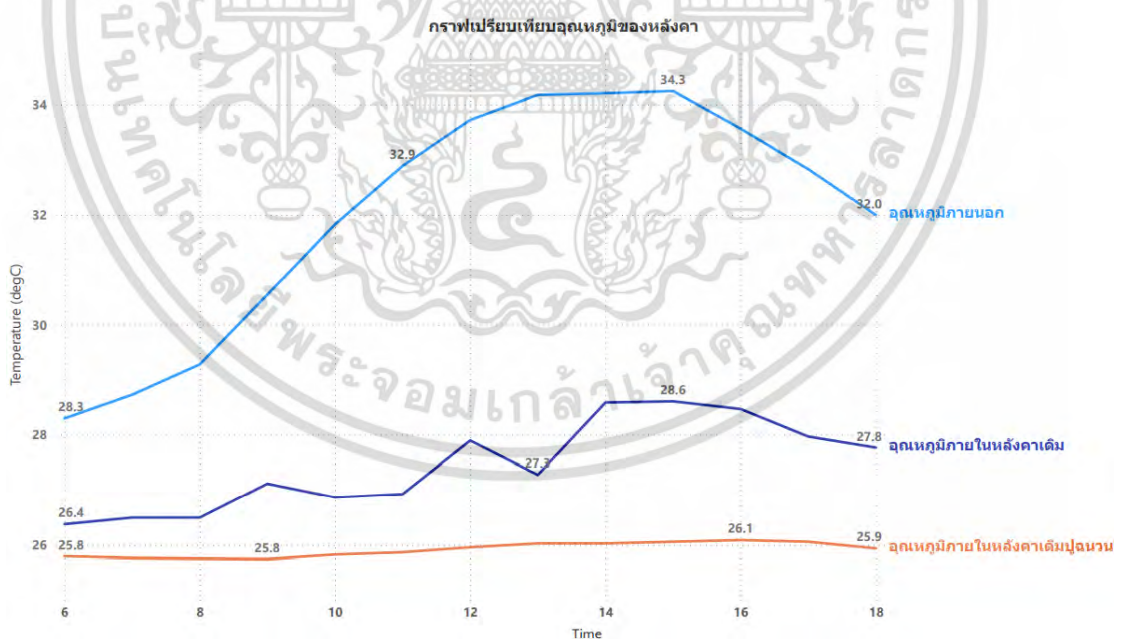


รูปที่ 4.8 การถ่ายเทความร้อนของหลังคาเติม เวลา 14.00 น.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การถ่ายเทความร้อนของหลังคาเติมปูนฉาบ Stay Cool เวลา 14.00 น.



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของหลังคา

จากผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนผ่านโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.6 พบว่าการถ่ายเทความร้อนของหลังคาเติมปูนฉาบ Stay Cool นั้นมีค่าน้อยกว่าหลังคาเดิมโดยเฉพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณปลายที่มีช่องว่างอากาศน้อย โดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าในเวลา 14.00 น. อุณหภูมิภายในบริเวณปลายที่มีช่องว่างอากาศน้อยของหลังคาเดิมปูลงนวมไยแก้ว Stay Cool มีค่า 26.03 องศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าอุณหภูมิภายในบริเวณปลายที่มีช่องว่างอากาศน้อยของหลังคาเดิมที่มีอุณหภูมิ 28.59 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.10 เห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในบริเวณปลายที่มีช่องว่างอากาศน้อยของหลังคาเดิมปูลงนวมไยแก้ว มีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิภายในบริเวณปลายที่มีช่องว่างอากาศน้อยของหลังคาเดิมในเวลาเท่ากัน

4.1.6 ระบบกระจกหลังการปรับปรุง

เพื่อประเมินผลกระทบของวัสดุกระจกต่อการใช้พลังงานของอาคาร แสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ และอุปกรณ์อื่นๆ ในอาคารได้รับการตั้งค่าคล้ายกับกรณีพื้นฐาน เฉพาะวัสดุกระจกในส่วนหน้าต่างของเปลือกอาคารเท่านั้นที่ถูกแทนที่ด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน ผลการประเมินโดยใช้ซอฟต์แวร์ BEC ใน 4 ด้านหลักเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานแสดงไว้ในตารางที่ 4.15 และ 4.16 จะเห็นว่ากระจกรุ่นใหม่สามารถให้คุณค่าที่ดีกว่าในแง่ของ OTTV เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นฐาน กระจกประเภท 1 เป็นวัสดุกระจกใสที่มีค่า U-Value ใกล้เคียงกันและค่า SHGC ต่ำกว่ากระจกที่ใช้ในอาคารฐาน ดังนั้นการเปลี่ยนกระจกประเภทนี้อาจทำให้ OTTV ลดลง แต่ไม่เพียงพอที่จะเป็นไปตามระดับการปฏิบัติตามข้อกำหนด กระจกประเภท 2 เป็นกระจกสีเขียวคล้ายกับประเภท 1 เพื่อเป็นไปตามรหัสพลังงาน วัสดุกระจกจะต้องเคลือบด้วยสารสะท้อนแสง ดังที่แสดงในกระจกประเภท 3 โดยที่ OTTV อยู่ภายในค่าเป้าหมายมาตรฐาน เมื่อพิจารณาแนวทางที่ 2 กระจกโพลีใสที่มีคุณสมบัติระบายความร้อนได้ดีกว่าสามารถลดการใช้พลังงานของอาคารทั้งหลังให้ได้ค่ามาตรฐาน อย่างไรก็ตาม อัตราการลดลงของ OTTV และการใช้พลังงานของทั้งอาคารไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง เนื่องจากต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ เมื่อคำนวณการใช้พลังงานของทั้งอาคาร แต่ OTTV ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากคุณลักษณะทางความร้อนของวัสดุ

ตารางที่ 4.15 รายงานค่าการถ่ายเทความร้อนของผนังหลังปรับปรุงด้วยวัสดุกระจก

กรณี	OTTV (W/m ²)		
	≤50.00	อัตราการลด (%)	สถานะ
ก่อนปรับปรุง	112.63	-	ไม่ผ่าน
กระจก 1	70.53	37.38%	ไม่ผ่าน
กระจก 2	57.30	49.13%	ไม่ผ่าน
กระจก 3	47.45	57.87%	ผ่าน
กระจก 4	35.04	68.89%	ผ่าน
กระจก 5	27.68	75.42%	ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 รายงานค่าการการใช้พลังงานรวมหลังปรับปรุงด้วยวัสดุกระจก

กรณี	การใช้พลังงานรวม (kWh/yr.)		
	≤184,820.75	อัตราการลด (%)	สถานะ
ก่อนปรับปรุง	261,538.00	-	ไม่ผ่าน
กระจก 1	224,156.76	14.29%	ไม่ผ่าน
กระจก 2	210,638.65	19.46%	ไม่ผ่าน
กระจก 3	200,572.35	23.31%	ไม่ผ่าน
กระจก 4	187,901.82	28.16%	ไม่ผ่าน
กระจก 5	180,373.75	31.03%	ผ่าน

4.2 ผลการคำนวณพลังงานสุทธิของอาคารหลังทำการปรับปรุง

ในระหว่างการปรับปรุงได้เปลี่ยนวัสดุกรอบอาคาร ระบบไฟส่องสว่าง และเครื่องปรับอากาศ อาคารจะต้องได้รับการประเมินใหม่โดยใช้โปรแกรม BEC ตามเกณฑ์มาตรฐานอาคารอนุรักษ์พลังงานของประเทศไทย ผลลัพธ์ของอาคารที่ได้รับการปรับปรุงใหม่จากการประเมินของ BEC แสดงในตารางที่ 4.17 เห็นได้ชัดว่าหลังจากการปรับปรุงระบบกรอบอาคาร การใช้พลังงานของอาคารทั้งหมดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีสาเหตุมาจากการถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมลดลง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ นอกจากนี้ระบบไฟหลอดไดโอดเปล่งแสงที่นำมาทดแทนยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิม ดังนั้น LPD ของอาคารที่ได้รับการปรับปรุงจึงลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับอาคารกรณีศึกษาเดิม อาคารปรับปรุงใหม่ผ่าน BEC ทั้งทางเดินที่ 1 และ 2 ดังนั้นอาคารที่ได้รับการปรับปรุงใหม่จึงเป็นไปตามประมวลกฎหมายอาคาร

อย่างไรก็ตาม การประเมินอาคารจากมุมมองด้านพลังงานเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอที่จะโน้มน้าวให้เจ้าของโครงการปรับปรุงอาคารได้ ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงมุมมองทางเศรษฐกิจเพื่อให้เจ้าของโครงการมีแผนการปรับปรุงที่เป็นไปได้

ตารางที่ 4.17 รายงานค่าการอนุรักษ์พลังงานของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาหลังปรับปรุง

	อาคารก่อนปรับปรุง	มาตรฐาน	สถานะ
OTTV (W/m ²)	79.724	50	ไม่ผ่าน
RTTV (W/m ²)	23.117	10	ไม่ผ่าน
LPD (W/m ²)	9.88	10	ผ่าน
SEER (BTU/h/W)	4.39	12.85	ไม่ผ่าน
การใช้พลังงานรวม (kWh/yr.)	261,537.98	184,820.75	ไม่ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงอาคาร

จากแนวทางในการปรับปรุงระบบต่างๆ เพื่อลดพลังงานสุทธิของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา มีค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงอุปกรณ์ในระบบต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.18 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบไฟฟ้าแสงสว่างของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

ชนิดหลอด	จำนวนหลอด					cost	Total Cost
	F1	F2	F3	F4	Total		
T5 18W	74	122	146	132	474	143	67,782.00
T8 24W	65	76	16	10	167	118	19,706.00
T8 14W	2	8	4	4	18	115	2,070.00
T10 26W	6	-	-	-	6	163	978
ค่าใช้จ่ายรวม							90,536.00

ตารางที่ 4.19 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบปรับอากาศของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

เครื่องปรับอากาศ	จำนวนเครื่องปรับอากาศ					Cost	Total Cost
	F1	F2	F3	F4	Total		
8,500 btu	3	-	-	-	3	23,900	71,700.00
14,300 btu	1	-	-	-	1	31,000	31,000.00
11,900 btu	4	-	-	-	4	26,900	107,600.00
17,700 btu	1	1	-	-	2	33,600	67,200.00
24,200 btu	2	-	-	-	2	46,900	93,800.00
30,070 btu	5	11	6	7	29	50,100	1,452,900.00
36,600 btu	-	11	-	-	11	60,499	665,489.00
24,010 btu	-	-	7	5	12	44,900	538,800.00
ค่าใช้จ่ายรวม							3,028,489.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงเซอร์กิตเบรกเกอร์ของอาคารเรียนวิศวกรรมโยธา

CB	จำนวนเซอร์กิตเบรกเกอร์					ต้นทุน	ราคารวม
	F1	F2	F3	F4	รวม		
1P 16AT	5	2	8	6	21	96	2,016.00
1P 20AT	4	-	-	1	5	96	480
1P 25AT	1	10	6	7	24	96	2,304.00
1P 32AT	5	6	-	-	11	96	1,056.00
1P 40AT	1	-	1	1	3	271	813
1P 50AT	4	-	-	1	5	271	1,355.00
1P 63AT	-	2	-	-	2	271	542
1P 70AT	-	1	1	1	3	1,403	4,209.00
1P 80AT	-	1	-	-	1	1,403	1,403.00
3P 16AT	-	5	-	-	5	1,297	6,485.00
3P 20AT	2	-	-	-	1	1,297	2,594.00
3P 25AT	4	-	-	-	4	1,297	5,188.00
3P 32AT	1	-	-	-	1	1,297	1,297.00
3P 50AT	-	1	-	-	1	1,583	1,583.00
3P 100AT	1	-	-	1	2	2,504	5,008.00
3P 125AT	1	-	1	-	2	5,237	10,474.00
3P 150AT	2	-	-	-	2	5,355	10,710.00
3P 160AT	1	1	-	-	2	5,355	10,710.00
ค่าใช้จ่ายรวม							68,227.00

ตารางที่ 4.21 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบไฟฟ้าทั้งหมดของอาคาร

ระบบที่ปรับปรุง	ค่าใช้จ่าย
แสงสว่าง	90,536.00
ระบบปรับอากาศ	3,028,489.00
เซอร์กิตเบรกเกอร์	68,227.00
EV Charger	34,805.00
ค่าใช้จ่ายรวม	3,222,057.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบกรอบอาคารผนัง และหลังคา

Wall							
ปรับปรุง	พื้นที่ (m ²)					ราคา/m ²	ราคารวม
	F1	F2	F3	F4	Total		
ฉนวนผนัง	474.908	634.52	364.01	364.01	1837.45	239.236	439,583.71
ฉนวนฝ้า	0	726	0	588	1314	195.417	256,777.94
ค่าใช้จ่ายรวม							696,361.65

ตารางที่ 4.23 ตารางค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

อุปกรณ์	ค่าใช้จ่าย	ต้นทุน	รวม
แผงเซลล์แสงอาทิตย์	90,536.00		1,920,000
อินเวอร์เตอร์	3,028,489.00		380,000
ค่าติดตั้ง	68,227.00		690,000
ค่าใช้จ่ายรวม			2,990,000.00

จากตารางที่ 4.18 ถึงตารางที่ 4.23 ซึ่งแสดงค่าใช้จ่ายในระบบต่างๆ โดยมีค่าใช้จ่ายในแต่ละระบบที่ปรับปรุงสรุปได้ดังตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบกรอบอาคารทั้งหมด

ระบบที่ปรับปรุง	ค่าใช้จ่าย
ระบบไฟฟ้า	3,222,057.00
ระบบกรอบอาคาร (ผนัง)	439,583.71
ระบบกรอบอาคาร (หลังคา)	256,777.94
ระบบกรอบอาคารทั้งหมดมีค่าใช้จ่ายในการปรับปรุง	696,361.65
ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์	2,990,000.00
ระบบทั้งหมดและการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์	5,413,418.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการเลือกลงทุนในระบบต่าง ๆ

สามารถใช้พารามิเตอร์ทางเศรษฐกิจหลายประการเพื่อกำหนดความเป็นไปได้ของเจ้าของโครงการที่ลงทุนในการปรับปรุงอาคาร ในงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวชี้วัดทางเศรษฐกิจ 2 ตัว ได้แก่ ระยะเวลาคืนทุนคิดลด (Discounted Payback Period, DPP) และ อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR) เป็นปัจจัยกำหนดความเป็นไปได้ในการลงทุนปรับปรุงอาคาร

โดยอัตราผลตอบแทนภายในคือพารามิเตอร์ที่ใช้วัดอัตราที่กระแสเงินสดคิดลดจากโครงการที่ปรับปรุงใหม่เท่ากับเงินลงทุนเริ่มแรก ค่าดังกล่าวจะนำมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) มาพิจารณา ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (4.1) ดังนั้นอัตราผลตอบแทนภายใน คืออัตราคิดลดที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิ จะเป็นศูนย์ดังแสดงในสมการ (4.2) ระยะเวลาคืนทุนเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้กันทั่วไปในการกำหนดระยะเวลาที่จำเป็นสำหรับการลงทุนเริ่มแรกที่จะชดใช้ผ่านกระแสเงินสดรับ ดังนั้นระยะเวลาคืนทุนคิดลด จึงนำมูลค่าปัจจุบันสุทธิมาพิจารณาในระหว่างการคำนวณกระบวนการกระแสเงินสด ซึ่งแสดงในสมการ (4.3)

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^i} - C_0 \quad (4.1)$$

$$0 = NPV = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+IRR)^i} - C_0 \quad (4.2)$$

$$DPP = \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{C_0 \times r}{C_i}}\right) \div \ln(1+r) \quad (4.3)$$

เมื่อทำการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจของการปรับปรุงอาคารแต่ละระบบสามารถกำหนดได้โดยการคำนวณต้นทุนการลงทุนเริ่มแรกและกระแสเงินสดเป็นบวกจากการลดต้นทุนด้านพลังงาน ค่าพลังงานสำหรับอาคารสามารถคำนวณได้จากค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง โดยใช้อัตราค่าไฟฟ้าตามเวลาที่ใช้ (TOU Tariff) ราคาปัจจุบันอยู่ที่ 4.3297 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับข้อมูลทางเศรษฐกิจ อัตราดอกเบี้ยที่จะใช้คำนวณมูลค่าปัจจุบันอยู่ที่ 1.75% ตามประกาศธนาคารแห่งประเทศไทย ผลลัพธ์ด้านการประหยัดพลังงานสุทธิจากโปรแกรม BEC ในกรณีการปรับปรุงอาคารและการประหยัดต้นทุนพลังงานสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.25-4.32 โดยผลที่แสดงจะอยู่ในรูปของกระแสเงินสดต่อปีที่พิจารณามูลค่าปัจจุบันสุทธิแล้วตลอดระยะเวลาโครงการ

ในการปรับปรุงระบบไฟฟ้าทั้งหมดกระแสเงินสดต่อปีของโครงการสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.25 การปรับปรุงระบบไฟฟ้า จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน 3,222,057 บาท และลดใช้ไฟฟ้าต่อปีเหลือ 183,059 หน่วยต่อปี โดยสามารถลดหน่วยไฟฟ้าที่ใช้งานต่อปีลงได้ 78,478.98 คิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 339,790.43 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุนที่ประมาณ 10 ปี ซึ่งอยู่ในระยะเวลาคืนทุนที่ค่อนข้างนานเนื่องจากต้นทุนการปรับปรุงที่สูง แต่ปริมาณพลังงานที่ลดได้มีสัดส่วนที่ต่ำ

ตารางที่ 4.25 ตารางกระแสเงินสดในการปรับปรุงระบบไฟฟ้าทั้งหมด

ปี	ต้นทุน	หน่วยไฟฟ้าที่ลดได้	ค่าใช้จ่ายที่ลดได้	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	งบบุคล
0	3,222,057.00	-	-	(3,222,057.00)	(3,222,057.00)
1	-	78,478.98	339,790.43	333,127.87	(2,888,929.13)
2	-	78,478.98	339,790.43	326,595.95	(2,562,333.18)
3	-	78,478.98	339,790.43	320,192.11	(2,242,141.07)
4	-	78,478.98	339,790.43	313,913.83	(1,928,227.24)
5	-	78,478.98	339,790.43	307,758.66	(1,620,468.58)
6	-	78,478.98	339,790.43	301,724.17	(1,318,744.41)
7	-	78,478.98	339,790.43	295,808.01	(1,022,936.39)
8	-	78,478.98	339,790.43	290,007.86	(732,928.54)
9	-	78,478.98	339,790.43	284,321.43	(448,607.11)
10	-	78,478.98	339,790.43	278,746.50	(169,860.61)
11	-	78,478.98	339,790.43	273,280.88	103,420.27

ในส่วนของการปรับปรุงการปรับปรุงระบบกรอบอาคารผนัง กระแสเงินสดต่อปีของโครงการสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.26 การปรับปรุงระบบไฟฟ้า จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน 439,583.00 บาท โดยสามารถลดหน่วยไฟฟ้าที่ใช้งานต่อปีลงได้ 55,108.98 คิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 238,605.34 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุนที่ประมาณปีกว่า ซึ่งอยู่ในระยะเวลาคืนทุนที่ค่อนข้างไว ถึงแม้ว่าปริมาณพลังงานที่ลดได้มีสัดส่วนที่ต่ำกว่าการปรับปรุงระบบไฟฟ้า แต่ต้นทุนในการดำเนินการนั้นมีค่าน้อยกว่ามาก

ตารางที่ 4.26 ตารางกระแสเงินสดในการปรับปรุงระบบกรอบอาคารประเภทผนัง

ปี	ต้นทุน	หน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้	ค่าใช้จ่ายที่ลดได้	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	งบดุล
0	439,583.00	-	-	(439,583.00)	(439,583.00)
1	-	55,108.98	238,605.34	233,926.80	(205,656.20)
2	-	55,108.98	238,605.34	229,340.00	23,683.80
3	-	55,108.98	238,605.34	224,843.14	248,526.94
4	-	55,108.98	238,605.34	220,434.45	468,961.39
5	-	55,108.98	238,605.34	216,112.21	685,073.60
6	-	55,108.98	238,605.34	211,874.71	896,948.31
7	-	55,108.98	238,605.34	207,720.31	1,104,668.61
8	-	55,108.98	238,605.34	203,647.36	1,308,315.97
9	-	55,108.98	238,605.34	199,654.27	1,507,970.25
10	-	55,108.98	238,605.34	195,739.48	1,703,709.73

ตารางที่ 4.27 ตารางกระแสเงินสดในการปรับปรุงระบบกรอบอาคารประเภทหลังคา

ปี	ต้นทุน	หน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้	ค่าใช้จ่ายที่ลดได้	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	งบดุล
0	256,777	-	-	(256,777.00)	(256,777.00)
1	-	19,252.98	83,359.61	81,725.11	(175,051.89)
2	-	19,252.98	83,359.61	80,122.66	(94,929.23)
3	-	19,252.98	83,359.61	78,551.63	(16,377.60)
4	-	19,252.98	83,359.61	77,011.40	60,633.80
5	-	19,252.98	83,359.61	75,501.37	136,135.17
6	-	19,252.98	83,359.61	74,020.95	210,156.12
7	-	19,252.98	83,359.61	72,569.56	282,725.68
8	-	19,252.98	83,359.61	71,146.63	353,872.31
9	-	19,252.98	83,359.61	69,751.60	423,623.91
10	-	19,252.98	83,359.61	68,383.92	492,007.82

ในส่วนของการปรับปรุงระบบกรอบอาคารหลังคา กระแสเงินสดต่อปีของโครงการสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.27 การปรับปรุงระบบไฟฟ้า จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน 256,777 บาท และลดการใช้ไฟฟ้าต่อปีเหลือ 242,285 แต่เมื่อเทียบเป็นหน่วยที่ลดลง จะสามารถลดหน่วยไฟฟ้าที่ใช้งานต่อปีลงได้ 19,252.98 คิดเป็นค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานประมาณ 83,359.61 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ประมาณ 3 ปี ซึ่งอยู่ในระยะเวลาคืนทุนที่ค่อนข้างนานเมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับปรุงผนัง เนื่องจากส่วนหลังคามีผลกระทบแก่พื้นที่ปรับอากาศบนชั้นที่ติดอยู่กับชั้นดาดฟ้า ทำให้การลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศมีค่าน้อยกว่าการปรับปรุงผนัง อย่างไรก็ตามด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าประมาณครึ่งหนึ่งทำให้ระยะเวลาคืนทุนไม่นานเกินไป

ในส่วนของการปรับปรุงระบบปรับอากาศประเภทกระจก กระแสเงินสดต่อปีของโครงการสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.28 การปรับปรุงระบบไฟฟ้า จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน 2,342,379.90 บาท โดยสามารถลดหน่วยไฟฟ้าที่ใช้งานต่อปีลงได้ 84,100.47 คิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 364,129.80 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุนที่ประมาณ 6 ปี ซึ่งอยู่ในระยะเวลาคืนทุนที่ค่อนข้างนาน ถึงแม้ว่าหน่วยไฟฟ้าที่ลดได้จะมีค่ามากกว่าการปรับปรุงปรับอากาศประเภทผนังอย่างมีนัยยะสำคัญ แต่ด้วยต้นทุนการปรับปรุงที่สูงกว่าเนื่องจากต้องมีการเปลี่ยนเฟรมกระจกใหม่ให้รองรับกระจกสองชั้น จึงทำให้ต้นทุนในการปรับปรุงสูงกว่าการปรับปรุงปรับอากาศประเภทผนังถึง 5 เท่า

ตารางที่ 4.28 ตารางกระแสเงินสดในการปรับปรุงระบบปรับอากาศประเภทกระจก

ปี	ต้นทุน	หน่วยไฟฟ้าที่ลดได้	ค่าใช้จ่ายที่ลดได้	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	งบบุล
0	2,342,379.90	-	-	(2,342,379.90)	(2,342,379.90)
1	-	84,100.47	364,129.80	356,990.00	(1,985,389.90)
2	-	84,100.47	364,129.80	349,990.20	(1,635,399.69)
3	-	84,100.47	364,129.80	343,127.65	(1,292,272.05)
4	-	84,100.47	364,129.80	336,399.65	(955,872.39)
5	-	84,100.47	364,129.80	329,803.58	(626,068.81)
6	-	84,100.47	364,129.80	323,336.85	(302,731.96)
7	-	84,100.47	364,129.80	316,996.91	14,264.95
8	-	84,100.47	364,129.80	310,781.28	325,046.23
9	-	84,100.47	364,129.80	304,687.53	629,733.76
10	-	84,100.47	364,129.80	298,713.27	928,447.03

ในส่วนของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ กระแสเงินสดต่อปีของโครงการสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.29 การปรับปรุงระบบไฟฟ้า จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน 2,990,000 บาท และลดใช้ไฟฟ้าต่อปีเหลือ 194,558 หน่วยต่อปี โดยสามารถลดหน่วยไฟฟ้าลดหน่วยไฟฟ้าที่ใช้งานต่อปีลงได้ 66,979.98 คิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 290,003.21 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุนที่ประมาณ 11 ปี ซึ่งอยู่ในระยะเวลาคืนทุนที่นานเนื่องจากต้นทุนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาที่สูง แต่ปริมาณพลังงานที่ผลิตออกมามีสัดส่วนที่ต่ำเมื่อเทียบกับต้นทุน อย่างไรก็ตามถ้าราคาของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์แสงอาทิตย์ที่การลดลงมา หรือพื้นที่อาคารสามารถติดตั้งได้มากกว่านี้จุดคุ้มทุนก็อาจจะเปลี่ยนไป

ตารางที่ 4.29 ตารางค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์

ปี	ต้นทุน	หน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้	ค่าใช้จ่ายที่ผลิตได้	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	งบบุล
0	2,990,000	-	-	(2,990,000.00)	(2,990,000.00)
1	-	66,979.98	290,003.21	284,316.87	(2,705,683.13)
2	-	66,979.98	290,003.21	278,742.03	(2,426,941.10)
3	-	66,979.98	290,003.21	273,276.50	(2,153,664.60)
4	-	66,979.98	290,003.21	267,918.14	(1,885,746.47)
5	-	66,979.98	290,003.21	262,664.84	(1,623,081.63)
6	-	66,979.98	290,003.21	257,514.55	(1,365,567.08)
7	-	66,979.98	290,003.21	252,465.24	(1,113,101.84)
8	-	66,979.98	290,003.21	247,514.94	(865,586.89)
9	-	66,979.98	290,003.21	242,661.71	(622,925.18)
10	-	66,979.98	290,003.21	237,903.64	(385,021.55)
11	-	66,979.98	290,003.21	233,238.86	(151,782.69)
12	-	66,979.98	290,003.21	228,665.55	76,882.86

ตารางที่ 4.30 ตารางค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงทุกระบบรวมไปถึงการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์

ปี	ต้นทุน	หน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้	ค่าใช้จ่ายที่ผลิตได้	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	งบบุล
0	5,413,418.00	-	-	(5,413,418.00)	(5,413,418.00)
1	-	179,873.98	778,800.36	763,529.76	(4,649,888.24)
2	-	179,873.98	778,800.36	748,558.59	(3,901,329.65)
3	-	179,873.98	778,800.36	733,880.97	(3,167,448.67)
4	-	179,873.98	778,800.36	719,491.15	(2,447,957.53)
5	-	179,873.98	778,800.36	705,383.48	(1,742,574.05)
6	-	179,873.98	778,800.36	691,552.43	(1,051,021.62)
7	-	179,873.98	778,800.36	677,992.58	(373,029.04)
8	-	179,873.98	778,800.36	664,698.61	291,669.57
9	-	179,873.98	778,800.36	651,665.30	943,334.87
10	-	179,873.98	778,800.36	638,887.55	1,582,222.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการปรับปรุงระบบไฟฟ้า ปรับปรุงระบบกรอบอาคาร และติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้า ด้วยแสงอาทิตย์ กระแสเงินสดต่อปีของโครงการสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.30 การปรับปรุงระบบไฟฟ้า จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน 5,413,418.00 บาท และลดใช้ไฟฟ้าต่อปีเหลือ 81,664 หน่วยต่อปี โดยสามารถลดหน่วยไฟฟ้าลดหน่วยไฟฟ้าที่ใช้งานต่อปีลงได้ 179,873.98 คิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 763,529.76 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุนที่ประมาณ 7 ปี ซึ่งอยู่ในระยะเวลาคืนทุนที่ค่อนข้างนาน เนื่องจากต้นทุนการปรับปรุงที่สูง แต่ในระยะยาวการคืนทุนที่สูงจะช่วยให้ตัวเลขชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์มีค่าดีขึ้น

จากตารางกระแสเงินสดรายปีจนถึงจุดคุ้มทุนแสดงให้เห็นว่าแต่ละระบบมีการคืนทุนที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับการลงทุนเบื้องต้น และพลังงานที่ลดลงรวมไปถึงค่าใช้จ่ายทางพลังงานที่สามารถลดได้ อย่างไรก็ตามการคืนทุนเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน เนื่องจากการปรับปรุงระบบที่มีต้นทุนสูงแต่สามารถลดการใช้พลังงานได้มาก ในระยะยาวอาจมีความคุ้มค่ามากกว่าระบบที่ลงทุนต่ำและได้รับเงินหมุนคืนผ่านการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการใช้ตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ในการประเมินรวมด้วย ซึ่งตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ประกอบไปด้วย ระยะเวลาคืนทุนคิดลด และอัตราผลตอบแทนภายใน ด้วยข้อมูลสรุปผลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุงอาคารในแต่ละระบบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 ตารางสรุปข้อมูลทางพลังงานและเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุงแต่ละระบบ

กรณี	พลังงานที่ลดลง (kWh)	ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน (บาท)	ต้นทุน (บาท)	IRR (%)	DPP (ปี)
ปรับปรุงหลังคา	19,253	94,339.35	256,777.00	29.92	3.32
ปรับปรุงผนัง	55,109	270,033.75	439,583.00	31.41	3.14
ปรับปรุงกระจก	84,100	364,129.80	2,342,379.90	15.08	6.95
ติดตั้งโซลาร์เซลล์	66,979	290,003.21	2,990,000.00	8.41	11.50
ปรับปรุงระบบไฟฟ้า	77,980	382,101.65	2,198,866.95	17.04	6.16
ปรับปรุงทั้งอาคาร	179,873.98	778,800.36	5,413,418.00	13.82	7.56

จากตารางที่ 4.34 พบว่าต้นทุนการปรับปรุงทั้งอาคารจะมีผลตอบแทนภายในที่ 13.82% และมีระยะเวลาคืนทุนคิดลดอยู่ที่ 3.14 ปี ซึ่งมีค่าตัวชี้วัดต่ำกว่าการปรับปรุงอาคารเฉพาะระบบย่อย เนื่องจากต้นทุนการติดตั้งโซลาร์เซลล์ที่สูงทำให้ต้นทุนการปรับอาคารทั้งระบบมีค่าสูงตามไปด้วย โดยมีพิจารณาการปรับปรุงเฉพาะระบบย่อยเฉพาะการปรับปรุงผนังมีอัตราผลตอบแทนภายในที่ดีที่สุดที่

31.41% และมีระยะเวลาคืนทุนคิดลดอยู่ที่ 3.14 ปี ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงระบบย่อยที่ละระบบอาจให้ผลตอบแทนจากการลงทุนมากขึ้นโดยมีระยะเวลาคืนทุนน้อยลง แต่ในกรณีนี้ อาคารมีปัญหาเกี่ยวกับการปฏิบัติตามข้อกำหนดของอาคาร ดังนั้น อาคารทั้งหลายจำเป็นต้องได้รับการแก้ไขในกระบวนการปรับปรุง ผลจากการปรับปรุงอาคารแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนกรอบอาคารสามารถลดการใช้พลังงานทั้งอาคารได้อย่างมากเนื่องจากภาระการทำความเย็นลดลง ในขณะที่การปรับปรุงทั้งอาคารสามารถพิสูจน์ข้อดีเพิ่มเติมได้จากการลดความต้องการพลังงานในหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถให้กำลังการผลิตสำรองสำหรับอนาคต โหลดในอาคาร กระบวนการปรับปรุงทั้งหมดนี้ดำเนินการภายใต้การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ยังคงแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้และตัวบ่งชี้ทางเศรษฐกิจที่น่าสนใจสำหรับเจ้าของโครงการและการลงทุน

ผลจากกระบวนการปรับปรุงแสดงให้เห็นว่าการออกแบบอาคารใหม่ตามหลักเกณฑ์อาคารอนุรักษ์พลังงานสามารถลดการใช้พลังงานและให้ผลตอบแทนจากการลงทุนจากการลดต้นทุนด้านพลังงาน กระบวนการปรับปรุงที่เสนอในการวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้กับอาคารอื่นๆ (ทั้งอาคารสำนักงานและอาคารการศึกษา) ซึ่งมีเวลาทำการและประเภทอาคารใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม หลักเกณฑ์อาคารอนุรักษ์พลังงานจะอิงตามปัจจัยหลายประการเกี่ยวกับภูมิศาสตร์และสภาพอากาศของประเทศไทยเป็นข้อมูลอ้างอิง และคำแนะนำในการปรับปรุงบางอย่างอาจใช้ได้กับอาคารที่ตั้งอยู่ในสภาพอากาศเขตร้อนเท่านั้น ในงานในอนาคต ความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุเปลือกและการถ่ายเทความร้อนกับแง่มุมของผลกระทบต่อภาระการทำความเย็น จำเป็นต้องได้รับการประเมินเพิ่มเติมสามารถสำรวจการใช้พลังงานหมุนเวียนและการมีอยู่ของภาระในอนาคตเพิ่มเติมได้ นอกจากนี้ จำเป็นต้องวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ทางเศรษฐกิจเพื่อประเมินกระบวนการปรับปรุงในทุกด้าน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอการปรับปรุงอาคารตามประมวลกฎหมายพลังงานอาคารของประเทศไทยโดยใช้โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร (BEC) ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าอาคารเดิมจึงไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของเกณฑ์อาคารอนุรักษ์พลังงาน จึงต้องมีการปรับปรุงระบบต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยในกรณีของกรอบอาคาร การถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมมีผลกระทบต่อภาระความเย็นของระบบปรับอากาศ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศด้วย และยังมีผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อการใช้พลังงานของทั้งอาคาร นอกจากนี้ระบบแสงสว่างและเครื่องปรับอากาศที่มีเทคโนโลยีเก่าและล้าสมัยยังส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานในอาคารอีกด้วย ในส่วนของระบบไฟส่องสว่าง การเปลี่ยนระบบฟลูออเรสเซนต์ที่ติดตั้งเดิมด้วยระบบ LED ที่มีคุณสมบัติแสงสว่างใกล้เคียงกันสามารถลดการใช้พลังงานของระบบไฟส่องสว่างได้ สำหรับระบบปรับอากาศ อุปกรณ์ที่ใช้ในปัจจุบันมีอายุมากและมีประสิทธิภาพการทำความเย็นต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงอาคารสำหรับแต่ละระบบย่อย ซึ่งประกอบด้วย วัสดุกรอบอาคาร ระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้า และการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

หลังจากการประเมินอาคารด้วยโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร พบว่าในกรณีของระบบแสงสว่าง จะมีค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุด (LPD) ของเคสที่มีการเปลี่ยนหลอดไฟลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับอาคารกรณีศึกษาเดิม สำหรับระบบปรับอากาศ เครื่องปรับอากาศแบบปรับความเร็วได้รุ่นใหม่ให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า โดยมีอัตราส่วนประสิทธิภาพของพลังงานตามฤดูกาล (SEER) สูงกว่าค่ามาตรฐานอย่างมาก ในด้านวัสดุกรอบอาคาร การเปลี่ยนส่วนประกอบที่บดบังแสงด้วยฉนวนไฟเบอร์เพิ่มเติมในกรณีของผนัง และในกรณีของหลังคาจะเป็นหลังคาเมทัลชีทที่มีฉนวนไฟเบอร์ฉลากประสิทธิภาพสูง ทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคาร (OTTV) และ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (RTTV) ลดลงอย่างมาก ผลการปรับปรุงระบบย่อยแต่ละระบบในด้านพลังงานและเศรษฐกิจสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 สรุปการดำเนินการปรับปรุงระบบไฟฟ้า ระบบแสงสว่าง และระบบปรับอากาศ จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน 3,222,057 บาท และลดใช้ไฟฟ้าต่อปีเหลือ 183,059 กิโลวัตต์ ชั่วโมง/ปี มีจุดคุ้มทุนที่ 6.16 ปี

5.1.2 สรุปการดำเนินการปรับปรุงระบบกรอบอาคาร (OTTV) จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน 439,583 บาท และลดใช้ไฟฟ้าต่อปีเหลือ 206,429 กิโลวัตต์ ชั่วโมง/ปี มีจุดคุ้มทุนที่ 3.14ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 สรุปการดำเนินการปรับปรุงระบบกรอบอาคาร (RTTV) จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน 256,777 บาท และลดการใช้ไฟฟ้าต่อปีเหลือ 242,285 กิโลวัตต์ ชั่วโมง/ปี มีจุดคุ้มทุนที่ 3.32 ปี

5.1.4 ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน 2,990,000 บาท และลดการใช้ไฟฟ้าต่อปีเหลือ 194,558 kwh/year มีจุดคุ้มทุนที่ 11.50 ปี

5.1.5 การปรับปรุงระบบไฟฟ้า ปรับปรุงระบบกรอบอาคาร และติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน 5,413,418 บาท และลดการใช้ไฟฟ้าต่อปีเหลือ 81,664 kwh/year มีจุดคุ้มทุนที่ 7.56 ปี

โดยสรุปได้ว่าการปรับปรุงระบบทั้งหมดจะพบว่าต้นทุนสุทธิในการปรับปรุงระบบย่อยทั้งหมดในอาคารกรณีศึกษา เท่ากับ 5,413,418 บาท ลดการใช้พลังงานรวมของอาคารได้ 179,873.98 กิโลวัตต์ ชั่วโมง/ปี ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้ 778,800.36 บาทต่อปี จากการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ พบว่า ระยะเวลาคืนทุนของโครงการนี้คือ 7.56 ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน(IRR) อยู่ที่ 13.829% อย่างไรก็ตามการปรับปรุงระบบย่อยที่ละรายการอาจให้ผลตอบแทนการลงทุนมากขึ้นโดยมีระยะเวลาคืนทุนน้อยลง แต่ในกรณีนี้ อาคารมีปัญหาเกี่ยวกับการปฏิบัติตามข้อกำหนดของอาคาร ดังนั้นทั้งอาคารจึงต้องได้รับการปรับปรุงใหม่ นอกจากนี้ ประโยชน์ข้างเคียงจากการลดความต้องการพลังงานในอาคาร คือ หม้อแปลงไฟฟ้าปกติเดิมสามารถรองรับโหลดของอาคารในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

- [1.] Mohammad, A. K.; Ghosh, A. Exploring energy consumption for less energy-hungry building in UK using advanced aerogel window. *Solar Energy* 2023, 253, 389-400.
- [2] AlQdah, K. S. Effect of using natural and local environment contents on the thermal conductivity of building materials; case in Medina, Saudi Arabia. *Case Studies in Thermal Engineering* 2021, 28, 101597.
- [3] Kurnia, J. C.; Haryoko, L. A. F.; Taufiqurrahman, I.; Chen, L.; Jiang, L.; Sasmito, A. P. Optimization of an innovative hybrid thermal energy storage with phase change material (PCM) wall insulator utilizing Taguchi method. *Journal of Energy Storage* 2022, 49, 104067.
- [4] Jain, M.; Pathak, K. K. Thermal modelling of insulator for energy saving in existing residential building. *Journal of Building Engineering* 2018, 19, 62-68.
- [5] Wernery, J.; Mancebo, F.; Malfait, W. J.; O'Connor, M.; Jelle, B. P. The economics of thermal superinsulation in buildings. *Energy and Buildings* 2021, 253, 111506.
- [6] Shao, Y.; Parks, A.; Ostertag, C. P. Lightweight concrete façade with multiple air gaps for sustainable and energy-efficient buildings in Singapore. *Building and Environment* 2022, 223, 109463.
- [7] Fabbri, K.; Tronchin, L.; Barbieri, F. Coconut fibre insulators: The hygrothermal behaviour in the case of green roofs. *Construction and Building Materials* 2021, 266(A), 121026.
- [8] Borràs, J. G.; Lerma, C.; Mas, A.; Vercher, J.; Gil, E. Contribution of green roofs to energy savings in building renovations. *Energy for Sustainable Development* 2022, 71, 212-221.
- [9] Eddib, F.; Lamrani, M. A. Effect of the thermal insulators on the thermal and energetic performance of the envelope of a house located in Marrakesh. *Alexandria Engineering Journal* 2019, 58(3), 937-944.
- [10] Chai, J.; Fan, J. Advanced thermal regulating materials and systems for energy saving and thermal comfort in buildings. *Materials Today Energy* 2022, 24, 100925.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [11] Reffat, R. M.; Ezzat, R. Impacts of design configurations and movements of PV attached to building facades on increasing generated renewable energy. *Solar Energy* 2023, 252, 50-71.
- [12] Hassan, A. A.; El-Rayes, K. Optimizing the integration of renewable energy in existing buildings. *Energy and Buildings* 2021, 238, 110851.
- [13] Gul, E.; Baldinelli, G.; Bartocci, P.; Shamim, T.; Domenighini, P.; Cotana, F.; Wang, J.; Fantozzi, F.; Bianchi, F. Transition toward net zero emissions - Integration and optimization of renewable energy sources: Solar, hydro, and biomass with the local grid station in central Italy. *Renewable Energy* 2023, 207, 672-686.
- [14] Vares, S.; Häkkinen, T.; Ketomäki, J.; Shemeikka, J.; Jung, N. Impact of renewable energy technologies on the embodied and operational GHG emissions of a nearly zero energy building. *Journal of Building Engineering* 2019, 22, 439-450.
- [15] Abdul-Zahra, A. S.; Al Jubori, A. M. Potential evaluation and analysis of near-to-net zero energy building in hot and dry climate. *Energy Conversion and Management: X* 2021, 12, 100146.
- [16] Holian, M. J. The impact of building energy codes on household electricity expenditures. *Economics Letters* 2020, 186, 108841.
- [17] Kellogg, K. A.; Cumbre-Gibbs, N. L. The impact of state level residential building code stringency on energy consumption in the United States. *Energy and Buildings* 2023, 278, 112607.
- [18] Evans, M.; Roshchanka, V.; Graham, P. An international survey of building energy codes and their implementation. *Journal of Cleaner Production* 2017, 158, 382-389.
- [19] Allard, I.; Nair, G.; Olofsson, T. Energy performance criteria for residential buildings: A comparison of Finnish, Norwegian, Swedish, and Russian building codes. *Energy and Buildings* 2021, 250, 111276.
- [20] Mott, A.; Delgado, A.; Evans, M. What, why and when to go virtual: An international analysis of early adopters of virtual building energy codes inspections. *Energy Research & Social Science* 2022, 94, 102874.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [21] Ohene, E.; Hsu, S. C.; Chan, A. P. C. Feasibility and retrofit guidelines towards net-zero energy buildings in tropical climates: A case of Ghana. *Energy and Buildings* 2022, 269, 112252.
- [22] Heidari, M.; Rahdar, M. H.; Dutta, A.; Nasiri, F. An energy retrofit roadmap to net-zero energy and carbon footprint for single-family houses in Canada. *Journal of Building Engineering* 2022, 60, 105141.
- [23] Qu, K.; Chen, X.; Wang, Y.; Calautit, J.; Riffat, S.; Cui, X. Comprehensive energy, economic and thermal comfort assessments for the passive energy retrofit of historical buildings - A case study of a late nineteenth-century Victorian house renovation in the UK. *Energy* 2021, 220, 119646.
- [24] Hirvonen, J.; Saari, A.; Jokisalo, J.; Kosonen, R. Socio-economic impacts of large-scale deep energy retrofits in Finnish apartment buildings. *Journal of Cleaner Production* 2022, 368, 133187.
- [25] Júnior, S. M.; Frandoloso, M. A. L.; Brião, V. B. Technical and economic feasibility study for a university zero energy building in Southern Brazil. *Energy and Buildings* 2023, 281, 112748.
- [26] OMSOL, Inc., COMSOL Application Notes, Simulation-Driven Design for Thermal Management of Buildings, Stockholm: COMSOL, Inc. 2017
- [27] Yunus A. Çengel and Afshin J. Ghajar, HEAT AND MASS TRANSFER: FUNDAMENTALS & APPLICATIONS, FIFTH EDITION New York: McGraw-Hill Education. 2015
- [28] Government Gazette. Energy Conservation Promotion Act, B.E. 2535. 1992. Volume, 1, Part 33, 2 April 1992. Available online: <https://www.eppo.go.th/images/law/ENG/nation2>
- [29] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ.2556, พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ: โกลบอล อีจี. ปี พ.ศ.2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



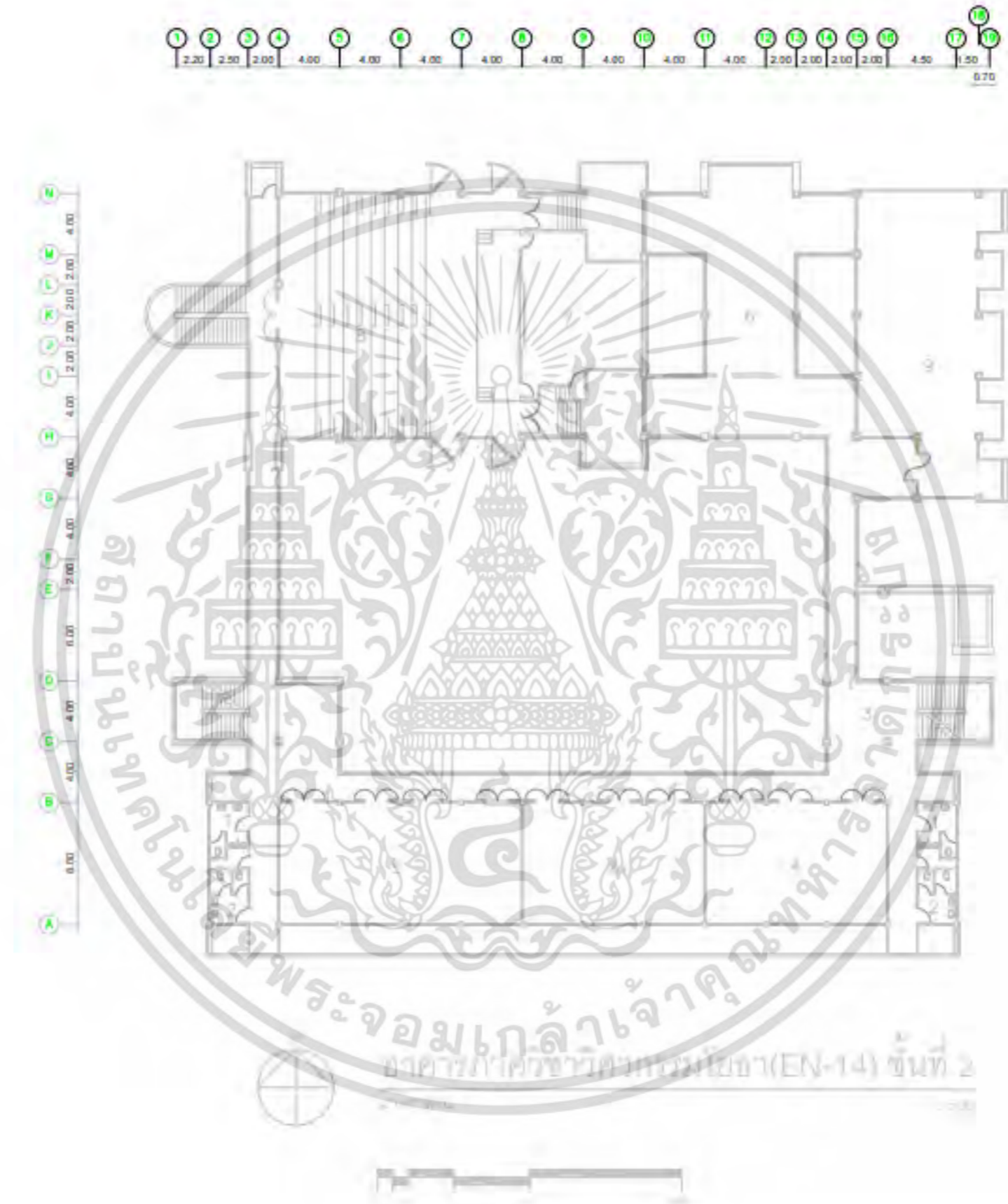
ภาคผนวก ก.

แบบแปลนอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม

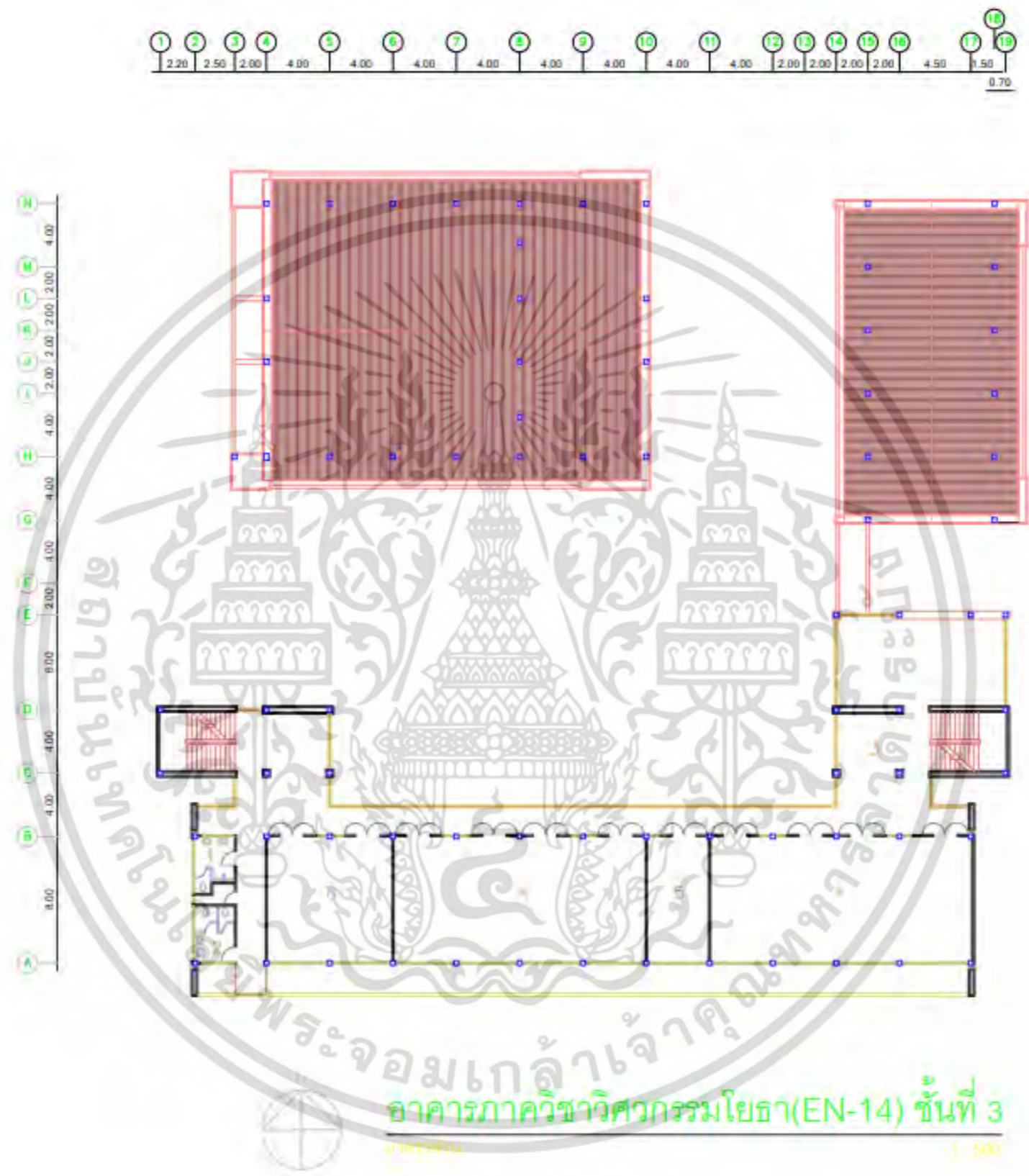
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



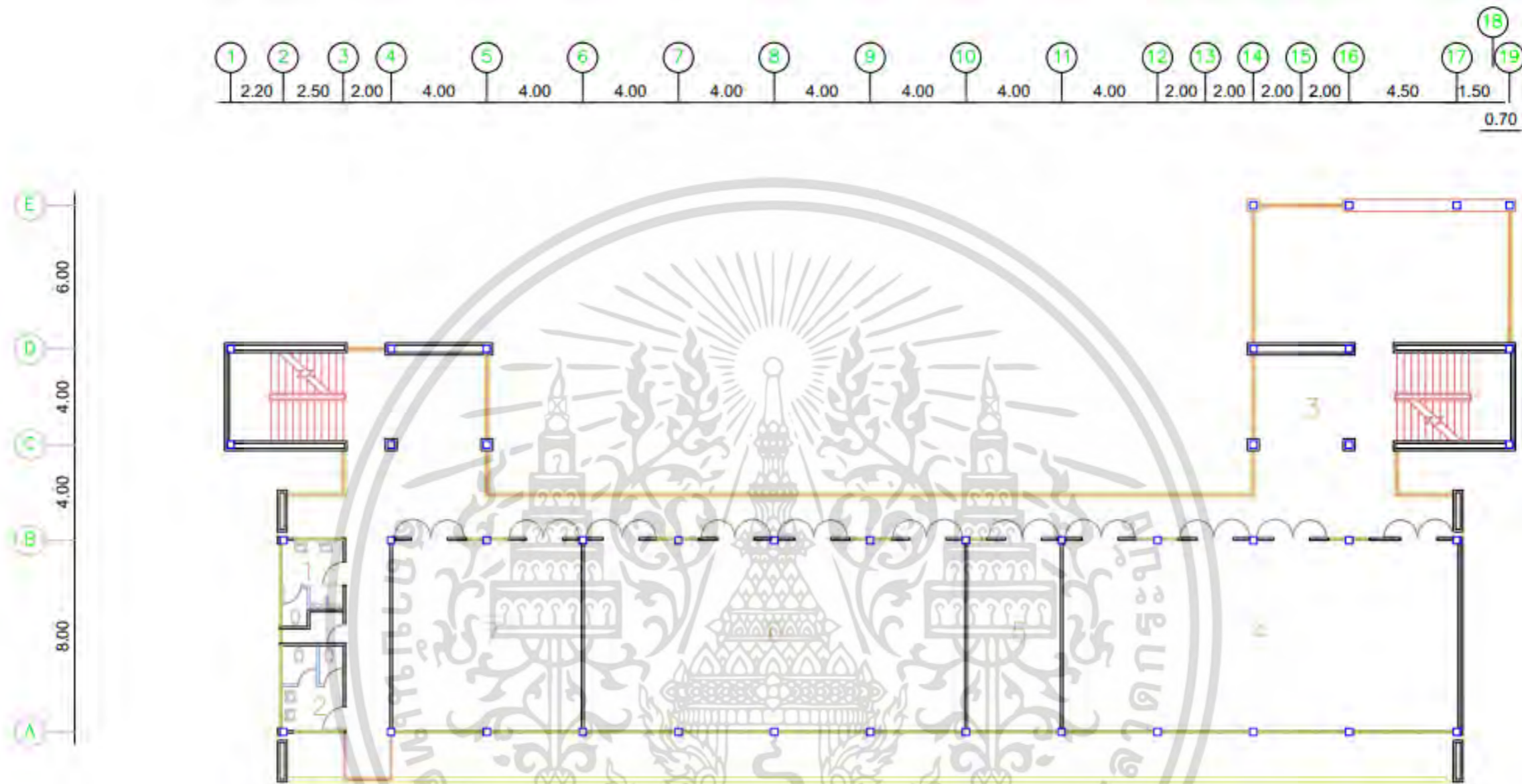
รูปที่ ก.1 แบบแปลนอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ชั้น 1
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 แบบแปลนอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ชั้น 2
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 แบบแปลนอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ชั้น 3
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



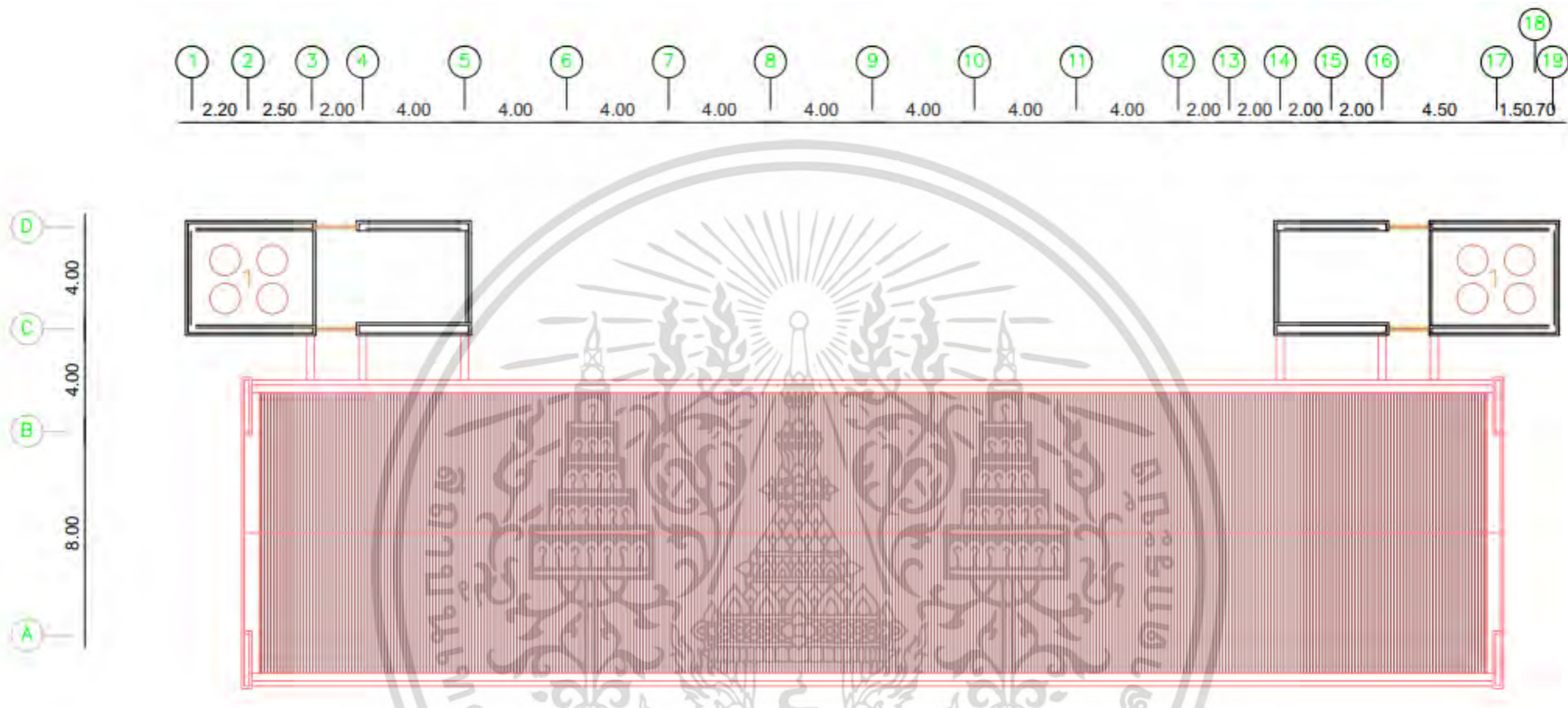
อาคารภาควิชาวิศวกรรมโยธา(EN-14) ชั้นที่ 4

มาตรฐาน

1 : 500

รูปที่ ก.4 แบบแปลนอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ชั้น 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อาคารภาควิชาวิศวกรรมโยธา (EN-14) ชั้นดาดฟ้า

มาตราส่วน

1 : 500

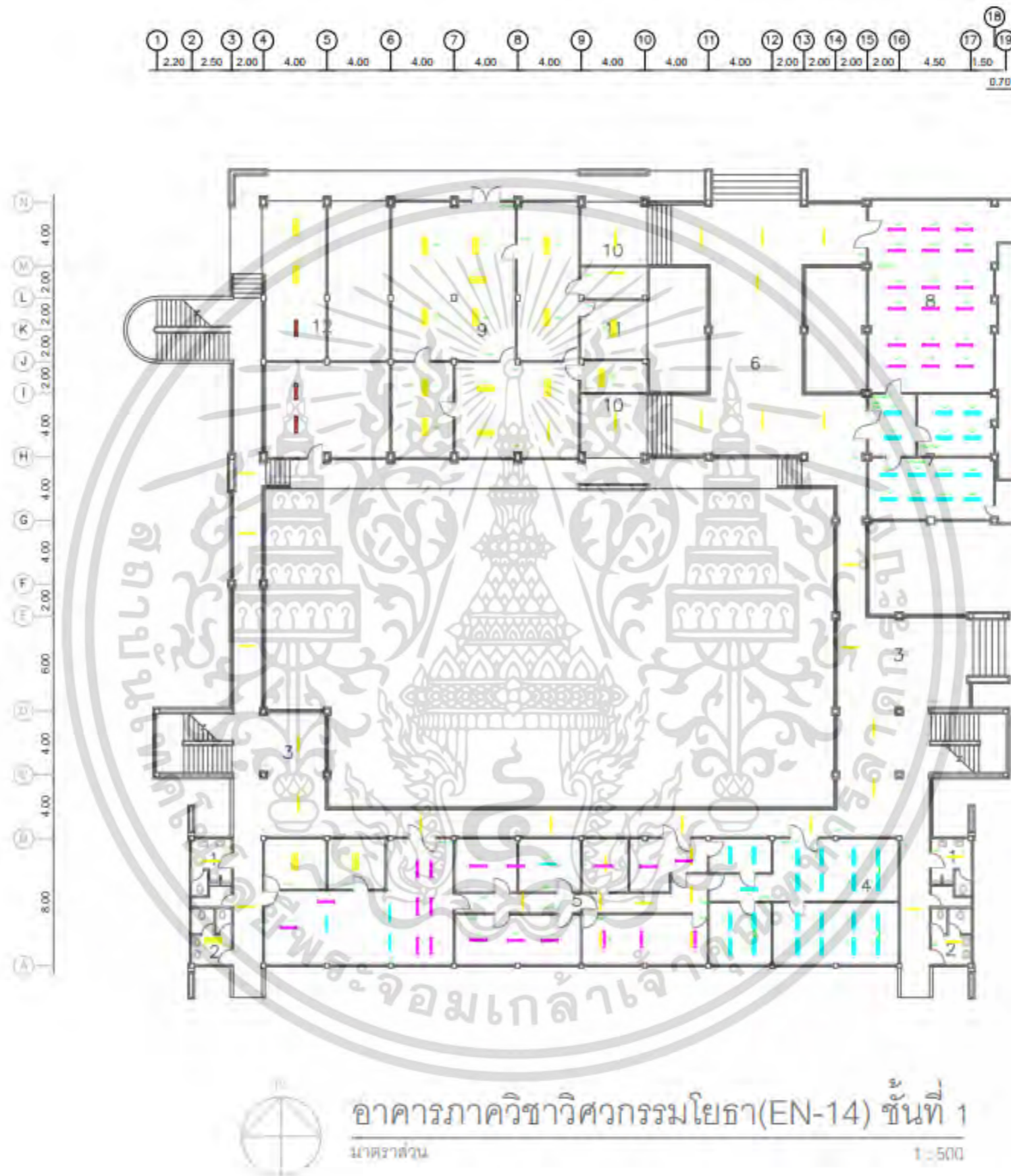


รูปที่ ก.5 แบบแปลนอาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ชั้นดาดฟ้า

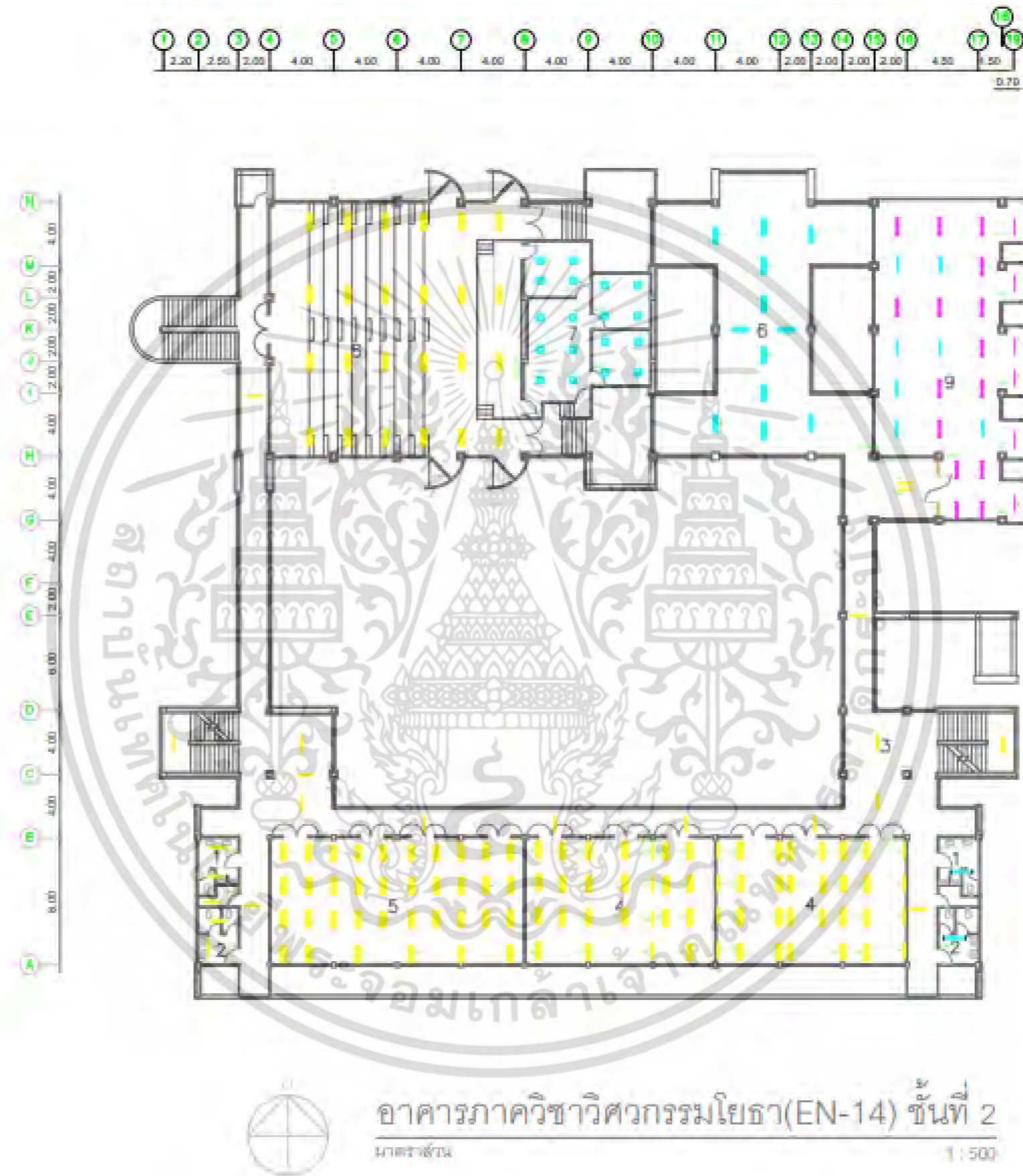
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



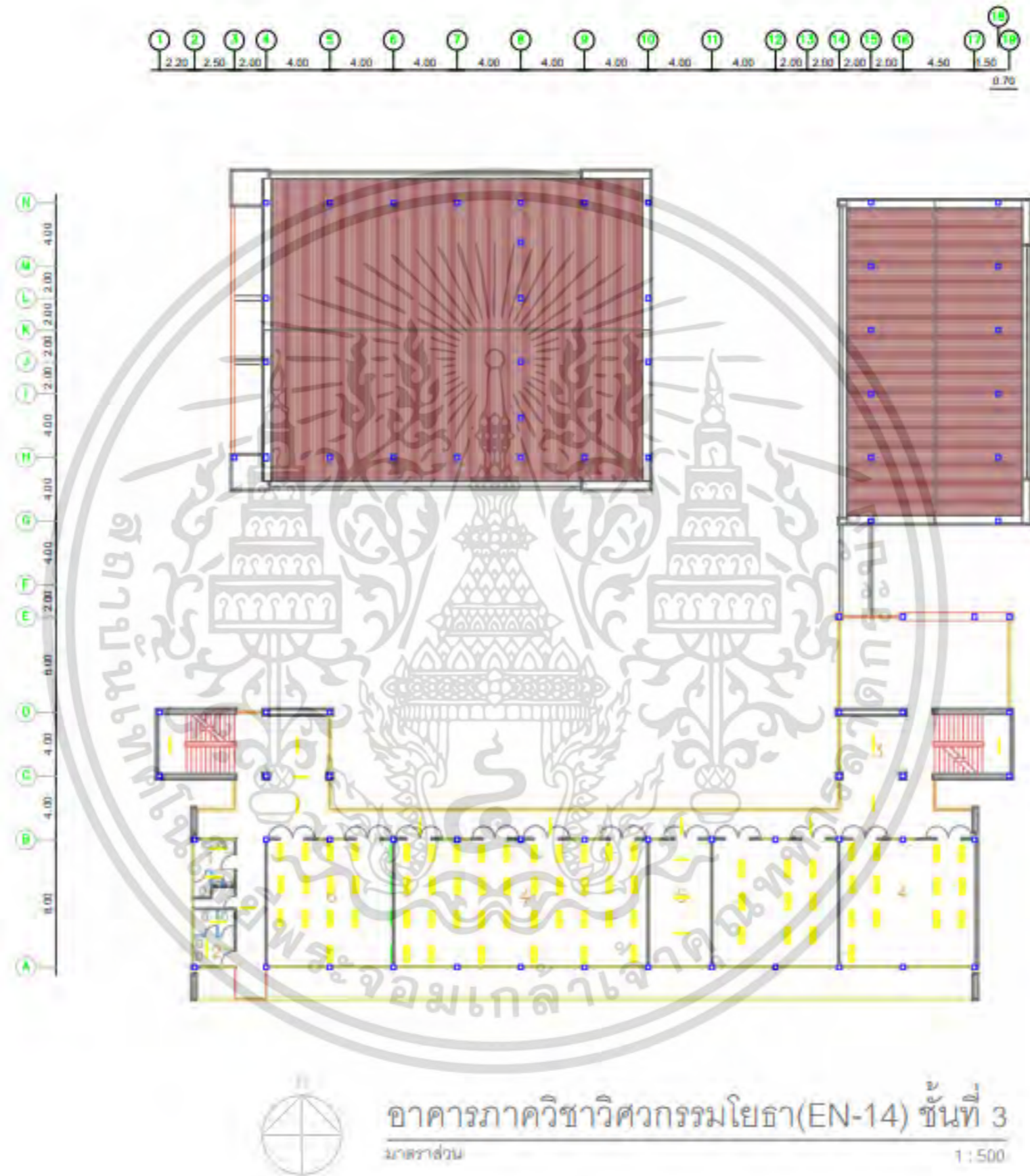
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



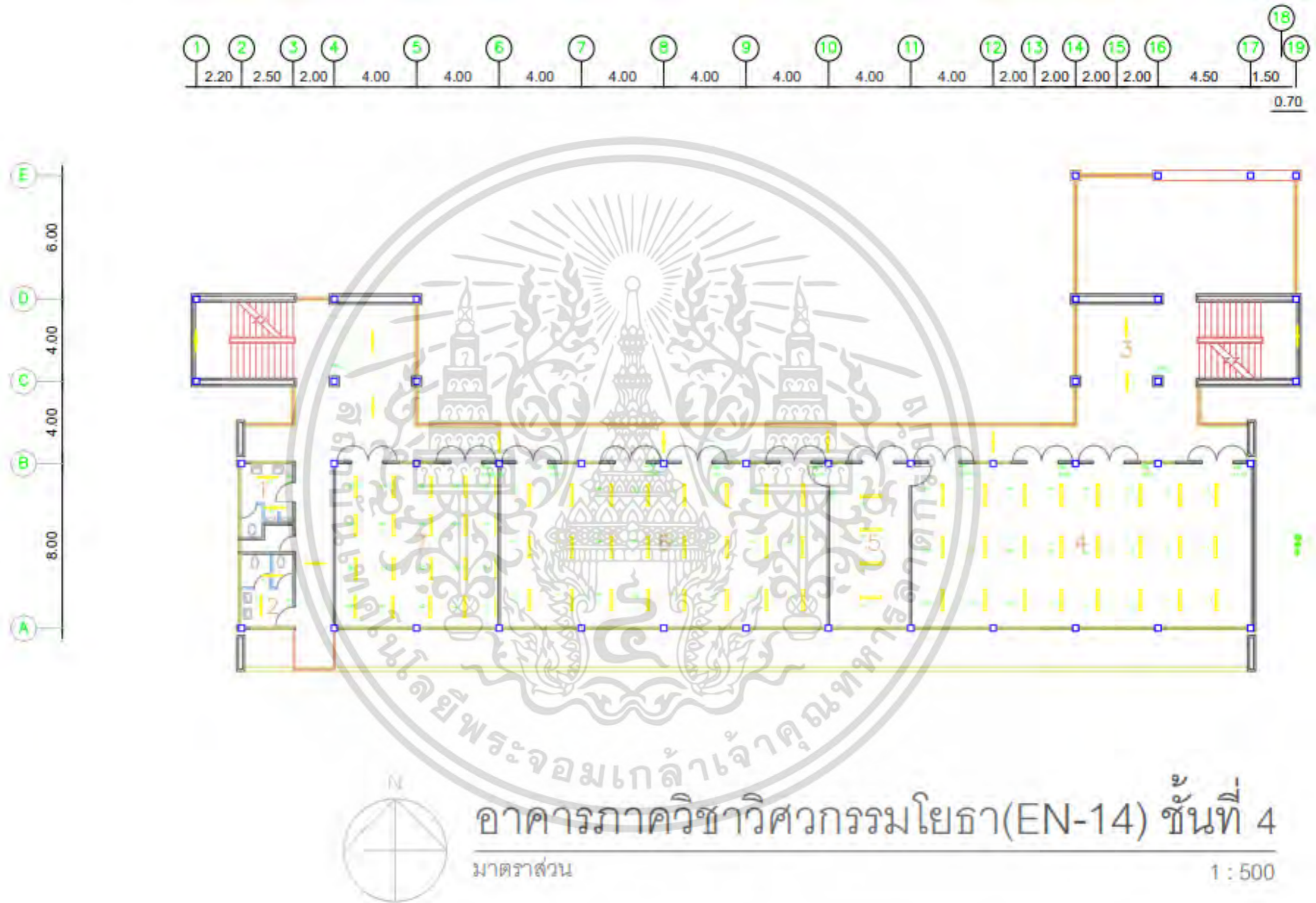
รูปที่ ข.1 แบบแปลนระบบไฟฟ้าแสงสว่าง อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ชั้น 1
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 แบบแปลนระบบไฟฟ้าแสงสว่าง อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ชั้น 2
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



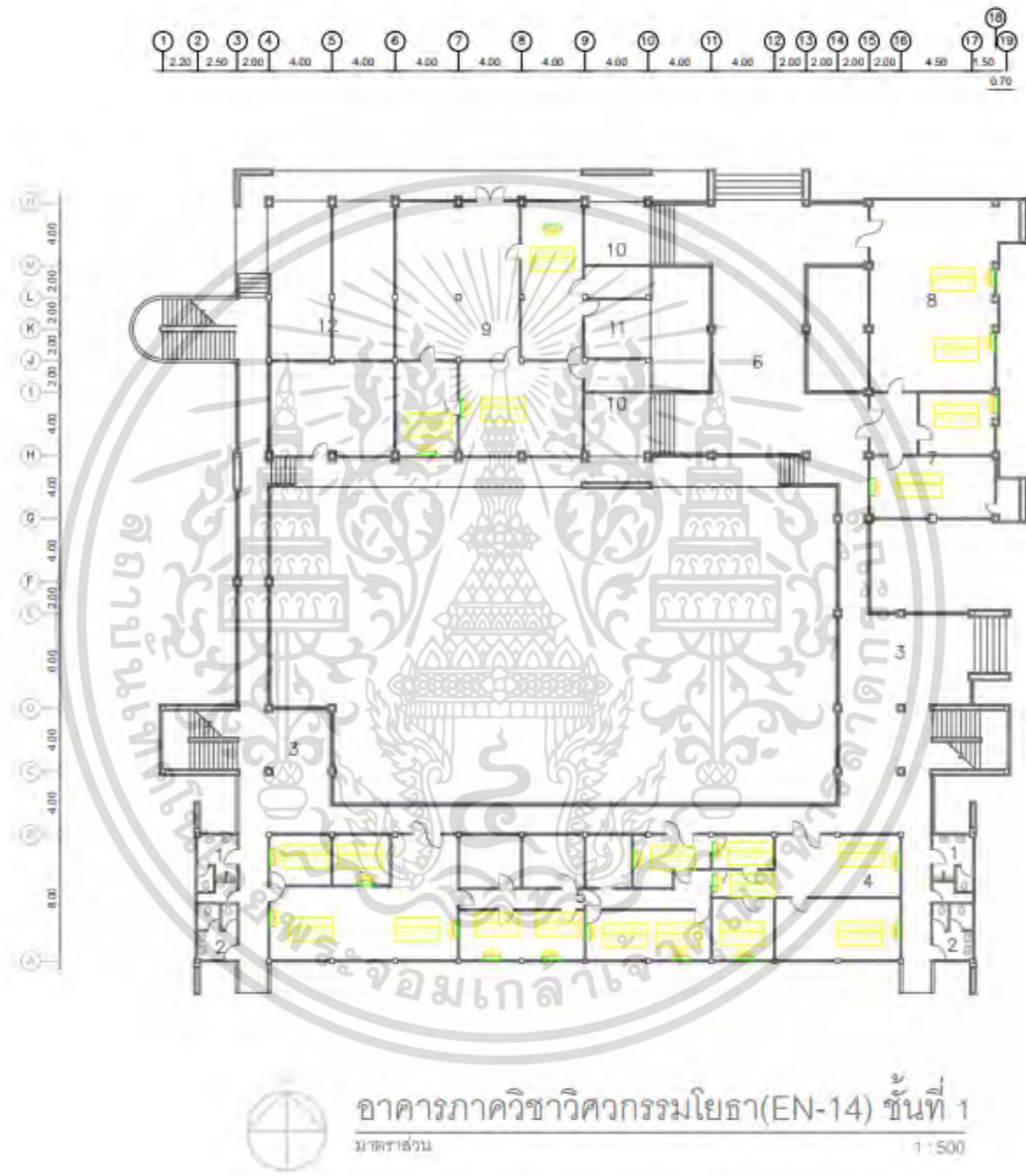
รูปที่ ข.3 แบบแปลนระบบไฟฟ้าแสงสว่าง อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ชั้น 3
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



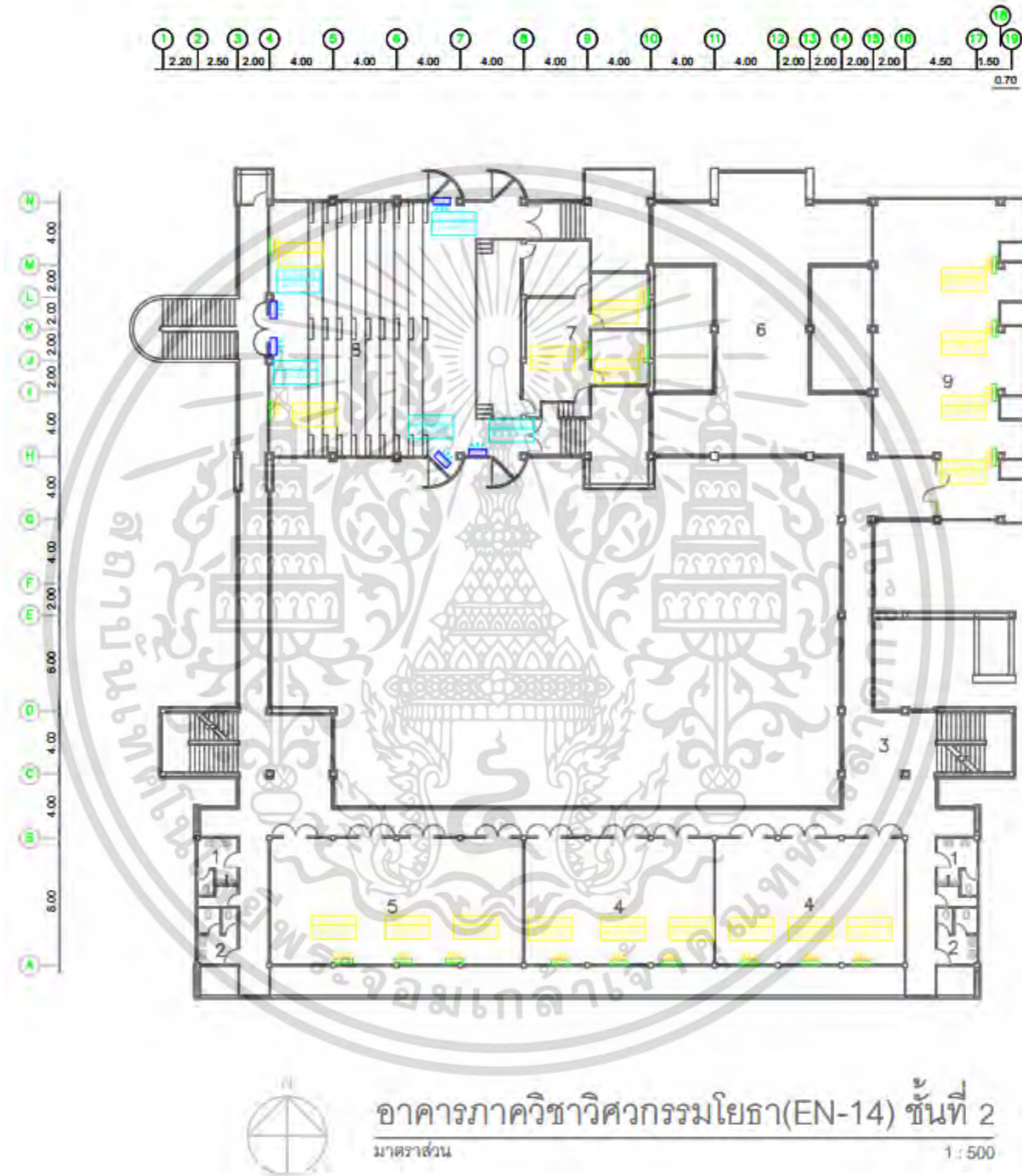
รูปที่ ข.4 แบบแปลนระบบไฟฟ้าแสงสว่าง อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ชั้น 4
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



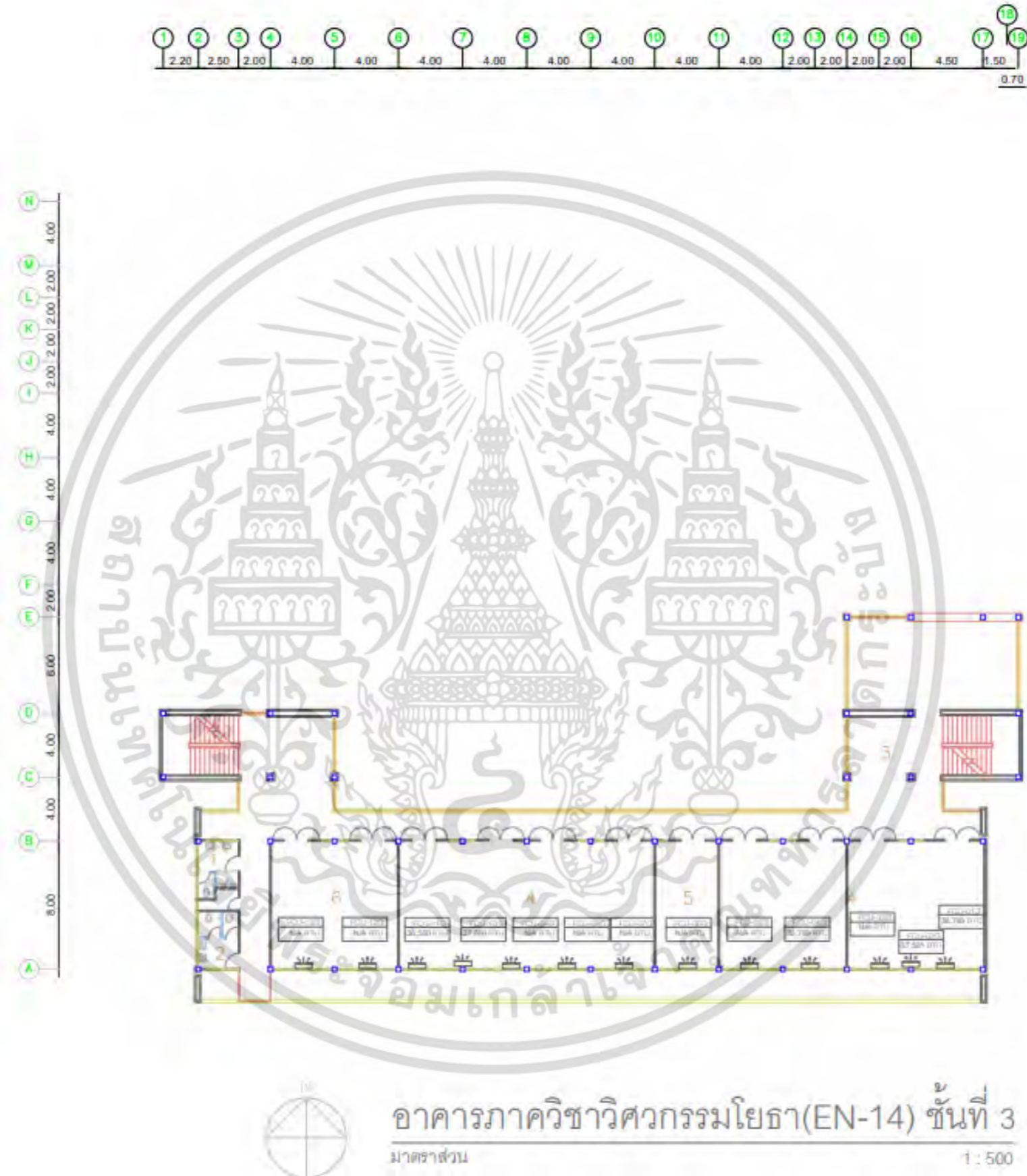
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



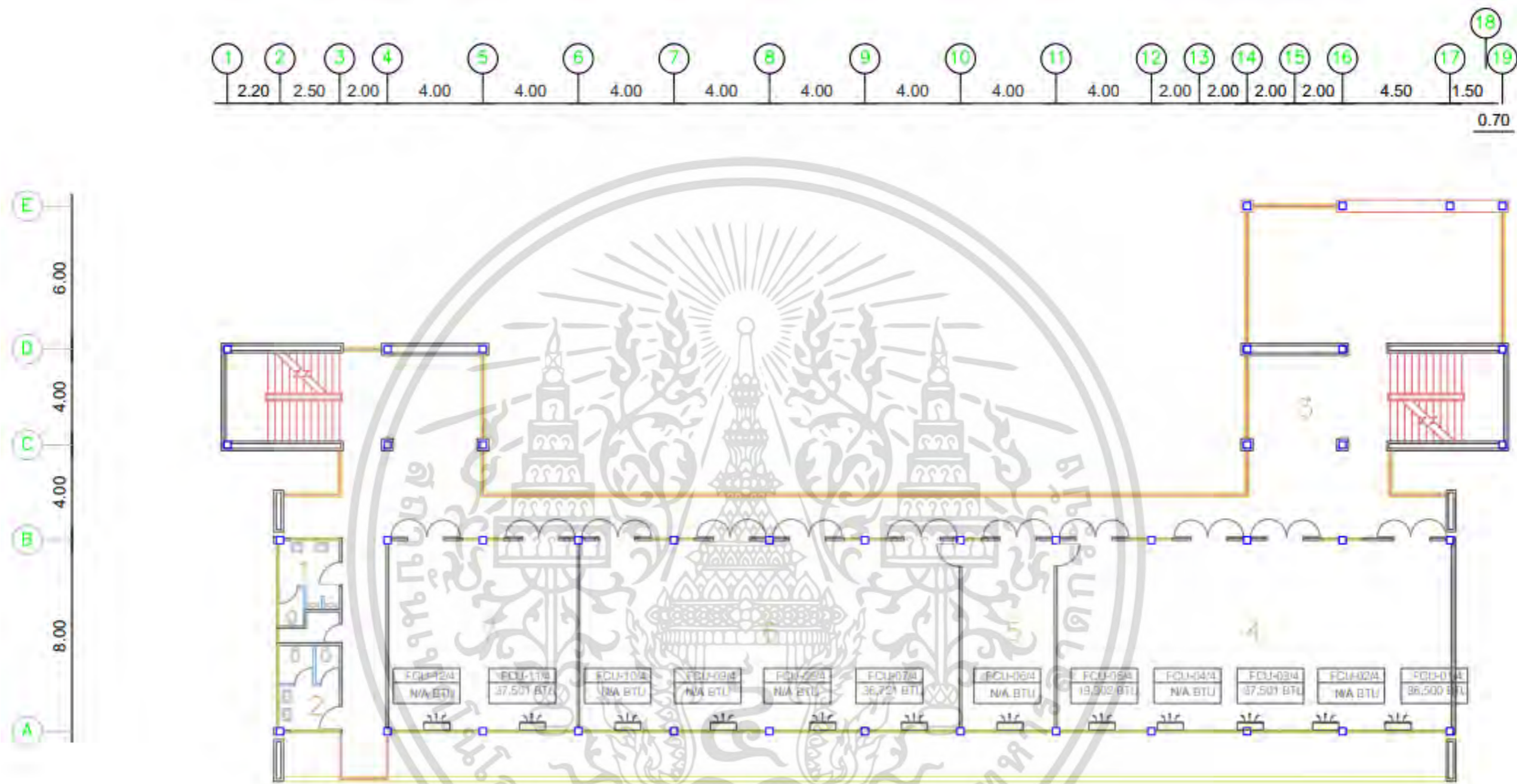
รูปที่ ค.1 แบบแปลนระบบปรับอากาศ อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ชั้น 1
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.2 แบบแปลนระบบปรับอากาศ อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ชั้น 2
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.3 แบบแปลนระบบปรับอากาศ อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ชั้น 3
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อาคารภาควิชาวิศวกรรมโยธา(EN-14) ชั้นที่ 4

มาตราส่วน

1 : 500

รูปที่ ค.4 แบบแปลนระบบปรับอากาศ อาคารเรียนวิศวกรรมโยธาเดิม ชั้น
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




ภาคผนวก ง.
บทความวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Article

Renovation of an Academic Building's Envelope, Lighting, and Air Conditioning System According to Thailand Building Energy Code for Energy Consumption Reduction

Pathomthat Chiradeja ¹, Surakit Thongsuk ², Santipont Ananwattanaporn ² and Atthapol Ngaopitakkul ^{2,*}

¹ Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Bangkok 10110, Thailand

² School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand; san_ti_for@hotmail.com (S.A.)

* Correspondence: atthapol.ng@kmitl.ac.th; Tel.: +66-2329-8330

Abstract: This study evaluated the feasibility of building renovation with regard to the aspects of economy and energy. An academic building located in Bangkok, Thailand was selected for a case study. Four sub-systems, namely, the building envelope, lighting system, air conditioning unit, and electrical system, were renovated. From the energy perspective, Thailand's Building Energy Code was used as an evaluating standard, and the BEC software (Version 2.6.0) was employed for the calculations. The economic feasibility of the renovation was determined on the basis of the internal rate of return and discounted payback period. It was demonstrated that the renovation can result in a reduction in the annual energy consumption of the entire building by up to 55.44%. In regards to economic feasibility, the renovation project can achieve a payback period of 4.98 years with 20.89% IRR. In addition, the renovation of a building can lead to spare capacity of the transformer for electric vehicle charger loads. Thus, the renovation of an old building into an energy-efficient building in compliance with building code can afford benefits both in terms of electricity consumption reduction and decreased energy cost for the project owner and provide opportunity for the building to support future load.

Keywords: building renovation; lighting system; building envelope; air conditioning system



Citation: Chiradeja, P.; Thongsuk, S.; Ananwattanaporn, S.; Ngaopitakkul, A. Renovation of an Academic Building's Envelope, Lighting, and Air Conditioning System According to Thailand Building Energy Code for Energy Consumption Reduction. *Sustainability* **2023**, *15*, 15298. <https://doi.org/10.3390/su152115298>

Academic Editor: Georges Zissis

Received: 20 August 2023

Revised: 17 September 2023

Accepted: 25 September 2023

Published: 26 October 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The rising global demand for electricity has become one of the key challenges given the inter-relatedness among various seemingly independent factors such as environmental impact, economic growth, and energy independence. According to the data from the International Energy Agency (IEA), energy usage by buildings has been significantly rising as the global economy and population are still growing. Thus, energy efficiency in the building sector is evolving to be an essential aspect, and its enhancement is increasingly considered key to reducing energy demand and mitigating climate change. The report notes that energy efficiency measures could reduce global energy demand by up to 20% by 2040. The IEA provides the latest global energy outlook in its "World Energy Outlook 2022" report [1]. The building sector energy consumption accounted for 132 EJ in 2021 or accounted for 30% of total global final energy consumption. However, there is a significant potential for improvements of the energy efficiency in the building sector through the introduction of insulation; efficient lighting equipment and heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems; and power generated from renewable energy. The IEA estimates that energy efficiency measures could reduce energy consumption in buildings by up to 50% by 2050.

An example building was selected from the monthly energy usage statistics of the period of 2018–2021 (Figure 1). The energy usage profile indicates that this academic building has a usage pattern that resembles the academic year of an undergraduate student

with the highest peak in April and May, owing to the following summer period. Energy usage has been constantly growing between 2018 and 2020. However, the value suddenly dropped in 2021 because of the COVID-19 pandemic, which resulted in lockdowns and a period of working from home. This reduction in energy usage has been steadily recovering to pre-COVID-19 levels and is forecast to rise further. In addition, the energy price will be much higher in the future as a result of inflation and conflicts. Thus, improvements in the building's energy efficiency are one of the issues that needs to be addressed to achieve the energy initiative set by government policy.

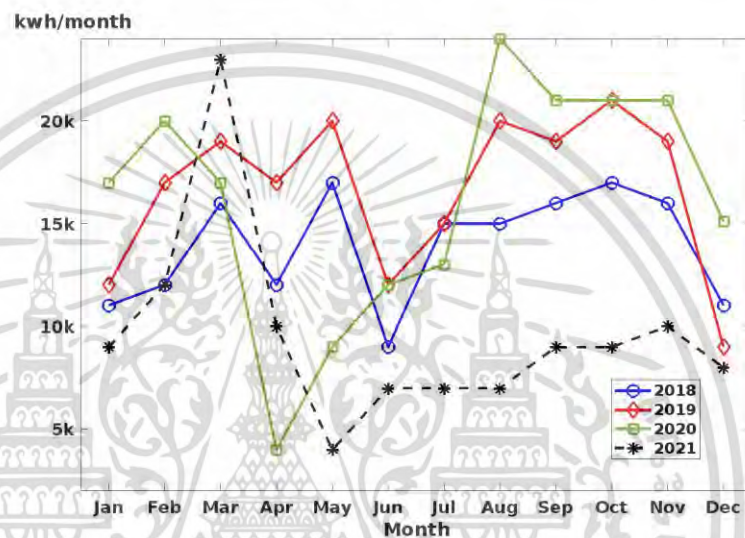


Figure 1. Electricity consumption of an academic building.

In the case of Thailand, the Energy Policy and Planning Office (EPPO) of Thailand's Ministry of Energy launched the Thailand Integrated Energy Blueprint (TIEB) [2] in 2014, which combined five short-term plans aimed at achieving sustainable growth of the country. Regarding The Energy Efficiency Plan 2018-2037 (EEP 2018) [3], the plan expected energy saving by 1166 ktoe or a 2% proportion of the final energy consumption reduction by applying building energy code to new buildings. Thailand's Building Energy Code (BEC) came from the ministerial regulations, derived from the "Energy Conservation and Promotion Act. B.E. 1992" [4]. The BEC's aim is to enforce the building in specific categories that have a total area of more than 2000 m² to consider energy efficiency design and use of high-efficiency equipment during the initial state of the project. Ministerial Regulation in 2009 [5] has set minimum energy efficiency criteria for different building aspects consisting of the building envelope, lighting, air conditioning, water heating, renewable energy, and whole building mandatory energy consumption. Compliance with the BEC is mandatory for all newly constructed buildings and buildings that undergo significant renovations, and non-compliance can result in no approval for the construction or opening of the building. In addition, the BEC also aim to develop the code further in the future by tightening the standard according to newer technology, which will force the newer project to adhere to higher standards ranging from BEC in 2019 to High-Performance Standard (HEPS) in 2025, Economic Building (ECON) in 2031, and finally to Zero Energy Building (ZEB) in 2036.

In order to improve building energy efficiency, the largest aspect of the building that affects energy usage is the envelope system. The combining energy efficiency measuring a building envelope in aspects of WWR, shading, glazing, and insulation can achieve annual average energy savings by 35% [6]. The thermal performance and optimal thickness of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the insulator material has been taken into consideration for a residential building, which provides a ratio that best performs in terms of energy saving [7]. Adding the AI-driven model to optimize the combination of material and components for a building envelope can increase energy savings by an additional 7.52% in cost and 8.48% in energy [8]. In arid and semi-arid climates, the annual cooling load can be reduced by 26% with the building envelope renovation [9]. The policy also presented an important role in setting the criteria for the newly constructed building to be applied. In an Italy case study, the regulatory bodies adjusted the level of the heat transfer coefficient depending on the climate zone [10]. A multifamily building's renovation can save the energy range from 8.8% to 74.8% depending on the modern heating system [11]. For an academic building, the renovation process for the building envelope in a hot climate can also achieve energy savings by 54% with a payback period of around 5.5 years [12]. Different renovation techniques can provide large-scale energy savings ranging between project characteristics, which can reduce energy approximately by 50% [13]. The renovation process for an existing old apartment building can involve renovating into minimum energy performance but still not the level of a near zero energy building (nZEB) [14]. The technical, environmental, economic, and social feasibility of renovating a building into nZEB has been addressed [15]. A building renovation on different aspects such as air conditioning, lighting, equipment, etc., with additional PV installed demonstrated an energy reduction of 46% [16].

The BEC is an essential tool for improving a building's energy efficiency. It provides minimum requirements for designing, constructing, and operating new and existing buildings to ensure energy efficiency and the judicious use of energy resources. A prior study used microdata from the American Community Survey (ACS) to evaluate the effects of building energy codes on energy cost. The data on the adoption of the building codes showed that energy codes were effective in decreasing household electricity expenses. Energy cost and climate are the main influences on energy efficiency and they also have a statistically consequential effect on energy use [17]. An example of the guideline that adopted building energy codes and delivers their potential benefits is discussed [18]. The suggestion for the outlines of building codes in countries such as Finland, Norway, Sweden, and Russia is introduced [19]. The innovations are a valuable tool to improve building energy codes. The consequences of virtual inspections include time and financial savings [20]. Therefore, the BEC is crucial for improving the energy efficiency of the building sector. It provides guidelines and standards that must be followed to ensure that a building is designed, constructed, and operated with energy efficiency in mind. By complying with BEC requirements, buildings can reduce their energy consumption and associated costs, lower greenhouse gas emissions, and improve occupant comfort and health.

An economic analysis can support determining the most effective and financially feasible solutions for improving a building's energy efficiency by evaluating the costs and benefits of implementing energy-efficient technologies and strategies. An examination of existing residential buildings' renovation in Ghana into net-zero energy buildings (NZEBs) by using energy efficiency and renewable energy sources found that the payback period for a renewable energy able to meet the remaining energy needs is estimated to be 6–10 years according to [21]. A life cycle cost analysis (LCCA) evaluates the economic feasibility of different energy conservation scenarios and measures. Results show that a phased retrofitting approach could result in significant energy savings and emission reductions with a reasonable payback period [22]. The passive measures for building renovations showing maximum energy-saving potential can be achieved by combining different building envelope technology. The recommended retrofitting combination can achieve a 51.8% primary energy reduction and a discounted payback period (DPP) of 18 years [23]. Examining an economic assessment of the energy regarding apartment buildings' renovation shows that tax revenues from building renovation can achieve a cost-effective status [24]. Economic assessment of the proposed strategies for making a university building a ZEB defines retrofitting strategies that reduce the building's energy consumption by 18.02% [25]. In summary, economic assessment plays an important part

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

in energy efficiency by comprehensively analyzing the costs and benefits associated with different energy efficiency measures. Moreover, it makes it possible to identify the most cost-effective energy efficiency measures and facilitates the development of a financially viable plan for achieving NZEBs.

The objective of this research was to evaluate the feasibility of the renovations of old buildings into energy conservation buildings that comply with Thailand's BEC by considering three aspects: building envelope, lighting, and air conditioning system. The BEC software was used to evaluate the energy performance of both the original and renovation cases. In addition, economic indicators were used to determine the feasibility of the building renovation. The main contributions of this study are as follows:

1. The thermal characteristics of the envelope material components considered for the renovation were studied to determine their efficiency in terms of thermal transfer in order to determine suitable material components from the aspects of efficiency and economy.
2. An economic feasibility analysis was performed on each sub-system in order to provide the project owner with options for building renovations, which are specific to sub-sections.
3. The renovation of the building was found to be capable of reducing the building peak load and providing additional spare power capacity from the original transformer to support future loads, such as electric vehicle (EV) chargers.

The rest of this paper is structured as follows: In Section 2, Thailand's BEC is discussed. Details of simulated buildings and the case study used in this research are displayed in Section 3. A building code evaluation of both the current building and the renovated case is demonstrated in Section 4. Next, Section 5 details an analysis of the feasibility of renovating buildings for project owners on the basis of economic indicators, and Section 6 presents a discussion on the additional benefits of building renovations. Finally, the conclusions are summarized in Section 7. A nomenclature list is provided in the final section.

2. Building Energy Code

Thailand's BEC is designed for nine types of buildings, both newly constructed and retrofitted, with a total area of more than 2000 m², and evaluates the energy aspect of the building. This standard categorizes buildings into three groups depending on the operating hours. The first group consists of buildings that are operated for an average of 8 h/day and consist mainly of buildings used for education and offices (Group 1). The second group are buildings that are operated for an average of 12 h/day and consist of theatres, convention halls, entertainment buildings, and department stores (Group 2). The final group are buildings that are operated for an average of 24 h/day and consist of hotels, hospitals, and condominiums (Group 3). There are six aspects that are generally assessed, namely the building envelope, lighting system, air conditioning system, hot water system, renewable energy system, and whole building energy consumption.

Regarding the envelope system, the BEC uses the overall thermal transfer value (OTTV) and the roof thermal transfer value (RTTV) as indicators for determining the efficiency of the materials used. First, the heat transfer coefficient for the material used in the building envelope is calculated by using the material thermal resistance, which comes from the thermal conductivity and thickness of material by using Equations (1) and (2). The heat transfer coefficient of the building envelope will then be used to determine the thermal transfer of each individual section of the building by using Equations (3) and (4). Finally, the amount of heat passing through the areas of the wall or roof for the entire building is calculated by combining the OTTV and RTTV for each section in the weight distributed manner as displayed in Equations (5) and (6).

$$R_T = R_o + \frac{\Delta x}{k} + R_i \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_{w,r,f} = \frac{1}{R_T} \quad (2)$$

$$OTTV_i = (U_w)(1 - WWR)(TD_{eq}) + (U_f)(WWR)\Delta T + (WWR)(SHGC)(SC)(ESR) \quad (3)$$

$$RTTV_i = (U_r)(1 - SRR)(TD_{eq}) + (U_f)(SSR)\Delta T + (SSR)(SHGC)(SC)(ESR) \quad (4)$$

$$OTTV = \frac{(A_{w1})(OTTV_1) + (A_{w2})(OTTV_2) + \dots + (A_{wn})(OTTV_n)}{A_{w1} + A_{w2} + \dots + A_{wn}} \quad (5)$$

$$RTTV = \frac{(A_{r1})(RTTV_1) + (A_{r2})(RTTV_2) + \dots + (A_{rn})(RTTV_n)}{A_{r1} + A_{r2} + \dots + A_{rn}} \quad (6)$$

The standard only evaluates the wall or roof areas that directly connect with the environment and rooms with air conditioning units. The calculation methodology based on the external thermal value from the environment can contribute to the cooling load of the air conditioning unit through the area with the air conditioning unit and thus affect the energy consumption of the entire building. BEC maximum allowance values for OTTV and RTTV for each of the building types are summarized in Table 1.

Table 1. BEC criteria for building envelope and lighting system.

Building Types	Wall Thermal Transfer Value (W/m ²)	Roof Thermal Transfer Value (W/m ²)	Lighting Power Density (W/m ²)
Group 1	≤50	≤10	10
Group 2	≤40	≤8	11
Group 3	≤30	≤6	12

With regard to the lighting system, the building code evaluates only the energy efficiency of the building and not the lighting quality, which is considered in a separate law. The calculation of the energy efficiency is based on the light power density (LPD), which is the ratio between the total energy usage of a building and the building floor area. However, parking lots are not included in the calculation owing to their low lighting requirement as they may skew the lighting efficiency result. BEC sets the maximum lighting power density for a working area to indicate the performance of the lighting system according to different building categories, as summarized in Table 1.

Regarding air conditioning systems, the building code distinguishes between split-type units and central-type units. A large proportion of small-size buildings mainly use split-type air conditioning systems because of constraints in the budget and installation area. For a split-type air conditioning system, BEC evaluates the performance of each individual unit. In the case of one of the units failing the standard, it is assumed that all units in the building fail. Before the standard revision, the coefficient of performance was used as an indicator. Currently, the seasonal energy efficiency ratio (SEER) is the value that is used to evaluate split-type air conditioning units. The code categorizes split-type air conditioning units into fixed speed and variable speed (inverter) because of the different performances of different technologies. The SEER value is tied to the “label no. 5” standard developed by the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) for electric appliances in Thailand. So, any building that has split-type air conditioning units with the label no. 5 marks will automatically pass the energy code. For the size of an air conditioning unit with a fixed speed around 8000 W, SEER higher than 12.85 is compliant with the standard and the unit; from 8000 to 12,000 W, a unit with SEER higher than 12.40 is compliant. For an air conditioning unit with variable speed, SEER around 15.00 for a unit size of 8000 W and SEER around 14.00 for a unit size up to 12,000 W are compliant with building code.

With regard to a hot water system, the energy code evaluates only the efficiency of the boiler and the coefficient of performance (COP) in case of a heat pump. The standard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

does not include the energy usage of hot water systems in the whole building energy calculation. Thus, hot water systems are evaluated separately for both pathways. In the case of renewable energy, the annual energy generated can directly support the whole building energy consumption. The building code based the calculation of whole building energy usage on three parts as shown in Equation (7). First, the energy usage in the air conditioning systems can be calculated by combining the cooling load from the building envelope, lighting, equipment, occupants, and air ventilation. The second part is energy usage from the lighting system and equipment. Finally, the electrical energy is generated from renewable sources that provide a direct subsidy to whole building energy consumption.

$$E_{prn} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{A_{wi}(OTTV_i)}{COP_i} + \frac{A_{ri}(RTTV_i)}{COP_i} + A_i \left\{ C_i(LPD_i) + C_e(EQD_i) + 130C_o(OCCU_i) + 24C_v(VENT_i) \right\} \right] \eta_h \quad (7)$$

$$+ \sum_{i=1}^n A_i(LPD_i + EQD_i)\eta_h - (PVE + HEE + ORE)$$

In order to comply with BEC, the building code provides two pathways in order to allow the project owner to have leeway in their design of the building. The first pathway consists of passing the sub-system evaluation involving the building envelope, lighting, air conditioning, and hot water system. The second pathway is used in case the sub-system does not comply with building code, and the whole building energy usage and hot water system will be under evaluation instead. The pathway for compliance with BEC can be summarized as shown in the diagram from Figure 2.

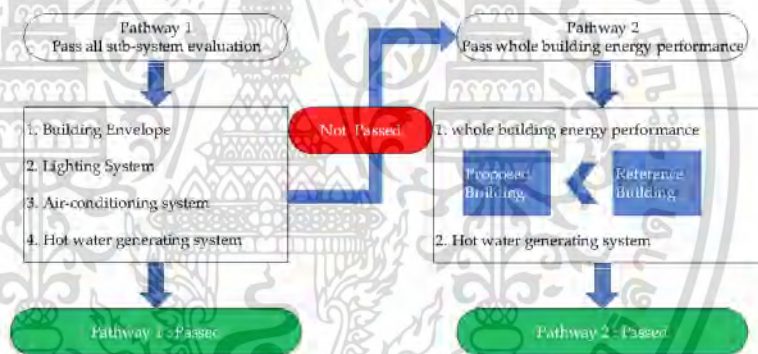


Figure 2. Thailand Building Energy Code compliance pathway.

The detail of BEC software is the program that was designed and approved by the Ministry of Energy, Thailand. This is the calculation model based on the cooling load and OTTV, which is similar to DOE-2.1E software from the United States Department of Energy with the database referencing the detail from the Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE) [26]. The main functionality of the software is the evaluation of a building in the aspects of envelope systems, lighting system, air conditioning system, hot water generation system, renewable energy, and whole building energy consumption in accordance with Thailand Building Energy Code. The limitation of the software is the calculation of lighting quality, the calculation of renewable energy, and building with complex functionality, which require additional software for simulation [27].

3. Building Selection and Renovation Process

A building that has criteria for both area types that falls under Jurisdiction of Thailand Building Energy Code but not in compliance with the code due to the construction period that pre-dated the law was selected as a case study. The building, with characteristics similar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

to other commonly built buildings in the same category, was also taken into consideration to provide widely applicable results. The study process consisted of selecting the case study building for simulation. The floor plan of the building was used to extract the amount of lighting equipment and air conditioning units, and the components of walls, the roof, and windows. The data from the current building were evaluated using BEC software in order to determine whether each sub-system complies with building code. For the building envelope, the thermal transfer analysis on the current material used in the original building was simulated using COMSOL Multiphysics software. After that, the different material with a better thermal characteristic was evaluated in terms of the thermal transfer analysis and was selected as a renovation case. For the lighting system, the amount of equipment could be directly counted from the floor plan and the energy efficiency could be evaluated by using the BEC software. To renovate the lighting system, DIALux software (version 4.13) was used to simulate the replacement software to assess whether it can provide similar lighting quality to the current one. The efficiency of an air conditioning unit could be individually calculated and a better-efficiency unit could be selected for replacement. After the renovation process is completed, the building will be subject to another BEC evaluation in order to confirm that all sub-systems are in compliance with building code. Finally, the cost of the overall renovation process and the cash flow from energy cost reduction were calculated to determine the project feasibility. In addition, an increasing transformer spare power capacity result from load reduction could be used to support future loads. The overall process of the study can be summarized in a diagram as shown in Figure 3.

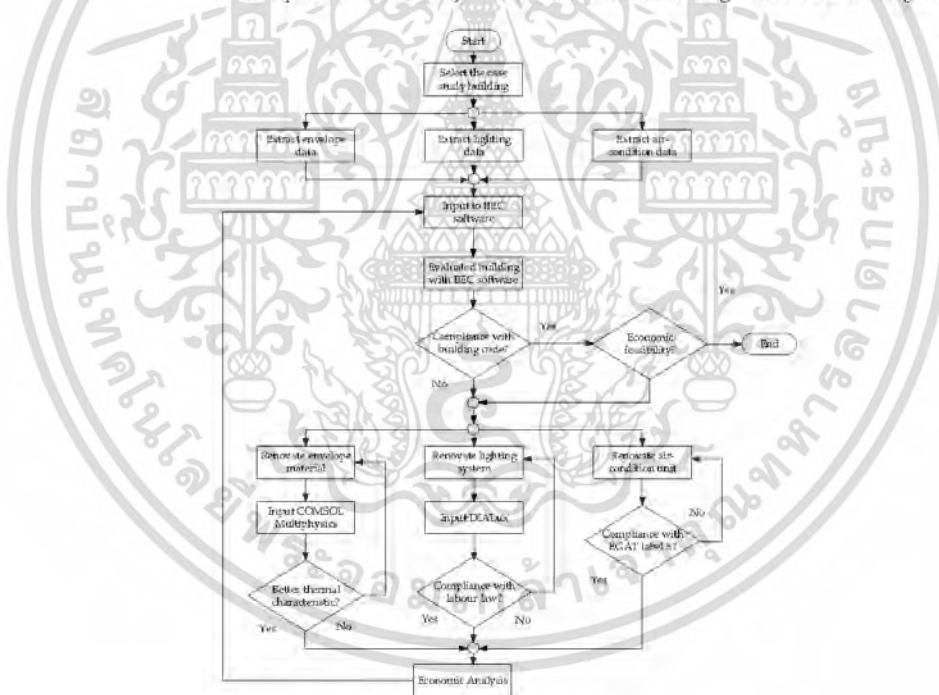


Figure 3. Diagram of the overall study process.

3.1. Case Study Building

The case study building was modelled after the main lecture building in the Department of Civil Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. The building has four stories with a total floor area of 3062 m² and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

consists of one auditorium, lecture rooms, laboratories, and office space for staff and lecturers. This building was constructed in 1992 before the approval of energy conservation and is on the list for renovation. The building has a floor area of more than 2000 m², which is within the criteria for building code evaluation. In addition, this building was constructed with similar characteristics to many education-type buildings in Thailand during that time period. Thus, the renovation proposal conducted regarding the case study building can be widely applicable to other building with similar aging and characteristics. Therefore, it was selected as a case study for the evaluation and renovation to achieve energy conservation according to Thailand's BEC. The floor plan of the entire building is shown in Figure 4.

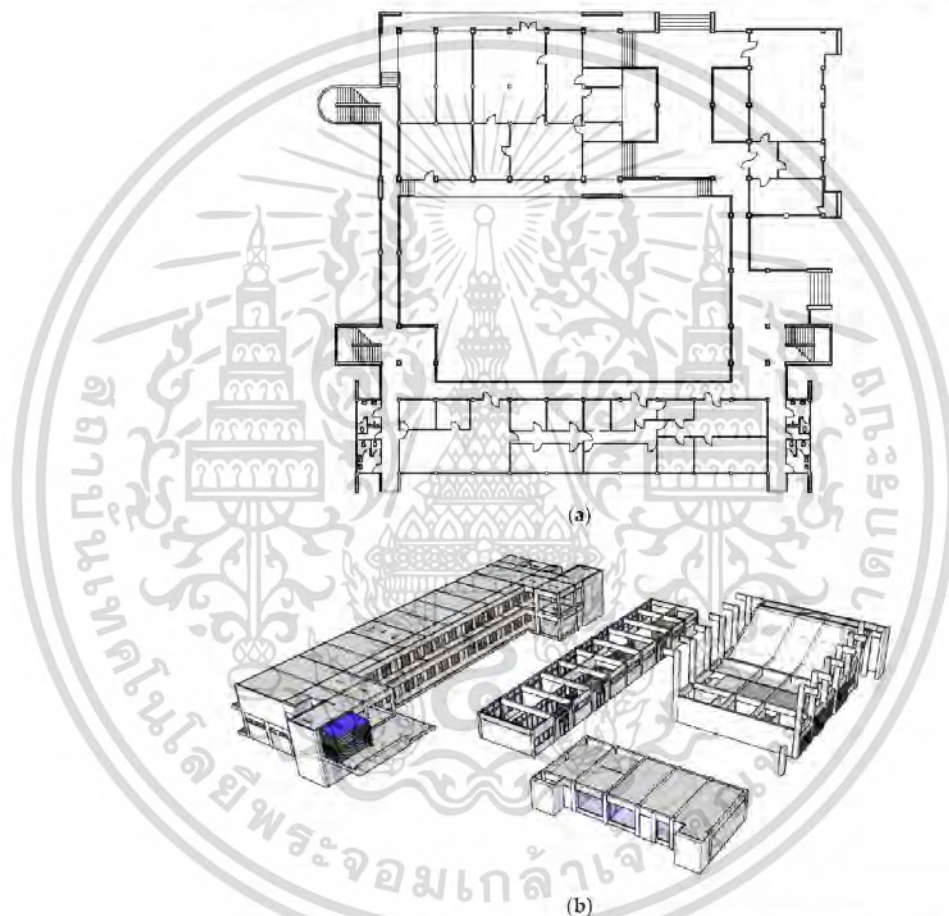


Figure 4. Building of the Department of Civil Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand: (a) floor plan; (b) SketchUp diagram.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A single line diagram of the case study building is shown in Figure 5. The electrical load of the current building is supplied with power from a 250 kVA transformer through a main distribution board via a main feeder with 12×150 , G-50 mm² on a cable tray. The main circuit breaker consists of three poles with 400 AT before the power is fed through the distribution board onto each floor with a 160 AT circuit breaker and 4×95 , G-10 mm². The renovation includes the lighting and air conditioning units, which were replaced with newer technology with higher efficiency and lower power requirements. While the transformer is still the original unit, the connected load on each distribution board can be reduced and additional capacity can be provided for future loads or the size of the circuit breaker can be changed.

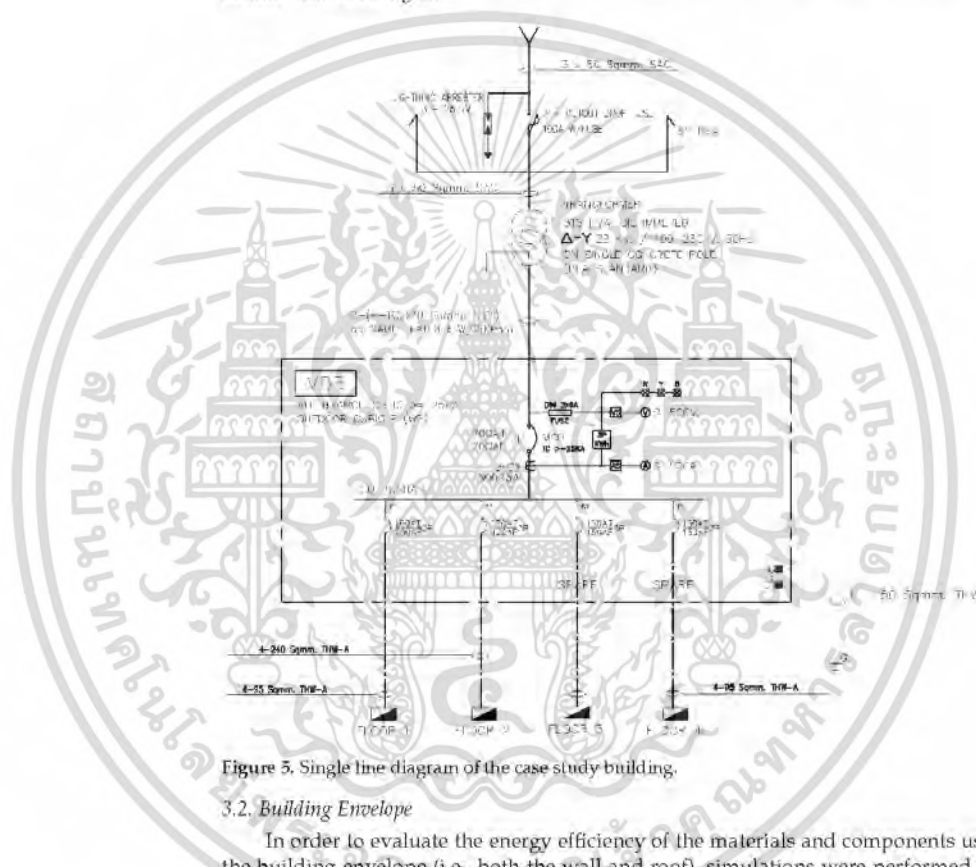


Figure 5. Single line diagram of the case study building.


3.2. Building Envelope

In order to evaluate the energy efficiency of the materials and components used in the building envelope (i.e., both the wall and roof), simulations were performed using COMSOL Multiphysics 5.6. The thermal transfer characteristics of the components of both the original construction material and the possible renovation material were evaluated. Regarding the original building, the components of the materials used in the building envelope consist of dry clay blocks with cement plaster. The thermal characteristics of the materials and a component diagram are summarized in Table 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

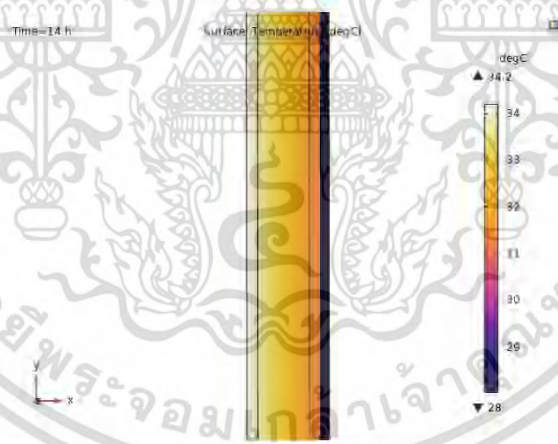
Table 2. Thermal characteristics of the materials and component diagram of an original wall.

Material of Original Wall			
	Thermal Conductivity of Material (W/m·K)	Specific Heat of Material (kJ/kg·K)	Density of Material (kg/m ³)
Plaster	0.840	0.720	1860
Dry Clay Brick	0.790	0.807	1760
Composition of Original Wall			
	Layer of Material	Thickness of Material (m.)	U-Value of Component (W/m ² ·K)



	Plaster	0.0075	1.634
	Dry Clay Brick	0.07	
	Plaster	0.0075	

The model of the original wall used in the case study was simulated using COMSOL Multiphysics 5.6. A simulation of the thermal transfer between the exterior and interior surface temperature throughout the daytime period was performed and the result is shown in Figure 6. The false-color diagram shows that the exterior heat can penetrate through the material without resistance, which results in a high interior surface temperature. The current material used in the building envelope consists of the plaster and dry clay brick, which has high thermal conductivity and result in a high heat transfer coefficient. This thermal characteristic directly affects the OTTV of the building envelope.

**Figure 6.** Thermal transfer of an original wall over 14 h.

To renovate the wall section of the building envelope with more energy-efficient materials, three types of material components were used and the thermal transfer simulation result was used to determine the material component with the highest efficiency. A diagram of the material component used in the renovation and the thermal characteristics of the material are shown in Table 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3. Thermal characteristics of the material and component diagram used for each type of renovated wall.

Material of Original Wall			
	Thermal Conductivity of Material (W/m·K)	Specific Heat of Material (kJ/kg·K)	Density of Material (kg/m ³)
Concrete Plaster	0.326	0.840	1200
Plaster	0.840	0.720	1860
Dry Clay Brick	0.790	0.807	1760
Autoclaved Aerated Concrete	0.476	0.840	1280
Fiberglass Insulation	0.042	0.960	12
Gypsum Board	0.286	1.090	800

Composition of Original Wall			
	Layer of Material	Thickness of Material (m.)	U-Value of Component (W/m ² ·K)
Case 1	1	Plaster	0.0075
	2	Dry Clay Brick	0.0700
	3	Plaster	0.0075
	4	Fiberglass Insulation	0.0650
			0.534
Case 2	1	Plaster	0.0075
	2	Dry Clay Brick	0.0700
	3	Plaster	0.0075
	4	Gypsum Board	0.0120
	5	Fiberglass Insulation	0.0650
			0.516
Case 3	1	Concrete Plaster	0.0075
	2	Autoclaved Aerated Concrete	0.0700
	3	Concrete Plaster	0.0075
	4	Gypsum Board	0.0120
	5	Fiberglass Insulation	0.0650
			0.507

The simulation result in terms of heat transfer at 14 h for each wall material and component renovation case studies are shown in Figure 7. The false-color diagram shows that under a similar exterior surface temperature condition, the renovating material can reduce heat transfer into the building. The thermal transfer from the environment encounters the resistance on the fiberglass insulation layer, which has the lowest thermal conductivity and a heat transfer coefficient being about three times reduced compared to the original material. Thus, the interior surface temperature in all three renovation case studies is significantly

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

reduced to a similar level. On the other hand, an additional component such as the gypsum board or autoclaved aerated concrete can only provide little reduction in thermal transfer in comparison with fiberglass insulation. This results in little differentiation in interior surface temperature for the renovated envelope in the case studies.

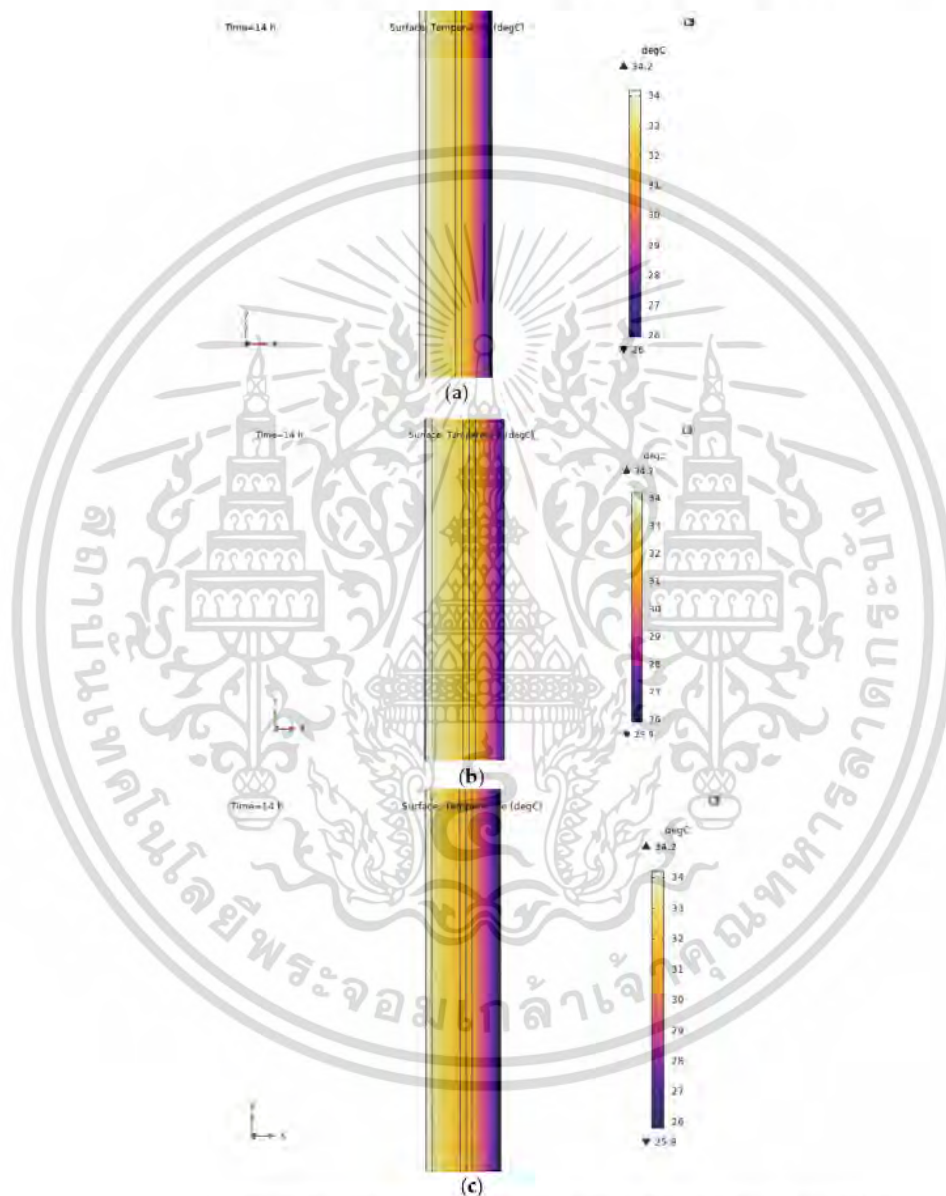


Figure 7. Thermal transfer results for various types of renovated walls over 14 h: (a) renovated wall, case 1; (b) renovated wall, case 2; (c) renovated wall, case 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 8 shows the results of plotting the obtained surface temperatures of both the exterior and interior of the original wall and the various renovated roof cases throughout a day. The results show that the original wall has a lower thermal resistance, resulting in a higher temperature inside the building. In regards to the renovation case, the interior temperatures are reduced significantly in all three cases because of the additional fiberglass insulation that decreases the thermal transmittance of the wall. A material such as a gypsum board provides an additional reduction in thermal transfer but not on the same scale as a fiberglass insulator. So, the wall material and component of renovation case 1 were selected due to easier installation and a slightly different efficiency in comparison with other cases.

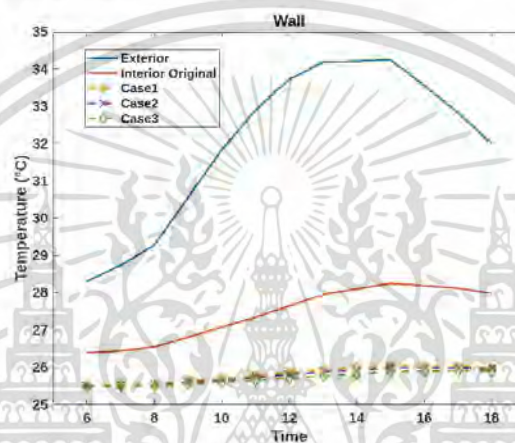


Figure 8. The thermal transfer results for various types of renovated wall throughout a day.

For the roof section of the envelope, the material used in the original building roof consists of a metal sheet with an air gap acting as an insulator before a gypsum board connected to an air-conditioned space. A simplified diagram of the current roof material and its thermal properties are listed in Table 4.

Table 4. Thermal characteristics of the materials and component diagram of roof.

Material of Original Wall			
	Thermal Conductivity of Material (W/m·K)	Specific Heat of Material (kJ/kg·K)	Density of Material (kg/m ³)
Metal Sheet	47.600	7840	0.500
Air Gap	0.025	1.23	1006
Gypsum Board	0.191	880	1.090
Composition of Original Wall			
	Layer of Material	Thickness of Material (m.)	U-Value of Component (W/m ² ·K)
	1. Metal Sheet	0.003	1.412
	2. Air Gap	0.4	
	3. Gypsum Board	0.01	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A model of the original roof in the case study was simulated using COMSOL Multiphysics 5.6. The simulation was conducted similarly to the one for the wall by calculating the thermal transfer between the exterior and interior surface temperatures throughout a day. The results are shown in Figure 9.

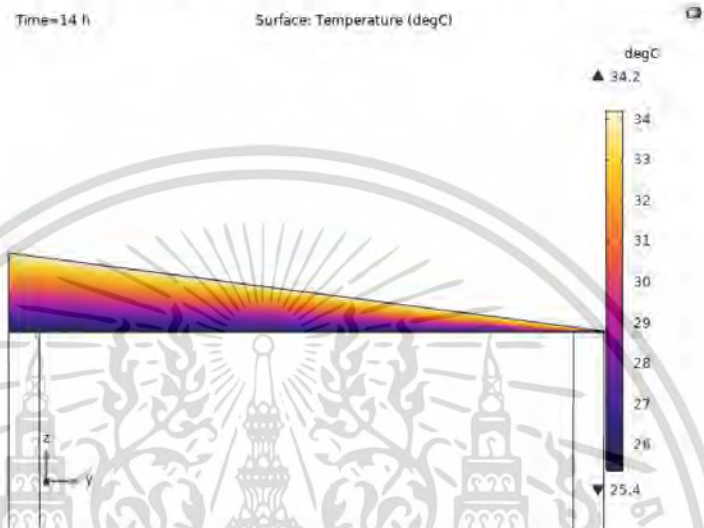


Figure 9. Simulation of thermal transfer in case of the original roof over 14 h.

The false-color analysis results indicate that the heat transfer into the building encounters the air gap, which acts as the thermal resistance due to lower thermal conductivity. Thus, the temperature for the interior surface is lower compared to the wall. Even though the air gap acts as a thermal resistance, it is still not enough, especially since the area where the air gap is thin due to the metal sheet has better thermal conductivity and the gypsum board does not provide significant thermal resistance. So, the RTTV for the original roof was still high and a renovation of the rooftop was necessary. The overall exterior and a diagram of the renovated roof material components used in the building envelope and its thermal specifications are shown in Table 5.

The simulation result in terms of heat transfer at 14 h for each roof material and component renovation case studies are shown in Figure 10. The result in terms of the false-color analysis shows that at a similar exterior surface temperature condition, the renovating material can significantly reduce heat transfer into the building except for case 2, which only replaces the metal sheet with roof tile. The thermal conductivity reduction in comparison with the metal sheet is not enough to provide case 2 with a better heat transfer coefficient due to the small thickness of the material. The renovation cases with an additional fiberglass insulator, which are case 1 and case 3, can affect the interior surface temperature in the two renovation case studies with a fiberglass insulator. This results from better thermal conductivity from the fiberglass insulator and it can resist heat transfer better than the air gap.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 5. Thermal characteristics of the material and component diagram for each type of renovated roof.

Material of Original Wall			
	Thermal Conductivity of Material (W/m·K)	Specific Heat of Material (kJ/kg·K)	Density of Material (kg/m ³)
Metal sheet	47.600	0.500	7840
Concrete roof tiles	0.993	0.790	2400
Air gap	0.025	1006	1.23
Fiberglass insulator	0.038	0.960	12
Gypsum board	0.191	1.090	880

Composition			
	Layer of Material	Thickness of Material (m.)	U-Value of Component (W/m ² ·K)
Case 1	① 1. Metal Sheet	0.03	0.215
	② 2. Air Gap	0.400	
	③ 3. Fiberglass Insulation	0.150	
	④ 4. Gypsum Board	0.03	
Case 2	① 1. Concrete Roof Tiles	0.019	1.269
	② 2. Air Gap	0.400	
	③ 3. Gypsum Board	0.010	
Case 3	① 1. Concrete Roof Tiles	0.019	0.203
	② 2. Air Gap	0.400	
	③ 3. Fiberglass Insulator	0.150	
	④ 4. Gypsum Board	0.010	

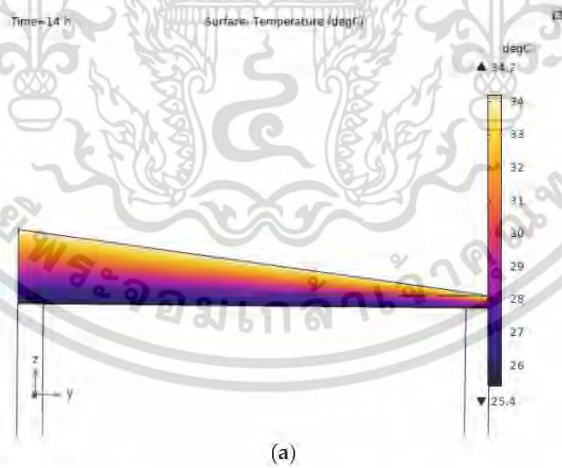


Figure 10. Cont.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

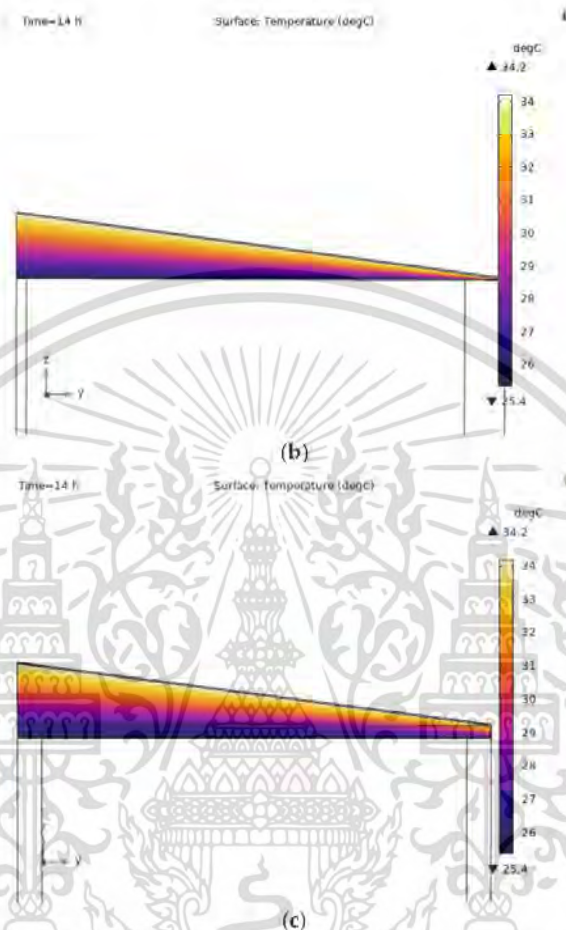


Figure 10. Thermal transfer results for various types of renovated roofs over 14 h: (a) renovated roof, case 1; (b) renovated roof, case 2; (c) renovated roof, case 3.

The results of plotting the obtained surface temperatures for both the exterior and interior of the original roof and various renovated roof cases are shown in Figure 11. The results show that the original roof has a lower thermal resistance, which results in a higher temperature inside the building. After the renovation, the interior temperature was significantly reduced for the cases with an addition of fiberglass insulation, which decreases the thermal transmittance of the roof. A material such as a roof tile provides an additional reduction in thermal transfer but not on a scale similar to the fiberglass insulator. So, the roof material and component of renovation case 1 were selected as the roof-type envelope replacement due to easier installation with only the addition of a fiberglass insulator and the efficiency is in an acceptable range.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

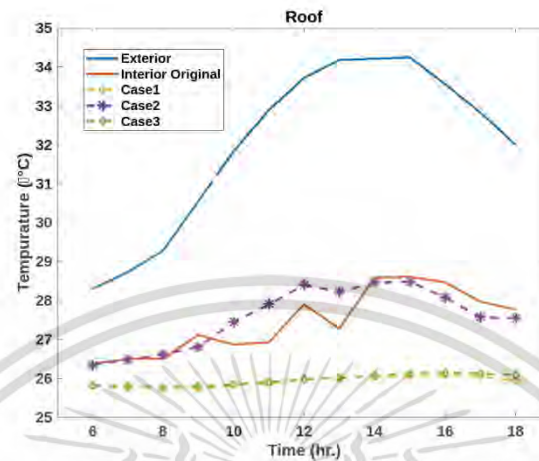


Figure 11. The thermal transfer results of various types of renovated roofs throughout a day.

3.3. Lighting System

With regard to a lighting system, Thailand's BEC only evaluates the LPD value for the lighting installed for a building with the exclusion of a parking lot. Thus, external software such as DIALux was used to simulate the lighting quality on the working plane. The details of the lighting equipment used in the case study building, shown in Table 6, indicate that the original lighting used in the case study building consisted of fluorescent lamps, which is an old technology with a low efficiency and low lighting power density.

Table 6. Specifications of lighting equipment used in the case study building.

Luminaire	Original Luminaire			
	Power Consumption (W)	Number of Luminaire	Luminous Efficacy (lm/W)	Lumen per Tube (lm)
Fluorescent T5	28	474	71.42	2000
Fluorescent T8	18	167	58.33	1050
Fluorescent T8	36	18	90.27	3250
Replacement Luminaire				
LED Tube	18	474	116.66	2100
LED Tube	14	167	120.00	1680
LED Tube	24	18	150.00	3600

The results from the lighting simulation using DIALux software in the aspect of isolux curves on the example room are shown in Figure 12. Based on the simulation, the currently used fluorescent lighting achieved an average illuminance on the working plane of 410 lux, which is within the labor standard value range for lighting quality for an office space at around 300–500 lux. For the renovation case, the LED lighting replacement achieved higher average illuminance on the working plane in comparison with the fluorescent lighting with a value around 472 lux. In addition, the minimum illuminance value is also increased, which in turn improved uniformity. However, the power requirement for the LED lighting is significantly lower, which results in less energy consumption and increased efficiency in the lighting system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

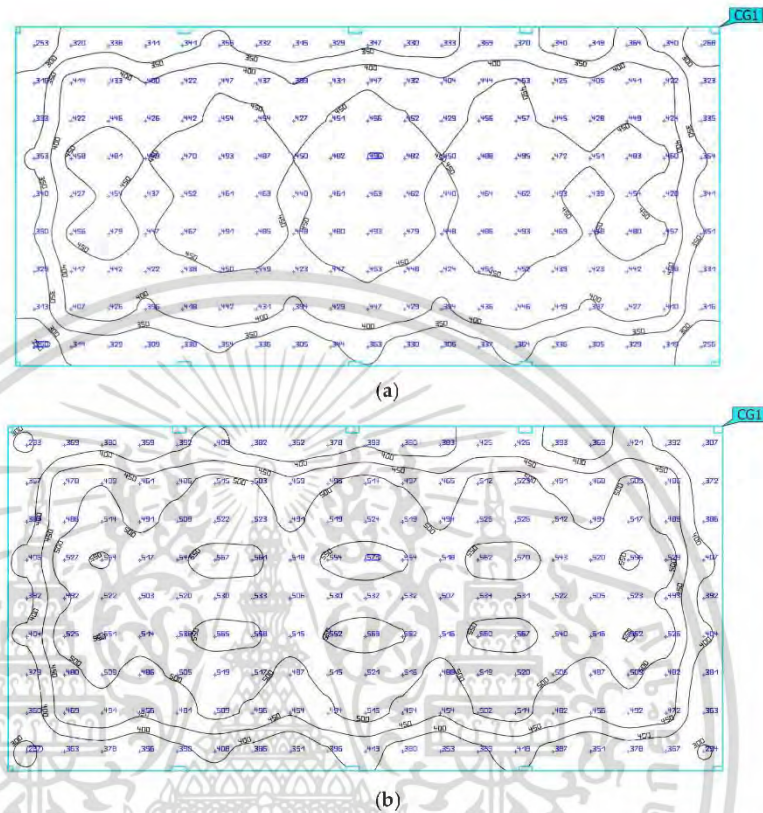


Figure 12. Illuminance of working plane of LED lighting replacement system and original system: (a) original lighting system; (b) replacement lighting system.

3.4. Air Conditioning System

With regard to an air conditioning unit, the BEC evaluated the efficiency of each individual air conditioning unit. The building inspection found that the currently used air conditioning unit is a fixed-speed split-type air conditioning system. Details of the currently used air conditioning system and the replacement unit are shown in Table 7.

Table 7. Illuminance of working plane of LED lighting replacement system and original system.

Currently Used Air Conditioning Unit				
Type of Air Conditioning Unit	Cooling Capacity (BTU/h)	Power Consumption (kW)	SEER (BTU/h/W)	Quantity
Fixed speed	9000	0.700	12.850	8
	12,000	1.065	11.267	16
	18,000	1.570	11.460	40
Replacement Air Conditioning Unit				
Variable speed	9000	0.600	24.00	8
	12,000	0.930	22.50	16
	18,000	1.470	20.81	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Evidently, the currently used air conditioning unit of the fixed speed type has a low efficiency because the unit was purchased before the new energy conservation standard was implemented. Thus, an inverter-type split-type air conditioning unit was chosen as a replacement in order to significantly improve the efficiency and reduce the energy usage of the building.

4. Energy Evaluation

The original building does not have a hot water system or renewable energy system. So, the BEC evaluated only four main systems: the building envelope system, lighting system, air conditioning system, and whole building energy consumption. The results from the BEC evaluation are shown in Table 8.

Table 8. BEC compliance of the case study building.

	Actual Value	Standard	Status
OTTV (W/m^2)	79,724	50	Failed
RTTV (W/m^2)	23,117	10	Failed
LPD (W/m^2)	9,88	10	Passed
SEER (BTU/h/W)	4.39	12.85	Failed
Whole Building Energy (kWh/yr.)	261,537.977	184,820.745	Failed

The table indicates that the currently used building has an efficiency for OTTV of $79.724 W/m^2$ and RTTV of $23.117 W/m^2$, which is lower than the standard compliance at $50 W/m^2$ and $10 W/m^2$ for OTTV and RTTV, respectively. The reason for this is that the case study building was constructed during a time in which energy evaluation was not required and the energy perspective was not taken into consideration during the design phase. Therefore, the material used for the walls, windows, and roof have a low thermal efficiency. Furthermore, the currently used lighting is fluorescent lighting. The efficacy in terms of the power consumption per area is a bit high but it still complies with the building code with an LPD of $9.88 w/m^2$. For the air conditioning system, the original unit that came with the building has a low energy efficiency owing to the outdated technology. The average SEER value for the air conditioning unit is $4.39 BTU/h/W$, which is significantly lower than the standard allowance because of the age of the air conditioning unit and its technology. Thus, the case study building does not pass this part of the BEC evaluation. When pathway two is evaluated, the evaluated building is observed to have a higher energy consumption than the reference building. Therefore, the case study building does not pass pathway two either; thus, the building fails to comply with the BEC.

During renovation, the envelope materials, lighting system, and air conditioning unit were replaced. The building is subject to re-evaluation using BEC software in compliance with Thailand's BEC. The results of the renovated building from the BEC evaluation are shown in Table 9.

Table 9. BEC compliance of the renovated building.

	Actual Value	Standard	Status
OTTV (W/m^2)	39,105	50	Passed
RTTV (W/m^2)	3,510	10	Passed
LPD (W/m^2)	5.08	10	Passed
SEER (BTU/h/W)	23.400	15.00	Passed
Whole Building Energy (kWh/yr.)	116,519.212	184,820.745	Passed

Evidently, after renovating the envelope system, the energy usage of the entire building was significantly reduced. This is attributable to a reduction in the thermal transfer from the environment, which is the main contribution to the cooling load of the air conditioning

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

system. In addition, the replacement LED lighting system has a significantly higher efficacy. Thus, the LPD of the renovated building was reduced by half compared with the original case study building. The renovated building passes the BEC in both pathways one and two. Thus, the renovated building is compliant with the building code.

However, the evaluation of a building only from an energy perspective may not be sufficient to convince project owners to renovate the building. Thus, the economic perspective must be taken into consideration in order to provide project owners with feasible plans for renovations.

5. Economic Evaluation

Several economic parameters can be used to determine the feasibility of the project owner investing in building renovation. In this research, two economic indicators consisting of DPP and IRR were selected as determined factors for feasibility to invest in building renovation. IRR is the parameter that measures the rate at which the discounted cash flow from the retrofitted project equals the initial investment. The value takes the NPV into consideration, which can be calculated by using Equation (8). So, the IRR is the discount rate that NPV will be zero as shown in Equation (9). The payback period is a commonly used parameter to determine the length of time required for the initial investment to be recouped through cash inflows. Thus, the DPP takes the NPV into account during the calculation of the cash flow process, which is displayed in Equation (10).

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^i} - C_0 \quad (8)$$

$$0 = NPV = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+IRR)^i} - C_0 \quad (9)$$

$$DPP = \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{C_0 \cdot r}{C_i}}\right) \div \ln(1+r) \quad (10)$$

An evaluation process of the economic feasibility of the building renovation projects used can be conducted by using an economic indicator to determine the cash flow that can be achieved after initial investment into building renovation. The material cost and labor cost data for building renovations are taken from the Comptroller General's Department (CGD) [28]. For the electricity price, the (MEA) for meter type 4 of a government building was used as reference data [29]. To renovate the building envelope, the material and labor cost can be summarized as shown in Table 10. The exchange rate using in calculation is 35 Thai Baht to 1 USD.

Table 10. Material and labor cost for building renovation with regard to the envelope.

Material Name	Material Cost (USD/m ²)	Labor Cost (USD/m ²)	Total Installation Cost (USD/m ²)
Autoclaved aerated concrete	12.47	2.60	15.07
Concrete plaster	4.00	2.67	6.67
Gypsum board	10.63	2.50	13.13
Fiberglass insulator (5 mm)	8.33	0.83	9.16
Fiberglass insulator (10 mm)	16.67	0.83	17.50

The details of the equipment and labor costs for replacing the lighting system and the air conditioning system in the building are summarized in Table 11. Regarding the lighting system, the cost for LED luminaire that will be used as a replacement varies on the wattage of the luminaire. For the air conditioning system, the equipment cost for an air conditioning unit is dependent on the capacity of the unit. However, the labor cost for replacement of the luminaire and air conditioning unit is calculated on the point basis. Thus, the labor cost will be fixed according to CGD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 11. The investment cost for equipment and installation of lighting systems and air conditioning system.

Lighting System				
	Amount of Equipment	Equipment Cost (USD)	Labor Cost (USD)	Total Installation Cost (USD)
LED Tube 18W	474	4.08	4.00	3829.92
LED Tube 14W	167	3.37	4.00	1230.79
LED Tube 24W	18	4.83	4.00	158.94
Total				5219.65
Variable-Speed Air Conditioning Unit				
9000 BTU/hrs	8	573.33	128.00	5610.64
12,000 BTU/hrs	16	643.33	128.00	12,341.28
18,000 BTU/hrs	40	863.33	128.00	39,653.20
Total				57,605.12

The economic feasibility of a building renovation can be determined by calculating the initial investment cost and positive cash flow from energy cost reduction. The energy cost for the building can be calculated with electricity cost from MEA by using the time of use tariff rate (FOU tariff). The current price is 4.3297 baht per kWh or USD 0.14 per kWh [29]. For the economic data, the interest rate that will be used to calculate the present value is 1.75% according to the Bank of Thailand [30]. The results in terms of the net energy savings from the BEC software in the case of a building renovation and energy cost savings can be summarized as shown in Table 12. The annual cash flow from the retrofit project over 10 years is shown in detail in Table 13.

Table 12. Energy and economic result after building renovation.

	Energy Consumption (Unit/yr)	Electricity Cost (USD/yr)
Base case	261,537.977	36,615.31
Renovation	116,519.212	16,312.68
Total savings	145,018.765	20,302.62

Table 13. Annual cash flow of the building renovation.

Year	Initial Cost (USD)	Energy Reduction (kWh/yr.)	Cost Saving (USD)	Cash Flow (USD)	Present Value (USD)	Balance (USD)
0	96,355.01	-	-	(96,355.01)	(96,355.01)	(96,355.01)
1	-	1865.08	20,302.62	20,302.62	19,904.53	(76,450.48)
2	-	1865.08	20,302.62	20,302.62	19,514.24	(56,936.24)
3	-	1865.08	20,302.62	20,302.62	19,131.61	(37,804.62)
4	-	1865.08	20,302.62	20,302.62	18,756.48	(19,048.14)
5	-	1865.08	20,302.62	20,302.62	18,388.71	(659.43)
6	-	1865.08	20,302.62	20,302.62	18,028.15	17,368.71
7	-	1865.08	20,302.62	20,302.62	17,674.65	35,043.37
8	-	1865.08	20,302.62	20,302.62	17,328.09	52,371.46
9	-	1865.08	20,302.62	20,302.62	16,988.32	69,359.78
10	-	1865.08	20,302.62	20,302.62	16,655.22	86,015.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From annual cash flow, the initial investment cost in year 0 is around USD 100 k from the equipment and labor cost for the renovation project. The positive cash flow comes from annual energy cost saving, which is around USD 20k per year. The results of an economic evaluation show that the net present value for the 10-year time project is USD 86,015. The economic indicators from the study show that the proposed building renovation can achieve DPP within 4.98 years and has an IRR value of 20.89%. This indicator shows that the renovation project is feasible and an attractive indicator is achieved. This result demonstrates that renovating an entire building according to BEC can achieve both building energy reduction and decreased project owner energy cost over the project life-time.

6. Renovation Side Benefits

After renovating a building, the currently used transformer would have additional spare power capacity as a result of the reduction in the energy consumption by the whole building. The load table for the building main distribution board both for the original and renovation case can be summarized as shown in Table 14.

Table 14. The main distribution board load table on both original and renovated building.

Circuit No.	Description	Original Load (VA)			Renovation Load (VA)		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1		29,883			31,538		
3	Floor 1		30,815			33,798	
5				26,040			31,081
7		48,008			34,468		
9	Floor 2		47,908			39,934	
11				47,934			35,776
13		26,320			26,592		
15	Floor 3		25,632			21,730	
17				27,334			25,236
2		25,368			22,464		
4	Floor 4		26,518			21,050	
6				27,984			25,504
8	Spare						
10	Spare						
12	Spare						
14	Spare						
16	Spare						
18	Spare						
	Phase (VA)	129,579	130,873	129,292	115,062	116,512	117,597
	Total (VA)		389,744			349,171	

From the load table, the total connected load connected with the main distribution board was reduced from 389.477 kVA to 349.171 kVA after building renovation. This results in an increased spare capacity of 40.573 kVA without transformer replacement. Thus, future loads, such as those of electric vehicle chargers, can be accommodated in order to support the raising number of EV cars in the future.

In order to renovate buildings to support future loads such as those of electric vehicles, the load and circuit breaker on the first floor were rearranged to provide spare capacity for the EV chargers, which were connected to the first-floor distribution board in the renovation case as shown in Table 15. The load table for the first-floor distribution board and the results on the load show that 21 kVA chargers can be installed on the first floor without any changes to the circuit breaker or cables being necessary.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 15. The first-floor distribution board load table on both original and renovated building.

Circuit No.	Description	Original Load (VA)			Renovation Load (VA)		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	Central	2995			2126		
3	Auditorium		7804			7154	
5	Laboratory			11,190			10,088
7	Shop 1	11,940			9792		
9	Shop 2		7061			6516	
11	Spare						
13		4778			5228		
15	Office		4850			4265	
17				4850			3635
2		5200			4361		
4	Office		7000			3730	
6				5900			5225
8		4970			2698		
10	Office		4100			4800	
12				4100			4800
14					7333		
16	EV Charger					7333	
18							7333
	Phase (VA)	29,883	30,815	26,040	31,538	33,798	31,081
	Total (VA)		86,738			96,418	

It can be seen that additional benefits of building renovation with newer technology require less power demand. Thus, an original transformer can provide room to support newer load. As the case study has an original transformer (3 phase 250 kVA) with renovation, the load demand of the building can be reduced by 13 kVA (each phase), which is around a 5.5% reduction compared to the original building. So, the additional EV charger was selected as the AC charger on the first floor due to limitation of the original transformer. On the other hand, renovating the building with large-scale load demand can provide much more leeway in the additional power transformer capacity. So, the additional charging unit or DC charger, which require higher power demand, can be installed for the building.

7. Conclusions

This study aimed to propose building renovation in compliance with the Thailand Building Energy Code. The results demonstrate that the energy efficiency of the envelope system has a significant impact on the energy consumption of the entire building. In addition, the lighting and air conditioning system with old and outdated technology also impact energy usage in the building. In the case of the building envelope, the thermal transfer from the environment has a direct impact on the cooling load, which also directly contributes to the energy usage of the air conditioning system. With regard to the lighting system, replacing the originally installed fluorescent system with an LED system with similar lighting qualifications can reduce the energy usage of the lighting system. Thus, the original building does not comply with building code on both pathways. So, the building renovation for each sub-system consisting of the envelope system, lighting system, and air conditioning system has been conducted.

After evaluation with BEC, it was shown that the LPD of the case with lighting replacement can be reduced significantly compared with the original case study building. For the air conditioning system, the newer variable-speed-type air conditioning unit provides greater efficiency with SEER significantly higher than the allowance value. By changing the opaque component with additional fiber insulation in the case of walls and a metal sheet roof with a high-performance label fiber insulation in the case of the roof, the OTTV and RTTV were reduced significantly. The result of the renovation of each sub-system in the aspect of energy and economics can be summarized as shown in Table 16.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 16. An energy reduction and economic feasibility for each sub-system.

Case	Energy Reduction (kWh)	Energy Cost Reduction (USD)	Initial Investment (USD)	IRR (%)	DPP (yrs.)
Building Envelope Roof	19,253	2695.41	8995.24	29.92	3.32
Building Envelope Wall	55,109	7715.25	24,535.00	31.41	3.14
Lighting System and Air Conditioning System	77,980	10,917.19	62,824.77	17.04	6.16
Entire Building	145,019	20,302.62	96,355.01	20.89	4.98

From the table, it was found that the net renovation cost of all sub-systems in the case study building was USD 96,355.01. The reduction in the total energy consumption of the building was 145,019 kWh/year, which can save energy with USD 20,302.62 per year. Based on economic calculations, it was found that the payback period of this project is 4.98 years and that the IRR is 20.89%. However, renovating sub-systems individually may provide greater return on investment with a lesser payback period but in this case, the building has issues with building code compliance. So, the entire building needs to be addressed in the renovation process. The result from the building renovation demonstrated that changing the envelope can achieve significant reduction in whole building energy consumption due to decreasing cooling load, while renovating an entire building can prove additional side benefits from power demand reduction in the transformer that can provide spare capacity for future loads in the building. This whole renovation process taken under an economic analysis still displayed the feasibility and attractive economic indicator for the project owner and investment.

The result from the renovation process demonstrated that redesigning the building in compliance with building code can reduce energy usage and achieved return on investment from energy cost reduction. This renovation process proposed in this research can be applied to other buildings (both office- and educational-type buildings), which have similar operating hours and building code criteria. However, the building code based many factors on the topology and climate of Thailand as a reference, and some renovation recommendations may apply only to buildings located in a tropical climate. In future work, the relation between envelope material and thermal transfer with an aspect of the impact on cooling load needs to be further evaluated. The usage of renewable energy and presence of future load can be further explored. In addition, the sensitivity analysis on the economic parameter needs to be addressed in order to evaluate the renovation process in every aspect.

Author Contributions: Conceptualization, S.A. and P.C.; methodology, S.T.; software, S.A.; validation, A.N. and P.C.; formal analysis, S.T.; investigation, S.T.; resources, P.C. and A.N.; data curation, S.T.; writing—original draft preparation, S.A. and S.T.; writing—review and editing, A.N.; visualization, S.T.; supervision, A.N.; project administration, P.C.; funding acquisition, P.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Srinakharinwirot University Research Fund.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data sharing is not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nomenclature

R_T	Total thermal resistance of the envelope component	$(m^2 \cdot ^\circ C)/w$
R_o	Thermal resistance of exterior air film	$(m^2 \cdot ^\circ C)/w$
R_i	Thermal resistance of interior air film	$(m^2 \cdot ^\circ C)/w$
Δx	Material thickness	m
k	Material thermal conductivity	$(W/m \cdot K)$
$OTTV$	Total overall thermal transfer value of external walls with air-conditioned space	w/m^2
$OTTV_i$	Overall thermal transfer value of external walls on section i	w/m^2
$RTTV$	Total roof thermal transfer value with air-conditioned space	w/m^2
$RTTV_i$	Roof thermal transfer value of roof on section i	w/m^2
WWR	Window-to-wall ratio	-
SRR	Skylight-to-roof ratio	-
TD_{eq}	Differential of equivalent temperature	$^\circ C$
U_o	Heat transfer coefficient for opaque material	$w/(m^2 \cdot ^\circ C)$
U_f	Heat transfer coefficient for transparent material	$w/(m^2 \cdot ^\circ C)$
U_r	Heat transfer coefficient for roof material	$w/(m^2 \cdot ^\circ C)$
ΔT	Differential temperature between building interior and exterior	$^\circ C$
$SHGC$	Solar heat gain coefficient	-
SC	Shading coefficient	-
ESR	Effective solar radiation	w/m^2
A_{wi}	Area of wall on section i	m^2
A_{ri}	Area of roof on section i	m^2
E_{po}	Annual whole building energy consumption	kWh/yrs.
COP_i	Coefficient of performance	-
LPD_i	Lighting power density on area i	w/m^2
EQD_i	Equipment power density on area i	w/m^2
$OCCU_i$	Average occupant on area i	person/ m^2
$VENT_i$	Volume of air ventilation and leakage	$l/s/m^2$
η_h	Annual operating hour	Hrs.
C_l	Coefficient of thermal power contribution to cooling load from lighting system	-
C_e	Coefficient of thermal power contribution to cooling load from equipment	-
C_o	Coefficient of thermal power contribution to cooling load from occupant	-
C_v	Coefficient of thermal power contribution to cooling load from ventilation	-
PVE	Annual power generated with photovoltaic energy	kWh/yrs.
HEE	Annual heat to electrical energy exchange	kWh/yrs.
ORE	Annual power generated with other renewable energy	kWh/yrs.
NPV	Net present value	USD
IRR	Internal rate of return	%
DPP	Discounted payback period	Yrs.
C_i	Estimated net cash flow for period i	USD
C_0	Initial investment	USD
r	Discounted rate	-
n	Life-time of the project	Yrs.

References

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2022. Available online: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> (accessed on 1 October 2022).
2. Traivivatana, S.; Wangjiraniran, W. Thailand Integrated Energy Blueprint (TIEB): One Step towards Sustainable Energy Sector. *Energy Procedia* **2019**, *157*, 492–497. [CrossRef]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Energy Policy and Planning Office (EPPCO), Ministry of Energy. *Energy Efficiency Plan 2015–2036 (EEP 2015)*; Energy Policy and Planning Office (EPPCO), Ministry of Energy: Bangkok, Thailand, 12 August 2015.
4. Department of Alternative Energy Development and Efficiency. *The Energy Conservation Promotion ACT B.E. 2535*; The Energy Policy and Planning Office: Bangkok, Thailand, 2 April 1992.
5. Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE). *Ministerial Regulation Prescribing Standard, Criteria, and Energy Management Procedures In Designated Factories and Buildings, B.E. 2552*; Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE): Bangkok, Thailand, 2009.
6. Gupta, V.; Deb, C. Envelope design for low-energy buildings in the tropics: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2023**, *186*, 113650. [[CrossRef](#)]
7. Huang, J.; Wang, S.; Teng, F.; Feng, W. Thermal performance optimization of envelope in the energy-saving renovation of existing residential buildings. *Energy Build.* **2021**, *247*, 111103. [[CrossRef](#)]
8. Long, L.D. An AI-driven model for predicting and optimizing energy-efficient building envelopes. *Alex. Eng. J.* **2023**, *79*, 480–501. [[CrossRef](#)]
9. Vakilinezhad, R.; Khabir, S. Evaluation of thermal and energy performance of cool envelopes on low-rise residential buildings in hot climates. *J. Build. Eng.* **2023**, *72*, 106643. [[CrossRef](#)]
10. Baghivo, C.; Congedo, P.M.; Malatesta, N.A. Building envelope resilience to climate change under Italian energy policies. *J. Clean. Prod.* **2023**, *411*, 137345. [[CrossRef](#)]
11. Cholewa, T.; Balaras, C.A.; Nizetić, S.; Siuta-Olcha, A. On calculated and actual energy savings from thermal building renovations—Long term field evaluation of multifamily buildings. *Energy Build.* **2020**, *223*, 110145. [[CrossRef](#)]
12. Ali, H.; Hashlamun, R. Envelope retrofitting strategies for public school buildings in Jordan. *J. Build. Eng.* **2019**, *25*, 100819. [[CrossRef](#)]
13. Cho, K.; Yang, J.; Kim, T.; Jang, W. Influence of building characteristics and renovation techniques on the energy-saving performances of EU smart city projects. *Energy Build.* **2021**, *252*, 111477. [[CrossRef](#)]
14. Hamburg, A.; Kuusk, K.; Mikola, A.; Kalamees, T. Realisation of energy performance targets of an old apartment building renovated to nZEB. *Energy* **2020**, *194*, 116874. [[CrossRef](#)]
15. Holopainen, R.; Milandru, A.; Ahvenniemi, H.; Häkkinen, T. Feasibility Studies of Energy Retrofits—Case Studies of Nearly Zero-energy Building Renovation. *Energy Procedia* **2016**, *96*, 146–157. [[CrossRef](#)]
16. Costa, J.F.W.; Amorim, C.N.D.; Silva, J.C.R. Retrofit guidelines towards the achievement of net zero energy buildings for office buildings in Brasilia. *J. Build. Eng.* **2020**, *32*, 101680. [[CrossRef](#)]
17. Kellogg, K.A.; La Cumbre-Gibbs, N. The impact of state level residential building code stringency on energy consumption in the United States. *Energy Build.* **2023**, *278*, 112607. [[CrossRef](#)]
18. Evans, M.; Roshchanka, V.; Graham, P. An international survey of building energy codes and their implementation. *J. Clean. Prod.* **2017**, *158*, 382–389. [[CrossRef](#)]
19. Allard, I.; Nair, G.; Olofsson, T. Energy performance criteria for residential buildings: A comparison of Finnish, Norwegian, Swedish, and Russian building codes. *Energy Build.* **2021**, *250*, 111276. [[CrossRef](#)]
20. Mott, A.; Delgado, A.; Evans, M. What, why and when to go virtual: An international analysis of early adopters of virtual building energy codes inspections. *Energy Res. Soc. Sci.* **2022**, *94*, 102874. [[CrossRef](#)]
21. Ohene, E.; Hsu, S.-C.; Chan, A.P. Feasibility and retrofit guidelines towards net-zero energy buildings in tropical climates: A case of Ghana. *Energy Build.* **2022**, *269*, 112252. [[CrossRef](#)]
22. Heidari, M.; Rahdar, M.H.; Dutta, A.; Nasiri, F. An energy retrofit roadmap to net-zero energy and carbon footprint for single-family houses in Canada. *J. Build. Eng.* **2022**, *60*, 105141. [[CrossRef](#)]
23. Qu, K.; Chen, X.; Wang, Y.; Calautit, J.; Riffat, S.; Cui, X. Comprehensive energy, economic and thermal comfort assessments for the passive energy retrofit of historical buildings—A case study of a late nineteenth-century Victorian house renovation in the UK. *Energy* **2020**, *220*, 119646. [[CrossRef](#)]
24. Hirvonen, J.; Saari, A.; Jokisalo, J.; Kosonen, R. Socio-economic impacts of large-scale deep energy retrofits in Finnish apartment buildings. *J. Clean. Prod.* **2022**, *368*, 133187. [[CrossRef](#)]
25. Júnior, S.M.; Frandoloso, M.A.L.; Brião, V.B. Technical and economic feasibility study for a university zero energy building in Southern Brazil. *Energy Build.* **2023**, *281*, 112748. [[CrossRef](#)]
26. Chirarattananon, S.; Taveekun, J. An OTTV-based energy estimation model for commercial buildings in Thailand. *Energy Build.* **2004**, *36*, 680–689. [[CrossRef](#)]
27. Bright Management Consulting Co., Ltd. *Promoting Energy Efficiency in Commercial Buildings (PEECB) Progress Report #2*; Department of Alternative Energy Development and Efficiency: Bangkok, Thailand, 2013.
28. Comptroller General's Department. *Material and Labour Cost for Fiscal Year 2562 B.E.*; Comptroller General's Department: Bangkok, Thailand, 2018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

29. Metropolitan Electricity Authority. Electricity Tariffs Large General Service, Provincial Electricity Authority, Bangkok Thailand. Available online: <https://www.mea.or.th/our-services/tariff-calculation/other/5FTSa4DY> (accessed on 5 September 2023).
30. Bank of Thailand. Interest Rates in Financial Market. (2005-Present). Available online: https://www.bot.or.th/App/BTWS_STAT/statistics/BOTWEBSTAT.aspx?reportID=223&language=ENG (accessed on 2 August 2023).

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Article

A Study on Transparent Type Envelope Material in Terms of Overall Thermal Transfer, Energy, and Economy for an Office Building Based on the Thai Building Energy Code

Pathomthat Chiradeja ¹, Surakit Thongsuk ², Santipont Ananwattanaporn ², Atthapol Ngaopitakkul ^{2,*} and Suntiti Yoomak ²

¹ Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Bangkok 10110, Thailand; pathomthat@swu.ac.th

² School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand; 61601183@kmitl.ac.th (S.T.); san_ti_ton@hotmail.com (S.A.); suntiti.yo@kmitl.ac.th (S.Y.)

* Correspondence: atthapol.ng@kmitl.ac.th; Tel.: +66-2329-8330

Abstract: Energy consumption in buildings has increased significantly as population and economic activities are concentrated in urban areas. Air conditioning accounts for a significant percentage of energy consumption in buildings, especially in tropical climates. The main area where heat can be transferred into the building is through glass windows. Thus, this study aims to evaluate feasibility in terms of overall thermal transfer value (OTTV), energy, and economics for retrofitting different glass materials in an office building in Thailand by using building energy code (BEC) software. The software uses Thailand's building energy code as the standard to evaluate the energy performance of the case study building in comparison with different glass types used in retrofitted cases. From an economic perspective, the internal rate of return (IRR) and discounted payback periods (DPP) were used as determining indexes. The results demonstrated that retrofitted windows with the best energy-efficient glass might achieve energy performance, but installation cost can reduce economic feasibility, while the glass with the second lowest heat transfer coefficient can reduce the OTTV by 68.89% and building energy consumption by 16.87%. However, it can achieve the highest economic performance with 10.70% IRR and DPP at 11.83 years. Therefore, the balance between energy and economic factors must be considered to provide energy-efficient and investment-friendly glass materials for retrofit projects. In addition, the study focuses specifically on tropical climates. Thus, the finding may not be reflected similarly for buildings located in different regions.

Keywords: glass material; overall thermal transfer value; thermal characteristic; economic analysis



Citation: Chiradeja, P.; Thongsuk, S.; Ananwattanaporn, S.; Ngaopitakkul, A.; Yoomak, S. A Study on Transparent Type Envelope Material in Terms of Overall Thermal Transfer, Energy, and Economy for an Office Building Based on the Thai Building Energy Code. *Sustainability* **2023**, *15*, 10435. <https://doi.org/10.3390/su151310435>

Academic Editor: Domenico Mazzeo

Received: 18 May 2023

Revised: 14 June 2023

Accepted: 22 June 2023

Published: 2 July 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The greatest global problems at present are the energy and environmental crises resulting from a decade of rapid worldwide population and economic growth. Energy is the main driving force that keeps the industry running to further expand each country's economic sector. In addition, the shift of jobs from rural agriculture to urban industry and commerce has led to an increasing number of residential and commercial buildings. Buildings require a significant amount of energy to provide functions and comfort to occupants. A survey by the International Energy Agency (IEA) [1] found that the majority of energy use in buildings mainly consists of air-conditioning systems, followed by lighting systems and other equipment, which is in line with the survey from the US Energy Information Administration [2]. The amount of energy consumed in an HVAC system depends on many factors, but the main factor is the thermal transfer from the environment through the building envelope. For buildings in tropical climates, heat transfer through the building materials increases the cooling load, the energy demand of the air-conditioning system, and the energy consumption of the entire building [3]. Therefore, changing building materials can achieve high energy efficiency and can be a potential measure to improve energy efficiency.

In the case of Thailand, a similar trend in energy usage in buildings has also been observed [4]. Thus, the Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), the Ministry of Energy, has set the goal to improve the country's energy efficiency by presenting an Energy Efficiency Plan 2018-2037 (EEP 2018). The goal of the policy is to reduce the energy intensity (EI) by 30% in 2030 from 181,238 ktce in the case of business as usual (BAU) to 126,867 ktce in 2030 [5]. To achieve this goal, the Energy Conservation Promotion Act was passed in 1992 [6]. One of the components of this act is the Building Energy Code (BEC), which establishes minimum building energy performance requirements for both new and renovated buildings that have floor areas greater than 2000 m². The energy code evaluates the following six parameters of the building: the building skin, lighting system, air-conditioning system, water heating appliance, alternative energy performance, and the entire building's energy consumption.

From the literature review, energy consumption in a building in a tropical climate mainly consists of a cooling load for an air conditioning system [7]. The energy demand for HVAC systems depends on many building factors, such as the building envelope, climate, and occupant behavior [8,9]. The aggregate result from profiling office building energy usage patterns reveals that building energy consumption throughout the day varied depending on the operation of lighting and air conditioning systems [10]. The heat generated from a lighting system in an office building is large enough to have a significant impact on the air conditioning system by increasing the building's cooling load [11]. The COVID-19 pandemic and remote work have reduced the usage of office space [12]. Even post-COVID-19, the level of energy consumption in office-type buildings has not been raised to pre-COVID-19 levels [13]. However, a new factor that directly impacts energy usage in office buildings located in urban areas is the Urban Heat Island (UHI) effect [14]. The urban microclimate from the effects of UHI can result in higher temperatures, around 4 degrees, compared to suburbs [15] and also increase energy consumption in buildings by up to 25% [16].

For the envelope, OTTV is the most important parameter for determining the amount of heat from the environment that can penetrate a building envelope [17,18]. Many studies have shown that improved building envelopes with highly energy-efficient materials have the potential to decrease building energy consumption by reducing heat transmittance through the building skin [19]. As a result, the cooling loads and air conditioning energy consumption were reduced [20]. The main factor for material thermal properties is thermal conductivity, which has a direct correlation with efficiency in building envelopes [21]. In hot climates, changing the building envelope to energy-efficient material can significantly reduce energy usage in the building and can additionally decrease emissions [22]. Therefore, architects and engineers must select suitable materials for each building. A previous study also demonstrated that the thermal properties of an opaque material can significantly affect energy consumption and indoor comfort, especially in tropical climates [23].

Thermal transfer mainly occurs through building windows and can affect the energy efficiency of the building [24]. The reason is that transparent materials have a higher thermal transfer value and result in higher energy demand for the cooling load compared to opaque materials [25]. Therefore, new technologies for transparent materials, such as reflective coatings [26], vacuum glazing [27,28], evacuated glazing [29], transparent insulation [30], and movable window insulation [31], have been developed and applied in the building envelope to reduce direct heat transfer from the environment. The studies on changing glass material into energy-efficient material with nano aerogel glazing [32] and nano vacuum insulation panel [33] have demonstrated that it can achieve both energy performance and economic viability. Shading can also reduce OTTV on the transparent material by limiting the amount of solar heat in the building and reducing the cooling load, which in turn reduces the building energy consumption [34]. The ratio of windows to walls is another factor that significantly affects the energy performance of a building [35]. However, the shading and window-to-wall ratio is the factor that cannot easily address in the building retrofitted case due to the constraining of the old building skin. In addition,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the higher cost of retrofitted buildings with better energy-efficient materials can potentially decrease investment feasibility [36]. Therefore, the target thermal characteristics for building materials used in renovation must be optimized in the aspect of economic feasibility in order to make the project attractive for investment [37].

From the literature review, the thermal characteristics of glass materials have a significant impact on thermal transmittance into buildings, especially in tropical climates. Sunlight heat through the windows can affect the building's cooling load and then increase the energy usage in the air conditioning system, which results in raising the whole building's energy consumption. To improve buildings' energy efficiency, retrofitted windows with glass that have better thermal properties can significantly reduce thermal transfer through the building envelope. The objective of this study was, therefore, to evaluate the performance of high-efficiency glass types in terms of energy savings and economic feasibility. The software based on Thailand's building energy code, or BEC, developed by the Ministry of Energy, Thailand, has been used as an evaluation tool. The case study involved an office building in Bangkok, Thailand. Thailand's building energy code has been used as a basis for comparative studies between different glass types. In addition, the two economic indicators, such as internal rate of return (IRR) and discounted payback period (DPP), were chosen as determinants of investment attractiveness. The contributions of the study can be summarized as follows:

- Five different glass types with distinguishing materials, components, and thermal characteristics were used to retrofit the current windows of the office building.
- The entire building energy performance using the different types of glass materials was evaluated and compared based on the Thai building energy codes.
- Feasibility analysis of the economic aspects of each type of glass material retrofitted in a building.

The content of this paper can be separated into six parts. The research problems and a literature review are presented in Section 1. Section 2 are discussed the details of Thai building energy codes. The case study building and the building components of the envelope subsystem are presented in Section 3. The energy performances of different glass materials and their economic feasibility are discussed in Sections 4 and 5, respectively. Finally, Section 6 summarises the research results and concludes the study.

2. Building Energy Code

The Thai building energy code (BEC) is part of the Energy Conservation Promotion Act of 1992, which mandates the standard for both new or renovated buildings with a total area under a single roof of more than 2000 m² [2]. The BEC has created two pathways for a building to meet the requirement. The first way is to evaluate four sub-systems consisting of the building envelope, lighting system, air-conditioning system, and hot water system (if installed). If all subsystems meet the standard, the Energy Ministry declares that the building is in compliance with BEC. However, if some subsystems (other than the hot-water system) do not meet the requirements, the code allows the building to be evaluated via a second pathway. The whole building's energy consumption is compared to that of the reference building, which is calculated using a similar characteristic building with the standard allowance as an input. To comply with this standard, the energy consumption must be lower than that of the reference building. In addition, the energy produced from renewable energy can be used to directly reduce building energy usage. These pathways provide leeway for building design.

2.1. Envelope System

The BEC categorises different buildings types into three distinct groups depending on the hours of operation, which are summarized in Table 1. The standard evaluated the envelope performance by using the Overall thermal transfer value (OTTV) and Roof thermal transfer value (RTTV) parameters. These two indexes determined the amount of thermal value from the environment in the building through material usage in walls,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

windows, and roofs. Different sets of OTTV and RTTV apply to these different categories due to different coefficients in the calculation equations, such as air leakage, occupant behavior, and sun direction during operating hours.

Table 1. The building type and allowable thermal transfer value according to the standard.

Classification of Buildings	Operating Hour	OTTV (W/m ²)	RTTV (W/m ²)
Office, School Theater	8 A.M.–4 P.M. (8 h)	≤50	≤15
Department store, Convention building, Entertainment complex	10 A.M.–10 P.M. (12 h)	≤40	≤12
Hotel, Hospital, Condominium	24 h (more than 12 h)	≤30	≤10

For building envelope, the OTTV can be calculated by determining the heat transfer coefficient (*U*-value) of the component and material used in skin building [6]. The *U*-value can be calculated by inverting the total thermal resistance of the component, as shown in Equation (1). The material thermal resistance was calculated by dividing material thickness by the thermal conductivity coefficient, as shown in Equation (2). For different opaque components in the section of the envelope that has more than one layer of material, the combined thermal resistance of the component can be calculated by using Equation (3). The air around the interior and exterior of the material can provide a small thermal resistance. The value provided by the BEC for the calculation is 0.12 m²·k/W in the case of the interior air film and 0.044 m²·k/W in the case of exterior air film.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (1)$$

$$R = \frac{\Delta x}{k} \quad (2)$$

$$R_T = R_o + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \dots + \frac{\Delta x_n}{k_n} R_i \quad (3)$$

where

R = material thermal resistance (m²·k/W);

R_T = component thermal resistance (m²·k/W);

R_i = thermal resistance of the interior air film (0.12 m²·k/W);

R_o = thermal resistance of the exterior air film (0.044 m²·k/W);

Δx_n = material thickness (m);

k_n = material thermal conductivity coefficient (W/m²·K).

The calculation of the OTTV for the BEC focuses only on a section with air-conditioning systems installed [6]. The calculation assumes that the heat from the environment through building skin generates a cooling load for the air-conditioning systems. Thus, in a section of a building without air conditioning, this effect does not occur, so these sections do not need to be evaluated according to BEC. The OTTV of the building envelope section can be calculated by using Equation (4). For the entire building envelope, the calculation was performed using the weighted arithmetic mean of each envelope section, as expressed in Equation (5).

$$OTTV_i = (U_w)(1 - WWR)(TD_{eq}) + (U_f)(WWR)\Delta T + (WWR)(SHGC)(SC)(ESR) \quad (4)$$

$$OTTV = \frac{(A_{w1})(OTTV_1) + (A_{w2})(OTTV_2) + \dots + (A_{wi})(OTTV_i)}{A_{w1} + A_{w2} + \dots + A_{wi}} \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where

$OTTV$ = overall thermal transfer value of the whole building (W/m^2);

$OTTV_i$ = overall thermal transfer value in each envelope section (W/m^2);

U_W = heat transfer coefficient in case of opaque component ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

WWR = Ratio between window area and wall area;

TD_{eq} = temperature difference equivalent ($^\circ C$);

U_T = heat transfer coefficient of the transparent component ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

ΔT = differential temperature between building interior and exterior ($^\circ C$);

$SHGC$ = solar heat gain coefficient;

SC = shading coefficient;

ESR = effective solar radiation (W/m^2);

A_{wi} = area of the wall section (m^2).

2.2. The Lighting Power Density for Lighting System

The energy consumption of lighting systems in buildings is evaluated against the BEC using the lighting power density (LPD) as an index. The building code does not evaluate lighting quality in the working space. However, a separate labor law prescribes the minimum illuminance requirements for each type of working space [38]. In the standard, LPD is the summation of the power consumption of the building's lighting system divided by the building's floor area. However, the calculation did not include the parking area because the required illuminance for the parking area is much lower than that for the working area. Therefore, the LPD results for a building with a large parking area may not reflect the actual performance of the lighting system. In addition, display lighting or movable lighting was not included in the calculation. The building categories and maximum LPD allowances are summarized in Table 2.

Table 2. The building type and light power density allowance according to the standard.

Classification of Buildings	LPD (W/m^2)
Office, School	≤ 10
Theater, Department store, Convention building, Entertainment complex	≤ 11
Hotel, Hospital, Condominium	≤ 12

2.3. Air-Conditioning System

The energy performance of each air-conditioning unit installed in the building is evaluated against the BEC. The standard divides air conditioners into two categories: split-type and central units. The split-type air-conditioners have a separate cooling unit inside the building and a compressor on the outside of the building; these air conditioners are commonly used in residential and small commercial buildings in Thailand [39]. For split-type air-conditioners, the seasonal energy efficiency ratio (SEER) is used as an indicator to evaluate energy performance. The evaluation process for central air conditioning was divided into two sections. First, the cooling unit must have a coefficient of performance (COP) that is higher than the energy code allowance. Second, the other components, such as the pump, cooling tower, and fan coil unit, must have a combined power consumption of less than 0.5 kW per refrigerator ton. All air conditioning units were split in the case study building. Therefore, only the energy code requirements for split-type air-conditioners were discussed.

The minimum requirements for the SEER value for the split-type air-conditioners in the BEC are summarized in Table 3. The SEER value is based on the Thailand electric appliance standard [40], that applied to electrical appliances sold in the Thai market, which BEC incorporates into its own code. The EGAT 5-star label has different steps depending on the level of energy efficiency achieved by the electrical appliances, ranging from level 5 with no stars to level 1 with 3 stars. For the split-type air-conditioning units, the SEER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

allowance is divided into fixed-speed and variable-speed (inverter) air-conditioning units. This is due to the different technologies and the possibility of achieving higher efficiency with inverter air-conditioners. Thus, the increased bar with higher SEER compared to fixed-speed air-conditioners.

Table 3. Allowable efficiency of air-conditioners, according to BEC.

	Size of Air Conditioning Unit	Conventional Label 5 (Without Star)	New Label 5 (1 Star)	New Label 5 (2 Stars)	New Label 5 (3 Stars)
SEER of Fixed speed air conditioning unit	8000 W (27,296 BTU/h.)	12.85–13.84	13.85–14.84	14.85–15.84	≥15.85
	8000–12,000 W (27,296–40,944 BTU/h.)	12.40–13.39	13.40–14.39	14.40–15.39	≥15.40
SEER of Variable speed air conditioning unit	8000 W (27,296 BTU/hr.)	15.00–17.49	17.50–19.99	20.00–22.49	≥22.50
	8000–12,000 W (27,296–40,944 BTU/h.)	14.00–16.49	16.50–18.99	19.00–21.49	≥21.50

2.4. Whole Building Energy Consumption

For the total energy consumption of the building, the calculation can be performed with the BEC by combining the annual energy usage as shown in Equation (6). From the equation, the energy consumption for an air conditioning system is calculated based on the cooling load, which includes factors such as the building envelope heat source, lighting, number of occupants, air leakage, and electrical equipment. Coefficient values for the heat source affecting the cooling load and hours of operation for each building type are summarized in Table 4. In addition, the code allows for the use of renewable energy by subtracting the total building energy use of the building from the annual energy production from solar, heat, or other types of renewable energy. The evaluation process of the BEC was performed by comparing the annual building energy consumption to reference buildings with similar floor areas and standard values for subsystems.

$$E_{pa} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{A_i (OITV) + A_i (RITV)}{COP} + A_i \left(\frac{C_l (LPD_i) + C_e (EQD) + 130C_o (OCCU_i) + 24C_v (VENT_i)}{COP} \right) \right] \eta_h + \sum_{i=1}^n A_i (LPD_i + EQD_i) \eta_h - (PVE + HEE + ORE) \quad (6)$$

where

EQD = other equipment energy usage per area (W/m^2);

$OCCU$ = number of occupants in building ($1/m^2$);

$VENT$ = air leakage ($1/s/m^2$);

COP = air conditioning unit coefficient of performance;

PVE = annual electricity production from photovoltaic;

HEE = annual heat energy usage in building;

ORE = annual electricity production from renewable energy sources;

C_l = coefficient lighting system cooling load;

C_e = coefficient electrical equipment cooling load;

C_o = coefficient occupants cooling load;

C_v = coefficient air ventilation cooling load;

η_h = total number of operating hours per year.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4. Cooling load coefficient using whole building energy consumption calculation.

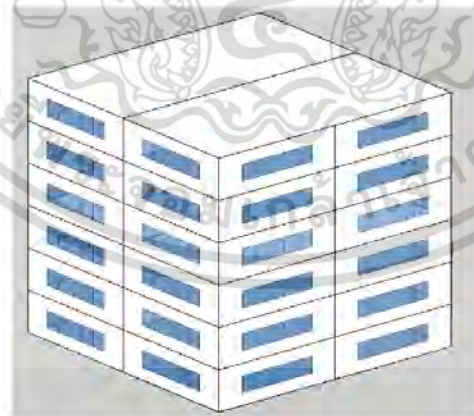
Classification of Buildings	C_l	C_e	C_o	C_v	η_k
Office, School Theater	0.84	0.85	0.90	0.90	2340
Department store, Convention building, Entertainment complex	0.84	0.85	0.90	0.90	4380
Hotel, Hospital, Condominium	1.0	1.0	1.0	1.0	8760

3. Research Methodology

The study process consists of evaluating the case study building, which is modeled after an actual office building located in Bangkok, Thailand, with the current envelope in compliance with Thailand's building energy code using the BEC software. The BEC software is a web-based building energy analysis program capable of simulating whole building energy, including envelope, lighting, air-conditioning, hot water, and renewable energy system based on the location of the evaluated building. In addition, it also assesses compliance with the Thailand building code automatically. The result from the building code evaluated will be used as a basis for comparison in case of changing window material with different glass components. Five different glass components with distinctive characteristics have been selected for each case study. The assessment has been performed on an aspect of CTTV and whole building energy consumption to select suitable glass material that passes the standard passageway one. Finally, the economic performance of the selected glass material will be assessed using IRR and DPP as an indicator for feasibility determination.

3.1. Case Study Building

The building used in the case study is an office building located in Bangkok, Thailand. It consists of six floors with a total usable area of 5100 m² divided into two zones. The area with air-conditioning is 3475 m², and the area without air-conditioning is 1675 m². Thus, the case study building underwent a BEC assessment based on an area under a single roof of more than 2000 m² according to standard criteria. The envelope area that has air conditioning is used in the calculation because only areas with air conditioning for environmental heat can affect the cooling load. The case study building has a window-to-wall ratio (WWR) of 0.49 with an opaque area of 711.89 m² and a transparent area of 703.9 m², as shown in the simple SketchUp diagram in Figure 1.

**Figure 1.** Simple SketchUp diagram of case study office building.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2. Material in Building Envelope

The thermal characteristic of opaque and transparent materials used in the case study building can be summarized as shown in Table 5. The main opaque material is concrete, which is mainly used for the building walls, whereas steel and Alu carbon sheets are scattered throughout the building envelope. For the air gap, it can act as a natural insulator, blocking heat from passing through building skin.

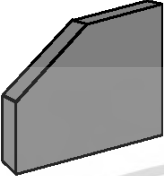
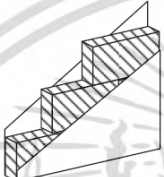


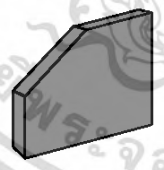
Table 5. The thermal properties of the materials used in the case study building envelope.

Opaque Material			
Material	Thermal Conductivity (W/m·K)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (kJ/kg·K)
Concrete plaster	0.72	1860	0.84
Autoclaved Aerated Concrete	0.476	1280	0.84
Gypsum plates	0.282	800	1.09
Fiberglass insulation	0.033	32	0.96
Reinforced concrete	1.442	2400	0.92
Alu carbon sheet	5.54	1375	0.897
Steel	47.6	7840	0.50
Transparent material			
Material	Thickness (m)	U-Value (W/m ² ·K)	SHGC
Clear float glass	0.06	5.74	0.82
Air gap			
	Types	Thickness (m.)	Air gap resistance (m ² ·C/W)
Air gap (roof)	High radiation level	0.6	

The case-study building had five different opaque components for the walls and one type of roof, as summarized in Table 6. The first type is pure concrete with a thickness of 42 cm, which is a column and beam. The second opaque component is a 20 cm thick concrete wall, and the fourth type also has a similar component with a slightly smaller thickness of 10 cm. As for the window and door frames, the third type was an aluminum sheet with an air gap between the sheets, and the fifth type is a steel sheet, which has second highest and highest U-values, respectively. This is owing to the thermal properties of the material, which has high U-values. However, the areas with these two types of opaque components accounted for only a small portion of the building envelope and did not significantly affect the OTTV. In contrast, the transparent material used in the case study is float glass, which has two times the thermal transmittance compared to opaque components. Thus, retrofitting the glass material can significantly reduce the heat transferred into the building from the environment and reduce the energy consumption of the air-conditioning systems and the energy consumption of the entire building.

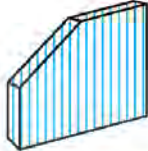
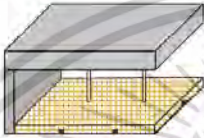
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 6. Material composition of the case study building.

	Diagram	Detail	Thickness (m.)	U-Value (W/m ² ·K)
Wall 1		Concrete	0.42	0.956
Wall 2		Autoclaved Aerated Concrete	0.01	1.461
		Concrete block Autoclaved Aerated Concrete	0.18 0.01	
Wall 3		Alu carbon Sheet	0.004	3.073
		Air gap Alu carbon Sheet	0.2 0.004	
		Autoclaved Aerated Concrete	0.01	
Wall 4		Concrete block Autoclaved Aerated Concrete	0.08 0.01	2.991
Wall 5		Steel Sheet	0.003	6.093

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 6. Cont.

	Diagram	Detail	Thickness (m.)	U-Value (W/m ² -K)
Glass 1		Clear float glass	0.06	5.74
Roof 1		Reinforced concrete Air Gap Fiberglass insulation Gypsum plates	0.25 0.6 0.075 0.009	0.231

4. Energy Performance

The BEC software version 2.6.0 provided by the Ministry of Energy was used to evaluate whether the office building met Thai building energy codes. The case study building does not have a hot water system or renewable energy sources. Therefore, the three subsystems to be evaluated are the building envelope, lighting system, and air-conditioning system for the first pathway and the total energy consumption of the building in the second pathway.

4.1. Assessment of the Base Case Building

The BEC evaluation result of the base-case office building without modifications is summarized in Table 7. The results generated by the BEC software show that the case-study building passes only two subsystem evaluations when the first pathway is used. The lighting equipment installed in the working area consumed less power per square meter than the standard. For example, the lighting power density (LPD) value of 7.62 W/m² was within the standard allowance (less than 10 W/m²). Each unit of the air-conditioning system of the case-study building was assessed using the standard by comparing the SEER to the standard (greater than 12.40). The air-conditioning system used in the building had an average SEER of approximately 12.89, which was consistent with the standard.

Table 7. BEC evaluation of the case study office building using base case glass.

	Description	Standard	Case Study Building	Result
First Passageway	OTTV (W/m ²)	≤50.00	112.63	Failed
	RTTV (W/m ²)	≤10.00	3.73	Passed
	LPD (W/m ²)	≤10.00	7.62	Passed
	Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER)	≥12.40	12.89	Passed
	Hot Water System		No Installation on Building	
Second Passageway	Hot Water System		No Installation on Building	
	Whole Energy Building Consumption (kWh/year)	≤226,021.83	264,474.22	Failed

However, the envelope system of the case study building did not meet the OTTV and was 70.53 W/m², which was significantly higher than the standard allowance for office buildings (less than 50 W/m²). However, the RTTV was within the standard allowance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(less than 10 W/m^2) at 3.73 W/m^2 . Therefore, the case study building needs to be evaluated using the second pathway. Comparing the total energy consumption, the total annual energy consumption of the case study building was $264,474.22 \text{ kWh/yr.}$, slightly higher than the standard reference building (less than $226,021.83 \text{ kWh/yr.}$). Thus, the building did not comply with the Thai energy codes.

This result indicates that the envelope material used on the wall and windows is not sufficiently energy-efficient to meet the standard value. The main factor causing a significant amount of thermal transfer is the transparent material of the window. This allows heat from the environment to enter the building and causes higher energy consumption for cooling loads in air-conditioning systems. In the current case study of building envelope components, the windows were only equipped with clear glass. Different glass materials with unique properties were selected as replacements to reduce thermal transfer and energy usage in cooling loads, and each type of glass was evaluated to find efficient materials for building windows.

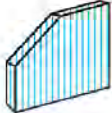
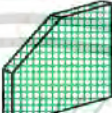



4.2. Assessment of the Glass Material Retrofitted Case Building

Based on the BEC evaluation, the OTTV in the case study did not meet the BEC. One of the methods to improve building OTTV is to replace the material of the envelope with a material with a lower heat transfer coefficient (U-value). As shown in Table 4, glass had the second-highest U-value after the steel frame. However, the envelope area of the glass was much higher than that of the steel frame, with a WWR of 0.49. Thus, changing the glass material can significantly improve the OTTV of the building. Two significant thermal characteristics of transparent material are U-value and SHGC. So, the retrofitted case considers these two factors when selecting replacement material. Five different glass that has been used in Thailand markets are selected for retrofitted, and their properties can be summarized in Table 8. The diagram shown depicts the composition of glass material with more than one layer, which is also included in the table. The glass material currently used for the windows of the case study building was a 6 mm thick clear glass. The retrofitted glass material consisted of five unique glass compositions, labeled glass types 1–5. Glass type 1 is a clear float glass but has slightly different thermal characteristics. Glass type 2 has a similar U-value to type 1 with lower SHGC due to ocean green color coating. Glass type 3 is a heat-reflective glass that can reflect much of the solar heat from the interior of a building, reducing the U-value and SHGC value. Glass type 4 is similar to glass type 3, with a reflective coating on the ocean green glass. Therefore, the U value and SHGC have been slightly reduced. Glass type 5 is double-glazed with an air gap between panels, giving the best U-value and SHGC compared to other glass materials.

To evaluate the effect of glass material on the energy consumption of the building, the lighting, air conditioners, and other equipment in the building were set similarly to the base case. Only the glass material in the window section of the building envelope was replaced with different materials. The results of the evaluation using BEC software for the four main aspects compared to the standard are listed in Table 9. It can be seen that the newer glass can provide a better value in terms of OTTV compared to the base case. Glass type 1 is a clear glass material that has a similar U-Value and lower SHGC value to the glass currently used in the base-case buildings. Thus, changing this type of glass may lower the OTTV, but not enough to meet the compliance level. Glass type 2 is a green glass similar to type 1. To meet the energy code, the glass material must be coated with a reflective substance, as shown in glass type 3, where the OTTV is within the standard allowance. Looking at the second pathway, clear float glass with better thermal properties can reduce the energy consumption of the whole building to the standard value. However, the reduction rate for the OTTV and energy consumption of the whole building is not linearly correlated because other factors must be taken into account when calculating the energy whole building's energy consumption, but the OTTV is directly influenced by material thermal characteristic.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 8. Thermal properties of the selected glass material for retrofitted case.

	Material	Composition	Thickness (m)	U-Value (W/m ² ·K)	SHGC
Glass Type 1	Clear float glass		0.06	5.25	0.82
Glass Type 2	Ocean green float glass		0.06	5.25	0.60
Glass Type 3	Clear reflective glass		0.06	4.65	0.46
Glass Type 4	Ocean green reflective glass		0.06	3.99	0.28
Glass Type 5	Double-glazed glass with air gap		0.06-0.12-0.06*	1.66	0.25

* Thickness value consists of outer glass panel-air gap-inner glass panel.

Table 9. Evaluation of the energy demand of the subsystems of the building envelope and the whole building using different types of glass.

Description	OTTV (W/m ²)			Whole Energy Building Consumption (kWh/Year)		
	Standard	Reduction (%)	Compliance	Standard	Reduction (%)	Compliance
Case study building	112.63	-	Failed	264,474.22	-	Failed
Glass Type 1	70.53	37.38%	Failed	224,156.76	0.83%	Passed
Glass Type 2	57.30	49.13%	Failed	210,638.65	6.81%	Passed
Glass Type 3	47.45	57.87%	Passed	200,572.35	11.26%	Passed
Glass Type 4	35.04	68.89%	Passed	187,901.82	16.87%	Passed
Glass Type 5	27.68	75.42%	Passed	180,373.75	20.20%	Passed

5. Economic Feasibility

In this section, a study is conducted on the economic feasibility of retrofitting a building window with glass material. This study uses economic reference data from Thailand, including inflation rate, electricity price, and material and labor costs, to evaluate the economic feasibility.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1. Economic Indexes

Two economic indexes were used to evaluate the feasibility of retrofitting glass materials in building windows for a 25-year project lifetime. Factors such as installation costs, labor costs, and revenue in the form of energy cost savings were used as the basis for the analysis. Typically, the payback period (PP) can be used as a simple indicator to evaluate the economic potential. However, actual investment returns lose value over time due to factors such as inflation, degradation of income, and the value of the interest rate. To account for these parameters, the DPP is used as an index to determine the period over which the investment returns occur by accounting for the time value of money. The DPP can be calculated using the discounted cash flow shown in Equation (7) to determine the period over which the investment will earn a return, as displayed in Equation (8) [41].

$$\text{Discounted Cash Flow} = \frac{\text{Actual Cash inflow}}{(1+i)^n} \quad (7)$$

$$DPP = A + \frac{B}{C} \quad (8)$$

where

i = rate of interest used to determine the present value of future cash flows;

n = period in which cash inflows are related;

A = last period with negative cumulative cash flow;

B = absolute value of the discounted cumulative cash flow at the end of period A ;

C = discounted cash flow during the period after A .

For the second index, the IRR is used to estimate shows the annual percentage return of the project investments. To calculate the IRR, the NPV of future cash flows must first be determined. By definition, the NPV is the gap between the cash flow in terms of present value and the original cost of investment over a projected lifespan. A positive NPV indicates that the present value of the project's cash flow exceeds its cost and has potential for investment. The NPV can be calculated using Equation (9) [42]. IRR, by definition, means the discount rate that causes the NPV to be zero. Thus, the IRR can be obtained by solving Equation (10) [42].

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+k)^t} - C_0 = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+IRR)^t} - C_0 = 0 \quad (10)$$

where

C_t = net cash inflows during period t ;

C_0 = total initial investment cost;

t = the number of time periods;

k = discount rate.

5.2. Economic Data

The economic parameter requirements for the evaluation are summarized in Table 10. The electricity cost derived from MEA category 3 medium-type businesses was 0.13418 USD per kWh, including the service charge, float time, and taxes [43]. The glass material cost was obtained from the glass manufacturer, and the labor cost for installing the different types of windows was obtained from the Comptroller General's Department (CGD), Ministry of Finance [44]. The total cost of installation also increased the absorbed cost by 7%, including packaging, transportation of manpower, and materials. In addition, the case study assumes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

that there is no cost for installing the frame in the retrofitted case for the retrofitted glass material only.

Table 10. The material and installation costs for retrofitted office buildings with different glass types.

	Glass Type 3	Glass Type 4	Glass Type 5
Glass Area (m ²)	703.90	703.90	703.90
Glass Cost (USD/m ²) *	33.32	43.57	85.43
Frame and Labor Cost (USD/m ²) *	0.31	0.31	3.43
Glass Material Cost (USD) *	25,330.41	35,397.16	66,925.14
Inflation Rate (%)	6	6	6
Energy Cost (USD/kW-h) *	0.13418	0.13418	0.13418

* The exchange rate is approximately 1 THB = 0.029 USD (April 2023).

Glass material types 1 and 2 were not selected for the economic evaluation because the material failed the BEC subsystem evaluation (pathway 1) in relation to the building envelope. Therefore, only three glass types are compared in terms of the economic feasibility of retrofitted glass materials for buildings. The Glass material types 3 and 4 were single monolithic heat-reflective glass with differences in color. Thus, the material cost is on a similar level with green color glass for type 4, a bit higher than clear glass in type 3. Glass type 5, a double-layer glass with low-e coating, has significantly higher material and labor costs up to 10 times that of single-layer clear glass. Labor costs for the single-layer glass were similar. However, for glass types 3 and 4, the material costs for reflective glass are three to four times higher than for glass without a coating.

5.3. Economic Result

An economic analysis of an office building where different glass materials were used for the windows is summarized in Table 11. The case study is divided into the case where only the glass material is retrofitted and the case where both the glass material and frame are retrofitted, as costs differ significantly.

Table 11. Summary of economic indexes for retrofitted office buildings with different glass types.

	Glass Type 3	Glass Type 4	Glass Type 5
Energy Reduction per Year (kW-h)	63,901.87	76,572.40	84,100.47
Energy Cost Reduction per year (USD)	8574.35	10,274.48	11,284.60
In case only glass material			
Total Installation Cost (USD)	25,330.41	35,397.16	66,925.14
IRR (%)	33.83%	28.98%	16.49%
DPP (years)	2.88	3.45	6.37
In case of material included frame			
Total Installation Cost (USD)	80,446.12	88,490.73	150,836.48
IRR (%)	9.57%	10.70%	5.54%
DPP (years)	10.41	9.51	15.08
cumulative cash flow(USD)	86,954.88	112,102.72	69,477.94

The result from the evaluation shows that the different glass materials make a significant difference in the degree of energy savings and, thus, a reduction in the energy cost of the building. Glass type 3 is a clear glass material with a reflective coating that prevents the heat from entering the building interior. Thus, retrofitting this type of glass material can reduce energy consumption and cost per year. When retrofitting with only the glass material, the IRR was the highest at 33.83%, and the DPP was 2.88 years. However, when the cost of the retrofitted frame is included, the initial investment increases significantly, resulting in a lower IRR of 9.57% with a DPP of 10.41 years. Glass type 4 is a similar reflective glass with

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a green color. The cost of the material is higher than that of glass type 3, but the frame cost is similar. Thus, the retrofitted glass material, including the frame, provided the best index value with an IRR of 10.70% and a DPP of 9.51 years. For glass materials with a double layer in glass type 5, the installation cost is much higher than single-layer glass due to the complex window frame. Glass type 5 has the best thermal characteristics with double-layer glass, which in turn results in the highest reduction in energy consumption for the entire building. However, the cost is significantly higher, with a reduced rate of approximately 50% more than glass type 4, and the installation cost is two times higher. This reflects the lower economic indexes compared to reflective glass. This result is also displayed when considering the cumulative cash flow throughout the 25-year project lifetime. Glass type 4 can provide the project owner with the highest cumulative cash flow, while the best energy performance in glass type 5 can obtain the lowest amount of cumulative cash flow due to the highest installation cost.

6. Conclusions

Air conditioning is the main system in the building that requires the largest amount of electricity in buildings due to cooling load from heat entering the room through the windows. Therefore, the thermal characteristics of glass directly affect the energy consumption of an entire building. Therefore, the objective of this study is to conduct a feasibility study on different types of retrofitted glass materials for building windows. The Thai building energy code was used as an evaluation tool and basis for comparison between the different case studies. The results show that windows retrofitted with glass material with a lower U-value can provide better OTTV for the building envelope subsystem. In addition, a reduction in OTTV means a reduction in energy consumption for the entire building. The reduction in energy consumption translates into energy cost savings for buildings with retrofitted windows that can offset the installation costs of new glass materials. However, the economic parameter for evaluating feasibility depends not only on energy savings but also on the cost of retrofitted glass. This discrepancy is evident in the case of glass type 5, where the energy savings from replacing the glass increase by up to 20.20%, while the economic parameter is worse than that of the other glass types. For the case study building, glass type 4 provides the best economic result with an IRR of 10.70%, a payback period of approximately 9.51 years, and annual energy savings of approximately 16.87%. In addition, the renovation project with glass type 4 can achieve a cumulative cash flow of up to 112,102.72 USD through a 25-year project lifetime. This results from the discrepancy between cost and savings, as the installation cost for glass type 5 is up to six times higher than for glass type 3, whereas the percentage of energy savings is only three times higher. A balance must be struck between energy savings and installation costs to conduct a feasibility study for project owners who wish to invest in retrofitted glass. The result from the evaluation of changing glass material in building windows demonstrated that energy saving through retrofitted buildings is feasible. Thus, the renovation of an aging building with energy efficient envelope with additional energy measurement can be evaluated in future studies in order to provide the project owner with a feasibility study to achieve a net zero energy building. In addition, this study applied specifically to buildings located in the tropical climate. Thus, the assessment of performance in different climates can be further addressed in future work.

Author Contributions: Conceptualization, S.A. and P.C.; methodology, S.T.; software, S.Y.; validation, A.N. and P.C.; formal analysis, S.A.; investigation, S.T.; resources, P.C. and A.N.; data curation, S.T.; writing—original draft preparation, S.A. and S.T.; writing—review and editing, A.N.; visualization, S.Y.; supervision, A.N.; project administration, P.C.; funding acquisition, P.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Srinakharinwirot University Research Fund.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data sharing is not applicable.

Acknowledgments: The authors wish to gratefully acknowledge the financial support for this research from the Srinakharinwirot University Research Fund, Thailand, and data support for this research from The Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), Thailand

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Buildings Sectorial Overview. Available online: <https://www.iea.org/reports/buildings> (accessed on 9 April 2022).
- 2018 Commercial Buildings Energy Consumption Survey Final Results. Available online: <https://www.eia.gov/consumption/commercial> (accessed on 9 April 2022).
- Wu, H.; Wang, D.; Liu, Y.; Wang, Y. Study on the effect of building envelope on cooling load and life-cycle cost in low latitude and hot-humid climate. *Procedia Eng.* **2017**, *205*, 975–982. [CrossRef]
- Energy Policy and Planning Office (EPPO). *Ministry of Energy. Energy Statistics of Thailand 2021*; Ministry of Energy: Bangkok, Thailand, 2021; pp. 95–110.
- Department of Alternative Energy Development and Efficiency. *Energy Efficiency Plan 2018-2037 (EEP 2018)*; Ministry of Energy: Bangkok, Thailand, 2020.
- Energy Conservation Promotion Act, B.E. 2535. *Gov. Gaz.* **1992**, *109*, 33.
- Kamal, A.; Kadam, S.T.; Hou, D.; Hassan, I.G.; Wang, L.L.; Sezer, N.; Rahman, M.A. Detailed profiling of high-rise building energy consumption in extremely hot and humid climate. *Clean. Energy Syst.* **2023**, *4*, 100060. [CrossRef]
- Jazaeri, J.; Gordon, R.L.; Alpcan, T. Influence of building envelopes, climates, and occupancy patterns on residential HVAC demand. *J. Build. Eng.* **2019**, *22*, 33–47. [CrossRef]
- Solano, J.C.; Martín, E.C.; Olivieri, L.; Galárraga, D.A. HVAC systems and thermal comfort in buildings climate control: An experimental case study. *Energy Rep.* **2021**, *7*, 269–277. [CrossRef]
- Liu, X.; Sun, H.; Han, S.; Han, S.; Niu, S.; Qin, W.; Sun, P.; Song, D. A data mining research on office building energy pattern based on time-series energy consumption data. *Energy Build.* **2022**, *259*, 111888. [CrossRef]
- Song, S.; Long, J.; Jiang, H.; Ran, B.; Yao, L. Characteristics of office lighting energy consumption and its impact on air conditioning energy consumption. *Energy Built Environ.* **2023**, *in press*, corrected proof. [CrossRef]
- Cai, S.; Gou, Z. Impact of COVID-19 on the energy consumption of commercial buildings: A case study in Singapore. *Energy Built Environ.* **2022**, *in press*, corrected proof. [CrossRef]
- Mantesi, E.; Chmutina, K.; Goodier, C. The office of the future: Operational energy consumption in the post-pandemic era. *Energy Res. Soc. Sci.* **2022**, *87*, 102472. [CrossRef]
- Milelli, M.; Bassani, F.; Garbero, V.; Poggi, D.; Hardenberg, J.V.; Ridolfi, L. Characterization of the Urban Heat and Dry Island effects in the Turin metropolitan area. *Urban Clim.* **2023**, *47*, 101397. [CrossRef]
- Rajagopal, P.; Shanhi Priya, R.; Senthil, R. A review of recent developments in the impact of environmental measures on urban heat island. *Sustain. Cities Soc.* **2023**, *88*, 104279. [CrossRef]
- Zhang, M.; Gao, Z. Effect of urban form on microclimate and energy loads: Case study of generic residential district prototypes in Nanjing, China. *Sustain. Cities Soc.* **2021**, *70*, 102930. [CrossRef]
- Chan, A.L.S.; Chow, T.T. Calculation of overall thermal transfer value (OTTV) for commercial buildings constructed with naturally ventilated double skin façade in subtropical Hong Kong. *Energy Build.* **2014**, *69*, 14–21. [CrossRef]
- Sheng, W.; Zhang, L.; Ridley, I. The impact of minimum OTTV legislation on building energy consumption. *Energy Policy* **2020**, *136*, 111075. [CrossRef]
- Pezeshki, Z.; Soleimani, A.; Darabi, A.; Mazinani, S.M. Thermal transport in: Building materials. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *181*, 238–252. [CrossRef]
- Prataviera, E.; Vivian, J.; Lombardo, G.; Zarrella, A. Impacts of uncertainty in building envelope thermal transmittance on heating/cooling demand in the urban context. *Appl. Energy* **2022**, *311*, 118691. [CrossRef]
- Dehwal, A.H.A.; Krarti, M. Evaluation of thermal and energy performance of cool envelopes on low-rise residential buildings in hot climates. *Energy* **2021**, *233*, 121165. [CrossRef]
- Tarek, D.; Ahmed, M.M.; Hussein, H.S.; Zeyad, A.M.; Al-Enizi, A.M.; Yousef, A.; Ragab, A. Building envelope optimization using geopolymer bricks to improve the energy efficiency of residential buildings in hot arid regions. *Case Stud. Constr. Mater.* **2022**, *17*, e01657. [CrossRef]
- Chiradeja, P.; Ngaopitakkul, A. Energy and Economic Analysis of Tropical Building Envelope Material in Compliance with Thailand's Building Energy Code. *Sustainability* **2019**, *11*, 6872. [CrossRef]
- Liao, W.; Wen, C.; Luo, Y.; Peng, J.; Li, N. Influence of different building transparent envelopes on energy consumption and thermal environment of radiant ceiling heating and cooling systems. *Energy Build.* **2022**, *255*, 111702. [CrossRef]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25. Zheng, W.; Wei, F.; Su, S.; Cai, J.; Wei, J.; Hu, R. Effect of the envelope structure on the indoor thermal environment of low-energy residential building in humid subtropical climate: In case of brick-timber vernacular dwelling in China. *Environ. Technol. Innov.* **2022**, *28*, 02884. [CrossRef]
26. Verma, R.; Rakshit, D. Comparison of reflective coating with other passive strategies: A climate based design and optimization study of building envelope. *Energy Build.* **2023**, *287*, 112973. [CrossRef]
27. Tiwari, R.; Kim, J. Multi-cell, triple pane, vacuum insulated glazing. *Sol. Energy* **2022**, *245*, 340–352. [CrossRef]
28. Chen, J.; Gong, Q.; Lu, L. Evaluation of passive envelope systems with radiative sky cooling and thermally insulated glazing materials for cooling. *J. Clean. Prod.* **2023**, *398*, 136607. [CrossRef]
29. Fang, Y.; Arya, F. Evacuated glazing with tempered glass. *Sol. Energy* **2019**, *183*, 240–247. [CrossRef]
30. Ming, Y.; Sun, Y.; Liu, W.; Liu, X.; Wu, Y. Optical evaluation of a smart transparent insulation material for window application. *Energy Convers. Manag.* **2022**, *16*, 100315. [CrossRef]
31. Zeng, Z.; Chen, J.; Augenbroe, G. Movable window insulation as an instantiation of the adaptive building envelope: An investigation of its cost-effectiveness in the U.S. *Energy Build.* **2021**, *247*, 111138. [CrossRef]
32. Mujeeb, M.A.; Ashraf, N.; Alsuwayigh, A. Energy performance and economic viability of nano aerogel glazing and nano vacuum insulation panel in multi-story office building. *Energy* **2016**, *113*, 949–956. [CrossRef]
33. Mujeeb, M.A.; Ashraf, N.; Alsuwayigh, A.H. Effect of nano vacuum insulation panel and nanogel glazing on the energy performance of office building. *Appl. Energy* **2016**, *173*, 141–151. [CrossRef]
34. Chan, L.S. Investigating the thermal performance and Overall Thermal Transfer Value (OTTV) of air-conditioned buildings under the effect of adjacent shading against solar radiation. *J. Build. Eng.* **2021**, *44*, 103211. [CrossRef]
35. Ma, R.; Ma, R.; Long, E. Analysis of the rule of window-to-wall ratio on energy demand of residential buildings in different locations in China. *Heliyon* **2023**, *9*, e12803. [CrossRef] [PubMed]
36. Khalil, A.A.; Fikry, M.; Abdeaal, W. High technology or low technology for buildings envelopes in residential buildings in Egypt. *Alex. Eng. J.* **2018**, *57*, 3779–3792. [CrossRef]
37. Huang, J.; Wang, S.; Teng, F.; Feng, W. Thermal performance optimization of envelope in the energy-saving renovation of existing residential buildings. *Energy Build.* **2021**, *247*, 111103. [CrossRef]
38. Illuminating Engineering Association of Thailand. *Guidelines for Indoor Lighting Design*, 1st ed.; Illuminating Engineering Association of Thailand: Bangkok, Thailand, 2016.
39. Air Conditioner Industry in Thailand. Available online: <https://yamada-cp-th.com/wp-content/uploads/2018/06/Air-Conditioner-Industry-in-Thailand-201806.pdf> (accessed on 9 April 2022).
40. Energy Efficiency Label No.5 Air Conditioner. Available online: <https://www.tea.org/policies/1583-energy-efficiency-label-no5-air-conditioner> (accessed on 9 April 2022).
41. Goel, S. Capital Budgeting Appraisal Methods. In *Capital Budgeting*, 1st ed.; Business Expert Press, LLC.: New York, NY, USA, 2015; pp. 63–88.
42. Peterson, P.F.; Fabozzi, F.J. Net Present Value Technique. In *Capital Budgeting: Theory and Practice*; John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA, 2002; pp. 72–78.
43. Electricity Tariffs Large General Service. Available online: <https://www.nrea.or.th/en/profile/109/114> (accessed on 10 April 2022).
44. Comptroller General's Department. *Material and Labour Cost for Fiscal Year 2565 B.E.*; Comptroller General's Department: Bangkok, Thailand, 2022.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสุรภกิจ ทองสุก
ที่อยู่	11/1 หมู่ 1 ต.บางพระ อ.เมืองฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา 24000
ประวัติการศึกษา	2566 วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วศ.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	2559 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	2546 ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต (ค.อ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
	2543 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ประวัติการทำงาน ปี พ.ศ. 2549 – ปัจจุบัน
มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

- ผลงานทางวิชาการ
1. S. Thongsuk and A. Ngaopitakkul, (2013).Impacts of Electrical line losses comprising Multi-Distributed Generation in Distribution System. The 5th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 5th APPEEC2013, Beijing, China, Energy and Power Engineering PART II Volume 5, Number 4B ,July2013 pp.1037-1042
 2. C. Pothisarn and S. Thongsuk. (2013). Relation Among Velocity of Lightning Travelling Wave, Lightning Stroke Current, and Tower Footing Resistance to Study Back-flashover on the Insulators in Transmission Tower. International Review on Modelling and Simulations (IREMOS) 2013, Italy. (IREMOS)2013 Vol.6, N.4 pp.1279-1288
 3. J. Klomjit, A. Ngaopitakkul, C. Jettanasen, C. Pothisarn and S. Thongsuk. (2013). Discriminating Between External Short Circuit and Internal Winding Fault in Power Transformer Using RBF Neural Network.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Proceeding of the IASTED International Conference on Power and Energy Systems (Asia PES 2013), Phuket, Thailand, April 2013

4. C. Jettanasen and S. Thongsuk. (2013) Attenuation of High-Frequency Electromagnetic Noise in a Single-Phase AC Motor Drive. 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2013), October 26-29, 2013, Busan, Korea.

5. S. Thongsuk, A. Ngaopitakkul, C. Jettanasen, S. Bunjongjit and C. Pothisarn, (2014). Selection of Proper Input Pattern for Back-Propagation Neural Network Algorithm to Identify the Phase with Fault Appearance in Transformer Windings. The Eighth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2014), Japan. ICIC Express Letters (An International Journal of Research and Surveys) Volume 8, Number 3, March 2014. pp.771-778.

6. S. Thongsuk and A. Ngaopitakkul (2014). Study on fault signal characteristics of an induction motor during interturn fault. International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2014, Kitakyushu, Japan.

7. J. Klomjit, S. Thongsuk and A. Ngaopitakkul. Selection of Proper Non-linear Kernel Parameter in Support Vector Machine Algorithm for Classifying the Internal Fault Type in Winding Power Transformer. International Conference on Intelligent Systems and Image Processing (ICISIP2014), Fukuoka, Japan.

8. Surakit Thongsuk, Atthapol Ngaopitakkul. Performance and Economic Analysis on Rooftop PV System. (Journal of Science and Technology) Srinakharinwirot University Vol.10, No.19 January-June 2018 pp.157-169

9. Santipont Ananwattanaporn, Panapong Songsukthawan, Suntiti Yoomak, Chaichan Pothisarn, Chaivan Jettanasen, Monthon Leelajindakraierk, Atthapol Ngaopitakkul, Surakit Thongsuk, Theerasak Patcharoen, Sulee Bunjongjit. (2020). Study on Coordination of Protective Relays in Distribution System with Distributed Generation. The 15th International Conference on Development in Power System Protection. (DPSP2020). The ACC, Liverpool, United Kingdom, Mar9–15,2020 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/9449474>

10. Pathomthat Chiradeja, Chaichan Pothisarn, Nattanon Phannil, Santipont Ananwattananporn, Monthon Leelajindakraierk, Atthapol Ngaopitakkul, Surakit Thongsuk, Vinai Pornpojratanakul, Sulee Bunjongjit and Suntiti Yoomak. (2021) Application of Probabilistic Neural Networks Using High-Frequency Components' Differential Current for Transformer Protection Schemes to Discriminate between External Faults and Internal Winding Faults in PowerTransformers.AppliedSciences.Appl.Sci.2021,11,10619. <https://doi.org/10.3390/app112210619>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้