

การพัฒนาระบบการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศเพื่อลดความ
ต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในอาคาร



นทีธินนท์ พงษ์พานิช

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี

พฤษภาคม 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การพัฒนาระบบการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้า
สูงสุดในอาคาร



นัทธีธนนท์ พงษ์พานิช

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี

พฤษภาคม 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

THE DEVELOPMENT ON ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS OF AIR CONDITIONING
SYSTEM FOR REDUCING THE PEAK DEMAND IN BUILDING



NUNTHANON PONGPANIT

A Dissertation Submitted to University of Phayao
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Doctor of Philosophy Degree in Energy Management and Smart Grid Technology
May 2020
Copyright 2019 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาระบบการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้า
สูงสุดในอาคาร

ของ นัทธีธนนท์ พงษ์พานิช

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสามารถกริดเทคโนโลยี

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรจบ สุขประภาภรณ์)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร. บุญวัฒน์ วิจารณ์พล)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วัฒนพงศ์ รักษ์วิเชียร)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร. สุรัตน์ เศษโพธิ์)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัชระ วงศ์ปัญญา)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา
(ดร. อภากร วัฒนนะ)

..... คณบดีคณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ต่อพงศ์ กรีธาชาติ)

เรื่อง:	การพัฒนากระบวนการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในอาคาร
ผู้วิจัย:	นัทธีธนนท์ พงษ์พานิช, วิทยานิพนธ์: ปร.ด. (การจัดการพลังงานและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2562
อาจารย์ที่ปรึกษา:	ดร. บุญวัฒน์ วิจารณ์ผล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.วัฒน์พงศ์ รักษ์วิเชียร ดร.สุรัตน์ เศษโพธิ์
คำสำคัญ	ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด, การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์, การจัดการด้านการใช้พลังงานในอาคาร, ระบบปรับอากาศ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาต้นแบบแนวทางการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศเพื่อลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในอาคาร (PD) โดยใช้จากการจัดการร่วมกันระหว่างการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ (PV) และรูปแบบการจัดการด้านการใช้พลังงาน (DSM) ในช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนพฤษภาคม การศึกษาเริ่มจากการประเมินศักยภาพของ PV โดยใช้ข้อมูลจาก Smart Grid UP ของอาคาร B3 ติดตั้งระบบ PV ขนาด 60 kWp และรูปแบบความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศอาคารที่มีขนาดรวม 1,500,265 BTUH ผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าความต้องการพลังงานไฟฟ้ากับการผลิตไฟฟ้ามีช่วงเวลาไม่ตรงกันทำให้มีพลังงานส่วนเกิน (Over Energy) มากกว่าความต้องการเฉลี่ย 66.18 kWh/วัน หรือคิดเป็น 21.11% ของความสามารถในการผลิตไฟฟ้า จากนั้นจึงพัฒนาแบบจำลอง DSM ร่วมกับ PV เพื่อติดตั้งบนอาคาร 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบ 1) การใช้ PV โดยตรงเพื่อลด PD ของอาคาร รูปแบบ 2) ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System, BESS) ที่เหมาะสมร่วมกับ PV และรูปแบบ 3) การออกแบบระบบควบคุมการจัดการด้านการใช้ไฟฟ้าด้วยการสำรองพลังงานอยู่ในรูปแบบน้ำเย็น (Chilled Water Thermal Storage, CWTS) ร่วมกับ PV จากการวิเคราะห์ อาคารที่ไม่มีจัดการพลังงานจะเกิด PD จะเท่ากับ 120.54 kW เมื่อเปรียบเทียบกับในรูปแบบ 1) ระดับ PD ของอาคารลดลงเหลือ 75.36% รูปแบบ 2 สามารถลด PD เหลือ 54.39% จากจำลองขนาดของ BESS ติดตั้ง 45 kWh และสุดท้ายรูปแบบ 3) PD ของอาคารลดลงเหลือ 55.70% จากการติดตั้งระบบทำน้ำเย็นขนาด 175,400 BTUH เมื่อเปรียบเทียบกับความน่าสนใจในการลงทุนใน พบว่าใน รูปแบบ 3) มีอัตราส่วนการลงทุนที่ต่ำที่สุดในการลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ 28,881.86 บาท/kW น้อยกว่าโดยที่รูปแบบ 1) และ 2) มีอัตราส่วนการลงทุนอยู่ที่ 111,073.71 บาท/kW และ 54,878.05 บาท/kW ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาผลตอบแทนด้วยตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์พบว่าไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนโดยเฉพาะในรูปแบบ 2 เนื่องจากต้นทุนของระบบ BESS ที่เลือกเป็นแบบแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน (Lithium-ion battery) มีราคาสูงมากในปัจจุบัน

Title: THE DEVELOPMENT ON ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS OF AIR CONDITIONING SYSTEM FOR REDUCING THE PEAK DEMAND IN BUILDING

Author: Nunthanon Pongpanit, Dissertation: Ph.D. (Energy Management and Smart Grid Technology), University of Phayao, 2019

Advisor: Dr. Bunyawat Vichanpol Co–advisor Associate Professor Dr.Wattanapong Rakwichian
Dr.Surat Sedpho

Keyword Peak Demand (PD), Photovoltaic (PV), Demand Side Management (DSM), Building Energy Managements (BEMs), Air Conditioning System

ABSTRACT

This research was aimed to propose guidelines for electrical energy management in air conditioning as a means of reducing peak demand (PD) in buildings by using an integrated system of Photovoltaic (PV) and Demand Side Management (DSM) during April–May. In this study, the potentials of PV system were assessed using information from the Smart Grid UP in Building B3 with a 60 kWp PV system installation and a 1,500,265 BTUH total electrical energy demand for air conditioning system in building. The results showed that a lack of synchronism between energy demand and energy generation causes an over energy of 66.18 kWh/day, which was about 21.11% of the electrical generation capacity. The PV–integrated DSM prototype was then developed in order to install in the building in 3 forms; 1) direct PV system, 2) PV–Battery Energy Storage System (PV–BESS) and 3) Chilled Water Thermal Storage (CWTS) integrated PV system. The results showed that integrating the direct PV system, the PV–BESS system with a 45 kWh BESS, and the PV–CWTS system with a 175,400 BTUH CWTS to the building can reduce the PD to 75.36%, 54.39% and 55.70% respectively, compared to the building without any energy management where the PD was 120.54 kW. As for economic analysis, the results also showed that the PV–CWTS system requires lowest investment of 28,881.86 Baht/kW. On the other hand, the direct PV system and the PV–BESS system require considerably larger investment of 111,073.71 Baht/kW and 54,878.05 Baht/kW, respectively. This indicates that the direct PV system and the PV–BESS system might not be worth the investment, especially the PV–BESS system due to the cost of the BESS system with a lithium–ion battery that is currently very expensive.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ ดร.บุญวัฒน์ วิจารณ์พล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาด่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย ขอขอบคุณ รศ.ดร. วัฒนพงศ์ รักษ์วิเชียร สำหรับคำแนะนำและให้โอกาสในการเรียนรู้ในการทำวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในสาขาวิศวกรรมเครื่องกลทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

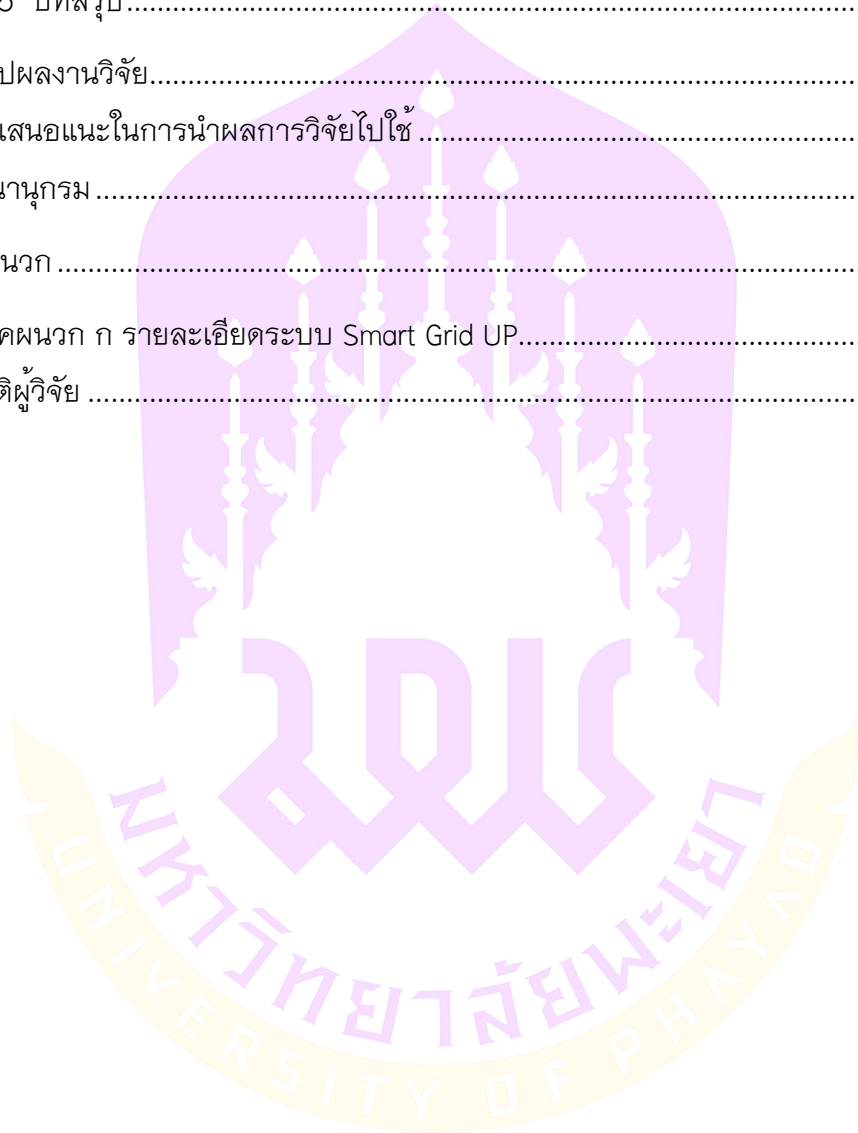
นัทธินนท์ พงษ์พานิช



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
ขอบเขตของการวิจัย	6
ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	6
นิยามศัพท์	8
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	40
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	40
วิธีการดำเนินงานวิจัย	42
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	58
การประเมินรูปแบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากศักยภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ของมหาวิทยาลัยพะเยาและรูปแบบการตอบสนองด้านโหลดปรับ อากาศอาคาร.....	59
การจัดการพลังงานระบบปรับอากาศในอาคาร (BEMS/AC) ด้วยการสำรองพลังงานอยู่ใน รูปแบบน้ำเย็น (Chilled Water Thermal Storage, CWTS).....	67

การศึกษารูปแบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าอาคารในฤดูร้อนร่วมกับระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 มหาวิทยาลัยพะเยา.....	76
การประเมินด้านความคุ้มค่าในการลงทุนของการจัดการด้านการใช้พลังงาน (DSM) ด้วย ตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์.....	88
บทที่ 5 บทสรุป.....	97
สรุปผลงานวิจัย.....	97
ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้.....	98
บรรณานุกรม.....	100
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก รายละเอียดระบบ Smart Grid UP.....	108
ประวัติผู้วิจัย.....	112



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 คักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ในรอบปี.....	60
ตาราง 2 เปรียบเทียบความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศและพลังงานที่ผลิตได้จาก Smart Grid UP อาคาร B3.....	65
ตาราง 3 ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Peak demand, PD) ของระบบปรับอากาศของอาคารต้นแบบ.....	66
ตาราง 4 พลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่อวันที่ผลิตได้และความต้องการพลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่อวันในช่วงฤดูร้อน.....	66
ตาราง 5 ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่อพื้นที่ (Specific Electricity Demand) และภาระความร้อน (Heat Load) จากระบบปรับอากาศในพื้นที่ต้นแบบ.....	69
ตาราง 6 สรุปผลการทดสอบการใช้ระบบ CWTS สำหรับระบบปรับอากาศในพื้นที่ต้นแบบ...	75
ตาราง 7 ผลการศึกษาการจัดการพลังงานอาคารของอาคารร่วมกับ ระบบ Smart Grid UP อาคาร B3.....	87
ตาราง 8 ตารางแสดงจำนวนวันตามกิจกรรมของมหาวิทยาลัยพะเยา (ปฏิทินการศึกษา ระดับปริญญาตรี ภาคปกติ ประจำปีการศึกษา 2561).....	90
ตาราง 9 ตารางสมมติฐานตัวแปรระบบเพื่อประเมินตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์.....	91
ตาราง 10 ตารางสมมติฐานตัวแปรทางเศรษฐศาสตร์.....	92

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 กำลังการผลิตเทียบกับความต้องการไฟฟ้าทั้งประเทศ ปี 2551 – 2562 [1].....	1
ภาพ 2 เส้นโค้งภาระความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดสุทธิในระบบ [2]	2
ภาพ 3 การใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละสาขาของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [3].....	3
ภาพ 4 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.....	4
ภาพ 5 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าอาคารแห่งประเทศไทย สำนักงานภาคเหนือ	4
ภาพ 6 ภาพรวมของกรอบแนวคิดของการวิจัย	8
ภาพ 7 แผนภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้งาน	11
ภาพ 8 คุณสมบัติแผงรับรังสีอาทิตย์ที่เลือกใช้ในงานวิจัย (ข้อมูลจากผู้ผลิต).....	11
ภาพ 9 (ก) ผลของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ต่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิต [9].....	13
ภาพ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันไฟฟ้า ของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์	14
ภาพ 11 ตัวอย่างของการดำเนินการตอบสนองด้านโหลดโดยการปรับปรุงการตอบสนองด้าน โหลดปรับอากาศ [6].....	17
ภาพ 12 ประโยชน์ของการตอบสนองด้านโหลด (Demand Response) ในการลดการสร้าง Peaking Plant [6]	18
ภาพ 13 ระบบกักเก็บพลังงานรูปแบบต่าง ๆ [6]	19
ภาพ 14 ตัวอย่างการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานประเภทแบตเตอรี่	21
ภาพ 15 เทคนิคพื้นฐานการจัดการด้านพลังงานในการตอบสนอง	22
ภาพ 16 ตัวอย่างมาตรการตามหลักการของ DSM [11]	23
ภาพ 17 ประโยชน์ของเทคโนโลยีระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (BEMS) [6].....	27
ภาพ 18 ค่าการใช้พลังงานสุทธิ (Net Consumption) จากแบบจำลองของอาคารแต่ละประเภท ในแต่ละระดับความสามารถในการประหยัดพลังงาน [15]	29
ภาพ 19 ค่าเฉลี่ยดัชนีการใช้พลังงานของอาคารสำนักงาน [16]	30

ภาพ 20 การควบคุมอุณหภูมิห้องด้วยเครื่องปรับอากาศ	31
ภาพ 21 การควบคุมในระบบแบบวงรอบปิดหรือ (Closed Loop Control)	32
ภาพ 22 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	32
ภาพ 23 ระบบควบคุมอุณหภูมิในระบบปรับอากาศที่ศึกษา	32
ภาพ 24 ผลตอบสนองจากการใช้เอาต์ควบคุมพีไอดีแบบต่าง ๆ [18]	33
ภาพ 25 Characteristics of stationary electricity storage systems	38
ภาพ 26 แผนผังขั้นตอนการของการดำเนินงานวิจัย	41
ภาพ 27 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย	44
ภาพ 28 รูปแบบระบบการเก็บข้อมูลของ Smart Grid UP อาคาร B3.....	46
ภาพ 29 แผนผังอาคารที่ศึกษาและการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร B3.....	47
ภาพ 30 อาคาร B3 ต้นแบบศึกษาและทดสอบในงานวิจัย.....	48
ภาพ 31 แผนภาพแนวทางการดำเนินงาน ข้อ 1.....	50
ภาพ 32 ห้องเขียนแบบคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา	51
ภาพ 33 เครื่องปรับอากาศที่ติดตั้งในพื้นที่ทดสอบ.....	52
ภาพ 34 การตรวจวัดและบันทึกค่าปริมาณและระดับพลังงานในระบบปรับอากาศ	52
ภาพ 35 ชุดตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น Autonics.....	53
ภาพ 36 การต่อชุด Sensor ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น.....	54
ภาพ 37 แผนภาพรูปแบบการศึกษา	54
ภาพ 38 รูปแบบการทดสอบในพื้นที่ต้นแบบ	54
ภาพ 39 แผนภาพแนวทางการดำเนินงาน ข้อ 2.....	55
ภาพ 40 รูปแบบความต้องการและการผลิตพลังงานไฟฟ้าของอาคารต้นแบบ	61
ภาพ 41 พลังไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 (Active Power)	61
ภาพ 42 ความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแผงรับรังสีอาทิตย์.....	62
ภาพ 43 เปรียบเทียบความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศและ	64

ภาพ 44 การจำลองความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ลดลงอาคาร B3.....	64
ภาพ 45 รูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศในพื้นที่ทดสอบ	68
ภาพ 46 ชุด Air-cooled chiller, CH1	70
ภาพ 47 ชุดถังเก็บน้ำเย็น (Chilled Water Storage Tank, CST).....	71
ภาพ 48 ชุดเครื่องส่งลมเย็นต้นแบบ (Air Handling Unit, AHU) พร้อมติดตั้ง	71
ภาพ 49 ชุด ARDUINO Board Model MEGA 2560 R3 และอุปกรณ์.....	72
ภาพ 50 ชุดวาล์วควบคุมการไหลแบบ 3- Way Valve.....	73
ภาพ 51 แผนภาพระบบ CWTS ที่ออกแบบพร้อมทดสอบในพื้นที่ต้นแบบ	73
ภาพ 52 ผลการทดสอบของการจัดการพลังงาน.....	74
ภาพ 53 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตกับความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายวันเดือน พ.ค.60	77
ภาพ 54 อุปกรณ์แผงรับรังสีอาทิตย์และความเข้มรังสีอาทิตย์	78
ภาพ 55 พลังไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 (Active Power).....	78
ภาพ 56 ความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีอาทิตย์และอุปกรณ์แผงรับรังสีอาทิตย์	79
ภาพ 57 การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้า(Active power) จากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 2 วัน.....	80
ภาพ 58 รูปแบบความต้องการพลังงาน (Demand energy) ของอาคารและพลังงานไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 (Active energy)	81
ภาพ 59 แนวทางการจัดการพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินร่วมกับแบตเตอรี่ [53].....	81
ภาพ 60 พลังงานส่วนเกินจากการจ่ายไหลในช่วงเวลา 8.30 น. 13.00 น.....	82
ภาพ 61 แผนภาพการจำลองการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน.....	84
ภาพ 62 ความสัมพันธ์ระดับความต้องการพลังงานไฟฟ้าของอาคารต้นแบบก่อนและหลังการจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าในรูปแบบที่ 1.....	85
ภาพ 63 ความสัมพันธ์ระดับความต้องการพลังงานไฟฟ้าของอาคารต้นแบบก่อนและหลังการจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าในรูปแบบที่ 2	86

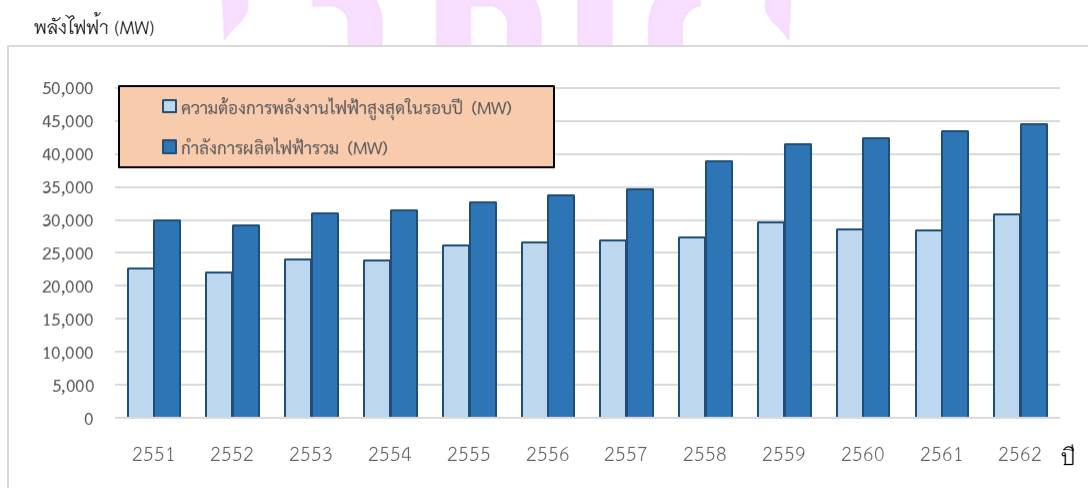
ภาพ 64 ความสัมพันธ์ระดับความต้องการพลังงานไฟฟ้าของอาคารต้นแบบก่อนและหลังการจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าในรูปแบบที่ 2	86
ภาพ 65 การใช้พลังงานไฟฟ้าในรอบปี 2561 ของมหาวิทยาลัยพะเยา.....	89
ภาพ 66 ปริมาณการผลิตไฟฟ้ารายเดือนของระบบ Smart Grid UP อาคาร B3	90
ภาพ 67 การประเมินกระแสเงินสดตอบแทนที่เกิดจากการจัดการด้านการใช้พลังงานในรูปแบบที่ 1.....	93
ภาพ 68 การประเมินกระแสเงินสดตอบแทนที่เกิดจากการจัดการด้านการใช้พลังงานในรูปแบบที่ 2	94
ภาพ 69 การประเมินกระแสเงินสดตอบแทนที่เกิดจากการจัดการด้านการใช้พลังงานในรูปแบบที่ 3	95
ภาพ 70 สรุปตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ของรูปแบบการจัดการด้านการใช้พลังงานที่ศึกษา	96
ภาพ 71 ภาพรวมของระบบ Smart Grid UP	108
ภาพ 72 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (SHARP รุ่น ND-AA250).....	109
ภาพ 73 คุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น ND-AA250	109
ภาพ 74 อินเวอร์เตอร์ (SMA รุ่น STP25000TL-30).....	110
ภาพ 75 การแสดงผลการทำงานของระบบ.....	111
ภาพ 76 ขนาดการติดตั้งของระบบแยกตามอาคาร	111

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

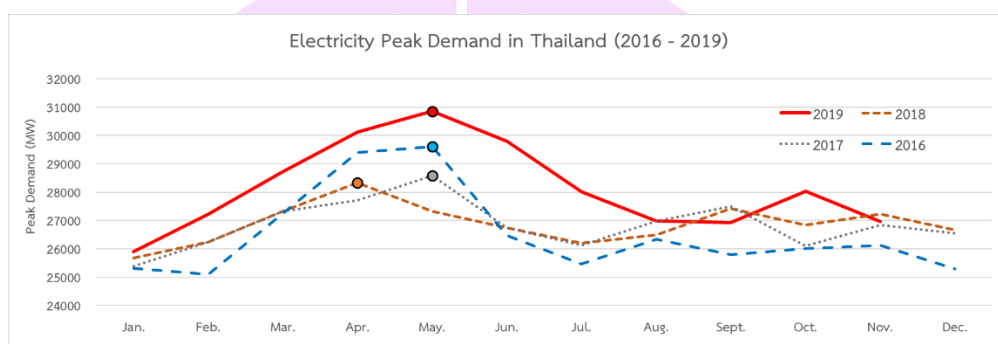
ไฟฟ้าจัดเป็นพลังงานที่มีการใช้งานหลากหลาย เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานประเภทอื่น ๆ และเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์รวมถึงใช้ในการสื่อสารและการคมนาคม ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า (Power generation system) จากโรงไฟฟ้า จากนั้นจึงส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านระบบส่ง (Power transmission system) โดยใช้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงไปยังระบบจำหน่าย (Power distribution system) เพื่อขายให้ผู้บริโภคไฟฟ้าในรอบหลายปีที่ผ่านมา ประเทศไทยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความต้องการพลังงานไฟฟ้าเป็นลำดับและมากขึ้นกว่า 30% ในปี พ.ศ.2562 เมื่อเปรียบเทียบกับย้อนหลังกับปริมาณความต้องการของการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในปี พ.ศ. 2551 โดยแนวโน้มดังกล่าวแสดงได้ดังภาพ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของกำลังการผลิตเมื่อเปรียบเทียบกับความต้องการไฟฟ้าทั้งประเทศระหว่าง ปี 2551 – 2562



ภาพ 1 กำลังการผลิตเทียบกับความต้องการไฟฟ้าทั้งประเทศ ปี 2551 – 2562 [1]

จากความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปีจึงมีความจำเป็นที่ต้องขยายกำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยด้วยการสร้างหรือหาแหล่งผลิต

ไฟฟ้ารวมถึงโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นในการผลิต การส่ง การจำหน่าย ที่เหมาะสมกับการใช้ไฟฟ้า ซึ่งภาพรวมการดำเนินการเหล่านี้เป็นการลงทุนขนาดใหญ่และต้องใช้ระยะเวลานานส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจเติบโตทางเศรษฐกิจจากความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มีคุณภาพและมีความเชื่อถือสำหรับการลงทุนในอนาคต ถ้าไม่มีโครงการขยายกำลังการผลิตไฟฟ้าอาจจะทำให้เกิดความขัดข้องในระบบไฟฟ้าที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายเป็นวงกว้างต่อทั้งระบบเศรษฐกิจและการพัฒนาของประเทศได้



ภาพ 2 เส้นโค้งภาระความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดสุทธิในระบบ [2]

จากภาพ 2 แสดงข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2559 ถึง 2562 แนวโน้มความต้องการใช้ไฟฟ้าที่ถูกลำเลียงในรูปแบบของเส้นโค้งภาระ (Load Curve) โดยภาระสูงสุดมีค่าสูงกว่าระดับ 31,000 MW โดยเกิดขึ้นในเดือนพฤษภาคม 2562 เวลา 14.27 น. เนื่องจากธรรมชาติของประเทศไทยซึ่งเป็นซึ่งเป็นประเทศที่ตั้งอยู่ในเขตร้อน ภาระหรือความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจะมีความสัมพันธ์กับช่วงที่อากาศร้อนที่สุดของปี ซึ่งปกติจะอยู่ระหว่างเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม โดยค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นกว่า 8% เมื่อเทียบกับค่าสูงสุดใกล้เคียงกันในปี 2560 และ 2561 ที่ 28,758 และ 28,338 MW ตามลำดับ ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้ามาจากการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับการปรับอากาศเพื่อรักษาอุณหภูมิอากาศในพื้นที่ต่าง ๆ ให้คงที่ตามความต้องการในกิจกรรมที่แตกต่างกัน ทำให้ความต้องการ (Demand) ใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศมากขึ้นตามไปด้วย

การใช้ไฟฟ้ารายสาขา ในช่วง ม.ค. – ต.ค. 2559						
สาขา	2556	2557	2558	2559 (ม.ค.-ต.ค.)	Δ (%) จากช่วงเดียวกัน ของปีก่อน	สัดส่วน (%)
ครัวเรือน	37,657	38,993	41,285	37,269	▲ 8.03	24.27
กิจการขนาดเล็ก	18,374	18,807	19,767	17,438	▲ 5.90	11.36
ธุรกิจ	30,413	31,362	33,218	29,389	▲ 6.20	19.14
อุตสาหกรรม	72,536	73,782	74,772	64,430	▲ 3.22	41.96
ส่วนราชการ และองค์กร ที่ไม่แสวงหากำไร*	149	152	179	168	▲ 14.26	0.11
เกษตรกรรม	354	414	386	231	▼ -32.82	0.15
การใช้ไฟฟ้า ที่ไม่คิดมูลค่า	2,379	2,517	2,743	2,441	▲ 7.97	1.59
อื่นๆ	2,479	2,592	2,479	2,172	▲ 5.89	1.41
รวมทั้งสิ้น	164,341	168,620	174,833	153,539	▲ 5.26	100.00

หน่วย: GWh

*ตั้งแต่เดือนตุลาคม 2555 เป็นต้นไป ผู้ใช้ไฟฟ้าที่เป็นหน่วยงานราชการจะถูกจัดเข้าประเภทธุรกิจ/กิจการขนาดเล็ก แยกแยะกรณี

ภาพ 3 การใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละสาขาของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [3]

เมื่อมาพิจารณาแยกตามประเภทของธุรกิจที่ใช้ไฟฟ้ามากที่สุดจากภาพ 3 จะเห็นได้ว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจากภาคอุตสาหกรรมมีสัดส่วนที่สูงที่สุดที่ 41.96% เพื่อทำการผลิตสินค้า ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะควบคุมการใช้ไฟฟ้าให้น้อยลงจากเหตุผลของกิจกรรมการใช้ไฟฟ้านับรองลงมาคือ ภาคครัวเรือนและภาคธุรกิจ โดยกิจกรรมหลักของการใช้พลังงานไฟฟ้าในส่วนนี้มาจากการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศในพื้นที่อาคารหรือบ้าน ปัจจัยหลักที่จะทำให้ลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้นั้นคือจะต้องลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศของการใช้ไฟในสาขานี้

ในภาพ 4 และ 5 เป็นตัวอย่างแสดงสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับอาคารของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา จากข้อมูลรายงานการจัดการพลังงานประจำปี 2557 และสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าอาคารแห่งประเทศไทย สำนักงานภาคเหนือ จากข้อมูลรายงานการจัดการพลังงานปี 2558

ระบบ	การใช้พลังงานไฟฟ้า		วิธีการ	
	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี	ร้อยละ	ประเมิน	ตรวจวัด
ปรับอากาศแบบรวมศูนย์	613,382.24	10.66		
ปรับอากาศแบบแยกส่วน	3,821,448.53	66.41		
แสงสว่าง	1,165,647.52	20.26		
อื่นๆ	154,079.41	2.68		
รวม	5,754,557.70	100.00		

ภาพ 4 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ประจำปี 2557 [4]

ระบบ	การใช้พลังงานไฟฟ้า		วิธีการ	
	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี	ร้อยละ	ประเมิน	ตรวจวัด
ปรับอากาศแบบรวมศูนย์	761,878.64	41.20		/
ปรับอากาศแบบแยกส่วน	352,276.41	19.05	/	
แสงสว่าง	184,922.00	10.00	/	
อื่นๆ	550,142.95	29.75	/	
รวม	1,849,220.00	100.00		

ภาพ 5 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าอาคารแห่งประเทศไทย สำนักงานภาคเหนือ
ประจำปี 2558 [5]

จากข้อมูลดังกล่าวเป็นตัวอย่างที่แสดงถึงสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารสาธารณะในประเทศไทยที่ชี้ให้เห็นถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศที่มีสัดส่วนสูงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนที่มากกว่า 60% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าอาคารหรืออาจจะประเมินเป็นค่าใช้จ่ายที่มากที่สุดของต้นทุนพลังงานในภาคธุรกิจ ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารเป็นหลัก

จากภาพรวมของภาระความต้องการไฟฟ้าสูงสุด หรือ Peak Demand (PD) ในประเทศไทย มาจากการใช้ไฟฟ้าสำหรับการปรับอากาศเป็นหลัก ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังการผลิตไฟฟ้ารวมของประเทศ หนึ่งในแนวทาง

แก้ปัญหาดังกล่าวในมักจะใช้เทคนิคของระบบบริหารจัดการพลังงาน (Energy Management System, EMS) ซึ่งเป็นระบบจัดการที่ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนหนึ่งของระบบดังกล่าวคือ “ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (Building Energy Management System, BEMS)” เป็นระบบที่ใช้ในการจัดการ ควบคุม และติดตามระบบพลังงานต่าง ๆ ภายในอาคาร เป็นระบบที่มีประโยชน์ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานภายในอาคาร โดยเฉพาะการประยุกต์มาใช้จัดการในการจัดการระบบปรับอากาศในอาคาร ผ่านการจัดเก็บข้อมูลผ่านระบบของสมาร์ทมิเตอร์ (Smart meter) เพื่อจัดการการตอบสนองโหลด (Demand Response, DR) โดย BEMS จะประเมินความสามารถในการตอบสนองด้านโหลดของอาคาร และสื่อสารกลับไปยังระบบควบคุมการตอบสนองด้านโหลดของการไฟฟ้า จากนั้น BEMS ก็จะสามารถสั่งการระบบต่าง ๆ ในอาคารและจะสื่อสารต่อไปยังระบบต่าง ๆ ให้ลดหรือปิดการใช้งานต่อไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในระบบ [6] โดยการพัฒนาการตอบสนองโหลดในระบบปรับอากาศมาเป็นเทคนิคการจัดการความต้องการไฟฟ้า (Demand Side Management, DSM) ที่สามารถพัฒนาเป็นรูปแบบเพื่อแก้ปัญหาความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการสร้างรูปแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สอดคล้องกันระหว่างการจัดการความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากผู้ใช้ไฟและความสามารถในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน

สำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ จะมุ่งเน้นศึกษาในด้านการจัดการพลังงานเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงในระบบการจัดการพลังงานอาคาร โดยเฉพาะการจัดการความต้องการไฟฟ้า (DSM) จากภาวะการปรับอากาศของอาคารซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละปี โดยแนวทางที่ได้จากการศึกษาจะเป็นทางเลือกหนึ่งในการส่งเสริมและการบริหารการใช้พลังงานไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมไม่มีผลกระทบกับการดำเนินกิจกรรมที่ทำอยู่เดิมเป็นการปรับเปลี่ยนแนวทางวิธีการใช้พลังงานให้คุ้มค่า ผลของการศึกษาสามารถพัฒนาเป็นแนวทางการสร้างรูปแบบการใช้พลังงานทดแทนร่วมกับการจัดการใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ช่วยลดภาระของประเทศในการจัดหาแหล่งพลังงานไฟฟ้าในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. พัฒนารูปแบบแนวทางการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศเพื่อลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในอาคาร
2. วิเคราะห์ผลตอบแทนจากการลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าด้วยตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์

ขอบเขตของการวิจัย

1. ขอบเขตด้านเนื้อหา

1.1 ศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนของระบบ Smart Grid UP อาคาร B3

1.2 ทดสอบเพื่อเก็บค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าและปริมาณการใช้ไฟฟ้าในระบบปรับอากาศสำหรับภาระความร้อนจากอากาศภายนอก

1.3 ศึกษารูปแบบระบบการจัดการพลังงานในอาคาร (Building Energy Management System, BEMS) ที่เหมาะสมเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศอาคาร

1.4 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศ

2. ขอบเขตด้านระยะเวลา

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นข้อมูลจากช่วงที่มีความต้องการพลังงานสูงสุดของประเทศไทย ในช่วงเดือนมีนาคม – เดือนพฤษภาคม

3. ขอบเขตด้านสถานที่

พื้นที่ต้นแบบการประเมินการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ อาคาร B3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

1. แนวทางการพัฒนารูปแบบระบบการจัดการพลังงานในอาคาร (BEMS) สำหรับการควบคุมค่าความต้องการและปริมาณพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบปรับอากาศโดยมีการตอบสนองการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ

2. รูปแบบระบบการจัดการพลังงานในอาคารเพื่อลดต้นทุนของการบริหารพลังงานในอาคารให้มีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่า

3. ทางเลือกสำหรับการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศที่เหมาะสมตามบริบทพื้นที่

กรอบแนวคิดงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยจะแบ่งรูปแบบการดำเนินงานเป็น 3 ส่วนหลักด้วยกัน เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ได้แก่

1. การศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนจากระบบ Smart Grid UP ของอาคาร B3มหาวิทยาลัยพะเยา ซึ่งจะเป็นการศึกษาเพื่อประเมินศักยภาพและข้อจำกัดของระบบเพื่อใช้ในการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศในอาคารต้นแบบ

2. การทดสอบการเพื่อประเมินรูปแบบความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศจากภาระความร้อนจากภายนอกอาคารและพื้นที่ต้นแบบ

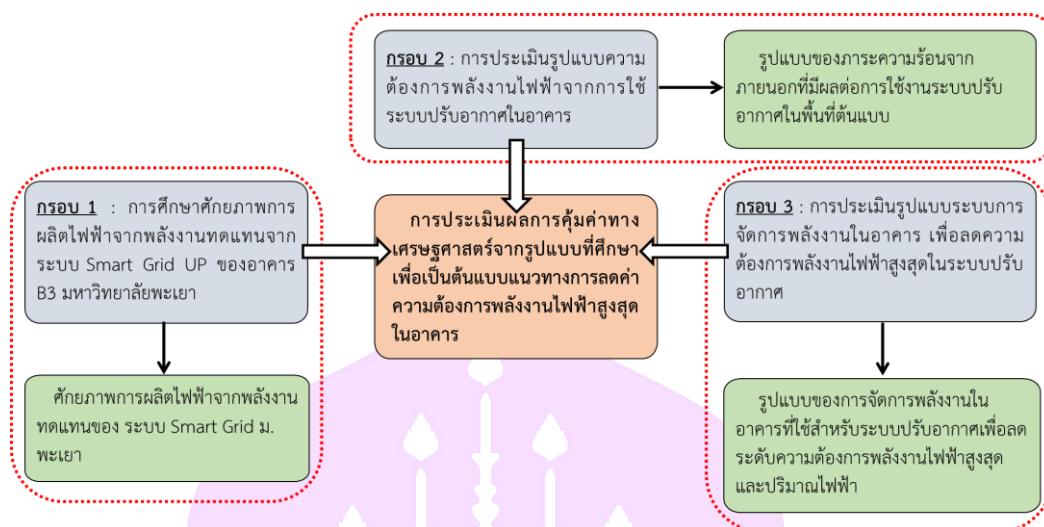
ผลที่คาดว่าจะได้รับจากศึกษาส่วนนี้ ได้แก่ รูปแบบของภาระความร้อนจากภายนอกที่มีผลต่อการใช้งานระบบปรับอากาศในพื้นที่ต้นแบบซึ่งจะถูกนำไปใช้พัฒนาเป็นรูปแบบการจัดการความต้องการใช้ไฟฟ้า (Demand Side Management : DSM) ที่เหมาะสมของระบบปรับอากาศในอาคาร

3. การประเมินรูปแบบระบบการจัดการพลังงานในอาคาร เพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในระบบปรับอากาศและทดสอบการจัดการในพื้นที่ต้นแบบ

ผลที่คาดว่าจะได้รับจากศึกษาส่วนนี้ ได้แก่ รูปแบบของการจัดการพลังงานในอาคารที่ใช้สำหรับระบบปรับอากาศที่ทำให้เกิดการลดลงทั้งระดับความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดและปริมาณไฟฟ้าและเพื่อเป็นข้อมูลเพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการจัดการพลังงาน

ส่วนสรุปของงานวิจัย จะได้รูปแบบที่เหมาะสมของการจัดการพลังงานในอาคารตามบริบทพื้นที่ตั้งอาคาร เพื่อลดการค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่มีการผลิตไฟฟ้ามีต้นทุนเพิ่มสูงหรือในช่วงเวลาที่เกิดความเสี่ยงต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในส่วนที่เป็นผลกระทบโดยตรงกับภาระของการปรับอากาศ

โดยกรอบแนวคิดของงานวิจัยสามารถแสดงโดยสรุปได้ตามภาพ 6



ภาพ 6 ภาพรวมของกรอบแนวคิดของการวิจัย

นิยามศัพท์

Energy Management System, EMS หรือระบบบริหารจัดการพลังงาน คือระบบอัตโนมัติที่นำเข้ามาใช้ในการควบคุมให้การผลิต การส่งพลังงาน รวมถึงให้การใช้พลังงานนั้นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ด้านพลังงานไฟฟ้าและยังครอบคลุมถึงพลังงานในรูปแบบอื่น ๆ ที่ใช้ในอาคาร เช่น พลังงานความร้อน เป็นต้น ระบบบริหารจัดการพลังงานจะอาศัยการทำงานประสานกันระหว่าง อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) สมาร์ทมิเตอร์ (Smart meter) และระบบควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติ (Actuator หรือ Controller) บนโครงสร้างของระบบเทคโนโลยีและสารสนเทศ (Information technology: IT) โดยอาจมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและระบบกักเก็บพลังงานร่วมด้วยเพื่อให้บริหารจัดการการใช้ไฟฟ้าเป็นไปอย่างเกิดประโยชน์สูงสุด [8]

Building Energy Management System, BEMS หรือระบบการจัดการพลังงานในอาคารคือระบบที่ช่วยในการจัดการ ควบคุม และติดตามระบบพลังงานต่าง ๆ ภายในอาคาร โดยจะรวบรวมข้อมูลที่ตรวจวัดในส่วนต่าง ๆ ประมวลผล และส่งข้อมูลที่จำเป็น ให้ผู้ควบคุมระบบของอาคารเข้าใจถึงลักษณะการใช้พลังงานในอาคาร อันจะเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานภายในอาคาร

Peak Demand, PD หรือ ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด คือความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงสุดในกิจกรรมต่าง ๆ ทั้งส่วนธุรกิจ อุตสาหกรรมและในครัวเรือน ในแต่ละเดือน โดยได้จากการวัดค่าพลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดใน 15 นาทีใด ๆ ในเดือนนั้น ๆ สำหรับการประเมิน

ความต้องการไฟฟ้าของประเทศไทยที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในพื้นที่ส่วนไหนและจากผู้ใช้ไฟฟ้ากลุ่มใด มีความจำเป็นต้องมีการศึกษาและวิเคราะห์การใช้ไฟฟ้าเพื่อนำไปพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าระยะปานกลางและระยะยาวในการวางแผนการพัฒนาไฟฟ้าของประเทศ

Demand Response, DR หรือเทคโนโลยีการตอบสนองโหลด (ตามนิยามของ Federal Energy Regulatory Commission หรือ FERC) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ไฟฟ้าที่ต่างไปจากปกติ เพื่อตอบสนองต่ออัตราค่าไฟฟ้า (Electricity Price) หรือเงินสนับสนุน (Incentive Payment) ที่กำหนดขึ้นเพื่อกระตุ้นให้ลดการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่การผลิตไฟฟ้ามีต้นทุนเพิ่มสูงมาก หรือในช่วงเวลาที่เกิดความเสี่ยงต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้า

Demand Side Management, DSM หรือ การจัดการด้านการใช้พลังงาน คือ เทคนิคหรือแนวทางที่ผู้ให้บริการด้านไฟฟ้าดำเนินการหรือสนับสนุนให้ผู้ใช้ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงการใช้ไฟฟ้าทั้งระดับความต้องการใช้ไฟฟ้ารวมถึงช่วงเวลาที่ใช้ไฟฟ้า เพื่อสร้างรูปแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สอดคล้องกับที่ผู้ให้บริการด้านไฟฟ้าต้องการและผู้ใช้ไฟฟ้าพึงพอใจ ซึ่งจะช่วยให้ด้านไฟฟ้าที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพ เกิดประโยชน์สูงสุดแทนการก่อสร้างโรงไฟฟ้าหรือระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพิ่มเติม [7] โดยในงานวิจัยนี้จะเน้นวิธีการจัดการเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การจัดการด้านการอนุรักษ์พลังงานและการบริหารการใช้พลังงาน ผ่านแนวทาง DSM Techniques หรือ การบริหารการใช้โหลด (Load management)

Thermal Energy Storage, TES หรือระบบกักเก็บพลังงานในรูปแบบความร้อนคือรูปแบบหนึ่งในระบบกักเก็บพลังงานที่สามารถปลดปล่อยพลังงานออกมาได้เมื่อต้องการสำหรับการจัดการพลังงาน ได้แก่ การกำหนดให้ระบบใช้งานในช่วงที่มีต้นทุนการใช้พลังงานสูงและเก็บพลังงานในรูปแบบความร้อนหรือความเย็นในช่วงต้นทุนพลังงานต่ำ

Chilled Water Thermal Storage, CWTS หรือการสำรองพลังงานในรูปแบบน้ำเย็น คือระบบที่ถูกออกแบบเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศในอาคาร โดยการปรับเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้า (Load Shifting)

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษา “การพัฒนากระบวนการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในอาคาร” มุ่งหวังให้เกิดต้นแบบด้านการจัดการพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับอาคารการเพื่อลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากภาระการปรับอากาศของอาคารซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละปี แนวทางการดำเนินงานจะเริ่มจากการศึกษารูปแบบของศักยภาพของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่ติดตั้งในอาคารต้นแบบและภาระความร้อนจากภายนอกที่มีผลต่อการใช้ระบบปรับอากาศ ซึ่งจะถูกนำไปใช้พัฒนาเป็นรูปแบบการจัดการความต้องการใช้ไฟฟ้า (Demand Side Management : DSM) ที่เหมาะสมกับระบบปรับอากาศในอาคาร โดยหัวข้อความรู้และแนวคิดที่จะใช้ประกอบการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

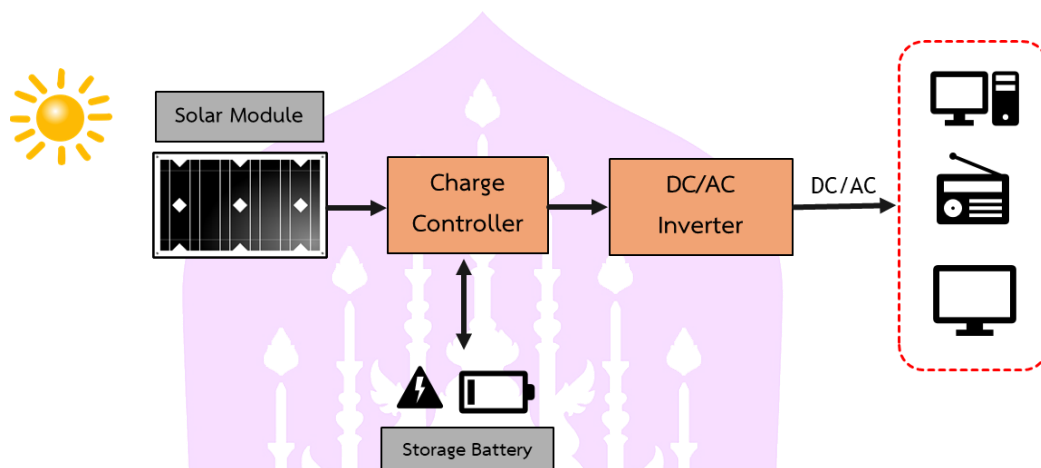
1. แนวคิดสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทน (Renewable Energy)

การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนถูกพิจารณาเป็นทางเลือกหลักสำหรับพลังงานไฟฟ้าในอนาคต เนื่องจากมีต้นทุนที่ถูกรวมถึงแนวโน้มของการเกิดปัญหาของสิ่งแวดล้อมต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการผลิตไฟฟ้าในอดีต สำหรับงานวิจัยนี้ จะศึกษาศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้าในการสร้างแบบจำลองทางเลือกสำหรับการจัดการพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด

การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) หรือ PV (Photo Voltaic)

หมายถึง กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของแสงบนวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Silicon) แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide) อินเดียม ฟอสไฟด์ (Indium Phosphide) แคดเมียม เทลลูไรด์ (Cadmium Telluride) และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เมื่ออุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง ก็จะเปลี่ยนเป็นตัวนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวก (+) และลบ (-) เพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับ

อุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์ที่สามารถใช้ได้ ขณะเดียวกัน ถ้าต้องใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ไฟฟ้ากระแสตรงจะต้องผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าหรือ Inverter ก่อนซึ่งจะทำให้สามารถทำงานได้ โดยรูปแบบการทำงานของ การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้งานแสดงดังภาพ 7



ภาพ 7 แผนภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้งาน

ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline) หรือ Multicrystalline โดยคุณสมบัติของแผงรับรังสีอาทิตย์ที่เลือกใช้ในการทดสอบแสดงได้ดังภาพ 8

MECHANICAL DATA	
Cells	polycrystalline, 156 mm ²
No. of cells and connections	60 in series(6strings)
Dimensions (LxWxD)	1,652x994x46 mm
Weight	19.0 kg
Front glass	Low iron tempered glass, 3mm
Frame	Anodized aluminum alloy, silver
Connection Box	IP-rating ES, 3 bypass diodes
Cable	4mm ² /1000±50 mm
Connector	MC4 PV-KBT4/PV-KST4, IP-rating 67

Electrical data (at STC*)	
ND-AA250	
Maximum power	P _{max} 250 W _p
Tolerance of P _{max}	+5% / -0%
Open-circuit voltage	V _{oc} 37.39 V
Short-circuit current	I _{sc} 8.81 A
Voltage at point of maximum power	V _{mpp} 30.68 V
Current at point of maximum power	I _{mpp} 8.15 A
Module efficiency	η _m 15.2 %

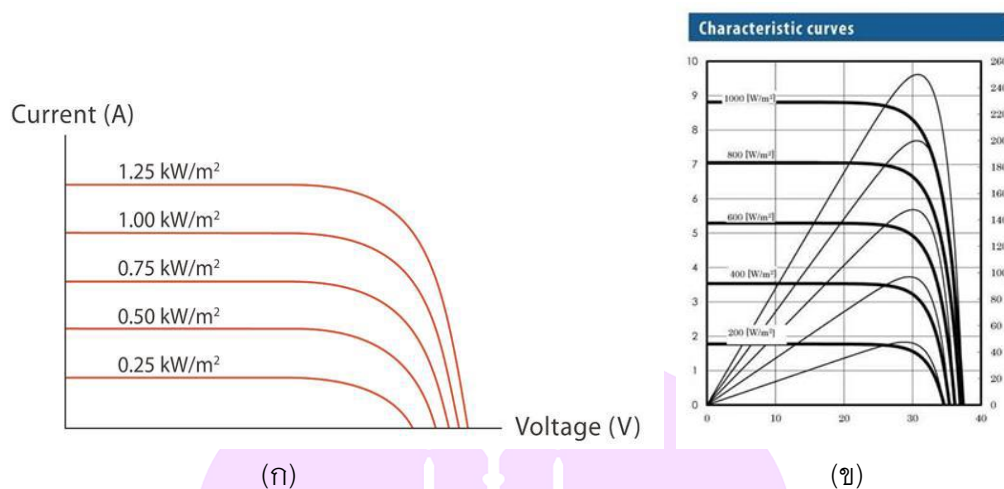
250W ND-AA250
Polycrystalline silicon photovoltaic modules

ภาพ 8 คุณสมบัติแผงรับรังสีอาทิตย์ที่เลือกใช้ในงานวิจัย (ข้อมูลจากผู้ผลิต)

ข้อดีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ คือกระบวนการที่ใช้ผลิตทำได้ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่ารวมถึงปริมาณของเสียซิลิกอนจะน้อยกว่าแบบโมโนคริสตัลไลน์ โดยที่ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์อยู่ที่ร้อยละ 13-16 เนื่องจากความบริสุทธิ์ของซิลิกอนที่ต่ำกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตัลไลน์ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าที่ร้อยละ 15-20 นอกจากนี้ชนิดของวัสดุซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าแล้ว ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ [8]

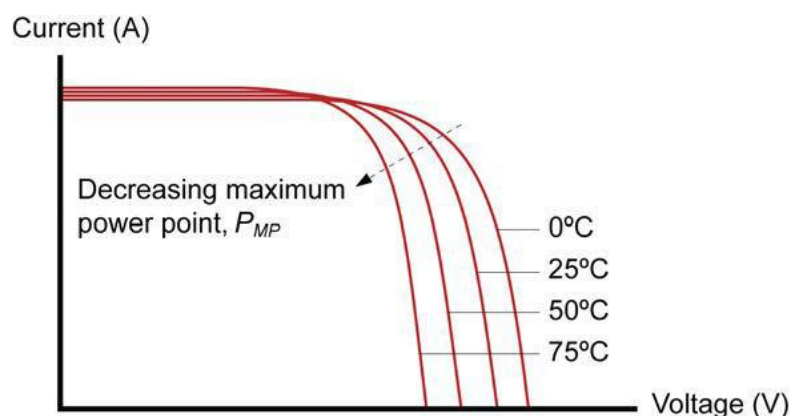
การยึดและการติดตั้งแผงรับรังสีอาทิตย์ เป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพ โดยทั่วไปในประเทศไทยจะติดตั้งให้ระนาบแผงรับรังสีอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ โดยมีความชันประมาณ 15 องศาจากพื้นดิน ซึ่งการยึดและติดตั้งแผงนั้นมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพโดยรวมของแผงหรือทั้งระบบ ถ้าติดตั้งไปผิดทิศหรือความชันแผงจากพื้นไม่เหมาะสม กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็จะลดลงไปอย่างมาก

ความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสงหรือรังสีแสงอาทิตย์ นั่นคือเมื่อความเข้มของแสงสูง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งจะกล่าวว่า กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะสูงขึ้นแต่แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้แทบจะไม่แปรไปตามความเข้มของแสงมากนักดังในภาพ 9 (ก) และ ภาพ 9 (ข) เป็นคุณสมบัติของแสงที่ใช้ในการศึกษา ความเข้มของแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐานคือความเข้มของแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ปราศจากเมฆหมอกและวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ตัวอย่างเช่น ความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ 100 เมกะวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร หรือ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM 1.5 (Air Mass 1.5) และถ้าแสงอาทิตย์ ทำมุม 60 องศากับพื้นโลกความเข้มของแสงจะมีค่าเท่ากับประมาณ 75 เมกะวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร หรือ 750 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM 2 กรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะใช้ค่า AM 1.5 เป็นมาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพของแผง



ภาพ 9 (ก) ผลของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ต่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิต [9]
 (ข) คุณสมบัติแผงรับรังสีอาทิตย์ที่ศึกษา (ข้อมูลจากผู้ผลิต)

อุณหภูมิรับรังสีแสงอาทิตย์ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะไม่แปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุก ๆ 1 องศาเซลเซียส ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงร้อยละ 0.5 ดังแสดงในภาพ 10 และมาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงแสงอาทิตย์จะถูกกำหนดจากการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น กำหนดไว้ว่าแผงแสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด (Open Circuit Voltage หรือ V_{oc}) ที่ 21 โวลต์ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก็จะหมายความว่าแรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงแสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเท่ากับ 21 โวลต์ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เช่น อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงแสงอาทิตย์ลดลงร้อยละ 2.5 (ร้อยละ 0.5×5 องศาเซลเซียส) นั่นคือ แรงดันของแผงแสงอาทิตย์ที่ V_{oc} จะลดลง 0.525 โวลต์ ($21 \text{ โวลต์} \times \text{ร้อยละ } 2.5$) เหลือเพียง 20.475 โวลต์ ($21 \text{ โวลต์} - 0.525 \text{ โวลต์}$) สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันไฟฟ้าก็จะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงแสงอาทิตย์ลดลงด้วย



ภาพ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันไฟฟ้า ของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ [9]

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยประกอบอื่น ๆ อีก นั่นคือ **วัสดุที่นำมาประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์** เช่น กระจกก็มีผลต่อประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน กระจกที่ใช้จะต้องลดการสะท้อนของแสงให้น้อยที่สุดก่อนที่แสงจะผ่านไปถึงเซลล์ด้านใน **เงาบังแสง** โดยเงาที่บังแผงรับแสงในบางส่วนก็มีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของทั้งระบบด้วยเนื่องจากส่วนมากแล้วระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ แผงจะต่อวงจรเป็นแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันที่ออกแบบไว้ เมื่อมีเงาบางส่วนบังแสงของแผงรับแสงอาทิตย์เพียงแค่หนึ่งแผงก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าในระบบหยุดไหลได้ สุดท้าย **อายุการใช้งาน** โดยประสิทธิภาพของแผงจะค่อย ๆ ลดลงตามอายุการใช้งาน จากการประเมินแผงรับแสงจะผลิตพลังงานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 0.5 – 1 ในทุก ๆ ปี ผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์มักเสนอการรับประกันว่าการจ่ายพลังงานจะสูงกว่าร้อยละ 80 หลังจาก 25 ปีไปแล้ว

2. เทคโนโลยีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการจัดการพลังงาน [6]

ระบบบริหารจัดการพลังงาน (Energy Management System: EMS)

เป็นระบบอัตโนมัติที่นำเข้ามาใช้ในการควบคุมให้การผลิต การส่ง พลังงาน รวมถึงให้การใช้พลังงานนั้นเป็นไปอย่างเหมาะสมที่สุด ความหมายของระบบบริหารจัดการพลังงานนั้นค่อนข้างกว้างโดยมิได้หมายถึงเฉพาะพลังงานไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังครอบคลุมถึงพลังงานในรูปแบบอื่นด้วย เช่น พลังงานความร้อน เป็นต้น ซึ่งการบริหารจัดการพลังงานในด้านของผู้ใช้ไฟฟ้าจะกล่าวถึง ระบบบริหารจัดการพลังงานในบ้านเรือน (Home Energy Management System: HEMS) ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (Building Energy Management System: BEMS) และระบบการจัดการพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม (Factory

Energy Management System: FEMS) ระบบบริหารจัดการพลังงานในปัจจุบันสามารถควบคุมการทำงานประสานกันระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) สมาร์ทมิเตอร์ (Smart Meter) และระบบควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าอัตโนมัติ (Actuator หรือ Controller) บนโครงสร้างของระบบเทคโนโลยีและสารสนเทศ (Information Technology: IT) รวมถึงยังสามารถควบคุมเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่จะเข้ามามีส่วนในระบบไฟฟ้ามากขึ้น เช่น การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนและระบบกักเก็บพลังงาน เป็นต้น ระบบบริหารจัดการพลังงานจะรับข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ ที่กระจายตัวอยู่ทั่วไป เช่น ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์หรือระบบต่าง ๆ ในช่วงเวลานั้นได้ ระบบที่มีขีดความสามารถในระดับที่สูงขึ้นจะสามารถเชื่อมโยงข้อมูลอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น สภาพอากาศ ราคาไฟฟ้าในช่วงเวลาต่าง ๆ จากหน่วยงานด้านการไฟฟ้า โดยข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาประมวลผลในส่วนกลางเพื่อการแสดงผลอย่างเป็นระบบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้ามีความเข้าใจพฤติกรรมการใช้พลังงานของตนเองมากขึ้น ซึ่งทำให้สามารถระบุแนวทางหรือศักยภาพที่เป็นไปได้ในการปรับเปลี่ยนการใช้พลังงานให้เหมาะสมมากขึ้น นอกจากนี้ระบบจะใช้ข้อมูลที่รวบรวมมาในการประมวลผลและวิเคราะห์ผลเพื่อหาแนวทางการบริหารจัดการพลังงานที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยการวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมที่สุดตามข้อกำหนดของผู้ใช้ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจจะเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดในเชิงเศรษฐศาสตร์ได้แก่ บริหารจัดการพลังงานให้เกิดผลการประหยัดในเชิงการเงินมากที่สุดหรือจุดที่เหมาะสมที่สุดในเชิงพลังงาน คือบริหารจัดการพลังงานให้เกิดผลประหยัดหน่วยการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดในบางกรณีอาจรวมถึงการงดใช้พลังงานหรือการลดการใช้พลังงานให้เหลือน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามจะต้องไม่ทำให้ความสามารถในการทำงานหรือผลิตภาพ (Productivity) ลดลงรวมถึงต้องไม่ก่อให้เกิดผลเสียทางสุขภาพใด ๆ กับผู้ที่อาศัยหรือทำงานอยู่ในพื้นที่นั้น ๆ ระบบบริหารจัดการพลังงานยังสามารถทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้าได้โดยตรงแม้จะไม่ได้อยู่ในสถานที่นั้น ๆ โดยผ่านทางอุปกรณ์เคลื่อนที่และอินเทอร์เน็ต เช่น สามารถกำหนดการเปิด-ปิดเครื่องใช้ไฟฟ้า ผ่านทางโทรศัพท์เคลื่อนที่

เทคโนโลยีการตอบสนองโหลดหรือความต้องการ (Demand Respond: DR)

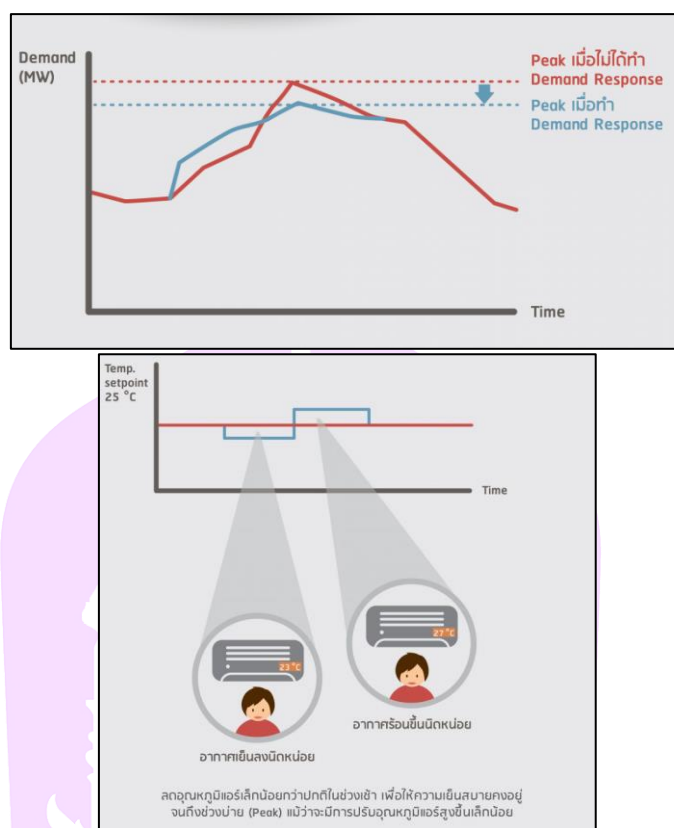
เป็นเทคโนโลยีสำหรับการเชื่อมโยงและตอบสนองระหว่างอุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านของผู้บริโภคและอาคารสำนักงาน โดยเทคโนโลยีนี้ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถจัดการระดับความต้องการพลังงานไฟฟ้าโดยการปรับปริมาณค่าความต้องการไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งานและข้อจำกัด การบริหารจัดการดังกล่าวจะถูกประยุกต์ใช้ในบริบทของการผลิตไฟฟ้าเองในพื้นที่เป้าหมายจากพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดการบริหารจัดการด้านพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพหรืออาจจะกล่าวได้ว่า การตอบสนอง

ด้านโหลด (Demand Response: DR) คือ การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมและรูปแบบการใช้ไฟฟ้าไปจากปกติของผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งอยู่ทางด้านอุปสงค์ (Demand) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตอบสนองต่อความจำเป็นที่เกิดขึ้นในการบริหารจัดการระบบไฟฟ้าหรือเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงราคาค่าไฟฟ้าในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ หรือต่อผลตอบแทน (Incentive) ที่ออกแบบมาเพื่อโน้มน้าวให้ผู้ใช้ไฟฟ้าเปลี่ยนหรือลดการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ราคาค่าไฟฟ้าสูง หรือในขณะที่ความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะผิดปกติ

ประโยชน์ของการตอบสนองด้านโหลด

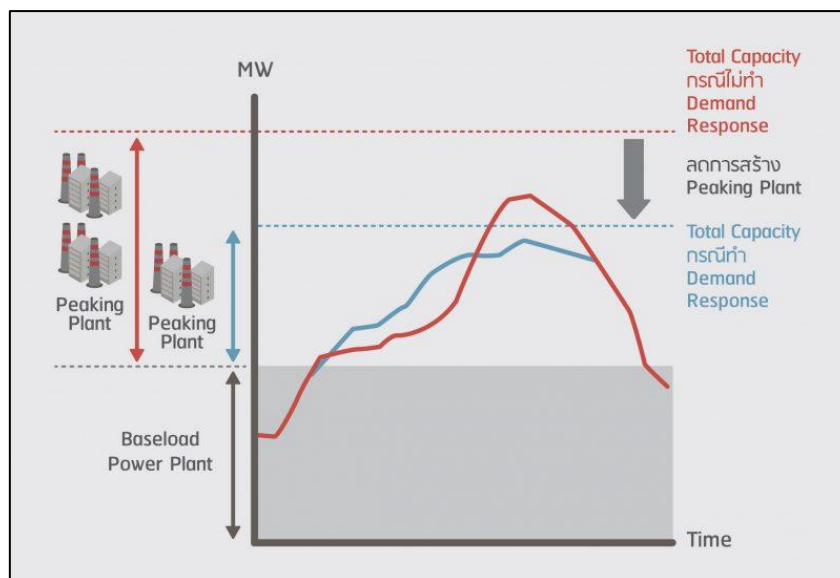
การตอบสนองด้านโหลดนั้นมีประโยชน์หลากหลายด้วยกัน แต่ประโยชน์ที่สามารถเห็นได้ชัดเจน มากที่สุดก็คือ การลดหรือชะลอการสร้างโรงไฟฟ้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Peaking Plant) ดังแสดงในภาพ 11 เส้นสีแดงที่บ่งชี้การใช้ไฟฟ้าตามปกติของประเทศ ซึ่งนำไปสู่ค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดดังแสดงด้วยเส้นสีแดงประในกรณีที่มีการดำเนินการตอบสนองด้านโหลดค่าความต้องการไฟฟ้าในช่วงเวลาต่าง ๆ จะเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีปกติ อันเนื่องมาจากการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของ ผู้บริโภค ในกรณีตัวอย่างการปรับปรุงโดยการเปลี่ยนระดับการตั้งค่าอุณหภูมิของระบบปรับอากาศสามารถแสดงได้ด้วยเส้นสีฟ้าที่บ่งชี้ ซึ่งจะนำไปสู่ค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดที่จำเป็นดังแสดงด้วยเส้นสีฟ้าประ





ภาพ 11 ตัวอย่างของการดำเนินการตอบสนองด้านโหลดโดยการปรับปรุงการตอบสนองด้านโหลดปรับอากาศ [6]

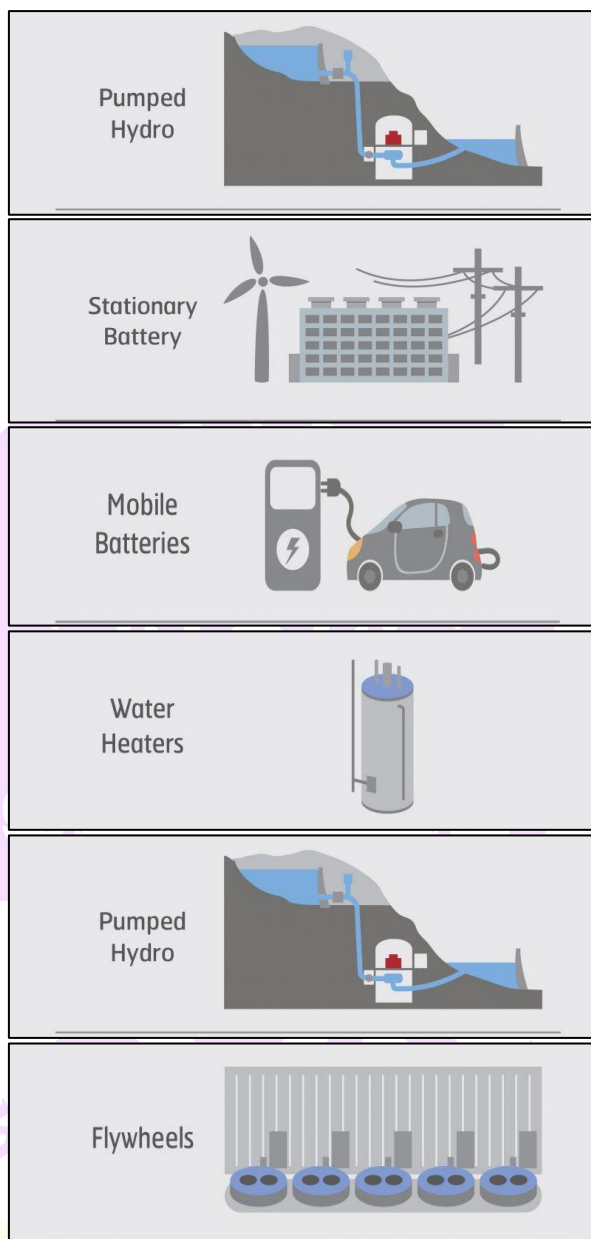
การที่จะตอบสนองต่อความต้องการไฟฟ้าในช่วงเวลาต่าง ๆ หน่วยงานด้านการไฟฟ้าจะต้องวางแผนการผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อค่าความต้องการไฟฟ้า ซึ่งการผลิตไฟฟ้าเพื่อรองรับความต้องการนั้นสามารถจำแนกได้เป็นสองส่วนหลัก ๆ คือโรงไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้าตามความต้องการฐาน (Baseload Power Plant) และโรงไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Peaking Plant) โดย Baseload Power Plant เป็นโรงไฟฟ้าที่ต้องเดินเครื่องอยู่ตลอดเวลา ด้วยกำลังการผลิตที่ค่อนข้างคงที่ (แสดงดังภาพ 12 เป็นแถบสีเทาเข้ม) โรงไฟฟ้างอกกล่าวจึงมักจะใช้เชื้อเพลิงราคาถูกเป็นลำดับแรก เช่น โรงไฟฟ้าพลังความร้อนถ่านหิน (เช่น โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง) เป็นต้น สำหรับกำลังการผลิตส่วนที่เหลือนั้นจะมาจาก Peaking Plant ซึ่งมีลักษณะของการเดินเครื่องเฉพาะในช่วงเวลาที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด ได้แก่ โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ ซึ่งใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง เชื้อถ่าน และโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับ เป็นต้น



ภาพ 12 ประโยชน์ของการตอบสนองด้านโหลด (Demand Response) ในการลดการ
สร้าง Peaking Plant [6]

ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS)

ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS) หมายถึง ระบบหรืออุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อกักเก็บไว้ใช้งานในเวลาอื่นเมื่อจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงานจะแปลงพลังงานที่กักเก็บไว้กลับมาเป็นพลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ได้อีกครั้งและจ่ายคืนสู่ระบบต่อไป โดยการแปลงรูปพลังงานไปมานั้นจะเกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วนไป ดังนั้นระบบกักเก็บพลังงานที่ดีจะต้องมีความสูญเสียในกระบวนการแปลงรูปพลังงานให้น้อยที่สุด ภาพ 13 แสดงตัวอย่างประเภทของระบบกักเก็บพลังงานซึ่งมีอยู่อย่างหลากหลาย โดยสามารถแบ่งตามรูปแบบของพลังงานที่กักเก็บ เช่น กักเก็บพลังงานในรูปแบบของพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ พลังงานเคมี นอกจากนี้ระบบกักเก็บพลังงานมีตั้งแต่ขนาดเล็กระดับเพียงไม่กี่วัตต์ เช่น แบตเตอรี่ โทรศัพท์เคลื่อนที่ ถ่านไฟฉาย ไปจนถึงขนาดใหญ่ระดับหลายเมกะวัตต์ เช่น แบตเตอรี่ลิเธียมระบบโครงข่ายไฟฟ้า โรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับ เป็นต้น

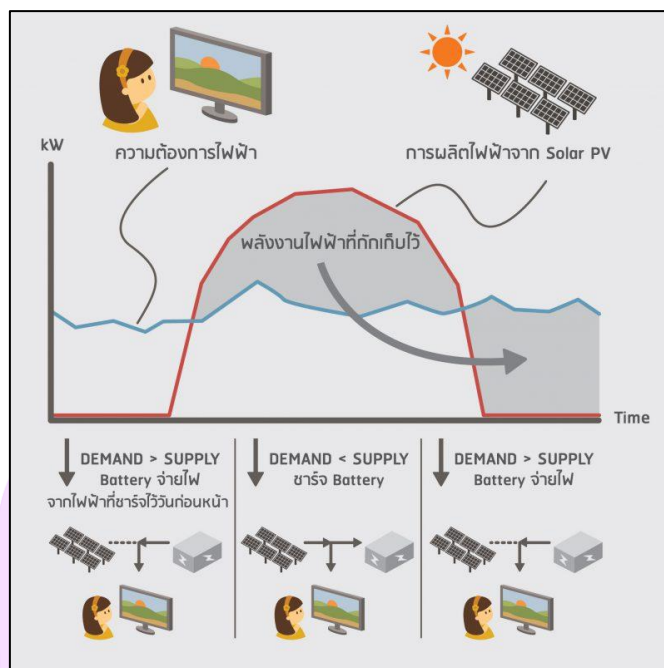


ภาพ 13 ระบบกักเก็บพลังงานรูปแบบต่าง ๆ [6]

ระบบกักเก็บพลังงานที่สำคัญ คือระบบที่กักเก็บพลังงานในรูปแบบของพลังงานเคมี นั่นคือ แบตเตอรี่ โดยครอบคลุมทั้งแบตเตอรี่แบบติดตั้งอยู่กับที่ (Stationary Battery) หรือแบตเตอรี่ติดตั้งในยานพาหนะไฟฟ้า (Mobile Battery) แบตเตอรี่เป็นเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานที่กำลังเติบโตอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน มีการพัฒนาและใช้งานเทคโนโลยีแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ในการสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าและเพื่อรองรับยานยนต์ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีระบบกักเก็บพลังงานประเภทอื่น ๆ ที่ยังไม่ได้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น การกักเก็บ

พลังงานในรูปแบบของพลังงานจลน์ ถึงเก็บความร้อนหรือความเย็น เป็นต้น จากวัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยในบริบทของการใช้พลังงานจะเป็นรูปแบบของการจัดการภาระร้อนในอาคาร หรือการปรับอากาศซึ่งไม่ได้เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้าโดยตรงดังนั้นรูปแบบถึงเก็บความเย็นจึงถูกพิจารณาใช้ในการศึกษานี้ โดยระบบกักเก็บพลังงานแบบต่าง ๆ มีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกันไป คุณสมบัติสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเปรียบเทียบ เช่น พิกัดกำลัง ระยะเวลาในการจ่ายพลังงาน ประสิทธิภาพในการชาร์จและจ่ายไฟฟ้าหรือพลังงาน อายุการใช้งาน ราคาต่อความจุไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) ราคาต่อกำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์) เป็นต้น

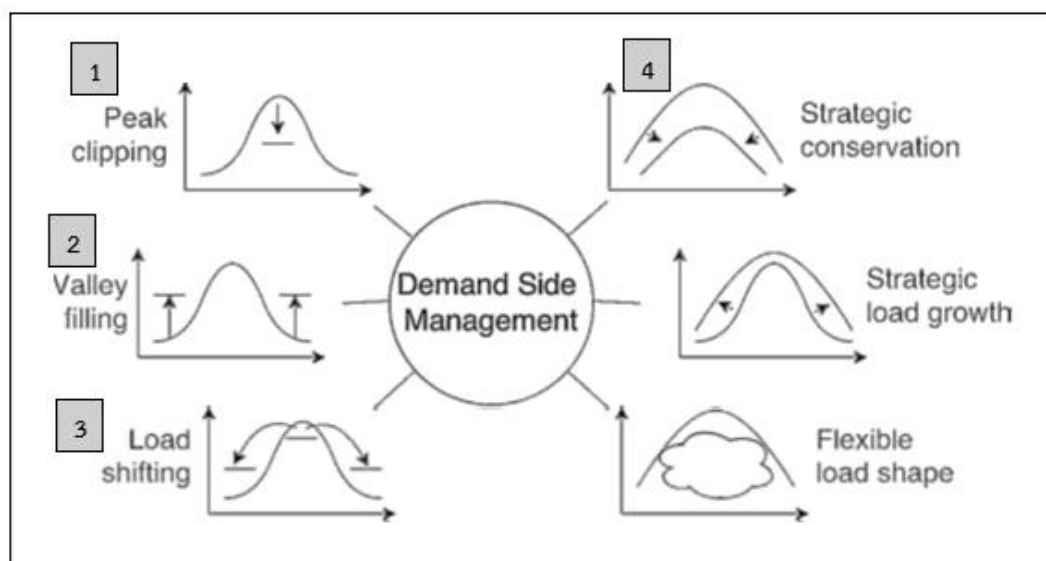
ระบบกักเก็บพลังงานมีความจำเป็นสำหรับระบบไฟฟ้าในอนาคตเป็นอย่างมาก ประโยชน์หลักของระบบกักเก็บพลังงาน คือ การสนับสนุนการรักษาสมดุลของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะ ในระบบที่มีพลังงานหมุนเวียนที่มีความไม่แน่นอนในสัดส่วนสูง รวมถึงยังสนับสนุนการตอบสนองด้านโหลดและช่วยรักษาเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้า ทั้งนี้รูปแบบการผลิตไฟฟ้าดังกล่าวอาจจะไม่สอดคล้องกับรูปแบบการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟ ตัวอย่างเช่น ในบ้านที่ไม่มีคนอยู่อาศัยในช่วงกลางวันจะไม่มีการใช้เครื่องอุปกรณ์ไฟฟ้าในบ้านมากนัก ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะมีกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดในช่วงเที่ยงวัน แต่จะมีความต้องการไฟฟ้าน้อยมากในช่วงเวลาดังกล่าว จึงทำให้การใช้ไฟฟ้าที่ผลิตได้จึงไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร อย่างไรก็ตามเมื่อมีการนำระบบกักเก็บพลังงานมาใช้จะสามารถนำไฟฟ้าที่ผลิตได้มากขึ้นในช่วงกลางวันจากการนำมาเก็บไว้ก่อนในช่วงที่ยังไม่มีความต้องการใช้ไฟฟ้า จากนั้นจึงใช้ไฟฟ้าที่กักเก็บไว้ในช่วงเย็นหรือหัวค่ำ ดังแสดงจากภาพ 14 ซึ่งเป็นตัวอย่างของการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานประเภทแบตเตอรี่ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



ภาพ 14 ตัวอย่างการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานประเภทแบตเตอรี่
ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การจัดการรูปแบบการตอบสนองด้านโหลด

ในการตอบสนองด้านโหลดมีหลายรูปแบบ บริบทและบทบาทของการตอบสนองด้านโหลดไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะแค่การประหยัดพลังงานเท่านั้น การตอบสนองด้านโหลดบางประเภทอาจจะนำไปสู่การใช้ไฟฟ้าในภาพรวมในปริมาณที่เท่าเดิมหรือแม้กระทั่งเป็นการเพิ่มการใช้ไฟฟ้าขึ้นในบางช่วงเวลา รูปแบบของการตอบสนองโหลดเป็นส่วนหนึ่งของแนวคิดการจัดการการใช้ไฟฟ้า (Demand Side Management : DSM) เป็นแนวทางให้ผู้ใช้ไฟฟ้าเปลี่ยนรูปแบบการใช้ไฟฟ้าทั้งระดับความต้องการใช้ไฟฟ้ารวมถึงช่วงเวลาที่ใช้ไฟฟ้าเพื่อสร้างรูปแบบความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สอดคล้องกับที่ผู้ให้บริการด้านไฟฟ้าต้องการโดยไม่กระทบกับความพึงพอใจของผู้ใช้ไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อให้สามารถใช้สาธารณูปโภคด้านไฟฟ้าที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพเกิดประโยชน์สูงสุดแทนการก่อสร้างโรงไฟฟ้าหรือระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพิ่มเติม ตัวอย่างรูปแบบพื้นฐานของการตอบสนองโหลดแสดงได้ดังภาพ 15



ภาพ 15 เทคนิคพื้นฐานการจัดการด้านพลังงานในการตอบสนอง
ด้านโหลดรูปแบบต่าง ๆ [10]

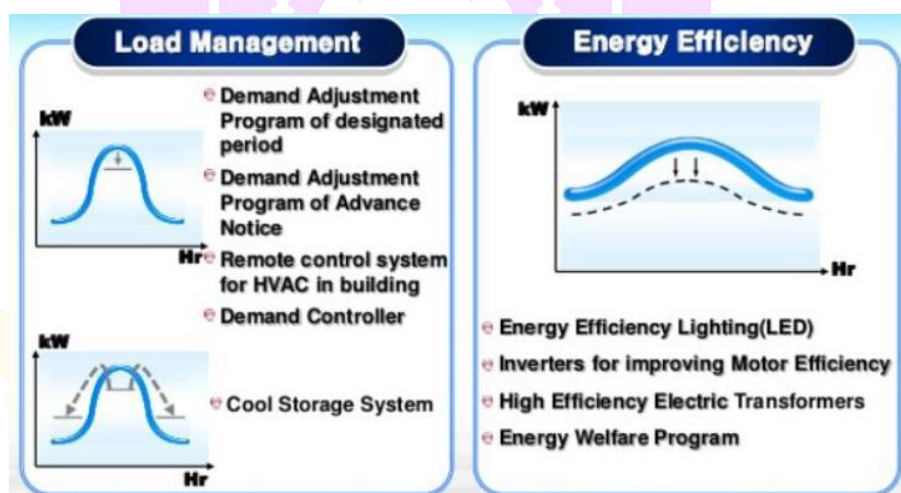
สำหรับในงานวิจัยนี้ จะศึกษารูปแบบตอบสนองโหลดหรือความต้องการ (Demand Respond: DR) จากระบบปรับอากาศในอาคารเพื่อใช้สำหรับการวางแผนและจัดการพลังงานไฟฟ้า โดยเลือกรูปแบบที่สนใจจากภาพ 15 ในรูปแบบที่ 1- 4

1. การดำเนินการตอบสนองด้านโหลดแบบตัดลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Peak Clipping) คือการลดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุด โดยการงดหรือลดการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ค่าความต้องการไฟฟ้าของประเทศขึ้นสูงสุด

2. การดำเนินการตอบสนองด้านโหลดแบบ Valley Filling เป็นการเพิ่มโหลดในการศึกษานี้จะเป็นการตอบสนองด้านโหลดกรณีที่มีการผลิตไฟฟ้าในปริมาณที่มากกว่าความต้องการไฟฟ้าหรือมีการผลิตไฟฟ้าส่วนเกินจากแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ซึ่งกำลังการผลิตไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเหล่านี้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ ณ เวลานั้น การตอบสนองด้านโหลดในรูปแบบ Valley Filling จึงมีประโยชน์ในการบริหารจัดการระบบการจัดการโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานซาร์จไฟฟ้าส่วนเกิน เข้าระบบกักเก็บพลังงานเพื่อรักษาให้ค่าความต้องการไฟฟ้าเท่ากับกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ไม่สามารถควบคุมได้โดยตรงในช่วงเวลานั้นและสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้โดยไม่จำเป็นต้องปลดโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนออกจากระบบ

3. การดำเนินการตอบสนองด้านโหลดแบบการปรับเลื่อนการใช้ไฟฟ้า (Load Shifting) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดในบางช่วงเวลา โดยการปรับเลื่อนการใช้งานโหลดทางไฟฟ้าจากช่วงเวลาหนึ่งไปยังอีกช่วงเวลาหนึ่ง โดยมีได้เป็นการลดหรือลดการใช้ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว กล่าวคือผู้ใช้ไฟฟ้ายังคงใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าเหมือนเดิม เพียงแต่ไม่ได้ใช้ในช่วงเวลาปกติ ซึ่งรูปแบบนี้จะคล้ายกับการนำ Peak Clipping และ Valley Filling มาใช้ผสมผสานกัน

4. Strategic Conservation เป็นการดำเนินการรูปแบบของการส่งเสริมให้เกิดการอนุรักษ์พลังงาน ในส่วนนี้จะสนใจศึกษาในมาตรการการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยเฉพาะการใช้ระบบควบคุมที่มีสมรรถนะในการควบคุมการทำงานของระบบปรับอากาศเป็นหลัก



ภาพ 16 ตัวอย่างมาตรการตามหลักการของ DSM [11]

ระบบการจัดการพลังงานงานในอาคาร (Building Energy Management System, BEMS)

ระบบการจัดการพลังงานงานในอาคารหรือ BEMS เป็นระบบเพื่อใช้สำหรับวางแผนและควบคุมการใช้พลังงานในอาคารอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีรูปแบบที่รวมถึงการงดใช้และการใช้น้อยที่สุด ที่จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานพื้นที่ในอาคารบกร่องด้อยลงหรือเสียหาย ดังนั้นคำว่า“ประสิทธิภาพ” (Efficiency) จึงเป็นคำที่สำคัญมากที่สุดของ BEMS โดยมีคุณลักษณะของระบบดังที่กล่าวไปแล้ว ถ้าพิจารณาในองค์ประกอบของ BEMS

จะประกอบขั้นตอนการจัดการพลังงานหลัก 5 ส่วน [12] ด้วยกันที่เรียกว่า 2A ซึ่งเปรียบเสมือนกับจัดทำ Energy Baseline และ 3C ได้แก่

1. **Audits** คือการตรวจสอบสภาพของอาคาร เพื่อเป็นข้อมูลรับรู้สภาพการใช้พลังงาน และสภาพแวดล้อมภายใน (Energy and Indoor Condition Audits) ระบบและอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในอาคาร ที่มีผลเกี่ยวข้องเนื่องกับการใช้งานพื้นที่

2. **Analysis** เป็นการวิเคราะห์รูปแบบและปริมาณการใช้พลังงาน โดยขั้นตอนของการวิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคารแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

2.1 Ratio-Based Methods คือการหาสัดส่วนการใช้พลังงานหรือค่าความต้องการพลังงาน(Energy Demand) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใช้สอยของอาคารต่อจำนวนผู้ใช้อาคาร ต่อเงินค่าก่อสร้างและบริหารอาคารต่ออุณหภูมิอากาศเฉลี่ยภายนอก

2.2 Inverse Modeling Methods คือการหาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการใช้พลังงานของอาคารกับอุณหภูมิอากาศภายนอก ซึ่งผลที่ได้จะแสดงในรูปสัดส่วนของ พลังงานจากการใช้ที่ไม่เกี่ยวข้องกับสภาวะอากาศภายนอก (Non Weather-Dependent Load-Non WDL) ในรูปของค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง รายวัน หรือรายเดือนและสัดส่วนของ Non WDL ในรูปของสมการเส้นตรงสองตัวแปร โดยจุดเชื่อมต่อของ Weather-Dependent Load-WDL และ Non WDL ก็คืออุณหภูมิอากาศภายนอกที่อาคารเริ่มมี WDL หรือที่เรียก Balance-Point Temperature

2.3 Forward Modeling Methods จะเป็นการสร้างโมเดลการใช้พลังงานจากข้อมูลตัวอาคาร, ข้อมูลงานระบบต่าง ๆ และข้อมูลอากาศโดย Forward Modeling เป็นการคาดคะเนการใช้พลังงานที่น่าจะเกิดขึ้นในอนาคต ทำให้สามารถนำไปประเมินค่าความคุ้มค่าในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

3. Conservation หรือ Energy Conservation คือการเลือกใช้มาตรการประหยัดพลังงานสำหรับพื้นที่เป้าหมาย สำหรับระบบการจัดการพลังงานสำหรับอาคาร ภาระทางไฟฟ้าของระบบปรับอากาศถูกนำมาเลือกใช้เป็นมาตรการเพื่อประหยัดพลังงานเป็นหลัก

4. Calculation (Calculation of Energy and Money Savings) ค่าการประหยัดพลังงานหรือ Saving สามารถประเมินได้โดยการเอาปริมาณการใช้พลังงานหลังปรับปรุงอาคาร (Post-Retrofit Consumption) หักลบออกจาก Energy Baseline การใช้พลังงานของอาคารก่อนปรับปรุง (Pre-Retrofit Baseline Use) โดยการคำนวณ Saving จะต้องอยู่บนพื้นฐานสภาพอากาศภายนอกเดียวกัน

5. Commissioning (Continuous Commissioning) เป็นการบริหารจัดการการใช้อาคาร เพื่อให้คงมีความสามารถรักษาผลการประหยัดพลังงานที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

BEMS มีรูปแบบระบบการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ในระบบวิศวกรรมระบบในอาคารด้วยระบบคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ เชื่อมต่อเข้ากับระบบเครือข่ายและนำมาประยุกต์ใช้ในการรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ควบคุมและตรวจสอบการทำงานของระบบอาคารต่าง ๆ เข้าด้วยกัน จากการจัดการดังกล่าวส่งผลต่อพื้นที่ควบคุมของอาคารได้ดังต่อไปนี้คือ [13]

1. การควบคุมการใช้พลังงานของอาคารโดยผ่านระบบคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศอย่างมีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือ
2. การควบคุมสภาพภูมิอากาศได้แก่ปริมาณ อุณหภูมิ ความชื้นของอากาศที่มีความเหมาะสมกับการดำเนินกิจกรรมและผู้ที่อยู่อาศัยภายในอาคาร
3. การบริหารจัดการอาคารให้มีประสิทธิภาพด้วยการจัดเก็บข้อมูลที่แม่นยำ ง่ายต่อการวางแผนการซ่อมบำรุงและตัดสินใจ

ประโยชน์สำหรับระบบการจัดการพลังงานงานในอาคาร

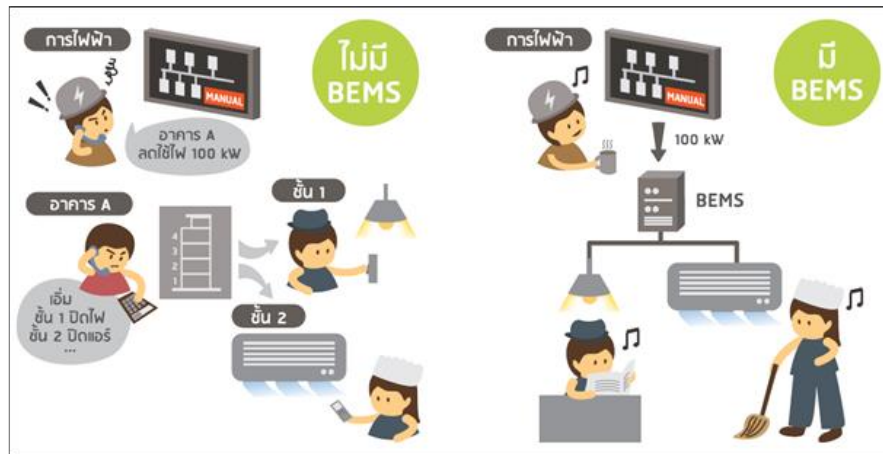
ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (Building Energy Management System, BEMS) เป็นการเชื่อมโยงอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและระบบต่าง ๆ เข้าด้วยกันภายใต้ระบบควบคุมส่วนกลาง โดยทั่วไปแล้ว HEMS กับ BEMS มีลักษณะคล้ายคลึงกันในด้านการใช้งานและหลักการทำงาน อย่างไรก็ตาม BEMS จะมีความซับซ้อนมากกว่า เนื่องจากในอาคารพาณิชย์มีจำนวนจุดที่ต้องควบคุมและจุดตรวจวัดมากกว่าหากเทียบกับ HEMS การนำระบบบริหารจัดการพลังงานเข้ามาใช้จะสามารถทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าทราบลักษณะรูปแบบการใช้ไฟฟ้าของตนเองได้ในแต่ละช่วงเวลาโดยละเอียด รวมไปถึงพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของตนเองอย่างชัดเจนมากขึ้นผ่านทางระบบแสดงผลในรูปแบบต่าง ๆ ที่จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของผู้ใช้ไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้แก่

1. ระบบบริหารจัดการพลังงานช่วยให้ผู้ใช้ไฟฟ้ามีความสะดวกสบายมากขึ้นในการควบคุมสั่งการอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ แต่เดิมในกรณีไม่มีการติดตั้ง BEMS ผู้ใช้ไฟฟ้าจำเป็นต้องควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ในแต่ละพื้นที่ด้วยตนเอง เช่น การไปเปิดหรือปิดสวิตช์ไฟส่องสว่างในแต่ละจุดโดยตรง การเพิ่มลดอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศในแต่ละห้อง แต่เมื่อนำ BEMS มาติดตั้ง ผู้ใช้ไฟฟ้าจะสามารถควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ผ่านทางอุปกรณ์เคลื่อนที่อย่าง สมาร์ทโฟน หรือแท็บเล็ต ทำให้สะดวกในการควบคุมมากขึ้นจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าปรับเปลี่ยนพฤติกรรมตนเองโดยลดการใช้ไฟฟ้าในส่วนที่ไม่จำเป็นลง

อันจะมีส่วนช่วยในการประหยัดไฟฟ้าและลดค่าไฟฟ้าลงได้ นอกจากนี้ผู้ใช้ไฟฟ้าจะทราบถึงสถานะการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ผ่านทางอุปกรณ์เคลื่อนที่ตลอดเวลา จึงทราบได้หากลิ้มเปิดอุปกรณ์บางอย่างทิ้งไว้โดยมิได้ตั้งใจ ทั้งนี้อุปกรณ์อัตโนมัติบางชนิดยังสามารถทำงานร่วมกับ HEMS ได้ เช่น เซ็นเซอร์จับการเคลื่อนไหวเพื่อเป็นส่วนในการควบคุมปิดไฟส่องสว่างในบริเวณบ้านที่ไม่มีคนอยู่ เป็นต้น จึงช่วยลดภาระของผู้ใช้ไฟฟ้าในการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิดลงได้เป็นอย่างดี

2. ระบบการบริหารจัดการพลังงาน สามารถช่วยสนับสนุนการดำเนินการตอบสนองด้านโหลดให้เป็นไปอย่างรวดเร็วมากขึ้น กล่าวคือ การตอบสนองด้านโหลดในรูปแบบที่ไม่เป็นอัตโนมัติ (Manual Demand Response) จะอาศัยการสื่อสารโดยตรงระหว่างบุคคลเป็นหลัก เช่น ในกรณีเจ้าหน้าที่จากหน่วยงานด้านการไฟฟ้าจะติดต่อผู้ดูแลอาคารพาณิชย์ต่าง ๆ โดยตรงผ่านระบบการสื่อสารทั่วไป เช่น อีเมล โทรศัพท์ เป็นต้น เพื่อแจ้งให้ผู้ดูแลอาคารลดการใช้ไฟฟ้าลงในช่วงเวลาที่กำหนดไว้ ผู้ดูแลอาคารจะต้องวิเคราะห์และวางแผนว่าจะสามารถลดการใช้ไฟฟ้าในอาคารลงได้อย่างไรในช่วงเวลานั้น ก่อนจะส่งการขอให้บุคลากรที่เกี่ยวข้องในอาคารนั้นดำเนินการงดหรือลดการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าลง แต่เมื่อมีการนำ BEMS มาประยุกต์ใช้จะทำให้สามารถดำเนินการตอบสนองด้านโหลดแบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi-automated Demand Response) หรืออัตโนมัติ (Full-automated Demand Response) ได้ผ่านทางระบบดังกล่าว

หลังจากนั้นกระบวนการต่าง ๆ จะเป็นไป อย่างอัตโนมัติ ระบบจะส่งสัญญาณเรียกให้ตอบสนองด้านโหลดไปยัง BEMS ของอาคาร จากนั้น BEMS จะประเมินความสามารถในการปรับเปลี่ยนรูปแบบการใช้ไฟฟ้าของอาคารว่าสามารถทำได้มากน้อยเพียงใด แล้วจึงส่งการโดยตรงไปยังระบบหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ให้ลดหรือหยุดการทำงานภายใต้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้แล้วจึงสื่อสารกลับไปยังระบบควบคุมการตอบสนองด้านโหลดส่วนกลาง เพื่อแจ้งว่าอาคารนี้สามารถช่วยลดโหลดได้เท่าไร BEMS จึงสามารถลดความเกี่ยวข้องของบุคคลในกระบวนการสื่อสารสั่งการที่จำเป็นเพื่อการตอบสนองด้านโหลดไปได้อย่างมาก ส่งผลให้ระยะเวลาการตอบสนองลดลง หน่วยงานด้านการไฟฟ้าสามารถเรียกขอการตอบสนองด้านโหลดในเวลาที่เหมาะสมขึ้นได้หากมีความจำเป็น



ภาพ 17 ประโยชน์ของเทคโนโลยีระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (BEMS) [6]

3. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ในการประเมินความคุ้มค่าในการเลือกใช้รูปแบบของการจัดการใช้พลังงานเพื่อลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ได้จากการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และผลตอบแทนด้านการเงิน โดยเฉพาะในบางรูปแบบการจัดการพลังงานเป็นการส่งเสริมจากภาครัฐจะมีผลประโยชน์ทางอ้อมที่ไม่ใช้มูลค่าทางการเงินมาประเมินร่วมด้วย สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์ต้นทุนและผลได้ (Cost-Benefit Analysis) ซึ่งเป็นการพิจารณาว่าผลประโยชน์ของรูปแบบการจัการนั้นมากกว่าหรือน้อยกว่าต้นทุน เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลประโยชน์จากรูปแบบการจัการแบบอื่น โดยมีตัวแปรหลักที่เลือกใช้ในการประเมินความเหมาะสมของโครงการดังนี้ [14]

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) คือ ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์และมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนของโครงการ เพื่อชี้ให้เห็นว่าโครงการนั้นจะให้ผลประโยชน์คุ้มค่าหรือไม่โดยคิดลดด้วยอัตราผลตอบแทนที่เท่ากัน (Required rate of return) ซึ่งประเมินได้จากสมการ 1 ดังนี้

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} \quad (1)$$

โดยกำหนดให้ B_t = ผลประโยชน์ของโครงการในปี t

C_t = ต้นทุนของโครงการปีที่ t

R = อัตราคิดลด (Discount Rate) หรือ ต้นทุนส่วนเพิ่มของเงินทุน

โดย t เป็นปีที่ดำเนินงานและ n คืออายุของระบบ

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR) จากการลงทุน คือ อัตราเงินกู้ที่ทำให้ NPV มีค่าเป็นศูนย์ โดยใช้การประเมินเพื่อเปรียบเทียบอัตราผลตอบแทนร่วมกับอัตราค่าเสียโอกาสของเงินทุน ซึ่งอาจเป็นดอกเบี้ยเงินกู้ของสถาบันการเงิน อัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ธุรกิจยอมรับได้หรืออัตราผลตอบแทนจากการลงทุนในระยะยาวตามที่กฎหมายกำหนดในรูปแบบการจัดการพลังงานที่ศึกษา มีสมการ 2 ในการประเมินดังนี้

$$\sum_{t=0}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1+irr)^t} = 0 \quad (2)$$

ใน 2 ตัวแปรข้างต้นเป็นแนวทางการประเมินรูปแบบการจัดการพลังงานแบบปรับค่าเวลาเป็นเกณฑ์ โดยนำเวลาเข้ามาเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดมูลค่าของเงินตรา (Value of Money) ซึ่งมูลค่าของเงินจะมีความแตกต่างกันในแต่ละปี จึงต้องปรับค่าของเวลาในอนาคต (Future Value) ให้เท่ากับมูลค่าของเงินในปัจจุบัน (Present Value) โดยการหักลดมูลค่าของเงินที่เกิดขึ้นในอนาคตด้วยอัตราคิดลด (Discount Rate) ขณะเดียวกัน **ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ (Payback Period)** ซึ่งเป็นการประเมินที่ไม่ปรับค่าเวลา หาได้จากจำนวนปีในการดำเนินการที่ทำให้ผลตอบแทนสุทธิในแต่ละปีมีค่ารวมเท่ากับเงินลงทุนเริ่มแรก ก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ (Sensitivity Analysis) คือ การศึกษาว่าเมื่อสถานการณ์การดำเนินรูปแบบการจัดการพลังงานมีปัจจัยต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไปทำให้มีผลกระทบต่อต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการ ส่งผลกระทบต่อผลตอบแทนสุทธิ ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว คือทำให้ทราบถึงปัจจัยที่อาจจะก่อให้เกิดความไม่แน่นอนหรือการลงทุนมีความคล่องตัวและทนต่อความเสี่ยงได้มากน้อยเพียงใด ทั้งนี้ เพื่อที่จะได้หาแนวทางการควบคุมป้องกันปัจจัยต่าง ๆ เหล่านั้น เพื่อให้การดำเนินเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

4. การประเมินศักยภาพพลังงานไฟฟ้าหรือ Energy Baseline ของอาคาร

ในการประเมินศักยภาพสำหรับการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าของอาคารจะใช้รูปแบบของการเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของอัตราการใช้พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ต่อปีของอาคารประเภทต่าง ๆ ในปัจจุบัน ซึ่งจะถือเป็น Energy Baseline ที่ใช้อ้างอิง (Reference) โดยเปรียบเทียบเป็นระดับความสามารถของระบบการจัดการพลังงานในอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงานที่ศึกษากับค่าที่มีการบังคับใช้เกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพการใช้พลังงานขั้นต่ำในอาคาร (BEC) และเกณฑ์ที่สูงกว่า มี 3 ระดับที่ถูกระบุกำหนดโดย [15] ดังนี้

4.1 BEC (Building energy code) หรือการติดฉลากอาคาร BEC ใช้บังคับเป็นมาตรฐานใช้เกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานขั้นต่ำในอาคาร โดยมีกลุ่มเป้าหมายที่บังคับคืออาคารขนาดใหญ่สร้างใหม่ ช่วงที่มีการบังคับใช้เกณฑ์มาตรฐานอาคารดังกล่าวในปี 2562-2579

4.2 HEPS (High Energy Performance Standard) คือ ระดับเกณฑ์มาตรฐานขั้นสูงของระบบต่าง ๆ ซึ่งเป็นเป้าหมายที่บรรลุด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน

4.3 Econ (Economic building) คือ เป้าหมายในอนาคตอันใกล้เมื่อมีการพัฒนาเทคโนโลยีของอุปกรณ์และระบบต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นไปอีกแต่ยังมีความคุ้มค่าในการลงทุน

4.4 ZEB (Zero Energy Building) คือ เป้าหมายในระยะยาวที่อาคารใช้พลังงานที่จ่ายเข้าจากภายนอกในระดับใกล้เคียงศูนย์ เนื่องจากความต้องการพลังงานของอาคารที่ต่ำมากและยังมีการผลิตพลังงานที่ใช้ในอาคารจากพลังงานหมุนเวียนด้วย

ประเภทอาคาร	การใช้พลังงานภายใต้แต่ละระดับความสามารถในการอนุรักษ์พลังงาน (kWh/m ² -y)				
	Reference	BEC	HEPS	Econ	ZEB
อาคารสำนักงาน	219	171	141	82	57
อาคารห้างสรรพสินค้า	308	231	194	146	112
อาคารธุรกิจค้าปลีกและส่ง	370	298	266	161	126
โรงแรม	271	199	160	116	97
คอนโดมิเนียม	256	211	198	132	95
สถานพยาบาล	244	195	168	115	81
สถานศึกษา	102	85	72	58	39
อาคารทั่วไป	182	134	110	66	53

ภาพ 18 ค่าการใช้พลังงานสุทธิ (Net Consumption) จากแบบจำลองของอาคารแต่ละประเภทในแต่ละระดับความสามารถในการประหยัดพลังงาน [15]

ในการศึกษาของ กรกมล ดันติวณิช [16] เป็นการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยดัชนีพลังงานเพื่อใช้เป็นเกณฑ์การใช้พลังงานเพื่อการบริหารจัดการพลังงานอย่างเป็นระบบในอาคาร พบว่าในกลุ่มอาคารที่แตกต่างกัน ดัชนีการใช้พลังงานจะแตกต่างกันและมีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงที่กระทรวงพลังงานกำหนดจากแบบจำลอง โดยประเมินเป็นค่าแสดงได้ดังภาพ 19

กลุ่มอาคาร	จำนวน			
	รวม	ระบบปรับอากาศ	ระบบแสงสว่าง	ระบบลิฟต์
	kWh/ปี/m ²	kWh/ปี/m ²	kWh/ปี/m ²	kWh/ปี/คน-ความสูง
2	215.80	137.24	27.88	2.22
3	199.90	107.11	25.10	3.37
4	218.50	136.14	29.85	2.27
รวม	209.90	135.32	28.53	2.28

ภาพ 19 ค่าเฉลี่ยดัชนีการใช้พลังงานของอาคารสำนักงาน [16]

หมายเหตุ: กลุ่มอาคารถูกกำหนดด้วยพื้นที่ใช้สอย (A) และความสูงอาคาร (H) ดังนี้

กลุ่ม 1 $A < 10,000 \text{ m}^2$ และ $H < 23 \text{ m}$

กลุ่ม 2 $2,000 \text{ m}^2 < A < 10,000 \text{ m}^2$ และ $H \geq 23 \text{ m}$

กลุ่ม 3 $A \geq 10,000 \text{ m}^2$ และ $H < 23 \text{ m}$

กลุ่ม 4 $A \geq 10,000 \text{ m}^2$ และ $H \geq 23 \text{ m}$

5. ทฤษฎีพื้นฐานทั่วไปสำหรับงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้แบ่งส่วนงานในการศึกษาเป็น 3 ส่วนโดยมีทฤษฎีและแนวทางการใช้องค์ความรู้ที่แตกต่างกันสำหรับการดำเนินงานนี้ได้แก่

5.1 การคำนวณภาระทำความเย็น หรือ Cooling load calculation

ใช้เพื่อคำนวณภาระทำความเย็นในพื้นที่ควบคุมมาประเมินรูปแบบภาระความร้อนจากอากาศภายนอกและใช้เป็นต้นแบบสำหรับการออกแบบระบบควบคุม โดยการคำนวณภาระทำความเย็นจะใช้มาตรฐานการออกแบบของ ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) และใช้รูปแบบการออกแบบ Cooling Load Temperature Difference / Solar Cooling Load / Cooling Load Factor (CLTD/SCL/CLF) ใน ASHRAE Handbook of Fundamentals [17] ทำให้ได้ข้อมูลของภาระทำความเย็นสูงสุดในแต่ละวัน ซึ่งใช้สำหรับการออกแบบการใช้งานของระบบปรับอากาศในพื้นที่ทดสอบ โดยคำนึงถึงความร้อนที่เกิดขึ้นหรือเข้ามาในห้องปรับอากาศซึ่งจะประกอบไปด้วย

5.1.1 ความร้อนจากการนำความร้อนผ่านตัวอาคาร (Sensible heat)

5.1.2 ความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านตัวอาคารที่โปร่งแสง Radiation (Sensible heat)

5.1.3 ความร้อนจากการเล็ดลอดของอากาศ (Infiltration)

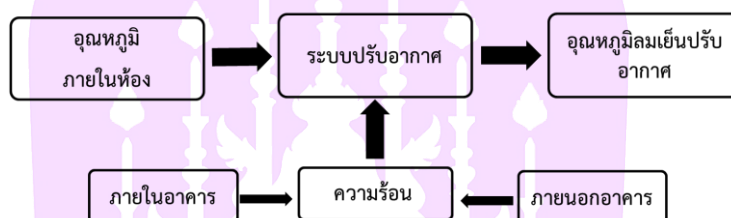
5.1.4 ความร้อนสัมผัสที่เกิดขึ้นภายในห้อง (Internal sensible heat)

5.1.5 ความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นภายในห้อง (Internal Latent heat)

5.1.6 ความร้อนจากอากาศภายนอก (Outdoor air heat) หรือ Ventilation Load

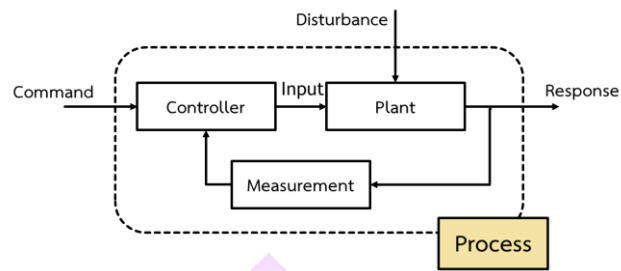
5.2 การออกแบบระบบควบคุมระบบปรับอากาศ

โดยการเลือกอุปกรณ์ปรับอากาศจะใช้เครื่องส่งลมเย็นทำงานร่วมกับเครื่องทำน้ำเย็น โดยการควบคุมจะถูกออกแบบเพื่อควบคุมอุณหภูมิในพื้นที่เป้าหมายเป็นหลัก โดยมีรูปแบบอย่างง่ายดังภาพ 20

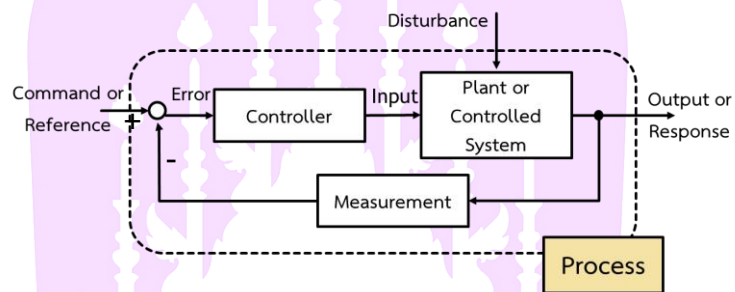


ภาพ 20 การควบคุมอุณหภูมิห้องด้วยเครื่องปรับอากาศ

รูปแบบการควบคุมที่เลือกใช้จะเป็นการควบคุมในระบบแบบวงรอบปิดหรือ Closed Loop Control ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุมแบบวงรอบปิดจะเป็นไปตามภาพ 21 ในการควบคุมแบบนี้ ตัวควบคุม(Controller) จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงหรือคำสั่ง (Referent or Command) กับสัญญาณเอาทพุทหรือผลตอบสนอง (Output or Response) ที่ป้อนกลับมาโดยตัวตรวจจับ(Measurement or Sensor) แลวนำไปสร้างสัญญาณป้อนหรืออินพุต(Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (System under controlled or Plant) เพื่อให้ได้เอาทพุทหรือผลตอบสนองเป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงหรือคำสั่งที่ต้องการ (Command or Reference) [18]

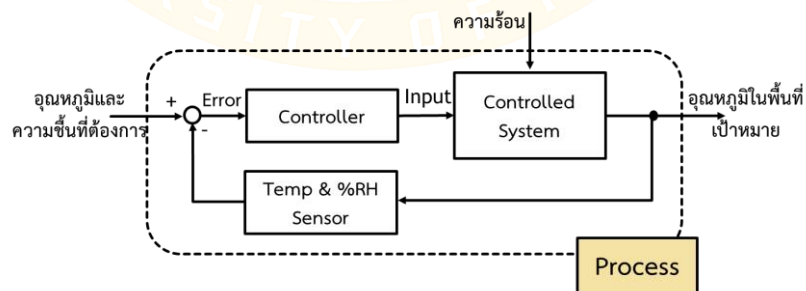


ภาพ 21 การควบคุมในระบบแบบวงรอบปิดหรือ (Closed Loop Control)



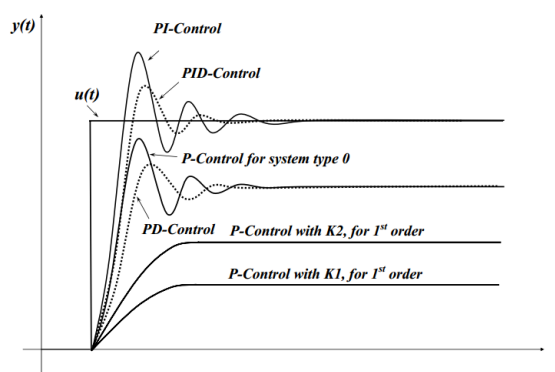
ภาพ 22 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมแบบวงรอบปิดอาจจะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) ตามภาพ 22 ระบบนี้เป็นระบบควบคุมที่พยายามรักษาเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ โดยการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการแล้วนำค่าความแตกต่างไปใช้เพื่อการควบคุมสัญญาณป้อนให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม รูปแบบการควบคุมการปรับอากาศในการศึกษานี้จะมีลักษณะแนวคิดดังภาพ 23



ภาพ 23 ระบบควบคุมอุณหภูมิในระบบปรับอากาศที่ศึกษา

โดยในการออกแบบตัวควบคุมเลือกใช้แบบพีไอดี ซึ่งนิยมใช้ทั่วไปสำหรับการควบคุมในอุตสาหกรรม โดยใช้หลักการปรับค่าเกนที่ไม่ซับซ้อนมากและให้ผลตอบสนองที่ยอมรับได้ สามารถปรับแต่งการควบคุมง่ายตามต้องการ ระบบควบคุมนี้มีตัวควบคุมย่อย 3 ตัว คือ 1) ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมพี 2) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมไอ และ 3) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมดี และจะใช้ตัวควบคุมรวมกันทั้ง 3 ตัวรวมกันในการควบคุม ตัวอย่างรูปแบบการตอบสนองนี้แสดงได้จากภาพ 24



ภาพ 24 ผลตอบสนองจากการใช้เอาต์ควบคุมพีไอดีแบบต่าง ๆ [18]

สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้หลักของการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีในการควบคุมระบบปรับอากาศสำหรับการปรับปริมาณน้ำเย็นให้เหมาะสมกับภาระความเย็นที่จำเป็นต้องใช้ภายในพื้นที่เป้าหมาย

5.3 การประเมินผลตอบแทนจากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ในการประเมินผลตอบแทนจากการผลิตไฟฟ้าจากการจ่ายโวลต์มีทางเลือก 2 ทางเลือก โดยทางเลือกแรกคือการขายไฟฟ้าซึ่งปัจจุบันจะสามารถขายไฟฟ้าได้ตามอัตราที่ไม่เป็นภาระต่อค่าไฟฟ้าที่ประมาณ 1.68 บาทต่อ kWh จากนโยบายของภาครัฐที่เน้นการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้เอง [19] ในส่วนนี้ถือว่าไม่มีการลงทุนเพิ่มเติมในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน ส่วนทางเลือกหลังจะเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มาใช้โดยตรง โดยในปัจจุบันค่าใช้จ่ายของพลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยคิดค่าไฟตามช่วงเวลาที่ใช้ (Time of Use rate, TOU) โดยกำหนดเป็นช่วง On-peak ในแต่ละวัน สำหรับการใช้งานอาคารในวันปกติของวันเปิดภาคการศึกษา (จันทร์ – ศุกร์) ในช่วงเวลา 9.00 – 22.00 น. ส่วนวันหยุดและช่วงเวลาที่เหลือจากช่วง On-peak จะพิจารณาเป็นช่วง Off-peak โดยอัตราค่าไฟฟ้าที่นำมาประเมินผลตอบแทน

คือ ช่วง On-peak ค่าไฟเท่ากับ 4.2097 บาท/kWh ที่ค่า Demand charge จากความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเดือนที่ 132.93 บาท/kWh ช่วง Off-peak มีค่าไฟที่ 2.6295 บาท/kWh [20] โดยในปี 2562 มีจำนวนวันหยุดที่ติดอัตรา Off-peak ทั้งหมด 116 วัน ซึ่งถือว่าเป็นช่วงเวลาที่มีต้นทุนพลังงานไฟฟ้าต่ำ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. แนวคิดการใช้ระบบการจัดการพลังงานงานในอาคาร (Building Energy Management System, BEMS)

จากการศึกษาเพื่อวิเคราะห์รูปแบบของค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand, PD) [21] ของระบบประกอบอาคาร พบว่าพลังงานไฟฟ้าจะถูกใช้ไปสำหรับการควบคุมสภาพอากาศสำหรับพื้นที่ต่าง ๆ ภายในอาคาร หรือระบบ Heating Ventilation and Air-Condition (HVAC) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยที่ 50% ของผลรวมของพลังงานที่ใช้ทั้งหมดของอาคาร Motegi N และคณะวิจัย [22] พบว่าการที่จะจัดการระบบ HVAC ให้มีประสิทธิภาพจะต้องใช้การจัดการที่มีรูปแบบการที่สัมพันธ์กับการตอบสนองความต้องการปริมาณไฟฟ้าที่หลากหลาย (Demand Response Resource) การจัดการพลังงานอาคารจะถูกใช้เพื่อควบคุมภาวะชั่วคราวของอากาศในพื้นที่ต่าง ๆ ของอาคารเพื่อตอบสนองต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะอากาศภายนอกอาคารและในประเทศไทยระบบปรับอากาศเป็นระบบที่ใช้พลังงานมากที่สุดของอาคารทั่วไป [23]

ในการศึกษาของ D. Murayama [24] การใช้ BEMS ในปัจจุบันจะถูกเน้นมาเพื่อใช้สำหรับการควบคุมระบบปรับอากาศ ระบบทำความร้อนและระบายอากาศ (Heating, Ventilation, and Air Conditioning: HVAC) เป็นหลัก ด้วยความสามารถที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ในส่วนแรกการควบคุมระบบ HVAC เพื่อมุ่งเน้นการประหยัดพลังงานซึ่งเป็นต้นทุนของการบริหารพื้นที่อาคาร ส่วนที่ 2 ระบบควบคุมที่สามารถตอบสนองความต้องการทางไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Demand Response, ADR) ซึ่งเป็นกลไกที่ต้องใช้การพยากรณ์การเกิดความต้องการพลังงานสูงสุด (Peak Demand, PD) ที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของแต่ละวัน ความสามารถทั้ง 2 ส่วนนี้ต้องทำงานร่วมกันเพื่อให้อุปกรณ์ในระบบที่ต้องควบคุมสามารถควบคุมคุณสมบัติแวดล้อมของพื้นที่ที่ตอบสนองต่อความต้องการพื้นที่และความรู้สึกของผู้ใช้งานในพื้นที่

ตัวอย่างแนวทางการศึกษาของ BEMS สำหรับการจัดการพลังงานของพื้นที่สำนักงานโดยที่มีการจำลองการเชื่อมต่อกับโครงข่ายพลังงานอัจฉริยะหรือ Smart grid, SG

โดยแบบจำลองที่ได้เพื่อหาราคาพลังงานที่ดีที่สุดต่อผู้บริโภคสุดท้าย (End users) ภายใต้อัตรา
ราคาพลังงานแบบ Dynamic energy pricing โดยรูปแบบการจำลองคือการเผื่อระวังและ
ควบคุมการใช้พลังงานซึ่งเน้นไปที่นโยบายของผู้ใช้งานและการจัดการพลังงานทดแทนสำหรับ
พื้นที่สำนักงานโดยไม่กระทบต่อสถานะแวดล้อมในการใช้งานพื้นที่ การทดสอบการเชื่อมโยง
การใช้ SG มีส่วนช่วยลดค่าใช้จ่ายพลังงานสูงสุดถึง 50% และลดปริมาณพลังงานที่ต้องใช้
อาจจะมากถึง 15% ของปริมาณการใช้เดิม

จากการประเมินการใช้พลังงานของ The U.S. Department of Energy ในปี 2011
โดยสรุปมีการใช้พลังงานสำหรับอาคารสูงถึง 40% ของการใช้พลังงานทั้งโลกและจากปริมาณ
ดังกล่าวประมาณ 50% ถูกใช้สำหรับการควบคุมสถานะแวดล้อมอาคารได้แก่ระบบ HVAC
หรือถ้าเปรียบเทียบเป็นสัดส่วนของทั้งโลกอาจจะกล่าวได้ว่ามีความต้องการใช้พลังงานใน
ระบบนี้ถึงประมาณ 20% และจากความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีการสื่อสาร และต้นทุน
พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่มีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ นั่นคือการพัฒนาทางด้านของ
สมาร์ตกริดเทคโนโลยีที่สามารถทำให้เกิดความยั่งยืน ความเชื่อมั่นและการมีส่วนร่วมจากผู้
พลังงานเองส่งผลต่อต้นทุนการผลิตพลังงานรูปแบบอื่น ๆ ลดลงอย่างมากและเมื่อใช้ควบคู่กับ
ระบบการจัดการพลังงานสำหรับอาคาร SG-BEMS Model จึงเป็นการศึกษาที่ถูกนำมาใช้เพื่อ
แก้ปัญหาพลังงานในอาคาร โดยตัวอย่างรูปแบบ SG-BEMS Architecture [25] แบ่งออกเป็น 3
ระดับ ได้แก่

- Level 1** Management level – supervisory computers.
Service Server, Data Management Server
- Level 2** Automation level– Smart G/W (gateway)
- Level 3** Field level – sensors, actuators, controllers

ในการปรับปรุงรูปแบบการตอบสนองโหล นิยมมุ่งใจกำหนดเป็นอัตราค่าไฟฟ้า
ตามมาตรการส่งเสริมการลดการใช้ไฟฟ้า (Demand Response Rate) จากการศึกษาของ
Karen Herter.[26] ในอัตราค่าไฟแบบ Critical Peak Demand หรือ CCP ถูกนำมาศึกษาเพื่อ
ประยุกต์ใช้ในครัวเรือนที่ระดับรายได้ที่แตกต่างกัน ของรัฐแคลิฟอร์เนีย ซึ่งถูกใช้เพื่อ
ประเมินผลของอัตราดังกล่าวต่อระดับโหลและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าที่ลดลง พบว่า
กลุ่มของผู้ใช้ไฟฟ้าปริมาณมากจะมีความสามารถที่จะลดระดับโหลหรือความต้องการ
พลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าอีกกลุ่ม ขณะที่กลุ่มที่ใช้ไฟต่ำจะสามารถลดสัดส่วนของค่าใช้จ่ายทาง
ไฟฟ้าได้ดีกว่า ส่วน M. Fera, R. Macchiaroli, R. Iannone, S. Miranda, S. Riemma [27] ศึกษาในอีก
ส่วนประกอบหนึ่งของตลาดผู้ค้าไฟ สำหรับการสร้างโมเดลเพื่อทดสอบความเข้าใจและ

ผลกระทบ ของความสามารถของ Aggregator ที่จะสร้างรายได้จากแนวทางของ Smart Grid ของการใช้เทคนิค DR ในส่วนของผู้ใช้ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวนมากในอาคารสาธารณะ 6 กลุ่ม จาก 321 หน่วยงาน ผลของแบบจำลองพบว่าจะสามารถทำรายได้ให้กับ Aggregator สูงขึ้นถึง 4 – 14% ในกลุ่มลูกค้าที่แตกต่างกัน ประหยัดค่าใช้จ่ายพลังงานของหน่วยงานที่ 0.15 – 0.40% ที่สำคัญสามารถลดค่าสูงสุดของความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้มากถึง 5.38 – 15.2% จากกลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้า

2. การจัดการพลังงานอาคารโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS)

ในประเทศไทยระบบปรับอากาศเป็นระบบที่ใช้พลังงานมากที่สุดในอาคารทั่วไป ดังนั้นการจัดการพลังงานจึงควรให้ความสำคัญในระบบดังกล่าวเป็นอันดับแรก ในกรณีศึกษา งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบผลิตไฟฟ้า Smart Grid UP ของอาคาร B3 ซึ่งพบว่าในช่วงเวลา กลางวันมักจะมีการผลิตไฟฟ้าเกินกว่าความต้องการ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ดังกล่าวระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารหรือ BEMS จึงถูกเลือกใช้ในการศึกษาร่วมกับ ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS) โดยสนใจใน 2 รูปแบบ ได้แก่ การ ออกแบบและทดสอบระบบกักเก็บความเย็นที่มีการสูญเสียความร้อนต่ำร่วมกับการควบคุมที่มี ประสิทธิภาพและระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System, BESS) ในขนาดที่เหมาะสม ทั้ง 2 ส่วนจะสามารถทำหน้าที่เป็นไฟฟ้าและพลังงานสำรองในการ จัดการพลังงานเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วงกลางวันในการจัดการด้านการ ใช้ไฟฟ้า (DSM) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการดำเนินการตอบสนองด้านโหลด (DR) ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว

แนวทางการจัดการพลังงานอาคารโดยการกักเก็บพลังงานความเย็น

การออกแบบเพื่อควบคุมค่าความต้องการพลังไฟฟ้าในอาคารแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ ได้แก่ Thermal Energy Storage (TES) ซึ่งนำมาใช้เพื่อลดต้นทุนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ ต้นทุนพลังงานสูงหรือที่เรียกว่าช่วง Peak จากการสำรองพลังงานอยู่ในรูปแบบน้ำเย็น (Chilled Water Thermal Storage, CWTS) สำหรับระบบปรับอากาศอาคาร โดยในประเทศจีนการจัดการ พลังงานที่มีประสิทธิภาพในรูปแบบดังกล่าวมีผลให้ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอาคารลด ได้ถึง 40% [28],[29] จากส่วนต่างของต้นทุนค่าไฟฟ้าในช่วงสูงสุดและต่ำสุดที่มากกว่า 3 เท่า และพื้นที่ที่อุณหภูมิในช่วงกลางวันสูงมากอย่างคูเวต การใช้รูปแบบ CTWS มาแก้ปัญหาการ เพิ่มขึ้นของความต้องการพลังไฟฟ้าทำให้ค่า Peak ลดลงได้มากกว่า 36% [30] การศึกษา เพิ่มเติมการสำรองรูปแบบความเย็นในรูปแบบของน้ำแข็ง (Ice Thermal Storage, ITS) [31] หรือ การใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์จากอุปกรณ์ Solar Collector มาใช้ทำน้ำเย็นด้วย Absorption

Chiller [32] เป็นแนวทางการจัดการพลังงานที่ถูกเลือกใช้สำหรับการออกแบบอาคารสร้างใหม่ แต่ในประเทศไทยที่ต้องคำนึงถึงต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากการก่อสร้างอาคารหรือในการปรับปรุงระบบปรับอากาศอาคารที่มีอยู่แล้วทำให้มีข้อจำกัดทั้งในด้านงบประมาณและพื้นที่การศึกษานอกจากนี้การเลือกใช้ชุดอุปกรณ์ปรับอากาศโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Powered Air-Condition System) ในการศึกษาเทคโนโลยีดังกล่าวจะใช้เพื่อทดสอบ Photovoltaic solar air condition (PV+AC) ในระบบปรับอากาศ จากการทดสอบของ F.J.Aguilar, S.Aledo and P.V.Quiles [33] โดยเฉลี่ยในช่วงการใช้งานของการปรับอากาศ ระบบ PV+AC จะทำให้ประสิทธิภาพของการปรับอากาศหรือค่า EER สูงถึง 14.54

Shengwei Wang และทีมนักวิจัยจาก Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong ได้มีงานศึกษาอย่างต่อเนื่องในช่วง 2010 ถึง 2016 [34]–[37] โดยการศึกษาของทีมวิจัยชุดนี้จะเน้นการศึกษาเพื่อการจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารที่เป็นสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากที่สุดในฮ่องกง โดยแนวทางการศึกษาจะใช้การวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองเพื่อควบคุมและตอบสนองความต้องการทางพลังงานไฟฟ้า (DR) ซึ่งใช้การควบคุมและจัดการเครื่องทำน้ำเย็นหรือ Chiller ในระบบปรับอากาศสำหรับพื้นที่ที่แตกต่างกันในอาคาร โดยเทคนิคการจัดการต่าง ๆ ถูกประยุกต์ผ่านระบบน้ำเย็น ได้แก่ การสะสมน้ำเย็นไว้ใช้เพื่อปรับอากาศในช่วงที่เป็นมาตรการ Demand Response Rate ในอัตราต่าง ๆ หรือการใช้วัสดุประเภท Phase Change Materials (PCM) เพื่อเพิ่มศักยภาพของการสะสมพลังงานในช่วงของการจัดการ Cold Storage และการพัฒนาโมเดลทำนายเพื่อควบคุมภาวะโหลดไฟฟ้า (Model Predictive Control หรือ MPC) ที่ต้องใช้สำหรับการควบคุมเครื่องทำน้ำเย็นในรูปแบบของ Nonlinear Programming (NLP) อย่างเหมาะสมที่สอดคล้องกับการผลิตไฟฟ้าจากระบบ PV และประเมินผลของค่าตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์

โดยในงานวิจัยนี้ การกักเก็บพลังงานความเย็นเลือกที่จะศึกษาผลของการจัดการพลังงานอาคารโดยใช้รูปแบบของ CWTS ที่มีการควบคุมการตอบสนองโหลดตามหลักการของ BEMS ทำงานร่วมกับระบบปรับอากาศเดิมซึ่งเป็นการใช้งานของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนในพื้นที่ทดสอบ

แนวทางการจัดการพลังงานอาคารโดยระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System, BESS)

ในการออกแบบระบบกักเก็บพลังงาน มีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงได้แก่ ประเภทของเทคโนโลยี การควบคุมของขั้นตอนในการอัดและคายประจุ รวมถึงขนาดติดตั้งที่เหมาะสม [38] โดยเฉพาะในรูปแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุ เป็นระบบที่มีความพร้อมในการใช้

งานชดเชยข้อด้อยของเทคโนโลยีที่เป็นจุดอ่อนในการรวมคุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงและกำลังที่มากกว่าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเข้าด้วยกัน [39] ทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของระบบกักเก็บให้มากขึ้น ขณะเดียวกันในการหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมเพื่อลดความต้องการพลังไฟฟ้าของระบบด้วยวิธี Mixed integer linear (MILP) เป็นนอกแบบในข้อจำกัดของการขายไฟฟ้าคืนระบบได้ถ้าไม่มีการชาร์จเข้าแบตเตอรี่ [40] ในการศึกษาพัฒนาออกแบบขนาดระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่ [41] ให้เกิดประโยชน์สูงสุดทางเศรษฐศาสตร์ผ่านโปรแกรม Matlab พบว่าการใช้แบตเตอรี่มาช่วยบริหารจัดการพลังงานโดยเฉพาะความต้องการพลังไฟฟ้าจะสามารถเพิ่มผลตอบแทนทางการเงินให้สูงขึ้น

แบตเตอรี่ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-acid battery) และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery) โดยในชนิดหลังมีความหนาแน่นพลังงานสูง อายุการใช้งานที่ยาวนาน แต่ราคาค่อนข้างแพงเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดแรก แต่ปัจจุบัน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน มีแนวโน้มที่ราคาลดต่ำมามากกว่า 60% ในปี 2030 เมื่อเทียบกับปี 2010 จากการพัฒนาอย่างก้าวกระโดดของรถยนต์ไฟฟ้า ทำให้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของรูปแบบเพื่อการจัดการพลังงานในอาคาร แนวโน้มราคาของแบตเตอรี่ดังกล่าว เปรียบเทียบคุณสมบัติและต้นทุนของแบตเตอรี่เทคโนโลยีต่าง ๆ แสดงได้ดังภาพ 25

Type	Technology	Year	Energy installation cost (USD/kWh)			Power density (W/L)		Round-trip efficiency (%)			Self-discharge (% per day)		
			worst	reference	best	worst	best	reference	worst	reference	best		
Flow	VRFB	2016	1 050	347	315	1	2	70.00	1.00	0.15	0.00		
		2030	360	119	108	1	2	78.00	1.00	0.15	0.00		
	ZBFB	2016	1 680	900	525	1	25	70.00	33.60	15.00	8.00		
		2030	576	309	180	1	25	78.00	33.60	15.00	8.00		
High-temperature	NaNiCl	2016	488	399	315	150	270	84.00	15.00	5.00	0.05		
		2030	197	161	127	150	270	87.00	15.00	5.00	0.05		
	NaS	2016	735	368	263	120	160	80.00	1.00	0.05	0.05		
		2030	324	162	116	120	160	85.00	1.00	0.05	0.05		
Lead-acid	Flooded LA	2016	473	147	105	10	700	82.00	0.40	0.25	0.09		
		2030	237	74	53	10	700	85.00	0.40	0.25	0.09		
	VRLA	2016	473	263	105	10	700	80.00	0.40	0.25	0.09		
		2030	237	132	53	10	700	83.00	0.40	0.25	0.09		
Li-ion	LFP	2016	840	578	200	100	10 000	92.00	0.36	0.10	0.09		
		2030	326	224	77	100	10 000	94.00	0.36	0.10	0.09		
	LTO	2016	1 260	1 050	473	100	10 000	96.00	0.36	0.05	0.09		
		2030	574	478	215	100	10 000	98.00	0.36	0.05	0.09		
	NCA	2016	840	352	200	100	10 000	95.00	0.36	0.20	0.09		
		2030	347	145	82	100	10 000	97.00	0.36	0.20	0.09		
	NMC/LMO	2016	840	420	200	100	10 000	95.00	0.36	0.10	0.09		
		2030	335	167	79	100	10 000	97.00	0.36	0.10	0.09		
Mechanical	CAES	2016	84	53	2	0	1	60.00	1.00	0.50	0.00		
		2030	71	44	2	0	1	68.00	1.00	0.50	0.00		
	Flywheel	2016	6 000	3 000	1 500	5 000	10 000	84.00	100.00	60.00	20.00		
		2030	3 917	1 959	979	5 000	10 000	87.00	42.61	39.17	8.52		
	PHS	2016	100	21	5	0	0	80.00	0.02	0.01	0.00		
		2030	100	21	5	0	0	80.00	0.02	0.01	0.00		

ภาพ 25 Characteristics of stationary electricity storage systems from 2016 to 2030 [42]

3. การประเมินผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

ในการใช้ประโยชน์จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยมีการศึกษาตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการดำเนินโครงการ จากการศึกษาของ พิษยดา จีวรราชวงศ์ ในการศึกษาต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในบ้านที่อยู่อาศัย [43] เพื่อประหยัดพลังงานของบ้านที่มีขนาดพื้นที่ใช้สอย 125 m² โดยมีรูปแบบของการศึกษาจากกรณีพื้นที่ติดตั้งแผงรับแสงอาทิตย์เต็มพื้นที่หลังคาและติดตั้งพอดีกับการใช้งานภายในบ้าน โดยมีการจัดการพลังงานจากระบบกักเก็บพลังงานของแบตเตอรี่ จากต้นทุนของของแบตเตอรี่ที่สูงและกำหนดให้มีการเปลี่ยนทุก 5 ปี ทำให้รูปแบบในการศึกษาไม่มีความคุ้มค่าในการลงทุน ในขณะที่เดียวกันเมื่อมีการสนับสนุนทางการเงินจากราคารับซื้อไฟฟ้าที่อัตรามากกว่า 6 บาทต่อหน่วย จากมาตรการสนับสนุนของภาครัฐทำให้มีความน่าสนใจในการลงทุนติดตั้งระบบ [44] สำหรับการศึกษาดังกล่าวระบบผลิตไฟฟ้าบนหลังคาของอาคารสถาบันศึกษาในสถาบันต่าง ๆ ได้แก่ อาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น [45] กลุ่มอาคารภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต [46] และอาคารของคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล [47] โดยมีแนวทางการศึกษาในด้านความคุ้มค่าในการลงทุนผ่านตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ เช่น NPV และ IRR ภายใต้การกำหนดผลตอบแทนจากการประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่อัตราเฉลี่ยของหน่วยงานเป็นหลัก ผลการศึกษาพบว่าอัตราผลตอบแทนภายในอยู่ระหว่างร้อยละ 8 – 8.5 ซึ่งมีความน่าสนใจในการลงทุน นอกจากนี้ยังศึกษาเพิ่มถึงผลประโยชน์ของสิ่งแวดล้อมในรูปแบบของการลดก๊าซเรือนกระจกและความเป็นไปได้ของการขยายระบบเพิ่ม

โดยสรุปจากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อดำเนินงานวิจัย “การพัฒนากระบวนการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในอาคาร” พบว่าแนวทางเพื่อลดความต้องการพลังงานสูงสุดหรือ Peak Demand ทำได้โดยสร้างรูปแบบระบบการจัดการพลังงานในอาคาร (Building Energy Managements: BEMS) ในระบบปรับอากาศจากการใช้งานร่วมกันระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และการจัดการพลังงานโดยใช้การควบคุมการทำงานของระบบปรับอากาศ (Air condition) กับระบบกักเก็บพลังงานด้วยน้ำเย็น (CWTS) และแบตเตอรี่ (BESS) โดยคำนึงถึงความสะดวกต่อผู้ใช้งานภายในอาคาร ทั้งนี้จะมีการประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนของรูปแบบการจัดการผ่านตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ที่มีผลตอบแทนจะถูกประเมินจากผลการทดสอบระบบและข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจริงเป็นหลัก

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

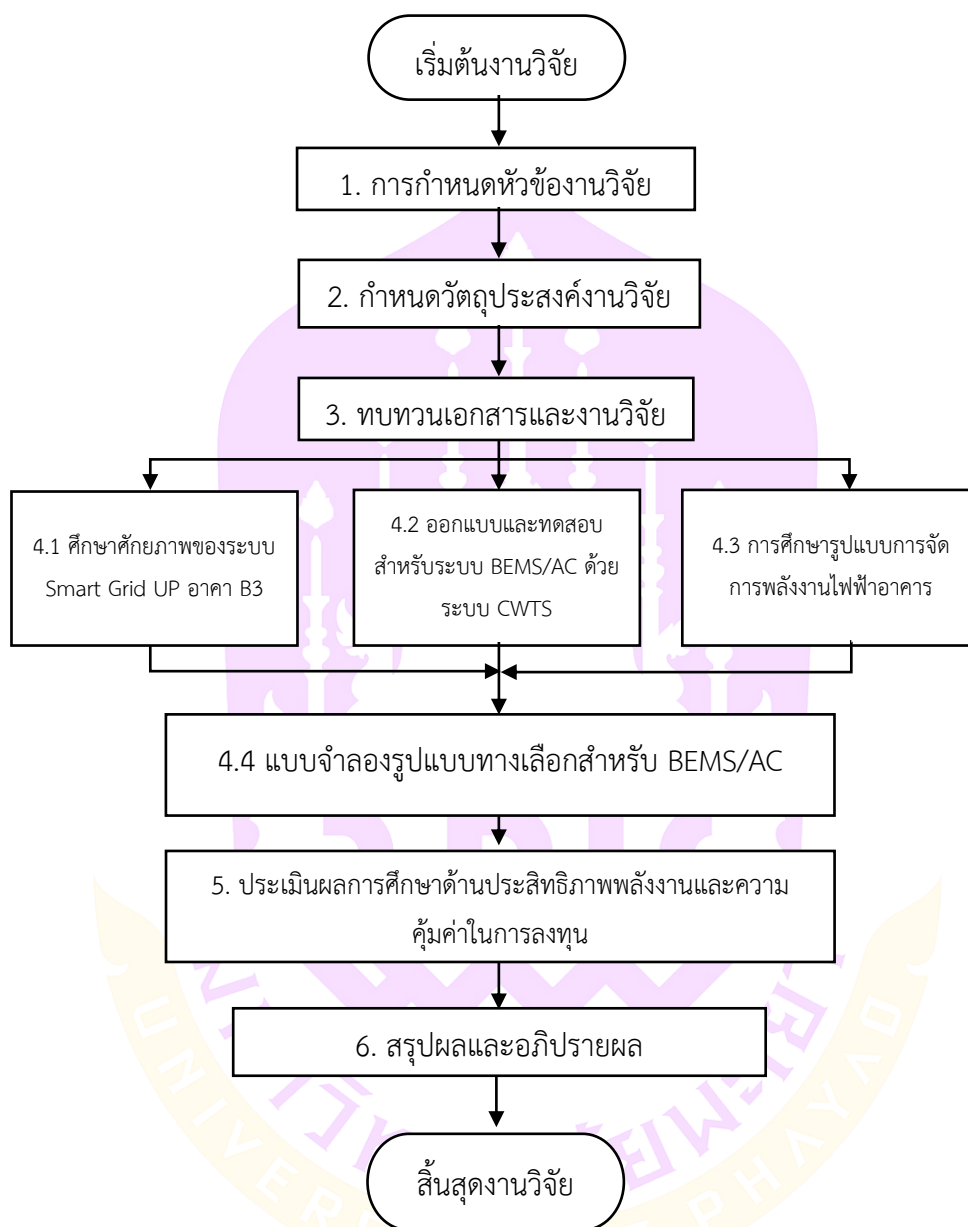
งานวิจัยในหัวข้อ “การพัฒนากระบวนการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศ เพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในอาคาร” เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนารูปแบบในการจัดการการใช้พลังงานในอาคาร (Building Energy Management System) ร่วมกันกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่มีสาเหตุหลักจากระบบปรับอากาศ มีวิธีดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เพื่อเป็นแนวทางให้การดำเนินงานวิจัยอย่างมีระบบและดำเนินงานวิจัยให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยอย่างครบถ้วน แล้วเสร็จทันตามกำหนดอย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงกำหนดขั้นตอนของการวิจัยเป็นให้เป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การกำหนดหัวข้องานวิจัย
2. กำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัย
3. การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
4. การศึกษาและดำเนินการวิจัยให้สอดคล้องกับกรอบงานวิจัยที่กำหนด
 - 4.1 การศึกษาเพื่อประเมินศักยภาพการของการจัดการพลังงานทดแทนของระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ของมหาวิทยาลัยพะเยาในอาคารต้นแบบ
 - 4.2 การศึกษาเพื่อประเมินรูปแบบความต้องการพลังงานไฟฟ้าระบบปรับอากาศในอาคาร เพื่อออกแบบและทดสอบรูปแบบการจัดการพลังงานสำหรับระบบปรับอากาศในอาคาร (BEMS/AC)
 - 4.3 การศึกษารูปแบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าอาคารในฤดูร้อนร่วมกับการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 มหาวิทยาลัยพะเยา
5. การประเมินผลการศึกษาทั้งในด้านประสิทธิภาพพลังงานของรูปแบบทางเลือกของการจัดการการใช้พลังงานและความคุ้มค่าในการลงทุนผ่านตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์
6. สรุปผลและอภิปรายผล

โดยแสดงเป็นแผนผังขั้นตอนการของการดำเนินงานวิจัยได้ดังภาพ 26



ภาพ 26 แผนผังขั้นตอนการของการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษารูปแบบปัญหาในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นสำหรับการแก้ปัญหาการเพิ่มขึ้นของความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของประเทศไทย ซึ่งเกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในการปรับอากาศสำหรับอาคารเป็นหลัก โดยแนวทางการแก้ปัญหา จะใช้การประยุกต์ตามแนวคิดของระบบการจัดการพลังงานในระบบปรับอากาศอาคารเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากการสร้างรูปแบบการจัดการด้านการใช้พลังงาน หรือ Demand Side Management : DSM แนวทางการดำเนินงานวิจัยแสดงได้ดังภาพ 27 ซึ่งเป็นภาพรวมของการดำเนินงาน เริ่มต้นจากการประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 และการทดสอบเพื่อประเมินรูปแบบความต้องการพลังงานไฟฟ้าหรือการตอบสนองด้านโหลดของระบบปรับอากาศก่อนปรับปรุง ข้อมูลที่ได้ทั้ง 2 ส่วนจะถูกไปประเมินเป็นรูปแบบการจัดการพลังงานอาคารหรือ BEMS/AC สำหรับอาคารต้นแบบ จากนั้นจึงสร้างการจำลองรูปแบบการลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าด้วย DSM Techniques ขึ้นมาเพื่อประเมินการลดลงของความต้องการพลังและพลังงานไฟฟ้าของอาคารต้นแบบที่เหมาะสมตามศักยภาพของบริบทพื้นที่

จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่ารูปแบบของความต้องการพลังงานไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า (Active Power) ที่ผลิตได้จากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 มีช่วงเวลาที่ไม่ตรงกัน ทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงกำหนดรูปแบบของ DSM Techniques ในการศึกษา ดังนี้

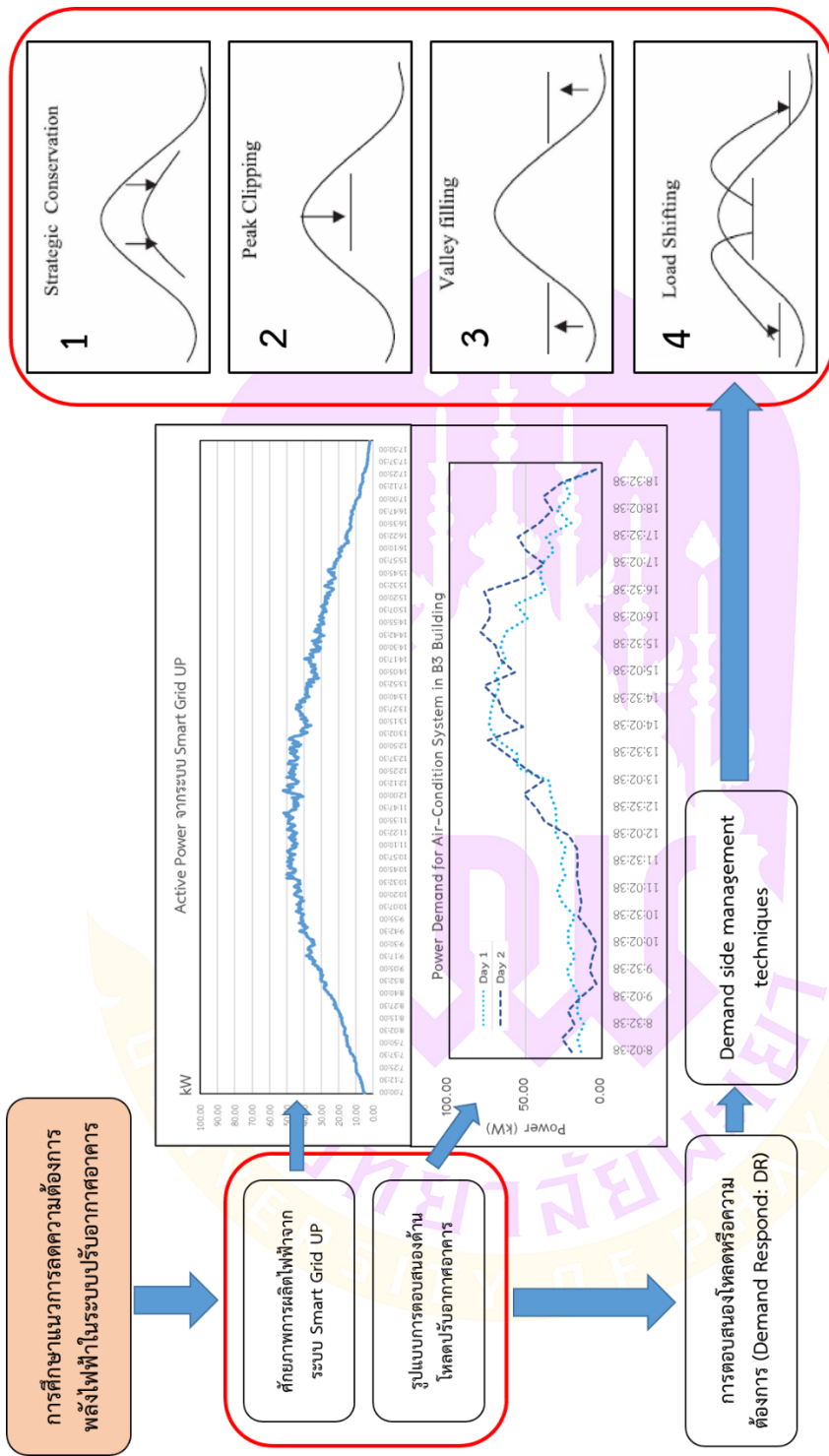
รูปแบบ 1 Strategic Conservation เป็นการกำหนดมาตรการเพื่ออนุรักษ์พลังงานในระบบปรับอากาศ ในข้อมูลเบื้องต้นของการศึกษาพบว่าระบบปรับอากาศติดตั้งเดิมของอาคาร มีขนาดใหญ่กว่าภาระความร้อนจริงภายนอกและเลือกใช้เครื่องปรับอากาศแบบแยกที่ส่วนมีการควบคุมด้วยเทอร์โมสแตท ในส่วนนี้สามารถดำเนินการปรับปรุงโดยการออกแบบระบบควบคุมที่มีการรับรู้ข้อมูลต่าง ๆ ของการใช้พลังงานในพื้นที่เพื่อควบคุมและปรับเปลี่ยนภาระไฟฟ้าของระบบปรับอากาศในการสร้างการตอบสนองด้านโหลด (Demand Response) ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในระบบได้

รูปแบบ 2 Peak Clipping เป็นรูปแบบการจัดการเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand) ของวัน โดยในเบื้องต้นจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าของ Smart Grid UP อาคาร B3 สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าจาก PV ในแต่ละวันได้โดยตรง (Self-Consumption) จากข้อมูลของการผลิตพลังงานไฟฟ้าพบว่ามีความเกิน (Over Energy) ที่มีสัดส่วนค่อนข้างสูงทำให้มีศักยภาพของจัดการในรูปแบบของระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System : ESS) สำหรับการจัดการด้านการใช้พลังงานในรูปแบบนี้

รูปแบบ 3 Valley Filling เป็นการเพิ่มโหลดในบางช่วงเวลา ซึ่งเป็นการตอบสนองด้านโหลดในกรณีที่มีการผลิตไฟฟ้าในปริมาณที่มากกว่าความต้องการไฟฟ้าของอาคารต้นแบบ การพิจารณารูปแบบการจัดการใช้พลังงานในช่วงนี้จะต้องเหมาะสมกับขนาดของการผลิตพลังงานส่วนเกินและบริบทการใช้งานพื้นที่ปัจจุบันซึ่งเป็นอาคารของสถาบันการศึกษา

รูปแบบ 4 Load Shifting เป็นการปรับเปลี่ยนการใช้ไฟฟ้าเพื่อลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุด ในการศึกษาจะต้องคำนึงถึงการใช้งานระบบปรับอากาศที่ต่อเนื่องในพื้นที่ ดังนั้นการเลื่อนภาระการปรับอากาศจึงจำเป็นต้องออกแบบระบบที่เหมาะสมกับการใช้งานโดยไม่กระทบกับผู้ใช้งานในพื้นที่





ภาพ 27 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

จากรูปแบบ DSM Techniques ที่มีศักยภาพสามารถกำหนดเป็นแบบจำลองมาตรฐานสำหรับการศึกษาเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศต้นแบบได้ดังนี้

1. การใช้พลังงานไฟฟ้าโดยตรงจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 สอดคล้องกับ DSM Techniques ในรูปแบบที่ 2 ซึ่งเป็นการศึกษาจากระบบเดิมที่ติดตั้งไปแล้ว จำเป็นต้องศึกษาและประเมินเพื่อเป็นฐานข้อมูลและแนวทางของการจัดการพลังงานของอาคารต้นแบบต่อไป

2. การประเมินรูปแบบระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS) แบ่งเป็นการศึกษา 2 รูปแบบ ได้แก่

2.1 การสำรองพลังงานอยู่ในรูปแบบน้ำเย็น (Chilled Water Thermal Storage, CWTS) สอดคล้องกับ DSM Technique ในรูปแบบที่ 4 ซึ่งจะเป็นการเพิ่มภาระไฟฟ้าในช่วงเวลา Off – Peak และสำรองพลังงานมาใช้ในช่วง On – Peak ช่วงบ่าย ส่วนนี้จะเป็นการออกแบบและทดสอบในพื้นที่ทดสอบของอาคารต้นแบบ ทำให้ได้ปริมาณพลังงานที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

2.2 ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System, BESS) เป็นการประเมินระดับการแบตเตอรี่ที่ต้องลงทุนอย่างเหมาะสมเนื่องจากราคาต้นทุนระบบที่มีราคาแพงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่น ๆ ในระบบสมาร์ทกริด รูปแบบนี้ สอดคล้องกับ DSM Technique ในรูปแบบที่ 3 ในช่วงเวลาที่การผลิตไฟฟ้าในปริมาณที่มากกว่าความต้องการไฟฟ้า

2.3 การใช้ระบบควบคุมที่สามารถรับรู้ข้อมูลต่าง ๆ ของการใช้พลังงานจากระบบปรับอากาศ ปรับเปลี่ยนภาระไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพของการสร้างการตอบสนองด้านโหลด (Demand Response) ในส่วนนี้ถูกออกแบบทำงานร่วมกับระบบ CWTS ทำให้เกิดการอนุรักษ์พลังงานซึ่งสอดคล้องกับ DSM Technique ในรูปแบบที่ 1

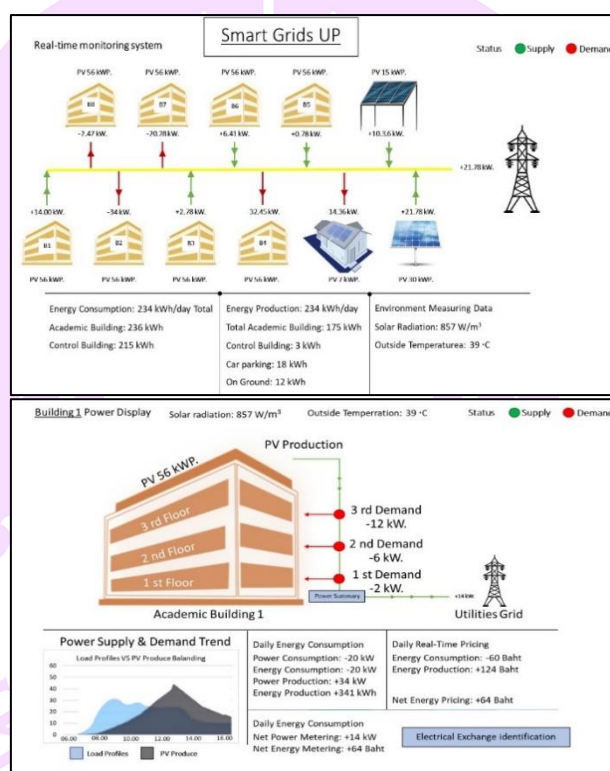
การศึกษาเพื่อประเมินปัญหาทางงานวิจัยจากรูปแบบความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับการปรับอากาศในพื้นที่ต้นแบบ จะเป็นการศึกษาในช่วงที่มีอุณหภูมิภายนอกอาคารมีค่าเฉลี่ยสูงสุดของปี ระหว่างเดือน เม.ย.และ พ.ค. ซึ่งระบบปรับอากาศจะต้องสร้างภาระทำความเย็นจากความร้อนภายนอกอาคาร โดยการทดสอบมีรายละเอียดในการดำเนินการที่สอดคล้องกับขั้นตอนการของการดำเนินงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. การประเมินศักยภาพการของการจัดการพลังงานทดแทนของระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 และรูปแบบการตอบสนองด้านโหลดปรับอากาศอาคาร

ในส่วนนี้จะเป็นการดำเนินงานเพื่อศึกษาและประเมินศักยภาพการจัดการของพลังงานทางเลือกจากระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการเก็บข้อมูลจาก

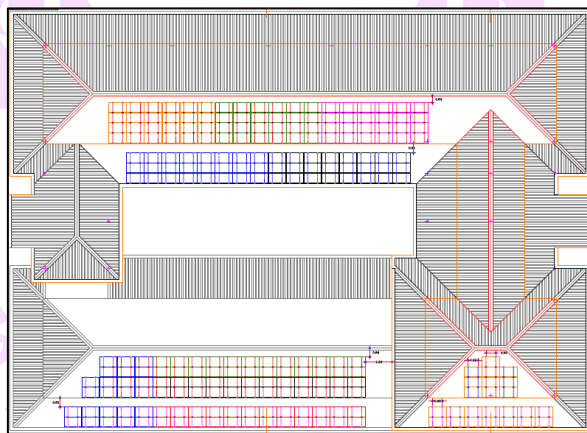
ระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 เพื่อนำมาประเมินการสร้งฐานข้อมูลและเสนอรูปแบบทางเลือกของการจัดการพลังงานไฟฟ้าในฤดูร้อนในการจัดการพลังงานไฟฟ้าเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศโดยเฉพาะ โดยมีขั้นตอนในการวิจัยดังนี้

1.1 การบันทึกและรวบรวมข้อมูลการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีข้อมูลที่สำคัญได้แก่ ภาพรวมของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด ค่ารังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิแผงรับรังสีอาทิตย์ โดยรูปแบบและลักษณะของระบบแสดงได้ดังภาพ 28



ภาพ 28 รูปแบบระบบการเก็บข้อมูลของ Smart Grid UP อาคาร B3

1.2 กำหนดพื้นที่ต้นแบบสำหรับการศึกษาคืออาคาร B3 ของมหาวิทยาลัยพะเยา มีรายละเอียดประกอบได้แก่ อาคารมีพื้นที่ปรับอากาศในการศึกษา 1,417.5 ตารางเมตร โดยติดตั้งระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนมีขนาดทำความเย็นรวม 1,500,265 Btu/hr และมีการติดตั้งระบบสถานีผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 60 kWp จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารพื้นที่ 396 ตารางเมตร คิดเป็น 25.50% ของพื้นที่หลังคาทั้งหมด ประมาณ 1,553 ตารางเมตร ในรูปที่ 24 และ 25 แสดงถึงพื้นที่ที่ทำการศึกษา



ภาพ 29 แผนผังอาคารที่ศึกษาและการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร B3



ภาพ 30 อาคาร B3 ต้นแบบศึกษาและทดสอบในงานวิจัย

2.3 การประเมินศักยภาพของการจัดการพลังงานของพลังงานทดแทนในระบบ และรูปแบบการตอบสนองด้านโหลดปรับอากาศอาคารเพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศในอาคาร ของมหาวิทยาลัยพะเยา ดำเนินภายใต้การวิเคราะห์ดังนี้

ส่วนที่ 1 การประเมินประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าย้อนหลัง 1 ปี โดยประเมินสรุปในรูปแบบของค่าเฉลี่ย ภายใต้ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานหรือ Conversion Efficiency ดังนี้

$$\text{Conversion Efficiency } (\eta_{el}) = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3}}{\text{พลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์}} \quad (3)$$

ส่วนที่ 2 การประเมินศักยภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศของพื้นที่ต้นแบบ อาคาร B3 มีการประเมินใน 2 รูปแบบ ได้แก่

2.3.1 การประเมินภาระโหลดความร้อนที่เข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศของอาคาร (Cooling load of building) โดยใช้การการคำนวณจากมาตรฐานการออกแบบของ ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) เพื่อหาภาระความร้อนสูงสุด ที่เกิดในช่วงเวลา 14:00–16:00 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มียุณหภูมิภายนอกสูงสุดในพื้นที่ต้นแบบ

2.3.2 การประเมินจากขนาดของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนที่ติดตั้งแล้วในพื้นที่ต้นแบบ ซึ่งเป็นความสามารถของระบบในการจัดการกับภาระโหลดความร้อนอาคาร

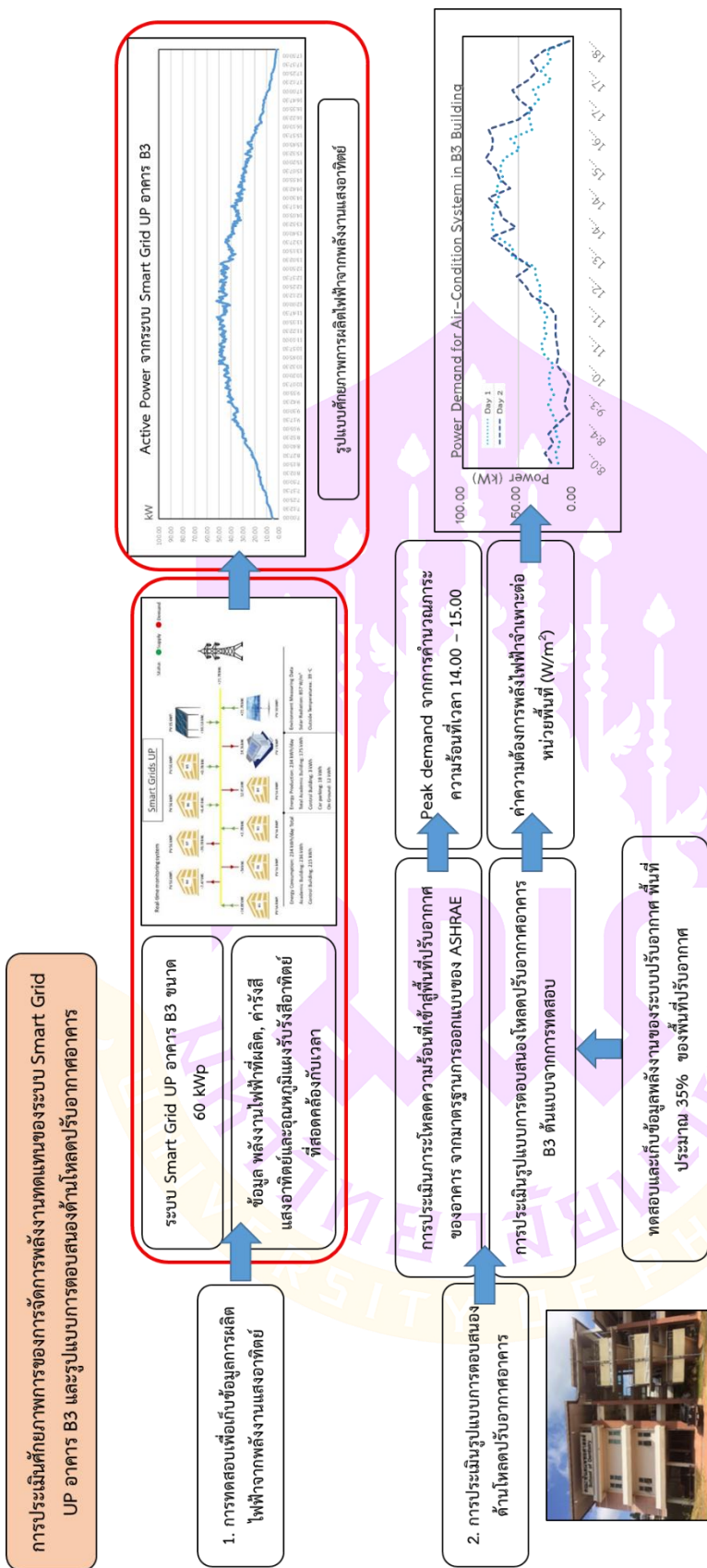
ปัจจุบัน ในส่วนนี้ทดสอบการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในพื้นที่ประมาณ 35% ของพื้นที่ปรับอากาศอาคาร จากนั้นประเมินเป็นค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่อหน่วยพื้นที่แล้วประเมินเป็นรูปแบบความต้องการพลังงานไฟฟ้าของอาคาร

ข้อมูลทั้ง 2 ส่วนนี้นำมาใช้ประเมินความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากระบบปรับอากาศที่เกิดจากภาระความร้อนภายนอกและความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากการติดตั้งอุปกรณ์ โดยใช้ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องปรับอากาศ หรือ COP ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Estimate Power Demand} = \frac{\text{Cooling load of building}}{\text{COP of air conditioning}} \quad (4)$$

โดยแผนภาพแสดงแนวทางการดำเนินงานในหัวข้อนี้แสดงดังภาพ 31





ภาพ 31 แผนภาพแนวทางการดำเนินงาน ข้อ 1

2. การจัดการพลังงานระบบปรับอากาศในอาคาร (BEMS/AC) ด้วยการสำรองพลังงานอยู่ในรูปแบบน้ำเย็น (Chilled Water Thermal Storage, CWTS)

การดำเนินงานศึกษาการจัดการพลังงานอาคารเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าระบบปรับอากาศ แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การประเมินศักยภาพของพลังงานของระบบปรับอากาศในพื้นที่ต้นแบบและการออกแบบและทดสอบการใช้รูปแบบ CWTS สำหรับการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศในอาคาร แสดงภาพรวมของการดำเนินงานส่วนนี้ดังภาพ 39 โดยในแต่ละส่วนมีขั้นตอนในการวิจัยดังนี้

2.1 การประเมินศักยภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศของพื้นที่ต้นแบบ

ดำเนินการทดสอบเพื่อประเมินศักยภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศของอาคารในช่วงฤดูร้อน เพื่อสร้างเป็นรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิภายนอกใน โดยพื้นที่ทดสอบในอาคาร B3 คือ ห้องเขียนแบบ มีพื้นที่ปรับอากาศ 189 ตารางเมตรจากการติดตั้งเครื่องปรับอากาศขนาด 26,110 Btu/Hr. จำนวน 1 เครื่องและเครื่องปรับอากาศขนาด 62,600 Btu/Hr. จำนวน 3 เครื่อง แสดงได้ดังรูปที่ 32-33 พื้นที่ทดสอบและลักษณะเครื่องปรับอากาศและการตรวจวัดค่าการใช้พลังงานของระบบ



ภาพ 32 ห้องเขียนแบบคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา



ภาพ 33 เครื่องปรับอากาศที่ติดตั้งในพื้นที่ทดสอบ



ภาพ 34 การตรวจวัดและบันทึกค่าปริมาณและระดับพลังงานในระบบปรับอากาศ

2.2 การออกแบบและทดสอบรูปแบบ CWTS สำหรับการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศ

รูปแบบการจัดการพลังงานที่ศึกษาจะเป็นการใช้งานระบบรวมกับการสำรองพลังงานอยู่ในรูปแบบน้ำเย็น (Chilled Water Thermal Storage, CWTS) โดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาในข้อ 2.1 ประเมินการออกแบบติดตั้งและทดสอบโดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

2.2.1 ออกแบบรูปแบบ CWTS โดยใช้ผลการทดสอบจากการศึกษาในส่วนที่ 1 โดยพิจารณาเฉพาะรูปแบบความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศจากภาวะความร้อนของอากาศภายนอกเป็นหลัก

2.2.2 ติดตั้งระบบ CWTS จากการออกแบบ 2.2.1 โดยสำรองน้ำเย็นเฉพาะใช้งานในพื้นที่ทดสอบ สามารถสร้างเป็นแผนภาพการรูปแบบการจัดการพลังงานในการวิจัยนี้ดังภาพ 38

2.2.3 ทดสอบระบบที่ติดตั้งและการใช้งานร่วมกับระบบปรับอากาศเดิมของพื้นที่ศึกษา โดยแนวทางการทดสอบได้ดังนี้

1) ทดสอบและเก็บข้อมูลจากระบบปรับอากาศที่ติดตั้งเดิมในพื้นที่ทดสอบ เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการศึกษาที่สนใจ

2) ผลิตน้ำเย็นสำรองและเก็บไว้ในถังเก็บน้ำเย็น เลือกช่วงเวลาทดสอบตั้งแต่ 06.00 น. เป็นต้นไป

3) ทดสอบระบบการจัดการพลังงานอาคารของระบบปรับอากาศ เลือกใช้ระบบ CWTS ทำงานร่วมกับระบบปรับอากาศเดิมโดยใช้รูปแบบที่ได้จากข้อที่ 1 เป็นข้อมูลในการเลือกช่วงเวลาใช้งานระบบสำหรับการจัดการพลังงาน

2.2.4 ในการทดสอบจะใช้อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ได้แก่ ค่ากำลังไฟฟ้า ปริมาณพลังงานไฟฟ้า อุณหภูมิและความชื้นอากาศของพื้นที่ทดสอบโดยกำหนดให้ใช้เครื่องมือและระบบในการตรวจวัดดังนี้

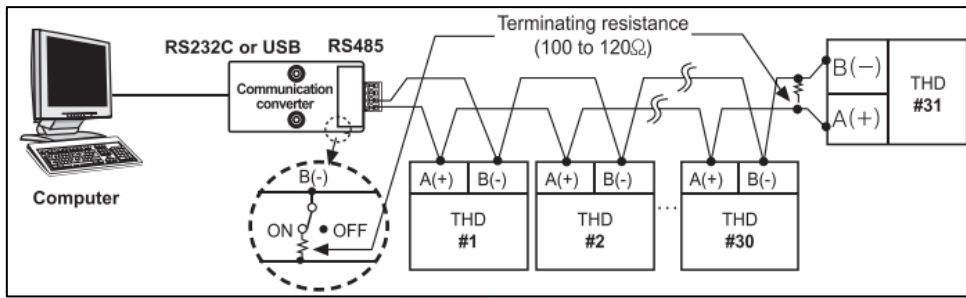
1) ชุด Power Meter สำหรับเก็บข้อมูลการใช้กำลังไฟฟ้าพร้อมชุด Data Logger

2) อุปกรณ์ตรวจวัดและเก็บค่าอุณหภูมิและความชื้นภายใน ภายนอกอาคารและชุดเครื่องส่งลมเย็นที่ใช้ในการทดสอบ แสดงได้ดังภาพ 35 และ 36

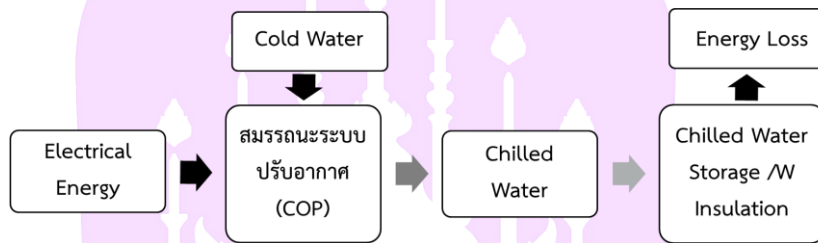
2.2.5 ประเมินและวิเคราะห์ผลการศึกษา ซึ่งเป็นการประเมินผลทดสอบสำหรับการแก้ปัญหาการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดในระบบปรับอากาศในฤดูร้อน



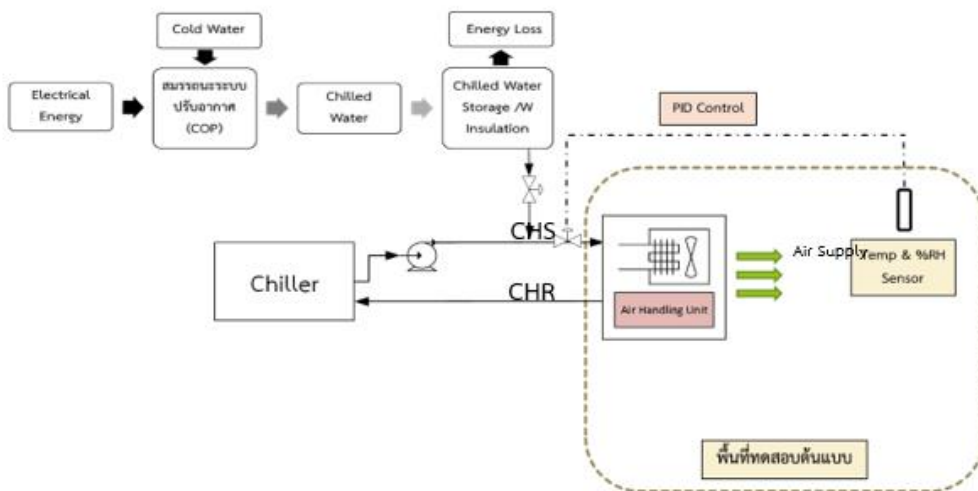
ภาพ 35 ชุดตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น Autonics



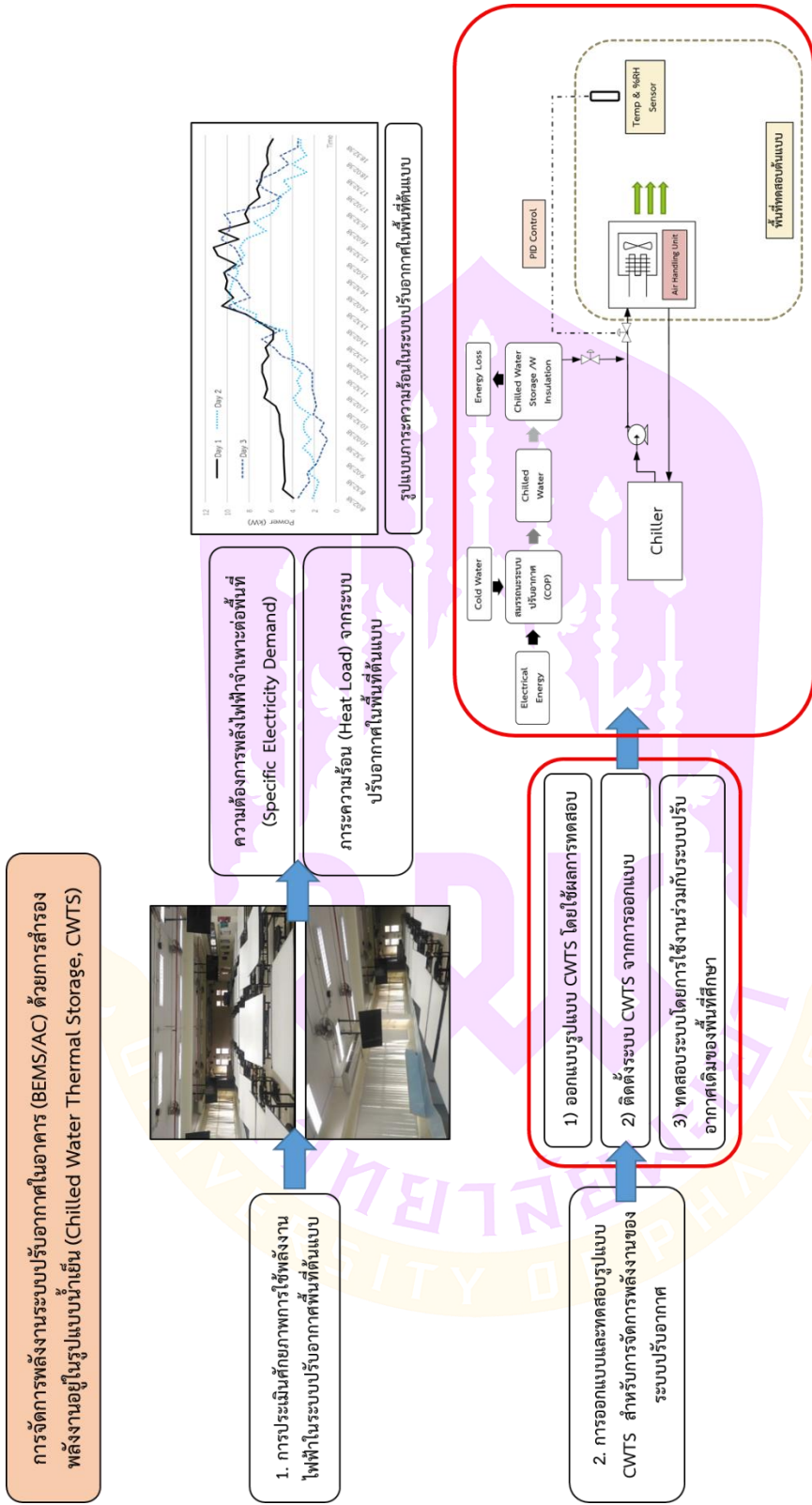
ภาพ 36 การต่อชุด Sensor ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น



ภาพ 37 แผนภาพรูปแบบการศึกษา



ภาพ 38 รูปแบบการทดสอบในพื้นที่ต้นแบบ



ภาพ 39 แผนภาพแนวทางการดำเนินงาน ข้อ 2

3. การศึกษารูปแบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าอาคารในฤดูร้อนร่วมกับระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 มหาวิทยาลัยพะเยา

เป็นการศึกษาเพื่อหารูปแบบการจัดการพลังงานที่เหมาะสม เพื่อจัดการรูปแบบการตอบสนองด้านโหลดที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น จากการจัดการด้านการใช้พลังงาน (Demand Side Management : DSM) โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 ส่วน

3.1 ประเมินศักยภาพการของการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 โดยตรง ร่วมกับรูปแบบการตอบสนองด้านภาระในการปรับอากาศ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ DSM Techniques ในรูปแบบ Peak Clipping

3.2 การศึกษาแนวทางการปรับปรุงการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศเดิมในอาคารต้นแบบ ในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบควบคุมภาระความเย็นของระบบ CWTS จะทำให้ปริมาณและระดับความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบในภาพรวมลดลง

3.3 การศึกษาเพื่อหาแนวทางการการใช้ประโยชน์จากการผลิตไฟฟ้าส่วนเกิน (Over energy) ในช่วงเวลา 07.00 – 13.00 น. จากผลประเมินเบื้องต้นพบว่าพลังงานไฟฟ้าส่วนนี้อาจจะสูงถึงกว่า 25% ของปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมด โดยในการศึกษานี้จะถูกใช้ประเมินขนาดของการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System, BESS) ที่เหมาะสมเพื่อทำหน้าที่เป็นไฟฟ้าสำรองในการจัดการพลังงานเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วงกลางวันและลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบแสงสว่างในช่วงกลางคืนในกรณีไม่มีการใช้พื้นที่อาคารในวันหยุดหรือวันเสาร์ – อาทิตย์

ทั้ง 3 ส่วนนำมาประเมินร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 เพื่อประเมินเป็นผลของการลดลงของความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของระบบปรับอากาศในอาคารต้นแบบ

4. การประเมินผลการศึกษาริจั

ในการศึกษาในหัวข้อ 3.1 – 3.3 สามารถสรุปการศึกษารูปแบบของการระบบการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศสำหรับอาคาร (BEM/AC) ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อนำมาใช้จัดการค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศทั้งในด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงานและความคุ้มค่าในการลงทุนผ่านตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ มีประเด็นที่ศึกษา 3 ประเด็นได้แก่

4.1 การศึกษาแนวทางการจัดการศักยภาพของพลังงานทดแทนเพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ จะเป็นการศึกษาหลักเพื่อพิจารณาเป็นปัจจัยการของการลดลงของปริมาณ

และค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในระบบปรับอากาศ เมื่อเกิดภาวะความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วงฤดูร้อน

4.2 การจัดการพลังงานโดยการออกแบบและประเมินขนาดระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อชดเชยความต้องการพลังงานไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดทั้งในระบบ CWTS และ BESS ตามลำดับ

4.3 การควบคุมระบบที่มีประสิทธิภาพ สามารถตอบสนองต่อระดับภาระความเย็นของระบบปรับอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพตาม ซึ่งจะทำให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยเฉพาะในส่วนของปริมาณพลังงาน

จาก 4.1 – 4.3 เป็นแนวทางการศึกษาการจัดการเพื่อใช้พลังงานในระบบปรับอากาศตามการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานไฟฟ้า (Demand Response :DR) เพื่อพิจารณาเป็นรูปแบบทางเลือกที่เหมาะสม ตามบริบทของพื้นที่ที่ศึกษาและประเมินผลการศึกษาในด้านประสิทธิภาพพลังงาน ส่วนการวิเคราะห์จะเปรียบเทียบกับค่าประเมินศักยภาพพลังงานไฟฟ้า หรือ Energy Baseline ของอาคาร กับ ZEB (Zero Energy Building) หรืออาคารใช้พลังงานที่จ่ายเข้าจากภายนอกในระดับใกล้เคียงศูนย์ จากความต้องการพลังงานของอาคารที่ต่ำมากและยังมีการผลิตพลังงานที่ใช้ในอาคารจากพลังงานหมุนเวียน

ในด้านความคุ้มค่าในการลงทุนผ่านตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ จะดำเนินการศึกษาผ่านตัวแปร NPV IRR และระยะเวลาการคืนทุน ทั้งนี้อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน จะถูกกำหนดด้วยฐานข้อมูลที่รวบรวมของการผลิตไฟฟ้าของพื้นที่จริงร่วมกับข้อมูลการทดสอบของการตอบสนองโหลดจากการปรับอากาศพื้นที่ทดสอบ ทำให้ผลที่ได้สามารถสะท้อนความเป็นจริงของการจัดการด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยในหัวข้อ “การพัฒนากระบวนการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในอาคาร” เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาแนวทางการจัดการการใช้พลังงานในอาคาร (Building Energy Management System) เพื่อพัฒนาเป็นต้นแบบของระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศในอาคารจากการจัดการพลังงานทดแทนร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากสายส่ง ในงานวิจัยจะเป็นการศึกษาการวิเคราะห์ข้อมูล ออกแบบและทดสอบเพื่อแก้ปัญหาความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของระบบปรับอากาศในพื้นที่ต้นแบบในช่วงที่อุณหภูมิภายนอกอาคารมีค่าเฉลี่ยสูงสุดของปีคือเดือน เม.ย. และ พ.ค. โดยผลของการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดที่สอดคล้องกับบทที่ 3 ดังหัวข้อต่อไปนี้

1. การประเมินรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าและศักยภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ของมหาวิทยาลัยพะเยาและรูปแบบการตอบสนองด้านโหลดปรับอากาศอาคาร
2. การออกแบบและทดสอบการจัดการพลังงานสำหรับระบบปรับอากาศในอาคาร (BEMS/AC) ด้วยการสำรองพลังงานอยู่ในรูปแบบน้ำเย็น (Chilled Water Thermal Storage, CWTS)
3. การศึกษารูปแบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าอาคารในฤดูร้อนร่วมกับระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 มหาวิทยาลัยพะเยา
4. การประเมินด้านความคุ้มค่าในการลงทุนของการจัดการด้านการใช้พลังงาน (DSM) ผ่านตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์

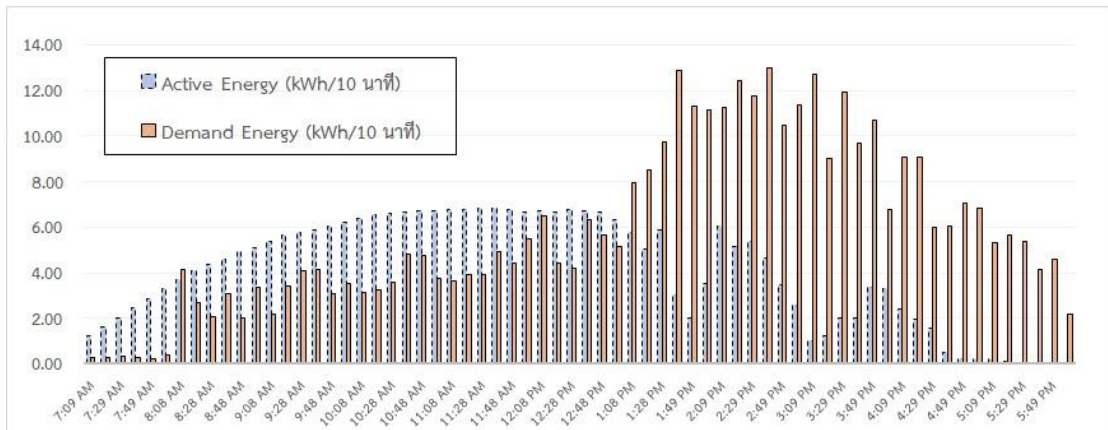
การประเมินรูปแบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากศักยภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ของมหาวิทยาลัยพะเยาและรูปแบบการตอบสนองด้าน โหลดปรับอากาศอาคาร

การดำเนินงานการเก็บข้อมูลจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ของมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเปรียบเทียบความเข้มแสง ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สรุปได้ดังตาราง 1 จากข้อมูลดังกล่าวพบว่า ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงฤดูหนาว ในตรงกันข้ามประสิทธิภาพดังกล่าวจะต่ำสุดในช่วงฤดูฝน โดยในช่วงฤดูหนาวมีความร้อนสะสมใต้แผงรับแสงอาทิตย์ไม่มากทำให้อุณหภูมิของแผงรับแสงเฉลี่ยต่ำกว่าในช่วงฤดูกาลอื่นจึงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นด้วย ส่วนช่วงฤดูฝนมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าลดลงเนื่องจากในช่วงฤดูฝนมีเมฆมากทำให้แสงอาทิตย์ไม่สามารถส่องถึงแผงรับแสงได้ จากการศึกษาของ พุทธิ์ สกุลช่างสังจะทัย [48] แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิแผงรับแสงเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกลดลงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าลดลง ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจึงลดลงด้วย การปรับปรุงประสิทธิภาพโดยการทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของแผงรับแสงลดลงโดยใช้วิธีติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนและการพ่นน้ำระบายความร้อนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่ 0.5 – 1.2% อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์พบว่า มีผลตอบแทนค่อนข้างต่ำ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากที่สุดคือความเข้มแสงและอุณหภูมิใต้แผง ในช่วงฤดูร้อนซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดในรอบปีจากการใช้งานในระบบปรับอากาศ ขณะเดียวกันจากตาราง 1 แสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาดังกล่าวมีศักยภาพที่จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดเช่นกัน การศึกษาเพื่อพัฒนาเป็นต้นแบบระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (BEMS) ร่วมกับการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP ของอาคาร B3 มหาวิทยาลัยพะเยา จะทำให้สามารถประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเครื่องปรับอากาศสอดคล้องกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้สูงขึ้น

ตาราง 1 ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ในรอบปี

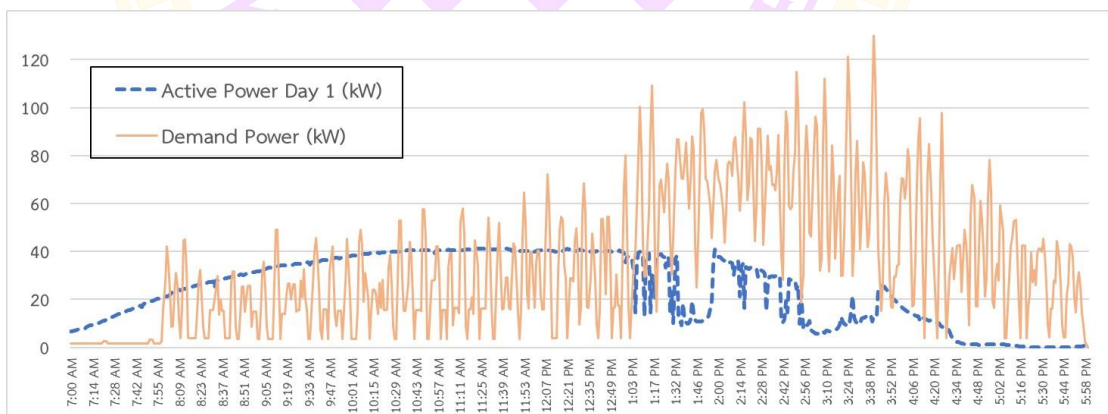
Season	Month	Average solar radiation intensity (kWh/m ² /day)	Average electricity production (kWh/m ² /day)	Conversion Efficiency (η_{el}) (%)
Summer	Feb.	4.19	0.86	20.55
	Mar.	4.39	0.83	18.91
	Apr.	4.61	0.71	15.40
	May.	4.97	0.81	16.49
Average		4.54	0.80	17.68
Rainy	Jun.	4.87	0.77	15.85
	Jul.	4.59	0.52	11.33
	Aug.	3.95	0.47	11.89
	Sept.	4.38	0.51	11.64
Average		4.45	0.57	12.75
Winter	Oct.	4.78	0.51	10.67
	Nov.	3.28	0.65	19.76
	Dec.	3.22	0.71	22.05
	Jan.	3.48	0.79	22.56
Average		3.69	0.67	18.02

ขอบเขตของงานวิจัยนี้สนใจศึกษาในช่วงฤดูร้อน โดยเฉพาะในเดือน พ.ค. ซึ่งเป็นเดือนที่มีค่าเฉลี่ยของความเข้มแสงอาทิตย์สูงที่สุดและมีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าได้มากที่สุดในรอบปี รวมถึงการเกิดปัญหาของระดับความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand) ของประเทศไทย เมื่อประเมินความต้องการพลังงานไฟฟ้าของอาคารต้นแบบและความสามารถในการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP ของอาคาร B3 ในรอบวัน พบว่ารูปแบบของทั้ง 2 ระบบมีความไม่สอดคล้องในการผลิตและความต้องการพลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา ทำให้การใช้พลังงานที่ผลิตได้ไม่มีประสิทธิภาพ รูปแบบเบื้องต้นดังกล่าวแสดงได้ดังภาพ 40 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบรูปแบบของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 (Active Energy) จากการติดตั้งระบบ PV ขนาด 60 kWp บนหลังคากับความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอาคาร (Demand Energy) จากการตรวจวัดทุก 10 นาที ที่มีการใช้อาคารตั้งแต่ 07.00 – 18 .00 น.ในเดือน พ.ค. 60



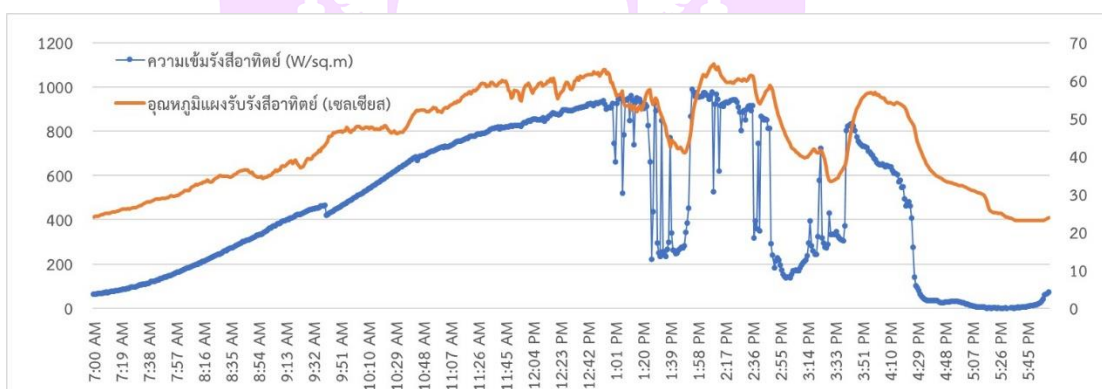
ภาพ 40 รูปแบบความต้องการและการผลิตพลังงานไฟฟ้าของอาคารต้นแบบ

รูปแบบการใช้พลังงานที่เกิดขึ้นชี้ให้เห็นว่าศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเริ่มตั้งแต่ช่วง 7.00 น. ขณะเดียวกันการใช้พื้นที่ของอาคารต้นแบบมีการใช้ประโยชน์ตั้งแต่เวลา 8.00 น. โดยในช่วงเวลา 07.00 – 13.00 น. เป็นช่วงที่ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยในวันที่ทดสอบพลังงานส่วนเกินนี้สูงถึง 74.30 kWh หรือเป็นสัดส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตไม่ได้ใช้ประโยชน์ถึง 38.01% ของการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลานั้นหรือคิดเป็น 27.71% ของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งวัน ดังภาพ 41 เป็นการเปรียบเทียบพลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้จากระบบ (Active Power) กับความต้องการพลังไฟฟ้าของอาคาร (Demand Power) ในช่วงเวลาเดียวกันจากภาพ 40



ภาพ 41 พลังไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 (Active Power) และความต้องการพลังไฟฟ้าของอาคาร (Demand)

เมื่อประเมินชุดข้อมูลจากภาพ 40 และ 41 พบว่าเกิดความผันผวนของการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ โดยเฉพาะในช่วงเวลา 13.00 – 15.30 น. จากสภาพอากาศที่ทำให้ความเข้มรังสีอาทิตย์เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วโดยที่อุณหภูมิใต้แผงรับรังสีไม่ได้ลดลงอย่างสอดคล้องกัน ทำให้พลังงานที่ผลิตได้ลดลงจากปัจจัยความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแผงรับแสงอาทิตย์ โดยอุณหภูมิที่สูงของแผงรับแสงจะทำให้สมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าลดลง [49] การเปลี่ยนแปลงนี้แสดงได้ในภาพ 42 ขณะเดียวกันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารที่มาจากระบบปรับอากาศขึ้นอยู่กับภาวะความร้อนจากโหลดยานนอกอาคารและคุณสมบัติของวัสดุในการดูดกลืนและสะท้อนความร้อนหรือที่เรียกว่า มวลอุณหภาพ (Thermal Mass) ทำให้เกิดการกักเก็บความร้อนและสะสมอยู่ในกรอบอาคาร การเปลี่ยนแปลงของอากาศภายนอกเพียงอย่างเดียวจึงไม่ส่งผลต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าของอาคารซึ่งต้องลดลงอย่างชัดเจน



ภาพ 42 ความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแผงรับรังสีอาทิตย์

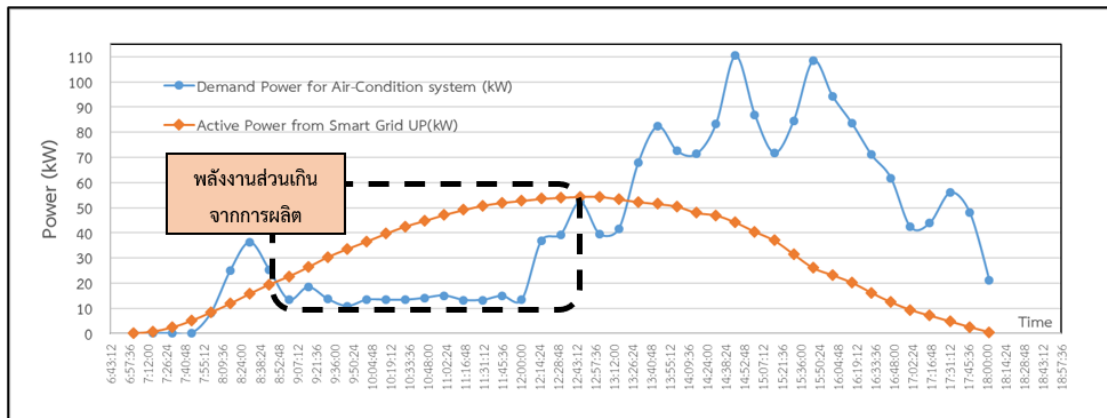
จากรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารต้นแบบซึ่งแสดงผลการศึกษาได้จากภาพ 40-42 ประกอบกับการประเมินสัดส่วนการใช้พลังงานจากระบบประกอบอาคารต่าง ๆ พบว่าในอาคารต้นแบบมีสัดส่วนการใช้พลังงาน 86.94% จากระบบปรับอากาศที่มีการติดตั้งขนาดทำความเย็นรวม 1,500,265 Btu/hr เมื่อประเมินเป็นความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของระบบที่ติดตั้งจะทำให้ระดับความต้องการพลังงานไฟฟ้ามากที่สุดถึง 139.15 kW โดยระบบแสงสว่างติดตั้งมีสัดส่วนการใช้พลังงานที่ประมาณ 8.06% ส่วนที่เหลือเป็นการใช้ไฟฟ้าสำหรับส่วน

อื่น ๆ ไม่เกิน 5% จากสัดส่วนดังกล่าวถือว่าเป็นระบบอาคารต้นแบบนี้มีรูปแบบการใช้พลังงานไม่ซับซ้อน สามารถสรุปผลการศึกษานี้ได้ดังนี้

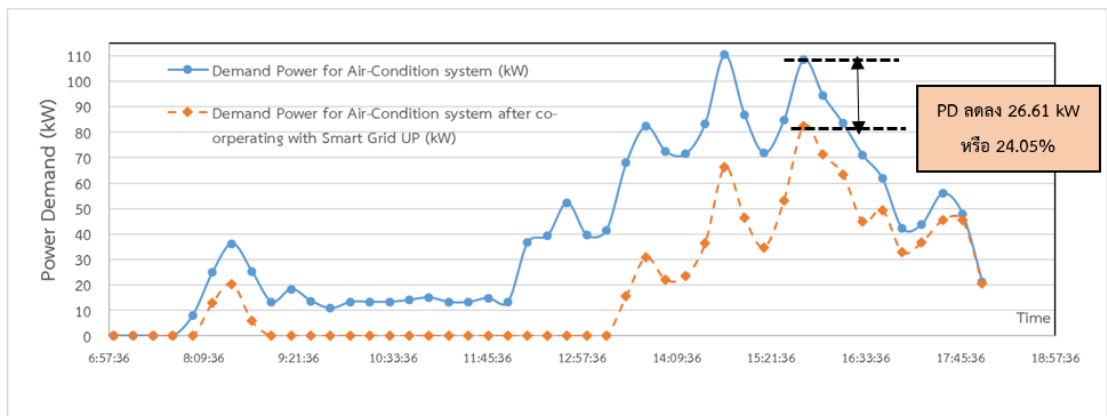
1. ประเมินการใช้ประโยชน์ของการผลิตพลังงานไฟฟ้าในช่วง 8.00 – 12.00 น. ทำให้ระดับความต้องการพลังไฟฟ้าของอาคาร มีค่าเฉลี่ยที่ 21 kW ซึ่งส่วนใหญ่มาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบแสงสว่างและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้วันละ 7 ชั่วโมงตั้งแต่เวลา 09:00–16:00

2. ประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของวันจะอยู่ในช่วงเวลา 09:00–09:30 โดยที่ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 250 W/m^2 ขณะเดียวกันผลของอุณหภูมิแผ่รังสีอาทิตย์สะสมจะสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 13:00–14:30 โดยผลกระทบดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าลดลง ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลงแม้ว่าช่วงดังกล่าวจะมีความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุดในรอบวัน จากแนวโน้มผลการทดสอบและการเก็บข้อมูล ทำให้สามารถประเมินความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศและความสามารถในการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ได้เป็นรูปแบบที่จะทำการศึกษาในหัวข้อถัดไป

ในการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศและเก็บข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพื้นที่ต้นแบบเพิ่มเติมในช่วงเดือนเมษายนและพฤษภาคม สามารถแสดงผลการทดสอบดังกล่าวในภาพ 43 ซึ่งเป็นการประเมินระดับค่าเฉลี่ยของ Active Power หรือพลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 และรูปแบบการใช้พลังไฟฟ้าเฉลี่ยในระบบปรับอากาศ ส่วนในภาพ 44 เป็นการจำลองการใช้พลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าหลักหลังจากถูกชดเชยด้วยพลังไฟฟ้าจากผลิตของระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 โดยตรง ส่งผลให้เกิดการลดของค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดของวันเฉลี่ยลดลงที่ 26.61 kW หรือประมาณ 24.05 % และสามารถทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าหลักโดยตรงได้เฉลี่ยวันละ 24.70 kWh ในขณะเดียวกันพบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการผลิตในระหว่างวันในช่วงเวลาประมาณ 9.00 – 12.00 น. ผลของการใช้พลังงานดังกล่าวแสดงดังตาราง 2



ภาพ 43 เปรียบเทียบความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศและ (Active Power) ที่ อาคาร B3



ภาพ 44 การจำลองความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ลดลงอาคาร B3

ตาราง 2 เปรียบเทียบความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศและพลังงานที่ผลิตได้จาก Smart Grid UP อาคาร B3

ช่วงเวลา	ความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศ (kWh)	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก Smart Grid UP อาคาร B3 (kWh)	พลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการต้องการใช้พลังงาน (kWh)
07:00-09:00	23.66	15.96	-
09:00-13:30	101.86	212.65	110.79
13:30-18:00	296.05	118.21	-
รวม	421.57	346.82	110.79

ในตาราง 2 แสดงการเปรียบเทียบความต้องการพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศและพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก Smart Grid UP อาคาร B3 โดยระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 82.27% ของค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ แต่ในการใช้งานจริงไม่สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตามความสามารถดังกล่าวในการศึกษานี้พบว่าสามารถใช้ประโยชน์จากการผลิตไฟฟ้าของระบบที่ติดตั้งได้เพียง 60% - 70% ของปริมาณที่ผลิตได้หรือสามารถทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศเพียง 55% ของปริมาณความต้องการพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ ผลที่เกิดขึ้นมาจากความสามารถในการกักเก็บความร้อนของกรอบอาคาร ทำให้เกิดการหน่วงเวลาในการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกอาคารเข้าสู่ภายในอาคาร ทำให้ความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารนานขึ้นทั้งที่ความเข้มแสงอาทิตย์ลดลง ส่งผลให้ภาระการปรับอากาศไม่สัมพันธ์กับค่าโหลดความร้อนภายนอกอาคารเห็นได้จากในช่วงเวลา 9.00 - 13.30 น. เป็นช่วงที่ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศมีค่าค่อนข้างต่ำแต่มีศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยสูงกว่าความต้องการมาก สามารถสรุปผลของการทดสอบความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดและศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ได้ตามตาราง 3 และตาราง 4

ตาราง 3 ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Peak demand, PD) ของระบบปรับอากาศ
ของอาคารต้นแบบ

รายละเอียด	พลังงานไฟฟ้า จำเพาะ (W/m ²)	ช่วงเวลา
Peak demand จากการคำนวณภาวะความร้อน	68.62 1	14.00 – 15.00
Peak demand จากการทดสอบของระบบปรับอากาศ	77.898	14.30 – 15.45
ศักยภาพการผลิตพลังไฟฟ้าของ Smart Grid UP อาคาร B3	38.384	12.30 – 13.30

ตาราง 4 พลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่อวันที่ผลิตได้และความต้องการพลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่อวันในช่วงฤดูร้อน

รายละเอียด	ค่าพลังงานจำเพาะ (kWh-day/m ²)
การผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อพื้นที่แผงรับแสงอาทิตย์ Smart Grid UP อาคาร B3	0.876
ความต้องการพลังงานไฟฟ้าต่อพื้นที่ปรับอากาศต่อพื้นที่ปรับอากาศ	1.065

สำหรับ ตาราง 3 เป็นตารางแสดงถึงความต้องการพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ พบว่าในพื้นที่ทดสอบมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าการประเมินจากการคำนวณถึง 13.52% ซึ่งเป็นผลจากการติดตั้งระบบปรับอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่าการใช้งานจริงของพื้นที่ซึ่งจะพบได้ในการติดตั้งทั่วไปในอาคารอื่น ๆ ในมหาวิทยาลัยพะเยา ในประเด็นต่อมาพบว่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศมีค่ามากกว่าศักยภาพการผลิตพลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ถึงกว่า 100% ซึ่งให้เห็นว่าระดับพลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากศักยภาพดังกล่าวอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีความแตกต่างกันของช่วงเวลาที่ต้องการใช้ประโยชน์และความสามารถในการผลิตไฟฟ้า จากตาราง 4 เป็นผลการวิเคราะห์ข้อมูลของความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของอาคารทดสอบกับ

ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศของอาคารเดียวกัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในอนาคตสำหรับการออกแบบการจัดการพลังงานทางเลือกกับความต้องการพลังงานไฟฟ้าในบริบทพื้นที่ใกล้เคียงกัน

ในภาพรวมของการศึกษาส่วนนี้จะได้ฐานข้อมูลและแนวโน้มผลการทดสอบที่มีความสำคัญต่อการออกแบบระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (Building Energy Management System, BEMS) เพื่อใช้เชื่อมโยงระหว่างความต้องการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศและการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ทำให้สามารถใช้พลังงานทดแทนที่มีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับความต้องการของพลังงานในอาคารได้อย่างแท้จริง

การจัดการพลังงานระบบปรับอากาศในอาคาร (BEMS/AC) ด้วยการสำรองพลังงานอยู่ในรูปแบบน้ำเย็น (Chilled Water Thermal Storage, CWTS)

ข้อมูลจากผลการศึกษาในหัวข้อที่แล้วเมื่อพิจารณารูปแบบความต้องการพลังงานไฟฟ้าและการผลิตไฟฟ้าของระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ทำให้ได้แนวทางในการพัฒนาปรับปรุงการจัดการการใช้พลังงานที่สอดคล้องกับบริบทเดิมของอาคารสำหรับการลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าระบบปรับอากาศ โดยเลือกใช้รูปแบบ CWTS ในการศึกษาจะมีขอบเขตของการศึกษารอบคลุมทั้งด้านออกแบบและทดสอบระบบในเดือนมีนาคม – เดือนพฤษภาคม ในการดำเนินงานแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการประเมินศักยภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศในอาคารต้นแบบ ในส่วนหลังเป็นการออกแบบและการทดสอบการใช้รูปแบบ CWTS สำหรับการจัดการพลังงานในอาคาร ของระบบปรับอากาศ โดยในแต่ละส่วนมีผลการดำเนินงานศึกษาดังนี้

1. การประเมินศักยภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศของพื้นที่ต้นแบบ

ในการประเมินศักยภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าจะถูกใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและทดสอบการจัดการการใช้พลังงานร่วมกับระบบ CWTS โดยมีการศึกษา 2 ส่วนย่อย คือ

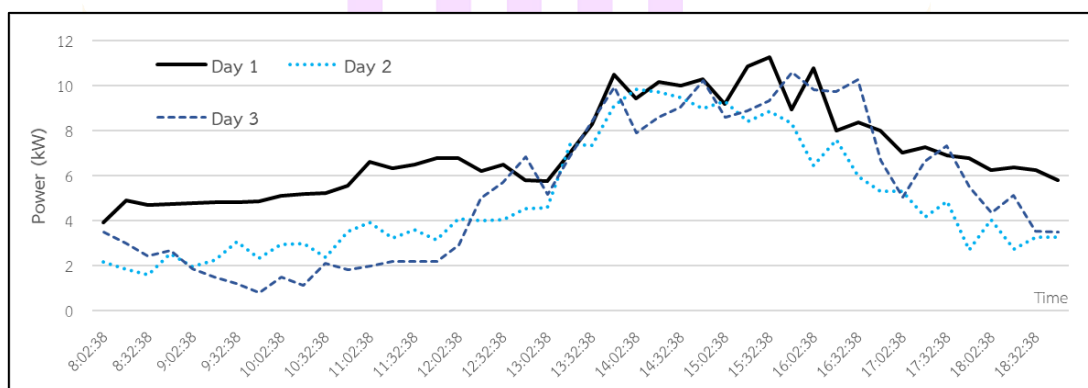
1.1 การประเมินภาระความร้อนที่เข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศของอาคาร (Cooling Load of Building) และขนาดติดตั้งของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนที่ติดตั้งแล้วในอาคารต้นแบบ ซึ่งเป็นความสามารถของระบบในการจัดการกับภาระความร้อนอาคาร

การประเมินเบื้องต้นจะใช้การคำนวณจากมาตรฐานการออกแบบของ ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) ในวิธี Residential Load Factor (RLF) Method [50] เพื่อหาภาระความร้อนสูงสุด ที่เกิดในช่วงเวลา 13.30-16.00 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มิอูณหภูมิภายนอกสูงสุดเกิดขึ้นในพื้นที่ต้นแบบ ผลการประเมินภาระความร้อน

สูงสุดที่เข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศของอาคารจากการคำนวณภาระดังกล่าวที่ 1,012,293.45 Btu/hr. หรือคิดเป็น 714.14 Btu/hr. \cdot m² โดยที่การติดตั้งของระบบปรับอากาศของอาคารมีขนาด 1,500,265 Btu/hr หรือคิดเป็น 1,058.39 Btu/hr. m² ขนาดการติดตั้งระบบมากกว่าการคำนวณถึง 48.02% ผลของภาระความร้อนดังกล่าวเมื่อประเมินเป็นความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand, PD) จากเครื่องปรับอากาศที่ติดตั้งพบว่าจะทำให้เกิด PD สูงสุดที่ 139.15 kW ทั้งที่ควรจะมีค่าสูงสุดไม่เกิน 97.27 kW จากการติดตั้งขนาดการปรับอากาศที่เหมาะสมกับพื้นที่

2. การทดสอบเพื่อประเมินรูปแบบและศักยภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศของอาคารในช่วงฤดูร้อนที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิภายนอก พื้นที่ทดสอบเลือกใช้พื้นที่ในห้องเขียนแบบ (Drawing room) ซึ่งมีพื้นที่ปรับอากาศ 189 ตารางเมตร ลักษณะพื้นที่ดังกล่าวได้ในบทที่ 3

ในการทดสอบเพื่อประเมินศักยภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศพบว่าภาระความร้อนสูงสุดในรอบวันของการใช้งานเครื่องปรับอากาศเท่ากับ 260.94 W/m² หรือ 890.85 Btu/hr. \cdot m² ที่ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ 85.55 W/m² และเมื่อมีการทดสอบและเก็บข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อหารูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 8.00 – 18.00 น. ติดต่อกัน 3 วัน ผลการทดสอบแสดงรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ดังภาพ 45



ภาพ 45 รูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศในพื้นที่ทดสอบ

ผลการทดสอบพบว่าระดับความต้องการพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลา 8.00 – 12.00 น. มีค่าเฉลี่ยที่ 4.57 kW หลังจากนั้นระดับดังกล่าวสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและอยู่ในระดับใกล้เคียงกันในช่วงเวลา 13.30 – 16.30 น. หรือประมาณ 3 ชั่วโมง โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 9.10 kW ซึ่งมีระดับสูง

กว่าช่วงเวลาก่อนหน้านั้นเกือบเท่าตัว รูปแบบความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ต่างกันในแต่ละวัน เกิดจากความร้อนภายนอกอาคารที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละวันและคุณสมบัติมวลอุณหภูมิกาย (Thermal Mass) ของวัสดุ ในการศึกษาวิจัยนี้ ผลทดสอบดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลเพื่อ ออกแบบและทดสอบการจัดการพลังงานเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในระบบ ปรับอากาศแสดงการสรุปผลการทดลองได้ตามตาราง 5

ตาราง 5 ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่อพื้นที่ (Specific Electricity Demand) และภาระความร้อน (Heat Load) จากระบบปรับอากาศในพื้นที่ต้นแบบ

รายละเอียด	Specific Electricity Demand	Specific Heat Load
1) ค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณ (W/m ²)	68.621	209.293
2) ค่าสูงสุดที่ได้จากการทดสอบเฉลี่ย (W/m ²)	59.627	181.863
3) ค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา 13.30 – 16.30. (W/m ²)	48.146	146.844

2. การศึกษารูปแบบ CWTS ในการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศในพื้นที่ทดลอง หอเขียนแบบวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

เมื่อพิจารณาจาก ตาราง 5 ใน 1) และ 2) ซึ่งเป็นค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากการคำนวณภาระสูงสุดของการปรับอากาศและค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบต่อเนื่อง 3 วัน พบว่าค่า 2) จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ 15.08% แต่จะสูงกว่าค่าพลังไฟฟ้าเฉลี่ยของช่วงเวลาศึกษาหรือ 3) ที่ 19.25% ซึ่งแสดงได้ว่าถ้ามีการบริหารจัดการไฟฟ้าที่ดีตามศักยภาพของการใช้พลังงานในการปรับอากาศของพื้นที่ต้นแบบ ก็จะทำให้สามารถลดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่าสัดส่วนดังกล่าว ผลของข้อมูลถูกกำหนดเพื่อใช้สำหรับการออกแบบ CWTS ในการจัดการพลังงานเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบโดยมีเป้าหมายให้เกิดการลดลงที่ประมาณ 20% ของค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละวัน สามารถสรุปเป็นข้อกำหนดในการออกแบบ (Design Criteria) เพื่อลดระดับความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศซึ่งจะต้องควบคุมให้ไม่เกิน 7.64 kW โดยระบบที่ออกแบบจะต้องสามารถชดเชยการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศได้ในช่วง 3.63 –10.91 kW จากความสามารถในการสำรองพลังงานในรูปน้ำเย็นไม่ต่ำกว่า 34.94 MJ โดยเลือกชุดอุปกรณ์เพื่อทดสอบดังต่อไปนี้

2.1 ชุดเครื่องทำน้ำเย็นระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air Cooled Chiller, CH1) มีคุณสมบัติอุปกรณ์คือ COP = 3.1 ที่ 7.753 kW ใช้สารทำความเย็น R-22 ชุดอุปกรณ์ ดังกล่าวแสดงได้ดังภาพ 46



ภาพ 46 ชุด Air-cooled chiller, CH1

2.2 ชุดถังเก็บน้ำเย็น (Chilled Water Storage Tank, CST) ขนาด 1,000 ลิตรพร้อม วัสดุฉนวน Close Cell Foam หนา 25 มิลลิเมตร

2.3 เครื่องสูบน้ำเย็น (Chilled Water Pump, CHP) มีขนาด 0.87 HP โดยมีระบบ ชุดควบคุมสำหรับปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ จากการทดสอบการใช้งานพบว่าสามารถ ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเย็นในการทดสอบได้ในช่วงที่ใช้งานระหว่าง 30 – 55 ลิตรต่อนาที



ภาพ 47 ชุดถังเก็บน้ำเย็น (Chilled Water Storage Tank, CST)
และ เครื่องสูบน้ำเย็น (Chilled Water Pump, CHP)

2.4 ระบบท่อน้ำเย็นเลือกใช้ท่อ PPR ขนาด 1.5 นิ้ว หุ้มฉนวน Close Cell Foam หนา 2.5 มิลลิเมตร สำหรับท่อน้ำเย็นจ่าย (Chilled Water Supply, CHS) และท่อน้ำเย็นกลับ (Chilled Water Return, CHR)

2.5 ชุดเครื่องส่งลมเย็นต้นแบบ (Air Handling Unit, AHU) เป็นเครื่องส่งลมเย็นที่ออกแบบสำหรับการทดสอบ ขนาดเหมาะสมกับ CH1 สามารถส่งลมเย็นที่อัตราการไหลสูงสุด 3,200 ft³/min สามารถปรับอัตราการไหลของอากาศเย็นโดยอุปกรณ์ปรับรอบ (Variable Speed Drive, VSD)

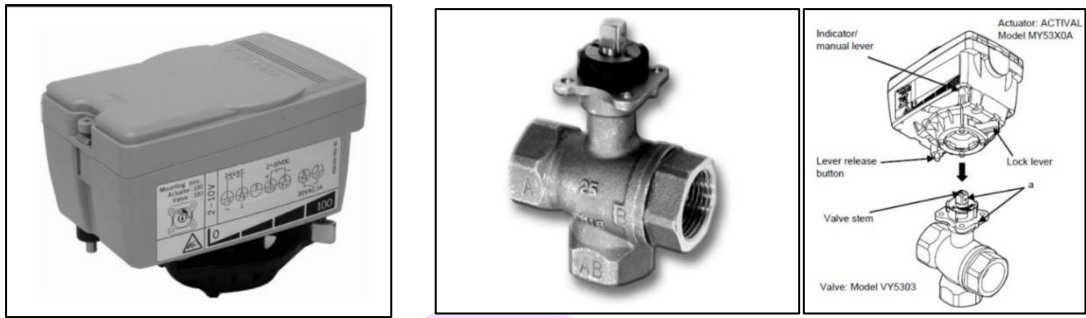


ภาพ 48 ชุดเครื่องส่งลมเย็นต้นแบบ (Air Handling Unit, AHU) พร้อมติดตั้ง
อุปกรณ์ปรับรอบ (Variable Speed Drive, VSD)

ในการออกแบบและสร้างระบบการรับรู้ข้อมูลต่าง ๆ ของการใช้พลังงานในพื้นที่ เพื่อควบคุมและปรับเปลี่ยนภาระไฟฟ้าของระบบปรับอากาศในการตอบสนองด้านโหลด (Demand Response) ในพื้นที่ศึกษาเลือกใช้ ARDUINO Model MEGA 2560 R3 และชุด Sensor ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น ยี่ห้อ Autronics THD Series ในการควบคุมระบบการใช้น้ำเย็นที่เหมาะสมกับภาระความร้อนจริงภายในห้องทดสอบ จากการตรวจวัดที่แม่นยำของชุด Sensor เพื่อควบคุมอัตราการใช้น้ำเย็นแบบ PID โดยอุปกรณ์ในการศึกษานี้เลือกใช้การวาล์วควบคุมการไหลของน้ำเย็นแบบ 3-Way Valve ของ “azbil” ขนาด 1-1/2” ที่มาพร้อมด้วยชุดควบคุมอัตราการไหลหรือ Electro – Mechanical Actuator แสดงรูปอุปกรณ์ควบคุมที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ดังภาพ 49 และ 50



ภาพ 49 ชุด ARDUINO Board Model MEGA 2560 R3 และอุณหภูมิ
และความชื้นภายนอกและภายในอุปกรณ์



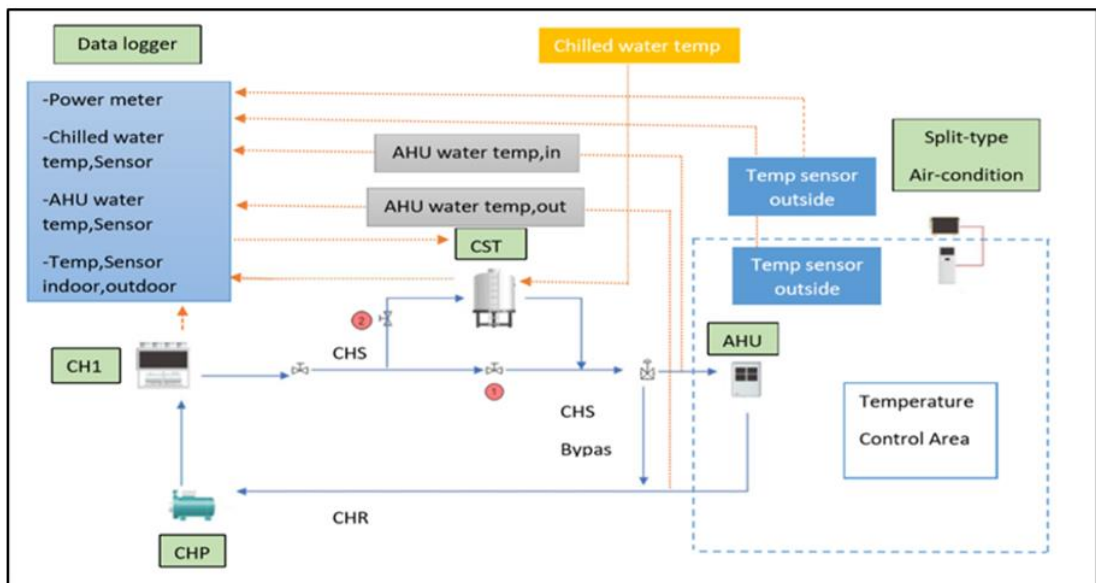
ภาพ 50 ชุดวาล์วควบคุมการไหลแบบ 3- Way Valve

3. การทดสอบการจัดการพลังงานสำหรับระบบปรับอากาศในอาคาร (BEMS/AC)

ต้นแบบ

ในการทดสอบสามารถแสดงเป็นแผนภาพการติดตั้งชุดอุปกรณ์และการเก็บข้อมูลได้

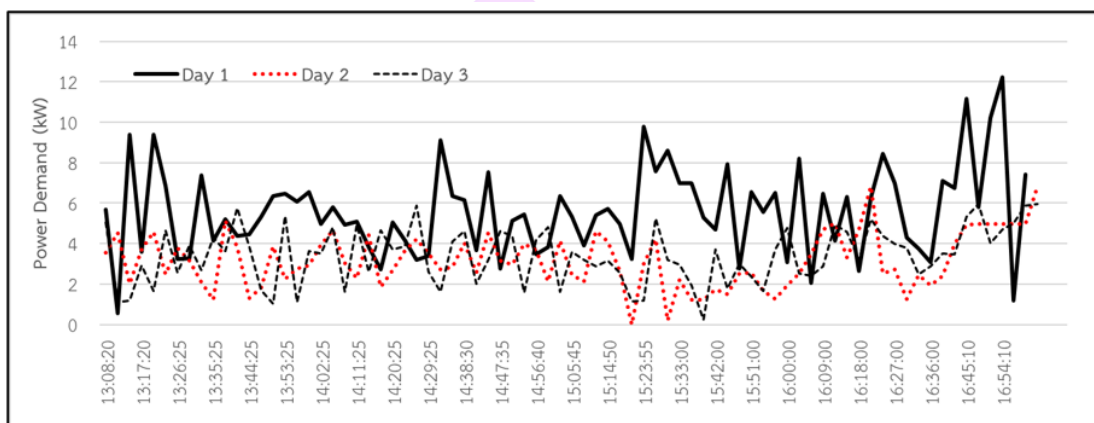
ดังภาพ 51



ภาพ 51 แผนภาพระบบ CWTS ที่ออกแบบพร้อมทดสอบในพื้นที่ต้นแบบ

การทดสอบเริ่มจากการผลิตน้ำเย็นแล้วเก็บน้ำเย็นไว้ในถังขนาด 1,000 ลิตร โดยควบคุมอุณหภูมิน้ำเย็นไม่เกิน 7 °C และกำหนดเวลาทำงานของเครื่องทำน้ำเย็นที่เวลา 06.00 – 07.00 น. การทดสอบใช้ประโยชน์จากน้ำเย็นเฉพาะในช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของวัน

จากการศึกษาพบว่าช่วงเวลาดังกล่าวอยู่ระหว่าง 12.00– 16.00 น. ผลการทดสอบของการจัดการพลังงานในรูปแบบนี้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบปรับอากาศติดตั้งเดิมแสดงได้จากภาพ 52 ซึ่งเป็นการทดสอบต่อเนื่อง 3 วันติดต่อกันในช่วงเวลา 13.00 – 17.00 น. โดย วันที่ 1, 2 และ 3 มีอุณหภูมิอากาศภายนอกห้องเฉลี่ยที่ 32.89 °C 33.03 °C และ 33.24 °C ตามลำดับ



ภาพ 52 ผลการทดสอบของการจัดการพลังงาน

Day 1 ความต้องการพลังไฟฟ้า จากระบบปรับอากาศติดตั้งเดิม Day 2 และ Day 3 ความต้องการพลังไฟฟ้าในวันที่ใช้ระบบ CWTS ควบคุมการทำงาน ผลการทดสอบพบว่าค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดของ Day 2 และ Day 3 เฉลี่ยต่ำกว่า Day 1 ที่ 5.39 kW หรือคิดเป็นระดับพลังไฟฟ้าที่ลดลง 44.11 % ของความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดของ Day 1 เมื่อพิจารณาค่าความต้องการพลังไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงเวลาที่ทดสอบจะเหลือเพียง 2.36 kW หรือเป็นระดับที่ลดลงที่ 45.34% ของวันที่ไม่มีการใช้ระบบ CWTS ส่วนในการเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับระบบปรับอากาศพบว่ามีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง 9.10 kWh เมื่อเปรียบเทียบกับ Day 1 โดยการประเมินนี้ยังไม่ได้หักลบกับพลังงานไฟฟ้าสำหรับการทำงานของระบบทำน้ำเย็นซึ่งเท่ากับ 7.54 kWh เมื่อประเมินเป็นการลดลงของพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์ทั้งหมดพบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง 7.13% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศเดิม

เมื่อมีการเก็บข้อมูลต่อเนื่อง 7 วัน สามารถประเมินเป็นผลลัพธ์ได้ตาม ตาราง 6 ซึ่งเป็นตารางสรุปผลการศึกษาของการจัดการพลังงานอาคารเพื่อลดความต้องการพลังไฟฟ้าระบบปรับอากาศในพื้นที่ต้นแบบ

ตาราง 6 สรุปผลการทดสอบการใช้ระบบ CWTS สำหรับระบบปรับอากาศในพื้นที่
ต้นแบบ

รายละเอียด	ปริมาณ	%	ค่าจำเพาะต่อพื้นที่
1 ค่าเฉลี่ย Peak Power Demand ที่ลดลง	4.93 kW	35.10	26.09 W/m ²
2 ค่าเฉลี่ย Electrical Energy ที่ลดลงของระบบปรับอากาศ	2.87 kWh	13.16	15.20 Wh/m ²
3 The Overall COP of CWTS	1.83		

จากตาราง 6 ข้อ (1) แสดงระดับการลดลงของความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด หรือ PD เฉลี่ยเท่ากับ 4.93 kW หรือลดลงคิดเป็นสัดส่วนที่ 35.10% ของค่า PD เดิมก่อนปรับปรุง เมื่อประเมินเป็นพลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่อพื้นที่ใช้งานคิดเป็น 26.09 W/m² ขณะเดียวกันใน (3) เป็นการประเมินสมรรถนะของการทำน้ำเย็นจากค่า COP พบว่ามีค่าสมรรถนะโดยรวมถึงแม้จะต่ำกว่าระบบปรับอากาศเดิม แต่จากการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีการตอบสนองต่อภาระความร้อนของพื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้มีปริมาณการใช้พลังงานเฉลี่ยต่ำกว่าระบบเดิม 13.16% หรือคิดเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะลดลงที่ 15.20 Wh/m² ซึ่งเป็นข้อมูล (2) ในตาราง

ผลการศึกษานี้เป็นการทดสอบในช่วงวันที่มีระดับอุณหภูมิอากาศภายนอกสูงสุด แนวทางการศึกษาในส่วนนี้จะถูกใช้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบการจัดการใช้พลังงานอาคารเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากระบบปรับอากาศ ระบบที่ถูกออกแบบนี้สามารถลดระดับความต้องการพลังงานไฟฟ้ามากกว่าเป้าหมายที่ประเมินไว้ที่ 20% จากการทำงานร่วมกับระบบปรับอากาศติดตั้งเดิมเนื่องจาก

1. ระบบปรับอากาศเดิมเป็นแบบแยกส่วน ควบคุมการทำงานโดยเทอร์โมสแตตเฉพาะตัว ทำให้ไม่สามารถจัดการการใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้ ขณะเดียวกันการออกแบบระบบตามแนวคิด BEMS ด้วยการใช้รูปแบบ CWTS มีการควบคุมอัตราการใช้น้ำเย็นแบบ PID ทดแทนการควบคุมแบบ On-Off ของเครื่องปรับอากาศเดิมโดยใช้การตรวจวัดอุณหภูมิพื้นที่ต่าง ๆ ที่แม่นยำ ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการจัดการด้านการใช้ไฟฟ้า (Demand Side Management : DSM) ร่วมกับการปรับปริมาณลมเย็นที่เหมาะสมจากการใช้งาน ทำให้เกิดการประหยัดพลังงานไฟฟ้าและช่วยลดระดับความต้องการพลังงานไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน

2. ประสิทธิภาพของการใช้งานเครื่องปรับอากาศขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิอากาศภายนอกเพื่อระบายความร้อนของส่วน Condensing ช่วงเวลาที่ศึกษาเป็นช่วงเวลาที่อุณหภูมิภายนอกค่อนข้างสูงทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานเครื่องปรับอากาศต่ำ ขณะเดียวกันช่วงเวลาในการใช้งานของเครื่องทำน้ำเย็นเป็นช่วงเช้า ระดับอุณหภูมิอากาศภายนอกต่ำทำให้สมรรถนะของระบบจึงสูงกว่าการใช้ประโยชน์ช่วงกลางวัน ทำให้ประสิทธิภาพของการใช้น้ำเย็นเฉพาะช่วงเวลาจึงทำให้เกิดผลที่ดีกว่าที่ประเมิน

3. เมื่อทดสอบใช้งานระบบอย่างต่อเนื่องพบว่าการใช้พลังงานของระบบทำน้ำเย็นมีแนวโน้มลดลงโดยอุณหภูมิน้ำเย็นเริ่มต้นของการทำงานมีค่าลดลงเนื่องจากการสูญเสียความร้อนต่ำของ CST รวมถึงความต้องการพลังงานในระบบปรับอากาศน้อยลงจากการกักเก็บความร้อนของกรอบอาคารเมื่อมีการใช้พื้นที่ปรับอากาศต่อเนื่อง ดังนั้นรูปแบบของการจัดการการใช้ประโยชน์พื้นที่อาคารที่ดีจะต้องมีการใช้งานพื้นที่อย่างต่อเนื่องซึ่งจะทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศลดลงได้

การศึกษารูปแบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าอาคารในฤดูร้อนร่วมกับระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 มหาวิทยาลัยพะเยา

การศึกษาส่วนนี้จะเป็นการใช้ผลของการศึกษาใน 4.1 และ 4.2 สร้างเป็นรูปแบบการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพต้นแบบเพื่อเป็นทางเลือกของอาคารที่มีการติดตั้งระบบประกอบอาคารไปแล้วและมีรูปแบบการใช้พลังงานที่ไม่ซับซ้อน ผลของการศึกษานี้แบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่

1. การประเมินรูปแบบศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ จากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 โดยเฉพาะเดือน พ.ค. ซึ่งเป็นเดือนที่มีโอกาสเกิดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของประเทศไทย

2. การจำลองรูปแบบการใช้การจัดการพลังงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับระบบ Smart Grid UP อาคาร B3

รายละเอียดผลการศึกษาแสดงได้ดังนี้

2.1 การประเมินรูปแบบศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ จากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3

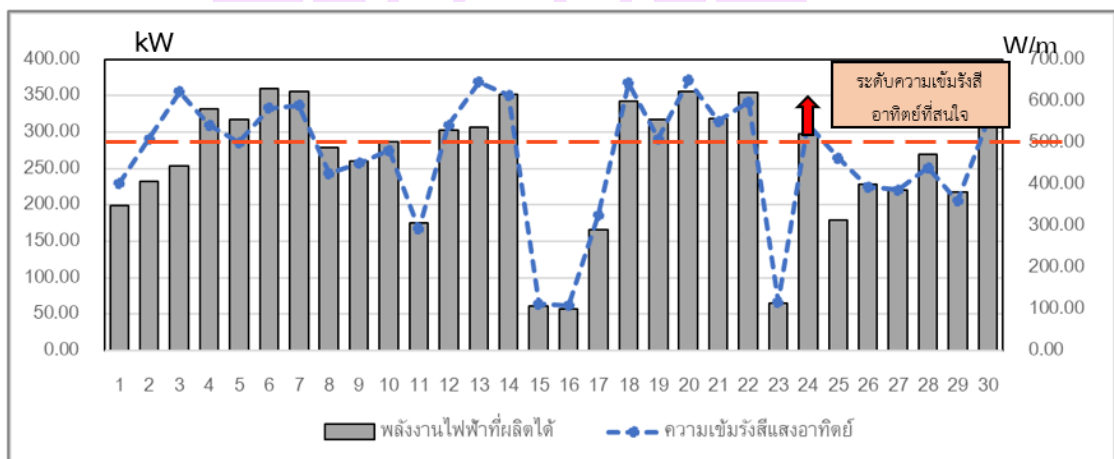
จากการบันทึกและรวบรวมข้อมูลจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ในเดือน พ.ค. โดยมีชุดของข้อมูลที่สำคัญได้แก่ ผลของการผลิตไฟฟ้า ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแผ่รังสีแสงอาทิตย์ โดยผลของการเก็บข้อมูลจะถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิต

ไฟฟ้าและนำไปสร้างเป็นรูปแบบการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำนายกำลังไฟฟ้าในเวลาต่าง ๆ ในช่วงวันที่มีท้องฟ้าโปร่ง (จากการทดสอบกำหนดให้เป็นวันที่ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยใน 10 ชั่วโมงมากกว่า 500 W/m^2) ทำให้สามารถประเมินพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ผลิตได้ในช่วงการใช้งานพื้นที่ 7.00 – 18.00 น. โดยความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P_e) จะขึ้นอยู่กับปัจจัยของความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแผงรับแสงอาทิตย์ ประเมินได้โดย [51]

$$P_e = a + bI_T + cI_T^2 + dT_m + eI_T T_m + fI_T^2 T_m \quad (5)$$

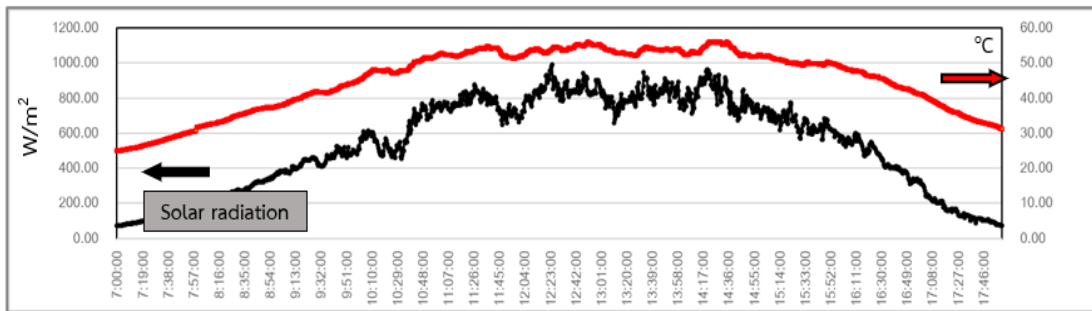
โดย I_T คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์และ T_m คือ อุณหภูมิแผงรับรังสีอาทิตย์

ในการเก็บข้อมูลของศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้ารายวันแสดงได้ดังภาพ 53 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตกับความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายวันในช่วงเดือนที่สนใจ

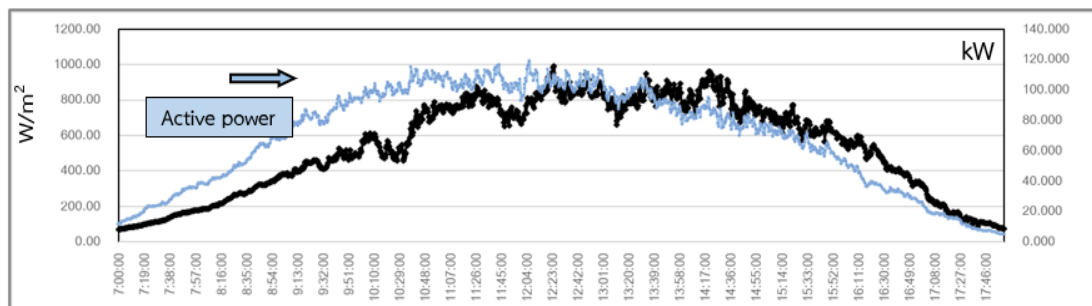


ภาพ 53 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตกับความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายวันเดือน พ.ค.60

ค่าเฉลี่ยของการผลิตพลังงานไฟฟ้า 259.12 kWh/วัน โดยมีความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยที่ 464.98 W/m^2 ในการวิเคราะห์กำหนดให้ใช้ข้อมูลในวันที่รังสีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอหรือในวันที่ระดับความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยมากกว่า 500 W/m^2 ภายใต้เงื่อนไขในเดือนที่ศึกษาจะมีทั้งหมด 15 วัน เพื่อนำมาประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าภายใต้ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแผงรับรังสี ซึ่งแสดงข้อมูลดังภาพ 54 และ 55



ภาพ 54 อุณหภูมิแผงรับรังสีอาทิตย์และความเข้มรังสีอาทิตย์

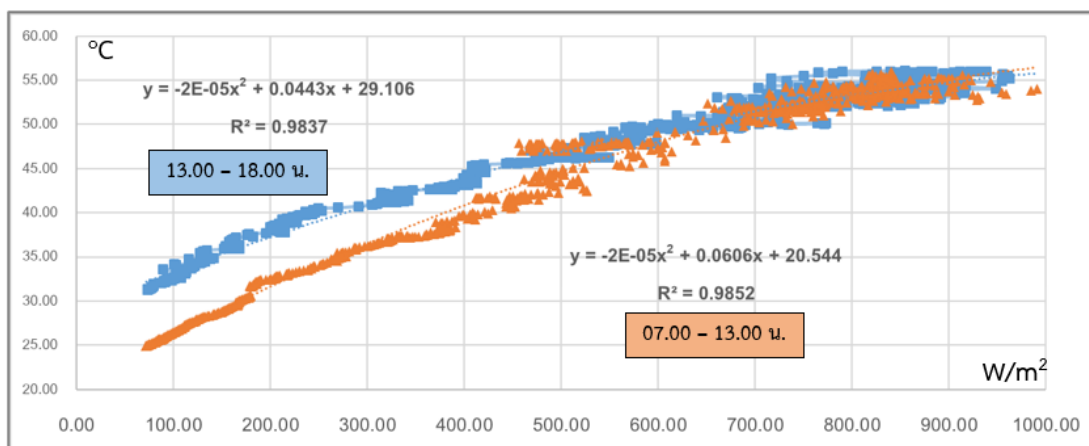


ภาพ 55 พลังไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 (Active Power) และความเข้มรังสีอาทิตย์

จากการศึกษาผลของความสัมพันธ์จากความเข้มรังสีอาทิตย์ซึ่งแปรผันตรงกับ อุณหภูมิแผงรับแสงอาทิตย์มี 2 ความสัมพันธ์ตามช่วงเวลาได้แก่ ช่วง 07.00 – 13.00 น และ 13.00 – 18.00 น. ความแตกต่างกันที่เกิดขึ้นเนื่องจากหลัง 13.00 น. เกิดการสะสมของความร้อนในวัสดุของแผงรับรังสีรวมถึงอากาศแวดล้อมซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าในช่วงเช้า ความสัมพันธ์ ทั้ง 2 มีรูปแบบแสดงตามภาพ 56 และแสดงได้ตามสมการดังนี้

$$07.00 - 13.00 \text{ น. } T_m = (-2 \times 10^{-5})I_T^2 + 0.0606I_T + 20.544 \quad \text{ค่า R Square} = 0.9852 \quad (6)$$

$$13.00 - 18.00 \text{ น. } T_m = (-2 \times 10^{-5})I_T^2 + 0.0443I_T + 29.106 \quad \text{ค่า R Square} = 0.9837 \quad (7)$$



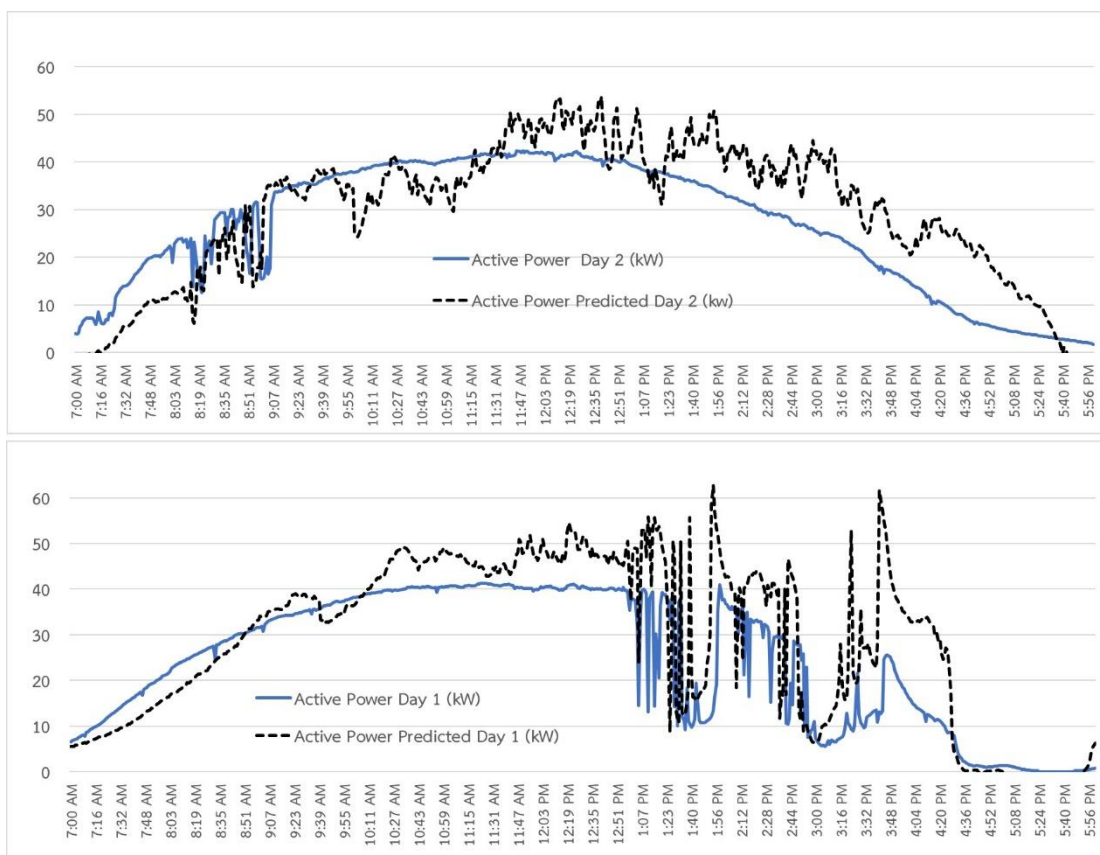
ภาพ 56 ความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแผงรับรังสีอาทิตย์

ผลกระทบของอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้กระแสลัดวงจร (I_{sc}) ของแผงรับรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นประมาณ 0.07%/K และแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) ลดลงประมาณ 0.4%/K ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลง 0.4%–0.5% [52] จากการประเมินชุดข้อมูลจะได้ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P_e) กับความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแผงรับรังสีอาทิตย์ได้ดังสมการ 8

$$P_e = 0.2436 I_T - 0.493T_m - 0.00286I_T T_m \quad (8)$$

Regression Statistics ที่ R Square = 0.9699773, Adjusted R Square = 0.969173, Standard Error = 6.4629445 จากชุด Observations = 1321

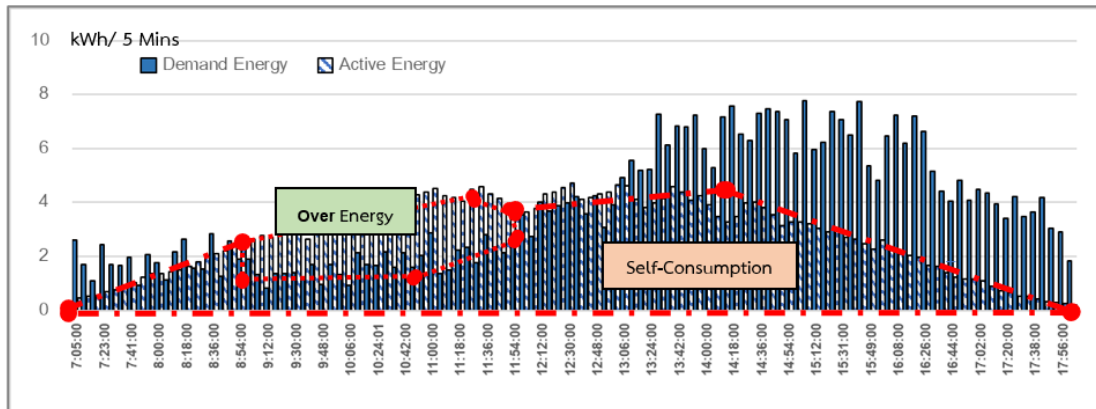
เมื่อทดสอบความสัมพันธ์จากสมการ 8 เพื่อใช้ประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดจริง 2 วัน โดยวันแรกจะมีความผันผวนของรังสีแสงอาทิตย์ในช่วงหลังเวลา 12.00 ไปแล้ว ส่วนวันที่ 2 เป็นวันที่มีรังสีแสงอาทิตย์ค่อนข้างสม่ำเสมอ ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงดังภาพ 57



ภาพ 57 การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้า(Active power) จากระบบ Smart Grid
UP อาคาร B3 2 วัน

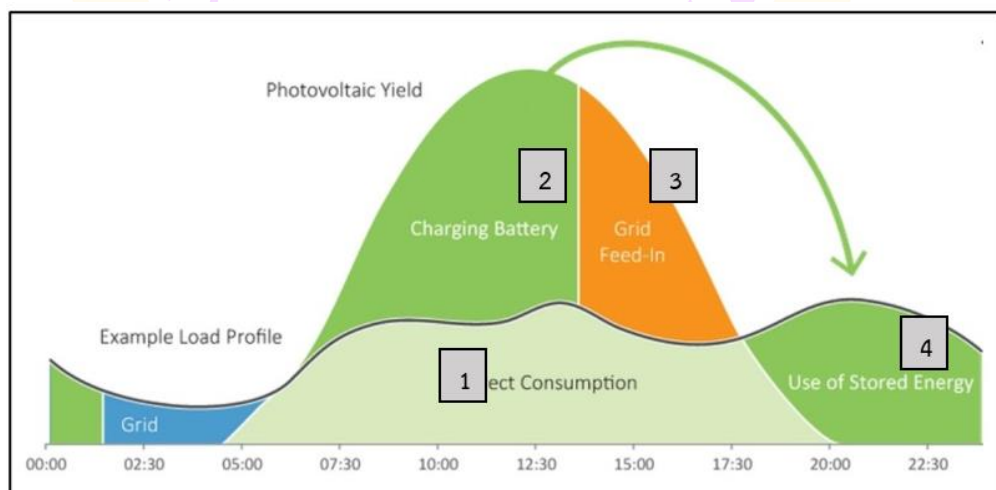
ผลการศึกษาการจำลองเพื่อทำนายศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 สามารถทำนายได้และมีความน่าเชื่อถือสูงในช่วงเวลา 07.00 – 13.00 น. ภายใต้สภาวะการรับรังสีอาทิตย์สม่ำเสมอและอุณหภูมิแผงรับแสงไม่สูงมากนักในขณะเดียวกัน ช่วงเวลาหลังจากนั้น ผลของความร้อนสะสมบนแผงรับรังสีอาทิตย์ทำให้อุณหภูมิแผงสูงกว่า 45°C ทำให้การทำนายศักยภาพการผลิตไฟฟ้ามีค่าคลาดเคลื่อนมากกว่า

ความสัมพันธ์ตามสมการ (8) เมื่อนำมาประเมินร่วมกับรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารพบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ส่วนเกิน (Over Energy) มีค่าเฉลี่ยที่ 66.18 kWh/วัน หรือคิดเป็น 21.11% ของความสามารถในการผลิตไฟฟ้าผลดังกล่าวแสดงดังภาพ 58



ภาพ 58 รูปแบบความต้องการพลังงาน (Demand energy) ของอาคารและพลังงานไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 (Active energy)

แนวทางการใช้ประโยชน์จากการผลิตไฟฟ้าส่วนเกินจากการจ่ายโหลดมีทางเลือก 2 ทางเลือก โดยทางเลือกแรกคือการขายไฟฟ้า ปัจจุบันจะสามารถขายไฟฟ้าได้ตามอัตราที่ไม่เป็นภาระต่อค่าไฟฟ้าที่ประมาณ 1.68 บาทต่อkWh จากนโยบายของภาครัฐที่เน้นการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ ส่วนทางเลือกหลังจะเป็นการนำพลังงานมากักเก็บในแบตเตอรี่ พลังงานไฟฟ้าส่วนนี้จะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด(Peak Demand, PD) ของแต่ละวัน แนวทางการแบ่งพลังงานเพื่อผลิตไฟฟ้าร่วมกับการกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ แสดงได้ดังภาพ 59

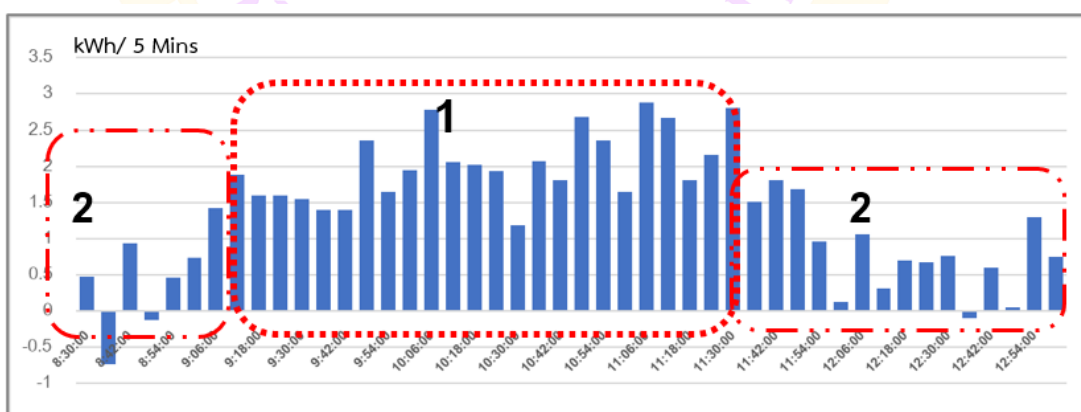


ภาพ 59 แนวทางการจัดการพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินร่วมกับแบตเตอรี่ [53]

จากภาพ 59 แบ่งการจัดการการใช้ประโยชน์จากพลังงานที่ผลิตได้เป็น 4 ส่วนได้แก่

1. พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มาใช้ประโยชน์กับความต้องการพลังงานไฟฟ้าขณะนั้นโดยตรง (Self-Consumption หรือ Direct Consumption)
2. พลังงานไฟฟ้าส่วนเกินส่วนแรก นำไปใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ (Charging Battery)
3. พลังงานไฟฟ้าส่วนเกินส่วนหลังถูกปล่อยย้อนเข้าสู่ระบบ (Grid Feed - in)
4. พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ ถูกนำมาใช้ในช่องไม่มีการผลิตไฟฟ้า (Discharging Battery)

ในการวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานส่วนเกินจากระบบผลิตไฟฟ้า Smart Grid UP อาคาร B3 เมื่อประเมินจากความสัมพันธ์ของปริมาณความต้องการพลังงาน (Demand energy) และความสามารถในการผลิตพลังงาน (Active energy) ของระบบจากสมการ 6 และ 7 พลังงานที่ผลิตได้แบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่ ผลิตไฟฟ้าจ่ายโหลดโดยตรง (Self-consumption) และพลังงานส่วนเกิน (Over energy) ในช่วงเวลา 9.00 – 12.00 น. เป็นช่วงที่มีการผลิตไฟฟ้าส่วนเกินมากที่สุดของวัน เมื่อนำไปประเมินเป็นศักยภาพของการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System, BESS) ที่เหมาะสมในการสำรองไฟฟ้าเพื่อใช้ในการจัดการพลังงานสำหรับลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วงกลางวันและลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบแสงสว่างในช่วงกลางคืนในกรณีไม่มีการใช้พื้นที่ในวันหยุด เมื่อศึกษาเฉพาะพลังงานส่วนเกินจากการจ่ายโหลดในช่วงดังกล่าวซึ่งแสดงได้จากภาพ 60 แบ่งพื้นที่ของแผนภาพเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วน 1 ส่วนเกินพลังงานเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ (Charging battery) ส่วน 2 ส่วนเกินพลังงานที่ถูกปล่อยให้อ้อนเข้าสู่ระบบ (Grid Feed-in)

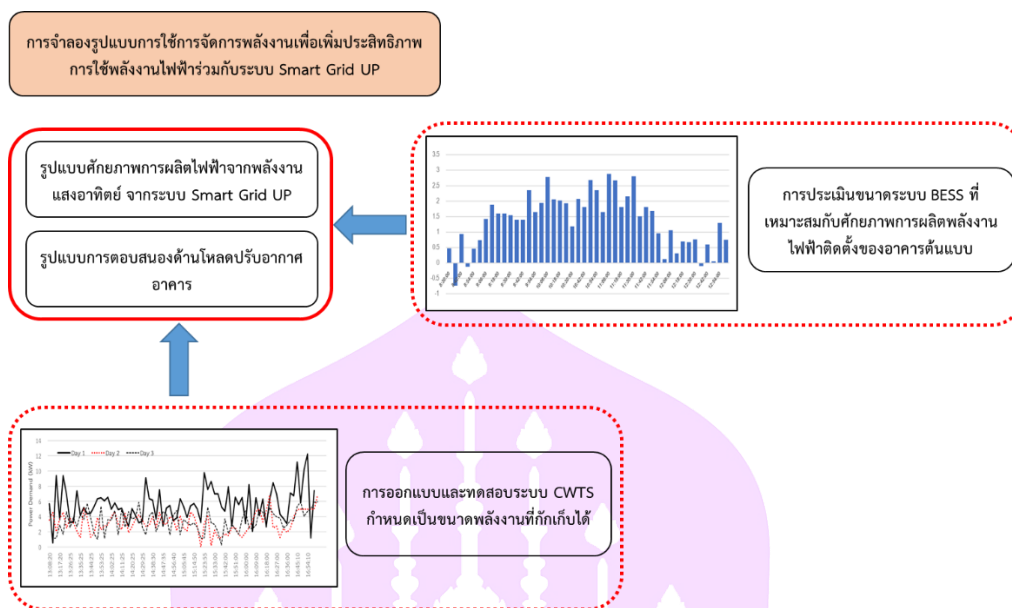


ภาพ 60 พลังงานส่วนเกินจากการจ่ายโหลดในช่วงเวลา 8.30 น. 13.00 น.

ผลการศึกษาในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 ร่วมกับรูปแบบความต้องการพลังงานไฟฟ้าในเดือน พ.ค. เพื่อให้เกิดการใช้พลังงานที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับการลงทุน ขนาดของระบบ BESS ที่ถูกนำมาใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ในช่วง 9.00 – 11.30 จะถูกประเมินและกำหนดให้มีขนาดของแบตเตอรี่ไม่เกิน 45 kWh โดยพิจารณาจากความต้องการของพลังงานที่ผลิตซึ่งจะต้องมีกระแสไฟที่มีการผันผวนไม่มากและข้อจำกัดศักยภาพของปริมาณพลังงานส่วนเกินที่จะเกิดขึ้น โดยการจัดการพลังงานจะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในการจ่ายโหลดในช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของวันและใช้แทนพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบทั่วไปในวันหยุด ผลตอบแทนจากพลังงานที่ผลิตได้จะแตกต่างกันจากอัตรา TOU การจัดการพลังงานที่ผลิตได้ส่วนเกินในรูปแบบของแบตเตอรี่ในช่วงเวลา On – peak จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ผลิตได้มากขึ้นจากผลต่างราคาต่อหน่วยไฟฟ้าและการลดลงของค่า Peak Demand ของการใช้ไฟฟ้าอาคารที่มีอัตราค่าไฟเท่ากับ 4.2097 บาท/kWh มีค่า Demand Charge ที่ 132.93 บาท/kW มาคำนวณเป็นผลตอบแทนการลงทุนเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด

3. การจำลองรูปแบบการใช้การจัดการพลังงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับระบบ Smart Grid UP อาคาร B3

ในเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการจัดการพลังงานด้วยแนวคิดของ BEMS ในการสร้างการตอบสนองด้านโหลด (Demand Response) ที่ทำงานร่วมกับระบบ CWTS และการจัดการเพื่อกำหนดขนาดระบบ BESS ที่เหมาะสม จะเป็นการศึกษาในส่วนนี้ โดยรูปแบบการศึกษาในหัวข้อนี้แสดงได้ดังภาพ 61



ภาพ 61 แผนภาพการจำลองการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า

จากการศึกษาในข้อ 2 ของระบบ CWTS ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดรายวันเฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่ของการศึกษาในอาคารต้นแบบเหลือเพียง 36.45 W/m² หรือค่าความต้องการพลังไฟฟ้าลดลงคิดเป็น 35.10% และลดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยของอาคารในช่วงเวลาดังกล่าวได้ 0.015 kWh/m² (การประเมินได้รวมค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าและปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็น) ข้อมูลจากการศึกษานี้จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบการจัดการความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สามารถปรับปรุงได้ในอาคารต้นแบบที่ติดตั้งระบบปรับอากาศไปแล้ว โดยระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพสามารถควบคุมอุณหภูมิห้องและระดับการใช้พลังงานที่เหมาะสมช่วยลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า 25% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบติดตั้งเดิม ผลการศึกษานี้ถูกนำมาใช้เพื่อจำลองการใช้ระบบ CWTS ในการออกแบบระบบดังกล่าวสำหรับอาคารต้นแบบกำหนดให้มีขนาดทำความเย็นไม่ต่ำกว่า 150,000 BTUH โดยเลือกใช้ชุดทำความเย็นขนาด 175,400 BTUH (แอร์ซิลเลอร์ AIR-COOLED LIQUID CHILLER เทรน รุ่น CGAT 175) ประเมินต้นทุนรวมค่าติดตั้งระบบประมาณ 684,500 บาท (ต้นทุนส่วนนี้อาจปรับให้ลดลงได้จากการเพิ่มขนาดสารรองน้ำเย็นและขยายเวลาการทำงานระบบทำน้ำเย็น ซึ่งจะทำให้ขนาดชุดทำความเย็นเล็กลงต้นทุนรวมจึงต่ำลง) สำหรับระบบ BESS แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ระหว่างปี 2553 – 2559 มีแนวโน้มราคาที่ต่ำลงอย่างมากจากการพัฒนาเพื่อใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicles, EVs) โดยมีแนวโน้มลดลงมากกว่า 60% รวมถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพของการเพิ่มพลังงานจำเพาะทำให้ราคา

อาจจะลดลงได้อีกระหว่าง 48 – 64% ภายในปี 2573 ในส่วนนี้ประเมินราคาแบตเตอรี่ในปัจจุบันที่ประมาณ 31,000 บาท kW-h [54] เป็นต้นทุนที่รวม Bi Directional Inverter แล้ว ประเมินการลงทุนในการปรับปรุงในส่วนนี้ที่ 1,395,000 บาท

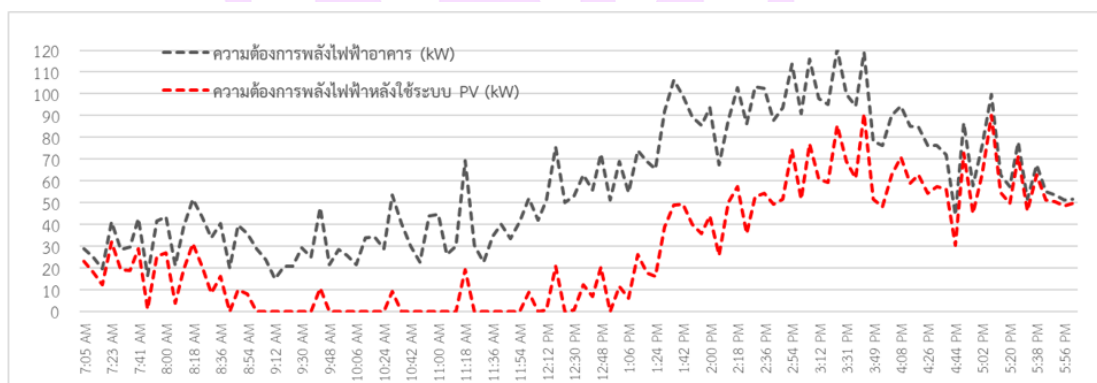
ในการจำลองรูปแบบการใช้การจัดการด้านการใช้พลังงาน (DSM) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 สำหรับลดความต้องการพลังงานสูงสุดกำหนดให้มีการศึกษาใน 3 รูปแบบ ได้แก่

รูปแบบที่ 1 การจำลองการใช้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic, PV) จ่ายโหลดโดยตรงเพื่อลดระดับความต้องการพลังไฟฟ้าของอาคาร

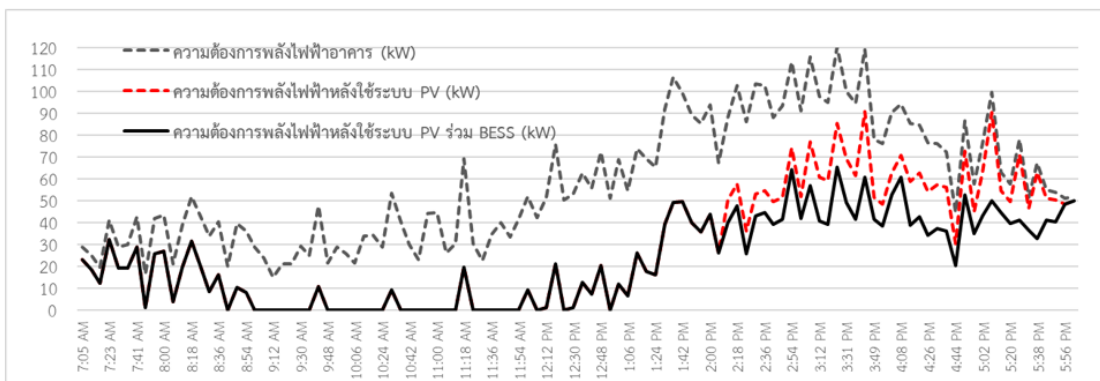
รูปแบบที่ 2 การจำลองเพื่อใช้งานร่วมกันระหว่าง PV และ BESS ที่เหมาะสมกับสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าและความต้องการพลังไฟฟ้าของอาคารต้นแบบ

รูปแบบที่ 3 การจำลองการจัดการพลังงานด้วย PV ร่วมกับระบบ CWTS ที่ออกแบบจากข้อมูลการทดสอบ โดยระบบดังกล่าวเสมือนถูกใช้ในช่วงเวลาที่มีการผลิตไฟฟ้าส่วนเกินแล้ว นำน้ำเย็นที่เก็บไว้เพื่อนำมาใช้ในช่วงเวลาที่ต้องการ

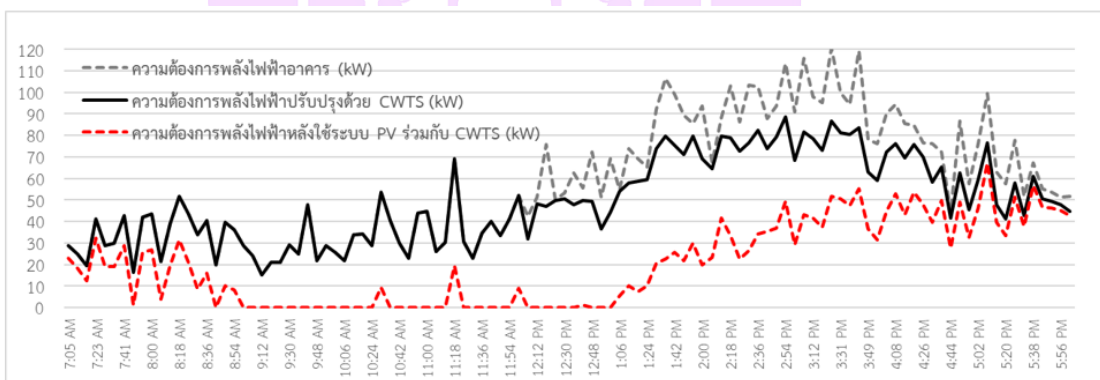
ผลของการจำลองการจัดการด้านการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในฤดูร้อนแสดงผลได้ดังภาพ 62 ถึง 64



ภาพ 62 ความสัมพันธ์ระดับความต้องการพลังไฟฟ้าของอาคารต้นแบบก่อนและหลังการจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าในรูปแบบที่ 1



ภาพ 63 ความสัมพันธ์ระดับความต้องการพลังไฟฟ้าของอาคารต้นแบบก่อนและหลังการจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าในรูปแบบที่ 2



ภาพ 64 ความสัมพันธ์ระดับความต้องการพลังไฟฟ้าของอาคารต้นแบบก่อนและหลังการจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าในรูปแบบที่ 2

ในการประเมินเพื่อเปรียบเทียบกับการลงทุนเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (PD) จากการพิจารณาเป็นอัตราส่วนทุนต่อผลประโยชน์ได้แก่มูลค่าการลงทุนเมื่อเปรียบเทียบกับระดับการลดลงของความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดต่อ (Cost Peak/Demand, บาท/kW) ได้ผลการประเมินดังนี้

การประเมินอัตราส่วนผลประโยชน์ของการจัดการด้านการใช้พลังงานในรูปแบบที่ 1 จากการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยตรงสามารถทำให้ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดลดลง 29.71 kW จากการติดตั้งระบบ PV มูลค่า 3,300,000 บาท [55] คิดเป็นอัตราส่วนการลงทุนที่สูงถึง 111,073.71 บาท/kW (PD) รูปแบบที่ 2 การจัดการในระบบด้วย BESS ทำให้ระดับ

ของ PD ลดลง 25.42 kW จากการลงทุนเพิ่มขึ้นที่ 1,395,000 บาท ในรูปแบบนี้ประเมินเป็นอัตราส่วนการลงทุนที่ 54,878.05 บาท/kW (PD) และในการประเมินรูปแบบสุดท้ายถ้าแทนระบบ BESS ด้วยระบบ CWTS มีการลงทุนระบบเพิ่มขึ้นที่ 684,500 บาทเพื่อให้ระดับความต้องการพลังไฟฟ้าลดลงมาที่ 23.70 kW อัตราส่วนการลงทุนในรูปแบบที่ 3 คือ 28,881.86 บาท/kW ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำสุดใน 3 รูปแบบที่ทำการศึกษา

ประเมินในภาพรวมประกอบทางเลือกในการลงทุนเพื่อลดความต้องการพลังงานสูงสุดของอาคาร รูปแบบของการจัดการด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยการกักเก็บพลังงานด้วยน้ำเย็นหรือ CWTS มีความน่าสนใจในการลงทุนมากที่สุดจากอัตราส่วนการลงทุนที่ต่ำที่สุด ทั้งนี้ข้อสรุปของการศึกษาสามารถสรุปเป็นข้อมูลประกอบเพิ่มเติมได้ตามตาราง 7

ตาราง 7 ผลการศึกษาการจัดการพลังงานอาคารของอาคารร่วมกับ ระบบ Smart Grid

UP อาคาร B3				
รายละเอียด		PV	PV + BESS	PV + CWTS
1. ความต้องการพลังงานไฟฟ้าอาคาร (kWh/วัน)	414.46	-	-	-
2. ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า (kWh/วัน)	313.50	-	-	-
3. ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (kW)	120.54			
4. ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากกริด (kWh/วัน)	-	219.06	177.04	191.31
% เทียบกับความต้องการพลังงานไฟฟ้าอาคาร เมื่อไม่มี ระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 (ข้อ 1.)	-	52.84%	42.71%	46.16%
5. ความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)	-	90.84	65.42	67.14
% เทียบกับความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อไม่มีระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 (ข้อ 3.)	-	75.36%	54.39%	55.70%

จากตาราง 7 ซึ่งเป็นการสรุปผลการศึกษา การจัดการพลังงานอาคารร่วมกับระบบ Smart UP ของอาคาร B3 ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานทางเลือกและการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศได้ โดยการจำลองก่อนดำเนินการระบบจัดการมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากกริดร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจาก PV พบว่ามีการใช้ประโยชน์จากการผลิตไฟฟ้าจ่าย

โหลดโดยตรง (Self-consumption) ได้เพียง 195.40 kWh หรือคิดเป็น 62.33% ของความสามารถในการผลิตไฟฟ้ารวม ในช่วงที่มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าเกิน (Over Energy) คักยภาพของพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินสามารถซาร์จแบตเตอรี่ที่ 42.02 kWh เมื่อจำลองการใช้ประโยชน์จากระบบ BESS พบว่าการใช้พลังงานที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นเป็น 237.42 kWh หรือ 75.73 % ของความสามารถในการผลิตไฟฟ้ารวม ทั้งนี้เมื่อปรับปรุงรูปแบบการใช้พลังงานโดยระบบควบคุมการจัดการด้านการใช้ไฟฟ้าร่วมกับระบบ CWTS สำหรับระบบปรับอากาศ ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ในส่วนต่อไปจะเป็นการชี้ให้เห็นถึงความคุ้มค่าในการลงทุนของการจัดการด้านการใช้พลังงาน (DSM) ทั้ง 3 รูปแบบ

การประเมินด้านความคุ้มค่าในการลงทุนของการจัดการด้านการใช้พลังงาน (DSM) ด้วยตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์

ในการศึกษาเพื่อที่จะตัดสินใจในการลงทุนในระยะยาวจะใช้การประเมินความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ จากการใช้ตัวชี้วัดทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการดำเนินโครงการ เริ่มต้นจากการพิจารณาต้นทุนของระบบและรูปแบบการใช้ประโยชน์จากการจัดการพลังงาน ค่าบำรุงรักษาระบบและผลประโยชน์จากการดำเนินการจัดการพลังงานในรูปแบบที่ศึกษา โดยตัวชี้วัดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ การประเมินมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) โดยคำนวณหาผลตอบแทนโดยการจำลองกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นจากผลตอบแทนในอัตราผลตอบแทนที่ต้องการหรือต้นทุนเงินทุนของเจ้าของโครงการ อีกรูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การหาอัตราผลตอบแทนภายใน (internal rate of return, IRR) เป็นการประเมินเพื่อหาผลตอบแทนจากมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดสุทธิที่ได้รับตลอดอายุโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์จากอัตราของ IRR การแสดงอัตราผลตอบแทนทำให้สามารถเปรียบเทียบกันของผลตอบแทนจากรูปแบบการจัดการการใช้พลังงานที่แตกต่างกันได้ง่ายขึ้น

สำหรับมหาวิทยาลัยพะเยามีอัตราค่าไฟแบบ TOU โดยการวิเคราะห์ต้นทุนพลังงาน แสดงได้ดังภาพ 65

ลำดับ ที่	เดือน	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	ความต้องการพลังไฟฟ้า (kW)	ค่าใช้จ่ายพลังงานรวม (บาท)	ค่าไฟ (บาท/kWh)	ตัวประกอบภาระ (Load Factor, %)
1	ม.ค. 61	1,085,316.00	3321.74	4,239,264.46	3.91	45.38%
2	ก.พ. 61	1,120,270.00	3769.37	4,514,231.70	4.03	41.28%
3	มี.ค. 61	1,290,550.00	4216.13	5,158,301.19	4.00	42.51%
4	เม.ย. 61	1,134,131.01	4981.68	4,698,156.19	4.14	31.62%
5	พ.ค. 61	1,218,421.01	4283.01	4,906,883.90	4.03	39.51%
6	มิ.ย. 61	985,991.00	3188.85	3,949,671.86	4.01	42.94%
7	ก.ค. 61	1,031,575.00	3192.25	4,104,527.56	3.98	44.88%
8	ส.ค. 61	1,492,030.00	4599.71	6,005,314.57	4.02	45.05%
9	ก.ย. 61	1,564,190.00	5302.88	6,304,155.74	4.03	40.97%
10	ต.ค. 61	1,463,619.00	4539.34	5,844,884.70	3.99	44.78%
11	พ.ย. 61	1,309,228.00	4287.83	5,241,718.07	4.00	42.41%
12	ธ.ค. 61	968,620.00	3007.94	3,638,765.69	3.76	44.73%
รวม		14,663,941.02		58,605,875.63		
เฉลี่ย		1,221,995.09	4,057.56	4,883,822.97	4.00	41.83%

ภาพ 65 การใช้พลังงานไฟฟ้าในรอบปี 2561 ของมหาวิทยาลัยพะเยา

ส่วนประกอบหลักของอัตราค่าไฟประกอบด้วย ค่าพลังงานไฟฟ้าหรือ Energy Charge (บาท/kWh) และค่าความต้องการพลังไฟฟ้าหรือ Demand Charge (บาท/kW) รวมถึงค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม ส่งผลให้อัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละเดือนแตกต่างกันตามลักษณะการใช้ไฟฟ้าหรือตัวประกอบโหลด (load factor) ในภาพรวมกำหนดให้ประเมินผลตอบแทนที่อัตราค่าไฟ 4 บาท/kWh

สำหรับการประเมินการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Smart Grid UP ในรอบ 1 ปี แสดงผลของข้อมูลดังกล่าวจากดังภาพ 66 ทำให้สามารถกำหนดปริมาณการผลิตไฟฟ้ารายปีตั้งต้นได้และคิดส่วนลดจากประสิทธิภาพที่ลดลงในปีต่อมา ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนระยะยาวต่อไป

เดือน	การผลิตไฟฟ้ารายเดือน (kWh/เดือน)	เดือน	การผลิตไฟฟ้ารายเดือน (kWh/เดือน)
มกราคม	9,344.64	สิงหาคม	5,594.88
กุมภาพันธ์	9,257.47	กันยายน	5,875.20
มีนาคม	9,880.32	ตุลาคม	6,071.04
เมษายน	8,179.20	พฤศจิกายน	7,464.96
พฤษภาคม	9,606.53	ธันวาคม	8,451.84
มิถุนายน	8,893.44	รวม	94,809.60
กรกฎาคม	6,190.08	เฉลี่ย	7,900.80

ภาพ 66 ปริมาณการผลิตไฟฟ้ารายเดือนของระบบ Smart Grid UP อาคาร B3

สัดส่วนของกิจกรรมการใช้ไฟฟ้าของสถาบันการศึกษาประเมินจากปฏิทินการศึกษา ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดเนื่องจากจะเป็นตัวแปรที่ใช้ระบุอัตราผลตอบแทนในโครงการ โดยในวันที่มีการเรียนการสอนปกติผลตอบแทนโครงการจะขึ้นอยู่กับอัตราค่าไฟฟ้าที่ 4 บาทต่อkWh ส่วนวันที่ไม่มีการเรียนการสอน จะมีการผลิตพลังงานส่วนเกินซึ่งพลังงานส่วนนี้จะเสมือนการขายไฟฟ้าตามอัตราที่ไม่เป็นภาระต่อค่าไฟฟ้าที่ประมาณ 1.68 บาทต่อkWh โดยสัดส่วนของวันที่แตกต่างกันแสดงได้ดังนี้

ตาราง 8 ตารางแสดงจำนวนวันตามกิจกรรมของมหาวิทยาลัยพะเยา (ปฏิทินการศึกษา ระดับปริญญาตรี ภาคปกติ ประจำปีการศึกษา 2561)

หัวข้อ	รายละเอียด	วัน	สัดส่วน
กรณีที่ 1	การเรียนการสอนปกติ	199	54.52%
กรณีที่ 2	วันทำงานปกติแต่ไม่มีสอน	56	15.34%
กรณีที่ 3	เสาร์ - อาทิตย์และวันหยุด	110	30.14%
		365	100%

ในการประเมินตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์จะกำหนดให้ประเมินใน 3 รูปแบบการจัดการด้านการใช้พลังงานที่สอดคล้องกับการศึกษาในหัวข้อกำหนดสมมติฐานในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้ดังนี้

ตาราง 9 ตารางสมมติฐานตัวแปรระบบเพื่อประเมินตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์

ระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์		
อายุโครงการ	25 ปี	ประเมินจากผู้ผลิตแผงซึ่งจะรับประกันกำลังการผลิตที่ไม่ต่ำกว่า 80% ในระยะเวลา 25 ปี
อายุ Inverter ที่ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้า	10 ปี	ประเมินจากระยะเวลาการรับประกันจากผู้ผลิตอุปกรณ์ทั่วไป
อัตราการเสื่อมของระบบผลิตไฟฟ้า	0.70 % ต่อปี	เป็นอัตราการลดลงของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก (ข้อมูลจากผู้ผลิต)
ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้า	ตามสมรรถนะของระบบที่ได้จากการเก็บข้อมูลการผลิตรายปี	
ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (BESS)		
ขนาดแบตเตอรี่	45 kWh	จากการประเมินผลการศึกษา
อัตราการเสื่อมของแบตเตอรี่	2.0% ต่อปี	ประเมินที่ความจุของแบตเตอรี่มากกว่า 80% ตามจำนวนรอบที่มากกว่า 5,000 รอบ [56]
ความลึกของการคายประจุแบตเตอรี่	80%	ตามคุณสมบัติของผู้ผลิต [54]
อายุการใช้งานแบตเตอรี่	10 ปี	
ระบบกักเก็บพลังงานด้วยน้ำเย็น (CWTS)		
ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะรวมของระบบ (COP)	1.83	จากการทดสอบระบบทำน้ำเย็นเครื่องส่งลมเย็นและการสูญเสียความร้อนจากการเก็บน้ำเย็น
ขนาดการกักเก็บพลังงาน	260 MJ	จากการประเมินศักยภาพการใช้พลังงานส่วนเกินจากการผลิตในงานวิจัย
ขนาดการทำความเย็น	ไม่ต่ำกว่า 150,000 BTUH	การคำนวณค่าพลังไฟฟ้าจากการศึกษาในงานวิจัย

ตาราง 10 ตารางสมมติฐานตัวแปรทางเศรษฐศาสตร์

ตัวแปรของทางเศรษฐศาสตร์		
ต้นทุนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้า	55,000 บาท/ kWp	การประเมินจาก NREL [55] รวมราคาแผงรับแสงอาทิตย์ Inverter และอุปกรณ์ประกอบ
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและซ่อมบำรุง	1% ของต้นทุนระบบ	เพิ่มขึ้น 2% ต่อปีจากอัตราพื้นฐานเงินเพื่อเฉลี่ยประเทศไทย
อัตราค่าไฟ	4.00 บาท/kWh	ค่าเฉลี่ยต้นทุนพลังงานจากอัตรา TOU ของมหาวิทยาลัยพะเยา
อัตราการคิดลด	6.00%	อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ของธนาคารพาณิชย์ (minimum loan rate, MLR) อ้างอิง [54]
ราคาแบตเตอรี่รวม Inverter	33,000 บาท/ kWh	
ชุดเครื่องทำน้ำเย็น	275,000 บาท	ราคา Package chiller 150,000 BTUH จาก Empress Refrigeration Co.,Ltd.
ชุดระบบทำน้ำเย็นและควบคุม	280,000 บาท	ราคาอุปกรณ์ ถังน้ำเย็นและค่าติดตั้ง
ชุดเครื่องส่งลมเย็น	25,900 บาท/ ชุด	ขนาด 2,000 CFM ของ Carrier คอยล์น้ำเย็น รุ่น 40VMS Series
อัตราการขายไฟฟ้าคืนระบบ	1.68 บาท/kWh	ตามอัตราที่ไม่เป็นภาระต่อค่าไฟฟ้าจากนโยบายของภาครัฐที่เน้นการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้เอง คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน(กกพ)

ในรูปแบบที่ 1 การวิเคราะห์ตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ สามารถวิเคราะห์ได้โดยการประเมินกระแสเงินสดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Smart Grid UP โดยตรง โดยใช้กิจกรรมจากตาราง 8 แยกเป็นกรณีพิจารณาผลตอบแทนจากกระแสเงินสด แสดงผลการประเมินได้ตามภาพ 67 ส่วนในรูปแบบที่ 2 เป็นการจัดการพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ร่วมกับระบบ BESS และส่วนสุดท้ายเป็นการประเมินร่วมกับระบบ CWTS ซึ่งกำหนดให้มีการใช้งานเครื่องทำน้ำเย็นในช่วงเวลาที่มีการผลิตส่วนเกิน ผลตอบแทนจากกระแสเงินสดทั้ง 2 รูปแบบหลังแสดงได้ดังภาพ 68 และ 69 ตามลำดับ

ปีที่	ประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้า	การผลิตพลังงานไฟฟ้า (kWh)	การใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh)			ผลตอบแทนต่อปี					ค่าใช้จ่าย			Net Income			
			กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	4.00 บาท/kWh	1.68 บาท/kWh	132.93 บาท/kWh	รวม	ค่าบำรุงรักษา	Inverter	รวม					
													รวม		ค่าบำรุงรักษา	รวม	
0																	
1	100.00%	94,809.60	51,690.71	14,546.13	28,572.76	208,163.33	71,851.53	38,589.61	318,604.47	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	285,604.47
2	97.00%	91,965.31	50,139.99	14,109.75	27,715.57	201,918.43	69,695.98	38,589.61	310,204.03	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	277,204.03
3	96.30%	91,301.64	49,778.16	14,007.92	27,515.56	200,461.29	69,193.02	38,589.61	308,243.92	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	275,243.92
4	95.60%	90,637.98	49,416.32	13,906.10	27,315.55	199,004.15	68,690.06	38,589.61	306,283.82	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	273,283.82
5	94.90%	89,974.31	49,054.49	13,804.28	27,115.55	197,547.00	68,187.10	38,589.61	304,323.72	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	271,323.72
6	94.20%	89,310.64	48,692.65	13,702.45	26,915.54	196,089.86	67,684.14	38,589.61	302,363.61	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	269,363.61
7	93.50%	88,646.98	48,330.82	13,600.63	26,715.53	194,632.72	67,181.18	38,589.61	300,403.51	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	267,403.51
8	92.80%	87,983.31	47,968.98	13,498.81	26,515.52	193,175.57	66,678.22	38,589.61	298,443.40	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	265,443.40
9	92.10%	87,319.64	47,607.15	13,396.99	26,315.51	191,718.43	66,175.26	38,589.61	296,483.30	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	263,483.30
10	91.40%	86,655.97	47,245.31	13,295.16	26,115.50	190,261.29	65,672.30	38,589.61	294,523.19	33,000.00	375,000	33,000.00		33,000.00		408,000.00	113,476.81
11	90.70%	85,992.31	46,883.48	13,193.34	25,915.49	188,804.14	65,169.34	38,589.61	292,563.09	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	259,563.09
12	90.00%	85,328.64	46,521.64	13,091.52	25,715.48	187,347.00	64,666.37	38,589.61	290,602.99	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	257,602.99
13	89.30%	84,664.97	46,159.81	12,989.69	25,515.47	185,889.86	64,163.41	38,589.61	288,642.88	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	255,642.88
14	88.60%	84,001.31	45,797.97	12,887.87	25,315.46	184,432.71	63,660.45	38,589.61	286,682.78	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	253,682.78
15	87.90%	83,337.64	45,436.14	12,786.05	25,115.45	182,975.57	63,157.49	38,589.61	284,722.67	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	251,722.67
16	87.20%	82,673.97	45,074.30	12,684.23	24,915.44	181,518.43	62,654.53	38,589.61	282,762.57	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	249,762.57
17	86.50%	82,010.30	44,712.47	12,582.40	24,715.43	180,061.28	62,151.57	38,589.61	280,802.47	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	247,802.47
18	85.80%	81,346.64	44,350.63	12,480.58	24,515.42	178,604.14	61,648.61	38,589.61	278,842.36	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	245,842.36
19	85.10%	80,682.97	43,988.80	12,378.76	24,315.42	177,147.00	61,145.65	38,589.61	276,882.26	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	243,882.26
20	84.40%	80,019.30	43,626.96	12,276.93	24,115.41	175,689.85	60,642.69	38,589.61	274,922.15	33,000.00		33,000.00		33,000.00		408,000.00	133,077.85
21	83.70%	79,355.64	43,265.13	12,175.11	23,915.40	174,232.71	60,139.73	38,589.61	272,962.05	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	239,962.05
22	83.00%	78,691.97	42,903.29	12,073.29	23,715.39	172,775.57	59,636.77	38,589.61	271,001.95	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	238,001.95
23	82.30%	78,028.30	42,541.46	11,971.47	23,515.38	171,318.42	59,133.81	38,589.61	269,041.84	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	236,041.84
24	81.60%	77,364.63	42,179.62	11,869.64	23,315.37	169,861.28	58,630.85	38,589.61	267,081.74	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	234,081.74
25	80.90%	76,700.97	41,817.79	11,767.82	23,115.36	168,404.14	58,127.89	38,589.61	265,121.63	33,000.00		33,000.00		33,000.00		33,000.00	232,121.63

ภาพ 67 การประเมินกระแสเงินสดตอบแทนที่เกิดจากการจัดการตามการใช้พลังงานในรูปแบบที่ 1

ปีที่	ประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้า	การผลิตพลังงานไฟฟ้า (kWh)	การใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh)			ผลตอบแทนต่อปี				ค่าใช้จ่าย				Net Income		
			กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	4.00 บาท/kWh	1.68 บาท/kWh	132.93 บาท/kWh	รวม	ค่าบำรุงรักษา	Inverter	รวม				
0																
1	100.00%	94,809.60	51,690.71	14,546.13	28,572.76	257,629.42	51,075.77	71,431.50	380,136.69	39,845.00		39,845.00		39,845.00		3,984,500
2	97.00%	91,965.31	50,139.99	14,109.75	27,715.57	249,900.54	49,543.50	71,431.50	370,875.54	39,845.00		39,845.00		39,845.00		331,030.54
3	96.30%	91,301.64	49,778.16	14,007.92	27,515.56	248,097.14	49,185.97	71,431.50	368,714.60	39,845.00		39,845.00		39,845.00		328,869.60
4	95.60%	90,637.98	49,416.32	13,906.10	27,315.55	246,293.73	48,828.44	71,431.50	366,553.67	39,845.00		39,845.00		39,845.00		326,708.67
5	94.90%	89,974.31	49,054.49	13,804.28	27,115.55	244,490.32	48,470.91	71,431.50	364,392.73	39,845.00		39,845.00		39,845.00		324,547.73
6	94.20%	89,310.64	48,692.65	13,702.45	26,915.54	242,686.92	48,113.37	71,431.50	362,231.79	39,845.00		39,845.00		39,845.00		322,386.79
7	93.50%	88,646.98	48,330.82	13,600.63	26,715.53	240,883.51	47,755.84	71,431.50	360,070.86	39,845.00		39,845.00		39,845.00		320,225.86
8	92.80%	87,983.31	47,968.98	13,498.81	26,515.52	239,080.11	47,398.31	71,431.50	357,909.92	39,845.00		39,845.00		39,845.00		318,064.92
9	92.10%	87,319.64	47,607.15	13,396.99	26,315.51	237,276.70	47,040.78	71,431.50	355,748.98	39,845.00		39,845.00		39,845.00		315,903.98
10	91.40%	86,655.97	47,245.31	13,295.16	26,115.50	235,473.29	46,683.25	71,431.50	353,588.05	39,845.00		39,845.00		39,845.00		313,742.98
11	90.70%	85,992.31	46,883.48	13,193.34	25,915.49	233,669.89	46,325.72	71,431.50	351,427.11	39,845.00		39,845.00		39,845.00		311,582.11
12	90.00%	85,328.64	46,521.64	13,091.52	25,715.48	231,866.48	45,968.19	71,431.50	349,266.18	39,845.00		39,845.00		39,845.00		309,421.18
13	89.30%	84,664.97	46,159.81	12,989.69	25,515.47	230,063.08	45,610.66	71,431.50	347,105.24	39,845.00		39,845.00		39,845.00		307,260.24
14	88.60%	84,001.31	45,797.97	12,887.87	25,315.46	228,259.67	45,253.13	71,431.50	344,944.30	39,845.00		39,845.00		39,845.00		305,099.30
15	87.90%	83,337.64	45,436.14	12,786.05	25,115.45	226,456.26	44,895.60	71,431.50	342,783.37	39,845.00		39,845.00		39,845.00		302,938.37
16	87.20%	82,673.97	45,074.30	12,684.23	24,915.44	224,652.86	44,538.07	71,431.50	340,622.43	39,845.00		39,845.00		39,845.00		300,777.43
17	86.50%	82,010.30	44,712.47	12,582.40	24,715.43	222,849.45	44,180.54	71,431.50	338,461.49	39,845.00		39,845.00		39,845.00		298,616.49
18	85.80%	81,346.64	44,350.63	12,480.58	24,515.42	221,046.05	43,823.01	71,431.50	336,300.56	39,845.00		39,845.00		39,845.00		296,455.56
19	85.10%	80,682.97	43,988.80	12,378.76	24,315.42	219,242.64	43,465.48	71,431.50	334,139.62	39,845.00		39,845.00		39,845.00		294,294.62
20	84.40%	80,019.30	43,626.96	12,276.93	24,115.41	217,439.23	43,107.95	71,431.50	331,978.68	39,845.00		39,845.00		39,845.00		288,216.32
21	83.70%	79,355.64	43,265.13	12,175.11	23,915.40	215,635.83	42,750.42	71,431.50	329,817.75	39,845.00		39,845.00		39,845.00		289,972.75
22	83.00%	78,691.97	42,903.29	12,073.29	23,715.39	213,832.42	42,392.89	71,431.50	327,656.81	39,845.00		39,845.00		39,845.00		287,811.81
23	82.30%	78,028.30	42,541.46	11,971.47	23,515.38	212,029.02	42,035.36	71,431.50	325,495.88	39,845.00		39,845.00		39,845.00		285,650.88
24	81.60%	77,364.63	42,179.62	11,869.64	23,315.37	210,225.61	41,677.83	71,431.50	323,334.94	39,845.00		39,845.00		39,845.00		283,489.94
25	80.90%	76,700.97	41,817.79	11,767.82	23,115.36	208,422.20	41,320.30	71,431.50	321,174.00	39,845.00		39,845.00		39,845.00		281,329.00

ภาพ 69 การประเมินกระแสเงินสดตอบแทนที่เกิดจากการจัดการตามการใช้พลังงานในรูปแบบที่ 3

นอกจากนี้การประเมินผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis) เพื่อประเมินปัจจัยเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตที่น่าสนใจต่อการตัดสินใจลงทุน ได้แก่ การลดลงของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และต้นทุนระบบ BESS ที่ลดลงอย่างรวดเร็วในอนาคต สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ตามภาพ 70 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในปัจจุบันความคุ้มค่าของการลงทุนเมื่อพิจารณาจาก NPV มีผลตอบแทนจากกระแสเงินสดต่ำกว่าอัตราการคิดลดที่กำหนด 6.00 % โดยในอนาคตถ้าต้นทุนเทคโนโลยีของ PV ลดลงพบว่าค่า IRR เพิ่มขึ้นเป็น 6.20 % ซึ่งมีความคุ้มค่าในการลงทุนในลำดับที่ 2 ทั้งนี้แม้ต้นทุนระบบ BESS จากการเลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery) จะลดลงมากในอนาคตถึง 40% ความน่าสนใจในการคุ้มค่าการลงทุนก็ยังอยู่ในระดับต่ำ

ลำดับที่	ทางเลือกรูปแบบการจัดการใช้พลังงาน (DSM)	Payback Period (ปี)	Net Present Value, NPV (บาท)	Internal Rate of Return, IRR (%)
1	รูปแบบที่ 1	13.76	-278,914	5.02%
2	รูปแบบที่ 1 ต้นทุนระบบ PV ลดลง 10%	12.46	51,086	6.20%
3	รูปแบบที่ 2	18.80	-1,703,826	1.15%
4	รูปแบบที่ 2 ต้นทุนระบบ BESS ลดลง 40%	15.53	-823,107	3.48%
5	รูปแบบที่ 3	14.30	-474,127	4.60%

ภาพ 70 สรุปตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ของรูปแบบการจัดการด้านการใช้พลังงานที่ศึกษา

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยในหัวข้อ “การพัฒนากระบวนการจัดการพลังงานของระบบปรับอากาศ เพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในอาคาร” ซึ่งเป็นการศึกษารูปแบบการจัดการใช้พลังงานในอาคาร (Building Energy Management System) เพื่อพัฒนาต้นแบบแนวทางการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศเพื่อลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในอาคาร โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการศึกษาคือ ความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและรูปแบบของการใช้พลังงานไฟฟ้าอาคาร ข้อมูลพื้นฐานทั้ง 2 ส่วนนี้จะมี ความแตกต่างกันตามบริบทพื้นที่และการใช้งานที่ต่างกันของประเภทอาคาร จากการทดสอบและบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปสร้างความสัมพันธ์ของศักยภาพการผลิตไฟฟ้าและรูปแบบของการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ ทำให้สามารถประเมินศักยภาพของระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System, BESS) ที่เหมาะสม รวมถึงการออกแบบการ ระบบควบคุมการจัดการด้านการใช้ไฟฟ้าด้วยระบบ CWTS ที่มีประสิทธิภาพในระบบปรับอากาศพื้นที่ศึกษาทำงานร่วมกับระบบเดิมของอาคาร ผลของการศึกษาในแนวทางดังกล่าว สามารถสรุปเป็นผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การพัฒนาต้นแบบแนวทางการจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศที่ศึกษามี 3 รูปแบบได้แก่

รูปแบบที่ 1 การใช้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic, PV) จ่ายโหลดโดยตรงเพื่อลดระดับความต้องการพลังไฟฟ้าของอาคาร

รูปแบบที่ 2 การจัดการพลังงานร่วมกันระหว่าง PV และ BESS ที่เหมาะสมกับสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าและความต้องการพลังไฟฟ้า

รูปแบบที่ 3 การจัดการพลังงานด้วย PV ร่วมกับระบบ CWTS ที่ออกแบบและควบคุมการทำงานที่มีประสิทธิภาพ

ทั้ง 3 รูปแบบมีศักยภาพในการควบคุมเพื่อลดระดับความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการลงทุน พบว่าในรูปแบบที่ 3 สามารถลดต้นทุนต่อการลดลงของระดับความต้องการพลังงานสูงสุดได้มากที่สุด

2. ในวิเคราะห์ผลตอบแทนจากการลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าด้วยตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน เมื่อพิจารณาผลตอบแทนจากกระแสเงินสดเทียบกับอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ของธนาคารพาณิชย์ที่ 6.00 % พบว่าไม่มีความคุ้มค่าในการลงทุน และมีระยะเวลาคืนทุนมากกว่า 12 ปีในทุกรูปแบบ แต่เมื่อประเมินในอนาคตแนวโน้มของระบบ PV มีต้นทุนลดลง 10% ผลตอบแทนในการลงทุนจะเพิ่มขึ้นเป็น 6.20% ทำให้มีความคุ้มค่าในการลงทุนมากขึ้น ในรูปแบบที่ 2 ในการจำลองถ้าเปลี่ยนชนิดแบตเตอรี่จากชนิด ลิเทียมไอออน เป็น Lead acid ชนิด Deep Cycle ที่มีราคาถูกกว่าเท่าตัวผลตอบแทนการลงทุนก็จะสูงขึ้นด้วย โดยในส่วนนี้ไม่ได้อยู่ในขอบเขตของการศึกษา

นอกจากนี้ยังมีประเด็นที่น่าสนใจเป็นข้อสรุปได้ดังนี้

2.1 แนวทางการออกแบบการจัดการการใช้พลังงานระหว่างพลังงานไฟฟ้าหลัก จากกริดและพลังงานจาก PV ที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีฐานข้อมูลหลักคือศักยภาพความเข้มแสงอาทิตย์ของพื้นที่นั้นและรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคาร ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการลงทุนในการเลือกขนาด PV ที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง โดยเน้นไปที่การจ่ายโหลดตรงเป็นหลักซึ่งมีผลตอบแทนต่อหน่วยสูงกว่าการขายคืนในระบบ ส่วนรูปแบบการใช้พื้นที่อาคารส่งผลต่อรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้ง 2 ส่วนที่สัมพันธ์นี้จะมีส่วนต่อการกำหนดขนาดระบบ BESS และ CWTS ที่เหมาะสม

2.2 ในการประเมินรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อไม่มีระบบ Smart Grid UP อาคาร B3 มีการใช้พลังงานจากกริดที่ 85.79 kWh/m²-yr เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของอัตราการใช้พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ต่อปีของอาคารประเภทสถานศึกษา โดยกำหนดให้ Energy Baseline ใช้อ้างอิง (Reference) ที่ 102 kWh/m²-yr จากภาพ 18 โดยค่าการใช้พลังงานในพื้นที่ทดสอบมีค่าใกล้เคียงในระดับ BEC (Building energy code) จากแนวทางที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่าระดับการใช้พลังงานเหลือเพียง 26.59 kWh/m²-yr ซึ่งเป็นระดับ ZEB (Zero Energy Building) อย่างไรก็ตามการมีระดับปริมาณดังกล่าวจะต้องมีการลงทุนเพิ่มเติมที่ค่อนข้างสูง

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในการศึกษาต่อเนื่อง ได้แก่ การประเมินการลงทุนของอุปกรณ์หลักของ BESS นั่นคือราคาในอนาคตของประเภทของแบตเตอรี่ ซึ่งในปัจจุบันนิยมเลือกใช้ 2 ชนิด ได้แก่ Lead-acid battery และ Lithium – ion battery [57] โดยชนิดหลังมีคุณสมบัติที่ดีกว่าและมีแนวโน้มของต้นทุนที่ลดลงอย่างรวดเร็วถึงมีคุณสมบัติในการจ่ายและรับกระแสได้อย่างรวดเร็ว จากความก้าวหน้าอย่างก้าวกระโดดของอุตสาหกรรมรถ EV อีก

ปัจจัยที่มีผลต่อการคิดผลตอบแทนคือโครงสร้างค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ถูกกำหนดโดยภาครัฐและอัตราการขายไฟคืนรวมถึงนโยบายจากการกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าตามมาตรการส่งเสริมการลดการใช้ไฟฟ้า (Demand Response Rate) ในปี 2561 (อ้างอิงจาก แผนแม่บทการพัฒนาระบบโครงข่ายสมรรถกิริยของประเทศไทย พ.ศ. 2558 – 2579) ซึ่งทำให้เกิดแรงจูงใจในการตัดสินใจในการลงทุนทั้งการติดตั้งระบบ PV ที่มากขึ้นหรือการเพิ่มขนาดของ BESS

2. ในการใช้งานระบบปรับอากาศในฤดูร้อน ประสิทธิภาพของการจัดการพลังงานที่ออกแบบขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำน้ำเย็นหรือ COP จากผลการทดสอบของระบบ CWTS มีค่าเพียง 1.83 ซึ่งถือว่าเป็นค่าค่อนข้างต่ำ การปรับปรุงอุปกรณ์เพื่อทำให้ COP ของระบบสูงขึ้น ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง ความสามารถในการผลิตน้ำเย็นจะมีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการลดของความต้องการพลังงานไฟฟ้าเป็นสัดส่วนที่สูงขึ้นด้วย

3. ผลประโยชน์ของการติดตั้งระบบเกิดสูงสุดในฤดูร้อน การทดสอบเพิ่มเติมในช่วงอื่นที่แตกต่างกันตลอดทั้งปี จะทำให้สามารถประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์และความน่าสนใจในการลงทุนได้ถูกต้องมากขึ้น

4. พื้นที่ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ถูกใช้เพียง 25.50% ของพื้นที่หลังคาทั้งหมด ทำให้มีพื้นที่เหลือสำหรับติดตั้งแผงรับแสงอาทิตย์ เพิ่มเติมได้ โดยในอนาคตที่แนวโน้มของแผงรับแสงอาทิตย์ มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีราคาถูกลง ทำให้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์เสริมในการดำเนินการบริหารจัดการพลังงานในอาคารได้ การพิจารณาการเพิ่มแผงเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าจึงเป็นแนวทางหนึ่งสำหรับสำหรับการออกแบบระบบการจัดการพลังงานทางเลือกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานสำหรับระบบปรับอากาศในอาคาร

บรรณานุกรม

- [1] ข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2562). **ความต้องการไฟฟ้าและกำลังการผลิตของระบบ**. สืบค้นเมื่อ 9 มกราคม 2563, จาก <http://www.egat.co.th/index.php?option=comcontent&view=article&layout=edit&id=353&Itemid=200>.
- [2] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2562). **ความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด**. สืบค้นเมื่อ 9 มกราคม 2563 จาก http://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&layout=edit&id=353&Itemid=200.
- [3] ศูนย์ทรัพยากรและสารสนเทศพลังงาน. (2559). **สถานการณ์การใช้น้ำมันและไฟฟ้าของไทย ช่วง 10 เดือนแรกของปี 2559**. กรุงเทพฯ : สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.), กระทรวงพลังงานฯ.
- [4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). **รายงานการจัดการพลังงานปี 2557 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา**. กรุงเทพฯ : กระทรวงพลังงานฯ.
- [5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). **รายงานการจัดการพลังงานปี 2558 ธนาคารแห่งประเทศไทย สำนักงานภาคเหนือ**. กรุงเทพฯ : กระทรวงพลังงานฯ.
- [6] เว็บไซต์เผยแพร่ข้อมูลการดำเนินงานด้านสมาร์ทกริดของประเทศไทย. (2562). **คู่มือ Smart Grid โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ**. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน(สนพ.), กระทรวงพลังงาน สืบค้นเมื่อ 9 มกราคม 2563. จาก <https://thai-smartgrid.com/manual-smart-grid/>.
- [7] รุฐนัท เตียววิไล, รัชชานัย นิธิฤทธิไกร และบัณฑิต เอื้ออาภรณ์. (2555). การศึกษาผลกระทบของการจัดการด้านการใช้ไฟฟ้าต่อระดับกำลังการผลิตสำรองที่ใช้ในการวางแผนพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้า, **วารสารวิจัยพลังงาน**, 9(1), 17-29.
- [8] กองถ่ายถอดและเผยแพร่เทคโนโลยี. (2562). **คู่มือการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์**. กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.), กระทรวงพลังงาน.
- [9] Geoff Stapleton and Susan Neill. (2012). **Grid-connected Solar Electric Systems. The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation**. New York : Earthscan 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon England.
- [10] Linas Gelazanskas, Kelum A.A.Gamage. (2014). Demand side management in smart grid: A review and proposals for future direction, **Sustainable Cities and Society**,

11(2014), pp 22–30.

- [11] สุวัฒน์ กมลพนัส. (2561). **การบริหารจัดการด้านอุปสงค์ของธุรกิจพลังงาน (Energy Demand Management)** สืบค้นเมื่อ 9 มกราคม 2563, จาก <https://www.thailand-energy-academy.org/assets/upload/coursedocument/file/การบริหารจัดการด้านอุปสงค์ของธุรกิจพลังงาน-%20วพน%20rev3%20public.pdf>.
- [12] อรรถจัน เศรษฐบุตร. (2560). **ขั้นตอนการบริหารการใช้พลังงานภายในอาคาร**. สืบค้นเมื่อ 10 ตุลาคม 2560, จาก <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~satch/research/Building%20Energy%20Management.pdf>.
- [13] D.Wijayasekara, O.Linda, M. Manic and C. Rieger. (2014). Mining building energy management system data using fuzzy anomaly detection and linguistic description, **IEEE TransInd. Inform**, 10(3), 1829–1840.
- [14] วสุพร ดีวงาม. (2561). **การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการติดตั้งโซลาร์รูฟอย่างเสรี สำหรับบ้านที่อยู่อาศัย** วิทยานิพนธ์ ศม., มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- [15] แผนอนุรักษ์พลังงาน. (2558). **Energy Efficiency Plan; EEP 2015 – 2026. มาตรการใช้เกณฑ์มาตรฐาน และการติดฉลากอาคาร (BEC)**. กรุงเทพฯ : กระทรวงพลังงาน.
- [16] กรกมล ต้นดิวนิช. (2553). **เกณฑ์การใช้พลังงานเพื่อการบริหารจัดการพลังงานอย่างเป็นระบบในอาคารสาขานาการพาณิชย์, วารสารวิจัยและสาระสถาปัตยกรรมการเมือง**, 7(2), 189–203.
- [17] นพรัตน์ เกตุขาว. (2558). **เอกสารประกอบการสอนระบบปรับอากาศและระบายอากาศ**. พะเยา : สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยพะเยา.
- [18] สุชาติ จันทรจรมานิตย์. (2555). **ระบบควบคุม Control system**. เชียงใหม่ : สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
- [19] นรินพร มาลาศรี. (2558). **“โซลาร์ภาคประชาชน” พลังงานแสงอาทิตย์ 100 เมกะวัตต์ ...จากปี 2562 สู่ 10 ปี แห่งอนาคต**. สืบค้นเมื่อ 18 มกราคม 2563, จาก <https://www.greennetworkthailand.com/โซลาร์ภาคประชาชน-ปี-2562>.
- [20] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2558). **โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าปี 2558**. สืบค้นเมื่อ 9 มกราคม 2563, จาก https://www.pea.co.th/Portals/0/demand_response/Rate2015Update.pdf.

- [21] Xiao F, Wang SW. (2009). Progress and methodologies of lifecycle commissioning of HVAC systems to enhance building sustainability, **Renew Sustain Energy**, 13(5), 1144–9.
- [22] Moteji N, Piette MA, Watson DS, Kiliccote S and Xu P. (2005). **Introduction to commercial building control strategies and techniques for demand response**. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory; LBNL–59975.
- [23] ชนิกันต์ ยิ้มประยูร. (2559). บทความปริทัศน์: อาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์, **Journal of Architectural/Planning Research and Studies**, 13(2), 1–30.
- [24] D. Murayama, K. Mitsumoto, Y. Takagi, Y. Iino S. and Yamamori (speakers). (7–10 May 2012). Smart grid ready BEMS adopting model-based HVAC control for energy saving, in **Transmission and Distribution Conference and Exposition T&D, IEEE PES**, (pp. 1–6). USA : Orlando, FL,
- [25] KyungGyu Park, Yoonkee Kim, SeonMi Kim, KwangHo Kim, WookHyun Lee and HwaChoon Park. (speakers). (9–10 October 2011) Building Energy Management System based on Smart Grid. in **Telecommunications Energy Conference (INTELEC), IEEE 33rd International**, (pp. 1–4). Netherlands : Amsterdam.
- [26] Karen Herter. (2007). **Residential implementation of critical-peak pricing of electricity**. *Energy Policy*, 35, 2121–2130.
- [27] M. Fera, R. Macchiaroli, R. Iannone, S. Miranda, S. and Riemma. (2016). **Economic evaluation model for the energy Demand Response**. *Energy*, 112, 457–468.
- [28] Lin H, Li X, Cheng P and Xu B. (2014). Thermo-economic evaluation of air conditioning system with chilled water storage. **Energy Conversion and Management**, 85, 328–332.
- [29] Lin H, Li X, Cheng P and Xu B. (2014). **Study on chilled energy storage of air-conditioning system with energy saving**. *Energy and Building*, 79, 41–46.
- [30] M.J. Sebzali, B. Ameer, H.J. and Hussain. (2014). **Comparison of energy performance and economics of chilled water thermal storage and conventional air-conditioning systems**. *Energy and Building*, 69, 237–250.
- [31] Song X, Liu L, Zhu T, Chen S and Cao Z. (2018). **Study of economic feasibility of a**

- compound cool thermal storage system combining chilled water storage and ice storage.** *Applied Thermal Engineering*, 133, 613–621.
- [32] Rosiek S and Garrido FJB. (2012). **Performance evaluation of solar-assisted air-conditioning system with chilled water storage (CIESOL building).** *Energy Conversion and Management*, 55, 81–92.
- [33] F.J.Aguilar, S.Aledo and P.V.Quiles. (2017). **Experimental analysis of air conditioner powered by photovoltaic energy and support grid.** *Applied Thermal Engineering*, 123, 486–497.
- [34] Yongjun Sun, Shengwei Wang and Gongsheng Huang. (2010). A demand limiting strategy for maximizing monthly cost savings of commercial Buildings. **Energy and Buildings**, 42, 2219–2230.
- [35] Borui Cui, Shengwei Wang and Xue Xue. (2014). **Effects and Performance of a Demand Response Strategy for Active and Passive Building Cold Storage.** *Energy Procedia*, 61, 564 – 567.
- [36] Yang Zhao, Yuehong Lu, Chengchu Yan and Shengwei Wang. (2015). **MPC-based optimal scheduling of grid-connected low energy buildings with thermal energy storages.** *Energy and Buildings*, 86, 415–426.
- [37] Xue Xue, Shengwei Wang, Chengchu Yan, Borui Cui. (2015). A fast chiller power demand response control strategy for buildings connected to smart grid. **Applied Energy**, 137, 77–87.
- [38] Ghiassi-Farrokhfal, Y., Rosenberg, C., Keshav, S., and Adjaho, M.B. (2016). Joint Optimal Design and Operation of Hybrid Energy Storage Systems. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, 34(3), pp 639– 650.
- [39] Jing, W., Lai, C.H., Wong, S.H. and Wong, M.L. (2016). Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids : a review. **IET Renewable Power Generation**, 11(4), pp 461–469.
- [40] Y Ru, J Kleissl and S Martinez. (2013). Storage Size Determination for Grid-Connected Photovoltaic Systems. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 4(1), pp 68–81.
- [41] ชีระภัทร์ แมนมิตร และปานจิต ดำรงกุลกำจร. (2558). ระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้

แบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ใช้ไฟที่มีการคิดอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้งาน. **วารสารวิจัยพลังงาน**, 12(2), 75–94.

- [42] Electricity Storage and Renewables. (2017). Costs and Markets to 2030. **The International Renewable Energy Agency (IRENA), 2017** สืบค้นเมื่อ 9 มกราคม 2563 จาก <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>
- [43] พิษยดา จิรวรรณวงศ์. (2556). **ในการศึกษาต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในบ้านที่อยู่อาศัย** วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, กรุงเทพมหานคร.
- [44] ธนาพล ตันติสัตยกุล. (2558). การประเมินมาตรการสนับสนุนทางการเงินสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาที่พักอาศัยในประเทศไทย. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 23(4), 605–621.
- [45] พรสวรรค์ พิริยะศรัทธา. (2559). การใช้เซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาวิทาลัยขอนแก่น เพื่อการประหยัดพลังงาน. **วารสารวิชาการคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น**, 15(1), 183–200.
- [46] ธนาพล ตันติสัตยกุล, พีรพล รัศมีธรรมโชติ และเมธาพร อุษสกุล. (2560). การประเมินผลประโยชน์ทางพลังงาน สิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 25(6), 1083–1099.
- [47] กัณฑ์ ปานประยูร. (2560). ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา ขนาด 8 กิโลวัตต์และความเป็นไปได้ของการขยายระบบ, **วารสารการพัฒนางานประจำสู่งานวิจัย**, 4, 76–86.
- [48] พงษ์ สกฤษ์ช่างสังจะทัย และณัฏ เกษประดิษฐ์. (2555). **การศึกษาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งที่ความร้อนเพื่อพัฒนาการใช้พลังงานอย่างยั่งยืน**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เชียงใหม่ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [49] Skoplaki, E. and Palyvos, J.A. (2009). Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. **Renewable Energy**, 34, 23–29.
- [50] ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI Edition). (2017). **chapter 17 residential cooling and heating load calculations**. USA : Atlanta Tullie Circle.

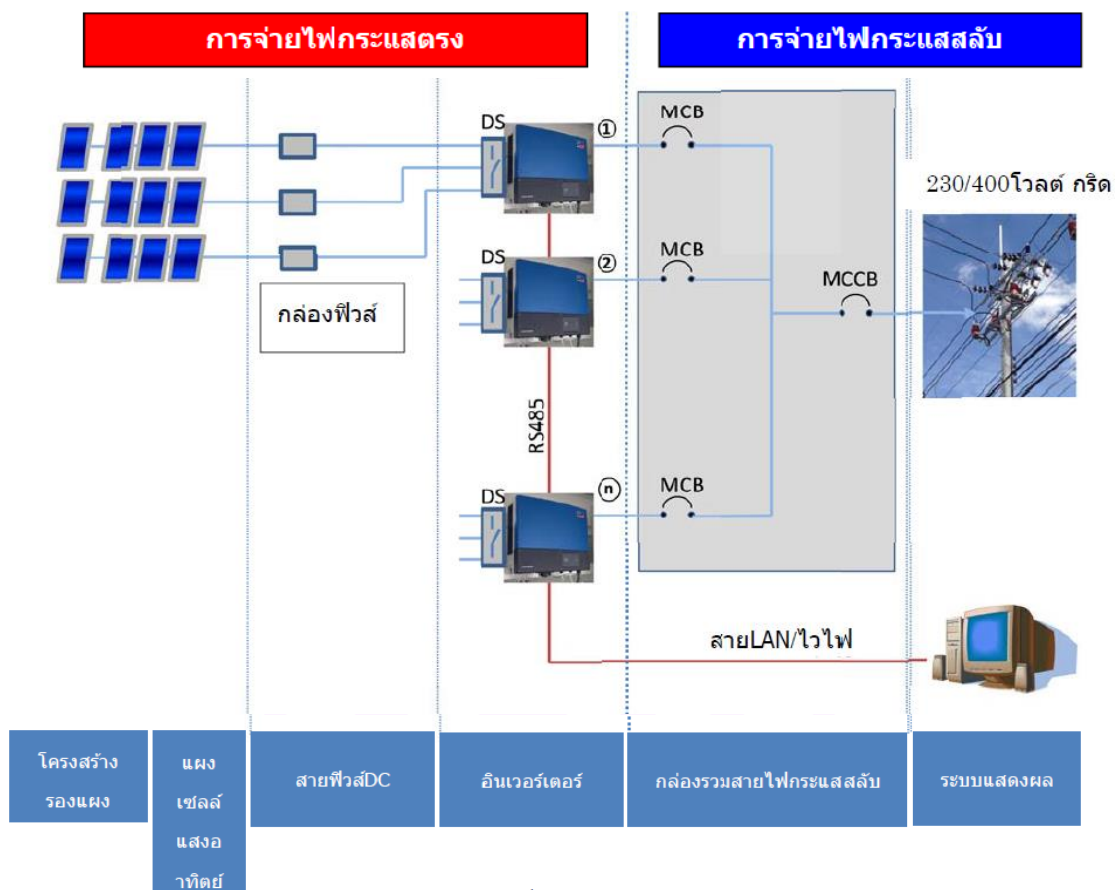
- [51] อรรถกร อาสนคำ, อิศระพงศ์ กั้นธิยะ และทะนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2558). การทำนายสมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ภายใต้การทำงานจริง. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**, 22(3), 88–94.
- [52] ชานนท์ ชูพงษ์. (2554). การพยากรณ์กำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับสายส่ง โดยไม่ใช้ตัววัดรังสีดวงอาทิตย์ กรณีศึกษาระบบที่ติดตั้งในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีระบบพลังงาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี.
- [53] The PowerTech Systems Company. (2015). **Self-consumption and self-sufficiency**. Retrieved November 16, 2019 from: <https://www.powertechsystems.eu/home/applications/energy-storage/self-consumption/>
- [54] Solar Quotes. (2018). **Solar Battery Storage Comparison Table**. Retrieved April 20, 2020 from <https://www.solarquotes.com.au/battery-storage/comparison-table/>.
- [55] Ran Fu, David Feldman and Robert Margolis. (2018). **U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018**. 15013 Denver West Parkway Golden : National Renewable Energy Laboratory (NREL)
- [56] R. Spotnitz. (2003). Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries. **Journal of Power Sources**, 13(1), 72–80.
- [57] Guido Lorenzi, Carlos Augusto and Santos Silva. (2016). Comparing demand response and battery storage to optimize self-consumption in PV systems. **Applied Energy**, 180, 524–535.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก รายละเอียดระบบ Smart Grid UP

1. ภาพรวมของระบบ Smart Grid UP



ภาพ 71 ภาพรวมของระบบ Smart Grid UP

รูปแบบการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า	สายส่งไฟฟ้ากระแสต่ำ 3 เฟส 4 สาย, 230/400 โวลต์, ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์
ประเภท	แผงโซลาร์: 500 กิโลวัตต์ (kWdc) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์
ขนาดกำลังผลิตติดตั้ง	จ่ายไฟกระแสสลับ: 425 กิโลวัตต์ (kWac)
ประเภทของกริด	แบบออนกริด (On-grid type)



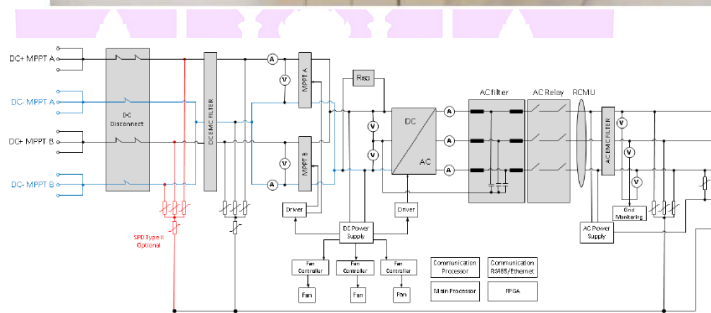
ภาพ 72 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (SHARP รุ่น ND-AA250)

หมายเหตุ: ลักษณะทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Solar photovoltaic cell type	156mm square, poly crystalline silicon
Frame material	Anodized aluminum alloy (Color: Silver)
Superstrate glasses material	Low iron tempered glasses
Encapsulation material	EVA(Ethylene Vinyl Acetate) resin
Back sheet material	Weatherproof films.
Dimension	Length: 1652mm Width: 994mm Depth: 46mm
Weight	19.0kg
Solar photovoltaic cell strings	60 in series (6 strings)
Junction box	IP-rating 65 (at live parts with the silicone potting)
Bypass Diode	The three bypass diodes shall be installed in the terminal box.
Cable	LEONI Studer BETAflam Solar 125-flex UL 4703 4.0mm sq. /Length 1000±50mm DC1000V, -40°C~90°C
Connector	Multi-Contact MC4 PV-KBT4/PV-KST4 IP-rating 67

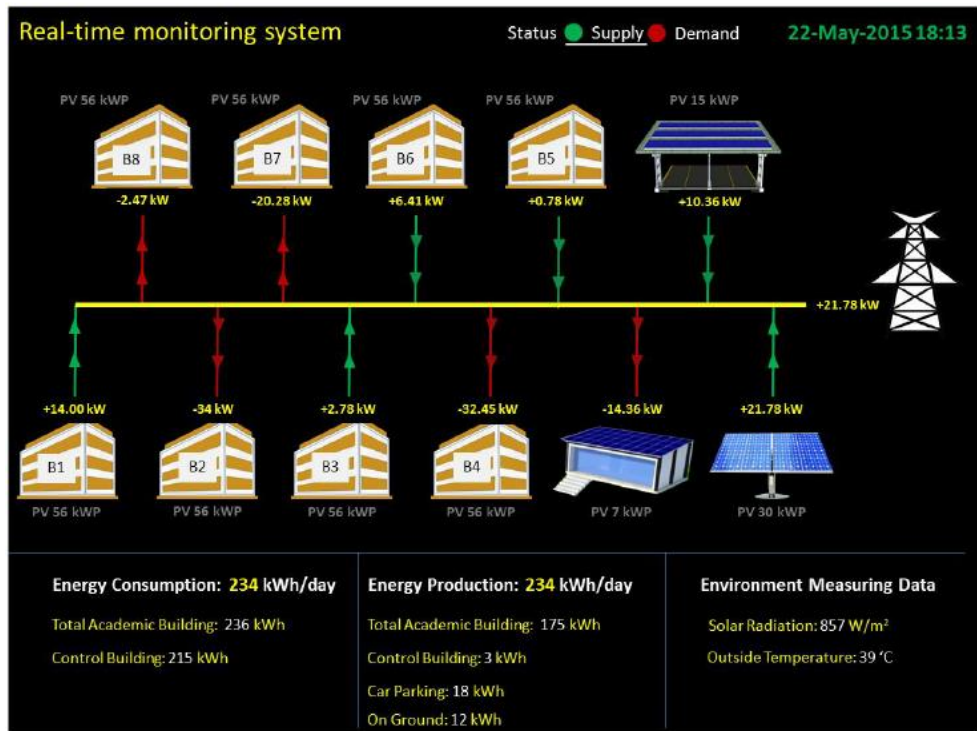
Characteristic	TYP	(Max.)	(Min.)	Unit
Maximum Power (Pmax)	250	262.50	250.00	W
Open-Circuit Voltage (Voc)	37.39	41.12	33.66	V
Short-Circuit Current (Isc)	8.81	—	7.93	A
Voltage at Point of Maximum Power (Vmpp)	30.68	—	—	V
Current at Point of Maximum Power (Impp)	8.15	—	—	A
Maximum System Voltage	1000			V
Over-Current Protection	15			A
Application Class	A (IEC61730 certified)			
Fire Rating	C (IEC61730 certified)			
Temperature Coefficient of Pmax	-0.440			%/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.329			%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.038			%/°C

ภาพ 73 คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น ND-AA250



Input [DC] Input [DC]	
Max. DC power [at $\cos \phi = 1$]	25550 W
Max. input voltage	1000 V
MPP voltage range / rated input voltage	390 V to 800 V / 600 V
Min. input voltage / start input voltage	150 V / 188 V
Max. input current input A / input B	33 A / 33 A
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A,3; B,3
Output [AC]	
Rated power [at 230 V, 50 Hz]	25000 W
Max. AC apparent power	25000 VA
AC nominal voltage	3 / N / PE; 220 / 380 V 3 / N / PE; 230 / 400 V 3 / N / PE; 240 / 415 V
Nominal AC voltage range	160 V to 280 V
AC grid frequency / range	50 Hz, 60 Hz / -6 Hz to +5 Hz
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V
Max. output current	36.2 A
Power factor at rated power	1
Adjustable displacement power factor	0 overreacted to 0 underreacted
Feed-in phases / connection phases	3 / 3
Efficiency	
Max. efficiency	98.5 %
Protective devices	
In-plant disconnection point	•
Ground fault monitoring / grid monitoring	• / •
DC surge arrester [type II] can be integrated	○
DC reverse polarity protection / AC short-circuit current capability / galvanically isolated	• / • / -
All-pole sensitive residual-current monitoring unit	•
Protection class [according to IEC 62103] / overvoltage category [according to IEC 60664-1]	I / III

ภาพ 74 อินเวอร์เตอร์ (SMA รุ่น STP25000TL-30)



ภาพ 75 การแสดงผลการทำงานของระบบ

ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์ในลำดับที่ 3 หรือ B3 เป็นหลัก

ลำดับที่	สถานที่ตั้ง	ความจุของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	จำนวนกล่องรวมสายไฟกระแสสลับ	จำนวนอินเวอร์เตอร์
1	อาคาร SEEN1, SEEN2	90 กิโลวัตต์	1	3
2	อาคาร EN1 EN2, ห้องควบคุม, บ้านดิน และลานจอดรถ	60 กิโลวัตต์	1	2
3	อาคาร EN3 EN4	60 กิโลวัตต์	1	2
4	อาคาร UP-SHOP-EN-CE	80 กิโลวัตต์	1	3
5	อาคาร UP-SHOP-EN-EE	30 กิโลวัตต์	0	1
6	อาคาร UP-SHOP-EN-IE	30 กิโลวัตต์	0	1
7	อาคาร UP-SHOP-EN-ME	30 กิโลวัตต์	0	1
8	อาคาร UP-SHOP-AHS	30 กิโลวัตต์	0	1
9	อาคาร UP-SHOP-PHAR	30 กิโลวัตต์	0	1
10	อาคาร UP-SHOP-AGR	30 กิโลวัตต์	0	1
11	อาคาร UP-SHOP-SC	30 กิโลวัตต์	0	1

ภาพ 76 ขนาดการติดตั้งของระบบแยกตามอาคาร

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นัทธีธนนท์ พงษ์พานิช
วัน เดือน ปี เกิด	5 กันยายน 2519
สถานที่เกิด	ตรัง
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2549 วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร พ.ศ.2549 บธ.บ (การจัดการทั่วไป), มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช, นนทบุรี พ.ศ.2542 วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล), มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา
ที่อยู่ปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ต.แม่กา อ.เมืองพะเยา จ. พะเยา
ผลงานตีพิมพ์	นัทธีธนนท์ พงษ์พานิชและบุญวัฒน์ วิจารย์พล. ศักยภาพของการใช้ สมาร์ตกริดเทคโนโลยี ในการจัดการพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ ภายในอาคารในช่วงฤดูร้อน กรณีศึกษา : อาคารในพื้นที่ของ มหาวิทยาลัยพะเยา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 28 ฉบับ ที่ 9 (อยู่ระหว่างรอการตีพิมพ์) นัทธีธนนท์ พงษ์พานิชและบุญวัฒน์ วิจารย์พล. การจัดการพลังงาน อาคารเพื่อลดความต้องการพลังไฟฟ้าระบบปรับอากาศ กรณีศึกษา : อาคารต้นแบบมหาวิทยาลัยพะเยา. วารสารวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, ปีที่ 39 ฉบับที่ 5 (อยู่ระหว่าง รอการตีพิมพ์)