

การประหยัดพลังงานที่เหมาะสมที่สุดในระบบกักเก็บพลังงาน
ด้วยความโน้มถ่วงโดยใช้กองเหล็ก



นายอนุศิษฐ์ ปั้นศิริชัยกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

OPTIMAL ENERGY SAVING IN GRAVITATIONAL ENERGY
STORAGE BY USING STEEL STACKS

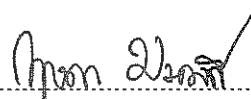


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การประหยัดพลังงานที่เหมาะสมที่สุดในระบบกักเก็บพลังงาน
ด้วยความโน้มถ่วงโดยใช้กองเหล็ก


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อาจารย์ ดร.กฤษดา มงคลดี)

ประธานกรรมการ



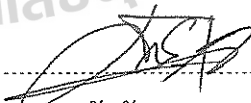
(ผศ. ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



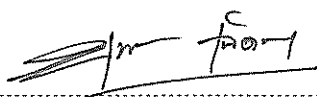
(รศ. ดร.กীরดี ชยะกุลคีรี)

กรรมการ



(ศ. ดร.ธนัดชัย กุลรวานิชพงษ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

รักษาการแทนคณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อนุศิษฐ์ ปั้นศิริชัยกุล: การประหยัดพลังงานที่เหมาะสมที่สุดในระบบกักเก็บพลังงานด้วยความโน้มถ่วงโดยใช้กองเหล็ก (OPTIMAL ENERGY SAVING IN GRAVITATIONAL ENERGY STORAGE BY USING STEEL STACKS)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล รัตนนิยมชัย, 179 หน้า.

คำสำคัญ: ระบบกักเก็บพลังงาน/ แรงโน้มถ่วง/ การประหยัดพลังงาน/ อัตราตามช่วงเวลาของวัน/ อัตราตามช่วงเวลาการใช้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาาระบบกักเก็บพลังงานด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกโดยใช้กองเหล็ก เพื่อเป็นตัวเลือกเทคโนโลยีในการกักเก็บพลังงานสมัยใหม่ กรณีศึกษาจะใช้โหลดการใช้ไฟของมหาวิทยาลัยและกลุ่มโหลดชุมชน พิจารณาความเหมาะสมในการกักเก็บพลังงานเพื่อช่วยลดค่าไฟให้น้อยที่สุด การจำลองหาระบบกักเก็บพลังงานโน้มถ่วงที่เหมาะสมที่สุดโดยการเปรียบเทียบกับโหลดการใช้ไฟแต่ละรูปแบบ ด้วยโปรแกรม MATLAB กรณีที่ 1 โหลดของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แบ่งเป็น 2 กรณีหลัก คือ โหลดแบบรายวันและแบบรายสัปดาห์ เพื่อวิเคราะห์หาความเหมาะสมในแต่ละรูปแบบ โดยโหลดกรณีนี้มีการคิดค่าไฟแบบอัตราตามช่วงเวลาการใช้ (TOU) ส่วนกรณีที่ 2 โหลดชุมชนจะเป็นชุมชนขนาดกลางและชุมชนขนาดใหญ่ แบ่งเป็น 2 กรณีหลัก คือ โหลดแบบรายวันและแบบรายเดือน โดยโหลดชุมชนทั้ง 2 ขนาดนี้จะนำทั้งค่าไฟแบบอัตราตามช่วงเวลาของวัน (TOD) และแบบอัตราตามช่วงเวลาการใช้ (TOU) มาคิดค่าไฟเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างและเปรียบเทียบผลการศึกษาพบว่าระบบกักเก็บพลังงานด้วยแรงโน้มถ่วงของโหลดมหาวิทยาลัยยังไม่เหมาะสมหรือคุ้มค่ากับการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานทั้ง 2 กรณี ส่วนโหลดชุมชนสามารถลดค่าไฟให้ถูกที่สุดในระบบได้ โดยที่การคิดค่าไฟแบบอัตราตามช่วงเวลาของวัน (TOD) จะมีการลดค่าไฟต่อเดือนได้ 1.1% ของโหลดขนาดกลางและ 2.21% ของโหลดขนาดใหญ่ ส่วนแบบอัตราตามช่วงเวลาการใช้ (TOU) สามารถลดค่าไฟต่อเดือนได้ 0.51% ของโหลดขนาดกลางและ 1.53% ของโหลดขนาดใหญ่ ซึ่งถือว่าเป็นการลดค่าไฟที่น้อย ระบบกักเก็บพลังงานนี้จึงไม่เหมาะสมกับการกักเก็บพลังงานทั้งแบบโหลดมหาวิทยาลัยและทั้งแบบชุมชนเมื่อเทียบกับต้นทุนในการติดตั้งทั้งหมดของระบบ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา อนุศิษฐ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ทศพล

ANUSIT PUNSIRICHAIYAKUL: OPTIMAL ENERGY SAVING IN GRAVITATIONAL ENERGY STORAGE BY USING STEEL STACKS.

THESIS ADVISOR: ASST. PROF. TOSAPHOL RATNIYOMCHAI, 179 PP.

Keyword: Energy storage system/ gravitational/ Energy saving/ Time of Day Rate/ Time of Use Rate

This thesis presents a study of the gravitational energy storage system using steel stacks, to be a technology option for modern energy storage. The case study will use the electricity usage load of the university and the community load group. Consider the suitability of energy storage to help reduce electricity costs to a minimum. Simulation of the most suitable gravitational energy storage system by comparing with each type of electrical load using the MATLAB program. Case 1 Suranaree University of Technology's load is divided into 2 main cases daily load and weekly load, to analyze and find suitability in each format. In this case, electricity is charged according to Time of Use Rate. As for the second case, the community load will be a medium-sized community and a large community. Divided into 2 main cases daily loading and monthly loading. Both community loads of these sizes will use both Time of Day Rate and Time of Use Rate electricity rates to calculate the electricity costs to see the difference and comparison. The results of the study found that the university load energy storage system is not suitable or cost-effective for installing the energy storage system in both cases. The community load can reduce the cheapest electricity bill in the system. By calculating Time of Day Rate electricity rates, there will be a monthly electricity bill reduction of 1.1% for medium loads and 2.21% for large loads, as for the Time of Use rate, it can reduce monthly electricity costs by 0.51% of medium loads and 1.53% of large loads. This is considered a fairly small reduction in electricity costs. This energy storage system is not suitable for both university and community energy storage compared to the total installation cost of the system.

School of Electrical Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature
Advisor's Signature
Tosaphol.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และแนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ยิ่งแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมไปถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ศาสตราจารย์ ดร.ธนดชัย กุลรวรานิชพงษ์ กับริองศาสตราจารย์ ดร.กীরติ ชยะกุลคีรี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ อาจารย์ ดร. กฤษดา มงคลดี อาจารย์ประจำคณะระบบรางและการขนส่ง สาขาระบบราง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตนครราชสีมา ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และเป็นผู้ตรวจทานวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการศึกษา รวมทั้งการเผยแพร่ผลงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้กำลังใจในการทำวิจัย และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างยิ่งมาโดยตลอด

อนุศิษย์ ปันศิริชัยกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	4
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 ระบบการกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS)	6
2.3 ระบบการกักเก็บพลังงานแรงโน้มถ่วง (Gravity Energy Storage System: GESS)	10
2.4 ระบบการทำงานของลิฟต์	15
2.5 วงจรแปลงพลังงานในระบบ	17
2.6 การลดความต้องการสูงสุดในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน	19

สารบัญ (ต่อ)

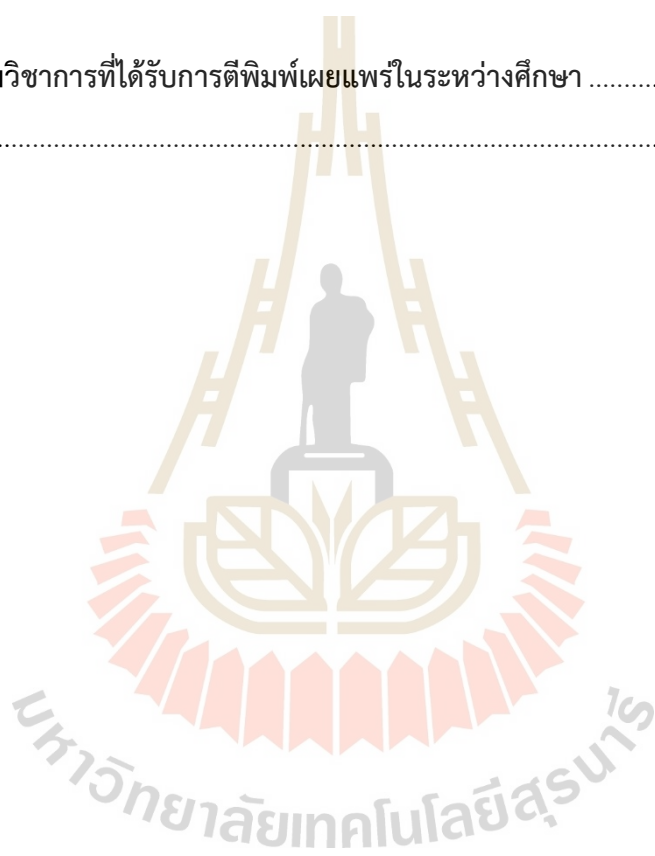
	หน้า
2.7 สรุป.....	20
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	21
3.1 บทนำ.....	21
3.2 ระบบลิฟต์.....	21
3.2.1 หลักการทำงานและการใช้พลังงานของลิฟต์.....	22
3.2.2 อุปกรณ์หลักของลิฟต์.....	23
3.2.3 การใช้พลังงานของลิฟต์.....	29
3.2.4 การประเมินความร้อนสูญเสียของลิฟต์.....	30
3.3 ระบบโซล่าเซลล์แสงอาทิตย์.....	31
3.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโซล่าเซลล์.....	31
3.3.2 หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์.....	32
3.3.3 การเพิ่มกำลังไฟฟ้าในระบบ.....	33
3.3.4 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์.....	33
3.3.5 ความเข้มแสงโซล่าเซลล์จากแสงอาทิตย์.....	36
3.4 ระบบแปลงผันกำลังงานทางกลและไฟฟ้า.....	37
3.4.1 ระบบส่งกำลังเชิงกล.....	37
3.4.2 มอเตอร์ไฟฟ้า.....	41
3.4.3 วงจรแปลงผันพลังงาน.....	45
3.4.4 แรงดึงดูดสถิตในการยกวัตถุ.....	51
3.5 การหาค่าที่เหมาะสมในระบบกักเก็บพลังงาน.....	53
3.5.1 Particle swarm optimization.....	53
3.5.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	56
3.6 ทฤษฎีและโมเดลจำลองการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็กในแนวดิ่ง.....	59
3.6.1 ทฤษฎีการคำนวณการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็กในแนวดิ่ง.....	59
3.6.2 โมเดลจำลองการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็กในระบบกักเก็บพลังงาน.....	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7	ต้นทุนระบบกักเก็บพลังงาน..... 63
3.8	สรุป 66
4	ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบกักเก็บพลังงาน 67
4.1	บทนำ 67
4.2	พารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองของระบบกักเก็บพลังงาน 67
4.2.1	ผลการจำลองขนาดและมวลของลวดสลิง 67
4.2.2	มวลของก้อนเหล็กและผลการจำลองขนาด 68
4.2.3	ระบบส่งกำลังเชิงกลที่ใช้ในระบบ 70
4.2.4	พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้จากโพลีโกลาเซลล์ 72
4.2.5	โพลีโกลาเซลล์ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 72
4.2.6	โพลีโกลาเซลล์ไฟฟ้าแหล่งชุมชนขนาดกลางและขนาดใหญ่ 76
4.3	ผลการจำลองระบบกักเก็บพลังงานของโพลีโกลาเซลล์เทคโนโลยีสุรนารี 78
4.3.1	ผลการจำลองระบบกักเก็บพลังงานในโหนดรายวัน 81
4.3.2	ผลการจำลองระบบกักเก็บพลังงานในโหนดรายสัปดาห์ 98
4.3.3	ผลการจำลองระบบกักเก็บพลังงานในโหนดรายสัปดาห์โดยใช้ Particle Swarm Optimization..... 104
4.4	ผลการจำลองระบบกักเก็บพลังงานของแหล่งชุมชนขนาดกลาง (1MW) และชุมชนขนาดใหญ่ (5MW) โดยใช้ Particle Swarm Optimization..... 126
4.4.1	การจำลองโดยใช้ Particle Swarm Optimization หาค่า Energy Storage Point โดยกำหนดค่า Cut Peak ที่ต้องการ..... 129
4.4.2	การจำลองใช้ Particle Swarm Optimization หาค่า Cut Peak และ Energy Storage Point โดยมีค่าไฟประหยัดและเหมาะสมที่สุด 137
4.5	สรุป 165
5	สรุปและข้อเสนอแนะ 166
5.1	สรุปผลการดำเนินงาน 166

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	166
เอกสารอ้างอิง	168
ภาคผนวก	
ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	173
ประวัติผู้เขียน	179



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	การเปรียบเทียบการใช้งานเครื่องลิฟต์แรงฉุดจากความฝืดขับเคลื่อนด้วยเฟือง (Geared machine) และขับเคลื่อนโดยตรง (Gearless machine).....26
3.2	ความเข้มแสงรายเดือนในระบบโซล่าเซลล์จังหวัดนครราชสีมา..... 37
3.3	ประสิทธิภาพของเฟืองเกียร์แต่ละชนิด 40
3.4	ความสูญเสีย 45
4.1	พารามิเตอร์ลวดสลิงยกก้อนเหล็กขนาด 250 ตัน.....68
4.2	พารามิเตอร์ลวดสลิงยกก้อนเหล็กขนาด 500 ตัน 68
4.3	ขนาดของก้อนเหล็กที่ชั้ยกในระบบ 70
4.4	ขนาดของก้อนคอนกรีตที่ชั้ยกในระบบ 70
4.5	อัตราครอบเฟืองในระบบ..... 71
4.6	ความเข้มแสงของระบบโซล่าเซลล์ในจังหวัดนครราชสีมา..... 72
4.7	การใช้พลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 73
4.8	แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าแต่ละเดือนของปี 2560-2565 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี..... 75
4.9	แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าในเดือนกันยายนของปี 2560-2565 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 76
4.10	อัตราค่าไฟฟ้า TOU ประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ 80
4.11	ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละวันของเดือนกันยายน 2562 80
4.12	พารามิเตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานขนาด 250 ตัน 84
4.13	กำลังงานและพลังงานที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 250 ตัน 85
4.14	พารามิเตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน 88
4.15	กำลังงานและพลังงานที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน 88
4.16	พารามิเตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานขนาด 250 ตัน 92

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.17	93
4.18	96
4.19	97
4.20	103
4.21	106
4.22	110
4.23	111
4.24	115
4.25	115
4.26	119
4.27	120
4.28	124
4.29	125
4.30	125
4.31	128
4.32	132
4.33	135
4.34	136
4.35	138
4.36	143
4.37	145

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.38	หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดกลาง TOU แบบรายวันโดยใช้ PSO..... 148
4.39	หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดกลาง TOU แบบรายเดือนโดยใช้ PSO..... 150
4.40	ค่าใช้จ่ายของโหลดชุมชนขนาดใหญ่ทั้งแบบ TOD และ TOU..... 151
4.41	หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดใหญ่ TOD แบบรายวันโดยใช้ PSO..... 156
4.42	หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดใหญ่ TOD แบบรายเดือนโดยใช้ PSO 159
4.43	หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดใหญ่ TOU แบบรายวันโดยใช้ PSO..... 161
4.44	หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดใหญ่ TOU แบบรายเดือนโดยใช้ PSO..... 164
4.45	ค่าใช้จ่ายก่อนและหลังมีระบบกักเก็บพลังงาน 164



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	เหมืองแร่ทองคำ บ้านเขาหม้อ ต.เขาเจ็ดยักษ์ อ.ทับคล้อ จ.พิจิตร.....	2
2.1	แนวคิดระบบการจัดเก็บกำลังไฟฟ้าพลังงานน้ำในรูปแบบพลังงานลม.....	7
2.2	ไดอะแกรมการทำงานของระบบการจัดเก็บกำลังไฟฟ้าพลังงานน้ำในรูปแบบพลังงานลม.....	8
2.3	ระบบกักเก็บพลังงานแรงโน้มถ่วง.....	11
2.4	กระบวนการชาร์จและคายประจุของการจัดเก็บด้วยแรงโน้มถ่วงของอากาศอัดที่เหมาะสมที่สุด.....	12
2.5	แผนผังของการเก็บพลังงานความโน้มถ่วงในมหาสมุทรลึก.....	13
2.6	ระบบขับเคลื่อนลิฟต์หมุนเวียนโดยใช้ ERU.....	18
3.1	โครงสร้างของลิฟต์.....	22
3.2	การทำงานของลิฟต์ในโหมดต่าง ๆ.....	23
3.3	ลิฟต์ที่มีห้องเครื่อง.....	24
3.4	ลิฟต์ที่ไม่มีห้องเครื่อง.....	25
3.5	เครื่องลิฟต์และชุดควบคุมประเภทต่าง ๆ.....	28
3.6	การใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องลิฟต์ที่ใช้แรงดูดจากความฝืดขับเคลื่อนด้วยเฟือง (geared machine) และขับเคลื่อนโดยตรง (gearless machine).....	30
3.7	แผนภาพการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของลิฟต์เครื่องลิฟต์แรงดูดจากความฝืดขับเคลื่อนด้วยเฟือง (geared machine) และขับเคลื่อนโดยตรง (gearless machine).....	31
3.8	คุณสมบัติพิเศษของโซล่าเซลล์.....	32
3.9	การเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	33
3.10	การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand alone system).....	34
3.11	การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system).....	35
3.12	การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system).....	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13	การทดสอบของเฟืองเกียร์ [เฟืองขับ:เฟืองตาม] 39
3.14	ระบบส่งกำลังเชิงกล 39
3.15	มอเตอร์ไฟฟ้า 41
3.16	วงจรสามเฟสครึ่งคลื่น..... 46
3.17	วงจรสามเฟสเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลง center tap 46
3.18	วงจรบริดจ์สามเฟส..... 47
3.19	วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบฟลูบริดจ์..... 48
3.20	สัญญาณอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบรูปคลื่น 48
3.21	วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์..... 49
3.22	วงจรสมมูลของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ขณะสวิตช์เปิด 49
3.23	วงจรสมมูลของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ขณะสวิตช์ปิด 50
3.24	ลวดสลิง..... 52
3.25	การคำนวณการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค..... 55
3.26	แผนผังการทำงานของ PSO..... 56
3.27	แผนภาพของวัตถุในการเคลื่อนที่ขึ้น 60
3.28	แผนภาพของวัตถุในการเคลื่อนที่ลง..... 60
3.29	โมเดลจำลองระบบส่งกำลังเชิงกล..... 62
3.30	การเปรียบเทียบมูลค่าการกักเก็บของระบบกักเก็บพลังงาน 5 วิธีการจัดเก็บ 65
4.1	ระยะขนาดของปริซึมสี่เหลี่ยม 69
4.2	ระบบส่งกำลังเชิงกลในระบบ ratio 486 : 1..... 71
4.3	พลังงานการใช้ไฟ 12 เดือนในแต่ละปี 73
4.4	แผนภูมิภาพแสดงพลังงาน 12 เดือนในแต่ละปี..... 74
4.5	พลังงานที่ใช้ทั้งหมดในแต่ละปี..... 74
4.6	วงจร Single line ของกลุ่มโหลดตัวอำเภอและตลาดสังขละบุรี โหลด 1 MW..... 76
4.7	กำลังงานที่ใช้จริงใน 1 วันของกลุ่มโหลดตัวอำเภอและตลาดสังขละบุรี 77

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	วงจร Single line ของกลุ่มโหลดชายแดน โหลดขนาด 5 MW..... 77
4.9	กำลังงานที่ใช้จริงใน 1 วันของกลุ่มโหลดชายแดน..... 78
4.10	ข้อมูลการใช้ไฟในเดือนกันยายน 2562..... 79
4.11	ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละวันของเดือนกันยายน 2562..... 81
4.12	กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ใน 1 วัน (16 กันยายน 2562) 82
4.13	กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกักเก็บพลังงาน (16 กันยายน 2562)..... 82
4.14	กำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการกักเก็บพลังงาน (16 กันยายน 2562)..... 83
4.15	กำลังงานที่ใช้ในการยกและได้จากการปล่อยของก้อนเหล็กแต่ละก้อน 83
4.16	กำลังงานโหลดใหม่หลังจากใช้ระบบกักเก็บพลังงาน 84
4.17	กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกักเก็บพลังงาน (16 กันยายน 2562)..... 86
4.18	กำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการกักเก็บพลังงาน (16 กันยายน 2562)..... 86
4.19	กำลังงานที่ใช้ในการยกและได้จากการปล่อยของก้อนเหล็กแต่ละก้อน 87
4.20	กำลังงานโหลดใหม่หลังจากใช้ระบบกักเก็บพลังงาน 87
4.21	กำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบโซล่าเซลล์ใน 1 วัน..... 89
4.22	กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดการใช้ไฟและระบบโซล่าเซลล์ 89
4.23	กำลังงานไฟฟ้าระบบโซล่าเซลล์และระบบกักเก็บพลังงาน 90
4.24	กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดการใช้ไฟและระบบโซล่าเซลล์หลังกักเก็บพลังงาน 90
4.25	กำลังงานที่ใช้ในการยกและได้จากการปล่อยของก้อนเหล็กแต่ละก้อน 91
4.26	กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดการใช้ไฟปกติเทียบกับโหลดหลังผ่านระบบกักเก็บพลังงาน 91
4.27	กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดหลังผ่านระบบกักเก็บพลังงาน..... 92
4.28	กำลังงานไฟฟ้าระบบโซล่าเซลล์และระบบกักเก็บพลังงาน 94
4.29	กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดการใช้ไฟและระบบโซล่าเซลล์หลังกักเก็บพลังงาน 94
4.30	กำลังงานที่ใช้ในการยกและได้จากการปล่อยของก้อนเหล็กแต่ละก้อน 95

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31	กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดการใช้ไฟปกติเทียบกับโหลดหลังผ่านระบบกักเก็บพลังงาน 95
4.32	กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดหลังผ่านระบบกักเก็บพลังงาน..... 96
4.33	สัปดาห์แรกของเดือนกันยายนรวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW 99
4.34	สัปดาห์ที่ 1 ในเดือนกันยายน 2562 รวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW..... 99
4.35	โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยห้กลับกับโหลดโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้..... 100
4.36	โหลดที่ยกก่อนเหล็กเพื่อกักเก็บพลังงานและปล่อยก่อนเหล็กลง 100
4.37	กำลังงานที่ใช้ในการยกและกำลังงานที่ได้จากการปล่อย 101
4.38	ค่ากำลังงานที่ใช้ในการยก..... 102
4.39	ค่ากำลังงานที่ได้จากการปล่อย 102
4.40	โหลดปกติเทียบกับโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงาน 103
4.41	สัปดาห์ที่ 1 ของเดือนกันยายนรวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW..... 104
4.42	สัปดาห์ที่ 2 ของเดือนกันยายนรวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW..... 105
4.43	สัปดาห์ที่ 3 ของเดือนกันยายนรวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW..... 105
4.44	สัปดาห์ที่ 4 ของเดือนกันยายนรวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW..... 106
4.45	สัปดาห์ที่ 1 ในเดือนกันยายน 2562 รวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW..... 107
4.46	โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยห้กลับกับโหลดโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ในสัปดาห์ ที่ 1..... 107
4.47	โหลดที่ยกก่อนเหล็กเพื่อกักเก็บพลังงานและปล่อยก่อนเหล็กลงในสัปดาห์ที่ 1 108
4.48	กำลังงานที่ใช้ในการยกและกำลังงานที่ได้จากการปล่อยในสัปดาห์ที่ 1 108
4.49	โหลดปกติเทียบกับโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 1 109
4.50	โหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 1..... 109
4.51	สัปดาห์ที่ 2 ในเดือนกันยายน 2562 รวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW..... 111
4.52	โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยห้กลับกับโหลดโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ในสัปดาห์ ที่ 2..... 112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.53	โหลดที่ยกก่อนเหล็กเพื่อกักเก็บพลังงานและปล่อยก่อนเหล็กลงในสัปดาห์ที่ 2 112
4.54	กำลังงานที่ใช้ในการยกและกำลังงานที่ได้จากการปล่อยในสัปดาห์ที่ 2 113
4.55	โหลดปกติเทียบกับโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 2 114
4.56	โหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 2 114
4.57	สัปดาห์ที่ 3 ในเดือนกันยายน 2562 รวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW 116
4.58	โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยห้กลับกับโหลดโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ในสัปดาห์ที่ 3 117
4.59	โหลดที่ยกก่อนเหล็กเพื่อกักเก็บพลังงานและปล่อยก่อนเหล็กลงในสัปดาห์ที่ 3 117
4.60	กำลังงานที่ใช้ในการยกและกำลังงานที่ได้จากการปล่อยในสัปดาห์ที่ 3 118
4.61	โหลดปกติเทียบกับโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 3 118
4.62	โหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงาน 119
4.63	สัปดาห์ที่ 4 ในเดือนกันยายน 2562 รวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW 121
4.64	โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยห้กลับกับโหลดโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ในสัปดาห์ที่ 4 121
4.65	โหลดที่ยกก่อนเหล็กเพื่อกักเก็บพลังงานและปล่อยก่อนเหล็กลงในสัปดาห์ที่ 4 122
4.66	กำลังงานที่ใช้ในการยกและกำลังงานที่ได้จากการปล่อยในสัปดาห์ที่ 4 122
4.67	โหลดปกติเทียบกับโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 4 123
4.68	โหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 4 123
4.69	กราฟกำลังงานที่ใช้ใน 1 วันของกลุ่มโหลดตัวอำเภอและตลาดสังขละบุรี 127
4.70	กราฟกำลังงานที่ใช้ใน 1 วันของกลุ่มโหลดชายแดน 127
4.71	กำลังงานที่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของกลุ่มโหลดอำเภอและตลาดสังขละบุรี 130
4.72	กำลังงานของการยกและปล่อยของระบบกักเก็บพลังงานโหลดอำเภอและตลาดสังขละบุรี 130
4.73	ความเร็วของการยกและปล่อยของระบบกักเก็บพลังงานโหลดอำเภอและตลาดสังขละบุรี 131

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.74 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.25 MW.....	132
4.75 กำลังงานที่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของกลุ่มโหลดชายแดน.....	133
4.76 กำลังงานของการยกและปล่อยของระบบกักเก็บพลังงานโหลดชายแดน.....	134
4.77 ความเร็วของการยกและปล่อยของระบบกักเก็บพลังงานโหลดชายแดน.....	134
4.78 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 5.32 MW โหลดชายแดน.....	135
4.79 TOD แบบรายวันของโหลดขนาดกลาง.....	138
4.80 TOD แบบรายเดือนของโหลดขนาดกลาง.....	139
4.81 TOU แบบรายวันของโหลดขนาดกลาง.....	139
4.82 TOU แบบรายเดือน ของโหลดขนาดกลาง.....	140
4.83 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 1.....	141
4.84 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 1.....	141
4.85 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 1.....	142
4.86 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานของโหลดขนาดกลางตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.50 MW กรณีที่ 1.....	142
4.87 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 2.....	143
4.88 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 2.....	144
4.89 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 2.....	144
4.90 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลดขนาดกลางตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.213 MW กรณีที่ 2.....	145
4.91 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 3.....	146
4.92 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 3.....	146
4.93 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 3.....	147
4.94 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลดขนาดกลางตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.50 MW กรณีที่ 3.....	147

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.95 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 4.....	148
4.96 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 4	149
4.97 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 4.....	149
4.98 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลดขนาดกลางตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ 1.29971 MW กรณีที่ 4.....	150
4.99 TOD แบบรายวัน จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ประมาณ Cut Peak = 6.8 MW.....	152
4.100 แบบTOD แบบรายเดือน จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ประมาณ Cut Peak = 5.1 MW.....	152
4.101 TOU แบบรายวัน จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ประมาณ Cut Peak = 5.7 MW.....	153
4.102 TOU แบบรายเดือน จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ประมาณ Cut Peak = 5.1 MW.....	153
4.103 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 1.....	154
4.104 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 1	155
4.105 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 1	155
4.106 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลดขนาดใหญ่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ 6.80 MW กรณีที่ 1	156
4.107 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 2.....	157
4.108 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 2	157
4.109 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 2.....	158
4.110 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลดขนาดใหญ่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ 5.113 MW กรณีที่ 2.....	158
4.111 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 3.....	159
4.112 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 3	160
4.113 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 3.....	160
4.114 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลดขนาดใหญ่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ 5.655 MW กรณีที่ 3.....	161
4.115 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 4.....	162

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.116	กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลตขนาดใหญ่ กรณีที่ 4 162
4.117	ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลตขนาดใหญ่ กรณีที่ 4 163
4.118	โหลตหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลตขนาดใหญ่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ 5.112 MW กรณีที่ 4 163



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System : ESS) ถือเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยในการบริหารจัดการพลังงานหมุนเวียน ช่วยลดความผันผวนของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตมาจากพลังงานทดแทน ให้มีความเสถียรมากขึ้น ไม่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้าและยังเปรียบเสมือน Power Bank กักเก็บพลังงาน เพื่อจ่ายไฟเข้าสู่ระบบเมื่อมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง

ในปัจจุบันการกักเก็บพลังงานได้กลายเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจอย่างกว้างขวางในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจะแตกต่างจากการกักเก็บพลังงานรูปแบบอื่น ๆ โดยที่พลังงานไฟฟ้าจะต้องใช้ในขณะที่กำลังผลิตอยู่จะถูกเปลี่ยนแปลงโดยทันที ให้เป็นรูปแบบของพลังงานอื่น เช่น พลังงานศักย์ พลังงานจลน์ หรือ พลังงานเคมี เป็นต้น วิธีการทั่วไปของการกักเก็บพลังงานขนาดใหญ่จะทำการใช้ไฟฟ้าพลังน้ำที่ถูกสูบขึ้นมาเก็บไว้ด้านบน ได้นำลักษณะทางภูมิศาสตร์มาใช้ เพื่อกักเก็บน้ำในอ่างเก็บน้ำที่ยกสูงขึ้น โดยใช้กระแสไฟฟ้าส่วนเกินในช่วงเวลาของความต้องการต่ำ เพื่อสูบน้ำขึ้นไปเก็บไว้ในอ่างเก็บน้ำ จากนั้นจะปล่อยน้ำที่ผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันและแปลงพลังงานศักย์ที่เก็บไว้กลับไปเป็นไฟฟ้า เมื่อมีความต้องการใช้ไฟฟ้ามีปริมาณสูง อีกวิธีหนึ่งในช่วงต้นในการแก้ไขปัญหาการกักเก็บพลังงานสำหรับความต้องการทางไฟฟ้า เพื่อการพัฒนาแบตเตอรี่เพื่อให้เป็นอุปกรณ์กักเก็บแบบเคมีไฟฟ้า แบตเตอรี่ก่อนหน้านี้ถูกจำกัดการใช้ในระบบพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่สูง อย่างไรก็ตามตั้งแต่ประมาณช่วงกลางของทศวรรษแรกของศตวรรษที่ 21 เทคโนโลยีของแบตเตอรี่ได้รับการพัฒนาให้มีความสามารถให้โหลดปรับได้ในขนาดสาธารณูปโภคและความสามารถในการควบคุมความถี่อย่างมีนัยสำคัญ

พลังงานน้ำที่ถูกสูบกลับมีข้อจำกัดด้วยสถานที่ที่เหมาะสม เนื่องจากต้องการพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ของที่ดิน สำหรับอ่างเก็บน้ำด้านบนและด้านล่างซึ่งจะต้องแยกออกจากกันด้วยความสูง ส่วนความจุพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่มีผลต่อความเสถียรของแบตเตอรี่ เนื่องจากจำนวนรอบการทำงานของแบตเตอรี่มีผลจากการประจุพลังงานสูง ๆ ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง สิ่งนี้จึงเป็นข้อจำกัดสำหรับระบบกักเก็บพลังงาน ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดความสนใจในการพัฒนารูปแบบใหม่ของการกักเก็บพลังงานด้วยแรงโน้มถ่วงเพื่อประยุกต์ใช้ประโยชน์จากพลังงานที่ใช้สูบน้ำกลับ เพื่อเป็นการกักเก็บพลังงานโน้มถ่วงโดยใช้วัตถุที่หนักในการกักเก็บพลังงาน

ดังนั้นจึงศึกษาข้อมูลเพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเกี่ยวกับการใช้แรงโน้มถ่วงของโลกในการกักเก็บพลังงาน เพื่อเป็นทางเลือกอีกทางเลือกหนึ่งในการกักเก็บพลังงาน เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่สำหรับการคิดค้นและทดลอง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเป็นพลังงานสะอาดและมีอยู่อย่างไม่จำกัด โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเหมืองแร่ที่ถูกปล่อยทิ้งร้างในประเทศไทยตามรูปที่ 1.1 เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด หรือสามารถประยุกต์ใช้ในพื้นที่ที่มีความสูงระดับหนึ่ง ปัจจุบันระบบกักเก็บพลังงานกำลังกลายเป็นส่วนประกอบของระบบพลังงานที่มีความสำคัญมากขึ้น กระบวนการจ่ายพลังงานจะเป็นการแปลงผันพลังงานจากพลังงานศักย์โน้มถ่วงเป็นพลังงานจลน์ของการเคลื่อนไหวของก้อนเหล็ก เพื่อเป็นแหล่งพลังงานกลในการผลิตพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 เหมืองแร่ทองคำ บ้านเขาหม้อ ต.เขาเจ็ดยอด อ.ทับคล้อ จ.พิจิตร

ที่มา : https://www.matichon.co.th/news-monitor/news_1322244

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำโหลดการใช้ไฟของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและแหล่งชุมชนมาวิเคราะห์ข้อมูล จึงนำมาประกอบการจำลองและการคำนวณระบบกักเก็บพลังงานโน้มถ่วงในการเก็บพลังงาน เพื่อนำค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงก้อนเหล็กขึ้นและการปล่อยก้อนเหล็กลง เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานและต้นทุนการบำรุงรักษาระหว่างระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System : BESS) และการกักเก็บพลังงานน้ำแบบสูบกลับ (Pumped-Storage)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระบบกักเก็บพลังงานในรูปแบบแรงโน้มถ่วงสำหรับโพลิตECHNICAL COLLEGE เทคโนโลยีสุรนารีและโพลิตECHNICAL COLLEGE ศึกษาการใช้งานของโพลิตECHNICAL COLLEGE ในการหาค่าที่เหมาะสมของการทำงานในระบบของโพลิตECHNICAL COLLEGE ต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแรงโน้มถ่วง
2. เพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงที่อัตราการใช้ไฟฟ้าสูง
3. เพื่อหาค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่ประหยัดที่สุดในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน
4. เพื่อกักเก็บพลังงานที่สูญเสียไปจากการผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

มวลของก้อนเหล็กและความสูงของระบบจะส่งผลต่อพลังงานที่กักเก็บ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมเป็นแนวทางที่ดีในการหาจุดปล่อยก้อนเหล็กในระบบ เพื่อช่วยลดอัตราการใช้ไฟฟ้าสูงและมีค่าไฟจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคให้ถูกลง

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ระบบทดสอบเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็ก โดยคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB
2. พารามิเตอร์และข้อมูลการจำลองของระบบทดสอบใช้ข้อมูลจากการเคลื่อนที่ของระบบลิฟต์โดยสาร
3. การจำลองไม่คำนึงถึงสถานที่และพื้นที่ความสูงของระบบในการติดตั้งภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
4. การจำลองไม่คำนึงถึงสถานที่และพื้นที่ความสูงของระบบในการติดตั้งภายในแหล่งชุมชนที่อยู่อาศัย
5. การคำนวณต้นทุนในการติดตั้งและค่าบำรุงรักษาของระบบเป็นเพียงการคำนวณแบบประมาณเท่านั้น เนื่องจากแต่ละระบบมีความซับซ้อนและมีรายละเอียดต่าง ๆ ที่แตกต่างกันและทางบริษัทหรือผู้จัดทำไม่สามารถเปิดเผยข้อมูลในส่วนนี้ได้
6. การคำนวณระบบทางด้านควบคุมและวงจรไฟฟ้าเป็นแบบอุดมคติและประสิทธิภาพการสูญเสียของระบบจากการอ้างอิง

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. จำลองผลระบบกักเก็บพลังงานเทียบกับการไม่มีระบบกักเก็บพลังงานภายในมหาวิทยาลัย
2. จำลองผลระบบกักเก็บพลังงานเทียบกับการไม่มีระบบกักเก็บพลังงานภายในแหล่งชุมชนที่อยู่อาศัย
3. จำลองผลการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็กในระบบโดยใช้วิธีการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่
4. เปรียบเทียบการทำงานของโปรแกรมจำลองด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้ Particle swarm optimization และไม่ใช่ Particle swarm optimization พร้อมเปรียบเทียบผลการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้โปรแกรมการหาค่าที่เหมาะสมในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายไฟที่เหมาะสมและประหยัดที่สุด
2. สามารถนำพลังงานที่สูญเสียเปล่าจากการผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์นำมาเก็บและนำไปใช้
3. สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงที่อัตราการใช้ไฟฟ้าสูงอย่างเหมาะสม

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท 1 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ ซึ่งกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่มีการศึกษามาแล้ว เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย โดยแบ่งเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่ ระบบการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า ระบบการกักเก็บพลังงานแรงโน้มถ่วง ระบบการทำงานของลิฟต์ วงจรแปลงพลังงานในระบบ และการลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ประกอบไปด้วยความรู้เบื้องต้นของเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงาน เช่น ระบบการเคลื่อนที่และทำงานของลิฟต์ ระบบโซล่าเซลล์

แสงอาทิตย์ ระบบแปลงพลังงานทางกลและไฟฟ้า การใช้ PSO หาค่าที่เหมาะสมในระบบ และต้นทุนของระบบกักเก็บ เป็นต้น

บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองโหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและชุมชนที่อยู่อาศัย เปรียบเทียบโหลดการใช้งานต่าง ๆ รวมถึงการใช้ PSO หาค่าใช้จ่ายที่ประหยัดที่สุดและเปรียบเทียบประเมินผลการจำลองการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการกักเก็บระบบพลังงาน

บทที่ 5 นำเสนอบทสรุปและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

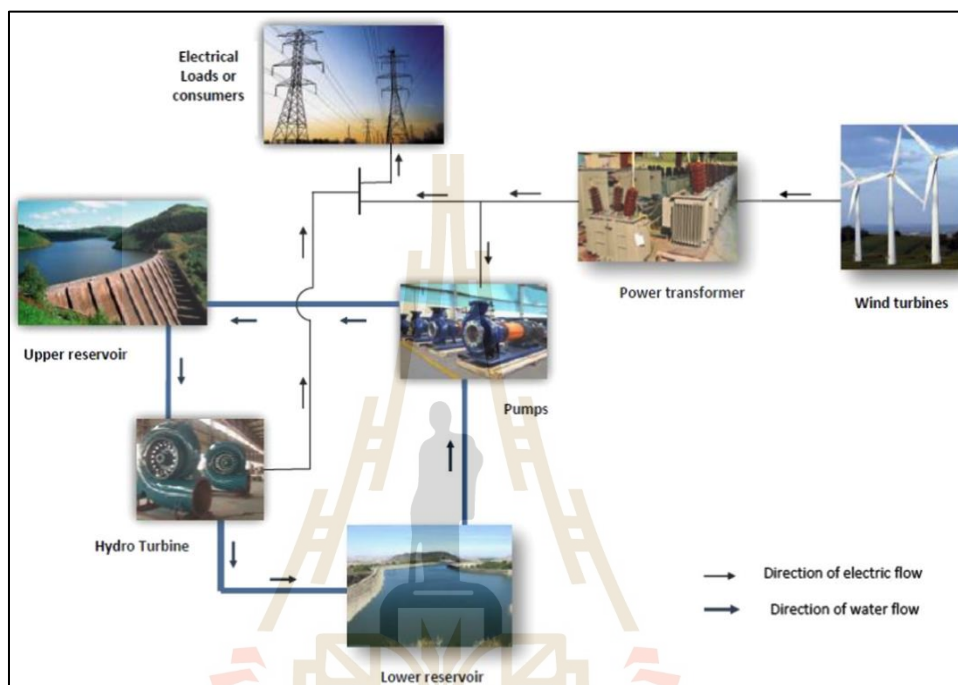
2.1 บทนำ

การศึกษาและวิจัยที่หลากหลายในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีการศึกษาการกักเก็บพลังงานในรูปแบบของแบตเตอรี่ (BESS) และพลังงานน้ำแบบสูบกลับ (Pumped-Storage) อย่างหลากหลาย เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงานโดยแรงโน้มถ่วง บทนี้นำเสนอการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีการศึกษามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยปรัทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยดังกล่าวได้นำมาใช้เป็นตัวอย่าง และเป็นแนวทางในการประยุกต์ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

2.2 ระบบการกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS)

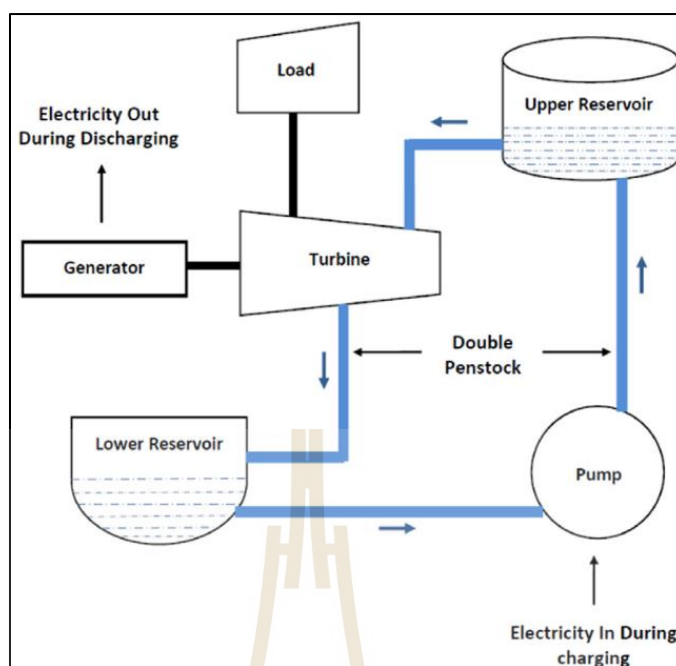
การเก็บพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้ (Pumped hydro energy storage : PHES) เป็นเทคโนโลยีการเก็บพลังงานในรูปแบบของพลังงานศักย์โดยอาศัยความแตกต่างของระดับน้ำภายในอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ในการเก็บและคายพลังงาน การทำงานของระบบ PHES คือ ในช่วงที่มีความต้องการใช้พลังงานต่ำ (off-peak) ระบบจะใช้พลังงานในการปั้มน้ำจากอ่างเก็บน้ำที่อยู่ในระดับต่ำขึ้นไปยังอ่างเก็บน้ำที่อยู่ระดับสูง เมื่อมีความต้องการใช้พลังงานในปริมาณที่มากน้ำจะถูกปล่อยให้ไหลผ่านกังหันเพื่อสร้างพลังงาน โดยปริมาณของพลังงานที่เก็บได้จะขึ้นอยู่กับระดับที่แตกต่างกันของอ่างเก็บน้ำทั้ง 2 และปริมาณน้ำที่สามารถเก็บไว้ได้ ซึ่ง PHES เป็นที่ยอมรับในเชิงพาณิชย์สำหรับการจัดเก็บไฟฟ้าในระดับสาธารณูปโภค พลังงานน้ำไม่ได้เป็นเพียงแหล่งพลังงานหมุนเวียนและยั่งยืนเท่านั้น แต่ความยืดหยุ่นและความจุของพลังงานยังทำให้สามารถปรับปรุงความเสถียรของกริดและสนับสนุนการใช้งานแหล่งพลังงานหมุนเวียนอื่นๆ ที่ไม่ต่อเนื่อง เช่น พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากพลังงานหมุนเวียนมีลักษณะที่มีความผันผวนไม่สามารถรักษาหรือควบคุมการจ่ายพลังงานอย่างต่อเนื่องได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจัดเก็บไฟฟ้าจำนวนมาก การศึกษาปัจจุบันมีจุดมุ่งหมายในการพัฒนาเทคโนโลยีและระบบไฮบริด (พลังงานลม-พลังงานน้ำ, พลังงานแสงอาทิตย์-พลังงานน้ำ และพลังงานลม-พลังงานแสงอาทิตย์-พลังงานน้ำ) จากการรวบรวมข้อมูลพบว่า การเก็บพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเกาะอิสระที่มีขนาดเล็ก และมีการจัดเก็บพลังงานขนาดใหญ่ โดยที่ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการเก็บพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้ นั้นแตกต่างกันไปในทางปฏิบัติระหว่าง 70% ถึง 80% โดยบางส่วนอ้างว่าสูงถึง 87% โดยทั่วโลกขนาดการเก็บ

พลังงานโดยการใช้ปั้มน้ำเก็บไว้ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 1,000–3000 MW ในทางกลับกัน ระบบการจัดเก็บแบบสูบน้ำด้วยไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ได้ถูกนำมาใช้สำหรับพื้นที่ที่มีขนาดเล็กมาก (จำนวนบ้านไม่กี่หลัง) เท่านั้น ระบบ PHEs ในรูปแบบพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการถ่ายโอนน้ำจากอ่างเก็บน้ำล่างขึ้นบน ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ (Shafiqur Rehman et al., 2015)



รูปที่ 2.1 แนวคิดระบบการจัดเก็บกำลังไฟฟ้าพลังงานน้ำในรูปแบบพลังงานลม
ที่มาภาพ: (Shafiqur Rehman et al., 2015)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมการทำงานของระบบการจัดเก็บกำลังไฟฟ้าพลังงานน้ำในรูปแบบพลังงานลม
ที่มาภาพ: (Shafiqur Rehman et al., 2015)

ปัจจุบันมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนโดยเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Home System, SHS) ซึ่งการกระจายของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นี้สามารถแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานทั่วโลกได้ โดยปกติแล้วแบตเตอรี่เป็นส่วนสำคัญของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แต่แบตเตอรี่นั้นมีราคาค่อนข้างสูงและต้องมีการดูแลระบบของแบตเตอรี่ให้เป็นอย่างดี การประมาณอายุการใช้งานแบตเตอรี่สามารถช่วยในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และตัดสินใจเลือกชนิดของแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ แต่การประมาณอายุการใช้งานแบตเตอรี่มักเป็นงานที่ซับซ้อนซึ่งต้องใช้ข้อมูลเชิงประจักษ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฟฟ้าเคมีภายในแบตเตอรี่ก่อน ดังนั้นจึงมีวิธีการประมาณอายุการใช้งานแบตเตอรี่อย่างง่าย คือ การจำลองด้วยแอปพลิเคชัน SHS โดยมีข้อมูลแบตเตอรี่ที่มีอยู่จากผู้ผลิตและโปรไฟล์โหลดพารามิเตอร์แบตเตอรี่ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ประมาณพลังงานแบตเตอรี่ ค่า Depth-of-Discharge (DOD) และค่า DOD ที่ใช้งานอยู่ สำหรับขนาดของ SHS ที่เลือกไว้ในการจำลองสามารถประเมินอายุการใช้งานสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดปิดผนึกอยู่ที่ 5.3 ปี และ 15.7 ปี สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์หือทธิพลของการปรับขนาดแบตเตอรี่ใน SHS ต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีค่าใช้จ่ายล่วงหน้าที่สูงขึ้นเนื่องจากขนาดแบตเตอรี่ขนาดใหญ่โดยหลักการแล้วสามารถนำมาใช้เพื่อชดเชยต้นทุนการเปลี่ยนตลอดอายุการใช้งานของ SHS วิธีการที่ได้

อธิบายไว้ยังถูกนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นพบว่าค่าประมาณค่าตลอดอายุการใช้งานอยู่ภายใน 3.85% ของแบบจำลองอื่น ๆ จากแบบเตอเรียการทดลอง (Nishant Narayan et al., 2017)

ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage Systems: BESSs) ถือเป็นหัวใจสำคัญในการบริหารจัดการการผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนให้ดียิ่งขึ้นจัดเป็นสินทรัพย์ใหม่สำหรับการควบคุมความถี่หลัก (Primary Frequency Regulation: PFR) ซึ่งเป็นการปรับปรุงความเสถียรของกริด มีการศึกษามากมายเกี่ยวกับการประมาณค่าอายุการใช้งานสำหรับ BESS ที่ดำเนินการตาม PFR ได้พิจารณาเฉพาะการจัดเก็บไฟฟ้าเคมี โดยไม่คำนึงถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE) การวิเคราะห์อายุการใช้งานของระบบจัดเก็บพลังงานแบตเตอรี่ โดยให้กฎความถี่หลักที่พิจารณาจากโมดูล IGBT ตัวเก็บประจุด้วยไฟฟ้า และความเสื่อมโทรมของการจัดเก็บไฟฟ้าเคมี ซึ่งข้อมูลอายุการใช้งานมีไว้เพื่อประมาณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net-Present-Value: NPV) ของระบบจัดเก็บพลังงานแบตเตอรี่ เพื่อประเมินประโยชน์ของการปรับใช้ระบบจัดเก็บพลังงานแบตเตอรี่แบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังในกริดของยุโรป มีการเปรียบเทียบระหว่างประเทศต่าง ๆ โดยพิจารณาจากการนำ PFR ไปใช้ จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ากลยุทธ์การจัดการระบบจัดเก็บพลังงานแบตเตอรี่สามารถยืดอายุการใช้งานได้ และส่วนประกอบที่มีอายุการใช้งานสั้นที่สุดคือการจัดเก็บไฟฟ้าเคมี แต่ส่วนประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอาจมีการสึกหรอต่ำ เนื่องจากการใช้พลังงานต่ำ ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนเล็กน้อยขณะทำ PFR โดยสรุป การจัดหา PFR โดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่พบว่ามีกำไรในทั้งสามประเทศ (Marco Stecca et al., 2021)

ในปัจจุบันการจัดเก็บพลังงานมีความโดดเด่นในด้านความสามารถในการจัดหาพลังงานสำรองให้กับเครือข่ายไฟฟ้า จึงมีการศึกษาและวิเคราะห์สินทรัพย์หลักของเทคโนโลยีชั้นนำของระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage: ES) ประเด็นการวิจัย ได้แก่ ตัวเลขตลาดโลก ผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจ และการประยุกต์ใช้ทางเทคนิค แม้จะมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่สำคัญในเทคโนโลยี ES แต่ก็ยังมีความท้าทายมากมายที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานของเกาะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อการทำงานของระบบที่แยกออกมารวมกับพลังงานหมุนเวียนที่เพิ่มสูงขึ้น แม้แต่เทคโนโลยีการเก็บพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาเต็มที่ที่สุด ก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบ ระบบกักเก็บพลังงานเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับพลังงานลม โดยเฉพาะอย่างยิ่งบนเกาะที่มีแหล่งพลังงานลมสูง และระบบกักเก็บพลังงานมีความสำคัญต่อคุณภาพไฟฟ้ามากกว่า และเหนือสิ่งอื่นใดคือความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า ดังนั้นการจ่ายไฟฟ้าในกริดแบบธรรมดาและแบบกระจายศูนย์โดยใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนต้องการกลไกการจัดการพลังงานที่ราคาไม่แพงและเชื่อถือได้ ซึ่งรวมถึงระบบจัดเก็บที่ยั่งยืน แม้จะมีข้อเสียบางประการในระบบการจัดเก็บที่ใช้กับไฟฟ้า ซึ่งเกี่ยวข้องกับประเภทของเทคโนโลยีและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ผู้เขียน (E.M.G. Rodrigues et al., 2014) ได้ทำการศึกษาและรวบรวมเทคโนโลยีการจัดเก็บหลายอย่างได้รับการ

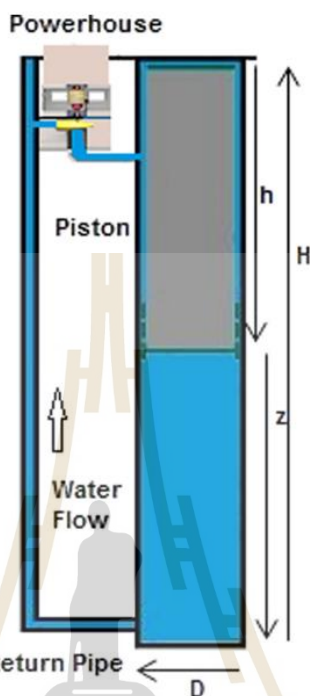
พัฒนาโดยมีลักษณะการตอบสนองที่แตกต่างกัน และความทันสมัยของระบบกักเก็บพลังงาน ประโยชน์และการใช้งาน

2.3 ระบบการกักเก็บพลังงานแรงโน้มถ่วง (Gravity Energy Storage System: GESS)

จากบทความ (Mathew Aneke, 2016) ได้รวบรวมแนวคิดของการจัดเก็บพลังงาน เทคโนโลยีต่างๆ สำหรับการจัดเก็บพลังงานโดยเน้นที่การจัดเก็บพลังงานรูปแบบรอง คือ พลังงาน ไฟฟ้าและความร้อนมากขึ้น ตลอดจนการวิเคราะห์โดยละเอียดของโครงการจัดเก็บพลังงานต่างๆ ทั่วโลก เทคโนโลยีการเก็บพลังงานบางอย่าง เช่น ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ เทอร์โมเคมี และแรงโน้มถ่วง อยู่ในขั้นตอนสาธิตหรือวิจัย ดังนั้นจึงยังไม่มีโครงการขนาดใหญ่ในชีวิตจริงที่จะตรวจสอบความสามารถ ในการใช้กักเก็บพลังงาน การวิจัยเพิ่มเติมจึงมีความจำเป็น เนื่องจากไม่มีเทคโนโลยีการเก็บพลังงาน แบบใดแบบหนึ่งที่มีคุณสมบัติครบถ้วนที่จำเป็นสำหรับการทำงานที่เหมาะสมที่สุด เทคโนโลยีที่เกิดขึ้น ใหม่เช่น การเก็บพลังงานด้วยอากาศเหลว (Liquid Air Energy Storage: LAES) โมดูลพลังงานแรง โน้มถ่วง (Gravity Power Module: GPM) และการเก็บพลังงานจากรางชั้นสูง (Advanced Rail Energy Storage: ARES) มีศักยภาพสำหรับการใช้งานในพื้นที่ขนาดใหญ่ หากโมดูลพลังงานแรงโน้ม ถ่วงมีประสิทธิภาพที่ 75–80% ก็อาจเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการเก็บพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้ในสถานที่ที่ไม่มีภูมิประเทศที่เอื้ออำนวย การเก็บพลังงานจากรางชั้นสูงสามารถเป็นทางเลือกที่ดี สำหรับการเก็บพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้เพื่อการใช้งานในพื้นที่ขนาดใหญ่มีภูมิประเทศที่ เอื้ออำนวย แต่ไม่มีน้ำประปาเพียงพอ อีกทั้งจำเป็นต้องมีการวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติมสำหรับการ จัดเก็บพลังงานไฮโดรเจน (Hydrogen Energy Storage: HES) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการ เดินทางไปกลับ และสุดท้ายสารละลายเกลือ (molten salt) ยังคงเป็นส่วนสำคัญในการจัดเก็บ พลังงานความร้อนสำหรับการใช้งานในพื้นที่ขนาดใหญ่ (Mathew Aneke, 2016)

การจัดเก็บพลังงานน้ำแบบปั้มน้ำเป็นเทคโนโลยีที่มีการติดตั้งอย่างกว้างขวางที่สุดในปัจจุบัน รูปแบบการจัดเก็บนี้มีข้อเสียบางประการซึ่งรวมถึงการจัดเตรียมเทคโนโลยี เนื่องจากไม่สามารถ นำไปใช้ได้ทุกที่ ผู้เขียน (A. Berrada et al., 2016) เสนอวิธีการปรับขนาดเทคโนโลยีระบบกักเก็บ พลังงานแรงโน้มถ่วงอย่างเหมาะสมที่สุดแบบไม่เชิงเส้นเพื่อลดต้นทุนระบบกักเก็บพลังงานแรงโน้ม ถ่วงในขณะที่ตอบสนองข้อจำกัดทั้งหมด และหลีกเลี่ยงความล้มเหลวในการออกแบบระบบ โดยทำ การตรวจสอบขนาดที่เหมาะสมที่สุดและคำนวณต้นทุนพลังงานที่ปรับระดับสำหรับการผลิตกำลังการผลิต 20 MWh โดยใช้เวลาปล่อย 4 ชั่วโมง ผู้เขียนได้เลือกความสูงของภาชนะให้มีความสูง 500 ม. มี เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.21 ม. เพื่อให้ได้พลังงานที่กำหนด การปรับให้เหมาะสมนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม ความสูงของคอนเทนเนอร์นั้นประหยัดกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับความจุเฉพาะ ขนาดของการ

จัดเก็บที่ใช้ในกรณีศึกษาถูกกำหนดโดยการวิเคราะห์เชิงพารามетริก งานนี้แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีนี้มีต้นทุนพลังงานในระดับที่น่าสนใจมากเมื่อเทียบกับการจัดเก็บพลังงานแบบสูบกลับและการจัดเก็บพลังงานอัดอากาศ

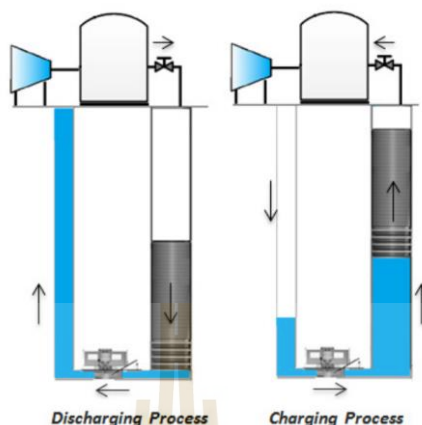


รูปที่ 2.3 ระบบกักเก็บพลังงานแรงโน้มถ่วง

ที่มาภาพ: (A. Berrada et al., 2016)

ในปีต่อมาได้มีการเสนอแนวคิดใหม่ที่เรียกว่า ระบบกักเก็บพลังงานจากแรงโน้มถ่วงของอากาศอัดโดยการรวมหลักการทำงานของทั้งสองระบบเข้าด้วยกัน คือ PHES และการจัดเก็บพลังงานอัดอากาศ (Compressed air energy storage: CAES) แสดงดังรูปที่ 2.4 มีการใช้แบบจำลองในการคำนวณความจุพลังงานสะสม พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของภาชนะบรรจุมีอิทธิพลต่อปริมาณความจุพลังงานที่อาจเกิดขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มแรงดันด้านทานจะเพิ่มการผลิตพลังงานของระบบ ความจุพลังงานของการจัดเก็บแรงโน้มถ่วงของอากาศอัดสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มปริมาณอากาศและน้ำ โดยการเพิ่มความจุสูงสุดจะกำหนดอัตราส่วนนี้เท่ากับ 1 การจัดเก็บพลังงานตามแรงโน้มถ่วงของอากาศอัดแสดงให้เห็นถึงโอกาสที่ดีสำหรับปริมาณความจุในการจัดเก็บที่อาจเกิดขึ้นที่สามารถเก็บพลังงานได้ค่อนข้างมากด้วยการผสมผสานระหว่างการจัดเก็บพลังงานอัดอากาศและการจัดเก็บพลังงานจากแรงโน้มถ่วง อีกทั้งการผลิตพลังงานของเทคโนโลยีนี้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับกักเก็บพลังงานจากแรงโน้มถ่วงโดยไม่ใช้อากาศอัด ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้อากาศอัดช่วยเพิ่มความจุของระบบได้อย่างมาก ดังนั้น การจัดเก็บแรงโน้มถ่วงของอากาศอัด

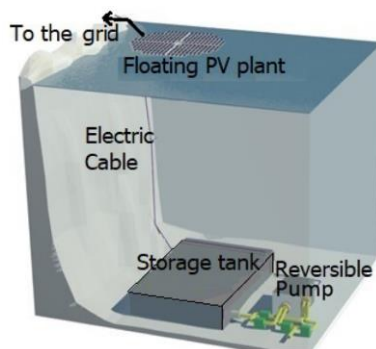
จึงถือได้ว่าเป็นวิธีที่น่าสนใจในการรวมพลังงานหมุนเวียนขนาดใหญ่ที่ไม่ต่อเนื่องเข้าด้วยกัน (Asmae Berrada et al., 2017)



รูปที่ 2.4 กระบวนการชาร์จและคายประจุของการจัดเก็บด้วยแรงโน้มถ่วงของอากาศอัดที่เหมาะสมที่สุด

ที่มาภาพ: (Asmae Berrada et al., 2017)

การจัดเก็บพลังงานความโน้มถ่วงด้วยพลังน้ำได้ขยายไปสู่บริบทของมหาสมุทรลึกเทคนิคนี้ มีชื่อว่า Deep Ocean Gravitational Energy Storage (DOGES) ความแตกต่างระหว่างการเก็บพลังงานความโน้มถ่วงในมหาสมุทรลึกกับระบบไฟฟ้าพลังน้ำ คือ สายเคเบิลและเทอร์ไบน์ของการเก็บพลังงานความโน้มถ่วงในมหาสมุทรลึกอยู่ใต้น้ำ และไม่จำเป็นต้องใช้ท่อส่งน้ำทั้งขาเข้าและขาออก การไม่มีท่อส่งน้ำขาออกและขาเข้า จะทำให้ไม่มีการกระจายพลังงานที่เกี่ยวข้อง จึงเอื้อต่อประสิทธิภาพของระบบประมาณ 90% ในส่วนของการจัดเก็บพลังงานอัดอากาศจะมีกระบวนการที่ไม่สามารถย้อนกลับได้เสมอไปเนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นด้วยในกระบวนการ ในขณะที่ DOGES ปราศจากข้อเสียเหล่านี้ อย่างไรก็ตามพลังงานที่เก็บไว้จะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความลึก เพื่อให้อุปกรณ์มีราคาถูกลงสำหรับความลึกที่มากกว่า 500 ม. ในทางปฏิบัติได้พุดถึงโมดูลความจุ 1 MWhซึ่งโมดูลนี้มีขนาดและน้ำหนักอยู่ในช่วงที่เป็นมาตรฐานสำหรับเครื่องจักรท่าเรือ (R. Cazzaniga et al., 2017) โดยแผนผังของการเก็บพลังงานความโน้มถ่วงในมหาสมุทรลึกแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งมีหลักการทำงานของระบบ คือ เมื่อพลังงานจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบลอยตัวจะจ่ายพลังงานให้กับปั๊ม/กังหันที่จะบังคับให้น้ำออกจากถัง เมื่อใดก็ตามที่จำเป็นต้องนำพลังงานกลับมาจากการจัดเก็บ น้ำจากภายนอกจะไหลกลับเข้าไปในถังเปล่าผ่านกังหัน ทำให้เกิดพลังงาน



รูปที่ 2.5 แผนผังของการเก็บพลังงานความโน้มถ่วงในมหาสมุทรลึก

ที่มาภาพ: (R. Cazzaniga et al., 2017)

ผู้เขียน (P. Nikolaidis et al., 2018) ได้ศึกษาการจัดเก็บพลังงานในรูปแบบต่างๆ ให้ประโยชน์ด้านเทคนิค เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม เช่น การเก็งกำไร การปรับสมดุลและแหล่งพลังงานสำรอง การควบคุมแรงดันไฟฟ้าและความถี่ การจัดการต้นทุน และการกำหนดรูปแบบโหลดและการปรับระดับ เป็นต้น ซึ่งสำหรับการใช้งานขนาดใหญ่การจัดการพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้เป็นทางเลือกในการจัดเก็บพลังงานที่เชื่อถือได้มากกว่าทางเลือกของอากาศอัด ในขณะที่การจัดเก็บพลังงานแบบล้อยุนกำลัง และการจัดเก็บพลังงานในรูปแบบของแม่เหล็กไฟฟ้ายังคงมุ่งเน้นไปที่การใช้งานระยะสั้นรวมถึงการควบคุมความถี่ เครื่องสำรองไฟ การหมุน สำรอง ฯลฯ ในการเก็บพลังงานขนาดกลางถึงขนาดใหญ่แบตเตอรี่ Pb-acid และ molten-salt นั้นถือว่าสามารถจัดเก็บไฟฟ้าแบบกระจายได้ โดยให้ข้อดีของการปรับระดับโหลดของทั้งเครือข่ายอุปทานและโรงงานผลิต ส่วนในแง่ของความปลอดภัยและความเรียบง่าย ระบบ Pb-acid และ Li-ion เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในที่พักอาศัยขนาดเล็ก ทำให้ผู้บริโภคสามารถลดค่าใช้จ่ายได้

ผู้เขียน (C.D. Botha et al., 2019) นำเสนอวิธีการกักเก็บพลังงานศักย์โน้มถ่วง มีการทบทวนวิธีการกักเก็บปัจจุบันที่ใช้หลักการของพลังงานศักย์โน้มถ่วง โดยเปรียบเทียบในแง่ของกำลังระดับพลังงาน และประสิทธิภาพการเดินทางไปกลับ ซึ่งหนึ่งในวิธีการจัดเก็บพลังงานโน้มถ่วงที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายมวลของแข็งในแนวตั้งขึ้นและลง โดยมีวิธีการยกที่แตกต่างกันสองวิธี วิธีแรกคือรอกม้วนแบบดรัมแบบดั้งเดิมซึ่งคล้ายกับรอกที่ใช้ในเหมือง ลิฟต์ และรอกเรือ และวิธีที่สองคือรอกแบบหลายลูกสูบที่ได้นำเสนอโดยอิงจากการใช้เครื่องจักรไฟฟ้าเชิงเส้น ผลลัพธ์ที่ได้คือวิธีการรอกทั้งสองวิธีสร้างระบบการจัดเก็บที่มีคุณสมบัติและการใช้งานการจัดเก็บที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ในขณะเดียวกันการกักเก็บพลังงานศักย์โน้มถ่วงแบบรอกหลายลูกสูบมีข้อได้เปรียบของการทำงานแบบไม่ใช่เชิงกล สิ่งนี้จะเพิ่มความจุในการจัดเก็บพลังงานอย่างมาก ในปีเดียวกันมีการวิเคราะห์ศักยภาพของการใช้แหล่งกักเก็บพลังงานแรงโน้มถ่วงพร้อมตุ้มน้ำหนักแบบแขวน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับการพัฒนาปล่องเหมืองลึกที่ถูกทิ้งร้างขึ้นใหม่ เทคโนโลยีนี้มีความหนาแน่นของพลังงานค่อนข้างต่ำ

แต่มีข้อดีที่ power capacity แยกจาก energy capacity ไม่มีการจำกัดรอบการทำงาน และ ศักยภาพที่จะใช้ร่วมกับการจัดเก็บพลังงานลมอัด การปรับขนาดน้ำหนักที่แขวนลอยเพื่อเพิ่มความจุ ในการจัดเก็บพลังงานสูงสุด โดยพิจารณาจากขนาดทางกายภาพของเพลลาของหุ่นระเบิด นอกจากนี้ ยังแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ในระบบและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังกำหนดอัตราการ เปลี่ยนแปลงสูงสุด (T. Morstyn et al., 2019)

เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาสั้น ๆ ในช่วงเวลาที่มีความต้องการต่ำและ มีความไม่สม่ำเสมอหนึ่งในวิธีแก้ปัญหาคือการที่รู้จักกันดีคือการจัดเก็บพลังงานและแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่ เสถียรยิ่งขึ้น เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้าอีกครั้งในช่วงเวลาที่มีความต้องการสูง กระบวนการนี้ให้ความเป็นไปได้ทาง เศรษฐกิจสำหรับโครงการจัดเก็บพลังงานส่วนใหญ่ แม้จะมีประสิทธิภาพน้อยที่สุดและพบได้ บ่อยที่สุด เช่น แบตเตอรี่ ผู้เขียน (Ana Cristina Ruoso et al., 2019) เสนอระบบการจัดเก็บที่ ทำงานด้วยพลังงานศักย์โน้มถ่วงโดยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยพิจารณาจากการใช้งานเพียงเล็กน้อย ขนาดของระบบที่พิจารณาคือเพลลา 12 ม. ความสูงลูกสูบ 5 ม. และเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เมตร นำเสนอการจัดเก็บพลังงาน 11 kWh อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพประมาณ 90% อายุการใช้งาน 50 ปี และความหนาแน่นของการจัดเก็บที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ

ประสิทธิภาพเชิงทิศทางเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบหุ่นยนต์ โดยที่อิมพีแดนซ์ทางกลของ เกียร์ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อไดนามิกของการโต้ตอบทางกายภาพกับสิ่งแวดล้อม โดย คุณสมบัติของเฟืองตรงนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพที่ขึ้นกับแรงบิดเป็นฟังก์ชันของทิศทางการ ไหลของกำลัง ประสิทธิภาพในทิศทางการ step-up จะแตกต่างจากการ step-down ความสามารถในการ ขยับย้อนกลับสามารถตรวจสอบประสิทธิภาพทิศทางการขึ้นลงที่ตัวกระตุ้นหุ่นยนต์ที่มีอัตราทดเกียร์สูง กระปุกเกียร์เซอร์โวอุตสาหกรรม และกลุ่มเฟือง แบบจำลองจลนศาสตร์แสดงให้เห็นว่าเกียร์คู่เดียว ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพในช่วง step-down มากกว่าแบบ step-up จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพทิศทางการแบบ step-down และ step-up อยู่ที่ 98% และ 96% ตามลำดับสำหรับ กระปุกเกียร์ PIC DESIGNS 6:1 ในช่วงความเร็วที่ทดสอบ นอกจากนี้ ประสิทธิภาพด้านพลังงาน โดยรวมของเซอร์โวมอเตอร์ Dynamixel จาก Robotis ที่มีอัตราทดเกียร์ 248:1 อยู่ที่ประมาณ 75% และ 70% โดยประมาณสำหรับการ step-down และ step-up ตามลำดับในช่วงความเร็วที่ทดสอบ สำหรับตัวกระตุ้นเซอร์โว Dynamixel นั้นการสร้างแบบจำลองด้วยค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพเชิง ทิศทางจะลดข้อผิดพลาดในแรงเอาต์พุตที่คาดการณ์ไว้เป็น 2-4% เมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ ประสิทธิภาพเดี่ยวที่ 4-8% และ 30% สำหรับรุ่นที่ไม่มีแรงเสียดทาน (Albert Wang et al., 2015)

ระบบรอกเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการขนส่งอุปกรณ์ บุคลากร แร่ที่ขุดได้ หรือสำหรับผลผลิต ของเหมือง โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ได้แก่ เครื่องม้วน เชือก และมอเตอร์ไฟฟ้า ความปลอดภัยและ ความน่าเชื่อถือของรอกขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบ ดังนั้นผู้เขียน (Tawanda Mushiri et al., 2017) จึงทำ

การออกแบบบรอกที่เหมาะสมและแม่นยำเพื่อให้ได้กำลังการผลิตเพิ่มขึ้น พารามิเตอร์การออกแบบ และวัสดุได้รับการคัดเลือกมาอย่างดีเพื่อลดต้นทุนและยืดอายุการใช้งานของส่วนประกอบของระบบบรอก โดยพิจารณาและเปรียบเทียบความเหมาะสมของระบบบรอกกับหม้อขนาดเล็ก

ผู้เขียน (T. C. S. Tagulao et al., 2018) ได้ทำการออกแบบและทดสอบอุปกรณ์แรงโน้มถ่วงขนาดเล็ก โดยมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 5V ขนาดเล็กติดอยู่กับระบบเกียร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มความเร็วด้วยอัตราทดเกียร์ 94.6224:1 เครื่องมือนี้ทำงานด้วยระบบกำหนดค่าไฟฟ้าสามระบบของโหลดไฟฟ้า ได้แก่ ไม่มีโหลด, 100 โอห์ม และ 500 โอห์ม โดยมีค่าน้ำหนักต่างกันตั้งแต่ 250 ถึง 2000 กรัม เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนด้วยแรงโน้มถ่วงโดยเฉพาะกับโหลดที่ใช้กำลังขับ กระแสเหนี่ยวนำ และวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพ และแรงบิดเอาต์พุตของระบบเพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้นสำหรับการแก้ปัญหาด้านพลังงานที่ยั่งยืน อุปกรณ์พลังงานศักย์โน้มถ่วงที่ควบคุมพลังงานจากมวลที่ตกลงมาอาจเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ ต้นแบบพลังงานขับเคลื่อนด้วยแรงโน้มถ่วงพบว่ามีประสิทธิภาพตั้งแต่ประมาณ 7% ถึง 28% ตามผลการทดลอง ซึ่งต่ำกว่าที่คาดไว้ 45% จากประสิทธิภาพที่คำนวณทางทฤษฎีตามแบบจำลองที่เสนอ ความคลาดเคลื่อนในประสิทธิภาพที่วัดได้เทียบกับการคำนวณที่คำนวณได้นั้นมาจากความเรียบง่ายของแบบจำลองที่เสนอ การปรับปรุงโมเดลนี้เพิ่มเติมและการกำหนดลักษณะเฉพาะของระบบอย่างละเอียดยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการสูญเสียที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงอาจสามารถประมาณผลการทดลองจริงได้ดีกว่า

2.4 ระบบการทำงานของลิฟต์

สำหรับการประหยัดพลังงาน ในกรณีที่มีเพลาลิฟต์จำนวนมากในอาคาร สามารถป้องกันการเสื่อมประสิทธิภาพของลิฟต์ได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามเมื่อเปิดใช้งานเพียงหนึ่งเพลาจากสองเพลลาเวลารอและระยะเวลาในการให้บริการผู้โดยสารจะนานเกินไป ผู้เขียน (Kentaro Nakayama et al., 2013) เสนอวิธีการที่สามารถรักษาประสิทธิภาพการบริการด้วยการตัดไฟสูงสุดในระบบลิฟต์สองเพลลา คือ กำลังสูงสุดจะเท่ากับการทำงานของเพลลาเดียว และประสิทธิภาพการบริการเกือบเท่ากับการทำงานของเพลลาสองอัน

ในปีถัดมาได้มีการเสนอกลไกการยกพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพซึ่งจะใช้เป็นทางเลือกแทนกำลังคนในการยกน้ำจากแหล่งใต้ดินโดยกลไกนี้ขับเคลื่อนโดยระบบพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพตามที่ต้องการทั้งในด้านการใช้แบตเตอรี่และกำลังในการยก ผู้เขียน (Divina Gracia D. Ronquillo et al., 2014) ได้ทำการออกแบบและใช้มอเตอร์ปัดน้ำฝนแรงบิดสูง 12 V เพื่อจ่ายกำลังให้กับถังชุด ซึ่งการออกแบบมีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้งานปีระหว่างอัตราคงที่ 60 ถึง 120 รอบต่อนาที

เนื่องจากเป็นความเร็วที่มีประสิทธิภาพที่ยอมรับได้ของระบบลูกสูบโดยไม่ทำลายทั้งการติดตั้ง อีกทั้ง การเชื่อมโยงกลไกกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กที่มีข้อได้เปรียบคือมีต้นทุนที่ถูกและสามารถ ติดตั้งร่วมกับปั๊มมือได้

การเคลื่อนย้ายในแนวตั้งที่มีประสิทธิภาพเป็นองค์ประกอบสำคัญของการพัฒนาและก่อสร้าง อาคารสูง ผู้เขียน (Kheir Al-Kodmany, 2015) ได้นำเสนอความก้าวหน้าในเทคโนโลยีลิฟต์และแสดง ให้เห็นถึงการใช้งานในโครงการสำคัญๆ ทั่วโลก โดยจัดทำแผนที่ จัดระเบียบ และเปรียบเทียบ ความสำเร็จที่สำคัญในด้านต่างๆ ของการออกแบบลิฟต์ รวมถึงความเร็วที่เพิ่มขึ้น ประหยัดพลังงาน ลดเวลารอ ลดต้นทุน ซึ่งเทคโนโลยีลิฟต์ใหม่ใช้ประโยชน์จากเบรกทนความร้อน ลดการสิ้นสະเทือน ที่มากเกินไป และปรับความดันอากาศเพื่อป้องกันอาการหูอื้อ นอกจากนี้ได้นำเสนอบริบทของ นวัตกรรมทางเทคโนโลยีล่าสุดโดยตรวจสอบการใช้งานในโครงการสำคัญๆ ได้แก่ One World Trade Center ในนิวยอร์ก Shanghai Tower ในเซี่ยงไฮ้ Burj Khalifa ในดูไบ Kingdom Tower ใน เจดดาห์ ซาอุดีอาระเบีย และโครงการปรับปรุงสี่เหลี่ยมของ Empire State ในนิวยอร์ก อีกทั้งยัง กล่าวถึงโมเดลการขนส่งแนวตั้งในอนาคต ซึ่งรวมถึงแนวคิดรถไฟใต้ดินแนวตั้ง การยกพื้นที่และ เทคโนโลยีการลอยด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ลิฟต์เป็นอุปกรณ์ขนส่งแนวตั้งที่สำคัญหากเกิดความไม่สมดุลขึ้นเนื่องจากน้ำหนักรวมของผู้โดยสารและตัวลิฟต์หนักขึ้นขณะลงจากที่สูงมอเตอร์ลากจะสร้างพลังงานไฟฟ้าขึ้นมาใหม่ ในทำนอง เดียวกันหากน้ำหนักรวมของผู้โดยสารและตัวลิฟต์เบาลงในขณะที่กำลังขึ้น มอเตอร์ลากจะสร้าง พลังงานไฟฟ้าขึ้นมาใหม่ด้วย สำหรับลิฟต์ทั่วไปพลังงานที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่เกิดจากมอเตอร์ลากอาจ ใช้ในขดลวดของมอเตอร์หรือในตัวต้านทานเบรก พลังงานที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ใช้ในตัวต้านทานเบรก ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในห้องเครื่องของลิฟต์จึงจำเป็นต้องติดตั้ง เครื่องปรับอากาศเพิ่มเติม ซึ่งจะเป็นการเพิ่มการใช้พลังงาน แนวคิดเทคโนโลยีที่นำพลังงานกลับมาใช้ ใหม่ หรือ Regenerative energy feedback ของลิฟต์เป็นวิธีที่สำคัญในการลดการใช้พลังงาน โดย เทคโนโลยีที่นำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ของลิฟต์ประกอบด้วยโครงสร้างระบบป้อนกลับพลังงานและ วิธีการเก็บพลังงานป้อนกลับ ผู้เขียน (P. Gao et al., 2016) แนะนำโครงสร้างระบบป้อนกลับและ วิธีการเก็บพลังงาน มีการวิเคราะห์และหาข้อสรุประหว่างวงจร PWM แบบคู่ที่นำพลังงานกลับมาใช้ ใหม่ และระบบ plug-in regenerative ที่นำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ลิฟต์ที่ติดตั้ง อินเวอร์เตอร์ป้อนกลับพลังงานของบัส DC เข้าสู่กริดผ่านอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ที่เพิ่มเข้ามาเพื่อ หลีกเลี่ยงการใช้พลังงานป้อนกลับโดยตรงจากความต้านทานการคายประจุในฝั่ง DC ทำให้ประหยัด พลังงานของลิฟต์ อีกทั้งได้มีการพัฒนา supercapacitor หรือระบบเก็บพลังงานจากแบตเตอรี่ เมื่อ

เปรียบเทียบกับระบบลิฟต์ทั่วไป ลิฟต์ที่ติดตั้งอินเวอร์เตอร์ป้อนกลับพลังงานมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และยังลดพลังงานย้อนกลับเข้ากริดได้อีกด้วย

Regenerative มอเตอร์จะผลิตพลังงานเมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาพยกเครื่อง (overhaul) ส่วนในรอกจะเกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำถูกใช้เพื่อเบรกยูนิตจากมากไปน้อย อีกทั้งพลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นถูกส่งผ่านตัวต้านทานที่กระจายพลังงานไฟฟ้าไปเป็นความร้อน โดยที่ Regenerative drives และการเชื่อมโยงการสร้างพลังงานช่วยให้ส่งพลังงานเบรกกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายหลักได้ จากผลการศึกษาและพัฒนาระบบขับเคลื่อนแบบประหยัดพลังงานสำหรับกลไกที่ทำงานในโหมดเบรกแบบฟื้นฟูเป็นเวลานาน ซึ่งหมายถึงกลไกการยกและการขนย้าย รอก เคน แสดงให้เห็นว่ามีความแม่นยำสูงมากในกระแสเตเตอร์ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า และกระแสฟื้นฟูระหว่างโหมดการทำงานการสร้างใหม่ (Ivanov A.S. et al., 2016)

2.5 วงจรแปลงพลังงานในระบบ

ปัจจุบันความต้องการทางด้านพลังงานมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าที่มีความจำเป็นในชีวิตประจำวัน รวมทั้งภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรม สาเหตุนี้จึงทำให้มีการค้นคว้าศึกษาหาวิธีการผลิตพลังงานทดแทน เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการในปัจจุบัน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลม เป็นต้น แต่การที่จะจ่ายพลังงานไฟให้มีความเสถียรเข้าสู่ระบบไฟฟ้าทั่วไป และให้ได้กระแสไฟชนิดเดียวกัน จำเป็นต้องมีการแปลงพลังงานไฟเพื่อให้สามารถจ่ายเข้าสู่ระบบ

Critical braking method คือ วิธีการเบรกมอเตอร์แบบใหม่ สำหรับชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำ ถ้าต้องการคืนพลังงานในช่วงเบรกมอเตอร์ต้องอาศัยการใช้การควบคุมสลิปของมอเตอร์ และยังสามารถนำมาใช้กับระบบขับเคลื่อนของลิฟต์ได้อีกด้วย วิธีการนี้มีปัญหาตรงกระแสค่อนข้างสูงทำให้อุปกรณ์การกึ่งตัวนำมีพิบัติสูงตามไปด้วย (Nomura et al., 1988)

การเพิ่มวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบชุก (Cuk) สามารถช่วยปรับปรุงวงจรเรียงกระแสที่ใช้ไทรสเตอร์ (Thyristor) นำมาขึ้นกลางระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์ และวงจรเรียงกระแสทำให้กระแสที่ได้จะมีลักษณะใกล้เคียงไซน์เพิ่มมากขึ้นแล้วป้อนคืนกลับไปยังแหล่งจ่าย แต่จะเกิดผลที่ทำให้ค่าสูญเสียเพิ่มขึ้นจากเดิมจากวงจรที่ต่อเพิ่มเข้าไป (Saha et al., 1996) ต่อมามีการพัฒนางจรเรียงกระแสแบบ PWM ด้วยการนำสวิตช์ไฟมาแทนไดโอด ทำให้สามารถควบคุมกระแสด้านอินพุทให้มีลักษณะเป็นไซน์ และสามารถคืนพลังงานกลับไปยังแหล่งจ่ายได้ด้วย (Rodriguez et al., 2005)

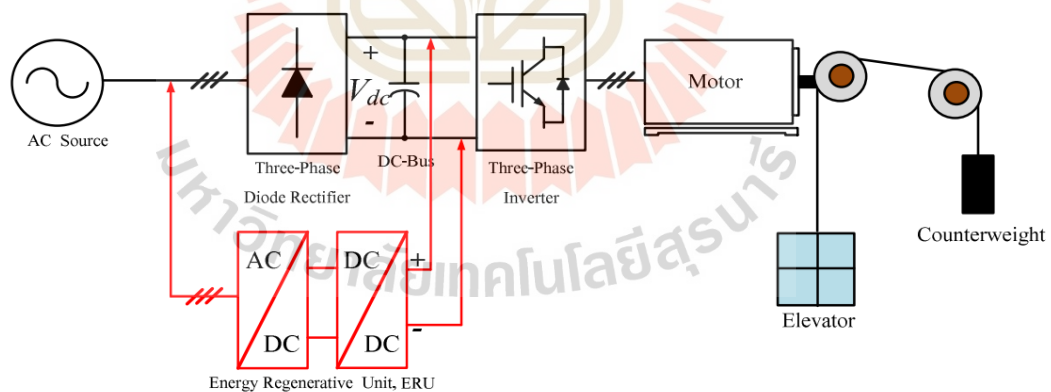
นาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ไม่สามารถคืนพลังงานได้ (non-regenerative brake unit) มาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสแบบ PWM ด้วยการต่อขานเข้ากับวงจรเรียงกระแสเดิมที่ใช้ไดโอดกรณีนี้จะเรียกว่า external regenerative brake unit ปัญหาอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นสำหรับการขนานใน

ลักษณะนี้จะทำให้มีกระแสไหลวน (circulating current) ระหว่างวงจรที่ต่อเพิ่มเข้าไปกับวงจรเรียงกระแสเดิม แต่การต่อแบบนี้จะทำให้พลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์สามารถส่งคืนพลังงานกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟได้ (Blasko, 1998)

นำเสนอการวิเคราะห์และเสนอแนวทางแก้ไขด้วยการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำแทรกระหว่างบัสไฟตรง (DC bus) กับด้านอินพุทของระบบชุดคั่นพลังงานวงจรแปลงผันช่วย (auxiliary converter) (Cheng et al. , 2008)

นำเสนอมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรสามารถกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบลิฟต์ โดยช่วงมอเตอร์ทำงานในโหมดรีเจนเนอเรติงของลิฟต์ สามารถผลิตไฟฟ้าแล้วป้อนคืนพลังงานคืนให้กับระบบของการไฟฟ้า เพื่อช่วยในการประหยัดไฟของระบบขับเคลื่อนของลิฟต์ (สิทธิชัย และคณะ, 2555)

ลิฟต์ที่ใช้มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร สามารถผลิตไฟฟ้าคืนระบบของการไฟฟ้าได้ จากวิธีการรีเจนเนอเรทีฟ อินเวอร์เตอร์ที่ไม่สามารถคืนพลังงานได้ในระบบขับเคลื่อนลิฟต์แบบเดิม สามารถใช้วงจร energy regenerative unit (ERU) เข้ามาต่อร่วม โดยการทำงานของวงจร ERU ลักษณะการทำงานเป็นแบบสองสเตจ (two stage) ดังรูปที่ 2.6 ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ (PWM inverter) และวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง แบบทบแรงดัน (boost converter) โดยนำวงจร ERU ต่อเข้ากับบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ (สิทธิชัย และบุญยัง ,2556-2557)



รูปที่ 2.6 ระบบขับเคลื่อนลิฟต์หมุนเวียนโดยใช้ ERU

ที่มา : Plangklang et al., 2014

นำลิฟต์ที่อาคารเรียนมาประยุกต์ใช้กับวงจร ERU แบบสองสเตจ ทำให้ระบบลิฟต์เดิมสามารถคืนพลังงานในช่วงรีเจนเนอเรติงของมอเตอร์ได้ เมื่อนำมาเทียบกับลิฟต์ที่ไม่ได้ติดตั้งวงจร ERU ระบบที่ติดตั้งสามารถประหยัดพลังงานได้ร้อยละ 43 (ธนิศร์ ,2555) โดยสอดคล้องกับระบบลิฟต์ทั่วไปที่จ่ายคืนพลังงานได้อยู่ที่ร้อยละ 35 (मितชุบิชิ เอลเลเวเตอร์ (ประเทศไทย), 2559)

2.6 การลดความต้องการสูงสุดในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน

การเติบโตของอุตสาหกรรมเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการเติบโตของประเทศต่างๆ ซึ่งอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับพลังงานไฟฟ้า แต่ทว่าแหล่งที่มาของพลังงานไฟฟ้ากำลังหมดลง ดังนั้นช่องว่างระหว่างซัพพลายเออร์และโหลดจึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งผลลัพธ์ของการใช้เทคนิคการจัดการด้านอุปสงค์บางประการพร้อมกับแบตเตอรี่ที่ใช้กับอุตสาหกรรม โดยลดความต้องการสูงสุดในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน และประหยัดค่าพลังงานโดยการหลีกเลี่ยงค่าปรับสำหรับความต้องการสูงสุด การใช้เทคนิคการจัดการด้านอุปสงค์และแบตเตอรี่เพียงเล็กน้อยส่งผลให้จุดสูงสุดลดลงและเติมจุดต่ำสุดที่ทำให้เส้นโค้งโหลดของอุตสาหกรรมมีลักษณะราบเรียบขึ้น ดังนั้นจึงเป็นการปรับปรุงที่ดีในปัจจุบันด้านโหลดและการประหยัดค่าพลังงานสำหรับผู้บริโภค อีกทั้งประโยชน์ที่ได้รับจากการจัดการด้านอุปสงค์อาจเป็นได้ทั้งระยะสั้นและระยะยาว คือ คุณภาพของอุปทานที่ดีขึ้นในแง่ของขนาดแรงดันไฟฟ้า สามารถลดการหยุดชะงักที่ไม่ได้กำหนดไว้ได้ สามารถลดค่าไฟลงได้มาก ช่วยปรับรูปทรงของโหลดให้เรียบขึ้น สามารถลดต้นทุนการผลิตและการใช้เชื้อเพลิงวิกฤต มีการลงทุนที่ลดลง และสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุปกรณ์ของซัพพลายเออร์ได้ (P.Ravibabu et al., 2008)

พลังงานไฟฟ้ามีความสำคัญต่อคุณลักษณะของประเทศกำลังพัฒนาเพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นแนวทางที่จะแก้ปัญหาความขาดแคลนเชื้อเพลิงคือการใช้แหล่งพลังงานที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด มีการเสนอวิธีการเพื่อแก้ปัญหาด้วยการจัดการโหลดในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน โดยมุ่งเป้าไปที่การลดช่องว่างระหว่างอุปสงค์และอุปทาน เพื่อให้ทั้งผู้บริโภคและซัพพลายเออร์ได้รับประโยชน์ร่วมกัน ผู้เขียน (Ravi Babu P et al., 2013) นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมโหลดและเทคนิคการจัดการด้านอุปสงค์ที่ใช้กับโหลดในประเทศ ซึ่งสามารถจำกัดการใช้พลังงานในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน และเพิ่มความน่าเชื่อถือของพลังงานโดยการลดการตัดไฟลง ระบบฮาร์ดแวร์อัจฉริยะที่เรียกว่า Maximum Demand Limiter ได้รับการออกแบบมาเพื่อควบคุมการโหลดภายในประเทศ ที่ให้อุปทานสำหรับโหลดพื้นฐานเฉพาะในช่วงเวลาที่ไฟฟ้าขาดแคลน ดังนั้นอัตราการตัดไฟจะลดลงและอาจเลื่อนการลงทุนเพื่อติดตั้งโครงการไฟฟ้าขึ้นใหม่ อีกทั้งยังสามารถลดวิกฤตพลังงานไฟฟ้าในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนได้อีกด้วย

ในปี 2015 มีงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าสามารถลดการใช้ไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะที่โหลดสูงสุด โดยคาดการณ์ความต้องการพลังงานของสถานีฐานที่ใช้ใน Green Power Controller เป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นสำหรับ Green Base Station ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าของสถานีฐานที่ใช้สำหรับการบรรเทาภัยพิบัติและลดต้นทุนด้านพลังงาน ความต้องการพลังงานที่ลดลงและการเพิ่มประสิทธิภาพ

การสำรองพลังงานสำหรับการสื่อสารแบบไร้สายจึงมีความสำคัญมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งแบตเตอรี่สามารถลดความต้องการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยการควบคุมการชาร์จและการคายประจุของแบตเตอรี่ทำให้สามารถควบคุมการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ได้ ดังนั้นวิธีการควบคุมแบบพีคคัทที่ลดความต้องการพลังงานสูงสุดโดยใช้แบตเตอรี่ซึ่งผลลัพธ์สุดท้ายคือการควบคุมพีคคัทช่วยให้เราสามารถระงับกระแสสูงสุดของสถานีฐานวิทยุและลดค่าไฟฟ้าได้ (M. Nakamura et al., 2015)

ผู้เขียน (Dedi Zhang et al., 2018) ศึกษากลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันการลดพีคและการเติมจุดต่ำสุดที่ใช้ในแหล่งจ่ายไฟโทรคมนาคม และแบบจำลองรายได้การลดพีคและการเติมจุดต่ำสุดที่มี daily income สูงสุดแก้ปัญหาด้วยวิธีการ Particle Swarm Optimization ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าความจุของแบตเตอรี่คงที่หรือไม่ โดยโมเดลแบ่งออกเป็นสองประเภทคือการกำหนดค่าแบตเตอรี่ที่กำหนดและความลึกของการคายประจุของแบตเตอรี่ที่สามารถรับได้ อีกอย่างคือแบตเตอรี่ที่มีความไม่แน่นอนและสามารถหาความจุของแบตเตอรี่สูงสุดได้

2.7 สรุป

บทที่ 2 นี้ได้นำเสนอการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ดำเนินการ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีการที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำผลการวิจัย ข้อเสนอต่าง ๆ มาประยุกต์และพัฒนาปรับใช้กับงานวิจัย โดยในบทถัดไปนำเสนอถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 3

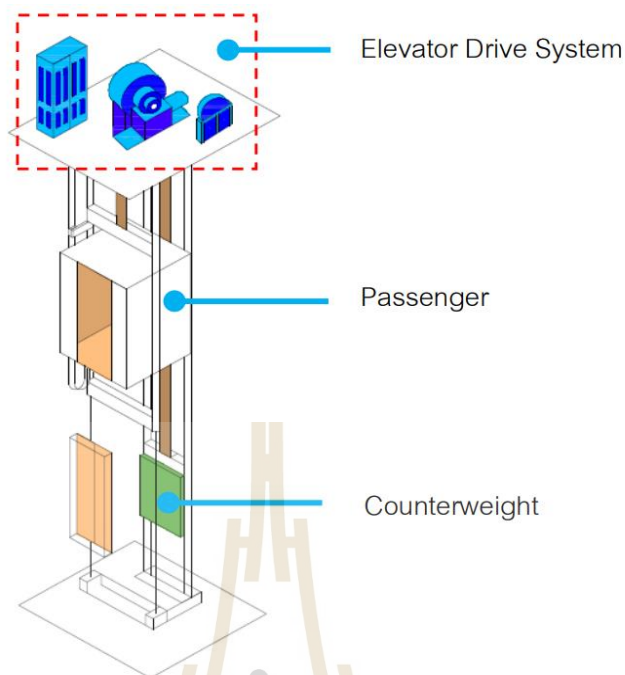
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System : ESS) มีความสำคัญตั้งแต่ในอดีตถึงปัจจุบัน ด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System : BESS) และการกักเก็บพลังงานน้ำแบบสูบกลับ ระบบกักเก็บพลังงานเป็นประเด็นหลักที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ในบทนี้จึงกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบกักเก็บพลังงานโดยแรงโน้มถ่วง เป็นเทคโนโลยีที่มีการศึกษาไม่มากนัก ซึ่งประกอบด้วย 6 หัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบลิฟต์ ระบบโซลาร์เซลล์แสงอาทิตย์ ระบบแปลงผันกำลังงานทางกลและไฟฟ้า การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี Particle Swarm Optimization ทฤษฎีและโมเดลจำลองการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็กในแนวตั้ง และในส่วนตัวสุดท้าย ต้นทุนระบบกักเก็บพลังงาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2 ระบบลิฟต์

ลิฟต์ คือ อุปกรณ์ที่สำคัญซึ่งถูกนำมาใช้อยู่เป็นจำนวนมากในทุกภาคส่วน ในการเคลื่อนย้ายผู้โดยสารหรือสิ่งของขึ้นลงในแนวตั้งภายในอาคารเพื่อความสะดวกและรวดเร็ว ดังนั้นการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของลิฟต์จะถูกใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากในแต่ละวัน การเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของลิฟต์จะอาศัยการควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์ลิฟต์ ร่วมกับชุดลูกถ่วง (counterweight) ซึ่งประกอบด้วยโครงเหล็กบรรจุก้อนน้ำหนักที่ทำด้วยเหล็กหล่อ ทำหน้าที่ถ่วงดุลกับน้ำหนักของลิฟต์และจำนวนผู้โดยสาร ดังในรูปที่ 3.1

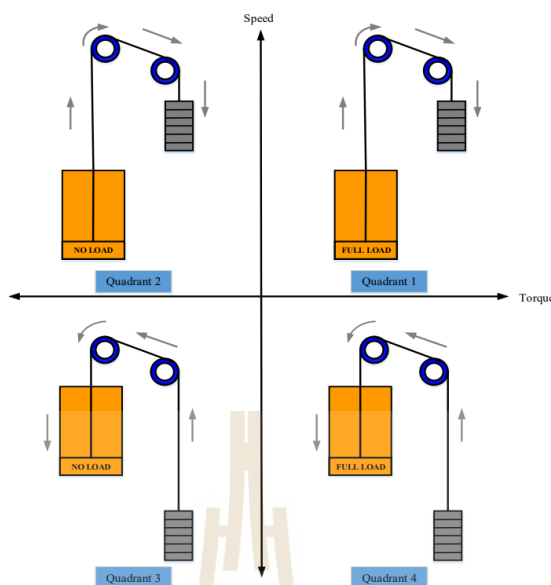


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของลิฟต์

ที่มาภาพ : http://www.journal.rmutsb.ac.th/th/data_news/file/rmutsb-journal-20160804-pdf-714.pdf [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

3.2.1 หลักการทำงานและการใช้พลังงานของลิฟต์

การเคลื่อนที่ของลิฟต์ใช้หลักการของรอกก้านและน้ำหนักถ่วงเพื่อลดการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนลิฟต์ โดยปลายเชือกรอกก้านด้านหนึ่งของลิฟต์จะยึดติดกับตัวลิฟต์ ในขณะที่ปลายเชือกรอกก้านอีกด้านหนึ่งจะผูกติดกับน้ำหนักถ่วง โดยปลายเชือกรอกก้านหรือสลิงจะมีความยาวเท่ากับความสูงของตึกโดยประมาณ ดังนั้นเมื่อลิฟต์โดยสารจอดที่ชั้นล่างสุดของอาคาร น้ำหนักถ่วงจะอยู่ชั้นบนสุด เมื่อลิฟต์โดยสารเคลื่อนที่ขึ้น น้ำหนักถ่วงจะมีหน้าที่ขับเคลื่อนที่ควบคู่ไปกับเบรก เพื่อชะลอความเร็ว โดยมอเตอร์จะทำหน้าที่ควบคุมความเร็วของลิฟต์ให้เป็นไปตามพิกัด ในทำนองเดียวกันหากลิฟต์จอดชั้นบนสุด น้ำหนักถ่วงจะอยู่ชั้นล่างสุด ลิฟต์จะเคลื่อนที่ลงโดยอาศัยน้ำหนักของตัวลิฟต์ จากหลักการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการออกแบบลิฟต์ให้เกิดความได้เปรียบเชิงกลจะทำให้ลิฟต์ใช้พลังงานน้อยมากเมื่อเทียบกับเครื่องจักรอื่น ๆ ที่ใช้งานในอาคาร



รูปที่ 3.2 การทำงานของลิฟต์ในโหมดต่าง ๆ

ที่มาภาพ : [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

จากรูปที่ 3.2 แสดงการทำงานของลิฟต์ในโหมดต่าง ๆ ดังนี้

Quadrant 1: ลิฟต์เคลื่อนที่ขึ้น เมื่อตุ้มถ่วงมีน้ำหนักน้อยกว่าตู้ลิฟต์ (Full load) มอเตอร์จะ ใช้กำลังงานมากในการดึงลิฟต์ขึ้น เรียกว่า โหมดมอเตอร์ (Motoring mode)

Quadrant 2: ลิฟต์เคลื่อนที่ขึ้น เมื่อตุ้มถ่วงมีน้ำหนักมากกว่าตู้ลิฟต์ มอเตอร์จะไม่ ออกแรง เนื่องจากใช้น้ำหนักของตุ้มถ่วงเพื่อดึงลิฟต์ขึ้น เรียกว่า โหมดรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerating mode)

Quadrant 3: ลิฟต์เคลื่อนที่ลง เมื่อตุ้มถ่วงมีน้ำหนักมากกว่าตู้ลิฟต์ มอเตอร์ยังคงมี การออกแรงดึงลิฟต์ลง คือ มีการใช้พลังงาน แปรผกผันกับโหลด ถ้าโหลดมีค่าน้อยมอเตอร์ต้องออก แรงมากเพื่อดึงโหลดลง เรียกว่า โหมดมอเตอร์ (Motoring mode)

Quadrant 4: ลิฟต์เคลื่อนที่ลง เมื่อตุ้มถ่วงมีน้ำหนักน้อยกว่าตู้ลิฟต์ (Full load) มอเตอร์ ไม่ต้องออกแรง เพราะที่ใช้แรงโน้มถ่วงจากน้ำหนักลิฟต์ พลังงานจะไหลย้อนกลับ สู่มอเตอร์ เรียกว่า โหมดรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerating mode)

3.2.2 อุปกรณ์หลักของลิฟต์

1. ห้องเครื่องลิฟต์: ห้องเครื่องลิฟต์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ลิฟต์ที่มีห้องเครื่อง และลิฟต์ที่ไม่มีห้องเครื่องลิฟต์ สำหรับลิฟต์ที่มีห้องเครื่องลิฟต์ ยังแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ลิฟต์ที่ ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าและลิฟต์ที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิก (hydraulic) โดยลิฟต์ที่มีห้องเครื่อง

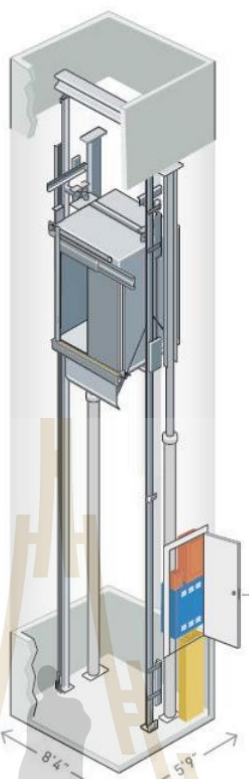
และขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าเป็นลิฟต์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากสะดวกและง่ายต่อการบำรุงรักษา สำหรับลิฟต์ที่ไม่มีห้องเครื่องนิยมใช้กับอาคารที่มีความสูงไม่มาก เนื่องจากพิถีพิถันความเร็วน้ำหนักบรรทุกและจำนวนชั้นจอดยังเป็นข้อจำกัด



รูปที่ 3.3 ลิฟต์ที่มีห้องเครื่อง

ที่มาภาพ : <http://www.asianelevators.com/images/MACHINROOMLESS.png> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.4 ลิฟต์ที่ไม่มีห้องเครื่อง

ที่มาภาพ : <http://3.bp.blogspot.com/>[เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

2. เครื่องลิฟต์ (Driving machine): เครื่องลิฟต์ หมายถึง ตัวต้นกำลังที่ให้พลังงานในการขับเคลื่อนตัวลิฟต์ แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

2.1 เครื่องลิฟต์แรงฉุดจากความฝืด (traction machine) หมายถึง เครื่องลิฟต์ที่ขับเคลื่อนตัวลิฟต์ โดยอาศัยความฝืดระหว่างเชือกถวดแขวนกับรอกขับเคลื่อน ซึ่งมีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังในการหมุนรอกขับเคลื่อน โดยมีทั้งแบบส่งกำลังผ่านเฟืองและแบบขับเคลื่อนโดยตรง แสดงการเปรียบเทียบตามตารางที่ 3.1 ประกอบด้วย

- เครื่องลิฟต์ขับเคลื่อนด้วยเฟือง (geared-drive machine, geared machine) หมายถึง เครื่องลิฟต์ที่ใช้กำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านเฟืองไปหมุนรอกขับเคลื่อน นิยมใช้เฉพาะกับลิฟต์ที่มีความเร็วต่ำที่ไม่สามารถขับโดยตรงจากมอเตอร์ได้
- เครื่องลิฟต์ขับเคลื่อนโดยตรง (direct drive machine, gearless machine) หมายถึง เครื่องลิฟต์ที่ใช้กำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าที่ต่อโดยตรงกับรอกขับเคลื่อน นิยมใช้ในลิฟต์ที่มีความเร็วสูง

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบการใช้งานเครื่องลิฟต์แรงฉุดจากความฝืดขับเคลื่อนด้วยเฟือง (Geared machine) และขับเคลื่อนโดยตรง (Gearless machine)

ประเภท	ความสูง (เมตร)	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	อายุการใช้งาน	ค่าใช้จ่าย การบำรุงรักษา	เงินลงทุน	ความนุ่มนวล
Geared a-c	45	0.25-1.0	30-40 ปี for Gear and Worm	ปานกลาง	ต่ำ	ไม่ดี
	90	0.75-2.5			ปานกลาง	ดีเยี่ยม
Geared d-c	52.5	0.25-2.0			ปานกลาง	พอใช้
	75	1.75			ปานกลาง	ดีเยี่ยม
Gearless a-c	ไม่จำกัด	2-10	ไม่ระบุ	สูง	สูง	ดีเยี่ยม

ที่มาภาพ : Stein/Reynolds/McGuinness, Mechanical and Electrical Equipment for Buildings 7th Edition. [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

2.2 เครื่องลิฟต์รอกก้าน (winding drum machine) หมายถึง เครื่องลิฟต์ที่ใช้กำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าไหลผ่านไป เพื่อหมุนรอกก้านของเชือกมัดสำหรับแขวน

2.3 เครื่องลิฟต์ไฮดรอลิก (hydraulic power unit) หมายถึง เครื่องลิฟต์ที่ใช้กำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนสูบน้ำมันเข้าระบบไฮดรอลิก เพื่อขับเคลื่อนลิฟต์ให้เคลื่อนขึ้น และลิฟต์เคลื่อนลงโดยแรงโน้มถ่วง เมื่อปล่อยน้ำมันไหลกลับสู่ถังเก็บน้ำมัน

3. ระบบควบคุมการขับเคลื่อน (Drive control): ระบบควบคุมการขับเคลื่อน หมายถึง ระบบควบคุมการเคลื่อนที่การหยุดทิศทาง การเคลื่อนที่ ความเร่ง อัตราเร็ว และความหน่วงของส่วนที่เคลื่อนที่ มีดังนี้

3.1 ระบบควบคุมการขับเคลื่อนโดยสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator field control) หมายถึง ระบบควบคุมซึ่งปรับแรงดันไฟฟ้า ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนลิฟต์โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบนี้ใช้กับลิฟต์ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของตัวเองเป็นระบบควบคุมที่มีการสูญเสียพลังงานสูงมาก

3.2 ระบบควบคุมโดยรีโอสแตต (rheostat control) หมายถึง ระบบควบคุมซึ่งเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานและ/หรือคาร์บอนอาร์มาเจอร์ และ/หรือในวงจรรสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เครื่องลิฟต์ ใช้กับลิฟต์ที่มีความเร็วต่ำและเป็นอาคารที่ไม่สูงมาก

3.3 ระบบควบคุมโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับอัตราความเร็วเดียว (single speed alternating current control) หมายถึง ระบบควบคุมที่ใช้มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ (induction motor) อัตราความเร็วค่าเดียวขับเคลื่อนตัวลิฟต์

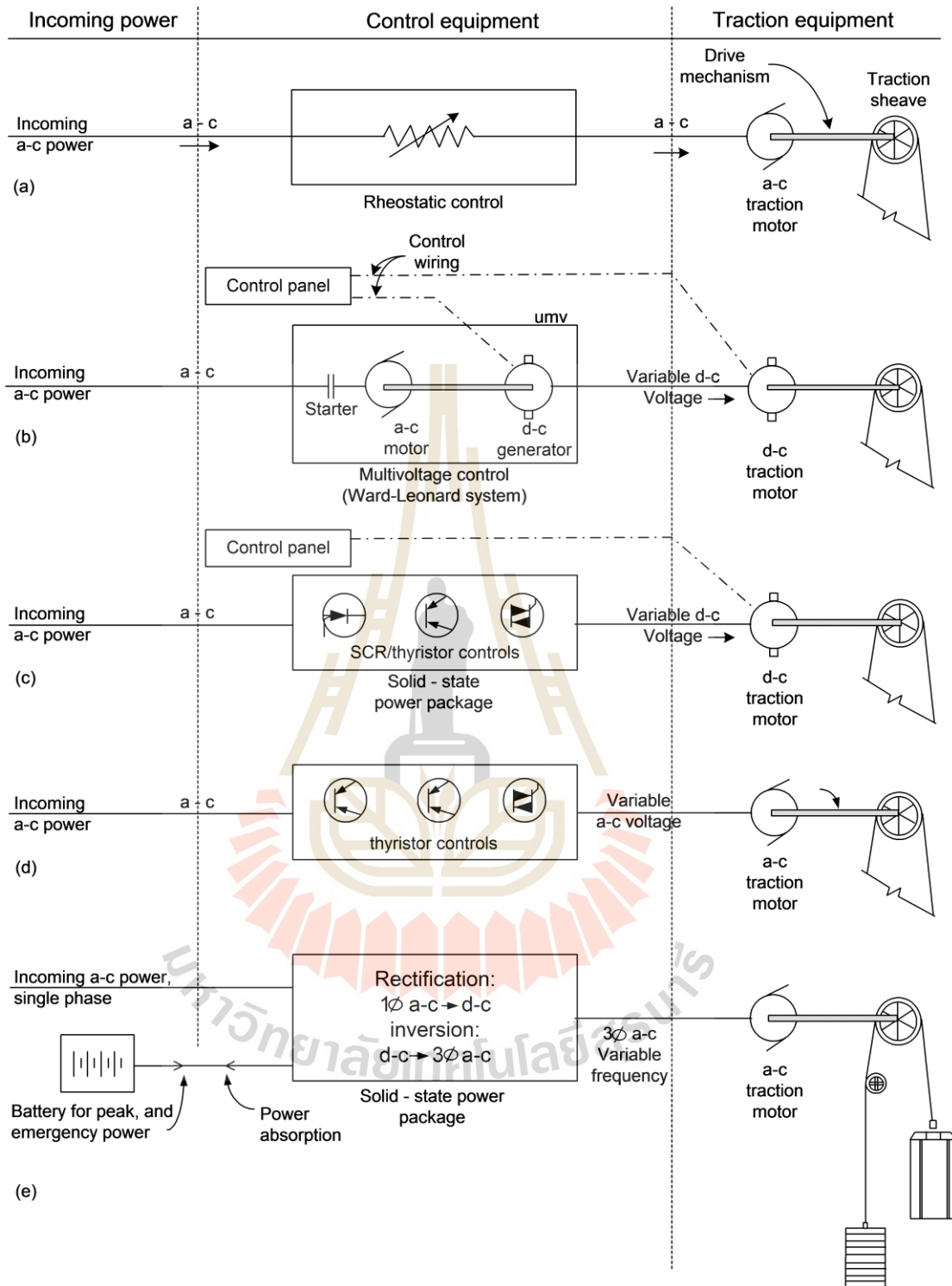
3.4 ระบบควบคุมโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับสองอัตราความเร็ว (two speed alternating current control) หมายถึง ระบบควบคุมที่ใช้มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำสองอัตราความเร็ว ขับเคลื่อนตัวลิฟต์ซึ่งทำให้หมุนด้วยอัตราความเร็วซิงโครนัส 2 ค่า โดยการต่อขดลวดของมอเตอร์ให้มีจำนวนขั้วต่างกัน

3.5 ระบบควบคุมโดยการแปรเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้า (variable voltage control) หมายถึง ระบบควบคุมที่แปรเปลี่ยนแรง เคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ขับเคลื่อนตัวลิฟต์ โดยมากใช้อุปกรณ์ประเภท SCR หรือ Thyristor ใช้กับลิฟต์ที่มีความเร็วปานกลาง-สูง

3.6 ระบบควบคุมโดยแปรเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้า (variable voltage, variable frequency control : VVVF) หมายถึง ระบบควบคุมที่แปรเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ขับเคลื่อนตัวลิฟต์ เป็นชุดควบคุมที่มีประสิทธิภาพพลังงานสูง โดยใช้งานกับมอเตอร์ขับเคลื่อนลิฟต์ชนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

ระบบควบคุมการขับเคลื่อนสามารถแสดงถึงลักษณะเครื่องลิฟต์และชุดควบคุม ประเภทต่าง ๆ ของระบบลิฟต์ดังรูปที่ 3.5





รูปที่ 3.5 เครื่องลิฟต์และชุดควบคุมประเภทต่าง ๆ

ที่มาภาพ : Stein /Reynolds/McGuinness, Mechanical and Electrical Equipment for Buildings

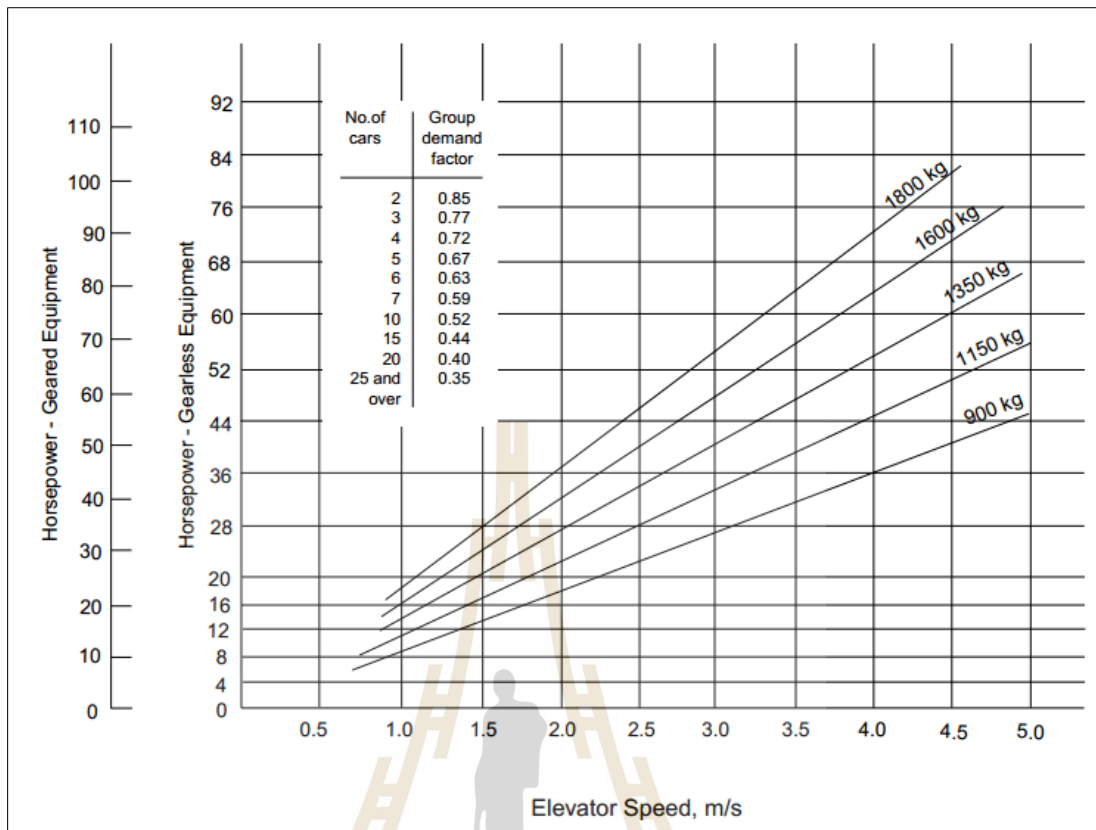
7th Edition. [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

4. รางบังคับลิฟต์และปล่องลิฟต์: ทำหน้าที่นำทางให้ห้องโดยสารเคลื่อนที่ในแนวตั้ง การติดตั้งรางลิฟต์ภายในปล่องลิฟต์จะต้องมีระยะที่ห้องโดยสารกับรางลิฟต์อย่างเหมาะสม โดยห้องลิฟต์กับรางลิฟต์ต้องไม่ห่างจนเกินไปและไม่ชิดจนเกินไปเพื่อไม่ให้เกิดการแกว่งขณะเคลื่อนที่ นอกจากนี้ภายในปล่องลิฟต์จะต้องติดตั้งอุปกรณ์ให้ความสว่างและช่องเปิดที่ปลอดภัยเพื่อให้เจ้าหน้าที่สามารถเข้าภายในปล่องลิฟต์ได้

5. อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของลิฟต์ (Systems of elevator operation and supervision): ลิฟต์จะถูกควบคุมการใช้งานผ่านเครื่องควบคุมการใช้งาน โดยพลังงานไฟฟ้าที่ลิฟต์ใช้ จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุกและความเร็วในขณะนั้น มอเตอร์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนลิฟต์จะรับสัญญาณเพื่อควบคุมให้ความเร็วลิฟต์เป็นไปตามน้ำหนักบรรทุกจริงรวมถึงความเร็ว นอกจากนี้อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของลิฟต์ยังจะต้องจัดการการทำงานของลิฟต์เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งานลิฟต์ เช่น ให้ลิฟต์ที่อยู่ใกล้ที่สุดมาให้บริการ การลดเวลารอคอย การประหยัดพลังงาน ซึ่งในปัจจุบันเป็นระบบคอมพิวเตอร์ (computerized system control) เป็นส่วนใหญ่

3.2.3 การใช้พลังงานของลิฟต์

ลิฟต์มีการใช้พลังงานส่วนใหญ่ในส่วนของเครื่องลิฟต์ ซึ่งเป็นตัวขับเคลื่อนตัวลิฟต์ ซึ่งมีอยู่หลายประเภท ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น นอกจากประเภทของเครื่องลิฟต์แล้วระบบควบคุมการขับเคลื่อน (drive control) ยังเป็นอุปกรณ์อีกตัวหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการใช้พลังงานของลิฟต์ ลิฟต์ที่มีมวลบรรทุกที่กำหนด (rated load) มากและความเร็ว (rated speed) สูงย่อมต้องใช้พลังงานมากตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ลิฟต์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ออกแบบไว้ให้มีความได้เปรียบเชิงกลและใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด สำหรับลิฟต์ที่มีมวลบรรทุก 900 kg เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 m/s จะใช้พลังงานไม่ถึง 1 หน่วย (kWh) ต่อครั้ง โดยบางช่วงของการเคลื่อนที่มอเตอร์ขับเคลื่อนลิฟต์ทำหน้าที่เป็นทั้งไดนาโมและมอเตอร์ในคราวเดียวกัน ดังนั้นลิฟต์จะใช้พลังงานไฟฟ้ากับระบบเบรก เพื่อชะลอความเร็วให้ลิฟต์จอดชั้นที่ต้องการอย่างปลอดภัย รูปที่ 3.6 แสดงค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าของเครื่องลิฟต์แรงฉุดจากความเร็วขับเคลื่อนด้วยเฟือง (geared machine) และขับเคลื่อนโดยตรง (gearless machine)

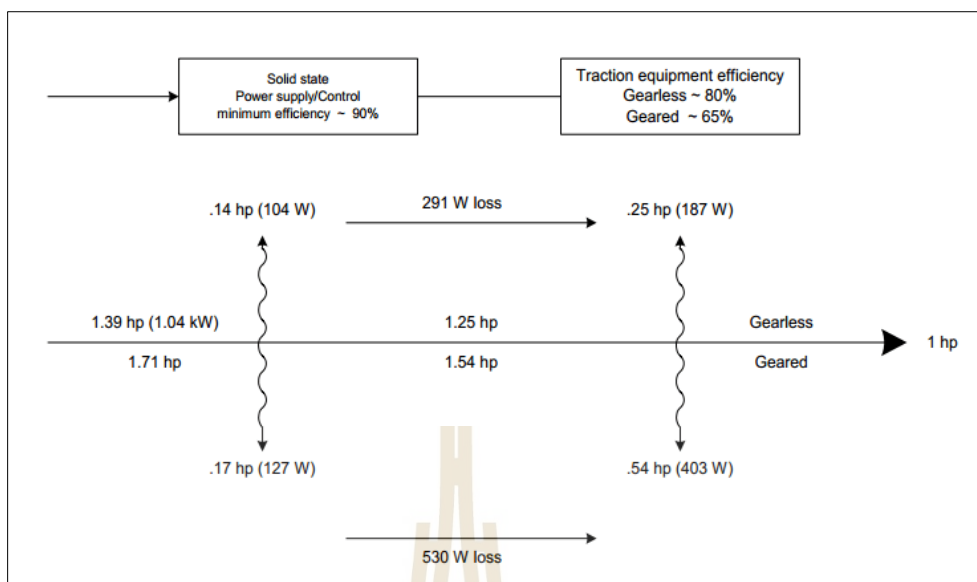


รูปที่ 3.6 การใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องลิฟต์ที่ใช้แรงฉุดจากความฝืดขับเคลื่อนด้วยเฟือง (geared machine) และขับเคลื่อนโดยตรง (gearless machine)

ที่มาภาพ : Stein /Reynolds/McGuinness, Mechanical and Electrical Equipment for Buildings 7th Edition. [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

3.2.4 การประเมินความร้อนสูญเสียของลิฟต์

ความร้อนสูญเสียในลิฟต์เกิดจากความร้อนในระบบเบรกบวกกับการสูญเสียของระบบไฟฟ้าของมอเตอร์ขับเคลื่อนลิฟต์และอุปกรณ์ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของชุดควบคุม รายละเอียดของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าซึ่งแสดงให้เห็นว่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของเครื่องลิฟต์ที่ขับเคลื่อนด้วยเฟือง (geared machine) มีค่ามากกว่าเครื่องลิฟต์ที่ขับเคลื่อนโดยตรง (gearless machine) เกือบ 2 เท่า ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของลิฟต์เครื่องลิฟต์แรงฉุดจากความผิดพลาดเคลื่อนด้วยเฟือง (geared machine) และขับเคลื่อนโดยตรง (gearless machine)

ที่มาภาพ : Stein /Reynolds/McGuinness, Mechanical and Electrical Equipment for Buildings
7th Edition. [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

3.3 ระบบโซลาร์เซลล์แสงอาทิตย์

3.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโซลาร์เซลล์

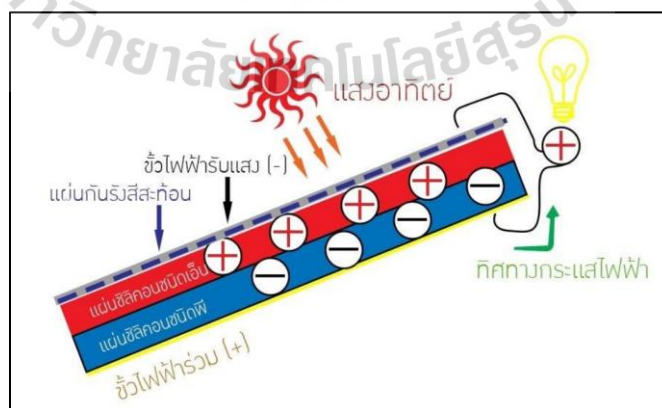
Solar Cell หรือ PV มีชื่อเรียกกันไปหลายอย่าง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์สุริยะ หรือเซลล์ Photovoltaic ซึ่งต่างก็มีที่มาจากคำว่า Photovoltaic โดยแยกออกเป็น Photo หมายถึง แสง และ volt หมายถึง แรงดันไฟฟ้าเมื่อรวมค่าแล้วหมายถึง กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของ แสงบนวัตถุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แนวความคิดนี้ได้ถูกค้นพบมาตั้งแต่ ปี ค.ศ.1839 แต่เซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังไม่ถูกสร้างขึ้นมา จนกระทั่ง ในปี ค.ศ. 1954 ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น (P-N) แบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สารเข้าไป ในผลึกของซิลิกอน จนได้เซลล์แสงอาทิตย์อันแรกของโลก จึงมีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์และได้ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับดาวเทียมใน อวกาศ เมื่อปี ค.ศ.1959 ดังนั้นสรุปได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Silicon) แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide) อินเดียม ฟอสไฟด์ (Indium Phosphide) แคดเมียม เทลลูไรด์ (Cadmium Telluride) และคอปเปอร์อินเดียม ไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับ

อุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้น ทำให้สามารถทำงานได้ (โซล่าเซลล์ไทยแลนด์ 96, 2556)

นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ยังสามารถผลิตพลังงานสูงสุดให้กับอาคารในวันอากาศร้อนในฤดูร้อนเมื่อระบบปรับอากาศต้องใช้พลังงานมากที่สุด ดังนั้นจึงช่วยลดภาวะไฟฟ้าเพิ่มปริมาณขึ้นสูงสุด เซลล์แสงอาทิตย์ทั้งขนาดใหญ่และเล็ก สามารถผลิตพลังงานให้กับสายส่งไฟฟ้าหรือทำงานได้ด้วยตัวของมันเองทุก ๆ ชั่วโมง ดวงอาทิตย์ให้พลังงานมายังโลกด้วยปริมาณพอที่จะตอบสนองความต้องการพลังงานทั่วโลกตลอดทั้งปี ปัจจุบันเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่พลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริงในปัจจุบันยังมีปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับความต้องการพลังงานทั่วโลก โดยทั่วไปมักคุ้นเคยกับสิ่งที่เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ หรือแผงโซล่าเซลล์ ส่วนมากมักติดตั้งบนหลังคาบ้าน หรือเครื่องคิดเลขแบบพกพา โซล่าเซลล์ผลิตขึ้นจากวัสดุสารกึ่งตัวนำคล้ายกับชิพที่อยู่ในคอมพิวเตอร์ เมื่อเซลล์ได้รับแสงอาทิตย์อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอม กระแสการไหลของอิเล็กตรอนจากเซลล์จำนวนมาก ทำให้มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น คือคุณสมบัติพิเศษของโซล่าเซลล์ ซึ่งเป็นการนำประโยชน์ของพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ได้อย่างคุ้มค่า

3.3.2 หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 3.8 จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้า ประจุลบและบวกขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอน และโฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้า ภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ ขั้วบวก (ปกติที่ฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพีขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อต่อ ให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น

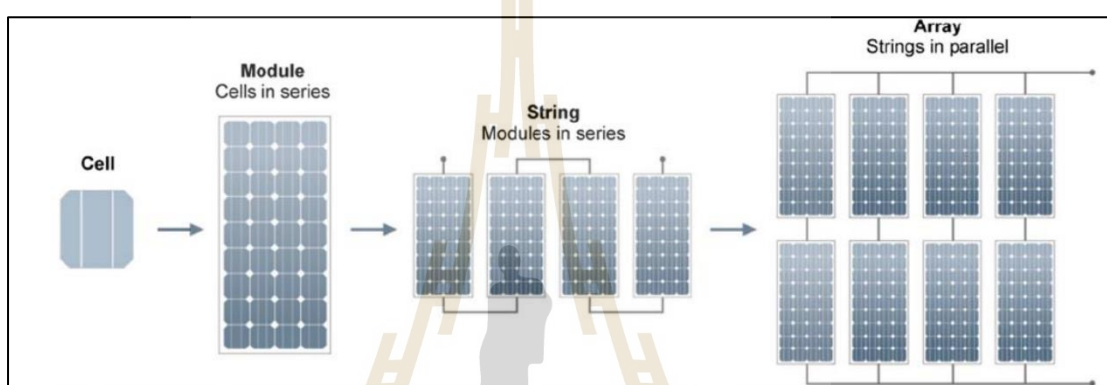


รูปที่ 3.8 คุณสมบัติพิเศษของโซล่าเซลล์

ที่มาภาพ : Department of Alternative Energy Development and Efficiency,
Ministry of Energy. 2014 [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

3.3.3 การเพิ่มกำลังไฟฟ้าในระบบ

แผงโซลาร์เซลล์ในแต่ละแผง (Module) นั้นจะประกอบไปด้วยเซลล์ (Cell) หลาย ๆ ตัวต่ออนุกรมหรือขนานกันภายในแผงโซลาร์เซลล์ แต่อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าที่ผลิตด้วยแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผงอาจจะไม่เพียงพอต่อการใช้งานในระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องนำแผงโซลาร์เซลล์มาต่อกัน โดยหากนำแผงโซลาร์เซลล์มาต่ออนุกรมกันหลาย ๆ แผง จะเรียกว่า สตริง (String) และการต่อสตริงขนานกันหลาย ๆ แถวจะเรียกว่า อาร์เรย์ (Array) ซึ่งสามารถอธิบาย ดังรูปที่ 3.9



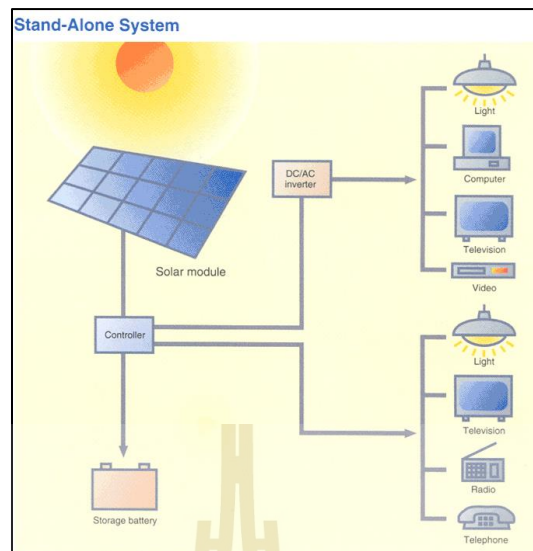
รูปที่ 3.9 การเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มาภาพ : นครินทร์รินผล, 2559 [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

3.3.4 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

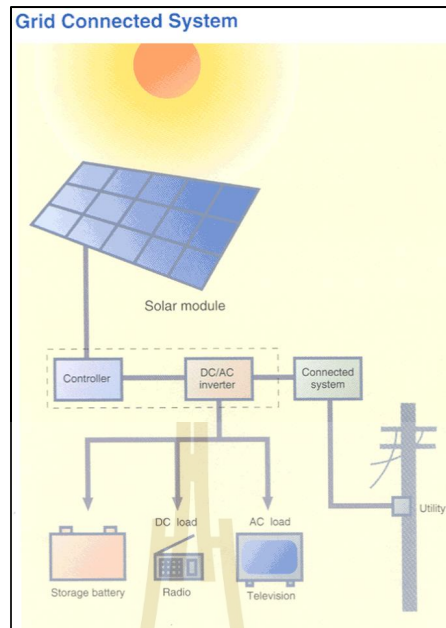
การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ

1. การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand alone system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand alone system)
ที่มาภาพ : <https://sites.google.com/site/rebirthgroupen/kar-phlit-fifa-dwy-sell-saeng-xathity> [เข้าถึง
เมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

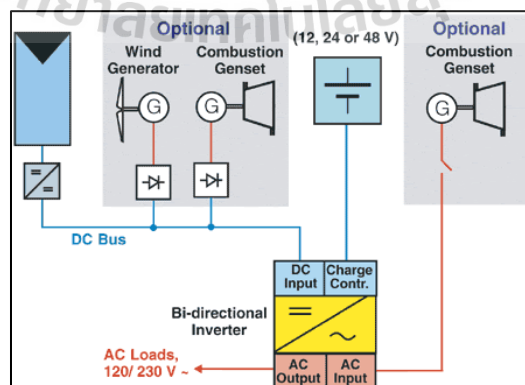
2. การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย
(PV Grid connected system)

ที่มาภาพ : <https://sites.google.com/site/rebirthgroupen/kar-phlit-fifa-dwy-sell-saeng-xathity>
[เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

3. การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system)
เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับกรอกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system)

ที่มา : <https://sites.google.com/site/rebirthgroupen/kar-phlit-fifa-dwy-sell-saeng-xathity>
[เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

3.3.5 ความเข้มแสงโซล่าเซลล์จากแสงอาทิตย์

Insolation เป็นการคำนวณปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ทั้งที่ชั้นบรรยากาศโลกหรือในระดับพื้นดิน คำนี้นี้มาจากวลี Incoming SOLAR RadiATION มักจะถูกกำหนดเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) สำหรับการใช้พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ หรือกิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน ($kWh/m^2/วัน$) ซึ่งใช้กันทั่วไปในอุตุนิยมวิทยาสำหรับการพยากรณ์อากาศ การพิจารณาสเปกตรัมของรังสีทั้งหมดจากดวงอาทิตย์ซึ่งมีช่วงตั้งแต่ความยาวคลื่นประมาณ 350 นาโนเมตรถึง 2,350 นาโนเมตร แม้ว่าสเปกตรัมแสงที่มองเห็นได้สำหรับมนุษย์นั้นอยู่ระหว่าง 400 ถึง 700 นาโนเมตรเท่านั้น ความเข้มแสงรายเดือนในระบบโซล่าเซลล์จังหวัดนครราชสีมาแสดงในตารางที่ 3.2

1. Global horizontal irradiation ($kWh/m^2/day$)

Global horizontal irradiation (GHI) คือ การฉายรังสีทั้งหมดจากดวงอาทิตย์บนพื้นผิวแนวนอนบนโลก

2. Diffuse horizontal irradiation ($kWh/m^2/day$)

Diffuse horizontal irradiation (DHI) คือ การแผ่รังสีที่พื้นผิวโลกจากแสงที่กระจัดกระจายตามชั้นบรรยากาศ วัดบนพื้นผิวแนวนอนโดยมีการแผ่รังสีที่มาจากทุกจุดบนท้องฟ้า ยกเว้นรังสีเซอร์คัมโซลาร์ (รังสีที่มาจากดิสก์ดวงอาทิตย์) แทบจะไม่มี DHI เลย ในกรณีที่ไม่มีบรรยากาศ

3. Temperature ($^{\circ}C$)

Temperature (T) คือ การวัดค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ของอนุภาคในสสารใด ๆ ซึ่งสอดคล้องกับความร้อนหรือเย็นของสสารนั้น

4. Wind Velocity (m/s)

Wind Velocity ในระบบโซล่าเซลล์ วัดมาจากค่าความเร็วลมอยู่ที่ 50 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

5. Relative humidity (%)

ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity : RH) คือ อัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อปริมาณไอน้ำอิ่มตัวที่สภาวะความดันและอุณหภูมิเดียวกัน มักแสดงในรูปร้อยละ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) หาได้จากความสัมพันธ์กับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) และอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature) จากความสัมพันธ์ในแผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric chart)

ตารางที่ 3.2 ความเข้มแสงรายเดือนในระบบโซลาร์เซลล์จังหวัดนครราชสีมา

	Global horizontal irradiation kWh/m ² /day	Diffuse horizontal irradiation kWh/m ² /day	Temperature °C	Wind Velocity m/s	Relative humidity %
January	4.44	1.94	24.5	1.09	67.3
February	4.68	2.45	27.0	0.99	63.5
March	5.18	2.80	29.0	1.00	63.7
April	5.46	3.06	29.7	1.00	68.4
May	5.41	2.42	29.3	1.09	73.8
June	5.76	2.91	28.9	1.39	74.2
July	5.23	2.71	28.8	1.40	73.5
August	4.58	2.83	28.3	1.30	76.4
September	4.89	2.43	27.2	0.89	82.3
October	4.34	2.46	27.2	1.09	78.1
November	3.83	2.06	25.9	1.40	72.0
December	4.09	1.89	24.6	1.39	66.9

ที่มา : <https://www.pvsyst.com/help/index.html>

ใช้ข้อมูลจากจำนวนเฉลี่ยรายเดือนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละเดือน โดยเฉลี่ยสำหรับเดือนนั้นตลอดระยะเวลา 19 ปี (ค.ศ.1996 - ค.ศ.2015) : Meteonorm 8.0 (1996-2015), sat=100%

3.4 ระบบแปลงผันกำลังงานทางกลและไฟฟ้า

3.4.1 ระบบส่งกำลังเชิงกล

ระบบส่งกำลัง หรือ เกียร์ คือ อัตราส่วนของผลคูณที่มีความแรงของเฟือง เฟืองจะมีการสับเปลี่ยนเฟืองโดยการเปลี่ยนเกียร์ต่ำและสูง ส่วนเกียร์ต่ำจะเป็นเฟืองใหญ่ จะทำให้มีอัตราเร่งมากกว่าแต่ความเร็วจะน้อยกว่าจนต้องเปลี่ยนไปเกียร์ระดับกลาง ซึ่งเป็นเฟืองระดับกลางแต่ความเร็วมากขึ้น ส่วนเกียร์ระดับสูงเป็นเฟืองขนาดเล็กจะหมุนช้ากว่าเฟืองใหญ่แต่เฟืองเล็กหรือเกียร์สูงจะให้ความเร็วที่สุดแต่อัตราเร่งจะน้อยกว่า เกียร์สูงจะต้องใช้พลังงานสูงจากการหมุนอย่างมากจนต้องมีการเปลี่ยนเกียร์เพื่อควบคุมความเร็วของรถ ระบบส่งกำลังจะมีอัตราทดของการส่งกำลังมีความจำเป็นต่อการออกแบบให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ได้ตามความต้องการ เกียร์มี 2 ประเภท คือ เกียร์อัตโนมัติ และเกียร์ธรรมดา

เฟือง (Gear) อุตสาหกรรม แบ่งได้ 8 ประเภท

1. เฟืองตรง (Spur Gears) เป็นเฟืองที่มีใช้งานกันมากที่สุดในบรรดาเฟืองชนิดต่าง ๆ เป็นเฟืองที่มีฟันขนานกับแกนหมุนและใช้ในการส่งกำลังการหมุนจากเพลานึงไปยังอีกเพลานึง เฟืองตรงส่วนมากจะนำมาใช้ในระบบส่งกำลัง (Transmission Component)

2. เฟืองสะพาน (Rack Gears) หน้าที่ของเฟืองสะพาน คือ ใช้ในการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากการเคลื่อนที่ในลักษณะการหมุนหรือการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นหรือการเคลื่อนที่ที่กลับไปกลับมา เฟืองสะพาน (Rack) มีลักษณะเป็นแท่งยาวตรง สามารถหมุนกลับลำตัวได้ประมาณ 90 องศา และมีฟันเฟืองอยู่ด้านบนขบอยู่กับส่วนที่เป็นฟันเฟือง (Gear)

3. เฟืองวงแหวน (Internal Gears) เป็นเฟืองตรงชนิดหนึ่ง มีรูปร่างลักษณะกลมเช่นเดียวกับเฟืองตรง แต่ฟันเฟืองจะอยู่ด้านบนของวงกลม และต้องใช้คู่กับเฟืองตรงที่มีขนาดเล็กกว่าขบอยู่ภายในเฟืองวงแหวน สำหรับอัตราทดนั้นสามารถออกแบบให้มากหรือน้อยได้โดยขึ้นอยู่กับขนาดของเฟืองตัวนอก (Ring) และเฟืองตัวใน (Pinion) โดยถ้าหากเฟืองตัวในเล็กกว่าเฟืองตัวนอกมากอัตราทดก็จะมากและถ้าหากเฟืองตัวในมีขนาดใกล้เคียงกับเฟืองตัวนอกอัตราทดก็จะน้อย โดยปกติเฟืองวงแหวนเป็นเฟืองตัวเล็ก (Pinion Gear) ที่อยู่ด้านในจะทำหน้าที่เป็นตัวขับ

4. เฟืองเฉียง (Helical Gears) เป็นเฟืองส่งกำลังที่มีฟันเฉียงทำมุมกับแกนหมุน คล้ายเฟืองฟันตรง แต่มีเสียงที่เกิดจากการทำงานเบากว่าเฟืองฟันตรง ลักษณะแนวของฟันเฟืองจะไม่ขนานกับเพลานอกจากนี้โดยจะทำมุมเฉียงไปเป็นมุมที่ต้องการ โดยอาจจะเอียงไปทางซ้ายหรือเอียงไปทางขวาขึ้นอยู่กับลักษณะความต้องการในการใช้งาน

5. เฟืองเฉียงก้างปลา (Herringbone Gears) เป็นเฟืองที่มีลักษณะคล้ายกับเฟืองตรงแต่ฟันของเฟืองจะเอียงสลับกันเป็นฟันปลา ทำให้เฟืองก้างปลาสามารถทำงานรับภาระ (Load) ได้มากกว่าเฟืองตรง ในขณะเดียวกันแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในขณะทำงานก็ยังค่น้อยเมื่อเทียบกับเฟืองตรง

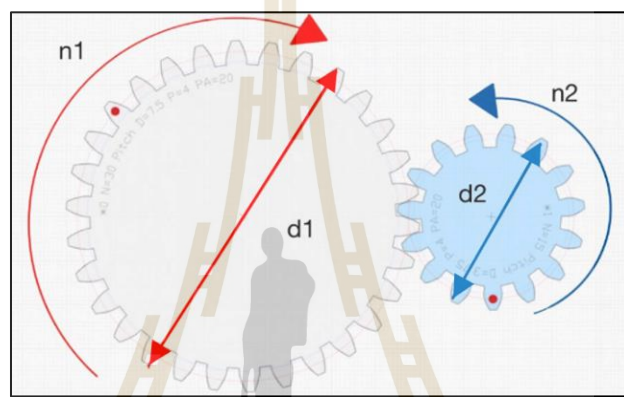
6. เฟืองดอกจอก (Bevel Gears) เป็นเฟืองที่มีการตัดฟันเฟือง ใช้สำหรับส่งกำลังจากเพลานึงไปยังอีกเพลานึงที่ตัดกัน มุมระหว่างเพลาทิ้งสองเป็นมุมระหว่างเส้นศูนย์กลางร่วมที่ตัดกัน ของฟันเฟือง มุมระหว่างเพลารวม 90 องศา แต่ในหลาย ๆ การใช้งานของเฟืองชนิดนี้อาจจะต้องการมุมระหว่างเพลามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่ามุม 90 องศา ก็ได้

7. เฟืองตัวหนอน (Worm Gears) เป็นชุดเฟืองที่ประกอบด้วยเกลียวตัวหนอน (Worm) และเฟือง (Gear) เป็นเครื่องกลที่ทำงานโดยการหมุนแนวเพลาชับ (Worm Shaft) และเพลารอบ (Worm Wheel Shaft) ของเฟืองตัวหนอนจะทำมุมกันที่มุมฉาก 90 องศา การทำงานของเฟืองตัวหนอนจะเงียบและมีแรงสั่นสะเทือนเกิดขึ้นน้อย เนื่องจากการส่งถ่ายกำลังจากเฟืองชับไปยัง

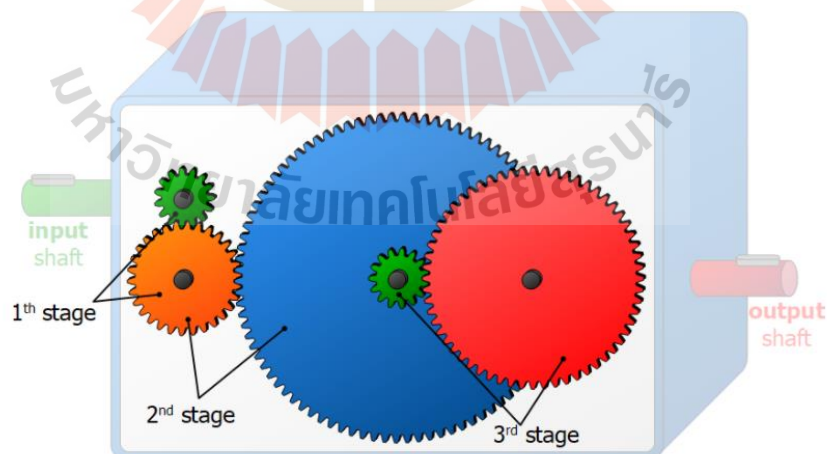
เฟืองตามนั้นการส่งถ่ายกำลังจะเป็นไปในลักษณะของการสั่นไถล (Sliding) ในการส่งถ่ายกำลังของเฟืองตัวหนอนนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นบนผิวฟันเฟืองจะมากกว่าเฟืองตรงหรือแบบเฟืองเฉียง

8. เฟืองเกลียวสกรู (Spiral Gears) เป็นเฟืองเกลียวที่ใช้ส่งกำลังระหว่างเพลาที่ทำมุมกัน 90 องศา การใช้งานเฟืองชนิดนี้ส่วนมากจะใช้ในการเปลี่ยนทิศทางในการส่งกำลังของเพลา

เฟืองจะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเฟืองและอัตราทดรอบ อัตราทดรอบยิ่งมาก ช่วงประสิทธิภาพจะลดลงเล็กน้อย ดังนั้นการเลือกชนิดของเฟืองและอัตราทดรอบจะขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน ดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3. 13 การทดรอบของเฟืองเกียร์ [เฟืองขับ:เฟืองตาม]
ที่มาภาพ : <https://geargenerator.com/> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]



รูปที่ 3.14 ระบบส่งกำลังเชิงกล

ที่มาภาพ : <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/basics/gear-stages/> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

ตารางที่ 3.3 ประสิทธิภาพของเฟืองเกียร์แต่ละชนิด

ลำดับ	ชนิด	ช่วงอัตราทดรอบ	ช่วงประสิทธิภาพ
1	เฟืองตรง	1:1 ถึง 6:1	94 – 98%
2	เฟืองเฉียง	3:2 ถึง 10:1	94 – 98%
3	เฟืองคอกจอก	3:2 ถึง 5:1	93 – 97%
4	เฟืองตัวหนอน	5:1 ถึง 75:1	50 – 90%
5	เฟืองเกลียวสกรู	3:2 ถึง 4:1	95 – 99%

ที่มา : <https://www.quora.com/Which-is-the-most-efficient-gearbox> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

อัตราทดของเฟือง คือ สัดส่วนระหว่างเฟือง 2 ตัว ขึ้นไปที่ส่งกำลังถึงกัน ซึ่งเฟืองตัวหนึ่งจะเป็นตัวขับและอีกเฟืองตัวจะเป็นตัวตาม (เฟืองขับและเฟืองตาม) ดังรูปที่ 3.13 และ 3.14 โดยการเคลื่อนที่ของเฟืองทั้ง 2 จะมีทิศทางที่ตรงกันข้ามกัน เช่น เฟืองขับหมุนตามเข็มนาฬิกา เฟืองตามจะหมุนทวนเข็มนาฬิกา

เฟืองขับและเฟืองตาม จะมีความเร็วรอบและจำนวนฟันเฟืองที่ต่างกัน ซึ่งตัวไหนจะมากกว่าหรือน้อยกว่าก็ขึ้นอยู่กับความต้องการที่ปลายทางว่าต้องการเพิ่มหรือลดความเร็ว โดยเฟืองขับและเฟืองตามจะมีความสัมพันธ์กันดังรูปและสมการต่อไปนี้

$$n_1 t_1 = n_2 t_2 \quad (3.1)$$

$$i_{GR} = \frac{\text{InputRotation}}{\text{OutputRotation}} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{t_2}{t_1} = \frac{d_2}{d_1} \quad (3.2)$$

โดยที่ n_1 คือ ความเร็วรอบเฟืองขับ (rpm)

n_2 คือ ความเร็วรอบเฟืองตาม (rpm)

t_1 คือ จำนวนฟันเฟืองขับ (teeth)

t_2 คือ จำนวนฟันเฟืองตาม (teeth)

d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองขับ (cm)

d_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองตาม (cm)

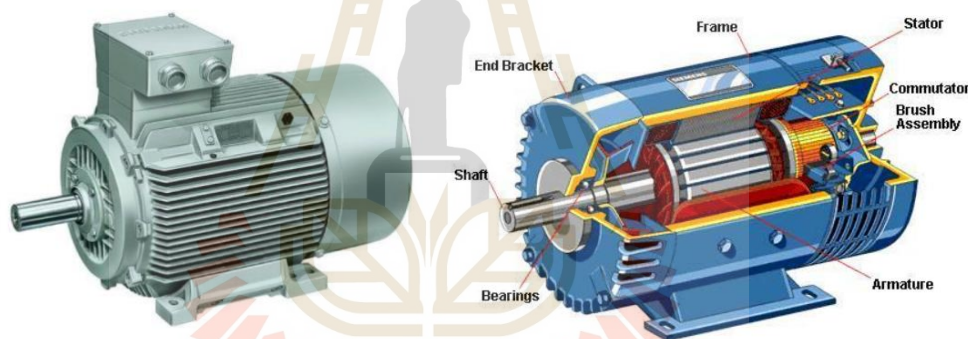
i_{GR} คือ อัตราทดรอบของเกียร์

เกียร์ทดรอบเป็นอุปกรณ์สำคัญในการทำงานของเครื่องจักรที่ขาดไม่ได้ ที่จะช่วยให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยหน้าที่หลักของเกียร์ทดรอบ คือ ทำหน้าที่ในการลดความเร็วของมอเตอร์ ให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่ใช้ และเพิ่มแรงบิดให้สูงขึ้น นิยมใช้กับงานที่ต้องการความเร็วไม่มากแต่ต้องการแรงบิดสูง

3.4.2 มอเตอร์ไฟฟ้า

1. โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ คือ เครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electromechanical Energy) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า (Electric Energy) ให้เป็นพลังงานกล (Mechanical Energy) ในรูปของการหมุนเคลื่อนที่มีประโยชน์ในการนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ถูกนำไปร่วมใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องมือไฟฟ้า และเครื่องใช้ไฟฟ้าประมาณ 80-90% ลักษณะมอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Energy) ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 มอเตอร์ไฟฟ้า

ที่มาภาพ : <https://sites.google.com/site/physic122/about> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

1.1 โครงสร้างมอเตอร์

ส่วนอยู่กับที่ เรียกว่า สเตเตอร์ (Stator) ทำหน้าที่ยึดขดลวดที่บรรจุลงในร่องสล็อต (Slot) ทำด้วยแผ่น เหล็กกลามิเนต (Laminated Steel) บาง ๆ และมีร่องสล็อตอัดเป็นแท่ง

ส่วนที่หมุน เรียกว่า โรเตอร์ (Rotor) จะมีแท่งตัวนำคล้ายกรงกระรอกฝังอยู่ภายในโรเตอร์ที่ปลายทั้ง สองของแท่งตัวนำจะถูกัดวงจรด้วยตัวนำรูปวงแหวน แท่งตัวนำของโรเตอร์มักมีลักษณะเฉียงเพราะจะทำให้มอเตอร์หมุนได้ราบเรียบและลดปัญหาเสียงฮัมของสนามแม่เหล็ก

1.2 หลักการทำงานของมอเตอร์

การที่โรเตอร์หมุนได้เนื่องจากเมื่อขดลวดทองแดงที่พันอยู่กับสเตเตอร์มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating magnetic fields) หมุนรอบ ๆ แกนเหล็กสเตเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวดโรเตอร์ ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้จะสร้างแรงบิดที่โรเตอร์ทำให้โรเตอร์หมุนไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed)

2. ชนิดของมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ 2 แบบหลัก ๆ ตามลักษณะของกระแสไฟฟ้า คือ

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เป็นมอเตอร์ที่ต้องใช้ไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเข้าไปในขดลวดเพื่อทำให้เกิดการดูดและผลักกันของแม่เหล็กถาวรกับแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากขดลวดมอเตอร์จึงหมุนได้
2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) เป็นมอเตอร์ที่ต้องใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้หลักการดูดและผลักกันของแม่เหล็กถาวร กับแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดมาทำให้เกิดการหมุนของมอเตอร์ และ 90% ในโรงงานอุตสาหกรรมจะนิยมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

3. ค่าสลิปและความเร็วรอบของมอเตอร์

ค่าสลิป (Slip) ของมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถบ่งบอกถึงค่าประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ได้อย่างคร่าว ๆ หากมอเตอร์มีค่า Slip ต่ำ จะมีประสิทธิภาพมากกว่ามอเตอร์ที่มีค่า Slip สูง ดังนั้นการทำงานของมอเตอร์สามารถแสดงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของค่าสลิป (Slip) ดังนี้

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.3)$$

เมื่อ s เป็นค่า Slip ของมอเตอร์ไม่มีหน่วย n_s และ n_r มีหน่วยเป็น rpm โดยค่าสลิปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แต่ไม่มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งขณะเริ่มหมุน Slip จะเท่ากับ 1 และขณะไม่มีภาระทางกล ค่าสลิปจะน้อยมาก (เข้าใกล้ ศูนย์) จึงสามารถกำหนดความถี่ของโรเตอร์ตามสมการ

$$f_r = sf_s \quad (3.4)$$

เมื่อ f_r และ f_s เป็นความถี่ของโรเตอร์และสเตเตอร์ตามลำดับ

ความเร็วรอบของมอเตอร์ : ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้านั้น จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ

1. จำนวนโพลของขดลวดที่ตัว Stator ของมอเตอร์ไฟฟ้า
2. ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวมอเตอร์

สามารถคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์ได้โดยใช้ดังสมการ

$$n = \frac{2 \times f \times 60}{p} \quad (3.5)$$

โดยที่	n	คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า (rpm)
	f	คือ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวมอเตอร์ (Hz)
	p	คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดที่ตัว Stator ของมอเตอร์ไฟฟ้า (pole)

4. แรงบิดของมอเตอร์

แรงบิด หมายถึง โมเมนต์ของแรงที่ทำให้เกิดการหมุนหรือการบิดรอบแกนเพลลาของ มอเตอร์ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้ผลคูณของแรงกับรัศมี ณ จุดที่แรงกระทำ เมื่อพิจารณาเพลลาอันหนึ่งที่มีรัศมี r เมตร มีแรง F นิวตัน มากระทำกับเพลลา ทำให้เพลลาหมุนไปด้วยความเร็ว n รอบต่อวินาที

แรงบิดที่ควรพิจารณามี 3 ชนิด ตามค่าสลิป 3 ตำแหน่ง ดังนี้

1. แรงบิดพิกัด (rated torque, T_F) เป็นแรงบิดขณะมอเตอร์ขับโหลดเต็มพิกัดที่ค่าสลิปหรือความเร็วพิกัด

2. แรงบิดขณะสตาร์ท (starting torque, T_S) เกิดขึ้นขณะมอเตอร์กำลังเริ่มเดิน (starting) ที่ค่าสลิปเท่ากับ 1 มอเตอร์ใช้งานโดยทั่วไปจะมีแรงบิดขณะสตาร์ทประมาณ 1.5 เท่าของแรงบิดพิกัด

3. แรงบิดสูงสุด (maximum torque, T_M) เป็นค่าแรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้สูงสุด หากแรงบิดของโหลดสูงกว่าแรงบิด ณ จุดนี้ จะทำให้มอเตอร์หยุดหมุน จึงเรียกแรงบิดนี้ว่า แรงบิดเบรกดาวน์ (breakdown torque)

กำลังทางกลทุก ๆ ชนิดที่เกิดที่เพลลาของมอเตอร์ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแรงบิดได้ ดังสมการที่ 3.6 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกำลังทางกล

$$\tau = \frac{60 \times P}{2 \times \pi \times n} \quad (3.6)$$

โดยที่ τ คือ แรงบิด (Nm)

P คือ กำลัง (W)

n คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า (rpm)

ดังนั้นหากำลังจากสมการที่ 3.6 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$P = \tau \omega \quad (3.7)$$

เมื่อ

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (3.8)$$

และ แรงบิดที่เพลาหาได้จากสมการ

$$\tau_{\text{spool}} = T r_s \quad (3.9)$$

โดยที่ ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

T คือ แรงดึงเชือก (N)

r_s คือ รัศมีเพลา (m)

5. การสูญเสียและประสิทธิภาพ (Efficiency and Losses)

มอเตอร์จะมีการสูญเสียกำลังโดยแยกย่อยเป็นส่วน ๆ ดังนี้

1. การสูญเสียในขดลวดทองแดงที่สเตเตอร์ (Stator copper losses) จะเกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน เนื่องจากกระแสไหลในขดลวดทองแดงที่มีความต้านทานอยู่ภายใน

2. การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses หรือ iron losses) ที่สเตเตอร์ เนื่องจากมีเส้นแรงแม่เหล็กตัดกับแกนเหล็ก จะทำให้เกิดกระแสไหลวนอยู่ในแกนเหล็กเป็นการสูญเสียที่เรียกว่า Eddy current loss และการเปลี่ยนทิศทางสนามแม่เหล็ก 50 ไซเคิลต่อวินาทีเกิดการสูญเสียที่เรียกว่า Hysteresis loss

3. การสูญเสียที่โรเตอร์ (Rotor losses) เนื่องจากมีกระแสไหลในตัวนำที่ฝังไว้ในโรเตอร์ จึงเกิดเป็นความร้อนขึ้นที่โรเตอร์

4. การสูญเสียจากการต้านทานของลมและแรงเสียดทาน (Windage and Friction losses) เกิดจากแรงเสียดทานในตลับลูกปืนและแรงต้านของครีบบระบายอากาศที่ตัวมอเตอร์

5. การสูญเสียจากสถานะที่มอเตอร์ขับโหลด (Stray losses) เป็นการสูญเสียเมื่อมีการขับเคลื่อนโหลด ซึ่งจะทำให้ความเร็วรอบลดลง ความถี่ของกระแสไหลในขดลวดโรเตอร์สนามแม่เหล็กเร็วไหลขณะขับโหลดจะเปลี่ยนแปลง

การสูญเสียต่าง ๆ ที่กล่าวถึงมาเป็นร้อยละที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ความสูญเสีย

ลำดับ	รายการความสูญเสีย	ขนาดประมาณ	องค์ประกอบที่ทำให้เกิดความสูญเสีย
1	ความสูญเสียที่สเตเตอร์	35-40%	ขนาดตัวนำสเตเตอร์
2	ความสูญเสียในแกน	15-20%	ชนิดและปริมาณวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็ก
3	ความสูญเสียที่โรเตอร์	15-25%	ขนาดตัวนำของโรเตอร์
4	ความสูญเสียจากแรงเสียดทานและลม	5-10%	พัดลมและแบร์ริง
5	ความสูญเสียปลั๊กย่อยจากโหลด	5-10%	การออกแบบจากโรงงาน

ที่มา : <https://www.ultimatecommercial.co.th> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

3.4.3 วงจรแปลงผันพลังงาน

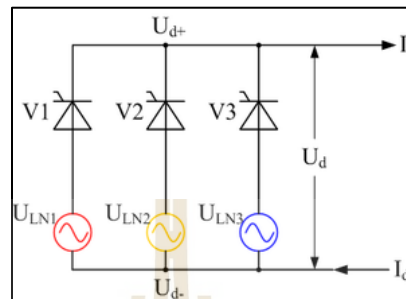
1. วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

วงจรเรียงกระแสหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เรคตีไฟเออร์ (Rectifier) คือวงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง หรือมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณ ได้แก่ ไดโอด

ไดโอด (Diode) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติยอมให้กระแสไหลผ่านได้เพียงทิศทางเดียวจากขั้วแอโนด (Anode: A) ซึ่งมีศักย์เป็นบวกไปยังขั้วแคโทด (Cathode : K) ซึ่งมีศักย์เป็นลบ เมื่อได้รับไบอัสแบบฟอร์เวิร์ด (Forward Bias) แต่ถ้าไดโอดได้รับไบอัสแบบตรงกันข้ามหรือรีเวิร์ส (Reverse Bias) ไดโอดจะไม่ยอมให้กระแสไหลผ่าน ดังนั้นไดโอดจึงถูกนำไปใช้ในวงจรเรียงกระแส ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Voltage) ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage)

วงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส (Three-phase rectifier circuit) เป็นวงจรเช่นเดียวกับวงจรเรียงกระแสเฟสเดียว วงจรเรียงกระแสสามเฟสสามารถใช้รูปแบบของวงจรได้ 3 รูปแบบ คือ ครึ่งคลื่น วงจรแบบเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลง center tap และแบบบริดจ์เต็มคลื่น

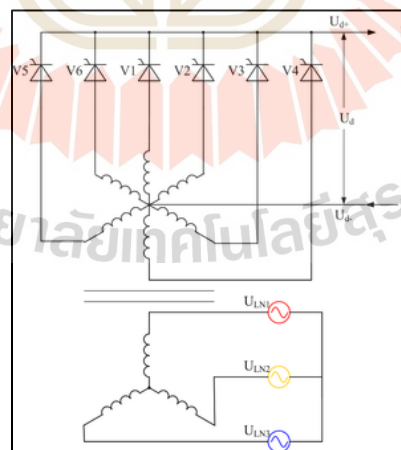
1. วงจรสามเฟสครึ่งคลื่น (Three-phase half wave rectifier) วงจรสามเฟสครึ่งคลื่นที่ควบคุมไม่ได้ ต้องใช้ไดโอดสามตัว ตัวละหนึ่งเฟส ดังรูปที่ 3.16 วงจรแบบนี้เป็นชนิดที่ง่ายที่สุดของวงจรเรียงกระแสสามเฟส แต่ต้องทนจากความถี่ที่ค่อนข้างสูง ทั้ง AC และ DC



รูปที่ 3.16 วงจรสามเฟสครึ่งคลื่น

ที่มาภาพ : <http://th.gprectifier-es.com/news/three-phase-rectifiers-.html> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

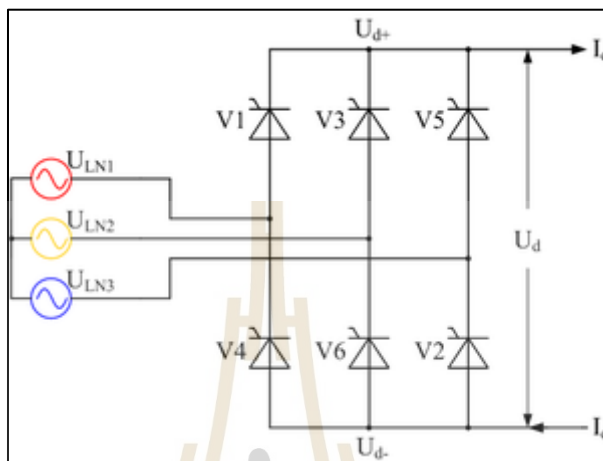
2. วงจรสามเฟสเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลง center tap (Fullwave center tap transformer rectifier) rectifier แบบนี้จำเป็นต้องใช้ไดโอด 6 ตัว แต่ละตัวต่อกับปลายแต่ละด้านของแต่ละขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า วงจรนี้มีหมายเลขพัลส์เป็นหก และอาจจะคิดว่าเป็นวงจรหกเฟสครึ่งคลื่น ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรสามเฟสเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลง center tap

ที่มาภาพ : <http://th.gprectifier-es.com/news/three-phase-rectifiers-.html> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

3. วงจรสะพานสามเฟส (Three-phase bridge rectifier) สำหรับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์สามเฟสที่ไม่ควบคุมจะใช้ไดโอดหกตัว และวงจรก็ยังมีจำนวนพัลส์เป็นหก ด้วยเหตุนี้มันจึงถูกเรียกว่าเป็น วงจรบริดจ์หกพัลส์ ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วงจรบริดจ์สามเฟส

ที่มาภาพ : <http://th.gprectifier-es.com/news/three-phase-rectifiers-.html> [เข้าถึงเมื่อ 9 มิ.ย. 2565]

2. วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit)

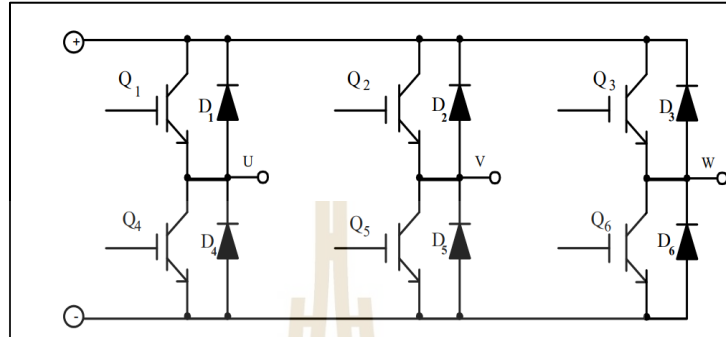
วงจรอินเวอร์เตอร์ คือ ส่วนที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟกระแสตรง (DC Voltage) เป็นแรงดันกระแสสลับ (AC Voltage) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ได้

การแปลงกระแสสลับ เป็นกระแสตรงและแปลงจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับอีกครั้งนั้น คือ การแปลงกระแสสลับโดยตรงนั้นความถี่ทางด้านขาออกจะไม่เกินความถี่ทางด้านขาเข้าทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้มากกว่าความเร็วพิกัดได้ แต่การเปลี่ยนจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงและแปลงกลับมาเป็นกระแสสลับอีกครั้งจะทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างความถี่ที่สูงกว่าความถี่ทางด้านขาเข้า ดังนั้นจึงสามารถที่จะปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มากกว่าความเร็วพิกัดได้ นิยมแปรผันกำลังไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์สามเฟสซึ่งจะเหมาะกับการที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง เพราะถ้าหากจะใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์จำนวนสามชุดก็ได้ แต่ต้องใช้สวิตช์จำนวน 12 ตัว นอกจากนั้นยังต้องอาศัยวงจรควบคุมที่ทำให้แต่ละเฟสต่างกัน 120 องศาของความถี่หลักจึงไม่เหมาะที่เลือกใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์จำนวนสามตัว

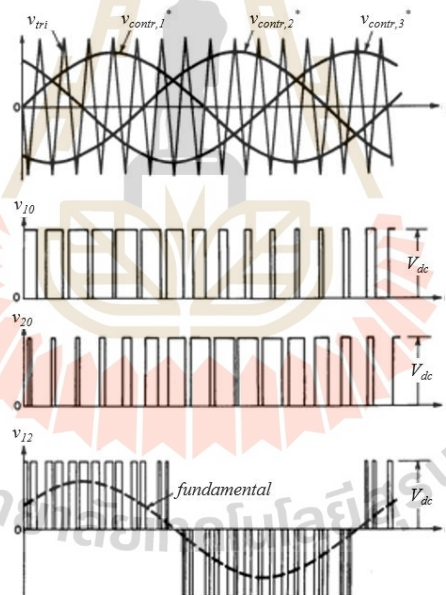
3. อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สามารถต่อได้จากทรานซิสเตอร์ และไดโอดอย่างละ 6 ตัว เมื่อทรานซิสเตอร์ Q1 นำกระแสขั้ว a ถูกต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟตรง เมื่อทรานซิสเตอร์ Q4 นำกระแสขั้ว a ถูกต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟตรง การทำงานในแต่ละไซเคิลถูกแบ่ง

ออกเป็น 6 โหมด ๆ ละ 60 องศา ลำดับการทำงานของทรานซิสเตอร์ คือ 123, 234, 345, 456, 561 และ 612 โดยทรานซิสเตอร์แต่ละตัวแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 และสัญญาณอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสดังรูปที่ 3.20 ซึ่งแต่ละตัวเยื้องเฟสไป 60 องศา เพื่อให้ได้แรงดัน 3 เฟสของสัญญาณมูลฐานสมดุล



รูปที่ 3.19 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบฟลูบริดจ์

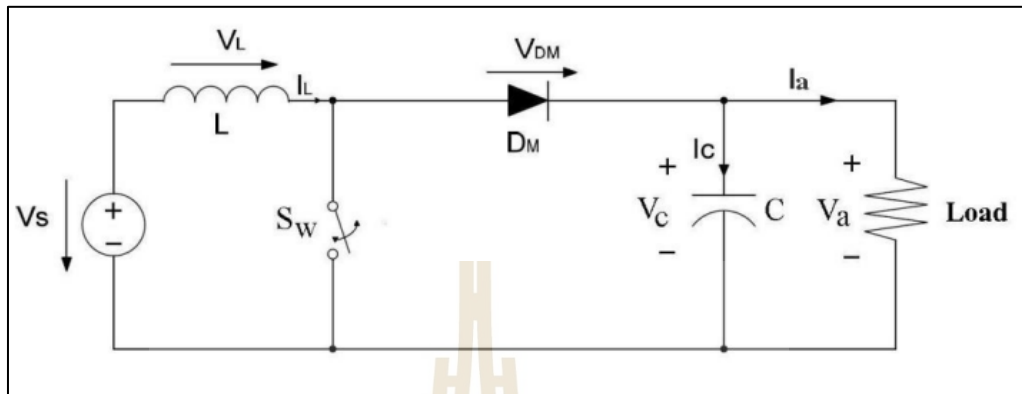


รูปที่ 3.20 สัญญาณอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบรูปคลื่น

4. วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter)

วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) เป็นวงจรที่ใช้สำหรับการแปลงแรงดันไฟฟ้า ทางด้านเอาต์พุต (Output) ให้มีค่ามากกว่าแรงดันทางด้านอินพุต (Input) ที่ป้อนเข้ามา ในวงจรหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวงจรทบระดับ (Step-up Converter) วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์จะ

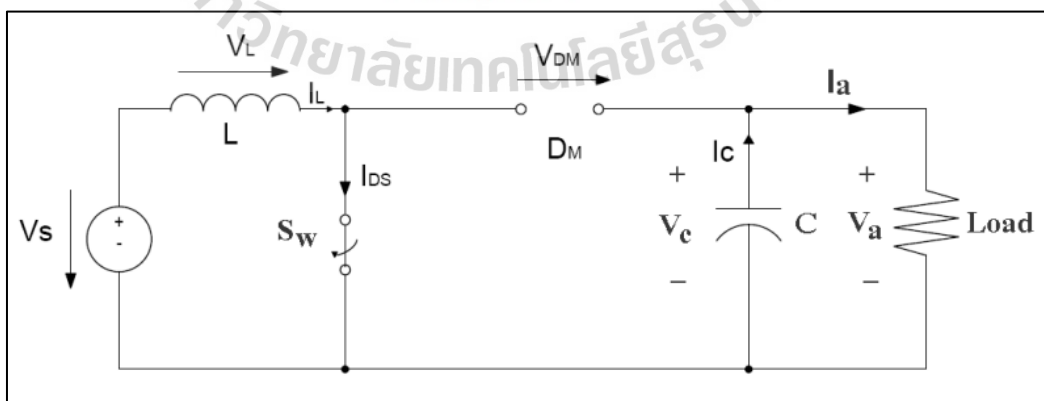
ใช้มอสเฟตกำลัง (MOSFET) หรือไอจีบีที (IGBT) สามารถพิจารณาการทำงานของบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ขณะสวิตช์นำกระแสและขณะสวิตช์หยุดนำกระแส ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

ขณะสวิตช์นำกระแส การทำงานของบัสต์คอนเวอร์เตอร์ในสภาวะสวิตช์เปิด (Switch On) พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (V_s) จะจ่ายให้ไปสะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำ ในระยะเวลาหนึ่งในช่วงเวลาสวิตช์เปิด ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสดังรูปที่ 3.22 แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ (V_L) จะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (V_{in}) ตามกฎแรงดันของเคอร์ชอฟตามสมการที่ (3.10)

$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.10)$$

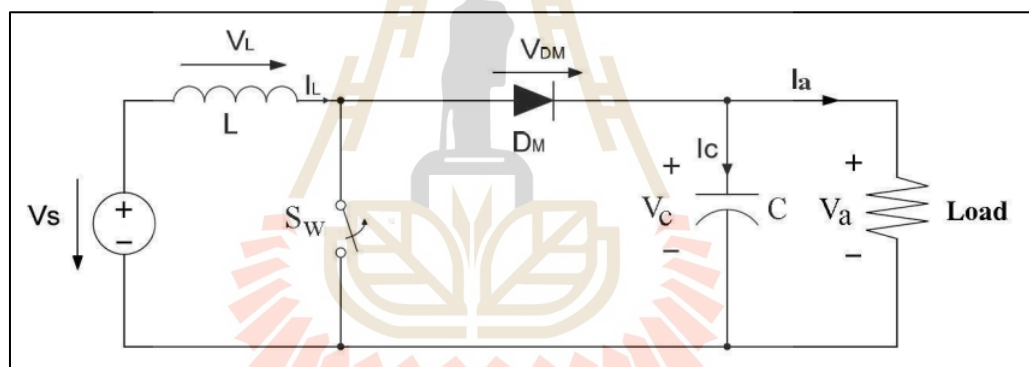


รูปที่ 3.22 วงจรสมมูลของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ขณะสวิตช์เปิด

ขณะสวิตช์หยุดนำกระแส การทำงานในโหมดนี้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.23 พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และพลังงานไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำจะถูกส่งมาให้ยังโหลด โดยพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากตัวเหนี่ยวนำเกิดจากการคายพลังงานไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ หลังจากที่ได้สะสมพลังงานไว้ในช่วงเวลาที่ทำงานในโหมดสวิตช์เปิด และจากการที่โหลดได้รับพลังงานไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายและการคายพลังงานของตัวเหนี่ยวนำนี้เองส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตมีค่าสูงกว่า แรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต

กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมุติแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_o) มีค่าคงที่ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ดังนี้

$$V_L = V_s - V_o \quad (3.11)$$



รูปที่ 3.23 วงจรสมมูลของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ขณะสวิตช์ปิด

จากรูปที่ 3.23 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์สามารถหาค่า Duty Cycle (D) ได้ตามสมการที่ (3.12) เมื่อค่า Duty Cycle เพิ่มขึ้นอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในทางปฏิบัตินิยมปรับอัตราขยายไม่เกิน 4 เท่า เพื่อให้วงจรมีเสถียรภาพ

$$D = \left(1 - \frac{V_s}{V_o}\right) \quad (3.12)$$

สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกได้จากสมการ

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \quad (3.13)$$

โดยที่	V_s	คือ แรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC)
	D	คือ ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle)
	V_o	คือ แรงดันเอาต์พุต

3.4.4 แรงดึงลวดสลิงในการยกวัตถุ

ลวดสลิง หรือ Wire rope เป็นเชือกแบบเส้นลวดโลหะที่ถูกมัดในลักษณะบิดเกลียว สามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าเชือกทั่วไปและมีข้อดีในการช่วยลดแรงเสียดทาน นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปลวดสลิงที่ใช้งานกันในงานก่อสร้างจะมีอยู่ประมาณ 4 ชนิด

1. Wire rope slings จัดเป็นเชือกประเภทหนึ่ง ประกอบจากการมัดของเส้นลวดโลหะที่ถูกนำมาบิดเป็นเกลียว ที่มีคุณสมบัติโค้งตัวไปตามมุมของวัตถุได้ และยังสามารถรับแรงเค้น และแรงดึงจากวัตถุได้ดี ส่วนมากจึงนิยมนำมาใช้เป็นตัวตั้งในการรับสิ่งของ

2. Stay ropes จัดเป็นสลิงที่มักจะใช้งานแบบตายตัว อยู่กับที่เป็นหลัก เนื่องจากคุณสมบัติของตัวสลิงประเภท Stay ropes ที่สามารถรับแรงดึง และยังสามารถรับน้ำหนักแบบคงที่และไม่คงที่ได้ดี

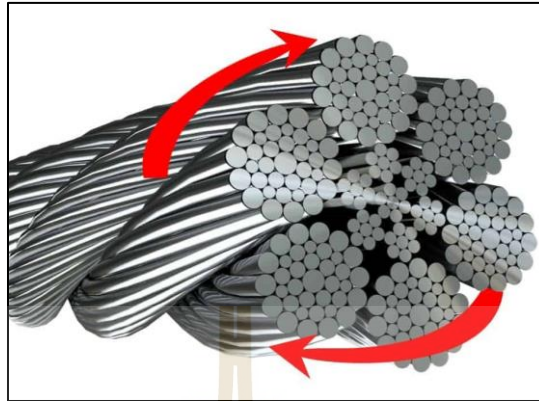
3. rack ropes เป็นเชือกสลิงที่ถูกนิยมนำไปทำเป็นรางสายสำหรับรับลูกล้อ เช่น รถกระเช้า เคน หรือยานพาหนะในการเคลื่อนที่ที่อาศัยลูกล้อ มีความแข็งแรงสูง รับน้ำหนักได้ดี

4. Running ropes เป็นหนึ่งในเชือกสลิงที่นิยมนำไปใช้งานในรูปแบบเคลื่อนที่ได้ โดยนำไปวางบิดบนลูกรอก เพราะเป็นลวดสลิงที่รับแรงเค้นโดยการบิดเป็นแรงหลัก

ความปลอดภัย ลวดสลิงนั้นได้รับความเค้นโดยแรงที่ไม่คงที่ การสีกหรือ การกัดกร่อนและจากน้ำหนักที่เกิน อายุการใช้งานของลวดสลิงมีจำกัดและควร มีการตรวจสอบสภาพของลวดสลิงว่ามีร่องรอยความเสียหายอันใดเพื่อจะเปลี่ยนทดแทนก่อนจะเกิดอันตราย การติดตั้งควรได้รับการออกแบบ เพื่ออำนวยความสะดวกของการตรวจสอบสภาพของลวดสลิง การติดตั้งลวดสลิงสำหรับลิฟต์โดยสารนั้นควรจะมีวิธีการเพื่อป้องกันตัว ลิฟต์นั้นหล่นลงมา บันไดเลื่อนนั้นจะมีทั้งลวดสลิงที่ใช้รับน้ำหนักและอุปกรณ์ความปลอดภัย

การคำนวณหาแรงดึงลวดสลิง ต้องคำนึงถึงส่วนประกอบหลัก ๆ ดังนี้ แรงดึงถึงจุดลวดสลิงขาด น้ำหนักที่ยกได้ปลอดภัยและค่าความปลอดภัย จะเห็นว่าการคำนวณแรงดึงของลวดสลิงอยู่ 3 ส่วนหลัก ๆ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่ใช้เป็นประจำ เพื่อให้สามารถป้องกันความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 3.24 แสดงลักษณะความแข็งแรงของลวดสลิง

การคำนวณหาแรงดึงลวดสลิงคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.24 ลวดสลิง

ที่มา : <https://www.hststeel.co.th/product/ungalvanized-steel-wire-ropes/ungalvanized-steel-wire-rope-19x7>

$$t_b = \frac{(d_w \text{ (mm)})^2}{20} \quad (3.14)$$

$$t_s = \frac{t_b}{sf} \quad (3.15)$$

หามวลของลวดสลิงตั้งสมการที่ (3.16)

$$m_s = A_s l_s \rho_s \quad (3.16)$$

โดยที่	t_b	คือ แรงดึงถึงจุดลวดสลิงขาด (tons)
	d_w	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลวดสลิง (mm)
	t_s	คือ น้ำหนักที่ยกได้อย่างปลอดภัย (tons)
	sf	คือ ค่าความปลอดภัย (Safety Factor)
	m_s	คือ มวลของลวดสลิง (kg)
	A_s	คือ พื้นที่หน้าตัดของลวดสลิง (mm ²)
	l_s	คือ ความยาวของลวดสลิง (m)
	ρ_s	คือ ความหนาแน่นของลวดสลิง (kg/m ³)

3.5 การหาค่าที่เหมาะสมในระบบกักเก็บพลังงาน

3.5.1 Particle swarm optimization

การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการ Particle swarm optimization หรือที่เรียกว่า PSO เป็น วิธีการหาค่าตอบแบบสุ่ม (random search algorithm) ถูกพัฒนาโดย J.Kennedy และ R.Eberhart ในปี ค.ศ. 1995 (Kennedy, 1995) โดยมีแนวคิดมาจากการศึกษาพฤติกรรมสัตว์ทางสังคมของสิ่งมีชีวิต เช่น ลักษณะการเคลื่อนที่ของฝูงปลา หรือการหาอาหารของฝูงนก ซึ่งเป็นวิธีการใช้สำหรับแก้ปัญหาทางคอมพิวเตอร์ หรือวิศวกรรม ซึ่งต้องอาศัยการเคลื่อนที่เป็นกลุ่มและการเว้นระยะห่างของปลาหรือนกแต่ละตัวที่อยู่ในกลุ่ม เรียกว่า อนุภาค (Particle) (Eberhart and Kennedy, 1995)

การเปรียบเทียบการหาค่าที่เหมาะสมของวิธี PSO เปรียบเสมือนการหาอาหารของฝูงนก หากมองเป็นพารามิเตอร์จะประกอบด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ (velocity) และตำแหน่งที่นกบินอยู่ (position) วิธีการ PSO จะเริ่มจากการสุ่มกลุ่มของคำตอบกับเวกเตอร์ (vector) ที่ใช้ปรับปรุงคำตอบนั้น ๆ กลุ่มคำตอบกับเวกเตอร์จะมีจำนวน N ตัวเท่ากัน โดย PSO จะเรียกคำตอบว่า ตำแหน่ง และ เรียกเวกเตอร์ว่า ความเร็วคู่ของตำแหน่งและความเร็วเปรียบเสมือนตัวนกหรืออนุภาค หรือกล่าวได้ว่า อนุภาคหนึ่งตัวจะรู้ตำแหน่งและความเร็วของตัวเองมันเอง โดยอนุภาคทุกตัวจะมีหมายเลขกำกับตั้งแต่ อนุภาคหมายเลข 1 อนุภาคหมายเลข 2 ไปถึง อนุภาคหมายเลข N

ทิศทางและความเร็วของอนุภาคแต่ละตัวจะมีการปรับเปลี่ยนไปเรื่อย ๆ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ตัวมันเองเคยไปมา เรียกว่า ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว (Personal Best position: P_{best}) และตำแหน่งที่ดีที่สุดที่กลุ่มอนุภาคเคยพบ เรียกว่า ตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (Global Best position: G_{best}) วิธีการ PSO เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีความเข้าใจง่ายและไม่ซับซ้อน ดังนี้

1. ตั้งค่าเริ่มต้นของอนุภาค (initial particle) การสร้างกลุ่มอนุภาคเริ่มต้นโดยใช้การสุ่มค่าให้ X_N และค่าความเร็วการเคลื่อนที่ให้ V_N ของแต่ละอนุภาคดังสมการที่ (3.17) และ (3.18) สุ่มค่าพารามิเตอร์ (parameter) ให้ตัวแปร X และ V ตามจำนวน N

$$X_N = \text{function random value } () \quad (3.17)$$

$$V_N = \text{function random value } () \quad (3.18)$$

2. ฟังก์ชันความเหมาะสมดังสมการที่ (3.19) คือ การคำนวณค่าความเหมาะสมของอนุภาค (evaluate fitness value) คำนวณโดยส่งค่า X ให้แก่ฟังก์ชันเป้าหมาย

$$\text{fitness value} = \text{objective function} (X_N) \quad (3.19)$$

3. การเก็บค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุด (update P_{best}) ซึ่งเป็นค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดในรอบการทำงานปัจจุบัน ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคปัจจุบันดีกว่า P_{best} จะทำการปรับปรุงค่า P_{best} โดยมีเงื่อนไขในการปรับปรุงตามสมการที่ (3.20)

$$\begin{aligned} IF \text{ fitness value} > G_{best} \\ G_{best} = \text{fitness value} \end{aligned} \quad (3.20)$$

4. การเก็บค่าตำแหน่งที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (update Gbest) พิจารณาจากการวนรอบซ้ำตั้งแต่รอบแรกจนถึงรอบปัจจุบัน ซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยแตกต่างจาก P_{best} ที่จะพิจารณาเฉพาะรอบปัจจุบัน G_{best} จึงเป็นเหมือนการเก็บค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดตั้งแต่วนรอบมา เงื่อนไขในการปรับปรุงดังสมการที่ (3.21)

$$\begin{aligned} IF \text{ fitness value} > G_{best} \\ G_{best} = X_N \end{aligned} \quad (3.21)$$

5. การคำนวณความเร็วการเคลื่อนที่ (update velocity) ของแต่ละอนุภาคดังสมการ (3.22)

$$V_{N,new} = wV_{N,old} + n_1 \text{random}() (P_{best} - X_N) + n_2 \text{random}() (G_{best} - X_N) \quad (3.22)$$

โดยที่ $V_{N,new}$ คือ ความเร็วที่คำนวณได้จากอนุภาครอบปัจจุบัน
 $V_{N,old}$ คือ ความเร็วที่คำนวณได้จากอนุภาครอบก่อน
 w คือ ค่าการถ่วงน้ำหนัก
 n_1, n_2 คือ ค่าคงที่ความเร็วในการค้นหา

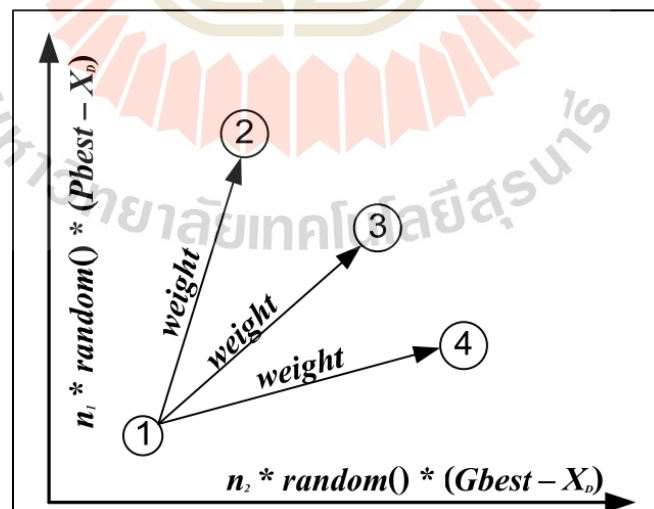
6. การปรับปรุงตำแหน่ง (update position) ของแต่ละอนุภาค จากสมการที่ (3.21) นำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (3.22) มาปรับปรุงทำให้ได้ตำแหน่งใหม่ที่อนุภาคจะเคลื่อนที่ไป ดังสมการที่ (5.7) ซึ่งการปรับปรุงจำเป็นต้องตรวจสอบขอบเขตของปัญหา เพื่อไม่ให้ตำแหน่งเกินค่าขอบเขต เนื่องจากปรับปรุงด้วยการบวกค่าเพิ่มขึ้น

$$X_{N,new} = X_{N,old} + V_{N,new} \quad (3.23)$$

โดยที่ $X_{N,new}$ คือ ความตำแหน่งที่คำนวณได้จากอนุภาครอบปัจจุบัน
 $X_{N,old}$ คือ ความตำแหน่งที่คำนวณได้จากอนุภาครอบก่อน

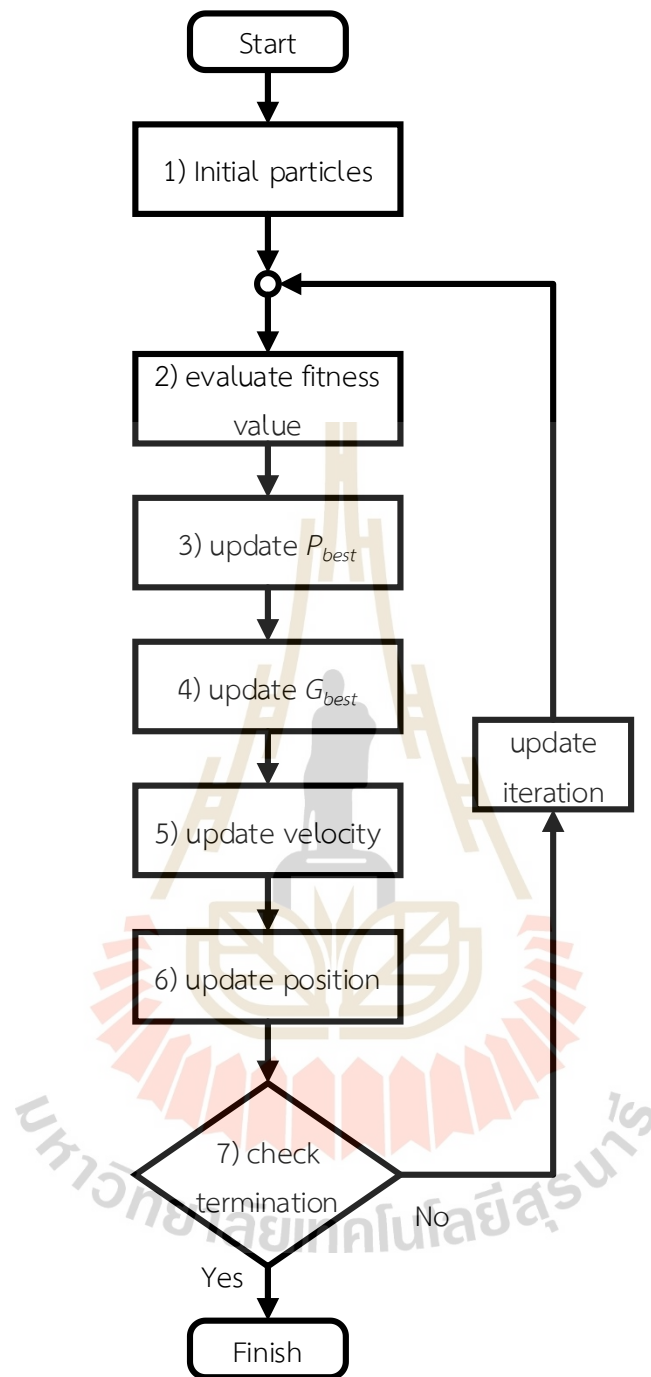
7. การตรวจสอบสิ้นสุดการวนรอบ (termination check) เงื่อนไขที่ตรวจสอบแบ่งได้สอง ลักษณะ คือ เมื่อการค้นหาใช้ระยะเวลาานาน มีจำนวนรอบถึงค่าที่กำหนดจึงหยุดการทำงาน หรือผลลัพธ์ที่ได้มีค่าที่สูงหรือดีกว่าค่าตอบที่ต้องการให้หยุดการทำงาน หากไม่เข้าเงื่อนไขการสิ้นสุดการวนรอบทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2

จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 5 จากสมการที่ (3.22) เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 3.25 พิจารณาในลักษณะหนึ่งมิติจากสมการค่าการถ่วงน้ำหนักจะนำมาใช้กำหนดระยะทางในการเคลื่อนที่ ช่วงสมการส่วนที่มี Gbest ประกอบอยู่ใช้คำนวณทิศทาง แนวแกน x และช่วงสมการส่วนที่มี Pbest ประกอบอยู่ใช้คำนวณทิศทาง แนวแกน y เมื่อสมการสามส่วนรวมกัน โดยอนุภาคเริ่มต้นในตำแหน่งที่ 1 หากส่วนของ Pbest มีค่าที่ได้จากการสุ่มมากและเป็นทิศทางที่ได้ผลลัพธ์ที่ดี ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่ 1 ไปตำแหน่งที่ 2 ถ้าหากส่วนของ Pbest ได้ ผลลัพธ์ที่ต่ำกว่าส่วนของ Gbest ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่ 1 ไปตำแหน่งที่ 4 ส่วนแผนผังการทำงานของ PSO แสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.25 การคำนวณการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค

ที่มาภาพ : (นุตยะสกุล, 2011)



รูปที่ 3.26 แผนผังการทำงานของ PSO

3.5.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในการจำลองไหลตมมหาลัยและไหลตมชุมชนจะแบ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น 2 กรณี เนื่องจากแต่ละกรณีมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน ดังนี้

กรณีที่ 1 โหลดมหาลัยการจำลองผลการยกและการปล่อยปล่อยก้อนเหล็ก เพื่อให้สามารถประหยัดพลังงานที่เหมาะสม กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคน้อยที่สุด ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Minimize } f = \sum_{t=0.5}^{ST} E_{total,t} \quad (3.24)$$

โดยที่ f คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
 ST คือ ระยะเวลาในการจำลอง (s)
 E_{total} คือ ค่าใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด (kWh)

ค่าใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด หาได้จากสมการที่ 3.25

$$E_{total} = \sum_{day=1}^{Week} E_{energy} \quad (3.25)$$

โดยที่ E_{energy} คือ ค่าใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละวัน (kWh)
 $Week$ คือ จำนวนวันที่ใช้พลังงานไฟฟ้า (7 วัน)

กรณีที่ 2 โหลดชุมชนการจำลองผลการปล่อยยกและการปล่อยก้อนเหล็ก เพื่อให้สามารถประหยัดพลังงานที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นค่าใช้จ่ายค่าไฟจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคน้อยที่สุด ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Minimize } f = \sum_{t=0.5}^{ST} P_{Energy,t} \quad (3.26)$$

โดยที่ f คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
 ST คือ ระยะเวลาในการจำลอง (s)
 P_{Energy} คือ ค่าใช้จ่ายที่ต้องจ่ายของพลังงานทั้งหมด (bath)

ในการคิดค่าใช้จ่ายของพลังงานที่ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด จะต้องคิดอัตราค่าไฟ 2 แบบ คือ แบบ TOD และแบบ TOU

การคิดอัตราค่าไฟแบบ TOU ดังสมการที่ 3.27

$$P_{Energy,t} = [(E_{Peak} \times E_{cost}) + (E_{Partial} \times E_{cost}) + (Power_{max} \times TOD_{Peak}) + Service + Ft] \times Vat \quad (3.27)$$

โดยที่	E_{Peak}	คือ พลังงานที่ใช้ในช่วงเวลา 18.30 น. – 21.30 น.
	$E_{Partial}$	คือ พลังงานที่ใช้ในช่วงเวลา 08.00 น. – 18.30 น.
	E_{cost}	คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/kW)
	$Power_{max}$	คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)
	TOD_{Peak}	คือ ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/kW)
	$Service$	คือ ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	Vat	คือ ภาษีมูลค่าเพิ่ม (7%)

การคิดอัตราค่าไฟแบบ TOU ดังสมการที่ 3.28

$$P_{Energy,t} = [(E_{Peak} \times E_{cost}) + (E_{OffPeak} \times E_{cost}) + (Power_{max} \times TOU_{Peak}) + Service + Ft] \times Vat \quad (3.28)$$

โดยที่	E_{Peak}	คือ พลังงานที่ใช้ในช่วงเวลา 09.00 น. – 22.00 น.
	$E_{OffPeak}$	คือ พลังงานที่ใช้ในช่วงเวลา 22.00 น. – 09.00 น.
	E_{cost}	คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/kW)
	$Power_{max}$	คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)
	TOU_{Peak}	คือ ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/kW)
	$Service$	คือ ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	Vat	คือ ภาษีมูลค่าเพิ่ม (7%)

เงื่อนไขบังคับการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ เงื่อนไขบังคับข้อสมการ (inequality constraint) และเงื่อนไขบังคับสมการ (equality constraint) รายละเอียดดังนี้

เงื่อนไขบังคับสมการ

$$P_{min} \leq P_{cut} \leq P_{max} \quad (3.29)$$

$$0 < \Delta E_{down} < \Delta E_{up} \quad (3.30)$$

$$0 < V_{object} \leq V_{max} \quad (3.31)$$

เงื่อนไขบังคับสมการ

$$N_{up} = N_{down} \quad (3.32)$$

$$a_{object} = 0.1 \quad (3.33)$$

$$V_{max} = 0.2 \quad (3.34)$$

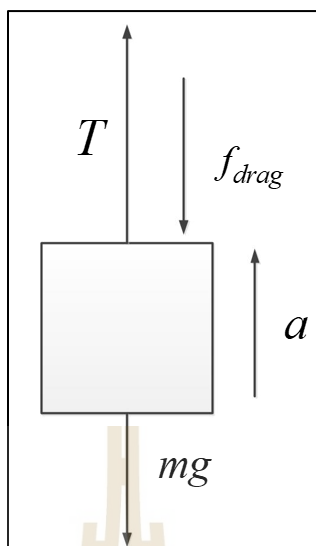
โดยที่	P_{min}	คือ	กำลังงานไฟฟ้าต่ำสุด (W)
	P_{cut}	คือ	ค่าที่ต้องการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ. จุดนั้น ๆ (W)
	P_{max}	คือ	กำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (W)
	E_{down}	คือ	พลังงานที่ได้จากการปล่อยก้อนเหล็กทั้งหมด (kWh)
	E_{up}	คือ	พลังงานที่ใช้ในการยกก้อนเหล็กทั้งหมด (kWh)
	V_{object}	คือ	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ
	V_{max}	คือ	ความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็ก (0.2 m/s)
	N_{down}	คือ	จำนวนก้อนเหล็กทั้งหมดที่ได้จากการปล่อยก้อนเหล็ก
	N_{up}	คือ	จำนวนก้อนเหล็กทั้งหมดที่ได้จากการยกก้อนเหล็ก
	a_{object}	คือ	ความเร่งในการเคลื่อนที่ของวัตถุ (0.1 m/ s ²)

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการ PSO ในการหาค่าไฟที่ใช้น้อยที่สุด โปรแกรมคำนวณแก้ไข ปัญหาของฟังก์ชันวัตถุประสงค์มานำเสนอ

3.6 ทฤษฎีและโมเดลจำลองการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็กในแนวดิ่ง

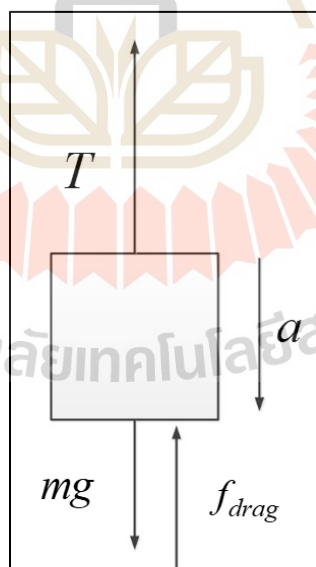
3.6.1 ทฤษฎีการคำนวณการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็กในแนวดิ่ง

การศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวดิ่ง จะมีหลักการเคลื่อนที่และหลักการทำงาน คล้ายกับลิฟต์ที่ใช้กันทั่วไป จึงนำมาประยุกต์ใช้ ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพของวัตถุในการเคลื่อนที่ขึ้น ได้ดังรูปที่ 3.27 และรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.27 แผนภาพของวัตถุในการเคลื่อนที่ขึ้น

จากแผนภาพของวัตถุ (FBD : Free Body Diagram) เมื่อมีการเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้ง แรงตึงเชือก (T) และความเร็ว (a) มีทิศทางขึ้น แต่น้ำหนักของวัตถุ (mg) และแรงต้านอากาศ (f_{drag}) จะมีทิศทางลงตามแผนภาพของวัตถุในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.28 แผนภาพของวัตถุในการเคลื่อนที่ลง

จากแผนภาพของวัตถุ (FBD : Free Body Diagram) เมื่อมีการเคลื่อนที่ลงในแนวตั้ง แรงตึงเชือก (T) และแรงต้านอากาศ (f_{drag}) จะมีทิศทางขึ้น แต่น้ำหนักของวัตถุ (mg) และความเร็ว (a) จะมีทิศทางลงตามแผนภาพของวัตถุในรูปที่ 3.28

จาก
จากรูปที่ 3.35 และ 3.36 จะเขียนสมการการเคลื่อนที่ขึ้นและลงได้ดังนี้

$$\Sigma F = ma \quad (3.35)$$

$$f_{drag} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_d A_F v^2 \quad (3.36)$$

สมการการเคลื่อนที่ขึ้นของวัตถุจากรูปที่ 3.27

$$T - mg - f_{drag} = ma \quad (3.37)$$

$$T = mg + ma + f_{drag} \quad (3.38)$$

สมการการเคลื่อนที่ลงของวัตถุจากรูปที่ 3.28

$$mg - T - f_{drag} = ma \quad (3.39)$$

$$T = mg - ma - f_{drag} \quad (3.40)$$

โดยที่	T	คือ แรงตึงเชือก (N)
	m	คือ มวลของวัตถุ (kg)
	g	คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
	a	คือ ความเร่งของวัตถุ (m/s^2)
	f_{drag}	คือ แรงต้านอากาศ (N)
	ρ_{air}	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
	C_d	คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (N/m^3)
	A_F	คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่ฉายให้ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ (m^2)
	v	คือ ความเร็วสัมพัทธ์การไหลของอากาศเทียบกับความเร็วของวัตถุ (m/s)

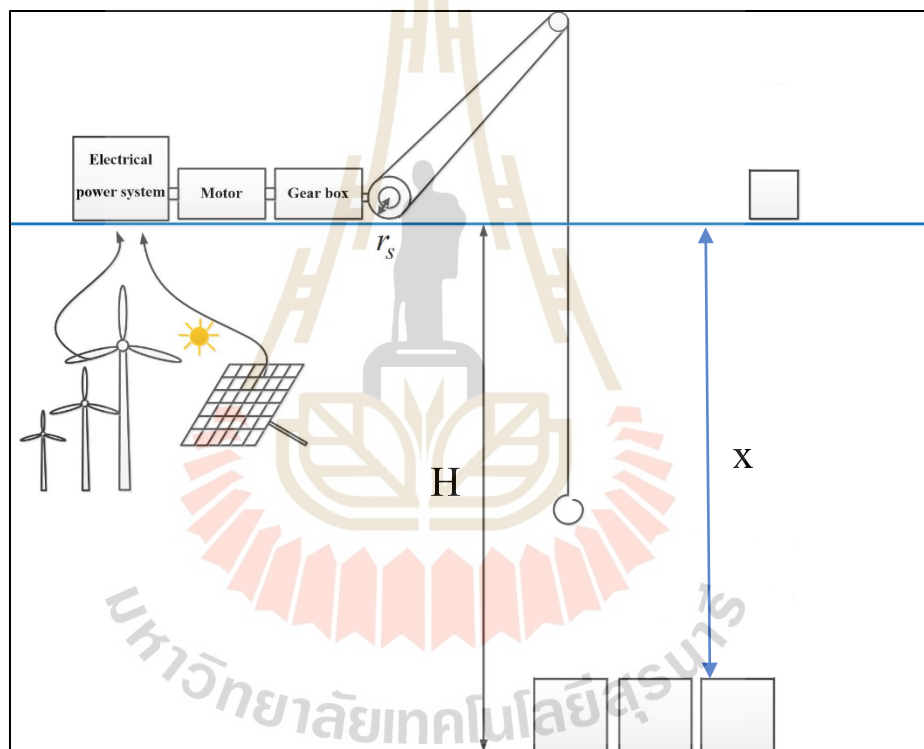
วัตถุที่ใช้ในระบบมีขนาดใหญ่และมีมวลมาก ต้องใช้ขนาดของสลิงที่ได้มาตรฐานในการยกขึ้นและปล่อยลง จะต้องคิดมวลของสลิงที่ใช้งานในระบบจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.41) และ (3.42) ดังสมการ

$$T = mg + ma + f_{drag} + m_l(H - x)(g + a) \quad (3.41)$$

$$T = mg - ma - f_{drag} + m_l(H - x)(g - a) \quad (3.42)$$

โดยที่ $m_l(H - x)$ คือ มวลของสลิงเทียบกับระยะทาง (m)
 H คือ ระยะทางจากพื้นล่างสุดไปถึงด้านบนสุด (m)
 x คือ ระยะทางจากด้านบนของวัตถุไปถึงด้านล่างสุด (m)

3.6.2 โมเดลจำลองการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็กในระบบกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 3.29 โมเดลจำลองระบบส่งกำลังเชิงกล

ดังรูปที่ 3.29 เนื่องจากสลิงที่ดึงในระบบต้องดึงผ่านเพลลาขนาดใหญ่โมเดลจำลองของระบบ เพื่อยื่นสลิงออกมาและปล่อยก้อนเหล็ก จะได้สมการจากทอร์กของมอเตอร์ดังนี้

$$\tau_{motor} = \tau_{spool} / i_{GR} \quad (3.43)$$

$$\tau_{spool} = Tr_s \quad (3.44)$$

โดยที่	r_s	คือ รัศมีเพลลา (m)
	τ_{motor}	คือ แรงบิดที่มอเตอร์ (Nm)
	τ_{spool}	คือ แรงบิดที่เพลลาถึงลวดสลิง (Nm)
	i_{GR}	คือ อัตราดอกเบี้ยของระบบส่งกำลังเชิงกล

3.7 ต้นทุนระบบกักเก็บพลังงาน

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน คือ ความคุ้มค่าในการติดตั้งทั้งในระยะสั้นหรือระยะยาว การเปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานในแต่ละรูปแบบไม่สามารถทำได้โดยตรง เนื่องจากแต่ละรูปแบบของระบบกักเก็บพลังงานมีเทคโนโลยีและอายุการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้น เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันพอสังเขป ผู้เปรียบเทียบจำเป็นต้องคำนวณมูลค่าของต้นทุนในลักษณะ Levelized cost of storage (LCOS) ซึ่งสะท้อนสัดส่วน ระหว่างผลรวมของต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร (ไม่รวมต้นทุนพลังงาน) ของระบบ Energy Storage กับปริมาณของพลังงานที่ระบบ Energy Storage สามารถปลดปล่อยได้ทั้งหมดภายในช่วงอายุการใช้งานของระบบ วิธีคำนวณ Levelized Cost of Storage (LCOS) ดังในสมการต่อไปนี้

$$LCOS = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^{t=N} \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^{t=N} \frac{S_{out}}{(1+i)^t}} \quad (3.45)$$

โดยที่	LCOS	คือ ต้นทุนการกักเก็บพลังงานที่เปลี่ยนแปลงทุก ๆ ปี (บาท/kWh)
	CAPEX	คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (บาท)
	A_t	คือ ค่าใช้จ่ายรายปีของระบบจัดเก็บรวมตลอดอายุของระบบจัดเก็บ (บาท)
	N	คือ อายุการใช้งานทางเทคนิค (ปี)
	i	คือ อัตราคิดลด (%)
	S_{out}	คือ พลังงานที่ผลิตได้ในแต่ละปี (kWh)

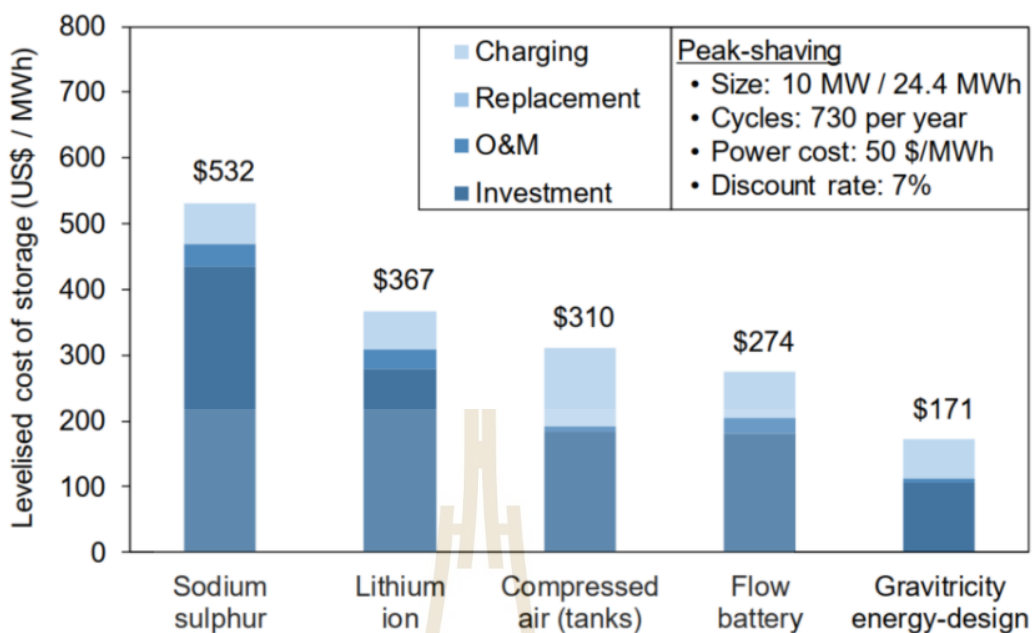
จากสมการที่ 3.45 จะได้

$$A_t = COPEX + CAPEX_{re} + C_{el}S_{in} - R \quad (3.46)$$

$$S_{out} = DoD \times N_{cycles} \times (\eta S_{rated}) \quad (3.47)$$

โดยที่	$COPEX$	คือ ต้นทุนการดำเนินงาน (บาท)
	$CAPEX_{re}$	คือ ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนส่วนประกอบของระบบที่กำหนด (บาท)
	C_{el}	คือ ต้นทุนพลังงานไฟฟ้า (บาท/kWh)
	S_{in}	คือ พลังงานอินพุตที่จ่ายให้กับระบบจัดเก็บพลังงาน (kWh)
	R	คือ มูลค่าการกู้คืนเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานของระบบ (บาท)
	DoD	คือ ความลึกของการปล่อย (m)
	N_{cycles}	คือ จำนวนรอบการชาร์จ / การคายประจุรายปี
	S_{rated}	คือ พลังงานของระบบที่ได้ (kWh)
	n	คือ ประสิทธิภาพการเดินทางไป-กลับของระบบ

การคิดต้นทุนด้วยวิธี LCOS จะได้มูลค่าที่คงที่เสมอ ต่างจากการคำนวณต้นทุนต่อรอบการชาร์จ (cost per cycle) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงตามอายุการใช้งานและการเสื่อมสภาพ วิธีคำนวณต้นทุนแบบ LCOS จึง เหมาะที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบเทคโนโลยีสำรองพลังงานที่ต่างประเภทกัน วิธีคำนวณดังกล่าวตอบ โจทย์เพียงแคต้นทุนของการเก็บพลังงาน เป็นการวิเคราะห์ที่มองด้านเดียวเท่านั้น การคัดเลือกเทคโนโลยีที่ดีที่สุดจำเป็นต้องวิเคราะห์องค์ประกอบของหลายปัจจัยที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการใช้งานในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 3.30 การเปรียบเทียบมูลค่าบริการกักเก็บของระบบกักเก็บพลังงาน 5 วิธีการจัดเก็บ

ที่มา : <https://www.storage-lab.com/gravity-based-storage>

จากรูปที่ 3.30 เปรียบเทียบราคา LCOS ระหว่างเทคโนโลยีในรูปแบบต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันเทคโนโลยีที่มี LCOS ต่ำที่สุด ได้แก่ Gravitricity Energy-design เนื่องจากระบบนี้ได้คิดระยะเวลาในการทำงานที่ 40-50 ปี จึงคำนวณได้ต้นทุนที่ถูกกว่าเทคโนโลยีกักเก็บในรูปแบบอื่นที่มีระยะเวลาการทำงานของระบบที่ประมาณ 10-20 ปี

Gravitricity Energy-design จะมีต้นทุนในการกักเก็บอยู่ที่ 171 $\text{\$/MWh}$ หรือประมาณ 5,985 บาท/ MWh ($1 \text{\$} = 35 \text{ บาท}$) คิดค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานจะได้ 5.99 บาท/kWh ถือว่ามีค่าใช้จ่ายต่อหน่วยที่สูง จึงต้องนำวิธีการกักเก็บพลังงานนี้มาวิเคราะห์ในการจำลองของโหลดแต่ละรูปแบบ เพื่อหาข้อสรุปและความเหมาะสมต่อของโหลดที่ต้องการนำมาเก็บ

อย่างไรก็ดีสังเกตว่าตัวเลขดังกล่าว ยังไม่ได้รวมต้นทุนทางสังคมและต้นทุนทางธรรมชาติที่เกิดขึ้น ในกรณีที่มีการคิดคำนวณพื้นที่และสถานที่ความสูงที่ต้องการใช้รวมไปด้วย ต้นทุนของการกักเก็บพลังงานด้วยวิธี Gravitricity Energy-design ก็จะมีสูงขึ้นตามไปด้วย

3.8 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับทฤษฎีต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบกักเก็บพลังงานโดยแรงโน้มถ่วง ที่กล่าวถึง ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบลิฟต์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบ ระบบโซล่าเซลล์ แสงอาทิตย์ ระบบส่งกำลังเชิงกล การแปลงวงจรที่ใช้ในการจ่ายไฟ-รับไฟของระบบ ระบบการกักเก็บพลังงาน เป็นต้น ซึ่งเป็นรายละเอียดที่สำคัญสำหรับทำความเข้าใจ และเป็นความรู้พื้นฐานสำหรับรายละเอียดในบทถัดไป โดยในบทถัดไปเป็นรายละเอียดเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองของระบบกักเก็บพลังงาน และวิเคราะห์ระบบจากโพลการใช้ไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ



บทที่ 4

ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบกักเก็บพลังงาน

4.1 บทนำ

จากการศึกษาเกี่ยวกับระบบกักเก็บพลังงานโดยแรงโน้มถ่วงยากต่อการทดลองจริง เนื่องจากเรื่องสถานที่และโครงสร้างต่าง ๆ ของระบบ การใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในปัจจุบันเข้ามาเป็นเครื่องมือการคำนวณผ่านการสร้างแบบจำลองของระบบกักเก็บพลังงาน การสร้างแบบจำลองสามารถจำลองการทำงานการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็กในสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น พลังงานที่ใช้ในการยกพลังงานที่ได้จากการปล่อย เป็นต้น ซึ่งช่วยให้ทราบถึงลักษณะการทำงานของระบบ และสามารถคาดเดาการณ์การทำงานระบบในอนาคตได้ ความถูกต้องของผลการจำลองขึ้นกับการสร้างแบบจำลองระบบกักเก็บพลังงานให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงในทางปฏิบัติ ในบทนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของระบบกักเก็บพลังงาน โดยแบ่งเป็นการคำนวณการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็กในแนวตั้ง และการคำนวณผลการกักเก็บพลังงานที่ได้ วิเคราะห์ระบบกักเก็บพลังงานในแบบต่าง ๆ นำเสนอผลการจำลองการกักเก็บพลังงานโดยการหาค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ระบบประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด

4.2 พารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในผลการจำลองของระบบกักเก็บพลังงาน

4.2.1 ผลการจำลองขนาดและมวลของลวดสลิง

ลวดสลิงมีความจำเป็นต่อระบบกักเก็บพลังงานนี้มาก มวลของก้อนเหล็กมีมวลที่หนักมากและมีขนาดใหญ่ จึงต้องพิจารณาและให้ความสำคัญกับขนาดของสลิงและมวลของลวดสลิงเพื่อช่วยในการยกมวลก้อนเหล็กขึ้นอย่างปลอดภัยและมั่นคง ค่าพารามิเตอร์ของลวดสลิงที่ยกก้อนเหล็กในการจำลองทุกกรณีจะเลือกใช้การจำลองขนาด 250 และ 500 ตัน ในทุกกรณี เนื่องจากขนาดโหนดแต่ละโหนดมีขนาดโหนดที่เป็นขนาดกลางและใหญ่จึงได้ยกตัวอย่างน้ำหนัก 2 กรณีนี้ ถ้าการจำลองใช้ขนาดที่เล็กกว่านี้อาจจะมองไม่เห็นภาพการทำงานและการเปลี่ยนแปลงของระบบ เพื่อให้ค่าที่ได้ออกมาสามารถเปรียบเทียบกันให้เห็นชัดเจน ขนาดสลิง น้ำหนักสลิง แรงดึงสูงสุด แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ลวดสลิงยกก้อนเหล็กขนาด 250 ตัน

Parameters	Value
Wire rope diameter (d_w)	126.25 mm
Length (L_s)	50 m
Mass Sling Wire	65 kg/m
Minimum Breaking Load	12,262 kN
	1250 tons
Safety factor (sf)	5

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ลวดสลิงยกก้อนเหล็กขนาด 500 ตัน

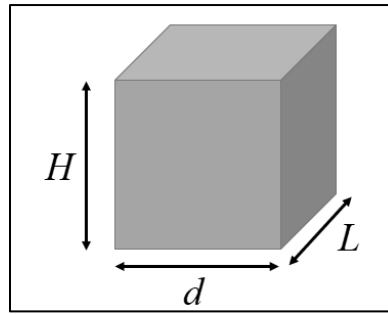
Parameters	Value
Wire rope diameter (d_w)	178.5 mm
Length (L_s)	50 m
Mass Sling Wire	130 kg/m
Minimum Breaking Load	24,525 kN
	2500 tons
Safety factor (sf)	5

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ลวดสลิง ขนาด 250 ตัน จะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางลวดสลิงขนาด 126.25 mm น้ำหนักที่ 65 kg/m แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ลวดสลิงขาด คือ 12,262 kN และขนาด 500 ตัน จะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางลวดสลิงขนาด 178.5 mm น้ำหนักที่ 130 kg/m แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ลวดสลิงขาด คือ 24,525 kN โดยใช้ค่าความปลอดภัยที่ 5 (Safety factor) [กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย, 2564]

4.2.2 มวลของก้อนเหล็กและผลการจำลองขนาด

ขนาดและมวลของวัตถุ

การกักเก็บพลังงานของระบบนี้จะมีปัจจัยขึ้นอยู่กับขนาดและน้ำหนักของวัตถุ เนื่องจากยิ่งวัตถุมีมวลมาก การกักเก็บพลังงานก็จะกักเก็บได้เพิ่มขึ้นไปด้วย ในงานวิจัยนี้ในหัวข้อวิทยานิพนธ์เลือกใช้เป็นน้ำหนักของก้อนเหล็กที่ใช้ในการยกขึ้นและปล่อยลงในระบบ



รูปที่ 4.1 ระยะเวลาของปริซึมสี่เหลี่ยม

เลือกใช้รูปทรงปริซึมสี่เหลี่ยม ดังนั้นปริมาตรของก้อนเหล็กปริซึมสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะ
ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$V = HdL \quad (4.1)$$

มวลของคอนกรีตจะได้จาก

$$m = \rho V \quad (4.2)$$

จากสมการที่ (4.1) จะได้ตั้งสมการที่ (4.3) และ (4.4)

$$d = \frac{V}{HL} \quad (4.3)$$

$$d = \frac{m}{HL\rho} \quad (4.4)$$

โดยที่

V คือ ปริมาตรของคอนกรีต (m^3)

H คือ ความสูงของปริซึมสี่เหลี่ยม (m)

d คือ ความกว้างของปริซึมสี่เหลี่ยม (m)

L คือ ความยาวของปริซึมสี่เหลี่ยม (m)

m คือ มวลของวัตถุ (kg)

ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)

จากสมการขนาดของคอนกรีตจะแปรผันตรงกับมวลของเหล็ก การเลือกใช้ขนาด
ของก้อนเหล็กขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศหรือความต้องการการกักเก็บพลังงานในการใช้งานใน
พื้นที่นั้น ๆ

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 ที่ใช้สลิงยกน้ำหนักมวล 250 และ 500 ตัน ตามลำดับ จะได้ขนาดของก้อนเหล็กปริซึมสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ขนาดของก้อนเหล็กที่ใช้ยกในระบบ

น้ำหนัก (Ton)	กว้าง: d (m)	ยาว: L (m)	สูง: H (m)	ความหนาแน่นของเหล็ก (kg/m ³)
250	3.17	3.17	3.17	7,850
500	3.99	3.99	3.99	7,850

ก้อนเหล็กที่ออกแบบเป็นก้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้นจากตารางค่าความกว้าง ยาว และสูงมีค่าเท่ากัน ด้านทุกด้านจึงยาวเท่ากันหมด ส่วนสาเหตุที่ใช้ก้อนเหล็กแทนก้อนคอนกรีต เนื่องจากความหนาแน่นของคอนกรีต มีความหนาแน่นน้อยกว่าเหล็กประมาณ 3 เท่า ทำให้ความกว้าง ยาว และสูง มีระยะเพิ่มขึ้นทำให้ต้องใช้ขนาดพื้นที่ที่เยอะขึ้น ขนาดของก้อนคอนกรีต ปริซึมสี่เหลี่ยมจัตุรัส แสดงดังตารางที่ 4.4

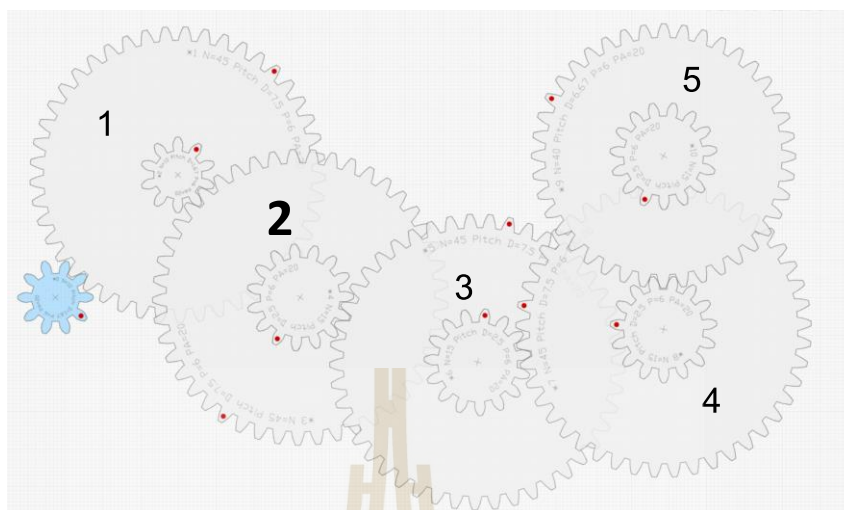
ตารางที่ 4.4 ขนาดของก้อนคอนกรีตที่ใช้ยกในระบบ

น้ำหนัก (Ton)	กว้าง: d (m)	ยาว: L (m)	สูง: H (m)	ความหนาแน่นของคอนกรีต (kg/m ³)
250	4.71	4.71	4.71	2,400
500	5.93	5.93	5.93	2,400

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 ขนาดน้ำหนัก 250 ตัน ระยะของก้อนคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากก้อนเหล็กประมาณ 1.54 m ของค่าความกว้าง ความยาวและความสูง ขนาดน้ำหนัก 500 ตัน ระยะของก้อนคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากก้อนเหล็กประมาณ 1.94 m ของค่าความกว้าง ความยาวและความสูง ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก จึงเลือกใช้วัสดุที่เป็นเหล็กมาคิดในระบบการจำลองกักเก็บพลังงาน

4.2.3 ระบบส่งกำลังเชิงกลที่ใช้ในระบบ

ในส่วนนี้จะใช้ระบบเกียร์ทดรอบ เพื่อช่วยในการลดความเร็วรอบจากมอเตอร์ให้ช้าลงในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ต้องการ ในขณะที่เดียวกันก็เพิ่มความสามารถในการรับแรงบิดที่มากขึ้นตามไปด้วย ในส่วนนี้ผู้ออกแบบได้ออกแบบ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ระบบส่งกำลังเชิงกลในระบบ ratio 486 : 1

จากรูปที่ 4.2 เฟืองสีฟ้าจะเป็นเฟืองที่มาจากมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนเฟืองที่ 1 ถึง 4 จะมีอัตราทดรอบที่ต่างกัน ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 อัตราทดรอบเฟืองในระบบ

หมายเลข	จำนวนฟันเฟือง (ใหญ่ : เล็ก)	อัตราส่วน	ความเร็วรอบ (rpm)
มอเตอร์	10	1 : 1	1,500
1	45 : 10	4.5 : 1	333.33
2	45 : 15	20.25 : 1	74.1
3	45 : 15	60.75 : 1	24.7
4	45 : 15	182.25 : 1	8.2
5	45 : 15	486 : 1	3.1

จากตารางที่ 4.5 ออกแบบระบบกำลังเชิงกล ได้อัตราทดรอบที่ 486 : 1 จะทำให้จากมอเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วทางด้านอินพุต 1500 rpm ออกทางด้านเอาต์พุตเพียง 3.1 rpm การออกแบบอัตราทดรอบนี้อ้างอิงจากความเร็วการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็กเทียบกับความเร็วรอบมอเตอร์ เพื่อให้ทำงานสอดคล้องกัน

4.2.4 พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้จากโพลดิโซล่าเซลล์

การคาดเดาโพลดิโซล่าเซลล์เพื่อนำมาจำลองผลการทดลอง มีความยากในการคาดเดาพลังงานที่โซล่าเซลล์จะผลิตได้ เนื่องจากในอนาคตสภาพอากาศจะมีฝน มีเมฆมาก หรือแดดจัดในแต่ละวันที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงสามารถคาดเดาพลังงานแสงแดดเฉลี่ยในแต่ละเดือนที่จังหวัดนครราชสีมาดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความเข้มแสงของระบบโซล่าเซลล์ในจังหวัดนครราชสีมา

	Horizontal Global kWh/m ² /day	Coll. plane kWh/m ² /day	System output kWh/day	System output kWh/month
January	4.44	5.32	26,976	836,249
February	4.68	5.23	26,482	741,499
March	5.18	5.43	27,501	852,543
April	5.46	5.32	26,938	808,152
May	5.41	4.97	25,168	708,201
June	5.76	5.11	25,911	777,326
July	5.23	4.71	23,876	740,160
August	4.58	4.35	22,047	683,457
September	4.89	4.98	25,223	756,686
October	4.34	4.74	23,992	743,763
November	3.83	4.38	22,201	666,044
December	4.09	4.96	25,146	779,515
Year	4.82	4.96	25,111	9,165,595

ที่มา : <https://www.pvsyst.com/help/index.html>

ใช้ข้อมูลจากจำนวนเฉลี่ยรายเดือนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละเดือน โดยเฉลี่ยสำหรับเดือนนั้นตลอดระยะเวลา 19 ปี (ค.ศ.1996 - ค.ศ.2015) : Meteonorm 8.0 (1996-2015), sat=100%

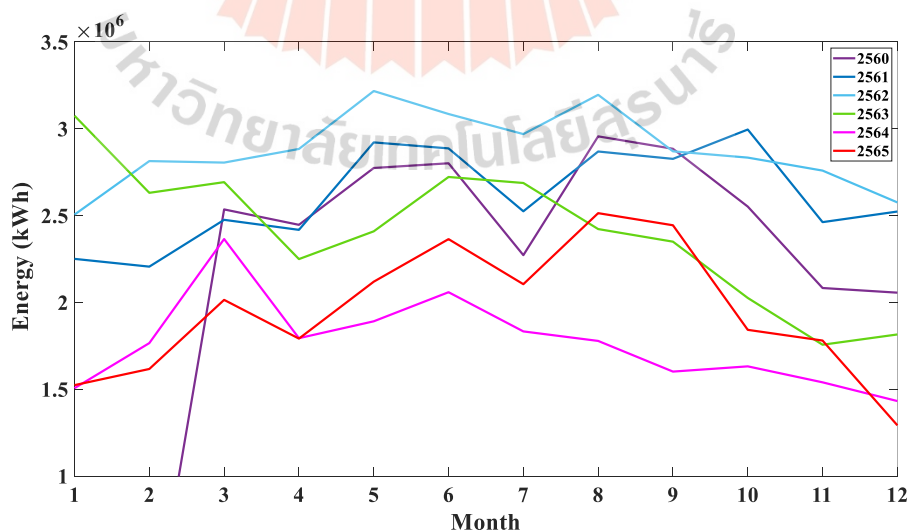
4.2.5 โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมีโหลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือนอย่างมาก จึงได้นำโหลดการใช้ไฟมาจำลองในระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อนำมาวิเคราะห์ในการลดการใช้พลังงานและประหยัดพลังงาน ซึ่งโหลดการใช้ไฟของมหาวิทยาลัยในทุก ๆ ปีจะไม่เท่ากัน เนื่องจากมีการใช้

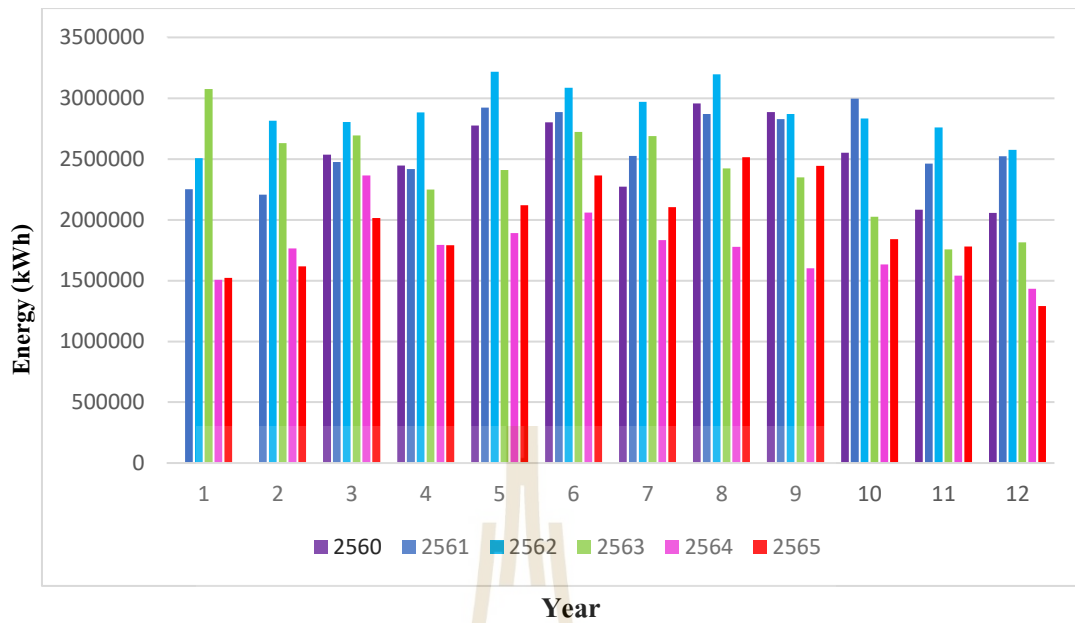
พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเดือนละ 3-20% ในแต่ละเดือนของปี เนื่องจากจำนวนอาคารเรียนและจำนวนนักศึกษาที่เพิ่มสูงขึ้น แสดงการใช้พลังงานในตารางที่ 4.7 ปีที่ไม่เกิด Covid-19 การใช้พลังงานไฟฟ้ายังมีการใช้ปกติ (พ.ศ.2560-2562) ส่วนปีที่มีโควิดมีการใช้พลังงานที่น้อยลงจากเดิม (พ.ศ.2563-2565) อัตราการคิดค่าไฟของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นการคิดค่าไฟแบบ TOU (Time of Use) ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.7 การใช้พลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

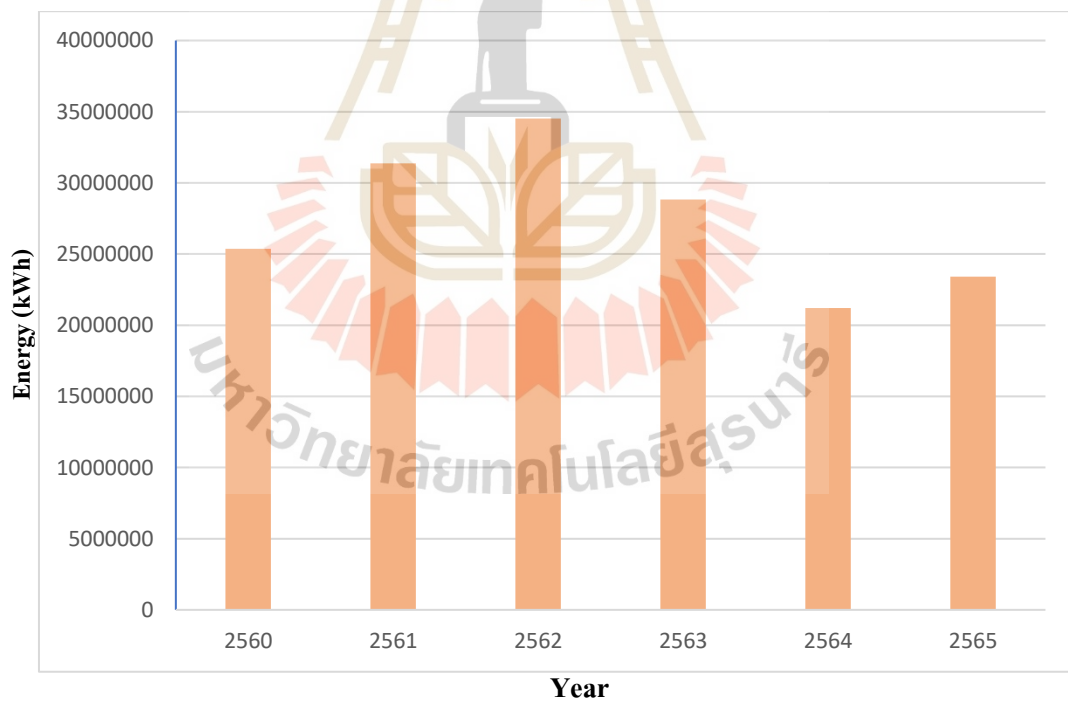
	Energy of 2560 (kWh)	Energy of 2561 (kWh)	Energy of 2562 (kWh)	Energy of 2563 (kWh)	Energy of 2564 (kWh)	Energy of 2565 (kWh)
January	-	2,250,848	2,505,734	3,075,296	1,506,155	1,523,635
February	-	2,206,116	2,814,090	2,631,221	1,765,785	1,616,725
March	2,535,712	2,475,712	2,805,358	2,692,791	2,365,160	2,014,715
April	2,446,912	2,417,971	2,883,906	2,249,596	1,794,205	1,791,615
May	2,774,300	2,921,701	3,217,583	2,409,435	1,891,255	2,119,390
June	2,801,400	2,887,142	3,085,234	2,722,555	2,058,875	2,364,605
July	2,272,157	2,524,896	2,969,546	2,687,878	1,833,090	2,105,030
August	2,956,480	2,869,245	3,195,705	2,422,545	1,778,270	2,514,185
September	2,884,865	2,826,775	2,870,235	2,349,925	1,601,670	2,444,430
October	2,551,960	2,995,745	2,834,065	2,025,815	1,631,825	1,842,095
November	2,083,051	2,462,431	2,759,279	1,756,396	1,539,785	1,780,450
December	2,056,195	2,523,495	2,576,048	1,815,570	1,432,005	1,292,140



รูปที่ 4.3 พลังงานการใช้ไฟ 12 เดือนในแต่ละปี



รูปที่ 4.4 แผนภูมิภาพแสดงพลังงาน 12 เดือนในแต่ละปี



รูปที่ 4.5 พลังงานที่ใช้ทั้งหมดในแต่ละปี

จากรูปที่ 4.5 แผนภูมิภาพแสดงให้เห็นว่า ในปี 2560 ถึงปี 2562 มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ทุก ๆ ปีตามลำดับชั้น แต่จากปี 2563 ถึงปี 2565 มีการใช้พลังงานลดลงกว่าปีก่อนหน้า

เนื่องจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเรียน จากเรียนในห้องเป็นเรียนแบบออนไลน์ สาเหตุเกิดจากสถานการณ์ Covid-19 ดังนั้นการจำลองผลของระบบกักเก็บนี้ จะนำปีที่ใช้พลังงานไฟมากที่สุดและใช้ในการเรียนปกติ คือ ปี 2562 มาใช้ในการจำลองตลอดการจำลองในโพลิตมมหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าแต่ละเดือนของปี 2560-2565 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

	Energy between 2560 and 2561	Energy between 2561 and 2562	Energy between 2562 and 2563	Energy between 2563 and 2564	Energy between 2564 and 2565
January	-	11.32%	22.73%	-51.02%	1.16%
February	-	27.55%	-6.50%	-32.89%	-8.44%
March	-2.37%	13.32%	-4.01%	-12.16%	-14.81%
April	-1.18%	19.27%	-21.99%	-20.24%	-0.14%
May	5.31%	10.13%	-25.12%	-21.50%	12.06%
June	3.06%	6.86%	-11.76%	-24.38%	14.84%
July	11.12%	17.61%	-9.48%	-31.80%	14.83%
August	-2.95%	11.38%	-24.19%	-26.59%	41.38%
September	-2.01%	1.54%	-18.13%	-31.84%	52.61%
October	17.39%	-5.40%	-28.52%	-19.45%	12.88%
November	18.21%	12.60%	-36.35%	-12.33%	15.62%
December	22.73%	2.08%	-29.52%	-21.12%	-9.76%
Average	6.93%	10.69%	-16.07%	-25.44%	-11.02%

ตารางที่ 4.8 จะเป็นการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างปีต่อปีหรือปีก่อนหน้าเทียบกับปีถัดมา จะเห็นการเปลี่ยนแปลง จากปี 2560 ไป 2561 การใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 6.93% เฉลี่ยตลอดทั้งปี จากปี 2561 ไป 2562 การใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 10.69% เฉลี่ยตลอดทั้งปี แต่พอหลังจากปี 2562 เกิดเหตุการณ์ Covid-19 จึงทำให้จากปี 2562 ไป 2563, 2563 ไป 2564 และ 2564 ไป 2565 ค่าการใช้พลังงานลดลงอย่างมากจะลดลงอยู่ที่ -16.07%, -25.44% และ -11.02% ตามลำดับ

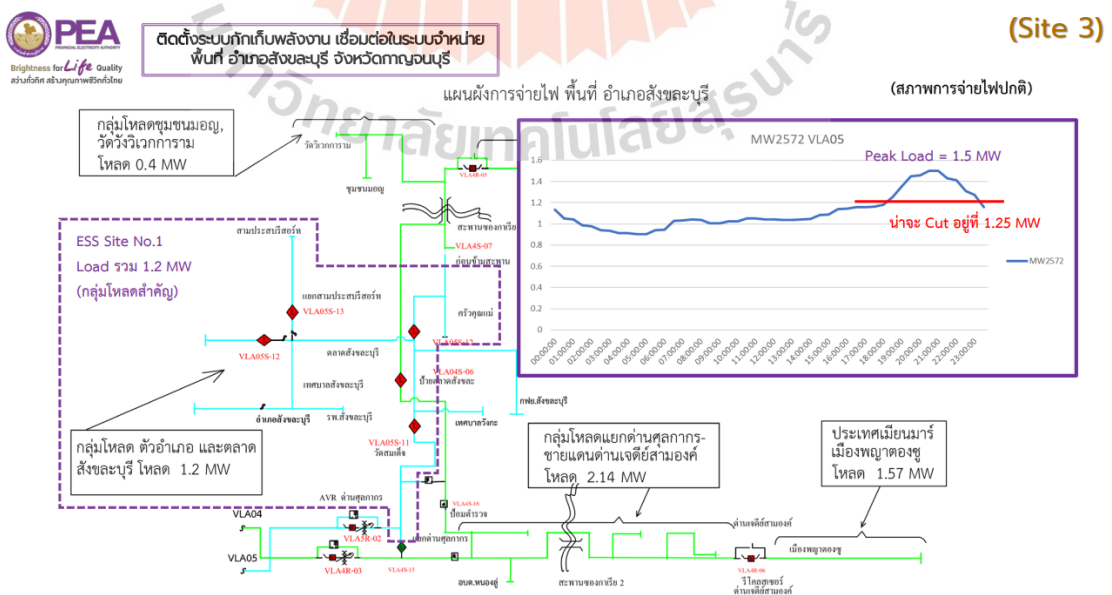
ตารางที่ 4.9 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าในเดือนกันยายนของปี 2560-2565 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

	กันยายน 2560	กันยายน 2561	กันยายน 2562	กันยายน 2563	กันยายน 2564	กันยายน 2565
Energy (kWh)	2,884,865	2,826,775	2,870,235	2,349,925	1,601,670	2,444,430

เนื่องจากในปี 2565 ในเดือนกันยายนเริ่มมีการเรียนการสอนในมหาวิทยาลัยปกติจากปีก่อน ๆ จึงได้ยกตัวอย่างของเดือนกันยายนมาใช้ในการคำนวณระบบการกักเก็บพลังงานนี้ จากตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าในปี 2560-2562 มีโหลดการใช้ไฟที่สูงใกล้เคียงกันในทุก ๆ ปี แต่พอมาในปี 2563-2565 โหลดการใช้ไฟลดลงอย่างมาก เนื่องจากการเรียนการสอนเปลี่ยนแปลงไปตามสถานการณ์ Covid-19 การคาดการณ์โหลดในอนาคตจึงคาดการณ์ได้ยาก เพื่อที่จะให้ระบบมีขนาดที่ครอบคลุมและเหมาะสม ดังนั้นในการจำลองระบบ จึงได้ยกตัวอย่างโหลดปี 2562 ของเดือนกันยายนมาจำลองในระบบกักเก็บพลังงาน

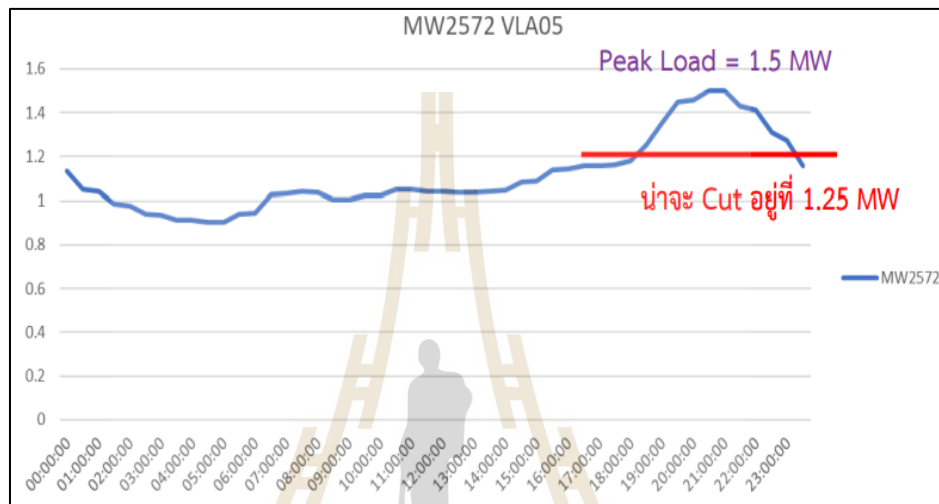
4.2.6 โหลดการใช้ไฟฟ้าแหล่งชุมชนขนาดกลางและขนาดใหญ่

ในส่วนนี้ได้นำกลุ่มโหลดพื้นที่อำเภอสังขละบุรี จังหวัดกาญจนบุรี ในพื้นที่นี้ปัจจุบันมีระบบจำหน่าย 2 วงจร มีโหลดสำคัญที่จำเป็นต้องการระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อแก้ปัญหาไฟดับบ่อยครั้งเนื่องจากสายจำหน่ายมีระยะทางไกลและปัญหาเรื่องความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงในช่วงเวลาหลังเลิกงาน ทำให้ช่วงเวลานั้นมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดแทบทุกวัน



รูปที่ 4.6 วงจร Single line ของกลุ่มโหลดตัวอำเภอและตลาดสังขละบุรี โหลด 1 MW

จากรูปที่ 4.6 เป็นกลุ่มโหลดตัวอำเภอลาดสังขละบุรี โหลดขนาด 1 MW ทางกรไฟฟ้ามีแผนที่จะติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน เชื่อมต่อในระบบจำหน่าย เพื่อแก้ปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้องในพื้นที่ และต้องการตัดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละวันที่ประมาณ 1.25 MW ดังรูปที่ 4.7 ดังนั้นได้สังเกตเห็นความสำคัญของโหลดชุมชนขนาดกลางนี้ จึงได้นำโหลดมาจำลองในระบบกักเก็บพลังงานโดยแรงโน้มถ่วง เพื่อนำมาวิเคราะห์ความเหมาะสมของระบบ



รูปที่ 4.7 กำลังงานที่ใช้จริงใน 1 วันของกลุ่มโหลดตัวอำเภอลาดสังขละบุรี

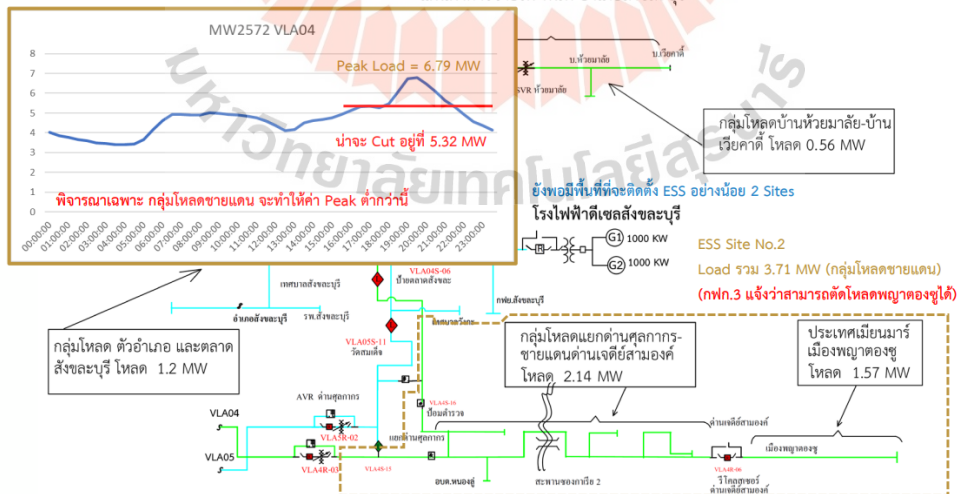


ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน เชื่อมต่อในระบบจำหน่าย พื้นที่ อำเภอลาดสังขละบุรี จังหวัดกาญจนบุรี

(Site 3)

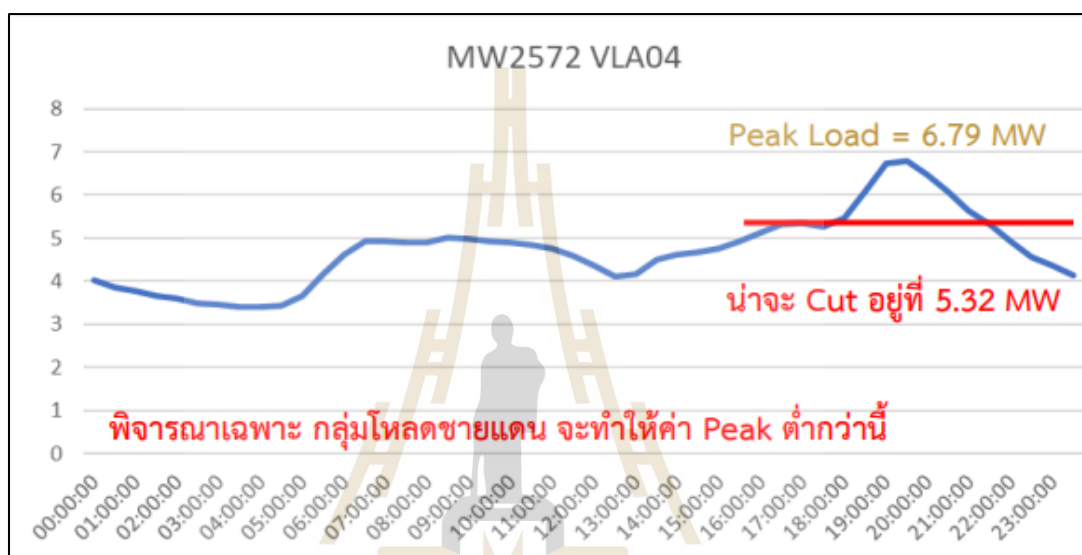
แผนผังการจ่ายไฟ พื้นที่ อำเภอลาดสังขละบุรี

(สภาพการจ่ายไฟปกติ)



รูปที่ 4.8 วงจร Single line ของกลุ่มโหลดชายแดน โหลดขนาด 5 MW

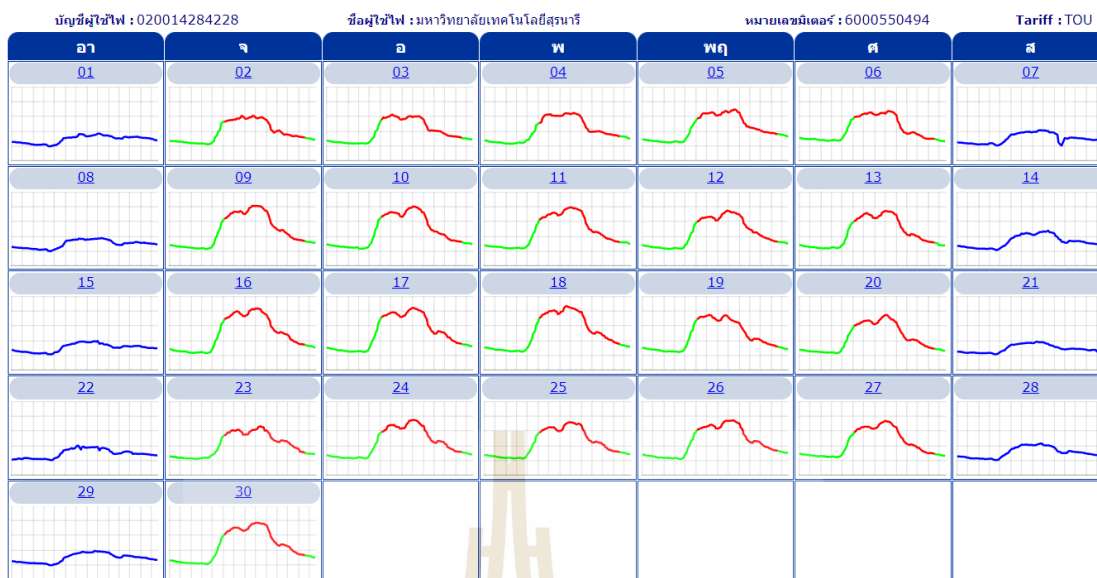
จากรูป 4.8 เป็นกลุ่มโหลดชายแดน โหลดขนาด 5 MW ทางกรไฟฟ้ามีแผนที่จะติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน เชื่อมต่อในระบบจำหน่าย เพื่อแก้ปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้องในพื้นที่ และต้องการตัดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละวันที่ประมาณ 5.32 MW ดังรูปที่ 4.9 ดังนั้นได้เล็งเห็นความสำคัญของโหลดชุมชนขนาดใหญ่ จึงได้นำโหลดมาจำลองในระบบกักเก็บพลังงาน โดยแรงโน้มถ่วง เพื่อนำมาวิเคราะห์ความเหมาะสมของระบบ



รูปที่ 4.9 กำลังงานที่ใช้จริงใน 1 วันของกลุ่มโหลดชายแดน

4.3 ผลการจำลองระบบกักเก็บพลังงานของโหลดมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นำโหลดการใช้ไฟของมหาวิทยาลัยในเดือนกันยายนปี 2562 มาใช้ในการจำลองระบบกักเก็บพลังงานในโหมดรายวันและโหมดรายสัปดาห์ จากโหลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้มีการเสียค่าไฟแบบอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU) การจำลองของโหลดมหาวิทยาลัยนี้ จะจำลอง 2 กรณี คือ แบบรายวันและรายสัปดาห์ เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นว่าการใช้ระบบกักเก็บพลังงานในลักษณะแบบไหน ถึงคุ้มค่าและเหมาะสมกว่ากัน



รูปที่ 4.10 ข้อมูลการใช้ไฟในเดือนกันยายน 2562

จากรูปที่ 4.10 กราฟรายเดือนของเดือนกันยายนจะสังเกตเห็นว่า กราฟจะมี 3 สี คือ สีแดง ช่วงเวลา Peak, สีเขียวช่วงเวลา Off Peak และสีน้ำเงินช่วงเวลา Holiday

เนื่องจากว่าคิดค่าไฟแบบ TOU จึงแบ่งช่วงเวลาดังนี้

Peak : เวลา 09.00 น. – 22.00 น. วันจันทร์ - ศุกร์
 Off Peak : เวลา 22.00 น. – 09.00 น. วันจันทร์ - ศุกร์
 Holiday : เวลา 00.00 น. – 24.00 น. วันเสาร์ - อาทิตย์ (และวันหยุดราชการ)

Peak คือ ช่วงที่ค่าไฟฟ้ามีราคาสูง เนื่องจากประเทศมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง การไฟฟ้าต้องจัดหาเชื้อเพลิงทุกชนิด ทั้งราคาสูงและราคาต่ำในการผลิตไฟฟ้า เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการในช่วงนี้

Off-Peak คือ ช่วงที่ค่าไฟฟ้ามีราคาต่ำ เนื่องจากประเทศมีความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ โรงไฟฟ้าสามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงที่มีราคาต่ำกว่ามาผลิตไฟฟ้าได้ จึงทำให้ต้นทุนค่าไฟฟ้าในช่วง Off-Peak ต่ำกว่าช่วง Peak

การคิดค่าไฟในส่วนนี้ คิดในรูปแบบของ (Time of Use Rate : TOU) เลือกใช้ประเภทที่ 4 กิจกรรมขนาดใหญ่ สำหรับการใช้ไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ อุตสาหกรรม ส่วนราชการ สำนักงาน หรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น รัฐวิสาหกิจ สถานทูต สถานที่ทำการของหน่วยงานราชการต่างประเทศ สถานที่ทำการขององค์การระหว่างประเทศ หรืออื่น ๆ ตลอดจนบริเวณที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความต้องการพลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุดในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ตั้งแต่

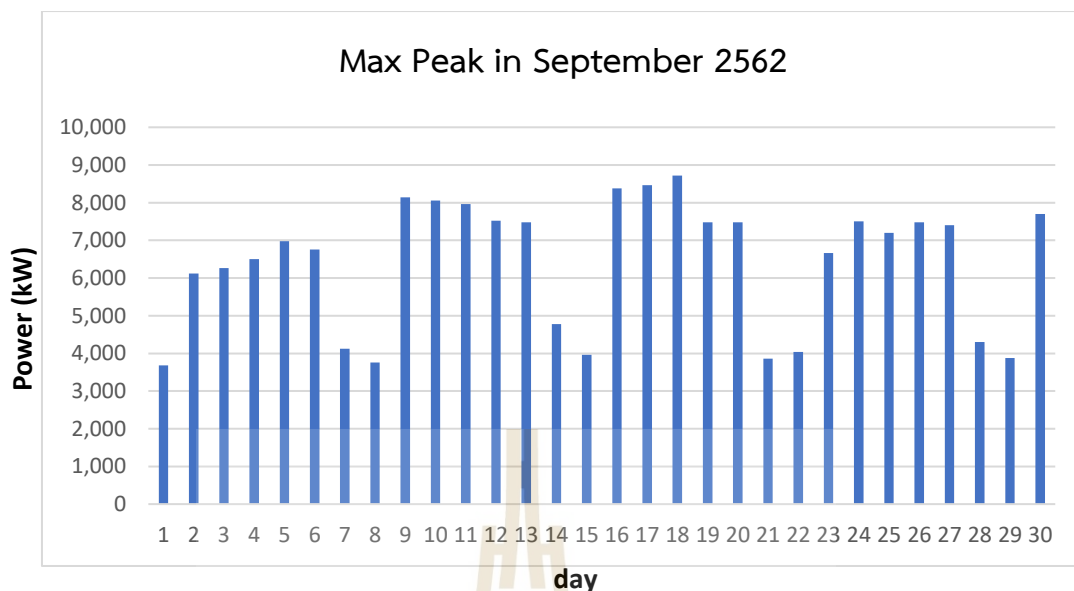
1,000 กิโลวัตต์ขึ้นไป หรือมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3 เดือน ก่อนหน้า เกิน 250,000 หน่วยต่อเดือน โดยต้องผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว ได้เข้าเงื่อนไขอัตราการใช้ไฟตามตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 อัตราค่าไฟฟ้า TOU ประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่

TOU				
	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (bath/kW)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (bath/kW)		ค่าบริการ (bath/month)
	Peak	Peak	Off Peak	
แรงดันตั้งแต่ 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	74.14	4.1025	2.549	312.24
แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์	132.93	4.1839	2.6037	312.24
แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์	210	4.3297	2.6369	312.24

ตารางที่ 4.11 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละวันของเดือนกันยายน 2562

อาทิตย์ (kW)	จันทร์ (kW)	อังคาร (kW)	พุธ (kW)	พฤหัสบดี (kW)	ศุกร์ (kW)	เสาร์ (kW)
1	2	3	4	5	6	7
3,680	6,120	6,260	6,500	6,980	6,760	4,120
8	9	10	11	12	13	14
3,760	8,140	8,060	7,960	7,520	7,480	4,780
15	16	17	18	19	20	21
3,960	8,380	8,460	8,720	7,480	7,480	3,860
22	23	24	25	26	27	28
4,040	6,660	7,500	7,200	7,480	7,400	4,300
29	30					
3,880	7,700					

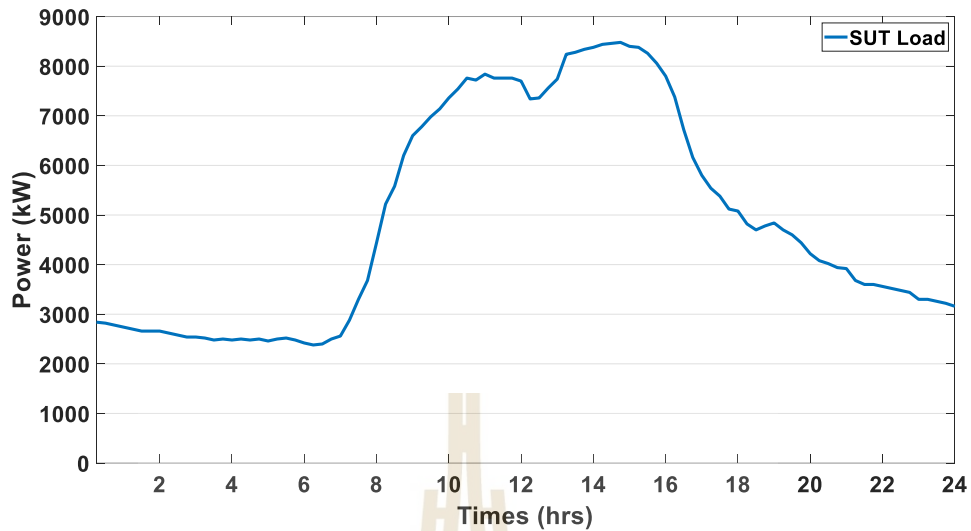


รูปที่ 4.11 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละวันของเดือนกันยายน 2562

จากตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.11 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละวันของเดือนกันยายน 2562 ในวันธรรมดาจะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สูงกว่าในวันเสาร์และอาทิตย์เกือบ 2 เท่า เนื่องจากวันธรรมดามีการเรียนการสอนที่ใช้ไฟอย่างมากในแต่ละวัน

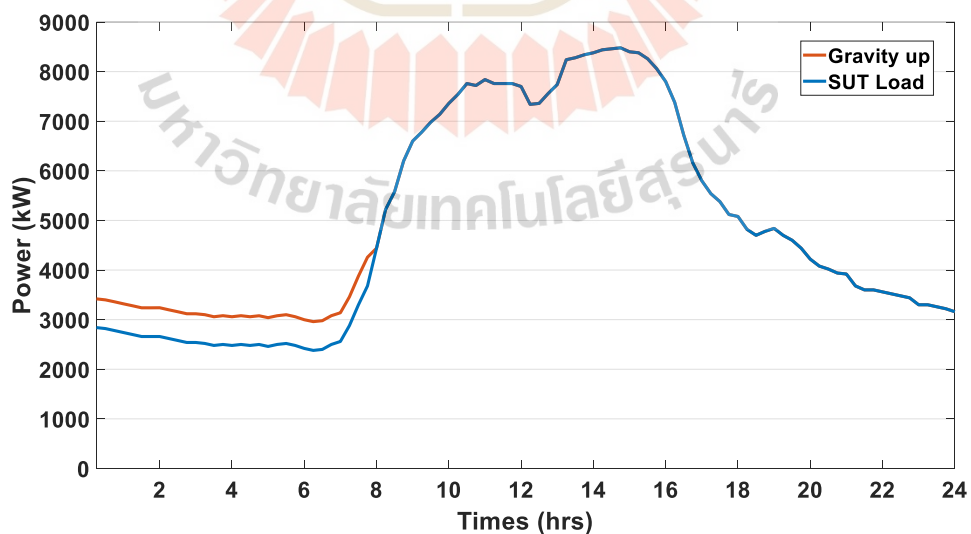
4.3.1 ผลการจำลองระบบกักเก็บพลังงานในโหมดรายวัน

ในกรณีนี้จะยกตัวอย่างวันในเดือนกันยายน 2562 มาเพียง 1 วัน เนื่องจากแต่ละวันของเดือนกันยายน ช่วงวันจันทร์ถึงวันศุกร์จะมีลักษณะโหลดการใช้ไฟที่ไม่แตกต่างกันหรือแทบจะเหมือนกัน และจะแบ่งการกักเก็บพลังงานในโหมดรายวันเป็น 2 กรณี คือ 1. แบบไม่มีระบบโซล่าเซลล์ในระบบและ 2. แบบมีระบบโซล่าเซลล์ในระบบ



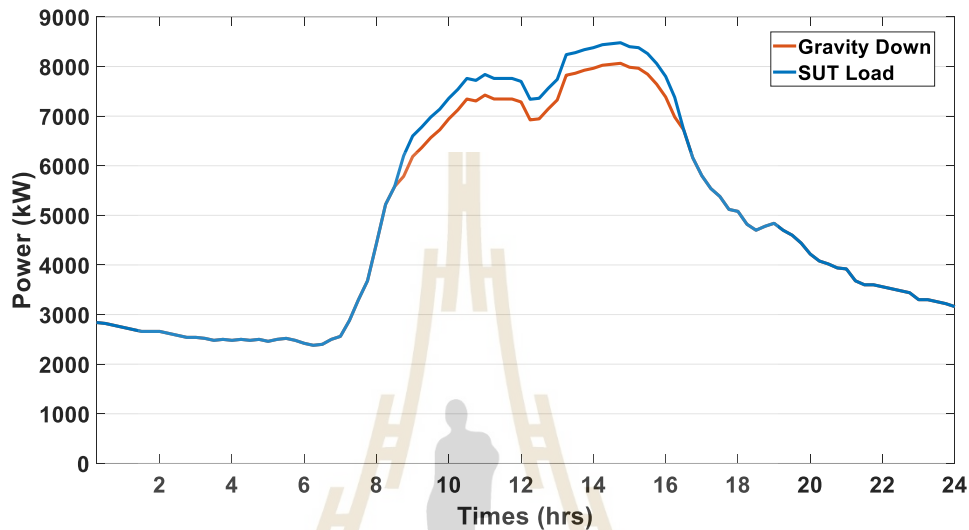
รูปที่ 4.12 กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ใน 1 วัน (16 กันยายน 2562)

กรณีไม่มีระบบโซลาร์เซลล์ (250 ตัน) จะยกก้อนเหล็กกักเก็บพลังงานในช่วงที่มีการใช้พลังงานไฟน้อยและมีอัตราค่าไฟอยู่ในช่วงที่ถูกลง (Off-Peak) จากรูปที่ 4.12 จากเส้นสีน้ำเงินจะเห็นช่วงเวลา 00.00 น. ถึง 08.00 น. จะมีอัตราการใช้กำลังไฟที่ต่ำกว่าช่วงเวลาอื่น และอยู่ในช่วงของอัตราค่าไฟที่ถูกลงอีกด้วย จึงได้กักเก็บพลังงานหรือยกก้อนเหล็กขึ้นไปกักเก็บด้านบนในช่วงเวลาดังกล่าว แสดงกราฟดังรูปที่รูป 4.13



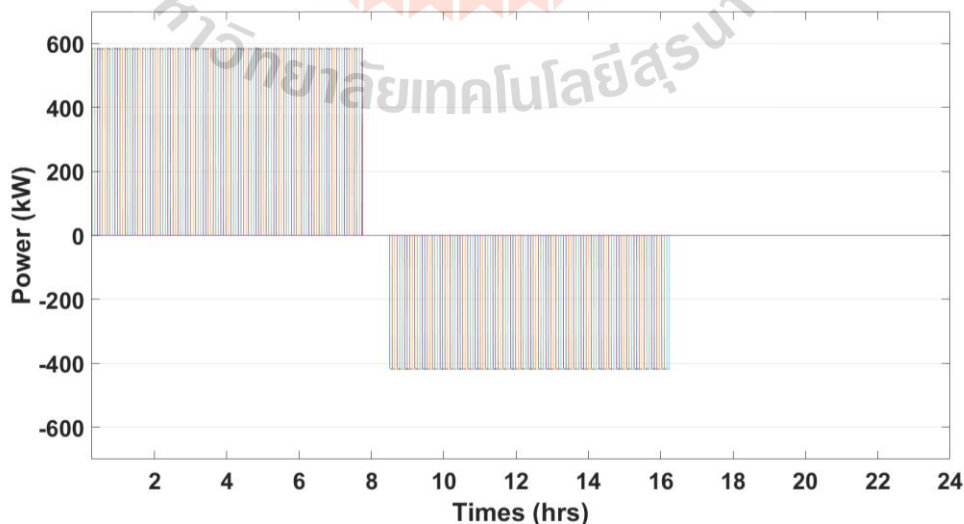
รูปที่ 4.13 กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกักเก็บพลังงาน (16 กันยายน 2562)

จากรูปที่ 4.13 เส้นสีส้มจะสูงกว่าเส้นสีน้ำเงิน เนื่องจากการกักเก็บพลังงานในช่วงเวลานั้น ยกก้อนเหล็กขึ้นไปกักเก็บที่มีขนาดก้อนละ 250 ตัน จึงทำให้กราฟในช่วงเวลานั้นยกสูงขึ้น แล้วจะนำก้อนเหล็กมาปล่อยลงในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟมาก เพื่อให้มีค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าลดลง แสดงดังรูปที่ 4.14



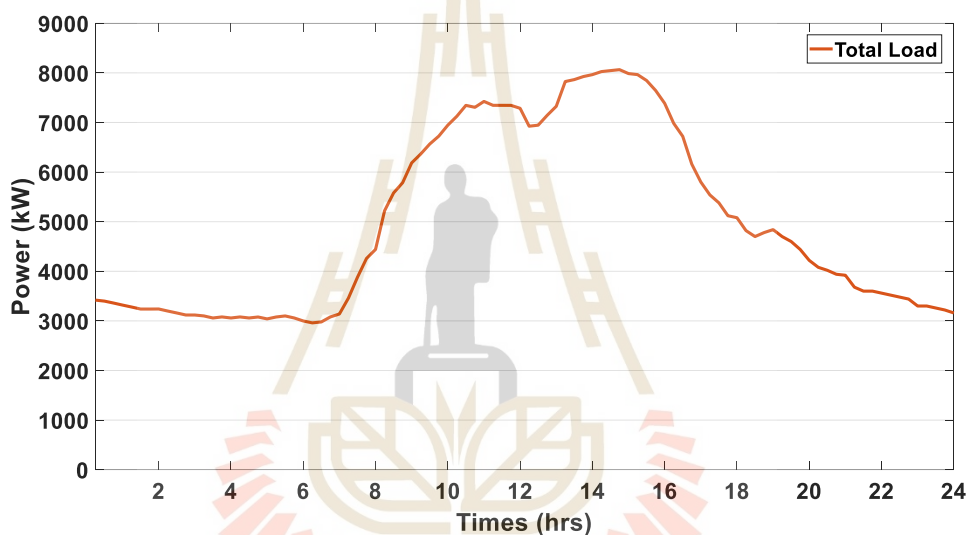
รูปที่ 4.14 กำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการกักเก็บพลังงาน (16 กันยายน 2562)

จากกราฟได้ปล่อยพลังงานออกมาในช่วงเวลา 09.00 น.-16.00 น. เนื่องจากช่วงเวลานั้นมีโหลดการใช้ไฟที่เพิ่มสูงมาก จึงได้ทำการปล่อยในช่วงเวลานั้น เพื่อลดโหลดและลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดลงมา จากกราฟเส้นสีน้ำเงินลดลงมาเป็นกราฟเส้นสีส้ม



รูปที่ 4.15 กำลังงานที่ใช้ในการยกและได้จากการปล่อยของก้อนเหล็กแต่ละก้อน

รูปที่ 4.15 แสดงถึงกำลังงานที่ใช้ในการกักเก็บก้อนเหล็กแต่ละก้อน และกำลังงานที่ได้จากการปล่อยลงในแต่ละก้อน ในการยกขึ้นและปล่อยลงจะใช้จำนวนก้อนเหล็กที่เท่ากัน เพราะออกแบบระบบให้กักเก็บแล้วนำไปใช้ให้หมดวันต่อวัน ดังนั้นจากรูปที่ 4.15 จำนวนที่ยกขึ้นทั้งหมด 112 ก้อน และปล่อยลง 112 ก้อนเช่นกัน ใช้กำลังงานในการยกประมาณ 580 kW และใช้พลังงานอยู่ที่ 40.38 kWh ในการยก 1 ก้อน ได้กำลังงานจากการปล่อยลง 415 kW และได้พลังงานอยู่ที่ 28.92 kWh ในการปล่อย 1 ก้อน พลังงานที่ใช้และพลังงานที่ได้จะไม่เท่ากัน เนื่องจากคิวดประสิทธิภาพการสูญเสียของระบบเพิ่มเข้ามา ดังรูปที่ 4.16 เป็นโพลตการใช้กำลังงานใหม่หลังจากใช้ระบบกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 4.16 กำลังงานโพลตใหม่หลังจากใช้ระบบกักเก็บพลังงาน

ตารางที่ 4.12 พารามิเตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานขนาด 250 ตัน

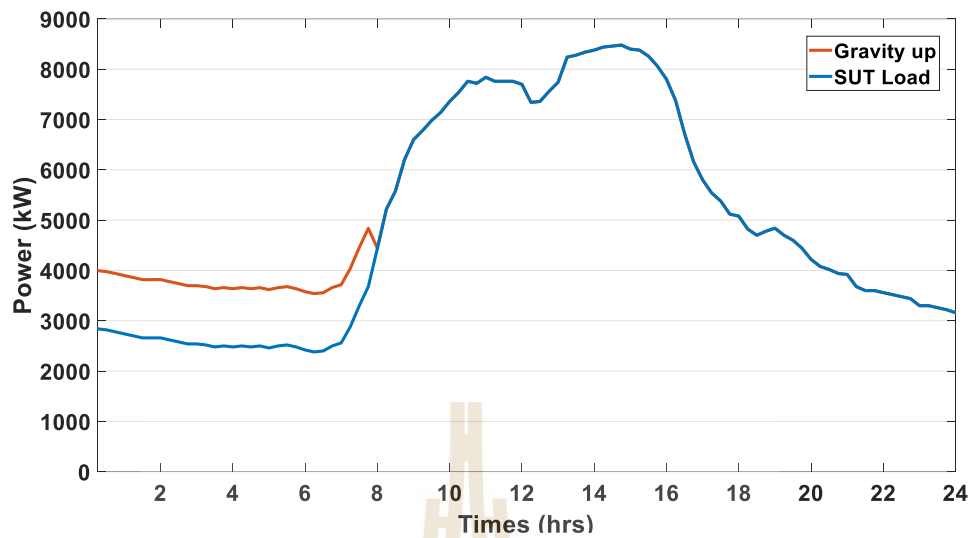
Parameters			
Mass	250 tons	Iron ingot volume	31.85 m ³
Total high	50 m	Frontal area	10.05 m ²
Iron ingot density	7850 kg/m ³	Gearbox eff	0.92
Air density	1.2 kg/m ³	Motor eff	0.92
Speed	0.2 m/s	Gear ratio	486 : 1
Acceleration	0.1 m/s ²	Number of Iron ingot	112

ตารางที่ 4.13 กำลังงานและพลังงานที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 250 ตัน

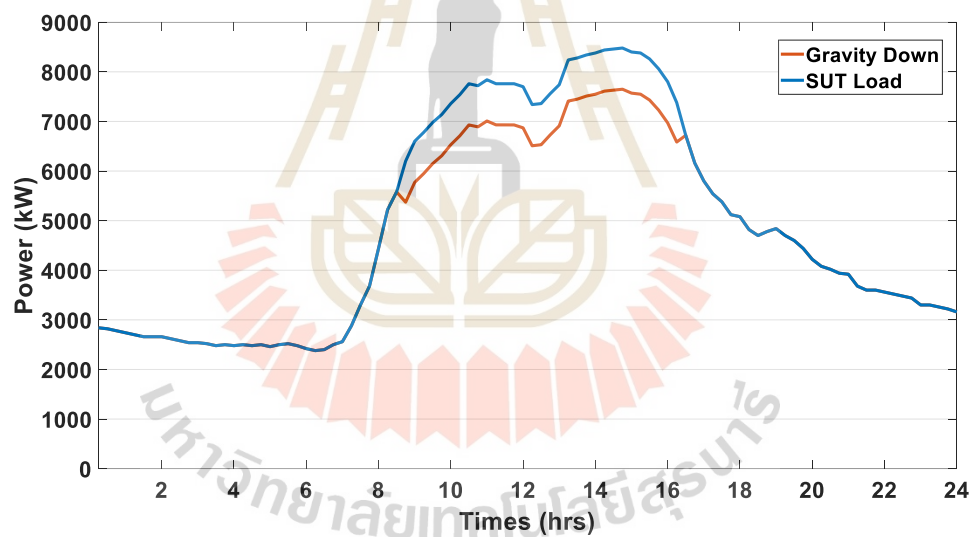
Result	
โหลดปกติ	117.68 MWh
โหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	118.95 MWh
พลังงานที่สูญเสีย	4,522 kWh
พลังงานที่ได้จากการปล่อย	3,239 kWh
ค่าไฟของโหลดปกติ	420,289 บาท
ค่าไฟของโหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	424,849 บาท

จากตารางที่ 4.12 เป็นค่าพารามิเตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานขนาด 250 ตัน ที่ใช้ในการคำนวณกำลังงานและพลังงานของระบบกักเก็บพลังงาน โดยที่จะกำหนดค่าต่าง ๆ ให้คล้ายกันในทุกกรณี ยกเว้นจำนวนก้อนเหล็กที่ยกได้ เพื่อที่จะได้ผลการจำลองในแต่ละกรณีได้ชัดเจน และความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง จะอ้างอิงมาจากความเร็วในการเคลื่อนที่จริงของลิฟต์ คือ 0.2 m/s ดังตารางที่ 4.13 โหลดปกติใช้พลังงานที่ 117.68 MWh ใช้ระบบกักเก็บพลังงานในช่วงเช้าแล้วปล่อยมาใช้ในช่วงเที่ยง สามารถลดพีคได้ ประมาณ 400 kW แต่โหลดหลังการใช้ระบบกักเก็บพลังงานใช้พลังงานที่ 118.95 MWh ซึ่งมีค่ามากกว่าโหลดปกติที่ไม่มีระบบกักเก็บพลังงานอยู่ 1.27 MWh ค่าส่วนต่างนี้มาจากการยกก้อนเหล็กขึ้นและปล่อยลงได้ค่าพลังงานที่ไม่เท่ากัน แต่จำนวนก้อนที่ยกและปล่อยเท่ากัน โดยมีการคิดประสิทธิภาพการสูญเสียของระบบทั้งหมดประมาณ 30% จึงทำให้ระบบมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 1.27 MWh ส่วนค่าใช้จ่ายของโหลดปกติใช้อยู่ที่ 420,289 บาท ค่าไฟของโหลดหลังการใช้ระบบกักเก็บพลังงาน 424,849 บาท โหลดที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานจะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น 4,560 บาท โดยประมาณ ในกรณีนี้จะไม่คิดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า (บาท/kW) เนื่องจากเป็นโหลดแบบรายวันจึงไม่นำมาคิด จากผลลัพธ์ที่ได้ระบบกักเก็บพลังงานรูปแบบนี้ไม่เหมาะสมกับโหลดในลักษณะแบบนี้ เนื่องจากไม่สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าและลดค่าใช้จ่ายของโหลดได้ จึงทำให้ไม่คุ้มค่ากับการลงทุนติดตั้งทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ระบบกักเก็บในรูปแบบนี้สามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละวันได้แต่ยังไม่เพียงพอต่อผลลัพธ์ที่ต้องการได้

กรณีไม่มีระบบโซล่าเซลล์ (500 ตัน) จำลองการเพิ่มน้ำหนักให้หนักขึ้น ระบบใหญ่ขึ้น เพื่อดูแนวโน้มของโหลดและค่าใช้จ่ายในรูปแบบมหาวิทยาลัย จากเส้นสีน้ำเงินจะเห็นช่วงเวลา 00.00 น. ถึง 08.00 น. จะมีอัตราการใช้กำลังไฟที่ต่ำกว่าช่วงเวลาอื่น และอยู่ในช่วงของอัตราค่าไฟที่ถูก จึงทำให้กักเก็บพลังงานหรือยกก้อนเหล็กขึ้นไปกักเก็บด้านบน ดังรูปที่ 4.17

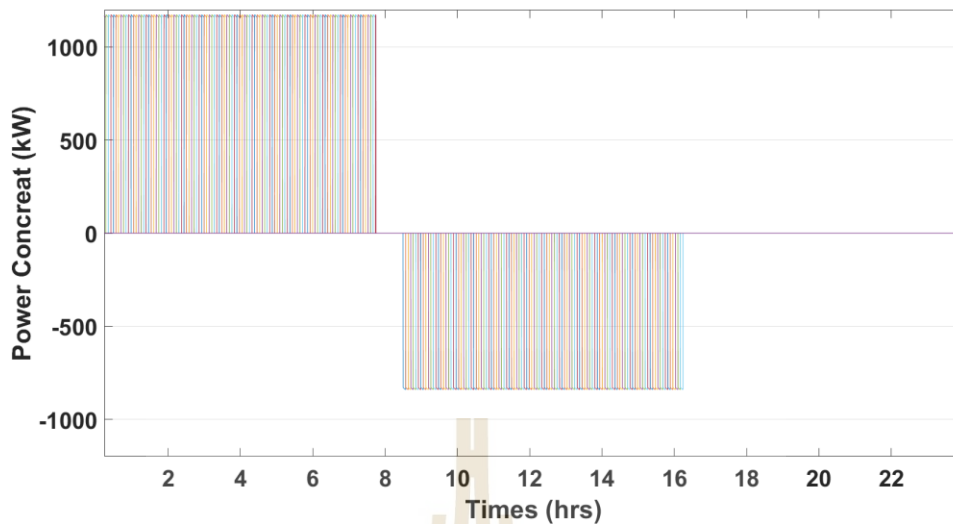


รูปที่ 4.17 กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกักเก็บพลังงาน (16 กันยายน 2562)



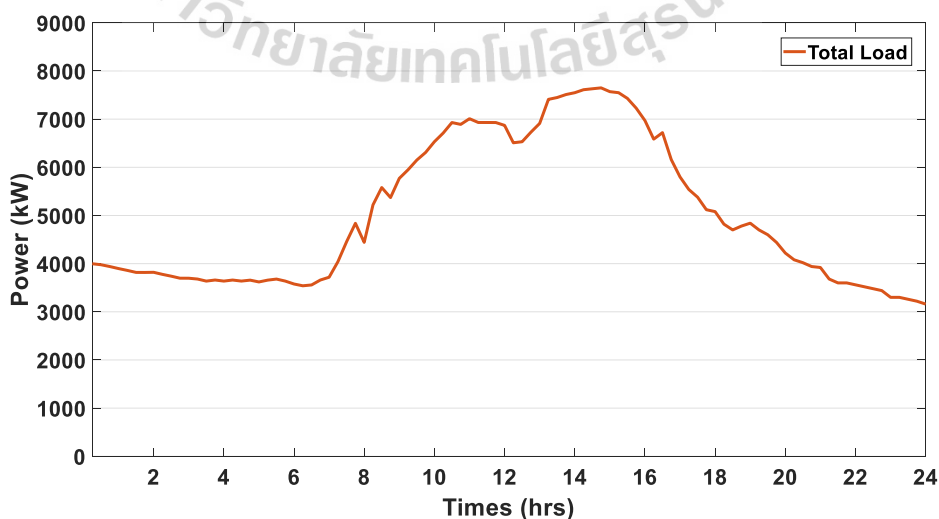
รูปที่ 4.18 กำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการกักเก็บพลังงาน (16 กันยายน 2562)

จากรูปที่ 4.17 เส้นสีส้มจะสูงกว่าเส้นสีน้ำเงิน เนื่องจากการกักเก็บพลังงาน ยกก้อนเหล็กขึ้นไปกักเก็บที่มีขนาดก้อนละ 500 ตัน จึงทำให้กราฟใช้ช่วงเวลานั้นยกสูงขึ้นจากกราฟเส้นเดิม แล้วนำก้อนเหล็กมาปล่อยลงในช่วงเวลาที่ต้องการปล่อยหรือมาตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลด เพื่อให้มีค่าความต้องการพลังไฟฟ้ามีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.19 กำลังงานที่ใช้ในการยกและได้จากการปล่อยของก้อนเหล็กแต่ละก้อน

รูปที่ 4.19 แสดงถึงกำลังงานที่ใช้ในการกักเก็บก้อนเหล็กแต่ละก้อน และกำลังงานที่ได้จากการปล่อยลงในแต่ละก้อน ในการยกขึ้นและปล่อยลงจะใช้จำนวนก้อนเหล็กที่เท่ากัน เพราะออกแบบระบบให้กักเก็บแล้วนำไปใช้ให้หมดในวันต่อวัน ดังนั้นจากรูปที่ 4.19 จำนวนที่ยกขึ้นทั้งหมด 112 ก้อน และปล่อยลง 112 ก้อนเช่นกัน จะใช้กำลังงานในการยกประมาณ 1157 kW และพลังงานอยู่ที่ 80.76 kWh ในการยก 1 ก้อน กำลังงานที่ได้จากการปล่อยลง 828 kW และพลังงานอยู่ที่ 57.86 kWh ในการปล่อย 1 ก้อน พลังงานที่ใช้และพลังงานที่ได้จะไม่เท่ากัน เนื่องจากคิดประสิทธิภาพการสูญเสียในระบบเพิ่มเข้ามา ดังรูปที่ 4.20 เป็นโพลการใช้กำลังงานใหม่หลังจากใช้ระบบกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 4.20 กำลังงานโพลดใหม่หลังจากใช้ระบบกักเก็บพลังงาน

ตารางที่ 4.14 พารามิเตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน

Parameters			
Mass	500 tons	Iron ingot volume	63.52 m ³
Total high	50 m	Frontal area	15.92 m ²
Iron ingot density	7850 kg/m ³	Gearbox eff	0.92
Air density	1.2 kg/m ³	Motor eff	0.92
Speed	0.2 m/s	Gear ratio	486 : 1
Acceleration	0.1 m/s ²	Number of Iron ingot	112

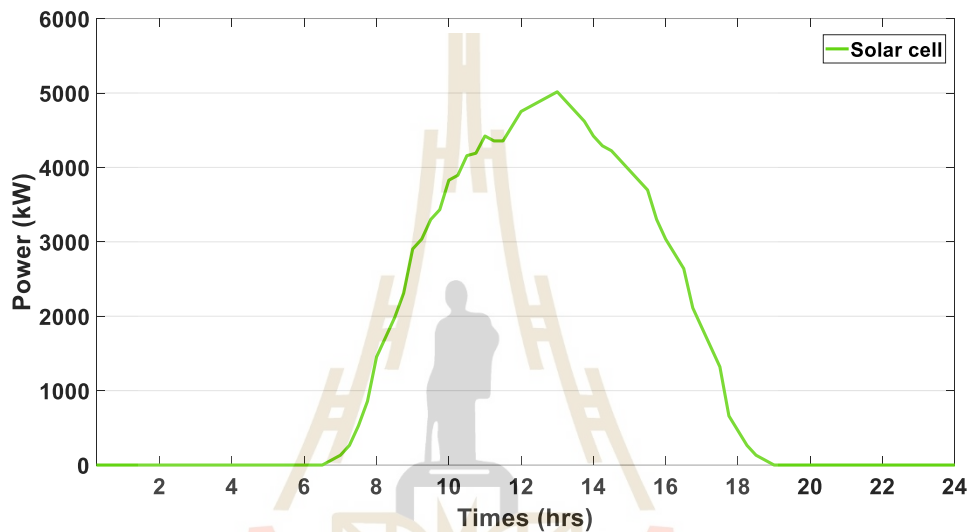
ตารางที่ 4.15 กำลังงานและพลังงานที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน

Result	
โหลดปกติ	117.68 MWh
โหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	120.23 MWh
พลังงานที่ใช้จ่ายกักเก็บ	9,045 kWh
พลังงานที่ได้จากการปล่อย	6,480 kWh
ค่าไฟของโหลดปกติ	420,289 บาท
ค่าไฟของโหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	423,907 บาท

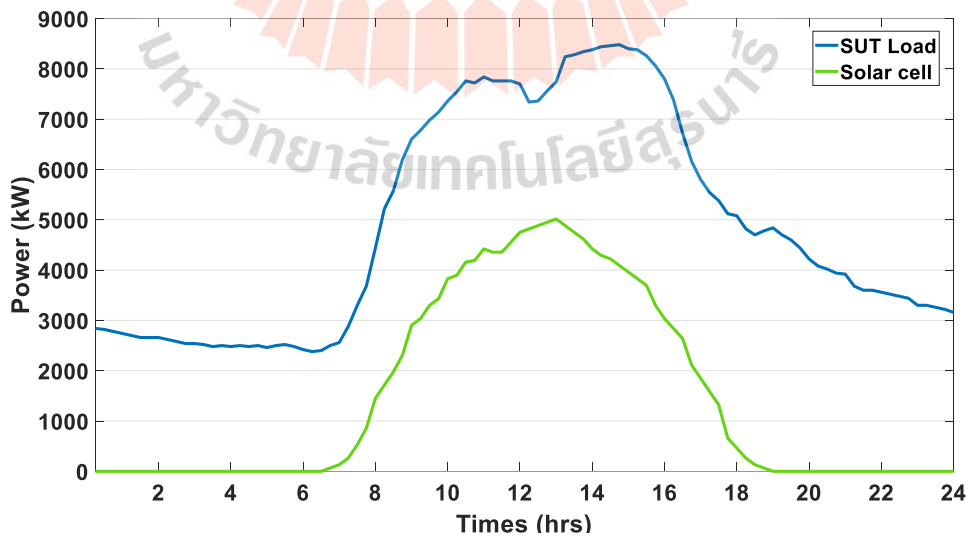
จากตารางที่ 4.14 เป็นค่าพารามิเตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน ที่ใช้ในการคำนวณกำลังงานและพลังงานของระบบกักเก็บพลังงาน โดยที่จะกำหนดค่าต่าง ๆ ให้คล้ายกันในทุกกรณี ยกเว้นจำนวนก้อนเหล็กที่ยกได้ เพื่อที่จะได้ผลการจำลองในแต่ละกรณีได้ชัดเจน ดังตารางที่ 4.15 โหลดปกติใช้พลังงานที่ 117.68 MWh ได้ใช้ระบบกักเก็บพลังงานในช่วงเช้าแล้วปล่อยมาใช้ในช่วงเที่ยง สามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ประมาณ 800 kW แต่โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานใช้พลังงานอยู่ที่ 120.23 MWh ซึ่งมากกว่าโหลดปกติที่ไม่มีระบบกักเก็บพลังงานอยู่ 2.55 MWh ค่าส่วนต่างนี้มาจากการยกก้อนเหล็กขึ้นและปล่อยลงได้ค่าพลังงานที่ไม่เท่ากัน แต่จำนวนก้อนที่ยกและปล่อยเท่ากัน โดยมีประสิทธิภาพการสูญเสียของทั้งระบบประมาณ 30% จึงทำให้ระบบมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 2.56 MWh ส่วนค่าใช้จ่ายของโหลดปกติใช้อยู่ที่ 420,289 บาท ค่าไฟของโหลดหลังการกักเก็บและปล่อย 423,907 บาท โหลดที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานจะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น 3,618 บาท โดยประมาณ ในกรณีนี้จะไม่คิดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า (บาท/kW) เนื่องจากเป็นโหลดแบบรายวันจึงไม่นำมาคิด จากผลลัพธ์ที่ได้ระบบกักเก็บพลังงานทั้งขนาด 250 และ 500 ตัน ไม่

เหมาะสมกับโหลดในลักษณะแบบนี้ เนื่องจากไม่สามารถลดพลังงานไฟฟ้าและลดค่าใช้จ่ายของโหลดได้

กรณีที่ 2 กรณีมีระบบโซลาร์เซลล์ในระบบ (250 ตัน) จะยกก้อนเหล็กกักเก็บพลังงานในช่วงที่มีการได้พลังงานไฟฟ้าจากระบบโซลาร์เซลล์ในตอนกลางวัน และจะถูกปล่อยลงมาในช่วงเวลาตอนเย็น ได้นำระบบโซลาร์เซลล์ขนาด 6 MW เข้ามาจำลองในระบบ โดยที่ให้ประสิทธิภาพทำงานของระบบโซลาร์เซลล์อยู่ที่ 80% จากค่าพิกัด ตามรูปที่ 4.21



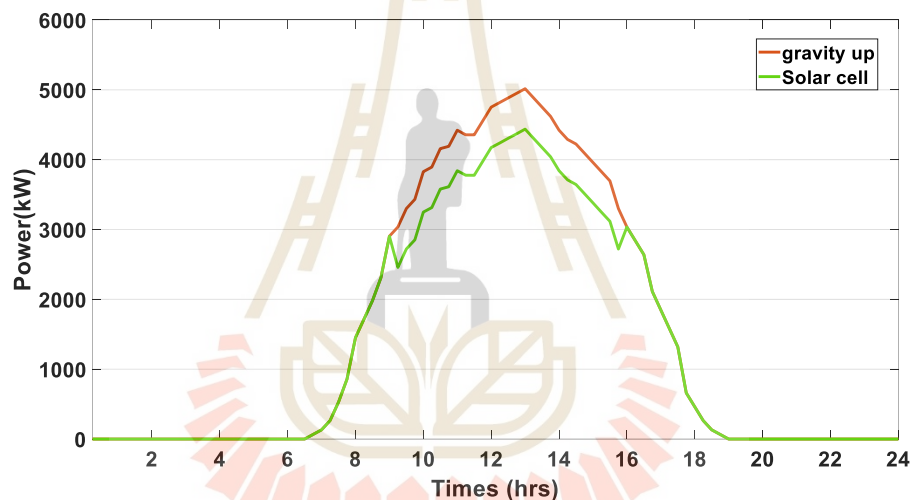
รูปที่ 4.21 กำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบโซลาร์เซลล์ใน 1 วัน



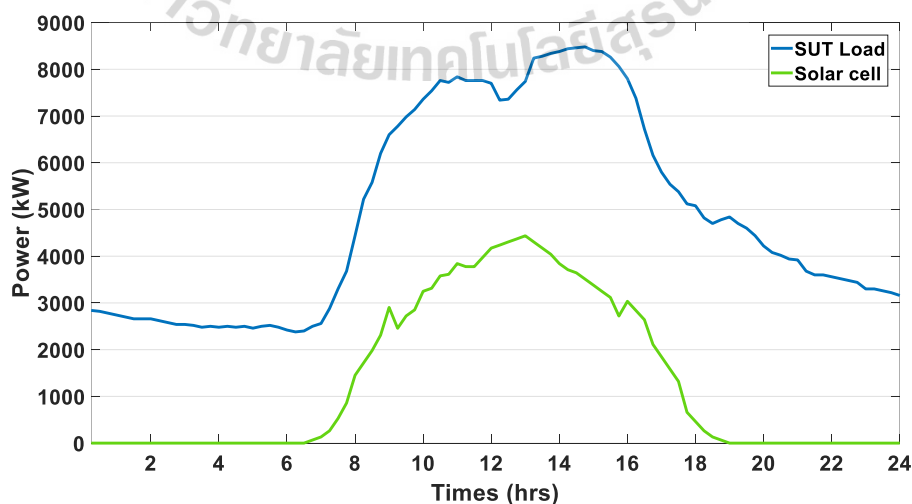
รูปที่ 4.22 กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดการใช้ไฟและระบบโซลาร์เซลล์

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าขนาดโหลดมีขนาดใหญ่กว่าระบบโซลาร์เซลล์มาก เนื่องจากทางมหาวิทยาลัยไม่ต้องการติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ที่ใหญ่เกินความจำเป็น จึงได้ติดตั้งขนาดที่ 6 MW ที่เหมาะสมกับความต้องการ

นำกำลังงานบางส่วนจากระบบโซลาร์เซลล์มากักเก็บพลังงานในช่วงตอนกลางวัน เพื่อคายพลังงานคืนระบบในช่วงเวลาตอนเย็น จากรูปที่ 4.23 เส้นสีเขียว คือ โหลดโซลาร์เซลล์ที่เหลือหลังจากใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 250 ตัน เส้นสีน้ำตาล คือ กำลังงานของโหลดโซลาร์เซลล์ที่ใช้ยกเหล็กเพื่อกักเก็บพลังงาน จะสังเกตเห็นว่าจากเส้นสีน้ำตาล ลดลงมาเป็นเส้นสีเขียวอยู่ในช่วงเวลา 09.00 น. -16.00 น. เนื่องจากตั้งเวลากักเก็บในช่วงเวลานั้น เพราะว่าเป็นช่วงเวลาที่สามารถผลิตไฟได้สูงจากพลังงานแสงอาทิตย์



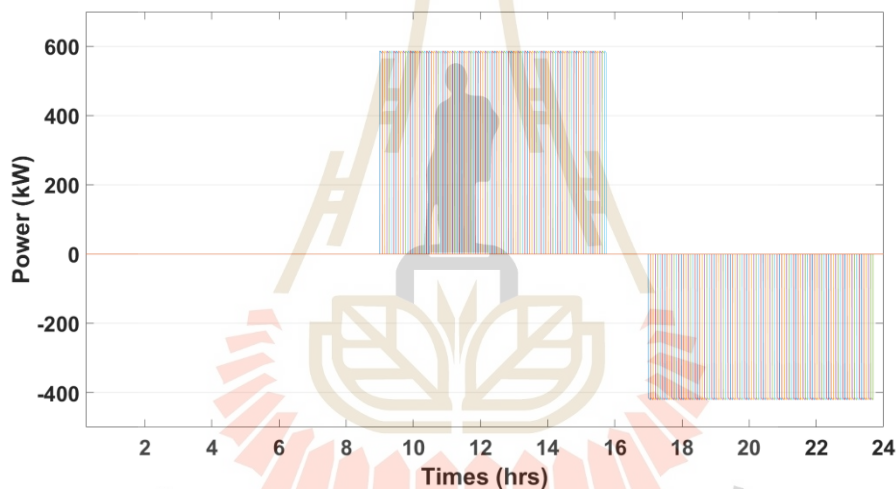
รูปที่ 4.23 กำลังงานไฟฟ้าระบบโซลาร์เซลล์และระบบกักเก็บพลังงาน



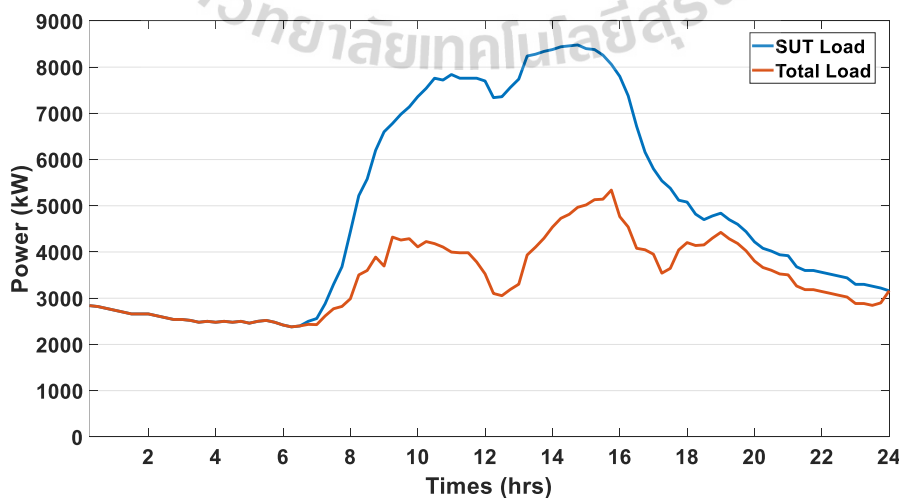
รูปที่ 4.24 กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดการใช้ไฟและระบบโซลาร์เซลล์หลังกักเก็บพลังงาน

จากรูปที่ 4.24 ระบบโซลาร์เซลล์หลังกักเก็บพลังงานที่เหลือ จะห้กลับกับโหลดการใช้ไฟ เพื่อลดพลังงานการใช้ไฟของโหลดไปบางส่วน

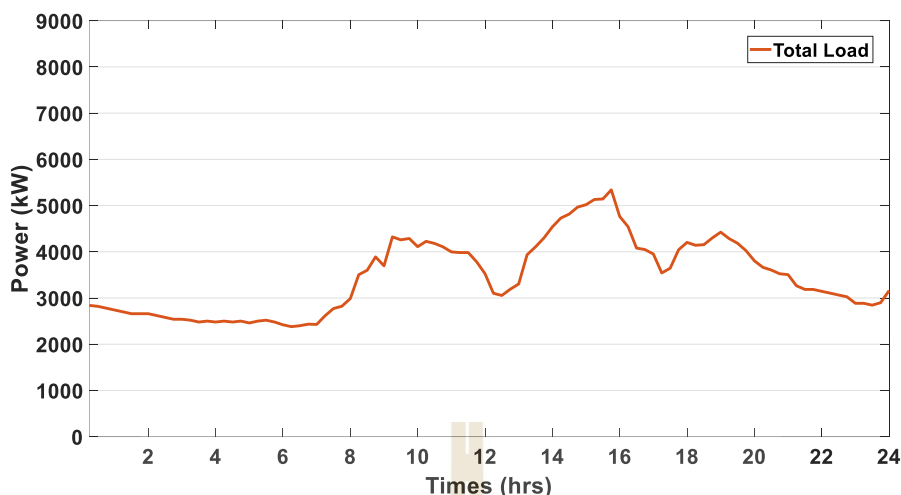
รูปที่ 4.25 แสดงถึงกำลังงานที่ใช้ในการกักเก็บก้อนเหล็กแต่ละก้อน และกำลังงานที่ได้จากการปล่อยลงในแต่ละก้อน ในการยกขึ้นและปล่อยลงจะใช้จำนวนก้อนเหล็กที่เท่ากัน เพราะออกแบบระบบให้นำไปกักเก็บก่อนแล้วนำไปใช้ให้หมดวันต่อวัน ดังนั้นจากรูปที่ 4.25 จำนวนที่ยกขึ้นทั้งหมด 97 ก้อน และปล่อยลง 97 ก้อนเช่นกัน จะใช้กำลังงานในการยกประมาณ 575 kW และพลังงานอยู่ที่ 40.38 kWh ในการยก 1 ก้อน ได้กำลังงานจากการปล่อยลง 412 kW และพลังงานอยู่ที่ 28.92 kWh ในการปล่อย 1 ก้อน พลังงานที่ใช้และพลังงานที่ได้จะไม่เท่ากัน เนื่องจากประสิทธิภาพการสูญเสียในระบบเพิ่มเข้ามา



รูปที่ 4.25 กำลังงานที่ใช้ในการยกและได้จากการปล่อยของก้อนเหล็กแต่ละก้อน



รูปที่ 4.26 กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดการใช้ไฟปกติเทียบกับโหลดหลังผ่านระบบกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 4.27 กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดหลังผ่านระบบกักเก็บพลังงาน

จากรูปที่ 4.26 และ 4.27 เส้นสีน้ำตาลแสดงโหลดใหม่หลังจากผ่านระบบกักเก็บพลังงาน ช่วงเวลา 17.00 น.-23.00 น. จะมีกราฟที่ลดลงจากสีน้ำเงินลงมาเป็นสีน้ำตาล เนื่องจากช่วงเวลานั้นเป็นการคายพลังงานคืนสู่ระบบ เพื่อนำกลับมาใช้จากการกักเก็บพลังงานไปตอนช่วงเวลา 09.00–16.00 น. ดังในรูป 4.23 ค่าพลังงานและค่าใช้จ่ายในแต่ละรูปแบบดังในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.16 พารามิเตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานขนาด 250 ตัน

Parameters			
Mass	250 tons	Iron ingot volume	31.85 m ³
Total high	50 m	Frontal area	10.05 m ²
Iron ingot density	7850 kg/m ³	Gearbox eff	0.92
Air density	1.2 kg/m ³	Motor eff	0.92
Speed	0.2 m/s	Gear ratio	486 : 1
Acceleration	0.1 m/s ²	Number of Iron ingot	97
Solar cell	6 MW	Solar cell eff	80%

จากตารางที่ 4.16 เป็นค่าพารามิเตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานขนาด 250 ตัน ที่ใช้ในการคำนวณกำลังงานและพลังงานของระบบกักเก็บพลังงาน โดยที่จะกำหนดค่าต่าง ๆ ให้คล้ายกันในทุกกรณี ยกเว้นจำนวนก้อนเหล็กที่ยกได้ เพื่อที่จะได้ผลการจำลองในแต่ละกรณีได้ชัดเจน ดังตารางที่ 4.17 โหลดปกติใช้พลังงานที่ 117.68 MWh ได้ใช้ระบบกักเก็บพลังงานจากโซล่าเซลล์ในช่วงเวลากลางวัน แล้วปล่อยมาใช้ในช่วงตอนเย็น ตามรูปที่ 4.26 สามารถลดค่ากำลังงานในช่วงเย็นได้

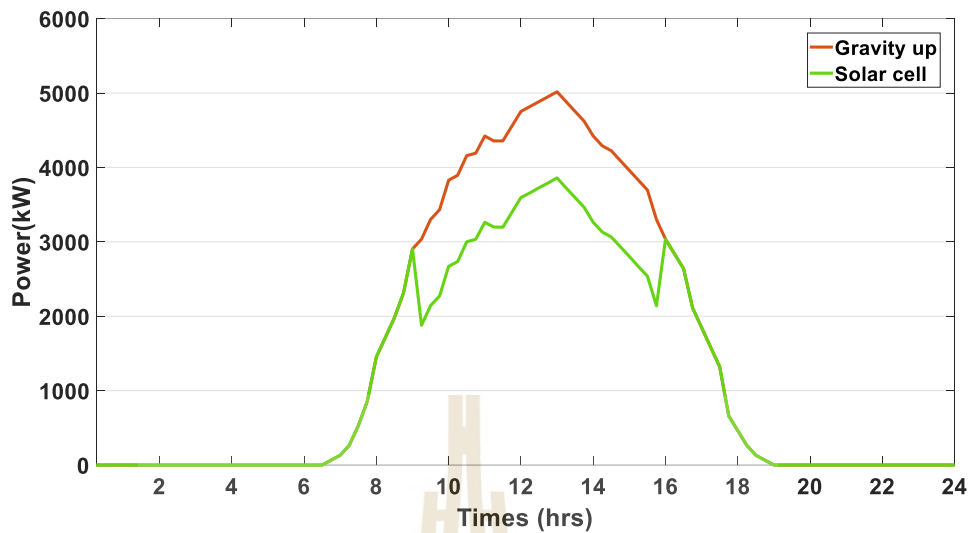
ประมาณ 400 kW แต่โหลดหลังการกักเก็บพลังงานและคายพลังงานใช้พลังงานที่ 83.81 MWh เป็นเพราะว่ามีโซลาร์เซลล์ในระบบมาช่วยลดประมาณ 34.98 MWh แต่ถ้าคิดแต่โซลาร์เซลล์มาหักล้างกับโหลดปกติอย่างเดียว โดยไม่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานจะได้ประมาณ 82.70 MWh ซึ่งน้อยกว่าโหลดที่มีระบบกักเก็บพลังงานอยู่ 1.11 MWh เกิดจากการสูญเสียพลังงานจากการยก ใช้พลังงานไป 3,916 kWh และได้พลังงานกลับคืนสู่ในระบบ 2,805 kWh

ตารางที่ 4.17 กำลังงานและพลังงานที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 250 ตัน

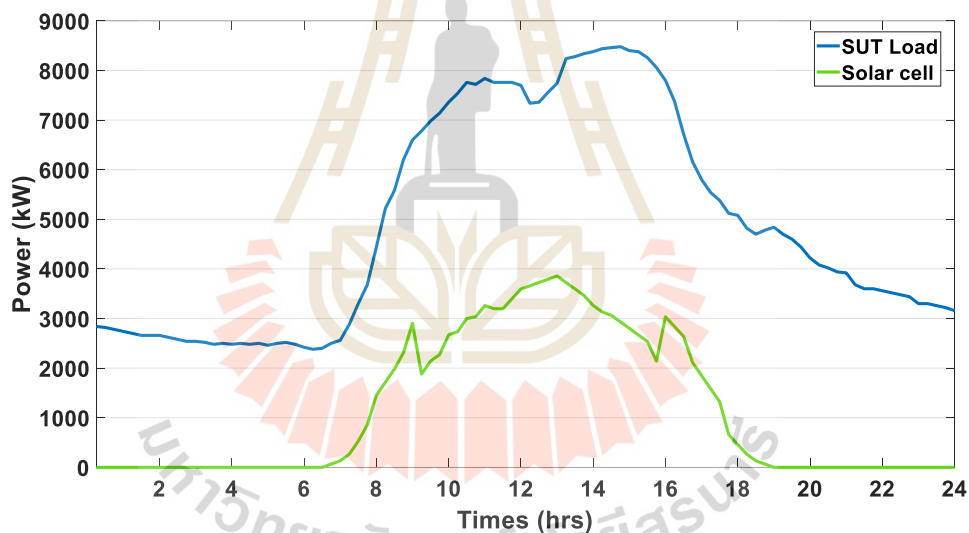
Result	
โหลดปกติ	117.68 MWh
โซลาร์เซลล์	34.98 MWh
โหลดหลังหักลบโซลาร์เซลล์	82.70 MWh
โหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	83.81 MWh
พลังงานที่เขี่ยกักเก็บ	3,916 kWh
พลังงานที่ได้จากการปล่อย	2,805 kWh
ค่าไฟของโหลดปกติ	420,289 บาท
ค่าไฟของโหลดปกติกับโซลาร์เซลล์ปกติ	286,294 บาท
ค่าไฟของโหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	291,244 บาท

ค่าไฟของโหลดปกติที่ใช้อยู่ที่ 420,289 บาท ค่าไฟของโหลดที่คิดแต่โซลาร์เซลล์ 286,294 บาท ส่วนค่าไฟโหลดหลังมีระบบกักเก็บพลังงานอยู่ที่ 291,244 บาท โหลดที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานจะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากโหลดที่คิดแต่โซลาร์เซลล์ 4,950 บาท โดยประมาณ

กรณีที่ 2 กรณีมีระบบโซลาร์เซลล์ในระบบ (500 ตัน) นำกำลังงานบางส่วนของระบบโซลาร์เซลล์มากักเก็บพลังงานในช่วงกลางวัน เพื่อคายพลังงานคืนระบบในช่วงเวลาตอนเย็น จากรูปที่ 4.28 เส้นสีเขียว คือ โหลดโซลาร์เซลล์ที่เหลือหลังจากใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน เส้นสีน้ำตาล คือ กำลังงานของโหลดโซลาร์เซลล์ที่เขี่ยเหลือเพื่อกักเก็บพลังงาน จะสังเกตได้ว่าจากเส้นสีน้ำตาล ลดลงมาเป็นเส้นสีเขียวอยู่ในช่วงเวลา 09.00 น.-16.00 น. เนื่องจากตั้งเวลากักเก็บในช่วงเวลานั้น เพราะว่าเป็นช่วงเวลาที่สามารถผลิตไฟได้สูงจากพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 4.28 กำลังงานไฟฟ้าระบบโซลาร์เซลล์และระบบกักเก็บพลังงาน

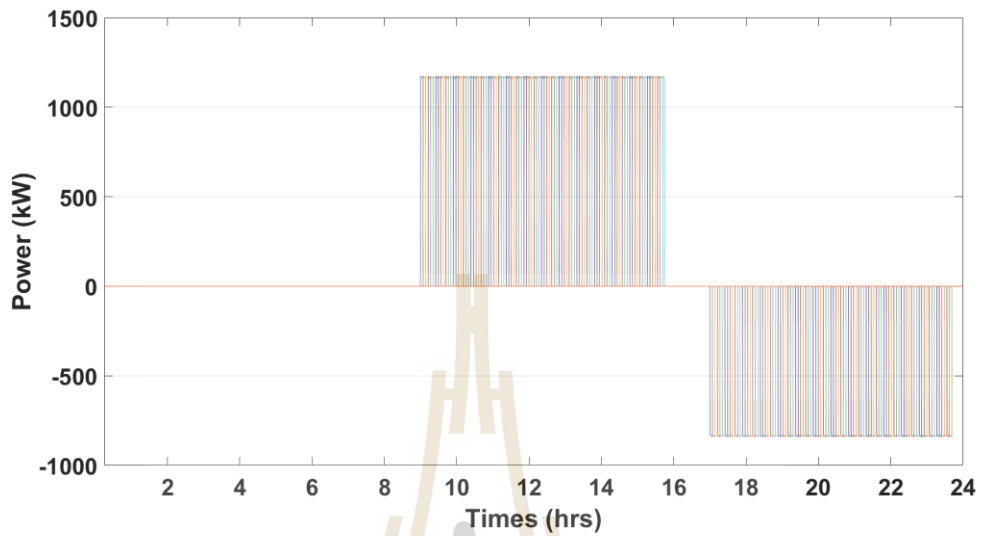


รูปที่ 4.29 กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดการใช้ไฟและระบบโซลาร์เซลล์หลังกักเก็บพลังงาน

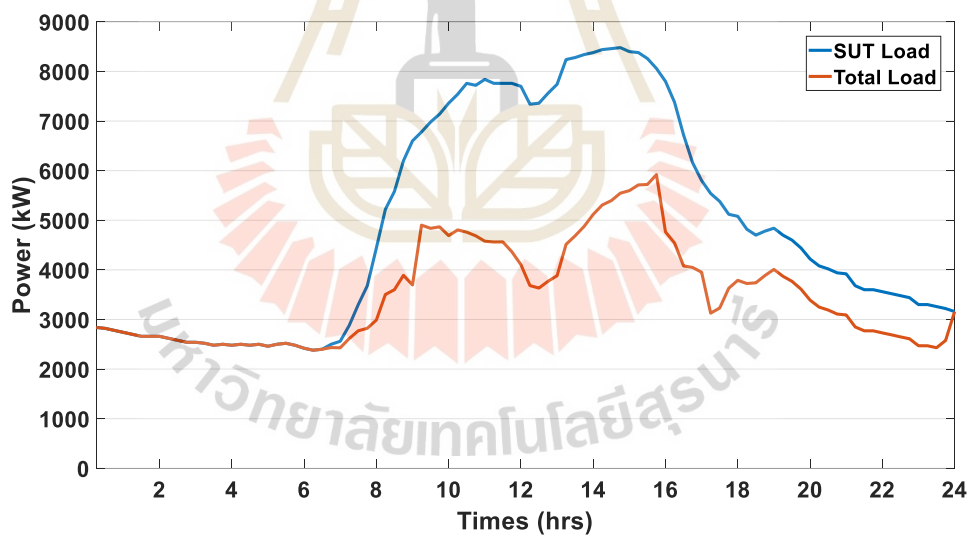
จากรูปที่ 4.29 ระบบโซลาร์เซลล์หลังกักเก็บพลังงานในส่วนที่เหลือ จะหักลบกับ โหลดการใช้ไฟ เพื่อลดพลังงานการใช้ไฟของโหลด

รูปที่ 4.30 แสดงถึงกำลังงานที่ใช้ในการกักเก็บก้อนเหล็กแต่ละก้อน และกำลังงานที่ได้จากการปล่อยลงในแต่ละก้อน ในการยกขึ้นและปล่อยลงจะใช้จำนวนก้อนเหล็กที่เท่ากัน เพราะ ออกแบบระบบให้กักเก็บแล้วนำไปใช้ให้หมดวันต่อวัน ดังนั้นจากรูปที่ 4.30 จำนวนที่ยกขึ้นทั้งหมด 97 ก้อน และปล่อยลง 97 ก้อนเช่นกัน จะใช้กำลังงานในการยกประมาณ 1,150 kW และพลังงานอยู่

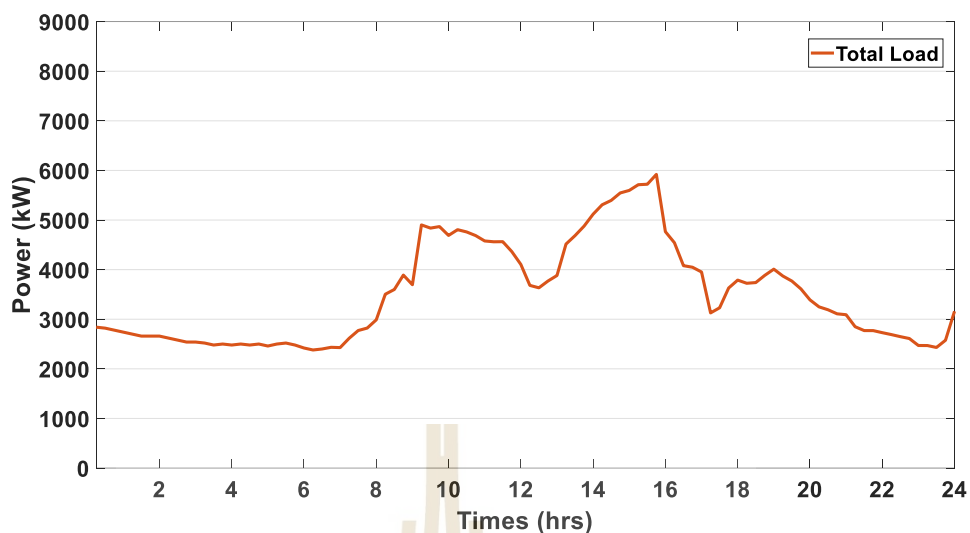
ที่ 80.92 kWh ในการยก 1 ก้อน ได้กำลังงานจากการปล่อยลง 820 kW และพลังงานอยู่ที่ 57.52 kWh ในการปล่อย 1 ก้อน



รูปที่ 4.30 กำลังงานที่ใช้ในการยกและได้จากการปล่อยของก้อนเหล็กแต่ละก้อน



รูปที่ 4.31 กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดการใช้ไฟปกติเทียบกับโหลดหลังผ่านระบบกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 4.32 กำลังงานไฟฟ้าจากโหลดหลังผ่านระบบกักเก็บพลังงาน

จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 เส้นสีน้ำตาลแสดงโหลดใหม่หลังจากผ่านระบบกักเก็บพลังงาน ช่วงเวลา 17.00 น.-23.00 น. จะมีกราฟที่ลดลงจากสีน้ำเงินลงมาเป็นสีน้ำตาล เนื่องจากช่วงเวลานั้นเป็นการคายพลังงานคืนสู่ระบบ เพื่อนำกลับมาใช้จากการกักเก็บพลังงานไปตอนช่วงเวลา 09.00 น.-16.00 น. ค่าพลังงานและค่าใช้จ่ายในแต่ละรูปแบบดังในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.18 พารามิเตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน

Parameters			
Mass	500 tons	Iron ingot volume	63.52 m ³
Total high	50 m	Frontal area	15.92 m ²
Iron ingot density	7850 kg/m ³	Gearbox eff	0.92
Air density	1.2 kg/m ³	Motor eff	0.92
Speed	0.2 m/s	Gear ratio	486 : 1
Acceleration	0.1 m/s ²	Number of Iron ingot	97
Solar cell	6 MW	Solar cell eff	80%

จากตารางที่ 4.18 เป็นค่าพารามิเตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน ที่ใช้ในการคำนวณกำลังงานและพลังงานของระบบกักเก็บพลังงาน โดยที่จะกำหนดค่าต่าง ๆ ให้คล้ายกันในทุกกรณี ยกเว้นจำนวนก้อนเหล็กที่ยกได้ เพื่อที่จะได้ผลการจำลองในแต่ละกรณีได้ชัดเจน ดังตารางที่ 4.19 โหลดปกติใช้พลังงานที่ 117.68 MWh ได้ใช้ระบบกักเก็บพลังงานจากโซลาร์เซลล์ในช่วงเวลา

กลางวัน แล้วปล่อยมาใช้ในช่วงเย็น ตามรูปที่ 4.31 สามารถลดค่ากำลังงานในช่วงเย็นได้ประมาณ 800 kW แต่โหลดหลังการกักเก็บพลังงานและคายพลังงานใช้พลังงานที่ 84.96 MWh ใช้พลังงานมากกว่าระบบกักเก็บขนาด 250 ตัน ซึ่งใช้พลังงานอยู่ที่ 83.81 kWh เนื่องจากระบบยิ่งใหญ่พลังงานในการสูญเสียไปก็จะเพิ่มขึ้นตาม แต่ถ้าคิดแต่โซลล่าเซลล์มาหักล้างกับโหลดปกติอย่างเดียว โดยไม่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานจะได้ประมาณ 82.70 MWh ซึ่งใช้ค่าพลังงานน้อยกว่าโหลดที่มีระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน อยู่ 2.26 MWh เกิดจากการสูญเสียพลังงานจากการยกใช้พลังงานไป 7,816 kWh และได้พลังงานกลับคืนสู่ในระบบ 5,554 kWh

ตารางที่ 4.19 กำลังงานและพลังงานที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน

Result	
โหลดปกติ	117.68 MWh
โซลล่าเซลล์	34.98 MWh
โหลดหลังหักลบโซลล่าเซลล์	82.70 MWh
โหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	84.96 MWh
พลังงานที่ใช้อยู่กักเก็บ	7,819 kWh
พลังงานที่ได้จากการปล่อย	5,554 kWh
ค่าไฟของโหลดปกติ	420,289 บาท
ค่าไฟของโหลดปกติกับโซลล่าเซลล์ปกติ	286,294 บาท
ค่าไฟของโหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	296,517 บาท

ค่าไฟของโหลดปกติใช้อยู่ที่ 420,289 บาท ค่าไฟของโหลดที่คิดแต่โซลล่าเซลล์ 286,294 บาท ส่วนค่าไฟโหลดหลังมีระบบกักเก็บพลังงานอยู่ที่ 296,517 บาท โหลดที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานจะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากโหลดที่คิดแต่โซลล่าเซลล์ 10,223 บาท โดยประมาณ

สรุปการกักเก็บพลังงานแบบโหมตรงรายวัน

ในกรณีที่ 1 แบบไม่มีระบบโซลล่าเซลล์มาเกี่ยวข้อง จากผลลัพธ์ที่ได้ของระบบกักเก็บพลังงานกักเก็บในช่วงเวลาที่มีค่าไฟถูกประมาณ 2.549 บาท/kWh แล้วนำมาปล่อยในช่วงเวลาที่มีค่าไฟแพงประมาณ 4.1025 บาท/kWh ไม่ว่าจะระบบกักเก็บพลังงานขนาดเล็ก กลางหรือใหญ่ ไม่เหมาะสมกับโหลดมหาวิทยาลัยหรือโหลดการใช้ไฟในลักษณะนี้ เนื่องจากไม่สามารถลดพลังงานไฟฟ้าของโหลดและลดค่าใช้จ่ายได้ ในทางกลับกันยังเพิ่มพลังงานการใช้ไฟและเพิ่มค่าใช้จ่ายอีกด้วย จึงไม่คุ้มค่ากับการลงทุนติดตั้งทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ระบบกักเก็บในรูปแบบนี้สามารถลดค่า

กำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละวันได้ แต่ยังไม่เหมาะสมกับความต้องการในการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประหยัดพลังงานได้

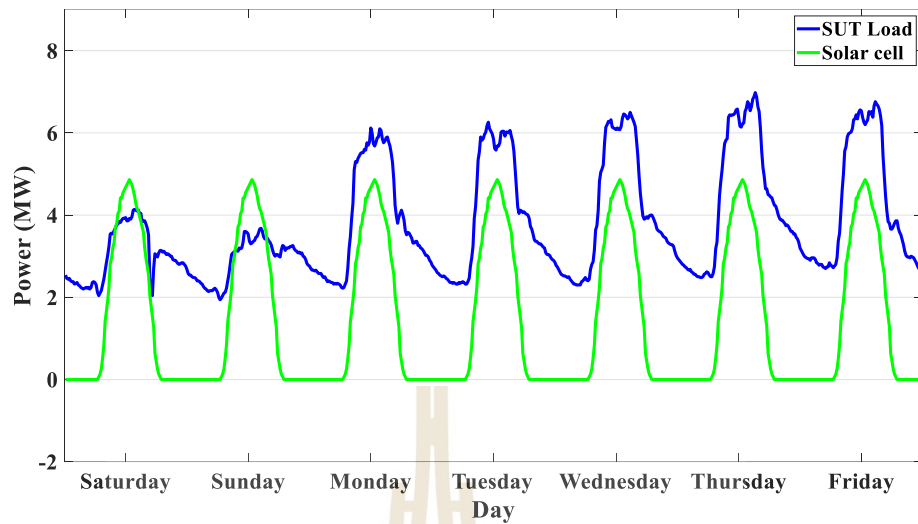
ในกรณีที่ 2 มีระบบโซลาร์เซลล์เข้ามาเกี่ยวข้อง จากผลลัพธ์ที่ได้ระบบกักเก็บพลังงานทั้งขนาด 250 ตัน และขนาด 500 ตัน หรือระบบกักเก็บในรูปแบบนี้ไม่เหมาะสมกับโหลดที่มีโซลาร์เซลล์มาในระบบ เนื่องจากพลังงานโซลาร์เซลล์มาหักล้างกับโหลดปกติอย่างเดียว มีค่าใช้จ่ายพลังงานน้อยกว่าและภาระค่าใช้จ่ายถูกกว่าระบบที่มีการกักเก็บพลังงาน ทั้งนี้ระบบกักเก็บพลังงานไม่สามารถลดพลังงานไฟฟ้าของโหลดและลดค่าใช้จ่ายได้ ดังนั้นควรนำระบบโหลดเดิมหักล้างกับโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้โดยตรงจึงจะเหมาะสมที่สุด เพราะไม่ต้องผ่านระบบกักเก็บที่จะทำให้สูญเสียประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ

4.3.2 ผลการจำลองระบบกักเก็บพลังงานในโหมตรายสัปดาห์

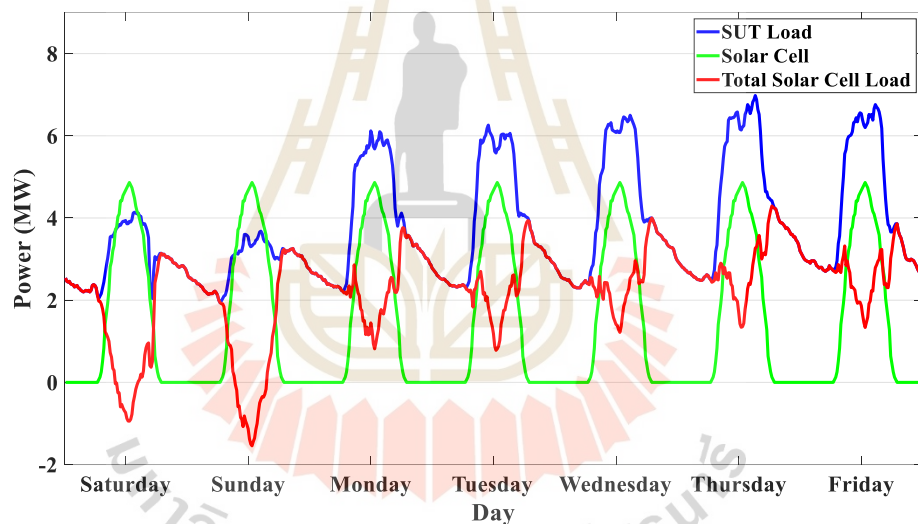
จากโหมตรการใช้พลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีรายวันมีความไม่เหมาะสมและไม่คุ้มค่าทั้ง 2 กรณีที่ได้ศึกษา จึงได้ศึกษาแบบรายสัปดาห์เพื่อนำมาตัดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วงเวลากลางวันที่มีค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าสูง

ในกรณีนี้จะใช้ระบบกักเก็บขนาด 500 ตัน ระบบเดียว เนื่องจากโหลดของมหาวิทยาลัยมีการใช้โหมตรกำลังงานที่สูงประมาณ 6000-8000 kW จึงใช้ระบบกักเก็บที่ได้กำลังงานสูงเช่นกัน จาก 2 กรณีที่ได้ศึกษารายวันข้างต้นระหว่างระบบ 250 ตัน กับ 500 ตัน ผลลัพธ์ที่ได้มีแนวโน้มทิศทางเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันนอกเหนือจากค่ากำลังงานและพลังงานงานที่แตกต่างกันจากการใช้ยกขึ้นและปล่อยลง สาเหตุเกิดจากวัตถุที่ยกมีขนาดหนักขึ้น 2 เท่า ค่าที่ได้ก็จะต่างกันประมาณ 2 เท่า

ดังนั้นยกตัวอย่างสัปดาห์แรกในเดือนกันยายนในปี 2562 ร่วมกับพลังงานโซลาร์เซลล์ขนาด 6 MW ที่มหาวิทยาลัยติดตั้ง เพื่อช่วยลดค่าไฟและลดโหมตรการใช้ไฟจะได้โหมตรตามรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 สัปดาห์แรกของเดือนกันยายนรวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW

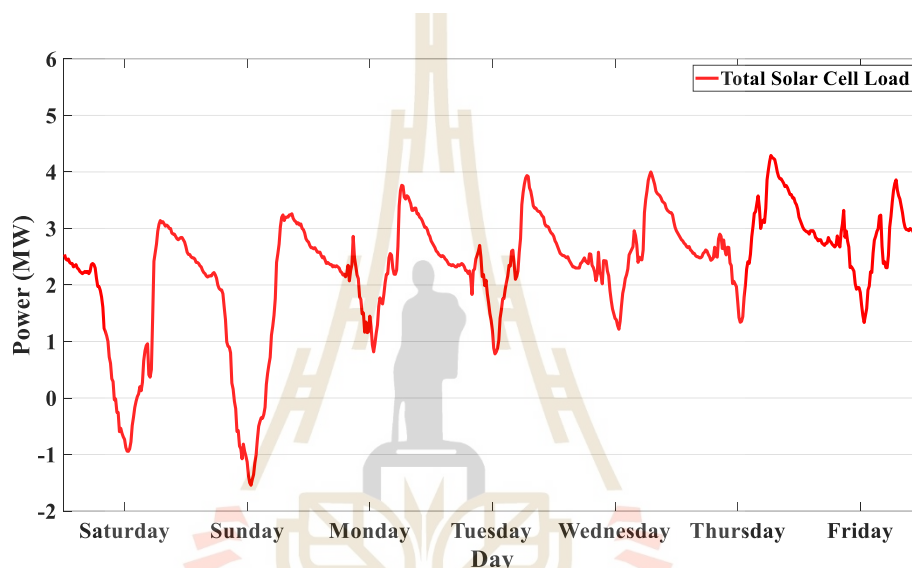


รูปที่ 4.34 สัปดาห์ที่ 1 ในเดือนกันยายน 2562 รวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW

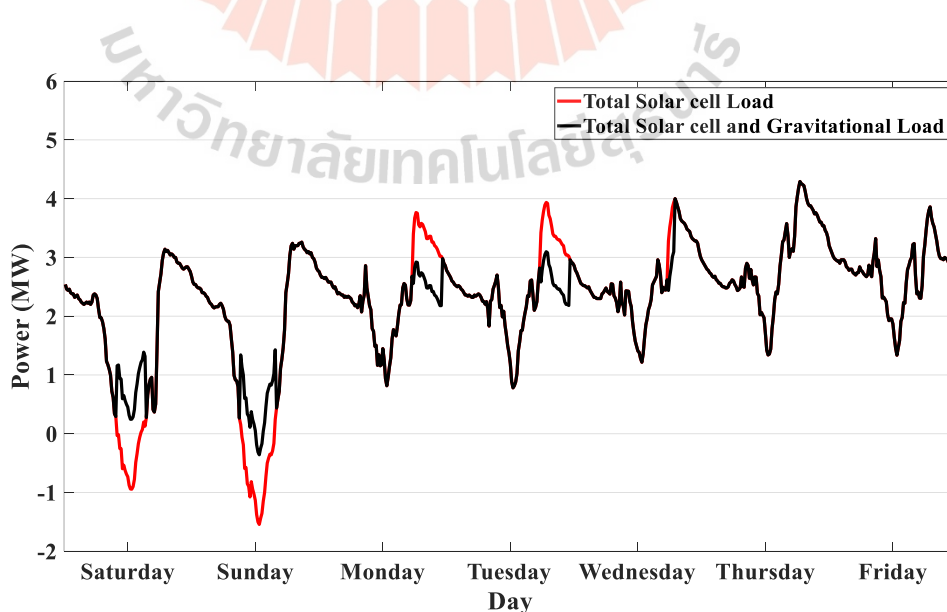
เส้นสีน้ำเงินเป็นโหลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยรายสัปดาห์ โดยใช้พลังงานอยู่ที่ 632.61 MWh เส้นสีเขียว คือ ขนาดของพลังงานโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ในแต่ละวันขนาด 6 MW ได้เฉลี่ยออกมาตามตารางที่ 4.6 พลังงานที่ได้ทั้งสัปดาห์อยู่ที่ 244.83 MWh จากรูปจะเห็นได้ว่า จะมี 5 วัน (จันทร์-ศุกร์) ที่พลังงานโซล่าเซลล์ไม่เพียงพอต่อโหลดและจะมี 2 วัน (เสาร์-อาทิตย์) ที่พลังงานโซล่าเซลล์ผลิตเกินความจำเป็น จึงได้สังเกตเห็นว่าจะนำระบบกักเก็บพลังงานโน้มถ่วงมากักเก็บในวันที่พลังงานโซล่าเซลล์ผลิตเกินความจำเป็น เพื่อไม่ให้พลังงานที่ผลิตได้เหลือทิ้งหรือสูญเปล่า ก็คือ

ช่วงวันหยุดของมหาวิทยาลัย (เสาร์-อาทิตย์) โดยที่วันเสาร์ สูญเสียพลังงานที่ 2.31 MWh และในวันอาทิตย์สูญเสียพลังงานที่ 5.08 MWh รวมทั้ง 2 วัน ที่พลังงานสูญเสียเปล่าประมาณ 7.39 MWh จึงได้นำพลังงานที่เหลือทิ้งนี้มากักเก็บในระบบกักเก็บพลังงาน

จากรูปที่ 4.34 และรูปที่ 3.35 เส้นสีแดง คือ โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยหักลบกับโหลดโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ พอหักลบกันจะเห็นเส้นสีแดง 2 วัน (เสาร์-อาทิตย์) มีค่ากำลังงานต่ำกว่า 0 MW หรือมีค่ากำลังงานติดลบ จึงได้ทำการกักเก็บพลังงาน 2 วันนี้ เพื่อไม่ให้พลังงานสูญเสียโดยเปล่าประโยชน์



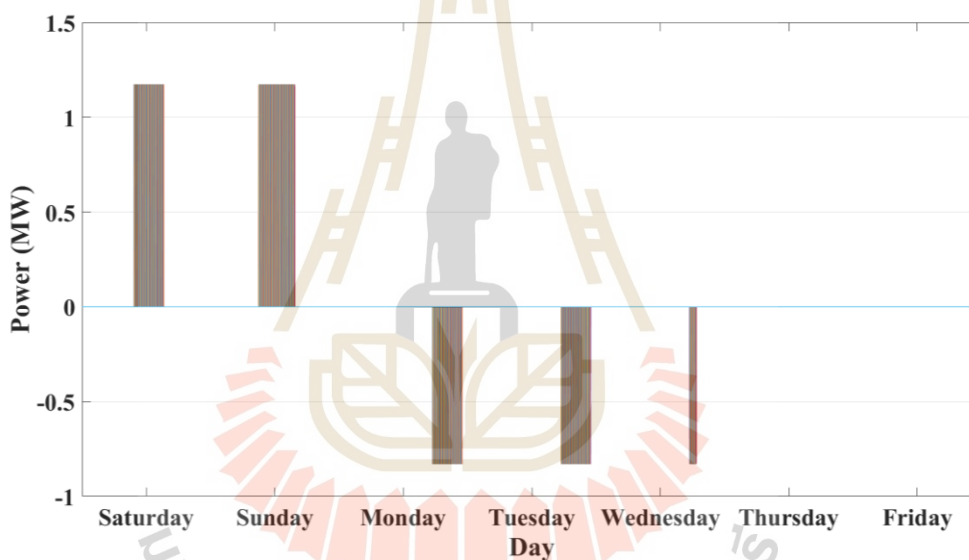
รูปที่ 4.35 โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยหักลบกับโหลดโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้



รูปที่ 4.36 โหลดที่ยกก่อนเหล็กเพื่อกักเก็บพลังงานและปล่อยก่อนเหล็กลง

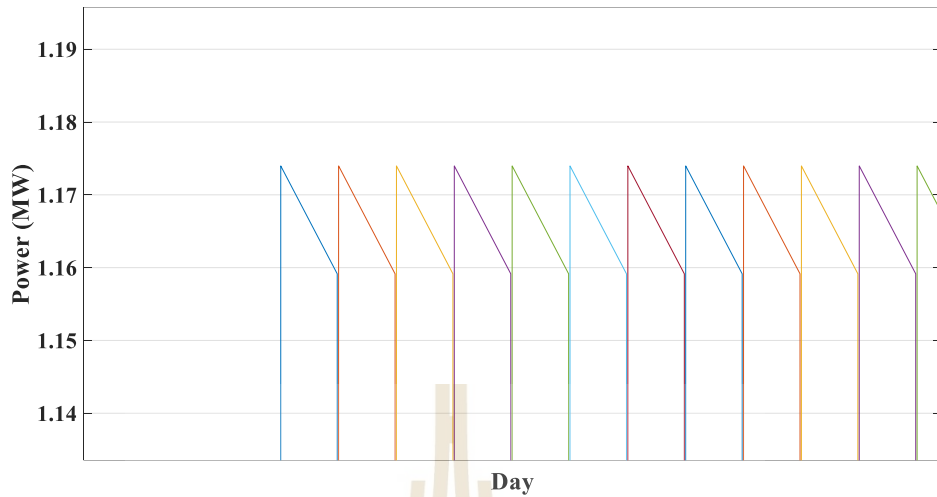
ทำการยกก้อนเหล็กในช่วง 2 วัน (เสาร์-อาทิตย์) ที่มีค่าติดลบและค่าที่ต่ำกว่า 250 kW แล้วนำก้อนเหล็กไปปล่อยในช่วงวันธรรมดาที่โซล่าเซลล์ไม่เพียงพอต่อโหลดในแต่ละวัน ดังรูปที่ 4.36

เส้นสีแดงจะเป็นเส้นโหลดเดิมที่ยังไม่มีการกักเก็บ เส้นสีดำเป็นกราฟโหลดใหม่ที่มีการกักเก็บพลังงาน ในวันเสาร์และอาทิตย์ และนำมาปล่อยใช้พลังงาน ในวันจันทร์ถึงศุกร์ จะเห็นว่าจากรูปที่ 4.36 มีการยกกักเก็บพลังงานในวันเสาร์และอาทิตย์ เนื่องจากมีค่ากำลังงานต่ำกว่า 0 MW ระบบกักเก็บพลังงานจึงนำพลังงานในส่วนนั้นมาทำการกักเก็บ และได้นำมาปล่อยในช่วงวันธรรมดา หรือวันที่มีการเรียนการสอน ได้แสดงกำลังและจำนวนที่ใช้ในการยกและที่ได้จากการปล่อยดังรูปที่ 4.37

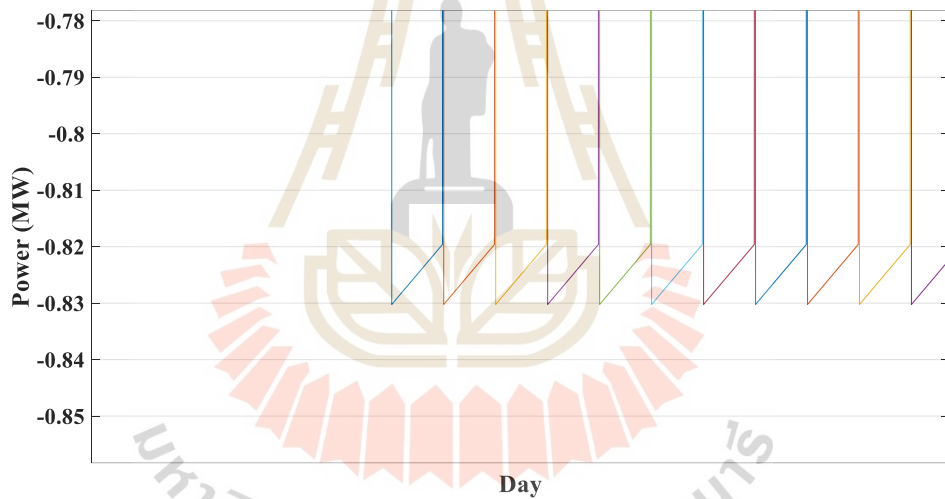


รูปที่ 4.37 กำลังงานที่ใช้ในการยกและกำลังงานที่ได้จากการปล่อย

จากรูปที่ 4.37 ในวันเสาร์สามารถยกเก็บได้ทั้งหมด 77 ก้อน วันอาทิตย์สามารถยกเก็บได้ทั้งหมด 98 ก้อน รวมที่ยกขึ้นได้ 175 ก้อน แล้วนำมาปล่อยในวันจันทร์ วันอังคาร วันพุธ ได้จำนวน 81, 77 และ 17 ก้อน ตามลำดับ ใช้กำลังงานในการยกขึ้นแต่ละก้อนประมาณ 1.16 MW ได้กำลังงานจากการปล่อยลงแต่ละก้อนอยู่ที่ 0.82 kW ดังรูปที่ 4.38 และ 4.39

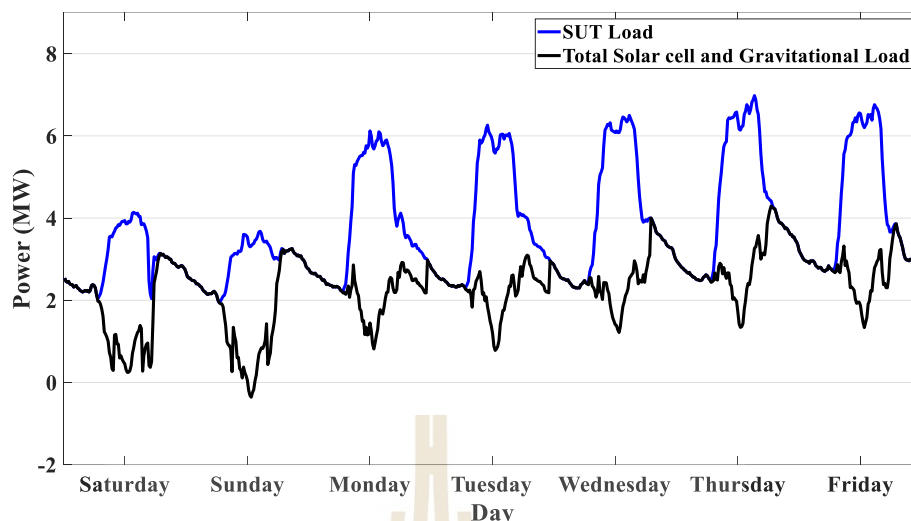


รูปที่ 4.38 ค่ากำลังงานที่ใช้ในการยก



รูปที่ 4.39 ค่ากำลังงานที่ได้จากการปล่อย

รูปที่ 4.38 และ 4.39 แสดงกำลังงานที่ซ้ยกและที่ปล่อยคืนสู่ระบบตามลำดับ จะเห็นว่ากราฟไม่ได้เป็นเส้นตรงตามแกน Y แต่กราฟจะมีความชันเล็กน้อย เนื่องจากมีน้ำหนักของ ลวดสลิงที่ซ้ยกมาคิดในการคำนวณ จึงมีลักษณะเอียงตามน้ำหนักของลวดสลิงในทุก ๆ ระยะที่ได้จาก ความสูง 50 m ของระบบ



รูปที่ 4.40 โหลดปกติเทียบกับโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงาน

จากรูปที่ 4.40 จะยังเห็นว่าในวันเสาร์และอาทิตย์ โหลดสีดำที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงาน ยังมีค่ากำลังงานติดลบเพียงเล็กน้อย เนื่องจากระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน ไม่เพียงพอกับโหลดที่ติดลบ จึงไม่สามารถนำกำลังงานที่ติดลบมาใช้ได้ทั้งหมด วันอาทิตย์เหลือพลังงานที่เหลือทิ้งประมาณ 0.32 MWh

สามารถนำมาปล่อยได้ 3 วัน คือ วันจันทร์ วันอังคารและวันพุธ ส่วนวันพฤหัสบดีและวันศุกร์ไม่ได้มีการปล่อยก้อนเหล็ก เพราะจำนวนที่กักเก็บก้อนเหล็กไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด ระบบกักเก็บพลังงานที่กักเก็บได้ใช้หมดภายใน 3 วัน จึงจำเป็นต้องหาวิธีการที่จะสามารถนำมาปล่อยแบบกระจายให้ได้ครบทั้ง 5 วัน เพื่อช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของสัปดาห์นั้นไปด้วย

ตารางที่ 4.20 กำลังงานและพลังงานที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน

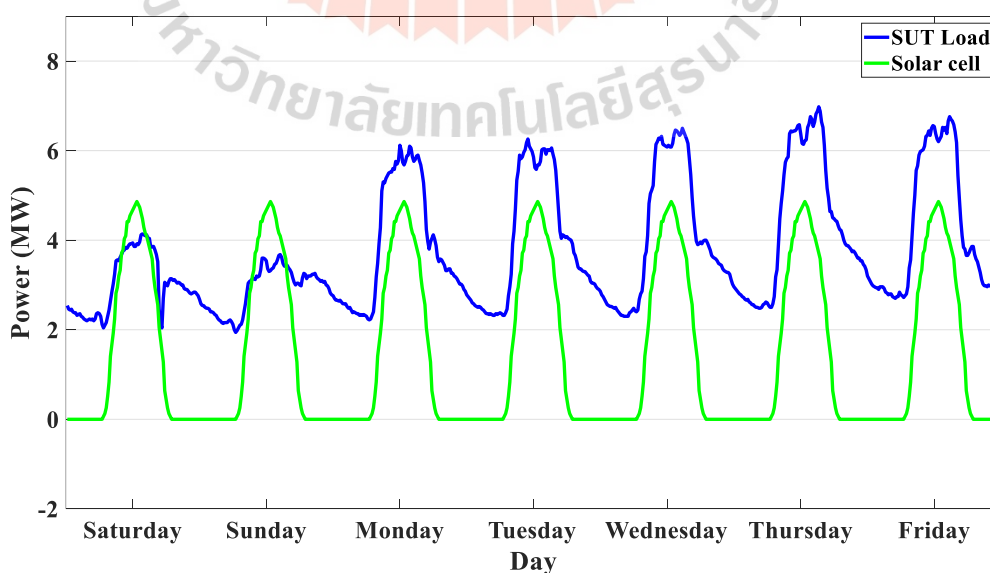
Result	
โหลดปกติ	632.61 MWh
โซลาร์เซลล์	244.83 MWh
โหลดหลังหักลบโซลาร์เซลล์	395.16 MWh
โหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	391.72 MWh
พลังงานที่ช้ยกักเก็บ	14,555 kWh
พลังงานที่ได้จากการปล่อย	10,293 kWh
ตัดยอดค่าความต้องการพลังไฟฟ้า	3.00 MW
ค่าความต้องการพลังไฟฟ้ารายสัปดาห์ก่อนใช้ระบบกักเก็บพลังงาน	4.29 MW
ค่าความต้องการพลังไฟฟ้ารายสัปดาห์หลังใช้ระบบกักเก็บพลังงาน	4.29 MW

สรุป

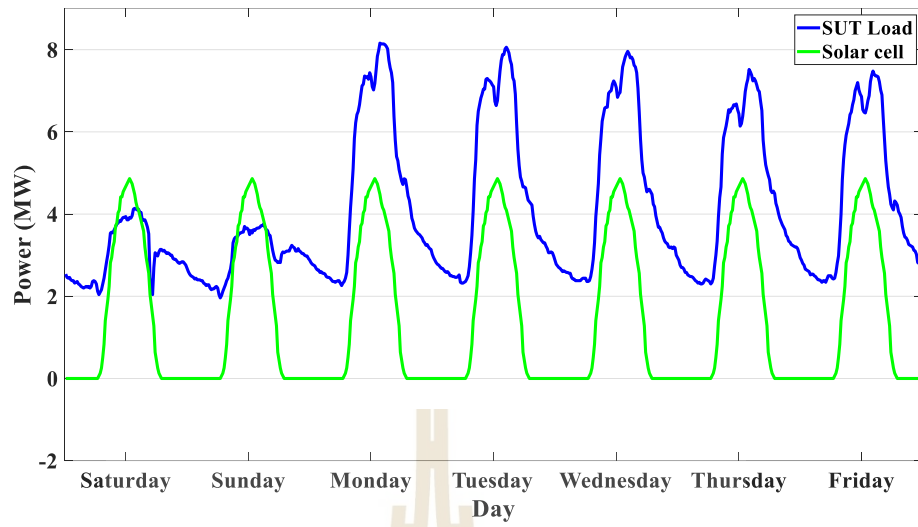
ระบบกักเก็บพลังงานในโหมดรายสัปดาห์จะกักเก็บพลังงานในวันที่มีการใช้โหลดน้อย คือ วันเสาร์และอาทิตย์ ได้ทั้งหมด 175 ก้อน และนำมาปล่อยในวันธรรมดากันจันทร์ถึงวันศุกร์ ทั้งหมด 175 เช่นกัน แต่ไม่สามารถกระจายปล่อยเพื่อตัดยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าได้ เนื่องจากไม่รู้จุดที่ควรเริ่มปล่อยในแต่ละวันให้ได้ครบ 5 วัน ในกรณีนี้เลือกตัดยอดที่ 3 MW จะช่วยลดการใช้พลังงานจากก่อนใช้ระบบกักเก็บใช้พลังงานจะอยู่ที่ 395.16 MWh หลังใช้ระบบกักเก็บใช้พลังงานอยู่ที่ 391.72 MWh ลดลงมา 3.45 MWh เนื่องจากพลังงานที่นำมาเก็บเกือบทั้งหมดเป็นพลังงานที่เหลือทิ้งในวันเสาร์และวันอาทิตย์จึงทำให้หลังใช้ระบบกักเก็บมีการใช้พลังงานลดลง แต่ยอดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าก่อนใช้ระบบกักเก็บและหลังใช้ระบบกักเก็บมีค่าเท่าเดิมที่ 4.29 MW กรณีนี้ไม่เหมาะสมกับค่าพลังงานที่ลดลงมาเมื่อเทียบกับขนาดของระบบกักเก็บพลังงานและการลงทุนในระยะยาว เนื่องจากไม่สามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลดได้

4.3.3 ผลการจำลองระบบกักเก็บพลังงานในโหมดรายสัปดาห์โดยใช้ Particle Swarm Optimization

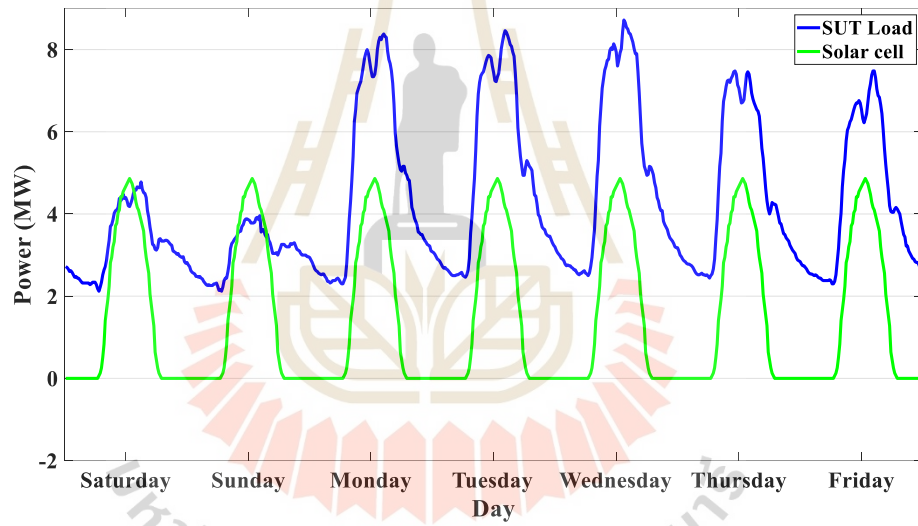
จากผลการจำลองที่ 4.3.2 ไม่สามารถรู้จุดที่เริ่มปล่อยของระบบกักเก็บพลังงานเพื่อให้ใช้พลังงานน้อยที่สุดในแต่ละอาทิตย์ จึงได้นำวิธี PSO (Particle Swarm Optimization) มาหาค่าจุดปล่อยระบบกักเก็บพลังงานให้ใช้พลังงานน้อยที่สุด โดยยกตัวอย่างเดือนกันยายน 2562 มาทั้งหมด 4 สัปดาห์ เพื่อหาค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้ารายเดือนว่าสามารถมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางไหน และสามารถช่วยลดการใช้พลังงานเป็นอย่างไร



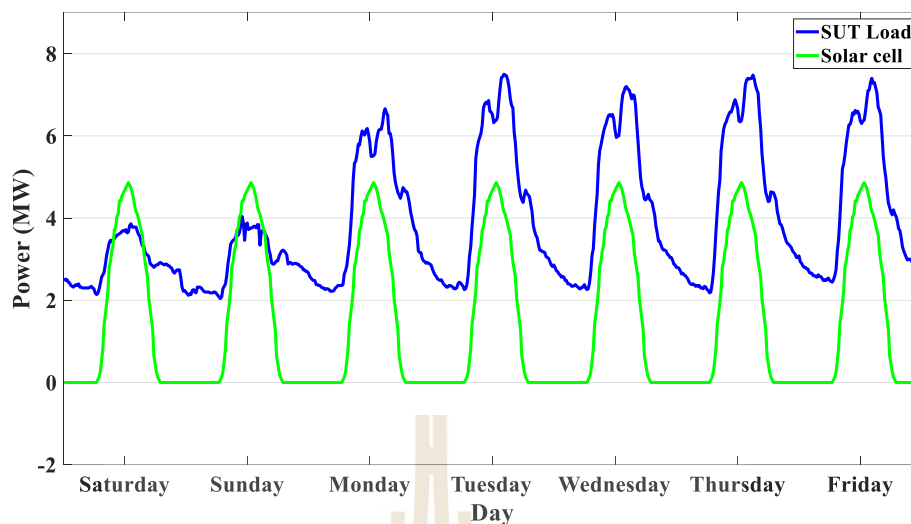
รูปที่ 4.41 สัปดาห์ที่ 1 ของเดือนกันยายนรวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW



รูปที่ 4.42 สัปดาห์ที่ 2 ของเดือนกันยายนรวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW



รูปที่ 4.43 สัปดาห์ที่ 3 ของเดือนกันยายนรวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW



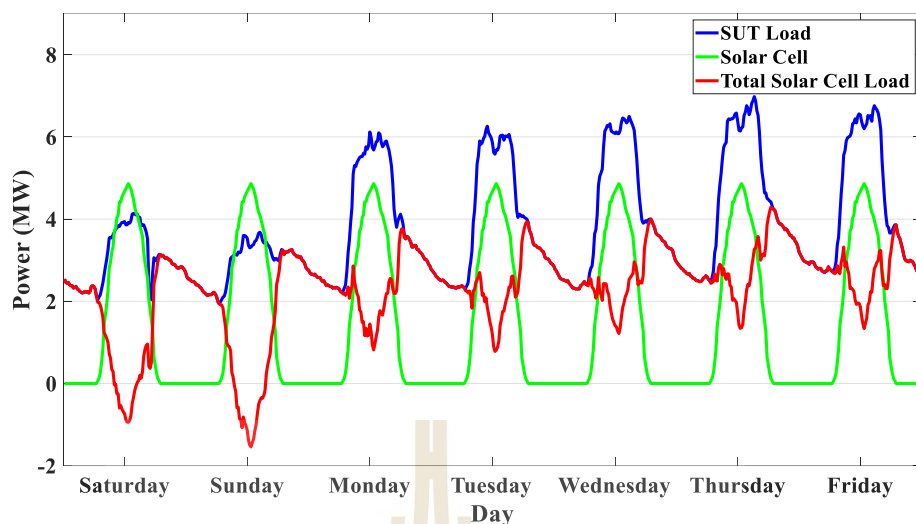
รูปที่ 4.44 สัปดาห์ที่ 4 ของเดือนกันยายนรวมกับพลังงานโซลาร์เซลล์ขนาด 6 MW

จากรูปที่ 4.41 ถึง 4.44 จะมีโหลดที่แตกต่างกัน ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละวันจะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แตกต่างกันตามตารางที่ 4.21 จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละสัปดาห์

ตารางที่ 4.21 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละสัปดาห์ของเดือนกันยายน 2562

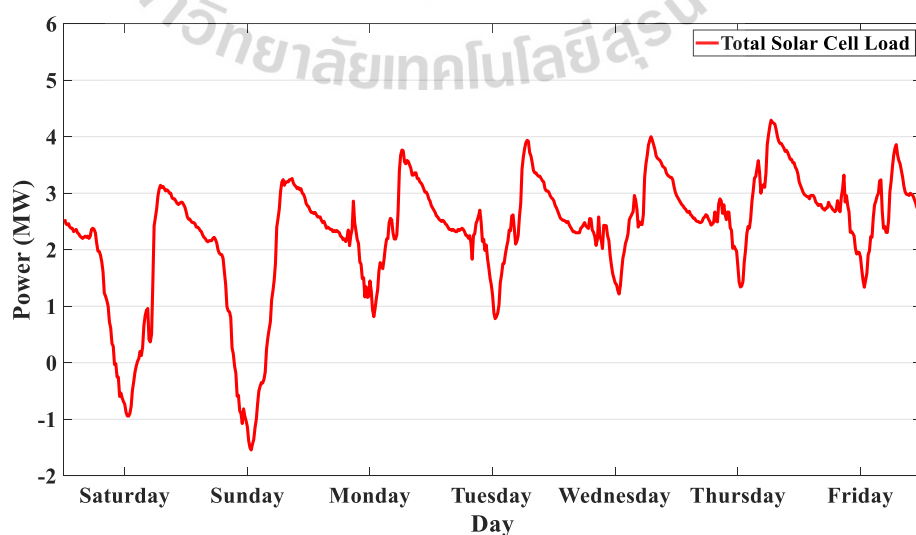
	จันทร์ (kW)	อังคาร (kW)	พุธ (kW)	พฤหัสบดี (kW)	ศุกร์ (kW)
สัปดาห์ที่ 1	6,120	6,260	6,500	6,980	6,760
สัปดาห์ที่ 2	8,140	8,060	7,960	7,520	7,480
สัปดาห์ที่ 3	8,380	8,460	8,720	7,480	7,480
สัปดาห์ที่ 4	6,660	7,500	7,200	7,480	7,400

จากตารางที่ 4.21 ในสัปดาห์ที่ 1 จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ในวันพฤหัสบดี 6,980 kW สัปดาห์ที่ 2 จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ในวันจันทร์ 8,140 kW สัปดาห์ที่ 3 จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ในวันพุธ 8,720 kW และสัปดาห์ที่ 4 จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ในวันอังคาร 7,500 kW ดังนั้นยอดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในเดือนนี้อยู่ที่สัปดาห์ที่ 3 คือ 8,720 kW

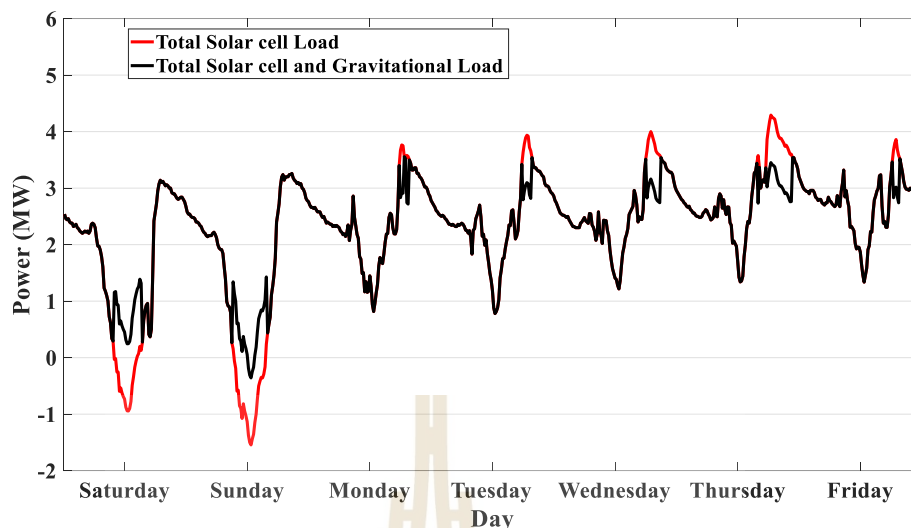


รูปที่ 4.45 สัปดาห์ที่ 1 ในเดือนกันยายน 2562 รวมกับพลังงานโซลาร์เซลล์ขนาด 6 MW

จากรูปที่ 4.45 เส้นสีน้ำเงิน คือ โหลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยรายสัปดาห์ โดยใช้พลังงานอยู่ที่ 632.61 MWh เส้นสีเขียว คือ ขนาดของพลังงานโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้ในแต่ละวันขนาด 6 MW พลังงานที่ได้ทั้งสัปดาห์อยู่ที่ 244.83 MWh เส้นสีแดง คือ โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยหักลบกับโหลดโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้ โดยที่วันเสาร์สูญเสียดังพลังงานที่ 2.31 MWh และในวันอาทิตย์สูญเสียดังพลังงานที่ 5.08 MWh รวมทั้ง 2 วัน ที่พลังงานสูญเปล่าประมาณ 7.39 MWh จึงได้นำพลังงานที่เหลือทิ้งนี้มากักเก็บในระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อไม่ให้พลังงานสูญเสียโดยเปล่าประโยชน์ ดังรูปที่ 4.46 โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยหลังหักลบกับโหลดโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้ในแต่ละวัน

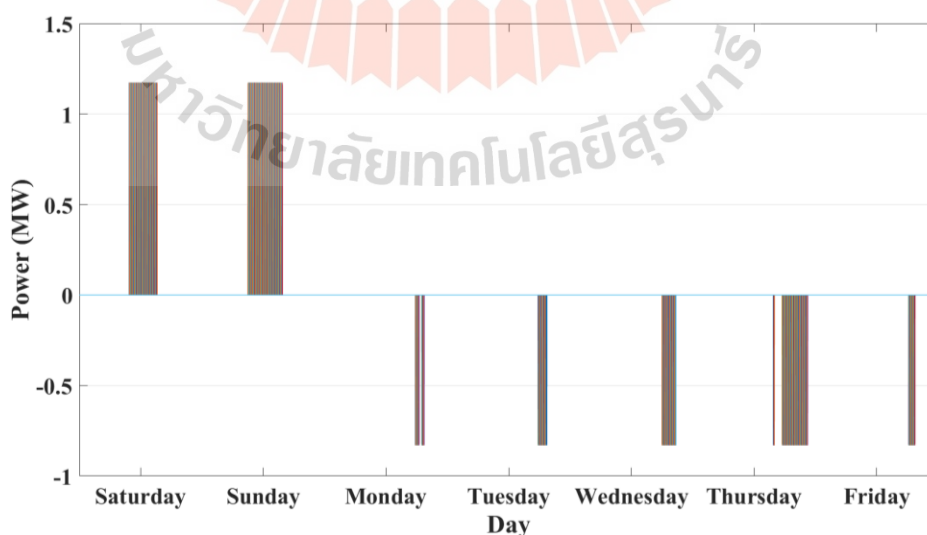


รูปที่ 4.46 โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยหักลบกับโหลดโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้ในสัปดาห์ที่ 1



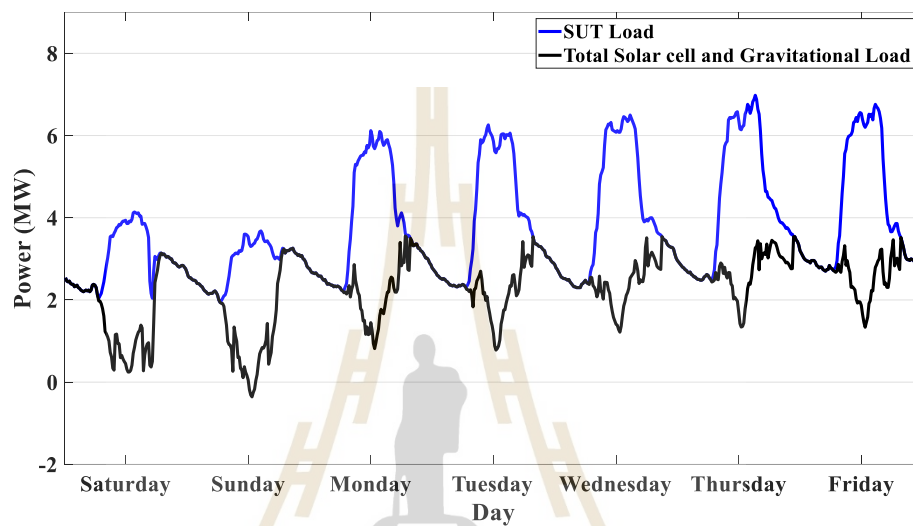
รูปที่ 4.47 โหลดที่ยกก่อนเหล็กเพื่อกักเก็บพลังงานและปล่อยก่อนเหล็กลงในสัปดาห์ที่ 1

ทำการยกก้อนเหล็กในช่วง 2 วัน (เสาร์-อาทิตย์) ที่มีค่าติดลบและค่าที่ต่ำกว่า 250 kW แล้วนำก้อนเหล็กไปปล่อยในช่วงวันธรรมดา ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลดในแต่ละวันและให้ได้พลังงานน้อยที่สุด ตามรูปที่ 4.47 เส้นสีแดง จะเป็นเส้นโหลดเดิมที่ยังไม่มีการกักเก็บ เส้นสีดำ เป็นกราฟโหลดใหม่ที่มีการกักเก็บพลังงานในวันเสาร์และอาทิตย์ แล้วนำมาปล่อยใช้พลังงาน ในวันจันทร์ถึงศุกร์ ได้แสดงกำลังและจำนวนที่ใช้ในการยกและที่ได้จากการปล่อยดังกราฟรูปที่ 4.48

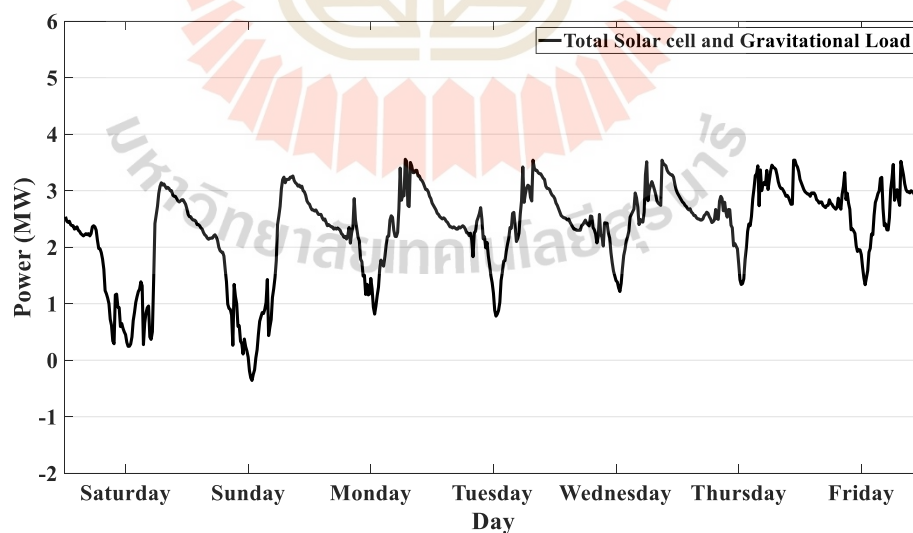


รูปที่ 4.48 กำลังงานที่ใช้ในการยกและกำลังงานที่ได้จากการปล่อยในสัปดาห์ที่ 1

จากรูปที่ 4.48 ในวันเสาร์สามารถยกเก็บได้ทั้งหมด 77 ก้อน วันอาทิตย์สามารถยกเก็บได้ทั้งหมด 98 ก้อน รวมที่ยกขึ้นได้ 175 ก้อน แล้วนำมาปล่อยในวันจันทร์ถึงวันศุกร์ได้จำนวนในแต่ละวัน 18, 25, 39, 75 และ 18 ก้อน ตามลำดับ ใช้กำลังงานในการยกขึ้นแต่ละก้อนประมาณ 1.16 MW ได้กำลังงานจากการปล่อยลงแต่ละก้อนอยู่ที่ 0.82 พลังงานที่ใช้จ่ายอยู่ที่ 14.56 MWh และพลังงานที่ได้จากการปล่อยอยู่ที่ 10.30 MWh



รูปที่ 4.49 โหลดปกติเทียบกับโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 1



รูปที่ 4.50 โหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 1

จากรูปที่ 4.49 และ 4.50 จะยังเห็นว่าในวันอาทิตย์ โหลดสีดำที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงาน ยังมีค่ากำลังงานติดลบเพียงเล็กน้อย เนื่องจากระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน กำลังงานที่ซั๊กไม่มากพอกับโหลดที่ติดลบ จึงไม่สามารถนำกำลังงานที่ติดลบมาใช้ได้ทั้งหมด วันอาทิตย์ เหลือพลังงานที่เหลือทิ้งประมาณ 320 kWh

สามารถนำมาปล่อยแบบกระจายทุก ๆ วันในวันธรรมดาทั้งสัปดาห์ได้ 5 วัน คือ วันจันทร์ถึงวันศุกร์ และจะสังเกตจากกราฟรูปที่ 4.50 จะเห็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดแต่ละวันมีค่าอยู่ในระนาบ X ที่มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมาก

ตารางที่ 4.22 กำลังงานและพลังงานที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน ในสัปดาห์ที่ 1

Result	
โหลดปกติ	632.61 MWh
โซล่าเซลล์	244.83 MWh
โหลดหลังหักลบโซล่าเซลล์	395.16 MWh
โหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	391.72 MWh
พลังงานที่ซั๊กกักเก็บ	14,555 kWh
พลังงานที่ได้จากการปล่อย	10,293 kWh
ตัดยอดค่าความต้องการพลังไฟฟ้า	3.56 MW
ค่าความต้องการพลังไฟฟารายสัปดาห์ก่อนใช้ระบบกักเก็บพลังงาน	4.29 MW
ค่าความต้องการพลังไฟฟารายสัปดาห์หลังใช้ระบบกักเก็บพลังงาน	3.56 MW

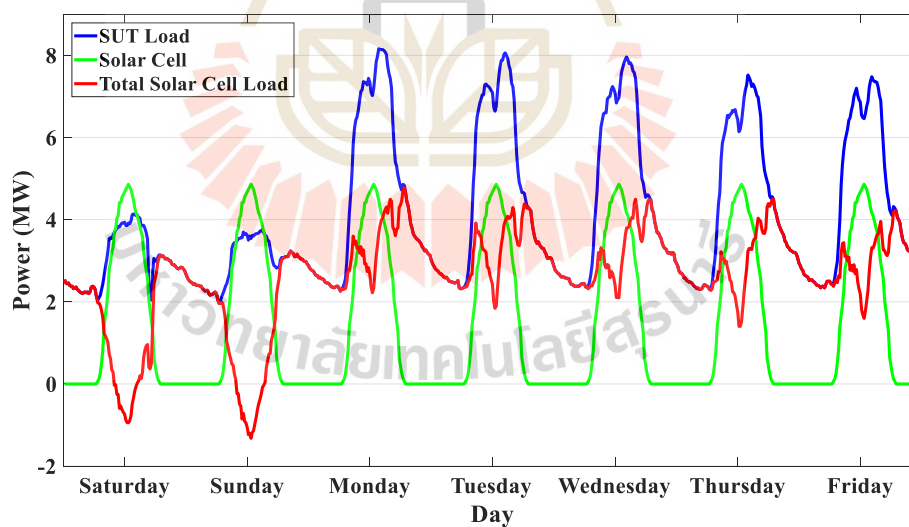
ระบบกักเก็บพลังงานในโหมดรายสัปดาห์จะกักเก็บพลังงานในวันที่มีการใช้โหลดน้อย คือ วันเสาร์และอาทิตย์ ได้ทั้งหมด 175 ก้อน และนำมาปล่อยในวันธรรมดาดังจันทร์ถึงวันศุกร์ ทั้งหมด 175 ก้อนเช่นกัน โดยสามารถปล่อยแบบกระจายเพื่อตัดยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าได้ ใช้ PSO หาค่าที่ใช้พลังงานน้อยสุดในสัปดาห์นี้โดยได้ค่าตัดยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ 3.56 MW ช่วยลดการใช้พลังงานจากก่อนใช้ระบบกักเก็บใช้พลังงานจะอยู่ที่ 395.16 MWh หลังใช้ระบบกักเก็บใช้พลังงานอยู่ที่ 391.72 MWh ลดลงมา 3.45 MWh และยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าก่อนใช้ระบบกักเก็บอยู่ที่ 4.29 MW และหลังใช้ระบบกักเก็บมีค่า 3.56 MW ในสัปดาห์นี้สามารถช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดไปได้ประมาณ 730 kW

ตารางที่ 4.23 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการใช้พลังงานน้อยที่สุดโดยใช้ PSO ในสัปดาห์ที่ 1

Iteration	ค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดปล่อย (kW)
1	3,556.59
2	3,557.48
3	3,555.72
4	3,557.21
5	3,556.42
Average	3,556.68
Standard deviation	0.69

ตารางที่ 4.23 เป็นตารางหาค่ากำลังที่ควรปล่อยจากการใช้ PSO ในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยได้ค่าออกมาใกล้เคียงกันอย่างมาก เฉลี่ยประมาณ 3,556.68 kW มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.69 kW ถือว่ามีค่าเบี่ยงเบนที่น้อยมาก และค่านี้ทำให้การใช้พลังงานของโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่น้อยที่สุดในสัปดาห์ที่ 1

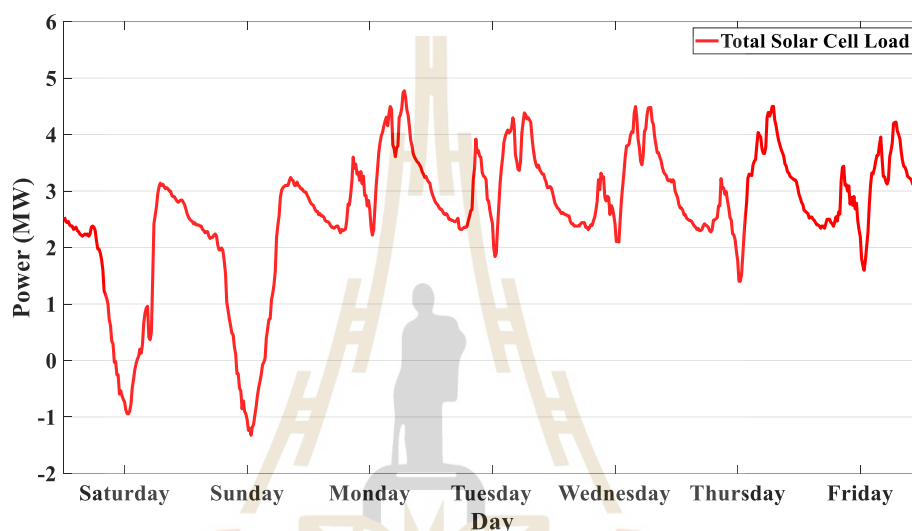
สัปดาห์ที่ 2 จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ในวันจันทร์ 8,140 kW ตั้งในรูป 4.51



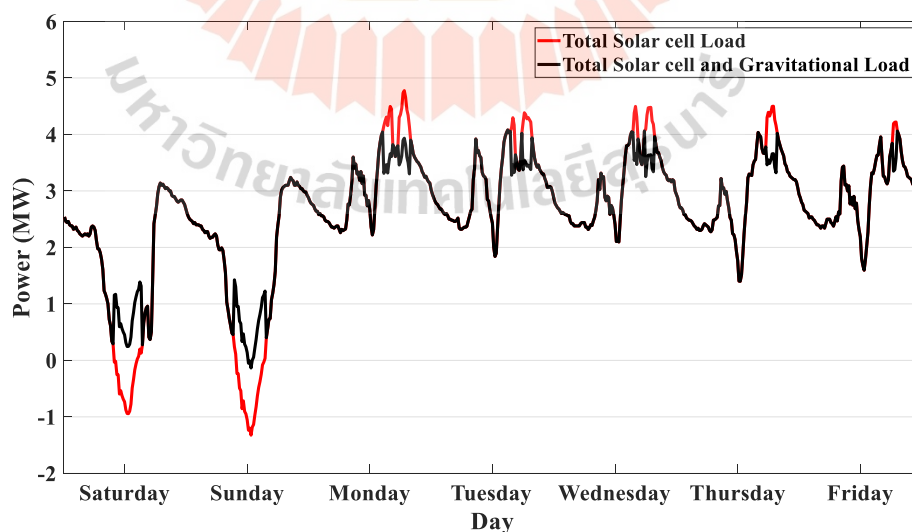
รูปที่ 4.51 สัปดาห์ที่ 2 ในเดือนกันยายน 2562 รวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW

จากรูปที่ 4.51 เส้นสีน้ำเงิน คือ โหลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร โดยใช้เวลาอยู่ที่ 686.55 MWh เส้นสีเขียว คือ ขนาดของพลังงานโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ในแต่ละวันขนาด 6 MW พลังงานที่ได้ทั้งสัปดาห์อยู่ที่ 244.83 MWh เส้นสีแดง คือ โหลดการใช้ไฟฟ้า

ของมหาวิทยาลัยห้กลับกับโหลดโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ โดยที่วันเสาร์สูญเสียพลังงานที่ 2.31 MWh และในวันอาทิตย์สูญเสียพลังงานที่ 3.92 MWh รวมทั้ง 2 วัน ที่พลังงานสูญเสียไปประมาณ 6.23 MWh จึงได้นำพลังงานที่เหลือทิ้งนี้มากักเก็บในระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อไม่ให้พลังงานสูญเสียโดยเปล่าประโยชน์ ดังรูปที่ 4.52 โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยหลังห้กลับกับโหลดโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ในแต่ละวัน

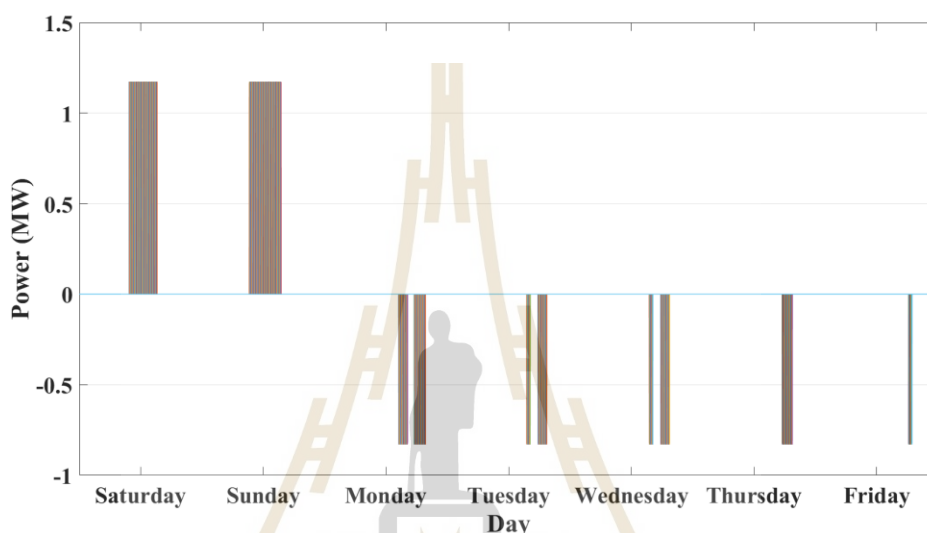


รูปที่ 4.52 โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยห้กลับกับโหลดโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ในสัปดาห์ที่ 2



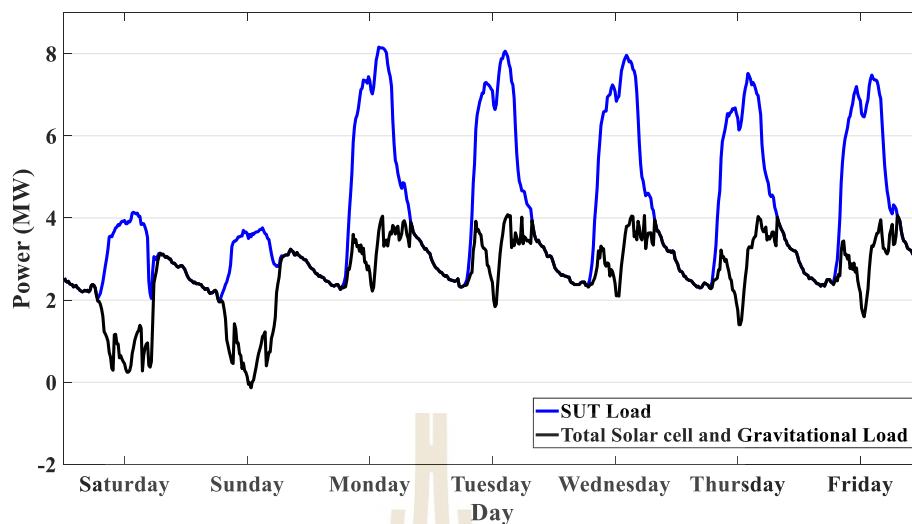
รูปที่ 4.53 โหลดที่ยกก่อนเหล็กเพื่อกักเก็บพลังงานและปล่อยก่อนเหล็กลงในสัปดาห์ที่ 2

ทำการยกก้อนเหล็กในช่วง 2 วัน (เสาร์-อาทิตย์) ที่มีค่าติดลบและค่าที่ต่ำกว่า 250 kW แล้วนำก้อนเหล็กไปปล่อยในช่วงวันธรรมดาลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลดในแต่ละวันและให้ได้พลังงานน้อยที่สุด ตามรูปที่ 4.53 เส้นสีแดงจะเป็นเส้นโหลดเดิมที่ยังไม่มีผ่านระบบกักเก็บ เส้นสีดำเป็นกราฟโหลดใหม่ที่มีการผ่านระบบกักเก็บพลังงานในวันเสาร์และอาทิตย์ แล้วนำมาปล่อยใช้พลังงานในวันจันทร์ถึงศุกร์ ได้แสดงกำลังและจำนวนที่ใช้ในการยกและที่ได้จากการปล่อยดังกราฟรูปที่ 4.54

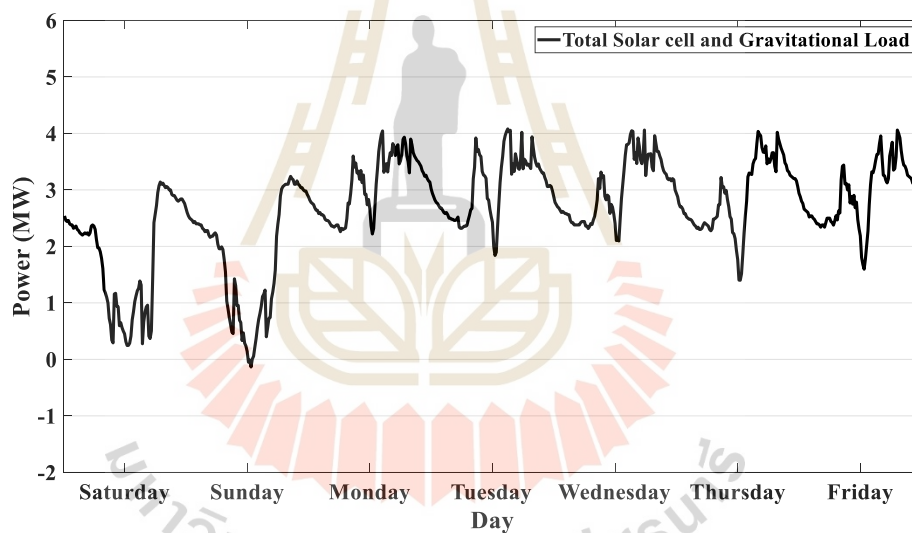


รูปที่ 4.54 กำลังงานที่ใช้ในการยกและกำลังงานที่ได้จากการปล่อยในสัปดาห์ที่ 2

จากรูปที่ 4.54 ในวันเสาร์สามารถยกเก็บได้ทั้งหมด 78 ก้อน วันอาทิตย์สามารถยกเก็บได้ทั้งหมด 88 ก้อน รวมที่ยกขึ้นได้ 167 ก้อน แล้วนำมาปล่อยในวันจันทร์ถึงวันศุกร์ได้จำนวนในแต่ละวัน 57, 36, 35, 28 และ 11 ก้อน ตามลำดับ ใช้กำลังงานในการยกขึ้นแต่ละก้อนประมาณ 1.16 MW ได้กำลังงานจากการปล่อยลงแต่ละก้อนอยู่ที่ 0.82 พลังงานที่ใช้อยู่ที่ 13.96 MWh และพลังงานที่ได้จากการปล่อยอยู่ที่ 9.82 MWh



รูปที่ 4.55 โหลดปกติเทียบกับโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 2



รูปที่ 4.56 โหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 2

จากรูปที่ 4.56 จะยังเห็นว่าในวันอาทิตย์ โหลดสีดำที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงาน ยังมีค่ากำลังงานติดลบเพียงเล็กน้อยเหลือพลังงานที่เหลือทิ้งประมาณ 49.15 kWh

สามารถนำมาปล่อยแบบกระจายทุก ๆ วันในวันธรรมดาทั้งสัปดาห์ได้ 5 วัน คือ วันจันทร์ถึงวันศุกร์

ตารางที่ 4.24 กำลังงานและพลังงานที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน ในสัปดาห์ที่ 2

Result	
โหลดปกติ	686.55 MWh
โซล่าเซลล์	244.83 MWh
โหลดหลังหักลบโซล่าเซลล์	447.94 MWh
โหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	445.93 MWh
พลังงานที่ซื้อมากักเก็บ	13,962 kWh
พลังงานที่ได้จากการปล่อย	9,822 kWh
ตัดยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า	4.09 MW
ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้ารายสัปดาห์ก่อนใช้ระบบกักเก็บพลังงาน	4.78 MW
ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้ารายสัปดาห์หลังใช้ระบบกักเก็บพลังงาน	4.08 MW

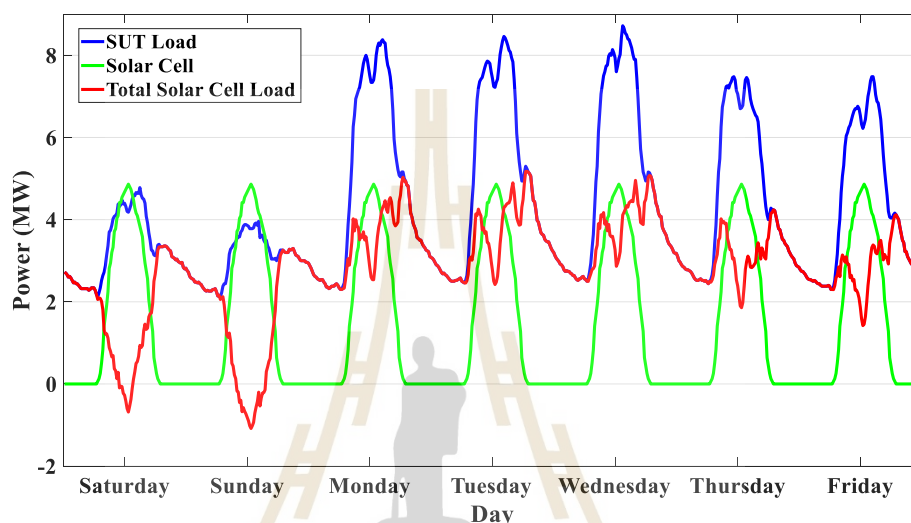
จากตารางที่ 4.24 ระบบกักเก็บพลังงานในโหมดรายสัปดาห์จะกักเก็บพลังงานในวันที่มีการใช้โหลดน้อย คือ วันเสาร์และอาทิตย์ ได้ทั้งหมด 167 ก้อน และนำมาปล่อยในวันธรรมดาวันจันทร์ถึงวันศุกร์ทั้งหมด 167 ก้อนเช่นกัน โดยสามารถปล่อยแบบกระจายเพื่อตัดยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าได้ ใช้ PSO หาค่าที่ใช้พลังงานน้อยสุดในสัปดาห์นี้โดยได้ค่าตัดยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ 4.09 MW ช่วยลดการใช้พลังงานจากก่อนใช้ระบบกักเก็บใช้พลังงานจะอยู่ที่ 447.94 MWh หลังใช้ระบบกักเก็บใช้พลังงานอยู่ที่ 445.93 MWh ลดลงมา 2.01 MWh และยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าก่อนใช้ระบบกักเก็บอยู่ที่ 4.78 MW หลังใช้ระบบกักเก็บมีค่า 4.08 MW ในสัปดาห์นี้สามารถช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดไปได้ประมาณ 700 kW

ตารางที่ 4.25 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการใช้พลังงานน้อยที่สุดโดยใช้ PSO ในสัปดาห์ที่ 2

Iteration	ค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดปล่อย (kW)
1	4,091.89
2	4,091.99
3	4,091.82
4	4,091.94
5	4,091.98
Average	4,091.92
Standard deviation	0.07

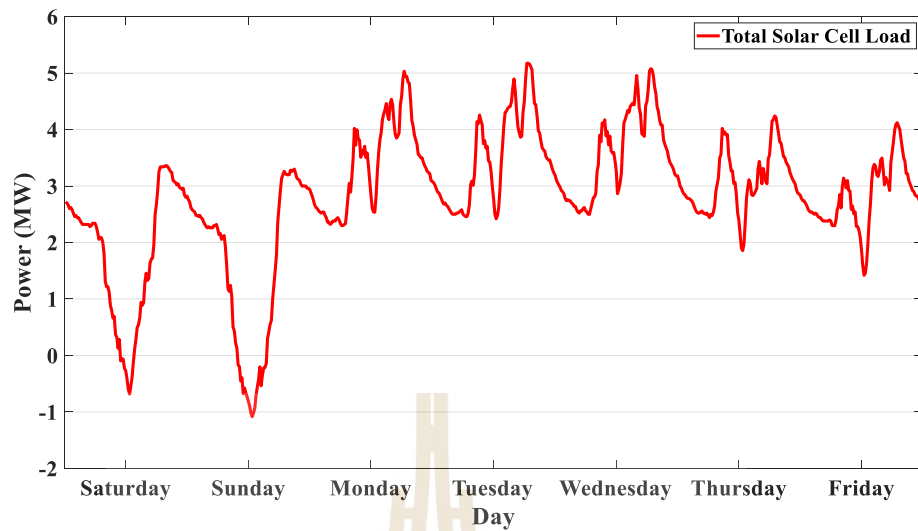
ตารางที่ 4.25 เป็นตารางหาค่ากำลังที่ควรปล่อยจากการใช้ PSO ในการคำนวณหา ค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยได้ค่าออกมาใกล้เคียงกันอย่างมาก เฉลี่ยประมาณ 4,091.92 kW มีส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.07 kW ถือว่ามีค่าเบี่ยงเบนที่น้อยมาก และค่านี้ทำให้การใช้พลังงานของโหลด ที่ผ่านระบบกักเก็บมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่น้อยที่สุดในสัปดาห์ที่ 2

สัปดาห์ที่ 3 จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ในวันพุธ 8,720 kW ดังในรูป 4.57

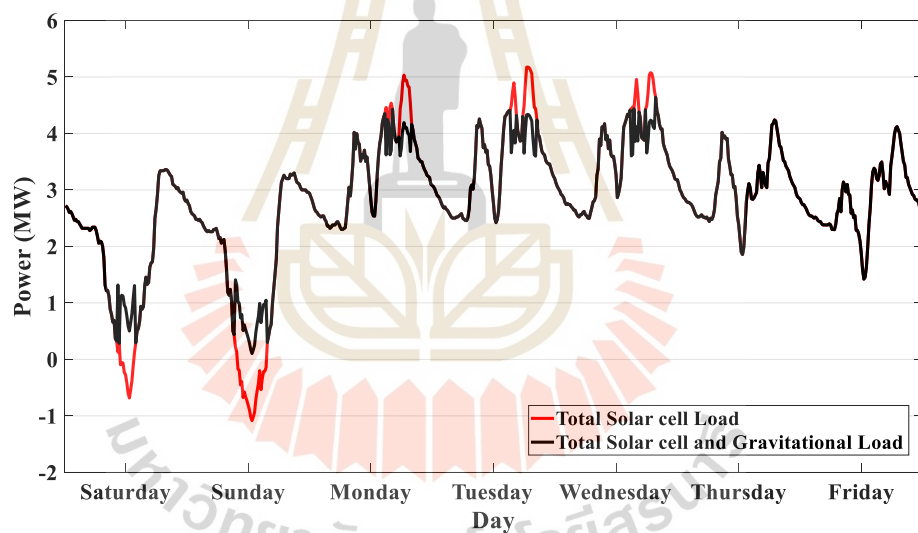


รูปที่ 4.57 สัปดาห์ที่ 3 ในเดือนกันยายน 2562 รวมกับพลังงานโซล่าเซลล์ขนาด 6 MW

จากรูปที่ 4.57 เส้นสีน้ำเงินเป็นโหลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยราย สัปดาห์ โดยใช้พลังงานอยู่ที่ 718.39 MWh เส้นสีเขียว คือ ขนาดของพลังงานโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ ใน แต่ละวันขนาด 6 MW พลังงานที่ได้ทั้งสัปดาห์อยู่ที่ 244.83 MWh เส้นสีแดง คือ โหลดการใช้ไฟฟ้า ของมหาวิทยาลัยหักลบกับโหลดโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ โดยที่วันเสาร์สูญเสียพลังงานที่ 0.86 MWh และ ในวันอาทิตย์สูญเสียพลังงานที่ 3.21 MWh รวมทั้ง 2 วัน ทั้งพลังงานสูญเสียเปล่าประมาณ 4.11 MWh จึงได้นำพลังงานที่เหลือทิ้งนี้มากักเก็บในระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อไม่ให้พลังงานสูญเสียโดยเปล่า ประโยชน์ ดังรูปที่ 4.58 โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยหลังลบกับโหลดโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ในแต่ละวัน

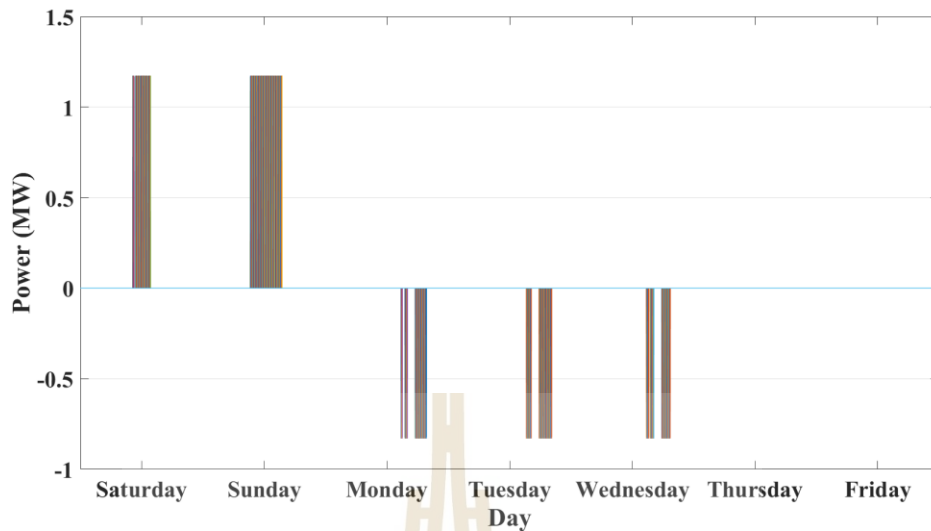


รูปที่ 4.58 โหลดการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยห้กลับกับโหลดโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้ในสัปดาห์ที่ 3



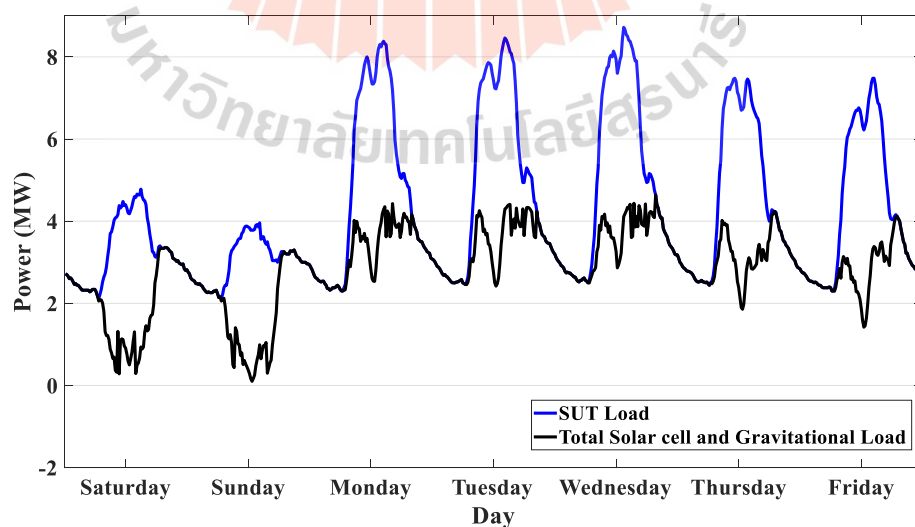
รูปที่ 4.59 โหลดที่ยกก่อนเหล็กเพื่อกักเก็บพลังงานและปล่อยก่อนเหล็กลงในสัปดาห์ที่ 3

ทำการยกก้อนเหล็กในช่วง 2 วัน (เสาร์-อาทิตย์) ที่มีค่าติดลบและค่าที่ต่ำกว่า 250 kW แล้วให้นำก้อนเหล็กไปปล่อยในช่วงวันธรรมดาที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลดในแต่ละวันและให้ได้พลังงานน้อยที่สุด ตามรูปที่ 4.59 เส้นสีแดง จะเป็นเส้นโหลดเดิมที่ยังไม่มีการกักเก็บ เส้นสีดำ เป็นกราฟโหลดใหม่ที่มีการกักเก็บพลังงาน ในวันเสาร์และอาทิตย์ และนำมาปล่อยใช้พลังงาน ในวันจันทร์ถึงศุกร์ ได้แสดงกำลังและจำนวนที่ใช้ในการยกและที่ได้จากการปล่อยดังกราฟรูปที่ 4.60

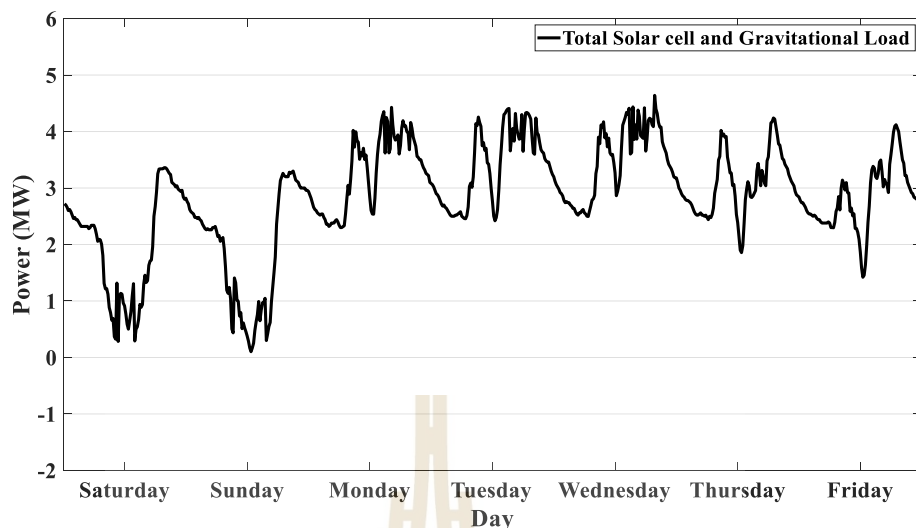


รูปที่ 4.60 กำลังงานที่ใช้ในการยกและกำลังงานที่ได้จากการปล่อยในสัปดาห์ที่ 3

จากรูปที่ 4.60 ในวันเสาร์สามารถยกเก็บได้ทั้งหมด 46 ก้อน วันอาทิตย์สามารถยกเก็บได้ทั้งหมด 88 ก้อน รวมที่ยกขึ้นได้ 135 ก้อน แล้วนำมาปล่อยในวันจันทร์ถึงวันพุธได้จำนวนในแต่ละวัน 43, 50 และ 42 ก้อน ตามลำดับ ใช้กำลังงานในการยกขึ้นแต่ละก้อนประมาณ 1.16 MW ได้กำลังงานจากการปล่อยลงแต่ละก้อนอยู่ที่ 0.82 พลังงานที่ใช้ยกอยู่ที่ 11.29 MWh และพลังงานที่ได้จากการปล่อยอยู่ที่ 7.94 MWh ในสัปดาห์ที่ 3 จะสามารถกระจายปล่อยได้ 3 วัน เนื่องจากในวันพฤหัสบดีและวันศุกร์โหลดจะอยู่ต่ำกว่าจุดที่ตัดยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 4.61 โหลดปกติเทียบกับโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 3



รูปที่ 4.62 โหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงาน

จากรูปที่ 4.62 จะยังเห็นว่าในวันเสาร์และวันอาทิตย์ โหลดสีดำที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานไม่มีค่ากำลังงานติดลบ สัปดาห์ที่ 3 จึงไม่เหลือพลังงานที่เหลือทิ้ง

สามารถนำมาปล่อยแบบกระจายทุก ๆ วันในวันธรรมดาทั้งสัปดาห์ได้ 3 วัน คือ วันจันทร์ถึงวันพุธ เนื่องจากในวันพฤหัสบดีและวันศุกร์โหลดการใช้ไฟจะอยู่ต่ำกว่าค่าที่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

ตารางที่ 4.26 กำลังงานและพลังงานที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน ในสัปดาห์ที่ 3

Result	
โหลดปกติ	718.39 MWh
โซล่าเซลล์	244.83 MWh
โหลดหลังหักลบโซล่าเซลล์	477.66 MWh
โหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	476.90 MWh
พลังงานที่จ่ายกักเก็บ	11,289 kWh
พลังงานที่ได้จากการปล่อย	7,940 kWh
ตัดยอดค่าความต้องการพลังไฟฟ้า	4.44 MW
ค่าความต้องการพลังไฟฟารายสัปดาห์ก่อนใช้ระบบกักเก็บพลังงาน	5.18 MW
ค่าความต้องการพลังไฟฟารายสัปดาห์หลังใช้ระบบกักเก็บพลังงาน	4.64 MW

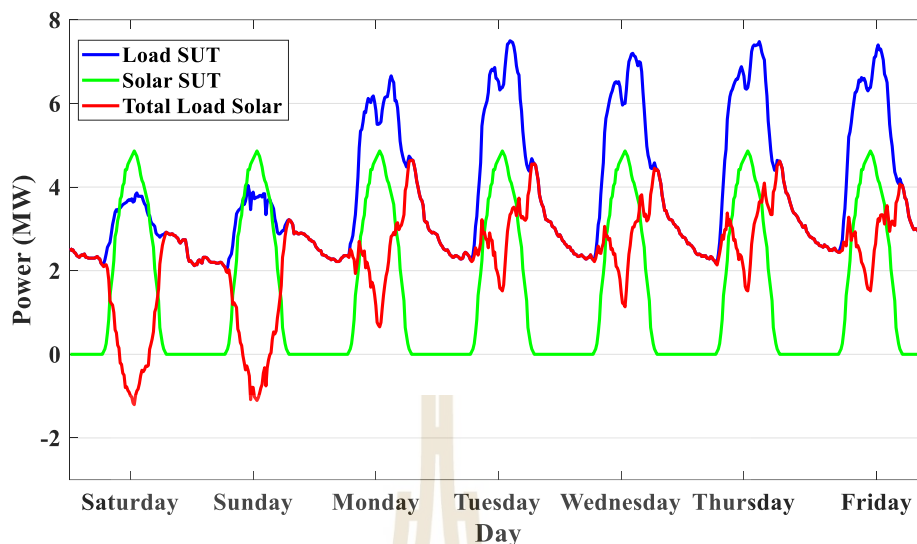
จากตารางที่ 4.26 ระบบกักเก็บพลังงานในโหมดรายสัปดาห์จะกักเก็บพลังงานในวันที่มีการใช้โหลดน้อย คือ วันเสาร์และอาทิตย์ ได้ทั้งหมด 135 ก้อน และนำมาปล่อยในวันธรรมดา วันจันทร์ถึงวันศุกร์ทั้งหมด 135 เช่นกัน โดยสามารถปล่อยแบบกระจายเพื่อตัดยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าได้ ใช้ PSO หาค่าที่ใช้พลังงานน้อยสุดในสัปดาห์นี้โดยได้ค่าตัดยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ 4.44 MW ช่วยลดการใช้พลังงานจากก่อนใช้ระบบกักเก็บใช้พลังงานจะอยู่ที่ 477.66 MWh หลังใช้ระบบกักเก็บใช้พลังงานอยู่ที่ 476.90 MWh ลดลงมา 3.45 MWh และยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าก่อนใช้ระบบกักเก็บอยู่ที่ 5.18 MW และหลังใช้ระบบกักเก็บมีค่า 4.64 MW ในสัปดาห์นี้สามารถช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดไปได้ประมาณ 540 kW ในสัปดาห์ที่ 3 จะมีการกักเก็บพลังงานได้น้อยกว่าสัปดาห์อื่น ๆ เนื่องจากโหลดการใช้ไฟในวันเสาร์และวันอาทิตย์มีค่าพลังงานโซลาร์เซลล์เหลืออยู่น้อย เลยทำให้ระบบกักเก็บ กักเก็บได้น้อยตามไปด้วย

ตารางที่ 4.27 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการใช้พลังงานน้อยที่สุดโดยใช้ PSO ในสัปดาห์ที่ 3

Iteration	ค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดปล่อย (kW)
1	4,439.99
2	4,439.99
3	4,439.99
4	4,439.99
5	4,439.99
Average	4,439.99
Standard deviation	0

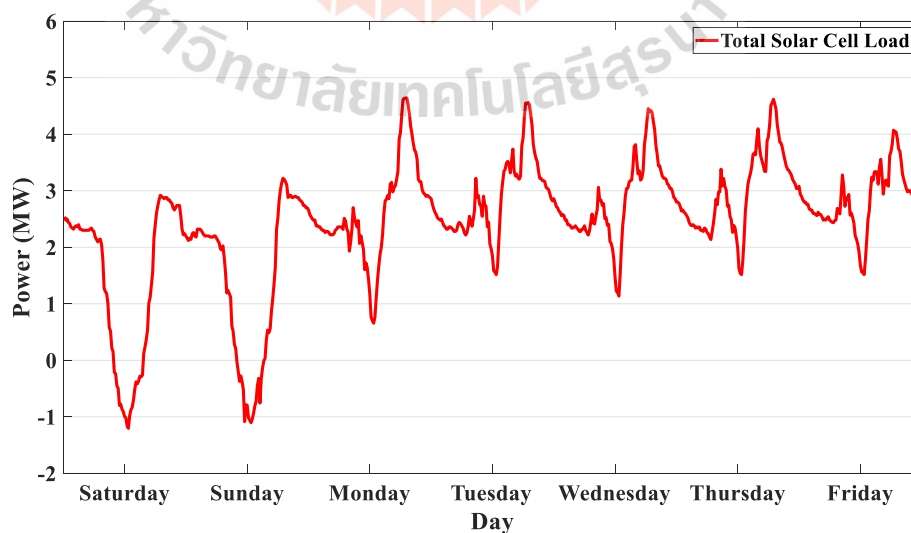
ตารางที่ 4.27 เป็นตารางหาค่ากำลังที่ควรปล่อยจากการใช้ PSO ในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยได้ค่าออกมาใกล้เคียงกันอย่างมาก เฉลี่ยประมาณ 4,439.99 kW มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0 kW ถือว่าไม่มีค่าความเบี่ยงเบน และค่านี้ทำให้การใช้พลังงานของโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดในสัปดาห์ที่ 3

สัปดาห์ที่ 4 จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ในวันพุธ 7,500 kW ดังในรูป 4.63

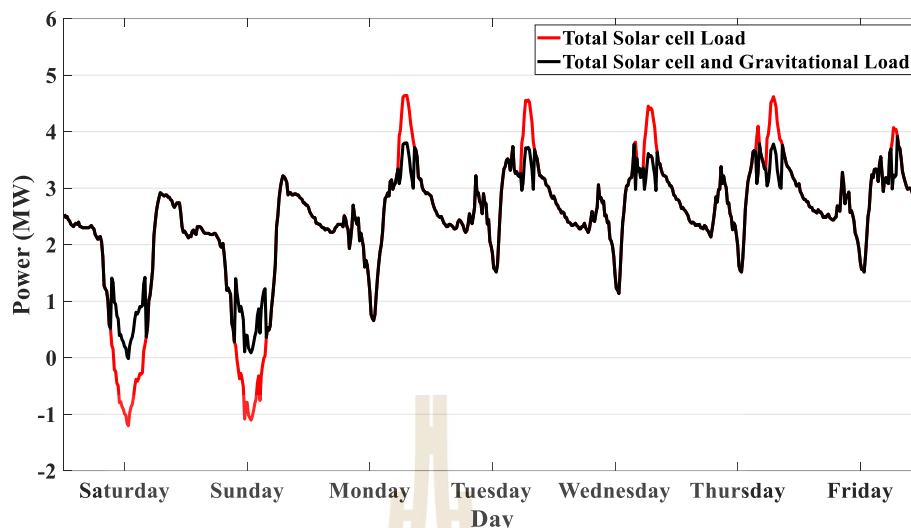


รูปที่ 4.63 สัปดาห์ที่ 4 ในเดือนกันยายน 2562 รวมกับพลังงานโซลาร์เซลล์ขนาด 6 MW

จากรูปที่ 4.63 เส้นสีน้ำเงินเป็นโพลการใช้พลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยรายสัปดาห์ โดยใช้พลังงานอยู่ที่ 653.59 MWh เส้นสีเขียว คือ ขนาดของพลังงานโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้ในแต่ละวันขนาด 6 MW พลังงานที่ได้ทั้งสัปดาห์อยู่ที่ 244.83 MWh เส้นสีแดง คือ โพลการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยหักลบกับโพลโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้ โดยที่วันเสาร์สูญเสียพลังงานที่ 3.75 MWh และในวันอาทิตย์สูญเสียพลังงานที่ 3.28 MWh รวมทั้ง 2 วัน ที่พลังงานสูญเสียเปล่าประมาณ 7.03 MWh จึงได้นำพลังงานที่เหลือทิ้งนี้มากักเก็บในระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อไม่ให้พลังงานสูญเสียโดยเปล่าประโยชน์ ดังรูปที่ 4.64 โพลการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยหักลบกับโพลโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้ในแต่ละวัน

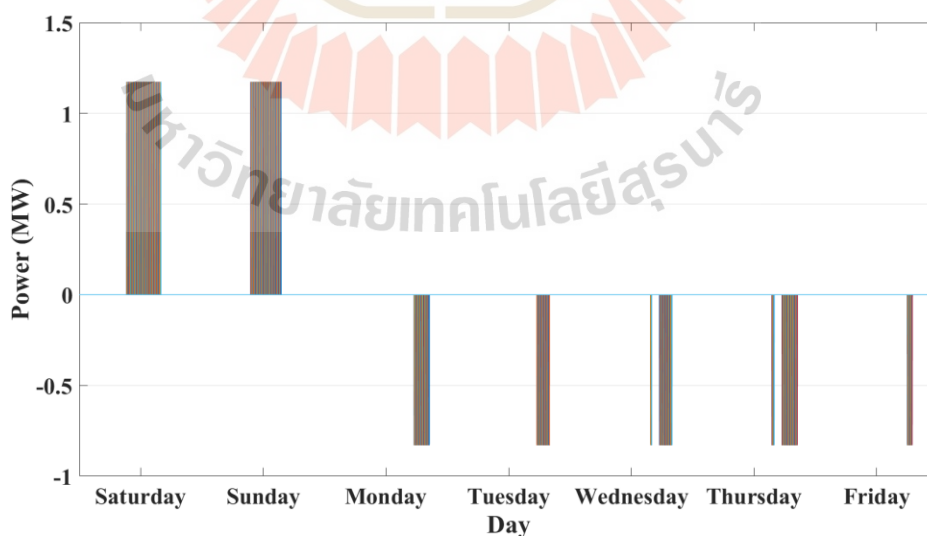


รูปที่ 4.64 โพลการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยหักลบกับโพลโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้ในสัปดาห์ที่ 4



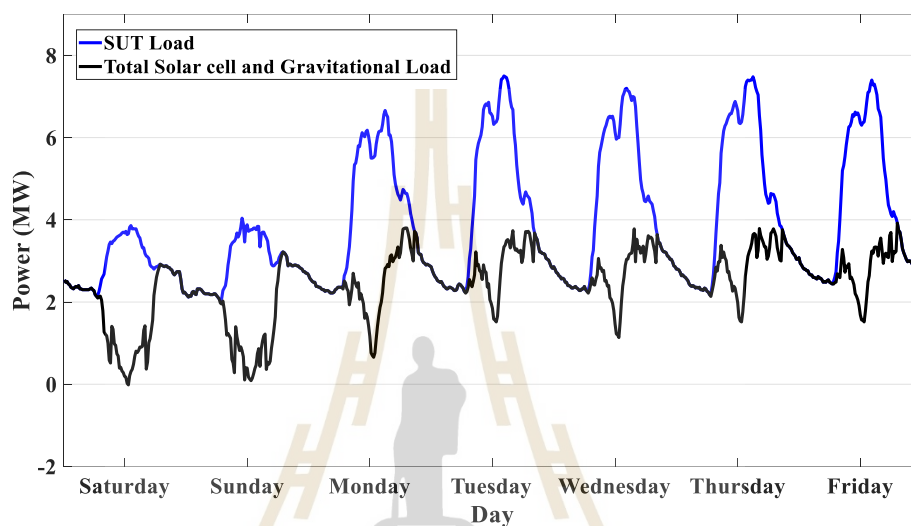
รูปที่ 4.65 โหลดที่ยกก่อนเหล็กเพื่อกักเก็บพลังงานและปล่อยก่อนเหล็กลงในสัปดาห์ที่ 4

ทำการยกก่อนเหล็กในช่วง 2 วัน (เสาร์-อาทิตย์) ที่มีค่าติดลบและค่าที่ต่ำกว่า 250 kW แล้วนำก้อนเหล็กไปปล่อยในช่วงวันธรรมดา ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลดในแต่ละวันและให้ได้พลังงานน้อยที่สุด ตามรูปที่ 4.65 เส้นสีแดง จะเป็นเส้นโหลดเดิมที่ยังไม่มีการกักเก็บ เส้นสีดำ เป็นกราฟโหลดใหม่ที่มีการกักเก็บพลังงาน ในวันเสาร์และอาทิตย์ และนำมาปล่อยใช้พลังงาน ในวันจันทร์ถึงศุกร์ ได้แสดงกำลังและจำนวนที่ใช้ในการยกและที่ได้จากการปล่อยดังกราฟรูปที่ 4.66

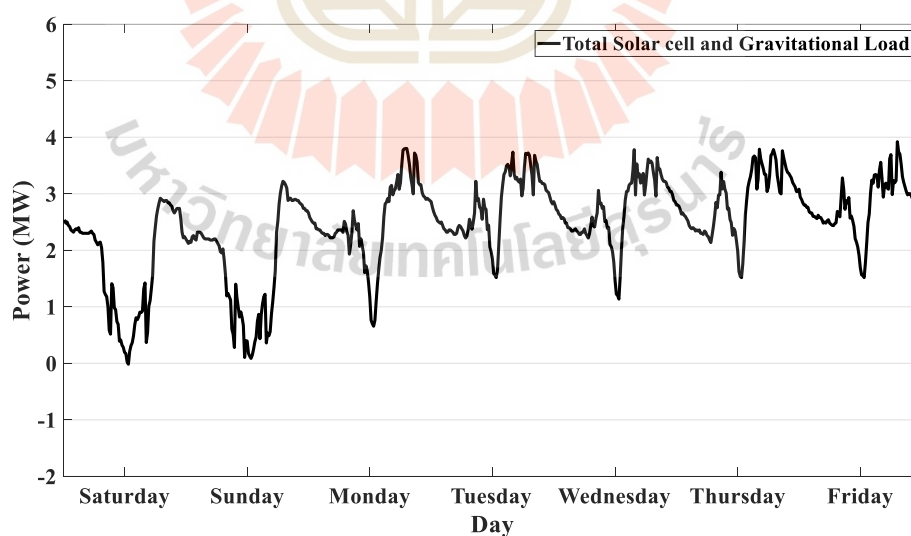


รูปที่ 4.66 กำลังงานที่ใช้ในการยกและกำลังงานที่ได้จากการปล่อยในสัปดาห์ที่ 4

จากรูปที่ 4.66 ในวันเสาร์สามารถยกเก็บได้ทั้งหมด 96 ก้อน วันอาทิตย์สามารถยกเก็บได้ทั้งหมด 86 ก้อน รวมที่ยกขึ้นได้ 182 ก้อน แล้วนำมาปล่อยในวันจันทร์ถึงวันศุกร์ได้จำนวนในแต่ละวัน 43, 36, 39, 50 และ 14 ก้อน ตามลำดับ ใช้กำลังงานในการยกขึ้นแต่ละก้อนประมาณ 1.16 MW ได้กำลังงานจากการปล่อยลงแต่ละก้อนอยู่ที่ 0.82 พลังงานที่ใช้ยกอยู่ที่ 15.15 MWh และพลังงานที่ได้จากการปล่อยอยู่ที่ 10.71 MWh



รูปที่ 4.67 โหลดปกติเทียบกับโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 4



รูปที่ 4.68 โหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานในสัปดาห์ที่ 4

จากรูปที่ 4.67 และ 4.68 จะยังเห็นว่าในวันเสาร์ โหลดสีดำที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงาน ยังมีค่ากำลังงานติดลบเพียงเล็กน้อย เหลือพลังงานที่เหลือทิ้งประมาณ 3.9 kWh

สามารถนำมาปล่อยแบบกระจายทุก ๆ วันในวันธรรมดาทั้งสัปดาห์ได้ 5 วัน คือ วันจันทร์ถึงวันศุกร์

ตารางที่ 4.28 กำลังงานและพลังงานที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน ในสัปดาห์ที่ 4

Result	
โหลดปกติ	653.59 MWh
โซล่าเซลล์	244.83 MWh
โหลดหลังหักลบโซล่าเซลล์	415.78 MWh
โหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	413.19 MWh
พลังงานที่ใช้จ่ายกักเก็บ	15,149 kWh
พลังงานที่ได้จากการปล่อย	10,705 kWh
ตัดยอดค่าความต้องการพลังไฟฟ้า	3.80 MW
ค่าความต้องการพลังไฟฟ้ายรายสัปดาห์ก่อนใช้ระบบกักเก็บพลังงาน	4.64 MW
ค่าความต้องการพลังไฟฟ้ายรายสัปดาห์หลังใช้ระบบกักเก็บพลังงาน	3.92 MW

จากตารางที่ 4.28 ระบบกักเก็บพลังงานในโหมดรายสัปดาห์จะกักเก็บพลังงานในวันที่มีการใช้โหลดน้อย คือ วันเสาร์และอาทิตย์ ได้ทั้งหมด 182 ก้อน และนำมาปล่อยในวันธรรมดาดังกล่าววันจันทร์ถึงวันศุกร์ทั้งหมด 182 เช่นกัน โดยสามารถปล่อยแบบกระจายเพื่อตัดยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าได้ ใช้ PSO หาค่าที่ใช้พลังงานน้อยสุดในสัปดาห์นี้โดยได้ค่าตัดยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ 3.80 MW ช่วยลดการใช้พลังงานจากก่อนใช้ระบบกักเก็บใช้พลังงานจะอยู่ที่ 415.78 MWh หลังใช้ระบบกักเก็บใช้พลังงานอยู่ที่ 413.19 MWh ลดลงมา 2.59 MWh และยอดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าก่อนใช้ระบบกักเก็บอยู่ที่ 4.64 MW และหลังใช้ระบบกักเก็บมีค่า 3.92 MW ในสัปดาห์นี้สามารถช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดไปได้ประมาณ 720 kW

ตารางที่ 4.29 เป็นตารางหาค่ากำลังที่ควรปล่อยจากการใช้ PSO ในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยได้ค่าออกมาใกล้เคียงกันอย่างมาก เฉลี่ยประมาณ 3,799.43 kW มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.80 kW ถือว่ามีค่าเบี่ยงเบนที่น้อยมาก และค่านี้ทำให้การใช้พลังงานของโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่น้อยที่สุดในสัปดาห์ที่ 4

ตารางที่ 4.29 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการใช้พลังงานน้อยที่สุดโดยใช้ PSO ในสัปดาห์ที่ 4

Iteration	ค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดปล่อย (kW)
1	3,799.99
2	3,798.23
3	3,799.99
4	3,798.98
5	3,799.98
Average	3,799.43
Standard deviation	0.80

สรุป

จากผลการจำลองทั้ง 4 สัปดาห์สามารถปล่อยพลังงานที่กักเก็บกระจายได้ในทุก ๆ วัน ค่าที่ได้จากการหาโดยใช้ PSO เป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่ควรปล่อยก่อนเหลือลง สามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและระบบกักเก็บพลังงานยังสามารถทำให้การใช้พลังงานรวมมีค่าน้อยลงจากระบบที่ไม่มีเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.30

ตารางที่ 4.30 สรุปค่าพลังงานและค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดแต่ละสัปดาห์ของเดือนกันยายน 2562 ในแต่ละกรณี

	มีระบบโซลาร์เซลล์ (MWh)	มีระบบโซลาร์เซลล์กับระบบกักเก็บพลังงาน (MWh)	PSO Power limit (MW)	Max Power ก่อนใช้ระบบกักเก็บ (MW)	Max Power หลังใช้ระบบกักเก็บ (MW)
สัปดาห์ที่ 1	395.16	391.72	3.56	4.29	3.56
สัปดาห์ที่ 2	447.94	445.93	4.09	4.78	4.08
สัปดาห์ที่ 3	477.66	476.90	4.44	5.18	4.64
สัปดาห์ที่ 4	415.78	413.19	3.80	4.64	3.92

จากตารางที่ 4.30 สัปดาห์ที่ 1 มีระบบโซลาร์เซลล์อย่างเดียวใช้พลังงานที่ 395.16 MWh ส่วนระบบที่มีทั้งระบบโซลาร์เซลล์กับระบบกักเก็บพลังงานใช้พลังงานลดลงมาเหลือ 391.72 MWh สามารถลดลงมาได้ 3.44 MWh ค่ากำลังสูงสุดสามารถลดลงมาได้ 730 kW

สัปดาห์ที่ 2 มีระบบโซลาร์เซลล์อย่างเดียวใช้พลังงานที่ 447.94 MWh ส่วนระบบที่มีทั้งระบบโซลาร์เซลล์กับระบบกักเก็บพลังงานใช้พลังงานลดลงมาเหลือ 445.93 MWh สามารถลดลงมาได้ 2.01 MWh ค่ากำลังสูงสุดสามารถลดลงมาได้ 700 kW

สัปดาห์ที่ 3 มีระบบโซลาร์เซลล์อย่างเดียวใช้พลังงานที่ 477.66 MWh ส่วนระบบที่มีทั้งระบบโซลาร์เซลล์กับระบบกักเก็บพลังงานใช้พลังงานลดลงมาเหลือ 476.90 MWh สามารถลดลงมาได้ 0.76 MWh ค่ากำลังสูงสุดสามารถลดลงมาได้ 540 kW

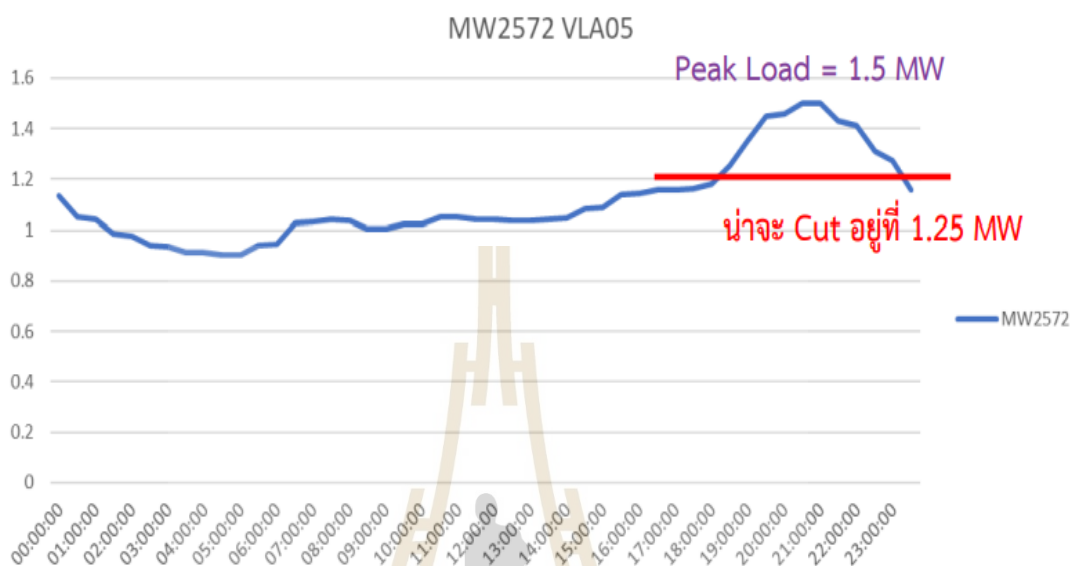
สัปดาห์ที่ 4 มีระบบโซลาร์เซลล์อย่างเดียวใช้พลังงานที่ 415.78 MWh ส่วนระบบที่มีทั้งระบบโซลาร์เซลล์กับระบบกักเก็บพลังงานใช้พลังงานลดลงมาเหลือ 413.19 MWh สามารถลดลงมาได้ 2.59 MWh ค่ากำลังสูงสุดสามารถลดลงมาได้ 720 kW

ดังนั้นเมื่อมีระบบกักเก็บพลังงานมากก็เก็บทั้งเดือน จะสามารถลดพลังงานไปได้ประมาณ 8.8 MWh หรือ 8,800 kWh (8,800 Unit) และสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดหรือค่าความต้องการไฟฟ้าได้ประมาณ 540 kW (เลือกสัปดาห์ที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงที่สุด) ซึ่งถ้าคิดค่าไฟที่ประหยัดคร่าว ๆ จะประหยัดไปได้ประมาณ 80,000 บาทต่อเดือน ถ้าเทียบกับการลงทุนในกรณีโหลดมหาวิทยาลัยรายสัปดาห์ ยังไม่คุ้มค่าหรือยังไม่เหมาะสมกับระบบกักเก็บพลังงานในรูปแบบโน้มถ่วง ถึงแม้ว่าจะสามารถกระจายการคายพลังงานไปได้ทุก ๆ วัน และสามารถตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเดือนได้ เนื่องจากใน 1 สัปดาห์ระบบสามารถกักเก็บและคายพลังงานออกมาได้เพียง 1 รอบต่อสัปดาห์ ซึ่งระบบนี้การคิดความคุ้มค่าจำเป็นต้องทำงาน 1 รอบ/วัน หรือสามารถทำได้ในทุก ๆ วัน และต้องลดพลังงานการใช้ไฟให้น้อยลงมาก ๆ ในทุก ๆ รอบที่ทำงาน จึงได้มองหาโหลดรูปแบบใหม่คือ โหลดชุมชนที่อยู่อาศัยที่แตกต่างจากโหลดมหาวิทยาลัย คือ โหลดมหาวิทยาลัยจะมีการใช้ไฟที่มากในช่วงเวลากลางวัน ส่วนโหลดชุมชนที่อยู่อาศัยจะมีการใช้ไฟที่มากในช่วงตอนเย็นหรือหลังเลิกงาน

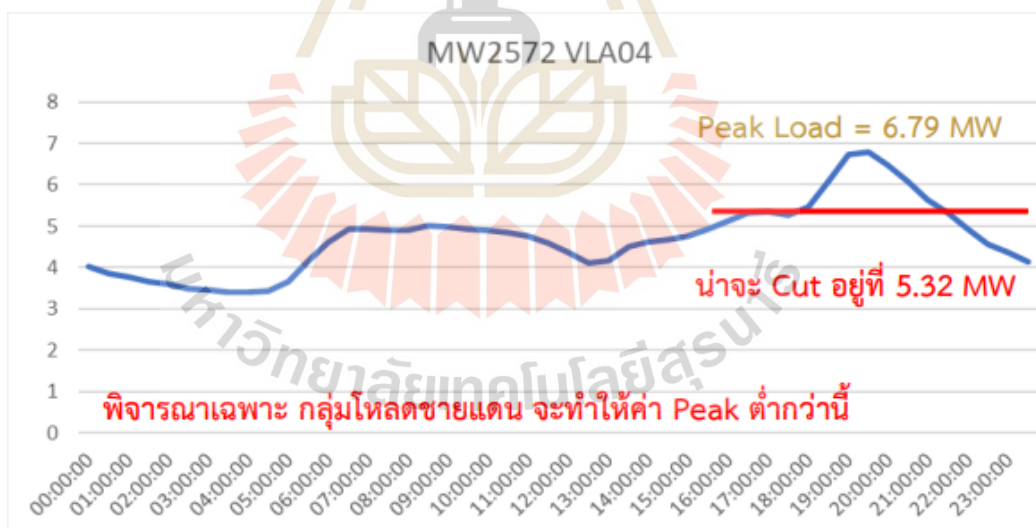
4.4 ผลการจำลองระบบกักเก็บพลังงานของแหล่งชุมชนขนาดกลาง (1MW) และชุมชนขนาดใหญ่ (5MW) โดยใช้ Particle Swarm Optimization

จากผลการจำลองโหลดมหาวิทยาลัยทั้งแบบรายวันและแบบรายเดือน ยังไม่เหมาะสมกับระบบกักเก็บพลังงานชนิดโน้มถ่วง จึงได้ลองนำโหลดชนิดอื่น คือ โหลดการใช้ไฟแบบชุมชนที่อยู่อาศัย มาทำการจำลองเพื่อดูลักษณะแนวโน้ม ในส่วนนี้ได้นำกลุ่มโหลดพื้นที่อำเภอสังขละบุรี จังหวัดกาญจนบุรี ในพื้นที่นี้ปัจจุบันมีระบบจำหน่าย 2 วงจร มีโหลดสำคัญที่จำเป็นต้องการระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อ

แก้ปัญหาไฟฟ้าดับบ่อยครั้งเนื่องจากสายจำหน่ายมีระยะทางไกลและปัญหาเรื่องความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงในช่วงเวลาหลังเลิกงาน ทำให้ช่วงเวลานั้นมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดแทบทุกวัน



รูปที่ 4.69 กราฟกำลังงานที่ใช้ใน 1 วันของกลุ่มโหลดตัวอำเภอสองและตลาดสังขละบุรี



รูปที่ 4.70 กราฟกำลังงานที่ใช้ใน 1 วันของกลุ่มโหลดชายแดน

จากรูปที่ 4.69 และ 4.70 ทางกรไฟฟ้าและชุมชนต้องการตัดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละวันที่ประมาณ 1.25 MW และ 5.32 MW ตามลำดับจึงได้นำโหลดมาจำลองในระบบกักเก็บพลังงานโดยแรงโน้มถ่วงโดยใช้ PSO ในการค่าจุดที่จะเริ่มต้นทำงานของระบบกักเก็บพลังงานหรือเริ่มต้นดึงก้อนเหล็กขึ้น

โดย 2 โหลดชุมชนนี้เป็นโหลดที่ใช้กำลังงานเยอะ จึงเลือกใช้ระบบกักเก็บพลังงานขนาด 500 ตัน เพื่อกักเก็บพลังงานในช่วงที่มีโหลดต่ำกว่าจุดเก็บพลังงาน โดยที่จุดเก็บพลังงานจะใช้ PSO ในการหาค่านี้มาโดยที่รู้จุดยอดที่ต้องการตัดพิก ในระบบนี้ต้องการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดให้เรียบตาม เส้นสีแดงในรูปที่ 4.69 และ 4.70 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของก้อนเหล็กในระบบของกรณีนี้ทั้งการ ยกขึ้นและปล่อยลง สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วได้ในทุก ๆ ช่วงเวลา เพื่อให้สอดคล้องกับกำลังงาน ที่ต้องการ ณ เวลานั้น ๆ ให้กราฟสามารถเป็นกราฟเรียบตามที่ต้องการได้

การคิดค่าไฟในส่วนนี้จะเลือกใช้ประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ คิดทั้งในรูปแบบของ (Time of Day Rate : TOD) และ (Time of Use Rate : TOU) สำหรับการใช้ไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ อุตสาหกรรม ส่วนราชการ สำนักงาน หรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น รัฐวิสาหกิจ สถานทูต สถานที่ทำการของหน่วยงานราชการต่างประเทศ สถานที่ทำการขององค์การ ระหว่างประเทศ หรืออื่น ๆ ตลอดจนบริเวณที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความต้องการพลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาที สูงสุดในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ตั้งแต่ 1,000 กิโลวัตต์ขึ้นไป หรือมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3 เดือน ก่อนหน้า เกิน 250,000 หน่วยต่อเดือน โดยต้องผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว ได้เข้าเงื่อนไข อัตราค่าไฟตามตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่

TOD					
	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/kW)			ค่าพลังงาน ไฟฟ้า (บาท/kW)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	Peak	Partial	Off Peak		
แรงดันตั้งแต่ 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	224.30	29.91	0	3.1097	312.24
แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์	285.05	58.88	0	3.1471	312.24
แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์	332.71	68.22	0	3.1751	312.24
TOU					
	ค่าความต้องการพลัง ไฟฟ้า (บาท/kW)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/kW)		ค่าบริการ (บาท/เดือน)	
	Peak	Peak	Off Peak		
แรงดันตั้งแต่ 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	74.14	4.1025	2.549	312.24	
แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์	132.93	4.1839	2.6037	312.24	
แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์	210	4.3297	2.6369	312.24	

โดยที่แบบ TOD

Peak	: เวลา 18.30 น. – 21.30 น.	ของทุกวัน
Partial	: เวลา 08.00 น. – 18.30 น.	ของทุกวัน
	(ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า คิดเฉพาะส่วนที่เกิน Peak)	
Off Peak	: เวลา 21.30 น. – 08.00 น.	ของทุกวัน

โดยที่แบบ TOU

Peak	: เวลา 09.00 น. – 22.00 น.	วันจันทร์ - ศุกร์
Off Peak	: เวลา 22.00 น. – 09.00 น.	วันจันทร์ - ศุกร์
Holiday	: เวลา 00.00 น. – 24.00 น.	วันเสาร์ - อาทิตย์ (และวันหยุดราชการ)

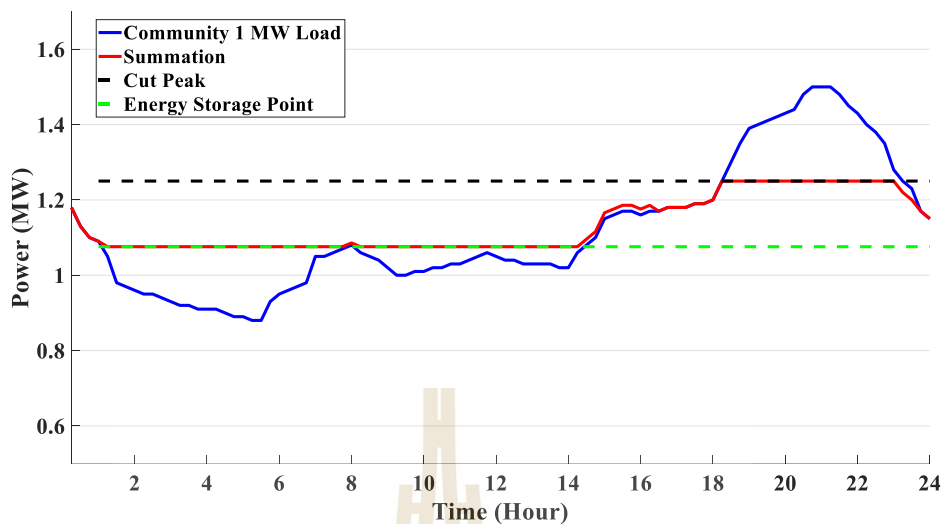
เนื่องจากแหล่งชุมชนรับไฟจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ดังนั้นจากตารางที่ 4.31 ในการจำลองนี้จึงนำค่าไฟที่มีแรงดัน 22-33 กิโลโวลต์ มาคิดค่าไฟของทั้ง 2 โหลด เนื่องจากเป็นค่าไฟที่อยู่ในอัตราปานกลางจากในตาราง

การคำนวณค่าไฟรายเดือนของโหลดชุมชนทั้งขนาดกลางและขนาดใหญ่ จะคำนวณจากกราฟของโหลดทั้ง 30 วัน รวมกันบวกกับค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลดคูณกับค่าความต้องการพลังไฟฟ้า เนื่องจากข้อมูลหรือโหลดที่มี ไม่เพียงพอต่อการจำลองทั้งเดือน จึงได้สมมติให้โหลดแต่ละโหลดมีลักษณะการใช้ไฟเหมือนเดิมทั้ง 30 วัน รวมทั้งวันเสาร์และวันอาทิตย์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณค่าไฟและเห็นแนวโน้มได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

4.4.1 การจำลองโดยใช้ Particle Swarm Optimization หาค่า Energy Storage Point โดยกำหนดค่า Cut Peak ที่ต้องการ

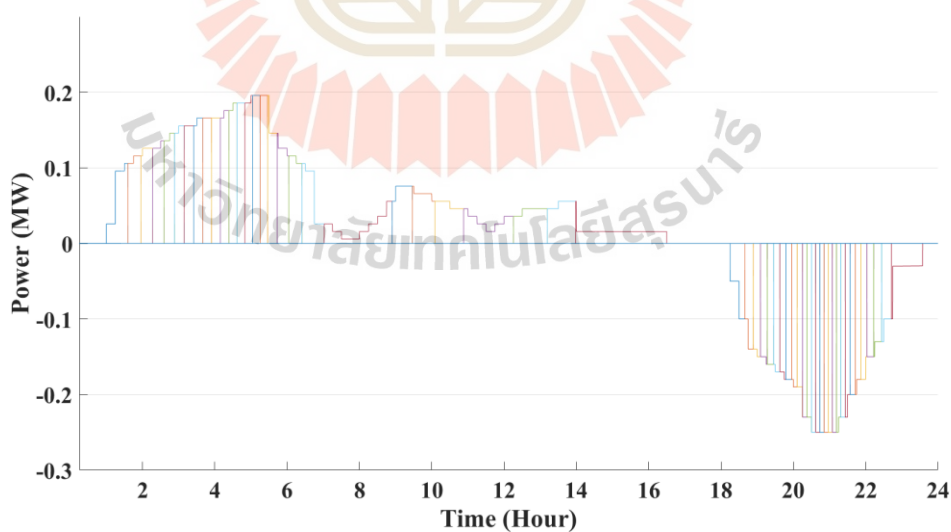
โหลดชุมชนขนาดกลางจะเป็นกลุ่มโหลดตัวอำเภอและตลาดสังขละบุรี ขนาด 1.2

MW

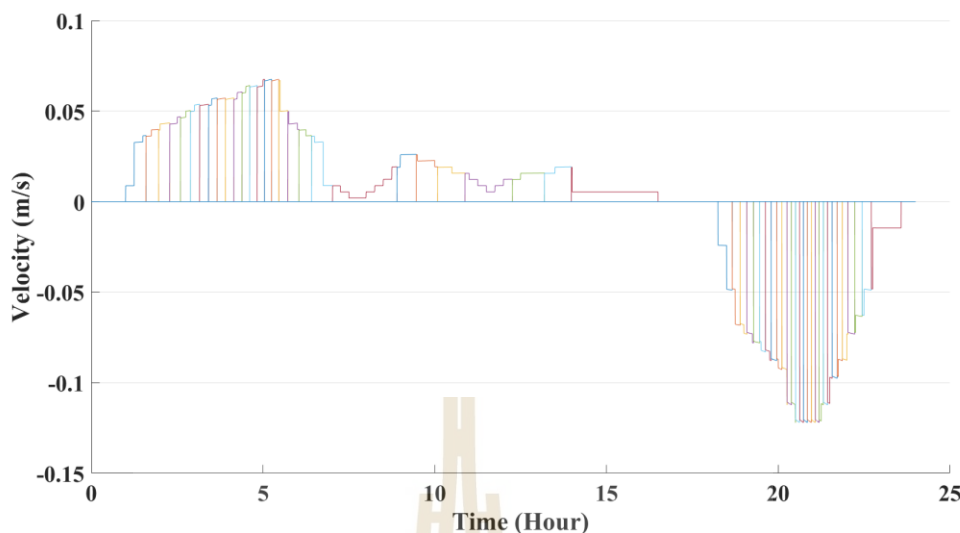


รูปที่ 4.71 กำลังงานที่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของกลุ่มโหลดอำเภอและตลาดสังขละบุรี

รูปที่ 4.71 แสดงกราฟหลังจากใช้ระบบกักเก็บพลังงาน เส้นสีน้ำเงิน คือ กราฟโหลดเดิมของชุมชน เส้นสีแดง คือ กราฟโหลดใหม่ที่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและมีระบบกักเก็บพลังงาน เส้นประสีดำ คือ ค่าที่ต้องการตัดยอดไม่ให้เกินค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เส้นประสีเขียว คือ จุดที่ต้องเริ่มกักเก็บพลังงาน ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลดขนาดกลางอยู่ที่ 1.25 MW



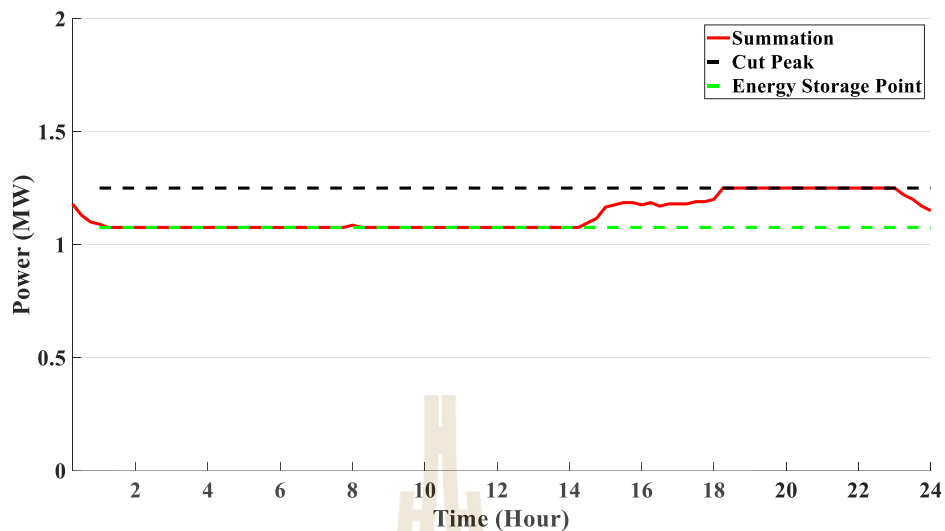
รูปที่ 4.72 กำลังงานของการยกและปล่อยของระบบกักเก็บพลังงานโหลดอำเภอและตลาดสังขละบุรี



รูปที่ 4.73 ความเร็วของการยกและปล่อยของระบบกักเก็บพลังงานไหลดอ้าเภอและตลาดสังขละบุรี

ใช้กำลังงานสูงสุดในช่วงกักเก็บประมาณ 0.2 MW ที่ความเร็วประมาณ 0.07 m/s ส่วนช่วงที่ปล่อยก้อนเหล็กจะได้กำลังไฟฟ้าประมาณ 0.25 MW ที่ความเร็วประมาณ 0.12 m/s เนื่องจากต้องการกำลังงานให้เพียงพอต่อการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการ จึงทำให้ความเร็วในการปล่อยมีความเร็วที่เร็วกว่าการดึงขึ้น

กำลังงานและความเร็วในการยกและการปล่อย การกักเก็บพลังงานแต่ละก้อนใช้เวลาในการปล่อยและยกไม่เท่ากันและกำลังที่ได้ก็จะไม่เท่ากัน การยกและการปล่อยที่ความเร็วมาก ๆ กำลังงานที่ได้จะมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนที่ความเร็วคงที่พลังงานก็จะคงที่ด้วย แสดงได้จากรูปที่ 4.72 และ 4.73 ทั้งกราฟของกำลังไฟฟ้าและกราฟของความเร็ว จะมีลักษณะของกราฟที่คล้ายคลึงกันอย่างมาก เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่แปรผันตรงกับกำลังไฟฟ้าที่ได้



รูปที่ 4.74 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.25 MW

รูปที่ 4.74 แสดงกราฟหลังจากใช้ระบบกักเก็บพลังงานตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.25 MW โดยที่เส้นสีแดง คือ กราฟโหลดใหม่ที่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและมีระบบกักเก็บพลังงาน

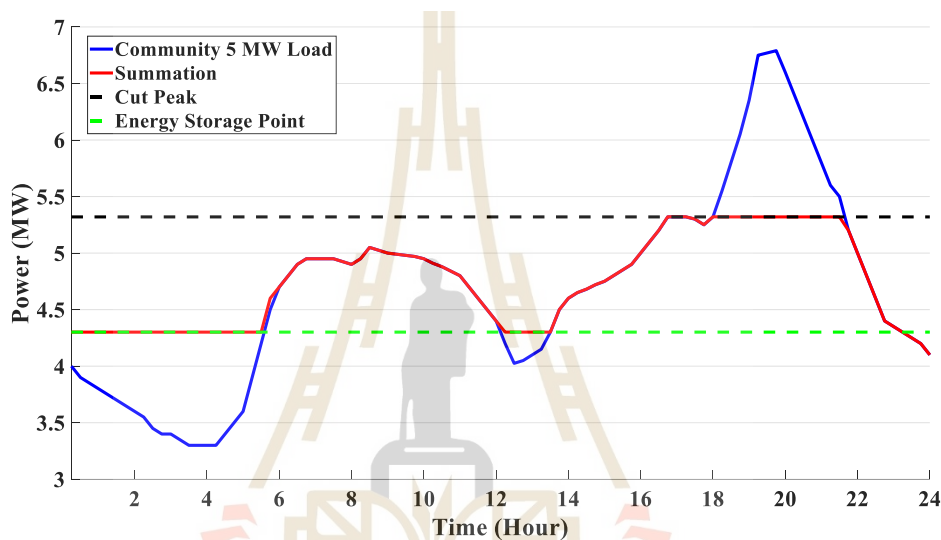
ตารางที่ 4.32 กำลังงานและพลังงานที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานของโหลดชุมชนขนาดกลาง

Result	
โหลดปกติ	26.88 MWh
โหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	27.21 MWh
ใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจากเดิม	0.33 MWh
พลังงานที่ใช้ยกกักเก็บ	1,130 kWh
พลังงานที่ได้จากการปล่อย	800 kWh
จุดตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการ	1,250 kW
จุดที่เริ่มกักเก็บพลังงาน	1,076 kW
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถลดลงได้	250 kW
จำนวนที่ยกและปล่อย	28 ก้อน

จากตารางที่ 4.32 คำนวณพลังงานที่ต่ำกว่าเส้นประสีเขียว เพื่อให้เพียงพอต่อการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในส่วนที่เลยเส้นประสีดำ โดยที่จุดตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการ คือ 1.25 MW จุดที่เริ่มกักเก็บพลังงาน คือ 1.07578 MW ใช้ก้อนเหล็กจำนวน 28 ก้อน พลังงานที่ใช้ยก 1.13

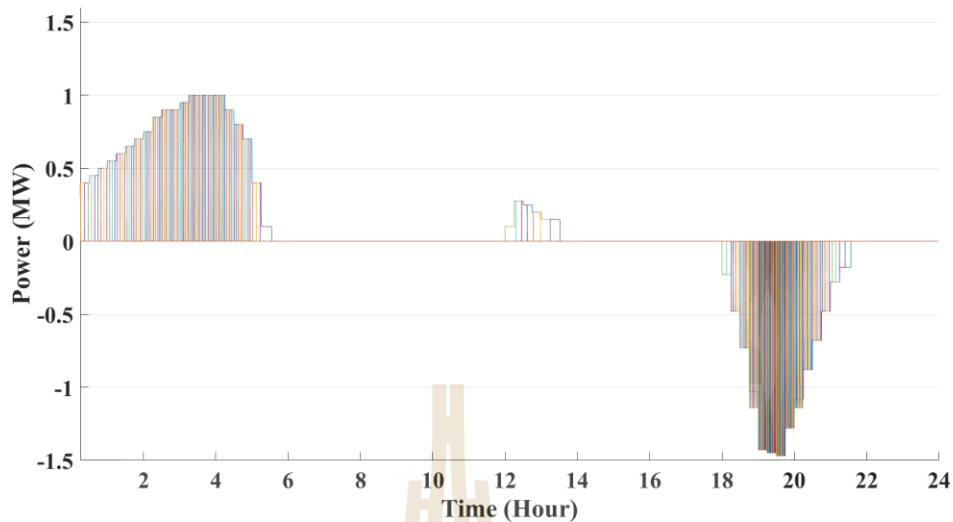
MWh พลังงานที่ได้จากการปล่อย 0.80 MWh พลังงานที่ใช้ก่อนผ่านระบบกักเก็บเท่ากับ 26.88 MWh พลังงานที่ใช้หลังผ่านระบบกักเก็บ 27.21 MWh ใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 0.33 MWh เนื่องจากมีประสิทธิภาพการสูญเสียของระบบกักเก็บพลังงาน แต่สามารถลดยอดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลดชุมชนขนาดกลางลงมาได้ 250 kW

โหลดชุมชนขนาดใหญ่จะเป็นกลุ่มโหลดแยกด้านศุลกากรชายแดนด้านเจดีย์สามองค์ โหลดขนาด 2.14 MW และประเทศเมียนมาร์เมืองพญาตองซูโหลดขนาด 1.57 MW รวมขนาด 3.71 MW

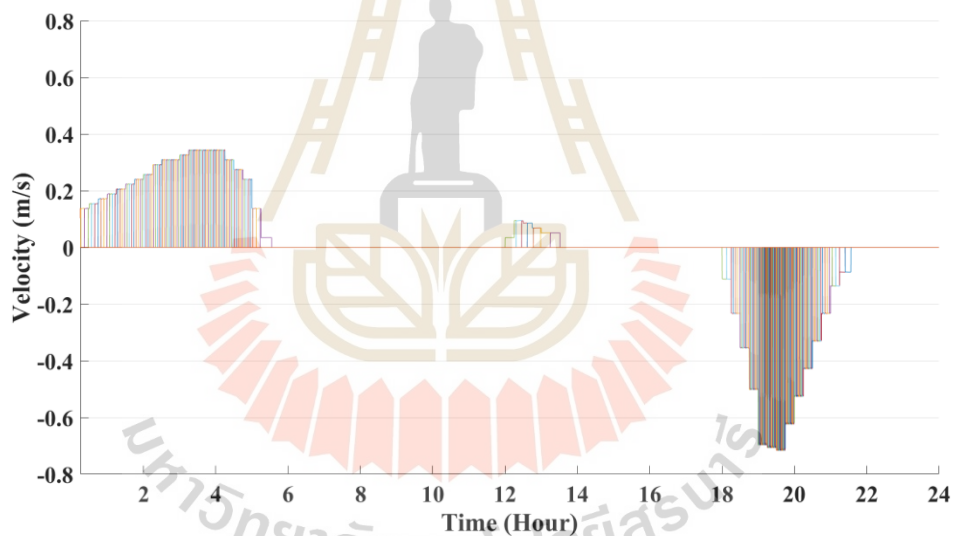


รูปที่ 4.75 กำลังงานที่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของกลุ่มโหลดชายแดน

รูปที่ 4.75 แสดงกราฟหลังจากใช้ระบบกักเก็บพลังงาน เส้นสีน้ำเงิน คือ กราฟโหลดเดิมของชุมชน เส้นสีแดง คือ กราฟโหลดใหม่ที่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและมีระบบกักเก็บพลังงาน เส้นประสีดำ คือ ค่าที่ต้องการตัดยอดไม่ให้เกินค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เส้นประสีเขียว คือ จุดที่ต้องเริ่มกักเก็บพลังงาน ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลดขนาดใหญ่อยู่ที่ 6.79 MW



รูปที่ 4.76 กำลังงานของการยกและปล่อยของระบบกักเก็บพลังงานไหลตขายแดน

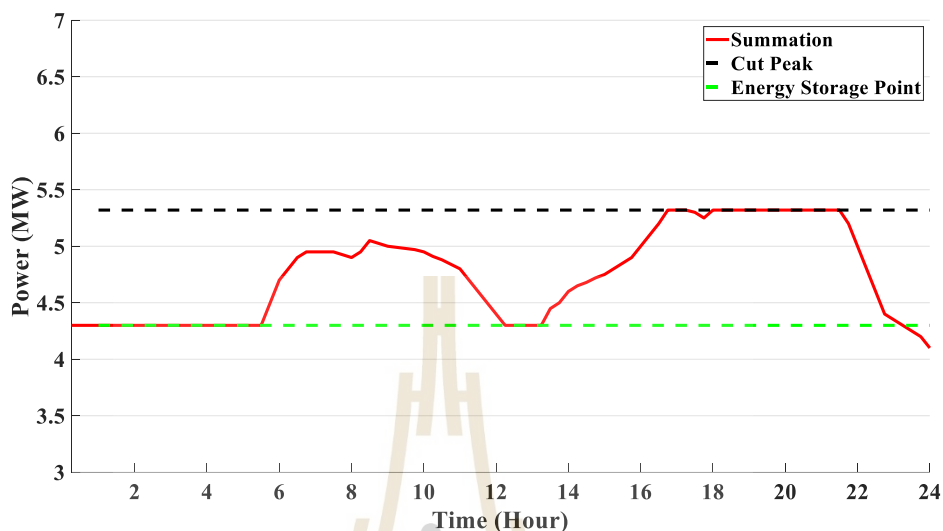


รูปที่ 4.77 ความเร็วของการยกและปล่อยของระบบกักเก็บพลังงานไหลตขายแดน

ใช้กำลังงานสูงสุดในช่วงกักเก็บประมาณ 1 MW ที่ความเร็วประมาณ 0.36 m/s ส่วนช่วงที่ปล่อยกำลังจะได้ประมาณ 1.49 MW ที่ความเร็วประมาณ 0.7 m/s เนื่องจากต้องการกำลังงานที่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด จึงทำให้ความเร็วในการปล่อยมีความเร็วที่เร็วกว่าการดึงขึ้นเกือบ 2 เท่า

กำลังงานและความเร็วในการยกและการปล่อย การกักเก็บพลังงานแต่ละก่อนจะใช้เวลาในการปล่อยและยกไม่เท่ากันและกำลังไฟฟ้าที่ได้ก็จะไม่เท่ากัน การยกและการปล่อยที่ความเร็วมาก ๆ กำลังงานที่ได้จะมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนที่ความเร็วคงที่พลังงานก็จะคงที่ด้วย แสดงได้จากรูป

ที่ 4.76 และ 4.77 ทั้งกราฟของกำลังไฟฟ้าและกราฟของความเร็ว จะมีลักษณะของกราฟที่คล้ายคลึงกันอย่างมาก เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่แปรผันตรงกับกำลังไฟฟ้าที่ได้



รูปที่ 4.78 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 5.32 MW โหลดชายแดน

รูปที่ 4.78 แสดงกราฟหลังจากใช้ระบบกักเก็บพลังงานตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 5.32 MW โดยที่เส้นสีแดง คือ กราฟโหลดใหม่ที่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและมีระบบกักเก็บพลังงาน

ตารางที่ 4.33 กำลังงานและพลังงานที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานของโหลดชุมชนขนาดใหญ่

Result	
โหลดปกติ	112.76 MWh
โหลดหลังการกักเก็บและปล่อย	113.97 MWh
ใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจากเดิม	1.21 MWh
พลังงานที่ซื้อมากักเก็บ	4,130 kWh
พลังงานที่ได้จากการปล่อย	2,920 kWh
จุดตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการ	5,320 kW
จุดที่เริ่มกักเก็บพลังงาน	4,300 kW
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถลดลงได้	1,470 kW
จำนวนที่ยกและปล่อย	102 ก้อน

จากตารางที่ 4.33 คำนวณพลังงานที่ต่ำกว่าเส้นประสีเขียว เพื่อให้เพียงพอต่อการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในส่วนที่เลยเส้นประสีดำ โดยที่จุดตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการ คือ 5.32 MW จุดที่เริ่มกักเก็บพลังงาน คือ 4.30 MW ใช้ก้อนเหล็กจำนวน 102 ก้อน พลังงานที่ไฉ่ยก 4.13 MWh พลังงานที่ได้จากการปล่อย 2.92 MWh พลังงานที่ใช้ก่อนผ่านระบบกักเก็บเท่ากับ 112.76 MWh พลังงานที่ใช้หลังผ่านระบบกักเก็บ 113.97 MWh ใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 1.21 MWh เนื่องจากมีประสิทธิภาพการสูญเสียของระบบกักเก็บพลังงาน แต่สามารถลดยอดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโหลดชุมชนขนาดใหญ่ลงมาได้ 1,470 kW

สรุป

จากรูปที่ 4.74 และ 4.78 ทางกรไฟฟ้าและชุมชนต้องการตัดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละวันที่ประมาณ 1.25 MW และ 5.32 MW ตามลำดับ โดยทำการหาค่าจุดที่ควรเริ่มกักเก็บพลังงานโดยใช้ PSO เพื่อให้ค่าที่นำมาเก็บเพียงพอต่อการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการ แต่การตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของทั้ง 2 โหลด เป็นเพียงตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโหลด เพื่อให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลงตามที่ต้องการ

ระบบกักเก็บพลังงานในโหมดชุมชนจะกักเก็บพลังงานในช่วงที่มีค่าต่ำกว่าจุดที่เริ่มกักเก็บพลังงานและนำมาปล่อยจุดที่ต้องการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโหลด ซึ่งสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามที่ต้องการไฟฟ้าและชุมชนต้องการได้จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่การใช้พลังงานรวมของโหลดจะเพิ่มสูงขึ้น 0.33 MWh ของโหลดขนาดกลางและ 1.21 MWh ของโหลดขนาดใหญ่ จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนของการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4.34 ค่าใช้จ่ายก่อนและหลังมีระบบกักเก็บพลังงาน

ชุมชน		ค่าใช้จ่าย (บาท)			
		TOD รายวัน	TOD รายเดือน	TOU รายวัน	TOU รายเดือน
ขนาดกลาง	ก่อนกักเก็บ	117,722	3,989,156	128,216	4,059,824
	หลังกักเก็บ	119,166	3,956,220	128,777	4,041,106
ขนาดใหญ่	ก่อนกักเก็บ	492,763	16,853,852	540,605	17,183,938
	หลังกักเก็บ	498,047	16,564,018	540,723	16,978,389
ส่วนต่าง	ขนาดกลาง	1,444	-32,936	561	-18,718
	ขนาดใหญ่	5,284	-289,834	118	-205,549

โดยที่ TOD รายวันและ TOU รายวัน จะไม่นำค่าความต้องการพลังไฟฟ้ามาคิดค่าใช้จ่าย จะคิดแต่ค่าพลังงานไฟฟ้า ส่วน TOD รายเดือนและ TOU รายเดือน จะนำค่าความต้องการพลังไฟฟ้ามาคิดค่าใช้จ่ายและคิดค่าพลังงานไฟฟ้าของทั้ง 30 วัน

จากตารางที่ 4.34 ส่วนต่างระหว่าง TOD รายวัน และ TOU รายวัน หลังผ่านระบบกักเก็บพลังงานจะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น คือ TOD รายวัน ขนาดกลางเพิ่มขึ้น 1,444 บาท ขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น 5,284 บาท TOU รายวัน ขนาดกลางเพิ่มขึ้น 561 บาท ขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น 118 บาท เนื่องจากกำลังงานสูญเสียการกักเก็บในระบบ จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น ส่วน TOD รายเดือนและ TOU รายเดือน จะมีค่าใช้จ่ายที่ลดลง คือ TOD รายเดือน ขนาดกลางลดลง 32,936 บาท ขนาดใหญ่ลดลง 289,834 บาท TOU รายเดือน ขนาดกลางลดลง 18,718 บาท ขนาดใหญ่ลดลง 205,549 บาท เนื่องจากสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดรายเดือนได้จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายลดลง ถึงแม้ว่าจะมีกำลังงานสูญเสียในระบบการกักเก็บพลังงาน

ดังนั้นจากค่าใช้จ่ายในตารางที่ 4.34 ไม่สามารถรู้ค่าไฟจากตารางเป็นค่าไฟที่ประหยัดหรือเหมาะสมที่สุดแล้วหรือไม่ จึงได้จำลองผลการจำลองเพิ่มเติมโดยใช้ PSO ทาทั้ง 2 ค่า คือ หาค่าจุดพีคที่ควรตัดและหาค่าจุดที่ควรเริ่มกักเก็บพลังงานที่ทำให้โหลดชนิดนั้นมีค่าใช้จ่ายที่ประหยัดที่สุดและเหมาะสมที่สุด

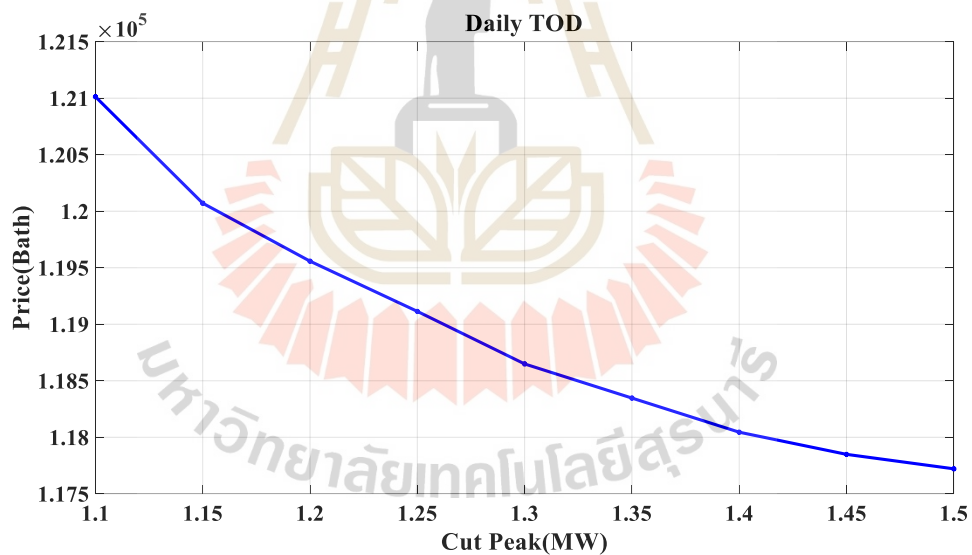
4.4.2 การจำลองใช้ Particle Swarm Optimization หาค่า Cut Peak และ Energy Storage Point โดยที่มีค่าไฟประหยัดและเหมาะสมที่สุด

โหลดชุมชนขนาดกลางจะเป็นกลุ่มโหลดตัวอำเภอและตลาดสังขละบุรี ขนาด 1.2 MW

ค่าจากตารางที่ 4.35 จะมีการคิดค่าไฟ 2 แบบ คือ แบบ TOD และ TOU มีทั้งแบบรายวันและรายเดือน เพื่อหาค่าที่เหมาะสมและประหยัดที่สุดของโหลดชุมชนนี้ โดยการคำนวณจะเป็นการคำนวณโดยตรง ณ.จุด Cut Peak นั้น ๆ เปลี่ยนค่าทุก ๆ 0.05 MW แบบรายวันจะนำเฉพาะโหลดที่ได้มาคิดค่าไฟทั้งหมด ส่วนแบบรายเดือนจะคำนวณจากกราฟของโหลด 30 วัน บวกกับค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตัดยอด รวมทั้งวันเสาร์และวันอาทิตย์ เนื่องจากถ้าเป็นข้อมูลรายเดือนต้องมีข้อมูลที่เพียงพอต่อการคาดการณ์มากกว่านี้ จึงได้ทำการคำนวณแบบประมาณ เพื่อให้เห็นแนวโน้มและทิศทาง แสดงดังรูปที่ 4.79 ถึง 4.82

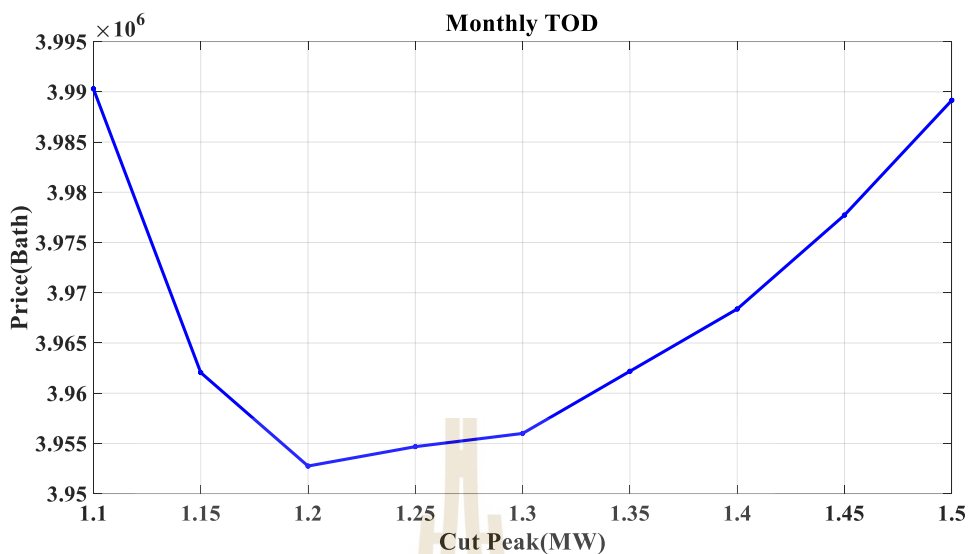
ตารางที่ 4.35 ค่าใช้จ่ายของโหลดชุมชนขนาดกลางทั้งแบบ TOD และ TOU

Cut Peak (MW)	ค่าใช้จ่าย (บาท)			
	TOD รายวัน	TOD รายเดือน	TOU รายวัน	TOU รายเดือน
1.50	117,721	3,989,156	128,042	4,054,625
1.45	117,849	3,977,732	128,236	4,053,344
1.40	118,045	3,968,382	128,244	4,046,476
1.35	118,347	3,962,188	128,258	4,039,758
1.30	118,649	3,955,997	128,367	4,035,928
1.25	119,114	3,954,680	128,707	4,039,008
1.20	119,558	3,952,751	128,991	4,040,434
1.15	120,071	3,962,055	129,307	4,047,071
1.10	121,013	3,990,298	129,950	4,066,344



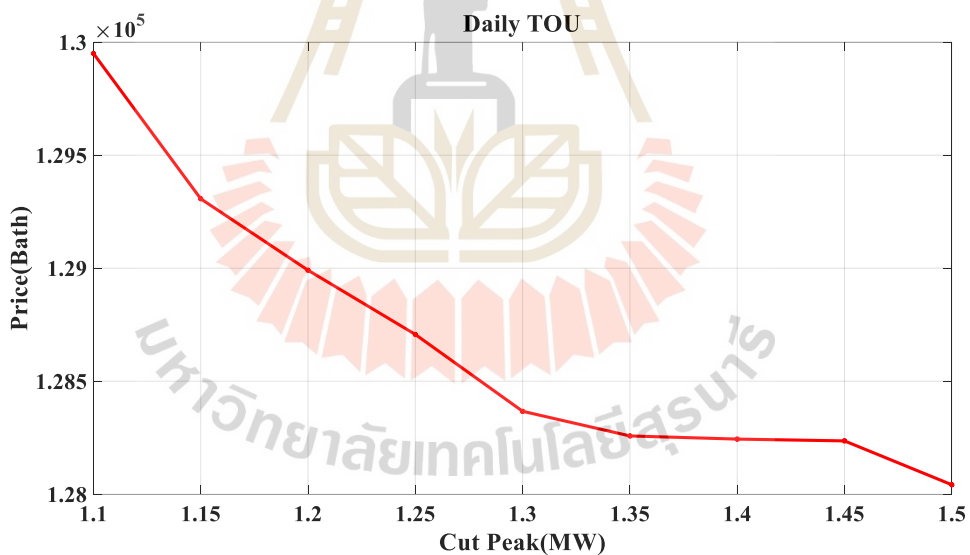
รูปที่ 4.79 TOD แบบรายวันของโหลดขนาดกลาง

จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ประมาณ Cut Peak = 1.5 MW



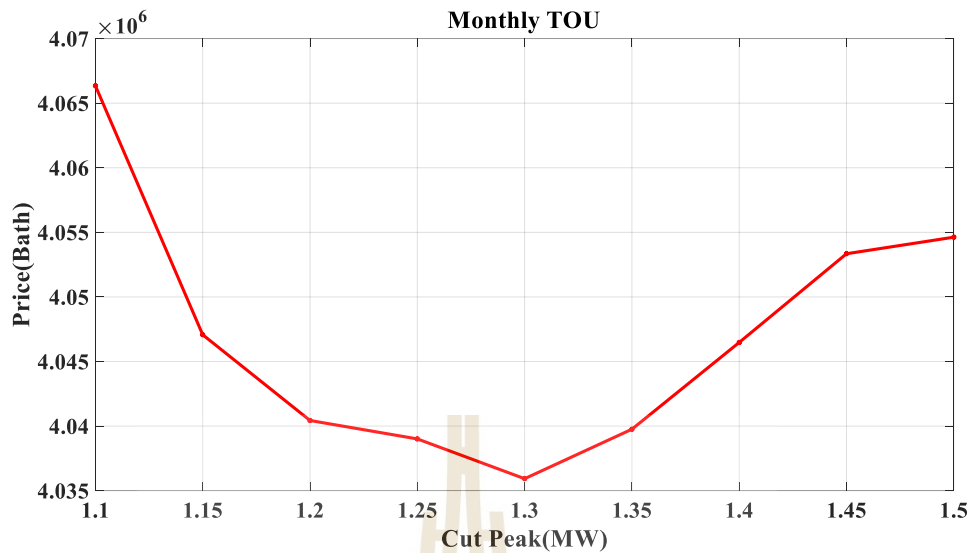
รูปที่ 4.80 TOD แบบรายเดือนของโหลดขนาดกลาง

จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ประมาณ Cut Peak = 1.2 MW



รูปที่ 4.81 TOU แบบรายวันของโหลดขนาดกลาง

จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ประมาณ Cut Peak = 1.5 MW



รูปที่ 4.82 TOU แบบรายเดือน ของโหลดขนาดกลาง

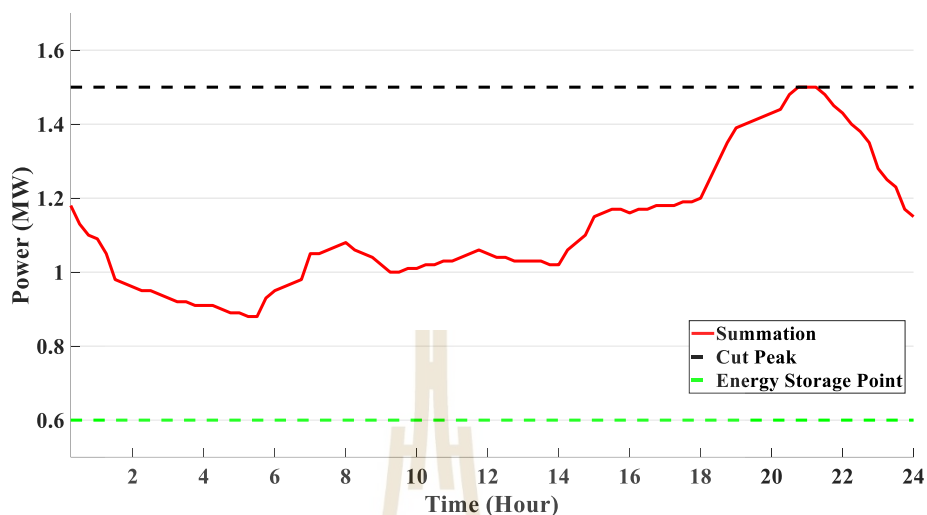
จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ประมาณ Cut Peak = 1.3 MW

จากรูปที่ 4.79 ถึง รูปที่ 4.82 เป็นค่าใช้จ่ายของแต่ละจุด Cut Peak เห็นได้ว่าทั้ง TOD และ TOU แบบรายวันจะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ Cut Peak = 1.5 MW ส่วน TOD และ TOU แบบรายเดือน จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ Cut Peak = 1.2 MW และ 1.3 MW ตามลำดับ เป็นแนวโน้มเพื่อหาค่า Cut Peak และ Energy Storage Point ที่เหมาะสมที่สุดและสามารถทำให้ค่าไฟถูกที่สุดโดยใช้ PSO หาทั้ง 4 กรณี ตามตารางที่ 4.35

ในส่วนนี้จะแบ่งการทำงานในการหาค่าไฟถูกที่สุด แบ่งได้ 4 กรณี

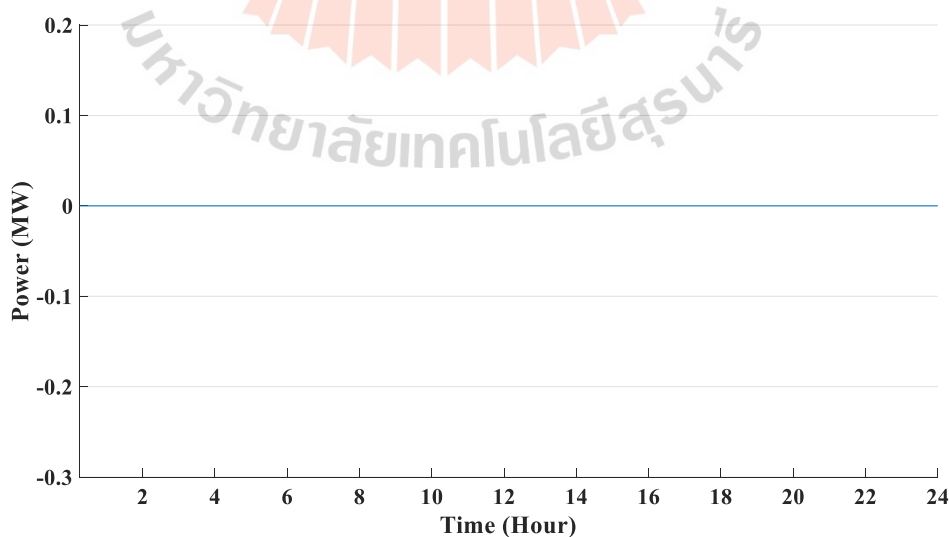
- กรณีที่ 1 อัตราค่าไฟแบบ TOD รายวัน
- กรณีที่ 2 อัตราค่าไฟแบบ TOD รายเดือน
- กรณีที่ 3 อัตราค่าไฟแบบ TOU รายวัน
- กรณีที่ 4 อัตราค่าไฟแบบ TOU รายเดือน

กรณีที่ 1 อัตราค่าไฟแบบ TOD รายวัน

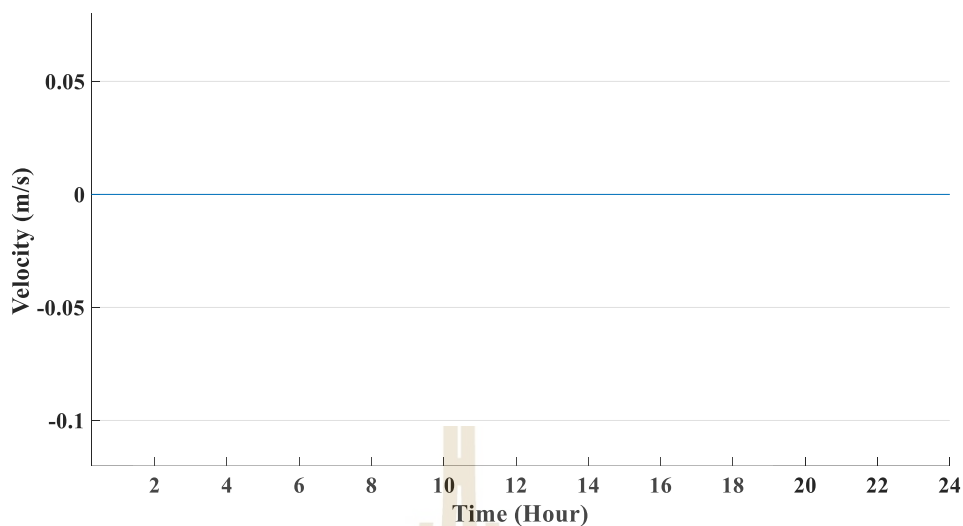


รูปที่ 4.83 จุด Cut Peak ที่ทำได้จาก PSO ของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 1

จากรูปที่ 4.83 จะเห็นว่ากรณีนี้จะไม่มีการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในกราฟโหลด เนื่องจากถ้ามีการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด จะต้องมีการใช้ระบบกักเก็บพลังงานเพื่อยกและปล่อยก้อนเหล็ก ซึ่งในระบบกักเก็บนี้มีการสูญเสียพลังงาน ที่ทำให้ค่าไฟเพิ่มขึ้นตามพลังงานที่สูญเสีย จึงได้ค่าที่คำนวณออกมาแล้วค่าไฟถูกที่สุดคือ Cut Peak = 1.5 MW หรือไม่มีการตัดยอดของโหลดนี้ เพราะค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่ได้มีผลต่อค่าใช้จ่ายของกรณีนี้ จึงไม่จำเป็นต้อง Cut Peak

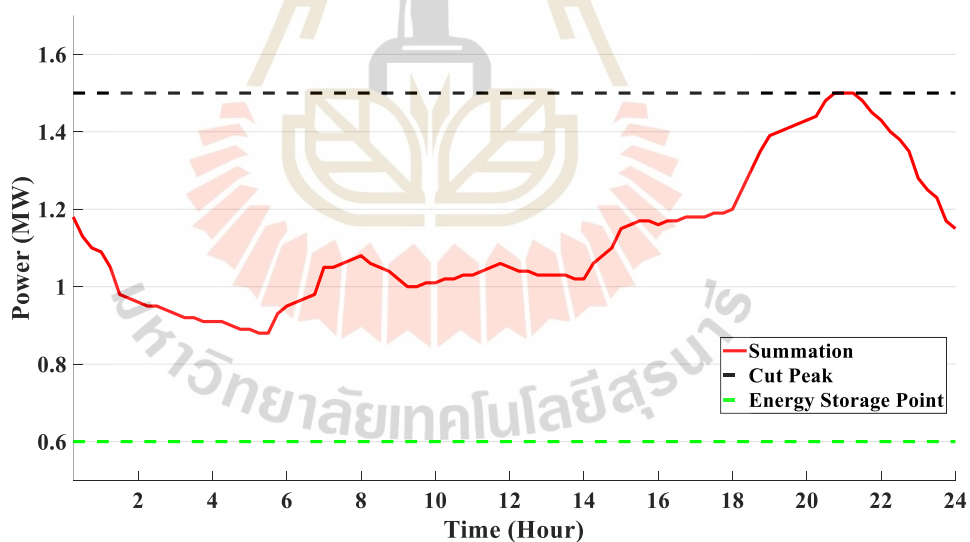


รูปที่ 4.84 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 1



รูปที่ 4.85 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 1

จากรูปที่ 4.84 และ 4.85 จะไม่มีการยกหรือปล่อยของก้อนเหล็ก เนื่องจากไม่มีการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 4.86 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานของโหลดขนาดกลางตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.50 MW กรณีที่ 1

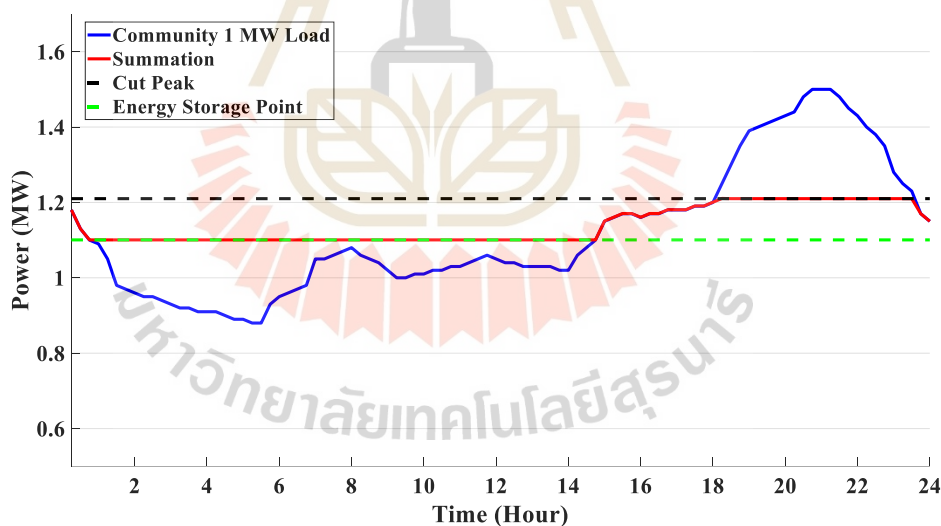
จากรูปที่ 4.86 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถใช้ PSO หาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการตัด คือ 1.50 MW ในกรณี TOD รายวัน

ตารางที่ 4.36 หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดกลาง TOD แบบรายวันโดยใช้ PSO

Iteration	Cut Peak (MW)
1	1.50
2	1.50
3	1.50
4	1.50
5	1.50
Average	1.50
Standard deviation	0

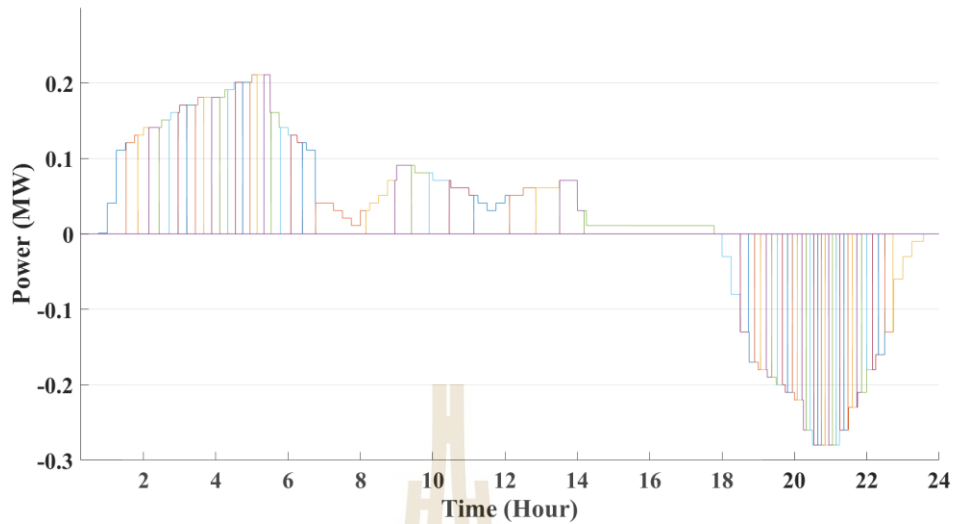
จากตารางที่ 4.36 ได้ค่า 1.5 MW เหมือนกันทุกรอบ เนื่องจากขอบเขตบนที่กำหนดสูงสุดคือ 1.5 MW ค่าที่ได้จึงได้ค่าที่เท่ากันหมดทุกรอบ โดยที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0

กรณีที่ 2 อัตราค่าไฟแบบ TOD รายเดือน

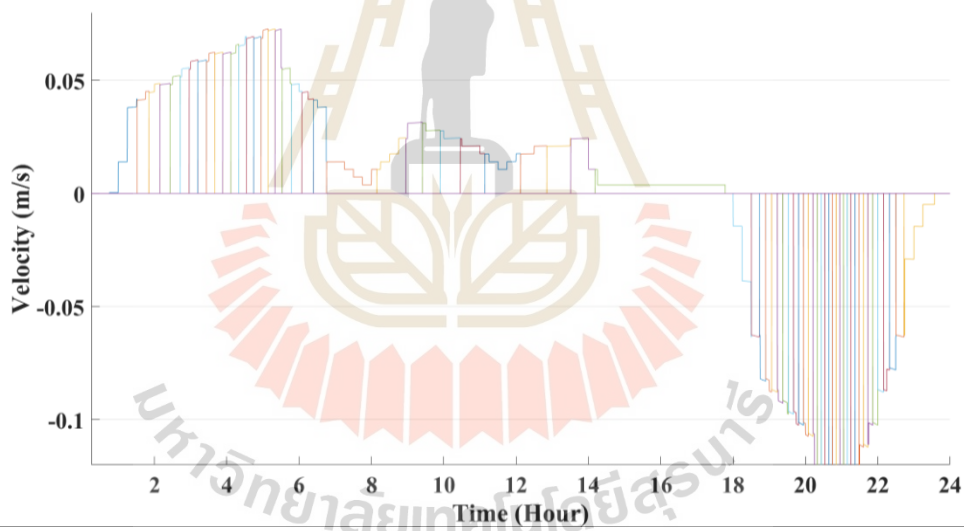


รูปที่ 4.87 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 2

จากรูป 4.87 จะเห็นได้ว่าการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในกราฟโหลด ได้ค่าที่คำนวณออกมาแล้ว คือ Cut Peak ที่ประมาณ 1.213 MW ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่ทำให้ค่าใช้จ่ายของโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานประหยัดที่สุด ถ้าเทียบกับการตัดยอดที่ค่าอื่น ๆ ในกรณีของ TOD แบบรายเดือน

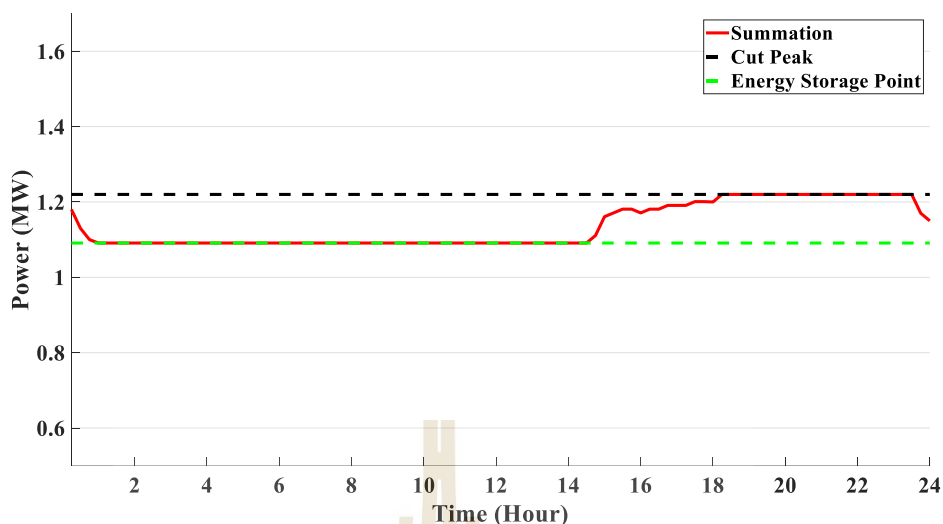


รูปที่ 4.88 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 2



รูปที่ 4.89 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 2

จากรูปที่ 4.88 และ 4.89 แสดงกำลังงานและความเร็วของการยกและปล่อยก้อนเหล็ก เนื่องจากระบบมีการกักเก็บพลังงานและนำมาปล่อยเพื่อตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของวัน



รูปที่ 4.90 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลดขนาดกลางตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.213 MW

กรณีที่ 2

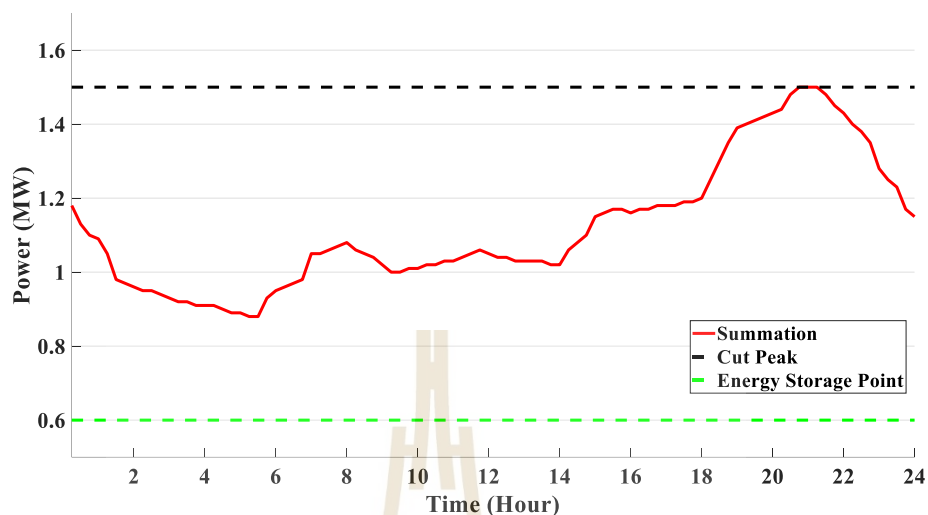
จากรูปที่ 4.90 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถใช้ PSO หาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการตัด คือ 1.213 MW ในกรณี TOD รายเดือน

ตารางที่ 4.37 หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดกลาง TOD แบบรายเดือนโดยใช้ PSO

Iteration	Cut Peak (MW)
1	1.21296
2	1.21894
3	1.22014
4	1.20987
5	1.20112
Average	1.21261
Standard deviation	0.00769

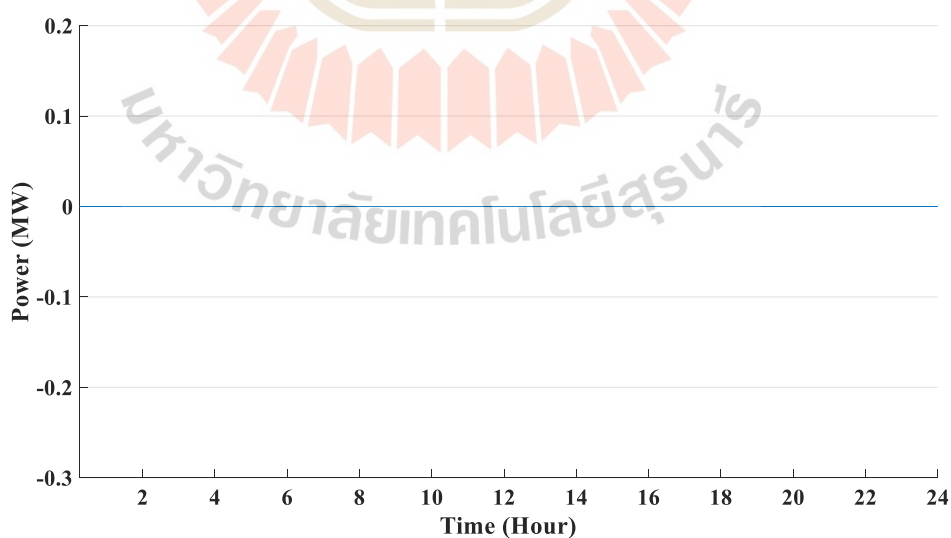
จากตารางที่ 4.37 ได้ค่าตัดยอดประมาณ 1.21261 MW หรือ 1,212.61 kW ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายถูกลงที่สุด โดยที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 0.00769

กรณีที่ 3 อัตราค่าไฟแบบ TOU รายวัน

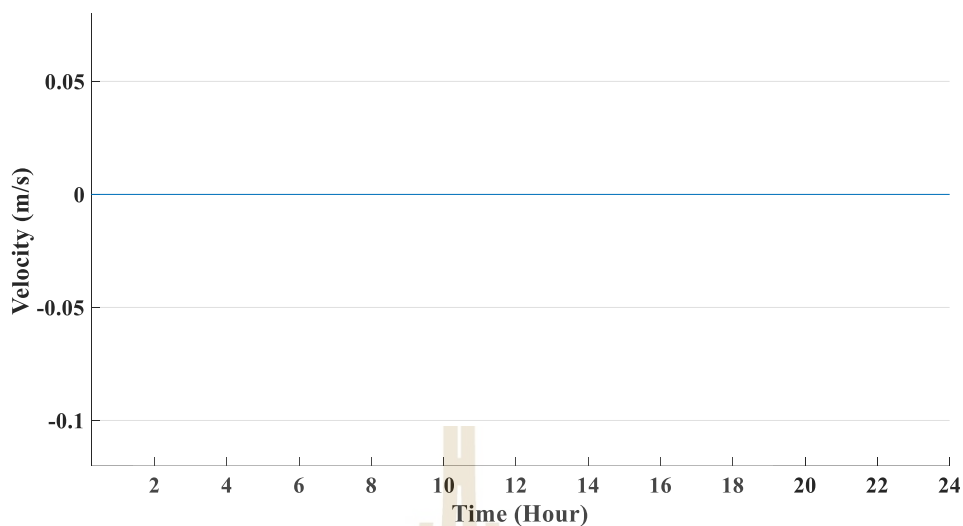


รูปที่ 4.91 จุด Cut Peak ที่ทำได้จาก PSO ของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 3

จากรูปที่ 4.91 จะเห็นได้ว่ากรณีนี้จะไม่มีการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในกราฟโหลด เช่นเดียวกับกรณี TOD แบบรายวัน จึงได้ค่าที่คำนวณออกมาแล้วค่าไฟถูกที่สุดคือ Cut Peak = 1.5 MW หรือไม่มีการตัดยอดของโหลดนี้ เพราะค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่ได้มีผลต่อค่าใช้จ่ายของกรณีนี้ จึงไม่จำเป็นต้อง Cut Peak เพื่อให้สูญเสียพลังงาน

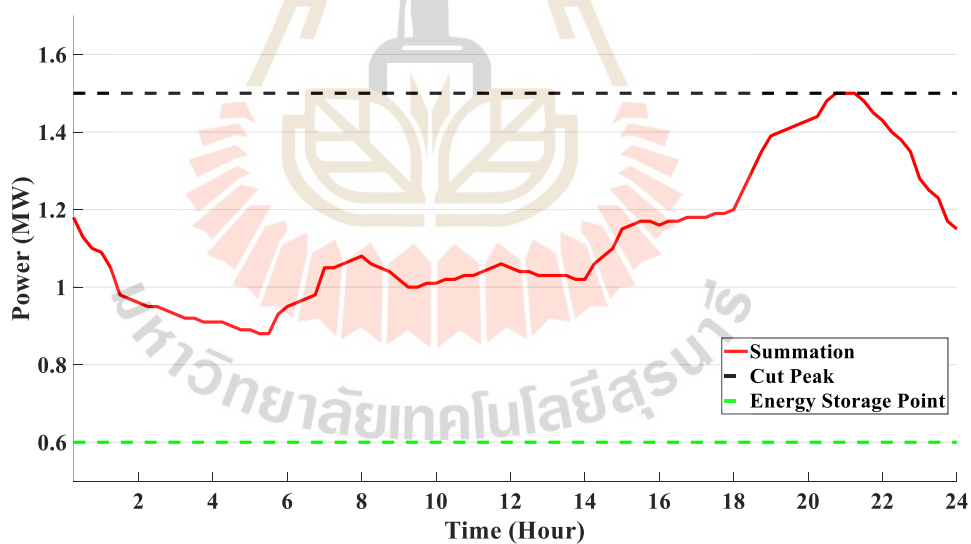


รูปที่ 4.92 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 3



รูปที่ 4.93 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 3

จากรูปที่ 4.92 และ 4.93 จะไม่มีการยกหรือปล่อยของก้อนเหล็ก เนื่องจากไม่มีการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 4.94 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลดขนาดกลางตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.50 MW
กรณีที่ 3

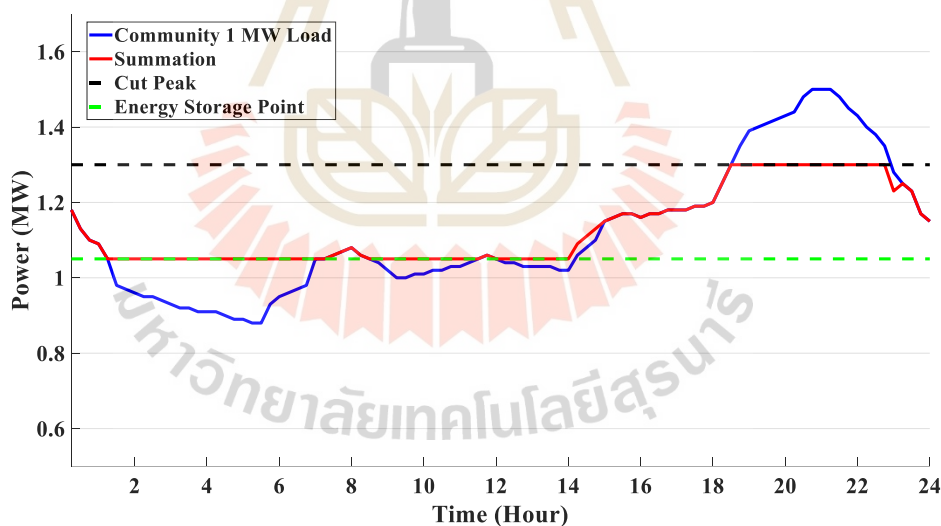
จากรูปที่ 4.94 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถใช้ PSO หาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการตัด คือ 1.50 MW ในกรณี TOU รายวัน

ตารางที่ 4.38 หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดกลาง TOU แบบรายวันโดยใช้ PSO

Iteration	Cut Peak (MW)
1	1.50
2	1.50
3	1.50
4	1.50
5	1.50
Average	1.50
Standard deviation	0

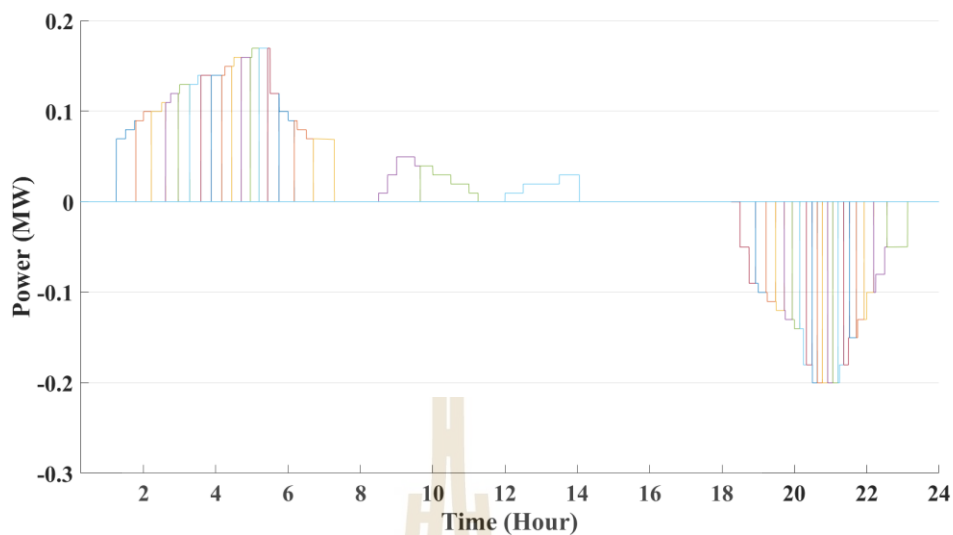
จากตารางที่ 4.38 ได้ค่า 1.5 MW เหมือนกันทุกรอบ เนื่องจากขอบเขตบนที่กำหนดสูงสุดคือ 1.5 MW ค่าที่ได้จึงได้ค่าที่เท่ากันหมดทุกรอบ โดยที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0

กรณีที่ 4 อัตราค่าไฟแบบ TOU รายเดือน

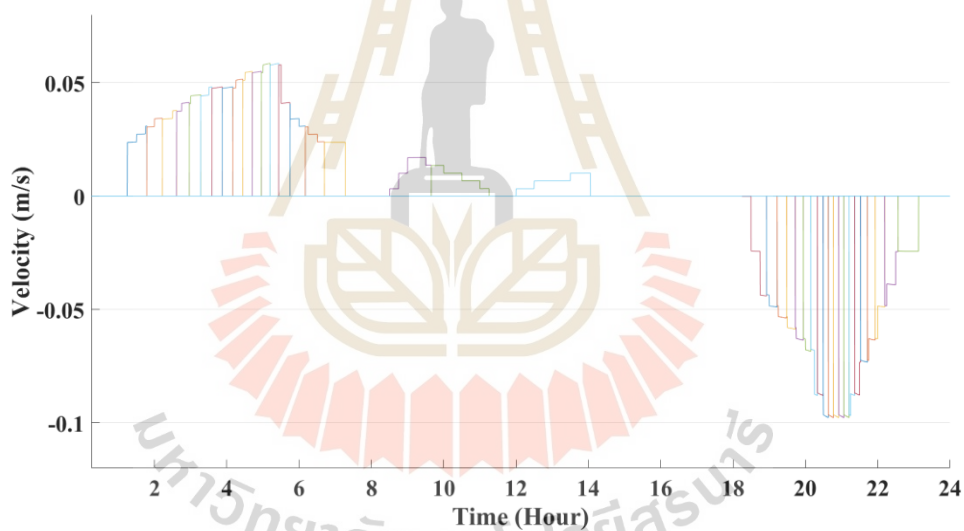


รูปที่ 4.95 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดกลาง กรณีที่ 4

จากรูปที่ 4.95 จะเห็นได้ว่าการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในกราฟโหลด ได้ค่าที่คำนวณออกมาแล้วคือ Cut Peak ที่ประมาณ 1.299 MW ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่ทำให้ค่าใช้จ่ายของโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานประหยัดที่สุด ถ้าเทียบกับการตัดยอดที่ค่าอื่น ๆ

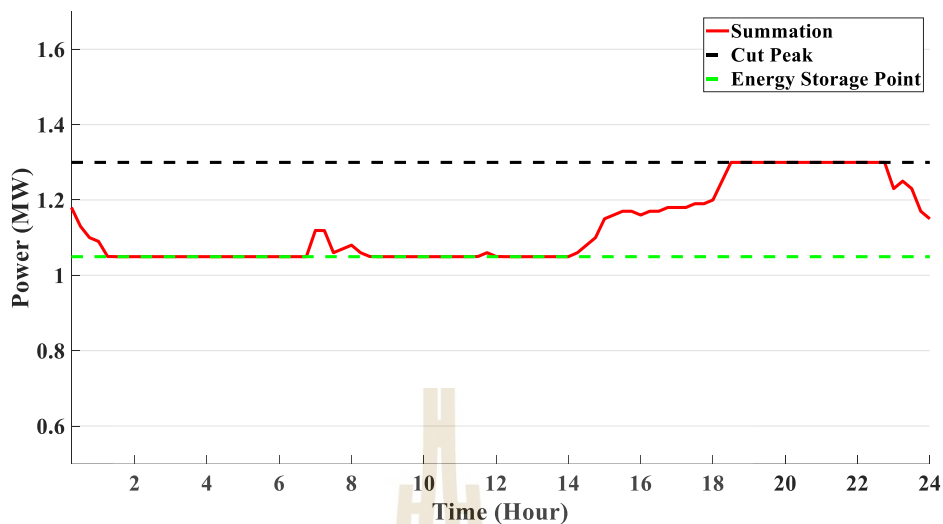


รูปที่ 4.96 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลขนาดกลาง กรณีที่ 4



รูปที่ 4.97 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลขนาดกลาง กรณีที่ 4

จากรูปที่ 4.96 และ 4.97 แสดงกำลังงานและความเร็วของการยกและปล่อยก้อนเหล็ก เนื่องจากระบบมีการกักเก็บพลังงานและนำมาปล่อยเพื่อตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของวัน



รูปที่ 4.98 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลดขนาดกลางตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.29971 MW

กรณีที่ 4

จากรูปที่ 4.98 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถใช้ PSO หาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการตัด คือ 1.29971 MW ในกรณี TOU รายเดือน

ตารางที่ 4.39 หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดกลาง TOU แบบรายเดือนโดยใช้ PSO

Iteration	Cut Peak (MW)
1	1.29971
2	1.30903
3	1.28799
4	1.30127
5	1.29745
Average	1.29909
Standard deviation	0.00758

จากตารางที่ 4.39 ได้ค่าตัดยอดประมาณ 1.299 MW หรือ 1,299.09 kW ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายถูกลงที่สุด โดยที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 0.00758

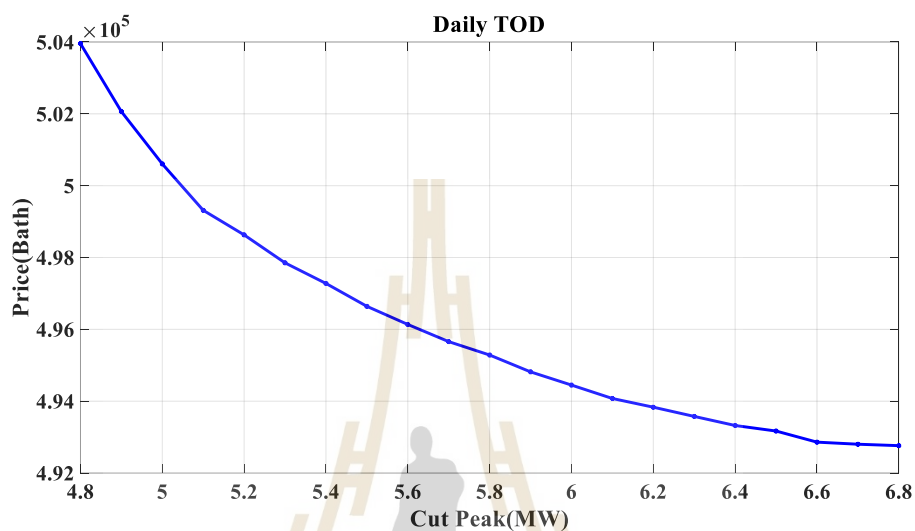
โหลดชุมชนขนาดใหญ่จะเป็นกลุ่มโหลดแยกด้านศุลกากรชายแดนด้านเจดีย์สามองค์ โหลดขนาด 2.14 MW และประเทศเมียนมาร์เมืองพญาตองซูโหลดขนาด 1.57 MW รวมขนาด 3.71 MW

ตารางที่ 4.40 ค่าใช้จ่ายของโหลดชุมชนขนาดใหญ่ทั้งแบบ TOD และ TOU

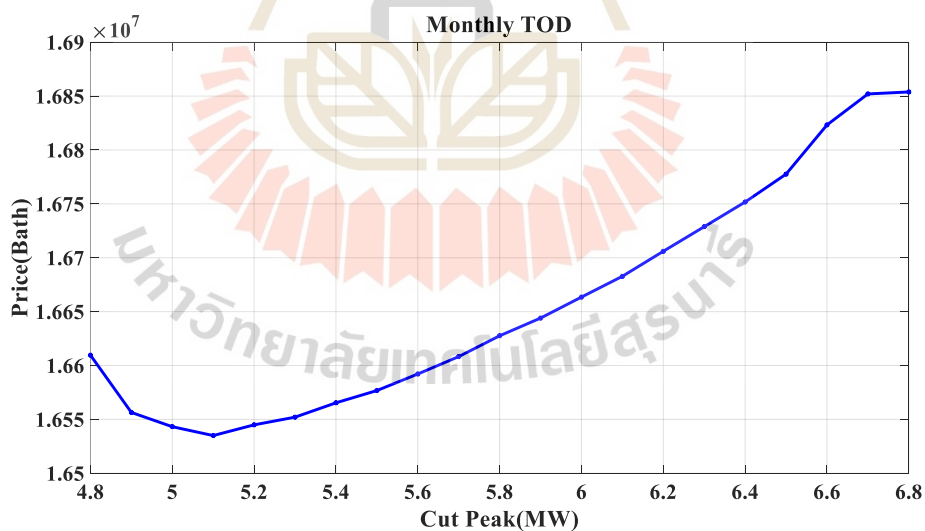
Cut Peak (MW)	ค่าใช้จ่าย (บาท)			
	TOD รายวัน	TOD รายเดือน	TOU รายวัน	TOU รายเดือน
6.8	492,762	16,853,852	540,605	17,183,938
6.7	492,802	16,851,997	540,614	17,182,790
6.6	492,860	16,823,245	540,576	17,167,420
6.5	493,169	16,777,594	540,573	17,141,720
6.4	493,323	16,751,717	540,537	17,126,431
6.3	493,576	16,728,811	540,524	17,111,816
6.2	493,833	16,706,001	540,493	17,096,651
6.1	494,075	16,682,783	540,408	17,079,864
6.0	494,449	16,663,490	540,414	17,065,844
5.9	494,816	16,644,006	540,352	17,049,757
5.8	495,285	16,627,567	540,378	17,036,310
5.7	495,658	16,608,248	540,236	17,017,830
5.6	496,136	16,592,109	540,259	17,004,299
5.5	496,641	16,576,749	540,258	16,990,036
5.4	497,278	16,565,365	540,331	16,978,007
5.3	497,851	16,552,056	540,373	16,965,023
5.2	498,630	16,544,913	540,463	16,953,509
5.1	499,315	16,534,974	540,462	16,939,263
5.0	500,606	16,543,202	541,011	16,941,514
4.9	502,063	16,556,424	541,778	16,950,284
4.8	503,956	16,609,613	543,122	16,988,930

ค่าจากตารางที่ 4.40 จะมีการคิดค่าไฟ 2 แบบ คือแบบ TOD และ TOU มีทั้งแบบรายวันและรายเดือน ได้จากการกำหนดค่าขึ้นมาเพื่อดูแนวโน้มที่เป็นไปได้ของระบบในแต่ละกรณี เพื่อหาค่าที่เหมาะสมและประหยัดที่สุดของโหลดชุมชนนี้ แบบรายวันจะนำเฉพาะโหลดที่ได้มาคิดค่า

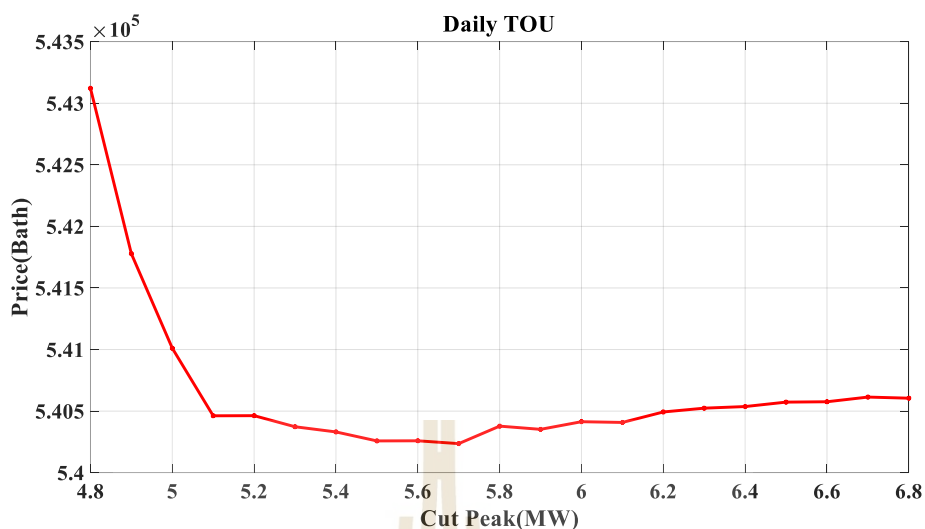
ไฟทั้งหมด ส่วนแบบรายเดือนจะคำนวณจากกราฟของโหลด 30 วัน บวกกับค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดรวมทั้งวันเสาร์และวันอาทิตย์ เนื่องจากถ้าเป็นข้อมูลรายเดือนต้องมีข้อมูลที่เพียงพอต่อการคาดการณ์มากกว่านี้ จึงได้ทำการคำนวณแบบประมาณ เพื่อให้เห็นแนวโน้มและทิศทาง แสดงดังรูปที่ 4.99 ถึง 4.102



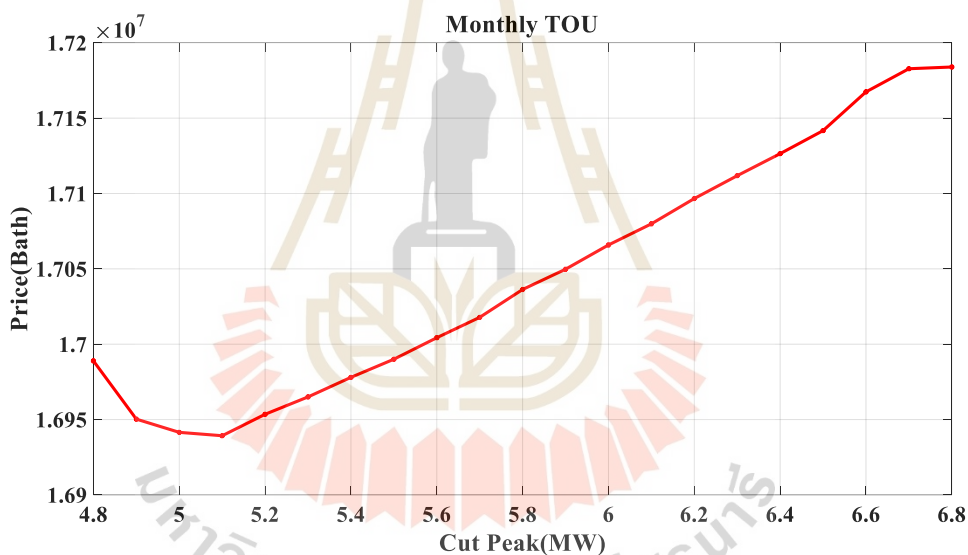
รูปที่ 4.99 TOD แบบรายวัน จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ประมาณ Cut Peak = 6.8 MW



รูปที่ 4.100 แบบTOD แบบรายเดือน จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ประมาณ Cut Peak = 5.1 MW



รูปที่ 4.101 TOU แบบรายวัน จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ประมาณ Cut Peak = 5.7 MW



รูปที่ 4.102 TOU แบบรายเดือน จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ประมาณ Cut Peak = 5.1 MW

จากรูปที่ 4.99 ถึง รูปที่ 4.102 เป็นค่าใช้จ่ายของแต่ละจุด Cut Peak เห็นได้ว่าทั้ง TOD แบบรายวัน จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ Cut Peak = 6.8 MW TOU แบบรายวันจะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ Cut Peak = 5.7 MW ส่วน TOD และ TOU แบบรายเดือน จะมีค่าไฟถูกที่สุดที่ประมาณ Cut Peak = 5.1 MW เป็นแนวโน้มเพื่อหาค่า ค่า Cut Peak และ Energy Storage Point ที่เหมาะสมที่สุด และสามารถทำให้ค่าไฟถูกที่สุด โดยใช้ PSO หาทั้ง 4 กรณี ตามตารางที่ 4.40

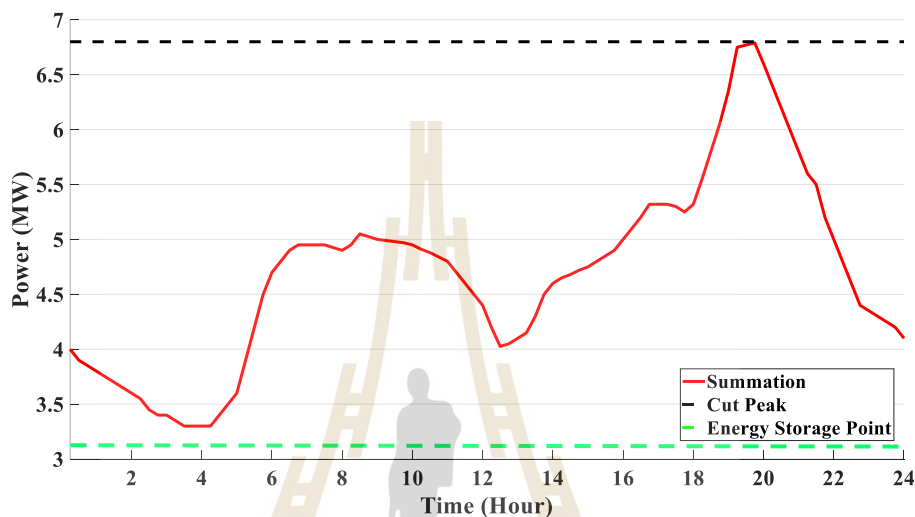
ในส่วนนี้จะแบ่งการทำงานในการหาค่าไฟถูกที่สุด แบ่งได้ 4 กรณี
กรณีที่ 1 อัตราค่าไฟแบบ TOD รายวัน

กรณีที่ 2 อัตราค่าไฟแบบ TOD รายเดือน

กรณีที่ 3 อัตราค่าไฟแบบ TOU รายวัน

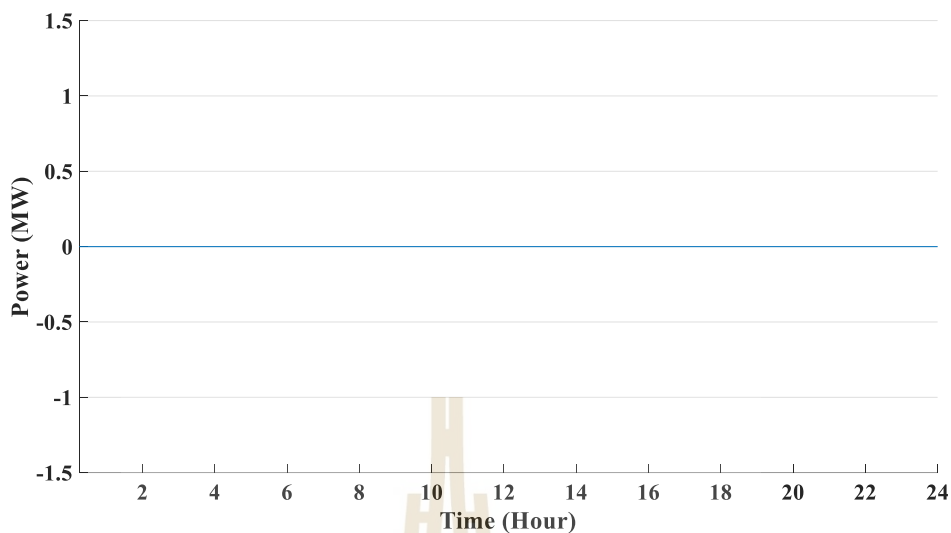
กรณีที่ 4 อัตราค่าไฟแบบ TOU รายเดือน

กรณีที่ 1 อัตราค่าไฟแบบ TOD รายวัน

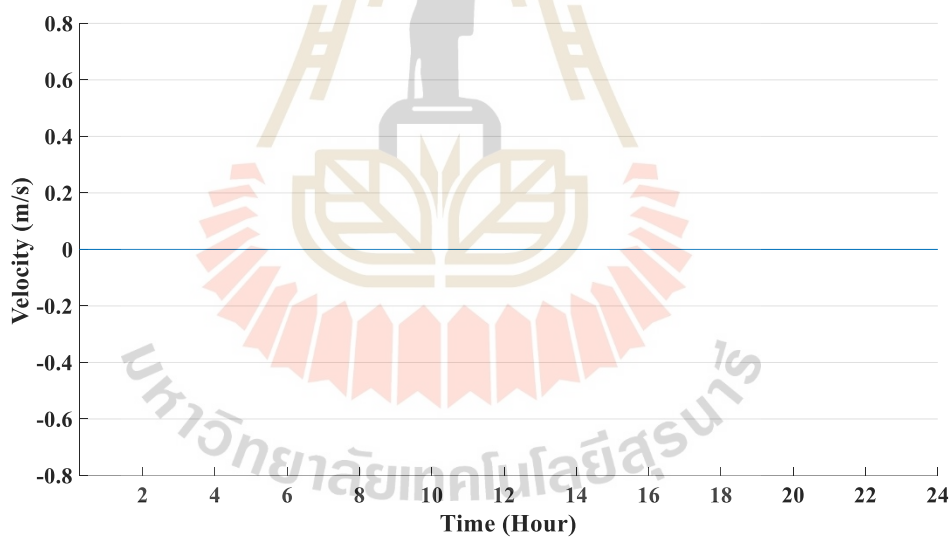


รูปที่ 4.103 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 1

จากรูปที่ 4.103 จะเห็นได้ว่ากรณีนี้จะไม่มีการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในกราฟโหลด เนื่องจากถ้ามีการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ก็จะต้องมีการใช้ระบบกักเก็บพลังงานเพื่อยกและปล่อยก้อนเหล็ก ซึ่งในระบบกักเก็บนี้มีการสูญเสียพลังงาน ที่ทำให้ค่าไฟเพิ่มขึ้นตามพลังงานที่สูญเสีย จึงได้ค่าที่คำนวณออกมาแล้วค่าไฟถูกที่สุดคือ Cut Peak = 6.8 MW หรือไม่มีการตัดยอดของโหลดนี้ เพราะค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่ได้มีผลต่อค่าใช้จ่ายของกรณีรายวันนี้ จึงไม่จำเป็นต้อง Cut Peak

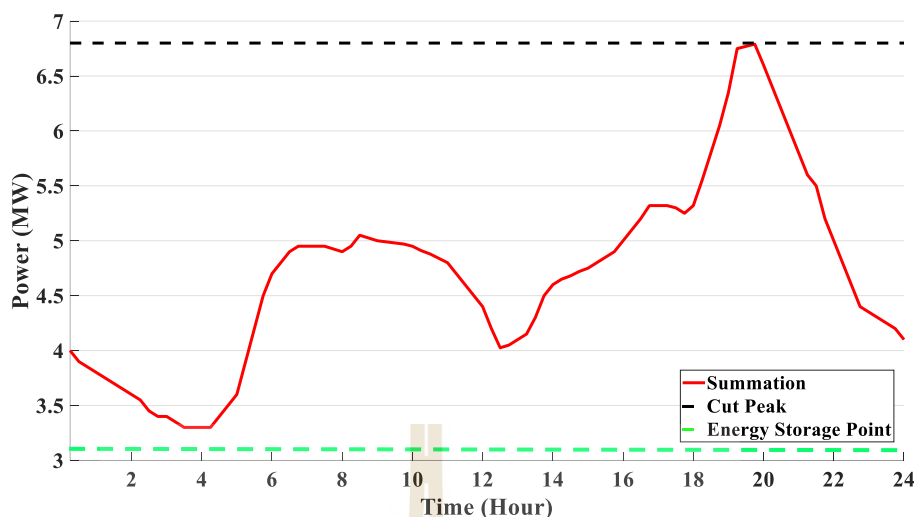


รูปที่ 4.104 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 1



รูปที่ 4.105 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 1

จากรูปที่ 4.104 และ 4.05 จะไม่มีการยกหรือปล่อยของก้อนเหล็ก เนื่องจากไม่มีการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 4.106 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลดขนาดใหญ่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 6.80 MW
กรณีที่ 1

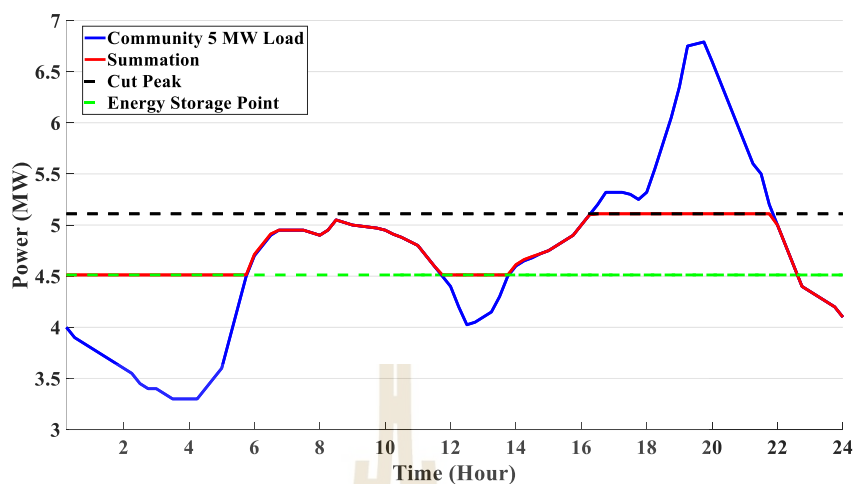
จากรูปที่ 4.106 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถใช้ PSO หาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการตัด คือ 6.80 MW ในกรณี TOD รายวัน

ตารางที่ 4.41 หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดใหญ่ TOD แบบรายวันโดยใช้ PSO

Iteration	Cut Peak (MW)
1	6.80000
2	6.80000
3	6.80000
4	6.80000
5	6.80000
Average	6.80000
Standard deviation	0

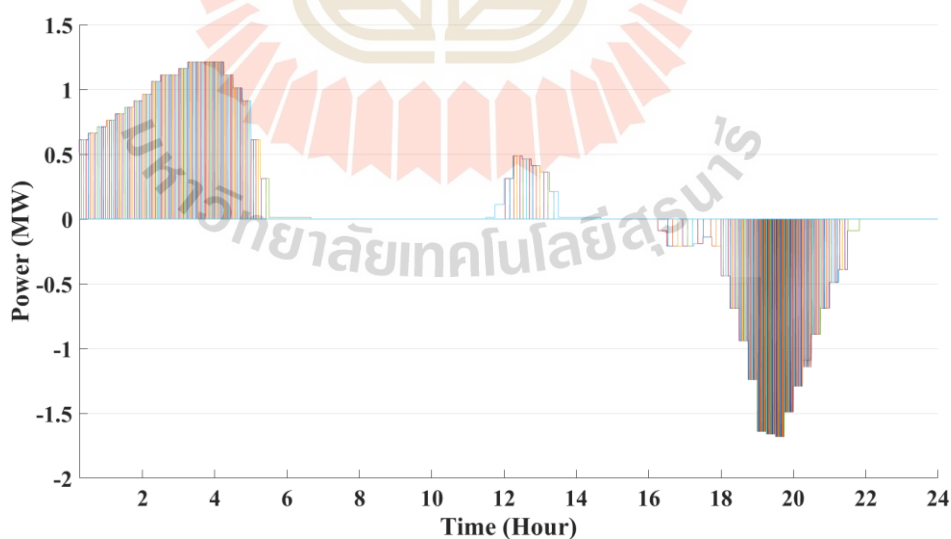
จากตารางที่ 4.41 ได้ค่า 6.8 MW เหมือนกันทุกรอบ เนื่องจากขอบเขตบนที่กำหนดสูงสุดคือ 6.8 MW ค่าที่ได้จึงได้ค่าที่เท่ากันหมดทุกรอบเพราะว่าไม่มีการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน โดยที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0

กรณีที่ 2 อัตราค่าไฟแบบ TOD รายเดือน

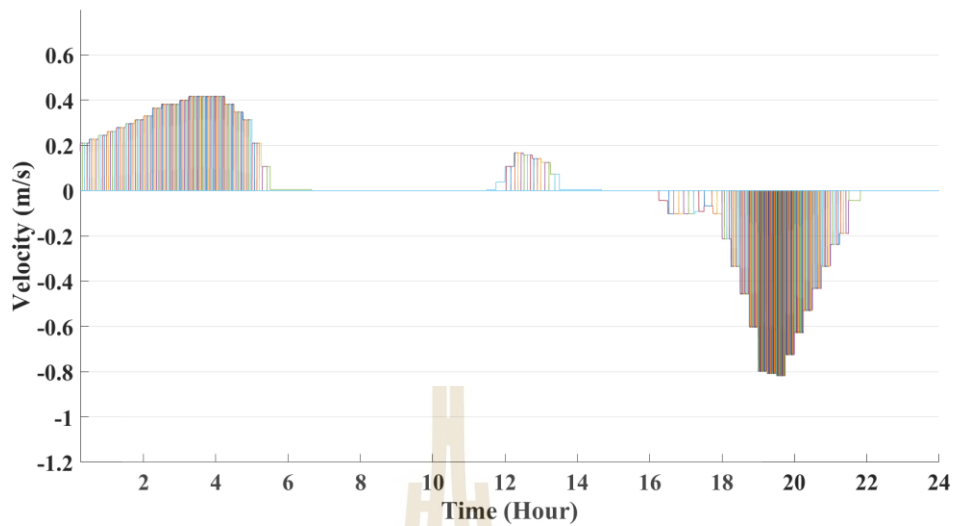


รูปที่ 4.107 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 2

จากรูปที่ 4.107 จะเห็นได้ว่าการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในกราฟโหลด ได้ค่าที่คำนวณออกมาแล้วคือ Cut Peak ที่ประมาณ 5.113 MW ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่ทำให้ค่าใช้จ่ายของโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานประหยัดที่สุด ถ้าเทียบกับการตัดยอดที่ค่าอื่น ๆ ในกรณีของ TOD แบบรายเดือน

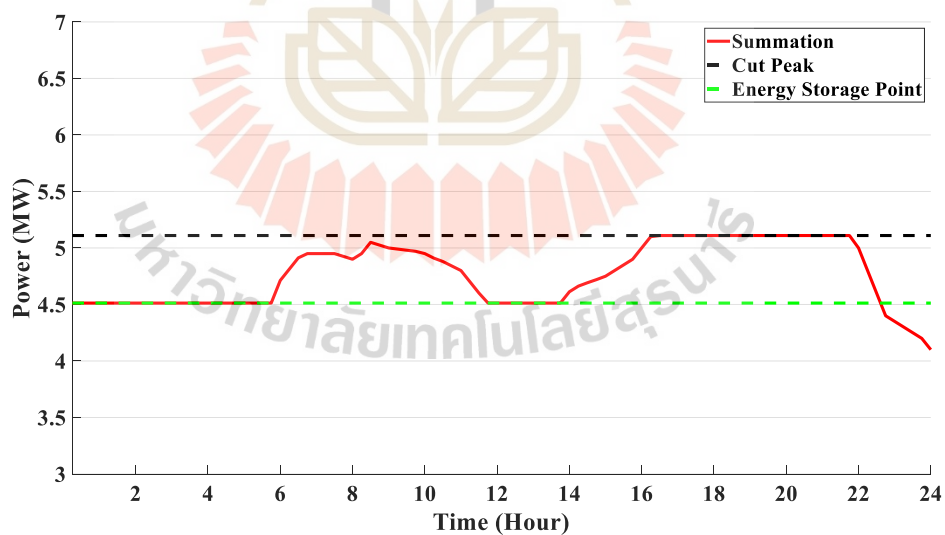


รูปที่ 4.108 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 2



รูปที่ 4.109 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 2

จากรูปที่ 4.108 และ 4.109 แสดงกำลังงานและความเร็วของการยกและปล่อยก้อนเหล็ก เนื่องจากระบบมีการกักเก็บพลังงานและนำมาปล่อยเพื่อตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของวัน



รูปที่ 4.110 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลดขนาดใหญ่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 5.113 MW
กรณีที่ 2

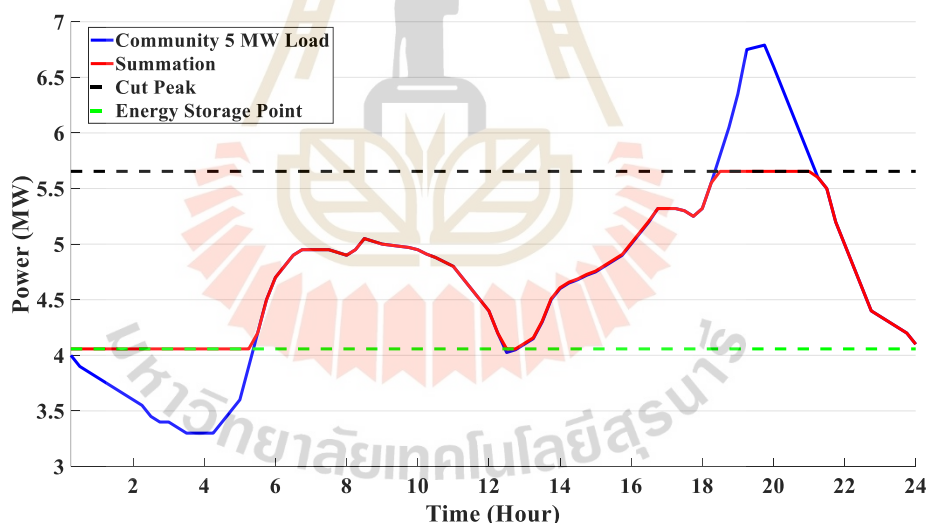
จากรูปที่ 4.110 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถใช้ PSO หาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการตัด คือ 5.113 MW ในกรณี TOD รายเดือน

ตารางที่ 4.42 หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดใหญ่ TOD แบบรายเดือนโดยใช้ PSO

Iteration	Cut Peak (MW)
1	5.11209
2	5.10987
3	5.12019
4	5.10784
5	5.11478
Average	5.1129
Standard deviation	0.00480

จากตารางที่ 4.42 ได้ค่าตัดยอดประมาณ 5.1129 MW หรือ 5,112.90 kW ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายถูกลงที่สุด โดยที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 0.00480

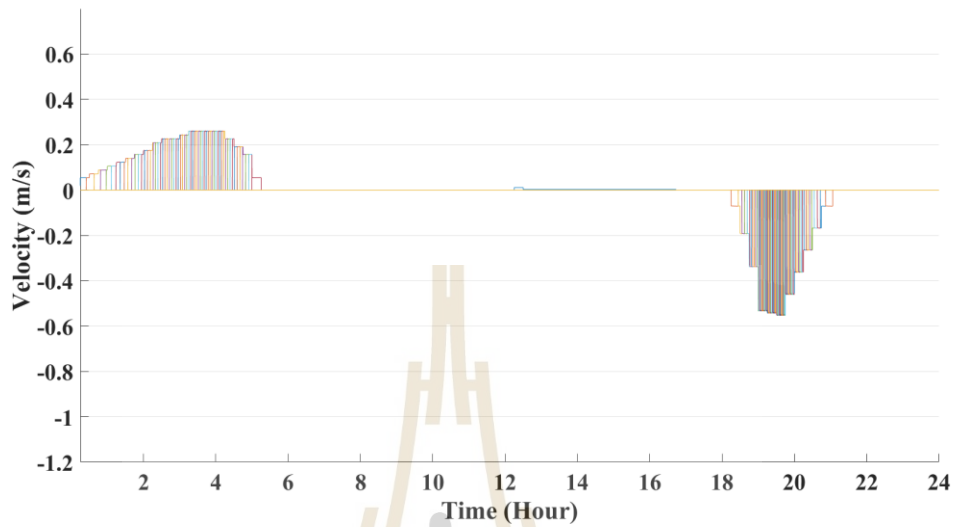
กรณีที่ 3 อัตราค่าไฟแบบ TOU รายวัน



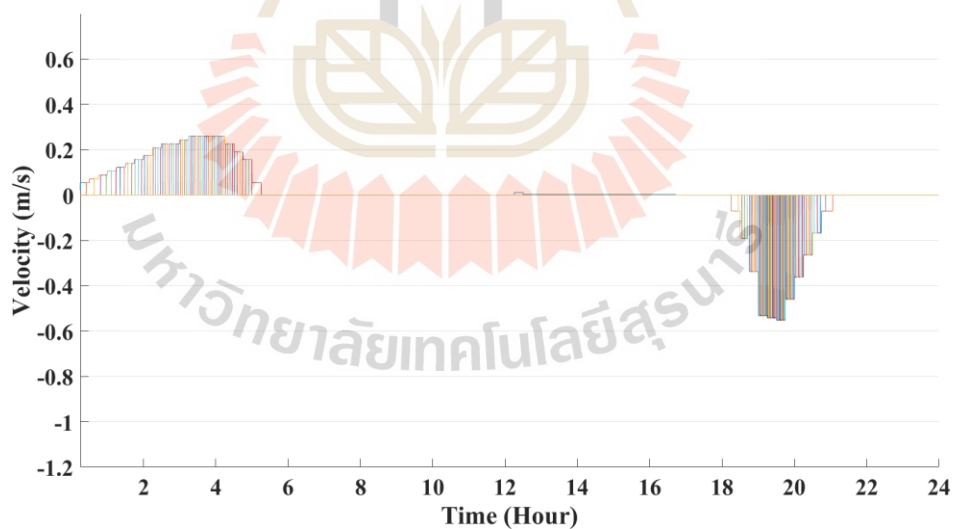
รูปที่ 4.111 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 3

จากรูปที่ 4.111 จะเห็นได้ว่าการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในกราฟโหลด ได้ค่าที่คำนวณออกมาแล้วคือ Cut Peak ที่ประมาณ 5.655 MW ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่ทำให้ค่าใช้จ่ายของโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานประหยัดที่สุด ถ้าเทียบกับการตัดยอดที่ค่าอื่น ๆ ในกรณีของ TOU แบบ

รายวัน เนื่องจากค่าไฟของช่วงเวลา Off peak มีค่าไฟถูกกว่าค่าไฟในช่วง Peak จึงทำให้ระบบกักเก็บพลังงานกักเก็บในช่วงค่าไฟถูกและได้ทำการปล่อยในช่วงที่มีค่าไฟแพง

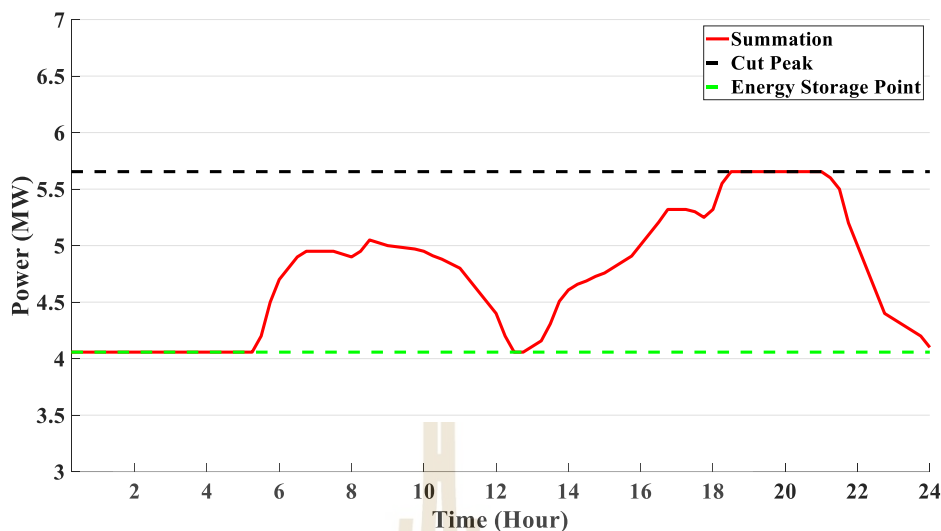


รูปที่ 4.112 กำลังงานของการยกและปล่อยของไหลขนาดใหญ่ กรณีที่ 3



รูปที่ 4.113 ความเร็วของการยกและปล่อยของไหลขนาดใหญ่ กรณีที่ 3

จากรูปที่ 4.112 และ 4.113 แสดงกำลังงานและความเร็วของการยกและปล่อยก้อนเหล็ก เนื่องจากระบบมีการกักเก็บพลังงานและนำมาปล่อยเพื่อตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของวัน



รูปที่ 4.114 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลดขนาดใหญ่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 5.655 MW กรณีที่ 3

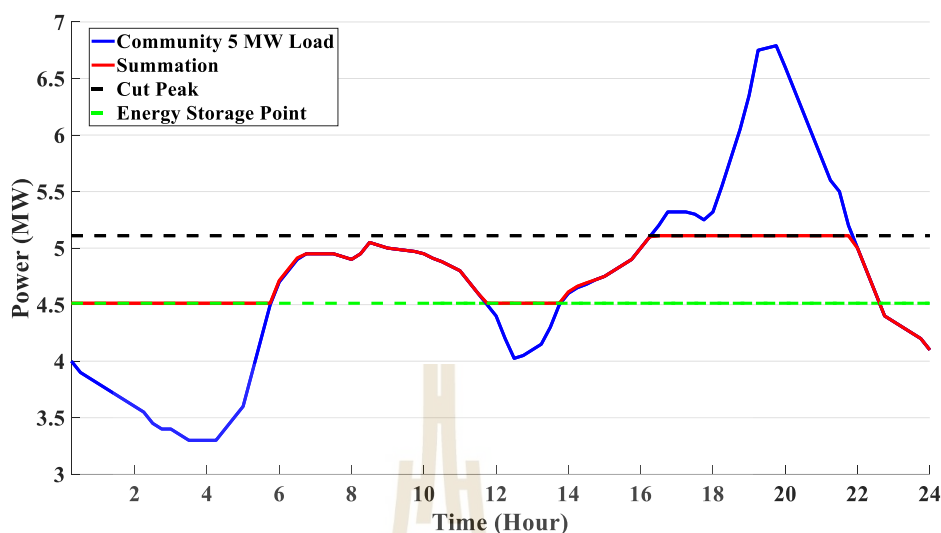
จากรูปที่ 4.114 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถใช้ PSO หาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการตัด คือ 5.655 MW ในกรณี TOU รายวัน

ตารางที่ 4.43 หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดใหญ่ TOU แบบรายวันโดยใช้ PSO

Iteration	Cut Peak (MW)
1	5.6575
2	5.6612
3	5.6498
4	5.6556
5	5.6483
Average	5.65448
Standard deviation	0.00538

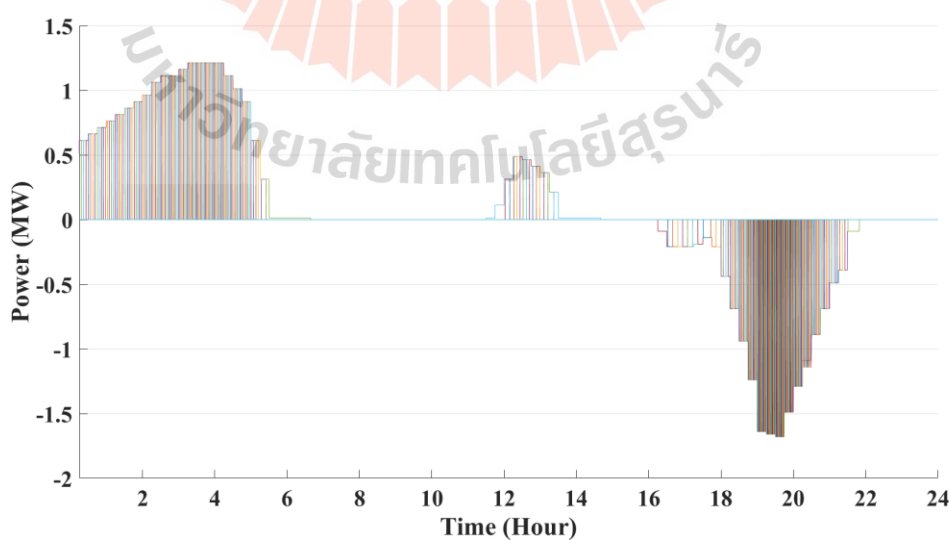
จากตารางที่ 4.43 ได้ค่าตัดยอดประมาณ 5.655 MW หรือ 5,655 kW ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายถูกลงที่สุด โดยที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 0.00538

กรณีศึกษาที่ 4 อัตราค่าไฟแบบ TOU รายเดือน

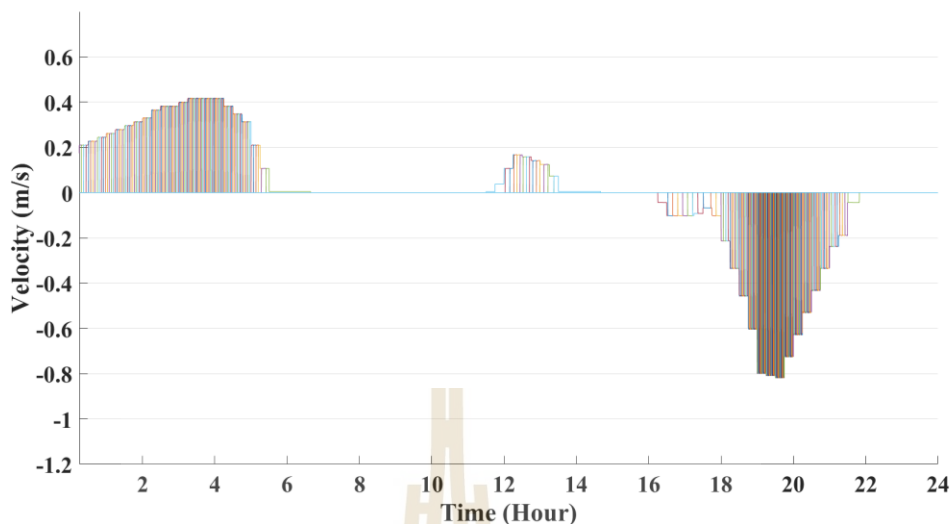


รูปที่ 4.115 จุด Cut Peak ที่หาได้จาก PSO ของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 4

จากรูปที่ 4.115 จะเห็นได้ว่าการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในกราฟโหลด ได้ค่าที่คำนวณออกมาแล้วคือ Cut Peak ที่ประมาณ 5.112 MW เป็นค่าที่ต่ำลงมากเนื่องจากการคิดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด จึงทำให้ยังมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดน้อยเท่าไร ค่าไฟก็จะยิ่งถูกลงตามกราฟ ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่ทำให้ค่าใช้จ่ายของโหลดที่ผ่านระบบกักเก็บพลังงานประหยัดที่สุด ถ้าเทียบกับการตัดยอดที่ค่าอื่น ๆ

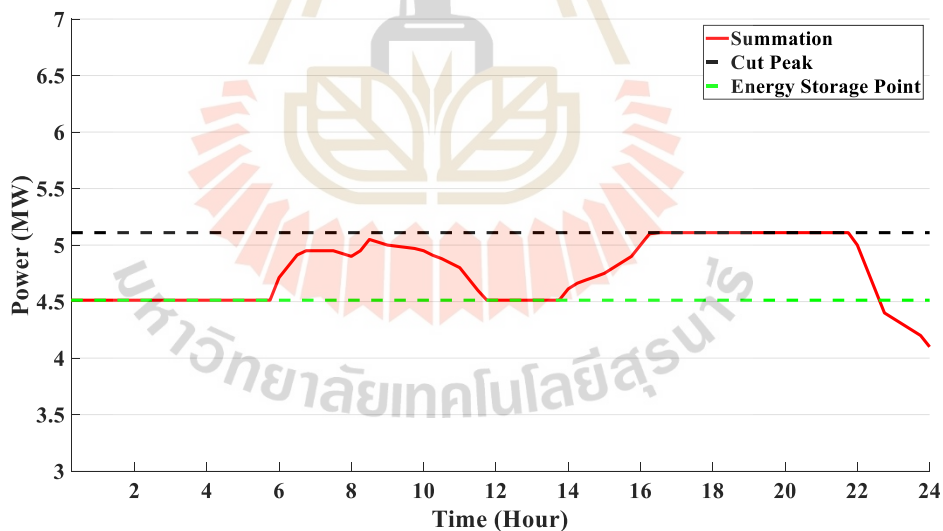


รูปที่ 4.116 กำลังงานของการยกและปล่อยของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 4



รูปที่ 4.117 ความเร็วของการยกและปล่อยของโหลดขนาดใหญ่ กรณีที่ 4

จากรูปที่ 4.116 และ 4.117 แสดงกำลังงานและความเร็วของการยกและปล่อยก้อนเหล็ก เนื่องจากระบบมีการกักเก็บพลังงานและนำมาปล่อยเพื่อตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของวัน



รูปที่ 4.118 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานโหลดขนาดใหญ่ตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 5.112 MW
กรณีที่ 4

จากรูปที่ 4.118 โหลดหลังใช้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถใช้ PSO หาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการตัด คือ 5.112 MW ในกรณี TOU รายเดือน

ตารางที่ 4. 44 หาค่าตัดยอดชุมชนขนาดใหญ่ TOU แบบรายเดือนโดยใช้ PSO

Iteration	Cut Peak (MW)
1	5.11335
2	5.11756
3	5.11582
4	5.10542
5	5.10747
Average	5.11192
Standard deviation	0.00527

จากตารางที่ 4.44 ได้ค่าตัดยอดประมาณ 5.112 MW หรือ 5,112 kW ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายถูกลงที่สุด โดยที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 0.00527

สรุป

จากการจำลองการหาค่า Cut Peak ที่ทำให้ค่าไฟถูกที่สุดแต่ละกรณี โดยไม่ต้องกำหนดค่าให้ Cut Peak ค่าไฟที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.45

ตารางที่ 4.45 ค่าใช้จ่ายก่อนและหลังมีระบบกักเก็บพลังงาน

ชุมชนโดยใช้ PSO		ค่าใช้จ่าย (บาท)			
		TOD รายวัน	TOD รายเดือน	TOU รายวัน	TOU รายเดือน
ขนาดกลาง	ก่อนกักเก็บ	117,722	3,989,156	128,216	4,059,824
	หลังกักเก็บ 1.25 MW	119,166	3,956,220	128,777	4,041,106
	หลังกักเก็บใช้ PSO หา Cut Peak	117,722	3,945,889	128,216	4,039,023
ขนาดใหญ่	ก่อนกักเก็บ	492,763	16,853,852	540,605	17,183,938
	หลังกักเก็บ 5.32 MW	498,047	16,564,018	540,723	16,978,389
	หลังกักเก็บใช้ PSO หา Cut Peak	492,763	16,481,688	539,545	16,920,485

ขนาดชุมชนขนาดกลาง ถ้าคิดค่าไฟแบบรายวันทั้งแบบ TOD และ TOU ไม่พิจารณาค่า Cut Peak จะได้ค่าไฟถูกที่สุด แบบ TOD รายเดือนหลังใช้ PSO หา Cut Peak จะมีค่าใช้จ่ายถูกลงจากก่อนมีระบบกักเก็บ 43,267 บาท/เดือน และจะมีค่าใช้จ่ายถูกลงจากหลังกักเก็บที่ 1.25 MW ประมาณ 10,331 บาท/เดือน แบบ TOU รายเดือนหลังใช้ PSO หา Cut Peak จะมีค่าใช้จ่ายถูกลงจากก่อนมีระบบกักเก็บ 20,801 บาท/เดือน และจะมีค่าใช้จ่ายถูกลงจากหลังกักเก็บที่

1.25 MW ประมาณ 2,083 บาท/เดือน ซึ่งจากการใช้ PSO ในการหาค่าไฟสามารถช่วยลดค่าไฟจากการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ทุกกรณี และกรณี TOD เหมาะสมกับชุมชนขนาดกลางนี้ที่สุด เนื่องจากมีค่าไฟที่ลดลงมากกว่าแบบ TOU ทั้งรายวันและรายเดือน

ขนาดชุมชนขนาดใหญ่ ถ้าคิดค่าไฟแบบรายวันแบบ TOD ไม่พิจารณาค่า Cut Peak จะได้ค่าไฟถูกที่สุด แบบ TOD รายเดือนหลังใช้ PSO หา Cut Peak จะมีค่าใช้จ่ายถูกลงจากก่อนมีระบบกักเก็บ 372,164 บาท/เดือน และจะมีค่าใช้จ่ายถูกลงจากหลังกักเก็บที่ 5.32 MW ประมาณ 82,330 บาท/เดือน แบบ TOU รายวันหลังใช้ PSO หา Cut Peak จะมีค่าใช้จ่ายถูกลงจากก่อนมีระบบกักเก็บ 1,060 บาท/เดือน และแบบ TOU รายเดือนหลังใช้ PSO หา Cut Peak จะมีค่าใช้จ่ายถูกลงจากก่อนมีระบบกักเก็บ 263,453 บาท/เดือน และจะมีค่าใช้จ่ายถูกลงจากหลังกักเก็บที่ 5.32 MW ประมาณ 57,904 บาท/เดือน ซึ่งจากการใช้ PSO ในการหาค่าไฟสามารถช่วยลดค่าไฟจากการตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ทุกกรณี และกรณี TOD เหมาะสมกับชุมชนขนาดใหญ่นี้ที่สุด เนื่องจากมีค่าไฟที่ลดลงมากกว่าแบบ TOU ทั้งรายวันและรายเดือน

ดังนั้นโหลดการใช้ไฟแบบชุมชน ถ้ามีการคิดค่าไฟแบบ TOD จะเหมาะสมกับการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานทุกชนิดมากกว่าการคิดค่าไฟแบบ TOU เนื่องจากโหลดชนิดนี้มีการใช้ไฟที่สูงในช่วงค่าไฟแพงของ TOU จึงทำให้การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแทบจะไม่คุ้มเท่าค่าไฟแบบ TOD

4.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอพารามิเตอร์ต่าง ๆ และกราฟโหลดต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการจำลองระบบกักเก็บพลังงานและวิเคราะห์ระบบจากโหลดการใช้ไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อหาความเหมาะสมในการกักเก็บพลังงานโดยแรงโน้มถ่วงและความคุ้มค่าในการใช้ระบบกักเก็บพลังงาน สำหรับรายละเอียดในบทถัดไป เป็นข้อสรุปและเสนอแนะของวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคโนโลยีการจัดเก็บพลังงานสำหรับระบบกักเก็บพลังงานโดยแรงโน้มถ่วงสำหรับโหลดของมหาวิทยาลัยและโหลดชุมชน โดยจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB นำมาทดสอบและประเมินผลการจำลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสม Particle swarm optimization ในการหาค่าที่เหมาะสมในการทำงานของโหลดแต่ละรูปแบบ

โหลดมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีไม่เหมาะสมกับการมีระบบกักเก็บพลังงานโดยแรงโน้มถ่วง เนื่องจากมีการคิดค่าไฟแบบ TOU และการทำงานของระบบ 1 รอบ จะสามารถทำได้เพียง 1 รอบ/สัปดาห์ ถือว่ามีจำนวนรอบการทำงานน้อยมากต่ออายุการใช้งานทางเทคนิค 40-50 ปี

โหลดชุมชนทั้งขนาดกลางและขนาดใหญ่ การใช้ PSO หาค่า Cut Peak โดยค่าไฟที่ถูกลงที่สุด และมีความเหมาะสมมากกว่า ระบุค่า Cut Peak ที่ต้องการ แต่การคิดเรทค่าไฟของชุมชนต้องคิดแบบ TOD ระบบนี้สามารถหาค่าจุดที่เริ่มกักเก็บพลังงานและจุดตัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ทั้งรูปแบบการกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ พลังงานน้ำ หรือโดยแรงโน้มถ่วง ขึ้นอยู่กับสถานที่และการวิเคราะห์ต้นทุนในการติดตั้งเป็นสิ่งสำคัญที่สุด

เทคโนโลยีกักเก็บโดยแรงโน้มถ่วงอาจจะยังไม่เป็นที่ยอมรับหรือแพร่หลาย เนื่องจากข้อมูลที่คำนวณต้นทุนที่ถูกลงกว่าระบบกักเก็บอื่น ๆ เป็นเพียงข้อมูลทางเทคนิคที่คาดการณ์ โดยมีอายุการใช้งานยาวนาน 40-50 ปี และยังต้องมีพื้นที่ที่สูงและใหญ่ในการติดตั้งระบบ ระบบนี้จึงอาจจะยังไม่เหมาะสมในการนำมาติดตั้งในประเทศไทย แสดงให้เห็นว่าระบบกักเก็บพลังงานโดยแรงโน้มถ่วงนี้ไม่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้กักเก็บพลังงานในวิทยานิพนธ์นี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานที่เป็นรูปแบบใหม่ของการกักเก็บ ได้คำนวณค่าพลังงานและกำลังต่าง ๆ จากการออกแบบและทฤษฎี จึงทำให้ค่าที่ได้เป็นการ

ประมาณการรวมไปถึงต้นทุนการติดตั้ง จึงทำให้ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าคุ้มทุนกว่าระบบกักเก็บพลังงานอื่นหรือไม่ เพื่อให้มีความละเอียด สมจริง และมีความเหมาะสม ควรมีการพิจารณาทำระบบกักเก็บพลังงานต้นแบบขนาดเล็กให้เหมาะสมกับระบบในการทดสอบ และเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองและการทดสอบจริงว่ามีแนวโน้มสามารถทำงานได้ ในลำดับต่อไป



เอกสารอ้างอิง

- กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับเครื่องจักร ปั่นจั่น และหม้อน้ำ (พ.ศ. 2564) แหล่งที่มา : <https://www.labour.go.th/index.php/59597-2564-31>
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2561). อัตราค่าไฟฟ้า-การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (ออนไลน์) แหล่งที่มา : https://www.pea.co.th/Portals/0/demand_response/Electricity%20Reconsider.pdf?ver=2018-10-01-155123-370 : 20 กรกฎาคม 2563.
- โซล่าเซลล์ไทยแลนด์96. (2556) ชนิดและความหมายของ โซล่าเซลล์ Solar Cell หรือเซลล์แสงอาทิตย์. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <https://solarcellthailand96.com/knowledge/what-solar-cell/> : 4 มิถุนายน 2563.
- มิตซูบิชิ เอลเลเวเตอร์ (ประเทศไทย). 2559. ผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วย Regenerative converter. (ระบบออนไลน์). แหล่งข้อมูล: <http://www.mitsubishielectric.com/whatschanging/ecochanges/elevators/index.html> (31 มีนาคม 2559).
- สิทธิชัย กันทะวงศ์, เอกรัตน์ นภกานต์ และบุญยัง ปลั่งกลาง. 2555. การศึกษาการกลายสภาพเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อการประยุกต์ใช้ผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีรีเจนเนอเรทีฟ. ใน: **การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5**, 18-20 ธันวาคม 2555. มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
- สิทธิชัย กันทะวงศ์ และบุญยัง ปลั่งกลาง. 2556. การศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากระบบลิฟต์ที่ใช้มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยวิธีการรีเจนเนอเรทีฟ. ใน: **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชชมงคล ครั้งที่ 5**, 27-29 มีนาคม 2556. หัวหิน แกรนด์แอนด์พลาซ่า จ.ประจวบคีรีขันธ์.
- สิทธิชัย กันทะวงศ์ และบุญยัง ปลั่งกลาง. 2557. การศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ ลิฟต์ชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยวิธีการรีเจนเนอเรทีฟ. ใน: **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชชมงคล ครั้งที่ 6**, 26-28 มีนาคม 2557. มาริไทม์ ปาร์คแอนด์สปาร์ตอร์ท จ. กระบี่.
- A. Berrada, K. Loudiyi, & I. Zorkani. (2016). Sizing and economic analysis of gravity storage. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 8, Issue 8.

- A. Berrada, K. Loudiyi, & I. Zorkani. (2017). TOWARD AN IMPROVEMENT OF GRAVITY ENERGY STORAGE USING COMPRESSED AIR. **9th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings**, SEB-17, 5-7 July 2017, Chania, Crete, Greece.
- A. C. Ruoso, N. R. Caetano, & L. A. O. Rocha. (2019). Storage Gravitational Energy for Small Scale Industrial and Residential Applications. **Inventions**, Vol. 4, Issue 4.
- A. S. Ivanov, P. R. Nusratov, A. S. Timofeev, & O. V. Gromova. (2016). Energy-Efficient Drive System for Lift-and-Carry Transfer Mechanisms. **2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)**, Chelyabinsk, Russia, 19-20 May 2016.
- A. Wang & S. Kim. (2015). Directional Efficiency in Geared Transmissions: Characterization of Backdrivability Towards Improved Proprioceptive Control. **2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)**, 26-30 May 2015.
- Blasko, V. 1998. Power conditions and control of a regenerative brake. Proc. **IEEE/IAS Conf. 2**: 1504-1510.
- C.D. Botha, & M.J. Kamper. (2019). Capability study of dry gravity energy storage. **Journal of Energy Storage**, Vol. 23, Pages 159-174.
- Cheng, P.T., C.C. Hou and J.S. Li. 2008. Design of an auxiliary converter for the diode rectifier and the analysis of the circulating current. **IEEE Trans. Power Electronics 23(4)**: 1658-1667.
- D. G. D. Ronquillo & E. P. Dadios. (2014). Solar-Powered Lifting Mechanism for Handpump Systems. **2014 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)**, Palawan, Philippines, 12-16 November 2014.
- D.K. Chaturvedi, S. Yadav, T. Srivastava, & T. Kumari¹. (2020). Electricity storage system: A Gravity Battery. **2020 Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4)**, London, UK, 27-28 July 2020.

- D. Zhang, S. Zhang, L. Teng, W. Kong, X. Peng, & M. Liu. (2018). Research on a peak-cutting and valley-filling Optimal Algorithm Based on Communication Power Supply. **2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)**, Turino, Italy, 07-11 October 2018.
- E.M.G. Rodrigues, R. Godina, S.F. Santos, A.W. Bizuayehu, J. Contreras, & J.P.S. Catalao. (2014). Energy storage systems supporting increased penetration of renewables in islanded systems. **Energy**, Vol. 75, Pages 265-280.
- J. Menéndez, F. Schmidt, & J. Loredó. (2020). Comparing Subsurface Energy Storage Systems: Underground Pumped Storage Hydropower, Compressed Air Energy Storage and Suspended Weight Gravity Energy Storage. **The 4th International Conference on Power, Energy and Mechanical Engineering (ICPEME 2020)**, E3S Web Conf. Volume 162, 2020.
- Kheir Al-Kodmany. (2015). Tall Buildings and Elevators: A Review of Recent Technological Advances. **Buildings**, Vol. 5, Issue 3.
- K. Nakayama & K. Takahashi. (2013). Group Control of 2-shafts Elevator System for Peak Power Cut and Service Performance. **2013 IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)**, Tokyo, Japan, 01-04 October 2013.
- M. Aneke & M. Wang. (2016). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. **Applied Energy**, Vol. 179, Pages 350-377.
- M. Nakamura, K. Kimura, & K. Takeno. (2015). Peak-cut control of smart energy BTS: Power control technology for reducing the power consumed by base stations. **2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)**, Osaka, Japan, 18-22 October 2015.
- M. Stecca, T. Batista Soeiro, L. ramirez Elizondo, P. Bauer, & P. Palensky. (2020). Lifetime Estimation of Grid-Connected Battery Storage and Power Electronics Inverter Providing Primary Frequency Regulation. **IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society**, Vol. 2, Pages 240-251.
- N. Narayana, T. Papakostaa, V. Vega-Garitaa, J. Popovic-Gerbera, P. Bauera, & M. Zemana. (2017). A simple methodology for estimating battery lifetimes in Solar Home System design. **2017 IEEE AFRICON**, 18-20 September 2017.

- Nomura, M., H. Ikejima, S. Morita and E. Watanabe. **1988. Regenerative power control for VVVF motor drive (critical braking method applied to the elevator).** pp. 97-105. In: Proc. APEC'88.
- P. Gao, W. Niu, Z. Quanjia, Y. Yang, & Y. Lv. (2016). Elevator Regenerative Energy Feedback Technology. **International Conference on Artificial Intelligence and Engineering Applications (AIEA 2016).**
- P. Nikolaidisa, & A. Poullikkas. (2018). Cost metrics of electrical energy storage technologies in potential power system operations. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Vol. 25, Pages 43-59.
- P.Ravi babu, K.Venkatesh, T.Swetha, S.F.Kodad, & B.V.Sankar Ram. (2008). Application of DSM Techniques and Renewable Energy Devises for Peak Load Management. **2008 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering**, Novosibirsk, Russia, 21-25 July 2008.
- P. Ravi Babu & V. P Sree Divya. (2013). Maximum Demand Limiter for Reliable Supply by Reducing the Power Cuts to Domestic Loads. **2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)**, Dindigul, India, 06-08 February 2013.
- R. Cazzanigaa, M. Cicua, T. Marranaa, M. Rosa-Clota, P. Rosa-Clota, & G.M. Tina. (2017). DOGES: Deep ocean gravitational energy storage. **Journal of Energy Storage**, Vol. 14, Pages 264-270.
- Rodriguez, J.R., J.W. Dixon, J.R. Espinoza, J. Pontt and P. Lezana. 2005. PWM regenerative rectifiers: State of the art. **IEEE Trans. Ind. Electron.** 52(1): 5-22.
- Saha, S., A.V. Dandekar and V.P. Sundarsingh. 1996. A modified approach of feeding regenerative energy to the mains. **IEEE Trans on IE 43(4):** 510-51
- S. Rehman, L. M. Al-Hadhrami, & Md. Mahbub Alam. (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 44, April 2015, Pages 586-598.
- S. Sagar, S. Sondhi, & J. Sagar. (2020). Gravity Battery: Storing Electrical Energy In The Form Of Gravitational Potential Energy. **2020 IEEE International Conference**

on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Galgotias University, Greater Noida, UP, India. Oct 2-4, 2020.

- T. C. S. Tagulao, R. A. D. Manabat, J. P. L. Atienza, M. L. L. Lucero, A. H. Fernando, A. B. Maglaya, L. A. Gan Lim, & R. R. P Vicerra. (2018). Performance Evaluation of a Small Scale Gravity Powered DC Generator. **2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)**, 29 November 2018 - 02 December 2018.
- T. Morstyna, M. Chilcottb, & M. D. McCulloch. (2019). Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts. **Applied Energy**, Vol. 239, Pages 201-206.
- T. Mushiria, M. Jirivengwab, & C. Mbohwa. (2017). Design of a hoisting system for a small scale mine. **14th Global Conference on Sustainable Manufacturing**, Stellenbosch, South Africa, 3-5 October 2016.





ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- A. Punsirichaiyakul, T. Ratniyomchai and T. Kulworawanichpong, (2020).
“Gravitational energy storage by using concrete stacks”, **2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2020)**, October 14-16, 2020, Chiangmai, THAILAND



Gravitational energy storage by using concrete stacks

Aunsit Punsirichaiyakul
School of Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
ter.punsirichaiyakul@gmail.com

Tosaphol Ratniyomchai
School of Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
e-mail:tosaphol@sut.ac.th

Thanatchai Kulworawanichpong
School of Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
e-mail:thanatch@sut.ac.th

Abstract— This article purposes to study theories of gravitational potential energy as an energy storage system by lifting the weight of concrete stacks up to the top as stored energy and dropping the concrete stacks down to the ground to discharge energy back to the electrical power system. This article is the analysis and trial plan to create an energy storage systems model with the vertical concrete stacks to form a suitable configuration. The gravitational energy storage system is an energy transformation between the gravitational potential energy and the kinetic energy of the concrete stacks moving down to the electrical energy via a generator. A comparative efficiency study of the charging and discharging energy system during lifting and dropping concrete stacks are also presented. The case study is based on the feasible square prism concrete stacks in vertical shape with a weight of 100 tonnes per stack. The height of the system is about 50 m. As the result, the power system obtains the energy from the gravitational energy storage as a discharging mode by 9.68 kWh, however, supplies the energy to the gravitational energy storage as a charging mode about 12.10 kWh with the overall efficiency of 80%. The finding in this study, the discharging mode of the gravitational energy storage is suitable to use in the power system to support the high demand during the on-peak time or the duration of the high cost of electricity whereas the charging mode is possibly used in the duration of off-peak time with low cost of electricity or supported by the renewable energy sources around.

Keywords—gravitational, concrete stacks, discharging mode, charging mode, energy storage.

I. INTRODUCTION

This article is a concept and study of using gravity to be the energy storage system. As alternative energy storage in Thailand, gravity is the energy that exists everywhere and it is possibly applying to an abandoned mine in Thailand [1]. For the benefit of the abandoned area, however, Thailand has very few mines, therefore, it is not popular to study this form of storage in Thailand.

The application of the gravity energy storage system is a few practical applications and examples in the real world. New gravitational energy storage is modeled to install on the mountain with the vanadium redox battery for a suitable accommodation of the renewable energy system. The gravity energy storage system is supported by the battery and the wind

turbine systems during the charging mode which is optimized for the feasibility application [2]. Regarding the gravity applications, storing energy by pumping water to a reservoir uphill, pumped hydropower was also energy storage that was used around the world [3]. However, it was a limitation that required a large area and a height for water retention between a lower and upper for applying the gravity [4]. Wind turbines and solar cell systems could produce energy more than the power system needed during the day [5]. This surplus energy is able to store in the energy storage system such as batteries and ultracapacitors or to supply the charging mode of the gravitational energy storage system. Other important parts for the safety of sling sizing selection that is able to support the weight of concrete stacks. Therefore, the size and weight of slings were designed and considered as safe as possible [7].

This article presents the design of the gravitational energy storage by using concrete stacks with converting the potential energy of gravity into the kinetic energy of the concrete movement and electrical energy. The rest of the sections in this article are explained as follows: Section II describes the structure model of the gravitational energy storage. The system formulations and the simulation results are presented in section III and IV, respectively. Finally, the conclusion of the article is presented in section V.

II. STRUCTURE MODEL OF THE SYSTEM

The gravitational energy storage system as shown in Fig. 1. includes the concrete stacks as the weight of the system connected with the sling to the pulley and gearbox as a mechanical conversion. The shaft of the gearbox is coupling with the motor/generator shaft as a prime mover. The output of the generator and the input of the motor are connected to the electrical power system, which might obtain the power from the renewable energy sources around such wind turbine and solar cell systems.

Regarding the parameters in Fig. 1, H is the total height of the gravitational energy storage system from under the gearbox level to the ground floor, h is the usable height of the gravitational energy storage system from the bottom of the lower concrete stacks to the ground floor and r_s is the radius of the pulley that is used to pull up/down the concrete stacks.

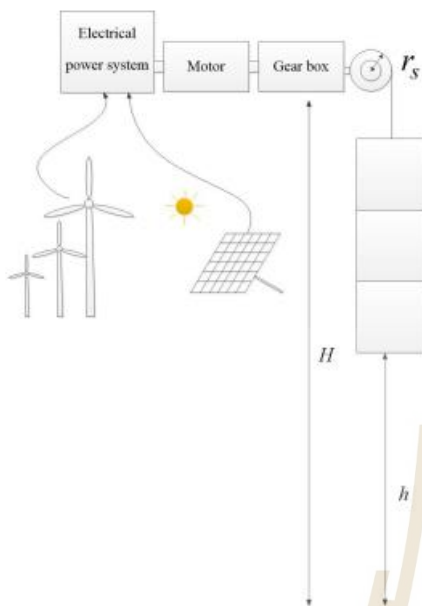


Fig. 1. Gravitational energy storage system using concrete stacks.



Fig. 2. The shape and dimension of a concrete bar.

The dimension of the concrete bar in terms of height, width, and length are shown in Fig. 2. Where d is the width and height of a square prism, and L is the length on the horizontal axis of a square prism.

III. SYSTEM FORMULATIONS

A. Energy Obtained from the Gravitational Energy Storage System

The charging energy is formulated according to the gravitational potential energy, E_c is expressed as follows:

$$E_c = mgh \quad (1)$$

The total discharging energy conversion of the energy storage system, E_d is obtained from (1) multiplied by the efficiency of the whole system written in (2).

$$E_d = \eta_E mgh \quad (2)$$

Where η_E is the round trip efficiency of the motor and electrical system, m is the total mass of concrete weight (kg), g is the acceleration to gravity (9.8 m/s^2) and h is the usable height for energy storage system [7].

The volume of a concrete bar, V is given by:

$$V = d^2 L \quad (3)$$

For a concrete bar with the density $\rho(\text{kg/m}^3)$, the mass of the concrete stacks, m_c is given by:

$$m_c = n\rho V \quad (4)$$

Where n is the total number of concrete bars used in the energy storage system. From (3) and (4), therefore the width and height of the concrete bar obtains in (5).

$$d = \sqrt{\frac{m}{L\rho n}} \quad (5)$$

The usable height of the gravitational energy storage system to lift the concrete stacks is expressed as follows:

$$h = H - nd = H - n\sqrt{\frac{m}{L\rho n}} \quad (6)$$

Thus, the total discharging energy capacity (J) of energy storage system is given by:

$$E = \eta_E \left(mgH - mgn\sqrt{\frac{m}{L\rho n}} \right) \quad (7)$$

As the square prism increases the sizing of width and height, then the weight of the concrete bar will increase accordingly, then the useable distance of energy storage is also decreased.

B. Sling

The total mass of the concrete stacks affects the selection of the size of the sling. The safety and efficiency of the sling cables must be carefully considered, because they have to support the weight of the concrete stacks to pull up and release every day for a long time. Therefore, it is very important to select and install the appropriate slings in the gravitational energy storage system.

The calculation of the pulling force strength of a sling is expressed by:

$$t_b = \frac{(\text{diameter of wire (mm)})^2}{20} \quad (8)$$

Where t_b is the tensile strength to the point of the sling (tons) and the weight that the sling can safely lift, t_s is given as follows:

$$t_s = \frac{t_b}{sf} \quad (9)$$

Where sf is the safety factor at the maximum working load which is equal to 5 [7]. Then the mass of sling, m_r is given by:

$$m_r = A_r l_r \rho_r \quad (10)$$

Where A_r is the total cross-sectional area of the sling, l_r is the sling length and ρ_r is the density of the sling (kg/m^3).

C. Mechanical Transmission and Gear Efficiency

Using mechanical power transmission is capable of reducing or increasing the speed of the concrete stack of the gravitational energy storage system by applying the gearbox. However, the system performance is also reduced because the efficiency of the gear reductions have a loss.

The gears shown in Fig.3 are called spur gears, which couple together. The left gear calls the 'driver' gear, that is driven by a motor. When the left gear is turned, it also begins turning with the right gear. The right gear calls the 'driven' gear. The gear ratio (GR) is the ratio between the driver gear (left) and the driven gear (right).

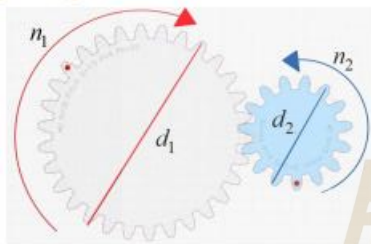


Fig. 3. Gear ratio.

The GR is also the ratio of the angular speed of the gear input and the angular speed of the gear output. Therefore, the GR of a simple gear is given as follows:

$$GR = \frac{\text{Input Rotation}}{\text{Output Rotation}} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{t_2}{t_1} \quad (11)$$

Where d_1 and d_2 are the diameter of the driver and driven gears, n_1 and n_2 are the speed of the driver and driven gears and t_1 and t_2 are the number of teeth per gear of the driver and driven gears [8].



Fig 4. The gear ratio of 1: 216 turns [9].

Fig.4 shows the teeth sprocket with the GR of 6:1 folding 3 sets in a row. Therefore, the GR of the whole system in one cycle is 216:1 which the GR of each gear can be presented in TABLE I. It will be able to reduce the speed of the system by 216 times.

From TABLE I, the coupling gear numbers 2, 3 and 4, 5 have the same rotation speed. The higher the number of gear ratio, the higher the efficiency of the system, regarding to the types of gears in TABLE II. The gear reducer affects the speed of the concrete movement.

In this study chooses the spur gears from TABLE II applied in the gravitational energy storage system because it has high efficiency in the range of 94 -98%.

TABLE I. THE GEAR RATIO OF THE GEAR IN FIG. 4.

Number	Scale	Ratio	Speed from motor (times)
1	60 teeth	1:1	1
2	10 teeth	1:6	6
3	60 teeth	1:6	6
4	10 teeth	1:36	36
5	60 teeth	1:36	36
6	10 teeth	1:216	216

TABLE II. GEAR EFFICIENCY FOR EACH TYPE [10].

No	Type	Normal ratio range	Efficiency range
1	Spur	1:1 to 6:1	94 – 98%
2	Straight Bevel	3:2 to 5:1	93 – 97%
3	Spiral Bevel	3:2 to 4:1	95 – 99%
4	Worm	5:1 to 75:1	50 – 90%
5	Hypoid	10:1 to 200:1	80 – 95%
6	Helical	3:2 to 10:1	94 – 98%
7	Cycloid	10:1 to 100:1	75 – 85%

IV. SIMULATION RESULTS

The parameters specified for the gravitational energy storage system are presented as follows:

$$\eta_E = 80\%, g = 9.81 \frac{m}{s^2}, h = 50 m, L = 4 m$$

$$\rho = 2400 \frac{kg}{m^3}, n = 3 \text{ piece.}$$

The simulation results of charging and discharging modes of the gravitational energy storage system varying with concrete stacks mass are shown in Fig. 5 and 6.

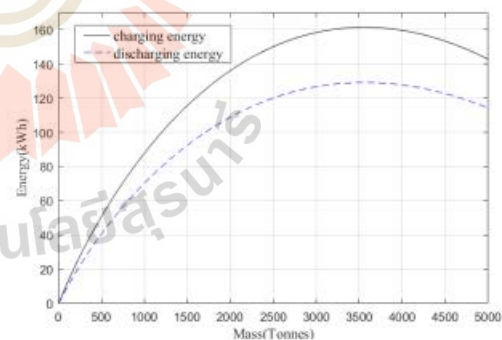


Fig. 5. Charging and discharging energy of energy storage system.

From Fig. 5, the black line shows the charging energy used to pull up the concrete stacks to the top, and the blue line shows the discharging energy obtained by releasing the concrete stacks down to the ground floor. The maximum charging energy of 162 kWh and the discharging energy of 130 kWh obtain at the mass of the concrete stack of 3556 tonnes. Therefore, the efficiency of the gravitational energy storage system is about 80%. Fig. 6 also shows the charging and discharging energy of the small gravitational energy storage system varying the mass of the concrete stack from 0 to 100 tonnes. All the results of the discharging energy obtained in Fig. 6 are presented in TABLE III.

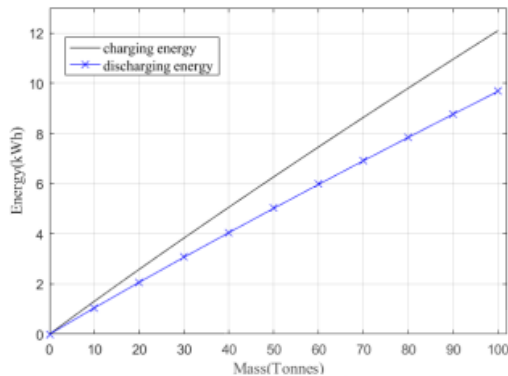


Fig. 6. Charging and discharging energy for the small energy storage system.

TABLE III. THE ENERGY VALUE FROM THE CHANGING WEIGHT OF CONCRETE STACKS

Usable high (m)	Mass (Tonnes)	Charging energy (kWh)	Discharging energy (kWh)
48.23	10	1.31	1.05
47.50	20	2.59	2.07
46.94	30	3.84	3.07
46.46	40	5.06	4.05
46.05	50	6.27	5.02
45.67	60	7.47	5.97
45.32	70	8.65	6.92
45.00	80	9.81	7.85
44.70	90	10.96	8.77
44.41	100	12.10	9.68

As the results in TABLE III, the small gravitational energy storage system has a high 50 meter. Considering the resulting of energy it depends on the weight of the concrete stack and the working height. Take an example from TABLE III, the weight of the concrete stacks of 50 tonnes, the discharging energy of the gravitational energy storage system obtains 5.02 kWh to the power grid and the charging energy of 6.27 kWh for pulling up the concrete stacks to the top. The finding is that the efficiency of the small gravitational energy storage system is also about 80%.

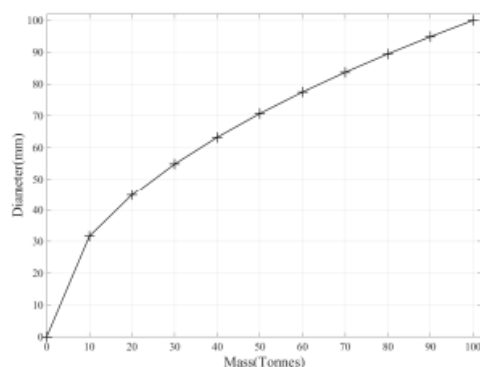


Fig. 7. Sling diameter of concrete stacks mass from 0 to 100 tonnes.

The diameter of the sling that is safe to lift the concrete stacks varying with the concrete stack mass

is shown in Fig. 7. The concrete stacks mass, the prism size, and the diameter of the sling from Fig. 7 are obtained in TABLE IV.

TABLE IV. CONCRETE STACKS MASS, PRISM AND SLING SIZES

Concrete stacks mass (tonnes)	Size per 1 piece ($d \times d \times L$) (m^3)	Sling cable diameter (mm)
10	0.589×0.589×4	31.62
20	0.833×0.833×4	44.72
30	1.021×1.021×4	54.77
40	1.178×1.178×4	63.24
50	1.318×1.318×4	70.71
60	1.443×1.443×4	77.46
70	1.559×1.559×4	83.67
80	1.667×1.667×4	89.44
90	1.768×1.768×4	94.87
100	1.863×1.863×4	100

V. CONCLUSIONS

This article describes the concept and theory of the gravitational energy storage system. Regarding the varied concrete stacks mass between 0 and 100 tonnes at a height of 50 meter. From the simulation, the maximum charging energy of 12.1 kWh and the discharging energy of 9.68 kWh obtain at the mass of the concrete stack of 100 tonnes. However, the actual usable height is 44.41 meter. It is obvious that the discharging energy of the gravitational energy storage obtained from the dropped down of the concrete stacks to the ground floor is lower than the charging energy to pull up the concrete stacks to the top.

REFERENCES

- [1] T. Morstyn, M. Chilcott and M. D. McCulloch, "Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts," Elsevier, Oxford, United Kingdom, 27 January 2019, pp. 201-206.
- [2] C. Yangyang, H. Hou, T. Xu, X. Wu, P. Liu and H. Wang, "A New Gravity Energy Storage Operation Mode to Accommodate Renewable Energy," IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Macao, pp.1-5, 1-4 December 2019.
- [3] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrami and M. M. Alam, "Pumped hydro energy storage system: a technological review," Renew Sustain Energy Rev 2015, 44, pp.586-98.
- [4] M. G. Gutiérrez and R. L. Arántegui, "Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage: a GIS-based assessment of pumped hydropower storage, JRC scientific and policy report, European commission, 2013.
- [5] A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic and D. Morton, "Challenges in integrating distributed Energy storage systems into future smart grid," IEEE international symposium on industrial electronics. 2008. pp.1627-32.
- [6] <https://blog.gooshared.com/view/88>
- [7] A. C. Ruoso, N. R. Caetano and L. A. O. Rocha, "Storage Gravitational Energy for Small Scale Industrial and Residential Applications," Inventions 2019, 4(4), pp.64.
- [8] P. Kosky, R. Balmer, W. Keat, G. Wise, "Mechanical Engineering," Exploring Engineering (Third Edition) ScienceDirect, 2013, pp.259-281.
- [9] Gear Generator<<https://geargenerator.com/>>
- [10] <https://www.quora.com/Which-is-the-most-efficient-gearbox>

ประวัติผู้เขียน

นายอนุศิษฐ์ ปันศิริชัยกุล เกิดเมื่อวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2540 ที่จังหวัดยโสธร เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลร้อยเอ็ด ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนมารีย์วิทยา และสำเร็จการศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา 2561 และปีการศึกษา 2562 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ณ สถาบันการศึกษาเดิม ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท มีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ โดยมีรายละเอียดตามภาคผนวก

