

การกำหนดขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่โดยคำนึงถึงการจัดสรรกำลังผลิต  
และพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในระบบผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Optimal Sizing of Battery Energy Storage System with Consideration of Economic  
Dispatch and Variable Renewable Energy in Thailand Generation System



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำหนดขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานด้วย  
แบตเตอรี่โดยคำนึงถึงการจัดสรรกำลังผลิตและพลังงาน  
หมุนเวียนที่มีความผันผวนในระบบผลิตไฟฟ้าของประเทศ  
ไทย

โดย

น.ส.อัจฉรา ยิ้มประไพ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศน์ีย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

----- คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

----- ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.โสทธิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศน์ีย์)

----- กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.พิสิษฐ์พล จีรพวงศานานุรักษ์)

----- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.สมภาพ อัมภุมงคล)

อัจฉรา ยิ้มประไพ : การกำหนดขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่โดยคำนึงถึงการจัดสรรกำลังผลิตและพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในระบบผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย. ( Optimal Sizing of Battery Energy Storage System with Consideration of Economic Dispatch and Variable Renewable Energy in Thailand Generation System) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.สุรชัย ชัยทัศน์

ปัจจุบันมีการส่งเสริมให้นำพลังงานหมุนเวียนเข้ามาใช้งานมากยิ่งขึ้น เนื่องจากไม่มีค่าเชื้อเพลิงเป็นพลังงานสะอาด ซึ่งแหล่งเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย คือ เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งแนวโน้มจะขาดแคลนและมีราคาสูงในอนาคต ดังนั้นพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม จึงกลายมาเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพื่อนำมาใช้ผลิตไฟฟ้า แต่การเพิ่มขึ้นของพลังงานนี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า เนื่องจากไม่สามารถควบคุมและไม่สามารถพยากรณ์ได้อย่างแน่นอน และส่งผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จึงเสนอให้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้งานในระบบไฟฟ้า เพื่อพัฒนาระบบไฟฟ้าให้มีความยืดหยุ่น และมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น และราคาการติดตั้งยังมีแนวโน้มที่ลดลงอีกด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสมเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน และทำงานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแผนการเดินเครื่องแบบเดิม เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป โดยที่ต้นทุนในระบบไฟฟ้านั้นต่ำที่สุด ซึ่งทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และพิจารณาราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมด้วย ในงานนี้พิจารณาการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในแต่ละการทดสอบ โดยใช้ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าและแผนการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จากผลการวิเคราะห์พบว่าสามารถหาขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้ เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้น 90% โดยทำงานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และได้ผลของต้นทุนของระบบที่ต่ำที่สุดเมื่อพิจารณาราคาในการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมด้วย

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6370419321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: BATTERY ENERGY STORAGE STSYEM / CONVENTIONAL GENERATION /  
ECONOMIC DISPATCH / VARIABLE RENEWABLE ENERGY / SOLAR / PV /  
WIND

Audchara Yimprapai : Optimal Sizing of Battery Energy Storage System with  
Consideration of Economic Dispatch and Variable Renewable Energy in Thailand  
Generation System. Advisor: Assoc. Prof. SURACHAI CHAITUSANEY, Ph.D.

The portion of renewable energy (RE) increases because RE generation has no fuel cost and is clean energy. In Thailand's generation system, fossil fuel is a primary energy source, which will be expensive and insufficient in the future. Thus, the variable renewable energy (VRE) generation, i.e., solar and wind, becomes an attractive source of generating electricity. However, the increasing proportion of VRE generation in a power system changes load curve and conventional generator operations since they are unpredictable and uncontrolled. As a result, this issue can be solved by using battery energy storage systems (BESSs). The BESS improves power system flexibility and reliability. Moreover, its price has been decreasing continuously.

This research proposes a method to determine the optimal BESS size which can balance load and conventional generation when VRE generation increases. Meanwhile, the old generator dispatch instructions provided by Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) were used. The proposed method uses an economic dispatch for minimizing the operating costs of generation and calculating the capital cost of the BESS with the VRE generation. This thesis considers the increase of VRE generation in each case study. The analysis considered electrical demand and generation data in Thailand's system. The result shows that if the VRE generation reaches 90 percent, the BESS is required. The optimal BESS operates with the conventional generation, which obtains the minimum operating cost, and the capital cost of BESS is considered.

Field of Study: Electrical Engineering Student's Signature .....

Academic Year: 2021 Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร. สุรชัย ชัยทัศน์ย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ เอาใจใส่ และให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบ และแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อยแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดีตลอดในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ รศ.ดร. โสทธิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์ อาจารย์ ดร. พิสิษฐ์พล จิรพงศานานุรักษ์ และ ดร.สมภพ อัจฉริยะกุล ที่ได้สละเวลาตรวจสอบ แก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง ขอขอบพระคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน ที่กรุณาให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ โครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย กับ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รุ่นที่ 5 ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ด้าน Smart Grid

และขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่สาวทั้งสองคน และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ได้ให้กำลังใจ คอยดูแล เอาใจใส่ และให้การสนับสนุนข้าพเจ้าตลอดมา ขอขอบคุณพี่เฉลิมจิต กลั่นสุภา และพี่วีรยา อิมเจริญกุล ที่คอยให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ และคนรอบตัวของข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจ และให้คำแนะนำแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมา สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณตัวข้าพเจ้าเองที่มีความอดทนไม่ย่อท้อ มีความพยายาม มีความมุ่งมั่นและตั้งใจ ตลอดจนแก้ไข ปัญหาต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อัจฉรา ยิ้มประไพ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญตาราง.....ฌ	ฌ
สารบัญภาพ.....ฎ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์..... 2	2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์..... 2	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน..... 3	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์..... 4	4
1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์..... 4	4
1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์..... 6	6
บทที่ 2 การพัฒนาพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในประเทศไทย..... 7	7
2.1 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก..... 7	7
2.1.1 การประเมินศักยภาพและแนวทางการจัดหาเชื้อเพลิงจากพลังงานธรรมชาติ..... 9	9
2.2 แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย..... 11	11
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน..... 16	16
3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์..... 16	16
3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม..... 23	23

3.3 การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน.....	31
3.3.1 ความแปรปรวนของพลังงานลม .....	32
3.3.2 ความแปรปรวนของพลังงานแสงอาทิตย์.....	33
3.3.3 การทำนายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม .....	34
3.3.4 การทำนายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	35
3.3.5 ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนต่อการจัดการระบบ ไฟฟ้าและการวางแผน.....	35
บทที่ 4 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	39
4.1 ระบบกักเก็บพลังงาน .....	39
4.2 ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	44
4.3 แบบจำลองของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	46
4.4 คุณสมบัติของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ .....	50
4.5 ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	53
4.6 การใช้งานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	55
บทที่ 5 การพัฒนาโปรแกรมคำนวณการคำนวณหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ เหมาะสม .....	60
5.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน .....	60
5.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า.....	60
5.3 การจำลองของค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิ .....	61
5.4 การกำหนดสมการสำหรับคำนวณหาขนาดระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	63
5.5 โปรแกรมแก้ปัญหาแบบเป็นเชิงเส้น.....	72
5.6 การพิจารณาต้นทุนต่อหน่วยของระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ...	73
บทที่ 6 การทดสอบและผลการทดสอบ การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	77
6.1 ข้อมูลที่ใช้ทดสอบ.....	77



6.1.1 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	77
6.1.2 ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้า .....	78
6.1.3 ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน .....	80
6.2 แนวทางการทดสอบ .....	81
6.3 เงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ .....	84
6.3.1 เงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	84
6.3.2 เงื่อนไขของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ .....	87
6.4 การพิจารณาราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ .....	88
6.5 แผนภาพการทำงาน .....	89
6.6 ผลการทดสอบ .....	91
6.7 วิเคราะห์ผลการทดสอบและสรุป .....	106
บทที่ 7 สรุปผล และข้อเสนอแนะ .....	112
บรรณานุกรม .....	116
ประวัติผู้เขียน .....	117
ภาคผนวก .....	118
ก. ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	119
ข. การเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการจัดสรรกำลังการผลิตในอดีต .....	121
ค. การผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน .....	124

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 เป้าหมายกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกแต่ละประเภท.....	8
ตารางที่ 2.2 การประมาณการกำลังผลิตไฟฟ้าแยกตามชนิดโรงไฟฟ้า .....	12
ตารางที่ 3.1 ร้อยละของพื้นที่ที่ได้รับรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี ในระดับต่างๆ.....	19
ตารางที่ 3.2 ความเร็วลมในแหล่งลมในแต่ละพื้นที่.....	24
ตารางที่ 4.1 ประเภทของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ตามชนิดของแบตเตอรี่.....	45
ตารางที่ 6.1 ลักษณะข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	78
ตารางที่ 6.2 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่อง .....	78
ตารางที่ 6.3 ลักษณะข้อมูลของความต้องการใช้ไฟฟ้า.....	79
ตารางที่ 6.4 ข้อมูลพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน จากการประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในแผน PDP 2018 .....	82
ตารางที่ 6.5 ราคาของกำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า.....	89
ตารางที่ 6.6 ค่ากำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่นำเข้ามาปรับใช้.....	92
ตารางที่ 6.7 ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	98
ตารางที่ 6.8 ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อกำหนดสถานะการรับจ่ายประจุ.....	99
ตารางที่ 6.9 ขนาดของความจุของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ติดตั้ง.....	100
ตารางที่ 6.10 การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	101
ตารางที่ 6.11 การเพิ่มขึ้นของพลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	102
ตารางที่ 6.12 ต้นทุนการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเริ่มมีการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	103
ตารางที่ 6.13 ต้นทุนการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเริ่มมีการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และพิจารณาราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	104
ตารางที่ 6.14 ผลต่างของต้นทุนการทำงานเมื่อมีการพิจารณาราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	105

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในวันทำงาน .....	119
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในวันหยุด.....	120
ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างการเดินเครื่อง และ การจัดสรรกำลังผลิต (MW) ในวันทำงาน .....	121
ตารางที่ ข.2 ตัวอย่างการเดินเครื่อง และ การจัดสรรกำลังผลิต (MW) ในวันทำงาน .....	122
ตารางที่ ข.3 ตัวอย่างการเดินเครื่อง และ การจัดสรรกำลังผลิต (MW) ในวันหยุด .....	123
ตารางที่ ข.4 ตัวอย่างการเดินเครื่อง และ การจัดสรรกำลังผลิต (MW) ในวันหยุด .....	123
ตารางที่ ค.1 ข้อมูลอัตราส่วนระหว่างการผลิตไฟฟ้าและการติดตั้งของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน.....	125
ตารางที่ ค.2 การประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในปี 2562.....	126



## สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 แผนภูมิแสดงค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั่วประเทศในแต่ละเดือน.....	9
รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของพื้นที่ตามความเร็วลมที่ระดับความสูง 90 เมตร .....	10
รูปที่ 2.3 แผนภูมิแสดงค่าการประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในปี พ.ศ. 2564.....	13
รูปที่ 2.4 แผนภูมิแสดงค่าการประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในปี พ.ศ. 2580.....	13
รูปที่ 2.5 แผนภูมิแสดงค่าการเปรียบเทียบอัตราส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่ผันผวน กับความต้องการใช้ไฟฟ้าในปี 2564.....	14
รูปที่ 2.6 แผนภูมิแสดงค่าการเปรียบเทียบอัตราส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่ผันผวน กับความต้องการใช้ไฟฟ้าในปี 2580.....	15
รูปที่ 3.1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดทั้งปี.....	17
รูปที่ 3.2 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของเดือนต่างๆ .....	18
รูปที่ 3.3 การผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระทำงานร่วมกับแบตเตอรี่.....	20
รูปที่ 3.4 การผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า .....	20
รูปที่ 3.5 การผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน.....	21
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเปลี่ยนแปลงของ ความเข้มแสงและอุณหภูมิ.....	22
รูปที่ 3.7 สัญลักษณ์อินเวอร์เตอร์ในวงจรไฟฟ้า.....	22
รูปที่ 3.8 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย แผนที่ความเร็วลมที่ความสูง 90 เมตร .....	24
รูปที่ 3.9 การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม .....	25
รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนหมุนแนวนอน .....	27
รูปที่ 3.11 ส่วนประกอบของกังหันลมแบบแกนหมุนแนวนอน และแกนหมุนแนวตั้ง.....	27
รูปที่ 3.12 กังหันลมแบบแกนหมุนแนวนอน .....	28
รูปที่ 3.13 กังหันลมแบบแกนหมุนแนวตั้ง.....	29
รูปที่ 3.14 ระดับความเร็วลมกับกำลังผลิตจากกังหันลม.....	30

รูปที่ 3.15 การผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานลม และโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	32
รูปที่ 3.16 ผลกระทบของการรวมตัวของพลังงานลมต่อความแปรปรวน .....	33
รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบความแปรปรวนในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์กัน .....	34
รูปที่ 3.18 สรุปผลกระทบของการนำพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเข้ามาใช้ต่อระบบไฟฟ้า.....	36
รูปที่ 3.19 การรักษาสอดคล้องระหว่างความต้องการใช้ไฟฟ้าและการผลิตไฟฟ้า .....	37
รูปที่ 3.20 การควบคุมระบบไฟฟ้า.....	38
รูปที่ 4.1 โครงการสมาร์ทกริดจังหวัดแม่ฮ่องสอน.....	41
รูปที่ 4.2 โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนศรีนครินทร์.....	42
รูปที่ 4.3 ศูนย์การเรียนรู้ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ลำตะคอง .....	43
รูปที่ 4.4 แบบจำลองระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ .....	46
รูปที่ 4.5 ภาพรวมของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ .....	47
รูปที่ 4.6 ภาพรวมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า.....	48
รูปที่ 4.7 ลักษณะของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในชนิดที่แตกต่างกัน.....	55
รูปที่ 4.8 รูปแบบการใช้งานของระบบกักเก็บด้วยแบตเตอรี่.....	55
รูปที่ 4.9 ลักษณะปรากฏการณ์หลังเปิด รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา .....	57
รูปที่ 5.1 อัตราการใช้ประโยชน์ของโรงไฟฟ้า กับระบบผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย.....	61
รูปที่ 5.2 ส่วนประกอบของต้นทุนต่อหน่วย .....	73
รูปที่ 5.3 ส่วนประกอบของ CAPEX และ OPEX .....	74
รูปที่ 6.1 ความต้องการใช้ไฟฟ้า.....	79
รูปที่ 6.2 ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	80
รูปที่ 6.3 ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม .....	81
รูปที่ 6.4 พลังงานหมุนเวียนเมื่อพิจารณาจากกำลังผลิตติดตั้งในปี 2562 ตามแผน PDP 2018 .....	83
รูปที่ 6.5 ข้อมูลการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน.....	83

รูปที่ 6.6 ตัวอย่างต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	85
รูปที่ 6.7 ลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบ .....	86
รูปที่ 6.8 แนวโน้มราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ .....	88
รูปที่ 6.9 แผนภาพการทำงาน .....	90
รูปที่ 6.10 กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	91
รูปที่ 6.11 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้น 90%.....	93
รูปที่ 6.12 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้น 100% .....	93
รูปที่ 6.13 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้น 110% .....	94
รูปที่ 6.14 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้น 120% .....	94
รูปที่ 6.15 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้น 130% .....	95
รูปที่ 6.16 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้น 140% .....	95
รูปที่ 6.17 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้น 150% .....	96
รูปที่ 6.18 ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	97
รูปที่ 6.19 ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อกำหนดสถานการณ์รับและจ่ายประจุ .	98
รูปที่ 6.20 ขนาดของความจุของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ติดตั้ง .....	100
รูปที่ 6.21 ต้นทุนการทำงานของของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเริ่มมีการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	103
รูปที่ 6.22 ต้นทุนการทำงานของของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเริ่มมีการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และพิจารณาราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่.....	104

รูปที่ 6.23 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่และการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน .....	107
รูปที่ 6.24 แนวโน้มความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิ.....	110



## บทที่ 1

### บทนำ

เนื้อหาของบทนี้จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันแนวโน้มความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศไทย มีแนวโน้มที่เพิ่มมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการเติบโตของเศรษฐกิจ และการเพิ่มขึ้นของประชากร และปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยได้จากการผลิตจากแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อเชื้อเพลิงฟอสซิลขาดแคลน เนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นภาครัฐจึงได้มีการสนับสนุนในนโยบายของแผนพัฒนาพลังงานทดแทน และพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 – 2580 (AEDP2018) เพื่อให้ประเทศไทยสามารถพัฒนาพลังงานทดแทนให้เป็นพลังงานหลักของประเทศได้ในอนาคต จึงส่งเสริมให้เกิดการสนับสนุนสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียนที่เพิ่มมากขึ้น ในแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 – 2580 (PDP2018) [1] ซึ่งได้มีการส่งเสริมให้มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนมากยิ่งขึ้น การนำพลังงานหมุนเวียนเข้ามาปรับใช้ในระบบไฟฟ้า มีข้อดี คือ เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้และไม่สิ้นเปลืองไป ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และไม่มีต้นทุนด้านเชื้อเพลิง แต่ในทางกลับกันการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เช่นเดียวกัน คือ ความไม่แน่นอน และความผันผวนของการผลิตไฟฟ้า เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม สามารถเรียกพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลมว่า “พลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน” ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า และการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานนี้จำเป็นที่จะมีการวิเคราะห์และการคาดการณ์การผลิตไฟฟ้าอย่างแม่นยำ

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ต้องพิจารณาถึงศักยภาพของพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย การเชื่อมต่อสำหรับการซื้อหรือขายไฟฟ้าในระบบ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เมื่อมีการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน อาจส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า และอาจจะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ ซึ่งส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการทำงานเพิ่มมากยิ่งขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีการนำระบบกักเก็บพลังงานเข้ามาปรับใช้ เนื่องจากปัจจุบันระบบกักเก็บพลังงานที่กำลังมีแนวโน้ม



ราคาลดลง คือ ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบได้อย่างรวดเร็ว สามารถแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงความต้องการใช้ไฟฟ้า และเป็นการเพิ่มความยืดหยุ่นและความน่าเชื่อถือให้กับระบบ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่มีขนาดที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการจัดการความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน และการจัดสรรการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ และต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ คือ การวิเคราะห์การใช้ต้นทุนในระบบไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด (Minimize operating cost) โดยต้นทุนในระบบไฟฟ้า คือ ค่าเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานอยู่ในระบบ และราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่จริงในระบบ และพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ที่มีแหล่งกำเนิดมาจาก พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และทำการพิจารณาราคาของการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เมื่อมีความจำเป็นต้องใช้งาน โดยใช้โปรแกรมแก้ปัญหาแบบเชิงเส้นซึ่งเป็นหนึ่งในชุดคำสั่งที่อยู่ภายใน Optimization toolbox ของโปรแกรม MATLAB

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. สามารถหาขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ที่นำเข้ามาตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความต้องการใช้ไฟฟ้าเมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเข้าสู่ระบบ
2. สามารถหาแนวโน้มของต้นทุนในระบบไฟฟ้าที่เกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนที่เข้าสู่ระบบตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 – 2580 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1 (PDP2018 revision 1)
2. พิจารณาการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนที่เข้าสู่ระบบตามการทดสอบต่างๆ

3. พิจารณาข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าใน 1 วัน โดยแบ่งเป็น วันทำงาน (Workday) และวันหยุด (Holiday)
4. พิจารณาต้นทุนของระบบ จะพิจารณาเฉพาะต้นทุนเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและราคาการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เท่านั้น
5. พิจารณาการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบ ประเภทพลังงานความร้อนชนิดถ่านหิน (Thermal, fuel coal) และ พลังงานความร้อนร่วม (Combined-cycle) เท่านั้น
6. พิจารณาระบบผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนทั้งหมด 2 ประเภท ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เท่านั้น
7. พิจารณาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนชนิดถ่านหิน และพลังงานความร้อนร่วมอยู่บน Bus เดียวกันเท่านั้น
8. พิจารณาระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ให้ใช้งานในบทบาทของการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า (Flexible ramping) เท่านั้น
9. พิจารณาการใช้ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยเท่านั้น
10. ในวิทยานิพนธ์นี้ไม่พิจารณาเรื่อง Reactive power
11. ในวิทยานิพนธ์นี้ไม่พิจารณาเรื่อง ราคาของการบำรุงรักษาและค่าดำเนินการของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Operation and maintenance)

#### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาบทความทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ดังนี้
  - 1.1. ศึกษาการทำงานและความหมายของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน
  - 1.2. ศึกษาการพัฒนาและการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ในประเทศไทย
  - 1.3. ศึกษารูปแบบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบของประเทศไทย
  - 1.4. ศึกษาต้นทุนเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในประเทศไทย

- 1.5. ศึกษาการทำงานและความหมายของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่
- 1.6. ศึกษาต้นทุนราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่
- 1.7. ศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเข้ามาในระบบ
2. พัฒนาโปรแกรมคำนวณกำลังผลิตติดตั้ง และรูปแบบการเดินเครื่องของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
ภายในระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน เพื่อ  
ตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า และกำหนดให้ได้รับต้นทุนในระบบไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด  
ร่วมกับการคิดราคาการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่
3. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ
4. เขียนบทความตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. เพื่อเป็นการหาแนวโน้ม และขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในอนาคต เมื่อมี  
ความต้องการที่จะออกแบบเพื่อใช้งานในระบบให้สามารถรองรับต่อพลังงานหมุนเวียนที่มี  
ความผันผวนที่เพิ่มขึ้นมาในระบบ โดยสามารถทำงานร่วมกับรูปแบบการเดินเครื่องของ  
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรูปแบบเดิม
2. โปรแกรมสำหรับคำนวณขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ร่วมกับ  
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรูปแบบเดิม โดยมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนในระบบ เพื่อให้ได้  
ต้นทุนในระบบไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด
3. การนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มาใช้งานสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับระบบ  
ไฟฟ้าของประเทศไทย และสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อวางแผนสำหรับการใช้งานในอนาคต

### 1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

จากรายงาน [2] ได้มีการบ่งบอกว่าการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ที่ผลิต  
ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม จะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์หลังเปิด (Duck curve) และ  
ส่งผลให้การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบนั้นผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าความต้องการใช้  
ไฟฟ้า จึงจำเป็นที่จะต้องตัดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน จากรายงาน  
[3] ได้มีการบ่งบอกว่าการนำพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเข้ามาใช้ในระบบจะส่งผลให้เกิด  
ค่าใช้จ่ายในระบบมากยิ่งขึ้น เช่น การเพิ่มค่าใช้จ่ายสำหรับการจัดสรรเพื่อตอบสนองต่อการ  
เปลี่ยนแปลงความต้องการใช้ไฟฟ้า แต่ในทางกลับกัน ค่าใช้จ่ายบางส่วนอาจจะลดลง เช่น ค่าใช้จ่าย  
จากเชื้อเพลิงที่ใช้เดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของพลังงานหมุนเวียนที่มีความ

ผันผวนที่เข้ามาในระบบ จากงานวิจัย [4] เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนเข้าสู่ระบบมากยิ่งขึ้นโดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงได้มีการนำเสนอระบบกักเก็บพลังงานชนิด Compressed air มาช่วยในการกักเก็บพลังงานและแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า ในที่นี้ใช้วิธี Dynamic economic load dispatch เพื่อประมาณการทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Thermal และระบบกักเก็บพลังงาน งานวิจัย [5] ได้เสนอให้มีการนำระบบกักเก็บพลังงานชนิด Concentrated solar power และ Pumped storage hydroelectricity นำมาแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงความต้องการใช้ไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบมาจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Thermal ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน ด้วยวิธีการ การหาค่าเหมาะสม (Optimization techniques) เรียกว่า “INTLINPROG” ในโปรแกรม MATLAB งานวิจัย [6] ได้ทำการทดสอบระบบกักเก็บพลังงานหมุนเวียน ชนิด Hydraulic pumped , Compressed air และ Battery ทำงานร่วมกัน และทำการวิเคราะห์ลักษณะการทำงานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Thermal โดยต้องการให้ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าต่ำที่สุดด้วยวิธีการ การหาค่าเหมาะสม (Optimization techniques) เรียกว่า “Mixed Integer Linear Program” งานวิจัยที่ [7] ได้เสนอให้มีการนำแบตเตอรี่เข้ามาปรับใช้ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยต้องการจัดสรรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบ ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ และแบตเตอรี่ ซึ่งได้ทำการหาค่าต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีการ “Mixed Integer Quadratic Program” งานวิจัย [8] ได้นำเสนอระบบกักเก็บพลังงานด้วย ชนิด Battery และ Hydraulic pumped เข้ามาทำการทดสอบร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน และพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน โดยทดสอบให้สอดคล้องกับการลดคาร์บอนไดออกไซด์ และทดสอบด้วยวิธี “Mixed Integer Linear Program” ซึ่งต้องการดูลักษณะแนวโน้มของต้นทุนการทำงานของระบบ

สรุป; จากบทความรายงาน และงานวิจัยที่ได้ศึกษาพบว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนที่มีแนวโน้มเพิ่มเข้ามาในระบบมากยิ่งขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า และส่งผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลต่อต้นทุนการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนที่เข้ามาในระบบ โดยการแก้ไขปัญหาการใช้งานและการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนได้นั้น จะใช้ระบบกักเก็บพลังงาน เช่น ระบบกักเก็บพลังงานชนิด ชนิด Compressed air, Concentrated solar power, Hydraulic pumped และ Battery ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน คือ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม ร่วมกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ และระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

นอกจากนั้นยังพบว่าบทความวิจัยที่ได้ศึกษานั้นมีวิธีประเมินหรือคำนวณผลการทดสอบที่แตกต่างกัน เช่น [5] ใช้การหาค่าที่ดีที่สุดโดยวิธี “INTELLINPROG” ในขณะที่ [6], [8] ใช้การหาค่าโดย “Mixed Integer Linear Program” และในขณะที่ [7] ใช้การหาค่าโดย “Mixed Integer Quadratic Program” ในการหาค่าตอบ ซึ่งจะแตกต่างจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่จะใช้วิธีการคำนวณหาขนาดระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสม โดยทำงานร่วมกับการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน โดยใช้โปรแกรมแก้ปัญหาแบบเชิงเส้นฟังก์ชัน “LINPROG” ซึ่งเป็นหนึ่งในชุดคำสั่งที่อยู่ใน Optimization toolbox ของโปรแกรม MATLAB

## 1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งออกเป็น 7 บท โดยแบ่งเป็นเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญ ปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ งานวิจัยในอดีต และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 จะกล่าวถึงการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในประเทศไทย ทั้งปัจจุบันและอนาคต

บทที่ 3 จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ในงานวิทยานิพนธ์

บทที่ 4 จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ในงานวิทยานิพนธ์

บทที่ 5 จะกล่าวถึงการพัฒนาโปรแกรมคำนวณการคำนวณหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสม โดยทำงานร่วมกับการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน

บทที่ 6 จะกล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบ การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

บทที่ 7 จะกล่าวถึงข้อสรุป และข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### การพัฒนาพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในประเทศไทย

ในบทนี้จะอธิบายถึงการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทยทั้งในปัจจุบัน และอนาคต การนำพลังงานหมุนเวียนเข้ามาปรับใช้ในระบบได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐ โดยมีนโยบายการสนับสนุนของภาครัฐดังต่อไปนี้

2.1 แผนพัฒนาพลังงานทดแทน และพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 – 2580 (AEDP2018)

2.2 แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 – 2580 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1 (PDP2018 Revision 1)

#### 2.1 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก

เนื่องจากปัจจุบัน ประเทศไทยมีการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศเป็นหลัก โดยสัดส่วนของเชื้อเพลิงที่นำเข้ามาส่วนใหญ่เป็นประเภทน้ำมัน และมีแนวโน้มที่สูงมากยิ่งขึ้นเนื่องจากการเติบโตของเศรษฐกิจ และการเพิ่มขึ้นของประชากร เพื่อต้องการลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมในประเทศ รัฐบาลจึงได้มีการสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานทดแทน และพลังงานทางเลือกในรูปของพลังงานไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพมาอย่างต่อเนื่อง

จากนโยบายของภาครัฐมีการขับเคลื่อนให้มีการพัฒนาพลังงานทางเลือก โดยจะขึ้นอยู่กับศักยภาพของการจัดหาวัตถุดิบเพื่อผลิตพลังงานหมุนเวียน และความเหมาะสมของการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ในแต่ละพื้นที่ โดยจากแผนพัฒนาพลังงานทดแทน และพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 – 2580 (AEDP 2018) [8] ได้มีการสนับสนุนให้เพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน และพลังงานทางเลือกในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ ต่อการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายที่ร้อยละ 30 ในปี พ.ศ. 2580 โดยพิจารณาเป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบพลังงานไฟฟ้าประมาณร้อยละ 5.75 ต่อการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย ซึ่งข้อมูลจาก AEDP ในปี พ.ศ. 2580 ประเทศไทยจะมีการใช้ไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน รูปแบบพลังงานไฟฟ้ารวม 29,411 เมกะวัตต์ โดยมีการพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ คือ 12,139 เมกะวัตต์ และพลังงานลม คือ 2,989 เมกะวัตต์ เป็นต้น โดยมีเป้าหมายของการพัฒนา ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เป้าหมายกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกแต่ละประเภท

ประเภทเชื้อเพลิง	กำลังการผลิตติดตั้ง (MW)
1. พลังงานแสงอาทิตย์	12,139
2. พลังงานแสงอาทิตย์ลอยน้ำ	2,725
3. ชีวมวล	5,790
4. พลังงานลม	2,989
5. ก๊าซชีวภาพ (น้ำเสีย/ของเสีย/พืชพลังงาน)	1,565
6. ชยะชุมชน	900
7. ชยะอุตสาหกรรม	75
8. พลังน้ำขนาดเล็ก	308
9. พลังน้ำขนาดใหญ่	2,920
รวมเมกะวัตต์ติดตั้ง (เมกะวัตต์)	29,411
รวมพลังงานไฟฟ้า (ล้านหน่วย)	85,652
ความต้องการพลังงานไฟฟ้าทั้งประเทศ (ล้านหน่วย)	250,204
สัดส่วนพลังงานทดแทนต่อความต้องการไฟฟ้า (%)	34.23
สัดส่วนพลังงานทดแทนต่อพลังงานขั้นสุดท้าย (%)	5.75

ที่มา : แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 – 2580 (AEDP 2018), 2563

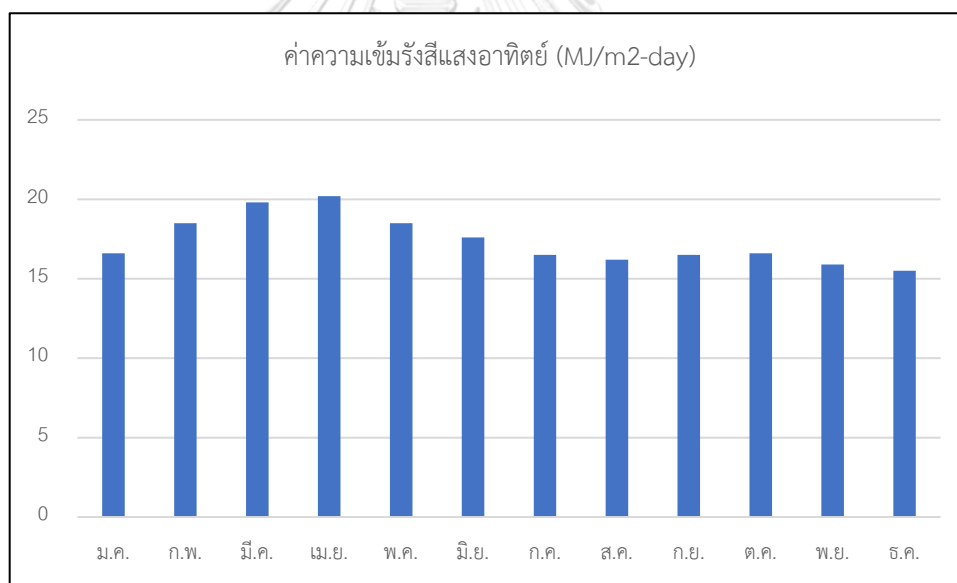
เนื่องจากการวิจัยระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน และพลังงานทางเลือกนั้น ต้องมีการประเมินแนวทางการศึกษาภาพ และแนวทางการจัดหาเชื้อเพลิง โดยจะต้องมีเงื่อนไขที่เหมาะสมกับพื้นที่ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นนโยบายต่างๆ ของรัฐบาลจึงจำเป็นที่จะต้องนำเรื่องนี้มาพิจารณาด้วย จากแผนงานพัฒนาพลังงานทดแทน และพลังงานทางเลือก ระบบไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนสามารถแบ่งอยู่ในศักยภาพพลังงานตามธรรมชาติ

จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 – 2580 (AEDP 2018) ได้กล่าวถึง การประเมินศักยภาพพลังงานตามธรรมชาติ ได้แก่ พลังงานลม, พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานน้ำ ซึ่งเป็นพลังงานที่ขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศ และภูมิอากาศ

### 2.1.1 การประเมินศักยภาพและแนวทางการจัดหาเชื้อเพลิงจากพลังงานธรรมชาติ

#### 1. พลังงานแสงอาทิตย์

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ หมายถึงปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่นั้นๆ ในเวลาหนึ่งวัน โดยมีหน่วยเป็นเมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ( $\text{MJ}/\text{m}^2\text{-day}$ ) จากการเก็บข้อมูลของ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้ดำเนินโครงการพัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพ พลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560 โดยข้อมูลภาพถ่าย ดาวเทียมที่เก็บข้อมูลเป็นเวลา 15 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2544 – 2558 ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศ พบว่ามี ศักยภาพแตกต่างกันตามพื้นที่และขึ้นอยู่กับอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุม ตะวันออกเฉียงใต้ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่กระจายตัวในช่วง  $17 - 20 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{-day}$  และมีความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดทั้งปี คือ  $17.6 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{-day}$  โดยที่ความเข้มของรังสี แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศที่ได้รับผลกระทบจากมลภาวะสิ่งแวดล้อม หรืออุณหภูมิต่ำสูงมากขึ้นส่งผลให้เกิดไอน้ำในอากาศเพิ่มมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภูมิแสดงค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั่วประเทศในแต่ละเดือน

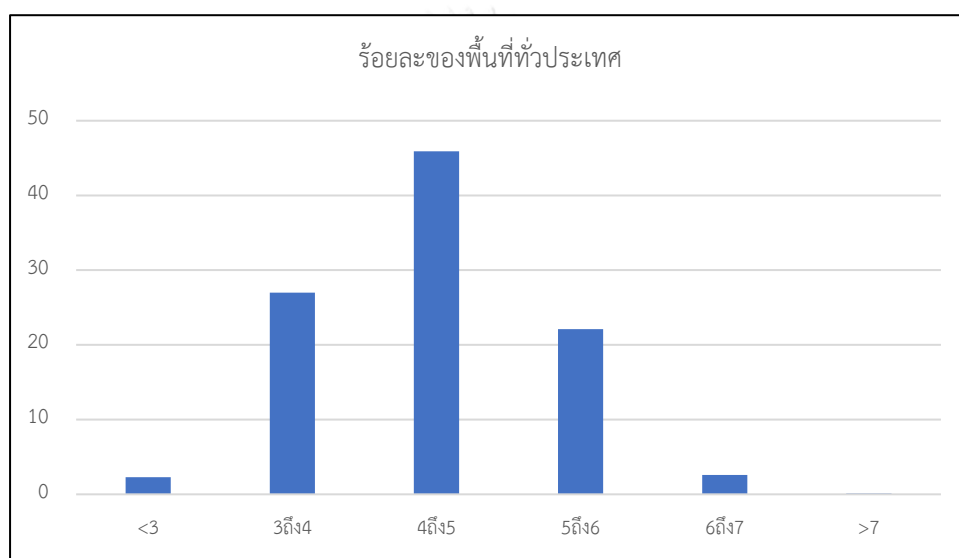
ที่มา : แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 – 2580 (AEDP 2018), 2563

จากความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ของประเทศไทยพบว่ามีค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี นั้นมีค่าสูง ดังนั้นสามารถนำไปใช้สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนให้เหมาะสม กับพื้นที่นั้นๆ ได้ โดยออกแบบให้สอดคล้องกันระหว่างความต้องการไฟฟ้า และความสามารถในการ นำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งาน



## 2. พลังงานลม

ประเทศไทยความเร็วลมค่อนข้างต่ำเนื่องจากตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นการใช้พลังงานลมจะต้องคัดเลือกหรือพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมที่เหมาะสมกับสภาพของลมในประเทศไทย บริเวณที่มีลมแรง จะเป็นบริเวณพื้นที่แคบ ส่งผลให้เกิดความเร็วลมที่สูงมากขึ้น จะเกิดในภูมิภาคเฉพาะที่ เช่น เนินเขา ช่องเขา หรือยอดเขา จากการศึกษาของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ในโครงการพัฒนา ปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานลมสำหรับประเทศไทย เมื่อปี พ.ศ. 2553 พบว่าที่ความสูง 90 เมตร พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศมีความเร็วลมเฉลี่ยที่ 4 – 5 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของพื้นที่ตามความเร็วลมที่ระดับความสูง 90 เมตร

ที่มา : แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 – 2580 (AEDP 2018), 2563

จากบริเวณที่เป็นพื้นที่แคบ เช่น เนินเขา ช่องเขา หรือยอดเขา ส่งผลให้มีความเร็วลมที่สูงมากขึ้นในประเทศไทย คือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งได้รับลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน และด้านตะวันออกของภาคที่มีลักษณะภูมิประเทศเป็นช่องเขาหรือเนินเขาจะมีความเร็วลมเฉลี่ย 6 - 7 เมตรต่อวินาที พื้นที่ของประเทศไทยที่มีความเร็วสูง คือ ภาคใต้ มีความเร็วลมเฉลี่ยสูงกว่าภาคอื่นเนื่องจาก ภาคใต้ตอนล่างและด้านตะวันตกของภาคใต้ตอนบน ได้รับลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจากอ่าวไทย และมีสิ่งกีดขวางทางลมน้อย ความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ 6 - 7 เมตรต่อวินาที ในภาคเหนือได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมน้อย มีความเร็วลมประมาณ 5 เมตรต่อวินาที ซึ่งมาจากในพื้นที่บางส่วนของภาคเหนือเป็นหุบเขา และเนินเขา ในส่วนของภาคตะวันตกจะมีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ 5 - 7 เมตรต่อวินาที เนื่องจากได้รับอิทธิพลมาจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ในส่วนของภาคกลางเป็นพื้นที่

รากลุ่ม ลมสงบทั้งปี ดังนั้นการพัฒนาการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกจะต้องพิจารณาความต้องการใช้ไฟฟ้าในพื้นที่นั้นและศักยภาพของพลังงานลม

การนำพลังงานทดแทน ชนิดพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนไปใช้ในแต่พื้นที่จำเป็นที่จะต้องมีการพิจารณาถึงศักยภาพดังที่กล่าวมา และต้องพิจารณาถึงปัจจัยของสิ่งแวดล้อม โครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่จะสามารถรองรับต่อการพัฒนาในการผลิตไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ หรือไม่ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการพิจารณาให้เหมาะสม

## 2.2 แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย

แนวทางการพัฒนาพลังงานทดแทน และพลังงานทางเลือกนั้นส่งเสริมให้รัฐบาลได้มีการจัดทำแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 - 2580 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1 (PDP2018 revision 1) [1] ซึ่งในแผนนี้เป็นการจัดทำมาเพื่อวางแผนให้จัดหาพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยให้เพียงพอต่อการใช้ไฟฟ้าภายในประเทศ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากร และการขยายตัวทางเศรษฐกิจ อีกทั้งในแผนการพัฒนายังมีการวางแผนทำนายแนวโน้มในอนาคต และการพัฒนาพลังงานไฟฟ้าที่มีการพิจารณาการพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการใช้ไฟฟ้าและศักยภาพการผลิตไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่

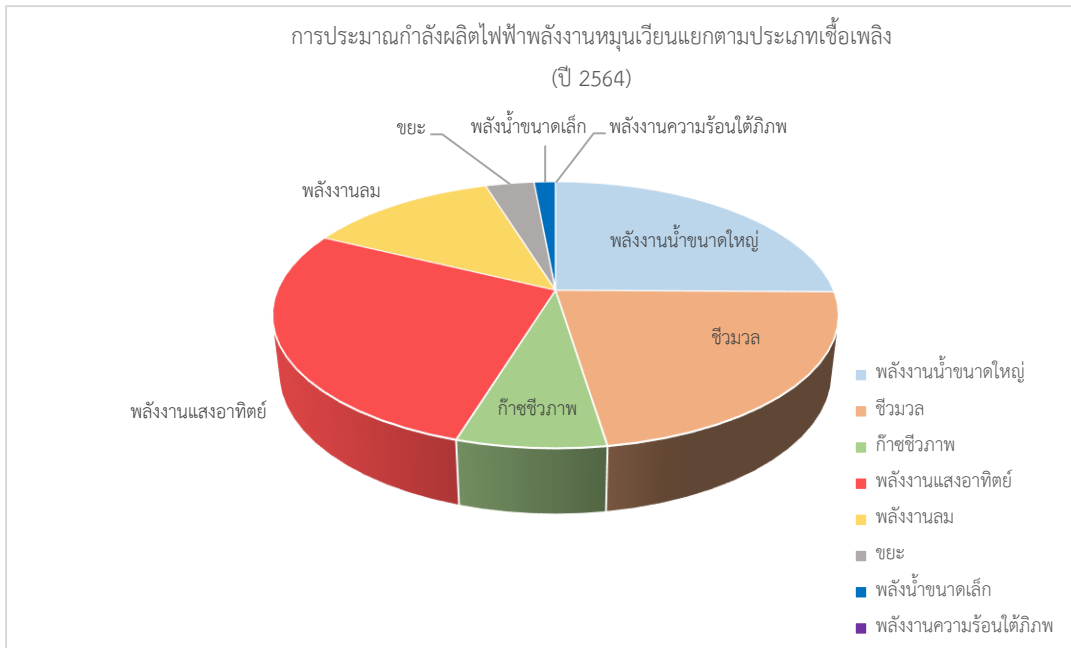
จากแผน PDP 2018 สถานภาพปัจจุบันในปี พ.ศ. 2561 พบว่ามีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงที่สุด คือ 29,969 เมกะวัตต์ และกำลังผลิตไฟฟ้า ณ สิ้นเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2560 กำลังผลิต 46,090 เมกะวัตต์ ซึ่งมีการวางแผนให้มีการเพิ่มกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าใหม่ในปี พ.ศ. 2561 - 2580 รวม 56,431 เมกะวัตต์ โดยพิจารณาเป็นพลังงานหมุนเวียนมากถึง 20,766 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเป็นโรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามนโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ซึ่งประกอบด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานแสงอาทิตย์ทุ่นลอยน้ำร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และพลังงานหมุนเวียนอื่นๆ จากปี พ.ศ. 2561 - 2580 สัดส่วนกำลังผลิตไฟฟ้าแยกตามชนิดโรงไฟฟ้าของพลังงานหมุนเวียน และพลังน้ำขนาดเล็ก เพิ่มจากร้อยละ 13.5 เป็นร้อยละ 32.5 ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การประมาณการกำลังผลิตไฟฟ้าแยกตามชนิดโรงไฟฟ้า

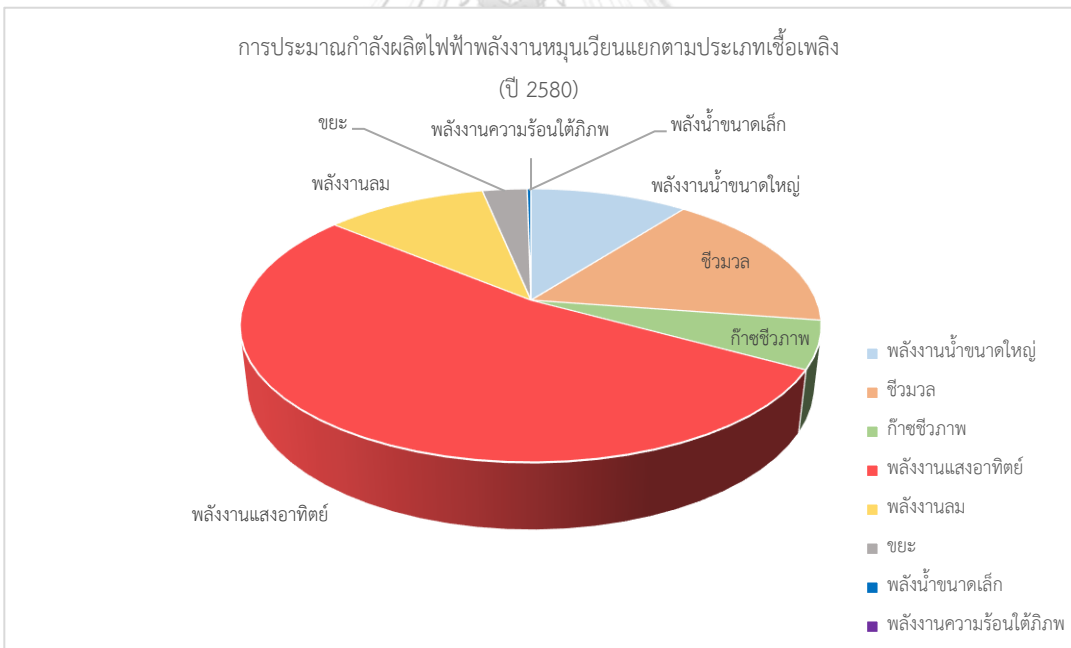
โรงไฟฟ้า	ปี			
	2561		2580	
	กำลังไฟฟ้า (MW)	สัดส่วน (%)	กำลังไฟฟ้า (MW)	สัดส่วน (%)
พลังน้ำขนาดใหญ่	6,023.00	12.5	10806.00	14
พลังงานหมุนเวียน /พลังน้ำขนาดเล็ก	6,473.00	13.5	25086.00	32.5
พลังความร้อน (ก๊าซ)	20,084.00	41.8	26470.00	34.3
โคเจนเนอเรชั่น	6,456.00	13.4	5815.00	7.5
พลังความร้อน(ถ่านหิน)	8,607.00	17.9	4673.00	6.1
ดีเซล	60.00	0.1	60.00	0.1
สายส่งเชื่อมโยง	300.00	0.6	300.00	0.4
มาตรการอนุรักษ์พลังงาน	0	0	4000.00	5.2
ผลรวม	48,002.00	100	77211.00	100

ที่มา : แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580 (PDP2018), 2563

ซึ่งจากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 - 2580 การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน จากปีพ.ศ. 2564 - 2580 เทียบกับประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนทั้งหมดนั้น เพิ่มจากร้อยละ 40.48 เป็นร้อยละ 63.78 ซึ่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน คือ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม เป็นพลังงานที่ไม่สามารถพยากรณ์ออกมาได้อย่างแม่นยำ และสามารถสร้างความผันผวนให้กับระบบ เมื่อมีพลังงานชนิดนี้เพิ่มมากยิ่งขึ้นจะส่งผลให้ระบบมีปัญหา และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้องการใช้ไฟฟ้า การเทียบอัตราส่วนการประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนประเภทที่มีความผันผวนกับประเภทอื่นๆ ซึ่งนำข้อมูลการวิเคราะห์มาจกแผน PDP 2018 ดังแสดงในรูป 2.3 และรูป 2.4



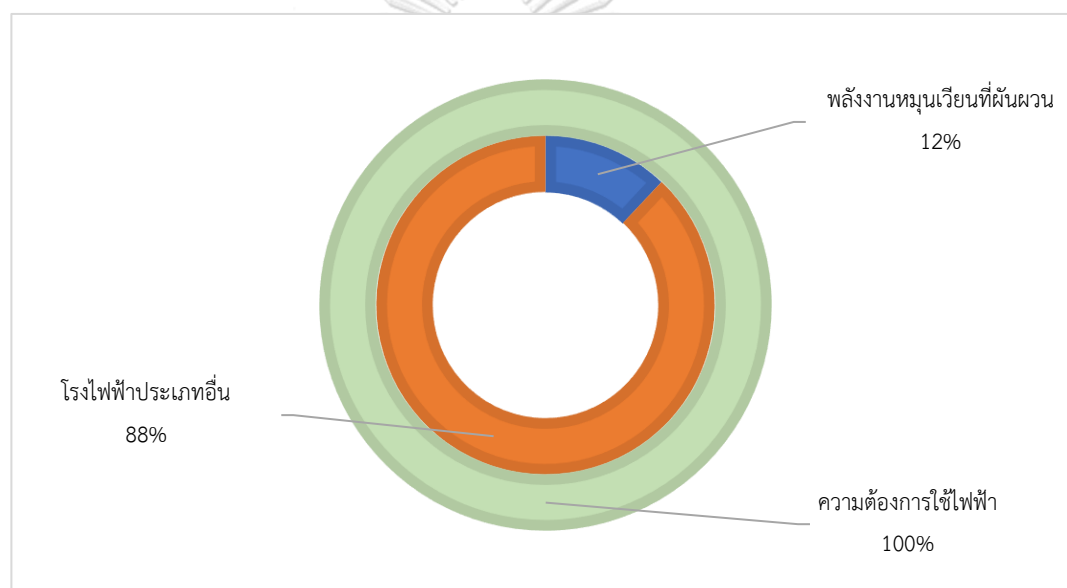
รูปที่ 2.3 แผนภูมิแสดงค่าการประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในปี พ.ศ. 2564



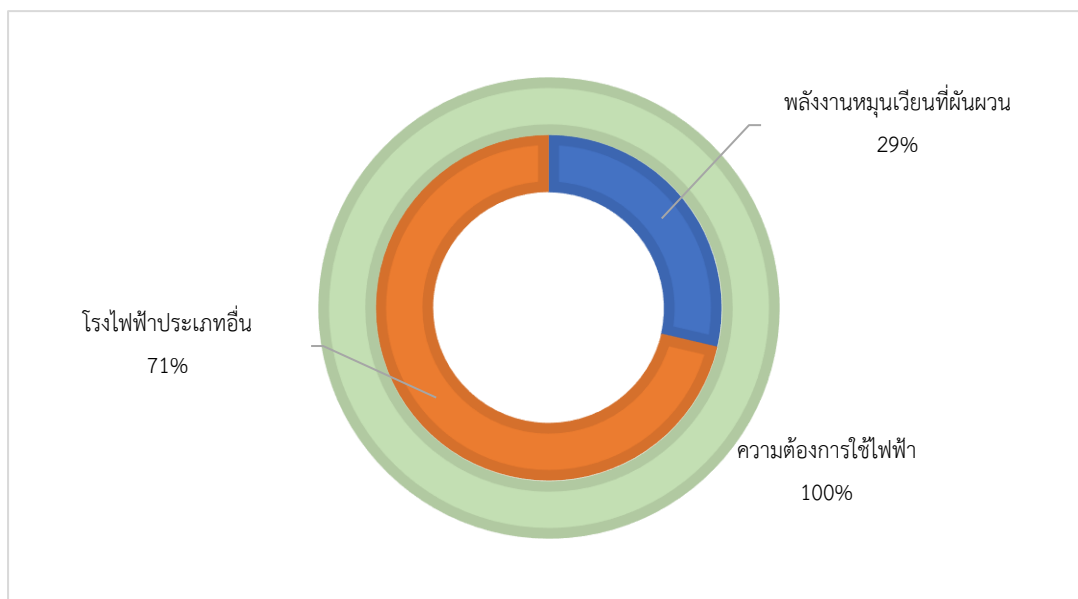
รูปที่ 2.4 แผนภูมิแสดงค่าการประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในปี พ.ศ. 2580

จากแผน PDP 2018 มีการทำนายค่าพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าของประเทศ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 - 2580 ซึ่งเป็นการพยากรณ์แนวโน้มความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีลักษณะที่เพิ่มมากยิ่งขึ้น ใน ส่วนของความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในประเทศสามารถแบ่งแยกย่อยออกได้ตามพื้นที่ ส่งผลให้ แผนพัฒนาจำเป็นต้องมีการส่งเสริมให้มีการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนตามศักยภาพ

เชื้อเพลิง และความต้องการใช้ไฟฟ้าในพื้นที่ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนจะมีความเกี่ยวข้องกับความต้องการใช้ไฟฟ้าในพื้นที่นั้นๆ อีกทั้งรัฐบาลได้มีการส่งเสริมให้มีการจัดตั้งโรงไฟฟ้าที่มีเชื้อเพลิงจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะสร้างความไม่มั่นคงให้กับระบบ รวมถึงความผันผวนให้กับระบบ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า และแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังผลิตชนิดนี้อาจจะส่งผลต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังผลิตที่มาจากเชื้อเพลิงอื่นๆ ให้มีรูปแบบการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป ตามแผน PDP 2018 ได้ทำการเทียบการประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน เทียบกับความต้องการใช้ไฟฟ้า พลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มจากร้อยละ 12 เป็นร้อยละ 29 เมื่อเทียบกับความต้องการไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 2.5 และ 2.6



รูปที่ 2.5 แผนภูมิแสดงค่าการเปรียบเทียบอัตราส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่ผันผวน กับความต้องการใช้ไฟฟ้าในปี 2564



รูปที่ 2.6 แผนภูมิแสดงค่าการเปรียบเทียบอัตราส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่ผันผวนกับความต้องการใช้ไฟฟ้าในปี 2580

จากแผนภูมิแสดงค่าการเปรียบเทียบอัตราส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่ผันผวนกับความต้องการใช้ไฟฟ้าจากปี พ.ศ. 2564 – 2580 พบว่าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนได้มีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และหลังจากที่ได้ทำการศึกษา แผนพัฒนาพลังงานทดแทน และพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 – 2580 (AEDP2018) และแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 – 2580 (PDP2018) พบว่ากำลังผลิตที่มาจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากยิ่งขึ้น ซึ่งแหล่งพลังงานชนิดนี้จะส่งผลให้ระบบเกิดความไม่แน่นอน และการเกิดเปลี่ยนแปลงความต้องการใช้ไฟฟ้า อาจส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมระบบ และระบบไม่มีเสถียรภาพ หรืออาจส่งผลให้เกิดปัญหาได้เพิ่มมากยิ่งขึ้น ดังนั้นส่งผลให้มีความจำเป็นที่ต้องวิเคราะห์พลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน เพื่อให้ดูแนวโน้มของการผลิต และการวางแผนในอนาคตจากการผลิตและใช้งานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานนี้ ซึ่งการศึกษาและวิเคราะห์นี้จะส่งผลให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อระบบไฟฟ้าของประเทศไทยมากที่สุด

### บทที่ 3

#### ทฤษฎีพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน

ในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน เช่น ศักยภาพพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน การแปลงผันพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเป็นพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น และแสดงการผลิตไฟฟ้าและผลกระทบจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน โดยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนที่จะพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ ดังนี้

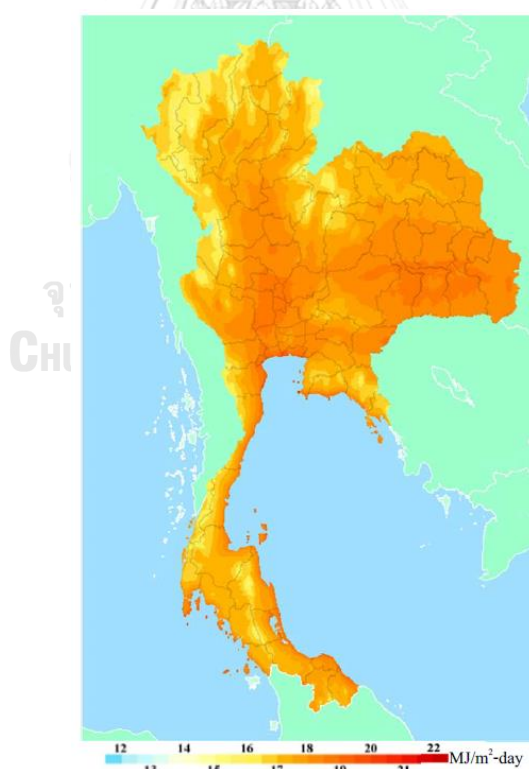
1. ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
2. ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

#### 3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้จากการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ในรูปของแสงแดด ซึ่งการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานยังสามารถนำมาใช้ได้ 2 รูปแบบ 1. การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เพื่อผลิตไฟฟ้า 2. การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เพื่อผลิตความร้อน ข้อดีของการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ คือ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียน เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วไม่มีวันหมดไป และมีศักยภาพสูงในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทย เป็นพลังงานที่ไม่มีต้นทุนค่าเชื้อเพลิง และไม่ก่อให้เกิดมลพิษ และมลภาวะทางด้านสิ่งแวดล้อม

เอกสาร [9] พลังงานแสงอาทิตย์นั้นสามารถเปลี่ยนแปลงมาจากรังสีแสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ทุกวินาทีดวงอาทิตย์จะทำการปลดปล่อยพลังงานความร้อนมาให้โลก โดยโลกได้รับพลังงานความร้อนเฉลี่ย คือ 1,367 วัตต์ต่อตารางเมตร แต่เนื่องจากโลกของเรามีชั้นบรรยากาศของโลก และก้อนเมฆปกคลุม ส่งผลให้รังสีแสงอาทิตย์บางส่วนเกิดการสะท้อน และกระจายรังสีแสงอาทิตย์บางส่วนเข้าสู่บรรยากาศ แต่ยังมีพลังงานจำนวนมหาศาลที่มาถึงพื้นผิวโลก ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบสู่โลกเรานั้นจะขึ้นอยู่กับ สภาพภูมิอากาศ ช่วงฤดูกาล และมลพิษทางอากาศ ฝุ่นละอองต่างๆ ดังนั้นส่งผลให้การกระจายพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละพื้นที่นั้นไม่เท่ากัน โดยพื้นที่ที่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมีโอกาสที่จะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าพื้นที่อื่นๆ โดยที่การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ และคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถเปลี่ยนแปลงแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด

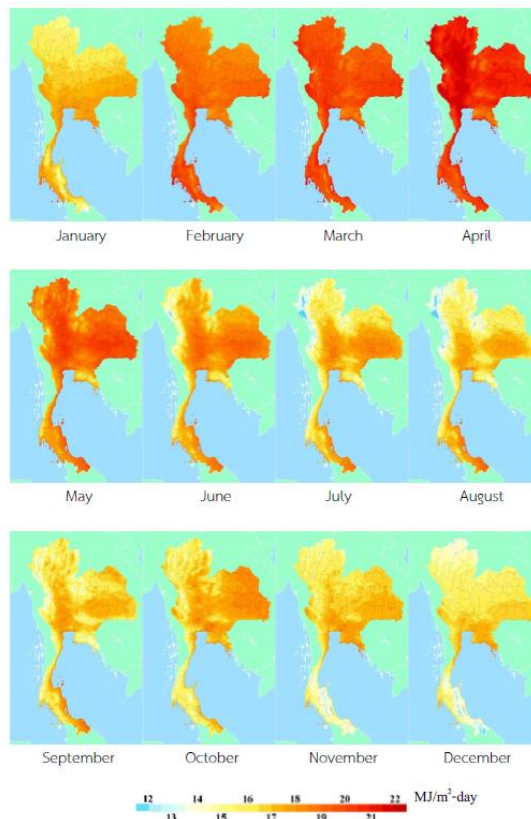
จากโครงการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทยปี 2560 [10] ผู้ดำเนินโครงการได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม โดยที่แบบจำลองดังกล่าวได้มีการคำนึงการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของโอโซน ไอน้ำ และการลดทอนของฝุ่นละออง ซึ่งใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 15 ปี (พ.ศ. 2544 - 2559) ซึ่งการดำเนินโครงการได้นำเสนอแบบจำลองดังกล่าวไปคำนวณรังสีแสงอาทิตย์ทั่วประเทศ และนำผลไปจัดแสดงในรูปแบบแผนที่รายเดือน และรายปี โดยจากข้อมูลพบว่าค่าเฉลี่ยของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ประเทศไทย พบว่ามีค่าเท่ากับ  $17.6 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$  ค่าเฉลี่ยนี้ได้มีการลดลงจากแผนฉบับเดิมปี 2553 (คือ  $18.0 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ ) เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของสภาพบรรยากาศในประเทศไทย จากผลของการคำนวณ และการเก็บข้อมูลพบว่าเดือนเมษายนเป็นช่วงเวลาที่พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีแสงอาทิตย์สูงที่สุด โดยได้รับรังสีแสงอาทิตย์สูงสุด คือ  $18 - 20 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$  ซึ่งจะอยู่ในพื้นที่บริเวณภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย การกระจายของรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของเดือนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดทั้งปี

ที่มา : โครงการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทยปี 2560, 2560 [10]





รูปที่ 3.2 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของเดือนต่างๆ

ที่มา : โครงการปรับปรุงปรุงแผนศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทยปี 2560, 2560 [10]

ความเข้มรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศเท่ากับ  $17.6 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$  ซึ่งพื้นที่เกินกว่าครึ่งของประเทศไทยได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ที่อยู่ในระดับสูง แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงและเพียงพอสำหรับการนำมาพัฒนาเพื่อผลิตไฟฟ้า และพัฒนาให้เหมาะสมเป็นประโยชน์ต่อไป ร้อยละของพื้นที่ที่ได้รับรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี ระดับต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ร้อยละของพื้นที่ที่ได้รับรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี ในระดับต่างๆ

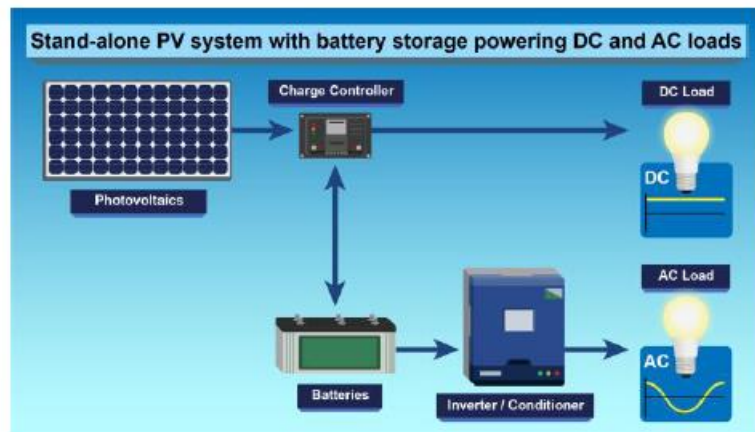
ช่วงความเข้มรังสีรวมของดวงอาทิตย์ รายวันเฉลี่ยต่อปี (MJ/m <sup>2</sup> -day)	ร้อยละของพื้นที่ เมื่อเทียบกับพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ
15 – 16	0.5
16 – 17	7.1
17 – 18	27.9
18 – 19	50.2
19 – 20	14.3

ที่มา : ศักยภาพแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย [11], 2549

เทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic technology) และการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar thermal electric technology) [11] ซึ่งในส่วนของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาในส่วนของการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เท่านั้น ซึ่งการออกแบบพลังงานแสงอาทิตย์ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 3 ประเภท [9]

#### 1. ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (Photovoltaic (PV) stand-alone system)

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ออกแบบมาเพื่อผลิตไฟฟ้าใช้สำหรับพื้นที่ที่มีความห่างไกล หรือพื้นที่ที่ไม่มีระบบส่งหรือโครงข่ายไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเข้าไปยังพื้นที่ ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับหรือมีปัญหาในพื้นที่บ่อยครั้ง ซึ่งอุปกรณ์สำคัญในการผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ คือ เซลล์แสงอาทิตย์ต่อใช้งานตรงกับโหลดไฟฟ้ากระแสตรง อีกรูปแบบหนึ่ง คือ การนำแบตเตอรี่เข้ามาเชื่อมต่อเพื่อกักเก็บพลังงาน โดยมีการเพิ่มอุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ (Solar charge controller) ซึ่งต่อใช้งานอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง และอุปกรณ์แปลงผันพลังงานเพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระซึ่งจะต่อใช้งานกับอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

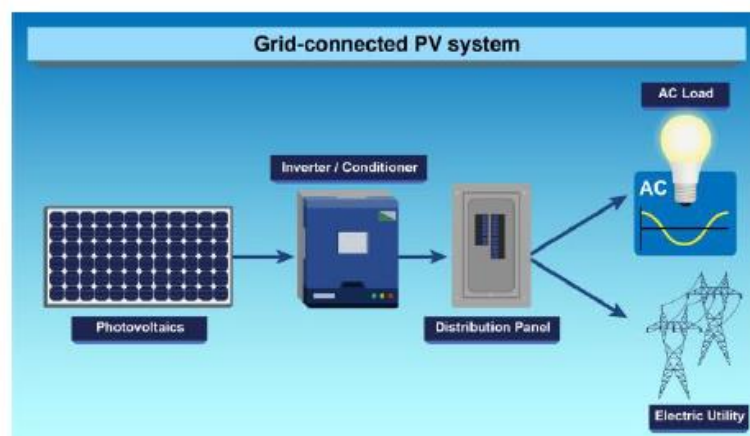


รูปที่ 3.3 การผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระทำงานร่วมกับแบตเตอรี่

ที่มา : คู่มือการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์, 2562 [9]

## 2. ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (PV grid connected system)

เป็นระบบผลิตกระแสไฟฟ้าที่ออกแบบมาเพื่อผลิตไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ซึ่งมีการใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบโครงข่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์สำคัญในการผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า คือ อุปกรณ์แปลงผันพลังงานเพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และการต่อผ่านกล่องต่อสายและเบรกเกอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกำลังไฟฟ้าตามความต้องการใช้งานของโหลด ซึ่งสามารถนำไปใช้กับโหลดกระแสสลับ และในขณะเดียวกันสามารถต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

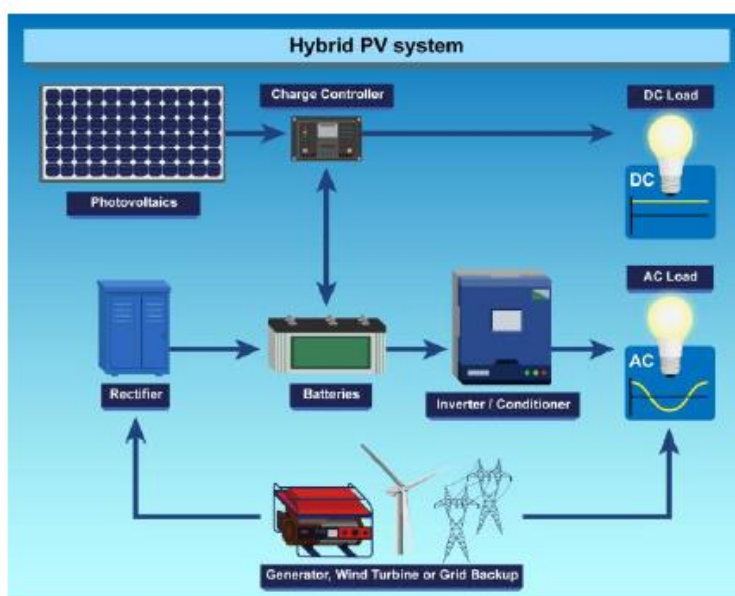


รูปที่ 3.4 การผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ที่มา : คู่มือการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์, 2562 [9]

### 3. ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV hybrid system)

เป็นระบบผลิตกระแสไฟฟ้าที่ออกแบบมาเพื่อผลิตไฟฟ้าเพื่อจากเซลล์แสงอาทิตย์ และทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่น โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่เฉพาะเจาะจง อุปกรณ์สำคัญในการผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน คือ อุปกรณ์แปลงผันพลังงานแบบผสมผสาน (Hybrid inverter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับเปลี่ยนแปลงแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถใช้งานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กังหันลมผลิตไฟฟ้า และแบตเตอรี่ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่นำไปใช้สามารถนำไปใช้ในรูปแบบของโหลดไฟฟ้ากระแสตรง หรือโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ และยังสามารถต่อกับระบบจำหน่ายได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

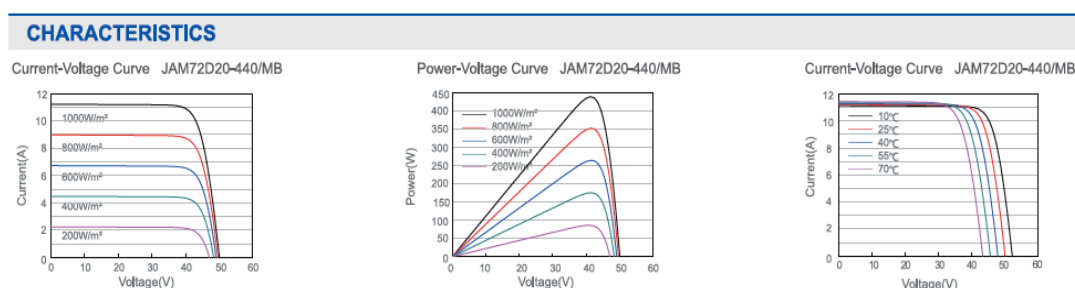
ที่มา : คู่มือการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์, 2562 [9]

การออกแบบพลังงานแสงอาทิตย์ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากที่กล่าวมาทั้งหมด จะมีอุปกรณ์ที่สำคัญ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) โดยจะต้องมีความรู้ความเข้าใจในอุปกรณ์ดังที่กล่าวมานี้อย่างถูกต้อง เพื่อนำมาใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ

#### 1. เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell)

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นกระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าโดยตรง โดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และมีพลังงาน กระแทกกับสารกึ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) ในสารกึ่งตัวนำจึงจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ โดยที่เซลล์แสงอาทิตย์ทำจากซิลิกอนซึ่งเป็นวัสดุที่มี

ราคาถูก โดยนำไปผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เพื่อผลิตเป็นแผ่นซิลิกอนบริสุทธิ์ ซึ่งจะกล่าวได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์รับแสงจากดวงอาทิตย์และทำการเปลี่ยนแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ปัจจัยในการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงขึ้นอยู่กับ ความเข้มของแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องมีความเหมาะสม และขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่นำไปใช้งาน ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง และอุณหภูมิส่งผลให้ได้รับกำลังไฟฟ้าได้หลากหลายค่า ดังแสดงในรูปที่ 3.6

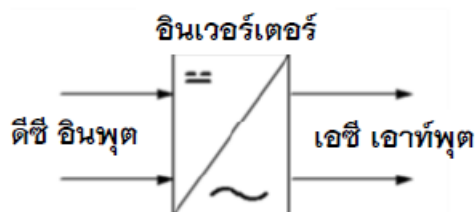


รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและอุณหภูมิ

ที่มา : JA solar catalog รุ่น JAM72D20, 2564 [12]

## 2. อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยจะทำการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าตรง คือ การที่ผลิตได้จากพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านเรือนหรือสำนักงาน ซึ่งเป็นกระแสสลับ 220 V หรือ 240 V ภายในอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยวงจรชุดควบคุม (Control circuit) ทำหน้าที่ควบคุมความถี่ และแรงดันให้เหมาะสม และทำหน้าที่เป็นวงจรหลักสำหรับการแปลงรูปคลื่น สัญญาณอินเวอร์เตอร์ในวงจรไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 สัญลักษณ์อินเวอร์เตอร์ในวงจรไฟฟ้า

ที่มา : คู่มือการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์, 2562 [9]

### 3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

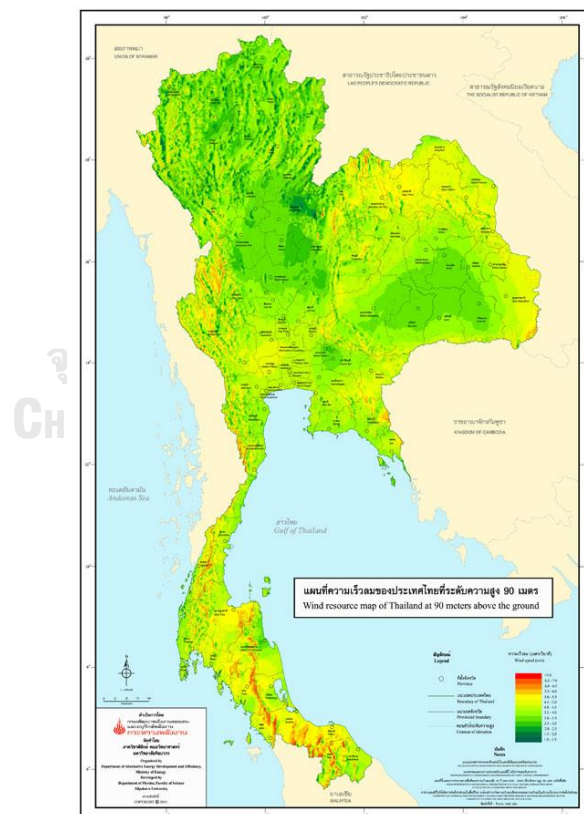
พลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบหนึ่ง และเป็นพลังงานที่ใช้แล้วไม่มีวันหมดไป ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานสะอาด สามารถทำได้ตามธรรมชาติ ไม่มีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า ปัจจุบันเทคโนโลยีในการผลิตพลังงานทดแทนทางด้านพลังงานลมมีความพร้อมอยู่มากและเป็นที่ยอมรับในต่างประเทศ เช่น บริเวณฝั่งทะเลแถบยุโรปเหนือ หรือช่องเขาในอเมริกา ซึ่งมีลักษณะภูมิประเทศเป็นแบบช่องเขา หรือเนินเขา เนื่องด้วยต้นทุนที่ต่ำ และการสนับสนุนของภาครัฐในเรื่องของมลภาวะทางอากาศ การนำพลังงานสะอาดมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า แต่ในประเทศไทยนั้นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมยังมีการนำมาใช้งานน้อย เนื่องจากศักยภาพของพลังงานลมในประเทศไทยไม่สูงมากเมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆ ซึ่งประเทศไทยได้มีการพัฒนาโครงการสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานลม ซึ่งมีการประยุกต์พลังงานลมร่วมกับพลังงานทางเลือกอื่น เช่น โครงการของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ในปีพ.ศ. 2562 มีกำลังผลิตรวมประมาณ 26.7 เมกะวัตต์ ซึ่งมีทั้งหมด 2 โครงการดังต่อไปนี้ 1. โครงการกังหันลมแหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต กำลังผลิต 0.192 เมกะวัตต์ เป็นการดำเนินงานร่วมกันระหว่างพลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ 2. โครงการกังหันลมลำตะคอง จังหวัดนครราชสีมา กำลังผลิต 26.50 เมกะวัตต์ โดยแบ่งโครงการออกเป็น 2 ระยะ โครงการระยะ 1 เป็นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม กำลังผลิต 2.50 เมกะวัตต์ และระยะ 2 เป็นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมร่วมกับการกักเก็บพลังงานชนิดไฮโดรเจน (Hydrogen) กำลังผลิต 24 เมกะวัตต์ ซึ่งการจัดตั้งโครงการนี้ขึ้นมาเพื่อต้องการศึกษาเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับพลังงานลม และศึกษาแหล่งศักยภาพพลังงานลม เพื่อพัฒนาระบบของประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพ ลดมลพิษทางอากาศ และลดการนำเข้าเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมต้องพิจารณาร่วมกับศักยภาพพลังงานลมในแต่ละพื้นที่ ซึ่งในประเทศไทยมีความเร็วลมค่อนข้างต่ำ และในสวนพื้นที่ที่มีพลังงานลมที่สูง คือ บริเวณพื้นที่แคบที่เกิดจากภูมิประเทศที่เฉพาะที่ เช่น เนินเขา ช่องเขา โดยความเร็วลมเฉลี่ยในแหล่งลมของประเทศไทยรายปีที่ระดับความสูง 120 เมตร เหนือระดับพื้นดิน มีค่าอยู่ระหว่าง 5.83 - 6.0 เมตรต่อวินาที [13] โดยสามารถแสดงตัวอย่างอัตราเร็วลมเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 3.2 และการแสดงแผนที่ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย และแผนที่ความเร็วลมที่ความสูง 90 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.2 ความเร็วลมในแหล่งลมในแต่ละพื้นที่

สถานี	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)
เชียงใหม่	4.19
ขอนแก่น	4.77
กรุงเทพฯ	2.63
สุราษฎร์ธานี	4.38
นครศรีธรรมราช	3.76
สงขลา	3.48

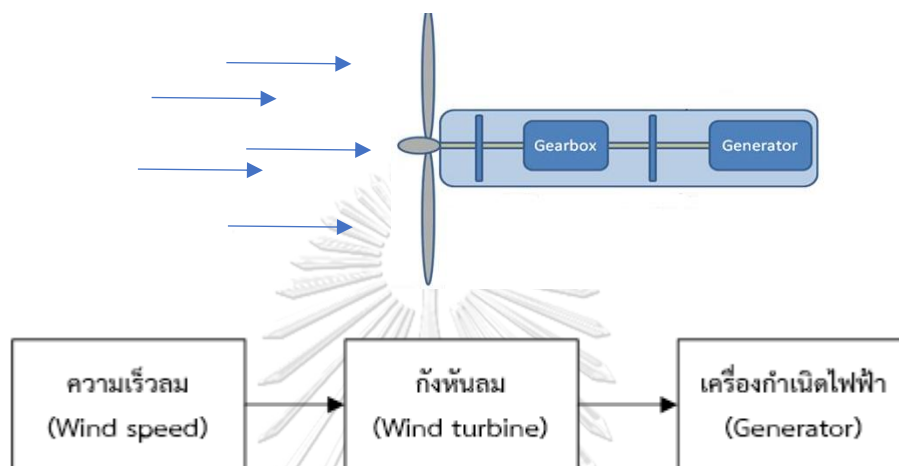
ที่มา : ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมของประเทศไทย, 2556 [13]



รูปที่ 3.8 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย แผนที่ความเร็วลมที่ความสูง 90 เมตร

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556 [31]

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม คือ การพัฒนามาจากกังหันลม ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลอย่างหนึ่งสามารถรับพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกล และแปรเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้งานต่อไป ซึ่งความเร็วลมในแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกันออกไปโดยขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีการจำลองระบบสำหรับการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 3.9 [14]



รูปที่ 3.9 การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

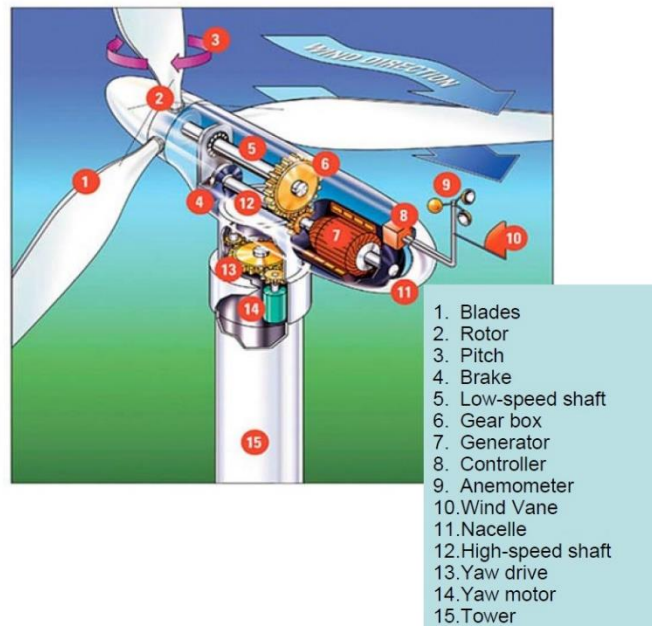
ที่มา : การกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมในระบบผลิตไฟฟ้าโดยคำนึงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของโหลด และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน, 2559 [14]

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมสามารถผลิตได้จากการทำงานของกังหันลม ซึ่งมีส่วนประกอบหลักของกังหันลมดังต่อไปนี้ [15] และแสดงในรูปที่ 3.10

1. แกนหมุนใบพัด (Rotor blade) ทำหน้าที่รับแรงลม ซึ่งแกนหมุนประกอบด้วย
  - 1.1. ดุมแกนหมุน (Rotor hub) เป็นอุปกรณ์ครอบแกนหมุนที่อยู่ส่วนหน้าสุด มีรูปร่างเป็นวงรีคล้ายไข่ เพื่อการลู่ลม
  - 1.2. ใบพัด (Blade) ยึดติดกับแกนหมุน ทำหน้าที่รับพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลม และหมุนแกนหมุนเพื่อส่งถ่ายกำลังไปยังเพลาแกนหมุนหลัก กังหันลมขนาด 3 ใบพัด เป็นกังหันลมที่ดีที่สุดในการกวาดรับแรงลมและนิยมใช้กันแพร่หลายมากที่สุด
  - 1.3. จุดปรับหมุนใบ (Pitch) อยู่ระหว่างรอยต่อของใบกับแกนหมุน ทำหน้าที่ปรับใบพัดให้มีความพร้อมและเหมาะสมกับความเร็วลม



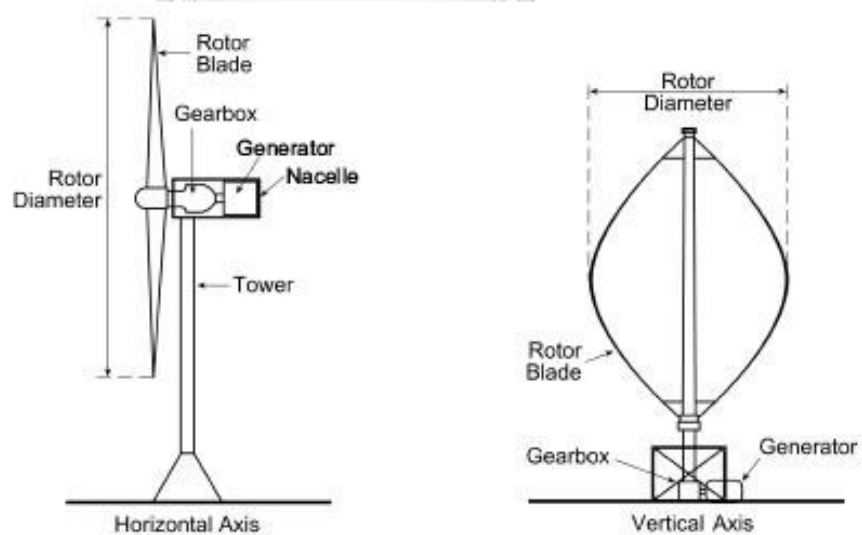
2. ห้องเครื่อง (Nacelle) มีลักษณะคล้ายกล่องใส่ของขนาดใหญ่ที่ถูกออกแบบเพื่อป้องกันสภาพอากาศภายนอกให้กับอุปกรณ์ที่อยู่ภายใน ซึ่งได้แก่
  - 2.1. เพลาแกนหมุนหลัก (Main shaft หรือ Low speed shaft) ทำหน้าที่รับแรงจากแกนหมุนใบพัด และส่งผ่านเข้าสู่ห้องปรับเปลี่ยนทรอบกำลัง
  - 2.2. ห้องทรอบกำลัง (Gear box) เป็นอุปกรณ์ควบคุมปรับเปลี่ยนทรอบการหมุนและถ่ายแรงของเพลาแกนหมุนหลักที่มีความเร็วรอบต่ำ ไปยังเพลาแกนหมุนเล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้มีความเร็วรอบสูงขึ้น และมีความเร็วสม่ำเสมอ
  - 2.3. เพลาแกนหมุนเล็ก (Shall shaft หรือ High speed shaft) ทำหน้าที่รับแรงที่มีความเร็วรอบสูงของห้องทรอบกำลังเพื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
  - 2.4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลที่ได้รับเป็นพลังงานไฟฟ้า
  - 2.5. เบรก (Brake) เป็นระบบกลไกเพื่อใช้ควบคุมและยึดการหยุดหมุนอย่างสิ้นเชิงของใบพัดและเพลาแกนหมุนของกังหันลม เมื่อต้องการให้กังหันลมหยุดหมุนและในระหว่างการซ่อมบำรุง
  - 2.6. ระบบควบคุมไฟฟ้า (Controller system) เป็นระบบควบคุมการทำงานและการจ่ายกระแสไฟฟ้ออกสู่ระบบโดยคอมพิวเตอร์
  - 2.7. ระบบระบายความร้อน (Cooling) เพื่อระบายความร้อนจากการทำงานต่อเนื่องตลอดเวลาของห้องทรอบกำลังและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อาจระบายด้วยลมหรือน้ำขึ้นกับการออกแบบ
  - 2.8. เครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม (Anemometer and Wired vane) เป็นส่วนที่ติดตั้งอยู่นอกห้องเครื่อง ซึ่งได้รับการเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เพื่อวัดความเร็วและทิศทางลม
3. เสา (Tower) เป็นอุปกรณ์รับส่วนที่เป็นชุดแกนหมุนใบพัดและอุปกรณ์ห้องเครื่องที่อยู่ด้านบน
4. ฐานราก เป็นส่วนที่รับน้ำหนักของชุดกังหันลม



รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนหมุนแนวนอน

ที่มา : สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย, 2564 [15]

การทำงานของกังหันลมในการผลิตไฟฟ้า โดยทั่วไปกังหันลมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะแกนหมุนของกังหันลม ได้แก่ กังหันลมแบบแกนหมุนแนวตั้ง และ กังหันลมแบบแกนหมุนแนวนอน ซึ่งส่วนประกอบของกังหันลมทั้งสองแบบแสดงดังรูปที่ 3.11 [27]



รูปที่ 3.11 ส่วนประกอบของกังหันลมแบบแกนหมุนแนวนอน และแกนหมุนแนวตั้ง

ที่มา : Design of a pitch angle control system for a horizontal axis small wind turbine, 2016 [27]

### 1. กังหันลมแบบแกนหมุนแนวนอน (HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE (HAWT))

เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุน และใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบกังหันลมที่เพลาใบพัด กังหันลมหลักและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ด้านบนสุดของเสา และขนานกับพื้นราบในแนวนอนหรือขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของลม การทำงานแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ การทำงานโดยหันหน้าให้ลมและหันหลังให้ลม การหมุนคอของกังหันลมขนาดเล็กจะหันหน้าเข้าหาลมโดยใช้หางเสือ กังหันขนาดใหญ่ใช้เซ็นเซอร์วัดทิศทางลมร่วมกับเซอร์โวมอเตอร์ (Servomotor) เพื่อขับเคลื่อนคอให้หันหน้าเข้าหาลม กังหันลมส่วนใหญ่มีกล่องเกียร์เพื่อช่วยเพิ่มความเร็วรอบของเพลาให้หมุนเร็วขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กังหันลมระดับเมกะวัตต์ที่มีขายในท้องตลาดเป็นแบบกังหันลมแกนหมุนแนวนอนทั้งสิ้น ตัวอย่างของกังหันลมแบบแกนหมุนแนวนอนแสดงในรูปที่ 3.12 [28]



รูปที่ 3.12 กังหันลมแบบแกนหมุนแนวนอน

ที่มา : ประเภทของกังหันลม, 2560 [28]

## 2. กังหันลมชนิดแกนหมุนแนวตั้ง (VERTICAL AXIS WIND TURBINE (VAWT))

เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ โดยมีใบพัดเป็นอุปกรณ์ตั้งฉากกับแรงลม กังหันลมชนิดนี้ เพลากลมของใบพัดจะตั้งฉากกับพื้นราบ หรือตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่ของลมมีหลายรูปแบบ ข้อดีที่สำคัญ คือ สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากสำหรับบริเวณที่มีการเปลี่ยนทิศทางลมบ่อยๆ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบเกียร์วางอยู่ใกล้พื้นดิน เพลากลมของกังหันลมสามารถจับต่อโดยตรงกับเกียร์ที่อยู่พื้นดินทำให้บำรุงรักษาได้ง่าย ทำงานเงียบ เหมาะสำหรับการติดตั้งในชุมชน ข้อเสีย คือ ติดตั้งในระดับพื้นดินซึ่งมีความเร็วลมต่ำ ทำให้ผลิตไฟฟ้าได้ลดลง ตัวอย่างของกังหันลมแบบแกนหมุนแนวตั้งแสดงในรูปที่ 3.13 [28]

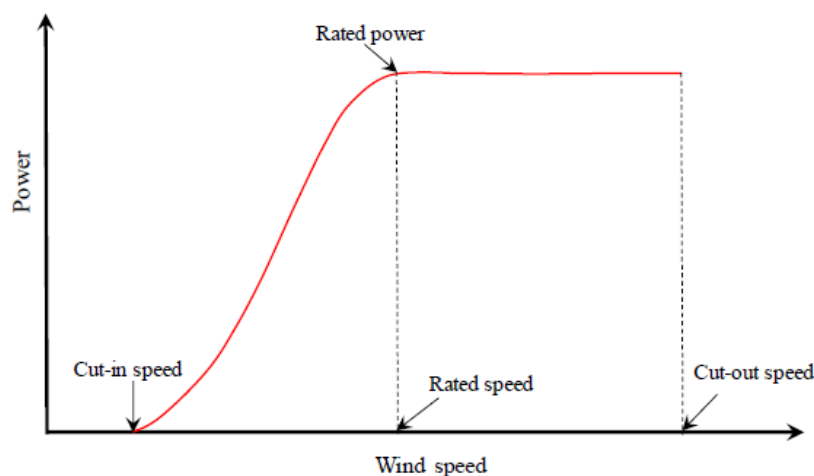


รูปที่ 3.13 กังหันลมแบบแกนหมุนแนวตั้ง

ที่มา : ประเภทของกังหันลม, 2560 [28]

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วลม ซึ่งความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่งผลให้การผลิตไฟฟ้านั้นมีความผันผวนและไม่แน่นอน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ภายในกังหันลมจะมีระดับความเร็วลมในการทำงานเป็น 4 ระดับ ดังต่อไปนี้ [14] แสดงในรูปที่ 3.14 [16]

1. ความเร็วลมเข้าระบบ (Cut-in wind speed) คือ ความเร็วลมที่ต่ำที่สุดที่กังหันลมสามารถเริ่มต้นทำงานและผลิตกำลังไฟฟ้าได้ สำหรับกังหันลมทั่วไปจะมีค่าประมาณ 3 - 4 เมตรต่อวินาที
2. ความเร็วลมเต็มพิกัด (Rated wind speed) คือ ความเร็วลมที่กังหันลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เต็มพิกัดอย่างต่อเนื่อง สำหรับกังหันลมทั่วไปจะมีค่าความเร็วประมาณ 11 - 15 เมตรต่อวินาที และเป็นระดับความเร็วลมที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. ความเร็วลมตัดออก (Cut-out wind speed) คือ ความเร็วลมสูงสุดที่อาจทำให้กังหันลมเกิดความเสียหายได้ กังหันลมต้องหยุดการทำงานที่ความเร็วลมระดับนี้ สำหรับกังหันลมทั่วไปจะมีค่าความเร็วประมาณ 25 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป
4. ความเร็วลมที่ทำให้กังหันลมทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum rotor efficiency) คือ ความเร็วลมที่อยู่ในช่วงที่มากกว่าความเร็วเข้าระบบแต่น้อยกว่าความเร็วลมเต็มพิกัด โดยกำลังผลิตที่ได้จากความเร็วลมระดับนี้จะขึ้นกับมุมพิชและอัตราส่วนความเร็วยอด



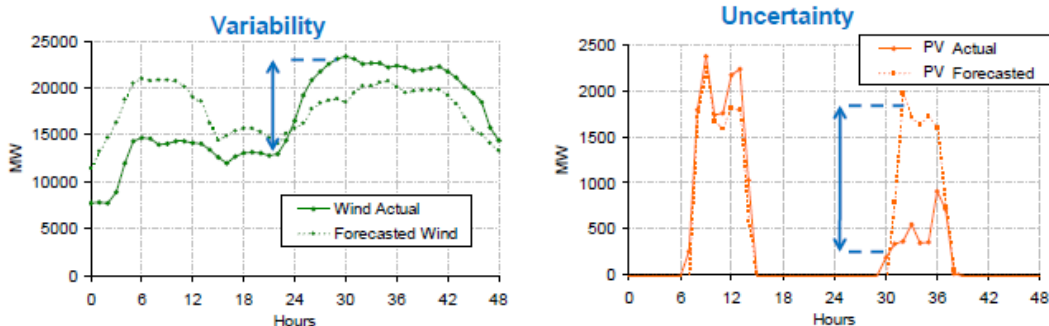
รูปที่ 3.14 ระดับความเร็วลมกับกำลังผลิตจากกังหันลม

ที่มา : Horizontal Axis Wind Turbine Blade Design Methodologies for Efficiency Enhancement, 2018

### 3.3 การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน คือ การผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานที่มีความแปรปรวนและไม่แน่นอน ได้แก่ พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถกล่าวได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานที่มีความผันผวน การผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานนี้จะสามารถสร้างความแปรปรวนและความไม่แน่นอนให้กับระบบ เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่สามารถควบคุมได้ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และไม่สามารถพยากรณ์ออกมาได้อย่างแน่นอน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในระบบเปลี่ยนแปลงการทำงาน และส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าของประเทศไทย แต่การนำแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเข้ามาใช้ในระบบไฟฟ้าของประเทศไทยมีการเพิ่มขึ้นมากยิ่งขึ้น เนื่องจากแหล่งพลังงานชนิดนี้เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่เสียด้านเชื้อเพลิง เป็นแหล่งพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศ อีกทั้งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วไม่มีวันหมดไป จึงทำให้รัฐบาลมีการสนับสนุนการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานชนิดนี้มากยิ่งขึ้นในอนาคตตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย

การเปลี่ยนแปลงของแหล่งพลังงานที่มีความผันผวนนั้นสามารถเกิดได้หลากหลายช่วงเวลาจากวินาที เป็นนาฬิกา เป็นชั่วโมง ซึ่งการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานที่มีความผันผวนให้กับระบบนั้นจะต้องมีการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานอื่นๆ เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างการผลิตไฟฟ้าและความต้องการใช้ไฟฟ้า โดยปกติแล้วความไม่แน่นอนของการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานชนิดนี้จะเกิดในหลากหลายช่วงเวลา ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนจำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานอื่นๆ ที่ต้องเตรียมพร้อมเพื่อตอบสนองต่อระบบเพื่อรักษาสมดุลการทำงานของระบบ ตัวอย่างการผลิตไฟฟ้าที่ไม่แน่นอนของโรงไฟฟ้าพลังงานลมและโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 3.15 [36]



รูปที่ 3.15 การผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานลม และโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ที่มา : Impacts of Variability and Uncertainty in Solar Photovoltaic Generation at Multiple Timescales 2013, 2013 [36]

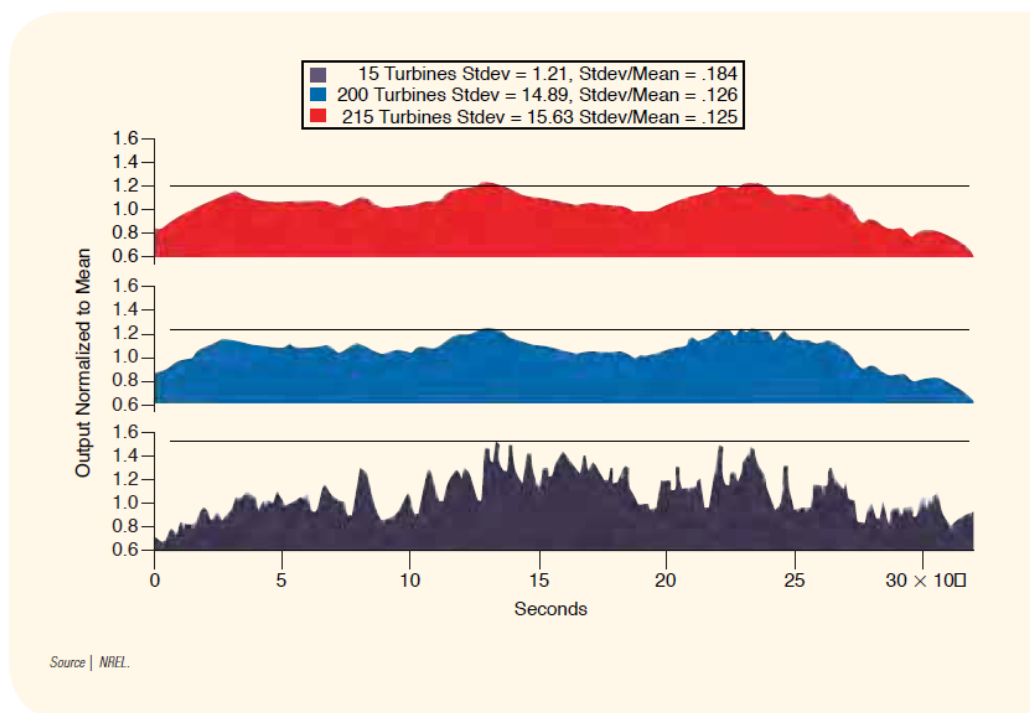
ผลกระทบของการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน คือ ความท้าทายของผู้ควบคุมระบบไฟฟ้าที่จำเป็นต้องรักษาและปรับสมดุลการผลิตไฟฟ้าและความต้องการใช้ไฟฟ้า โดยต้องคำนึงถึงต้นทุนในระบบไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด โดยผู้ควบคุมระบบจำเป็นต้องมีการปรับเพิ่มหรือลดกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบร่วมกับการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนให้เหมาะสมกับปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้า

จากข้อจำกัดที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถบ่งบอกได้ว่า การใช้งานแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพื่อผลิตไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้านั้นเป็นการสร้างความท้าทายหลายประการ คือ แหล่งพลังงานที่นำมาผลิตไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและไม่สามารถควบคุมได้ ส่งผลให้เกิดการพยากรณ์กำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเกิดความผิดพลาด ซึ่งปัจจุบันแม้ว่าจะมีการพัฒนาการพยากรณ์แหล่งพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถจัดการความแปรปรวนได้ แต่ยังมีข้อจำกัดที่ส่งผลให้เกิดการผิดพลาด เนื่องจากทรัพยากรในการผลิตไฟฟ้านั้นมีความเฉพาะเจาะจงสำหรับพื้นที่นั้นๆ เช่น พลังงานลมจะขึ้นอยู่กับความเร็วลมแตกต่างกันตามภูมิภาค และรูปแบบสภาพอากาศ ที่ตั้งของโรงไฟฟ้า ลักษณะของกังหันลม ในส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับ พื้นที่ที่ตั้งโรงไฟฟ้า ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม ปริมาณฝุ่นหรือมลพิษทางอากาศ รูปแบบสภาพอากาศ และอุณหภูมิ [37]

### 3.3.1 ความแปรปรวนของพลังงานลม

การผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมจะแตกต่างกันไปตามความเร็วลมที่มีความผันผวนที่มีลักษณะเฉพาะในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งส่งผลให้มีความจำเป็นที่จะต้องวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้า ข้อดีของพลังงานลม คือ ลมมีศักยภาพในการกระจายตัวตามพื้นที่สูง กล่าวคือ โรงไฟฟ้า

พลังงานลมจะสามารถจัดตั้งได้อย่างกว้างขวางตามพื้นที่ที่เหมาะสมทางภูมิศาสตร์ ดังนั้นรูปแบบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานลมสามารถประมาณจากแต่ละโรงไฟฟ้าที่แยกเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งเป็นการประมาณในรูปแบบนี้จะช่วยลดความแปรปรวนโดยรวมของโรงไฟฟ้าพลังงานลม ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ผลกระทบของการรวมตัวของพลังงานลมต่อความแปรปรวน

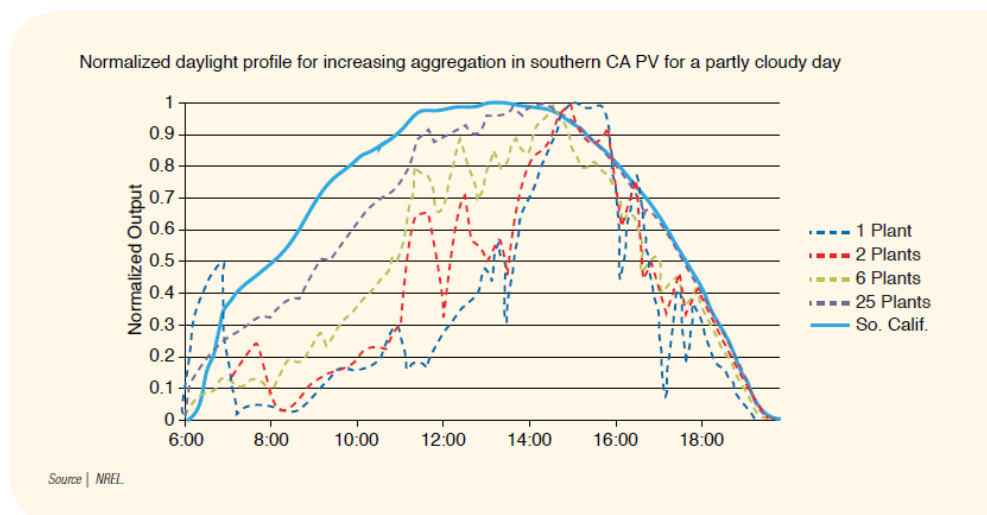
ที่มา : BRINGING VARIABLE RENEWABLE ENERGY UP TO SCALE, Options for Grid Integration Using Natural Gas and Energy Storage, 2015 [37]

### 3.3.2 ความแปรปรวนของพลังงานแสงอาทิตย์

การผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductors) ในการแปลงแสงแดดเป็นไฟฟ้าโดยตรง ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงสามารถเปลี่ยนแปลงได้เกือบทันทีทันใด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของรังสีแสงอาทิตย์ ดังนั้นโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แต่ละแห่งสามารถมีความแปรปรวนในการผลิตไฟฟ้าโดยขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ เช่น ในวันที่มีเมฆมาก โดยทั่วไปพื้นที่ของโรงไฟฟ้ามีขนาดใหญ่มากขึ้น และการกระจายตัวทางภูมิศาสตร์ของแต่ละโรงไฟฟ้ามีขนาดใหญ่มากยิ่งขึ้น ความแปรปรวนรวมกันทุกๆ โรงไฟฟ้าที่รวมกันจะยิ่งลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีอย่างหนึ่งของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์กัน และ



ความแปรปรวนของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะลดลงนั้นขึ้นอยู่กับประเภทของเทคโนโลยี และรูปแบบสภาพอากาศที่มีอยู่



รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบความแปรปรวนในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์กัน

ที่มา : BRINGING VARIABLE RENEWABLE ENERGY UP TO SCALE, Options for Grid Integration Using Natural Gas and Energy Storage, 2015 [37]

การผสมผสานเทคโนโลยีของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนภายในพื้นที่ที่สมดุล มีข้อดีคือ ลดความแปรปรวนของการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานลมและแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ และการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาเสริมการผลิตไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการใช้ไฟฟ้าจะช่วยให้ผลิตไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น

การทำนายหรือการพยากรณ์ได้ของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนสามารถวัดได้จากข้อผิดพลาดในการคาดการณ์ที่แตกต่างกัน คือ ค่าความผิดพลาดแบบสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error; MAE) และค่าความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Squared Error; RMSE) เป็นค่าที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการพยากรณ์ [36]

### 3.3.3 การทำนายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

ในปัจจุบันการทำนายการผลิตไฟฟ้าจากแต่ละโรงไฟฟ้าพลังงานลมนั้นสามารถใช้วิธีค่าความผิดพลาดแบบสัมบูรณ์เฉลี่ย ซึ่งมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 5 ของความจุลมที่กำหนด (Rated wind generation capacity) ซึ่งเป็นการยากที่จะทำการคาดการณ์ล่วงหน้าว่าจะมีการผลิตไฟฟ้าในรูปแบบใด โดยปกติแล้วค่าความผิดพลาดแบบสัมบูรณ์เฉลี่ยจะอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 20 ของกำลังไฟฟ้าที่กำหนด (Rated power) และความซับซ้อนของภูมิประเทศจะมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของ

รูปแบบการทำนาย โรงไฟฟ้าพลังงานลมที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีความซับซ้อนสามารถพยากรณ์ผลิตผลได้สูงสุด คือ ร้อยละ 35 (ข้อมูลจากมาตรฐาน International Electrotechnical Commission; IEC) ข้อผิดพลาดในการทำนายผลผลิตจากพลังงานลมจะลดลงตามจำนวนกังหันลมที่เพิ่มมากขึ้น และการกระจายตัวทางภูมิศาสตร์ที่ใหญ่มากขึ้น ตัวอย่างเช่น ในรัฐมินนิโซตา สหรัฐอเมริกา การจัดทำค่าความผิดพลาดแบบสัมบูรณ์เฉลี่ยล่วงหน้าลดลงจากร้อยละ 20 เป็น 12 จากการผลิตไฟฟ้าของ 4 โรงไฟฟ้าเท่านั้น สำหรับพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ที่ใหญ่กว่า เช่น ประเทศเยอรมนี การจัดทำค่าความผิดพลาดแบบสัมบูรณ์เฉลี่ยล่วงหน้า สามารถต่ำกว่าร้อยละ 5 ดังนั้นในประเทศส่วนใหญ่ที่มีการใช้งานพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนสูง การคาดการณ์พลังงานลมจะมีการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญอันเป็นผลมาจากความพยายามในการวิจัยและพัฒนาในช่วงเวลาที่ผ่านมา

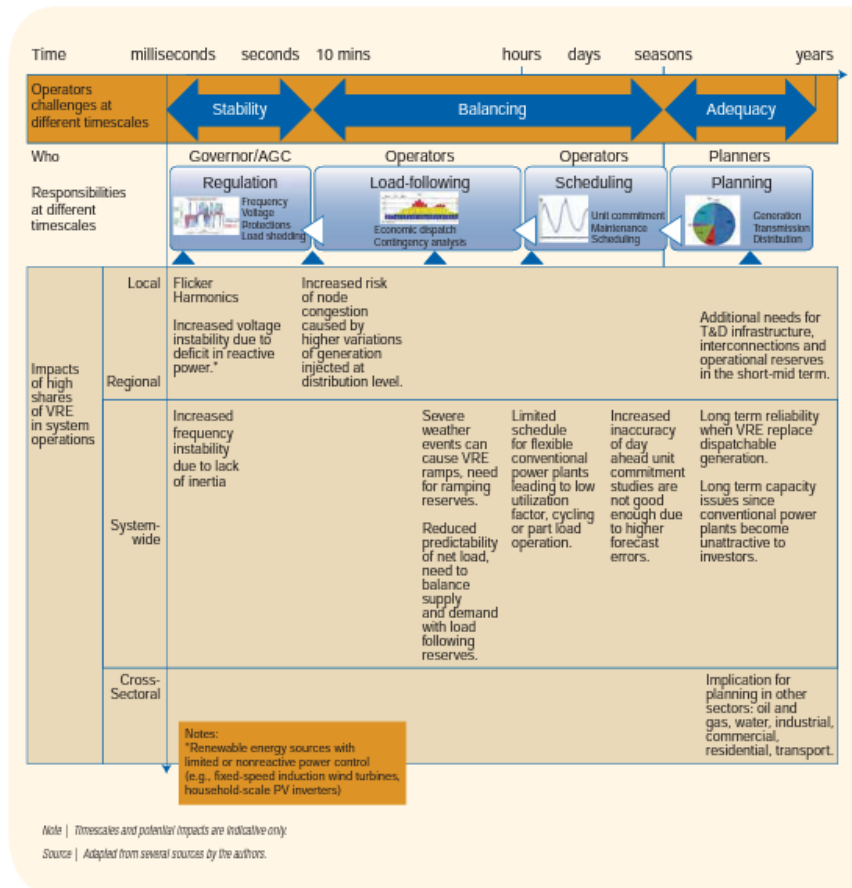
### 3.3.4 การทำนายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ความแปรปรวนของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับเวลาการขึ้นและการตกของดวงอาทิตย์ที่สามารถคาดการณ์ได้ ในการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์จะส่งผลกระทบต่อการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้เช่นกัน การวางแผนจะต้องได้รับการติดตั้งให้เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงของดวงอาทิตย์ในแต่ละวัน และแต่ละฤดูกาล ซึ่งการวางแผนนั้นจะเป็นตัวกำหนดผลผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และกำหนดช่วงเวลาที่ผลิตได้มากที่สุดในแต่ละวัน อย่างไรก็ตามผลกระทบของเมฆหรือพายุนั้นมีการคาดการณ์ได้ยาก และการพยากรณ์การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ยังไม่ได้มีการพัฒนาเทียบเท่ากับการพยากรณ์การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม แต่การเติบโตของพลังงานแสงอาทิตย์นั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกำลังเป็นแรงผลักดันให้มีการพัฒนาและวิจัยเพื่อปรับปรุงการพยากรณ์การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากยิ่งขึ้น

### 3.3.5 ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนต่อการจัดการระบบไฟฟ้าและการวางแผน

การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนจะส่งผลกระทบต่อการบริหารจัดการระบบไฟฟ้าและการวางแผนการผลิตไฟฟ้า เนื่องจากลักษณะของแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน และลักษณะของระบบไฟฟ้าที่ต้องการนำพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเข้ามาใช้ แหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนนั้นยากต่อการคาดการณ์กำลังผลิตไฟฟ้า และมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่งผลให้เพิ่มความไม่แน่นอน ความแปรปรวนให้กับระบบไฟฟ้า และส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบไฟฟ้าในที่สุด ซึ่งความท้าทายและต้นทุนในการนำพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเข้ามา

ใช้งานจะขึ้นอยู่กับโรงไฟฟ้าที่มีอยู่เดิม และการผลิตกำลังไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถสรุปผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนได้ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



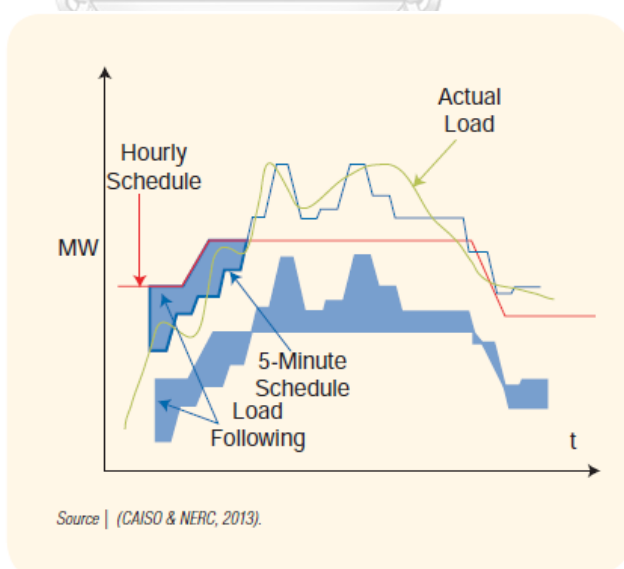
รูปที่ 3.18 สรุปผลกระทบของการนำพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเข้ามาใช้ต่อระบบไฟฟ้า

ที่มา : BRINGING VARIABLE RENEWABLE ENERGY UP TO SCALE, Options for Grid Integration Using Natural Gas and Energy Storage, 2015 [37]

1. การวางแผน (Planning) ความเหมาะสมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งไฟฟ้า บางครั้งการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนจะผลิตได้มากที่สุดในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่ต่ำ ส่งผลให้การผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ ณ เวลานั้นอาจจะมีมากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ทำให้เกิดการย้อนกลับของกำลังไฟฟ้าได้ เช่น ในช่วงเวลากลางวัน พลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูง และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนอาจไม่พร้อมใช้งานในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง เช่น ช่วงเวลากลางคืน พลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ ดังนั้นการเตรียมการ

ผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบจะต้องมีความแน่นอน และมั่นใจได้ว่ามีความจุเพียงพอที่จะสามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สูงที่สุด และต้องคำนึงถึงการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ถือว่าเป็นความท้าทายที่สำคัญสำหรับการวางแผนให้กับระบบไฟฟ้า

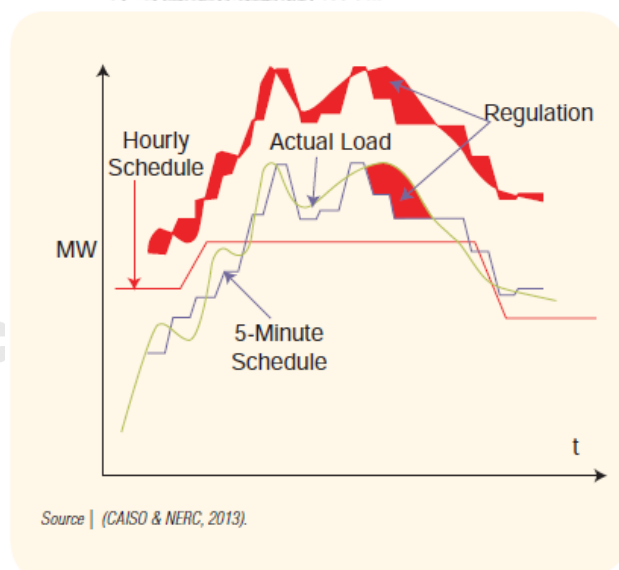
2. การวางแผนการเดินเครื่องและการตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า (Scheduling and Load Following) ความแปรปรวนของการผลิตไฟฟ้าและการคาดการณ์การผลิตไฟฟ้าที่จำกัด ส่งผลให้เกิดความท้าทายในการสร้างความสมดุลระหว่างการผลิตไฟฟ้าและความต้องการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาแต่ละนาที่ แต่ละชั่วโมง ซึ่งลักษณะของการผลิตกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบนั้นจะมีผลต่อการจัดเวลาในการเดินเครื่องของแต่ละโรงไฟฟ้า โดยจะทำการแจ้งล่วงหน้าเป็นชั่วโมง หรือวัน ให้แต่ละโรงไฟฟ้าที่จะต้องผลิตไฟฟ้าในแต่ละวันเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม เพื่อต้องการรักษาสมดุลระหว่างการผลิตไฟฟ้าและการใช้ไฟฟ้า ระบบจำเป็นต้องสามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ซึ่งการตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าอาจจะมีการนำระบบกักเก็บพลังงานเข้ามาใช้งานเพื่อเป็นทางเลือกในการจัดสรรพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างเหมาะสม ตัวอย่างการรักษาสมดุลระหว่างความต้องการใช้ไฟฟ้าและการผลิตไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การรักษาสมดุลระหว่างความต้องการใช้ไฟฟ้าและการผลิตไฟฟ้า

ที่มา : BRINGING VARIABLE RENEWABLE ENERGY UP TO SCALE, Options for Grid Integration Using Natural Gas and Energy Storage, 2015 [37]

3. การควบคุม (Regulation) ความแปรปรวนของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน และความสามารถในการคาดการณ์ที่ค่อนข้างจำกัด จะส่งผลต่อการรักษาเสถียรภาพในการรักษาสมดุลระหว่างการผลิตกำลังไฟฟ้าแบบทันทีทันใดของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนและความต้องการใช้ไฟฟ้า ให้มีความพอดีและเหมาะสมกัน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเบี่ยงเบนของความถี่ในระบบไฟฟ้า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสมดุลในช่วงเวลาวินาทีถึงนาที จะส่งผลต่อความถี่ แรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะได้รับการจัดการจากระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic control system) ในโรงไฟฟ้าแต่ละโรง เพื่อทำการปรับการผลิตไฟฟ้าให้เหมาะสมต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า เพื่อรักษาเสถียรภาพของความถี่ให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด และเมื่อระบบไฟฟ้ามีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนมากยิ่งขึ้น ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบสำรอง (Automatic regulation reserve) จะต้องตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วและบ่อยมากขึ้น เพื่อทำการชดเชยความถี่ที่เบี่ยงเบนจากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ตัวอย่างของการควบคุมระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การควบคุมระบบไฟฟ้า

ที่มา : BRINGING VARIABLE RENEWABLE ENERGY UP TO SCALE, Options for Grid Integration Using Natural Gas and Energy Storage, 2015 [37]

## บทที่ 4

### ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

ในบทนี้จะกล่าวถึงความหมาย และความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบกักเก็บพลังงานต่างๆ และได้กล่าวถึงการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในประเทศไทย นิยามของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ แบบจำลองของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ คุณสมบัติของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ จากนั้นจะกล่าวถึงระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้ในระดับโครงข่ายไฟฟ้า (Grid scale)

#### 4.1 ระบบกักเก็บพลังงาน

ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System; ESS) คือ ระบบ อุปกรณ์ วิธีการ หรือ เทคโนโลยีที่นำมาใช้กักเก็บพลังงานไฟฟ้า ซึ่งสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปแบบอื่น เพื่อนำมาใช้เมื่อมีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีแนวคิดจากการที่ปัจจุบันเริ่มมีการนำพลังงานหมุนเวียนเข้ามาปรับใช้ในระบบไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น การนำมาใช้งานนั้นก่อให้เกิดความผันผวนของระบบไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้าและไม่สามารถควบคุมระบบได้ เนื่องจากพลังงานหมุนเวียนบางชนิดนั้นมีความไม่แน่นอนในการผลิตไฟฟ้าในแต่ละวัน เช่น พลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ประกอบไปด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ในช่วงกลางวัน และพลังงานลมที่มีความเร็วลมในแต่ละวันเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นจะส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีปัญหา ซึ่งการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนจะผลิตไฟฟ้าได้อย่างไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้องการใช้ไฟฟ้า จากข้อจำกัดของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนจึงทำให้มีการนำระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าเข้ามาปรับใช้ในระบบมากยิ่งขึ้น

หลักการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่นำมาใช้ในระบบ คือ การกักเก็บพลังงานในช่วงเวลาใดช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อนำไปตอบสนองความต้องการพลังงานไฟฟ้าในอีกช่วงเวลาหนึ่ง เมื่อมีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มากเกินไปกว่าระบบสามารถตอบสนองได้ ซึ่งรูปแบบในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบพลังงานอื่นๆ เช่น โรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับ คือ การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานศักย์เพื่อทำการสูบน้ำขึ้นไปยังอ่างเก็บน้ำด้านบน และเมื่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไม่เพียงพอ เช่น ช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สูง (Peak load) โรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับจะทำการปล่อยน้ำลงเพื่อผลิตไฟฟ้า

ในรูปแบบโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ซึ่งระบบกักเก็บพลังงานสามารถช่วยยกระดับการบริหารจัดการพลังงานในระบบระหว่างการผลิตไฟฟ้า และความต้องการใช้ไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมและความพอดี [17]

เทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานกำลังมีบทบาทเพิ่มขึ้นในโครงข่ายไฟฟ้าแบบใหม่ ตามความต้องการปรับตัวรองรับการเปลี่ยนแปลงแบบพลิกผัน (Disruptive forces) ต่างๆ เช่น การเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดของพลังงานทดแทน การเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของระบบไฟฟ้าจากส่วนกลาง (Centralized generation) ไปสู่การกระจายตัวของแหล่งผลิตไฟฟ้า (Distributed generation) โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะส่งผลให้การบริหารโครงข่ายไฟฟ้ามีความซับซ้อนยิ่งขึ้น ซึ่งเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานซึ่งมีความสามารถในการโยกย้ายพลังงานไฟฟ้าจากเวลาหนึ่งไปอีกเวลาหนึ่ง จะสามารถทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์รักษาสมดุลในระบบไฟฟ้าและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการระบบไฟฟ้า ตั้งแต่การผลิตไฟฟ้า การควบคุมระบบและโครงข่ายไฟฟ้า การจำหน่ายไฟฟ้า และการใช้ไฟฟ้า

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการนำระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าเข้ามาปรับใช้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนในระบบไฟฟ้าของประเทศไทย และการสนับสนุนการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนในระบบ โดยเฉพาะพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ซึ่งการนำมาใช้ของระบบกักพลังงานไฟฟ้าช่วยเพิ่มความมั่นคงในการผลิตไฟฟ้าแบบภาพรวม และเป็นการนำมาใช้ของเทคโนโลยีใหม่ๆ ซึ่งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้มีการนำระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้ามาใช้ดังต่อไปนี้ [18]

1. ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System ; BESS) เป็นระบบกักเก็บพลังงานที่ใช้แบตเตอรี่เป็นส่วนหนึ่งของระบบ ในช่วงที่ระบบไฟฟ้ามีความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ จะทำการกักเก็บพลังงานที่ผลิตได้มากเกินไปในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทยด้วยการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่ เมื่อระบบไฟฟ้ามีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะทำการปล่อยพลังงานไฟฟ้าออกสู่ระบบ ซึ่งเป็นการช่วยลดความไม่สม่ำเสมอของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน และเป็นการปรับสมดุลความต้องการใช้ไฟฟ้าวร่วมกับการผลิตไฟฟ้าในระบบ ตัวอย่างโครงการในประเทศไทยที่ได้มีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มาใช้ คือ ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ของโครงการสมาร์ตกริด จังหวัดแม่ฮ่องสอน จำนวน 1 เมกะวัตต์ชั่วโมง โดยเป็นการติดตั้งควบคู่ไปกับเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังผลิต 3 เมกะวัตต์ ซึ่งสามารถจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบในปี 2566, สถานีไฟฟ้าแรงสูงบำเหน็จณรงค์ จังหวัดชัยภูมิ จำนวน 16 เมกะวัตต์ชั่วโมง ซึ่งสามารถจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบในปี 2565, สถานีไฟฟ้าแรงสูงชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี จำนวน 21 เมกะวัตต์ชั่วโมง ซึ่งสามารถจ่าย

ไฟฟ้าเข้าระบบในปี 2565 รูปภาพการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มาใช้ที่โครงการสมาร์ท-กริด จังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงการสมาร์ทกริดจังหวัดแม่ฮ่องสอน

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2563 [18]

2. โรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับ (Pumped storage hydro plant) โรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับ คือ การมีเครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่ติดตั้งภายในโรงไฟฟ้า โดยมีหลักการทำงาน คือ เมื่อมีความต้องการไฟฟ้าที่น้อยในระบบจะมีการนำพลังงานไฟฟ้าบางส่วนมาใช้ในการสูบน้ำจากอ่างเก็บน้ำด้านล่าง นำขึ้นไปสู่อ่างเก็บน้ำด้านบนเพื่อพักน้ำไว้ และเมื่อระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงมากยิ่งขึ้นจะมีการปล่อยน้ำลงมาเพื่อนำมาผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเปลี่ยนพลังงานศักย์เป็นพลังงานไฟฟ้า การทำงานในรูปแบบนี้ถือเป็นการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบหนึ่ง ไม่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม การนำมาใช้ส่วนมากในประเทศไทย คือ เขื่อน หรืออาจจะมีการสร้างอ่างเก็บน้ำด้านบนขนาดใหญ่เพื่อทำการกักเก็บน้ำไว้ได้อีกด้วย ตัวอย่างโครงการในประเทศไทยที่ได้มีการสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับ คือ โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนศรีนครินทร์ เครื่องที่ 4 และ 5 จังหวัดกาญจนบุรี กำลังผลิตรวม 360 เมกะวัตต์, โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนภูมิพล เครื่องที่ 8 จังหวัดตาก กำลังผลิต 171 เมกะวัตต์, โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา เครื่องที่ 1 - 4 จังหวัดนครราชสีมา กำลังผลิตรวม 1,000 เมกะวัตต์ รูปภาพโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับโครงการโรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนศรีนครินทร์ จังหวัดกาญจนบุรี ดังแสดงในรูปที่ 4.2





รูปที่ 4.2 โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนศรีนครินทร์

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2563 [18]

3. ระบบกักเก็บพลังงานด้วยเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับพลังงานลม (Wind hydrogen hybrid system) เป็นการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบของไฮโดรเจน โดยเมื่อมีการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่ผลิตได้มากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบ หรือผลิตในช่วงที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบน้อย พลังงานส่วนที่เหลือจะถูกนำไปแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) ซึ่งจะทำการแยกน้ำออกเป็นก๊าซออกซิเจน และก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนจะถูกนำไปกักเก็บในถังบรรจุ และนำไปผลิตไฟฟ้าผ่านเซลล์เชื้อเพลิง (Hydrogen fuel cell) เพื่อใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูง และเนื่องจากพลังงานลมมีความสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากในช่วงเวลากลางคืน ทำให้ทำการกักเก็บพลังงานไว้ใช้ในตอนกลางวัน ตัวอย่างโครงการในประเทศไทยที่ได้มีการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานด้วยเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับพลังงานลม คือ ศูนย์การเรียนรู้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ลำตะคอง จังหวัดนครราชสีมา เพื่อจ่ายไฟให้กับศูนย์การเรียนรู้ กฟผ. ลำตะคอง ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ศูนย์การเรียนรู้ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ลำตะคอง

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2563 [18]

การนำระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในระบบไฟฟ้าของประเทศไทย เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ ทำให้ระบบสามารถทำการผลิตไฟฟ้าได้อย่างสม่ำเสมอ มีความแน่นอน และราคาที่คุ้มค่ามากที่สุด การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในปัจจุบันที่มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นในประเทศไทยนั้น ส่งผลให้การใช้งานระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้ามีความคุ้มค่า สามารถเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบได้ ซึ่งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้มีการพยายามนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เกี่ยวกับการกักเก็บพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในระบบไฟฟ้าของประเทศไทยอีกด้วย

ปัจจุบันต้นทุนของเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานโดยเฉพาะเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่กำลังลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการวิจัยและพัฒนาอย่างเข้มข้นในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า และการขยายการผลิตขนาดใหญ่ที่ทำให้เกิดการลดลงของราคาในการลงทุน ซึ่งในระยะสั้นเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่น่าจะเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพตลาดสูงที่สุด เพราะนอกจากมีต้นทุนที่ลดลงอย่างรวดเร็วแล้ว ยังมีคุณสมบัติที่สามารถตอบโจทย์การใช้งานในโครงข่ายไฟฟ้าได้หลากหลายอีกด้วย

## 4.2 ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

นิยามเกี่ยวกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System; BESS) คือ การนำมาใช้ของเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานไฟฟ้า เมื่อมีการผลิตไฟฟ้าได้มากเกินไปเกินกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า และสามารถนำไปใช้เมื่อระบบขาดแคลนไฟฟ้า ซึ่งช่วยให้ผู้ควบคุมระบบไฟฟ้า และระบบสาธารณูปโภคสามารถกักเก็บพลังงานไว้ใช้ภายหลังได้ ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดเคมีที่มีการรวบรวมพลังงานจากระบบหรือโรงไฟฟ้า และปล่อยพลังงานไฟฟ้าเมื่อมีความจำเป็นต้องการใช้ การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ช่วยปรับปรุงระบบไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยมีการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อลดปัญหาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้อย่างสม่ำเสมอและส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า ให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าภายในระบบไฟฟ้าได้และสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มั่นคงยิ่งขึ้น อีกทั้งรองรับการเพิ่มขึ้นของโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในอนาคต [19] ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เป็นการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบของปฏิกิริยาเคมี ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการใช้งานได้ 2 ชนิด ดังต่อไปนี้ [20]

1. แบตเตอรี่ปฐมภูมิ เป็นแบตเตอรี่ที่เมื่อผ่านการใช้แล้วไม่สามารถนำกลับมาอัดประจุเพื่อกลับมาใช้ใหม่ได้ หรือเรียกว่า “ถ่าน” มีอยู่หลายชนิด เช่น ถ่านอัลคาไลน์ ถ่านลิเทียม เป็นต้น แบตเตอรี่แบบนี้มีหลายขนาด ใช้ในวิทยุ นาฬิกา เก็บพลังงานได้สูง อายุการใช้งานสูง แต่เมื่อถูกใช้หมดจะกลายเป็นขยะมลพิษ
2. แบตเตอรี่ทุติยภูมิ เป็นแบตเตอรี่ที่เมื่อผ่านการใช้แล้วสามารถนำกลับมาอัดประจุเพื่อกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น แบตเตอรี่รถยนต์ แบตเตอรี่มือถือ และถ่านรุ่นใหม่ๆ เป็นต้น

จากเอกสาร [21] โดยทั่วไปแล้วเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จัดเป็นเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานเคมี และมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

- 2.1. ขั้วบวก (Cathode) เป็นส่วนที่ให้อิเล็กตรอนระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาเคมี
- 2.2. ขั้วลบ (Anode) เป็นส่วนที่รับอิเล็กตรอนจากขั้วบวก
- 2.3. อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นสารละลายที่ทำหน้าที่ส่งผ่านไอออนบวกระหว่างแคโทดและแอโนด ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี

เทคโนโลยีแบตเตอรี่ในปัจจุบันมีอยู่หลากหลาย โดยมีความแตกต่างหลักอยู่ที่อัตราส่วนและองค์ประกอบของสารเคมีที่ใช้ผลิตแคโทด แอโนด และอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งองค์ประกอบของสารเคมีที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้แบตเตอรี่ชนิดต่างๆ มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น อัตราการกักเก็บหรือการ

ปลดปล่อยประจุของพลังงานที่สะสมไว้ (Power rating) พลังงานและกำลังไฟฟ้าต่อปริมาตร (Power and energy density) พลังงานและกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนัก (Specific power and energy) จำนวนรอบที่สามารถกักเก็บและปล่อยพลังงานได้ (Discharge cycle)

แบตเตอรี่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิซึ่งสามารถอัดประจุและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Rechargeable battery) เช่น แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-acid battery), แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion), แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ (Lithium-ion polymer), แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Nickel-Metal Hydride; NiMH) โดยแต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่ปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมีการปรับมาใช้ในงานในหลากหลายรูปแบบสามารถแบ่งประเภทของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ตามประเภทชนิดของแบตเตอรี่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

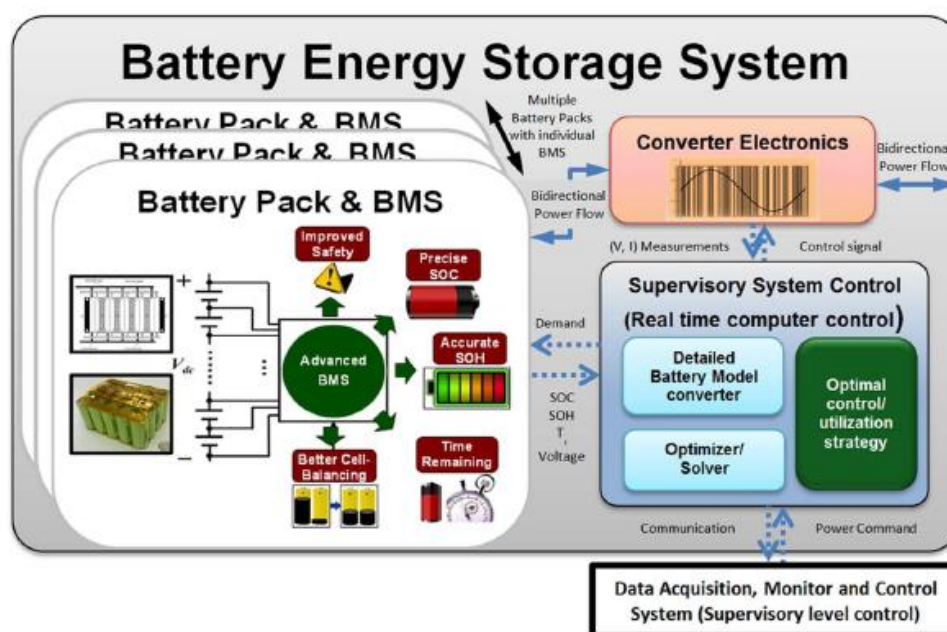
ตารางที่ 4.1 ประเภทของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ตามชนิดของแบตเตอรี่

ชื่อทั่วไปของแบตเตอรี่	การใช้งาน
ตะกั่วกรด (Lead-acid)	สตาร์ทเครื่องยนต์ในรถยนต์ รถไฟ ยานยนต์อื่นๆ เครื่องสำรองไฟฟ้า
เหล็กนิกเกิล (Nickel-Iron)	เครื่องสำรองไฟฟ้าขนาดกลางและใหญ่ เครื่องชุดเจาะ
นิกเกิลแคดเมียม (Nickel-Cadmium/NiCad)	อุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดพกพา หรือขนาดเล็ก ไฟฉุกเฉิน เครื่องบิน (สำหรับสตาร์ท) แฟลช รถไฟฟ้า รถไฮบริด
นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Nickel-Metal Hydride)	อุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดพกพาสมัยเก่า รถไฟฟ้า รถไฮบริด แหล่งสำรองไฟฟ้าสำหรับพลังงานหมุนเวียน
ลิเทียมไอออน (Lithium-ion)	อุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดพกพาสมัยเก่า รถไฟฟ้า รถไฮบริด แหล่งสำรองไฟฟ้าสำหรับพลังงานหมุนเวียน
ลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ (Lithium-ion polymer)	อุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดพกพา ของเล่น เครื่องบินบังคับ

ที่มา : โครงการศึกษาความเหมาะสมและแนะแนวทางในการส่งเสริมอุตสาหกรรมสำรองไฟฟ้าสำหรับ โครงข่ายไฟฟ้าของประเทศ (Grid Energy Storage), 2562 [21]

### 4.3 แบบจำลองของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

แบบจำลองของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ประกอบด้วยองค์ประกอบใหญ่ดังต่อไปนี้ แบตเตอรี่แพ็ค คอนเวอร์เตอร์ (Converter) และระบบควบคุม (Control system or Supervisor control system) [32] ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แบบจำลองระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

ที่มา : Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications, 2014 [32]

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องโดยตรงและสำคัญเมื่อมีการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ คือ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) และคอนเวอร์เตอร์ (Converter) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากระดับหนึ่งไปยังระดับหนึ่ง ซึ่งทั้ง 2 อุปกรณ์จะทำงานแตกต่างกันออกไป อินเวอร์เตอร์ คือ การแปลงไฟฟ้าจากกระแสตรงไปเป็นกระแสสลับ (DC - AC) และคอนเวอร์เตอร์ คือ การแปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับไปเป็นกระแสตรง (AC - DC) ซึ่งการปรับปรุงให้เทคโนโลยีดังกล่าวทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น คือ การนำอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor switching devices) เช่น ไดโอด (Diode) และทรานซิสเตอร์ (Transistors) ถือว่าเป็นอุปกรณ์แบบ Active devices ที่ทำหน้าที่สวิตช์ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้า นำมาใช้ควบคู่กับอุปกรณ์แบบ Passive devices ดังเดิมเช่น ตัวต้านทาน (Resistors),

ตัวเก็บประจุ (Capacitors) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductors) ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยี อินเวอร์เตอร์ และคอนเวอร์เตอร์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและเป็นตลาดขนาดใหญ่ที่สำคัญ มีการนำมาใช้ทั่วไปในหลายๆ รูปแบบการทำงานไม่ใช่แค่เพียงกักเก็บพลังงาน เช่น การนำมาใช้เพื่อควบคุม การผลิตพลังงานทดแทนเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า การนำมาใช้เพื่อควบคุมและขับเคลื่อนมอเตอร์ของ รถยนต์ไฟฟ้า เครื่องจักรโรงงาน เครื่องและลิฟต์ และการนำมาใช้แปลงไฟฟ้าให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ

ในการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ระดับโครงข่ายไฟฟ้า จะประกอบไปด้วย ระบบกระแสไฟฟ้าตรง (DC system), ระบบแปลงกำลัง (Power Conversion System; PCS) ระบบ จัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System; BMS), ระบบควบคุม (Control system or Supervisor control system) และการเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า ภาพรวมของระบบกักเก็บ พลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีการเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.5

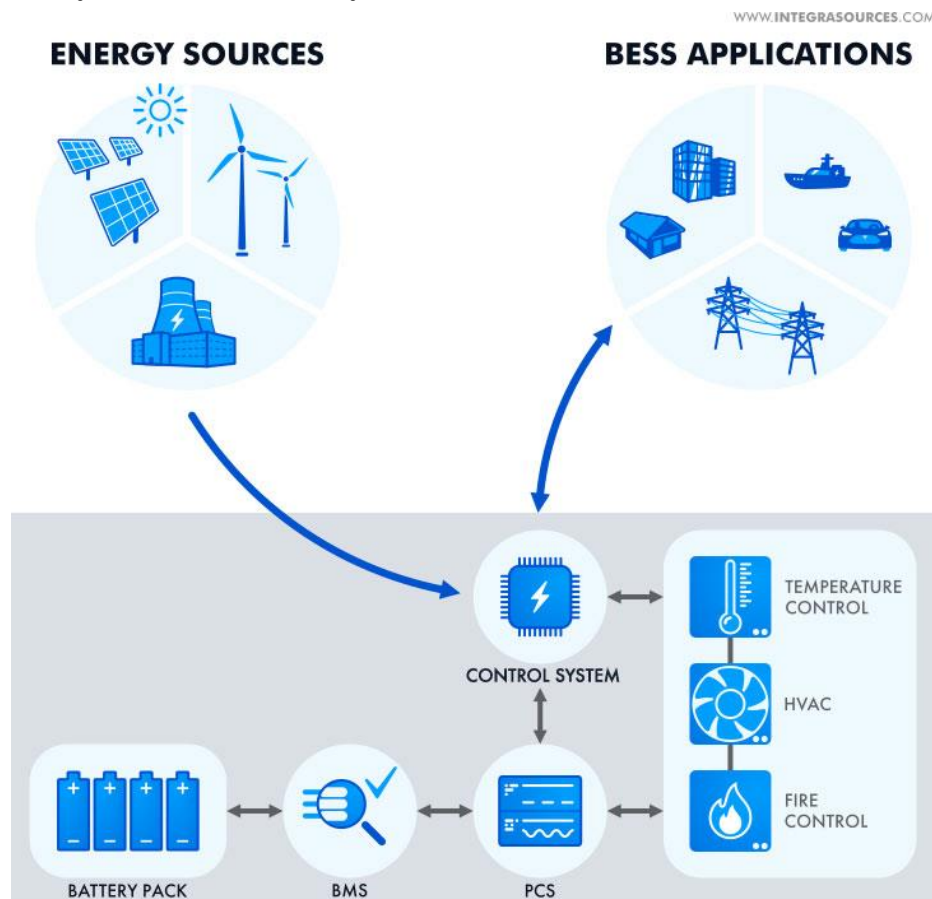


รูปที่ 4.5 ภาพรวมของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

ที่มา : Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications, 2014 [32]

ภายในระบบกระแสไฟฟ้าตรง (DC system) จะประกอบไปด้วยเซลล์แบตเตอรี่ในแต่ละ โมดูล (Module) ซึ่งทำการประกอบเป็นความจุไฟฟ้าที่เพียงพอเพื่อรองรับข้อกำหนดการทำงาน และ การใช้งานร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยแต่ละเซลล์แบตเตอรี่จะทำการเชื่อมต่อกันในอนุกรมไฟฟ้า และการกำหนดค่าแบบขนานเพื่อจ่ายไฟให้กับบัสไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งต้องทำการเชื่อมต่อผ่านระบบแปลง กำลัง (PCS) การทำงานของระบบแปลงกำลัง คล้ายกับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลง กำลังไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ และคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้าจาก กระแสสลับเป็นกระแสตรง ทำการจัดเรียงกันเป็นสี่แฉก ระบบแปลงกำลังทำการเชื่อมต่อผ่านระบบ ไฟฟ้ากระแสตรงกับโครงข่ายไฟฟ้าซึ่งเป็นกระแสสลับ และผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า (XFMR) โดยทำการ รับส่งพลังงานไฟฟ้าร่วมกันแบบสองทิศทาง คือ การอัดประจุ และการคายประจุ ซึ่งในระบบกักเก็บ พลังงานไฟฟ้าอาจจะประกอบด้วยหลายๆ ชุดการทำงานของระบบแปลงกำลังไฟฟ้า และหม้อแปลง ไฟฟ้า และระบบไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถเรียกว่า ชุดจ่ายไฟ (Power block) การจัดเรียงตัว

ภายในจะเหมือนกันหรืออาจจะมีการผสมผสานกันกับประเภทอื่น แต่การทำงานของชุดจ่ายไฟแต่ละชุดจ่ายไฟทำการประสานงานผ่านระบบจัดการแบตเตอรี่ (BMS) ซึ่งทำการจัดการกำลังไฟฟ้าทั้งหมดระหว่างชุดจ่ายไฟ และการทำงานของระบบจัดการแบตเตอรี่จะประสานงานผ่านระบบควบคุม (Control system) ไปยังผู้ใช้งาน ภาพรวมของการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ภาพรวมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า

ที่มา : Integra Source, 2021 [33]

อีกหนึ่งเทคโนโลยีที่สำคัญและจำเป็นต้องใช้ควบคู่กับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ คือ ระบบการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System; BMS) ซึ่งเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่กำกับและควบคุมการทำงานของแบตเตอรี่แพ็ค ซึ่งจะทำงานควบคู่ไปกับแบตเตอรี่แพ็ค โดยทำหน้าที่ดังต่อไปนี้ [21]

1. สังเกตและติดตามการทำงานของแบตเตอรี่ เช่น วัดอุณหภูมิ ตรวจสอบระดับแรงดันและกระแสไฟฟ้า ระดับของพลังงานที่กักเก็บ (State of discharge) ความลึกของการปลดปล่อยพลังงาน (Depth of discharge) และระดับสุขภาพของแบตเตอรี่ (State of health)

2. คำนวณและวิเคราะห์การทำงานของแบตเตอรี่ เช่น วิเคราะห์กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการอัดประจุ (Charge) และคายประจุ (Discharge) ปริมาณพลังงานที่กักเก็บได้ต่อรอบ ค่าความต้านทาน (Impedance) ภายใน ของแต่ละเซลล์ไปจนถึงการเก็บข้อมูลพลังงานที่ปลดปล่อยไปแล้วทั้งหมดตั้งแต่เริ่มใช้งานครั้งแรก และจำนวนรอบการใช้งาน
3. สื่อสารกับอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ติดต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลกับระบบการจัดการแบตเตอรี่ของแบตเตอรี่อื่นๆ ที่ต่อกันแบบ อนุกรมหรือขนาน ติดต่อกับระบบ Controller Area Network (CAN) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายใน อุตสาหกรรมยานยนต์ ไปจนถึงการติดต่อกับ DC-bus ของระบบเครือข่ายไฟฟ้า
4. ป้องกันการทำงานของแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มความปลอดภัย เช่น ป้องกันไม่ให้อุณหภูมิ แรงดัน ปริมาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามากเกินไปหรือน้อยเกินไป และป้องกันไฟฟ้าลัดวงจร
5. การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่เพื่อยืดอายุการใช้งาน เป็นปัจจัยที่ทำให้ระบบการจัดการแบตเตอรี่ มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเซลล์แบตเตอรี่โดยทั่วไปจะมี Rated voltage ที่ต่ำ การนำมาใช้จริงจึงต้องนำหลายๆ เซลล์มาต่อกันแบบอนุกรมเพื่อเพิ่ม Operating voltage ตามความต้องการของการใช้งานแต่ละแบบ โดยปัญหา คือ ขั้นตอนการผลิตเซลล์ในโรงงานมักมีความคลาดเคลื่อน (Imperfection) จึงส่งผลให้บางเซลล์ที่อัดประจุ (Charge) ได้เต็มก่อน และบางเซลล์ที่คายประจุ (Discharge) หมดก่อน ส่งผลให้อายุการใช้งานของแต่ละเซลล์ในแบตเตอรี่แต่ละก้อนไม่เท่ากัน ระบบการจัดการแบตเตอรี่จึงมีหน้าที่ปรับระดับแรงดันของแต่ละเซลล์ เรียกว่า State of Charge (SoC) ให้เท่ากันในทุกรอบเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่แพ็ค

โดยปกติแล้วการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะมีการเสื่อมสภาพตามการใช้งานในแต่ละรอบการทำงาน ซึ่งการเสื่อมสภาพนี้สามารถเสื่อมได้อย่างรวดเร็วเนื่องมาจากการอัดประจุที่รุนแรง อุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นทั้งผลมาจากสภาพแวดล้อมและลักษณะการทำงาน และการอัดประจุที่มากเกินไป หรือการอัดประจุที่น้อยเกินไป การใช้งานของระบบการจัดการแบตเตอรี่พื้นฐานจะควบคุมชุดแบตเตอรี่แพ็ค เพื่อการตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่พอดี และการมีระบบการจัดการแบตเตอรี่ที่สามารถตรวจสอบและควบคุมการทำงานได้อย่างแม่นยำจะสามารถลดปัญหาการเสื่อมสภาพและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบได้ [32]



ในส่วนของระบบควบคุม (Control system) ที่ใช้ในระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ จะมีการทำงานร่วมกับระบบการจัดการแบตเตอรี่ซึ่งจะสามารถช่วยให้การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยการทำงานดังต่อไปนี้

1. การลดการไล่ระดับอุณหภูมิทั่วทั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่
2. การปกป้องเซลล์แบตเตอรี่จากเสื่อมภายใน และความสามารถที่จะเชื่อมต่อของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่
3. การปรับรูปแบบการอัดประจุและคายประจุให้เหมาะสมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่
4. การปรับสมดุลของเซลล์แบตเตอรี่ทั้งหมดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

ระบบการจัดการแบตเตอรี่และระบบควบคุมจะทำงานควบคู่กันไป ซึ่งสถานะของแบตเตอรี่ที่ระบบควบคุมสามารถวัดได้ คือ กระแส (Current), แรงดันไฟฟ้า (Voltage), อุณหภูมิ (Temperature) และความเข้มข้นของไอออนอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte ion concentrations) (ในแบตเตอรี่แบบไหลเท่านั้น) ข้อมูลนี้สามารถส่งผลไปยังระบบควบคุม และนำไปแสดงผลต่อไป ในส่วนของระบบควบคุมสามารถควบคุมและจัดการการทำงานได้ คือ กระแส, การไหลของอิเล็กโทรไลต์ (ในแบตเตอรี่แบบไหลเท่านั้น), อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (เมื่อทำความเย็นหรือทำความร้อนได้)

การใช้งานระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในระดับโครงข่ายไฟฟ้า (Grid scale) มีการใช้งานระบบควบคุมเพื่อทำการประสานระหว่างโครงข่ายไฟฟ้า และระบบการจัดการแบตเตอรี่ ซึ่งข้อมูลของแบตเตอรี่จะถูกส่งจากระบบการจัดการแบตเตอรี่และถูกส่งไปยังระบบควบคุม เมื่อโครงข่ายไฟฟ้ามีความต้องการพลังงานจากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ระบบควบคุมจะทำหน้าที่จัดการการทำงานทั้งในการอัดประจุ หรือคายประจุ โดยระบบควบคุมจะพิจารณาการทำงานให้เหมาะสมกับสถานะปัจจุบันของแบตเตอรี่ และความต้องการของระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งถือได้ว่าระบบควบคุมเป็นส่วนที่ทำการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกับระบบจัดการแบตเตอรี่เพื่อจัดการข้อมูลพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และข้อมูลพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม

#### 4.4 คุณสมบัติของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน และแปลงพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยแบตเตอรี่จะถูกกำหนดคุณสมบัติ หรือข้อกำหนดเฉพาะที่ใช้สำหรับการอธิบาย

ทางเทคนิคของแบตเตอรี่ ได้แก่ คุณสมบัติทางเคมี, แรงดัน, ความจุ, พลังงาน, วงจรชีวิต, ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

การกำหนดคุณสมบัติของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ สามารถแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้ [34], [35]

1. คุณสมบัติทางเคมี (Chemistry) โดยทั่วไปคุณสมบัติทางเคมีของแบตเตอรี่ที่พบบ่อยที่สุด คือ ตะกั่ว นิกเกิล และลิเทียม ซึ่งแต่ละระบบจำเป็นต้องมีการออกแบบลักษณะการทำงานที่เหมาะสม โดยแต่ละคุณสมบัติเคมีจะส่งผลกระทบต่อราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และค่าบำรุงรักษาแบตเตอรี่
2. แรงดัน (Nominal voltage) เป็นแรงดันที่ใช้สำหรับการอ้างอิงของแบตเตอรี่ สามารถเรียกว่าเป็นแรงดันไฟฟ้าในสภาวะปกติของแบตเตอรี่
3. ความจุ (Capacity or Nominal capacity) คือ ปริมาณประจุที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ และแสดงถึงความจุจำเพาะของแบตเตอรี่ในหน่วย แอมแปร์-ชั่วโมง (Ah) เป็นกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งการติดตั้งแบตเตอรี่สามารถติดตั้งแบตเตอรี่ที่มีความจุที่ใหญ่กว่าความต้องการ เพื่อความสามารถในการใช้งานที่นานมากขึ้น หรือติดตั้งแบตเตอรี่ที่มีความจุที่เล็กกว่าแต่ใช้งานได้ในเวลาสั้นลง เช่น กำหนดให้แบตเตอรี่มีความจุ 10 Ah แสดงว่าแบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสคงที่ 10 A ได้ภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง จ่ายกระแสคงที่ 1 A ภายใน 10 ชั่วโมง
4. พลังงาน (Energy or Nominal energy) คือ ความจุพลังงานของแบตเตอรี่ และแสดงถึงพลังงานจำเพาะของแบตเตอรี่ในหน่วย วัตต์-ชั่วโมง (Wh) เป็นกำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายได้เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งพลังงานสามารถคำนวณได้จากการคูณกำลังการคายหรือรับประจุ หน่วยเป็นวัตต์ (W) และเวลาที่ทำการคายหรืออัดประจุ หน่วยเป็นชั่วโมง (h) คล้ายกับความจุซึ่งการลดลงของพลังงานนั้นจะขึ้นอยู่กับเพิ่มขึ้นของอัตราการอัดหรือคายประจุ (C-rate)
5. วงจรชีวิต (Cycle life) คือ จำนวนรอบการคายประจุที่แบตเตอรี่สามารถทำงานได้อย่างเต็มความสามารถก่อนที่จะไม่เป็นไปตามเกณฑ์ประสิทธิภาพที่เฉพาะเจาะจง (Specific performance criteria) ที่ได้ระบุมาจากผู้ผลิตแบตเตอรี่ อายุการใช้งานของวงจรจะถูกประมาณสำหรับเงื่อนไขในการอัดหรือคายประจุอย่างเฉพาะเจาะจง และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน คือ การอัดและคายประจุในแต่ละรอบ และสถานะอื่นๆ คือ อุณหภูมิ และความชื้น

6. ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power density) คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อหน่วยปริมาตร (W/L) กำลังไฟฟ้าจำเพาะ เป็นลักษณะและคุณสมบัติของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถนำมาใช้กำหนดขนาดของแบตเตอรี่เพื่อนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่กำหนด
7. ความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า (Energy density) คือ พลังงานของแบตเตอรี่ต่อหน่วยปริมาตร (Wh/L) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า ความหนาแน่นของพลังงานเชิงปริมาตร พลังงานจำเพาะ เป็นลักษณะและคุณสมบัติของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถนำมาใช้กำหนดขนาดของแบตเตอรี่เพื่อนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่กำหนด

ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับคำศัพท์ที่ใช้การอธิบาย จำแนกและเปรียบเทียบชนิดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งการกำหนดตัวแปรพื้นฐานนี้ คือ การนำไปใช้เพื่อกำหนดลักษณะการทำงานของแบตเตอรี่ เช่น สถานะของประจุ (State of Charge; SoC), ความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge; DoD), แรงดันขั้ว (Terminal voltage), แรงดันเมื่อเปิดวงจร (Open-circuit voltage), ซี-เรต (C-rate) เป็นต้น

การกำหนดตัวแปรพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีดังต่อไปนี้ [35]

1. สถานะของประจุ (State of Charge; SoC) คือ การแสดงสถานะความจุของแบตเตอรี่ในช่วงเวลาปัจจุบัน โดยเทียบเป็นร้อยละของความจุสูงสุด ซึ่งสถานะของประจุสามารถคำนวณจากการใช้งานในปัจจุบันเพื่อเป็นการวางแผนสำหรับการอัดประจุของแบตเตอรี่ในช่วงเวลาที่ถัดไป
2. ความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge; DoD) คือ ร้อยละของความจุของแบตเตอรี่ที่คายประจุแล้ว จะแสดงเป็นร้อยละเทียบกับความจุสูงสุด ซึ่งค่าของความลึกของการคายประจุจะตรงข้ามกับสถานะของประจุ
3. แรงดันขั้ว (Terminal voltage) คือ แรงดันระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ระหว่างที่มีการต่อกับโหลด ซึ่งแรงดันขั้วไฟฟ้าจะแปรผันตามค่าสถานะของประจุ และกระแสในการอัดหรือคายประจุไฟฟ้า
4. แรงดันเมื่อเปิดวงจร (Open-circuit voltage) คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ที่ไม่ต่อกับโหลด ซึ่งแรงดันเมื่อเปิดวงจรขึ้นอยู่กับสถานะการอัดประจุของแบตเตอรี่
5. ซี-เรต (C-rate) คือ หน่วยของการอัดและคายประจุ จะพิจารณาเป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสคายประจุเทียบกับขนาดความจุของแบตเตอรี่ (จำนวนเท่า) เช่น แบตเตอรี่ ขนาด 80 Ah คายประจุ ที่ 1C คือ ทำการคายประจุที่กระแส 80 แอมป์ซึ่งจะใช้งานแบตเตอรี่ได้ 1

ชั่วโมง ถ้าคายประจุที่ 0.5C คือ ทำการคายประจุที่กระแส 40 แอมป์ซึ่งจะใช้งานแบตเตอรี่ได้ 2 ชั่วโมง ถ้าคายประจุที่ 2C คือ ทำการคายประจุที่กระแส 160 แอมป์ ซึ่งจะใช้งานแบตเตอรี่ได้ 30 นาที






#### 4.5 ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

ปัจจุบันการนำระบบกักเก็บพลังงานเข้ามาใช้เป็นที่นิยมในระบบไฟฟ้า เพื่อทำการรักษาสมดุลระหว่างการผลิตไฟฟ้าและความต้องการใช้ไฟฟ้า ซึ่งการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มาใช้จะช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียน ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่กลายเป็นทางเลือกที่เหมาะสมและน่าสนใจสำหรับการนำมาใช้อย่างยิ่ง เนื่องจากความเหมาะสมทางด้านสภาพภูมิศาสตร์ และสามารถติดตั้งไว้บริเวณที่ใช้พื้นที่ไม่มาก อีกทั้งยังสามารถตอบสนองต่อระบบไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว สามารถใช้ได้กับลักษณะการใช้งานที่หลากหลายเพื่อรองรับกับระบบไฟฟ้าที่หลากหลาย และปัจจุบันระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีแนวโน้มราคาที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งคุณสมบัติของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ได้แก่ ประสิทธิภาพ คือ ปัจจัยสำคัญของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ที่สามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการทำงาน จะบ่งบอกโดยลักษณะการอัดและคายประจุใน 1 รอบเต็ม โดยสามารถเรียกว่าประสิทธิภาพแบบไปและกลับ (Round-trip efficiency) ซึ่งแรงดันของแบตเตอรี่จะตกตามพลังงานที่ทำการจ่ายออกไปและสถานะประจุ (SoC) ดังนั้น ประสิทธิภาพแบบไปกลับของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่คาดว่าจะขึ้นอยู่กับกำลังในการอัดและคายประจุ และสถานะประจุของแบตเตอรี่ [39]

ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นมีเทคโนโลยีหลากหลายประเภท โดยมีความแตกต่างหลักอยู่ที่อัตราส่วนและองค์ประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการผลิตแคโทด แอโนด และอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งองค์ประกอบที่ต่างกันนี้จะส่งผลต่อคุณสมบัติของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ตัวอย่างเช่น ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ชนิดลิเทียมไอออน ตะกั่วกรด นิกเกิลแคดเมียม และอื่นๆ การคำนวณประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะต้องคำนึงถึงขั้นตอนการกักเก็บพลังงานและช่วงปลดปล่อยพลังงาน ค่าประสิทธิภาพสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ปล่อยออกมาเทียบกับพลังงานที่ใส่เข้าไป ถ้าระบบมีค่าประสิทธิภาพสูง นั่นคือ จะมีการสูญเสียพลังงานในระหว่างขั้นตอนการกักเก็บหรือปลดปล่อยน้อย ดังนั้นเทคโนโลยีที่มีค่าประสิทธิภาพต่ำจึงไม่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานที่มีรอบการอัดและคาย

ประจวบยๆ ซึ่งเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะมีประสิทธิภาพอยู่ระหว่างร้อยละ 60 ไปจนถึงร้อยละ 98 โดยจะสังเกตได้ว่าเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ เทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน, แบตเตอรี่ตะกั่วกรด และแบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ [21]

เทคโนโลยีของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สามารถจำแนกได้ตามความหนาแน่นของพลังงาน ประสิทธิภาพของการอัดและคายประจุแบบไปกลับ อายุการใช้งาน และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของอุปกรณ์ ความหนาแน่นของพลังงานถูกกำหนดให้เป็นปริมาณพลังงานที่สามารถเก็บไว้ในระบบเดียวต่อหน่วยปริมาตรหรือต่อหน่วยน้ำหนัก ประสิทธิภาพของการอัดและคายประจุเป็นมาตรฐานของประสิทธิภาพที่สามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้ ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมสามารถรองรับประสิทธิภาพในการอัดและคายประจุสูงสุดที่ร้อยละ 95 ในขณะที่ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วจะมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 60 - 70 และระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์จะมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 70 - 75 องค์ประกอบด้านประสิทธิภาพที่สำคัญอย่างหนึ่งของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ คือ อายุการใช้งาน และปัจจัยนี้มีผลกระทบมากที่สุดในการทบทวนประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจ ข้อพิจารณาที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ ความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมหรือขอบเขตที่อุปกรณ์ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและนำไปรีไซเคิลได้ [40] ตามรูปที่แสดงในรูปที่ 4.7

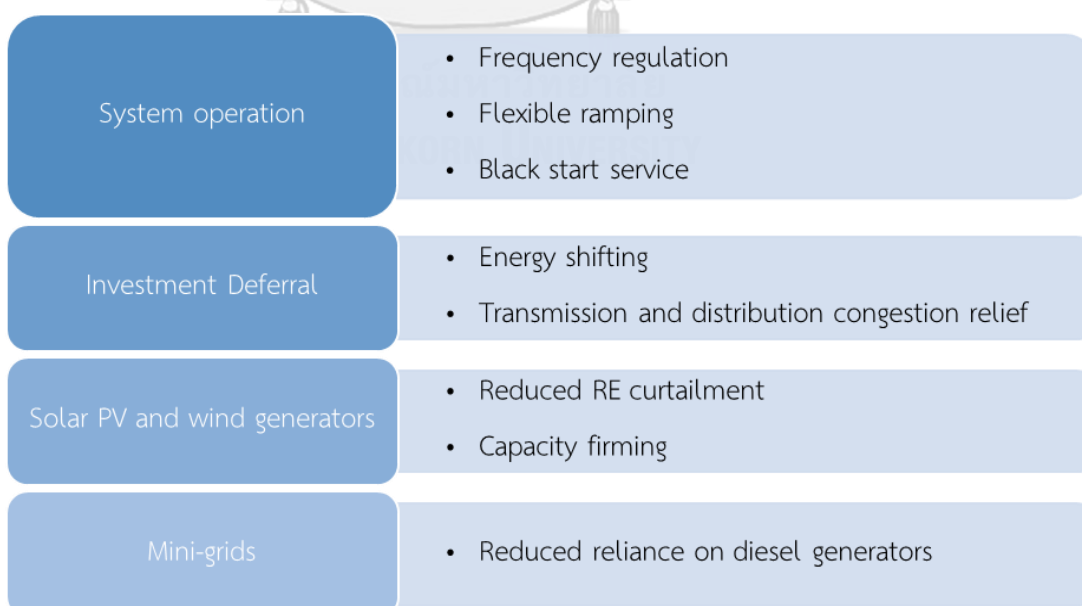
	Energy density (kW/kg)	Round Trip Efficiency (%)	Life Span (years)	Eco-friendliness
Li-ion 	<b>1st</b> 150-250	<b>1st</b> 95	<b>1st</b> 10-15	<b>1st</b> Yes
NaS 	<b>2nd</b> 125-150	<b>2nd</b> 75-85	<b>2nd</b> 10-15	<b>2nd</b> No
Flow 	<b>3rd</b> 60-80	<b>3rd</b> 70-75	<b>4th</b> 5-10	<b>4th</b> No
Ni-Cd 	<b>4th</b> 40-60	<b>4th</b> 60-80	<b>3rd</b> 10-15	<b>3rd</b> No
Lead Acid 	<b>5th</b> 30-50	<b>5th</b> 60-70	<b>5th</b> 3-6	<b>5th</b> No

รูปที่ 4.7 ลักษณะของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในชนิดที่แตกต่างกัน

ที่มา : Handbook on battery energy storage system, 2018 [40]

#### 4.6 การใช้งานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการวิเคราะห์การใช้งานของระบบกักเก็บด้วยแบตเตอรี่ที่มีการนำมาใช้ในระดับโครงข่ายไฟฟ้า (Grid scale) ซึ่งในการใช้งานระดับโครงข่ายนั้นมีหลากหลายรูปแบบการใช้งาน สามารถแบ่งได้ตามรูปภาพที่ 4.8

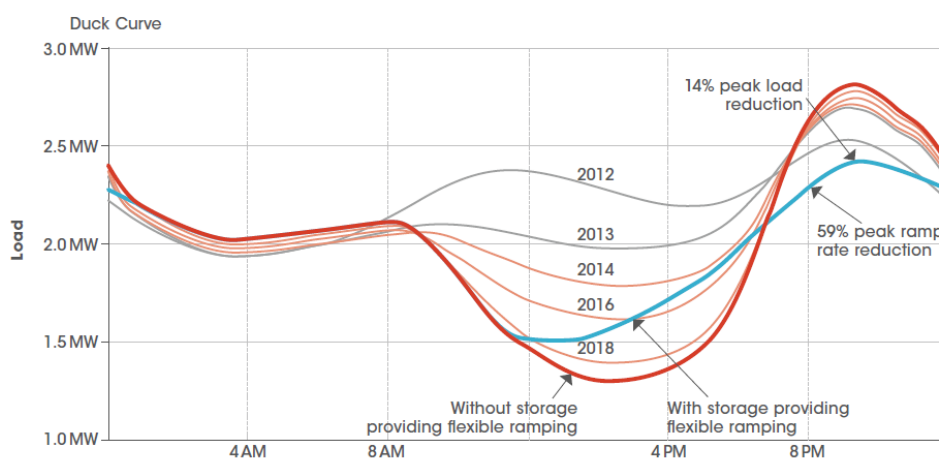


รูปที่ 4.8 รูปแบบการใช้งานของระบบกักเก็บด้วยแบตเตอรี่

ที่มา : Utility-scale batteries, 2019 [22]

สามารถแบ่งลักษณะการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้หลากหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดเพิ่มเติมในแต่ละลักษณะการใช้งานดังต่อไปนี้

1. การบริหารจัดการของระบบไฟฟ้า (System operation) เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในระบบมากยิ่งขึ้น จำเป็นต้องมีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้งาน เพื่อบริหารจัดการความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบให้เหมาะสม ซึ่งแบ่งได้ตามลักษณะการใช้งานดังต่อไปนี้
  - 1.1. การควบคุมความถี่ (Frequency regulation) เมื่อมีการผลิตไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน จะทำให้การผลิตไฟฟ้านั้นผันผวนตาม และมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้น ส่งผลให้การจ่ายพลังงานไฟฟ้า และความต้องการใช้ไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอ ทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความถี่จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว (มิลลิวินาที) จึงเหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน
  - 1.2. การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า (Flexible ramping) เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนโดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ ที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เพียงช่วงเวลากลางวัน ส่งผลให้ลักษณะความต้องการใช้ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป คือ ลดเพียงช่วงกลางวัน หรือเรียกว่าปรากฏการณ์หลังเปิด (Duck curve) ซึ่งในช่วงที่พลังงานแสงอาทิตย์หยุดการผลิตไฟฟ้าหรือช่วงกลางคืน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความต้องการใช้ไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว จำเป็นต้องมีการจัดสรรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น อาจจะมีราคาค่าเชื้อเพลิงสำหรับการทำงาน เพราะมีความจำเป็นที่ต้องเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มาใช้กักเก็บพลังงานที่ผลิตได้ในช่วงกลางวัน และนำไปตอบสนองต่อระบบในช่วงกลางคืนจะช่วยลดปรากฏการณ์หลังเปิด รูปที่ 4.9 ได้แสดงลักษณะปรากฏการณ์หลังเปิดที่มีการทำนายในรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 4.9 ลักษณะปรากฏการณ์หลังเปิด รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา

ที่มา : Utility-scale batteries, 2019 [22]

- 1.3. การสำรองจ่ายไฟฟ้า (Black start services) เมื่อมีการเกิดระบบไฟฟ้าดับจำเป็นที่จะต้องมีการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่วนใหญ่มีการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดดีเซลเพื่อตอบสนองทันทีทันใด และระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาปรับใช้ เนื่องจากสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน
2. การชะลอการลงทุน (Investment deferral) โดยปกติแล้วการสร้างโรงไฟฟ้านั้นจะมีอายุการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปตามชนิดของโรงไฟฟ้า ซึ่งการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นเปรียบเสมือนการสร้างโรงไฟฟ้าโรงหนึ่ง เพื่อเป็นการชะลอการลงทุนในรูปแบบของการสร้างโรงไฟฟ้า และยังมีลักษณะการใช้งานที่ตอบสนองต่อระบบได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งแนวโน้มราคาของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ยังมีแนวโน้มที่ลดลงอีกด้วย สามารถแยกตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้
  - 2.1 การกักเก็บพลังงาน (Energy shifting) จะทำการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ขนาดใหญ่เพื่อทำการเก็บพลังงานสำรองไว้ใช้เมื่อระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สูง (Peak demand) ซึ่งเป็นการติดตั้งแทนการสร้างโรงไฟฟ้าที่ใช้ในการตอบสนองในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงความต้องการใช้ไฟฟ้า
  - 2.2 การลดการแออัดของการส่งและการกระจายพลังงาน (Transmission and distribution congestion relief) ในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สูงมากขึ้นจะเกิดความแออัดในการจัดส่งพลังงานในระบบซึ่งอาจจะส่งผลให้ระบบส่งไฟฟ้าเกิดปัญหาได้ การติดตั้งระบบกักเก็บ



พลังงานด้วยแบตเตอรี่จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถติดตั้งเพื่อช่วยกักเก็บพลังงานที่มากเกินไปในระบบโครงข่ายไฟฟ้า และสามารถตอบสนองต่อระบบได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย

3. การบริการสำหรับการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน (Solar PV and wind generators) เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ผลิตไฟฟ้าได้อย่างไม่แน่นอน ยากต่อการทำนายในแต่ละวัน จะส่งผลให้ในบางครั้งการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานนี้สร้างปัญหาให้กับระบบ ดังนั้นการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สามารถช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ ซึ่งแบ่งได้ตามลักษณะการใช้งานดังต่อไปนี้
  - 3.1 การลดทอนพลังงานหมุนเวียน (Reduced renewable energy curtailment) การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ไม่สามารถที่จะควบคุมหรือทำนายการผลิตไฟฟ้าได้อย่างแน่นอน ซึ่งในบางครั้งการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งพลังงานนี้มากเกินไปเกินความต้องการใช้ไฟฟ้าในพื้นที่นั้นๆ ดังนั้นจะมีการลดทอนพลังงานหมุนเวียนในพื้นที่นั้นๆ ซึ่งถือว่าการเสียโอกาสอย่างหนึ่ง ดังนั้นการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้จะสามารถกักเก็บพลังงานส่วนเกินที่ผลิตได้นี้ไว้ใช้เมื่ออยู่ในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สูงมากขึ้น
  - 3.2 ความจุไฟฟ้าที่แน่นอน (Capacity firming) ความผันผวนของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์จะมีการเปลี่ยนแปลงการผลิตไฟฟ้าเมื่อมีเมฆบัง พลังงานลมจะมีการเปลี่ยนแปลงการผลิตไฟฟ้าเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ระบบเกิดปัญหาได้ ดังนั้นการเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สามารถลดความผันผวนของพลังงานที่ผลิตได้ เป็นการผสมผสานการทำงานร่วมกัน ซึ่งทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมามีความแน่นอนระดับหนึ่ง ลดความผันผวนและลดการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว
4. การใช้งานสำหรับระบบโครงข่ายขนาดเล็ก (Mini grids) ในพื้นที่เมืองที่มีลักษณะเป็นเกาะ ถือว่า จะมีโครงข่ายไฟฟ้าที่เป็นโครงข่ายขนาดเล็ก เนื่องจากปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในระบบโครงข่ายขนาดเล็ก ส่งผลให้ยากต่อการจัดการระหว่างการผลิตไฟฟ้าและความต้องการใช้ไฟฟ้า ดังนั้นการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้จะเป็นการแก้ปัญหาและจัดการปัญหา ซึ่งแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้

#### 4.1 การลดการพึ่งพาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดดีเซล (Reduce reliance on diesel generators)

ในระบบโครงข่ายขนาดเล็กนั้น โดยปกติแล้วการผลิตไฟฟ้าจะพึ่งพาการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทดีเซล แต่ปัจจุบันมีพลังงานหมุนเวียนเพิ่มขึ้นในระบบ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนส่งผลให้การผลิตไฟฟ้านั้นไม่แน่นอน ซึ่งการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สามารถสำรองพลังงานให้กับระบบเพื่อช่วยจัดการระหว่างความต้องการใช้ไฟฟ้าและการผลิตไฟฟ้า และเป็นการลดการพึ่งพาพลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดดีเซลอีกด้วย

การนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้ในระดับโครงข่ายนั้นมีหลากหลายรูปแบบลักษณะการใช้งาน ปัจจุบันนี้พลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาระบบโครงข่ายให้มีประสิทธิภาพ และมีความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น สามารถจัดการการผลิตไฟฟ้าให้เหมาะสมต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า ซึ่งเทคโนโลยีของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ถือเป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และราคาของอุปกรณ์มีแนวโน้มที่จะลดลง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้พิจารณาระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อเข้ามาแก้ไขปัญหา

## บทที่ 5

### การพัฒนาโปรแกรมคำนวณการคำนวณหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วย แบตเตอรี่ที่เหมาะสม

ในบทนี้จะอธิบายถึงวิธีการที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ในการคำนวณหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่มีความเหมาะสม โดยทำงานร่วมกับการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ทฤษฎีที่นำเสนอเพื่อคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ โดยจะพิจารณาราคาต้นทุนของระบบให้ต่ำที่สุด ซึ่งพิจารณาร่วมกับราคาการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เมื่อระบบไฟฟ้ามีความจำเป็นต้องใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งพิจารณาโดยโปรแกรมแก้ปัญหาแบบเชิงเส้นในโปรแกรม MATLAB ที่เป็นเครื่องมือในการช่วยคำนวณเพื่อหาคำตอบ

#### 5.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน

สำหรับแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม ซึ่งมีเชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานตามธรรมชาติที่มีความผันผวน ไม่สามารถพยากรณ์ได้อย่างแน่นอน และสามารถส่งผลให้ระบบไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้องการใช้ไฟฟ้า และการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในระบบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณากำลังผลิตจากข้อมูลในรูปแบบการผลิตจริงต่อกำลังผลิตติดตั้ง โดยเป็นข้อมูลของคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน

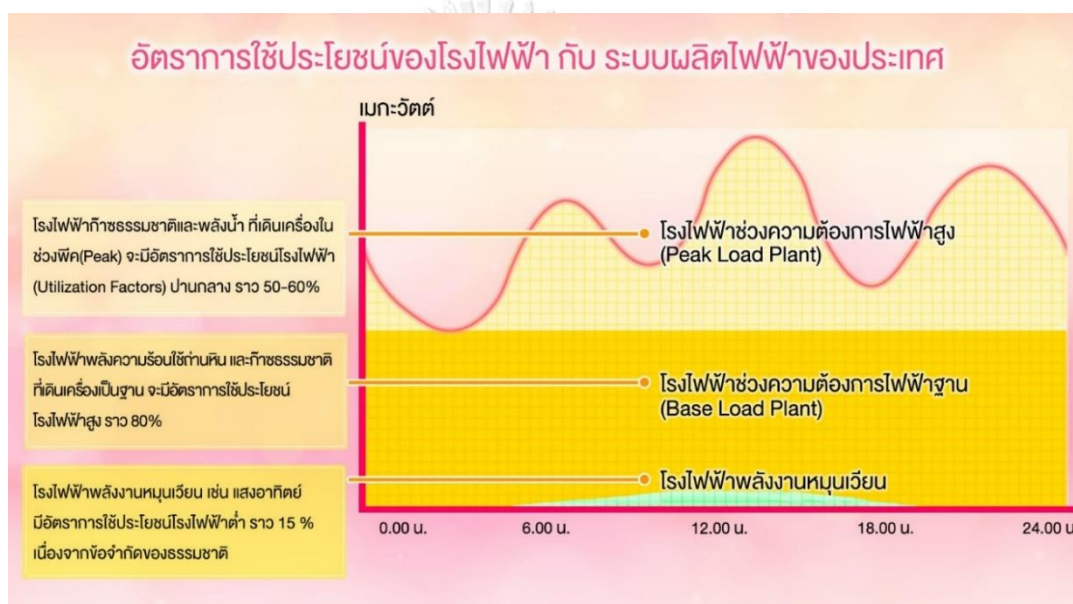
#### 5.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

สำหรับการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการกำหนดขอบเขตข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ประเภท

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Combined-cycle Generator)
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนชนิดถ่านหิน (Thermal (coal) Generator)

เนื่องจากประเทศไทยมีส่วนการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ประเภทนี้มากที่สุด การผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนชนิดถ่านหิน นิยมใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้าในช่วงที่ใช้ไฟฟ้าน้อยหรือช่วงฐาน (Base load) ซึ่งจะถูกสั่งให้เดินเครื่องเกือบ 24 ชั่วโมง หรือเรียกว่า Base Load Plant ซึ่งลักษณะการเดินเครื่องในลักษณะนี้จะช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้งานได้อย่างมี

ประโยชน์สูงถึงร้อยละ 80 ในส่วนของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม นิยมใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงที่ใช้ไฟฟ้าสูงสุด (Peak load) ซึ่งจะถูกล้างให้เดินเครื่องเมื่อมีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น หรือเรียกอีกอย่างว่า Peak Load Plant จะมีการหยุดหรือเดินเครื่องลดลง เมื่อมีความต้องการไฟฟ้าในระบบลดลง ซึ่งลักษณะการเดินเครื่องในลักษณะนี้จะช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพลดลงประมาณร้อยละ 50 – 60 ซึ่งทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับกรวางแผน และการส่งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าแห่งชาติ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า โดยพิจารณากำลังผลิตข้อมูลการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย รูปที่ 5.1 แสดงอัตราการใช้ประโยชน์ของโรงไฟฟ้า กับระบบผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย



รูปที่ 5.1 อัตราการใช้ประโยชน์ของโรงไฟฟ้า กับระบบผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2558 [29]

### 5.3 การจำลองของค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิ

สำหรับการจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิ จะทำการจำลองมาจากข้อมูลการเดินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบของประเทศไทย เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าซึ่งเป็นข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในส่วนของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์ขอบเขตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ชนิดดังที่กล่าวไปในหัวข้อ 5.2 ซึ่งโรงไฟฟ้าประเภทอื่น ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กและขนาดใหญ่, โรงไฟฟ้าผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก, โรงไฟฟ้าจากประเทศมาเลเซีย และโรงไฟฟ้าจากประเทศลาว จะไม่นำมาวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำใช้เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น (Peak load) และมีการควบคุมปริมาณน้ำจากกรมชลประทานซึ่ง

ส่งผลมีข้อจำกัดในการเดินเครื่อง และไม่ได้เดินเครื่องตลอดเวลา โรงไฟฟ้าผู้ผลิตรายเล็ก เป็นโครงการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ระบบการผลิตพลังงานความร้อน และพลังงานความร้อนไฟฟ้าร่วมกัน (Cogeneration) หรือการผลิตไฟฟ้า โดยใช้พลังงานนอกรูปแบบ กากหรือเศษวัสดุเหลือใช้ เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งโครงการโรงไฟฟ้าผู้ผลิตขนาดเล็กแต่ละโครงการจะทำการซื้อและขายไฟฟ้าให้กับกรไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [38] ในส่วนของโรงไฟฟ้าจากประเทศมาเลเซียนั้นไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากมีปริมาณการรับและจ่ายไฟฟ้าในปริมาณน้อย โรงไฟฟ้าจากประเทศลาวในการรับและจ่ายไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลามีความแตกต่างกันตลอดทั้งช่วงเวลาที่นำมาวิเคราะห์จึงไม่นำมาพิจารณาในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เช่นกัน ดังนั้นการนำข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้ามาวิเคราะห์นั้นจะต้องเป็นข้อมูลที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ในขอบเขตงานดังกล่าว จึงได้มีการทำการทักกลับกำลังผลิตไฟฟ้าที่ได้จากโรงไฟฟ้าประเภทอื่นออกไป คือ โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กและขนาดใหญ่, โรงไฟฟ้าผู้ผลิตไฟฟ้าย่อย, โรงไฟฟ้าจากประเทศมาเลเซีย และโรงไฟฟ้าจากประเทศลาว ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 5.1

$$P_{net\ load,t} = P_{load,t} - P_{hydro,t} - P_{SPP,t} - P_{HVDC,t} - P_{EDL,t} \quad (5.1)$$

โดยที่

$P_{net\ load,t}$	คือ ความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิที่เวลา t (MW)
$P_{load,t}$	คือ ความต้องการใช้ไฟฟ้าที่ต้องจัดสรรกำลังการผลิตเวลา t (MW)
$P_{SPP,t}$	คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากจากระบบผลิตไฟฟ้า Small Power Plant (SPP) ที่มีอยู่ในระบบที่เวลา t (MW)
$P_{hydro,t}$	คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าพลังน้ำที่เวลา t (MW)
$P_{HVDC,t}$	คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟ High Voltage Direct Current Transmission System (HVDC) ที่เวลา t (MW)
$P_{EDL,t}$	คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟ Électricité du Laos (EDL) ที่เวลา t (MW)
$t$	คือ ช่วงเวลาที่ t ซึ่งในงานนี้ คือ ครึ่งชั่วโมง

ค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิที่ได้จากการหาในสมการที่ 5.1 เป็นค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีการหักลบกำลังผลิตไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนไปแล้ว ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้การผลิตไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนจะทำการจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบก่อน ซึ่งเป็นการหักลบกับความต้องการใช้ไฟฟ้าโดยตรง ดังนั้นค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าก่อนทำการหักลบการผลิตไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเป็นไปตามสมการที่ 5.2 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นสำหรับการนำมาวิเคราะห์ร่วมกับการทดสอบต่างๆ

$$P_{load\ demand,t} = P_{net\ load,t} + P_{VRE,t} \quad (5.2)$$

โดยที่

$P_{load\ demand,t}$  คือ ความต้องการใช้ไฟฟ้าของระบบสุทธิที่เวลา  $t$  (MW)

$P_{net\ load,t}$  คือ ความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิที่เวลา  $t$  (MW)

$P_{VRE,t}$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน มีอยู่ในระบบที่เวลา  $t$  (MW)

#### 5.4 การกำหนดสมการสำหรับคำนวณหาขนาดระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน คือ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม ซึ่งมีแหล่งเชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติ ทำให้มีความแปรปรวนมาก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า และอาจจะส่งผลกระทบต่อระบบได้ ทำให้ระบบมีปัญหา โดยปกติแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบจะต้องมีการจัดสรรกำลังไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า แต่เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า ซึ่งการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นอาจจะมากเกินไปกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า จะส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีปัญหา

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอให้มีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาช่วยแก้ไขปัญหาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดิมที่มีอยู่ในระบบ ซึ่งต้องการให้การจัดการการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบนั้นจะต้องมีราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้า (Operating cost) ของระบบนั้นต่ำที่สุด

การเลือกขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นจึงจำเป็นต้องมีขนาดที่เหมาะสมเพื่อทำงานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบ และต้องการให้ต้นทุนของระบบไฟฟ้านั้นต่ำที่สุด หรือสามารถเรียกได้ว่าการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ (Economic dispatch) โดยมีการพิจารณา

ราคาในการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เนื่องจากการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นจะส่งผลต่อราคาต้นทุนการดำเนินงานทั้งหมด กำหนดให้ค่าต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเป็นไปตาม สมการที่ 5.3

$$\text{Objective Function} = \text{Minimize} \sum_{t=1}^{48} \sum_{k=1}^n \left( \frac{C_k}{2} P_{k,t} \right) \quad (5.3)$$

โดยที่

$C_k$	คือ ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ k (บาท/kWh)
$P_k$	คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าที่ k (MW)
$k$	คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องอยู่
$n$	คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องอยู่ตามแผนการเดินเครื่อง
$t$	คือ เวลา

เนื่องจากข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าเป็นข้อมูลแบบครึ่งชั่วโมง ดังนั้นจึงต้องใช้ต้นทุนเชื้อเพลิงหารครึ่ง ( $\frac{C_k}{2}$ ) โดยที่การคำนวณจะเกิดขึ้นภายในโปรแกรม MATLAB และการพิจารณากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พิจารณาเป็นแบบช่วงเวลาโดยช่วงเวลาละครึ่งชั่วโมง ซึ่งทำการวิเคราะห์ภายในโปรแกรม MATLAB เช่นเดียวกัน ทำให้ได้ผลลัพธ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกมาเป็นแบบกำลังไฟฟ้า

การกำหนดเงื่อนไขในการหาขนาดระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ โดยต้องมีค่าต้นทุนในการผลิตไฟฟ้านั้นต่ำที่สุดมีทั้งหมด 2 เงื่อนไข

1. เงื่อนไขของระบบ (The system constraints)
2. เงื่อนไขของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (The battery energy storage system constraints)

ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เงื่อนไขของระบบ (The system constraints)

เนื่องจากในขอบเขตของงานได้ทำการพิจารณาข้อมูลระบบไฟฟ้าของประเทศไทย และใช้ข้อมูลจริงของประเทศไทยในการวิเคราะห์ ซึ่งจะมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

### 1.1 เงื่อนไขการรักษาสมดุลของกำลังไฟฟ้า (Power balance constraints)

ในระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องมีการรักษาสมดุลของการผลิตไฟฟ้า และความต้องการใช้ไฟฟ้า อย่างสม่ำเสมอ เมื่อระบบไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า หรือน้อยกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ดังนั้นจำเป็นต้องจะมีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้ เพื่อรักษาสมดุล กำหนดสมการในการรักษาสมดุลการผลิตไฟฟ้าเป็นไปตาม สมการที่ 5.4

$$P_{load\ demand,t} = \sum_{k=1}^n P_{k,t} + P_{VRE,t} + P_{batt,t} \quad (5.4)$$

โดยที่

$P_{load\ demand}$	คือ ความต้องการใช้ไฟฟ้าของระบบสุทธิ (MW)
$P_k$	คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าที่ k (MW)
$P_{VRE}$	คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน (MW)
$P_{batt}$	คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (MW)

โดยถ้ำกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ( $P_{batt}$ ) เป็นบวก คือ การจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้าสู่ระบบ ถ้ำกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ( $P_{batt}$ ) เป็นลบ คือ การกักเก็บกำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าสู่ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 1.2 เงื่อนไขข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator limitation constraints)

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจะต้องมีข้อจำกัดในการเดินเครื่อง และการจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งถูกกำหนดมาให้แต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามี่เงื่อนไขที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจำเป็นต้องทำงานภายใต้เงื่อนไขที่เป็นไปตาม สมการที่ 5.5

$$P_{min,k} \leq P_{k,t} \leq P_{max,k} \quad (5.5)$$

โดยที่

$P_{min,k}$	คือ กำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าที่ k (MW)
$P_{max,k}$	คือ กำลังไฟฟ้ามากที่สุดที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าที่ k (MW)



1.3 เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator ramp rate limitation constraints)

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องนั้นมีข้อจำกัดในความสามารถในการเปลี่ยนแปลงการผลิตไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา ทั้งมีค่าเป็นบวก (Ramp down) และลบ (Ramp up) โดยแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีเงื่อนไขที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจำเป็นต้องทำงานภายใต้เงื่อนไขที่เป็นไปตาม สมการที่ 5.6

$$|P_{k,t-1} - P_{k,t}| \leq P_{ramp,k} \quad (5.6)$$

โดยที่

$P_{ramp,k}$  คือ กำลังไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ของโรงไฟฟ้าที่ k (MW/30min)

2. เงื่อนไขของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (The battery energy storage system constraints)

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการที่จะหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสม ที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าและทำงานร่วมกับการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบแบบเดิมได้ เมื่อระบบมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่แล้ว จะทำการพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่ง โดยจะมีการกำหนดลักษณะของข้อมูลคล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เช่น ราคาซื้อเพลิงต่อหน่วยในการทำงาน, พิกัดกำลังผลิต ต่ำสุด-สูงสุด และความสามารถในการ เพิ่ม-ลด กำลังผลิต ของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ดังนั้นระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จึงมีเงื่อนไขในการทำงาน ดังต่อไปนี้

2.1 เงื่อนไขข้อจำกัดของระบบกักเก็บไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ (Battery power limitation constraints)

เมื่อระบบมีความจำเป็นต้องใช้งานระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ จะสามารถกำหนดลักษณะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้จากค่ากำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่มากที่สุดในแต่ละการทดสอบ โดยสามารถกำหนดกำลังไฟฟ้าสูงสุด และกำลังไฟฟ้าต่ำสุด เพื่อใช้สำหรับการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ดังสมการที่ 5.7 และ 5.8

$$P_{batt,max} = \max (P_{batt}) \quad (5.7)$$

$$P_{batt,min} = -\max (P_{batt}) \quad (5.8)$$

โดยที่

$P_{batt}$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (MW)

$P_{batt,min}$  คือ กำลังไฟฟ้าต่ำสุดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (MW)

$P_{batt,max}$  คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (MW)

กำหนดให้กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จำเป็นต้องมีเงื่อนไขการทำงานในแต่ละการทดสอบ คือ กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในเวลาใดๆ จะต้องทำงานอยู่ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่ำสุด และกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ดังสมการที่ 5.9

$$P_{batt,min} \leq P_{batt,t} \leq P_{batt,max} \quad (5.9)$$

โดยที่

$P_{batt,t}$  คือ กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในเวลาที  $t$  (MW)

2.2 เงื่อนไขการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Power summation constraints)

กำหนดให้กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นจะขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานที่จะนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ไปใช้งานในรูปแบบใด โดยในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้การรับจ่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าใน 1 วันจะต้องมีค่าเท่ากัน หรือมีผลรวมกำลังไฟฟ้าในหนึ่งวันเท่ากับศูนย์ สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 5.10

$$\sum_{t=1}^{48} P_{batt,t} = 0 \quad (5.10)$$

โดยที่

$P_{batt,t}$  คือ กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในเวลาที  $t$  (MW)

2.3 เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Power ramp rate of battery constraints)

กำหนดให้ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่มากที่สุดในแต่ละการทดสอบ และการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการเปลี่ยนแปลงของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงเวลา ที่มีค่าเป็นบวก (Ramp down) และลบ (Ramp up) จะต้องตอบสนองภายใต้เงื่อนไขของข้อจำกัดการเปลี่ยนแปลงไปของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.11, 5.12

$$P_{batt,ramp,limit} = \max (P_{batt,t}) \quad (5.11)$$

$$|P_{batt,t-1} - P_{batt,t}| \leq P_{batt,ramp,limit} \quad (5.12)$$

โดยที่

$P_{batt,ramp,limit}$  คือ กำลังไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (MW/30min)

2.4 เงื่อนไขข้อจำกัดของสถานะประจุของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (State of charge limitation constraints)

เนื่องจากการกำหนดให้ข้อจำกัดในการรับหรือจ่ายประจุของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นต้องการให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากยิ่งขึ้น และมีความสามารถใช้งานระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้อย่างเต็มความสามารถ [23] ดังนั้นจึงมีการกำหนดความสามารถในการใช้งานได้ ดังสมการที่ 5.13

$$SoC_{limit} = 60\% \quad (5.13)$$

โดยที่

$SoC_{limit}$  คือ การกำหนดสถานะของการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (%)

ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สามารถจัดการอัดและคายประจุด้วยระบบของตนเอง ดังนั้นการทำงานของ การอัดประจุมากที่สุด และการคายประจุน้อยที่สุดสามารถกำหนดได้ตั้งสมการที่ 5.14, 5.15

$$SoC_{max} = 80\% \quad (5.14)$$

$$SoC_{min} = 20\% \quad (5.15)$$

โดยที่

$SoC_{max}$  คือ สถานะการอัดประจุสูงสุด (%)

$SoC_{min}$  คือ สถานะการคายต่ำสุด (%)

การพิจารณาพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ โดยจะทำการพิจารณาหลังจากการพิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ หรือ Economic dispatch กับเงื่อนไขทั้ง 2 เงื่อนไข ซึ่งขนาดของระบบกักเก็บพลังงานสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 5.16 ถึง 5.19 ซึ่งจากสมการที่ 5.16 คือ ค่าพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เท่ากับผลคูณของกำลังไฟฟ้าและผลต่างของเวลา ในสมการที่ 5.17 ถ้าค่าพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีค่าเป็นบวกให้นำมาบวกเป็นผลรวมของพลังงานในแต่ละช่วงเวลาที่ทำการคายประจุ (Discharge) อย่างต่อเนื่อง และกลายเป็นผลรวมของพลังงานที่ทำการคายประจุในช่วงเวลาหนึ่ง (i) หากเมื่อมีการเปลี่ยนเป็นการอัดประจุ (Charge) จะทำการเปลี่ยนสมการในการพิจารณา ได้แก่ สมการที่ 5.18 ในสมการที่ 5.18 ถ้าค่าพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีค่าเป็นลบให้นำมาบวกเป็นผลรวมของพลังงานในแต่ละช่วงเวลาที่ทำการอัดประจุ (Charge) อย่างต่อเนื่อง และกลายเป็นผลรวมของพลังงานที่ทำการอัดประจุในช่วงเวลาหนึ่ง (i) หากเมื่อมีการเปลี่ยนเป็นการคายประจุ (Discharge) จะทำการเปลี่ยนสมการในการพิจารณา ได้แก่ สมการที่ 5.17 ทำการเก็บข้อมูลการอัดและคายประจุแบบต่อเนื่องในลักษณะนี้ตลอดช่วงเวลาที่ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ทำงาน และทำการเลือกค่าที่มากที่สุดระหว่างพลังงานที่ทำการคายประจุ หรืออัดประจุตามสมการที่ 5.19 เพื่อนำมากำหนดขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ต่อไป

$$E_{batt} = P_{batt} \times t \quad (5.16)$$

$$E_{batt,discharge,i} = \sum_{t=1}^i E_{batt,t}, E_{batt,t} > 0 \quad (5.17)$$

$$E_{batt,charge,i} = \sum_{t=1}^i E_{batt,t}, E_{batt,t} < 0 \quad (5.18)$$

$$E_{batt} = \max(|E_{batt,charge}|, E_{batt,discharge}) \quad (5.19)$$

โดยที่

$E_{batt}$	คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (MWh)
$E_{batt,charge}$	คือ ลักษณะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีการรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบ (MWh)
$E_{batt,discharge}$	คือ ลักษณะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปสู่ระบบ (MWh)
$i$	คือ ผลรวมของช่วงเวลาที่ต้องเนื่องในการอัด หรือคายประจุ

ในการพิจารณาพลังงานสุทธิ หรือขนาดสุดท้ายของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ จะทำการพิจารณาร่วมกับข้อจำกัดของสถานะประจุของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในสมการที่ 5.13 ซึ่งการพิจารณาร่วมกันสามารถทำได้ดังสมการที่ 5.20

$$E_{batt,f} = E_{batt}/SoC_{limit} \quad (5.20)$$

โดยที่

$E_{batt,f}$	คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สุทธิ (MWh)
--------------	---

ในการพิจารณาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับประสิทธิภาพ ซึ่งประสิทธิภาพเป็นหนึ่งในลักษณะสำคัญของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้ในระดับโครงข่ายไฟฟ้า และเป็นตัวกำหนดปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้ระหว่างการทำงาน ในส่วนการพิจารณาประสิทธิภาพจะส่งผลต่อขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ กำหนดให้เรียกขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อทำการพิจารณาประสิทธิภาพว่า ความจุของระบบกักเก็บ

พลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ติดตั้ง (The installed storage capacity) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 5.21

$$E_{storage} = \frac{E_{batt}}{DoD_{max} * \eta} \quad (5.21)$$

โดยที่

$E_{storage}$  คือ ความจุของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ติดตั้ง (MWh)

$DoD_{max}$  คือ ความจุที่มากที่สุดที่ใช้งานได้ (%)

ซึ่งค่า  $DoD_{max}$  คือ ค่าความจุที่สามารถใช้งานได้มากที่สุดสำหรับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้สามารถกล่าวได้ว่า ค่า  $DoD_{max}$  คือ ค่า  $SoC_{limit}$  ดังนั้นสมการที่ 5.21 สามารถกำหนดได้ดังสมการที่ 5.22

$$E_{storage} = \frac{E_{batt,f}}{\eta} \quad (5.22)$$

โดยที่

$\eta$  คือ ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (%)

ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ( $\eta$ ) ดังสมการที่ 5.23 [43]

$$\eta = 85\% \quad (5.23)$$

การคำนวณหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสม โดยทำงานร่วมกับการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนของประเทศไทย โดยต้องการให้ต้นทุนในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบจะต้องต่ำที่สุดเป็นปัญหาแบบเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องใช้โปรแกรมการแก้ปัญหาแบบเชิงเส้นในการคำนวณ

## 5.5 โปรแกรมแก้ปัญหาแบบเป็นเชิงเส้น

เนื่องจากทฤษฎีที่นำเสนอเป็นการคำนวณระบบสมการที่เป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องใช้โปรแกรมการแก้ปัญหาแบบเชิงเส้น (Linear programming solver) ในการแก้ปัญหา โปรแกรมการแก้ปัญหาแบบเป็นเชิงเส้นเป็นวิธีการหาค่าตอบที่มีค่าน้อยที่สุดของฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) ที่มีเงื่อนไขที่เป็นได้ทั้งสมการเชิงเส้น และอสมการเชิงเส้น ดังสมการที่ 5.24

$$\min_x f(x) \text{ such that } \begin{cases} A \cdot x \leq b \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (5.24)$$

โดยที่

f	คือ ฟังก์ชันเป้าหมาย
A	คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของระบบสมการเชิงเส้น
b	คือ เวกเตอร์หลักซึ่งแสดงค่าคงที่ซึ่งอยู่ด้านขวาของระบบสมการเชิงเส้น
$A_{eq}$	คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของระบบสมการเชิงเส้น
$b_{eq}$	คือ เวกเตอร์แสดงค่าคงที่ซึ่งอยู่ด้านขวาของระบบสมการเชิงเส้น
lb	คือ ค่าขอบเขตล่างของเวกเตอร์ตัวแปรอิสระ x
ub	คือ ค่าขอบเขตบนของเวกเตอร์ตัวแปรอิสระ x

โปรแกรมแก้ปัญหาแบบเป็นเชิงเส้น (Linear programming solver) สามารถทำได้โดยการใช้คำสั่ง “LINPROG” ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นหนึ่งในชุดคำสั่งที่อยู่ภายใน Optimization toolbox ซึ่งหลักการการแก้ปัญหาเชิงเส้นสามารถอธิบายถึงเรื่องของการทำ Optimization ให้เข้าใจได้ง่าย การใช้ Optimization toolbox นี้จะช่วยทำให้หาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละปัญหา และสามารถนำมาแก้ไขปัญหาได้อย่างรวดเร็ว และการแก้ปัญหาด้วย LINPROG function นั้นเป็นการหาคำตอบแบบ Local minimum ซึ่งคำตอบที่สามารถหาได้จะอยู่ในขอบเขตที่เรากำหนด และตัวเลือกที่เราระบุ

## 5.6 การพิจารณาต้นทุนต่อหน่วยของระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการคำนวณต้นทุนต่อหน่วย (Levelized Cost of Energy, LCOE) ของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุการใช้งานของสินทรัพย์ที่สร้างขึ้น จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับราคาเฉลี่ยที่สินทรัพย์ที่สร้างจะต้องได้รับในตลาดที่ในช่วงอายุการใช้งานของสินทรัพย์นั้น

ส่วนประกอบของ LCOE จะประกอบด้วยสองส่วนด้วยกัน คือ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง (Capital Expenditures; CAPEX) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (Operating Expenditures; OPEX) ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ส่วนประกอบของ CAPEX และ OPEX จะประกอบด้วยส่วนประกอบของค่าใช้จ่ายในรูปแบบที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.2

Capital Expenditures (CAPEX)
<ul style="list-style-type: none"> <li>Available Payment (AP1)               <ul style="list-style-type: none"> <li>ต้นทุนโครงการ (Capital cost)</li> <li>ค่าใช้จ่ายคงที่ คือ งบลงทุน (Capital cost)</li> <li>ภาษี (TAX)</li> </ul> </li> </ul>
Operating Expenditures (OPEX)
<ul style="list-style-type: none"> <li>Available Payment (AP2)               <ul style="list-style-type: none"> <li>ค่าใช้จ่ายคงที่ คือ งบดำเนินงาน Fixed O&amp;M (FOM)</li> <li>ค่าประกัน (Insurance)</li> </ul> </li> <li>Energy Payment (EP)               <ul style="list-style-type: none"> <li>ค่าใช้จ่ายผันแปร คือ Variable O&amp;M (VOM)</li> <li>ค่าเชื้อเพลิง (Fuel cost)</li> <li>กองทุนพลังงาน (Energy Fund)</li> </ul> </li> </ul>

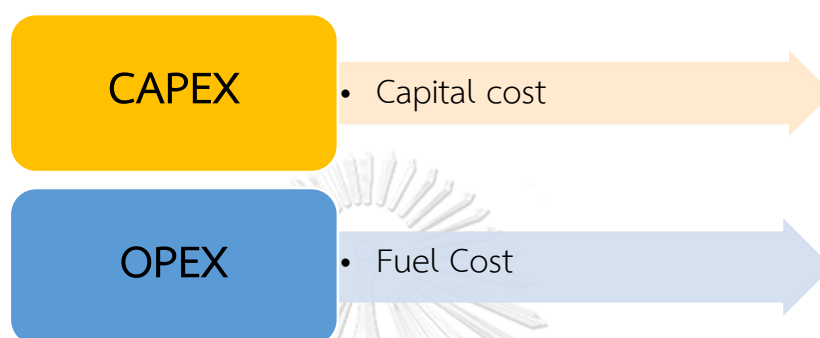
รูปที่ 5.2 ส่วนประกอบของต้นทุนต่อหน่วย

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2565 [41]

จากรูปที่ 5.2 จะสามารถกล่าวได้ว่า CAPEX ประกอบด้วย Available payment (AP1) มีในส่วน of ค่าใช้จ่ายที่คงที่ หรือค่าใช้จ่ายในการลงทุน ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้จะไม่พิจารณาในส่วน of ภาษี และสามารถกล่าวได้ว่า OPEX ประกอบด้วย Available payment (AP2) และ Energy payment (EP) ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ไม่พิจารณาค่าใช้จ่ายคงที่และผันแปร, ค่าประกัน และค่า



กองทุนพลังงาน ซึ่งในส่วนของค่าเชื้อเพลิงที่ ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้กำลังไฟฟ้าที่ได้ทำการผลิตจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนและโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ซึ่งผลิตเข้าระบบ นั้นจะนำกำลังไฟฟ้าในส่วนนี้มาอัดและคายประจุร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ดังนั้นในส่วนค่าเชื้อเพลิงของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะประมาณให้เท่ากับ 0 บาท/kWh ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และนำมาใช้งานในงานวิทยานิพนธ์นี้



รูปที่ 5.3 ส่วนประกอบของ CAPEX และ OPEX

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2565 [41]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในส่วนของ การพิจารณา LCOE ที่แยกออกเป็น 2 ส่วนประกอบ คือ ค่า CAPEX และ OPEX นั้น จะนำมาพิจารณาในรูปแบบที่แตกต่างกัน นั่นคือ ค่า OPEX คือ ต้นทุนการดำเนินงาน มีหน่วยเป็น บาท/kWh และในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้เป็นค่า Operating cost เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ หรือ Economic dispatch ซึ่งวิเคราะห์โดย Optimization toolbox ในโปรแกรม MATLAB ดังที่กล่าวไปข้างต้น ในส่วนของ CAPEX คือ ค่าต้นทุนค่าการติดตั้ง มีหน่วยเป็น บาท/kW, บาท/kWh จะนำไปพิจารณาสำหรับราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

ในส่วนค่า OPEX หรือ Operating Expenditures เป็นค่าต้นทุนการดำเนินงาน ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดว่าจะไม่ทำการพิจารณาค่าต้นทุนการดำเนินงาน และค่าบำรุงรักษา (Operational and maintenance) จะพิจารณาเพียงค่าเชื้อเพลิงของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ได้ทำการผลิตจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนและโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ทำการผลิตเข้าระบบและนำกำลังไฟฟ้าในส่วนนี้มาอัดและคายประจุร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ดังนั้นในส่วนค่าเชื้อเพลิงของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะประมาณให้เท่ากับ 0 บาท/kWh

ในส่วนของ CAPEX หรือ Capital Expenditures หรือต้นทุนการติดตั้ง ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะทำการพิจารณาหลังจากการหาต้นทุนการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับระบบกักเก็บ

พลังงานด้วยแบตเตอรี่ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ (Economic dispatch) โดยทำงานภายใต้เงื่อนไขของ เงื่อนไขของระบบ (The system constraints) และเมื่อมีความจำเป็นต้องใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้น จะต้องทำงานภายใต้เงื่อนไขของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (The battery energy storage system constraints) เมื่อระบบมีการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ จำเป็นต้องมีการพิจารณาต้นทุนการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เนื่องจากเป็นการเพิ่มต้นทุนให้กับระบบ โดยจะนำราคาการติดตั้งไปรวมกับค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ทำงานร่วมกันในตอนแรก โดยจะได้ผลของต้นทุนของระบบ (Operating cost) ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริงและมีความเหมาะสม ดังสมการที่ 5.25

$$Operating\ cost = (Minimize \sum_{t=1}^{48} \sum_{k=1}^n (\frac{C_k}{2} P_{k,t})) + C_{capital} \quad (5.25)$$

โดยที่

$C_{capital}$  คือ ราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (บาท)

ราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Capital cost) คือ ต้นทุนค่าการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และการเลือกใช้งานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะส่งผลต่อต้นทุนของระบบ ซึ่งจะสามารถแบ่งการพิจารณาราคาได้ 2 ส่วนหลัก คือ ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับพลังงานที่สามารถจัดเก็บและปล่อยออกไปได้ อีกส่วนหนึ่ง คือ ขึ้นอยู่กับกำลังสูงสุดที่ทำการอัดและคายประจุเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า โดยทั้งหมดนี้จะถูกควบคุมโดยระบบควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ทำการอัดและคายประจุตามความเหมาะสมกับความต้องการใช้ไฟฟ้า ดังสมการที่ 5.26

$$C_{capital} = C_p P_{max} + C_w E_{storage} \quad (5.26)$$

โดยที่

$P_{max}$  คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละการทดสอบ (MW)

$C_p$  คือ ราคาของกำลังไฟฟ้า (บาท/kW)

$E_{storage}$  คือ ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (MWh)

$C_w$  คือ ราคาของพลังงานไฟฟ้า (บาท/kWh)

ซึ่งจะมีการนำข้อมูลของ CAPEX และ OPEX ที่เป็นข้อมูลล่าสุดในปัจจุบันมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ค่าของต้นทุนในการดำเนินงานของระบบไฟฟ้าที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกับค่าใช้จ่ายจริงมากที่สุด และเมื่อมีการพิจารณาราคาในการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่แล้ว จะนำไปรวมกับผลการพิจารณาต้นทุนการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เพื่อได้ต้นทุนของระบบสุทธิออกมา โดยมีค่าสมบูรณ์ที่สุดในแต่ละการทดสอบ



## บทที่ 6

### การทดสอบและผลการทดสอบ การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

บทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ในการผลิตไฟฟ้า ได้แก่ ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้า ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน แนวทางการทดสอบ เงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ การพิจารณาราคา การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ แผนภาพการทำงาน ผลการทดสอบ การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสรุป

#### 6.1 ข้อมูลที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลที่ใช้ในการนำมาทดสอบจะเป็นข้อมูลที่ได้มีการใช้งานจริงในระบบไฟฟ้าของประเทศไทย หรือเป็นข้อมูลที่ได้ทำการเก็บข้อมูลจากระบบไฟฟ้าของประเทศไทย จะมีดังต่อไปนี้ ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้า ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 6.1.1 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นข้อมูลที่น่ามาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในปี 2562 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้ผ่านการพิจารณาการสั่งการเดินเครื่องโรงไฟฟ้า (Unit commitment) จริงในปี 2562 เป็นการเดินเครื่องเพื่อตอบสนองความต้องการใช้ไฟฟ้า ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดขอบเขตของชนิดข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่น่ามาวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Combined-cycle Generator)
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนชนิดถ่านหิน (Thermal (coal) Generator)

สามารถแบ่งลักษณะของข้อมูลที่น่ามาใช้ได้ตามตารางที่ 6.1 และสามารถแบ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องได้ 2 ประเภทดังแสดงในตารางที่ 6.2 [24]

ตารางที่ 6.1 ลักษณะข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ประเภทของข้อมูล	สรุปรายละเอียดของข้อมูล
1. ราคาซื้อเพลิงต่อหน่วยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ข้อมูลราคาซื้อเพลิงต่อหน่วยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทพลังงานความร้อนชนิดถ่านหิน (Thermal, coal) และ พลังงานความร้อนร่วม (Combined cycle) ในหน่วย “บาท/kWh”
2. พิกัดกำลังผลิต ต่ำสุด-สูงสุด ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ข้อมูลกำลังผลิต สูงสุด-ต่ำสุด ในหน่วยเป็น “MW”
3. ความสามารถในการ เพิ่ม-ลด กำลังผลิต (Ramp Rate)	ความสามารถในการ เพิ่ม-ลด ในหน่วย “MW/30min”

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2562 [24]

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่อง

ประเภทวัน	ประเภทเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (เครื่อง)	พิกัดกำลังผลิตตามสัญญา (MW)
วันทำงาน (Workday)	Thermal	7	7,902.00
	Combined cycle	15	15,681.00
วันหยุด (Holiday)	Thermal	7	7,902.00
	Combined cycle	14	14,081.00

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2562 [24]

### 6.1.2 ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้า

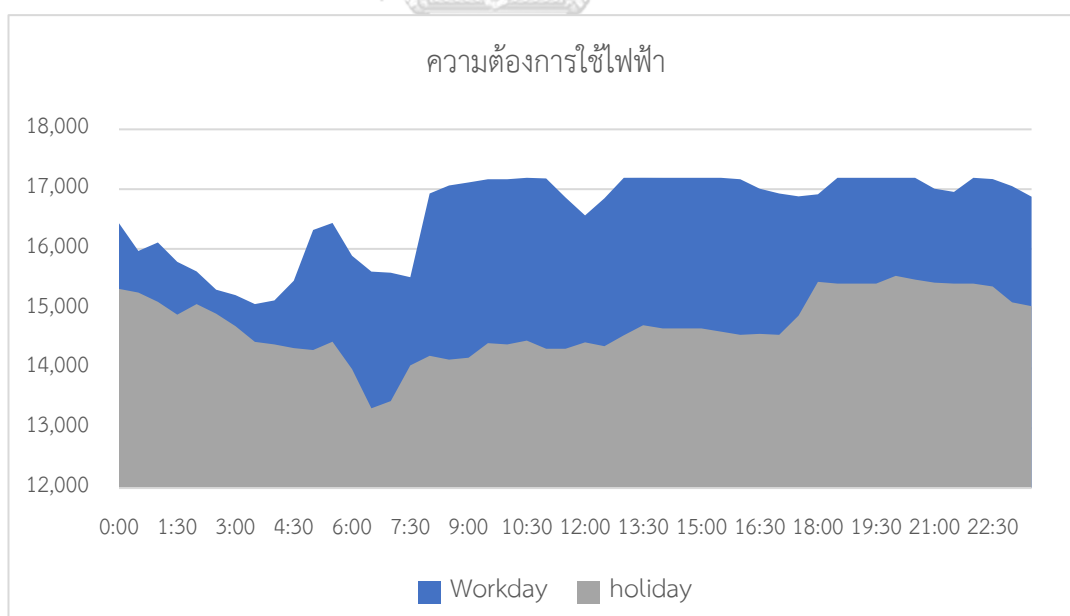
ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าที่นำมาใช้งานเป็นข้อมูลการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจริงที่ทำการตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าในปี 2562 ซึ่งเป็นข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สูงที่สุดในเดือนพฤษภาคม โดยเป็นข้อมูลที่ตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าในเดือนพฤษภาคม ปี 2562 ซึ่งมี 2 ชุดข้อมูล คือ ข้อมูลวันทำงาน และข้อมูลวันหยุด การพิจารณาข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงที่สุดเพื่อเป็นการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์หลังเปิด (Duck curve) และลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่จะนำเข้ามาใช้งานเมื่อระบบมีความจำเป็นที่ต้องใช้งาน ลักษณะข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้า คือ ข้อมูล

ของการตอบสนองจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กและขนาดใหญ่, โรงไฟฟ้าผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก, โรงไฟฟ้าจากประเทศมาเลเซีย และโรงไฟฟ้าจากประเทศลาว ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดขอบเขตของงานของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนไว้ 2 ชนิด คือ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม และโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน (ชนิดถ่านหิน) ดังนั้น จำเป็นที่จะต้องห้กลับกำลังไฟฟ้าที่ไม่เกี่ยวกับขอบเขตของงาน คือ การวิเคราะห์ตามสมการที่ 5.1, 5.2 และนำมาวิเคราะห์ สามารถแบ่งลักษณะของข้อมูลที่สามารถใช้ได้ตามตารางที่ 6.3, ตัวอย่างความต้องการใช้ไฟฟ้าที่ได้จากการตอบสนองจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามชนิดที่กล่าวไปในหัวข้อ 6.1.1 และนำมาวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 6.1 [25]

ตารางที่ 6.3 ลักษณะข้อมูลของความต้องการใช้ไฟฟ้า

ประเภทของข้อมูล	สรุปรายละเอียดของข้อมูล
1. การเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ข้อมูลการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายราย 30 นาที เดือนเมษายน ปี 2562 โดยแบ่งเป็น วันทำงาน (Workday) และ วันหยุด (Holiday) โดยจะมีข้อมูลการเดินเครื่องทั้งหมด 2 ชุด

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2562 [25]



รูปที่ 6.1 ความต้องการใช้ไฟฟ้า

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2562 [25]

### 6.1.3 ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนตามขอบเขตของงาน สามารถแบ่งออกได้เป็น

1. ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
2. ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1. ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นข้อมูลจากคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (ERC) โดยลักษณะข้อมูลเป็นการบันทึกที่ราย 30 นาทีจากระบบผลิตไฟฟ้า Small power plant (SPP) วันที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง (Peak day) ลักษณะข้อมูลเป็นแบบอัตราส่วนระหว่างกำลังผลิตส่วนด้วยกำลังผลิตติดตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 6.2 [26]

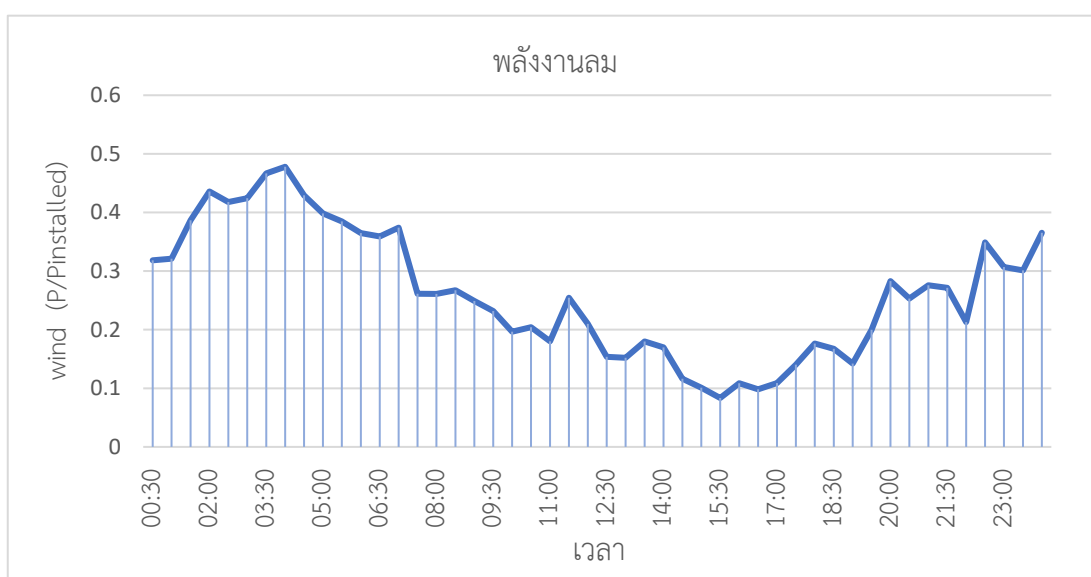


รูปที่ 6.2 ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ที่มา : ERC RE integration, 2562 [26]

## 2. ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเป็นข้อมูลจากคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (ERC) โดยลักษณะข้อมูลเป็นการบันทึกทราย 30 นาทีจากระบบผลิตไฟฟ้า Small power plant (SPP) วันที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง (Peak day) ลักษณะข้อมูลเป็นแบบอัตราส่วนระหว่างกำลังผลิตส่วนด้วยกำลังผลิตติดตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 6.3 [26]



รูปที่ 6.3 ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

ที่มา : ERC RE integration, 2562 [26]

จากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้า เป็นข้อมูลที่ใช้งานจริงในปี 2562 ซึ่งได้รับข้อมูลมาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ดังนั้นการคำนวณการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนจึงได้นำข้อมูลการประมาณการกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแยกตามประเภทเชื้อเพลิงจาก แผน PDP 2018 revision 1 [1] ในส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลมเข้ามาปรับใช้งาน เพื่อคาดการณ์กำลังผลิตที่จะผลิตได้ตามแผน และทำการทดสอบต่อไปอย่างเหมาะสม

## 6.2 แนวทางการทดสอบ

จากข้อมูลที่น่ามาใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้า เป็นข้อมูลที่ใช้งานจริงในปี 2562 ซึ่งได้รับข้อมูลมาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เนื่องจากแผน PDP 2018 revision 1 จากการประมาณการกำลังผลิตไฟฟ้าของพลังงานหมุนเวียน



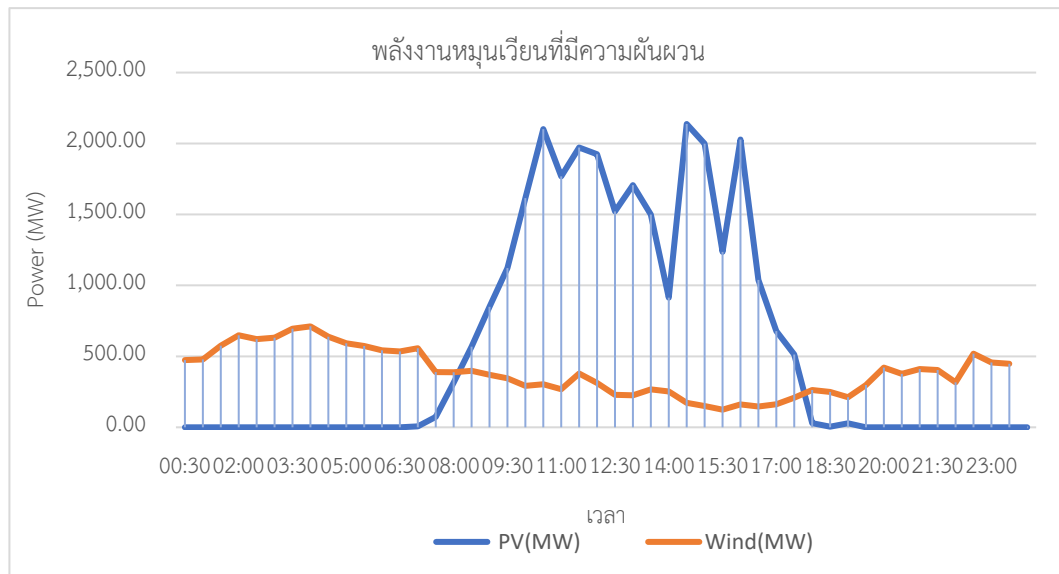
โดยแยกตามประเภทเชื้อเพลิง [1] ซึ่งมีการคาดการณ์กำลังผลิตที่จะเพิ่มเข้ามาในระบบของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 – 2580 มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงมากยิ่งขึ้น

แนวทางในการทดสอบ คือ กำหนดให้ทดสอบจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 10%-150% ของการประมาณการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในปี 2562 เนื่องจากต้องการดูแนวโน้มการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้ในระบบ และขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เพื่อหาต้นทุนการดำเนินการของระบบ

เนื่องจากการนำข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของปี 2562 มาวิเคราะห์ ซึ่งในแผน PDP 2018 revision 1 ปี 2562 มีการประมาณการกำลังผลิตของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน คือ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม ดังตารางที่ 6.4 ซึ่งนำข้อมูลนี้ไปใช้ร่วมกับข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในหัวข้อที่ 6.1.3 เพื่อให้ได้ข้อมูลการประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในปี 2562 และใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการปรับกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นในแต่ละการทดสอบ รูปที่ 6.4 แสดงการประมาณการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมโดยใช้กำลังผลิตตั้งในปี 2562 จากแผน PDP 2018 ตารางที่ 6.4 ข้อมูลพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน จากการประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในแผน PDP 2018

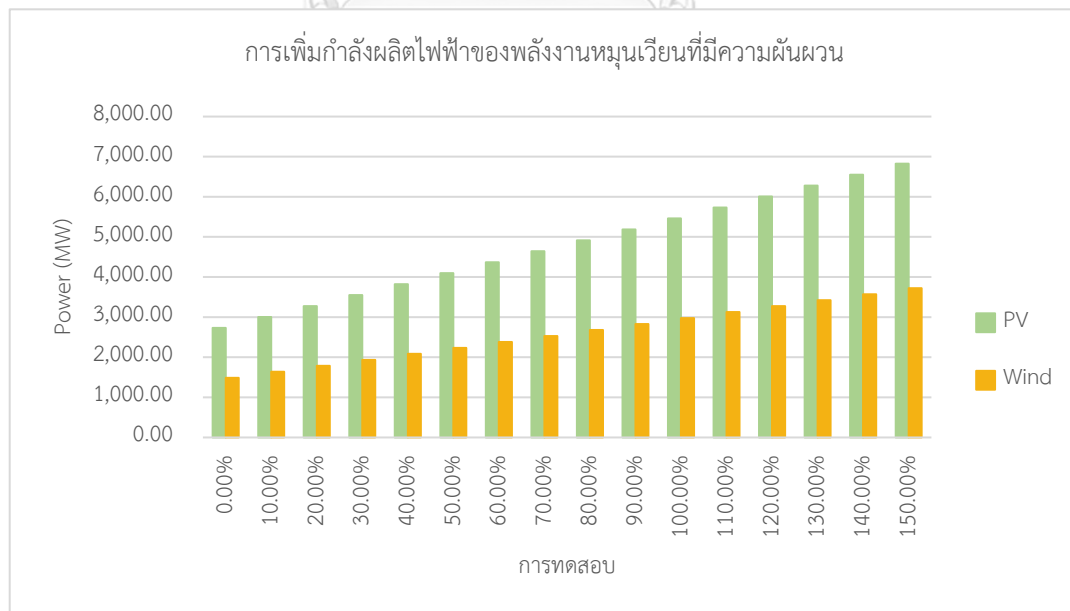
ปี	PV ที่จะติดตั้ง (MW)	Wind ที่จะติดตั้ง (MW)
2562	2,730	1,488

ที่มา : แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย, 2563 [1]



รูปที่ 6.4 พลังงานหมุนเวียนเมื่อพิจารณาจากกำลังผลิตติดตั้งในปี 2562 ตามแผน PDP 2018

พิจารณาการเพิ่มขึ้นของกำลังผลิตไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน การเพิ่มขึ้นของกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนตั้งแต่ 10%-150% โดยทำการปรับค่าเพิ่มจากการประมาณกำลังผลิตในปี 2562 ดังนั้นจะแบ่งการทดสอบเป็น 15 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 6.5 ข้อมูลการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน โดยที่ 0% คือ การประมาณการกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในปี 2562



รูปที่ 6.5 ข้อมูลการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน

ในการพิจารณาราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้น จะพิจารณาจากส่วนประกอบทั้งหมด 2 ส่วนหลักตามสมการที่ 5.26 คือ ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับพลังงานไฟฟ้า และอีกส่วนหนึ่ง คือ กำลังไฟฟ้า โดยที่พลังงานและกำลังไฟฟ้านั้นใช้ในการตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าและการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนตามที่ได้กล่าวไปข้างต้น ซึ่งในการทดสอบจะพิจารณาราคาการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า

### 6.3 เงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

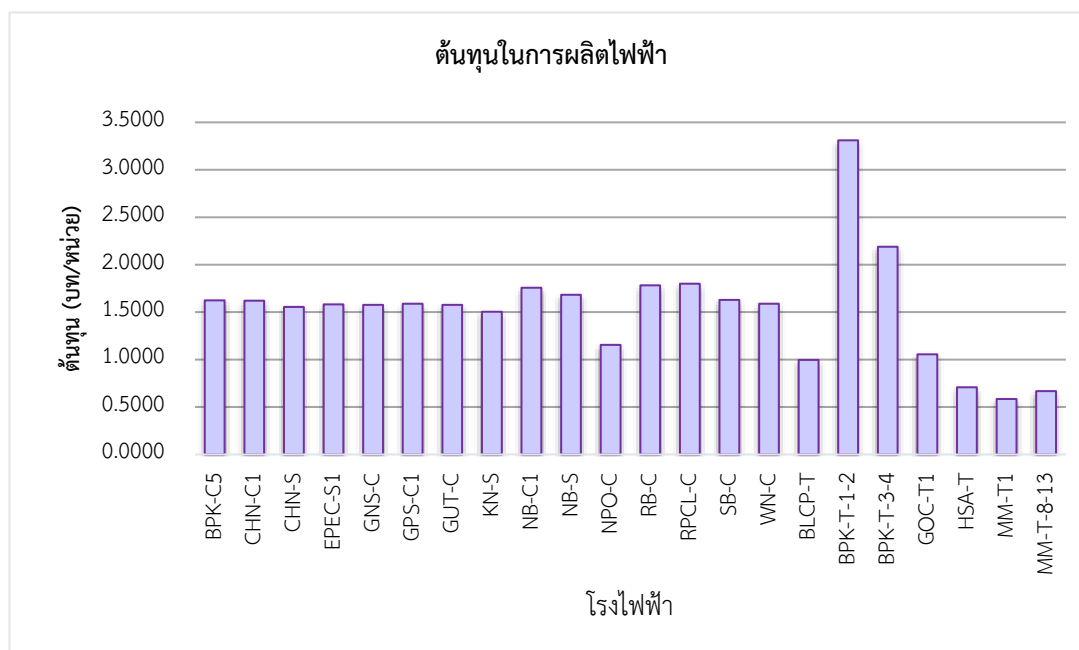
เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ต้องการหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่มีความเหมาะสมในการใช้งานเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา ร่วมกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่เดิมในระบบไฟฟ้าของประเทศไทย และได้มีการกำหนดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ว่า ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบสามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า ณ ขณะนั้นได้ คือ ไม่จำเป็นต้องมีการใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ แต่ถ้าหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าได้ ณ ขณะนั้นได้ จำเป็นต้องมีการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้าสู่ระบบ ดังนั้นเงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบที่เดินเครื่องอยู่จริงนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการนำมาพิจารณา ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 6.3.1 เงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการพิจารณาด้านทุนทางเศรษฐศาสตร์ หรือการจัดสรรกำลังไฟฟ้า (Economic dispatch) คือ การเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะต้องมีการเพิ่มหรือลดกำลังผลิตเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า โดยจะมีแนวทางในการพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องทำการเพิ่มหรือลดดังต่อไปนี้

1. พิจารณาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดมีต้นทุนการเดินเครื่องเหมาะสมต่อการ เพิ่ม หรือลด กำลังการผลิต (เพิ่มการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต้นทุนต่ำ และลดการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต้นทุนสูง)
2. พิจารณาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดสามารถเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตได้เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาที่มีการวิเคราะห์

ซึ่งแสดงตัวอย่างของต้นทุนค่าเชื้อเพลิง หรือต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าดังรูปที่ 6.6 พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินเครื่องจริงของปี 2562 และอยู่ในขอบเขตของงานโดยวันทำงานมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงาน 22 เครื่อง วันหยุดมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานทั้งหมด 21 เครื่อง



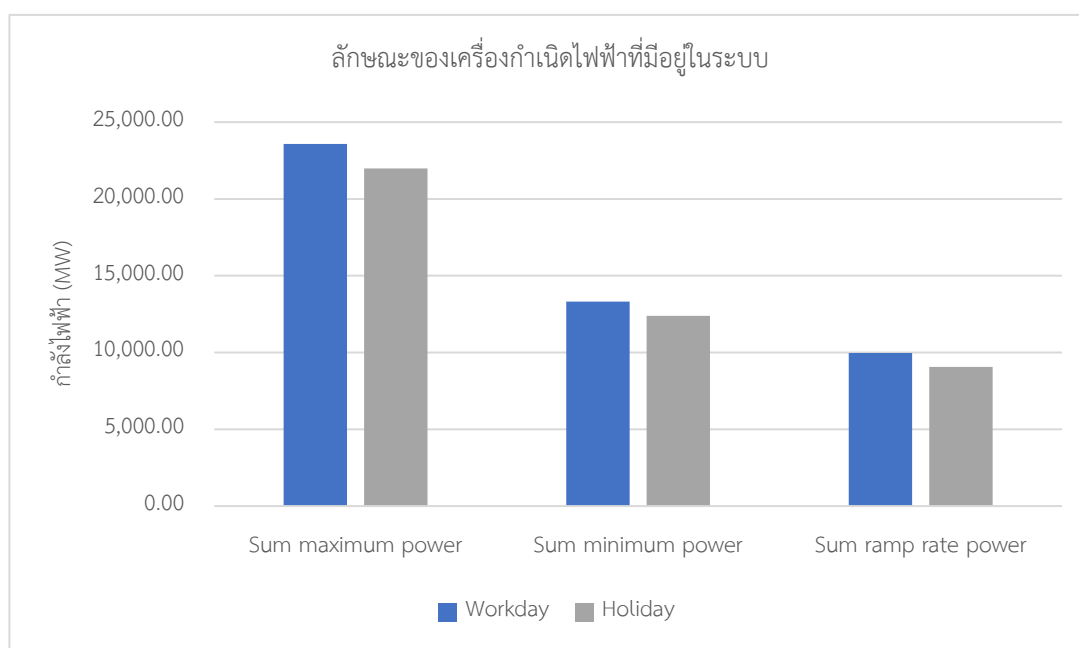
รูปที่ 6.6 ตัวอย่างต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2562 [24]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้การวิเคราะห์นั้นมิ่วัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสม เพื่อนำมาใช้งานร่วมกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบ และพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในระบบไฟฟ้าที่เพิ่มเข้ามาในระบบ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป คือ การรักษาสมดุลของการผลิตไฟฟ้าดังสมการที่ 5.4 ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการกำหนด ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบสามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า ณ ขณะนั้นได้ คือ ไม่จำเป็นต้องใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ แต่ถ้าหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า ณ ขณะนั้นได้ จำเป็นต้องมีการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้าสู่ระบบ โดยจะมีเงื่อนไขการพิจารณาเพื่อหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากลักษณะข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานอยู่ในระบบ และเป็นข้อมูลแผนการเดินเครื่องที่มีอยู่จริงตามหัวข้อ 6.1.1 เงื่อนไขในการหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะมีดังต่อไปนี้ และแสดงในรูปที่ 6.7

1. ผลรวม ความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระบบ ในการเดินเครื่องที่กำลังไฟฟ้าที่มากที่สุด (Maximum power)

2. ผลรวม ความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระบบ ในการเดินเครื่องที่ กำลังไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด (Minimum power)
3. ผลรวม ความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระบบ ในการเปลี่ยนแปลง กำลังไฟฟ้า (Ramp rate power)



รูปที่ 6.7 ลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบ

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2562 [24]

ซึ่งจะนำข้อมูลในรูปที่ 6.7 มาพิจารณาเปรียบเทียบเพื่อหาขนาดของกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ จะมีเงื่อนไขในการพิจารณาเมื่อนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้งานในระบบดังต่อไปนี้

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบ ไม่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป จึงจำเป็นที่จะต้องมีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้งาน เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปได้
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบ ไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีอยู่ ณ ขณะนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้งาน เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าในส่วนที่ขาดไปหลังจากการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบแล้ว

3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบ ตอบสนองได้มากเกินไปเกินความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีอยู่ ณ ขณะนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้งาน เพื่อกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในส่วนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบได้ทำการจัดสรรกำลังไฟฟ้า เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าแล้ว

ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดไว้ หากไม่เข้าเงื่อนไขที่กล่าวมาข้างต้น คือ ไม่จำเป็นต้องใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในการตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า กล่าวคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบสามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า ณ ขณะนั้นได้

### 6.3.2 เงื่อนไขของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

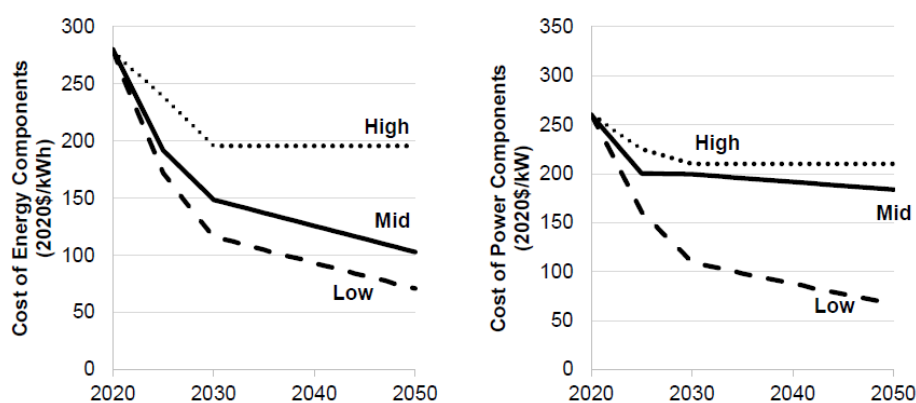
เมื่อระบบไฟฟ้ามีความจำเป็นที่จะต้องนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาปรับใช้งาน จะต้องมีการพิจารณาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งจากการอธิบายการพิจารณาต้นทุนต่อหน่วยของระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในหัวข้อที่ 5.6 ในส่วนค่า OPEX ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้มีการพิจารณาในส่วนค่าดำเนินงานและค่าบำรุงรักษา จึงกำหนดค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ไว้ 1 ส่วนดังต่อไปนี้

1. ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงของกำลังไฟฟ้าที่ทำการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะกำหนดให้เท่ากับ 0 บาทต่อหน่วย เนื่องจากในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้กำลังไฟฟ้าที่ได้ทำการผลิตจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนและโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ซึ่งผลิตเข้าระบบนั้นจะนำกำลังไฟฟ้าในส่วนนี้เข้ามาอัดและคายประจุร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

ดังนั้นต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากับ 0 บาทต่อหน่วย (บาท/kwh) และในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดอัตราค่าใช้จ่ายในการรับและจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าและออกระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ให้เท่ากันเสมอ และในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ทำงานในรูปแบบของการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า (Flexible ramping) เท่านั้น

#### 6.4 การพิจารณาราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

จากการพิจารณาต้นทุนต่อหน่วยของระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ได้ทำการอธิบายหลักการพิจารณาต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในส่วนที่นำมาพิจารณาในงานวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งในส่วนของ CAPEX จะพิจารณาจากค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง ซึ่งการเลือกใช้งานระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นจะส่งผลต่อต้นทุนรวมของระบบ โดยทำการแบ่งการพิจารณาราคาได้ 2 ส่วนหลัก คือ ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับพลังงานที่สามารถจัดเก็บและปล่อยออกไปได้ อีกส่วนหนึ่ง คือ ขึ้นอยู่กับกำลังสูงสุดที่ทำการอัดและคายประจุเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า ดังสมการที่ 5.26 ในส่วนของข้อมูลที่น่ามาใช้เพื่อพิจารณาราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ทั้ง 2 ส่วนนั้น ดังแสดงในรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 แนวโน้มราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

ที่มา : Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage, 2022 [42]

จากในรูป 6.8 แนวโน้มราคาในปี 2564 ราคาของกำลังไฟฟ้า ( $C_p$ ) และราคาของพลังงานไฟฟ้า ( $C_w$ ) ซึ่งราคาของกำลังไฟฟ้าจะมีค่าประมาณ 250 \$/kW ในส่วนราคาของพลังงานไฟฟ้าจะมีค่าประมาณ 270 \$/kW สามารถนำมาพิจารณาเป็นเงินไทยได้ดังแสดงในตารางที่ 6.5 และนำมาใช้ในการวิเคราะห์ในสมการที่ 5.26 ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่อายุการใช้งาน 10 ปี และ 1 ปีมี 365 วัน กำหนดให้ค่าเงินบาท 1 \$ คือ 34 บาท เพื่อนำมาวิเคราะห์ราคาของกำลังและพลังงานไฟฟ้าใน 1 วัน

ตารางที่ 6.5 ราคาของกำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า

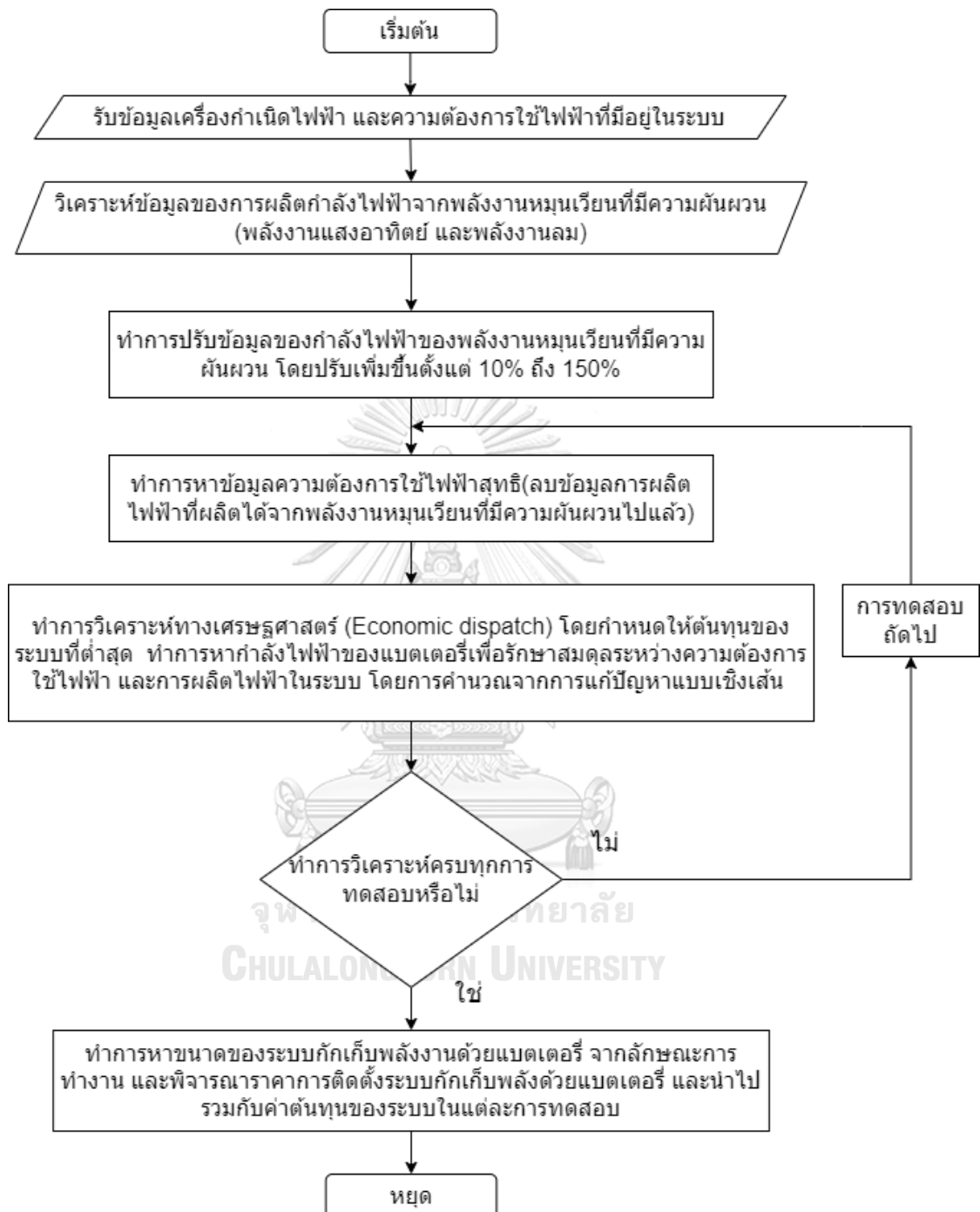
	กำลังไฟฟ้า ( $C_p$ ) (Per kW)	พลังงานไฟฟ้า ( $C_w$ ) (Per kWh)
ราคา (\$)	0.06849	0.07397
ราคา (Baht)	2.3288	2.5151

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ทำงานในรูปแบบของการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า (Flexible ramping) เท่านั้น

### 6.5 แผนภาพการทำงาน

จากข้อมูลที่กล่าวมาทั้งหมดซึ่งมีข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความต้องการใช้ไฟฟ้า และข้อมูลการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน นำมาแบ่งการทดสอบได้ทั้งหมด 15 การทดสอบตามที่กล่าวไปข้างต้น เพื่อต้องการหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสมในแต่ละการทดสอบ โดยมีเงื่อนไขในการทำงานที่ขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และภายใต้เงื่อนไขของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีความจำเป็นที่จะต้องใช้งาน โดยจะได้ค่าต้นทุนของระบบแบบต่ำที่สุด ซึ่งจะต้องรวมราคาการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เมื่อระบบไฟฟ้ามีความจำเป็นต้องใช้งาน ซึ่งจากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปได้เป็นแผนภาพการทำงาน (Flowchart) ได้ดังรูปที่ 6.9





รูปที่ 6.9 แผนภาพการทำงาน

## 6.6 ผลการทดสอบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสนอผลการหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนตั้งแต่ 10%-150% ซึ่งสามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 15 การทดสอบ และในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดไว้ หากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบสามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าได้ ไม่จำเป็นต้องมีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาปรับใช้งาน ผลของการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาปรับใช้แสดง รูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

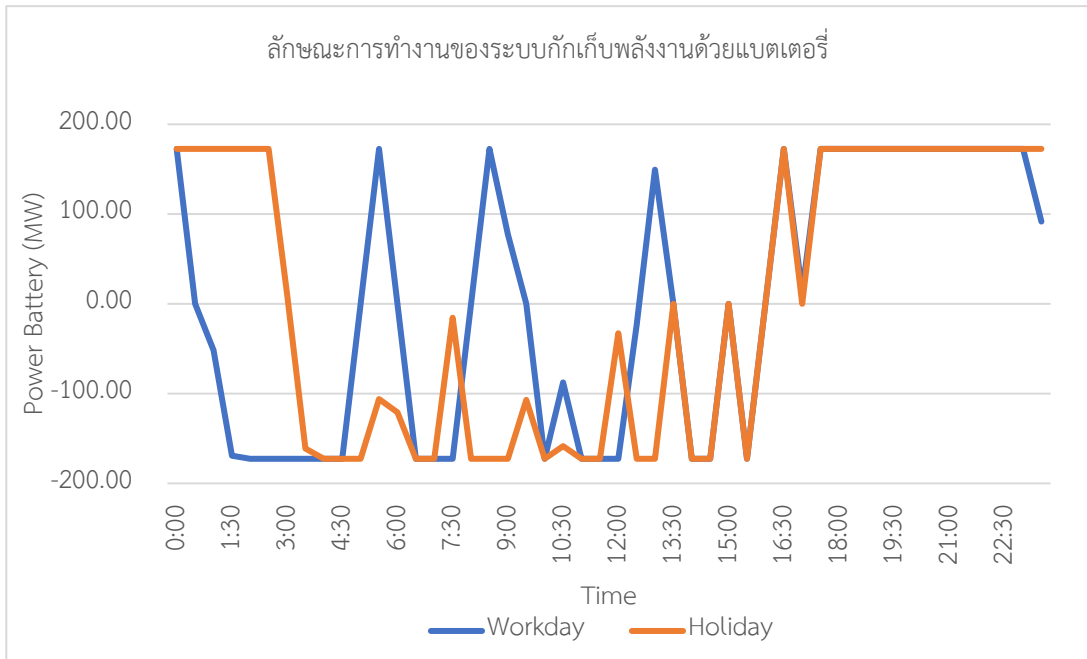
เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนเข้าสู่ระบบมากยิ่งขึ้นจะส่งผลให้มีความจำเป็นต้องใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งในวันทำงานในทุกการทดสอบไม่ส่งผลต่อการกำหนดขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในทุกๆ กรณี แต่ในวันหยุดสามารถกำหนดขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และจำเป็นต้องมีการใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ นำเข้ามาช่วยรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เนื่องจากการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ไม่สามารถแยกกรณีติดตั้งสำหรับวันทำงานหรือวันหยุดได้ จำเป็นต้องมีการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อใช้ในวันทำงานและวันหยุด ดังนั้นจึงต้องนำค่ากำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่มากที่สุดจากทั้งสองกรณี คือ วันทำงาน และวันหยุด ในการนำมาใช้งานสำหรับวันทำงานและวันหยุด ผลสรุปค่ากำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในแต่ละการทดสอบ สามารถแสดงในตารางที่ 6.6

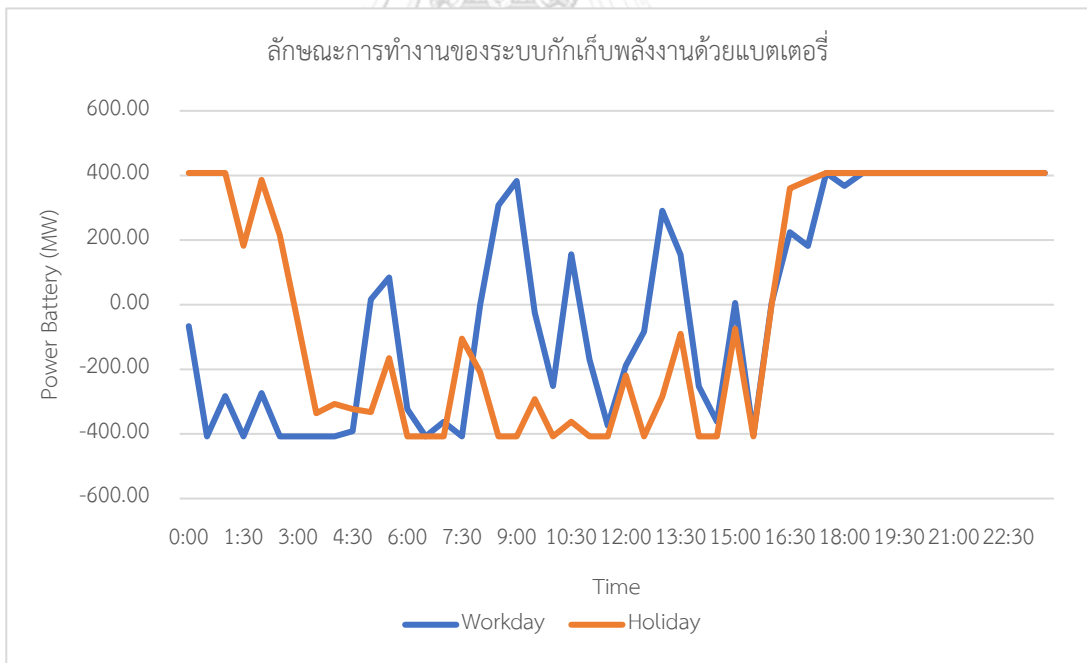
ตารางที่ 6.6 ค่ากำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่นำเข้ามาปรับใช้

การเพิ่มขึ้นของ พลังงานหมุนเวียนที่มี ความผันผวน(%)	กำลังไฟฟ้าของระบบ กักเก็บพลังงานด้วย แบตเตอรี่ (MW)	การเพิ่มขึ้นของ พลังงานหมุนเวียนที่ มีความผันผวน (%)	กำลังไฟฟ้าของระบบกัก เก็บพลังงานด้วย แบตเตอรี่ (MW)
10%	0	90%	172.62
20%	0	100%	407.67
30%	0	110%	642.73
40%	0	120%	877.78
50%	0	130%	1,112.80
60%	0	140%	1,352.00
70%	0	150%	1,592.51
80%	0		

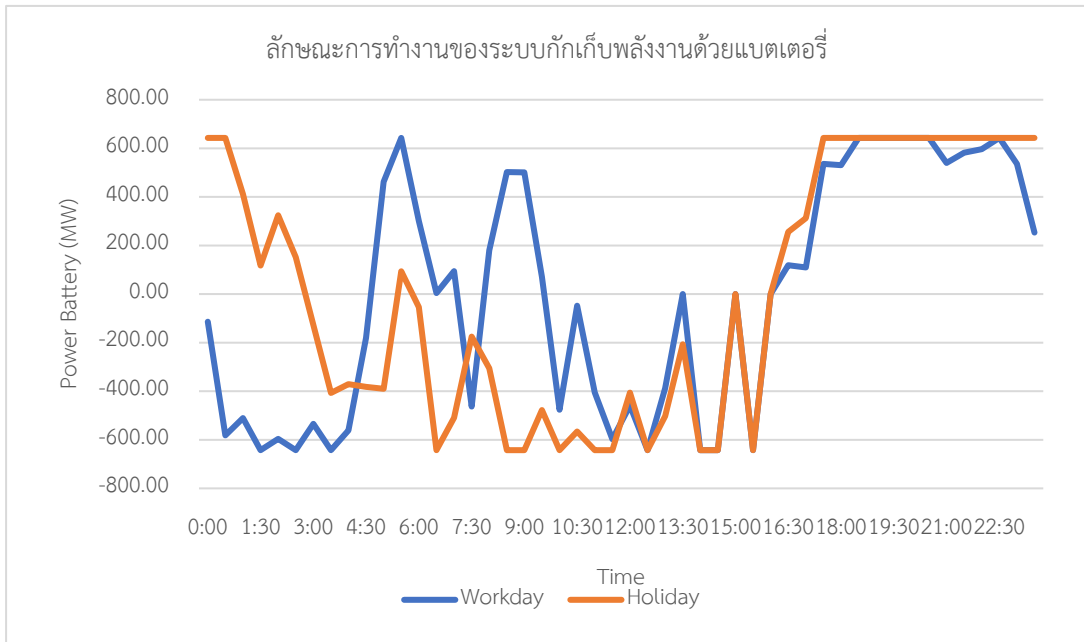
จากผลการทดสอบพบว่าระบบจะมีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน 90% เมื่อเทียบกับการผลิตไฟฟ้าของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในปี 2562 ซึ่งการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อช่วยการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.11 ถึง รูปที่ 6.17



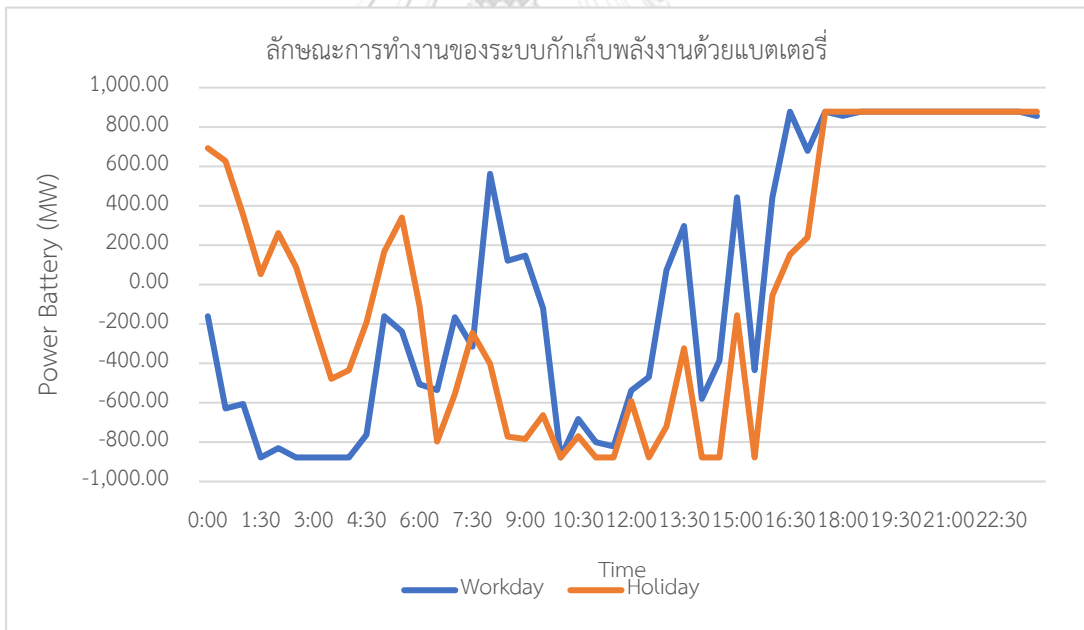
รูปที่ 6.11 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มี ความผันผวนเพิ่มขึ้น 90%



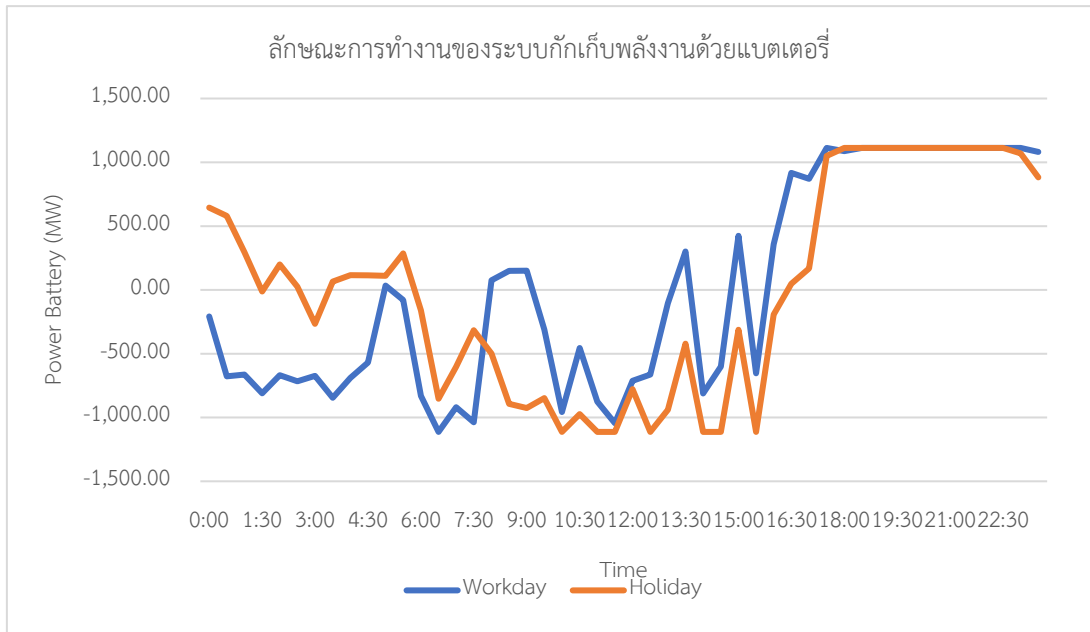
รูปที่ 6.12 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มี ความผันผวนเพิ่มขึ้น 100%



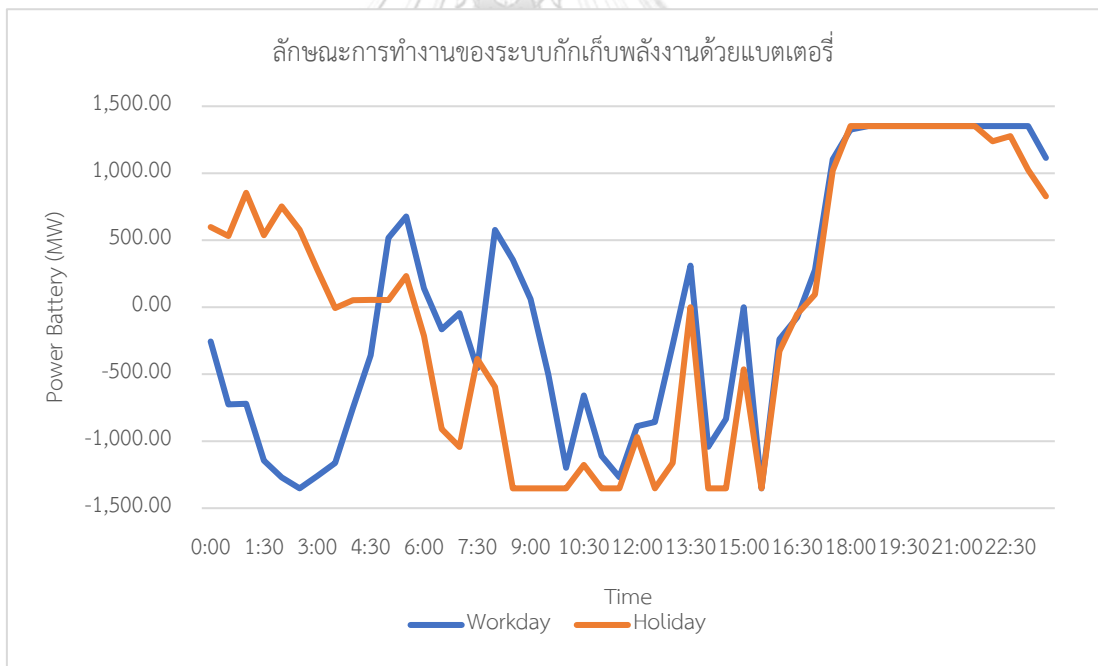
รูปที่ 6.13 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้น 110%



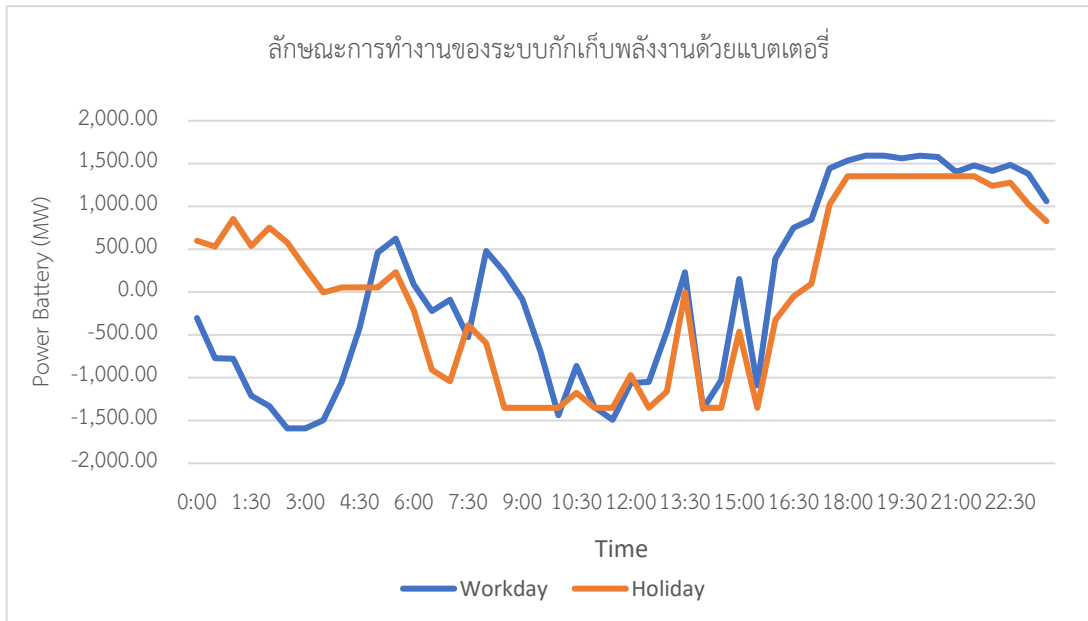
รูปที่ 6.14 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้น 120%



รูปที่ 6.15 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มี ความผันผวนเพิ่มขึ้น 130%



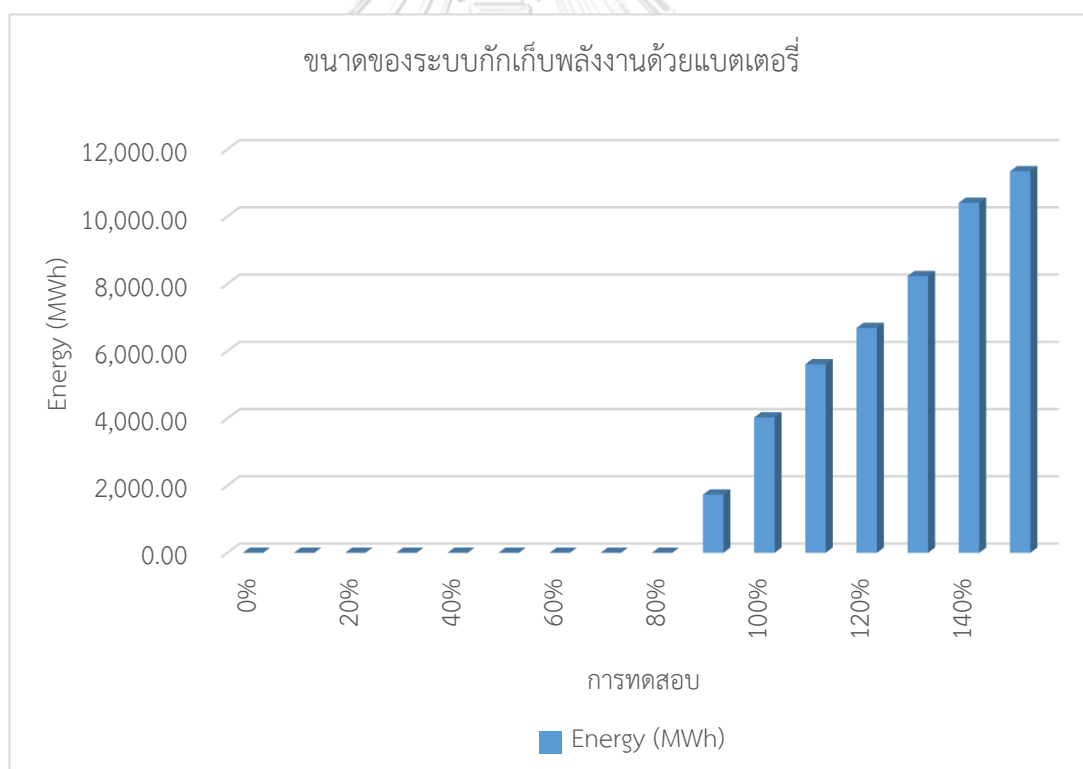
รูปที่ 6.16 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มี ความผันผวนเพิ่มขึ้น 140%



รูปที่ 6.17 การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มี ความผันผวนเพิ่มขึ้น 150%

ความหมายของการแสดงลักษณะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เมื่อกำลังไฟฟ้าระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีค่าเป็นบวก คือ จ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ไปสู่ระบบ ถ้ากำลังไฟฟ้าระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีค่าเป็นลบ คือ รับกำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าสู่ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งจากรูปที่ 6.11 ถึง 6.17 มีการแสดงลักษณะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ทั้งในวันทำงาน และวันหยุด ที่มีกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ค่าเดียวกัน

จากลักษณะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สามารถหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากสมการที่ 5.16, 5.17, 5.18 และ 5.19 โดยดูจากลักษณะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ที่ทำงานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบ ผลของขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่แสดงในรูปที่ 6.18 และตารางที่ 6.7 โดยในตารางจะแสดงเพียงการทดสอบที่มีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้เท่านั้น นั่นคือ ที่การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนที่ 90%



รูปที่ 6.18 ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่



ตารางที่ 6.7 ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียน ที่มีความผันผวน (%)	ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (MWh)
90%	1,731.91
100%	4,025.60
110%	5,606.97
120%	6,687.61
130%	8,229.36
140%	10,409.65
150%	11,345.35

เมื่อมีการกำหนดสถานะการรับจ่ายประจุให้กับขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่  
ที่มากที่สุด ตามสมการที่ 5.13 จะได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.19 และตารางที่ 6.8

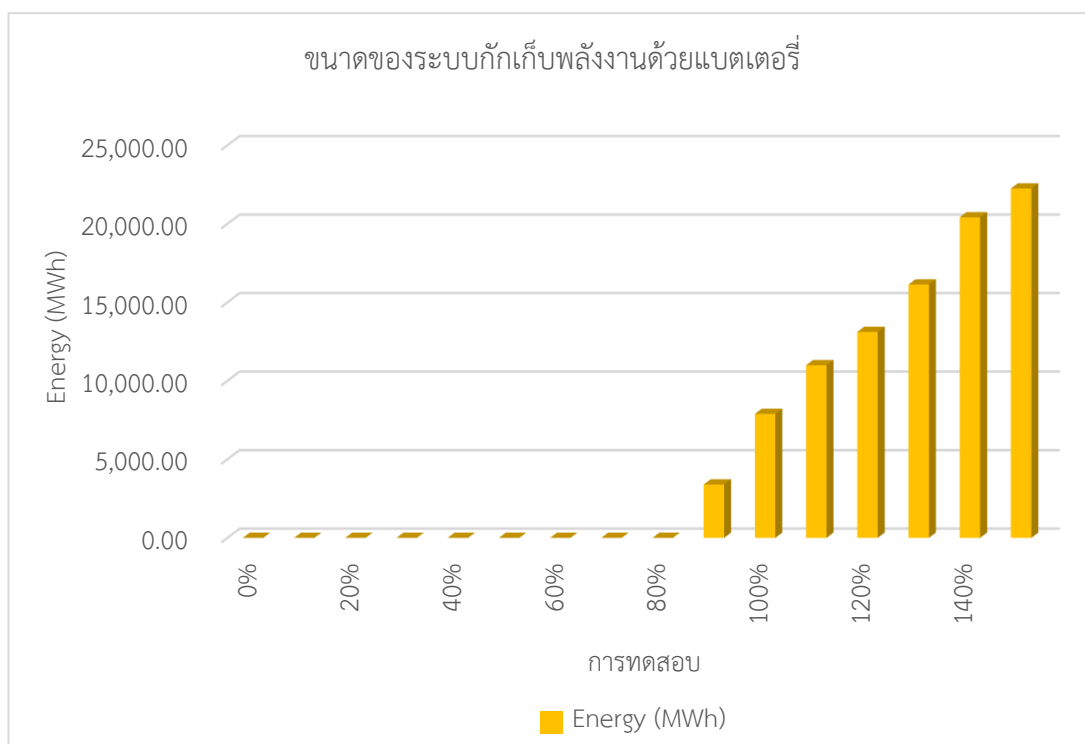


รูปที่ 6.19 ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อกำหนดสถานะการรับและจ่ายประจุ

ตารางที่ 6.8 ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อกำหนดสถานะการรับจ่ายประจุ

การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่ มีความผันผวน (%)	ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (MWh)
90%	2,886.52
100%	6,709.34
110%	9,344.95
120%	11,146.01
130%	13,715.60
140%	17,349.42
150%	18,908.91

เมื่อได้กำหนดสถานะการรับจ่ายประจุให้กับขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่มากที่สุดแล้วนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดประสิทธิภาพให้กับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งจะเป็นการกำหนดประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ตามสมการที่ 5.23 และได้ทำการวิเคราะห์ความจุของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ติดตั้ง ตามสมการที่ 5.22 จะสามารถหาขนาดสุทธิของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่จะนำมาติดตั้งแสดงในรูปที่ 6.20 และตารางที่ 6.9 โดยในตารางจะแสดงเพียงการทดสอบที่มีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้เท่านั้น นั่นคือ ที่การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนที่ 90%



รูปที่ 6.20 ขนาดของความจุของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ติดตั้ง

ตารางที่ 6.9 ขนาดของความจุของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ติดตั้ง

การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน (%)	ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (MWh)
90%	3,395.90
100%	7,893.34
110%	10,994.06
120%	13,112.96
130%	16,136.00
140%	20,411.09
150%	22,245.78

จากการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถหาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของระบบได้จากการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานอยู่ ตามสมการที่ 5.3 และจะทำการพิจารณาราคาการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งในส่วนของกำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าจะวิเคราะห์จากการเพิ่มขึ้นในกรณีก่อนหน้าที่มีการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เปรียบเสมือนเป็นการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะนำผลกำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมาวิเคราะห์ เพื่อหาราคาในการติดตั้ง ( $C_{capital}$ ) นั้น ตามสมการที่ 5.25 ดังแสดงในตารางที่ 6.10, 6.11

ตารางที่ 6.10 การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน (%)	กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (MW)	กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากกรณีก่อนหน้า (MW)
80%	0	0
90%	172.62	172.620
100%	407.70	235.081
110%	642.80	235.100
120%	877.80	235.000
130%	1,112.84	235.040
140%	1,352.10	239.260
150%	1,592.51	240.406

ตารางที่ 6.11 การเพิ่มขึ้นของพลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

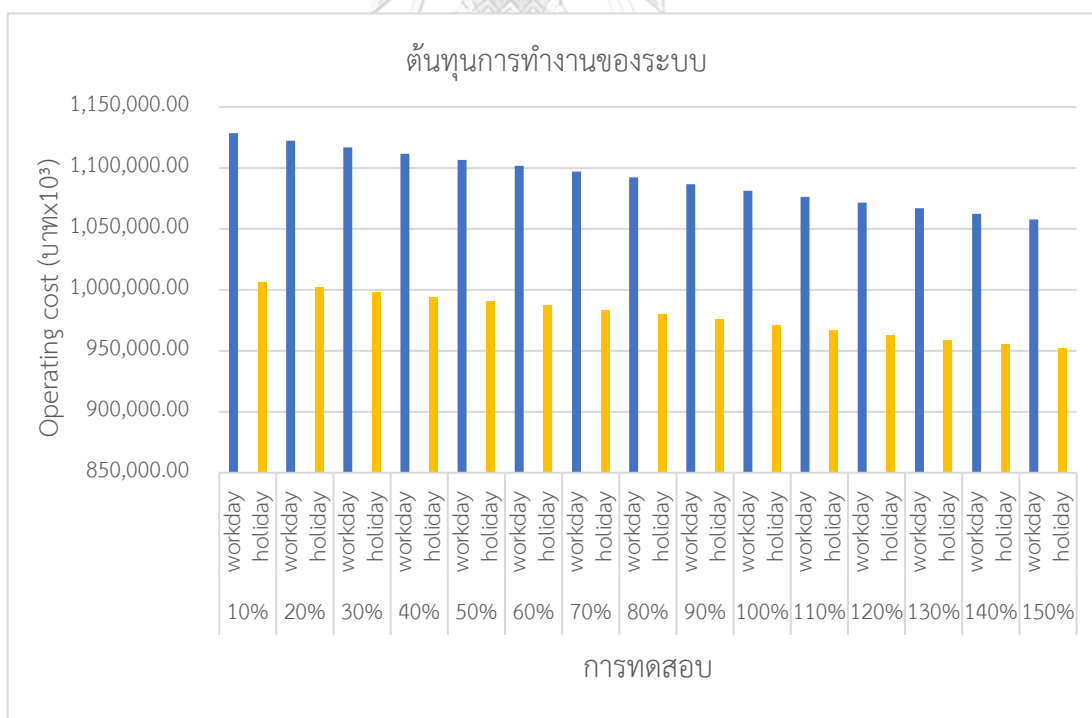
การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน (%)	พลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (MWh)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากกรณีก่อนหน้า (MWh)
80%	0	0
90%	3,395.90	3,395.90
100%	7,893.34	4,497.44
110%	10,994.06	3,100.72
120%	13,112.96	2,118.90
130%	16,136.00	3,023.04
140%	20,411.09	4,275.09
150%	22,245.78	1,834.69

จากตารางที่ 6.10 และตารางที่ 6.11 จะนำข้อมูลการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า ไปพิจารณาเพื่อหาราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ( $C_{capital}$ ) ซึ่งจะนำไปบวกเข้ากับค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องอยู่ ตามแผนการเดินเครื่องเดิม และทำงานร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ตามสมการที่ 5.25

ตารางที่ 6.12 และรูปที่ 6.21 แสดงค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องในแผนการเดินเครื่องเดิม โดยทำงานร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และเมื่อมีการพิจารณาราคาในการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่แล้วนั้น จะนำไปบวกกับค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในตอนแรก เพื่อได้ต้นทุนรวมของระบบ ดังแสดงในตารางที่ 6.13 และแสดงในรูปที่ 6.22 ซึ่งการแสดงต้นทุนในระบบไฟฟ้าจะแสดงเพียงการทดสอบที่มีการเริ่มนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้ ที่ 90% เทียบกับการประมาณกำลังผลิตของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในปี 2562

ตารางที่ 6.12 ต้นทุนการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเริ่มมีการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

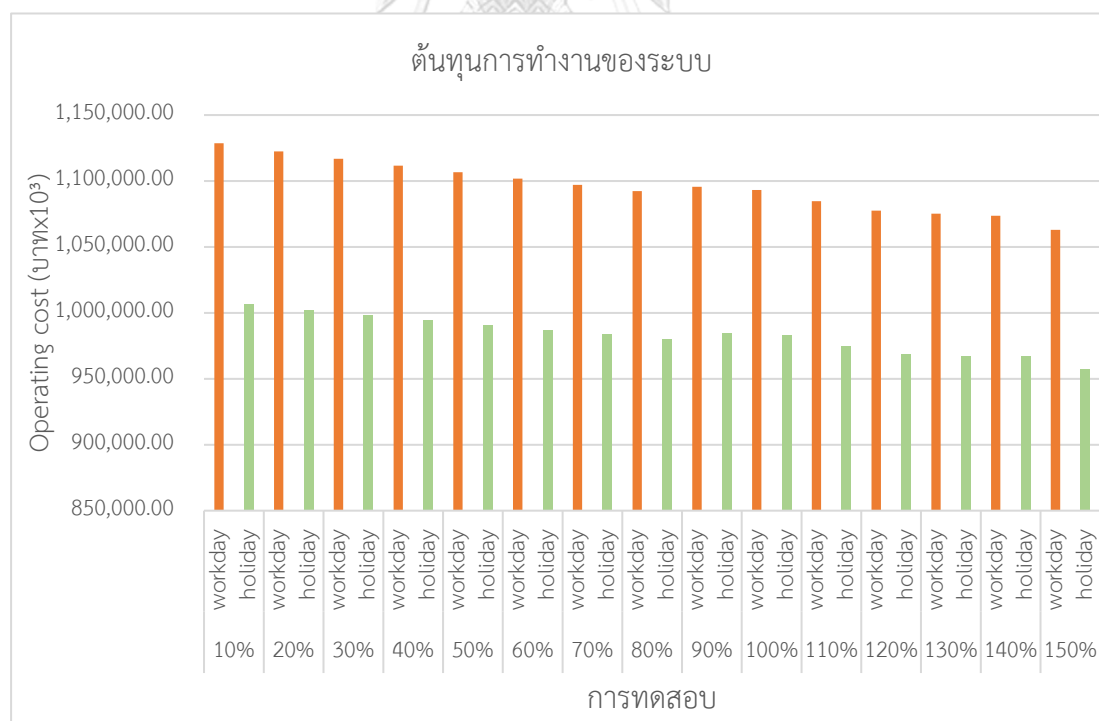
การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน (%)	ต้นทุนการทำงานของระบบ วันทำงาน (บาทx10 <sup>3</sup> )	ต้นทุนการทำงานของระบบ วันหยุด (บาทx10 <sup>3</sup> )
90%	1,086,718.93	975,754.71
100%	1,081,357.03	971,005.12
110%	1,076,371.35	966,609.41
120%	1,071,644.07	962,568.12
130%	1,071,160.581	959,049.40
140%	1,067,356.815	955,756.05
150%	1,057,754.491	952,492.07



รูปที่ 6.21 ต้นทุนการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเริ่มมีการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

ตารางที่ 6.13 ต้นทุนการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเริ่มมีการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และพิจารณาราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน (%)	ต้นทุนการทำงานของระบบ วันทำงาน (บาทx10 <sup>3</sup> )	ต้นทุนการทำงานของระบบ วันหยุด (บาทx10 <sup>3</sup> )
90%	1,095,661.96	984,697.74
100%	1,093,215.94	982,863.93
110%	1,084,717.39	974,955.17
120%	1,077,520.57	968,444.58
130%	1,075,157.67	967,200.01
140%	1,073,687.17	967,065.41
150%	1,062,928.78	957,666.36



รูปที่ 6.22 ต้นทุนการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเริ่มมีการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และพิจารณาราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

จากทั้ง 2 กรณี ได้แก่ กรณีแรกที่ทำการศึกษาเพียงต้นทุนการเดินเครื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องในรูปแบบเดิม และทำงานร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และกรณีที่สอง คือ ทำการพิจารณาราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพิ่มเข้าไป ทำให้ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าและการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนนั้นมีค่าสมบูรณ์มากที่สุด ซึ่งผลต่างระหว่างกรณีแรก และกรณีที่สอง จะแสดงในตารางที่ 6.13 และผลต่างระหว่างทั้งสองกรณีนั้นเพิ่มมาจากราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ( $C_{capital}$ )

ตารางที่ 6.14 ผลต่างของต้นทุนการทำงานเมื่อมีการพิจารณาราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

การทดสอบ	จำนวนต้นทุนที่เพิ่มขึ้นวันทำงาน และวันหยุด (บาท $\times 10^3$ )
90%	8,150.61
100%	11,858.91
110%	8,346.04
120%	5,876.50
130%	8,150.60
140%	11,309.47
150%	5,174.29

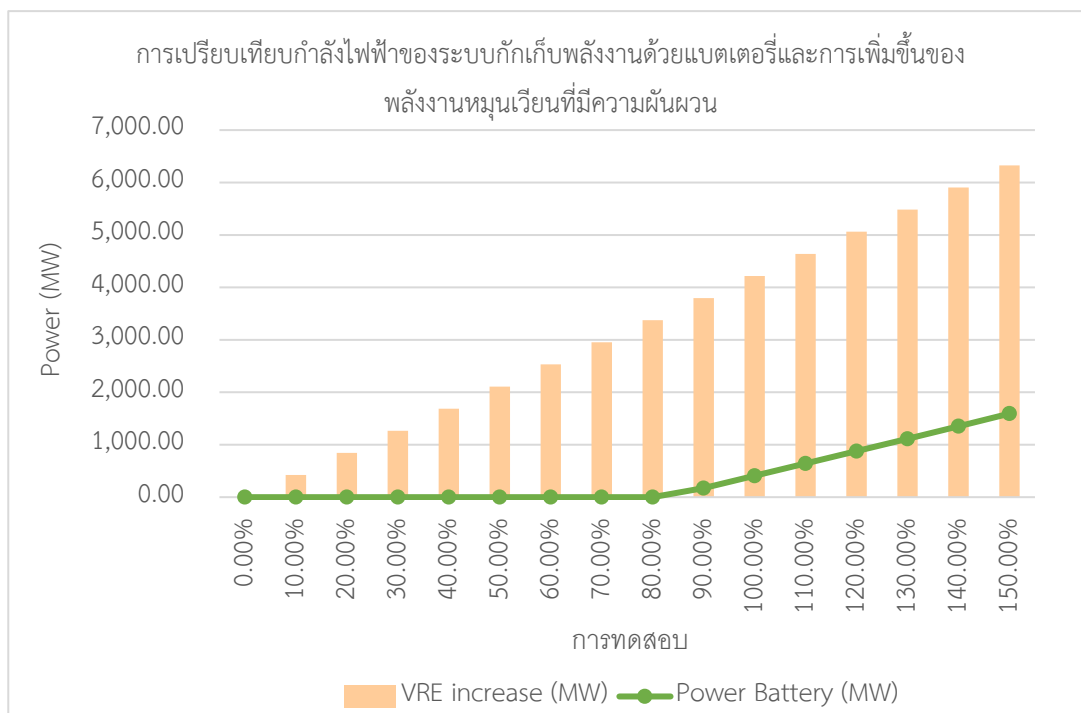
### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อมีการพิจารณาราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพิ่มเข้าไป จะพบว่าการเพิ่มขึ้นมากที่สุดจากทุกๆ การทดสอบ คือ กรณีที่พลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้นจาก 90% เป็น 100% และในส่วนของราคาในการติดตั้งที่ทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง เนื่องจากการติดตั้งกำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าในแต่ละกรณีมีการเพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่เท่ากัน บางกรณีมีการเพิ่มขึ้นมากและบางกรณีมีการเพิ่มขึ้นน้อย ส่งผลให้ราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงจากผลการทดสอบ



## 6.7 วิเคราะห์ผลการทดสอบและสรุป

ตามขั้นตอนและกระบวนการที่ได้แสดงไปดังรูปที่ 6.9 และการนำข้อมูลที่ได้นำไปไว้ในข้อที่ 6.1 มาวิเคราะห์ และมีแนวทางการทดสอบทั้งหมด 15 การทดสอบ โดยมีการกำหนดเงื่อนไขการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มาใช้งาน ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเงื่อนไขของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ จะได้ผลการทดสอบตามรูปที่ 6.10 แสดงผลการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเข้าสู่ระบบ ในส่วนแรก จะทำการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ประเภท คือ วันทำงานและวันหยุด แต่ในการใช้งานจริงในระบบไม่สามารถติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อใช้สำหรับวันทำงานหรือวันหยุดวันใดวันหนึ่งเท่านั้น จึงต้องเลือกค่ากำลังไฟฟ้ามืดที่สุดจากทั้งสองกรณี และนำไปใช้ทั้งวันทำงานและวันหยุด พบว่าจะเริ่มมีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาทำงาน เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนเพิ่มขึ้นจากค่าพลังงานหมุนเวียนที่ผันผวนในปี 2562 ที่ 90% เป็นต้นไป สามารถใช้งานระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบแบบเดิม ผลสรุปของค่ากำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่นำมาใช้งานแสดงในตารางที่ 6.6 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ออกมาได้ คือ เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้นเข้ามาในระบบเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สามารถทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เทียบกับการนำพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเข้าสู่ระบบที่เพิ่มมากขึ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.23



รูปที่ 6.23 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่และการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน

จากผลการทดสอบรูปที่ 6.11 ถึงรูปที่ 6.17 เมื่อมีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาปรับใช้งานตั้งแต่การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนที่ 90% เป็นต้นไป การทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สามารถรักษาสถิติกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าได้ โดยผลที่ได้เป็นผลที่เกิดจากการพิจารณาต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ หรือการจัดสรรกำลังไฟฟ้า (Economic dispatch) ในการหาความเหมาะสมในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในระบบ โดยการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจัดสรรตามต้นทุนการเดินเครื่อง มีการเพิ่มหรือลดกำลังผลิตให้เหมาะสมต่อความต้องการใช้ไฟฟ้านั้นต่ำกว่าความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบเดินกำลังไฟฟ้าต่ำสุดทุกเครื่อง หมายความว่า ในรูปแบบการจัดสรรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเดิม เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดินที่ กำลังไฟฟ้าที่ต่ำสุด (Minimum power) ทุกเครื่องแล้ว กำลังผลิตไฟฟ้าที่ผลิตได้ยังมากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาปรับใช้ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่อง ซึ่งผลิตออกมาที่ กำลังไฟฟ้าต่ำสุด จะทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งความสัมพันธ์ของการทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ สามารถทำงานได้สอดคล้องกัน

และแก้ปัญหาการทำงานของระบบเมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มเข้ามาในระบบในอนาคตได้ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบยังสามารถทำงานได้ในรูปแบบเดิม

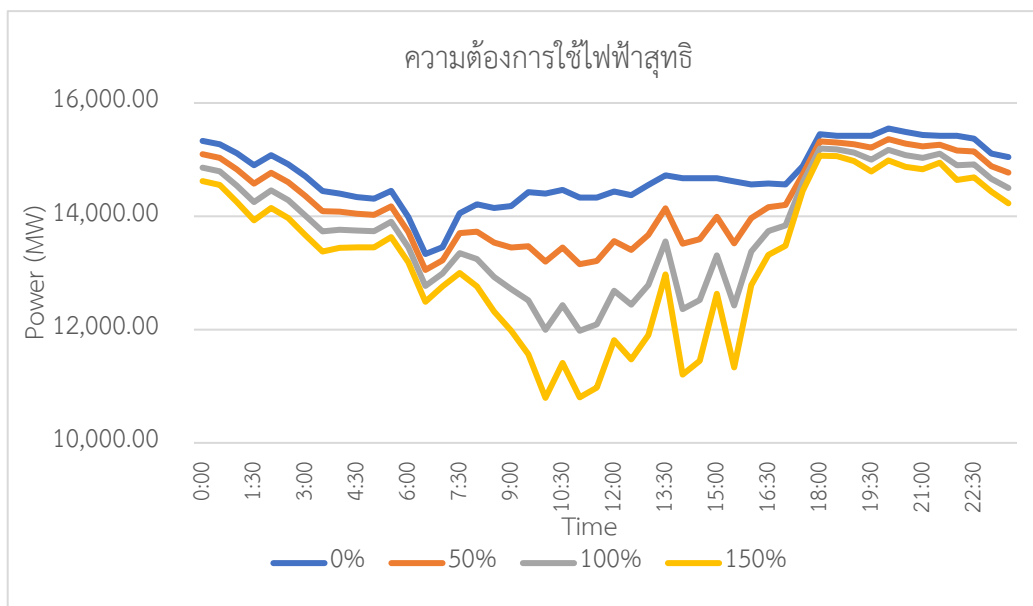
เมื่อมีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะสามารถหาลักษณะการทำงานที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งจะสามารถหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้ดังรูปที่ 6.18 และตารางที่ 6.7 การเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนจะส่งผลต่อขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ โดยมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของรูปที่ 6.19 และตารางที่ 6.8 คือ การกำหนดความสามารถในการอัดหรือคายกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่มากที่สุด เพื่อต้องการยืดอายุการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ให้มีอายุการใช้งานที่ยาวมากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลต่อขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ทำให้มีขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ใหญ่มากขึ้น และเมื่อได้มีการกำหนดประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง นั่นคือ จะมีการสูญเสียพลังงานในระหว่างขั้นตอนการอัดและคายประจุน้อย หลังจากที่มีการกำหนดประสิทธิภาพให้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะส่งผลให้ความจุของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ติดตั้งมีแนวโน้มที่จะใหญ่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.20 และตารางที่ 6.9 ซึ่งการนำขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มาใช้งานนั้น จะส่งผลให้ระบบไฟฟ้าของประเทศไทยทำงานได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ สามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน

การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในแต่ละการทดสอบมีการติดตั้งที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งในส่วนของกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจากส่วนประกอบทั้งสองนี้สามารถนำมาพิจารณาเป็นราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ตามสมการที่ 5.25 เมื่อมีการพิจารณาราคาการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากทุกผลการทดสอบ โดยพิจารณาในส่วนของกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากกรณีก่อนหน้า เปรียบเสมือนการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพิ่มในระบบ เมื่อพิจารณาราคาในการติดตั้งเพิ่มเข้าไปแล้ว พบว่าต้นทุนการทำงานของระบบจะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตาราง 6.12 และ 6.13 และรูปที่ 6.21 และ 6.22 พบว่าแนวโน้มต้นทุนการทำงานของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องแบบเดิมร่วมกับการพิจารณาราคาการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน จะเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ไม่พิจารณาราคาการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในตอนแรกนั้น และจากการทดสอบพบว่าแนวโน้มของราคาต้นทุนการทำงานระบบมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง เนื่องจากการพิจารณาราคาในการติดตั้งขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีการเพิ่มขึ้น

จากกรณีก่อนหน้าแบบเพิ่มขึ้นมากและเพิ่มขึ้นน้อย ส่งผลให้ราคาในการติดตั้งเปลี่ยนแปลงแบบเพิ่มขึ้นและลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบพบว่าพลังงานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นราคาในการติดตั้งในงานวิทยานิพนธ์นี้จะขึ้นอยู่กับส่วนของพลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

จากผลการทดสอบในการหาต้นทุนการทำงานของระบบแบบก่อนพิจารณาราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และหลังการพิจารณาราคาของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ พบว่าจะมีผลต่างของต้นทุนการทำงานของระบบอยู่ค่าประมาณหนึ่ง ดังแสดงในตาราง 6.14 ซึ่งจะมีการเพิ่มขึ้นและลดลงของต้นทุนการทำงานของระบบที่แตกต่างกันในแต่ละการทดสอบ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนมากขึ้น ส่งผลให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิ (Net load) ลดลง ส่งผลให้ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องอยู่แบบเดิมนั้นลดลง แต่การนำมาใช้ของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นจะเพิ่มต้นทุนของระบบในส่วนของการติดตั้ง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของพลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแตกต่างกันออกไป ส่งผลให้ราคาในการติดตั้งมีความแตกต่างกันแบบเพิ่มขึ้นหรือลดลง แต่กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นเพิ่มขึ้นไม่แตกต่างกันมาก ส่งผลให้ราคาการติดตั้งจะเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของตัวแปรพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

การทำงานระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เพื่อตอบสนองความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิ (Net load) ที่มีการหักลบจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนที่เพิ่มขึ้นในแต่ละกรณี พบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในแต่ละการทดสอบ จะส่งผลให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิลดลง (Net load) ดังแสดงในรูปที่ 6.24 ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนในการเดินเครื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวมกับราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีแนวโน้มที่ลดลงและเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ติดตั้งเพิ่มเข้ามาในแต่ละกรณี แสดงในรูปที่ 6.22 และตารางที่ 6.13 แต่ราคาต้นทุนการทำงานของระบบไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้รวมค่าใช้จ่ายในการรับซื้อไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ซึ่งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเป็นผู้รับซื้อกำลังไฟฟ้าในส่วนนี้จากผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small Power Producer; SPP) และ ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer; VSPP)



รูปที่ 6.24 แนวโน้มความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิ

การนำข้อมูลมาวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เป็นข้อมูลในวันที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงที่สุด เนื่องจากต้องการที่จะเห็นลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องอยู่ในรูปแบบเดิม และระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ทำการติดตั้งเข้ามาเพิ่มเติม เพื่อตอบสนองเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน ในวันที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้ามากทั้งในวันทำงานและวันหยุด ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าจะมีการเริ่มการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้นที่ 90% จากการทดสอบสามารถวิเคราะห์เพิ่มเติมได้ตามลักษณะข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ต่อไปในอนาคต เช่น ลักษณะข้อมูลสำหรับในวันที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้ามาก และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนน้อย ความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิ (Net load) ที่เกิดขึ้นจะมีค่ามาก หรือลดลงไม่มาก ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นน้อย ทำให้ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เล็กลงด้วย หรือในวันที่มีแสงแดดมากส่งผลให้ความเข้มแสงมาก พลังงานที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์จะมาก ส่งผลให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิลดลง ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มาก ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะใหญ่ขึ้นตาม หรือในกรณีที่วันที่มีความเร็วลมสูงจะส่งผลให้กังหันลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น ซึ่งทำให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิจะลดลง ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มาก ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะใหญ่ขึ้นตาม หรืออีกกรณีหนึ่งนั่นคือ ในพื้นที่ที่มีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนมาก จะส่งผลให้ลักษณะความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิลดลง และขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะใหญ่มากขึ้น เป็นต้น จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบนี้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลลักษณะความ

ต้องการใช้ไฟฟ้า หรือข้อมูลการผลิตไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ลักษณะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลให้ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน โดยขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ได้กล่าวไปข้างต้น และขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่จะนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ไปใช้งาน แต่ทั้งหมดนี้เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การหาข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าควรมีหลากหลายรูปแบบ เช่น วันที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้ามาก วันที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าน้อย และข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนที่หลายรูปแบบ เช่น วันที่มีแดดมาก หรือมีเมฆมาก หรือวันที่มีลมมากหรือน้อย ความแตกต่างของข้อมูลทีกล่าวมาข้างต้นในรูปแบบ 1 เดือน หรือ 1 ปี จะสามารถหาขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้ในแต่ละรูปแบบที่ต้องการจะทดสอบ เพื่อการใช้งานที่มีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่า เพิ่มความมั่นคงในการผลิตไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้าของประเทศไทย

## บทที่ 7

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบสามารถคำนวณหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสม เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าเมื่อมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้นในแต่ละการทดสอบ โดยที่ลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังเป็นการทำงานในแผนการเดินเครื่องแบบเดิม จะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเข้ามาในระบบที่ 90% ของการประมาณกำลังผลิตตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าในปี 2562 ของประเทศไทย จะมีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้งาน เพื่อให้ระบบสามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าได้ เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน จะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานในรูปแบบปัจจุบันไม่สามารถตอบสนองได้ เพราะการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานในรูปแบบเดิมนั้นมากเกินกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ดังนั้นจำเป็นต้องนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้งานในระบบไฟฟ้า เพื่อให้ระบบนั้นไม่มีความจำเป็นในการเปลี่ยนแปลงแผนการจ่ายโหลดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในแผนเดิม และระบบไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มการเดินเครื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีราคาต้นทุนในการทำงานที่สูง ส่งผลให้ไม่มีค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบเพิ่มมากยิ่งขึ้น และยังสามารถจ่ายโหลดแบบต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด (Minimize operating cost) และจากผลการทดสอบจะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในแต่ละการทดสอบ กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ใหญ่มากขึ้น โดยดูจากลักษณะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องในรูปแบบเดิม และการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสมมาใช้งานจะสามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างเหมาะสม จึงสามารถกล่าวได้ว่าการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามาใช้งานทำให้การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นดีมากยิ่งขึ้น และการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้ามามีขึ้นเป็นการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับระบบไฟฟ้า

นอกจากนั้นการพิจารณาราคาการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นจำเป็นที่จะต้องมีการพิจารณาเนื่องจากการเลือกใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะส่งผลต่อต้นทุนของระบบไฟฟ้า โดยการพิจารณาราคาของการติดตั้งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก คือ ราคาที่ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้า และส่วนที่สอง คือ ราคาที่ขึ้นอยู่กับพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นราคาในการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อระบบมีความจำเป็นที่จะต้องติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใหญ่มากขึ้น ซึ่งจากการทดสอบจะพบว่าในบางการทดสอบมีราคาที่สูงเพิ่มขึ้นและ

ลดลง เนื่องมาจากในแต่ละการทดสอบมีการติดตั้งพลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เพิ่มและลดจากการทดสอบก่อนหน้า ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าผลของราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เพิ่มหรือลดจะขึ้นอยู่กับส่วนที่สอง นั่นคือ พลังงานไฟฟ้า และมีการพิจารณาราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่แล้ว ยังพบว่าแนวโน้มของค่าต้นทุนการทำงานของระบบมีแนวโน้มที่ทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง เนื่องจากมีพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเข้ามาในระบบ ส่งผลให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธินั้นลดลง ทำให้ราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องอยู่แบบเดิมนั้นลดลง แต่เมื่อมีการคำนวณราคาในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เข้าไปด้วยนั้น จะส่งผลให้ต้นทุนการทำงานของระบบมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง แต่อย่างไรก็ตามผลการคำนวณและการทดสอบนี้ได้วิเคราะห์มาจากข้อมูลของรูปแบบการเดินเครื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบแบบเดิม และข้อมูลของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขข้อมูลที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 6.1 และการทดสอบในหัวข้อที่ 6.2 เท่านั้น โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องอยู่ในระบบรูปแบบเดิมจะต้องทำงานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 6.3.1 เท่านั้น อีกทั้งการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่จะติดตั้งเข้ามาในระบบไฟฟ้าจำเป็นที่จะต้องทำงานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 6.3.2 เท่านั้นด้วย ดังนั้นหากมีการนำทฤษฎีที่นำเสนอนี้ไปทดสอบกับข้อมูลที่แตกต่างกันออกไป หรือเงื่อนไขที่แตกต่างกันออกไปจะส่งผลให้ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในแต่ละการทดสอบเปลี่ยนแปลงไปจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้

ข้อเสนอแนะสำหรับการพิจารณาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานในรูปแบบเดิมนั้น เพื่อให้ได้ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่มีความเหมาะสมในระบบอย่างแน่นอน หากมีการพิจารณาแผนการเดินเครื่องที่มีการปรับเป็นข้อมูลที่สมัยใหม่ในแต่ละปี จะทำให้การวิเคราะห์ได้ข้อมูลที่เหมาะสมกับระบบในแต่ละปี อีกทั้งหากระบบมีการเปลี่ยนแปลงแผนการเดินเครื่องใหม่หรือเปลี่ยนแปลงการส่งการเดินเครื่องใหม่นั้น จะส่งผลให้ได้ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น และในทางปฏิบัติอาจจะมีการพิจารณาการให้โรงไฟฟ้าประเภทอื่นๆ จ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น โรงไฟฟ้าพลังน้ำ หรือโรงไฟฟ้าที่สามารถเริ่มเดินเครื่องเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว แต่จะต้องคำนึงถึงต้นทุนค่าเชื้อเพลิงระหว่างโรงไฟฟ้าที่จะเลือกเดินและระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ว่าราคาต้นทุนการเลือกใช้งานโรงไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ชนิดใดเหมาะสมกว่ากัน เพื่อยังคงรักษาต้นทุนการทำงานของระบบให้ต่ำที่สุด และรักษาเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า



ข้อเสนอแนะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในบทบาทของการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้า (Flexible ramping) เท่านั้น แต่ในการใช้งานในระบบยังมีหลากหลายบทบาทสำหรับการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ดังที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 4.6 ซึ่งในแต่ละบทบาทจะส่งผลต่อลักษณะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และส่งผลต่อขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่อีกด้วย และในส่วนของราคาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นในอนาคตอาจจะมีแนวโน้มที่ลดลง ส่งผลให้ราคาสำหรับการติดตั้งลดลงได้ ซึ่งอาจจะทำให้มีความคุ้มค่าในการที่จะติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มากยิ่งขึ้นในอนาคต

ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้า การนำข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีความหลากหลายรูปแบบ เช่น วันที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้ามาก วันที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าน้อย ซึ่งมีการเก็บข้อมูลในรูปแบบ 1 วัน 1 เดือน หรือ 1 ปี นำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ร่วมกับการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิ (Net load) ซึ่งการนำข้อมูลที่หลากหลายมาใช้ในการวิเคราะห์จะสามารถหาขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้ในแต่ละช่วงเวลาที่เรานำมาทดสอบ เช่น 1 วัน 1 เดือน หรือ 1 ปี หรือแต่ละการทดสอบ เพื่อให้การใช้งานที่มีประสิทธิภาพ เพิ่มความมั่นคงให้กับระบบไฟฟ้า

ข้อเสนอแนะสำหรับการพิจารณาระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน นอกจากการพิจารณาการประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าที่ได้ตามข้อมูลจากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยแล้ว หากข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลที่ผลิตได้จริงตามศักยภาพของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในระบบไฟฟ้าของประเทศไทย จะส่งผลให้สามารถหาขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้งานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบได้อย่างเหมาะสมมากยิ่งขึ้น อีกทั้งการประเมินความสามารถในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในแต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกันออกไป เพื่อการวางแผนสำหรับการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในพื้นที่นั้นๆ อาจส่งผลให้ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงไป แต่จะสามารถหาขนาดที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้งานและเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับระบบไฟฟ้าของประเทศไทยได้

เนื่องจากปัจจุบัน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) มีการสนับสนุนโครงการ การผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ โครงการโซลาร์เซลล์ทุ่นลอยน้ำแบบไฮบริด (Hydro-Floating Solar PV Hybrid) ซึ่งจากงานวิทยานิพนธ์ที่ได้ศึกษามาและทำการทดสอบ สามารถนำไปปรับใช้ได้กับโครงการของกฟผ. ได้ใน

อนาคต เมื่อมีการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มาใช้ โดยสามารถประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อกักเก็บพลังงาน และตอบสนองต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งการตอบสนองต่อระบบจะทำงานแบบผสมผสาน (Hybrid) ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ซึ่งตรงตามกับวัตถุประสงค์ของการนำระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสมเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุดของกฟผ.



บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อัจฉรา ยิ้มประไพ
วัน เดือน ปี เกิด	11 มิถุนายน 2538
สถานที่เกิด	สิงห์บุรี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2559 ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2563
ที่อยู่ปัจจุบัน	973/103 ริชพาร์คคอนโด ถนน กรุงเทพ-นนทบุรี แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งนำมาพิจารณาเพื่อหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่มีความเหมาะสม เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในแต่ละการทดสอบ และใช้แผนการเดินเครื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรูปแบบเดิม ซึ่งข้อมูลที่จะกล่าวในบทนี้ คือ ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบ ข้อมูลการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการจัดสรรกำลังการผลิตในอดีต และข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน

### ก. ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเป็นแผนการเดินเครื่องแบบเดิมในเดือนพฤษภาคม ปีพ.ศ. 2562 โดยมีข้อมูลแบ่งเป็น 2 ชุดข้อมูล ได้แก่ วันทำงาน และวันหยุด ซึ่งข้อมูลที่ได้รับมานั้น ได้รับมาจากฝ่ายควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยเครื่องกำเนิดที่นำมาพิจารณาในงานวิทยานิพนธ์นี้ คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน ชนิดถ่านหิน (Thermal, fuel coal) และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Combined-cycle) ข้อมูลประกอบไปด้วย ต้นทุนค่าเชื้อเพลิง กำลังผลิตสูงสุด-ต่ำสุด และความสามารถในการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิต โดยแบ่งข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็น 2 ชุดข้อมูล วันทำงานจะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 22 เครื่อง วันหยุดมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 21 เครื่อง ดังแสดงในตารางที่ ก.1 และ ก.2

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในวันทำงาน

รายชื่อ	ต้นทุนเชื้อเพลิง (บาท/kWh)	กำลังผลิตสูงสุด (MW)	กำลังผลิตต่ำสุด (MW)	ความสามารถในการเร่ง กำลังผลิต (MW/30 min)
BPK-C5	1.6242	710.00	410.00	375.00
CHN-C1	1.6208	710.00	410.00	300.00
CHN-S	1.5545	766.00	464.00	390.00
EPEC-S1	1.5814	350.00	200.00	112.50
GNS-C	1.5762	1,600.00	928.00	900.00
GPS-C1	1.5888	700.00	350.00	225.00
GUT-C	1.5762	1,600.00	928.00	900.00
KN-S	1.5048	930.00	540.00	450.00
NB-C1	1.7568	670.00	430.00	450.00
NB-S	1.6823	828.00	508.00	495.00
NPO-C	1.1552	650.00	360.00	480.00
RB-C	1.7829	2,041.00	1,470.00	405.00
RPCL-C	1.7987	1,400.00	980.00	960.00

รายชื่อ	ต้นทุนเชื้อเพลิง (บาท/kWh)	กำลังผลิตสูงสุด (MW)	กำลังผลิตต่ำสุด (MW)	ความสามารถในการเร่ง กำลังผลิต (MW/30 min)
SB-C	1.6284	1,290.00	885.00	750.00
WN-C	1.5887	1,436.00	790.00	915.00
BLC-P-T	0.9967	1,346.50	322.00	270.00
BPK-T-1-2	3.3112	1,051.00	560.00	150.00
BPK-T-3-4	2.1882	1,152.00	560.00	150.00
GOC-T1	1.0553	660.00	210.00	180.00
HSA-T	0.7073	1,473.00	858.00	702.00
MM-T1	0.5853	600.00	180.00	180.00
MM-T-8-13	0.6667	1,620.00	972.00	225.00

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในวันหยุด

รายชื่อ	ต้นทุนเชื้อเพลิง (บาท/kWh)	กำลังผลิตสูงสุด (MW)	กำลังผลิตต่ำสุด (MW)	ความสามารถในการเร่ง กำลังผลิต (MW/30 min)
BPK-C5	1.6242	710.00	410.00	375.00
CHN-C1	1.6208	710.00	410.00	300.00
CHN-S	1.5545	766.00	464.00	390.00
EPEC-S1	1.5814	350.00	200.00	112.50
GNS-C	1.5762	1,600.00	928.00	900.00
GPS-C1	1.5888	700.00	350.00	225.00
KN-S	1.5048	930.00	540.00	450.00
NB-C1	1.7568	670.00	430.00	450.00
NB-S	1.6823	828.00	508.00	495.00
NPO-C	1.1552	650.00	360.00	480.00
RB-C	1.7829	2,041.00	1,470.00	405.00
RPCL-C	1.7987	1,400.00	980.00	960.00
SB-C	1.6284	1,290.00	885.00	750.00
WN-C	1.5887	1,436.00	790.00	915.00
BLC-P-T	0.9967	1,346.50	322.00	270.00
BPK-T-1-2	3.3112	1,051.00	560.00	150.00
BPK-T-3-4	2.1882	1,152.00	560.00	150.00
GOC-T1	1.0553	660.00	210.00	180.00
HSA-T	0.7073	1,473.00	858.00	702.00
MM-T1	0.5853	600.00	180.00	180.00
MM-T-8-13	0.6667	1,620.00	972.00	225.00

## ข. การเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการจัดสรรกำลังการผลิตในอดีต

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าในเดือนพฤษภาคม ปี พ.ศ. 2562 ซึ่งการจัดสรรกำลังผลิตนี้ใช้เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกสั่งเดินเครื่องจริง และอยู่ในขอบเขตของงาน คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน ชนิดถ่านหิน และพลังงานความร้อนร่วม โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดข้อมูล ได้แก่ วันทำงาน และวันหยุด ซึ่งข้อมูลที่ได้รับมานั้น ได้รับมาจากฝ่ายควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ดังแสดงในตารางที่ ข.1, ข.2, ข.3 และ ข.4

ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างการเดินเครื่อง และการจัดสรรกำลังผลิต (MW) ในวันทำงาน

Row Labels	BLCP-T	BPK-C5	BPK-T	CHN-C1	CHN-S	EPEC-S	GNS-C	GOC-T	GPS-C1	GUT-C1	HSA-T	KN-S
5/29/2019 0:30	1,347	547	330	205	750	200	1,521	660	180	759	1,476	651
5/29/2019 1:00	1,347	428	330	205	464	200	1,521	660	180	759	1,476	593
5/29/2019 1:30	1,347	428	330	205	607	200	1,521	660	180	759	1,476	590
5/29/2019 2:00	1,347	428	330	205	464	200	1,369	660	180	759	1,476	563
5/29/2019 2:30	1,347	428	330	205	464	200	1,217	660	180	759	1,476	553
5/29/2019 3:00	1,347	428	330	205	464	200	1,217	660	180	456	1,476	551
5/29/2019 3:30	1,347	428	330	205	678	200	925	660	180	456	1,476	540
5/29/2019 4:00	1,347	428	330	205	464	200	925	660	180	456	1,476	604
5/29/2019 4:30	1,347	428	330	205	464	200	1,050	660	180	456	1,476	540
5/29/2019 5:00	1,347	428	330	205	464	200	1,217	660	180	608	1,476	551
5/29/2019 5:30	1,347	433	330	205	750	200	1,521	660	180	759	1,476	651
5/29/2019 6:00	1,347	552	330	205	750	200	1,521	660	180	759	1,476	651
5/29/2019 6:30	1,347	428	330	205	589	200	1,369	660	180	759	1,476	540
5/29/2019 7:00	1,347	428	330	205	464	200	1,369	660	180	608	1,476	552
5/29/2019 7:30	1,347	428	330	205	464	200	1,208	660	180	759	1,476	540
5/29/2019 8:00	1,347	428	330	205	464	200	1,369	660	180	456	1,476	608
5/29/2019 8:30	1,347	654	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 9:00	1,347	680	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 9:30	1,347	680	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 10:00	1,347	680	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 10:30	1,347	680	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 11:00	1,347	680	330	205	750	345	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 11:30	1,347	680	330	205	750	333	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 12:00	1,347	600	330	205	750	308	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 12:30	1,347	600	330	205	750	289	1,521	660	180	759	1,476	744
5/29/2019 13:00	1,347	680	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 13:30	1,347	680	330	205	750	345	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 14:00	1,347	680	330	205	750	345	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 14:30	1,347	680	330	205	750	345	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 15:00	1,347	680	330	205	750	345	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 15:30	1,347	680	330	205	750	345	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 16:00	1,347	680	330	205	750	345	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 16:30	1,347	680	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 17:00	1,347	680	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 17:30	1,347	654	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 18:00	1,347	606	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 18:30	1,347	640	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 19:00	1,347	680	330	205	750	345	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 19:30	1,347	680	330	205	750	345	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 20:00	1,347	680	330	205	750	345	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 20:30	1,347	680	330	205	750	345	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 21:00	1,347	680	330	205	750	345	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 21:30	1,347	680	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 22:00	1,347	680	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920



Row Labels	BLCP-T	BPK-C5	BPK-T	CHN-C1	CHN-S	EPEC-S	GNS-C	GOC-T	GPS-C1	GUT-C1	HSA-T	KN-S
5/29/2019 22:30	1,347	680	330	205	750	345	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 23:00	1,347	680	330	205	750	323	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 23:30	1,347	680	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
5/29/2019 0:00	1,347	600	330	205	750	321	1,521	660	180	759	1,476	920
Total	64,632	28,447	15,840	9,825	32,764	13,757	69,512	31,680	8,627	3,104	70,848	38,542

ตารางที่ ข.2 ตัวอย่างการเดินเครื่อง และ การจัดสรรกำลังผลิต (MW) ในวันทำงาน

Row Labels	MM-T1	MM-T8-13	NB-C1	NB-S	NPO-C	RB-C	RPCL-C	SB-C	WN-C4
5/29/2019 0:30	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 1:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 1:30	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 2:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 2:30	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 3:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 3:30	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 4:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 4:30	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 5:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 5:30	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 6:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 6:30	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 7:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 7:30	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 8:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 8:30	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 9:00	540	1,325	666	812	500	1,948	693	703	724
5/29/2019 9:30	540	1,325	666	812	554	1,948	693	703	724
5/29/2019 10:00	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 10:30	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 11:00	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 11:30	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 12:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 12:30	540	1,325	666	706	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 13:00	540	1,325	666	706	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 13:30	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 14:00	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 14:30	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 15:00	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 15:30	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 16:00	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 16:30	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 17:00	540	1,325	666	812	447	1,948	693	703	724
5/29/2019 17:30	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 18:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 18:30	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 19:00	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 19:30	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 20:00	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 20:30	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 21:00	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 21:30	540	1,325	666	812	447	1,948	693	703	724
5/29/2019 22:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/29/2019 22:30	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 23:00	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/29/2019 23:30	540	1,325	666	812	491	1,948	693	703	724
5/29/2019 0:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
Total	25,920	63,600	31,990	38,755	23,204	93,513	33,270	33,744	34,734

ตารางที่ ข.3 ตัวอย่างการเดินเครื่อง และ การจัดสรรกำลังผลิต (MW) ในวันหยุด

Row Labels	BLCP-T	BPK-C5	BPK-T	CHN-C1	CHN-S	EPEC-S	GNS-C	GOC-T	GPS-C1	HSA-T	KN-S
5/26/2019 0:30	1,347	600	330	205	750	251	762	660	180	1,476	744
5/26/2019 1:00	1,347	600	330	205	750	200	762	660	180	1,476	744
5/26/2019 1:30	1,347	536	330	205	750	200	762	660	180	1,476	651
5/26/2019 2:00	1,347	536	330	205	750	200	762	660	180	1,476	651
5/26/2019 2:30	1,347	600	330	205	750	200	762	660	180	1,476	685
5/26/2019 3:00	1,347	579	330	205	750	200	762	660	180	1,476	651
5/26/2019 3:30	1,347	428	330	205	750	200	762	660	180	1,476	566
5/26/2019 4:00	1,347	428	330	205	464	200	762	660	180	1,476	590
5/26/2019 4:30	1,347	428	330	205	464	200	762	660	180	1,476	546
5/26/2019 5:00	1,347	428	330	205	464	200	610	660	180	1,476	637
5/26/2019 5:30	1,347	428	330	205	607	200	762	280	180	1,476	542
5/26/2019 6:00	1,347	428	330	205	635	200	762	280	180	1,476	651
5/26/2019 6:30	1,347	428	330	205	582	200	469	280	180	1,476	540
5/26/2019 7:00	1,347	428	330	205	464	200	469	280	180	1,476	540
5/26/2019 7:30	1,347	428	330	205	464	200	469	280	180	1,476	540
5/26/2019 8:00	1,347	428	330	205	464	200	610	280	180	1,476	580
5/26/2019 8:30	1,143	428	330	205	750	200	762	280	180	1,374	607
5/26/2019 9:00	1,143	428	330	205	750	200	762	280	180	1,270	646
5/26/2019 9:30	1,143	482	330	205	750	200	762	280	180	1,244	651
5/26/2019 10:00	1,143	513	330	205	750	200	762	280	180	1,244	651
5/26/2019 10:30	1,347	500	330	205	750	200	762	280	180	1,244	651
5/26/2019 11:00	1,347	511	330	205	750	200	762	280	180	1,244	651
5/26/2019 11:30	1,347	428	330	205	750	200	762	280	180	1,244	651
5/26/2019 12:00	1,347	428	330	205	750	200	762	280	180	1,244	651
5/26/2019 12:30	1,347	428	330	205	750	200	762	280	180	1,244	651
5/26/2019 13:00	1,347	470	330	205	750	200	762	280	180	1,244	651
5/26/2019 13:30	1,347	482	330	205	750	200	762	280	180	1,361	651
5/26/2019 14:00	1,347	482	330	205	750	200	762	280	180	1,476	651
5/26/2019 14:30	1,347	536	330	205	750	200	762	280	180	1,476	651
5/26/2019 15:00	1,347	536	330	205	750	200	762	280	180	1,476	651
5/26/2019 15:30	1,347	536	330	205	750	200	762	280	180	1,476	651
5/26/2019 16:00	1,347	482	330	205	750	200	762	280	180	1,476	651
5/26/2019 16:30	1,347	428	330	205	750	200	762	280	180	1,476	651
5/26/2019 17:00	1,347	445	330	205	750	200	762	280	180	1,476	651
5/26/2019 17:30	1,347	428	330	205	750	200	762	280	180	1,476	651
5/26/2019 18:00	1,347	536	330	205	750	200	762	280	180	1,476	651
5/26/2019 18:30	1,347	600	330	205	750	212	762	660	180	1,476	744
5/26/2019 19:00	1,347	600	330	205	750	200	762	660	180	1,476	744
5/26/2019 19:30	1,347	600	330	205	750	200	762	660	180	1,476	744
5/26/2019 20:00	1,347	600	330	205	750	200	762	660	180	1,476	744
5/26/2019 20:30	1,347	600	330	205	750	312	762	660	180	1,476	744
5/26/2019 21:00	1,347	600	330	205	750	267	762	660	180	1,476	744
5/26/2019 21:30	1,347	600	330	205	750	214	762	660	180	1,476	744
5/26/2019 22:00	1,347	600	330	205	750	200	762	660	180	1,476	744
5/26/2019 22:30	1,347	600	330	205	750	200	762	660	180	1,476	744
5/26/2019 23:00	1,347	600	330	205	750	200	762	660	180	1,476	694
5/26/2019 23:30	1,347	600	330	205	750	200	762	660	180	1,476	660
5/26/2019 0:00	1,347	536	330	205	750	200	762	660	180	1,476	660
Total	63,819	24,369	15,840	9,825	33,858	9,857	35,376	21,800	8,627	68,569	31,538

ตารางที่ ข.4 ตัวอย่างการเดินเครื่อง และ การจัดสรรกำลังผลิต (MW) ในวันหยุด

Row Labels	MM-T1	MM-T8-13	NB-C1	NB-S	NPO-C	RB-C	RPCL-C	SB-C	WN-C4
5/26/2019 0:30	540	1,325	666	812	616	1,948	693	703	724
5/26/2019 1:00	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/26/2019 1:30	540	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/26/2019 2:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 2:30	540	1,325	666	812	607	1,948	560	703	724
5/26/2019 3:00	540	1,325	666	812	500	1,948	560	703	724

Row Labels	MM-T1	MM-T8-13	NB-C1	NB-S	NPO-C	RB-C	RPCL-C	SB-C	WN-C4
5/26/2019 3:30	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 4:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 4:30	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 5:00	540	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 5:30	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 6:00	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 6:30	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	723
5/26/2019 7:00	690	1,325	430	812	394	1,948	693	703	450
5/26/2019 7:30	690	1,325	522	812	394	1,948	693	703	450
5/26/2019 8:00	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 8:30	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 9:00	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 9:30	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 10:00	690	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/26/2019 10:30	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 11:00	690	1,325	666	812	447	1,948	693	703	724
5/26/2019 11:30	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 12:00	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 12:30	690	1,325	666	706	500	1,948	693	703	724
5/26/2019 13:00	690	1,325	666	706	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 13:30	690	1,325	666	812	447	1,948	693	703	724
5/26/2019 14:00	690	1,325	666	812	500	1,948	693	703	724
5/26/2019 14:30	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 15:00	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 15:30	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 16:00	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 16:30	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 17:00	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 17:30	690	1,325	666	812	394	1,948	693	703	724
5/26/2019 18:00	690	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/26/2019 18:30	690	1,325	666	812	623	1,948	693	703	724
5/26/2019 19:00	690	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/26/2019 19:30	690	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/26/2019 20:00	690	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/26/2019 20:30	690	1,325	666	812	623	1,948	693	703	724
5/26/2019 21:00	690	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/26/2019 21:30	690	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/26/2019 22:00	690	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/26/2019 22:30	690	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/26/2019 23:00	690	1,325	666	812	607	1,948	693	703	724
5/26/2019 23:30	690	1,325	568	812	607	1,948	693	572	724
5/26/2019 0:00	690	1,325	568	812	607	1,948	693	572	724
Total	31,620	63,600	31,412	38,755	23,202	93,513	33,003	33,483	34,186

#### ค. การผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนโดยลักษณะข้อมูล คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ส่วนด้วยกำลังผลิตที่ได้ติดตั้งในวันที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดในปี 2562 - 2563 จากคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (ERC) ดังแสดงในตาราง ค.1 ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลตั้งต้น และในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ข้อมูลจากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1 (PDP 2018 revision 1) โดยนำข้อมูลการประมาณการกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแยกตามประเภทเชื้อเพลิง ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม ในปี 2562

นำไปคูณเข้ากับข้อมูลตั้งต้น เพื่อหาการประมาณการผลิตของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน และเพื่อนำไปใช้ในการปรับกำลังผลิตจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเพิ่มขึ้นในแต่ละการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลอัตราส่วนระหว่างการผลิตไฟฟ้าและการติดตั้งของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน

TIME	PV (P/Pinstalled)	Wind (P/Pinstalled)
00:30	0.000	0.318
01:00	0.000	0.321
01:30	0.000	0.387
02:00	0.000	0.436
02:30	0.000	0.418
03:00	0.000	0.424
03:30	0.000	0.467
04:00	0.000	0.478
04:30	0.000	0.429
05:00	0.000	0.398
05:30	0.000	0.385
06:00	0.000	0.365
06:30	0.000	0.359
07:00	0.002	0.374
07:30	0.027	0.261
08:00	0.115	0.261
08:30	0.208	0.267
09:00	0.311	0.249
09:30	0.411	0.232
10:00	0.592	0.197
10:30	0.770	0.204
11:00	0.648	0.180
11:30	0.722	0.255
12:00	0.705	0.210
12:30	0.557	0.154
13:00	0.625	0.152
13:30	0.549	0.180
14:00	0.334	0.170
14:30	0.783	0.116
15:00	0.732	0.101
15:30	0.453	0.083

TIME	PV (P/Pinstalled)	Wind (P/Pinstalled)
16:00	0.743	0.109
16:30	0.381	0.098
17:00	0.248	0.109
17:30	0.188	0.140
18:00	0.011	0.176
18:30	0.002	0.167
19:00	0.010	0.142
19:30	0.000	0.200
20:00	0.000	0.283
20:30	0.000	0.253
21:00	0.000	0.276
21:30	0.000	0.271
22:00	0.000	0.213
22:30	0.000	0.349
23:00	0.000	0.307
23:30	0.000	0.301
24:00	0.000	0.365

ตารางที่ ค.2 การประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าของพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนในปี 2562

TIME	PV (P/Pinstalled)	Wind (P/Pinstalled)
00:30	0.03	473.92
01:00	0.02	477.79
01:30	0.04	575.21
02:00	0.02	648.31
02:30	0.01	621.82
03:00	0.02	631.63
03:30	0.02	694.55
04:00	0.02	711.24
04:30	0.02	638.59
05:00	0.02	592.64
05:30	0.01	572.50
06:00	0.01	542.95
06:30	0.10	534.32
07:00	6.66	556.68
07:30	73.28	388.92
08:00	314.48	388.55
08:30	568.38	397.67
09:00	849.51	370.50

TIME	PV (P/Pinstalled)	Wind (P/Pinstalled)
09:30	1,122.66	345.13
10:00	1,615.27	292.39
10:30	2,101.18	303.74
11:00	1,768.68	268.03
11:30	1,971.74	378.80
12:00	1,924.22	312.53
12:30	1,521.33	228.53
13:00	1,706.63	226.09
13:30	1,499.03	267.88
14:00	913.16	252.76
14:30	2,137.52	172.93
15:00	1,998.72	150.28
15:30	1,235.74	124.19
16:00	2,028.13	161.45
16:30	1,038.88	146.32
17:00	677.40	162.16
17:30	513.75	208.74
18:00	29.13	262.50
18:30	4.14	249.17
19:00	27.68	211.53
19:30	0.09	297.27
20:00	0.04	420.96
20:30	0.04	376.51
21:00	0.04	410.28
21:30	0.03	403.75
22:00	0.02	317.00
22:30	0.03	519.22
23:00	0.02	456.52
23:30	0.03	448.21
24:00	0.03	543.62

- [1] “แผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้า (Power Plant Development: PDP),” กระทรวงพลังงาน.
- [2] P. Denholm, M. O’connell, G. Brinkman, and J. Jorgenson, “Overgeneration from Solar Energy in California: a Field Guide to the Duck Curve”, NREL, 2015
- [3] International Energy Agency (IEA),” Thailand Renewable Grid Integration Assessment,”2018.
- [4] P. Julianto, A. Soeprijanto and Mardlijah, "Dynamic Economic Load Dispatch by Introducing Compressed Air Energy Storage for Solving Duck Curve," 2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 2020
- [5] H. O. R. Howlader, M. Furukakoi, H. Matayoshi and T. Senjyu, "Duck curve problem solving strategies with thermal unit commitment by introducing pumped storage hydroelectricity & renewable energy," 2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2017
- [6] Reza Hemmati, Hedayat Saboori, “Short-term bulk energy storage system scheduling for load leveling in unit commitment: modeling, optimization, and sensitivity analysis,” Journal of Advanced Research, Volume 7, Issue 3, 2016
- [7] G. Yudhaprawira, Sarjiya and S. P. Hadi, "Unit commitment for power generation system including PV and batteries by Mixed Integer Quadratic Programming," 2012
- [8] Mehdi Jafari, Magnus Korpås, Audun Botterud, “Power system decarbonization: Impacts of energy storage duration and interannual renewables variability,” Renewable Energy, Volume 156, 2020.
- [9] “คู่มือการพัฒนาและการลงทุนการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์,” กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- [10] “โครงการปรับปรุงแผนที่ตั้งศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทยปี 2560,” กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- [11] “ศักยภาพแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย,” กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

- [12] JA solar holdings, *JAM72D20 Catalogue*. (China: JÁ solar holding,2021), Exhibition catalogue.
- [13] “ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมของประเทศไทย,” ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานลม-แสงอาทิตย์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
- [14] อ. พัชพล, "การกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมในระบบผลิตไฟฟ้าโดยคำนึงถึงอัตรา การเปลี่ยนแปลงของโหลดและการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน," วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.
- [15] สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย. (31 Jan 2022). พลังงานลม. Available: <http://reca.or.th/wind/>
- [16] Rehman, S.; Alam, M.M.; Alhems, L.M.; Rafique, M.M. “Horizontal Axis Wind Turbine Blade Design Methodologies for Efficiency Enhancement,” A Review. *Energies* 2018, 11, 506.
- [17] Global Power Synergy Public Company Limited All rights reserved. (2021, 31 Jan 2022). ระบบกักเก็บพลังงาน. Available: <https://www.gpscgroup.com/en/news/985/energy-storage-system-1>
- [18] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2021, 31 Jan 2022). ระบบกักเก็บพลังงาน กฟผ. เพื่อ ความมั่นคงของพลังงานแห่งอนาคต. Available: <https://www.egat.co.th>
- [19] Greening the Grid is supported by the U.S. Agency for International Development (USAID). (31 Jan 2022). Grid-Scale Battery Storage. Available: <https://greeningthegrid.org>
- [20] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท). (2017,31 Jan 2022). แบตเตอรี่ อุปกรณ์ให้พลังงานแห่งอนาคต. Available: <https://emagazine.ipst.ac.th>
- [21] มูลนิธิสถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย. “โครงการศึกษาความเหมาะสมและแนะแนวทาง ในการส่งเสริมอุตสาหกรรมสำรองไฟฟ้าสำหรับ โครงข่ายไฟฟ้าของประเทศ (Grid Energy Storage),” 2562.



- [22] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2019,31 Jan 2022). Utility-scale batteries. Available: <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Utility-scale-batteries>
- [23] J. Dulout, B. Jammes, C. Alonso, A. Anvari-Moghaddam, A. Luna and J. M. Guerrero, "Optimal sizing of a lithium battery energy storage system for grid-connected photovoltaic systems," 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM), 2017.
- [24] Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), "Generation system data of Electricity Generating Authority of Thailand", 2019.
- [25] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.), "แผนการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าปี 2562. ในวันทำงานและวันหยุด", 2562
- [26] ERC RE integration, "VRE generation data of SPP Non-firm in Thailand", 2019-2020.
- [27] Salem, Mohamed. (2016). Design of a pitch angle control system for a horizontal axis small wind turbine. 10.13140/RG.2.2.27324.36487.
- [28] Energy next. (2017,21 Feb 2022). ประเภทของกังหันลม. Available: <https://energynext.co.th/ประเภทของกังหันลม/>
- [29] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (21 Feb 2022). อัตราการใช้ประโยชน์ของโรงไฟฟ้า (Utilization factors). Available: <https://www.egat.co.th/>
- [30] L. Zhou, Y. Zhang, X. Lin, C. Li, Z. Cai and P. Yang, "Optimal Sizing of PV and BESS for a Smart Household Considering Different Price Mechanisms," in IEEE Access, vol. 6, pp. 41050-41059, 2018
- [31] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (31 Jan 2022). แผนที่ความเร็วลมของประเทศไทยที่ระดับความสูง 90 เมตร. Available: [http://www2.dede.go.th/km\\_it/windmap53/windmap90m.html](http://www2.dede.go.th/km_it/windmap53/windmap90m.html)

- [32] Lawder, Matthew & Suthar, Bharatkumar & Northrop, Paul & De, Sumitava & Hoff, C. & Leitemann, Olivia & Crow, M.L. & Santhanagopalan, Shriram & Subramanian, Venkat. (2014). Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications. Proceedings of the IEEE. 102. 1014-1030. 10.1109/JPROC.2014.2317451.
- [33] Integra Source. (2021, 8 Mar 2022). Efficient Energy Management and Energy Saving with a BESS (Battery Energy Storage System). Available: <https://www.integrasources.com/blog/energy-management-and-energy-saving-bess/>
- [34] I. Buchmann. Battery definitions. Available: <http://www.batteryuniversity.com>.
- [35] MIT Electric Vehicle Team. (2008, 8 Mar 2022). A guide to understanding battery specifications. Available: [http://mit.edu/evt/summary\\_battery\\_specifications.pdf](http://mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf)
- [36] E. Ela, V. Diakov, E. Ibanez, and M. Heaney. Impacts of Variability and Uncertainty in Solar Photovoltaic Generation at Multiple Timescales. No. NREL/TP-5500-58274. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2013.
- [37] S Martinez Romero. BRINGING VARIABLE RENEWABLE ENERGY UP TO SCALE Options for Grid Integration Using Natural Gas and Energy Storage. No.006/15. Energy Sector Management Assistance Program. (ESMAP), 2015.
- [38] สำนักนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน. (มีนาคม 2559, 27 เมษายน 2565). ผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชน. Available: <http://www.eppo.go.th/index.php/th/eppo-intranet/itemlist/category/500-2016-03-16-03-42-48#>
- [39] N.K. Noyanbayev, A.J. Forsyth, T. Feehally, Efficiency analysis for a grid-connected battery energy storage system, Materials Today: Proceedings, Volume 5, Issue 11, Part 1, 2018.