

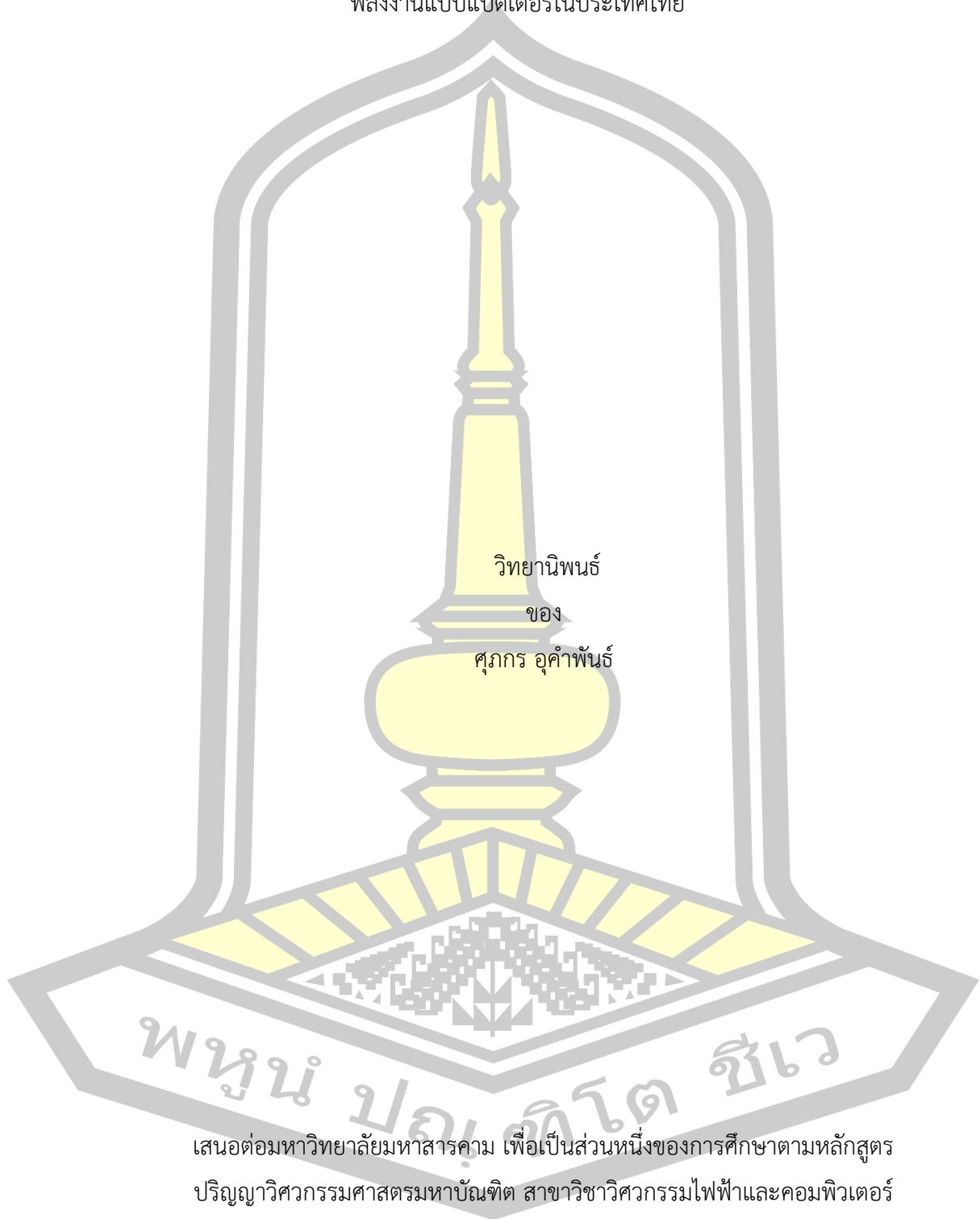
การประเมินผลกระทบของการบูรณาการการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และระบบจัดเก็บ
พลังงานแบบแบตเตอรี่ในประเทศไทย

วิทยานิพนธ์
ของ
ศุภกร อุคำพันธ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มกราคม 2569

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การประเมินผลกระทบของการบูรณาการการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และระบบจัดเก็บ
พลังงานแบบแบตเตอรี่ในประเทศไทย



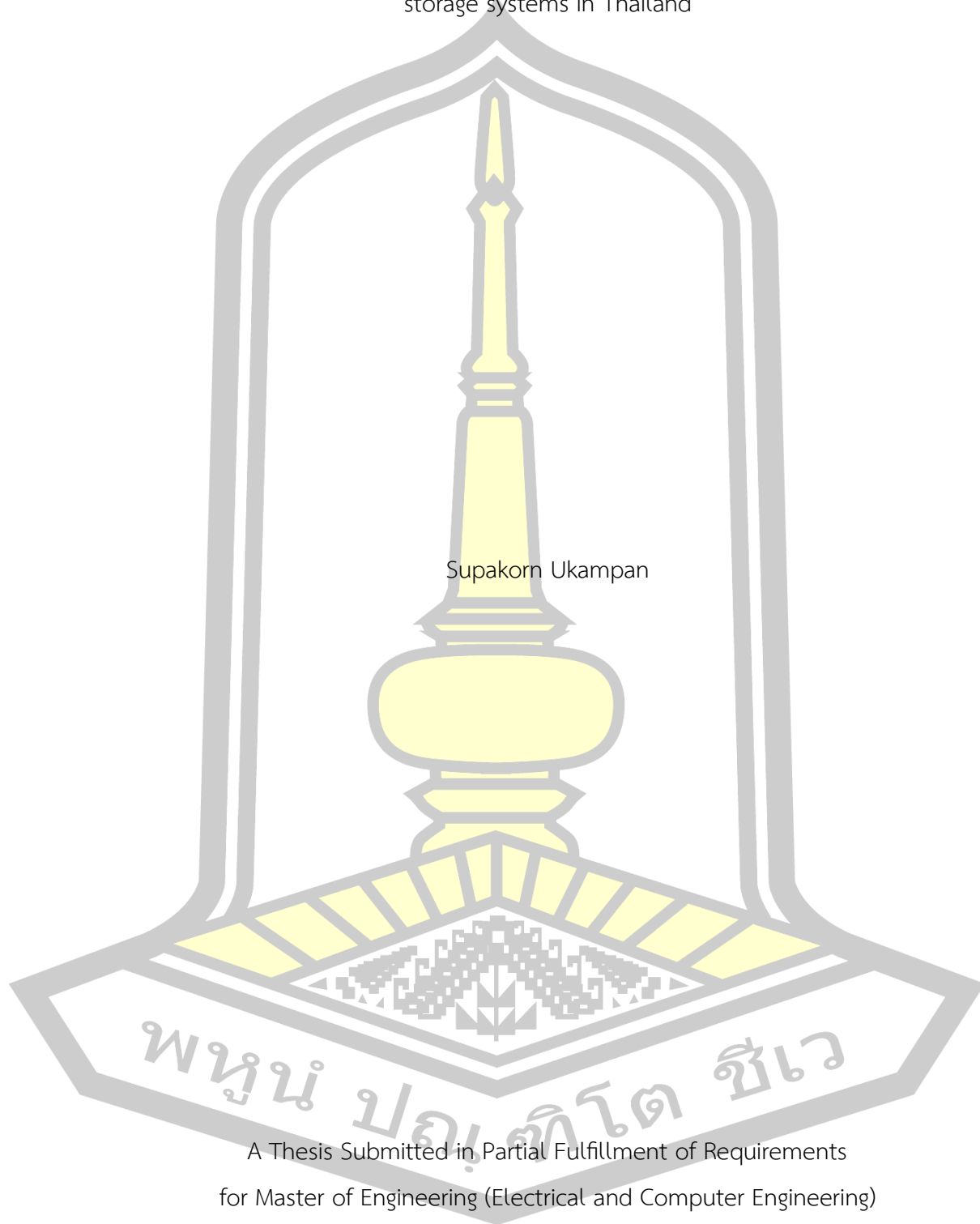
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มกราคม 2569

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Assessing the impacts of integrating solar electricity generation and battery energy
storage systems in Thailand

Supakorn Ukampan



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)

January 2026

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายศุภกร อุคำพันธ์ แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. สุพรรณนิภา วัฒนชะ)

.....กรรมการ

(ศ. ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. จักรมาส เลหาภณิข)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(ผศ. ดร. พลเดช เขาวรัตน์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การประเมินผลกระทบของการบูรณาการการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
และระบบจัดเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในประเทศไทย

ผู้วิจัย ศุภกร อุคำพันธ์

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. สุพรรณนิภา วัฒนะ

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2569

บทคัดย่อ

เพื่อตอบสนองต่อความกังวลด้านความมั่นคงทางพลังงานและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รัฐบาลไทยจึงให้ความสำคัญกับการส่งเสริมพลังงานแสงอาทิตย์และการบูรณาการร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (BESS) ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบของการบูรณาการดังกล่าวในประเทศไทย โดยมุ่งเน้นถึงศักยภาพในการเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงานและการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ งานวิจัยนี้พัฒนา 3 สถานการณ์ ได้แก่ สถานการณ์อ้างอิง (REF) สถานการณ์เพิ่มสัดส่วนพลังงานแสงอาทิตย์ (PVOnly) และสถานการณ์บูรณาการพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน (PVBESS) โดยใช้แบบจำลอง LEAP-NEMO เพื่อประเมินการบูรณาการที่เหมาะสมในระหว่างปี พ.ศ. 2567–2580 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการบูรณาการพลังงานแสงอาทิตย์และ BESS ช่วยเพิ่มความหลากหลายของแหล่งพลังงาน ลดการพึ่งพาการนำเข้าก๊าซธรรมชาติ และสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานปลอดคาร์บอน อย่างไรก็ตาม การบูรณาการยังคงมีความท้าทายด้านต้นทุนแบตเตอรี่ การจัดการซากอุปกรณ์ และข้อจำกัดทางกฎระเบียบ เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ งานวิจัยจึงเสนอแนวทางเชิงกลยุทธ์ ได้แก่ การใช้ประโยชน์จากแนวโน้มราคาที่ลดลงร่วมกับสิทธิประโยชน์ทางภาษี การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานการรีไซเคิล และการปรับปรุงขั้นตอนการอนุญาตติดตั้งให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น มาตรการเหล่านี้จะเป็นแนวทางสำคัญในการส่งเสริมการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนและระบบกักเก็บพลังงานอย่างยั่งยืนในประเทศไทย

คำสำคัญ : ความมั่นคงทางพลังงาน, ศักยภาพในการลดคาร์บอน, ภาคไฟฟ้า, แนวทางเชิงกลยุทธ์, ความเป็นกลางทางคาร์บอน

TITLE Assessing the impacts of integrating solar electricity generation and battery energy storage systems in Thailand

AUTHOR Supakorn Ukampan

ADVISORS Associate Professor Supannika Wattana , Ph.D.

DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Electrical and Computer Engineering

UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2026

ABSTRACT

Driven by concerns over energy security and climate change, the Thai government has prioritized the deployment of solar power integrated with Battery Energy Storage Systems (BESS). This study aims to assess the impacts of solar and BESS integration in Thailand, focusing on its potential to enhance energy security and reduce CO₂ emissions. Three scenarios were developed for analysis: the Reference (REF), the Solar Power Only (PVOnly), and the Solar Power with Battery Energy Storage System (PVBESS). The LEAP-NEMO model was applied to evaluate the optimal integration of solar power and BESS during 2024–2037. The results show that solar and BESS integration enhances energy diversification, reduces dependence on imported natural gas, and accelerates the transition toward a decarbonized power sector. However, several challenges remain, including high battery costs, end-of-life management, and regulatory barriers. To address these issues, this study proposes strategic measures such as leveraging declining battery prices with tax incentives, developing recycling infrastructure, and streamlining installation approval procedures. Implementing these strategies provides a strong pathway toward sustainable renewable energy and energy storage development in Thailand.

Keyword : Energy security, Strategic Pathway, Carbon Neutrality, Carbon Reduction

กิตติกรรมประกาศ

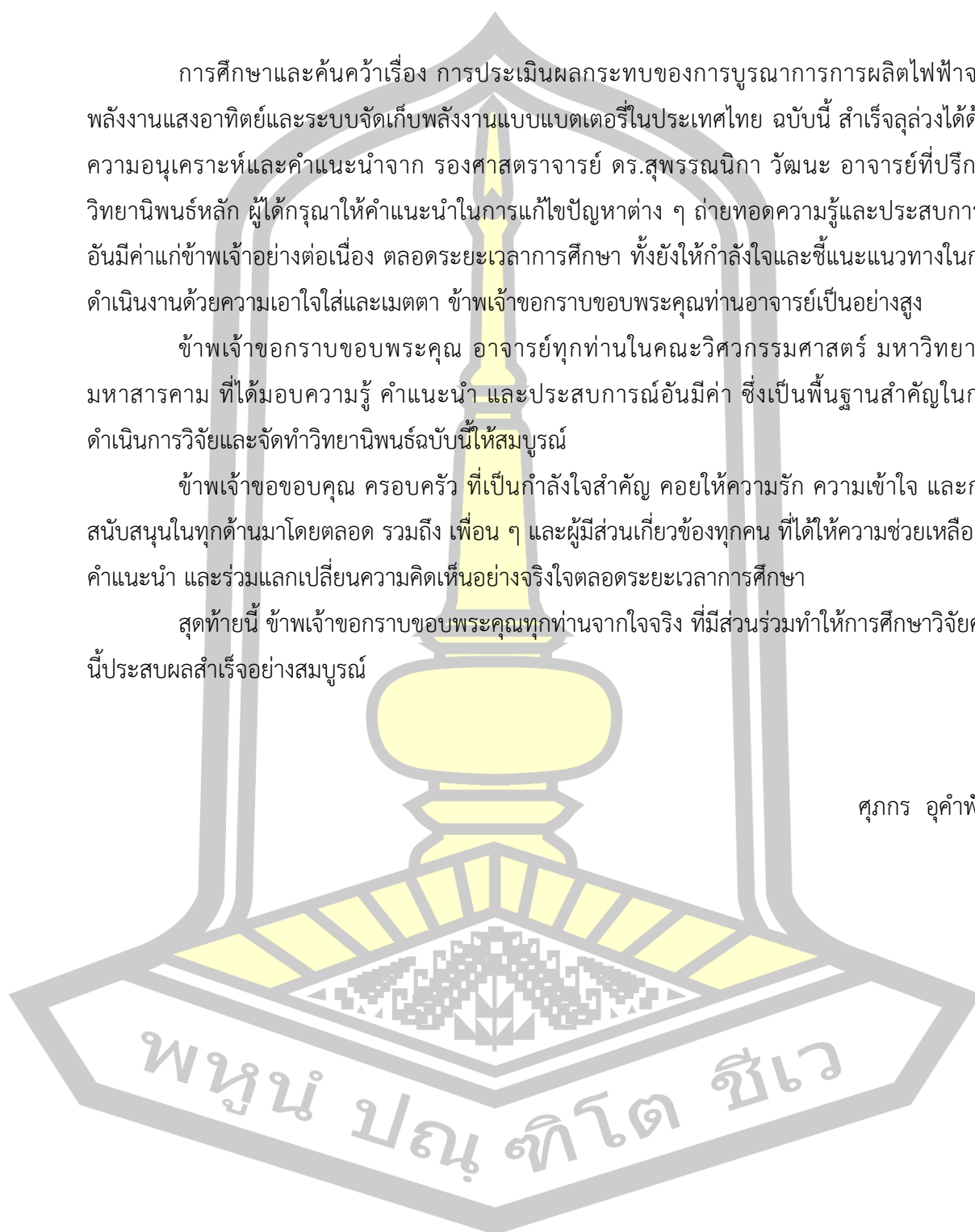
การศึกษาและค้นคว้าเรื่อง การประเมินผลกระทบของการบูรณาการการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และระบบจัดเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในประเทศไทย ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วย ความอนุเคราะห์และคำแนะนำจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณนิภา วัฒนะ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก ผู้ได้กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาดังต่าง ๆ ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ อันมีค่าแก่ข้าพเจ้าอย่างต่อเนื่อง ตลอดระยะเวลาการศึกษา ทั้งยังให้กำลังใจและชี้แนะแนวทางในการ ดำเนินงานด้วยความเอาใจใส่และเมตตา ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม ที่ได้มอบความรู้ คำแนะนำ และประสบการณ์อันมีค่า ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการ ดำเนินการวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ครอบครัว ที่เป็นกำลังใจสำคัญ คอยให้ความรัก ความเข้าใจ และการ สนับสนุนในทุกด้านมาโดยตลอด รวมถึง เพื่อน ๆ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกคน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้ คำแนะนำ และร่วมแลกเปลี่ยนความคิดเห็นอย่างจริงจังตลอดระยะเวลาการศึกษา

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณทุกท่านจากใจจริง ที่มีส่วนร่วมทำให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้ ประสบผลสำเร็จอย่างสมบูรณ์

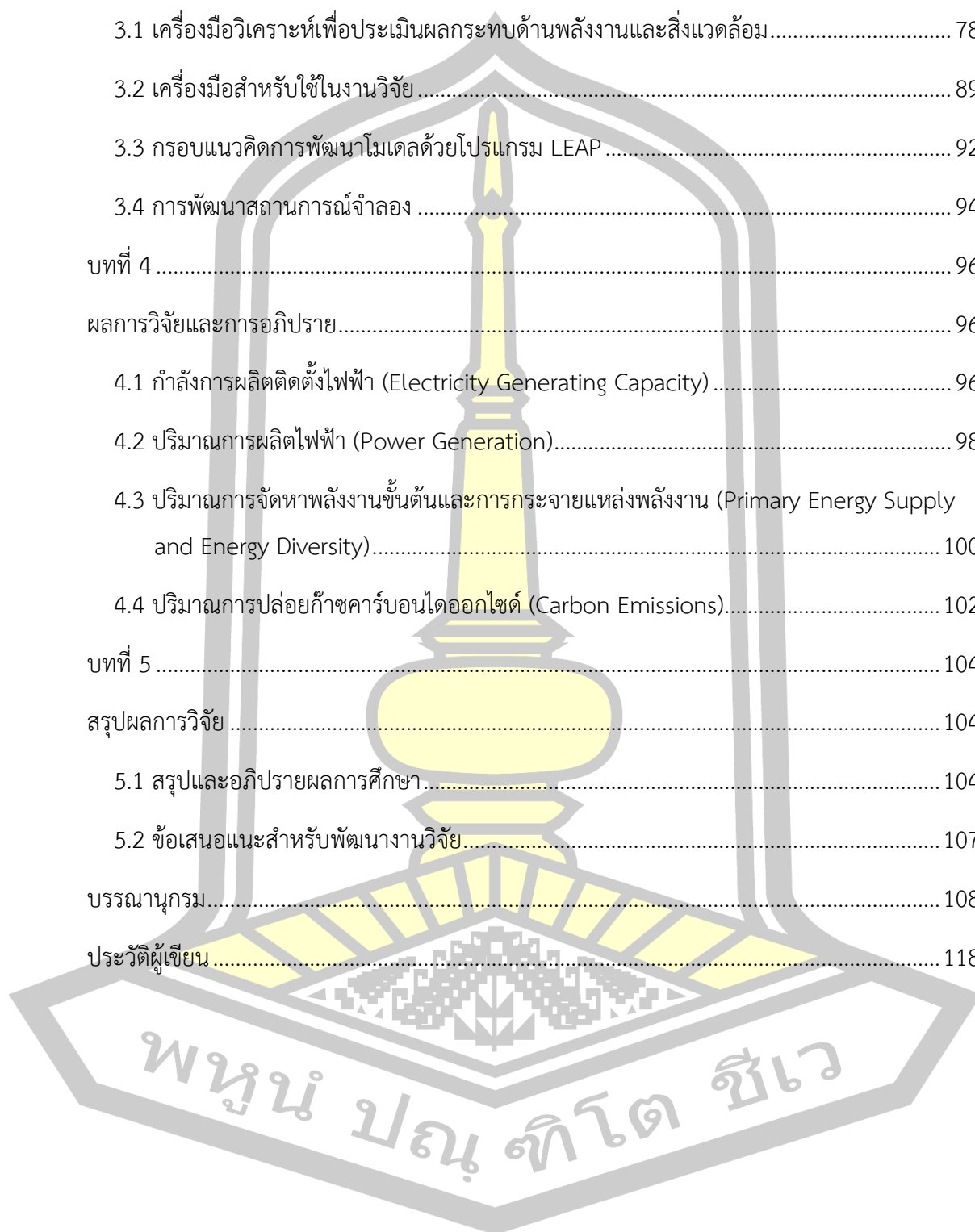
ศุภกร อุคำพันธ์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 กรอบงานวิจัย	4
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับในงานวิจัยครั้งนี้	5
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ	5
บทที่ 2	8
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 นโยบายและแผนพลังงานของประเทศไทย.....	8
2.2 เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่... 25	
2.3 สถานการณ์พลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันของประเทศไทย.....	51
2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	56
บทที่ 3	78

วิธีการดำเนินงานวิจัย	78
3.1 เครื่องมือวิเคราะห์เพื่อประเมินผลกระทบด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม	78
3.2 เครื่องมือสำหรับใช้ในงานวิจัย	89
3.3 กรอบแนวคิดการพัฒนาโมเดลด้วยโปรแกรม LEAP	92
3.4 การพัฒนาสถานการณ์จำลอง	94
บทที่ 4	96
ผลการวิจัยและการอภิปราย.....	96
4.1 กำลังการผลิตติดตั้งไฟฟ้า (Electricity Generating Capacity)	96
4.2 ปริมาณการผลิตไฟฟ้า (Power Generation).....	98
4.3 ปริมาณการจัดหาพลังงานขั้นต้นและการกระจายแหล่งพลังงาน (Primary Energy Supply and Energy Diversity).....	100
4.4 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Emissions).....	102
บทที่ 5	104
สรุปผลการวิจัย	104
5.1 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา.....	104
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับพัฒนางานวิจัย.....	107
บรรณานุกรม.....	108
ประวัติผู้เขียน.....	118



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แนวทางปฏิบัติตามรัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย พ.ศ.2560 กับนโยบายภาครัฐ.....	15
ตาราง 2 ความสอดคล้องระหว่างและยุทธศาสตร์ชาติ กับนโยบายภาครัฐ.....	17
ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับประเทศไทย	59
ตาราง 4 สรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับต่างประเทศ	67
ตาราง 5 สรุปการทบทวนวรรณกรรมเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	72
ตาราง 6 สรุปเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับประเมินผลกระทบด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม	87
ตาราง 7 สรุปการพัฒนาสถานการณ์จำลอง	95
ตาราง 8 ปริมาณความต้องการพลังงานขั้นต้นและการกระจายพลังงาน.....	101
ตาราง 9 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคการผลิตไฟฟ้า	103
ตาราง 10 สรุปผลกระทบของแต่ละสถานการณ์ในแต่ละด้าน ในปี พ.ศ. 2580	105

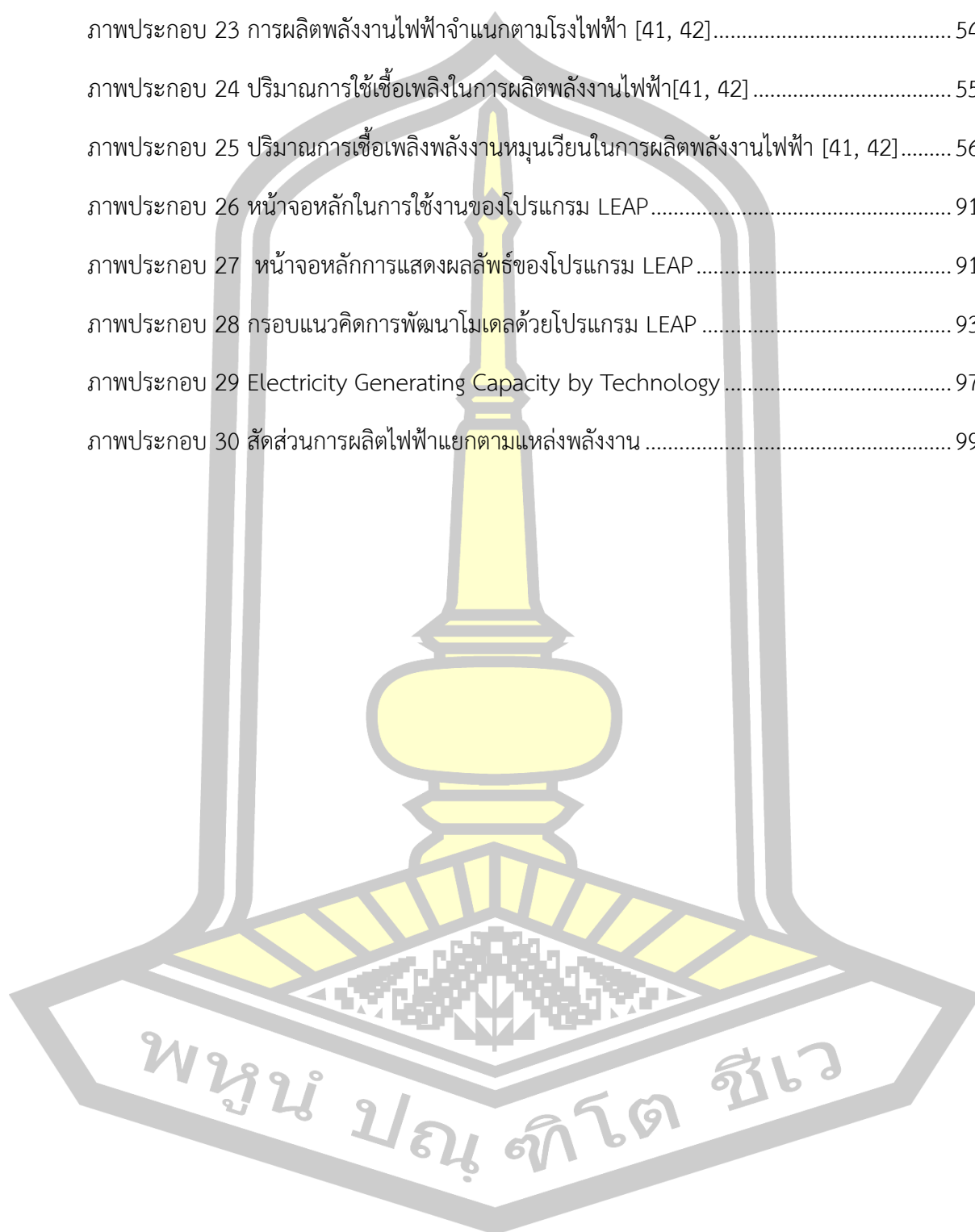


สารบัญภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดและวิธีการดำเนินงานวิจัย	4
ภาพประกอบ 2 ระดับของแผนบริหารราชการ ตามมติคณะรัฐมนตรี [16, 17]	13
ภาพประกอบ 3 ความเชื่อมโยงของแผนปฏิบัติราชการ พ.ศ. 2566 - 2570 [18, 19]	14
ภาพประกอบ 4 การกระจายพลังงานแสงอาทิตย์และการดูดกลืนในชั้นบรรยากาศ [15, 26]	26
ภาพประกอบ 5 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน พ.ศ. 2565 [29]	27
ภาพประกอบ 6 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของ 20 จังหวัดที่มีศักยภาพสูง พ.ศ. 2566 [30]	28
ภาพประกอบ 7 ร้อยละของพื้นที่ที่ได้รับรังสีอาทิตย์ในระดับต่าง ๆ พ.ศ. 2566 [15, 30]	29
ภาพประกอบ 8 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [15, 25]	31
ภาพประกอบ 9 รายละเอียดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [32]	32
ภาพประกอบ 10 เซลล์แสงอาทิตย์ก่อนได้รับแสง [15, 33]	32
ภาพประกอบ 11 เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสง [15, 33]	33
ภาพประกอบ 12 เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสงและเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า [15, 33]	34
ภาพประกอบ 13 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [34]	36
ภาพประกอบ 14 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตัลไลน์และโพลีคริสตัลไลน์ [36]	37
ภาพประกอบ 15 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบบาง [35]	39
ภาพประกอบ 16 ภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน [37]	42
ภาพประกอบ 17 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านกับรับแสงด้านเดียว [37]	42
ภาพประกอบ 18 เซลล์แสงอาทิตย์แบบเต็มเซลล์และครึ่งเซลล์ [37, 38]	43
ภาพประกอบ 19 หลักการทำงานของระบบการจัดเก็บพลังงานแบตเตอรี่แบบชาร์จไฟได้ [15]	45
ภาพประกอบ 20 หลักการของแบตเตอรี่พื้นฐาน [39]	46
ภาพประกอบ 21 การใช้พลังงานไฟฟ้าจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจ [41, 42]	52

ภาพประกอบ 22 การจัดหาพลังงานไฟฟ้าของระบบ [41, 42].....	53
ภาพประกอบ 23 การผลิตพลังงานไฟฟ้าจำแนกตามโรงไฟฟ้า [41, 42].....	54
ภาพประกอบ 24 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า[41, 42]	55
ภาพประกอบ 25 ปริมาณการซื้อเพลิงพลังงานหมุนเวียนในการผลิตพลังงานไฟฟ้า [41, 42].....	56
ภาพประกอบ 26 หน้าจอหลักในการใช้งานของโปรแกรม LEAP.....	91
ภาพประกอบ 27 หน้าจอหลักการแสดงผลลัพธ์ของโปรแกรม LEAP.....	91
ภาพประกอบ 28 กรอบแนวคิดการพัฒนาโมเดลด้วยโปรแกรม LEAP	93
ภาพประกอบ 29 Electricity Generating Capacity by Technology	97
ภาพประกอบ 30 สัดส่วนการผลิตไฟฟ้าแยกตามแหล่งพลังงาน	99



1.1 ความเป็นมาของการวิจัย

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) มีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ปัญหาโลกเดือด (Global Warming) ซึ่งมีแนวโน้มทวีความรุนแรงมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และถือเป็นหนึ่งในวิกฤตระดับโลกที่ส่งผลกระทบในวงกว้างต่อสภาพแวดล้อม เศรษฐกิจ และคุณภาพชีวิตของประชากรบนโลก [1] โดยมีสาเหตุสำคัญมาจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก [2] และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกนี้ยังมาจากหลายภาคส่วนด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นภาคอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงจำนวนมหาศาลในการผลิตสินค้า ภาคขนส่งที่อาศัยน้ำมันและเชื้อเพลิงในการเคลื่อนย้ายสินค้าและประชากร อีกทั้งภาคเศรษฐกิจ และภาคครัวเรือนที่ใช้พลังงานในรูปแบบต่าง ๆ [3] เหล่านี้ล้วนมีส่วนในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคการผลิตไฟฟ้าซึ่งถือได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกอีกแหล่งหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากยังคงพึ่งพาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมัน เป็นหลักในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งการเผาไหม้ดังกล่าว มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณมากเข้าสู่ชั้นบรรยากาศอย่างต่อเนื่อง [4] จากรายงานดุลยภาพพลังงานของประเทศไทย [5] ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จาก 91.5 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2558 เพิ่มขึ้นเป็น 93.9 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2567 [6] ซึ่งหากพิจารณาถึงสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทยนั้น จะพบว่า การผลิตไฟฟ้าของประเทศยังคงพึ่งพาก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก โดยมากกว่า 67% ใน ปี พ.ศ. 2558 [7] ของการผลิตไฟฟ้าทั้งประเทศ ปัจจุบันใน ปี พ.ศ. 2567 ยังคงใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นแหล่งพลังงานหลัก โดยมากกว่า 58% ของการผลิตในประเทศทั้งหมด

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าประเทศไทยยังคงพึ่งพาการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก อีกทั้งก๊าซธรรมชาติที่มีในประเทศไม่เพียงพอต่อการผลิตไฟฟ้าเพื่อรองรับความต้องการของประชากรในประเทศ ทำให้การผลิตไฟฟ้าในประเทศต้องนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ โดยเฉพาะจากประเทศพม่า [8] ด้วยเหตุนี้ ความมั่นคงทางพลังงานของประเทศจึงลดลง และเนื่องจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้าเป็นหลัก ภาคการผลิตไฟฟ้าจึงปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงเป็นอันดับต้นๆของประเทศ ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้เพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการมุ่งสู่การเป็นประเทศที่เป็นกลางทางคาร์บอนภายในปี พ.ศ. 2593 ประเทศไทยจึงมีแนวคิดในการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนให้เพิ่มมากขึ้น เพื่อลด

การพึ่งพาก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน อีกทั้งยังสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อีกด้วย [9] โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดและมีศักยภาพสูงในการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ส่งผลให้ประเทศไทยได้รับแสงแดดตลอดทั้งปี [10] รวมถึงประเทศไทยมีการใช้พื้นที่ในการเกษตร ทำให้สามารถแบ่งสัดส่วนมาติดตั้งระบบผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้เองได้ นอกจากนี้ยังมีมาตรการจากรัฐบาลโดยออกนโยบายปลดล็อกการติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา หรือ Solar Rooftop ซึ่งไม่ต้องขออนุญาตตามกฎหมายว่า โรงงาน [11] อีกทั้งตามร่างแผนการพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า พ.ศ.2567 (Power Development Plan: PDP2024) ยังได้กำหนดกำลังการผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก โดยกำลังการผลิตติดตั้งจากพลังงานแสงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นจาก 3,193 เมกะวัตต์ ในปี พ.ศ. 2567 เป็น 36,057 เมกะวัตต์ ในปี พ.ศ. 2580 ซึ่งถือเป็นการเพิ่มขึ้นของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่สูงที่สุด [12] อย่างไรก็ตาม พลังงานแสงอาทิตย์ยังมีข้อจำกัดในด้านความมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือ อันเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของสภาพอากาศและช่วงเวลาในการผลิตไฟฟ้าที่จำกัด [13] การเพิ่มการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในปริมาณที่สูงนั้น อาจทำให้ยังประสบปัญหาการผลิตไฟฟ้าไม่ต่อเนื่องและยังมีประเด็นในเรื่องของความพร้อมในการจ่ายไฟฟ้าอีกด้วย ดังนั้น ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System: BESS) จึงเป็นหนึ่งในแนวทางที่จะช่วยเพิ่มความมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของการเพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System: BESS) ซึ่งจะช่วยลดการพึ่งพาก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลหลักของประเทศในปัจจุบัน และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อน ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับเป้าหมายของการเป็นประเทศที่มีความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และการปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) ตามแนวนโยบายพลังงานของประเทศไทย การศึกษาจะพิจารณาผลกระทบจากการเพิ่มจำนวนการติดตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับต่าง ๆ ร่วมกับการประเมินความสามารถในการรองรับของระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ เพื่อวิเคราะห์ความเพียงพอ ความมั่นคง และความมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในอนาคต โดยเน้นการตอบสนองความต้องการพลังงานที่มีความผันผวนและมีแนวโน้มที่จะสูงมากขึ้นเรื่อย ๆ อีกทั้งการเพิ่มศักยภาพในการใช้งานพลังงานหมุนเวียนให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยพิจารณาทั้งในด้านเทคโนโลยี เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่บูรณาการร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ ในประเทศไทย

1.2.2 เพื่อประเมินความเป็นไปได้และประสิทธิภาพของการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในการเสริมความเสถียรภาพของของระบบพลังงานหมุนเวียน

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์บทบาทของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีระบบกักเก็บพลังงานต่อความยั่งยืนด้านพลังงานของประเทศไทย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนารอบแนวคิดในการวิจัย (Research framework) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต่อความมั่นคงทางพลังงานและศักยภาพการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ดังแสดงในหัวข้อ 1.4) โดยมีขอบเขตการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1.3.1. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และศึกษา รวบรวมข้อมูลของสถานการณ์การใช้พลังงานไฟฟ้า แผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้า และแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศไทย

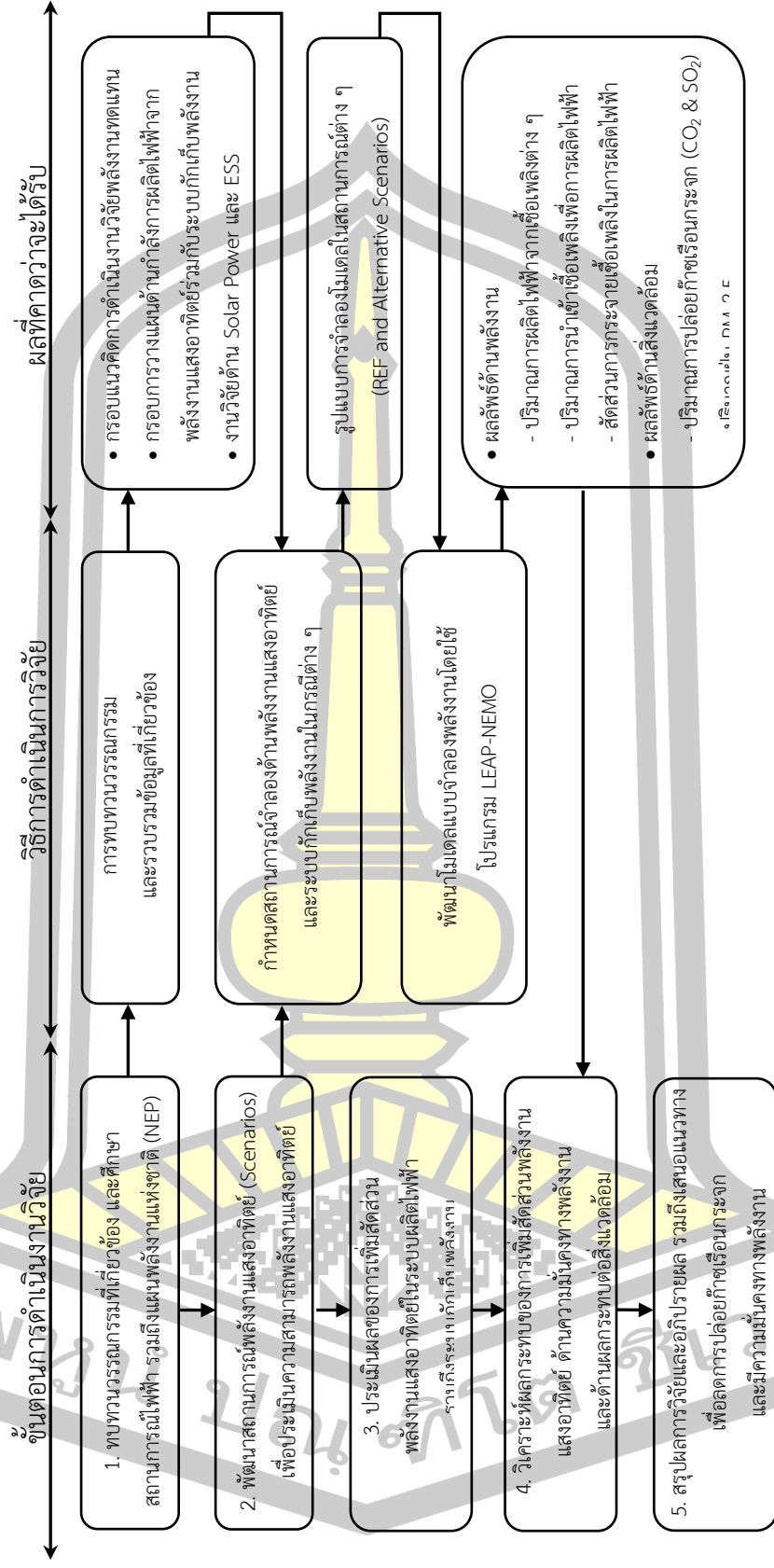
1.3.2. พัฒนาสถานการณ์ไฟฟ้าตามแผน PDP & AEDP (REF scenario) และสถานการณ์ไฟฟ้าทางเลือกต่างๆ (Alternative scenarios) โดยพิจารณาจากการปรับเปลี่ยนแผน PDP & AEDP เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบจากการเพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่บูรณาการร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ ในประเทศไทย

1.3.3. ศึกษาการใช้งานแบบจำลองแผนทางเลือกพลังงานในระยะยาว (Long - range Energy Alternatives Planning system: LEAP) ร่วมกับ โปรแกรม Next Energy Modeling system (NEMO)

1.3.4. ประเมินความเป็นไปได้และประสิทธิภาพของการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในการเสริมความเสถียรภาพของของระบบพลังงานหมุนเวียน

1.3.5. วิเคราะห์บทบาทของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีระบบกักเก็บพลังงานต่อความยั่งยืนด้านพลังงานของประเทศไทย

1.4 กรอบงานวิจัย



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับในงานวิจัยครั้งนี้

1.5.1 ข้อเสนอแนะแนวทางและกลยุทธ์ในการส่งเสริมพลังงานแสงอาทิตย์รวมถึงการนำระบบกักเก็บพลังงานมาใช้ควบคู่กันเพื่อการบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน

1.5.2 ทราบถึงบทบาทของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานต่อความยั่งยืนด้านพลังงานของประเทศไทย

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.6.1 NEP: The National Energy Plan คือแผนแม่บทที่กำหนดทิศทางของนโยบายด้านพลังงานของประเทศ โดยมีผู้รับผิดชอบคือ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน ซึ่งจะประกอบไปด้วยแผนพลังงานอีก 5 แผน คือ แผน PDP แผน AEDP แผน EEP แผน Gas Plan และแผน Oil Plan

1.6.2 PDP: The Power Development Plan คือ แผนแม่บทด้านการจัดหาไฟฟ้าในระยะยาวของประเทศ ครอบคลุมช่วงเวลา 15–20 ปี มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างความมั่นคงและความเพียงพอของกำลังการผลิตไฟฟ้า โดยพิจารณาตามนโยบายพลังงานแห่งชาติและปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม

1.6.3 AEDP: The Alternative Energy Development Plan คือ แผนว่าด้วยการวางแผนพลังงานสะอาดและการจัดหาเพื่อส่งเสริมพลังงานทางเลือกให้แก่ประเทศ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างความมั่นคงและความเพียงพอของกำลังการผลิตไฟฟ้า โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1.6.4 DEDE: The Department of Alternative Energy Development and Efficiency หรือ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน เป็นส่วนราชการระดับกรมของ กระทรวงพลังงาน รับผิดชอบในการส่งเสริมประสิทธิภาพการใช้พลังงาน กำกับการอนุรักษ์พลังงาน จัดหาแหล่งพลังงาน พัฒนาทางเลือกการใช้พลังงานแบบผสมผสานและเผยแพร่เทคโนโลยีด้านพลังงานอย่างเป็นระบบต่อเนื่อง เพื่อสนองตอบความต้องการของทุกภาคส่วนอย่างเพียงพอ

1.6.5 EPPO: The Energy Policy and Planning Office หรือ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน เป็นองค์กรหลักในการจัดการด้านนโยบาย และแผนพลังงานเพื่อความยั่งยืนของประเทศ โดยมีภารกิจหลักเป็นไปตาม พระราชบัญญัติ คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ พระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานพระราชกำหนดแก้ไขและป้องกันภาวะการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิง

1.6.6 LEAP: The Low Emissions Analysis Platform เป็นแพลตฟอร์มสำหรับการวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวางแผนพลังงานและการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สามารถวิเคราะห์ข้อมูลและจำลองโมเดลได้ตามความต้องการ โดยมุ่งเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและการใช้พลังงานอย่างยั่งยืน

1.6.7 NEMO: The Next Energy Modeling system for Optimization เป็นเครื่องมือเพิ่มประสิทธิภาพระบบพลังงานแบบโอเพนซอร์สที่มีประสิทธิภาพสูง พัฒนาโดยสถาบันสิ่งแวดล้อมสต็อกโฮล์ม (Stockholm Environment Institute) โดยออกแบบมาสำหรับนักสร้างแบบจำลอง (modelers) และนักวางแผน (planners) ที่ต้องการความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพขั้นสูง โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ และหลีกเลี่ยงข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพที่พบในซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สทั่วไป

1.6.8 ประเภทเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้า

NGCT (Natural gas combustion turbine) คือ กังหันก๊าซที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในการเผาไหม้เพื่อผลิตพลังงาน

CCGT (Combined Cycle Gas Turbine) คือ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม โดยการใช้กังหันก๊าซ (Gas Turbine) และกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ทำงานร่วมกันในระบบเดียว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า

Thermal Power คือ การผลิตไฟฟ้าโดยอาศัย พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน เพื่อนำไปผลิตไฟฟ้า

Hydropower คือการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานของน้ำ โดยอาศัยการไหลของน้ำมาหมุนกังหันเพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Biomass คือ พลังงานที่ได้จากวัสดุอินทรีย์หรือสารชีวภาพ ที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เช่น เศษไม้ ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย กากมันสำปะหลัง ขยะอินทรีย์

Wind Energy คือ การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยใช้กังหันลม (Wind Turbine) ในการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า

Solar PV คือ ระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการแปลงพลังงานจากแสงแดดเป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้งานหรือส่งเข้าระบบไฟฟ้า

1.6.9 พารามิเตอร์ของโรงไฟฟ้า

Capacity Credit คือ สัดส่วน (%) ของกำลังผลิตติดตั้ง (Installed Capacity) ที่สามารถนับรวมว่า มีความน่าเชื่อถือ สำหรับการรองรับความต้องการไฟฟ้าสูงสุด

Lifetime คือ อายุการใช้งานของโรงไฟฟ้า หมายถึง ช่วงระยะเวลาที่โรงไฟฟ้าสามารถผลิตไฟฟ้าได้ตามประสิทธิภาพที่ออกแบบไว้

Capital cost คือ ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นทั้งหมดที่ใช้ในการก่อสร้าง ติดตั้ง และเตรียมพร้อม การดำเนินงานของโครงการหรือสินทรัพย์ถาวร เช่น โรงไฟฟ้า หรือระบบ พลังงาน

Fixed O&M (Fixed Operation and Maintenance Cost) คือ ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเป็น ประจำทุกปี เช่น ต้นทุนการดำเนินงานและบำรุงรักษาคงที่ โดยไม่ขึ้นอยู่กับ ค่าจ้างพนักงาน ค่าประกันภัย

Variable O&M (Variable Operation and Maintenance Cost) คือ ต้นทุน ดำเนินงานและบำรุงรักษาที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการผลิตไฟฟ้า

Process Efficiency คือ ประสิทธิภาพที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าเมื่อเทียบจากพลังที่ป้อนให้ ระบบ โดยส่วนใหญ่ใช้ค่าเป็นเปอร์เซ็นต์

Exogenous Capacity คือ กำลังการติดตั้งของโรงไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็นเมกะวัตต์ (MW) ซึ่งถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าโดยผู้วางแผนระบบ เช่น นโยบายภาครัฐหรือโครงการ ลงทุนที่ประกาศแล้ว

Historical Production คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าหรือระบบผลิตขึ้นจริงใน อดีต มีหน่วยเป็นกิกะวัตต์ชั่วโมง (GWh)

Load Shapes คือ รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาต่าง ๆ ของวัน สัปดาห์ หรือปี

1.6.10 Solar PV System คือระบบที่ทำหน้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน อย่างแสงอาทิตย์ โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Panels) ในการแปลงพลังงานแสงให้ เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งการผลิตไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงและระยะเวลาการรับแสงในแต่ละ วัน ทำให้มีลักษณะการผลิตที่ไม่คงที่หรือไม่ตรงกับช่วงเวลาการใช้งานของไฟฟ้าโดยตรง ในระบบที่ไม่มี แบตเตอรี่ พลังงานที่ผลิตได้ต้องถูกใช้งานทันทีหรือส่งกลับเข้าระบบสายส่ง แต่หากมีการรวมระบบ จัดเก็บพลังงาน เช่น BESS เข้าด้วยกัน ระบบจะสามารถเก็บพลังงานส่วนเกินที่ผลิตได้ในช่วงกลางวัน ไว้ใช้ในช่วงกลางคืนหรือช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูง ช่วยเพิ่มความเสถียรในการจ่ายพลังงาน

1.6.11 BESS : Battery Energy Storage System คือระบบที่ใช้แบตเตอรี่ในการเก็บพลังงาน ไฟฟ้า ซึ่งมักผลิตจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น แสงอาทิตย์ (Solar PV) หรือ ลม (Wind Turbine) ที่มีลักษณะผลิตไฟฟ้าไม่คงที่ หรือไม่สอดคล้องกับช่วงเวลาการใช้งาน ระบบ BESS จะทำหน้าที่เก็บ พลังงานส่วนเกินไว้ในช่วงที่มีการผลิตมาก และจ่ายพลังงานกลับในช่วงที่มีความต้องการสูงหรือผลิต ได้น้อย เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้ระบบไฟฟ้า

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิเคราะห์และประเมินผลกระทบจากการเพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่บูรณาการร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในประเทศไทย การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องถือเป็นกระบวนการที่สำคัญ นอกจากนั้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ การศึกษาข้อมูลทางด้านเทคโนโลยีและการศึกษาแนวโน้มของการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อกักเก็บพลังงานและเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า ถือเป็นประเด็นสำคัญที่กำลังได้รับความสนใจและมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งการศึกษาสถานการณ์พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย จะช่วยให้เกิดความเข้าใจในการจัดการและการใช้ทรัพยากรในด้านพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย และที่สำคัญ การศึกษาแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าและแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก จะช่วยให้เกิดความเข้าใจในทิศทางการจัดสรรทรัพยากรในด้านพลังงานไฟฟ้า โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอ นโยบายและแผนพลังงานของประเทศไทย ในหัวข้อที่ 1.2 ในส่วนของ เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ จะนำเสนอในหัวข้อที่ 2.2 หัวข้อที่ 3.2 เป็นการศึกษา สถานการณ์พลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันของประเทศไทยและ การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง จะนำเสนอในหัวข้อที่ 2.4

2.1 นโยบายและแผนพลังงานของประเทศไทย

การกำหนดทิศทางของแผนและนโยบายของประเทศ ถูกกำหนดขึ้นจากสถานการณ์พลังงานภายในประเทศ เช่น ความมั่นคงของแหล่งผลิตพลังงาน รวมถึงแหล่งเชื้อเพลิงภายในประเทศ และปัจจัยภายนอก อย่างราคาพลังงานที่มีความผันผวนสูงและมีทิศทางเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้การวางแผนด้านพลังงานยังต้องคำนึงถึงทิศทางพลังงานของโลก โดยการเปลี่ยนมาใช้พลังงานสะอาดเป็นหลัก ซึ่งในการประชุม Conference of the Parties 26 (COP 26) ประเทศไทยได้มีบทบาทและกำหนดเป้าหมายที่จะบรรลุเป็นประเทศที่มี ความเป็นกลางทางคาร์บอน Carbon Neutrality (CN) ภายในปี ค.ศ. 2050 (พ.ศ. 2593) และเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ Net Zero Greenhouse Gas Emission (NZE) ภายในปี ค.ศ. 2065 (พ.ศ. 2608) เป็นหนึ่งในเป้าหมายสำคัญที่ประเทศไทยตั้งไว้ เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และประเทศไทยยังได้เสนอ

ยุทธศาสตร์ระยะยาวในการพัฒนาแบบปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำของประเทศ (Thailand's Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy : LT-LEDS) ในเวที COP27 ซึ่งถือเป็นแนวทางสำคัญในการวางกรอบการดำเนินงานของภาคพลังงาน ที่มีบทบาทสำคัญในการบรรลุเป้าหมาย CN และ NZE [14]

เพื่อขับเคลื่อนนโยบายให้บรรลุเป้าหมาย กระทรวงพลังงานได้มีการจัดทำ แผนพลังงานชาติ (National Energy Plan: NEP) ซึ่งมีการกำหนดยุทธศาสตร์ด้านพลังงานของประเทศโดยเน้นความมั่นคงและยั่งยืนทางพลังงานควบคู่กันการส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดการ เพื่อลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงาน เช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน ถ่านหิน การใช้พลังงานสะอาดยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้พลังงานที่มาจาก ถ่านหิน และเมื่อต้องการใช้พลังงานทางเลือกซึ่งเป็นพลังงานสะอาดยังต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานทางเลือกที่ประเทศไทยมีอยู่เดิมแล้วคือ ชีวมวล เพราะว่าประเทศไทยถือเป็นประเทศที่ทำเกษตรเป็นส่วนใหญ่ ทำให้มีพลังงานหมุนเวียนโดยเฉพาะพลังงานชีวภาพ มีผลผลิตทางการเกษตร และผลผลิตเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีศักยภาพสูงสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมัน ข้าว และ ข้าวโพด ด้วยเหตุนี้ประเทศไทยจึงมีศักยภาพพอที่จะพัฒนาพลังงานหมุนเวียน เนื่องจากการพัฒนาดังกล่าวจะเป็นการกระตุ้นให้เกิดการสร้างงาน และรายได้ให้กับคนในภาคเกษตรกรรม ช่วยเสริมสร้างความเข้มแข็งและรายได้ที่มากขึ้นในชุมชน ดังนั้นหน่วยงานภาครัฐ จึงออกนโยบายส่งเสริมและสนับสนุนการใช้พลังงานหมุนเวียนมาอย่างต่อเนื่อง โดยมีรายละเอียดของนโยบายและแผนการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนที่มีการปรับเปลี่ยนไปตามระยะเวลาตั้งแต่ ปี พ.ศ.2547 จนถึงปัจจุบัน [15]

แผนพัฒนาพลังงานหมุนเวียนฉบับแรก (พ.ศ.2547-พ.ศ.2554) ภาครัฐเริ่มมีนโยบายส่งเสริมพลังงานหมุนเวียนต่อเนื่องกว่า 30 ปี โดยเริ่มนโยบายชัดเจนในปี พ.ศ. 2546 จากปัญหาราคาน้ำมันที่แพงอย่างต่อเนื่อง จึงได้จัดทำแผน First Renewable Energy Development Plan : REDP 2004 (REDP 2004) ที่มุ่งเน้นเชื้อเพลิงชีวภาพ ภาษี การวิจัย และการประชาสัมพันธ์

สำหรับเอทานอล

- ปี พ.ศ. 2547 เริ่มขาย E10 (เอทานอล 10% + เบนซิน 90%) ยอดขายพุ่งถึง 17.4% ของเบนซินในปี พ.ศ.2548 แต่ลดลงหลังปี พ.ศ.2549 เนื่องจากปัญหาสมรรถนะรถ ความไม่ชัดเจนของรถที่รองรับ และส่วนต่างราคาจากเบนซินน้อยเกินไป
- รัฐปรับนโยบายเพิ่มส่วนต่างราคา ส่งผลให้ยอดขาย E10 เพิ่มจาก 3.5 ล้านลิตร/วัน ในปี พ.ศ. 2549 เป็น 12 ล้านลิตร/วัน (พ.ศ. 2552)
- ปี พ.ศ. 2550 และ พ.ศ. 2551 ขยายสู่ E20 (เอทานอล 20%) และ E85 (เอทานอล 85%)

ส่วนของไบโอดีเซล

- ปี พ.ศ. 2548 เริ่มรณรงค์ B5 (ไบโอดีเซล 5%) แต่ยอดขายต่ำเพียง 0.12 ล้านลิตร/วัน (พ.ศ. 2549) จากปัญหานโยบายราคาไม่ชัดเจน มาตรฐาน B100 ไม่แข็งแรง และค่ายรถไม่รับประกัน
- ปี พ.ศ. 2551 เริ่มใช้ B2 เพื่อให้ผู้เกี่ยวข้องปรับตัว
- ปี พ.ศ. 2553 ปรับเป็น B3 เนื่องจากมีน้ำมันปาล์มเพียงพอ พร้อมอุดหนุนราคา B5 ให้ถูกลง เพื่อกระตุ้นการใช้

แผนพัฒนาพลังงานหมุนเวียนฉบับที่ 2 (พ.ศ.2551–พ.ศ.2565) โดยตั้งเป้าเพิ่มสัดส่วนพลังงานทางเลือกให้ถึง 20% ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายภายในปี พ.ศ. 2565 มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการพึ่งพาน้ำมันนำเข้า เสริมความมั่นคงพลังงาน ส่งเสริมพลังงานสีเขียวในชุมชน และสนับสนุนอุตสาหกรรม-เทคโนโลยีพลังงานทดแทน โดยแผนจะแบ่งออกเป็น 3 ระยะ

ระยะสั้น (พ.ศ. 2551–2554) เน้นการส่งเสริมเทคโนโลยีพลังงานเชิงพาณิชย์ เช่น เชื้อเพลิงชีวภาพ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ โดยในระยะสั้นรัฐตั้งเป้าการผลิต เอทานอลไว้ที่ 3.0 ล้านลิตร/วัน ส่วนไบโอดีเซล (B100) 1.35 ล้านลิตร/วัน

ระยะกลาง (พ.ศ. 2555–2559) พัฒนาอุตสาหกรรมพลังงานทางเลือก ส่งเสริมเทคโนโลยีใหม่และแนวคิด เมืองสีเขียว โดยในระยะกลางรัฐตั้งเป้าการผลิต เอทานอลไว้ที่ 6.2 ล้านลิตร/วัน ส่วนไบโอดีเซล (B100) 3.64 ล้านลิตร/วัน

ระยะยาว (พ.ศ. 2560–2565) ขยายการใช้เทคโนโลยีพลังงานใหม่ เช่น ไฮโดรเจน และขยายเมืองสีเขียวทั่วประเทศและอาเซียน โดยในระยะกลางยาวตั้งเป้าการผลิต เอทานอลไว้ที่ 9.0 ล้านลิตร/วัน (พ.ศ. 2560–2565) ส่วนไบโอดีเซล (B100) 4.5 ล้านลิตร/วัน

แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (พ.ศ. 2555–2564) ต่อจากแผนพัฒนาพลังงานหมุนเวียนฉบับที่ 2 รัฐบาลจัดทำแผน AEDP 2012 ในปี พ.ศ. 2553 แทนที่ REDP ฉบับเดิม โดยมีเป้าหมายให้ พลังงานทดแทนและทางเลือกเป็นพลังงานหลัก ของประเทศคิดเป็น 25% ของการใช้พลังงานทั้งหมดภายในปี พ.ศ. 2564 มุ่งเน้นการมีส่วนร่วมจากภาครัฐ ภาคเอกชน และชุมชน เพื่อความยั่งยืน พัฒนาโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน วัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาให้พลังงานทดแทนเป็นพลังงานหลัก ทดแทนน้ำมันนำเข้า เสริมความมั่นคงด้านพลังงาน ส่งเสริมพลังงานทดแทนระดับชุมชนและแนวคิด “ชุมชนสีเขียว” สนับสนุนอุตสาหกรรมการผลิตเทคโนโลยีพลังงานทดแทน

แผนพลังงานชาติ (NEP) จัดทำขึ้นเพื่อแทนที่ แผนบูรณาการพลังงานระยะยาว (TIEB) ซึ่งเคยเป็นกรอบแผนหลัก 5 ด้านของประเทศ ได้แก่ ด้านพลังงานไฟฟ้า พลังงานน้ำมัน พลังงานก๊าซ พลังงานทดแทน และการอนุรักษ์พลังงาน โดยคำนึงถึงความมั่นคงของระบบไฟฟ้า และต้นทุนที่เหมาะสม รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเมื่อวันที่ 26 มีนาคม 2564 ที่ประชุม (กพข.) มีมติเห็นชอบให้จัดทำแผนพลังงานชาติฉบับใหม่ โดยสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) เป็นผู้ดำเนินการเพื่อบูรณาการแผนเดิมทั้งหมดให้สอดคล้องกับเป้าหมาย COP26 โดยมุ่งสู่ Carbon Neutrality ภายในปี ค.ศ. 2065 ถึง ค.ศ. 2070 หรือ พ.ศ. 2608 ถึง พ.ศ. 2613 โดยเป้าหมายหลักของแผนพลังงานชาติ มีดังนี้

1. ขับเคลื่อนประเทศสู่การใช้พลังงานสะอาดและการปล่อย CO₂ สุทธิเป็นศูนย์ภายในปี ค.ศ. 2065 ถึง ค.ศ. 2070
2. เสริมความสามารถในการแข่งขันและลงทุนในเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ
3. สนับสนุนยุทธศาสตร์การลดก๊าซเรือนกระจก (GHG) ของประเทศในระยะยาว

กรอบนโยบายของแผนพลังงานชาติ (Policy Direction) เพื่อบรรลุเป้าหมายพลังงานสะอาด ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในปี พ.ศ. 2580 มีกำหนดแนวทางสำคัญ ดังนี้

1. เพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าใหม่จากพลังงานหมุนเวียน ไม่น้อยกว่า 50% โดยคำนึงถึงต้นทุนระบบกักเก็บพลังงานและไม่เพิ่มภาระค่าไฟฟ้าในระยะยาว
2. ปรับการใช้พลังงานในภาคขนส่งสู่ EV ภายใต้นโยบาย 30@30 (รถยนต์ EV 30% ของการผลิตทั้งหมดภายในปี พ.ศ. 2030) และลดปัญหาฝุ่น PM 2.5
3. เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่า 30% ด้วยการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมด้านการจัดการพลังงาน
4. ปรับโครงสร้างกิจการพลังงานให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนผ่านพลังงาน (Energy Transition) โดยใช้แนวทาง 4D1E ได้แก่
 - Decarbonization คือ ลดการปล่อยคาร์บอน
 - Digitalization คือ ใช้เทคโนโลยีดิจิทัล
 - Decentralization คือ กระจายศูนย์พลังงาน
 - Deregulation คือ ปรับกฎระเบียบ
 - Electrification คือ เปลี่ยนมาใช้พลังงานไฟฟ้า

นอกจากนี้ยังต้องสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561 – 2580) แผนแม่บทภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติ (พ.ศ. 2566 – 2580) (ฉบับปรับปรุง) แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 13 (พ.ศ. 2566 – 2570) และนโยบายและแผนระดับชาติว่าด้วยความมั่นคงแห่งชาติ (พ.ศ. 2566 – 2570) จากการกำหนดนโยบายและเพื่อให้บรรลุเป้าหมาย กระทรวงพลังงานได้มีการถ่ายทอดแนวนโยบาย แผนปฏิบัติราชการ พ.ศ. 2567 จากแผนปฏิบัติราชการระยะ 5 ปี (พ.ศ. 2566 – 2570) เพื่อขับเคลื่อนใน 4 เรื่อง ได้แก่

แผนปฏิบัติราชการเรื่องที่ 1 การสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน มีเป้าหมายเพื่อให้มีพลังงานเพียงพอ และการวางโครงสร้างพื้นฐานทางพลังงานที่มีประสิทธิภาพ โดยส่งเสริมเทคโนโลยีด้านพลังงาน

แผนปฏิบัติราชการเรื่องที่ 2 การกำกับดูแล ราคา และการสร้างการแข่งขันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ มีเป้าหมายให้ประชาชนเข้าถึงพลังงานในราคาที่เหมาะสม เพื่อส่งเสริมการแข่งขันในกิจการน้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ และไฟฟ้า มุ่งสู่การเป็นศูนย์กลางซื้อขาย LNG ในภูมิภาค

แผนปฏิบัติราชการเรื่องที่ 3 การสร้างความยั่งยืนและเข้าถึงประชาชน มีเป้าหมายเพื่อส่งเสริมการผลิตและการใช้พลังงานทดแทนในประเทศ เพื่อให้มีสัดส่วนการผลิตและการใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มขึ้น

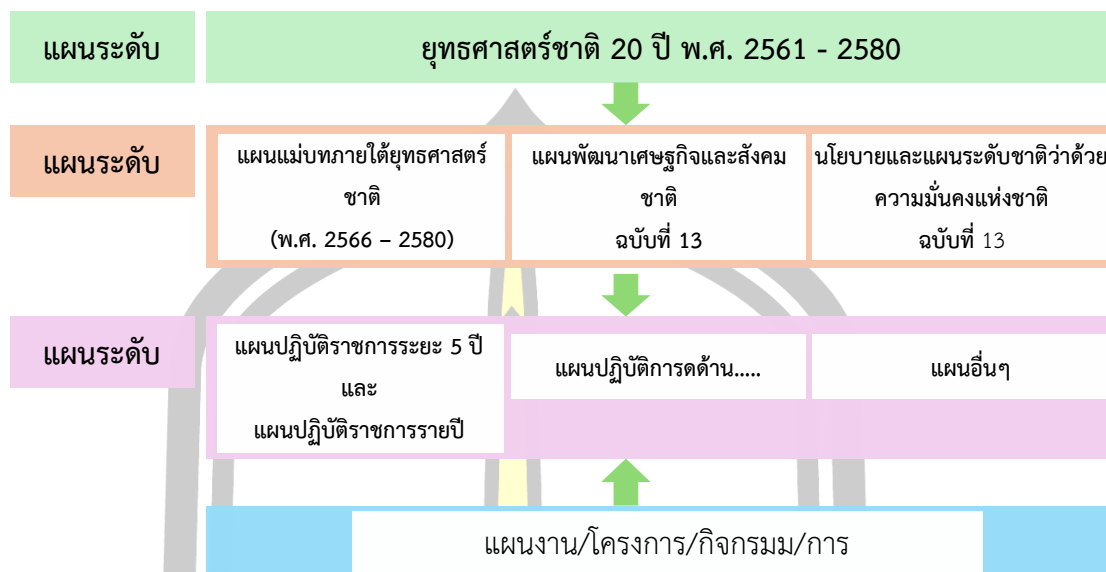
แผนปฏิบัติราชการเรื่องที่ 4 การสร้างความโปร่งใสเป็นองค์กรที่มีธรรมาภิบาลให้สังคมเชื่อถือเป้าหมายเพื่อให้กระทรวงพลังงานเป็นองค์กรสมรรถนะสูง พัฒนาปรับปรุงแผนบริหาร และโครงสร้างการบริหารจัดการองค์กร [16]

ตามมติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2560 และวันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2562 ได้แบ่งระดับของแผนบริหารราชการของประเทศไทยได้แบ่งระดับของแผนบริหารราชการของประเทศไทยออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้ ดังแสดงในภาพประกอบ 2

แผนระดับ 1 หมายถึง ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี พ.ศ. 2561 – 2580 เป็นแผนการพัฒนาประเทศที่กำหนดกรอบและแนวทางการพัฒนาให้หน่วยงานของรัฐทุกภาคส่วนต้องทำตาม

แผนระดับ 2 หมายถึง แผนที่กำหนดแนวทางการขับเคลื่อนของประเทศในหลายมิติ เพื่อให้บรรลุตามเป้าหมายของยุทธศาสตร์

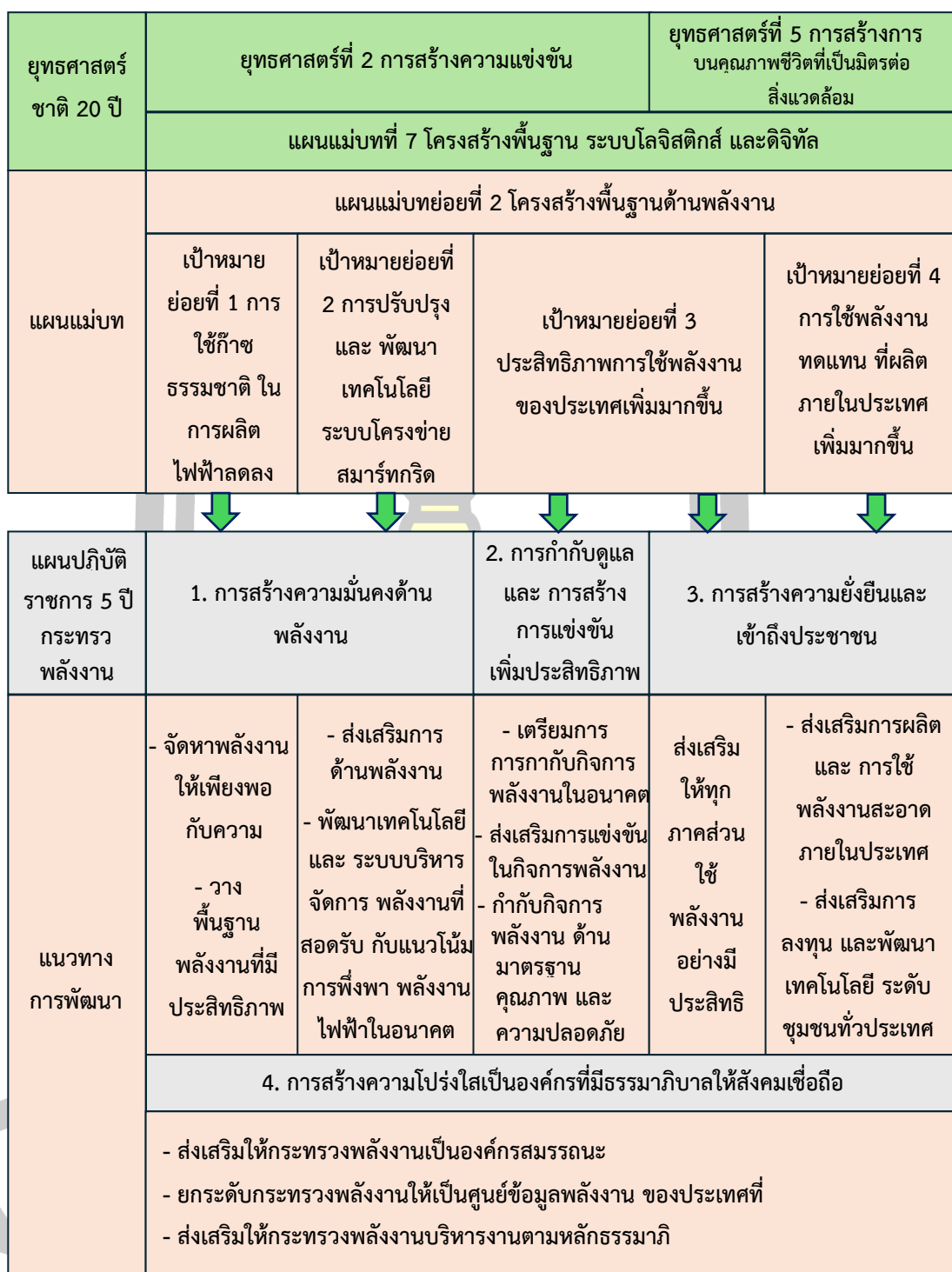
แผนระดับ 3 หมายถึง แผนที่จัดทำขึ้นเพื่อสนับสนุนและขับเคลื่อนการดำเนินงานของแผนระดับที่ 1 และแผนระดับที่ 2 สู่การปฏิบัติให้บรรลุเป้าหมายที่กำหนดไว้ [17]



ภาพประกอบ 2 ระดับของแผนบริหารราชการ ตามมติคณะรัฐมนตรี [16, 17]

เพื่อให้สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี และการขับเคลื่อนประเทศในด้านความมั่นคงทางพลังงาน การส่งเสริมพลังงานสะอาด และการพัฒนาเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ กระทรวงพลังงานจึงได้จัดทำ แผนปฏิบัติราชการระยะ 5 ปี (พ.ศ. 2566-2570) ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในการแปลงยุทธศาสตร์ระดับชาติให้เกิดผลในเชิงปฏิบัติ โดยกำหนดเป้าหมาย แนวทาง และตัวชี้วัดที่ชัดเจนเพื่อให้นโยบายถูกขับเคลื่อนอย่างเป็นรูปธรรม นอกจากนี้กระทรวงพลังงานได้ให้ความสำคัญกับการเพิ่ม สัดส่วนของพลังงานสะอาด การปรับปรุง โครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงาน รวมถึงการส่งเสริมประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และการเข้าถึงพลังงานอย่างเท่าเทียมและยั่งยืน โดยมุ่งเน้นให้การดำเนินงานในระดับกระทรวงมีความเชื่อมโยงกับแผนแม่บทภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติในทุกด้าน ทั้งด้านการพัฒนาเศรษฐกิจ การรักษาสีสิ่งแวดล้อม และการยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชน

นอกจากนี้ยังมีเป้าหมายการพัฒนาใน 4 เรื่องหลัก ครอบคลุมตั้งแต่การสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน การกำกับดูแลและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ การสร้างความยั่งยืนและการเข้าถึงพลังงานของประชาชน ตลอดจนการเสริมสร้างธรรมาภิบาลขององค์กร เพื่อให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของระบบพลังงานในอนาคตได้อย่างมั่นคงและยืดหยุ่น และตอบสนองต่อเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของประเทศ ดังแสดงในภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 ความเชื่อมโยงของแผนปฏิบัตินโยบาย พ.ศ. 2566 - 2570 [18, 19]

จากแผนปฏิบัติการด้านพลังงานและนโยบายในปี พ.ศ. 2566 ต่อมาในวันที่ 12 กันยายน พ.ศ. 2567 คณะรัฐมนตรีภายใต้การนำของนางสาวแพทองธาร ชินวัตร ได้แถลงนโยบายต่อรัฐสภา โดยมีการกำหนด นโยบายเร่งด่วนด้านพลังงาน ที่มุ่งเน้นการลดภาระค่าครองชีพของประชาชน ควบคู่กับการพัฒนาเศรษฐกิจสีเขียว และการรักษาสິงแวดล้อมในระยะยาว

ในด้านพลังงาน รัฐบาลมีนโยบายในการลดราคาพลังงาน และปรับโครงสร้างราคาพลังงานให้เหมาะสม รวมถึงการปรับปรุงกฎหมายและกฎระเบียบที่เกี่ยวข้อง เช่น การเปิดโอกาสให้สามารถทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าโดยตรง (Direct PPA) การจัดตั้ง ระบบสำรองน้ำมันเชื้อเพลิงเชิงยุทธศาสตร์ (Strategic Petroleum Reserve: SPR) นอกจากนี้ในระยะกลางและระยะยาว รัฐบาลยังมีแผนในการส่งเสริม เศรษฐกิจสีเขียว โดยใช้จุดแข็งของประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรให้เกิดประโยชน์สูงสุด เช่น การสนับสนุนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งในรูปแบบติดตั้งบนหลังคา (Solar Rooftop) และบนแหล่งน้ำ (Floating Solar) รวมถึงพลังงานน้ำ และพลังงานทางเลือกอื่น ๆ พร้อมทั้งผลักดันการเปิดเสรีตลาดไฟฟ้า ส่งเสริม ตลาดคาร์บอนเครดิต และขับเคลื่อนให้ประเทศไทยก้าวขึ้นเป็นศูนย์กลางการค้าพลังงานสะอาดของภูมิภาคอาเซียน

ในระดับครัวเรือนและชุมชน รัฐบาลยังสนับสนุนให้ประชาชนผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยระบบโซลาร์เซลล์ เพื่อใช้ในครัวเรือน และสามารถจำหน่ายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้เกินความต้องการคืนให้แก่รัฐ พร้อมทั้งเร่งพัฒนา ระบบสาธารณูปโภคพื้นฐาน ให้มีความครอบคลุม เข้าถึงได้ และมีคุณภาพ เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงและการเติบโตของระบบพลังงานในอนาคต เพื่อให้เห็นความสอดคล้องของนโยบายภาครัฐกับหน้าที่ของรัฐตามรัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย พุทธศักราช 2560 และยุทธศาสตร์ชาติ จะแสดงรายละเอียดไว้ดังตาราง 1 และตาราง 2

ตาราง 1 แนวทางปฏิบัติตามรัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย พ.ศ.2560 กับนโยบายภาครัฐ

รัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย	นโยบายของรัฐบาล
มาตรา 56 รัฐต้องจัดหรือดำเนินการให้มีสาธารณูปโภค ขั้นพื้นฐานที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของประชาชนอย่างทั่วถึง ตามหลักการพัฒนาอย่างยั่งยืน แบะคำนึงถึงความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่ ความเสมอภาคในการเข้าถึงบริการ ตลอดจนส่งเสริมให้ประชาชนมีคุณภาพชีวิตที่ดี	ออกมาตรการเพื่อลดราคาพลังงานและสาธารณูปโภค

ตาราง 1 แนวทางปฏิบัติตามรัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย พ.ศ. 2560 กับนโยบายภาครัฐ(ต่อ)

รัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย	นโยบายของรัฐบาล
(ต่อ) โครงสร้างหรือโครงข่ายขั้นพื้นฐานของกิจการสาธารณูปโภค ขั้นพื้นฐานของรัฐอันจำเป็นต่อ การดำรงชีวิตของประชาชนหรือเพื่อความมั่นคงของรัฐ รัฐจะกระทำด้วยประการใดให้ตกเป็น กรรมสิทธิ์ ของเอกชนหรือทำให้รัฐเป็นเจ้าของ น้อยกว่าร้อยละ ห้าสิบเอ็ดมิได้ การจัดหรือดำเนินการให้มีสาธารณูปโภคตามวรรคหนึ่งหรือวรรคสอง รัฐต้องดูแลมิให้มีการเรียกเก็บ ค่าบริการจนเป็น ภาระแก่ประชาชนเกินสมควร การนำสาธารณูปโภคของรัฐไปให้เอกชนดำเนินการทางธุรกิจ ไม่ว่าด้วยประการใด ๆ รัฐต้องได้รับ ประโยชน์ตอบแทน อย่างเป็นธรรม โดยคำนึงถึงการลงทุนของรัฐ ประโยชน์ที่รัฐและเอกชนจะได้รับ และค่าบริการที่จะเรียกเก็บจากประชาชน ประกอบกัน [20]	• ปรับโครงสร้างราคาพลังงาน ควบคู่กับการเร่งรัด ปรับปรุงกฎหมายและระเบียบที่เกี่ยวข้อง [21]
มาตรา 72 รัฐพึงดำเนินการเกี่ยวกับที่ดินทรัพยากรน้ำและ พลังงาน ดังต่อไปนี้ (5) ส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานและการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า รวมทั้งพัฒนา และสนับสนุนให้มีการผลิตและการใช้พลังงานทางเลือกเพื่อเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานอย่างยั่งยืน [20]	• ส่งเสริมเศรษฐกิจสีเขียว โดยอาศัยจุดแข็งของที่ตั้งใกล้ เส้นศูนย์สูตรเข้าถึงพลังงานแสงอาทิตย์ได้ตลอดทั้งปี • สนับสนุนให้ประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตพลังงานสะอาด ทั้งพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ และพลังงานทางเลือกอื่น ๆ • สร้างความมั่นคงทางพลังงาน • ส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า [21]

ตาราง 2 ความสอดคล้องระหว่างยุทธศาสตร์ชาติ กับนโยบายภาครัฐ

ยุทธศาสตร์ชาติ	นโยบายของรัฐบาล
ด้านความมั่นคง 5. การพัฒนากลไกการบริหารจัดการความมั่นคงแบบองค์รวม เพื่อให้กลไกสำคัญทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีการใช้หลักธรรมาภิบาลและการบังคับใช้กฎหมาย อย่างเคร่งครัด โดย (1) การพัฒนากลไกให้พร้อมสำหรับ การติดตาม เฝ้าระวัง แจ้งเตือนป้องกัน และแก้ไขปัญหา (2) การบริหาร จัดการความมั่นคงให้เอื้ออำนวยต่อการพัฒนาประเทศ ในมิติอื่น ๆ และ (3) การพัฒนากลไกและองค์กรขับเคลื่อนยุทธศาสตร์ชาติด้านความมั่นคง [22]	• การเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน รูปแบบใหม่ สำหรับทั้งการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก พลังงานสู่ภูมิภาคอาเซียน [21]
ด้านการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ๑. สร้างการเติบโตอย่างยั่งยืนบนสังคมเศรษฐกิจสีเขียว โดย (1) เพิ่มมูลค่าของเศรษฐกิจฐานชีวภาพให้สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ด้านการสร้างความสามารถในการแข่งขัน (2) อนุรักษ์และฟื้นฟูความหลากหลายทางชีวภาพในและนอก ถิ่นกำเนิด (3) อนุรักษ์และฟื้นฟูแม่น้ำลำคลองและแหล่งน้ำ ธรรมชาติทั่วประเทศ (4) รักษาและเพิ่มพื้นที่สีเขียวที่เป็นมิตร กับสิ่งแวดล้อม และ (5) ส่งเสริมการบริโภคและการผลิต ที่ยั่งยืน [22]	• ส่งเสริมเศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy or Eco-friendly Economy) โดยอาศัยจุดแข็งของที่ตั้งใกล้ เส้นศูนย์สูตรเข้าถึงพลังงานแสงอาทิตย์ได้ตลอดทั้งปี • สนับสนุนให้ประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตพลังงานสะอาด ทั้งพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ บนหลังคาและผืนน้ำ พลังงานน้ำ และพลังงานทาง เลือกรื่น ๆ • สานต่อนโยบายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) เพื่อให้ประเทศไทยเป็นผู้นำของอาเซียน ในด้านการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งจะช่วย

ตาราง 2 ความสอดคล้องระหว่างยุทธศาสตร์ชาติ กับนโยบายภาครัฐ (ต่อ)

ยุทธศาสตร์ชาติ	นโยบายของรัฐบาล
ด้านการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม 5. พัฒนาความมั่นคงน้ำ พลังงาน และเกษตร ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดย (1) พัฒนาการจัดการน้ำ เชิงลุ่มน้ำทั้งระบบเพื่อเพิ่มความมั่นคงด้านน้ำของประเทศ (2) เพิ่มผลิตภาพของน้ำทั้งระบบในการใช้น้ำอย่างประหยัด รู้คุณค่า และสร้างมูลค่าเพิ่มจากการใช้น้ำให้ทัดเทียมกับระดับสากล (3) พัฒนาความมั่นคงพลังงานของประเทศ และส่งเสริมการใช้พลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (4) เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยลดความเข้มข้นของการใช้พลังงาน และ (5) พัฒนาความมั่นคงด้านการเกษตรและอาหารของประเทศและชุมชน ในมิติปริมาณ คุณภาพ ราคาและการเข้าถึงอาหาร [22]	• การสร้างระบบสำรองน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อความมั่นคง ทางยุทธศาสตร์ของประเทศ (SPR) • การสำรวจหาแหล่งพลังงานเพิ่มเติม และการเจรจา ประเด็นพื้นที่ทับซ้อนกับกัมพูชา (OCA) เพื่อลดต้นทุน ด้านพลังงาน • สนับสนุนให้ประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตพลังงานสะอาด ทั้งพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ บนหลังคาและผืนน้ำ พลังงานน้ำ และพลังงานทาง เลือกอื่น ๆ • พัฒนาลาดซื้อขายไฟฟ้าเสรีและคาร์บอนเครดิต (Carbon Credit) เพื่อความยั่งยืน และการเสริมสร้าง ความมั่นคงด้านพลังงาน • สร้างความมั่นคงทางพลังงาน • ส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าสนับสนุนให้ ประชาชนผลิตกระแสไฟฟ้าระบบโซลาร์เซลล์ใช้ในครัวเรือนและมีรายได้จากการจำหน่ายกระแสไฟฟ้าที่ผลิต เกินกว่าความต้องการคืนให้รัฐ [21]
7. กฎหมายมีความสอดคล้องเหมาะสมกับบริบทต่าง ๆ และมีเท่าที่จำเป็น โดย (1) ภาครัฐจัดให้มีกฎหมายที่ สอดคล้องและเหมาะสมกับบริบทต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลง (2) มีกฎหมายเท่าที่จำเป็น	• การปรับโครงสร้างราคาพลังงาน ควบคู่กับการเร่งรัด จัดทำ ปรับปรุงกฎหมายและระเบียบที่เกี่ยวข้อง [21]

ตาราง 2 ความสอดคล้องระหว่างยุทธศาสตร์ชาติ กับนโยบายภาครัฐ (ต่อ)

ยุทธศาสตร์ชาติ	นโยบายของรัฐบาล
(3) การบังคับใช้กฎหมาย อย่างมีประสิทธิภาพ เท่าเทียม มีการเสริมสร้างประสิทธิภาพ การใช้ กฎหมาย [22]	

โดยรวมแล้วนโยบายด้านพลังงานของประเทศไทย มีการกำหนดทิศทางและปรับเปลี่ยนโครงสร้างนโยบายไปตามบริบทของประเทศในแต่ละช่วงเวลา โดยมีเป้าหมายหลักในการสร้างความมั่นคงทางพลังงาน และสนับสนุนการใช้พลังงานสะอาดที่ปล่อยคาร์บอนต่ำ รวมถึงการใช้พลังงานเป็นเครื่องมือในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ โดยนโยบายพลังงานในปี พ.ศ. 2568 ได้มีการสะท้อนแนวคิดสำคัญผ่านสามมิติหลัก ๆ ได้แก่ ความมั่นคงด้านพลังงาน (Security) ความยั่งยืน โดยเน้นพลังงานคาร์บอนต่ำ (Sustainability) และการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ (Economics) นโยบายพลังงานในปี พ.ศ. 2568 ยังเน้นการจัดหาแหล่งพลังงานใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พร้อมกับการพัฒนาระบบพลังงานให้มีประสิทธิภาพ

อีกทั้งการเตรียมมาตรการรองรับการเปลี่ยนผ่านพลังงาน (Energy Transition) ผ่านการสนับสนุนพลังงานสีเขียว โดยใช้เทคโนโลยีผลิตพลังงานสะอาดไม่ปล่อยควันพิษและคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังสนับสนุนด้านการลงทุนในภาคพลังงานเพื่อเพิ่มศักยภาพการแข่งขันทางเศรษฐกิจ โดยมีการกำหนดแนวนโยบายดังกล่าวที่มีความสอดคล้องและต่อเนื่องกันจากอดีตถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาจากนโยบายในระดับชาติ เช่น รัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย พุทธศักราช พ.ศ. 2560 และ ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี อีกทั้งพิจารณานโยบายของรัฐบาลในแต่ละยุค โดยในแต่ละแผนที่ผ่านมามีความสำคัญกับความมั่นคง ความยั่งยืน และการพัฒนาเศรษฐกิจจากภาคพลังงานอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ประเทศมีความมั่นคงทางด้านพลังงาน และการขับเคลื่อนเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเพื่อให้เห็นภาพรวมของการพัฒนาด้านพลังงานในเชิงแผนและเชิงกลยุทธ์มากยิ่งขึ้น หัวข้อถัดไปจะเป็นการทบทวน แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก AEDP2015 (พ.ศ.2558-พ.ศ.2579) ซึ่งถือเป็นกรอบนโยบายสำคัญที่วางแนวทางการส่งเสริมพลังงานหมุนเวียนของประเทศในระยะยาว และเป็นจุดเริ่มต้นที่นำมาสู่การปรับปรุงและพัฒนานโยบายด้านพลังงานอย่างต่อเนื่อง จนถึงการวางแนวทางนโยบายพลังงานในปัจจุบัน

2.1.1 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก AEDP2015

เพื่อให้สอดคล้องกับรอบการจัดทำแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ รวมถึงสนับสนุนการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน กระทรวงพลังงานจึงได้จัดทำ แผนบูรณาการพลังงานระยะยาว (Thailand Integrated Energy Blueprint: TIEB) โดยได้ทบทวนแผนพลังงานหลัก 5 ฉบับ ได้แก่

1. แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า (PDP)
2. แผนอนุรักษ์พลังงาน (EEP)
3. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP)
4. แผนบริหารจัดการก๊าซธรรมชาติ (Gas Plan)
5. แผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิง (Oil Plan)

แผน TIEB มีการวางกรอบแผนบูรณาการพลังงานระยะยาว ซึ่งมุ่งเน้นให้ความสำคัญอยู่ 3 ด้านหลัก ได้แก่

1. ความมั่นคงทางพลังงาน (Energy Security) เพื่อรองรับความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจและประชากร พร้อมทั้งกระจายสัดส่วนของเชื้อเพลิงอย่างเหมาะสม
2. ด้านเศรษฐกิจ (Economy) มุ่งลดต้นทุนพลังงานให้เหมาะสมและไม่เป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาประเทศ ควบคู่กับการปฏิรูปโครงสร้างราคาพลังงานและส่งเสริมประสิทธิภาพการใช้
3. ด้านสิ่งแวดล้อม (Ecology) โดยการเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนและการใช้เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชน

โดยแผน AEDP2015 มีเป้าหมายการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนภายในประเทศให้เต็มศักยภาพ ด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับประเทศ พร้อมส่งเสริมบทบาทของชุมชนในมิติด้านสังคมและสิ่งแวดล้อม โดยได้มีการกำหนด ยุทธศาสตร์หลัก 6 ด้าน ได้แก่

1. การส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนในการผลิตและใช้พลังงานทดแทน
2. การปรับมาตรการจูงใจภาคเอกชนให้เหมาะสม
3. การแก้ไขข้อกฎหมายและระเบียบที่ยังเป็นอุปสรรค
4. การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน เช่น สายส่งไฟฟ้าและระบบ Smart Grid
5. การสร้างความรู้ความเข้าใจแก่ประชาชน
6. การใช้ผลงานวิจัยเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมพลังงานทดแทนอย่างครบวงจร

เป้าหมายภายใต้ AEDP2015 ได้กำหนดเป้าหมายในการเพิ่มสัดส่วนของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ภายในปี พ.ศ. 2579 โดยมีแหล่งพลังงานหลักประกอบด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ 6,000 เมกะวัตต์ พลังงานลม 3,002 เมกะวัตต์ ชีวมวล 5,570 เมกะวัตต์ และอื่น ๆ เช่น ชยะ พลังน้ำ และก๊าซชีวภาพ รวมทั้งหมด 19,684 เมกะวัตต์ เป้าหมายดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงการใช้พลังงานสะอาดในภาคการผลิตไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงาน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว [15, 23]

2.1.2 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก AEDP2018

การเปลี่ยนผ่านเข้าสู่ยุคดิจิทัลภายใต้แผนนโยบาย ไทยแลนด์ 4.0 กับการเติบโตอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า ส่งผลให้รูปแบบการใช้พลังงานของประเทศเปลี่ยนแปลงไป ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้ามีความสำคัญมากขึ้น โดยเฉพาะในภาคขนส่งที่เดิมพึ่งพาเชื้อเพลิงชีวภาพอย่างมากและมีแนวโน้มจะลดลงเนื่องจากเปลี่ยนไปใช้พลังงานจากไฟฟ้า นอกจากนี้ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีด้านพลังงานและระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงอย่างต่อเนื่องเอื้อให้ผู้บริโภคจำนวนมากสามารถเปลี่ยนบทบาทเป็น ผู้ผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้เอง หรือขายกลับเข้าสู่ระบบ โดยแนวโน้มดังกล่าวนำไปสู่ความจำเป็นในการปรับปรุงแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกฉบับเดิม (AEDP2015) ให้สอดคล้องกับบริบทใหม่ของประเทศ ดังนั้น กระทรวงพลังงานจึงได้จัดทำ แผน AEDP2018 (พ.ศ. 2561–2580) โดยเป็นส่วนหนึ่งของ แผนบูรณาการพลังงานระยะยาว (Thailand Integrated Energy Blueprint: TIEB) ที่ประกอบด้วย 5 แผนหลัก ได้แก่

1. แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า (PDP)
2. แผนอนุรักษ์พลังงาน (EEP)
3. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP)
4. แผนบริหารจัดการก๊าซธรรมชาติ (Gas Plan)
5. แผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิง (Oil Plan)

แผนทั้ง 5 ยังมีความสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561–2580) และแผนการปฏิรูปประเทศด้านพลังงาน โดยมุ่งเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศในระยะยาว ควบคู่ไปกับการส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเน้นการสร้างสมดุลระหว่างความมั่นคงทางพลังงาน การพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ภายใต้หลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง และการมีส่วนร่วมจากทุกภาคส่วน ทั้งภาครัฐ เอกชน และประชาชน การขับเคลื่อนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกภายใต้แผน AEDP2018 จำเป็นต้องพิจารณาความพร้อมในหลายด้าน ได้แก่

- การจัดหาวัตถุดิบ ที่สามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่อง
- เทคโนโลยี ที่เหมาะสมและเข้าถึงได้โดยผู้ผลิต
- กฎระเบียบและสิทธิในที่ดิน ที่เอื้อต่อการพัฒนา
- ความต้องการจากผู้บริโภค ที่สามารถซื้อพลังงานทดแทนในราคาที่เหมาะสม

โดยมีนโยบายและแผนงานของหน่วยงานต่าง ๆ ที่มีบทบาทเกี่ยวข้อง แบ่งเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่

1. นโยบายที่มีผลต่อการจัดหาพลังงานทดแทน
 - ยุทธศาสตร์น้ำมันสำปะหลัง
 - ยุทธศาสตร์อ้อยโรงงานและน้ำตาลทราย
 - ยุทธศาสตร์การปฏิรูปปาล์มน้ำมัน
 - ประกาศกระทรวงมหาดไทยว่าด้วยการจัดการขยะ
 - กฎกระทรวงเกี่ยวกับที่ดินในเขตปฏิรูปที่ดิน
2. นโยบายที่มีผลต่อการผลิตและใช้พลังงานทดแทน
 - นโยบายรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน
 - แผนพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ทกริด
 - พระราชบัญญัติกองทุนน้ำมันเชื้อเพลิง พ.ศ. 2562
 - ยุทธศาสตร์ระบบคมนาคมขนส่ง 20 ปี
 - นโยบายส่งเสริมรถยนต์ไฟฟ้า
3. นโยบายที่ส่งผลต่อเป้าหมายโดยรวมของแผน
 - ความสำเร็จของการดำเนินงานตามแผน PDP, EEP, Oil Plan และ Gas Plan

กรอบแนวคิดในการจัดทำแผน AEDP2018 เพื่อให้สอดคล้องกับบริบทพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไป แผน AEDP2018 ได้กำหนดกรอบแนวทางการพัฒนา ดังนี้

- กำหนดช่วงเวลาของแผนให้สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี
- บูรณาการแผนร่วมกับแผนหลักอื่นในกระทรวงพลังงาน
- ปรับลดสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพในภาคขนส่ง เนื่องจากการเติบโตของยานยนต์ไฟฟ้า
- เพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนให้รองรับเศรษฐกิจฐานดิจิทัล
- ยังคงเป้าหมายสัดส่วนพลังงานทดแทนที่ ร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย ภายในปี พ.ศ. 2580

เป้าหมายภายใต้ AEDP2018 ได้กำหนดเป้าหมายในการเพิ่มสัดส่วนของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ภายในปี พ.ศ. 2580 โดยมีแหล่งพลังงานหลักประกอบด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ 12,139 เมกะวัตต์ พลังงานแสงอาทิตย์ทุ่นลอยน้ำ 2,725 เมกะวัตต์ พลังงานลม 2,989 เมกะวัตต์ ชีวมวล 5,790 เมกะวัตต์ และอื่น ๆ เช่น ชยะ พลังน้ำ และก๊าซชีวภาพ รวมทั้งหมด 29,411 เมกะวัตต์ เป้าหมายดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความต้องการที่จะใช้พลังงานสะอาดเป็นพลังงานหลักร่วมกับพลังงานอื่น เพื่อเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานลดการพึ่งพาพลังงานฟอสซิล และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [15, 24]

2.1.3 แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า PDP2024 (ฉบับร่าง)

แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศฉบับปี พ.ศ. 2567 หรือ ร่างแผน PDP2024 จัดทำขึ้น โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อปรับโครงสร้างพลังงานของประเทศไทยให้สอดคล้องกับเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจก และการเข้าสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี พ.ศ. 2050 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emission) ภายในปี พ.ศ. 2065 ตามทิศทางของแผนพลังงานชาติ และนโยบายพลังงานโลก การปรับปรุงแผน PDP2024 มีสาเหตุสำคัญจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างความต้องการไฟฟ้า โดยเฉพาะหลังสถานการณ์โควิด-19 ซึ่งส่งผลให้มีการผลิตไฟฟ้ามากกว่าความต้องการในบางช่วงเวลา นอกจากนี้ยังมีการเติบโตของเทคโนโลยีที่เปลี่ยนพฤติกรรมผู้ใช้ เช่น Solar Rooftop รถยนต์ไฟฟ้า (EV) ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน (BESS) และ Smart Grid ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อการวางแผนกำลังผลิตในอนาคต โดยหลักการสำคัญของแผน PDP2024 มีอยู่ด้วยกัน 4 ด้าน ได้แก่

1. Security เสริมความมั่นคงระบบไฟฟ้าให้รองรับการผลิตจากพลังงานหมุนเวียนที่ไม่แน่นอน
2. Economy ควบคุมต้นทุนค่าไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม
3. Ecology ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล
4. Efficiency เพิ่มประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าและลดค่าเสียเปล่าในสายส่ง

และในร่างแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ (PDP2024) ยังได้กำหนด เป้าหมายสำคัญเชิงยุทธศาสตร์ เพื่อรองรับการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานและการบรรลุเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อมของประเทศโดยมีรายละเอียด ดังนี้

- ยกระดับสัดส่วนการผลิตไฟฟ้า GWh จากพลังงานสะอาด ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ภายในปี พ.ศ. 2580
- ลดการปล่อยก๊าซ CO₂ ภาคการผลิตไฟฟ้า เหลือ 67.7 ล้านตันในปี พ.ศ. 2573 (ตามเป้าหมาย NDC 40%)

- ส่งเสริมเทคโนโลยีใหม่ เช่น โรงไฟฟ้า SMR (Small Modular Reactor) ระบบสูบกลับ (Pumped Storage) ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ BESS และการผสมไฮโดรเจนในโรงไฟฟ้าก๊าซ
- จัดทำโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนใหม่ รวม 34,851 MW ภายในปี พ.ศ. 2580
- กำลังผลิตรวมทั้งระบบ ณ สิ้นแผนปี พ.ศ. 2580 วางแผนให้มีการกำลังการผลิตอยู่ที่ 112,391 MW

นอกจากนี้ยังมีการวางนโยบายโครงสร้างสัดส่วนพลังงานในปี พ.ศ. 2580 ตาม ร่าง PDP2024 โดยมีสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียน (Renewables) อยู่ที่ 51% พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuels) อยู่ที่ 47.6% พลังงานนิวเคลียร์ขนาดเล็ก (SMR) อยู่ที่ 1% และพลังงานอื่น ๆ (DR, EE) อยู่ที่ 0.4% จากร่าง PDP2024 ยังชี้ให้เห็นว่า แนวทางใน PDP2024 จะมีการเพิ่มพลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะ พลังงานแสงอาทิตย์และลม จะเป็นแหล่งผลิตหลักในอนาคตควบคู่ไปกับการใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ BESS เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า ขณะเดียวกันโรงไฟฟ้าฟอสซิลจะลดบทบาทลงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะถ่านหินและลิกไนต์ ซึ่งจะถูกแทนที่ด้วยแหล่งพลังงานสะอาดที่มีความยืดหยุ่นและปล่อยคาร์บอนต่ำ

เป้าหมายภายใต้ PDP2024 (ฉบับร่าง) ได้กำหนดเป้าหมายในการเพิ่มสัดส่วนของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ภายในปี พ.ศ. 2580 โดยมีแหล่งพลังงานหลักประกอบด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ 33,269 เมกะวัตต์ พลังงานแสงอาทิตย์ทุ่นลอยน้ำ 2,788 เมกะวัตต์ พลังงานลม 9,339 เมกะวัตต์ และอื่น ๆ เช่น ชยะ พลังน้ำ และก๊าซชีวภาพ รวมทั้งหมด 81,893 เมกะวัตต์ เป้าหมายดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงการยกระดับพลังงานหมุนเวียนให้เป็นแหล่งผลิตหลักของประเทศ เพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลในระยะยาว พร้อมทั้งส่งเสริมระบบพลังงานที่มีความ ยืดหยุ่น มั่นคง และยั่งยืน รองรับการเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ และการบรรลุเป้าหมาย Net Zero Emissions ในอนาคต [12]

จากแผนและนโยบายด้านพลังงานทดแทนของประเทศไทยได้มีการกำหนดทิศทางพลังงานทางเลือกไว้ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันโดยพลังงานแสงอาทิตย์ได้มีการตั้งเป้าหมายไว้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากความต้องการลดการพึ่งพาพลังงานจากฟอสซิล และพลังงานแสงอาทิตย์ยังสามารถติดตั้งได้ในระดับครัวเรือนและยังมีโอกาสที่จะราคาถูกลงเรื่อย ๆ ทำให้พลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นอีกปัจจัยหลักที่สำคัญอย่างมากต่อการนำประเทศไปสู่การเป็นประเทศที่เป็นกลางทางคาร์บอน ดังนั้น เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานของพลังงานแสงอาทิตย์และการกักเก็บพลังงาน จึงจำเป็นต้องศึกษาหลักการทำงานของพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน

2.2 เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

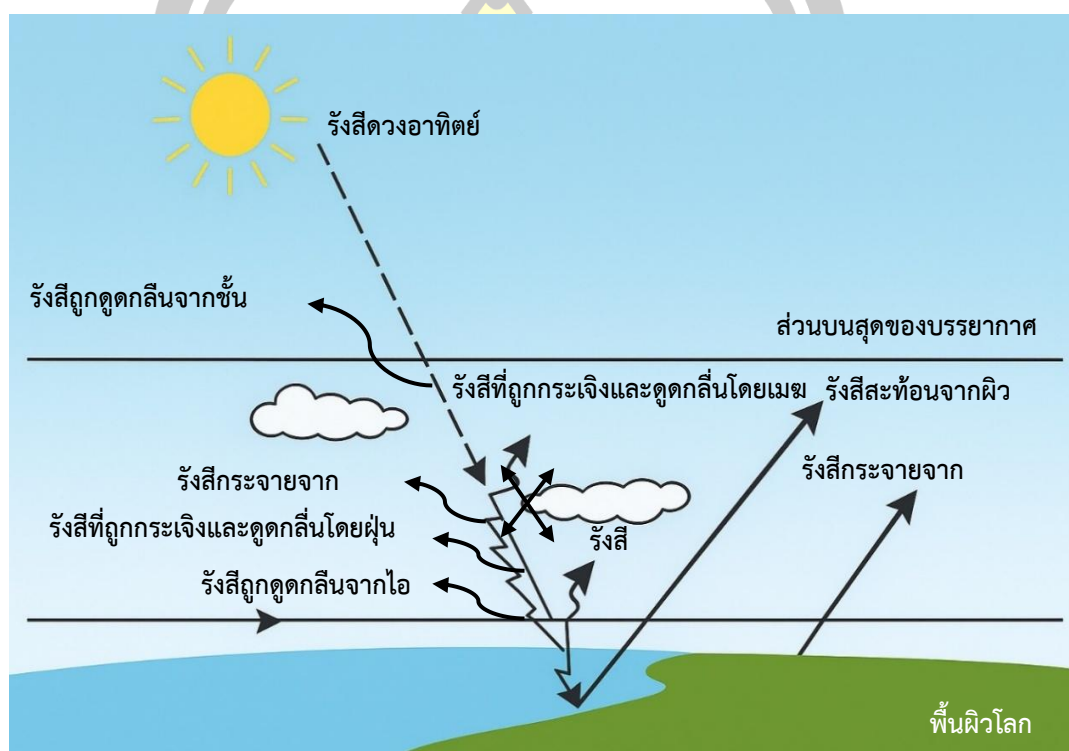
จากนโยบายการเพิ่มสัดส่วนของพลังงานทดแทนและคำนึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (PDP) และแผนพัฒนาพลังงานทดแทน (AEDP) นั้นทำให้พลังงานทดแทนอย่างพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีบทบาทอย่างมากเนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนที่สามารถติดตั้งได้ง่ายกว่าพลังงานทดแทนประเภทอื่น อีกทั้งยังเหมาะสมสำหรับประเทศไทยที่มีแดดทั้งปี รวมถึงเป็นระบบเล็กสามารถใช้ในครัวเรือน หรือระบบขนาดใหญ่ที่สามารถใช้เป็นโรงไฟฟ้าได้อีกด้วย ซึ่งแตกต่างจากพลังงานทดแทนแบบอื่น เช่น ชีวมวลที่จำเป็นต้องมีเทคโนโลยีการผลิตพลังงานที่ซับซ้อนอย่างเตาเผาและกังหันไอน้ำ หรือพลังงานลมที่ต้องการพื้นที่ขนาดใหญ่ และความแรงลมที่เหมาะสมเพื่อติดตั้งกังหันลมทำให้การใช้พลังงานลมยังไม่สะดวกในการติดตั้งในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดทั้งด้านพื้นที่และสภาพอากาศ

2.2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานจากแสงอาทิตย์เกิดจาก ดวงอาทิตย์ โดยมาในรูปแบบของแสง และ รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ซึ่งรวมถึง รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) แสงที่มองเห็น (Visible light) และ รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation) รังสีเหล่านี้มีความสามารถในการถ่ายโอนพลังงานไปยังโลกผ่านอวกาศในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางด้วยความเร็วแสงจากดวงอาทิตย์มาถึงโลก โดยใช้เวลาประมาณ 8.18 นาที โดยเฉลี่ย พลังงานนี้เดินทางผ่านอวกาศประมาณ 150 ล้านกิโลเมตร หรือ 93 ล้านไมล์ และหากคิดความยาวคลื่นทั้งหมดที่มีอยู่ในรังสีดวงอาทิตย์ พลังงานทั้งหมดหรือความส่องสว่างของดวงอาทิตย์จะอยู่ที่ประมาณ 3.86×10^{23} กิโลวัตต์วัตต์ ใน 1 วัตต์จะสอดคล้องกับพลังงานที่แผ่ออกมาต่อหน่วยเวลา หากพิจารณาจากระยะห่างจากดวงอาทิตย์ถึงโลกจะเห็นได้ว่า ขนาดของโลกค่อนข้างเล็ก เศษส่วนของความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ที่มาถึงโลกของเราคือ 1.75×10^{14} กิโลวัตต์ เมื่อถูกดูดซับจากชั้นบรรยากาศจะตกลงบนพื้นโลกประมาณ 1.25×10^{14} กิโลวัตต์ หรือประมาณ 961 ถึง 1,191 วัตต์ต่อตารางเมตร คิดเป็นพลังงานประมาณ 2,000–2,500 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี โดยปริมาณความร้อนที่ดวงอาทิตย์ถ่ายเทมาสู่โลกทั้งหมดนั้นกว่าร้อยละ 31.8 ได้ถูกสะท้อนกลับในลักษณะคลื่นสั้นสู่ชั้นบรรยากาศ และมีเพียงร้อยละ 68.2 ที่ผิวโลกสามารถรับความร้อนได้ [15, 25]

จากการส่งพลังงานของดวงอาทิตย์มายังโลกนั้น จะมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละพื้นที่ของโลก โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการได้รับพลังงานต่อพื้นที่ เช่น ระยะทางจากโลกถึงดวงอาทิตย์ มุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ การถูกบดบังจากก้อนเมฆหรือชั้นบรรยากาศ และการสะท้อนของแสงจากพื้นผิวโลก เมื่อแสงอาทิตย์ผ่านเข้าสู่ชั้นบรรยากาศของโลก พลังงานของแสงส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนโดยชั้นโอโซนและก๊าซในบรรยากาศ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ และ ไอน้ำ ซึ่งมีบทบาทในการดูดซับและกระจายรังสี

ที่เข้ามา นอกจากนี้ยังมีการ สะท้อนของแสงบางส่วนจากก้อนเมฆ และฝุ่นละอองในบรรยากาศ ส่งผลให้แสงบางส่วนไม่สามารถมาถึงพื้นผิวโลกได้เต็มที่ โดยการสะท้อนและการดูดซับในชั้นบรรยากาศทำให้ปริมาณพลังงานที่มาถึงพื้นโลก ลดลงจากรังสีดวงอาทิตย์ที่แท้จริง และการกระจายตัวของพลังงานนี้จะขึ้นอยู่กับมุมการตกกระทบ ซึ่งจะมีความแตกต่างกันไปตามฤดูกาลและละติจูดของพื้นที่นั้น [26] ไล่ละเอียดดังภาพประกอบ 4

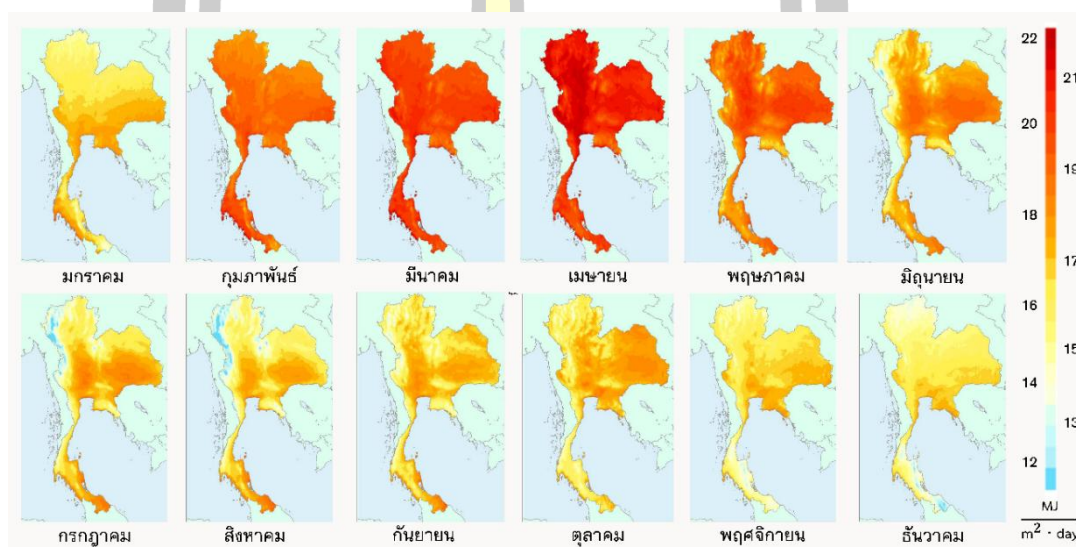


ภาพประกอบ 4 การกระจายพลังงานแสงอาทิตย์และการดูดกลืนในชั้นบรรยากาศ [15, 26]

2.2.2 การประเมินศักยภาพของประเทศไทยในการติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์

ประเทศไทยมีจุดแข็งคือเป็นประเทศที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ซึ่งได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงประมาณ 5.5 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรโดยเฉลี่ย [27] โดยศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับพื้นที่ และขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่นั้น โดยบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากก็จะมีศักยภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้สูง สำหรับการใชพลังงานแสงอาทิตย์ที่ต้องใช้อุปกรณ์รวมแสงนั้น จำเป็นต้องทราบศักยภาพรังสีตรงด้วย และสำหรับประเทศไทยในแต่ละเดือนความเข้มของแสงอาทิตย์จะต่างกันออกไป เนื่องด้วยมุมของดวงอาทิตย์ที่กระทำต่อโลกเปลี่ยนไปตามฤดูกาล โดยพบว่าในช่วงเดือน กุมภาพันธ์ ถึงเดือน พฤษภาคม

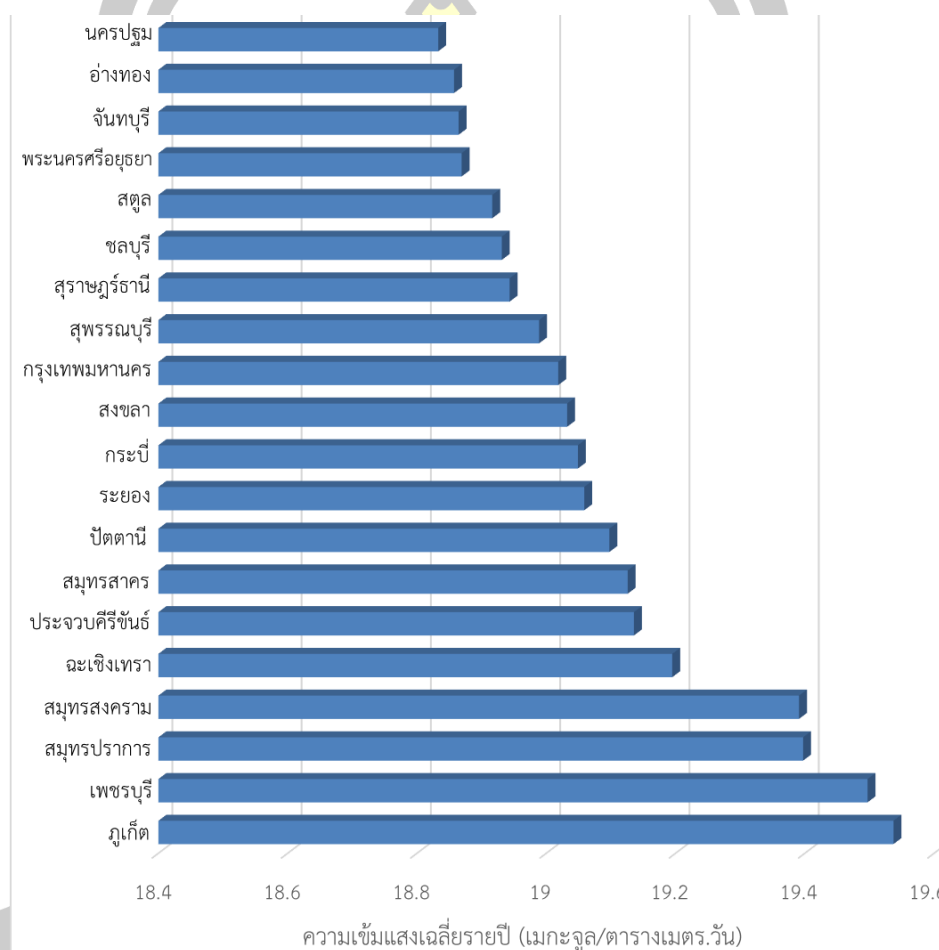
ประเทศไทยได้รับความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์สูงที่สุด เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในช่วงของหน้าร้อน และในช่วงเดือนอื่น ๆ ประเทศไทยก็ยังคงได้รับความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ค่อนข้างที่จะสูง เนื่องจากประเทศไทยอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรทำให้ทุกฤดู จะยังคงได้รับแสงแดดจากดวงอาทิตย์ ส่งผลให้ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศที่มีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการพัฒนา พลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งในระดับครัวเรือน อุตสาหกรรม และภาคสาธารณสุขปโภค ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานสะอาดในอนาคต [25, 28] ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน พ.ศ. 2565 [29]

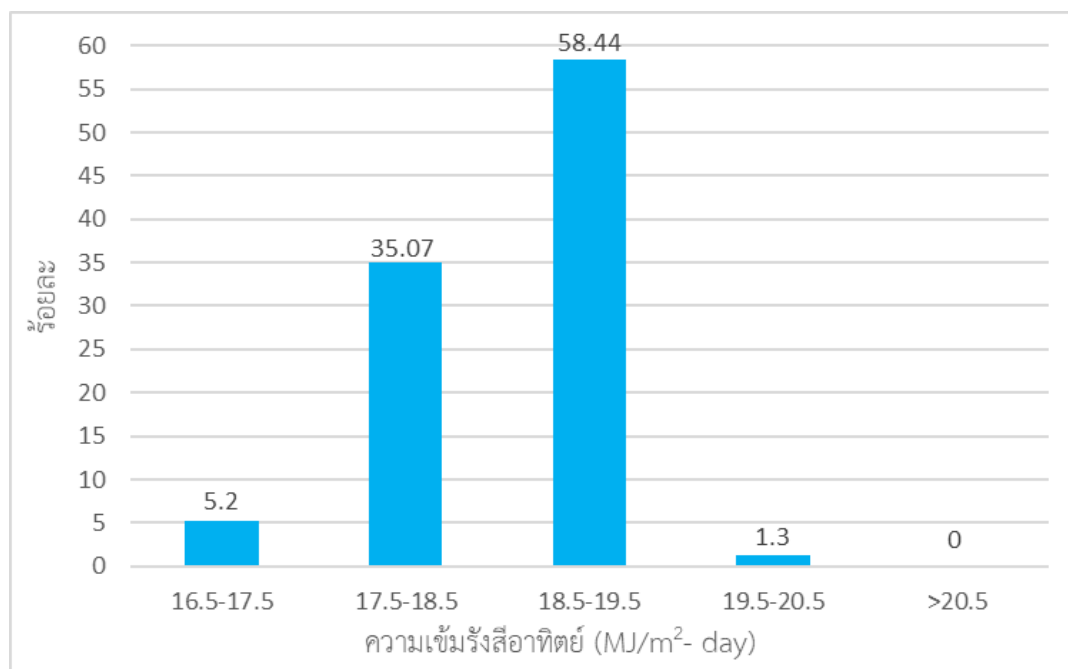
เมื่อพิจารณาศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับจังหวัด พบว่าจังหวัดที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีสูงที่สุด ได้แก่ ภูเก็ต เพชรบุรี สมุทรปราการ และสมุทรสงคราม ซึ่งมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยมากกว่า $19.39 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ โดยเฉพาะจังหวัดภูเก็ตที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดในกลุ่มนี้อยู่ที่ $19.54 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ สะท้อนให้เห็นถึงข้อได้เปรียบทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ภาคใต้และภาคกลางตอนล่างที่ตั้งอยู่ในบริเวณที่ได้รับแสงแดดตลอดทั้งปี โดยมีท้องฟ้าปลอดโปร่งและสภาพภูมิอากาศที่เอื้อต่อการสะสมพลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ ในลำดับรองลงมา ได้แก่ ปัตตานี สมุทรสาคร ประจวบคีรีขันธ์ และฉะเชิงเทรา ซึ่งมีค่าความเข้มเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ $19.09\text{--}19.20 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ ถือเป็นระดับที่สูงเพียงพอในการวางระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ หรือเพื่อการใช้ภายในครัวเรือนและชุมชน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีความต้องการพลังงานสูง หรือมีข้อจำกัดในการเข้าถึงระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก และหากพิจารณาภาพรวมในระดับประเทศ จะพบว่าหลายจังหวัดมีค่าเฉลี่ยของความเข้มแสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยแล้วอยู่ในช่วง 18.5--

19.0 MJ/m²·day ซึ่งนับเป็นระดับที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับประเทศอื่น ๆ ที่อยู่ในละติจูดเดียวกัน โดยเฉพาะกลุ่มจังหวัดในภาคตะวันตก ภาคตะวันออก ซึ่งอยู่ในแนวโซนรับแสงอาทิตย์ของโลก นอกจากนี้การกระจายตัวของพลังงานแสงอาทิตย์ในลักษณะนี้ทำให้ประเทศไทยสามารถกำหนดแนวทางพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ (Distributed Solar PV) ได้อย่างเหมาะสมในหลายพื้นที่ ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของ 20 จังหวัดที่มีศักยภาพสูง พ.ศ. 2566 [30]

จากการประเมินความเข้มของแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีในแต่ละจังหวัดของประเทศไทย จะเห็นว่าจังหวัดที่มีศักยภาพสูงกระจายตัวอยู่ในหลากหลายภูมิภาค ทั้งภาคใต้ ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตกของประเทศ สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพที่ครอบคลุมในการพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพในทุกภูมิภาคของไทย ทำให้สามารถออกแบบและวางแผนการผลิตไฟฟ้าในรูปแบบกระจายศูนย์ Distributed Generation



ภาพประกอบ 7 ร้อยละของพื้นที่ที่ได้รับรังสีอาทิตย์ในระดับต่าง ๆ พ.ศ. 2566 [15, 30]

หากพิจารณาความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ในเชิงพื้นที่ทั่วประเทศไทย ตามข้อมูลที่แสดงในภาพประกอบ 7 จะพบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับที่สูงและกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะบริเวณที่มีความเข้มรังสีเฉลี่ยรายวันต่อปีในช่วง 18.5–19.5 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งครอบคลุมพื้นที่มากที่สุดถึง ร้อยละ 58.44 ของพื้นที่ทั้งหมดทั่วประเทศ ขณะที่พื้นที่อีกราว ร้อยละ 35.07 อยู่ในช่วงความเข้มรังสี 17.5–18.5 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งยังถือว่าเป็นช่วงศักยภาพที่ดี เหมาะสมต่อการผลิตพลังงานแสงอาทิตย์เชิงพาณิชย์และระดับชุมชน ส่วนพื้นที่ที่มีศักยภาพค่อนข้างต่ำ คือช่วง 16.5–17.5 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน พบว่ามีเพียง ร้อยละ 5.2 ของพื้นที่ทั้งหมดเท่านั้น ซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นพื้นที่ที่ได้รับแสงอาทิตย์น้อยกว่า เช่น พื้นที่ภูเขาหรือแถบฝนตกชุก จากการเฉลี่ยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันของพื้นที่ทั่วประเทศ พบว่าค่าเฉลี่ยทั้งปียู่ที่ 18.45 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับหลายประเทศในภูมิภาคเดียวกัน และสะท้อนให้เห็นถึงความเหมาะสมของประเทศไทยในการพัฒนาโครงการพลังงานแสงอาทิตย์อย่างเป็นระบบ ทั้งในระดับกระจายศูนย์และระดับโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ นอกจากนี้ หากเปรียบเทียบกับประเทศอื่น ๆ จากภาพประกอบ 7 จะพบว่า ประเทศไทยอยู่ในกลุ่มประเทศที่มีศักยภาพสูงด้านพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดสู่การเป็นผู้นำด้านการใช้พลังงานสะอาดในภูมิภาคได้อย่างมั่นคงในอนาคต [26, 28]

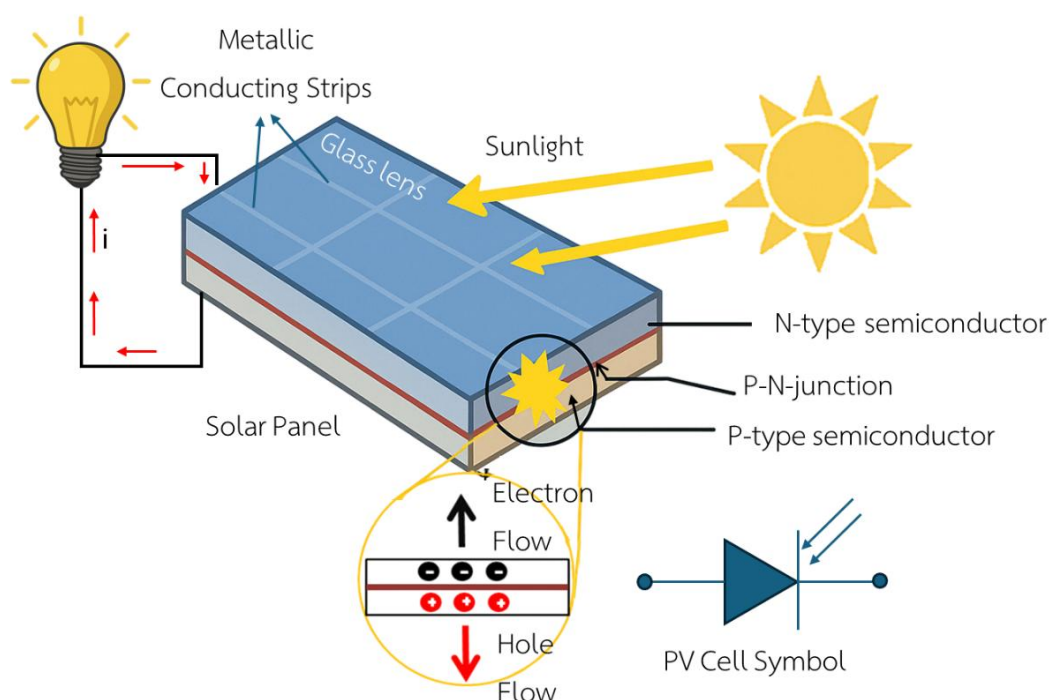
2.2.3 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรและมีแสงแดดตลอดทั้งปี ด้วยเหตุนี้ประเทศไทยเป็นอีกหนึ่งประเทศที่มีศักยภาพสูงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ การนำเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มาใช้ ถือว่าเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล และช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งสอดคล้องกับข้อตกลงปารีส (Paris Agreement) และนโยบายด้านพลังงานสะอาดของประเทศไทย ปัจจุบันการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างก้าวหน้า ทั้งในด้านแผงโซลาร์เซลล์ ระบบกักเก็บพลังงาน และระบบบริหารจัดการพลังงาน ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยลดลง และเพิ่มความคุ้มค่าในการลงทุน

ก) เทคโนโลยีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

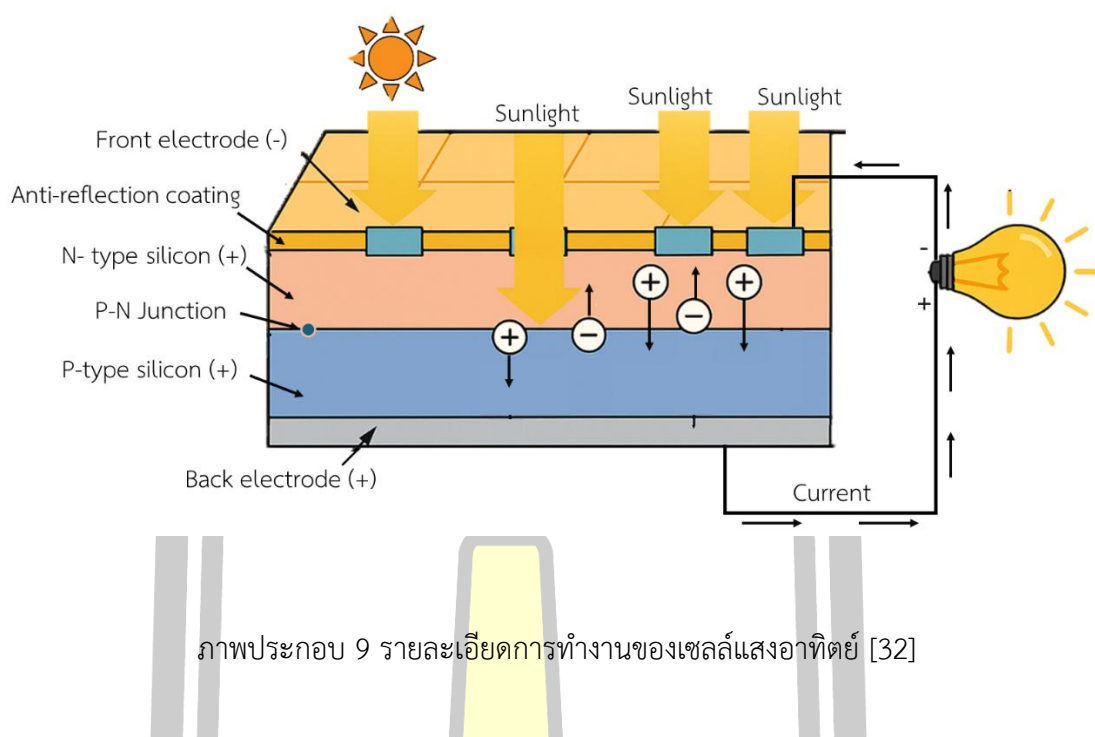
สำหรับประเทศไทยได้เริ่มต้นใช้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในปี พ.ศ. 2519 โดยมีหน่วยงานหลัก ได้แก่ กระทรวงสาธารณสุขและมูลนิธิแพथยาสา ซึ่งได้นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนประมาณ 300 แผง ขนาด 15 และ 30 วัตต์ ต่อมาหน่วยงานภาครัฐ กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน (ซึ่งปัจจุบันคือ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาและส่งเสริมการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นการใช้งานในด้านระบบแสงสว่าง โทรคมนาคม และเครื่องสูบน้ำในพื้นที่ห่างไกล [25]

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ หัวใจสำคัญของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ คือปรากฏการณ์โฟโตวอลตาอิก (Photovoltaic Effect: PV) ซึ่งถูกค้นพบโดย เอ็ดมอนด์ เบกเกอร์ (Edmond Becquerel) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ในปี พ.ศ. 2382 (ค.ศ. 1839) ปรากฏการณ์นี้เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตมาจากวัสดุกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ซึ่งเป็นธาตุที่มีอยู่มากและมีต้นทุนต่ำ โดยซิลิกอนจะถูกแปรรูปให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ และผ่านการเติมสารเจือปนบางชนิด เช่น โบรอน และ ฟอสฟอรัส เพื่อสร้างสารกึ่งตัวนำชนิด P-type และ N-type ซึ่งประกบกันเป็นรอยต่อที่เรียกว่า p-n junction เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิวเซลล์จะทำให้พลังงานของอนุภาคของแสงหรือเรียกว่า อนุภาคโฟตอน (Photons) ซึ่งจะถูกถ่ายเทสู่อิเล็กตรอน (Electron) ภายในวัสดุกึ่งตัวนำ และทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะหลุดจากอะตอมและเคลื่อนที่อย่างอิสระ สนามไฟฟ้าที่เกิดจากรอยต่อ p-n junction จะผลักดันให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังด้านหนึ่ง ขณะที่โฮล (ช่องว่างของอิเล็กตรอน) เคลื่อนไปอีกด้านหนึ่ง เมื่อต่อวงจรกับโหลดภายนอก การไหลของอิเล็กตรอนในวงจรจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (DC) [31] ดังภาพประกอบ 8

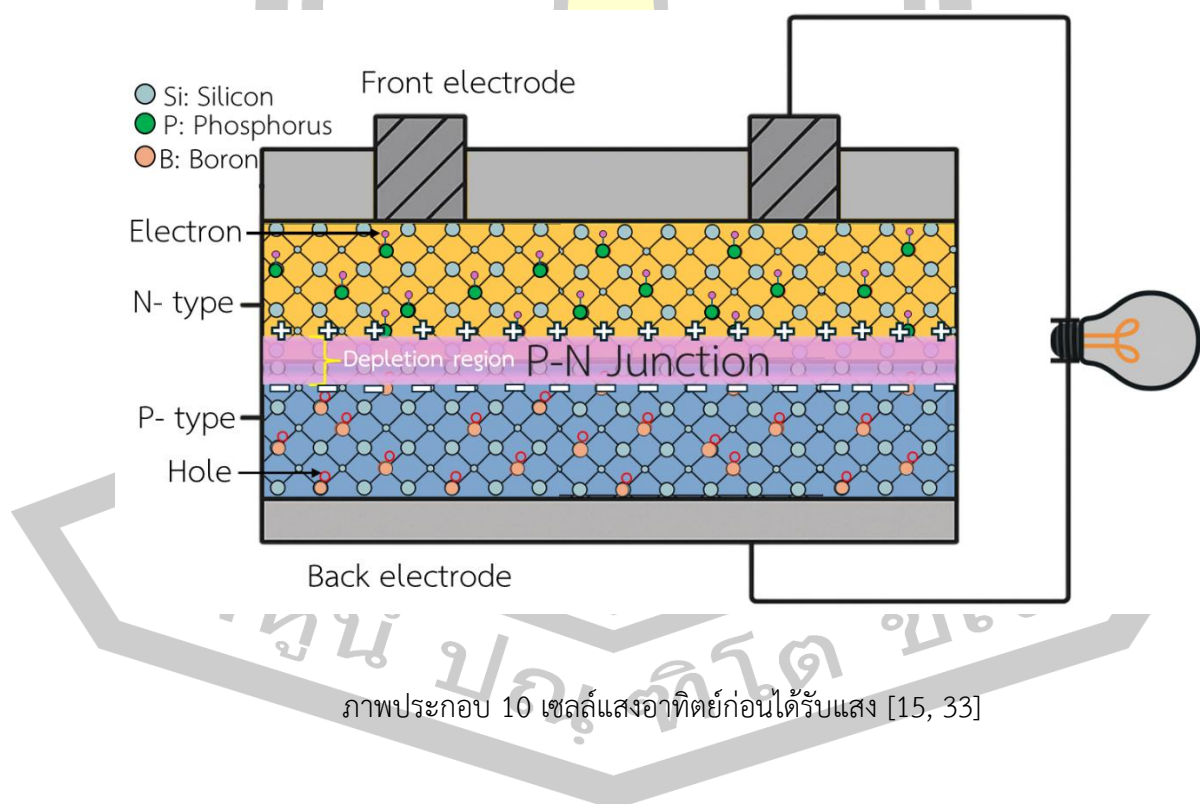


ภาพประกอบ 8 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [15, 25]

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ จากภาพประกอบ 8 ในภาพแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยวัสดุกึ่งตัวนำสองชนิด คือ N-type และ P-type ซึ่งประกอบกันเป็นรอยต่อ P-N junction โดยชั้นของ N-type ซิลิคอน อยู่ด้านบนของเซลล์เป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่ถูกเติมสารเจือปนฟอสฟอรัส ทำให้มีอิเล็กตรอนส่วนเกิน หรือเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และเมื่อแสงแดดตกกระทบอิเล็กตรอนเหล่านี้จะได้รับพลังงานจาก โฟตอน(Photons) ส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ ถัดมาคือชั้นของ P-type ซิลิคอน คือส่วนด้านล่างของเซลล์ เป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่โด๊ปด้วยโบรอน ทำให้เกิดโฮลหรือช่องว่างของอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา เมื่อแสงแดด (Sunlight) ส่องผ่านกระจกด้านหน้า (Glass lens) และตกกระทบชั้นเซลล์ จากนั้นโฟตอน (Photons) จากแสงจะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนใน N-type อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจะเคลื่อนที่ขึ้นไปยัง Front Electrode หรือขั้วบวก และโฮลใน P-type จะเคลื่อนที่ลงไปยัง Back Electrode ขั้วลบ เมื่อวงจรถูกปิด เช่น ต่อหลอดไฟ กระแสไฟฟ้าจะไหลจาก Front Electrode จะผ่านโหลดวิ่งไปยัง Back Electrode ซึ่งเป็นการจับคู่อิเล็กตรอน-โฮล และปล่อยพลังงานเป็นไฟฟ้า ดังแสดงรายละเอียดเพิ่มในภาพประกอบ 9

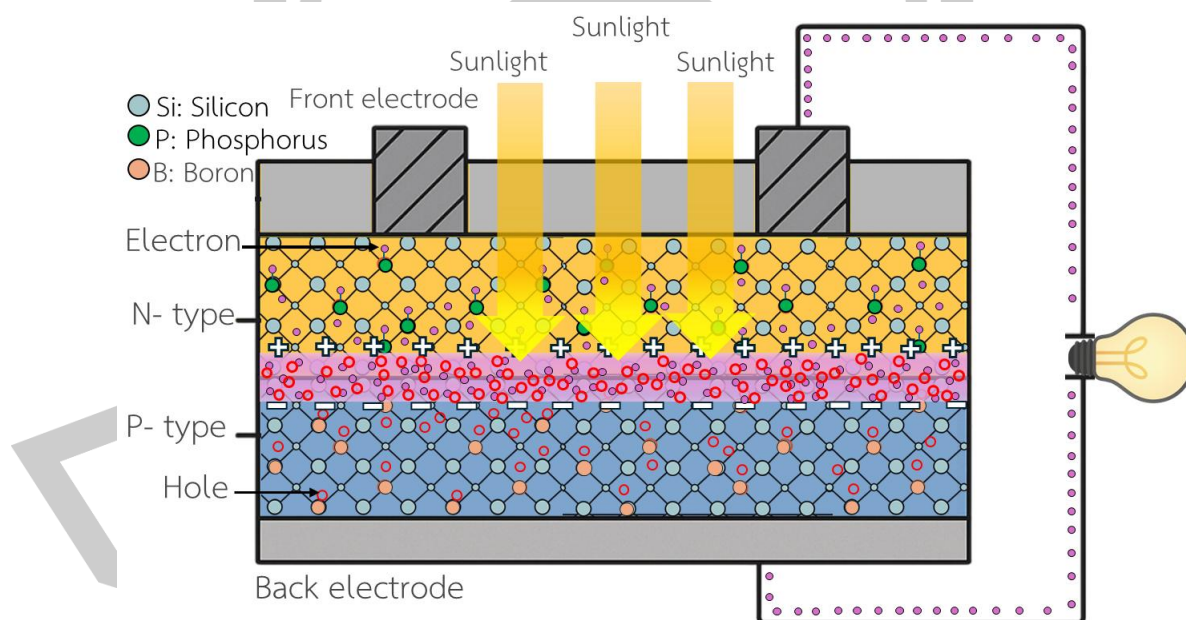


ภาพประกอบ 9 รายละเอียดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [32]



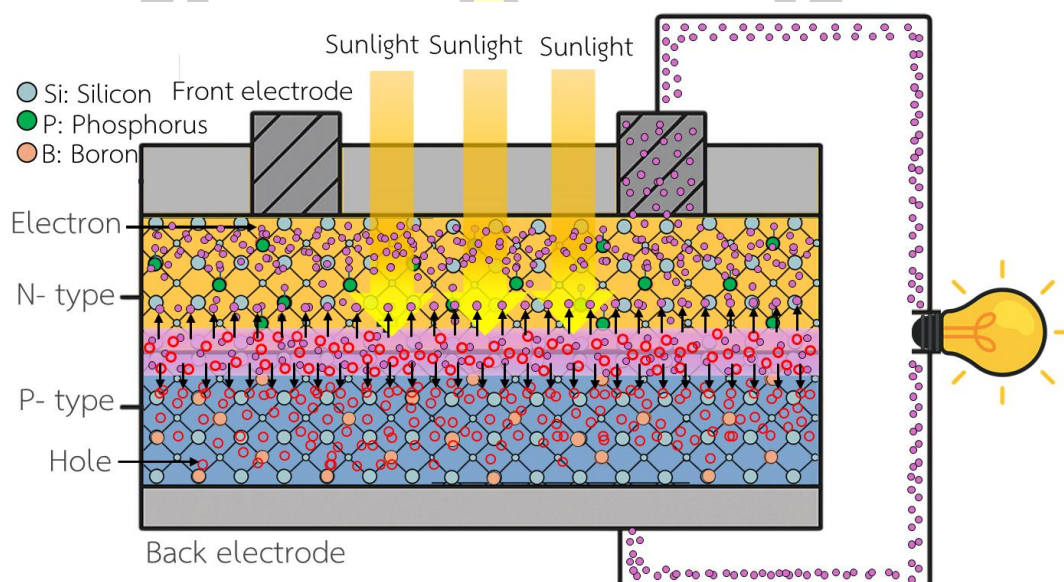
ภาพประกอบ 10 เซลล์แสงอาทิตย์ก่อนได้รับแสง [15, 33]

จากภาพประกอบ 10 ในสภาวะที่ยังไม่มีแสงอาทิตย์เซลล์ยังไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ แต่สามารถทำงานได้ทันทีเมื่อมีแสงตกกระทบ โดยชั้น N-type ซิลิคอนอยู่บริเวณด้านบนของเซลล์ซึ่งในชั้นนี้มีการโด๊ปซิลิคอนบริสุทธิ์ด้วยอะตอมฟอสฟอรัส (P) ซึ่งมีอิเล็กตรอนส่วนเกิน ทำให้ N-type มีอิเล็กตรอนส่วนเกินจำนวนมากและเป็นพาหะหลักในการนำไฟฟ้า ถึงแม้จะมีโฮลปะปนอยู่เล็กน้อย แต่โดยรวมแล้วยังคงมีศักยภาพสูงในการให้อิเล็กตรอน ถัดมาคือชั้น P-type ซิลิคอน อยู่บริเวณด้านล่างของเซลล์ เกิดจากการโด๊ปด้วยอะตอมโบรอน (B) ซึ่งมีอิเล็กตรอนน้อยกว่าซิลิคอนทำให้เกิดโฮลเป็นจำนวนมาก และโฮลเหล่านี้จะเป็นพาหะหลักในการนำไฟฟ้าในฝั่งนี้ แม้ว่าจะมีอิเล็กตรอนปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย ส่วนของ บริเวณรอยต่อ P-N Junction เป็นส่วนที่ N-type และ P-type ซิลิคอนมาประกบกัน ทำให้เกิดเขต Depletion Region ซึ่งไม่มีพาหะไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ แต่จะมีสนามไฟฟ้าในตัวเองที่พร้อมแยกอิเล็กตรอนและโฮลออกจากกัน เมื่อได้รับพลังงานจากแสง ในส่วนของ Front Electrode ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าเซลล์ จะมีแถบโลหะที่อยู่บนชั้น N-type ทำหน้าที่เป็นขั้วรับอิเล็กตรอนเข้าสู่วงจรภายนอกเมื่อเกิดกระแสไฟฟ้า และ Back Electrode ขั้วไฟฟ้าด้านหลังเซลล์ จะมีแถบโลหะที่อยู่ด้านหลังของชั้น P-type ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮล และปิดวงจรไฟฟ้าเพื่อให้อิเล็กตรอนหมุนเวียนกลับมาที่ P-type



ภาพประกอบ 11 เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสง [15, 33]

จากภาพประกอบ 11 เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานอนุภาคจากแสงหรือโฟตอน (Photons) จะถูกดูดกลืนโดยชั้นซิลิคอนของเซลล์ตรงบริเวณรอยต่อ P-N (P-N Junction) ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกตัวของอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งโฟตอนจากแสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอนในอะตอมของซิลิคอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากพันธะของอะตอม และเมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้ออกจากระดับพลังงานเดิม จะเกิด โฮลหรือตำแหน่งว่างของอิเล็กตรอนขึ้นในตำแหน่งเดิม จากสนามไฟฟ้าภายในบริเวณ P-N junction จะดึงให้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงเคลื่อนที่ไปทาง ชั้น N-type ในขณะเดียวกัน โฮลจะเคลื่อนที่ไปทาง ชั้น P-type การเคลื่อนที่นี้ทำให้เกิดการแยกพาหะไฟฟ้า และป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนกลับมายึดคู่กันทันที



ภาพประกอบ 12 เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสงและเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า [15, 33]

จากภาพประกอบ 12 เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับพลังงานจากแสงดวงอาทิตย์ในปริมาณที่มากพอ โฟตอนจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากพันธะในซิลิคอน ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้นในบริเวณของ N-type และ P-type โดยเฉพาะในเขต Depletion Region สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายใน Depletion Region จะทำหน้าที่แยกพาหะไฟฟ้า โดยผลักให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ขึ้นไปยังชั้น N-type ไปรวมตัวกันที่ Front Electrode ขณะที่โฮลจะเคลื่อนที่ลงไปยังชั้น P-type และสะสมที่ Back Electrode เมื่ออิเล็กตรอนสะสมในปริมาณมาก จะเกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างสองขั้ว คือ Front Electrode และ Back Electrode ซึ่งเป็นการแยกประจุต่างชนิดกันออกจากกัน และหากมีการต่อวงจรภายนอกให้ครบ อิเล็กตรอนจะไหลออกจาก Front Electrode ผ่านโหลด เช่น หลอดไฟ

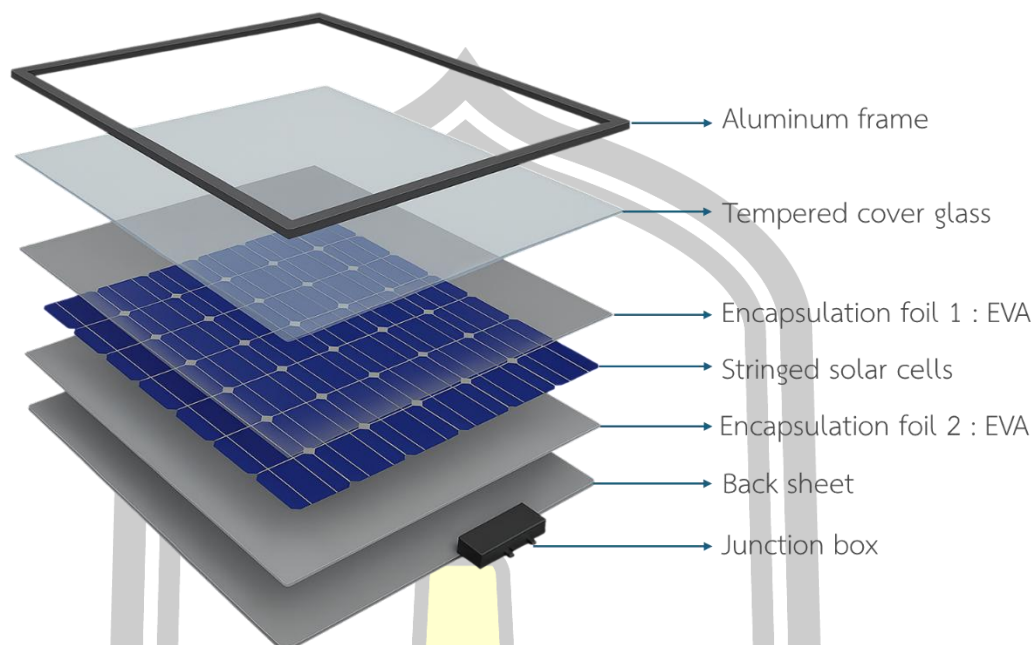
แล้วเดินทางไปยัง Back Electrode เพื่อกลับเข้าสู่ P-type และรวมตัวกับโฮลที่นั่น ซึ่งการจับคู่นี้ทำให้ระบบกลับสู่สมดุล และกระบวนการจะเกิดขึ้นซ้ำอีกเมื่อเซลล์ได้รับแสงรอบถัดไป ทั้งนี้กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน หรือก็คือกระแสไฟฟ้าจะไหลจาก Back Electrode ผ่านไปยังโหนด และไปยัง Front Electrode [28]

ข) เทคโนโลยีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยการรวมเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์มีขนาดเล็ก และสามารถผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ในระดับต่ำเท่านั้น ดังนั้นการใช้งานจริงจึงไม่สามารถใช้เพียงเซลล์เดียวได้ จำเป็นต้องนำเซลล์หลาย ๆ เซลล์มาต่อกันในรูปแบบ อนุกรมเพื่อเพิ่มค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้งาน ซึ่งเซลล์ที่นำมาต่อกันเป็นกลุ่มจนได้ระดับแรงดันที่ต้องการ เรียกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือที่รู้จักกันในชื่อ Solar Module หรือ Solar Panel [15]

โครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญหลายส่วนเพื่อให้สามารถใช้งานกลางแจ้งได้ ด้านหน้าของแผงเซลล์จะมีกรอบอะลูมิเนียม Aluminum Frame ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของแผง และจะมีชั้นของแผ่นกระจกนิรภัย Tempered Cover Glass ต้องมีความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทกมีค่าความโปร่งใสสูง เพื่อให้แสงส่องผ่านได้มากที่สุดโดยไม่ลดทอนประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า และส่วนสำคัญคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Stringed Solar Cells ซึ่งเป็นเซลล์ที่ถูกเชื่อมต่อกันด้วยลวดนำไฟฟ้า Busbar เพื่อเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าและส่งกระแสไฟฟ้า และเพื่อให้แต่ละส่วนยึดติดกันได้ดีจึงมีการใช้ ซิลิโคน หรือแผ่นฟิล์มห่อหุ้ม Ethylene Vinyl Acetate ซึ่งมีสองชั้นคือด้านบนและด้านล่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานยึดเซลล์ไว้ตรงกลาง ยังใช้เพื่อป้องกันความชื้นและป้องกันการเคลื่อนของเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง อีกส่วนสำคัญของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือกล่องรวมสายไฟ Junction Box กับ แผ่นหลัง Back Sheet ซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดรวมกระแสไฟฟ้าจากเซลล์ทั้งหมด และยังมีไดโอดป้องกันกระแสย้อนกลับ นอกจากนี้ยังเป็นจุดเชื่อมสายไฟเข้าสู่ระบบอินเวอร์เตอร์หรือตัวเก็บพลังงาน ส่วนของหลังหรือ Back Sheet ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและป้องกันความชื้น เพื่อปกป้องเซลล์และส่วนประกอบภายในจากด้านหลัง [33] ดังภาพประกอบที่ 13

ดังนั้น ด้วยโครงสร้างที่ถูกออกแบบมาให้แข็งแรง แผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงสามารถติดตั้งได้ในหลายพื้นที่ ทั้งบนหลังคา อาคาร หรือพื้นที่เปิดโล่ง สามารถปรับใช้งานได้ทั้งในระดับครัวเรือน โรงงานอุตสาหกรรม หรือระบบผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ของประเทศ ไม่ว่าจะเป็นระบบอิสระ Off-grid สำหรับพื้นที่ห่างไกลจากระบบไฟฟ้าหลัก หรือระบบเชื่อมโยงกับโครงข่ายไฟฟ้า On-grid สามารถขายไฟฟ้าคืนสู่ระบบ



ภาพประกอบ 13 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [34]

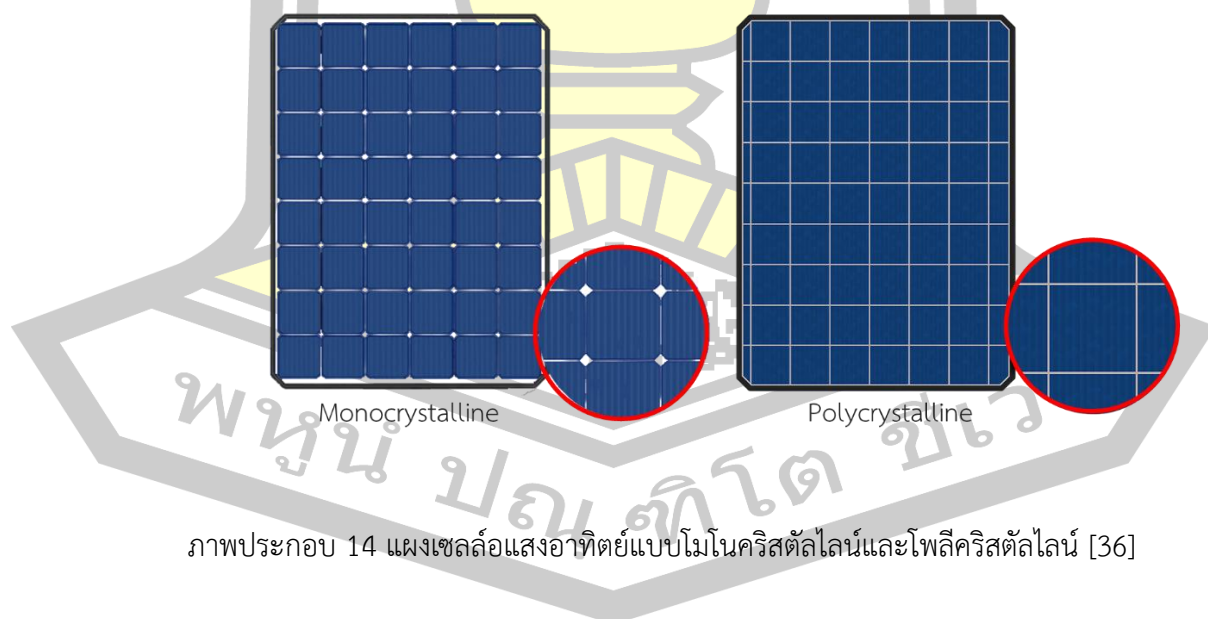
ค) ชนิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากโครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะเห็นได้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงถูกออกแบบมาให้มีความแข็งแรง ความทนทานต่อสภาพแวดล้อมสามารถใช้งานในพื้นที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นพื้นที่กลางแจ้ง บนหลังคาอาคาร โดยมีองค์ประกอบสำคัญ เช่น กรอบอะลูมิเนียม แผ่นกระจกนิรภัย ชั้นฟิล์มห่อหุ้ม และกล่องรวมสายไฟ นอกจากการออกแบบโครงสร้างแล้วเทคโนโลยีของเซลล์ที่ใช้ภายในแผงก็มีความหลากหลายและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ปัจจุบันมีการแบ่งชนิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ออกเป็นหลายประเภทตามลักษณะของวัสดุและเทคโนโลยีที่ใช้ [35, 36] ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 3 รุ่นคือ

1. เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นแรก (First generation Solar Cells)

เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นแรกจะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้แผ่นเวเฟอร์ซิลิคอนผลึกเดี่ยว Single Crystal เป็นพื้นฐาน ซึ่งผลิตจากซิลิคอนผลึกเดี่ยวเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนสูงที่สุดเพราะจะได้ผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลก และมีแสงอาทิตย์ชนิดผลึกหลายผลึก Polycrystalline ที่มีโครงสร้างคล้ายรวงผึ้ง ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกหลายผลึกมีประสิทธิภาพน้อยกว่าชนิดผลึกเดี่ยว [36]

- *Monocrystalline Solar Cells* หรือ Single Crystalline Solar Cells เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สร้างจากผลึกเดี่ยว Single Crystal โดยกระบวนการผลิตใช้วิธี Czochralski หรือ Crystal Pulling การดึงผลึก ซึ่งเป็นเทคนิคที่นำแท่งซิลิคอนขนาดใหญ่มาดัดเป็นผลึกซิลิคอน ในเทคนิคเฉพาะนี้แท่งซิลิคอนที่ได้จะเป็นผลึกบริสุทธิ์ตามธรรมชาติทั้งหมด เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้จึงมีราคาสูงเนื่องจากมีความบริสุทธิ์สูง โดยมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง 17% ถึง 18% ด้วยรูปทรงทรงแปดเหลี่ยมหรือทรงกลมของเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้จึงทำให้เมื่อประกอบเป็นแผงพลังงานแสงอาทิตย์ จะมีช่องว่างเหลืออยู่บ้างเซลล์ [36]
- *Polycrystalline solar cells* หรือ Multicrystalline solar cells เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ประกอบด้วยผลึกซิลิคอนหลายผลึก กระบวนการผลิตเริ่มจากการหลอมแท่งซิลิคอนที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน จากนั้นเทซิลิคอนที่หลอมเหลวลงในแม่พิมพ์ทรงสี่เหลี่ยม วิธีการนี้ไม่สามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีลักษณะเหมือนกันทุกครั้งได้ แม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะมีต้นทุนต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว Monocrystalline แต่ก็มีประสิทธิภาพต่ำกว่า โดยมีประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 12% ถึง 14% ด้วยรูปทรงสี่เหลี่ยมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ จึงมีช่องว่างระหว่างเซลล์น้อยกว่าเมื่อประกอบเป็นแผงพลังงานแสงอาทิตย์ [35] ดังแสดงตัวอย่างในภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตัลไลน์และโพลีคริสตัลไลน์ [36]

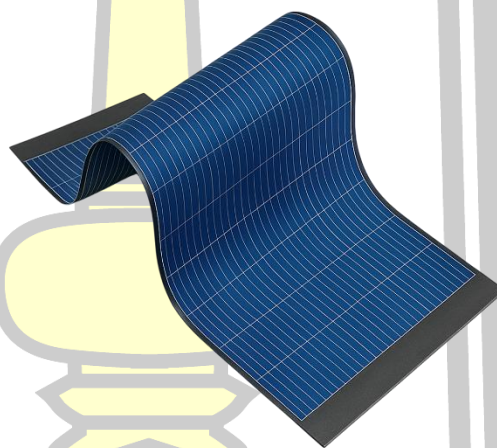
2. เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่สอง (Second Generation Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่สอง หรือที่เรียกว่าเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง Thin Film Solar Cell Technology เซลล์แสงอาทิตย์นี้ใช้เวเฟอร์ซิลิคอนผลึกเดี่ยวมีต้นทุนสูง เนื่องจากต้องใช้ซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งกระบวนการในการแยกซิลิคอนบริสุทธิ์นั้นทั้งซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายสูง แต่ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์สามารถลดลงได้อย่างมากหากสามารถเคลือบฟิล์มบางของซิลิคอนให้มีความหนาเพียง 1 ไมโครเมตร ลงบนพื้นผิวโดยเทคโนโลยีฟิล์มบางนี้ใช้ซิลิคอนเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีที่ใช้เวเฟอร์ซิลิคอน ผู้ที่พัฒนาเทคโนโลยีนี้เป็นครั้งแรกคือ R. Chittick ซึ่งได้คิดค้นการเคลือบฟิล์มบางด้วยซิลิคอนชนิดอะมอร์ฟัส Amorphous Si ต่อมาเพื่อนร่วมงานของเขาได้ตีพิมพ์รายงานการศึกษาระบบอย่างเป็นระบบครั้งแรกที่อธิบายเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบ Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD) ซึ่งกลายเป็นกระบวนการหลักในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง [35] ดังแสดงในภาพประกอบ 15

- *Amorphous Silicon Solar Cells* หรือ Thin-Film Solar Cells – a-Si เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้สามารถผลิตได้โดยใช้อุณหภูมิต่ำ จึงสามารถใช้วัสดุรองรับ Substrate ที่ต้องการพลังงานในการผลิตต่ำได้ นอกจากนี้ยังสามารถติดตั้งบนพื้นผิวที่ยืดหยุ่นหรือโค้งกระบวนการผลิตเริ่มจากการนำวัสดุรองรับมาเคลือบด้านหลังด้วยวัสดุซิลิคอนที่ผ่านการโด๊ป Doping ซึ่งซิลิคอนที่ใช้ในกระบวนการนี้มีโครงสร้างอะตอมที่ไม่เป็นระเบียบแน่นอน หรือเรียกว่า โครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีต้นทุน ต่ำ และสามารถหาได้ง่ายในท้องตลาด โดยทั่วไปเซลล์ชนิดนี้จะมีด้านที่นำไฟฟ้าเป็นสี เงิน และด้านสะท้อนแสงเป็นสี น้ำตาลเข้มในด้านประสิทธิภาพ เซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-Si มีค่าประสิทธิภาพอยู่ในช่วงประมาณ 4% – 8% ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพต่ำ แต่ก็สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่มีแสงแดดน้อยหรือช่วงเวลาที่แสงแดดสั่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ [36]
- *Cadmium Telluride* หรือ Thin-Film – CdTe เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้กระบวนการผลิตเริ่มจากการเลือกวัสดุรองรับ เช่น กระจกจากนั้นใช้เทคนิคการเคลือบแบบหลายชั้น Multi-layer deposition เพื่อเคลือบวัสดุ CdTe ลงบนพื้นผิว เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มี ต้นทุนต่ำกว่าฟิล์มบางชนิดอื่น ๆ โครงสร้างของเซลล์เป็นแบบ P-N heterojunction คือรอยต่อระหว่างวัสดุกึ่งตัวนำสองชนิดที่มีแบนด์แก๊ปหรือองค์ประกอบทางวัสดุต่างกัน โดยประกอบด้วยชั้น CdTe แบบ P-type และชั้นหน้าต่างที่ทำจาก Cadmium sulfide (CdS) แบบ N-type ในด้านประสิทธิภาพ เซลล์ CdTe มีค่าการแปลงพลังงานอยู่ในช่วงประมาณ 9% – 11% แม้จะไม่สูงเท่าเซลล์ซิลิคอนแบบผลึก

แต่ก็เพียงพอสำหรับการใช้งานทั่วไป โดยเฉพาะในโครงการที่ต้องการลดต้นทุน แต่ข้อเสียหลักของเซลล์ชนิดนี้คือการใช้ แคดเมียม (Cadmium) ซึ่งเป็นสารพิษที่สามารถสะสมในร่างกายของมนุษย์ สัตว์ และพืชได้ [35]

- *Copper Indium Gallium Selenide* หรือ Thin-Film – CIGS เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้ผลิตโดยการเคลือบวัสดุ CIGS ลงบนพื้นผิวรองรับ เช่น กระดาษ โลหะ หรือ พอลิพลาสติก เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ประกอบด้วยธาตุหลัก 4 ชนิด ได้แก่ ทองแดง (Cu) อินเดียม (In) แกลเลียม (Ga) และ ซีลีเนียม (Se) โดยมีโครงสร้างเป็นวัสดุกึ่งตัวนำแบบ แบนด์แก๊ปตรง (Direct band gap) ซึ่งสามารถดูดซับพลังงานแสงได้ดีแม้ในชั้นวัสดุที่บางเนื่องจากมี ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง เซลล์ CIGS จึงต้องการวัสดุเคลือบบาง ๆ ก็เพียงพอสำหรับการดูดกลืนแสง ทำให้ลดปริมาณการใช้วัสดุและต้นทุนได้ [35] ในด้านประสิทธิภาพอยู่ในช่วงประมาณ 10% – 12%



ภาพประกอบ 15 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบบาง [35]

3. เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่สาม (Third Generation Solar Cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดจังก์ชันเดี่ยว single junction สามารถเอาชนะขีดจำกัดของประสิทธิภาพตามทฤษฎี Shockley–Queisser ซึ่งมีช่วงประสิทธิภาพอยู่ที่ 31–41% เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนผลึก Crystalline silicon – C-Si ซึ่งเป็นเทคโนโลยีรุ่นที่หนึ่ง และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง แม้จะได้รับความนิยม แต่ยังมีข้อจำกัดในการเพิ่มประสิทธิภาพ และยังไม่สามารถตอบโจทย์ทั้งด้านประสิทธิภาพ ต้นทุน เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่สามจึงได้พัฒนาขึ้น [35, 36]

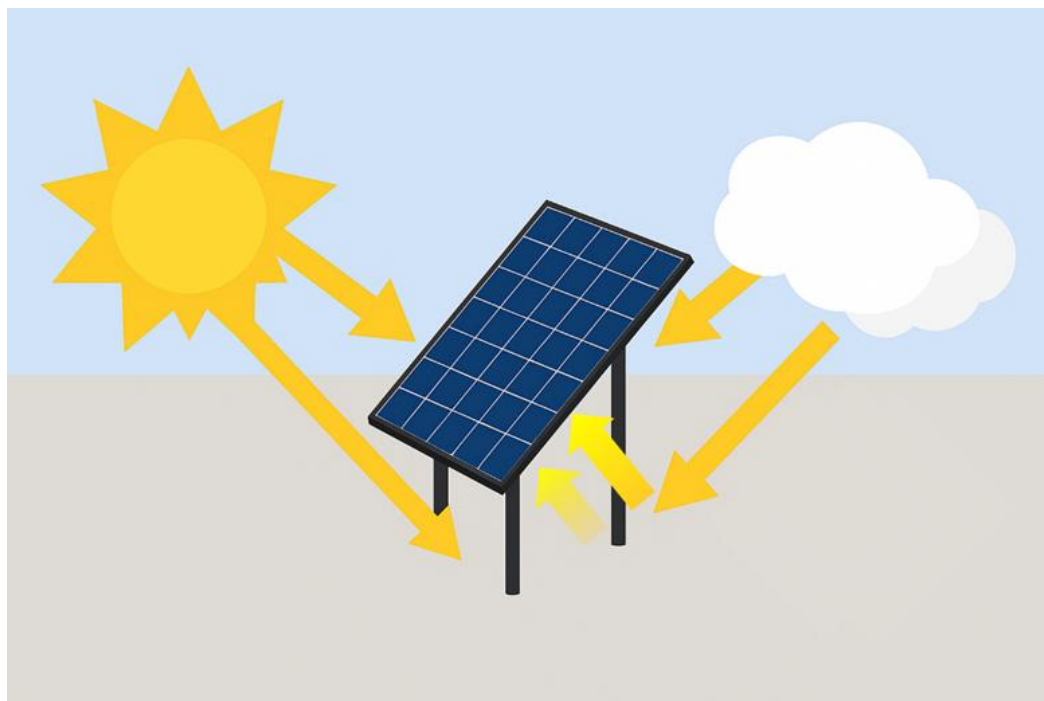
- Nanocrystal Solar Cells หรือ Quantum Dot Solar Cells – QDSC เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้รู้จักกันในชื่อว่า เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอต สามารถนำมาใช้แทนวัสดุปริมาณมากแบบดั้งเดิม เช่น ซิลิคอน Si แคดเมียมเทลลูไรด์ CdTe หรือ CIGS ควอนตัมดอต Quantum Dots เป็นวัสดุที่สามารถ ปรับค่าพลังงานแบนด์แก๊ปได้ สามารถดูดซับพลังงานแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เซลล์ประเภทนี้ใช้วัสดุโฟโตโวลตาอิกที่ดูดซับแสง ซึ่งมาจากกลุ่ม โลหะทรานซิชัน โดยอยู่ในรูปแบบของอนุภาคนาโน Nanocrystals วัสดุควอนตัมดอตจะถูกวางไว้ ระหว่างช่องทางการนำโฮล Hole และช่องทางการนำอิเล็กตรอน สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนประสิทธิภาพโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 30% – 33% ทั้งนี้ประสิทธิภาพของเซลล์จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้น Layers ที่นำมาเรียงซ้อนกันในโครงสร้างของเซลล์ [35]
- Dye-Sensitized Solar Cells – DSSC เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้รู้จักกันในชื่อว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถพัฒนาให้มีต้นทุนต่ำ และเป็นทางเลือกแทนวัสดุแบบเดิม เซลล์ชนิดนี้ใช้ โมเลกุลของสารสีย้อม Dye molecules เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ดูดซับแสง ซึ่งจะกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยทั่วไปสีย้อมที่ใช้จะเป็นสารอินทรีย์หรือโลหะทรานซิชันเชิงซ้อน เช่น รูทีเนียม Ruthenium-based dyes เซลล์ DSSC ประกอบด้วยโครงสร้างที่มี วัสดุนาโน เช่น TiO_2 เป็นชั้นรับอิเล็กตรอน ซึ่งจะเคลือบด้วยสีย้อมไวแสง และมีอิเล็กโทรไลต์อยู่ตรงกลาง ทำหน้าที่นำอิเล็กตรอนกลับไปยังสีย้อมที่สูญเสียอิเล็กตรอนไป สีย้อมไวแสงจะถูกวางไว้ ระหว่างอิเล็กโทรดนำอิเล็กตรอนและอิเล็กโทรดนำโฮล เพื่อส่งต่อพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์ เซลล์ DSSC มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง ประมาณ 7% – 11% สำหรับการผลิตเชิงพาณิชย์ [36]
- Organic Solar Cells – OSC เซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์ OSC เป็นเทคโนโลยีโฟโตโวลตาอิกที่ใช้วัสดุกึ่งตัวนำอินทรีย์ เช่น พอลิเมอร์นำไฟฟ้า หรือ โมเลกุลอินทรีย์ขนาดเล็ก เพื่อดูดซับแสงและสร้างกระแสไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก Photovoltaic Effect เซลล์ชนิดนี้สามารถผลิตได้ด้วย เทคนิคต้นทุนต่ำ เช่น Thermal evaporation และ Inkjet printing โดยมีลักษณะโครงสร้างเป็น ชั้นฟิล์มบาง ที่เคลือบบนวัสดุรองรับแบบยืดหยุ่น เช่น พลาสติกหรือพอยล์ เซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความยืดหยุ่น ความบางเบา และต้นทุนต่ำ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีแสงจำกัด หรือในระบบที่ไม่สามารถใช้แผงซิลิคอนแบบแข็งได้ [35]
- Perovskite Solar Cells เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้รู้จักกันในชื่อว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ ซึ่งใช้วัสดุที่มีโครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกต์ เซลล์ชนิดนี้สามารถ

ผลิตได้ด้วยกระบวนการต้นทุนต่ำ เช่น การเคลือบแบบพิมพ์ลงบนพื้นผิว โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือซับซ้อนหรืออุณหภูมิสูงแบบเซลล์ซิลิคอนทั่วไป อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปบนวัสดุที่ยืดหยุ่นและน้ำหนักเบาได้ วัสดุเพอรอฟสไกต์มีคุณสมบัติโดดเด่นด้านการดูดกลืนแสงและการนำอิเล็กตรอน ทำให้สามารถพัฒนาเซลล์ที่มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงถึง 31% ซึ่งถือว่าสูงมากเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีอื่น ๆ ในระดับเดียวกัน แต่เนื่องจากเซลล์ชนิดนี้ยังอยู่ในช่วงการพัฒนา ความเสถียรยังต่ำ ด้วยคุณสมบัติที่สามารถผลิตได้ง่าย ราคาถูก และให้ประสิทธิภาพสูง เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์จึงเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับความสนใจและคาดว่าจะมีบทบาทสำคัญในอนาคต [36]

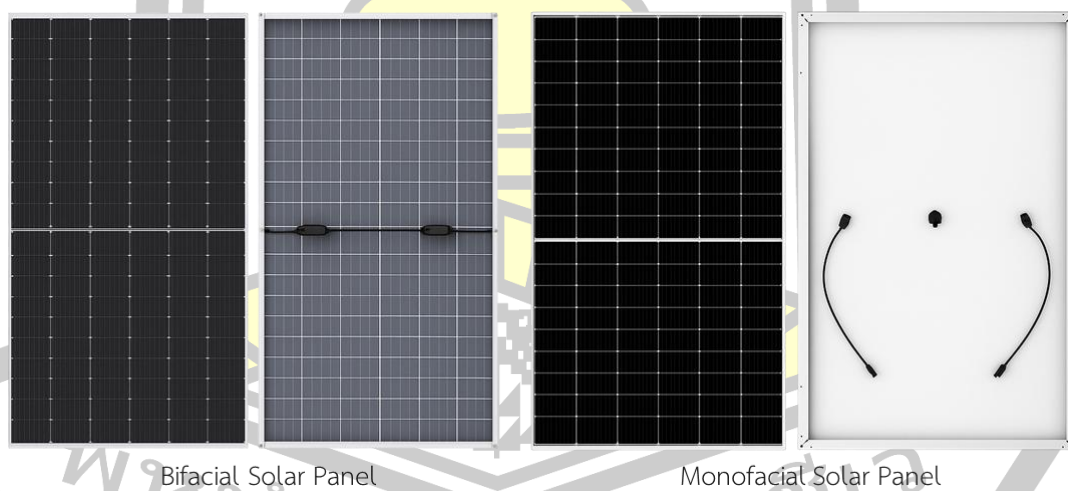
นอกจากนี้ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีเทคโนโลยีที่ทันสมัยและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากพลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็น พลังงานสะอาด ที่สามารถผลิตได้อย่างไม่จำกัดจากทรัพยากรธรรมชาติ เช่น แสงแดด ซึ่งมีอยู่ทุกวันและไม่มีวันหมด รวมถึงการออกแบบให้เหมาะกับอนาคต และพื้นที่จำกัดกับสภาพแวดล้อมเฉพาะ ได้แก่

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองด้าน Bifacial Solar Cells

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Passivated Emitter Rear Cell (PERC) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้ดียิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม โดยหลักการสำคัญของเซลล์ชนิด PERC คือการเพิ่มชั้นสะท้อนกลับ Passivation Layer ที่ด้านหลังของเซลล์ ซึ่งช่วยลดการสูญเสียของอิเล็กตรอนและป้องกันการดูดกลืนแสงที่ไม่ก่อให้เกิดการผลิตกระแสไฟฟ้า Recombination Loss สิ่งที่ได้คืออนุภาคโฟตอนที่สะท้อนกลับมาจากด้านหลังจะมีโอกาสถูกดูดซับอีกครั้งและเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้นประมาณ 1-2% เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป ในปัจจุบันยังมีการใช้งาน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองด้าน Bifacial solar cells เพิ่มขึ้นเซลล์ชนิดนี้สามารถผลิตไฟฟ้าได้จากทั้งด้านหน้าและด้านหลัง โดยด้านหลังจะรับแสงสะท้อนจากพื้นผิวต่าง ๆ เช่น พื้นปูน พื้นทราย หรือแม้แต่พื้นผิวน้ำ ซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณพลังงานที่ผลิตได้โดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของแผง แม้ว่าจะมีแนวโน้มการใช้งานเซลล์แบบสองด้านเพิ่มขึ้น แต่เซลล์แสงอาทิตย์แบบด้านเดียว Monofacial solar cells ก็ยังคงมีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยเฉพาะในพื้นที่ที่แสงสามารถตกกระทบได้เพียงด้านเดียว เช่น บนหลังคา หรือในบางพื้นที่จำกัดแสงสะท้อนจากพื้น [37] ดังแสดงในภาพประกอบ 16 และภาพประกอบ 17



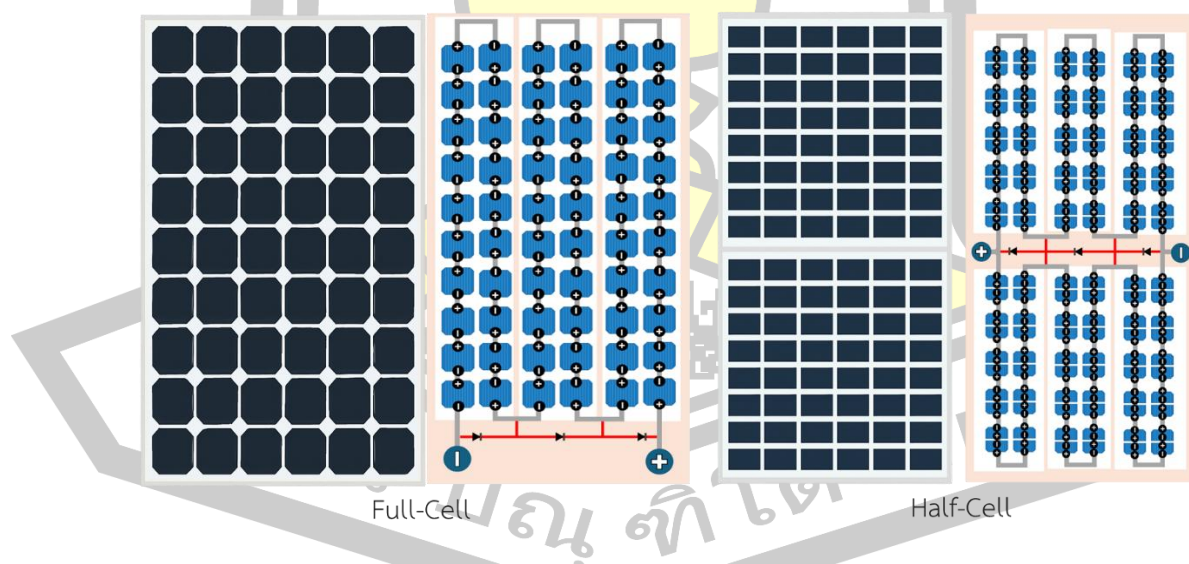
ภาพประกอบ 16 ภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน [37]



ภาพประกอบ 17 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรับแสงสองด้านกับรับแสงด้านเดียว [37]

เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบครึ่งเซลล์และเต็มเซลล์ Half-Cell and Full-Cell

เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบครึ่งเซลล์ Half-Cell และแบบเต็มเซลล์ (Full-Cell) เป็นรูปแบบของการออกแบบเซลล์ภายในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีความแตกต่างกันในด้านโครงสร้างและประสิทธิภาพ โดยแผงแบบ เต็มเซลล์ Full-Cell จะใช้เซลล์ซิลิคอนขนาดเต็มมาตรฐาน ซึ่งเป็นรูปแบบดั้งเดิมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แต่ละแผ่นทำงานเชื่อมต่อกันทั้งแผง โดยไม่ถูกตัดแบ่ง ทำให้กระบวนการผลิตง่ายและต้นทุนต่ำกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม แผงแบบนี้จะมีข้อจำกัดเมื่อเจอสถานะที่แสงแดดไม่สม่ำเสมอ หรือมีเงาบังบางส่วน ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าลดลง และยังมีโอกาสเกิดความร้อนสะสม Hot Spot ได้ง่าย ในขณะที่เทคโนโลยี ครึ่งเซลล์ Half-Cell จะเป็นการพัฒนาเพิ่มเติมโดยการตัดเซลล์ซิลิคอนแต่ละแผ่นออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน ทำให้จำนวนเซลล์ต่อแผงเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เช่น จาก 60 เซลล์ เป็น 120 ครึ่งเซลล์ การตัดเซลล์ให้เล็กลงจะช่วยลดความต้านทานภายในวงจร และช่วยให้พลังงานสูญเสีย้น้อยลง อีกทั้งยังลดความร้อนสะสม และสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นในสถานะที่มีแสงน้อยหรือมีเงาบังบางส่วน นอกจากนี้ โครงสร้างภายในของแผงแบบ Half-Cell ยังถูกออกแบบให้ระบบไฟฟ้าทำงานแยกจากกันเป็นสองส่วน ทำให้แผงยังสามารถผลิตไฟฟ้าได้แม้บางส่วนจะอยู่ในเงา ส่งผลให้แผงแบบครึ่งเซลล์มีความทนทานและเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่หลากหลายมากกว่าแบบเต็มเซลล์ [38] ดังแสดงในภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 เซลล์แสงอาทิตย์แบบเต็มเซลล์และครึ่งเซลล์ [37, 38]

เทคโนโลยีโซลาร์เซลล์ลอยน้ำ Floating PV Technology

เทคโนโลยีโซลาร์เซลล์ลอยน้ำ เป็นแนวคิดที่ใช้ แหล่งน้ำขนาดใหญ่ เช่น อ่างเก็บน้ำ เขื่อน หรือ แม่น้ำบ่อน้ำในภาคเกษตรกรรม เป็นพื้นที่สำหรับติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งช่วยลดความจำเป็นในการใช้ที่ดินขนาดใหญ่ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ดินมีราคาสูงหรือมีข้อจำกัดด้านการใช้ประโยชน์ เช่น เขตเมือง เขตชุมชน หรือพื้นที่การเกษตรสำคัญ ข้อได้เปรียบของการติดตั้งแผงโซลาร์บนผิวน้ำ คือ อุณหภูมิที่ลดลงจากการระเหยของน้ำช่วยให้แผงทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่อเทียบกับแผงที่ติดตั้งบนดินหรือหลังคา ซึ่งอาจได้รับความร้อนมากเกินไป นอกจากนี้ยังช่วยลดการระเหยของน้ำในแหล่งน้ำที่ติดตั้ง และอาจช่วยในเรื่องของการลดการเกิดตะไคร่น้ำหรือลดอุณหภูมิในบางกรณี ในประเทศไทย เริ่มมีการวางแผนและดำเนินโครงการ Floating PV อย่างจริงจัง โดยเฉพาะในพื้นที่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ซึ่งได้เริ่มติดตั้งระบบ Floating Solar Hybrid ที่เขื่อนสิรินธร จ.อุบลราชธานี ซึ่งถือเป็นโครงการขนาดใหญ่ระดับประเทศ [35]

ต้นไม้พลังงานแสงอาทิตย์ Solar Trees

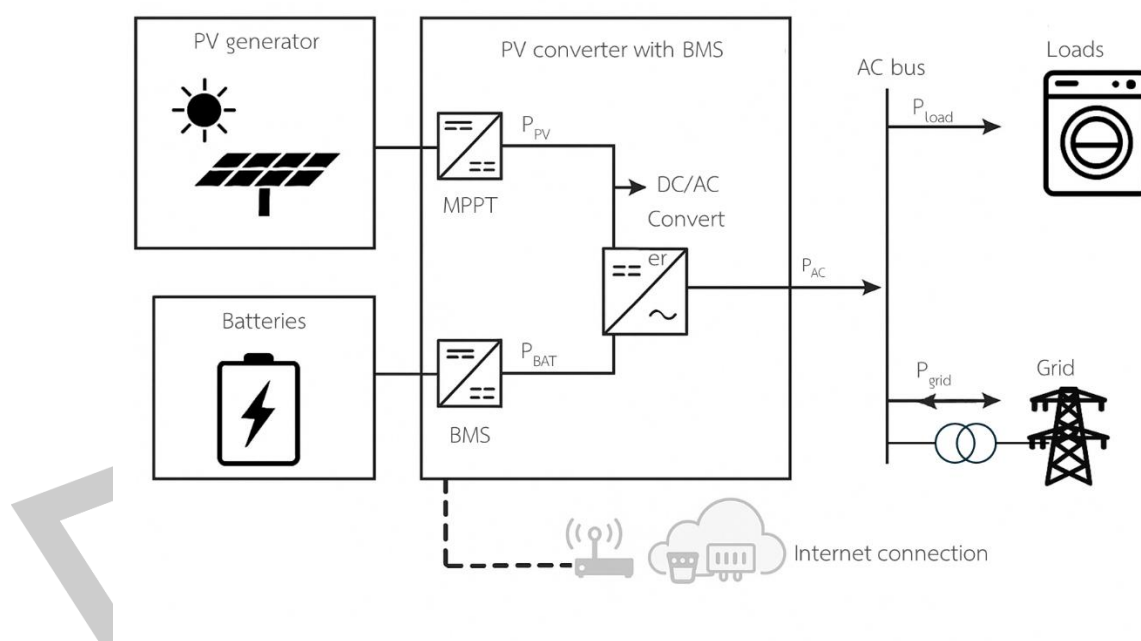
ต้นไม้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นแนวคิดการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จำลองรูปร่างคล้ายต้นไม้ในธรรมชาติ โดยมีการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนต้นไม้ ซึ่งจะถูกจัดวางในมุมที่สามารถรับแสงแดดได้มากที่สุดตลอดทั้งวัน จุดเด่นสำคัญคือสามารถใช้พื้นที่แนวตั้งในการผลิตไฟฟ้า แทนการวางแผนแบบราบบนพื้นดิน ทำให้ประหยัดพื้นที่และเหมาะกับการใช้งานในเขตเมืองหรือพื้นที่จำกัดแผงโซลาร์ที่ติดตั้งในลักษณะนี้สามารถ ดูดซับแสงแดดจากหลายทิศทาง ไม่ว่าจะเป็นแสงตรงหรือแสงกระจาย และแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ต้นไม้พลังงานแสงอาทิตย์ยังสามารถออกแบบให้มีฟังก์ชันเพิ่มเติม เช่น ที่นั่งชาร์จโทรศัพท์ จุดพักผ่อน ไพลอน หรือแม้กระทั่งสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า EV Charging [35]

เพื่อการเกษตร Agro-photovoltaic

โซลาร์เซลล์เพื่อการเกษตร หรือที่เรียกว่า เป็นแนวคิดที่ผสมผสานการใช้ที่ดินเพื่อการผลิตพลังงานแสงอาทิตย์และการเกษตร เข้าไว้ด้วยกัน โดยติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เหนือพื้นที่เพาะปลูก ซึ่งช่วยให้สามารถใช้พื้นที่เดียวกันได้อย่างคุ้มค่าทั้งในด้านการผลิตพืชผลและการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ แผงโซลาร์เซลล์ในระบบ Agri-PV มักจะถูกติดตั้งให้มีระยะห่างหรือความสูงเพียงพอเพื่อให้แสงแดดยังสามารถส่องถึงพืชด้านล่างได้อย่างเหมาะสม และยังให้ร่มเงาบางส่วน ซึ่งช่วยลดอุณหภูมิและการระเหยของน้ำ ส่งผลดีต่อพืชบางชนิด โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีอากาศร้อนจัดหรือแห้งแล้ง นอกจากนี้ ระบบนี้ยังสามารถขายไฟฟ้าที่ผลิตได้เข้าสู่ระบบ หรือควบคุมสภาพอากาศในโรงเรือน ทั้งยังส่งเสริมแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืน ทั้งด้านพลังงานและความมั่นคงทางอาหารในอนาคต [35]

2.2.4 ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

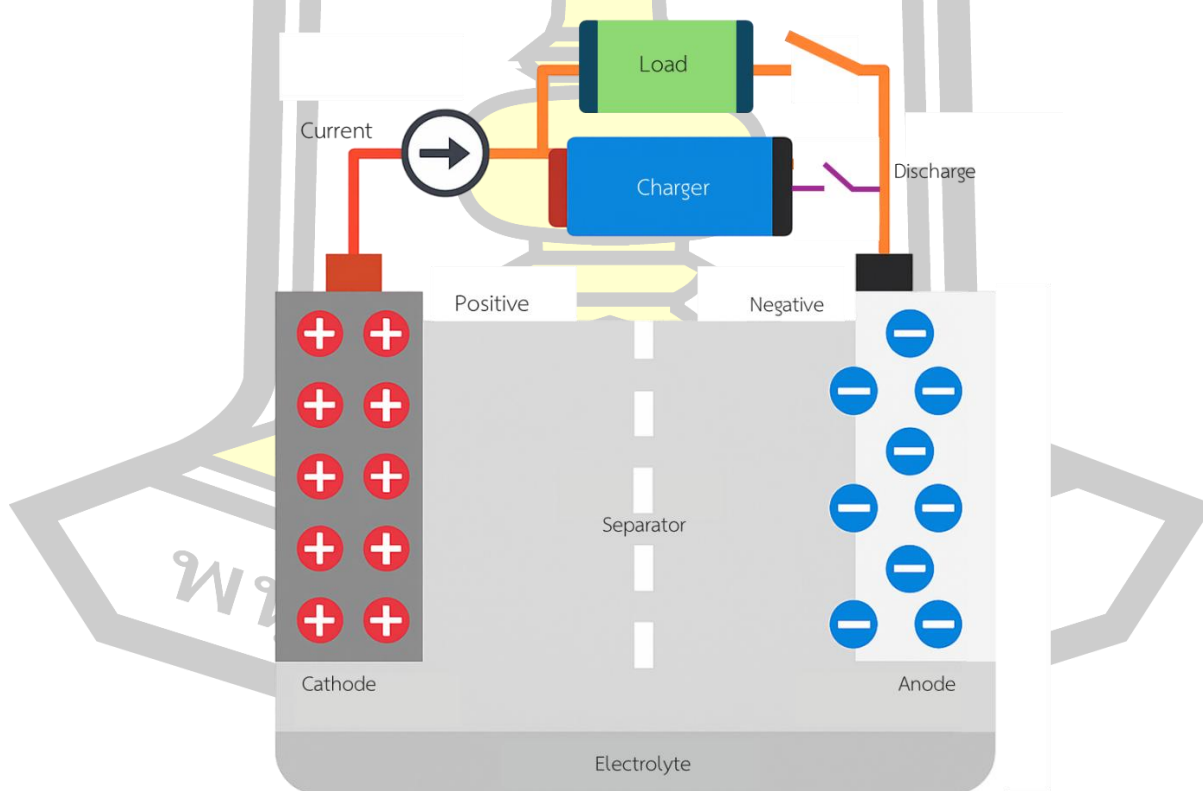
เนื่องจากประเทศไทยได้กำหนดเป้าหมายและนโยบายสำคัญในการก้าวสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน Carbon Neutrality เพื่อลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยการเพิ่มสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียนในระบบผลิตพลังงานของประเทศ โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นพลังงานสะอาดที่สำคัญในการช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจาก ฟอสซิล เนื่องจากประเทศไทยมีศักยภาพสูงในการติดตั้งระบบผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์ แต่แม้ว่าพลังงานแสงอาทิตย์จะเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมด แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านความไม่ต่อเนื่องและความไม่เสถียรของการผลิตพลังงาน เพราะการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของวันและสภาพอากาศ ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้อย่างมีประสิทธิภาพและต่อเนื่อง การนำเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงาน Energy Storage Systems เข้ามาร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานหมุนเวียนอื่นจึงมีความสำคัญในการส่งเสริมความมั่นคงให้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 หลักการทำงานของระบบการกักเก็บพลังงานแบบเตอรี่แบบชาร์จไฟได้ [15]

ก) เทคโนโลยีการเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

ระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ หรือ BESS (Battery Energy Storage System) เป็นเทคโนโลยีการเก็บพลังงานในรูปแบบของ พลังงานเคมี โดยอาศัยกระบวนการไฟฟ้าเคมี Electrochemical Reaction ภายในเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งสามารถชาร์จและคายประจุได้หลายรอบ ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานร่วมกับแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ที่มีความไม่สม่ำเสมอในการผลิต แต่ละเซลล์ของแบตเตอรี่ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ขั้วบวก Cathode ขั้วลบ Anode และ อิเล็กโทรไลต์ Electrolyte ซึ่งอาจอยู่ในสถานะของเหลว ของแข็ง หรือกึ่งของแข็ง โดยมีแผ่นแยก Separator ที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เพื่อป้องกันการลัดวงจร ภายใน เมื่อเกิดการคายประจุ Discharge อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วลบไปยังขั้วบวกผ่านวงจรภายนอก ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้า และสามารถชาร์จไฟกลับได้เมื่อจ่ายพลังงานจากภายนอกเข้าไปในทิศทางตรงกันข้าม ในปัจจุบัน BESS ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในทั้งระดับครัวเรือน พาณิชยกรรม และระบบผลิตไฟฟ้าแบบ Utility-scale โดยมีเทคโนโลยีแบตเตอรี่หลากหลายประเภท [39] โดยแต่ละประเภทจะมีพื้นฐานการทำงานคล้ายกันดังแสดงในภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 หลักการของแบตเตอรี่พื้นฐาน [39]

ข) ประเภทขอเทคโนโลยีการเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่

เทคโนโลยีแบตเตอรี่สามารถจำแนกออกได้หลายประเภทและหลายรูปแบบ ทั้งในด้านองค์ประกอบทางเคมี ขนาดและรูปทรง รวมถึงลักษณะการใช้งานของแบตเตอรี่ ซึ่งแต่ละลักษณะส่งผลต่อสมรรถนะ และความเหมาะสมในการใช้งานในแต่ละประเภท องค์ประกอบทางเคมีมีบทบาทสำคัญต่อความจุไฟฟ้า อายุการใช้งาน และประสิทธิภาพการชาร์จ-คายประจุ ขณะที่ขนาดและรูปทรงของแบตเตอรี่จะสัมพันธ์กับข้อจำกัดด้านพื้นที่ติดตั้งและน้ำหนักของอุปกรณ์ที่ใช้งาน ส่วนลักษณะการใช้งาน เช่น การใช้แบบถาวร ชั่วคราว หรือแบบเคลื่อนที่ ถือเป็นอีกปัจจัยที่กำหนดชนิดของแบตเตอรี่ โดยสามารถจำแนกแบตเตอรี่แบบต่าง ๆ ได้ดังนี้ [40]

จำแนกตามลักษณะการใช้งานของแบตเตอรี่ สามารถแบ่งแบตเตอรี่ได้ 2 ประเภท ได้แก่

1. แบตเตอรี่ชนิด Primary คือแบตเตอรี่ที่ไม่สามารถชาร์จไฟกลับมาใช้ใหม่ได้เมื่อพลังงานหมดลง โดยแบตเตอรี่ประเภทนี้ประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ปฏิกิริยาเคมีภายในไม่สามารถย้อนกลับได้ จึงใช้ได้เพียงครั้งเดียว แบตเตอรี่ชนิด Primary มีให้เลือกหลากหลายรูปแบบ ตั้งแต่ขนาดเล็กอย่าง แบตเตอรี่เหรียญ Coin cell ไปจนถึงขนาดมาตรฐาน เช่น AA ซึ่งมักใช้ในอุปกรณ์แบบแยกเดี่ยว Standalone devices ที่ไม่สะดวกหรือไม่สามารถชาร์จไฟได้ เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ ที่การชาร์จแบตเตอรี่อาจไม่ใช่เรื่องที่สามารถทำได้ในสถานการณ์เฉพาะหน้า ดังนั้น การใช้แบตเตอรี่แบบ Primary จึงเหมาะสมกว่า เพราะมีความจุพลังงานจำเพาะสูง และระบบที่ใช้แบตเตอรี่ประเภทนี้มักได้รับการออกแบบให้ ใช้พลังงานต่ำ เพื่อให้แบตเตอรี่ใช้งานได้นานที่สุด ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ แบตเตอรี่ชนิด Primary เช่น เครื่องกระตุ้นหัวใจ เครื่องติดตามสัตว์ นาฬิกาข้อมือ รีโมตคอนโทรล ตัวอย่างของแบตเตอรี่ชนิดใช้ซ้ำไม่ได้ เช่น แบตเตอรี่อัลคาไลน์ Alkaline Batteries แบตเตอรี่อลูมิเนียม-อากาศ Aluminum-Air Batteries แบตเตอรี่ลิเทียม Lithium battery แบตเตอรี่ปรอท Mercury battery

แบตเตอรี่ชนิด Primary ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือแบตเตอรี่อัลคาไลน์ (Alkaline batteries) เนื่องจากมีความจุพลังงานสูง เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ราคาประหยัด และไม่เกิดการรั่วซึม แม้แบตเตอรี่หมด อีกทั้งยังสามารถเก็บรักษาได้นานหลายปี มีความปลอดภัยสูง และสามารถนำขึ้นเครื่องบินได้โดยไม่ต้องปฏิบัติตามข้อจำกัดของกฎหมายการขนส่งทางอากาศ UN Transport regulations นอกจากนี้แบตเตอรี่อัลคาไลน์ยังมีข้อดีคือสามารถหาซื้อได้ง่ายตามร้านค้าทั่วไป และมีให้เลือกหลากหลายขนาดเพื่อตอบสนองความต้องการของอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังมีอัตราการคายประจุเองต่ำ ทำให้สามารถเก็บไว้ได้นานโดยไม่เสื่อมคุณภาพ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของแบตเตอรี่อัลคาไลน์คือมีกระแสไฟฟ้าต่ำ จึงเหมาะกับอุปกรณ์ที่ใช้ไฟน้อย เช่น รีโมตคอนโทรล ไฟฉาย หรืออุปกรณ์บันทึกขนาดพกพาแบตเตอรี่ชนิด

2. แบตเตอรี่ชนิด Secondary หรือแบตเตอรี่แบบชาร์จไฟได้ Rechargeable Batteries เป็นแบตเตอรี่ที่ประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีซึ่งปฏิกิริยาเคมีภายใน ซึ่งสามารถย้อนกลับได้ด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้สามารถชาร์จไฟกลับมาใช้งานได้อีกครั้งเมื่อพลังงานหมดลง แตกต่างจากแบตเตอรี่แบบ Primary ที่ใช้แล้วทิ้ง แบตเตอรี่ชนิดนี้มักใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการการใช้งานต่อเนื่องหรือมีการใช้พลังงานสูง ซึ่งการใช้แบตเตอรี่แบบใช้ครั้งเดียวจะสิ้นเปลืองหรือไม่เหมาะสม สมาร์ทโฟน โน้ตบุ๊ก เครื่องใช้ไฟฟ้าพกพา รวมถึงยานยนต์ไฟฟ้า EV และระบบกักเก็บพลังงานสำหรับการผลิตไฟฟ้า ตัวอย่างของแบตเตอรี่ชนิดใช้ซ้ำได้เช่น แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน Li-Ion Batteries แบตเตอรี่ลิเทียมโพลีเมอร์ Li-Po Batteries แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ Ni-MH Batteries และแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด Lead-acid Batteries

แบตเตอรี่ชนิด Secondary ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน Lithium-ion Batteries เนื่องจากมีความจุพลังงานสูง น้ำหนักเบา สามารถชาร์จซ้ำได้หลายรอบโดยไม่สูญเสียความจุอย่างรวดเร็ว และให้แรงดันไฟฟ้าคงที่ขณะใช้งาน อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานยาวนาน จึงเหมาะสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และระบบกักเก็บพลังงานในการผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน [39]

จำแนกตามชนิดเคมีที่ใช้ในแบตเตอรี่ สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead acid battery)

แบตเตอรี่ตะกั่วกรด ถือเป็นแบตเตอรี่รุ่นแรกของโลกที่ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1859 ซึ่งนอกจากจะเป็นเทคโนโลยีที่เก่าแก่ที่สุดแล้ว ยังเป็นแบตเตอรี่ที่มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดและสามารถผลิตได้ง่าย ส่งผลให้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในหลากหลายอุตสาหกรรม ทั้งระบบไฟฟ้าสำรองพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบโทรคมนาคม และยานยนต์ โดยเฉพาะในระบบจัดเก็บพลังงานเพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าและเสริมความมั่นคงให้พลังงานหมุนเวียน องค์ประกอบหลัก ของแบตเตอรี่ชนิดนี้ประกอบด้วย ขั้วบวกหรือแคโทดทำจากตะกั่วไดออกไซด์ (PbO_2) ขั้วลบหรือแอโนดทำจากตะกั่วฟองน้ำ (Pb) อิเล็กโทรไลต์ ใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

หลักการทำงาน เริ่มจากเมื่อชาร์จแบตเตอรี่ ขั้วบวกและลบจะอยู่ในสภาพ (PbO_2) และ Pb ตามลำดับ เมื่อมีการคายประจุ ปฏิกิริยาเคมีจะเปลี่ยนแผ่นทั้งสองเป็นตะกั่วซัลเฟต ($PbSO_4$) พร้อมปล่อยกระแสไฟฟ้าออกไปสู่วงจรภายนอก ขณะเดียวกัน กรดซัลฟิวริกในอิเล็กโทรไลต์จะลดลง กลายเป็นน้ำ และความต่างศักย์ของแบตเตอรี่จะลดลง จนกระทั่งแรงดันไม่เพียงพอจ่ายโหลด อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่สามารถนำกลับมาชาร์จใหม่ได้ โดยการจ่ายไฟย้อนกลับเพื่อคืนสภาพแผ่นธาตุให้เหมือนเดิมอีกครั้ง

2. แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม (Nickel cadmium battery)

แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียมเป็นเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่ถูกพัฒนาขึ้นและเริ่มใช้งานอย่างแพร่หลายในช่วงกลางศตวรรษที่ 20 โดยเฉพาะในอุปกรณ์พกพา อุปกรณ์สื่อสาร ไฟฉุกเฉิน และระบบสำรองไฟ จุดเด่นของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือความทนทาน ความสามารถในการคายประจุได้รวดเร็ว และสามารถใช้งานได้ในสภาพอุณหภูมิที่หลากหลาย อีกทั้งยังต้องการการบำรุงรักษาน้อย และมีอายุการใช้งานประมาณ 2,000–2,500 รอบ แม้จะมีราคาสูงและมีปัญหาด้านผลของความจำ Memory effect รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากแคดเมียมซึ่งเป็นโลหะหนักที่เป็นพิษ แต่แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียมยังคงเป็นตัวเลือกที่นิยมในงานที่ต้องการความเสถียรสูง องค์ประกอบหลักของแบตเตอรี่ชนิดนี้ประกอบด้วย ขั้วบวกหรือแคโทดทำจากนิกเกิลไฮดรอกไซด์ (Ni(OH)_2) ขั้วลบหรือแอโนดทำจากแคดเมียมไฮดรอกไซด์ (Cd(OH)_2) และอิเล็กโทรไลต์ที่มีคุณสมบัติเป็นด่างซึ่งช่วยในการนำไฟฟ้า

หลักการทำงาน ในระหว่างการคายประจุขั้วบวกจะเปลี่ยนจากนิกเกิลออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (NiOOH) ไปเป็นนิกเกิลไฮดรอกไซด์ (Ni(OH)_2) โดยทำปฏิกิริยากับน้ำ ขณะที่ขั้วลบจะเปลี่ยนจากแคดเมียม (Cd) ไปเป็นแคดเมียมไฮดรอกไซด์ (Cd(OH)_2) พร้อมกับปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกสู่ภายนอก ซึ่งสร้างกระแสไฟฟ้าให้กับวงจร เมื่อชาร์จประจุกลับเข้าไป ปฏิกิริยาทั้งหมดจะย้อนกลับ อิเล็กตรอนจะถูกดึงกลับมายังขั้วลบ ทำให้แผ่นธาตุกลับคืนสภาพเดิมอีกครั้งระหว่างกระบวนการอาจเกิดการแยกตัวของก๊าซออกซิเจนที่ขั้วบวก และก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วลบ ซึ่งอาจทำให้น้ำในเซลล์ลดลงจึงจำเป็นต้องมีระบบวาล์วระบายหรือเติมน้ำในบางกรณี เพื่อรักษาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ให้คงที่ตลอดอายุการใช้งาน

3. แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในยุคปัจจุบัน โดยเริ่มมีการใช้งานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่น คืออายุการใช้งานที่ยาวนาน ระดับแรงดันไฟฟ้าสูง น้ำหนักเบา และอัตราการคายประจุในตัวเองต่ำ อีกทั้งยังมีความหนาแน่นของพลังงานสูง และมีรอบการใช้งานสูงสามารถใช้งานได้มากถึง 10,000 รอบ แบตเตอรี่ชนิดนี้จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เช่น โทรศัพท์มือถือ แล็ปท็อป และเป็นแหล่งพลังงานหลักของรถยนต์ไฟฟ้ารุ่นใหม่ ๆ แต่ข้อจำกัดสำคัญของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนคือราคาที่ค่อนข้างสูง มากกว่า 600 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และต้องการวงจรควบคุมเพื่อป้องกันการประจุไฟเกินหรือลัดวงจร เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน องค์ประกอบหลักของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้แก่ ขั้วบวกหรือแคโทด ทำจากสารประกอบลิเทียมออกไซด์ เช่น (LiCoO_2), (LiNiO_2) หรือ (LiMnO_2) ขั้วลบหรือแอโนด ทำจากคาร์บอนแกรไฟต์ ส่วนตัวแยก Separator ที่ทำหน้าที่แยกขั้วไฟฟ้าไม่ให้สัมผัสกันโดยตรง และอิเล็กโทรไลต์ซึ่งเป็นสารละลายเกลือลิเทียม (LiPF_6) ในน้ำยาคาร์บอนไดออกไซด์

หลักการทำงาน ในระหว่างกระบวนการ ชาร์จไฟ อะตอมลิเทียมที่อยู่ในแคโทดจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Li^+) แล้วเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วลบหรือแอโนด ซึ่งเป็นคาร์บอนแกรไฟต์ พร้อมกับอิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านวงจรภายนอกจากขั้วลบไปยังขั้วลบ เมื่อถึงที่แอโนด ไอออนลิเทียมและอิเล็กตรอนจะรวมตัวกันและฝังตัวอยู่ระหว่างชั้นคาร์บอน ทำให้เกิดการเก็บพลังงานไว้ในแบตเตอรี่ ขณะที่คายประจุ กระบวนการจะย้อนกลับ โดยไอออนลิเทียมจะเคลื่อนกลับจากแอโนดไปยังแคโทดผ่านอิเล็กโทรไลต์ ขณะที่อิเล็กตรอนก็เคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกไปจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ ปฏิริยาารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่สามารถเกิดซ้ำได้หลายพันรอบ จึงทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และประสิทธิภาพสูง เหมาะสำหรับอุปกรณ์สมัยใหม่ที่ต้องการความเสถียรและพลังงานสูงในน้ำหนักที่เบา

4. แบตเตอรี่ที่มีการไหลของส่วนเก็บพลังงาน (Flow battery)

แบตเตอรี่ชนิดไหลเป็นเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานในรูปของพลังงานเคมี ที่ใช้หลักการทางไฟฟ้าเคมีเช่นเดียวกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ แต่มีความแตกต่างเด่นชัดตรงที่ส่วนที่เก็บพลังงานจะอยู่ในรูปของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสามารถไหลเวียนผ่านเซลล์ไฟฟ้าเคมีภายนอกได้ อิเล็กโทรไลต์นี้ประกอบด้วยธาตุหรือสารประกอบที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมี และเก็บอยู่ในถังแยกต่างหากจากเซลล์ เมื่อปั๊มเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี จะทำให้เกิดปฏิกิริยาารีดอกซ์เพื่อชาร์จหรือคายประจุ โดยองค์ประกอบหลักของระบบประกอบด้วย ถังเก็บสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทั้งฝั่งแคโทดและแอโนด ปั๊มสำหรับหมุนเวียนของเหลว เซลล์ไฟฟ้าเคมี และเยื่อเลือกผ่าน Membrane ซึ่งทำหน้าที่แยกสารละลายสองฝั่งไม่ให้ผสมกันโดยตรง

หลักการทำงาน เมื่อเริ่มต้นกระบวนการทำงาน สารละลายอิเล็กโทรไลต์จากทั้งสองถังจะถูกปั๊มเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยขั้วแอโนดและแคโทดที่อยู่ภายในเซลล์จะทำหน้าที่รับส่งอิเล็กตรอนผ่านวงจรภายนอก ในระหว่างการ ชาร์จ พลังงานไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมี โดยไอออนจากอิเล็กโทรไลต์จะถูกสะสมไว้ในสถานะที่มีพลังงานสูง และในขั้นตอนของการคายประจุ ปฏิริยาจะย้อนกลับ โดยไอออนจะปล่อยอิเล็กตรอนออกสู่ภายนอกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์และขนาดพื้นที่ของแต่ละเซลล์ ในขณะที่ความจุพลังงานขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างยืดหยุ่นส่งผลให้แบตเตอรี่ชนิดไหลเหมาะสำหรับการใช้งานในระบบกักเก็บพลังงานขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน และระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ Smart Grid [39, 40]

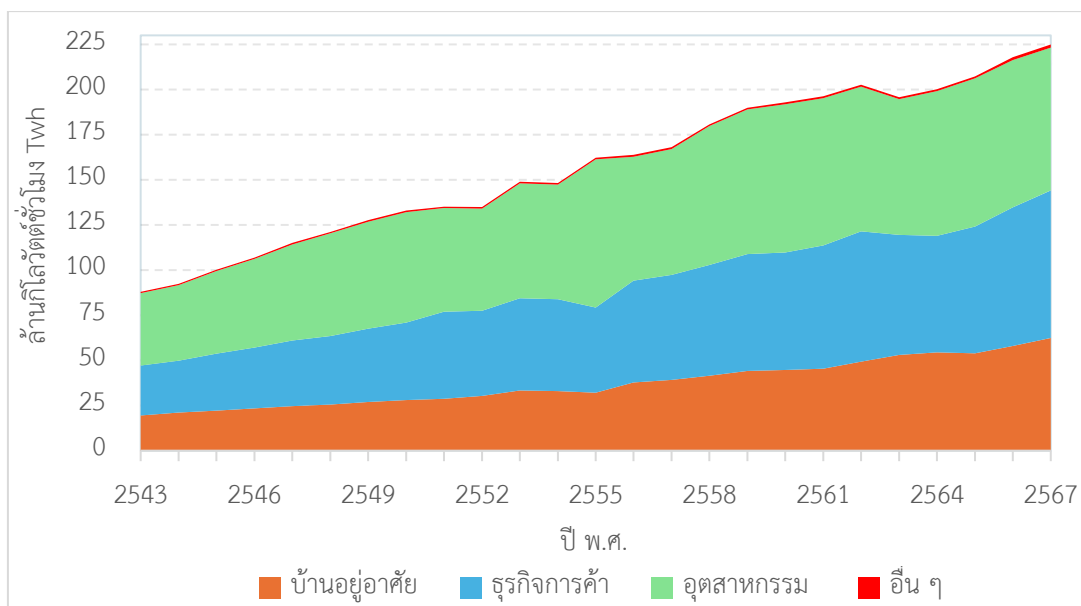
2.3 สถานการณ์พลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันของประเทศไทย

จากแผนและนโยบายด้านพลังงานของประเทศไทยชี้ให้เห็นว่าพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและเป็นสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิตของคนในประเทศ ด้วยเหตุนี้สถานการณ์พลังงานของประเทศไทยจึงมีการกำหนดทิศทางที่ชัดเจนผ่านแผนและนโยบายระดับประเทศ โดยคำนึงถึงปัจจัยภายใน เช่น ความมั่นคงของแหล่งพลังงานในประเทศ ความเพียงพอของโครงสร้างพื้นฐาน และความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง รวมถึงปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบโดยตรง เช่น ราคาพลังงานโลกที่ผันผวน และแนวโน้มการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาดในระดับสากล เพื่อตอบสนองต่อเป้าหมายที่ท้าทายเหล่านี้ กระทรวงพลังงานจึงได้จัดทำแผนพลังงานชาติ (National Energy Plan: NEP) และแผนปฏิบัติราชการระยะ 5 ปี พ.ศ. 2566–2570 โดยเน้นย้ำการส่งเสริมพลังงานสะอาด การปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงาน

เพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มการใช้พลังงานและการประเมินสถานการณ์พลังงานของประเทศไทยในหัวข้อนี้ จึงได้อธิบายสถานการณ์พลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันของประเทศไทย โดยครอบคลุมทั้งการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายจำแนกตามแหล่งพลังงาน การจัดหาและผลิตพลังงานขั้นต้น การนำเข้าพลังงาน รวมถึงการส่งเสริมพลังงานหมุนเวียน เพื่อให้เห็นภาพรวมของการวางแผนด้านพลังงานที่เชื่อมโยงกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของประเทศไทยในระยะยาว [16]

2.3.1 การใช้พลังงานไฟฟ้าจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจ

จากสถานการณ์การใช้พลังงานของประเทศไทยในช่วงที่ผ่านมา พบว่าประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมซึ่งถือเป็นภาคส่วนที่ใช้พลังงานมากที่สุด โดยในปี พ.ศ. 2543 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงถึง 40,139 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนในปี พ.ศ. 2567 มีปริมาณการใช้พลังงานอยู่ที่ 79,170 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง โดยปีที่มีการใช้พลังงานสูงสุดคือ พ.ศ. 2565 อยู่ที่ 82,039 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับภาคธุรกิจการค้า ซึ่งเป็นภาคที่มีการใช้พลังงานรองลงมา มีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยจากข้อมูลในปี พ.ศ. 2543 พบว่ามีการใช้พลังงานอยู่ที่ 27,642 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นจนถึง 81,692 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมงในปี พ.ศ. 2567 ซึ่งนับเป็นปีที่มีการใช้พลังงานสูงสุดในภาคส่วนนี้ นอกจากนี้ภาคครัวเรือนยังเป็นอีกภาคส่วนที่มีบทบาทสำคัญต่อการขับเคลื่อนประเทศผ่านการบริโภคพลังงานไฟฟ้าเพื่ออำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน โดยในปี พ.ศ. 2543 มีการใช้พลังงานอยู่ที่ 19,474 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนในปี พ.ศ. 2567 มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงถึง 62,416 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงการเติบโตของภาคครัวเรือนและแนวโน้มความต้องการพลังงานที่อาจเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต ดังแสดงในภาพประกอบ 21

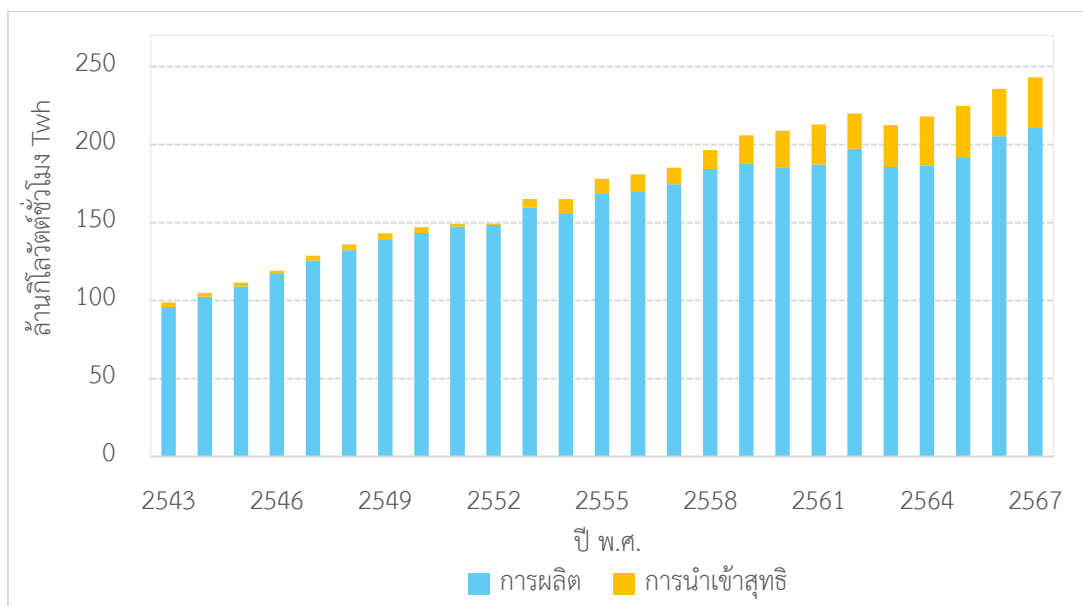


ภาพประกอบ 21 การใช้พลังงานไฟฟ้าจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจ [41, 42]

2.3.2 การจัดหาและนำเข้าพลังงานไฟฟ้า

เนื่องจากประเทศไทยยังคงประสบปัญหาในการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการภายในประเทศ จึงจำเป็นต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานไฟฟ้า เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงาน และรองรับการเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคม โดยในปี พ.ศ. 2543 ประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานไฟฟ้าสุทธิอยู่ที่ 2,773 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการขยายตัวของความต้องการใช้พลังงาน รวมถึงข้อจำกัดของทรัพยากรการผลิตภายในประเทศ จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2567 ปริมาณการนำเข้าพลังงานไฟฟ้าสุทธิเพิ่มขึ้นเป็น 32,402 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง ดังแสดงในภาพประกอบ 22

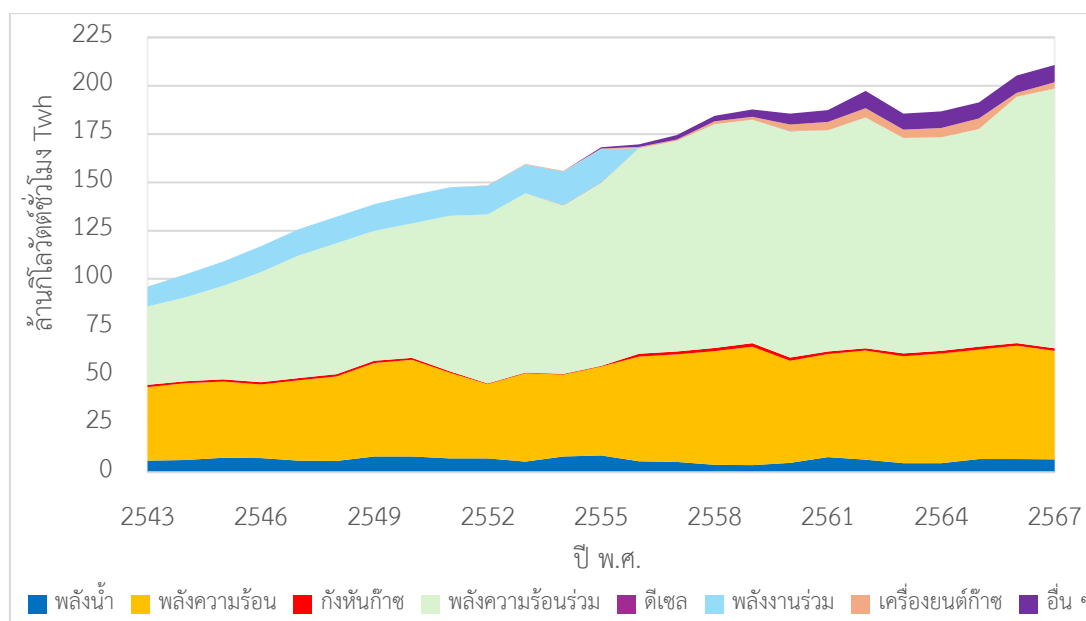
ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ความต้องการพลังงานของประเทศไทยเพิ่มสูงขึ้น ได้แก่การปรับเปลี่ยนภาคอุตสาหกรรมจากการใช้แรงงานมนุษย์มาเป็นการใช้เทคโนโลยีอัตโนมัติและเครื่องจักรที่ทันสมัยมากขึ้น รวมถึงการเติบโตของยานยนต์ไฟฟ้า (EV) ซึ่งต้องการไฟฟ้าในปริมาณมาก หากประเทศไทยมีการเปลี่ยนผ่านไปสู่การใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งพลังงานหลัก โดยไม่มีระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System) ที่เพียงพอ อาจทำให้เกิดปัญหาในด้านเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเนื่องจากพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานลม มีความไม่แน่นอนและผันผวนสูง การบริหารจัดการพลังงานในอนาคตจึงจำเป็นต้องมีการวางแผนอย่างรอบคอบและยั่งยืน เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้นได้อย่างมั่นคง



ภาพประกอบ 22 การจัดหาพลังงานไฟฟ้าของระบบ [41, 42]

2.3.3 การผลิตพลังงานไฟฟ้าจำแนกตามโรงไฟฟ้า

จากข้อมูลการผลิตพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยในช่วงปี พ.ศ. 2543 ถึง พ.ศ. 2567 พบว่าประเทศไทยมีการพึ่งพาการผลิตไฟฟ้าจาก โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม เป็นแหล่งพลังงานหลักมาอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2543 โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 40,625 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง รองลงมาคือโรงไฟฟ้าพลังความร้อนซึ่งมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 38,009 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง ขณะที่โรงไฟฟ้าหลักที่มีกำลังการผลิตน้อยที่สุดในปีเดียวกันคือโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ ซึ่งผลิตไฟฟ้าได้เพียง 1,151 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมมีลักษณะการทำงานโดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลัก และยังคงเป็นโรงไฟฟ้าที่มีสัดส่วนการผลิตสูงที่สุดในประเทศมาอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2567 มีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น 134,313 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง ขณะที่โรงไฟฟ้าพลังความร้อนมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 56,284 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง ในส่วนของโรงไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ ในปีเดียวกัน ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังน้ำ มีกำลังการผลิต 6,607 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ 1,297 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง และโรงไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ รวมมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 8,999 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงโครงสร้างของระบบผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยที่ยังคงพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก โดยเฉพาะก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงสำคัญในโรงไฟฟ้าความร้อนร่วม ดังแสดงในภาพประกอบ 23

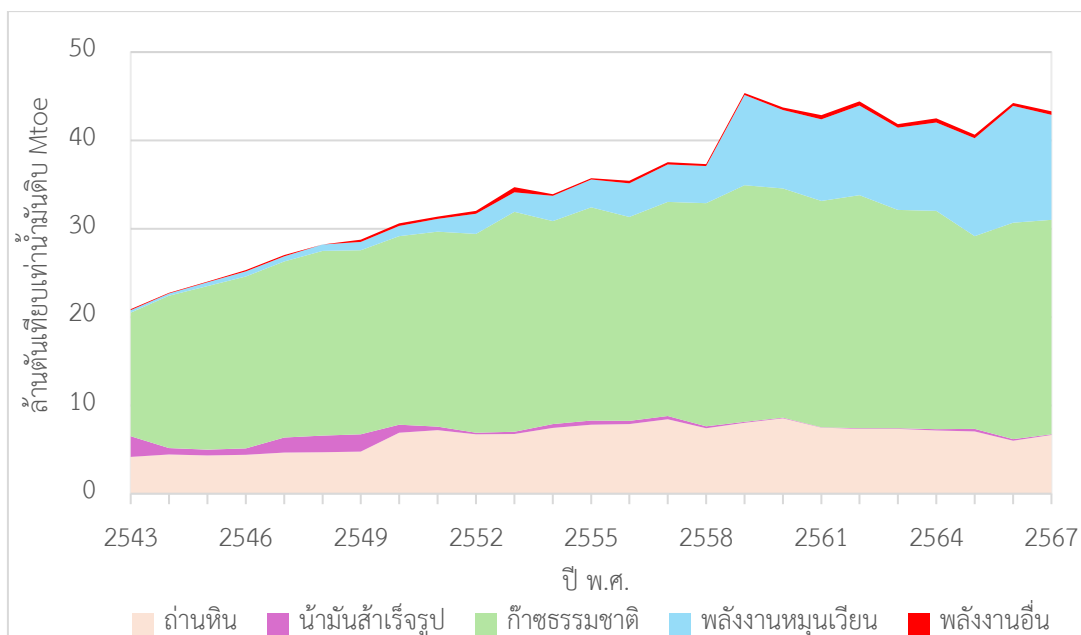


ภาพประกอบ 23 การผลิตพลังงานไฟฟ้าจำแนกตามโรงไฟฟ้า [41, 42]

2.3.4 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจำแนกตามชนิดเชื้อเพลิง

การผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยมีการพึ่งพาพลังงานจากก๊าซธรรมชาติมากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น จากข้อมูลการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยในช่วงปี พ.ศ. 2543 ถึง พ.ศ. 2567 พบว่า ประเทศไทยมีการพึ่งพาพลังงานจากก๊าซธรรมชาติเป็นแหล่งพลังงานหลักอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2543 มีการพึ่งพาก๊าซธรรมชาติอยู่ที่ 14,015 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ และเพิ่มขึ้นเป็น 24,287 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ในปี พ.ศ. 2567 ซึ่งแสดงถึงปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติที่มีสัดส่วนมากที่สุดเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานอื่น ๆ เช่น ถ่านหิน น้ำมันสำเร็จรูป พลังงานหมุนเวียน และพลังงานอื่น

ในปี พ.ศ. 2543 มีสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนอยู่ที่ 280 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากต้องการลดการพึ่งพาพลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิล และเพื่อให้มีความมั่นคงทางพลังงาน อีกทั้งยังคำนึงถึงการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในปี พ.ศ. 2567 สัดส่วนพลังงานหมุนเวียนเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 11,860 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ โดยพลังงานหมุนเวียนในปี พ.ศ. 2543 ยังไม่ได้มีการนำพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เข้ามาผลิตไฟฟ้าในระบบ จนถึงปี พ.ศ. 2552 เริ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ มีสัดส่วนการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ที่ 1 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ จนถึงปี พ.ศ. 2567 มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ที่ 463 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ดังแสดงในภาพประกอบ 24

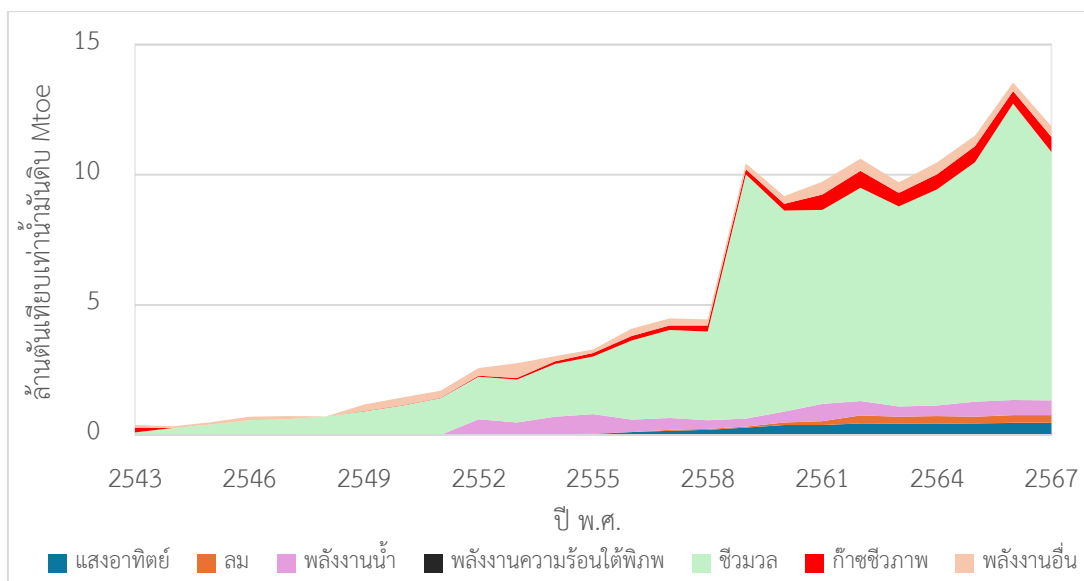


ภาพประกอบ 24 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า[41, 42]

2.3.5 ปริมาณการเชื้อเพลิงพลังงานหมุนเวียนในการผลิตพลังงานไฟฟ้า

จากข้อมูลการผลิตพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทย พบว่าในช่วงที่ผ่านมาประเทศไทยยังคงพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก ไม่ว่าจะเป็นก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน หรือผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ซึ่งนอกจากจะมีความเสี่ยงในด้านความมั่นคงทางพลังงานแล้ว ยังเป็นแหล่งพลังงานที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมาก ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ด้วยเหตุนี้ ประเทศไทยจึงมีนโยบายในการส่งเสริมการใช้ พลังงานหมุนเวียน เพื่อกระจายความเสี่ยง และเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานในระยะยาว โดยในช่วงปี พ.ศ. 2543 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานหมุนเวียนในภาคการผลิตไฟฟ้าเพียงบางประเภท ได้แก่ ชีวมวล ซึ่งมีปริมาณอยู่ที่ 99 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ และ ก๊าซชีวภาพ 181 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบเท่านั้น และมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นจนถึงปี พ.ศ. 2567 ประเทศไทยมีการขยายการใช้พลังงานหมุนเวียนหลากหลายประเภทมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะพลังงานจาก แสงอาทิตย์ ซึ่งมีปริมาณการใช้เทียบเท่าน้ำมันดิบอยู่ที่ 463 พันตัน พลังงานจากลม 300 พันตัน พลังงานจากน้ำ 562 พันตัน และ ชีวมวล เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น 9,545 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ดังแสดงในภาพประกอบ 25

แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความพยายามของประเทศไทยในการปรับโครงสร้างการผลิตไฟฟ้าให้มีความยั่งยืนมากขึ้น ลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล และมุ่งเน้นการใช้พลังงานสะอาดที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ



ภาพประกอบ 25 ปริมาณการเชื้อเพลิงพลังงานหมุนเวียนในการผลิตพลังงานไฟฟ้า [41, 42]

2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนเข้าสู่ระบบผลิตไฟฟ้า พบว่ามีแนวโน้มในการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนอย่างต่อเนื่อง และมีศักยภาพที่จะกลายเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าหลักในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างแพร่หลาย การศึกษาดังกล่าวครอบคลุมแหล่งข้อมูลจากเอกสารและงานวิจัยในหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ หนังสือ (Textbooks) แผนพัฒนาพลังงานระดับประเทศ (Energy Development Plans) รายงานการใช้และการผลิตพลังงาน (Energy Reports) บทความวิชาการ (Academic Papers) รวมถึงงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารทั้งในและต่างประเทศในการศึกษารุ่นนี้ ได้ดำเนินการรวบรวม วิเคราะห์ และสังเคราะห์ข้อมูลจากเอกสารและรายงานข้างต้นอย่างเป็นระบบ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการประเมินศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ และสนับสนุนการวางแผนการพัฒนาและขยายการใช้งานพลังงานหมุนเวียนในภาคการผลิตไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต ดังนี้

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องภายในประเทศไทย

Lorm and Limmeechokchai (2024) [43] การปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่ของประเทศ ไทยมาจากภาคการผลิตพลังงาน ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลักของประเทศมาอย่างต่อเนื่องหลายสิบปี เพราะเหตุนี้จึงมีการกำหนดนโยบายและตั้งเป้าหมายในการลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อนำไปสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนในอนาคต ระบบพลังงานของไทยใน

ปัจจุบันยังไม่ได้ใช้ศักยภาพของพลังงานหมุนเวียน การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากขึ้น รวมถึงการส่งเสริมการใช้รถยนต์ไฟฟ้า นอกจากนี้เทคโนโลยีดักจับและกักเก็บคาร์บอน (CCS) ที่ช่วยลดการปล่อยคาร์บอนจากโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลก็ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้จริงในประเทศ รวมถึงการใช้พลังงานไฮโดรเจนในระบบพลังงานของไทยก็ยังไม่ได้ขยายสู่ระดับที่ใหญ่พอ งานศึกษานี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยโดยใช้เครื่องมือ LEAP-NEMO เพื่อจำลองและประเมินสถานการณ์ในสามรูปแบบ ได้แก่ สถานการณ์อ้างอิง สถานการณ์ที่ตั้งเป้าหมายเข้มข้นขึ้น และสถานการณ์ที่ตั้งเป้าหมายการปล่อยก๊าซสุทธิเป็นศูนย์ ภายในปี 2050 (Net Zero Emissions 2050: NZE) ซึ่งจากผลการจำลองในกรณี NZE พบว่า พลังงานหมุนเวียนจะมีสัดส่วน 25% ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย และคิดเป็น 71% ของการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด รถยนต์ไฟฟ้าจะมีสัดส่วน 80% ของจำนวนรถยนต์ทั้งหมดในภาคขนส่งทางถนน ขณะที่โรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติที่ติดตั้งเทคโนโลยี CCS จะเข้ามามีบทบาทสำคัญในระบบผลิตไฟฟ้าที่ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

Handayani et al. (2022) [44] ภาคพลังงานเป็นหนึ่งในผู้ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกหลักทั่วโลก ในขณะเดียวกันก็มีความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศด้วย ดังนั้น ภาคพลังงานทั่วโลกจึงจำเป็นต้องเร่งดำเนินการลดการปล่อยคาร์บอนให้เร็วขึ้น บทความนี้ประเมินเส้นทางของภาคพลังงานสู่การปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี ค.ศ. 2050 สำหรับสมาคมประชาชาติแห่งเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (อาเซียน) โดยใช้แพลตฟอร์มการวิเคราะห์การปล่อยคาร์บอนต่ำ (LEAP) นอกจากนี้ บทความนี้ยังสร้างสถานการณ์นโยบายอ้างอิงและนโยบายพลังงานหมุนเวียน ผลการจำลองสถานการณ์ LEAP บ่งชี้ว่าภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ ประเทศสมาชิกอาเซียนจำเป็นต้องใช้ประโยชน์จากศักยภาพพลังงานหมุนเวียนที่ยังไม่ได้ใช้ในปัจจุบันอย่างรวดเร็วเพื่อให้บรรลุการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี ค.ศ. 2050 เมื่อถึงเวลานั้น จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงพอร์ตโฟลิโอเทคโนโลยีอย่างมีนัยสำคัญ โดยพลังงานหมุนเวียนและการเก็บพลังงานที่ผันผวนจะเข้ามามีบทบาทสำคัญ การจำลองสถานการณ์ LEAP ยังบ่งชี้ว่าเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนและการเก็บพลังงานมีต้นทุนที่สามารถแข่งขันได้มากกว่าการดักจับและการเก็บคาร์บอนเพื่อบรรลุเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ในระยะยาว ในแบบจำลอง LEAP การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดในปี ค.ศ. 2029 จากนั้นจะลดลงทีละน้อยจนถึงศูนย์ภายในปี ค.ศ. 2050 ในขณะเดียวกัน ต้นทุนการลดการปล่อยก๊าซอยู่ที่ 16 ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน CO_{2e} ในสถานการณ์นโยบายพลังงานหมุนเวียน และ 12 ดอลลาร์สหรัฐต่อ CO_{2e} ในสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์

ตรีพูนสุข และ รุ่งแจ้ง (2024) [45] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัชชี (FAHP) เพื่อจัดลำดับรูปแบบการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนโดยการจัดเป็นโครงสร้างการตัดสินใจ วิธี FAHP เป็นการวิเคราะห์แบบหลายหลักเกณฑ์ที่นิยมมากวิธีหนึ่งในการหาลำดับความสำคัญโดยการเปรียบเทียบคู่ในการตัดสินใจจากผู้เชี่ยวชาญ ผู้ทำงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาเลือกกรูแบบการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ได้แก่ ราคาต้นทุนค่าไฟฟ้า ความเข้ากันได้ของเทคโนโลยี การยอมรับจากสาธารณะ และการใช้ประโยชน์ที่ดินตามลำดับ และทางเลือกที่เหมาะสมของโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ได้แก่ รูปแบบโรงไฟฟ้าที่ผสมผสาน 3 เทคโนโลยี รองลงมาเป็นรูปแบบโรงไฟฟ้าที่ผสมผสาน 2 เทคโนโลยี คือ โรงไฟฟ้าพลังน้ำร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และโรงไฟฟ้าเทคโนโลยีเดียว คือ โรงไฟฟ้าพลังน้ำ ตามลำดับ งานวิจัยนี้สามารถเป็นประโยชน์ในกระบวนการกำหนดนโยบายเชิงบูรณาการเพื่อพัฒนาด้านพลังงานอย่างยั่งยืนโดยอาศัยดุลพินิจของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียได้อย่างรอบด้านยิ่งขึ้น เช่น การประยุกต์ใช้ในการวางแผนบูรณาการพลังงานระยะยาวของประเทศไทย (TIEB) เป็นต้น ปัจจัยสำคัญในการจัดลำดับรูปแบบการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย

สุทนต์ และคณะ (2024) [46] บทความวิชาการฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยสภาพแวดล้อมภายนอกที่ส่งผลต่อการจัดการเชิงกลยุทธ์ของธุรกิจพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย โดยมุ่งวิเคราะห์แต่ละประเด็นในด้านต่าง ๆ เพื่อพิจารณาว่าเป็นโอกาสหรืออุปสรรคต่อธุรกิจ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยและแนวคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายนอกร่วมกับการวิเคราะห์แก่นสาระ (Essence Analysis) ซึ่งใช้เป็นกรอบแนวคิดหลักในกระบวนการวิเคราะห์เชิงกลยุทธ์ และในการศึกษาครั้งนี้ ได้พิจารณาปัจจัยสภาพแวดล้อมภายนอก 6 ด้าน ได้แก่ ด้านการเมือง เศรษฐกิจ สังคม เทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม และกฎหมาย ผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยที่เป็นโอกาสต่อธุรกิจพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ การสนับสนุนนโยบายจากภาครัฐ แนวโน้มค่าไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ทศนคติของสังคมที่เอื้อต่อพลังงานทดแทน การพัฒนาเทคโนโลยีในด้านอุปกรณ์โรงไฟฟ้า และแนวโน้มด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ คาร์บอนเครดิต และกระแสโลกที่มุ่งลดโลกร้อน ในทางกลับกัน ปัจจัยที่เป็นอุปสรรคสำคัญ ได้แก่ ด้านเศรษฐกิจและการเติบโตทางเศรษฐกิจ ขณะที่ด้านกฎหมายก็ยังคงมีข้อจำกัดจากกฎระเบียบและมาตรฐานการติดตั้งที่อาจส่งผลการดำเนินธุรกิจ

ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับประเทศไทย

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	ขอบเขตของการศึกษา	วิธีการดำเนินการวิจัย	ผลการศึกษาโดยสรุป
Lorm and Limmeechokchai (2024) [43]	เพื่อวิเคราะห์ถึงสาเหตุและความเป็นไปได้ในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) จากการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบ (Renewable Energy)	- ประเทศไทย - ภาคการผลิตไฟฟ้า (Power Sector) - ปี ค.ศ. 2018 ถึง ค.ศ. 2050	LEAP-NEMO model	ใน NZE Scenario ปี ค.ศ. 2050 การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนสูงถึง 71% ของการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด ร้อยต่อไฟฟ้าจะมีสัดส่วน 80% ของยานพาหนะทั้งหมดในภาคขนส่งทางถนน โรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซธรรมชาติที่ติดตั้ง CCS จะมีบทบาทสำคัญในการลดการปล่อยคาร์บอน
Handayani et al. (2022) [44]	เพื่อการวิเคราะห์และประเมินแนวทางสู่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ ของกลุ่มประเทศอาเซียน (ASEAN) ภายในปี 2050	- อาเซียน 10 ประเทศ - ภาคการผลิตไฟฟ้า - ปี ค.ศ. 2021 ถึง ค.ศ. 2050	LEAP-NEMO model	งานวิจัยนี้ช่วยให้เห็น การบรรลุเป้าหมาย Net Zero Emissions ในภาคการผลิตไฟฟ้าของอาเซียนภายในปี ค.ศ. 2050 สามารถทำได้จริง โดยอาศัย การใช้ศักยภาพพลังงานหมุนเวียนในภูมิภาคอย่างเต็มที่ ควบคู่กับ การเพิ่มการใช้เทคโนโลยีจัดเก็บพลังงาน (Energy Storage) เพื่อรองรับการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานที่มีความผันแปร

ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับประเทศไทย (ต่อ)

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	ขอบเขตของการศึกษา	วิธีการดำเนินการวิจัย	ผลการศึกษาโดยสรุป
ตรีพนสุช และ รุ่งแจ้ง (2024) [45]	เพื่อศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการจัดลำดับความสำคัญของรูปแบบการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนของประเทศไทย โดยคำนึงถึงมิติทางด้านเศรษฐกิจสังคม เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม	- ประเทศไทย - ภาคการผลิตไฟฟ้า	การวิเคราะห์ FAHP	งานวิจัยนี้สามารถนำมาเป็นประโยชน์ในกระบวนการกำหนดนโยบายด้านพลังงานแห่งชาติ เพื่อพิจารณาแผนพลังงานอย่างยั่งยืน โดยคำนึงถึงการลดต้นทุนและลดผลเสียต่อผู้ประกอบการ ยิ่งขึ้น ตลอดจนช่วยลดข้อขัดแย้งในการวางแผนยุทธศาสตร์พลังงานระยะยาวของประเทศไทย (TIEB) เป็นต้น
สุนันต์ และคณะ (2024) [46]	เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยสภาพแวดล้อมภายนอกที่มีต่อการจัดการเชิงกลยุทธ์ของภาคธุรกิจพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย	- ประเทศไทย - ภาคการผลิตไฟฟ้า	การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative Analysis)	งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมภายนอกมีอิทธิพลสำคัญต่อการวางแผนและการดำเนินงานกลยุทธ์ของธุรกิจพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย ปัจจัยเหล่านี้ช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถปรับตัวและวางแผนกลยุทธ์ได้อย่างเหมาะสม ลดความเสี่ยงทางธุรกิจ

ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับประเทศไทย (ต่อ)

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	ขอบเขตของการศึกษา	วิธีการดำเนินการวิจัย	ผลการศึกษาโดยสรุป
Limmeechokchai and Dul (2023) [47]	เพื่อประเมินศักยภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) จากการใช้พลังงานไฟฟ้าหมุนเวียนในไทย โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีฐาน (BAU) กับกรณีเพิ่มสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียน	- ประเทศกัมพูชา ลาว ไทย และเวียดนาม - ภาคการผลิตไฟฟ้า - ปี ค.ศ. 2015 ถึง ค.ศ. 2030	LEAP model	การใช้พลังงานหมุนเวียน (RE) ช่วยลดการปล่อย GHG ได้ 110.1 MtCO ₂ eq ภายในปี ค.ศ. 2030 หรือราว 62% ของเป้าหมาย NDC รวมของกลุ่ม GMS โดยเวียดนามปล่อยมากที่สุด (70.1%) และไทย 26.7% ในปี ค.ศ. 2030 ลดส่วนการผลิตไฟฟ้าจาก RE เพิ่มขึ้น 49.8% และความต้องการไฟฟ้าลดลง 9.34%
Lorm and Limmeechokchai (2022) [48]	ศึกษาศักยภาพการลดคาร์บอนในภาคการผลิตไฟฟ้าของ 4 ประเทศในภูมิภาคน้ำโขง (GMS) ได้แก่ กัมพูชา ลาว ไทย และเวียดนาม เพื่อบรรลุ Net Zero Emissions	- ประเทศกัมพูชา ลาว ไทย และเวียดนาม - ภาคการผลิตไฟฟ้า - ปี ค.ศ. 2020 ถึง ค.ศ. 2050	LEAP model	หากดำเนินการตามแผน NZE การปล่อย CO ₂ จากภาคพลังงานสามารถลดลงได้ถึง 88.67% ภายในปี ค.ศ. 2050 พลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะแสงอาทิตย์และลม กลายเป็นแหล่งพลังงานหลัก ไทยมีสัดส่วนการปล่อย CO ₂ สูงที่สุดในกลุ่ม 4 ประเทศ

ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับประเทศไทย (ต่อ)

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	ขอบเขตของการศึกษา	วิธีการดำเนินการวิจัย	ผลการศึกษาโดยสรุป
Pongthaisawan et al. (2023) [49]	เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มทางและทางเลือกของประเทศไทยในการบรรลุเป้าหมาย ในการมีความเป็นกลางทางคาร์บอน ในภาคพลังงานภายในปี 2050 โดยใช้การสร้างสถานการณ์จำลองเพื่อพิจารณา นโยบาย ด้าน เทคโนโลยี	- ประเทศไทย - ภาคการผลิตไฟฟ้า - ปี ค.ศ. 2020 ถึง ค.ศ. 2050	LEAP model	Classic Scenario มีการพึ่งพาเทคโนโลยีพลังงานสะอาดและคาร์บอนเครดิตจากต่างประเทศ Orchestra Scenario โดยเน้นจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดการพึ่งคาร์บอนเครดิต ทั้งสองแนวทางสามารถนำไปสู่เป้าหมาย Carbon Neutrality ปี ค.ศ. 2050 ได้
Hongvityakorn et al. (2024) [50]	เพื่อการออกแบบและวิเคราะห์การใช้พลังงาน แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บ พลังงาน (ESS) เพื่อให้ อาคารสำนักงานของสถาบันวิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	- ประเทศไทย - เชียงใหม่ - Soar and ESS	Algorithmic Simulation	ผลการศึกษาพบว่า ระบบ PV 250 kW ร่วมกับ ESS 175 kWh สามารถลดการใช้พลังงานจากภายนอกได้ถึง 88.39% ซึ่งบรรลุเกณฑ์ Nearly ZEB Level 1 ได้สำเร็จ ขณะที่ระบบเดิม (PV 160 kW + ESS 50 kWh) ยังอยู่ในระดับ ZEB Ready โดยลดได้เพียง 64.21%

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับต่างประเทศ

Fernandez et al. (2025) [51] การวางแผนระบบพลังงานในอนาคตที่มีการผสมผสานพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy: RE) ในสัดส่วนที่สูง กำลังได้รับความสำคัญมากขึ้นเพื่อเสริมความมั่นคงทางพลังงานและสิ่งแวดล้อม ในการจำลองระบบพลังงานแบบ Bottom-up มี 2 แนวทางหลัก ได้แก่ Static และ Long-term งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองและวิเคราะห์การเปลี่ยนผ่านพลังงานหมุนเวียนของประเทศมาเลเซียไปจนถึงปี ค.ศ. 2050 โดยใช้ซอฟต์แวร์ Low Emissions Analysis Platform (LEAP) และเชื่อมต่อกับ Next Energy Modelling system for Optimization (NEMO) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการวางแผน มีการพัฒนารูปแบบจำลอง 5 รูปแบบ (Model 1-5) ครอบคลุมปี ค.ศ. 2020 ถึง ค.ศ. 2050 โดยมุ่งเน้นภาคการผลิตไฟฟ้า ในรูปแบบ NETR 2050 (National Energy Transition Roadmap 2050) พร้อมศึกษาความเหมาะสมของขนาดกำลังการจัดเก็บพลังงาน (Energy Storage Capacities) ทั้ง Battery Energy Storage Systems (BESS) และ Pumped Hydro Storage (PHS) ในโมเดลปีอ้างอิง ค.ศ. 2020 การผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ 153.8 TWh/ปี โดยพึ่งพ่าน้ำมันและก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก ขณะที่ในโมเดล NETR 2050 หลังการเพิ่มประสิทธิภาพด้วย LEAP-NEMO การผลิตไฟฟ้าเพิ่มเป็น 270.6 TWh/ปี โดยมีสัดส่วนหลักจากก๊าซธรรมชาติและพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO_2) ใน Model 1-5 เท่ากับ 287.5, 321.5, 382.1, 404.5 และ 466.3 ล้านตัน ตามลำดับ แต่เมื่อใช้มาตรการ Energy Efficiency (EE) และ LEAP-NEMO ใน Model 5 สามารถลด CO_2 ลงเหลือ 449.7 ล้านตัน จากการลดสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติ

Sutikno et al. (2024) [52] หลักการด้านการเข้าถึงได้ (Accessibility), ความเพียงพอ (Adequacy) และความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม (Environmental Sustainability) ในการจัดหาไฟฟ้าในระดับประเทศ จะกลายเป็นข้อเรียกร้องสำคัญในช่วงหลายปีข้างหน้า การเปลี่ยนผ่านพลังงานจากแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลไปสู่พลังงานหมุนเวียนเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อบรรเทาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยมีเป้าหมายสู่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net-Zero Emissions) ภายในปี ค.ศ. 2060 ของอินโดนีเซีย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนผ่านพลังงาน ประเมินสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนที่เหมาะสมที่สุด และกำหนดกลยุทธ์ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคการผลิตไฟฟ้า โดยใช้ซอฟต์แวร์ LEAP-NEMO ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการจำลองเชิงพยากรณ์ (forecasting-based simulation modeling) ร่วมกับการประยุกต์ใช้คณิตศาสตร์ผ่านซอฟต์แวร์ LEAP และกรอบการเพิ่มประสิทธิภาพของ NEMO ผลการศึกษาพบว่าภายในปี ค.ศ. 2060 สถานการณ์ NZE FRE สามารถบรรลุการใช้พลังงานหมุนเวียน 100% ในส่วนของการผลิตไฟฟ้า ในขณะที่สถานการณ์ BAU อยู่ที่ 42.1% และสถานการณ์ NZE CCS อยู่ที่ 70.8% โดยในสถานการณ์ NZE FRE แหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าจะประกอบด้วยพลังงาน

แสงอาทิตย์ (Solar), ชีวมวล (Biomass), พลังน้ำ (Hydro) และพลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal) ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งที่มีสัดส่วนมากที่สุด

Ren et al. (2024) [53] การเปลี่ยนผ่านสู่การลดคาร์บอนในภาคการผลิตไฟฟ้าของจีนมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับโลก โดยการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนถือเป็นวิธีหลักที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการลดการปล่อยคาร์บอนของภาคส่วนนี้ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองการเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียน เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการบรรลุเป้าหมายการปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emission) ภายในปี ค.ศ. 2050 ในภาคการผลิตไฟฟ้าของจีน นอกจากนี้ ยังได้ประเมินผลกระทบของการกำหนดราคาคาร์บอน (Carbon Pricing) และมาตรการจูงใจทางการเงิน (Financial Incentives) ที่มีต่ออัตราการใช้พลังงานหมุนเวียนและปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการศึกษา พบว่า แม้ความต้องการไฟฟ้าในจีนจะยังคงเติบโตต่อเนื่องควบคู่กับการพัฒนาเศรษฐกิจ แต่จะมีแนวโน้มชะลอตัวลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป ทั้งนี้ ภาคการผลิตไฟฟ้าสามารถบรรลุเป้าหมาย Net Zero Emission ภายในปี ค.ศ. 2050 ได้ในขณะที่ยังคงรองรับความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยต้องมีสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนอยู่ที่ 75% เพื่อให้บรรลุเป้าหมายดังกล่าว งานวิจัยแนะนำให้กำหนดราคาคาร์บอนโดยใช้ราคาตลาดปัจจุบันเป็นฐาน และเพิ่มขึ้นทุกปีในอัตรา 10% ตามดัชนีการเพิ่มขึ้นสัมพัทธ์ (Relative Increment Index) นอกจากนี้ จากข้อจำกัดด้านต้นทุนเริ่มต้นที่สูงและการพัฒนาไฟฟ้าพลังงานลมในทะเล (Offshore Wind Power) ที่เริ่มต้นช้ากว่าพลังงานหมุนเวียนประเภทอื่น ๆ จึงมีข้อเสนอให้รวมต้นทุนการเชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้า (Grid Connection Cost) ไว้ในโครงสร้างราคาค่าบริการส่งและจำหน่ายไฟฟ้า (Transmission and Distribution Price)

Golfam and Ashofteh (2024) [54] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าด้านต้นทุนและผลประโยชน์ (Cost-Benefit Analysis) ของสถานการณ์ด้านอุปสงค์และอุปทานในการผลิตและจัดหาไฟฟ้าพลังน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำมารูน (Marun Catchment) ซึ่งตั้งอยู่ในจังหวัดคุเซสถาน ประเทศอิหร่าน โดยใช้เครื่องมือ Low Emission Analysis Platform (LEAP) สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ได้ทำการรวบรวมและคำนวณข้อมูลด้านประชากร ตัวชี้วัดเศรษฐกิจมหภาค และอัตราการบริโภคพลังงานต่อหัวของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ในทั้งภาคเมืองและภาคเกษตรกรรมในปี ค.ศ. 2015 สำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำมารูน หลังจากนั้น ได้ประมาณการสมมติฐานสำคัญที่ส่งผลต่อการใช้พลังงาน ได้แก่ อัตราการเติบโตของประชากร, อัตราการเติบโตของผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ (GDP), และสัดส่วนความเป็นเมือง ในช่วงปี ค.ศ. 2015 – ค.ศ. 2040 เพื่อนำมาจำลองแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความต้องการพลังงาน ผลการศึกษาระบุว่า ความต้องการใช้ไฟฟ้าสุทธิในปี ค.ศ. 2040 จะอยู่ที่ 5,094 MWh ขณะที่กำลังการผลิตไฟฟ้าจะมีอยู่ที่ 3.1 ล้าน MWh นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ต้นทุน-ผลประโยชน์ของแต่ละสถานการณ์ชี้ให้เห็นว่า การใช้หลอดไฟประหยัดพลังงาน (Energy-Saving

Lamps) จะให้ค่า NPV เท่ากับ -251 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เมื่อเทียบกับสถานการณ์ BAU ซึ่งถือว่าเป็นทางเลือกที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ดีที่สุดสำหรับการตอบสนองความต้องการไฟฟ้าในพื้นที่ลุ่มน้ำมารูน.

U. Shah et al. (2024) [55] อินโดนีเซียเป็นหนึ่งในประเทศที่มีเศรษฐกิจเติบโตเร็วที่สุดในโลก โดยระบบผลิตไฟฟ้ายังคงพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก ขณะที่พลังงานหมุนเวียนยังมีบทบาทน้อยในการรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization Approach) ในการวิเคราะห์เส้นทางการพัฒนาระบบไฟฟ้าในระยะยาวของอินโดนีเซีย ภายใต้กรอบของนโยบายและการเปลี่ยนแปลงในภาคพลังงานที่กำลังมีการถกเถียงกันอยู่ในปัจจุบัน การวิเคราะห์ได้จำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ที่สะท้อนถึงความเป็นไปได้ของนโยบาย เช่น การลดต้นทุนของเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน การยุติกำลังการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินเร็วกว่าที่วางแผนไว้ รวมถึงการนำโครงการภาษีคาร์บอนมาใช้ โดยสถานการณ์เหล่านี้ถูกออกแบบผ่านการจำลองด้วยแบบจำลองการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization Model) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงขนาดของการเปลี่ยนแปลงที่จำเป็นในการขับเคลื่อนอินโดนีเซียไปสู่เป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) รวมทั้งช่วยเสริมสร้างการอภิปรายในประเด็นเรื่องการยุติการขยายกำลังการผลิตจากถ่านหินเกินกว่าแผนที่มียูอยู่ในปัจจุบัน โดยพิจารณาครอบคลุมทั้งด้านเทคนิค สิ่งแวดล้อม และเศรษฐกิจ ข้อค้นพบเหล่านี้ถือเป็นข้อมูลสำคัญที่จะช่วยสนับสนุนการตัดสินใจของผู้กำหนดนโยบายและนักวางแผนในภาคพลังงานของอินโดนีเซีย ในขณะที่ประเทศยังคงมุ่งเดินตามเส้นทางการพัฒนาเศรษฐกิจอย่างยั่งยืนต่อไป

Handayani et al. (2023) [56] บทความนี้ได้ประเมินแนวทางของภาคการผลิตไฟฟ้าในประเทศกำลังพัฒนาในการก้าวไปสู่เป้าหมายการปล่อยก๊าซสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero) โดยใช้ Low Emissions Analysis Platform (LEAP) ร่วมกับระบบ Next Energy Modeling system for Optimization (NEMO) เพื่อทำการจำลองการบูรณาการพลังงานหมุนเวียน 100% เข้าสู่ระบบผลิตไฟฟ้า แม้ว่าที่ผ่านมาจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ใช้ LEAP ในการศึกษา แต่มีเพียงไม่กี่งานที่ได้นำ NEMO ซึ่งเป็นส่วนเสริมการเพิ่มประสิทธิภาพล่าสุดของ ผลการวิเคราะห์จาก LEAP-NEMO ชี้ให้เห็นว่าการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหัวของลาว กัมพูชา และเมียนมาจะสามารถข้ามเส้นความยากจนด้านพลังงานได้ภายในปี ค.ศ. 2030, ค.ศ. 2035 และ ค.ศ. 2045 ตามลำดับ ส่วนในด้านการผลิตพลังงาน ผลการวิเคราะห์ระบุว่าทั้งสามประเทศสามารถบูรณาการพลังงานหมุนเวียน 100% เข้าสู่ระบบผลิตไฟฟ้าได้ หากสามารถใช้ศักยภาพพลังน้ำ (Hydropower) ให้เต็มที่ควบคู่ไปกับการใช้พลังงานหมุนเวียนประเภทอื่น ๆ ที่ไม่ใช่พลังน้ำ

Wang et al. (2023) [57] ปัจจุบันหลายพื้นที่ของจีน โดยเฉพาะเขตมองโกเลียใน (Inner Mongolia) ซึ่งพึ่งพาการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินเป็นหลัก กำลังเผชิญแรงกดดันในการลดการปล่อย

คาร์บอนเพื่อบรรลุเป้าหมาย Carbon Peaking และ Carbon Neutrality งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization Model) เพื่อหาแนวทางลดการปล่อยคาร์บอนในภาคผลิตไฟฟ้าของมองโกเลียใน ด้วยต้นทุนที่ต่ำที่สุด ผ่านสถานการณ์จำลอง 3 แบบ ที่มีข้อจำกัดการปล่อยคาร์บอนและเป้าหมายพลังงานหมุนเวียนแตกต่างกัน การศึกษาพิจารณาปัจจัยด้านความต้องการไฟฟ้า กำลังการผลิตที่ติดตั้ง การผลิตจริง ต้นทุน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละสถานการณ์ พบว่าความต้องการไฟฟ้าในมองโกเลียในจะเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงปี ค.ศ. 2060 โดยความต้องการในภาคอุตสาหกรรมลดลงเฉลี่ย 41% ขณะที่ภาคขนส่งและประโยชน์เพิ่มขึ้นเกือบ 89% หากต้องการลดการปล่อยคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ มองโกเลียในต้องใช้ศักยภาพพลังงานหมุนเวียนเต็มที่ สร้างระบบกักเก็บพลังงาน และกระจายแหล่งผลิตไฟฟ้าให้หลากหลาย ในแง่ต้นทุนและประสิทธิภาพ การเลิกใช้ถ่านหินทั้งหมดภายในปี ค.ศ. 2060 จะลดการปล่อยคาร์บอนได้ราว 148 ล้านตัน และลดต้นทุนรวมได้ถึง 1,375 พันล้านหยวน เมื่อเทียบกับกรณีที่ยังใช้ถ่านหิน 13% เป็นพลังงานสำรอง แนวทางนี้จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์และวางแผนลดการปล่อยคาร์บอนระดับจังหวัดหรือภูมิภาค เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจของผู้กำหนดนโยบาย หน่วยงานรัฐ และอุตสาหกรรมไฟฟ้าในการเดินทางสู่เป้าหมาย Carbon Neutrality อย่างมีประสิทธิภาพ

Kanugrahan et al. (2022) [58] อินโดนีเซียมีแผนพัฒนาการผลิตไฟฟ้าที่ตั้งเป้าหมายให้พลังงานหมุนเวียนมีสัดส่วน 23%, 28% และ 31% ของการผลิตไฟฟ้าทั้งหมดภายในปี ค.ศ. 2025, ค.ศ. 2038 และ ค.ศ. 2050 ตามลำดับ งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ของแผนพัฒนาการผลิตไฟฟ้าของอินโดนีเซียโดยใช้แบบจำลอง LEAP ในช่วงหลังสถานการณ์ COVID-19 โดยเน้นไปที่การบรรลุเป้าหมายพลังงานหมุนเวียน ในการศึกษาได้มีการจำลอง 4 สถานการณ์ ได้แก่ สถานการณ์ดำเนินธุรกิจตามปกติ (BAU), การเพิ่มประสิทธิภาพด้านต้นทุน (CO), แผนระดับชาติ (NP) และการปล่อยคาร์บอนเป็นศูนย์ (ZC) สถานการณ์ BAU อ้างอิงจากแผนธุรกิจไฟฟ้าของบริษัท PLN ในช่วงปี ค.ศ. 2019 – ค.ศ. 2028 ซึ่งไม่มีเป้าหมายพลังงานหมุนเวียนโดยเฉพาะ สถานการณ์ CO มีเป้าหมายที่จะบรรลุข้อกำหนดด้านพลังงานหมุนเวียนด้วยต้นทุนที่ต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ สถานการณ์ NP มีเป้าหมายบรรลุพลังงานหมุนเวียน พร้อมทั้งมีเป้าหมายเพิ่มเติมในการใช้ก๊าซธรรมชาติ 22% ภายในปี ค.ศ. 2025 และ 25% ภายในปี ค.ศ. 2038 ส่วนสถานการณ์ ZC มีเป้าหมายที่จะใช้พลังงานหมุนเวียน 100% ภายในปี ค.ศ. 2050 ด้วยต้นทุนต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

ตาราง 4 สรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับต่างประเทศ

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	ขอบเขตของการศึกษา	วิธีการดำเนินการวิจัย	ผลการศึกษาโดยสรุป
Fernandez et al. (2025) [51]	เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนผ่านพลังงานหมุนเวียนของจนถึงปี ค.ศ. 2050 โดยใช้แบบจำลอง LEAP ในการพัฒนา 5 โมเดลของระบบพลังงานแห่งชาติ และศึกษาพลังงานหมุนเวียนร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน	• ประเทศมาเลเซีย • ภาคการผลิตไฟฟ้า • ปี ค.ศ. 2020 ถึง ค.ศ.2050	LEAP-NEMO model	สามารถลดการพึ่งพาถ่านหินลงจนหมดภายในปี ค.ศ. 2050 โดยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) และก๊าซธรรมชาติจะกลายเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าหลัก สัดส่วน พลังงานหมุนเวียนในกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นจาก 23% ในปี ค.ศ. 2020 เป็น 70% ในปี ค.ศ. 2050 การใช้ระบบกักเก็บพลังงาน (BESS และ PHS)
Sutikno et al. (2024) [52]	เพื่อสร้างแบบจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนผ่านด้านพลังงาน ประเมินการผสมผสานระหว่างพลังงานหมุนเวียนที่เหมาะสมที่สุด และกำหนดกลยุทธ์การลดการปล่อยก๊าซโดยใช้ซอฟต์แวร์ LEAP-NEMO	• ประเทศอินโดนีเซีย • ภาคการผลิตไฟฟ้า • ปี ค.ศ. 2023 ถึง ค.ศ.2060	LEAP-NEMO model	NZE FRE (Full Renewable Energy) เป็นสถานการณ์ที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากที่สุด โดยลดลงถึง 70.5% เทียบกับ BAU พลังงานหมุนเวียนใน NZE FRE จะเป็น 100% ภายในปี ค.ศ. 2060 โดยมี Solar, Biomass, Hydro, Geothermal เป็นแหล่งพลังงานหลัก ในขณะที่ NZE CCS มีการลด CO ₂ ได้ 61%

ตาราง 4 สรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับต่างประเทศ (ต่อ)

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	ขอบเขตของการศึกษา	วิธีการดำเนินการวิจัย	ผลการศึกษาโดยสรุป
Ren et al. (2024) [53]	เพื่อประเมินความเป็นไปได้และนโยบายที่จำเป็นในการบรรลุเป้าหมาย Net Zero Emission ของภาคการผลิตไฟฟ้าประเทศจีนภายในปี ค.ศ. 2050 โดยพัฒนาแบบจำลอง LEAP-REP	- ประเทศประเศจีน - ภาคการผลิตไฟฟ้า - ปี ค.ศ. 2022 ถึง ค.ศ. 2050	LEAP model	เพื่อให้สามารถบรรลุเป้าหมาย Net Zero Emission ในภาคพลังงานจีนได้ภายในปี ค.ศ. 2050 หากมีการเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนเป็น 80% ของกำลังการผลิตติดตั้ง และ 75% ของปริมาณการผลิตไฟฟ้า พลังงานหมุนเวียนหลัก ได้แก่ พลังงานลม , พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงาน
Golfam and Ashoffteh (2024) [54]	เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์สถานการณ์อุปสงค์-อุปทานในการผลิตและจัดหาพลังงานในพื้นที่ลุ่มน้ำ Marun ตั้งอยู่ใน จังหวัด Khuzestan อิหร่าน โดยใช้ Low Emission Analysis Platform (LEAP)	- ประเทศอิหร่าน - ภาคการผลิตไฟฟ้า - ปี ค.ศ. 2015 ถึง ค.ศ. 2040	LEAP model	สถานการณ์ DSM มีต้นทุนต่ำและให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจที่สูงสุด ขณะที่ Energy Mix และ Integration แม้รองรับความต้องการไฟฟ้าได้ทั้งหมด แต่มีต้นทุนสูงกว่า โดยเฉพาะจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ความต้องการไฟฟ้าในปี ค.ศ. 2040 จะเพิ่มขึ้นกว่า 3 เท่า

ตาราง 4 สรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับต่างประเทศ (ต่อ)

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	ขอบเขตของการศึกษา	วิธีการดำเนินการวิจัย	ผลการศึกษาโดยสรุป
U. Shah et al. (2024) [55]	เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการหยุดการเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินในอินโดนีเซีย ผ่านการจำลองสถานการณ์ด้านพลังงานไฟฟ้าในระยะยาว โดยใช้แบบจำลองโปรแกรม LEAP-OSeMOSYS	- ประเทศอินโดนีเซีย - ภาคการผลิตไฟฟ้า - ปี ค.ศ. 2021 ถึง ค.ศ. 2050	LEAP model	BAU ใช้ถ่านหินหลัก (78% ในปี ค.ศ. 2050) และปล่อย CO ₂ สูงสุด, NOCOAL ทำให้สัดส่วนพลังงานหมุนเวียนเพิ่มเป็น 65% และลดการปล่อย CO ₂ ลง 67%, CT ภาครัฐarbonช่วยลด CO ₂ ได้ 14% เท่านั้น และไม่เพียงพอในการทำให้ RE แข่งขันกับถ่านหิน และ CPOl รวมมาตรการทั้งหมด ลด CO ₂ ได้ 42% โดยใช้ต้นทุนไม่สูงเท่า NZE
Handayani et al. (2023) [56]	เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการบรรลุเป้าหมายการเป็นศูนย์ทางคาร์บอน Net Zero Emissions ภายในปี ค.ศ. 2050 โดยการผนวกรวมพลังงานหมุนเวียน 100% เข้ากับระบบผลิตไฟฟ้า	- ประเทศกัมพูชา, ลาว และ เมียนมา - ภาคการผลิตไฟฟ้า - ปี ค.ศ. 2021 ถึง ค.ศ. 2050	LEAP-NEMO model	กัมพูชา ใช้พลังงานร่วมกับโซลาร์และลม GHG เหลือศูนย์ในปี ค.ศ. 2050 ลดลงจาก 18.7 ล้านตัน ลาว พลังน้ำยังคงเป็นหลัก แต่เพิ่มสัดส่วนลมและโซลาร์ GHG ลดลงจาก 21.7 ล้านตัน เหลือศูนย์ในปี 2045 เมียนมา มีการเปลี่ยนผ่านเร็วที่สุดจากถ่านหินไปโซลาร์และลม

ตาราง 4 สรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับต่างประเทศ (ต่อ)

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	ขอบเขตของการศึกษา	วิธีการดำเนินการวิจัย	ผลการศึกษาโดยสรุป
Wang et al. (2023) [57]	เพื่อวิเคราะห์แนวทางการเปลี่ยนผ่านระบบพลังงานไฟฟ้าของมองโกเลียในประเทศจีน ที่มีการใช้ถ่านหินในสัดส่วนสูง ไปสู่ การปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี ค.ศ. 2060	• ประเทศจีน • ภาคการผลิตไฟฟ้า • ปี ค.ศ. 2020 ถึง ค.ศ. 2060	LEAP-NEMO model	ภายใต้สถานการณ์ CAN มองโกเลียจะสามารถลดคาร์บอนได้กว่า 1,200 ล้านตัน และเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนเป็น 100% ภายในปี ค.ศ. 2060 ด้วยต้นทุนต่ำที่สุด โดยพึ่งพาแสงอาทิตย์ ลม และระบบกักเก็บพลังงาน ส่วน NDC ยังใช้ถ่านหินเป็นสำรอง ทำให้ลดคาร์บอนได้ช้าและมีต้นทุนสูง ขณะที่ BAS ปลดปล่อยคาร์บอนมากที่สุดและมีต้นทุน
Kanugrahan et al. (2022) [58]	เพื่อวิเคราะห์เชิงเทคโนโลยี เศรษฐศาสตร์ของการขยายกำลังผลิตไฟฟ้าในอินโดนีเซีย โดยมุ่งหวังให้บรรลุเป้าหมายพลังงานหมุนเวียน 31% ภายในปี ค.ศ. 2050	• ประเทศอินโดนีเซีย • ภาคการผลิตไฟฟ้า • ปี ค.ศ. 2020 ถึง ค.ศ. 2050	LEAP-NEMO model	การศึกษานี้พบว่า BAU มีต้นทุนสูงสุดและยังพึ่งพาถ่านหินเป็นหลัก ส่วน CO ต้นทุนต่ำสุดแต่ความมั่นคงระบบต่ำ NP สมดุลระหว่างพลังงานสะอาดกับฟอสซิล ขณะที่ ZC มีต้นทุนสูงกว่า แต่บรรลุพลังงานหมุนเวียน 100% ในปี ค.ศ. 2050 ซึ่งต้องใช้ Solar PV และเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานเสริม

ตาราง 4 สรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับต่างประเทศ (ต่อ)

ผู้เขียน	วัตถุประสงค์	ขอบเขตของการศึกษา	วิธีการดำเนินการวิจัย	ผลการศึกษาโดยสรุป
Ayuketah et al. (2022) [59]	เพื่อวิเคราะห์เส้นทางการขยายกำลังผลิตไฟฟ้าในประเทศแอมะซอนภายใต้กรอบนโยบายต่าง ๆ โดยใช้อำนาจจำลองแบบ LEAP/NEMO พร้อมประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจสิ่งแวดล้อม	• ประเทศแอมะซอน • ภาคการผลิตไฟฟ้า • ปี ค.ศ. 2016 ถึง ค.ศ. 2045	LEAP-NEMO model	กลยุทธ์ที่คุ้มค่าที่สุดสำหรับแอมะซอนคือการลดความสูญเสียไฟฟ้า (PL2) และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (DEE2) ซึ่งช่วยลดต้นทุนรวมได้มากกว่า 1.1 พันล้านดอลลาร์และลดการปล่อย GHG ได้เกือบ 30% แม้การตั้งเป้าลดคาร์บอน 100% (ET2) จะลด GHG ได้มากที่สุด แต่มีต้นทุนสูงกว่า
Rahmanta et al. (2024) [60]	เพื่อจำลองและวิเคราะห์แนวทางการวางแผนระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อให้ประเทศไทยอินโดนีเซียสามารถบรรลุเป้าหมายของการเป็น Net Zero Emissions (NZE) ภายในปี ค.ศ. 2060 โดยเน้นการใช้พลังงานหมุนเวียนและโรงไฟฟ้านิวเคลียร์	• ประเทศอินโดนีเซีย • ภาคการผลิตไฟฟ้า • ปี ค.ศ. 2020 ถึง ค.ศ. 2060	LEAP-NEMO model	การศึกษานี้มุ่งวางแผนขยายระบบผลิตไฟฟ้าของเกาะสุมาตรา อินโดนีเซีย เพื่อบรรลุเป้าหมาย Net Zero Emissions ภายในปี ค.ศ. 2060 โดยใช้แบบจำลอง LEAP ร่วมกับ NEMO วิเคราะห์ 3 สถานการณ์ คือ Baseline, NZE1 และ NZE2 (นิวเคลียร์ต้นทุนต่ำ) ผลพบว่า ทั้ง NZE1 และ NZE2 สามารถลดการปล่อย CO ₂ เหลือศูนย์ได้ภายในปี ค.ศ. 2058

2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับวิธีสร้างแบบจำลอง

ในส่วนนี้เป็นการสรุปแนวทางต่าง ๆ ที่มีอยู่สำหรับการประเมินผลกระทบด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ภาพรวมของแนวทางการวิเคราะห์ที่ปรากฏในเอกสารอ้างอิง พร้อมทั้งชี้ให้เห็นถึงวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ตามรายละเอียดในตาราง 2.4 และ 2.3 พบว่ามีเครื่องมือและแบบจำลองหลากหลายที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างของเครื่องมือเหล่านี้ ได้แก่ EnergyPLAN, MARKAL, TIMES, MAED, MESSAGE, SIMPACTS, WASP, LEAP รวมถึงเครื่องมือที่พัฒนาต่อยอดอย่าง LEAP-NEMO และ LEAP-OSeMOSYS ดังแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 สรุปการทบทวนวรรณกรรมเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ผู้เขียน	ขอบเขตการศึกษา	วัตถุประสงค์	วิธีการที่ใช้
Raza et al. (2025) [61]	อินโดนีเซีย	เพื่อวางแผนขยายกำลังผลิตไฟฟ้าในอินโดนีเซียโดยเน้นใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพในสัดส่วนสูง เพื่อลดการปล่อย GHG และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจภายใต้นโยบายสิ่งแวดล้อม	LEAP- model
Wijayanto et al. (2025) [62]	อินโดนีเซีย	เพื่อวางแผนการผลิตไฟฟ้าระยะยาวของอินโดนีเซียภายใต้ปีเป้าหมาย 2050 โดยเปรียบเทียบสถานการณ์การใช้งาน ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานเสริม เพื่อสนับสนุนการลดคาร์บอนในระบบพลังงานและส่งเสริมการพึ่งพาพลังงานสะอาด	LEAP- model

ตาราง 5 สรุปการทบทวนวรรณกรรมเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

ผู้เขียน	ขอบเขตการศึกษา	วัตถุประสงค์	วิธีการที่ใช้
Shen et al. (2025) [63]	จีน	เพื่อสร้างแบบจำลองการเพิ่มประสิทธิภาพแบบหลากหลายวัตถุประสงค์ Multi-objective Optimization โดยใช้แบบจำลอง Markal-Macro ร่วมกับอัลกอริธึม Firefly เพื่อหาเส้นทางที่เหมาะสมในการบรรลุจุดสูงสุดของการปล่อยคาร์บอน ในประเทศจีน	Markal model
Obiora et al.(2024) [64]	สหรัฐอเมริกา, จีน, ญี่ปุ่น, เยอรมนี, อินเดีย	เพื่อประเมินความเป็นไปได้และผลกระทบของการบรรลุเป้าหมายการใช้พลังงานหมุนเวียนและพลังงานนิวเคลียร์ 100% ภายในปี ค.ศ. 2030 และ 2050 ในประเทศเหล่านี้	EnergyPLAN model
Victor et al.(2024) [65]	สหรัฐอเมริกา	เพื่อศึกษาและวิเคราะห์บทบาทของไฮโดรเจนในระบบพลังงานของสหรัฐฯ โดยมุ่งเน้นที่ระดับการผลิตและความต้องการไฮโดรเจนในปัจจุบัน	Markal model
Shah et al.(2024) [55]	อินโดนีเซีย	เพื่อวิเคราะห์แนวทางการวางแผนระบบไฟฟ้าระยะยาวของประเทศอินโดนีเซียที่ขับเคลื่อนด้วยนโยบาย โดยการจัดทำฉากทัศน์ต่าง ๆ	LEAP-OSeMOSYS model

ตาราง 5 สรุปการทบทวนวรรณกรรมเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

ผู้เขียน	ขอบเขตการศึกษา	วัตถุประสงค์	วิธีการที่ใช้
Manirambona et al.(2024) [66]	เคนยา	เพื่อศึกษานโยบายด้านความต้องการพลังงานที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการในประเทศเคนยา ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและยกระดับประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระยะยาว	LEAP model
Xu et al.(2024) [67]	เขตอ่าวกวางตุ้ง-ฮ่องกง-มาเก๊า หรือ เขตอ่าวใหญ่ กวางตุ้ง-ฮ่องกง-มาเก๊า	เพื่อศึกษาแนวทางการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานไฟฟ้าคาร์บอนต่ำในเขตอ่าวใหญ่ กวางตุ้ง-ฮ่องกง-มาเก๊า (GBA) โดยมุ่งเน้นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและส่งเสริมความยั่งยืนด้านพลังงาน	LEAP model
Golfam et al.(2024) [68]	อิหร่าน	เพื่อคาดการณ์ความต้องการใช้พาหะพลังงานในอนาคตจนถึงปี พ.ศ. 2583 (ค.ศ. 2040) และเพื่อประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในพื้นที่ลุ่มน้ำมารูน ประเทศอิหร่าน	LEAP model
Karunanithi et al.(2024) [69]	ชาวอินเดีย	เพื่อศึกษาวิเคราะห์แผนการขยายกำลังการผลิตไฟฟ้าของภาคพลังงานในรัฐอานธรประเทศ ประเทศอินเดีย ในช่วงปี พ.ศ. 2564 ถึง พ.ศ. 2593	LEAP model

ตาราง 5 สรุปการทบทวนวรรณกรรมเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

ผู้เขียน	ขอบเขตการศึกษา	วัตถุประสงค์	วิธีการที่ใช้
Li et al.(2024) [70]	เขตปักกิ่ง-เทียนจิน-เหอเป่ย์ของ ประเทศจีน	เพื่อศึกษาวิเคราะห์ความต้องการพลังงานและปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของภาคอุตสาหกรรมในเขต Jing-Jin-Ji (ปักกิ่ง-เทียนจิน-เหอเป่ย์) ของประเทศจีน	LEAP model
Murugesan et al.(2023) [71]	รัฐนิวเซาท์เวลส์	เพื่อเติมเต็มช่องว่างทางวิชาการในการวางแผนพลังงานเพื่อให้มีการปล่อยคาร์บอนต่ำในรัฐนิวเซาท์เวลส์ โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง Aus-TIMES	TIMES
Karatayev et al.(2023) [72]	สาธารณรัฐโลวัก	เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานชีวมวลในระดับต่าง ๆ ที่มีต่อความมั่นคงและโครงสร้างของระบบการจัดการพลังงาน	EnergyPLAN model
Li et al.(2023) [73]	จีน	เพื่อพัฒนาแผนการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานในมณฑลกว่างซี โดยมีเป้าหมายในการเพิ่มสัดส่วนของพลังงานที่ไม่ใช่เชื้อเพลิงฟอสซิลภายในปี 2050 ภายใต้เงื่อนไขของการดำเนินงานระบบไฟฟ้าที่มั่นคง	EnergyPLAN

ตาราง 5 สรุปการทบทวนวรรณกรรมเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

ผู้เขียน	ขอบเขตการศึกษา	วัตถุประสงค์	วิธีการที่ใช้
Battulga et al.(2023) [74]	ประเทศมองโกเลีย กรุงอูลานบาตอร์	เพื่อวิเคราะห์ศักยภาพของเมืองที่พึ่งพาถ่านหินในการเปลี่ยนผ่านไปสู่เมืองคาร์บอนต่ำ ด้วยความต้องการพลังงานต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้	MAED model
Kanté et al.(2023) [75]	ประเทศมาลี พื้นที่ เตาซา	เพื่อวิเคราะห์และกำหนดดุลยภาพระหว่างความต้องการไฟฟ้าและฉกัทัศน์ของโครงสร้างการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมและยั่งยืน	MESSAGE model
Nyasapoh et al.(2022) [76]	กานา	เพื่อศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างของระบบการผลิตไฟฟ้า และประเมินผลกระทบของทางเลือกด้านเชื้อเพลิงต่าง ๆ	MESSAGE model
Ugwoke et al.(2021) [77]	ไนจีเรีย	เพื่อศึกษาความสอดคล้องและการทำงานร่วมกันระหว่างการวางแผนชุมชนและยุทธศาสตร์การวางแผนด้านพลังงาน เพื่อส่งเสริมการพัฒนาที่ยั่งยืน และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น	LEAP model
Nourianfar et al.(2021) [78]	อิหร่าน	เพื่อพัฒนาแนวทางการแก้ไขปัญหาด้านการดำเนินงานของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะในประเด็นของการส่งจ่ายพลังงานและความร้อนร่วมที่คำนึงถึงต้นทุนและการปล่อยมลพิษ (CHPEED)	MAED model

ตาราง 5 สรุปการทบทวนวรรณกรรมเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

ผู้เขียน	ขอบเขตการศึกษา	วัตถุประสงค์	วิธีการที่ใช้
Abdel-Hameed et al.(2021) [79]	อียิปต์	เพื่อกำหนดแนวทางเชิงกลยุทธ์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในอนาคตจากเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าหลายประเภท โดยพิจารณาตามหลักการสำคัญ 3 ประการที่กำหนดไว้	SIMPACTS model
Kim et al.(2021) [80]	ไนจีเรีย	เพื่อเสนอทางเลือกของส่วนผสมในการจัดหาพลังงานไฟฟ้าในอนาคตที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไนจีเรีย โดยมีเป้าหมายเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	SIMPACTS model
Vincent et al.(2021) [81]	เกาหลีใต้	เพื่อส่งเสริมการวิเคราะห์เชิงวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับผลกระทบในวงกว้าง Ripple Effects ที่เกิดจากการดำเนินนโยบาย	WASP model
Kamdar et al.(2021) [82]	ไทย	เพื่อวิเคราะห์และประเมินความเหมาะสมของพื้นที่ในการพัฒนาโครงการฟาร์มกังหันลมขนาดเล็กในภูมิภาคตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศไทย โดยอาศัยปัจจัยด้านภูมิประเทศ ลม ความใกล้โครงข่ายไฟฟ้า และข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อม	WASP Tool

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทที่ 2 ได้ทำการทบทวนนโยบายและแผนพลังงานของประเทศไทย โดยทำการทบทวนนโยบายพลังงานทั้งในอดีตและนโยบายปัจจุบัน ทำให้เห็นถึงแนวโน้มการใช้พลังงานของประเทศไทย รวมถึงความเป็นไปได้ในอนาคต และยังสะท้อนให้เห็นถึงสถานการณ์ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยในปัจจุบัน จากการทบทวนนโยบายและแผนพลังงานพบว่าปัจจุบันประเทศไทยมีนโยบายการเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนในระบบผลิตไฟฟ้าสูงขึ้นมากหากเทียบกับแผนพลังงานในอดีต เนื่องจากปัญหาด้านความมั่นคงทางพลังงาน และปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยพลังงานหมุนเวียนที่มีสัดส่วนสูงที่สุดคือ พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งในบทที่ 2 ได้มีการทบทวนวรรณกรรมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย และต่างประเทศ เพื่อทราบถึงผลการวิจัยรวมถึงการใช้เครื่องมือสำหรับการสร้างแบบจำลองพลังงาน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น

ดังนั้นในบทนี้ จึงได้ทำการรวบรวมเครื่องมือสำหรับการสร้างแบบจำลองพลังงานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียน มุ่งเน้นการวิเคราะห์ไปที่พลังงานแสงอาทิตย์ โดยหัวข้อที่ 3.1 เป็นการรวบรวมเครื่องมือที่ใช้ในสร้างแบบจำลองพลังงานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุระเบียบวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวิจัยครั้งนี้ หัวข้อที่ 3.2 เป็นการนำเสนอหลักการและข้อมูลของโปรแกรมที่งานวิจัยนี้นำมาใช้ในการดำเนินการวิจัย นอกจากนี้ กรอบวิธีการวิจัยของงานวิจัยได้มีการนำเสนอในหัวข้อที่ 3.3 และหัวข้อที่ 3.4 เป็นการพัฒนาสถานการณ์จำลองต่าง ๆ โดยระบุสมมติฐานของสถานการณ์จำลอง ที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยอ้างอิงจากนโยบายและแผนพลังงานของประเทศไทยในปัจจุบัน

3.1 เครื่องมือวิเคราะห์เพื่อประเมินผลกระทบด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่ามีระเบียบวิธีหลากหลายรูปแบบที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม โดยแต่ละระเบียบวิธีมีแนวคิดพื้นฐาน ขอบเขตการใช้งาน จุดเด่น และข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการศึกษาในแต่ละบริบท ทั้งในด้านการวางแผนพลังงานระยะยาว การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การพัฒนาแบบจำลองระบบพลังงาน หรือการวิเคราะห์นโยบายพลังงาน เพื่อให้เกิดความเข้าใจอย่างเป็นระบบและสามารถเลือกใช้ระเบียบวิธีได้อย่างเหมาะสม งานวิจัยนี้จึงนำเสนอรายละเอียดของระเบียบวิธีแต่ละประเภท ดังต่อไปนี้

ก) MARKAL

MARKAL เป็นแบบจำลองเชิงเทคโนโลยีสำหรับการวางแผนพลังงานระยะยาวที่พัฒนาโดยความร่วมมือภายใต้โครงการ (Energy Technology Systems Analysis Program: ETSAP) ของสำนักงานพลังงานสากล (International Energy Agency: IEA) ซึ่งเริ่มต้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1978 [83] จุดเด่นของ MARKAL คือสามารถใช้วิเคราะห์ทางเลือกเชิงนโยบายในระบบพลังงานโดยคำนึงถึงต้นทุน ความต้องการ และข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อมในอนาคต แบบจำลองใช้วิธีการปรับเชิงเส้น (Linear Programming) เพื่อคำนวณหาทางเลือกของเทคโนโลยีและเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุดในระบบพลังงาน โดยมีเป้าหมายในการหาทางเลือกที่มีต้นทุนต่ำที่สุดในช่วงเวลาระยะกลางถึงระยะยาว ครอบคลุมห่วงโซ่พลังงานทั้งหมดตั้งแต่การผลิต การแปรรูป การขนส่ง ไปจนถึงการใช้งานปลายทาง ต่อมา MARKAL ได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมจนกลายเป็นแบบจำลอง (The Integrated MARKAL-EFOM System: TIMES) ซึ่งรวมเอาแนวทางทั้งด้าน วิศวกรรม และ เศรษฐศาสตร์ เข้าด้วยกัน เพื่อให้การวิเคราะห์ระบบพลังงานมีความละเอียดและยืดหยุ่นมากขึ้น โดย TIMES ใช้ในการสำรวจอนาคตของระบบพลังงานที่เป็นไปได้ [84] ภายใต้สถานการณ์และข้อจำกัดต่าง ๆ โครงสร้างของแบบจำลอง TIMES มีโครงสร้างพื้นฐานที่ครอบคลุมองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่

- เทคโนโลยี (Technology/Process) คือกระบวนการหรืออุปกรณ์ทางกายภาพที่เปลี่ยนสินค้าโภคภัณฑ์ (Commodities) หนึ่งไปเป็นอีกหนึ่ง เช่น โรงไฟฟ้า โรงกลั่น ระบบขนส่ง หรือเครื่องใช้ไฟฟ้า
- สินค้าโภคภัณฑ์ (Commodities) ได้แก่ พลังงาน วัสดุ บริการด้านพลังงาน เงิน และการปล่อยมลพิษ ซึ่งจะเป็นสิ่งที่ ผลิต หรือ บริโภค โดยเทคโนโลยี
- การไหลเวียนของสินค้า (Commodity Flows) คือการเชื่อมโยงระหว่างเทคโนโลยีกับสินค้า เช่น การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม เทคโนโลยีจะผลิตสินค้า และสินค้านั้นจะไหลไปยังผู้บริโภคปลายทาง [85]

ในปัจจุบัน เครื่องมือในตระกูล MARKAL/TIMES ถูกใช้งานแล้วในกว่า 70 ประเทศทั่วโลก โดยมีสถาบันที่เกี่ยวข้องประมาณ 250 แห่ง และในจำนวนนั้นมีผู้ใช้งานจริงประมาณ 75% ซอร์สโค้ดของโปรแกรมสามารถขอรับได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย แต่ผู้ใช้งานจะต้องลงนามใน หนังสือข้อตกลง (Letter of Agreement) ก่อนจึงจะสามารถเข้าถึงโค้ดได้ ทั้งนี้ โค้ดของโปรแกรมถูกเขียนด้วย ภาษา GAMS ซึ่งเป็นภาษาสำหรับการเขียนโปรแกรมเชิงพาณิชย์ และผู้ใช้งานต้องซื้อใบอนุญาตการใช้งานเพิ่มเติม [86]

ข) MESSAGE

MESSAGE ย่อมาจาก Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact เป็นแบบจำลองทางเลือกกลยุทธ์การจัดหาพลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไป เป็นแบบจำลองการวางแผนระบบพลังงานระยะยาวที่พัฒนาโดย (International Institute for Applied Systems Analysis: IIASA) โดยดูและระหว่าง (International Atomic Energy Agency: IAEA) ตั้งแต่ช่วงทศวรรษ 1980 โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์กลยุทธ์ด้านพลังงานที่มีประสิทธิภาพเชิงต้นทุน และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับประเทศและโลก [87, 88] โครงสร้างและกลไกการทำงานแบบจำลอง MESSAGE ใช้การวิเคราะห์แบบ Bottom-up โดยรวมข้อมูลด้านเทคโนโลยี ต้นทุน พฤติกรรมผู้ใช้พลังงาน และนโยบายมาประกอบการตัดสินใจ โครงสร้างระบบพลังงานในแบบจำลองประกอบด้วย

- เทคโนโลยี แทนอุปกรณ์/กระบวนการ เช่น โรงไฟฟ้า โรงกลั่น ระบบขนส่ง
- สินค้าโภคภัณฑ์ เช่น พลังงาน ไฟฟ้า ความร้อน เชื้อเพลิง และมลพิษ
- การไหลของสินค้า แสดงเส้นทางพลังงานจากแหล่งผลิตถึงผู้ใช้

แบบจำลองทำงานเป็นช่วงเวลา (Time Step) ทุก 5-10 ปี ยาวนานถึง 120 ปี โดยประเมินเส้นทางการลงทุน การเลือกเทคโนโลยี และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจในแต่ละช่วงเวลา นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมโยงกับแบบจำลองอื่น ในการวิเคราะห์สถานการณ์พลังงาน-สิ่งแวดล้อม เช่น [89]

- SG – กำหนดสมมติฐานด้านประชากรและเศรษฐกิจ
- MACRO – วิเคราะห์ความสัมพันธ์พลังงาน-เศรษฐกิจระดับมหภาค
- MAGICC – คำนวณผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ
- GLOBIOM / GAINS – ประเมินผลกระทบด้านการใช้ที่ดิน สุขภาพ และการปล่อยมลพิษ

MESSAGE สามารถจำลองเทคโนโลยีด้านการผลิตพลังงานความร้อน พลังงานหมุนเวียน ระบบกักเก็บและแปลงพลังงาน เทคโนโลยีด้านการขนส่ง [89] ตลอดจนต้นทุนต่าง ๆ รวมถึงต้นทุนของการปล่อยมลพิษ เช่น SO_2 NO_x และการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (carbon sequestration) โดยผลลัพธ์หลักของแบบจำลองนี้คือการประเมินกลยุทธ์การลดก๊าซเรือนกระจกรายภาคส่วนในระดับโลก และระดับภูมิภาคที่มีประสิทธิภาพเชิงต้นทุน มากกว่าการตั้งเป้าหมายการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเจาะจง ในช่วงหลัง MESSAGE ได้รับการขยายขอบเขตให้ครอบคลุมก๊าซเรือนกระจกทุกชนิด รวมถึงสารก่อภาวะเรือนกระจกอื่น ๆ ที่มีผลต่อการแผ่รังสี (radiative substances)

ค) MAED

MAED ย่อมาจาก Model for Analysis of Energy Demand เป็นแบบจำลองการวิเคราะห์ความต้องการพลังงาน แบบจำลองพัฒนาโดย (International Atomic Energy Agency: IAEA) เพื่อใช้ในการประเมินความต้องการใช้พลังงานของประเทศหรือภูมิภาคในอนาคต ภายใต้สมมติฐานด้านประชากร เศรษฐกิจ สังคม และเทคโนโลยี โดย MAED ได้รับการพัฒนาต่อยอดและปรับปรุงจากแบบจำลอง MEDEE โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อให้เหมาะสมกับประเทศกำลังพัฒนา โดยแบบจำลองตัวแรกที่พัฒนาคือ (Wien Automatic System Planning package: WASP) ซึ่งเน้นหานโยบายขยายกำลังผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ภายใต้ข้อจำกัดที่ผู้กำหนด [90]

กลไกการทำงานแบบจำลอง MAED ประเมินความต้องการพลังงานโดยอาศัยวิธีการ Bottom-up ซึ่งประกอบด้วย

- กำหนดกิจกรรมทางเศรษฐกิจและโครงสร้างประชากร เช่น จำนวนครัวเรือน รายได้เฉลี่ยต่อหัว การผลิตภาคอุตสาหกรรม
- คำนวณการใช้พลังงานของแต่ละกิจกรรม โดยอิงจากสมมติฐานด้านเทคโนโลยีและประสิทธิภาพของอุปกรณ์
- รวมความต้องการพลังงานของทุกภาคส่วน เพื่อประมาณค่าความต้องการพลังงานในอนาคตของประเทศหรือภูมิภาค

แบบจำลองสามารถทำงานในช่วงเวลา Time step เช่น ทุก 5 ปี และวางแผนในระยะยาว 20–30 ปีหรือมากกว่านั้นได้ โครงสร้างเดิมของ MAED มีข้อจำกัดในด้านการแยกภาคเศรษฐกิจและการใช้พลังงานปลายทาง โดยภาคเศรษฐกิจหลัก 6 ภาค ได้แก่ เกษตรกรรม ก่อสร้าง เมืองแร่ อุตสาหกรรม บริการ และพลังงาน มีการคำนวณความต้องการพลังงานในระดับรวม ซึ่งไม่สะท้อนลักษณะเฉพาะของประเทศกำลังพัฒนา เช่น ภาคเกษตรที่มีหลากหลายกิจกรรม (เพาะปลูก ปศุสัตว์ ประมง ป่าไม้) หรือความแตกต่างระหว่างครัวเรือนในแต่ละภูมิภาค

เวอร์ชันใหม่ของ MAED จึงได้รับการพัฒนาให้มีโครงสร้างที่ยืดหยุ่นมากขึ้น โดยเปิดโอกาสให้ผู้ใช้สามารถ กำหนดตอนภาคย่อยได้สูงสุด 10 หน่วยย่อยในแต่ละภาคเศรษฐกิจ กำหนดรูปแบบการขนส่งได้สูงสุด 15 รูปแบบ ทั้งระหว่างเมืองและภายในเมือง ระบุเชื้อเพลิงได้สูงสุด 8 ประเภทสำหรับแต่ละรูปแบบการขนส่ง กำหนดประเภทที่อยู่อาศัยได้สูงสุด 10 ประเภทในแต่ละกลุ่มครัวเรือน (ชนบท/เมือง) โดยโมเดลรุ่นแรกของ MAED ใช้งานในระบบ DOS และถูกแจกจ่ายไปมากกว่า 40 ประเทศ ต่อมาได้พัฒนาเป็นเวอร์ชัน Excel ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงและเข้าใจโครงสร้างของแบบจำลองได้ง่ายขึ้น [91]

ง) SIMPACTS

SIMPACTS ย่อมาจาก Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่พัฒนาโดย (International Atomic Energy Agency: IAEA) เพื่อประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจจากการผลิตไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งเชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานหมุนเวียน และพลังงานนิวเคลียร์ กลไกการทำงานและองค์ประกอบหลัก SIMPACTS ประกอบด้วยชุดโมดูลย่อยซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลกระทบแต่ละด้านได้ เช่น

- AIRPACT ประเมินผลกระทบจากมลพิษทางอากาศ เช่น SO_2 NO_x PM_{10} ต่อสุขภาพของมนุษย์ พืชผล และวัสดุ
- RISKPAC ประเมินความเสี่ยงและผลกระทบจากอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์หรือเชื้อเพลิงฟอสซิล
- NUCLEAR ACCIDENT MODULE วิเคราะห์ต้นทุนภายนอกจากอุบัติเหตุนิวเคลียร์ร้ายแรง เช่น การรั่วไหลของกัมมันตภาพรังสี
- GREENHOUSE GAS MODULE คำนวณผลกระทบจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยแปลงเป็นต้นทุนทางสังคมหรือมูลค่าทางเศรษฐกิจของความเสียหายต่อสภาพภูมิอากาศ
- ECONIMP ประเมินต้นทุนเศรษฐกิจของผลกระทบเหล่านั้น [92]

ข้อมูลที่ใช้ประกอบการประเมินได้แก่ ปริมาณการปล่อยมลพิษ ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ สภาพภูมิอากาศ ความหนาแน่นของประชากร และค่าสัมประสิทธิ์ด้านสุขภาพ เพื่อวิเคราะห์ ความเสียหายต่อสุขภาพประชาชน ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ ต้นทุนภายนอกของแต่ละเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้า การใช้งาน SIMPACTS ถูกนำไปใช้ในหลายประเทศ โดยเฉพาะในบริบทของประเทศกำลังพัฒนา เพื่อสนับสนุน การเปรียบเทียบต้นทุนจริงของเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้า (รวมต้นทุนภายนอก) การจัดลำดับความสำคัญของการลงทุนในเทคโนโลยีสะอาด การพัฒนาแผนยุทธศาสตร์พลังงานที่คำนึงถึงผลกระทบสิ่งแวดล้อม

ผลลัพธ์จาก SIMPACTS สามารถใช้ในรูปแบบของ ต้นทุนภายนอกต่อหน่วยพลังงาน (เช่น ดอลลาร์/กิโลวัตต์-ชั่วโมง) ข้อมูลเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างแหล่งผลิตไฟฟ้า เช่น พลังงานถ่านหินกับพลังงานลม ข้อมูลประกอบการตัดสินใจเชิงนโยบายเกี่ยวกับพลังงานที่สะอาดและยั่งยืน เครื่องมือนี้มีประโยชน์อย่างยิ่งในการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างการผลิตไฟฟ้าจากฟอสซิล พลังงานนิวเคลียร์ และพลังงานหมุนเวียน รวมถึงการเลือกสถานที่ตั้งของโรงไฟฟ้าแห่งใหม่ หรือการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจของนโยบายลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม จุดแข็งที่สำคัญของ SIMPACTS คือความสามารถในการให้ผลลัพธ์ที่เป็นประโยชน์แม้มีข้อมูลจำกัด [92]

จ) WASP

WASP ย่อมาจาก Wien Automatic System Planning Package เป็นแบบจำลองที่พัฒนาโดย (International Atomic Energy Agency: IAEA) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยวางแผนการขยายกำลังผลิตไฟฟ้าในระยะยาว โดยคำนึงถึงต้นทุนรวมของระบบไฟฟ้า ภายใต้ข้อจำกัดด้านเทคนิค เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม [92] แบบจำลอง WASP ได้รับการพัฒนาโดย (Tennessee Valley Authority: TVA) และ (Oak Ridge National Laboratory: ORNL) ของสหรัฐอเมริกา และถูกนำไปปรับปรุงโดย IAEA เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในประเทศกำลังพัฒนา ปัจจุบัน WASP ได้รับความนิยมในระดับสากล ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวางแผนระบบผลิตไฟฟ้าระยะยาว โดยมีโครงสร้างแบบจำลองของ WASP แบ่งการทำงานออกเป็น 6 โมดูลหลัก ได้แก่

- Demand Forecasting รับข้อมูลคาดการณ์ความต้องการไฟฟ้า
- Candidate Plants กำหนดรายการเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าที่เป็นไปได้ในอนาคต
- System Simulation จำลองการดำเนินงานของระบบไฟฟ้าในแต่ละปี
- Costing Module ประเมินต้นทุนรวมของระบบ
- Reliability Check ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของระบบที่จำลอง
- Optimization เลือกชุดแผนการลงทุนที่มีต้นทุนรวมต่ำที่สุดภายใต้ข้อจำกัด

การเชื่อมโยงกับแบบจำลองอื่น WASP สามารถเชื่อมโยงกับแบบจำลองอื่นของ IAEA เช่น

- MAED ใช้คาดการณ์ความต้องการพลังงานขั้นสุดท้าย
- SIMPACTS ประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพจากการผลิตไฟฟ้า
- MESSAGE พัฒนาแผนพลังงานระดับนโยบาย

การพัฒนาและเวอร์ชัน WASP มีการปรับปรุงและพัฒนาให้ใช้งานได้หลายเวอร์ชัน เช่น WASP-II, WASP-III, WASP-III Plus และ WASP-IV โดยในแต่ละเวอร์ชันมีการปรับปรุงด้านการคำนวณ ความยืดหยุ่นในการใช้งาน และการตอบสนองต่อข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงานที่ซับซ้อนมากขึ้น WASP-IV เป็นเวอร์ชันที่รองรับเทคโนโลยีที่ทันสมัยเพื่อให้สามารถจำลองโมเดลการใช้พลังงานในรูปแบบใหม่ เช่น ระบบกักเก็บพลังงาน การบำรุงรักษาโรงไฟฟ้า และการคำนวณการปล่อยมลพิษ WASP ยังถือว่าเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยในการวางแผนระบบไฟฟ้าแบบองค์รวม โดยเฉพาะในบริบทของประเทศกำลังพัฒนา ผู้ใช้งานสามารถกำหนดข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อม นโยบายเชื้อเพลิง และเทคโนโลยี เพื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการลงทุนผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในระยะยาว โดยสามารถเชื่อมโยงกับแบบจำลองอื่นของ IAEA เพื่อการประเมินเชิงบูรณาการที่ครอบคลุมด้านพลังงาน เศรษฐกิจ [93]

ฉ) EnergyPLAN

EnergyPLAN เป็นแบบจำลองระบบพลังงานที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัย Aalborg ประเทศเดนมาร์ก มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยในการออกแบบยุทธศาสตร์ด้านพลังงานในระดับประเทศหรือภูมิภาค โดยเน้นการจำลอง Simulation-based model แทนการเพิ่มประสิทธิภาพ Optimization-based model เพื่อศึกษาผลกระทบของทางเลือกต่าง ๆ ภายใต้เงื่อนไขและสถานการณ์จำลองที่ผู้ใช้กำหนด โดยมีลักษณะเด่นของ EnergyPLAN ได้แก่

- การวิเคราะห์แบบรายชั่วโมง (Hourly Resolution) จำลองการทำงานของระบบตลอดทั้งปี (8760 ชั่วโมง) เพื่อประเมินผลกระทบจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ผันแปร เช่น พลังงานลมและแสงอาทิตย์ ได้อย่างแม่นยำ
- ระบบแบบบูรณาการ: รองรับการวิเคราะห์ทั้งระบบพลังงาน ไม่ว่าจะเป็นไฟฟ้า ความร้อน การขนส่ง และอุตสาหกรรม ภายในเฟรมเวิร์กเดียว
- ความสามารถในการจัดการพลังงานส่วนเกินและการส่งออกไฟฟ้า พิจารณาการจำกัดเก็บพลังงาน การลดการผลิต (curtailment) และการค้าพลังงานระหว่างประเทศ
- ความง่ายในการใช้งาน ใช้รูปแบบตารางแท็บ (tab sheets) ซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถป้อนข้อมูลและวิเคราะห์ผลได้สะดวก

EnergyPLAN ใช้ข้อมูลนำเข้าที่หลากหลาย เช่น ความต้องการใช้พลังงาน กำลังการผลิต แหล่งพลังงานหมุนเวียน ต้นทุนต่าง ๆ และนโยบายพลังงาน เพื่อประเมินผลด้าน สมดุลพลังงานและศักยภาพในการตอบสนองความต้องการ ต้นทุนรวมของระบบพลังงาน (รวมค่าลงทุน ค่าดำเนินการ และรายได้จากการค้าพลังงาน) การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ผลกระทบเชิงระบบจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน EnergyPLAN จะไม่ใช่แบบจำลองที่เน้นการหา ค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ Optimization แต่สามารถใช้เพื่อเปรียบเทียบทางเลือกหลาย ๆ แบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวางแผนสำหรับระบบพลังงานหมุนเวียนเต็มรูปแบบ (100% Renewable Energy Systems)

ในปี ค.ศ. 2024 EnergyPLAN มีผู้ใช้งานมากกว่า 1,200 คนในกว่า 80 ประเทศ และมีการอ้างอิงในวรรณกรรมทางวิชาการมากกว่า 500 เรื่อง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการยอมรับในวงวิชาการอย่างแพร่หลาย ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมประกอบด้วย สมดุลพลังงาน ผลการผลิตประจำปี การใช้เชื้อเพลิง การนำเข้า/ส่งออกไฟฟ้า และต้นทุนรวม (รวมถึงรายได้จากการซื้อขายไฟฟ้า) โปรแกรมนี้หลีกเลี่ยงกระบวนการคำนวณที่ใช้เวลานาน โดยสามารถประมวลผลข้อมูลรายปีได้ภายในไม่กี่วินาทีบนคอมพิวเตอร์ทั่วไป [94]

ข) LEAP

LEAP ย่อมาจาก Low Emissions Analysis Platform เดิมใช้ชื่อว่า Long-range Energy Alternatives Planning System เป็นแบบจำลองการวางแผนพลังงานและวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่พัฒนาโดยสถาบันสิ่งแวดล้อมแห่งสต็อกโฮล์ม (Stockholm Environment Institute: SEI) โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อสนับสนุนการวางแผนนโยบายพลังงานและสิ่งแวดล้อมในระดับประเทศและภูมิภาค รวมถึงการประเมินผลกระทบของมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG mitigation options) LEAP ได้รับการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ในประเทศกำลังพัฒนา โดยมีความยืดหยุ่นสูงในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างระบบพลังงาน ทั้งฝั่งอุปสงค์และอุปทาน ตลอดจนสามารถผนวกกับข้อมูลทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมเพื่อการวิเคราะห์เชิงบูรณาการ โดยแบบจำลองจะคำนวณการใช้พลังงาน การปล่อยก๊าซเรือนกระจก และต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ที่เกี่ยวข้องในช่วงเวลาระยะยาว (Long-term planning horizon) [95]

ระบบนี้รองรับการวิเคราะห์ทั้งแบบ Bottom-up และ Top-down และสามารถจัดการข้อมูลแบบปีต่อปี (Year-by-year accounting) ตลอดจนการเปรียบเทียบหลายสถานการณ์ (Scenario analysis) เพื่อให้ผู้วางนโยบายสามารถตัดสินใจได้อย่างรอบด้าน โดยในปัจจุบัน LEAP เป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ในกระบวนการรายงานและติดตามการดำเนินการด้านการลดก๊าซเรือนกระจก (MRV)

คุณสมบัติหลักของ LEAP รองรับการวิเคราะห์ระบบพลังงานทั้งระบบ ตั้งแต่ต้นทาง (Upstream) เช่น การผลิตเชื้อเพลิง การนำเข้า และการแปรรูป จนถึงปลายทาง (end-use) เช่น การบริโภคพลังงานของภาคครัวเรือน อุตสาหกรรม ขนส่ง ฯลฯ เชื่อมโยงกับแบบจำลองการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) ตามแนวทางของ IPCC ได้อย่างสมบูรณ์ เหมาะสำหรับการวางแผนนโยบาย Climate Change และการพัฒนาที่ยั่งยืน สามารถวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ ทั้งในเชิงต้นทุนพลังงาน ต้นทุนทางสังคม และต้นทุนสิ่งแวดล้อม ใช้งานผ่าน GUI (Graphic User Interface) เหมาะกับทั้งนักวิจัยและนักนโยบาย แม้ไม่มีพื้นฐานด้านการเขียนโปรแกรม [96]

รูปแบบการทำงาน LEAP เป็นแบบจำลองแบบ Accounting-based ซึ่งมุ่งเน้นการติดตามความต้องการพลังงานและการจัดหา โดยผู้ใช้สามารถกำหนดสมมติฐานของแต่ละสถานการณ์ เช่น อัตราการเติบโตของประชากร เศรษฐกิจ ประสิทธิภาพพลังงาน เทคโนโลยี และนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม โดย LEAP แบ่งการจำลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก

- Demand Module ระบุโครงสร้างภาคการใช้พลังงาน เช่น ภาคครัวเรือน ภาคอุตสาหกรรม ภาคขนส่ง ประเมินกิจกรรมการใช้พลังงาน (Activity Level) และค่า Intensity ของเทคโนโลยีที่ใช้

- Transformation Module กำหนดรูปแบบของโครงสร้างการผลิตและแปลงพลังงาน เช่น การผลิตไฟฟ้า การกลั่นน้ำมัน การผลิตก๊าซ สามารถระบุเทคโนโลยี โรงไฟฟ้า ความสามารถในการจัดเก็บ การส่งไฟฟ้า และ Loss ต่าง ๆ ได้
- Environment Module คำนวณการปล่อยมลพิษและ GHG จากกิจกรรมและเทคโนโลยีในระบบ [97]

การใช้งานและการพัฒนาเครื่องมือ LEAP โดยเป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับและใช้งานอย่างแพร่หลายในกว่า 200 ประเทศทั่วโลก โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งมักได้รับการสนับสนุนจากองค์กรระหว่างประเทศ เช่น UNDP, UNEP, ADB รวมถึงหน่วยงานพลังงานระดับภูมิภาคอย่าง (ASEAN Centre for Energy: ACE) และ LEAP ยังได้รับการอ้างอิงในวรรณกรรมวิจัยนับร้อยฉบับ และได้รับการยอมรับจาก IEA และ IPCC ในฐานะเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการประเมินศักยภาพของนโยบายด้านพลังงานและสภาพภูมิอากาศในระยะยาว ด้วยความสามารถในการใช้งานที่โปร่งใสและเป็นมิตรกับผู้ใช้ LEAP จึงกลายเป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ในการวางแผนพลังงาน การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทั้งในระดับเมือง ระดับรัฐ ระดับประเทศ และระดับภูมิภาค

ภายในปี ค.ศ. 2018 LEAP มีผู้ใช้งานกว่า 36,000 ราย ใน 195 ประเทศและเขตเศรษฐกิจ โดยมีการเพิ่มฟีเจอร์สำคัญในเวอร์ชันปี 2018 ได้แก่ เครื่องคำนวณผลกระทบต่อผลประโยชน์ (IBC) เพื่อประเมินผลกระทบด้านสุขภาพ ระบบนิเวศ และสภาพภูมิอากาศจากสถานการณ์จำลอง

ต่อมาในปี ค.ศ. 2020 LEAP ได้พัฒนาเป็นเวอร์ชัน 64 บิต เพื่อรองรับการจำลองขนาดใหญ่ พร้อมปรับปรุงความสามารถในการใช้งานและการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย โดยเวอร์ชันปี 2020 มีจุดเด่นเพิ่มเติม เช่น กรอบการทำงาน NEMO สำหรับการสร้างแบบจำลองการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization Modeling)

และปัจจุบันภายใน ค.ศ. 2024 จำนวนผู้ใช้งาน LEAP เพิ่มขึ้นเป็นกว่า 67,000 ราย ใน 207 ประเทศและเศรษฐกิจทั่วโลก และในเว็บไซต์หลักของ LEAP ซึ่งมีสมาชิกมากกว่า 71,000 รายทั่วโลก โดย LEAP กำลังกลายเป็น มาตรฐานโดยพฤตินัย สำหรับประเทศที่ต้องการวางแผนพลังงานแบบบูรณาการและประเมินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งอย่างน้อย 60 ประเทศ ได้นำ LEAP ไปใช้ในการจัดทำ Nationally Determined Contributions (NDCs) ที่เสนอให้กับ UNFCCC [98]

ดังนั้น เพื่อให้เห็นภาพรวมของเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ระบบพลังงาน ทั้งในด้านการใช้พลังงาน ความต้องการพลังงาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้จัดทำตารางสรุปเครื่องมือวิเคราะห์ที่สำคัญ ซึ่งแสดงไว้ในตาราง 6

ตาราง 6 สรุปเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับประเมินผลกระทบด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

เครื่องมือ	หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง	การเข้าถึง	จำนวนผู้ใช้งาน	พื้นที่การใช้งาน	ช่วงเวลาทดลอง
MARKAL	Energy Technology Systems Analysis Program, International Energy Agency (IEA) (www.etsap.org)	เชิงพาณิชย์	100-1000	ระดับประเทศ / รัฐ / ภูมิภาค	สูงสุด 50 ปี
MESSAGE	International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) (www.eiasa.ac.at)	ฟรี / ต้องซื้อซอฟต์แวร์จำลอง	100-1000	ระดับสากล	มากกว่า 50 ปี
WASP	International Atomic Energy Agency (IAEA) (www.iaea.org)	เชิงพาณิชย์ / ให้ใช้ฟรีแก่ประเทศสมาชิก ของ IAEA	100-1000	ระดับประเทศ / รัฐ / ภูมิภาค	สูงสุด 50 ปี
Energy PLAN	Aalborg University (www.energyplan.eu)	ดาวน์โหลดได้ฟรี	100-1000	ระดับประเทศ / รัฐ / ภูมิภาค	ภายใน 1 ปี
MAED	International Atomic Energy Agency (IAEA) (www.iaea.org)	เชิงพาณิชย์ / ให้ใช้ฟรีแก่ประเทศสมาชิก ของ IAEA	100-1000	ระดับประเทศ / รัฐ / ภูมิภาค	มากกว่า 30 ปี

ตาราง 6 สรุปเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับประเมินผลกระทบด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม (ต่อ)

เครื่องมือ	หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง	การเข้าถึง	จำนวนผู้ใช้งาน	พื้นที่การใช้งาน	ช่วงเวลาจำลอง
SIMPACTS	International Atomic Energy Agency (IAEA) (www.iaea.org)	เชิงพาณิชย์ / ให้ใช้ฟรีแก่ประเทศสมาชิกของ IAEA	100-1000	ระดับประเทศ / รัฐ / ภูมิภาค	มากกว่า 50 ปี
LEAP	Stockholm Environment Institute (SEI) (https://www.sei.org/)	เชิงพาณิชย์ / ให้ใช้ฟรีสำหรับประเทศกำลังพัฒนาและการใช้งานแบบนักศึกษา	>5000	ระดับประเทศ / รัฐ / ภูมิภาค	ไม่มีจำกัด

ที่มา: [99] และ [100]

3.2 เครื่องมือสำหรับใช้ในงานวิจัย

จากการทบทวนวรรณกรรมและการศึกษาเครื่องมือสำหรับการจำลองแบบจำลองระบบพลังงาน เพื่อวิเคราะห์การเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ให้สอดคล้องกับแผนและนโยบายด้านการอนุรักษ์พลังงานของประเทศไทย พบว่ามีเครื่องมือจำนวนมากที่สามารถใช้ในการจำลองระบบพลังงานได้อย่างครอบคลุมและหลากหลาย อย่างไรก็ตามเครื่องมือบางประเภทมีข้อจำกัดด้านสิทธิการใช้งาน เนื่องจากต้องเสียค่าลิขสิทธิ์หรือมีเงื่อนไขในการเข้าถึงซอฟต์แวร์

ทั้งนี้ จากการทบทวนข้อมูลพบว่าเครื่องมือ LEAP หรือ Low Emissions Analysis Platform ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในวงการวิชาการและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องด้านพลังงาน โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่มีความน่าเชื่อถือ และรองรับการจำลองทั้งด้านความต้องการพลังงาน การผลิต การปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการวิเคราะห์ผลกระทบจากนโยบาย ที่สำคัญ LEAP เปิดให้ใช้งานได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย สำหรับนักศึกษา หน่วยงานรัฐ และองค์กรไม่แสวงหาผลกำไร เพียงลงทะเบียนและขอสิทธิการใช้งานอย่างถูกต้องตามเกณฑ์ของสถาบันผู้พัฒนา จึงนับว่าเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมในการนำมาใช้จำลองระบบพลังงานของประเทศไทยในบริบทของการส่งเสริมพลังงานหมุนเวียน

3.2.1 การสร้างแบบจำลองจาก LEAP

LEAP หรือ Low Emissions Analysis Platform เป็นเครื่องมือสร้างแบบจำลองพลังงานที่ครอบคลุมทั้งด้านการใช้พลังงาน การแปรรูปพลังงาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีความสามารถเด่นในการจำลองนโยบายพลังงาน การปล่อยก๊าซเรือนกระจก และผลกระทบทางเศรษฐกิจ-สังคมในระดับประเทศและระดับภูมิภาค โดย LEAP มีโครงสร้างการทำงานของ Analysis View เป็นหน้าหลักในการสร้างและจัดการแบบจำลองของ LEAP ประกอบด้วยส่วนสำคัญ ดังนี้

1. โครงสร้างแบบต้นไม้ Tree View

เป็นพื้นที่ที่ใช้จัดเรียงข้อมูลโครงสร้างแบบจำลอง ทั้งในด้าน ความต้องการพลังงาน (Demand) และการแปรรูปพลังงาน (Transformation) โดยแบ่งออกเป็นประเภทของกิ่ง (Branch) หลายแบบ ได้แก่

- Category Branch ใช้จัดหมวดหมู่ข้อมูลในลักษณะลำดับชั้น เช่น กลุ่มภาคครัวเรือน อุตสาหกรรม และอื่น ๆ
- Technology Branch ใช้ระบุข้อมูลของเทคโนโลยี เช่น โรงไฟฟ้าชีวมวล ระบบขนส่ง โดยมีข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพเชิงพลังงานและการปล่อย

- Key Assumption Branch สำหรับระบุสมมติฐานหลัก เช่น GDP และอัตราการเจริญเติบโตประชากร
- Fuel Branch แสดงเชื้อเพลิงที่ใช้และผลิต ทั้งในระดับทรัพยากรและกระบวนการแปรรูป
- Environmental Loading Branch แสดงชนิดของมลพิษ เช่น CO₂, NO_x, PM ที่ปล่อยออกจากแต่ละเทคโนโลยี

2. ตารางข้อมูล Data Table

ตารางข้อมูลสามารถแสดงข้อมูลของกิ่งที่เลือกใน Tree View โดยแต่ละแถวของตารางจะแสดงข้อมูลของหนึ่งกิ่ง และมีแท็บด้านบนเพื่อเลือกประเภทข้อมูล เช่น ระดับกิจกรรม (Activity Level) ความเข้มของพลังงาน (Energy Intensity) ต้นทุน (Cost) การปล่อยมลพิษ (Environmental Loading) โดยระบบจะปรับตารางให้สอดคล้องกับประเภทของกิ่งและโครงสร้างข้อมูล que เลือกโดยอัตโนมัติ

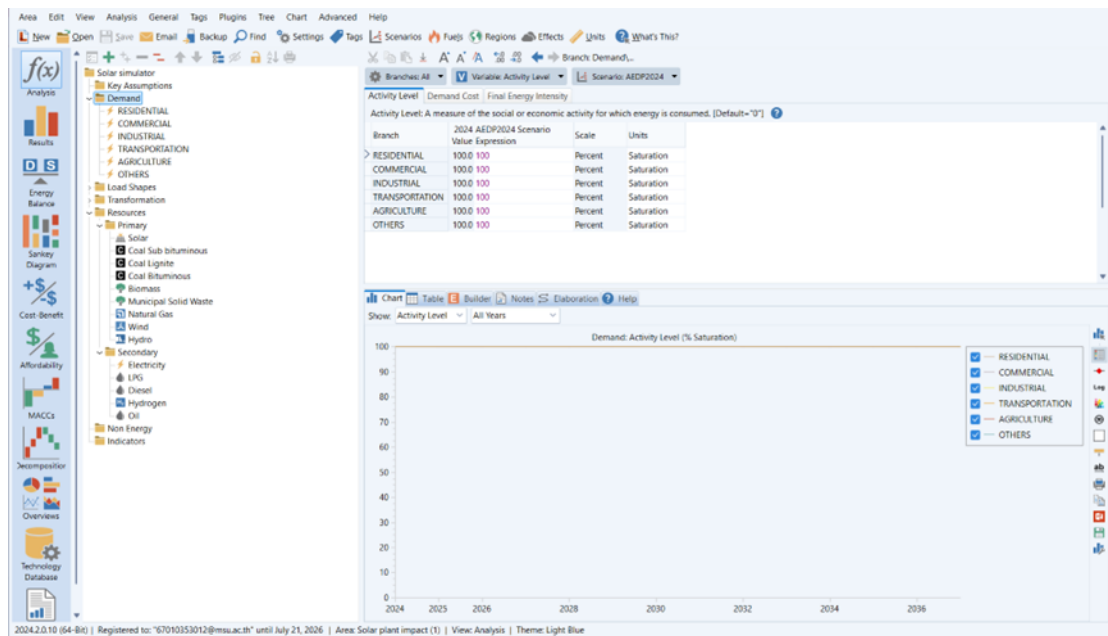
3. แผนภูมิ ตารางสรุป หรือใส่หมายเหตุได้ Chart / Table / Notes

ในส่วนล่างของ Analysis View จะสรุปข้อมูลที่กรอกในรูปแบบ กราฟ หรือ ตาราง ซึ่งสามารถแสดงผลเป็นแบบแท่ง วงกลม หรือกราฟแบบพื้นที่ รวมถึงสามารถส่งออกไปยัง Microsoft Excel หรือ PowerPoint ได้ เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบและการจัดทำรายงาน

4. เลือกสถานการณ์ Scenario Selection

อยู่เหนือ Data Table ใช้เลือกข้อมูลระหว่าง บัญชีปัจจุบัน (Current Accounts) และสถานการณ์ต่าง ๆ (Scenarios) ข้อมูลของทุกสถานการณ์จะอิงจาก Current Accounts โดยผู้ใช้สามารถสร้างสถานการณ์ใหม่ ที่ใช้ข้อมูลจากสถานการณ์หลัก และปรับแก้เฉพาะตัวแปรที่ต้องการเท่านั้น กลไกนี้ทำให้การเปรียบเทียบผลของนโยบายต่าง ๆ และสามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงระบบได้

ดังนั้น ในส่วนของการจำลองโมเดลนั้นสามารถทำได้โดยหลังจากโปรแกรมได้รับข้อมูลเช่น ข้อมูลการใช้พลังงานของแต่ละภาคส่วน ข้อมูลทางเทคนิค เช่น ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน รวมถึงสมมติฐานด้านการเติบโตทางเศรษฐกิจหรือประชากร ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ประกอบการคำนวณในระบบ และคาดการณ์การใช้พลังงานในอนาคต ปริมาณการผลิตไฟฟ้า รวมถึงความต้องการเชื้อเพลิงในแต่ละปี ดังแสดงในภาพประกอบ 26 เมื่อโมเดลได้รับข้อมูลเพียงพอ โปรแกรม LEAP จะสามารถประมวลผลเพื่อแสดงผลลัพธ์ในส่วนของ Results โดยสามารถเลือกดูผลลัพธ์เฉพาะด้านได้ เช่น ความต้องการใช้พลังงานรวมในแต่ละภาค ความสามารถในการผลิตพลังงาน การปล่อยก๊าซเรือนกระจก รวมถึงปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของระบบในแต่ละปี ดังแสดงตัวอย่างในภาพประกอบ 27



ภาพประกอบ 26 หน้าจอหลักในการใช้งานของโปรแกรม LEAP



ภาพประกอบ 27 หน้าจอหลักการแสดงผลลัพธ์ของโปรแกรม LEAP

3.3 กรอบแนวคิดการพัฒนาโมเดลด้วยโปรแกรม LEAP

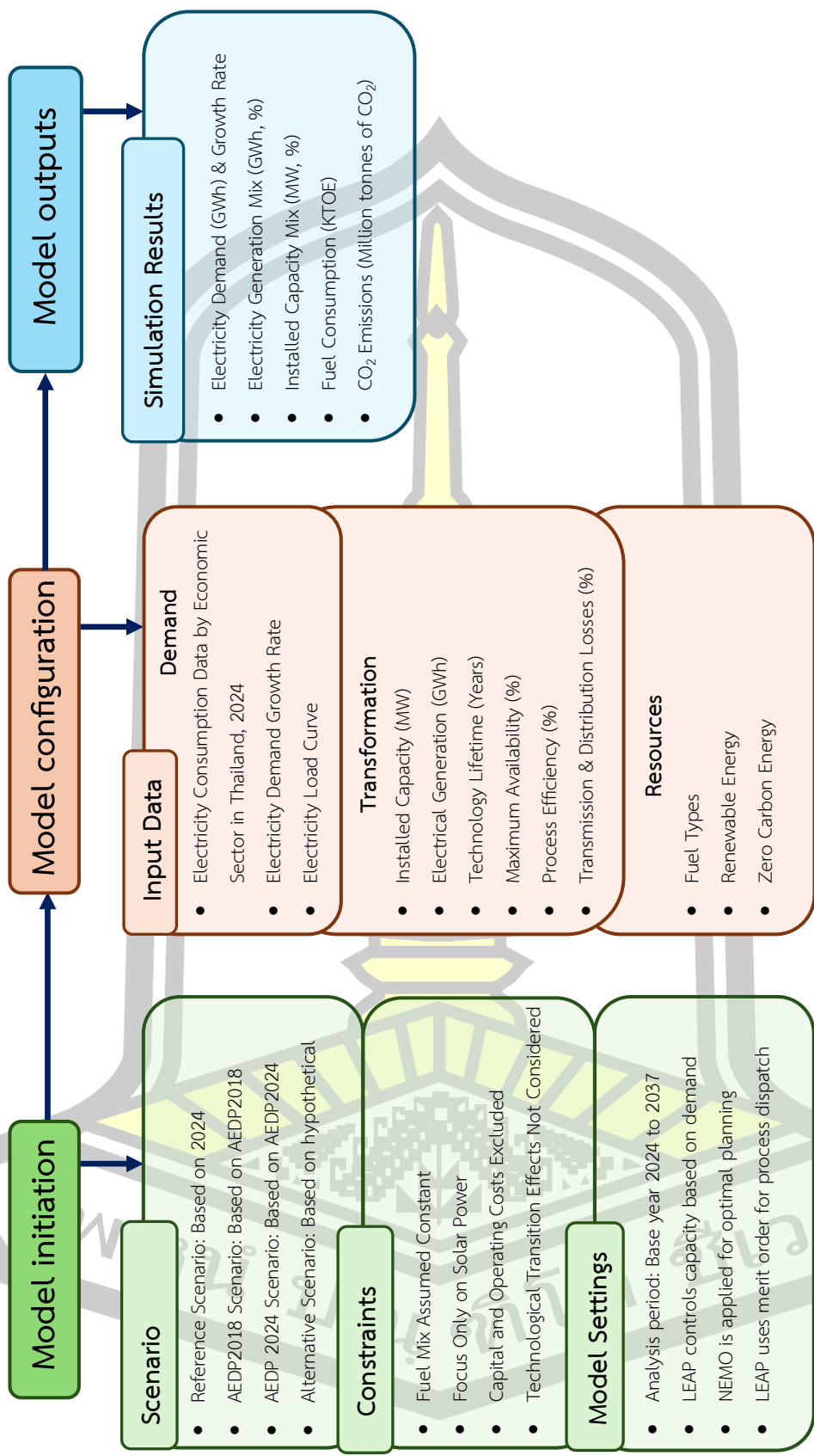
กรอบความคิดการจำลองโมเดล โดยใช้ LEAP ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ 1) การตั้งต้นของโมเดล 2) กระบวนการสร้างโมเดล 3) ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง ซึ่งแต่ละส่วนมีความสัมพันธ์กันเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังภาพประกอบ 28

ส่วนแรก การตั้งต้นของโมเดลประกอบด้วยข้อมูลนำเข้าเบื้องต้น เช่น ความต้องการใช้ไฟฟ้าในพื้นฐาน อัตราการเติบโตของความต้องการไฟฟ้า และข้อมูลทางเทคนิคของโรงไฟฟ้า เช่น กำลังการผลิต อายุการใช้งาน ประสิทธิภาพ และค่าความสูญเสียในระบบ โดยข้อมูลเหล่านี้จะถูกป้อนเข้าสู่แบบจำลองเพื่อใช้ในการคำนวณสถานการณ์ในอนาคต

ส่วนที่สอง กระบวนการสร้างโมเดลจะเริ่มจากการกำหนดข้อจำกัดของแบบจำลอง เช่น การสมมติให้เชื้อเพลิงบางประเภทไม่มีการเปลี่ยนแปลง การวิเคราะห์เฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ หรือการไม่พิจารณาต้นทุนทางการเงิน หลังจากนั้นจะเป็นการกำหนดช่วงเวลาในการวิเคราะห์ รวมถึงการกำหนดลำดับความสำคัญของแหล่งพลังงานในแต่ละปี ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการใช้เครื่องมือ NEMO เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการเพิ่มกำลังการผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ในบางสถานการณ์

ส่วนที่สาม ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองจะแสดงผลในเชิงปริมาณ เช่น ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารายปี กำลังผลิตที่ติดตั้งสะสม อัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของระบบผลิตไฟฟ้า หากมีการเปลี่ยนแปลงนโยบายหรือเป้าหมายด้านพลังงาน สามารถนำไปวิเคราะห์ต่อในเชิงยุทธศาสตร์เพื่อนำเสนอแนวทางการพัฒนาระบบพลังงานอย่างยั่งยืนในอนาคต

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแบบจำลอง LEAP ในงานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการประเมินศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับประเทศ โดยสามารถให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนการผลิตไฟฟ้า (Electricity Generation Mix) การเพิ่มขึ้นของกำลังการผลิตติดตั้ง (Installed Capacity) และการเปลี่ยนแปลงของการใช้เชื้อเพลิง (Fuel Consumption) เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างสถานการณ์อ้างอิง (Reference Scenario) และสถานการณ์พลังงานหมุนเวียน นอกจากนี้ยังสามารถประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO₂ Emissions) ได้อย่างแม่นยำ โดยใช้ข้อมูลเชิงเทคนิคและสมมติฐานที่สอดคล้องกับแผน PDP และ AEDP ล่าสุด การวิเคราะห์ผลลัพธ์ยังช่วยให้สามารถสรุปข้อเสนอเชิงนโยบายในการส่งเสริมพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล และเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงานในระยะยาวได้อย่างเป็นระบบและน่าเชื่อถือ



ภาพประกอบ 28 กรอบแนวคิดการพัฒนาโมเดลด้วยโปรแกรม LEAP

3.4 การพัฒนาสถานการณ์จำลอง

การพัฒนาสถานการณ์จำลองในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบของการขยายสัดส่วนพลังงานแสงอาทิตย์และมีผลต่อโครงสร้างระบบพลังงานในอนาคต โดยการจำลองได้มีการตั้งสมมติฐานให้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าหลักที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตามสถานการณ์จำลอง ขณะที่การติดตั้งเทคโนโลยีใหม่ยังคงควบคุมอยู่ภายใต้หลักการเพิ่มกำลังการผลิตตามความต้องการใช้ไฟฟ้ารายปี นอกจากนี้ยังได้ปรับใช้เครื่องมือ NEMO เพื่อเลือกแนวทางการผลิตไฟฟ้าหรือกำลังติดตั้งที่เหมาะสมกับความต้องการในบางกรณี โดยไม่คำนึงถึงต้นทุนการลงทุนหรือค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน งานวิจัยนี้ได้กำหนดสถานการณ์จำลองขึ้นมาเป็น 3 ดังต่อไปนี้

สถานการณ์อ้างอิง (Reference Scenario: REF) เป็นการจำลองสถานการณ์โดยการคง ระดับความต้องการใช้ไฟฟ้ารวมรายปีโดยจำแนกออกเป็นแต่ละสาขาเศรษฐกิจ และโครงสร้างกำลังผลิตจากแหล่งพลังงานอื่นตามปีฐาน โดยสถานการณ์นี้ใช้ข้อมูลและแนวโน้มในปัจจุบันเป็นเกณฑ์อ้างอิง ซึ่งอิงจากนโยบายพลังงาน กำลังผลิตติดตั้ง รวมถึงโครงสร้างการผลิต และสัดส่วนเชื้อเพลิงของระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงในปีของข้อมูลฐาน (Base Year) ซึ่งสถานการณ์นี้ทำหน้าที่เป็นพื้นฐานเปรียบเทียบ (Baseline) กับสถานการณ์อื่น ๆ ที่มีการแทรกแซงเชิงนโยบายหรือเทคโนโลยี เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงในอนาคต

สถานการณ์จำลองการเพิ่มพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic Only: PVOnly) เป็นการจำลองสถานการณ์ที่มีการเพิ่มขึ้นของกำลังผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ ในขณะที่ยังคงระดับความต้องการใช้ไฟฟ้ารวมรายปี และกำลังติดตั้งรวมในอนาคตไว้เท่าเดิม เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับสถานการณ์อ้างอิงได้อย่างชัดเจน โดยการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนพลังงานแสงอาทิตย์ในสถานการณ์นี้ส่งผลให้กำลังผลิตจากโรงไฟฟ้าฟอสซิลลดลงภายใต้ข้อจำกัดของกำลังการผลิตรวมที่เท่ากัน ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและโครงสร้างของระบบผลิตไฟฟ้าได้เมื่อมีการส่งเสริมพลังงานหมุนเวียนในระดับที่สูงขึ้น

สถานการณ์เพิ่มระบบกักเก็บพลังงานเข้ามาในระบบ (Photovoltaic with Battery Energy Storage System: PVBESS) เป็นสถานการณ์จำลองที่ต่อเนื่องจากสถานการณ์การเพิ่มพลังงานแสงอาทิตย์ (PVOnly) โดยเพิ่มระบบแบตเตอรี่เข้าไปในระบบ ทำให้กำลังการผลิตรวมในอนาคตเพิ่มขึ้นจากความสามารถในการสำรองและจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ แต่สัดส่วนกำลังผลิตจากแหล่งพลังงานอื่นจะยังคงเท่าเดิม และการจำลองสถานการณ์นี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือ NEMO ในการทำการวิเคราะห์เชิงเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization) เพื่อคัดเลือกการติดตั้งกำลังผลิตและระบบกักเก็บที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ข้อจำกัดของระบบ และรองรับความไม่แน่นอนของแหล่งพลังงานหมุนเวียน

ตาราง 7 สรุปการพัฒนาสถานการณ์จำลอง

Scenarios	Key Scenario features and assumptions
Reference: (REF scenario)	• Represents the current trends of the existing energy and technology mix for power generation. • Maintains the combined cycle gas turbine (CCGT) power plants as the dominant technology, with 59% of total generating capacity. • Assumes a steady 6.5% share of solar energy in the technology mix throughout the entire study period. • Assumes a constant share in technology mix: thermal (22%), hydro (7.4%), wind (2.8%) gas engine (0.8%), gas turbine (0.6%) for the whole period.
Solar Only: (PVOnly scenario)	• Reflect the Power Development Plan 2018 revision1 • Decreased share of CCGT and thermal in generating capacity to 36% and 10% , respectively, by 2037. • Substantial increase of solar in technology mix (6.5% in 2024, 21.1% in 2037). • Greater proportion in technology mix: hydro (14%), gas engine (9%), gas turbine (5%) and wind (4%) in 2037.
Solar with BESS: (PVBESS scenario)	• Assumes generating capacity of all technologies consistent with the PVOnly scenario. • Incorporates BESS into the electricity system.

บทที่ 4

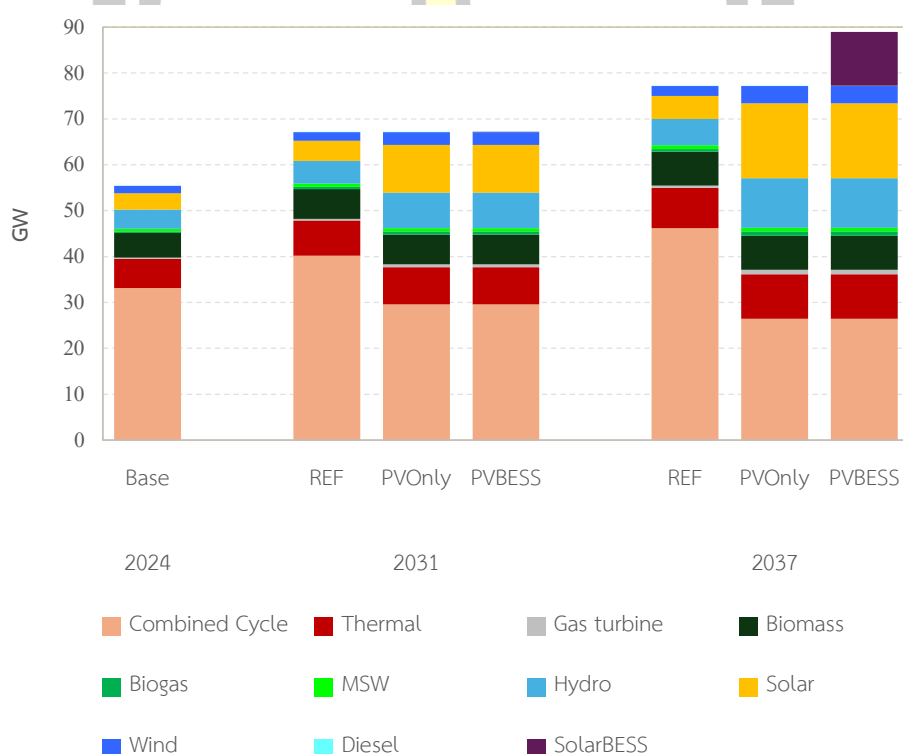
ผลการวิจัยและการอภิปราย

จากการศึกษาและพัฒนาแบบจำลอง LEAP-NEMO ในบทที่ 3 ในบทนี้ได้ทำการประเมินและอภิปรายผลของการบูรณาการของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ ในภาคส่วนของการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย โดยมีการวิเคราะห์ผลกระทบในแง่ของกำลังการผลิตติดตั้งไฟฟ้า (Electricity Generating Capacity) ปริมาณการผลิตไฟฟ้า (Electricity Generation) การจัดหาพลังงานขั้นต้นเพื่อการผลิตไฟฟ้า (Primary Energy Requirements for Power Production) การกระจายแหล่งพลังงาน (Energy Diversity) และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Emission) การประเมินครอบคลุมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2567 ถึงปี พ.ศ. 2580 ดังนั้นในบทนี้นำเสนอผลการประเมินและอภิปรายผล โดยหัวข้อที่ 4.1 นำเสนอผลของกำลังการผลิตติดตั้งไฟฟ้า ในส่วนของปริมาณการผลิตไฟฟ้านำเสนอในหัวข้อที่ 4.2 โดยหัวข้อ 4.3 นำเสนอผลของการจัดหาพลังงานขั้นต้นเพื่อการผลิตไฟฟ้าและการกระจายพลังงาน ในส่วนของ การอภิปรายผลของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นำเสนอในหัวข้อ 4.4

4.1 กำลังการผลิตติดตั้งไฟฟ้า (Electricity Generating Capacity)

ในการประเมินผลของการบูรณาการของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ เมื่อพิจารณากำลังการผลิตติดตั้งไฟฟ้า จะพบว่ากำลังการผลิตติดตั้งไฟฟ้าโดยรวมของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2567 อยู่ที่ 55,387 เมกะวัตต์ (ดังแสดงในภาพประกอบ 29) โดยกำลังการผลิตส่วนใหญ่เป็นของโรงไฟฟ้าความร้อนร่วมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก คิดเป็น 60% ของกำลังการผลิตทั้งหมด ในส่วนของโรงไฟฟ้าประเภทอื่น เช่น โรงไฟฟ้าพลังความร้อน คิดเป็น 11% โรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล คิดเป็น 10% โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ คิดเป็น 7% ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ คิดเป็น 6% และเทคโนโลยีอื่น เช่น กังหันก๊าซ พลังงานลม ก๊าซชีวภาพ และขยะมูลฝอย มีสัดส่วนรวมกันคิดเป็น 6% ซึ่งในสัดส่วนทั้งหมดนี้จะเห็นได้ชัดเจนว่า โรงไฟฟ้าความร้อนร่วมมีสัดส่วนเกินกว่าครึ่งของโรงไฟฟ้าทั้งหมด โดยการติดตั้งจำนวนมากนี้มีผลมาจากการค้นพบน้ำมันและก๊าซธรรมชาติในอ่าวไทยตลอดระยะเวลากว่า 50 ปีที่ผ่านมา และเนื่องจากก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าประเภทอื่น ดังนั้นประเทศไทยจึงใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นหลักในการผลิตไฟฟ้า เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการใช้ไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอ

ในระหว่างปี พ.ศ. 2567 ถึง พ.ศ. 2580 กำลังการผลิตไฟฟ้ารวมของทั้งประเทศจะเพิ่มจาก 55,387 เมกะวัตต์ ในปี พ.ศ. 2567 เป็น 77,210 เมกะวัตต์ ในปี พ.ศ. 2580 ภายใต้สถานการณ์ REF และ PVOnly ในขณะที่สถานการณ์ PVBESS ซึ่งมีการบูรณาการระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage Systems: BESS) จะส่งผลให้มีกำลังการผลิตโดยรวมอยู่ที่ 88,939 เมกะวัตต์ในปี พ.ศ. 2580 โดยสถานการณ์ PVBESS จะเริ่มมีการติดตั้งระบบ BESS ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2574 อยู่ที่ 61.5 เมกะวัตต์ และจะมีการติดตั้งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 11,729 เมกะวัตต์ในปี พ.ศ. 2580 ทั้งนี้ความจุของ BESS ในสถานการณ์ PVBESS นี้ เป็นผลจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยแบบจำลอง NEMO



ภาพประกอบ 29 Electricity Generating Capacity by Technology

จากการอภิปรายผลข้างต้น แสดงให้เห็นถึงการพึ่งพาโรงไฟฟ้าความร้อนร่วมเป็นหลัก ในสถานการณ์ REF และยังคงพึ่งพาก๊าซธรรมชาติจำนวนมากเพื่อการผลิตไฟฟ้า ส่งผลให้ความมั่นคงทางพลังงานของประเทศลดลง เนื่องจากก๊าซธรรมชาติในประเทศมีปริมาณที่ลดลง ส่งผลให้ประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าก๊าซธรรมชาติมากขึ้น โดยเริ่มนำเข้าก๊าซธรรมชาติเป็นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2543 ปริมาณนำเข้าเริ่มต้นเพียง 1,971 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ และเพิ่มขึ้นถึง 16,588 พันตัน

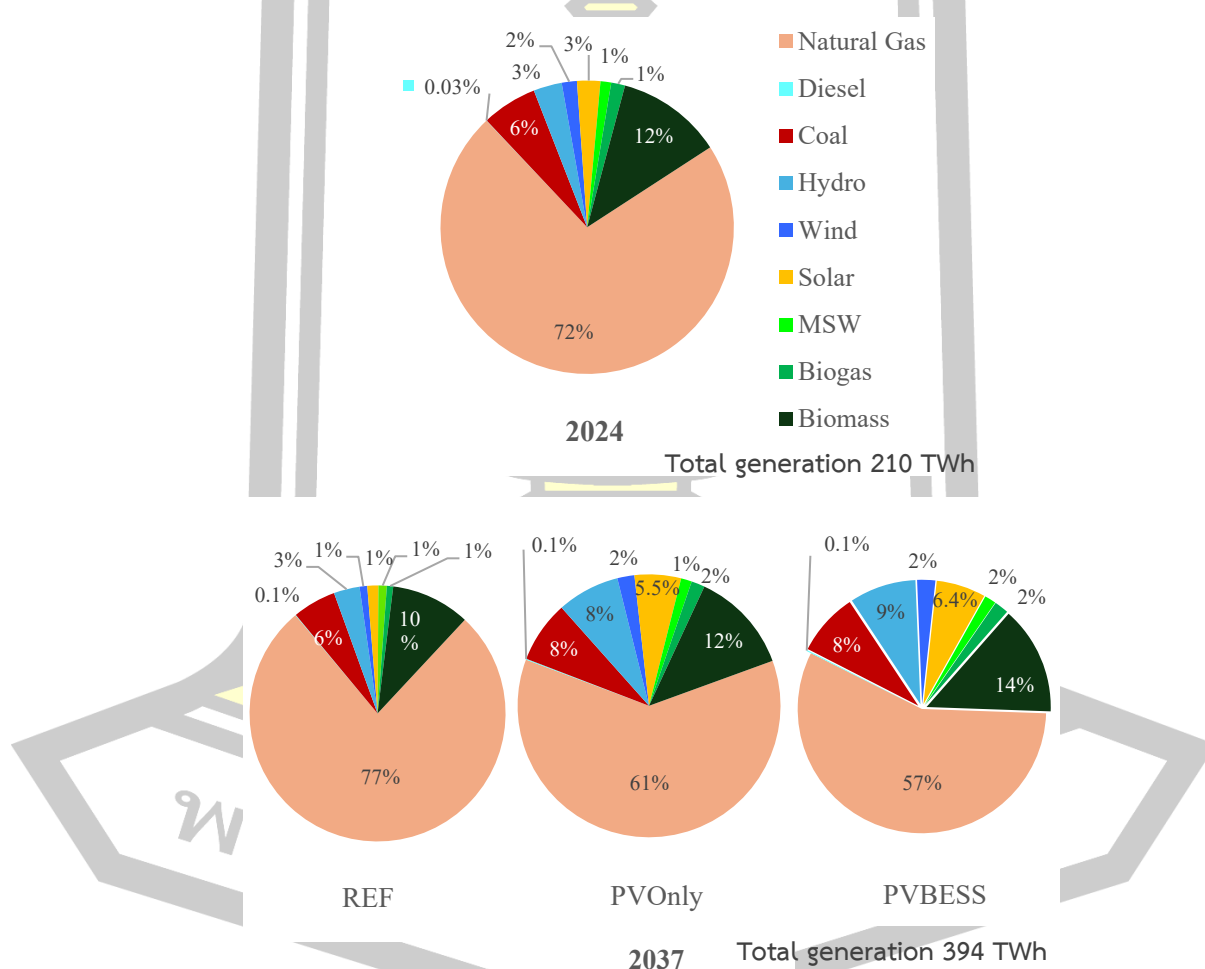
เทียบเท่าน้ำมันดิบ ในปี พ.ศ. 2567 ในส่วนของสถานการณ์ PVOnly และ PVBESS สัดส่วนของโรงไฟฟ้าความร้อนร่วมลดลงเหลือเพียง 34% และ 30% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายพลังงานของประเทศไทย ที่มีเป้าหมายในการลดการพึ่งพาก๊าซธรรมชาติในการผลิตไฟฟ้า และส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน ในส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์ ภายใต้สถานการณ์ REF คาดว่ากำลังการผลิตจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 3,585 เมกะวัตต์ในปี พ.ศ. 2567 เป็น 4,998 เมกะวัตต์ในปี พ.ศ. 2580 ขณะที่สถานการณ์ PVOnly และ PVBESS มีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นถึง 16,311 เมกะวัตต์ในปี พ.ศ. 2580

4.2 ปริมาณการผลิตไฟฟ้า (Power Generation)

ในส่วนของปริมาณการผลิตไฟฟ้า จากภาพประกอบ 30 จะพบว่าปริมาณการผลิตไฟฟ้ารวมของประเทศจะเพิ่มขึ้นจาก 210 เทราวัตต์ชั่วโมงในปี พ.ศ. 2567 จนเข้าใกล้ 400 เทราวัตต์ชั่วโมงในปี พ.ศ. 2580 โดยทั้งสามสถานการณ์จำลองในปี พ.ศ. 2567 โครงสร้างของการผลิตไฟฟ้ายังคงมีการพึ่งพาพลังงานจากก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก โดยมีสัดส่วนสูงถึง 72% ของการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด ขณะที่พลังงานจากชีวมวล มีสัดส่วนอยู่ที่ 12% พลังงานจากถ่านหินมีสัดส่วนอยู่ที่ 6% พลังงานแสงอาทิตย์มีอยู่เพียงแค่ 3% เช่นเดียวกับพลังน้ำอยู่ที่ 3% และแหล่งพลังงานอื่น เช่น พลังงานจากน้ำมัน ไบโอแก๊ส ชยะ รวมกันอยู่ที่ 4% ดังนั้นเพื่อที่จะเพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สูงขึ้น การใช้พลังงานจากก๊าซธรรมชาติภายใต้สถานการณ์ REF จะเพิ่มขึ้นเป็น 77% ภายในปี พ.ศ. 2580 โดยจะมีสัดส่วนลดลงในสถานการณ์ที่มีการบูรณาการพลังงานหมุนเวียน ภายใต้สถานการณ์ PVOnly จะลดลงเหลือ 61% และเหลือเพียง 57% ในสถานการณ์ PVBESS ทั้งนี้ยังสะท้อนให้เห็นว่าการผลิตไฟฟ้าภายใต้สถานการณ์ REF ยังคงมีการพึ่งพาแหล่งพลังงานที่ไม่หลากหลาย ส่งผลให้เกิดความเสี่ยงด้านความมั่นคงทางพลังงานและการนำเข้าเชื้อเพลิง

นอกจากนี้ สถานการณ์ PVOnly ยังพบว่าการลดลงของสัดส่วนก๊าซธรรมชาติถูกทดแทนด้วยการพึ่งพาพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น โดยเฉพาะพลังน้ำและพลังงานแสงอาทิตย์ โดยสัดส่วนพลังน้ำคาดว่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 8% และ 9% ในสถานการณ์ PVBESS โดยผลลัพธ์ของการเพิ่มขึ้นมาจากการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำภายในประเทศและการนำเข้าพลังน้ำจากประเทศเพื่อนบ้าน สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์ ภายใต้สถานการณ์ REF ปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเพียงร้อยละ 1.4% หรือคิดเป็น 5,499 กิกะวัตต์ชั่วโมงในปี พ.ศ. 2580 ขณะที่สถานการณ์ PVOnly จะมีปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2567 โดยเพิ่มขึ้นประมาณ 4 เท่า และ 4.6 เท่าในสถานการณ์ PVBESS ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่สูงที่สุดพบในสถานการณ์ PVBESS เนื่องจากส่วนหนึ่งของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ถูกกักเก็บไว้ในระบบ BESS เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบไฟฟ้า โดย

ระบบ BESS จะทำการชาร์จพลังงานในช่วงที่มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สูงในช่วง Off-Peak และปล่อยพลังงานในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง (Peak Demand) ซึ่งช่วยลดการสูญเสียพลังงานจากการจำกัดกำลังผลิตของแสงอาทิตย์ (Solar Curtailment) และลดการพึ่งพาโรงไฟฟ้าฟอสซิลที่มีประสิทธิภาพต่ำในช่วงพีค ในส่วนของ พลังงานชีวมวล การผลิตไฟฟ้าภายใต้สถานการณ์ REF คาดว่าจะเพิ่มขึ้นประมาณ 60% ในช่วงปี พ.ศ. 2567–2580 เมื่อเปรียบเทียบกับสถานการณ์ PVOnly พบว่าการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 100% และสูงสุดในสถานการณ์ PVBESS ที่เพิ่มขึ้นถึง 125% การเพิ่มขึ้นดังกล่าวส่งผลให้สัดส่วนของชีวมวลในโครงสร้างการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น แสดงถึงทั้งการกระจายแหล่งพลังงานที่มากขึ้น และการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของประเทศไทยในฐานะประเทศเกษตรกรรม



ภาพประกอบ 30 สัดส่วนการผลิตไฟฟ้าแยกตามแหล่งพลังงาน

จากการอธิบายผลข้างต้น แสดงให้เห็นว่า การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีปริมาณสูงที่สุด ในสถานการณ์ PVBESS ซึ่งอาจกล่าวเป็นนัยได้ว่าการใช้ประโยชน์แสงอาทิตย์จะเกิดควมมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อมีการใช้งานร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ เนื่องจากพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์ถูกเก็บไว้ในรูปแบบของระบบแบตเตอรี่จะถูกใช้งานเมื่อมีความต้องการใช้ที่สูงหรือตอนกลางคืน สำหรับพลังงานจากถ่านหินจะเห็นได้ว่าการผลิตไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 6% ในปี พ.ศ. 2567 เป็น 8% ทั้งในสถานการณ์ PVOnly และ PVBESS แม้ถ่านหินจะเป็นแหล่งพลังงานที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ก็ยังคงมีบทบาทในระบบไฟฟ้าของประเทศไทยในอีกประมาณ 15 ปี ข้างหน้า เนื่องจากเมื่อสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนเพิ่มสูงขึ้น หน่วยงานภาครัฐซึ่งเป็นผู้กำหนดนโยบายยังจำเป็นต้องรักษาบทบาทของถ่านหินไว้ในฐานะ แหล่งพลังงานสำรอง เพื่อคงเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าโดยรวม

4.3 ปริมาณการจัดหาพลังงานขั้นต้นและการกระจายแหล่งพลังงาน (Primary Energy Supply and Energy Diversity)

เมื่อพิจารณาปริมาณการจัดหาพลังงานขั้นต้น (Primary Energy Supply) สำหรับการผลิตไฟฟ้า และการกระจายแหล่งพลังงาน พบว่าปริมาณพลังงานขั้นต้นในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 34,448 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ในปี พ.ศ. 2567 เป็น 64,098 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ในปี พ.ศ. 2580 ภายใต้สถานการณ์ REF และ 63,561 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ในปี พ.ศ. 2580 ภายใต้สถานการณ์ PVOnly หรือลดลงเพียง 0.8% เมื่อเทียบกับสถานการณ์ REF (ดังแสดงในตารางที่ 8) การลดลงดังกล่าวเกิดจากการใช้ก๊าซธรรมชาติที่ลดลง ซึ่งถูกชดเชยด้วยพลังงานหมุนเวียนที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของสถานการณ์ PVBESS ปริมาณการจัดหาพลังงานขั้นต้นเพิ่มขึ้น 4.5% หรือ 67,016 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เมื่อเทียบกับสถานการณ์ REF การเพิ่มขึ้นดังกล่าวเกิดจากการขยายสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียนในระบบผลิตไฟฟ้า รวมถึงการเพิ่มพลังงานจากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

นอกจากนี้ในด้านของพลังงานฟอสซิล ในสถานการณ์ REF มีการเพิ่มขึ้นจาก 26,953 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ในปี พ.ศ. 2567 เป็น 52,694 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ในปี พ.ศ. 2580 ขณะที่สถานการณ์ PVOnly และ PVBESS สามารถลดความต้องการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลลงได้ 13% และ 17% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสถานการณ์ REF สำหรับก๊าซธรรมชาติ ความต้องการใช้ในสถานการณ์ PVOnly และ PVBESS ลดลง 17% และ 23% ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของความต้องการเชื้อเพลิงฟอสซิลนี้ส่งผลต่อความมั่นคงทางพลังงานจากการลดการพึ่งพาการนำเข้า และช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อพิจารณาจะพบว่า สถานการณ์ PVBESS มีปริมาณพลังงานขั้นต้นรวมสูง

กว่าสถานการณ์ REF ซึ่งอาจดูเหมือนเป็นว่าเป็นภาระพลังงานที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นนี้เกิดจากการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานที่ถูกส่งต่อไปยังแบตเตอรี่

จากการอภิปรายผลข้างต้นสรุปได้ว่าสถานการณ์ REF ยังคงพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาผันผวนนอกจากนั้นยังปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสูงซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ต่างจากสถานการณ์ PVBESS ที่มีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาบูรณาการกับระบบกักเก็บพลังงาน ไม่เพียงแต่ลดต้นทุนของเชื้อเพลิงและช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก อีกทั้งยังช่วยเสริมความมั่นคงทางพลังงานของประเทศ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของพลังงานขั้นต้นในสถานการณ์ PVBESS จึงไม่ใช่ภาระพลังงานที่เพิ่มขึ้น แต่เป็นการเปลี่ยนผ่านเชิงกลยุทธ์จากระบบที่พึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ไปสู่ระบบพลังงานที่พึ่งพาตนเองและยั่งยืนมากกว่า อีกทั้งการบูรณาการระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (BESS) ยังมีบทบาทสำคัญในการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ทำให้พลังงานหมุนเวียนสามารถมีส่วนร่วมในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตาราง 8 ปริมาณความต้องการพลังงานขั้นต้นและการกระจายพลังงาน

	2024	2037		
		REF	PVOnly	PVBESS
Total Primary Energy Requirement (KTOE)	34,448	64,098	63,561	67,016
Fossil energy (KTOE)	26,953	52,694	45,908	43,981
Natural Gas	70.6%	75.2%	62.5%	55.7%
Coal	7.6%	6.9%	9.6%	9.8%
Diesel	0.04%	0.08%	0.13%	0.14%
Renewable energy (KTOE)	7,495	11,404	17,653	19,841
Biomass	14.6%	12.6%	15.9%	16.9%
Hydro	1.6%	1.7%	4.1%	4.4%
Solar	1.4%	0.7%	3.0%	3.2%
Biogas	1.8%	0.9%	2.0%	2.1%
MSW	1.5%	1.3%	1.7%	1.8%
Wind	0.9%	0.5%	1.1%	1.2%
Electricity (KTOE)	-	-	-	3,193
BESS	-	-	-	4.8%
Herfindahl-Hirschman Index	0.53	0.59	0.43	0.33

นอกจากการประเมินการใช้พลังงานขั้นต้นแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ทำการประเมินการกระจายการใช้พลังงานขั้นต้นเพื่อการผลิตไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้ดัชนีการกระจายพลังงาน (Herfindahl-Hirschman Index: HHI) เป็นตัวชี้วัดเพื่อประเมินระดับการกระจายตัวของแหล่งพลังงาน โดยดัชนี HHI คำนวณจาก ผลรวมของกำลังสองของสัดส่วนพลังงานแต่ละประเภทในโครงสร้างพลังงานของประเทศ กล่าวคือค่าดัชนี HHI จะลดลงเมื่อโครงสร้างพลังงานมีความหลากหลายมากขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการกระจุกตัวของแหล่งพลังงานเพียงไม่กี่ประเภท

จากตารางที่ 8 จะพบว่าสัดส่วนการใช้ก๊าซธรรมชาติในสถานการณ์ REF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 71% ในปี พ.ศ. 2567 เป็น 75% ในปี พ.ศ. 2580 ขณะที่สัดส่วนของพลังงานจากชีวมวลลดลงประมาณ 2% การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลให้ค่าดัชนี HHI เพิ่มขึ้นจาก 0.53 ในปี พ.ศ. 2567 เป็น 0.59 ในปี พ.ศ. 2580 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างพลังงานภายใต้สถานการณ์ REF มีความหลากหลายน้อยลง ขณะที่สถานการณ์ PVOnly มีสัดส่วนของก๊าซธรรมชาติจะลดลง และมีสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียนและถ่านหินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนี HHI ในปี พ.ศ. 2580 ลดลงเหลือ 0.43 ซึ่งสะท้อนถึงระดับความหลากหลายทางพลังงานที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับสถานการณ์ REF และที่น่าสนใจคือ ความหลากหลายของการใช้พลังงานขั้นต้นในสถานการณ์ PVBESS สูงที่สุด โดยมีค่าดัชนี HHI เท่ากับ 0.33 ในปี พ.ศ. 2580 เมื่อเทียบกับสถานการณ์ REF และ PVOnly ความหลากหลายที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการบูรณาการ ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (BESS) ซึ่งมีสัดส่วนคิดเป็นประมาณ 4.8% ของพลังงานขั้นต้นทั้งหมด ดังนั้นแล้วการมีส่วนร่วมของ BESS จึงส่งผลให้ความหลากหลายของระบบพลังงานโดยรวม ทำให้โครงสร้างพลังงานของประเทศมีความยืดหยุ่นและมั่นคงมากยิ่งขึ้น

4.4 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Emissions)

ในส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการเพิ่มขึ้นของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และการบูรณาการระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (BESS) มีส่วนช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากตารางที่ 9 จะเห็นว่า การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ภายใต้สถานการณ์ REF จะเพิ่มขึ้นจาก 67 ล้านตันในปี พ.ศ. 2567 เป็น 130 ล้านตันในปี พ.ศ. 2580 ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มขึ้นสุทธิ 63 ล้านตัน ในขณะที่ สถานการณ์ PVOnly และ PVBESS จะลดลงเมื่อเทียบกับสถานการณ์ REF ประมาณ 13 ล้านตัน (ลดลง 10.2%) และ 17 ล้านตัน (ลดลง 13.1%) ตามลำดับ ภายในปี พ.ศ. 2580 ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนการใช้พลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างชัดเจน และเมื่อมีการบูรณาการระบบกักเก็บพลังงาน แบบแบตเตอรี่ (BESS) ร่วมด้วย สามารถช่วยให้การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

แต่อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนผ่านไปสู่ระบบไฟฟ้าที่มีการบูรณาการพลังงานแสงอาทิตย์และระบบ BESS ในระดับสูงอาจก่อให้เกิดความท้าทายต่อระบบไฟฟ้าของประเทศไทย โดยเฉพาะในด้านการบริหารจัดการความซับซ้อนของการทำงานร่วมกันระหว่างแหล่งพลังงานหมุนเวียนและระบบกักเก็บพลังงาน ซึ่งจำเป็นต้องมีกลยุทธ์และแนวทางการดำเนินงานใหม่ ๆ เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ระดับการบูรณาการพลังงานแสงอาทิตย์และระบบ BESS ที่สูงขึ้นยังนำมาซึ่งปัญหาด้านความยั่งยืนในระยะยาว โดยเฉพาะในประเด็นการจัดการซากของแผงโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่เมื่อสิ้นอายุการใช้งาน โดยอาจมีการดำเนินการด้านการรีไซเคิล เพื่อลดปริมาณวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่ชำรุดหรือหมดอายุการใช้งาน รวมถึงการนำทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่ (Resource Recovery) ทั้งหมดนี้จึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้การเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาดของประเทศไทยเป็นไปอย่างมีความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อมและยั่งยืนในเชิงเศรษฐกิจ

ตาราง 9 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคการผลิตไฟฟ้า

Years	REF	PVOnly		PVBESS	
		Changes from REF scenario		Changes from REF scenario	
	(thousand tonnes)	(thousand tonnes)	(%)	(thousand tonnes)	(%)
2024	67,018	-	-	-	-
2031	103,829	-5,932	(-5.7)	-11,014	(-10.6)
2037	129,934	-13,225	(-10.2)	-17,001	(-13.1)

พหุ ประสิทธิภาพ

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้ทำการประเมินผลกระทบของการเพิ่มสัดส่วนพลังงานแสงอาทิตย์และการบูรณาการระบบกักเก็บพลังงาน ในภาคการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย โดยการพัฒนาสามสถานการณ์หลัก ได้แก่ สถานการณ์อ้างอิง (REF) สถานการณ์ของการเพิ่มสัดส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์ตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า (PVOOnly) และสถานการณ์บูรณาการพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน (PVBESS) และทำการประเมินผลกระทบโดยใช้แบบจำลอง LEAP- NEMO ซึ่งในบทที่ 4 ได้นำเสนอผลการประเมินในด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็น กำลังการผลิตติดตั้งไฟฟ้า ปริมาณการผลิตไฟฟ้า การจัดหาพลังงานขั้นต้นเพื่อการผลิตไฟฟ้า การกระจายแหล่งพลังงาน และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในบทนี้จะเป็นการสรุปและอภิปรายผลการศึกษาโดยรวม โดยมุ่งเน้นการอภิปรายผลกระทบร่วมกับนโยบายด้านพลังงานที่เกี่ยวข้อง โดยหัวข้อ 5.1 นำเสนอสรุปและอภิปรายผลศึกษา และในหัวข้อที่ 5.2 นำเสนอข้อเสนอแนะสำหรับพัฒนางานวิจัย

5.1 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

จากการศึกษาผลกระทบของการบูรณาการพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ในประเทศไทย โดยใช้กรอบแบบจำลอง LEAP-NEMO และสามสถานการณ์จำลองได้แก่ สถานการณ์อ้างอิง (REF) สถานการณ์เพิ่มพลังงานแสงอาทิตย์ (PVOOnly) และสถานการณ์บูรณาการพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน (PVBESS) ในระหว่างปี พ.ศ. 2567–2580 ผลการศึกษาซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของการเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนร่วมกับการบูรณาการระบบกักเก็บพลังงาน (ดังแสดงในตารางที่ 10) สรุปได้ดังนี้

- ภายใต้สถานการณ์การบูรณาการพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (PVBESS) ส่งผลให้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลลดลงถึง 16.5% ขณะที่การพึ่งพาพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว (PVOOnly) ลดลงได้เพียง 12.9% เมื่อเทียบกับสถานการณ์ REF ทั้งนี้ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การบูรณาการพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานมีประสิทธิภาพมากกว่าการเพิ่มกำลังผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์เพียงลำพัง

- เมื่อประเมินการใช้ก๊าซธรรมชาติพบว่า มีการใช้ก๊าซธรรมชาติลดลงอย่างชัดเจน โดยลดลงถึง 17.6% ในสถานการณ์ PVOnly และลดลงได้มากถึง 22.6% ในสถานการณ์ PVBESS เมื่อเทียบกับสถานการณ์ REF โดยแสดงให้เห็นถึงความมั่นคงทางพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากลดการพึ่งพาจากการนำเข้าก๊าซธรรมชาติ นอกจากนี้ยังทำให้ความหลากหลายทางพลังงานเพิ่มมากขึ้น
- ในด้านความหลากหลายของแหล่งพลังงาน (Energy Diversity) การบูรณาการระบบกักเก็บพลังงานเข้ากับพลังงานแสงอาทิตย์ส่งผลให้เพิ่มความสมดุลของโครงสร้างพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าดัชนี Herfindahl-Hirschman Index (HHI) ลดลงจาก 0.59 ในสถานการณ์ REF เหลือ 0.43 ในสถานการณ์ PVOnly และลดลงต่อเนื่องจนถึง 0.33 ในสถานการณ์ PVBESS ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระดับความหลากหลายทางพลังงานที่ดีขึ้นและมีความยืดหยุ่นของระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ตาราง 10 สรุปผลกระทบของแต่ละสถานการณ์ในแต่ละด้าน ในปี พ.ศ. 2580

	REF	PVOnly	PVBESS
Energy Impacts			
Fossil requirements (KTOE)	52,694	45,908 (-12.9)	43,981 (-16.5)
Natural gas requirements (KTOE)	48,213	39,712 (-17.6)	37,309 (-22.6)
Natural gas saving (KTOE)		8,501	10,904
Energy diversity index	0.59	0.43	0.33
Environmental Impacts			
CO ₂ Emissions (thousand tonnes)	129,934	116,709 (-10.2)	112,933 (-13.1)
CO ₂ Saving (thousand tonnes)		13,225	17,001

จากการสรุปผลการประเมินข้างต้น แสดงให้เห็นว่าระดับการบูรณาการที่เหมาะสมของพลังงานแสงอาทิตย์และระบบ BESS ที่สามารถสร้างสมดุลระหว่างเป้าหมายด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภายใต้ระบบการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนผ่านไปสู่ระบบพลังงานแสงอาทิตย์และ BESS เป็นแนวทางที่ให้ประโยชน์อย่างมากต่อทั้งด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในด้านการเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงานของประเทศ (Energy Security) ผ่านการเพิ่มความหลากหลายของโครงสร้างพลังงาน และการลดการพึ่งพาการนำเข้าก๊าซธรรมชาติ รวมถึงการผลักดันการลดการปล่อยคาร์บอน

อย่างไรก็ตาม การบูรณาการพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ถึงแม้ว่าจะมีประโยชน์ในหลายด้าน แต่การบูรณาการเทคโนโลยีดังกล่าวยังต้องเผชิญกับความท้าทายหลายประการ เช่น ต้นทุนเริ่มต้นของแบตเตอรี่ที่ยังคงสูง การจัดการซากแบตเตอรี่รวมถึงแผงโซลาร์เซลล์เมื่อสิ้นอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับข้อจำกัดด้านกฎระเบียบและกระบวนการอนุญาต การติดตั้งที่ซับซ้อน ซึ่งอาจเป็นอุปสรรคต่อการขยายตัวของเทคโนโลยีดังกล่าวในอนาคต เพื่อแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้ และช่วยเร่งการบูรณาการเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์และ BESS ให้เกิดขึ้นอย่างเป็นรูปธรรม ดังนั้นงานวิจัยนี้เสนอแนวทางเชิงนโยบาย ได้แก่

- การสร้างแรงจูงใจทางเศรษฐกิจ (Economic Incentives) โดยการจัดให้มีแรงจูงใจทางภาษี (Tax Incentives) และมาตรการสนับสนุนทางการเงิน เพื่อดึงดูดและส่งเสริมการเข้ามาเป็นผู้ที่มีบทบาทในระบบ
- การวางแผนเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy Planning) โดยการจัดตั้งโครงสร้างพื้นฐานและระเบียบด้านการรีไซเคิลที่ครอบคลุม เพื่อรองรับการจัดการซากแบตเตอรี่และแผงโซลาร์เซลล์เมื่อสิ้นอายุการใช้งาน
- การปฏิรูปกฎระเบียบ (Regulatory Reform) โดยการปรับปรุงกระบวนการขออนุญาต และติดตั้งโครงการพลังงานหมุนเวียนให้มีความรวดเร็ว และลดความซ้ำซ้อนของขั้นตอนการติดตั้ง

พูน ปณ จิต ชีวะ

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับพัฒนางานวิจัย

สำหรับการศึกษาการบูรณาการระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ ถึงแม้ว่าจะครอบคลุมในหลายด้านได้แก่ การผลิตไฟฟ้า ปริมาณการผลิตไฟฟ้า การจัดหาพลังงานขั้นต้นและการกระจายพลังงาน รวมถึงการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่งานวิจัยนี้แต่ยังสามารถต่อยอดการศึกษาเพื่อให้ครอบคลุมและมีมุมมองที่กว้างขึ้นในอนาคตได้ในประเด็นต่อไปนี้

- การพิจารณาต้นทุนของโรงไฟฟ้าและการผลิตพลังงาน
- การคิดภาษี การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์
- การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ



บรรณานุกรม

- [1] J. Wei, T. Jiang, P. Ménager, D.-G. Kim, and W. Dong, "COP29: Progresses and challenges to global efforts on the climate crisis," *The Innovation*, vol. 6, no. 1, 2025.
- [2] W. E. Parker, M. K. Brown, and R. Linares, "Greenhouse gases reduce the satellite carrying capacity of low Earth orbit," *Nature Sustainability*, 2025.
- [3] P. De Simone, Q. Lai, J. Ducci, D. Campani, and G. Biancofiore, "The carbon footprint and energy consumption of liver transplantation," *Frontiers in Transplantation*, vol. 3, p. 1441928, 2025.
- [4] P. Thanatrakolsri and D. Sirithian, "Evaluation of Greenhouse Gas Emissions and Mitigation Measures at Thammasat University's Lampang Campus in Thailand," *Environmental Health Insights*, vol. 18, p. 11786302241253589, 2024.
- [5] DEDE, "Thailand Energy Balance of Thailand 2015," Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), Ministry of Energy., 2015. [Online]. Available: https://www.dede.go.th/articles?id=467&menu_id=49
- [6] EPPO., "Carbon dioxide (CO2) emissions from energy use in 2024," Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy, Bangkok., 2024. [Online]. Available: <https://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/situation-co2/per-year>
- [7] EPPO., "Thailand Energy Situation (2015)," Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy, Bangkok., 2015. [Online]. Available: <https://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/energy-status/year>
- [8] E. E. Phyu, "Energy Dilemma of Natural Gas Trading between Thailand and Myanmar," 2023.
- [9] A. Chaichaloempreecha and B. Limmeechokchai, "Transition of Thailand's Power Sector toward Carbon Neutrality 2050," in *2022 International Conference and Utility Exhibition on Energy, Environment and Climate Change (ICUE)*, 2022: IEEE, pp. 1-7.
- [10] ส. ก. แ. ไส, "การ ประเมิน ประสิทธิภาพ การ ผลิต ไฟฟ้า พลังงาน แสงอาทิตย์ บน หลังคา."
- [11] น. พ. ช. ฐ. ไ. วงศ์, "แนวทาง การ พัฒนา กลยุทธ์ การ ส่งเสริม การ ลงทุน ติด ตั้ง ระบบ

- พลังงาน แสงอาทิตย์ ใน กลุ่ม โรงงาน อุตสาหกรรม ใน ประเทศไทย," มหาวิทยาลัย มหิดล.
- [12] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. "ร่างแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ.2567-2580 (PDP2024)." <https://www.oap.go.th/wp-content/uploads/2025/02/ร่าง-แผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้า-Power-Development-Plan-PDP.pdf> (accessed.
- [13] H. Li, "Regional advantages and disadvantages of large-scale wind and solar energy production," 2024.
- [14] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, "วารสารนโยบายพลังงาน ฉบับที่ 134," ประเทศไทย, 2024.
- [15] ส. วัฒนะ, พลังงานหมุนเวียน พ.ศ. 2564. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม: ประเทศไทย, 2021.
- [16] กระทรวงพลังงาน, "แผนปฏิบัติราชการ รายปี พ.ศ. 2567 กระทรวงพลังงาน," ประเทศไทย, 2024.
- [17] ส. สำนักนายกรัฐมนตรี. "แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่สิบสาม พ.ศ. 2566 – 2570." (accessed.
- [18] กระทรวงพลังงาน, "แผนปฏิบัติราชการรายปี พ.ศ. 2566 กระทรวงพลังงาน," ประเทศไทย, 2023.
- [19] กระทรวงพลังงาน, "รายงานประจำปี พ.ศ. 2566," ประเทศไทย, 2023.
- [20] สำนักเลขาธิการวุฒิสภา. "รัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย พุทธศักราช ๒๕๖๐." <https://www.senate.go.th/assets/portals/13/files/รัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักร%20พุทธศักราช%202560.pdf> (accessed.
- [21] เลขาธิการของคณะรัฐมนตรี, "คำแถลงนโยบายของคณะรัฐมนตรี," ประเทศไทย, 2024.
- [22] ส. สำนักเลขาธิการของคณะกรรมการยุทธศาสตร์ชาติ. "ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. ๒๕๖๑ – ๒๕๘๐." <https://cbethailand.com/เอกสารที่เกี่ยวข้อง/ยุทธศาสตร์ชาติ-20-ปี-พ-ศ-2561-2580> (accessed.
- [23] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579." <https://www.eppo.go.th/images/POLICY/PDF/AEDP2015.pdf> (accessed.
- [24] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 – 2580." <https://www.eppo.go.th/images/POLICY/PDF/AEDP2018.pdf> (accessed.
- [25] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิต พลังงาน

- ทดแทน ชุดที่2 พลังงานแสงอาทิตย์ พ.ศ.2562."
- https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=774&filename=index (accessed.
- [26] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "โครงการพัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย พ.ศ.2561." <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/BibA11494.pdf> (accessed.
- [27] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "คู่มือ สร้างความรู้ เสริมทักษะโซลาร์รูปโครงการสร้างความรู้ เสริมทักษะโซลาร์รูป พ.ศ.2566." https://phdb.moph.go.th/main/upload/web_news_files/1oytxpgce7xco8kck8.pdf (accessed.
- [28] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ พ.ศ.2557." https://www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=630 (accessed.
- [29] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยจากข้อมูลดาวเทียม พ.ศ. 2565." <https://gis.dede.go.th/gallery-map-view.aspx?p=93> (accessed.
- [30] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "ฐานข้อมูลความเข้มรังสีระดับตำบล พ.ศ.2563." <https://gis.dede.go.th/gallery-map-view.aspx?p=93> (accessed.
- [31] I. Ramiro, "Working Principles of a Solar Cell," in *Fundamentals of Solar Cells and Photovoltaic Systems Engineering*: Elsevier, 2025, pp. 59-97.
- [32] iEnergyGuru. "เซลล์แสงอาทิตย์ พ.ศ.2558." <https://ieneryguru.com/2015/06/แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้า> (accessed.
- [33] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "คู่มือการผลิตพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ พ.ศ. 2562." https://drive.google.com/file/d/1_-BjVla02Oia1l2wZDwBzV7TDme-nt3H/view (accessed.
- [34] G. M. I. Kamoona and N. A. Khalil, "Improving Thermal Performance in the University Classrooms," *Journal of Engineering*, vol. 30, no. 1, 2024.
- [35] M. V. Damhare, B. Butey, and S. Moharil, "Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1913, no. 1: IOP Publishing, p. 012053.
- [36] S. Arya and P. Mahajan, *Solar Cells: Types and Applications*. Springer Nature, 2023.
- [37] H. H. COBAN, "EXPERIMENTAL STUDY OF BIFACIAL SOLAR PHOTOVOLTAIC

SYSTEMS IN SNOWY ENVIRONMENTS."

- [38] P. Kaneria and K. Reddy, "Minimizing shadow effects to optimize solar energy input in the World Solar Challenge," *Green Technology & Innovation*, p. 025090004, 2025.
- [39] V. K. Reddy N and M. SH, "Battery Technology–A Comprehensive Review," *Journal of Mines, Metals & Fuels*, vol. 70, 2022.
- [40] S. Nyamathulla and C. Dhanamjayulu, "A review of battery energy storage systems and advanced battery management system for different applications: Challenges and recommendations," *Journal of Energy Storage*, vol. 86, p. 111179, 2024.
- [41] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "รายงานคุณภาพพลังงานของประเทศไทย ปี พ.ศ.2555 – พ.ศ.2563." https://oldwww.dede.go.th/ewt_news.php?nid=47340 (accessed.
- [42] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "รายงานสถานการณ์พลังงานของประเทศไทย ปี พ.ศ.2543 – พ.ศ.2554." <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib2903-2000.pdf> (accessed.
- [43] R. Lorm and B. Limmeechokchai, "Thailand Net Zero Emissions 2050: Analyses of Decarbonized Energy System Beyond the NDC," *International Energy Journal*, vol. 24, no. 2, 2024.
- [44] K. Handayani, P. Anugrah, F. Goembira, I. Overland, B. Suryadi, and A. Swandaru, "Moving beyond the NDCs: ASEAN pathways to a net-zero emissions power sector in 2050," *Applied Energy*, vol. 311, p. 118580, 2022.
- [45] ศ. ป. ต. พูนสุข and ช. น. ร. แจ้ง, "ปัจจัย สำคัญ ใน การ จัด ลำดับ รูป แบบ การ พัฒนา โรงไฟฟ้า พลังงาน หมุนเวียน ใน ประเทศไทย," *วารสาร วิชาการ พระจอมเกล้า พระนครเหนือ*, vol. 34, no. 2, pp. ID. 242-086054, 2024.
- [46] S. Sutont, T. Holmyong, and P. Samart, "ปัจจัย สภาพ แวดล้อม ภายนอก ที่ มี ผลกระทบ ต่อ การ จัดการ เชิง กลยุทธ์ ของ ธุรกิจ พลังงาน แสงอาทิตย์ ใน ประเทศไทย," *Ph. D. in Social Sciences Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 1-14, 2024.
- [47] B. Limmeechokchai and D. Dul, "Achievement of Paris Agreement in selected Greater Mekong Sub-region countries: Analyses of renewable electricity and emissions gap," *Energy*, vol. 1, no. 113, pp. 29-66, 2023.

- [48] R. Lorm and B. Limmeechokchai, "Decarbonized power generation in selected GMS countries: Cambodia, Lao PDR, Thailand, and Vietnam," Thammasat University, 2022.
- [49] J. Pongthanaisawan, W. Wangjiraniran, and N. Nakapreecha, "Thailand energy scenarios: pathways towards carbon neutrality 2050," *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 13, no. 1, pp. 489-500, 2023.
- [50] B. Hongvityakorn, N. Jaruwasupant, K. Khongphinitbunjong, and P. Aggarangsi, "Achieving Nearly Zero-Energy Buildings through Renewable Energy Production-Storage Optimization," *Energies*, vol. 17, no. 19, p. 4845, 2024.
- [51] M. I. Fernandez, Y. I. Go, W.-G. Früh, and D. M. Wong, "Projection of Electricity Generation Profiles and Carbon Emissions Towards 2050: A Malaysia Context," *Energy for Sustainable Development*, vol. 85, p. 101681, 2025.
- [52] M. I. Sutikno, S. Suhanan, and A. A. Setiawan, "Energy Transition Planning in Achieving the 2060 Net-Zero Emissions Target in the Electricity Sector of North Sumatra Province," *International Journal of Engineering Business and Social Science*, vol. 3, no. 2, pp. 180-193, 2024.
- [53] Z. Ren, S. Zhang, H. Liu, R. Huang, H. Wang, and L. Pu, "The feasibility and policy engagements in achieving net zero emission in China's power sector by 2050: A LEAP-REP model analysis," *Energy Conversion and Management*, vol. 304, p. 118230, 2024.
- [54] P. Golfam and P.-S. Ashofteh, "Environmental-economic analysis of regional energy system under different supply and demand side scenarios with LEAP model," *Environment, Development and Sustainability*, pp. 1-22, 2024.
- [55] K. U. Shah, P. Raghoo, and P. Blechinger, "Is there a case for a coal moratorium in Indonesia? Power sector optimization modeling of low-carbon strategies," *Renewable and Sustainable Energy Transition*, vol. 5, p. 100074, 2024.
- [56] K. Handayani, I. Overland, B. Suryadi, and R. Vakulchuk, "Integrating 100% renewable energy into electricity systems: A net-zero analysis for Cambodia, Laos, and Myanmar," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 4849-4869, 2023.
- [57] X. Wang, Z. Lu, T. Li, and P. Zhang, "Carbon-neutral power system transition pathways for coal-dominant and renewable Resource-abundant regions: Inner

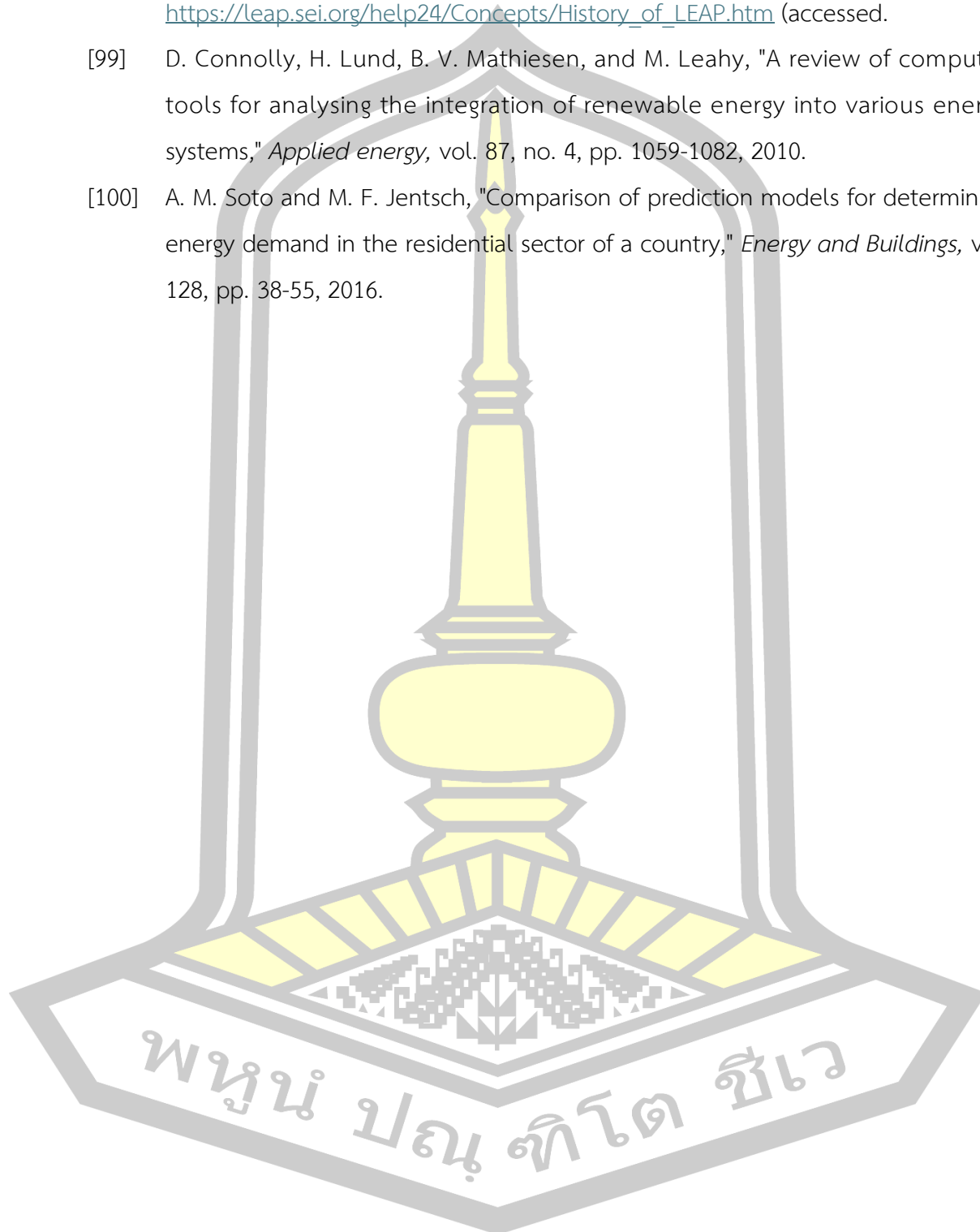
- Mongolia as a case study," *Energy Conversion and Management*, vol. 285, p. 117013, 2023.
- [58] S. P. Kanugrahan, D. F. Hakam, and H. Nugraha, "Techno-economic analysis of Indonesia power generation expansion to achieve economic sustainability and net zero carbon 2050," *Sustainability*, vol. 14, no. 15, p. 9038, 2022.
- [59] Y. Ayuketah, S. Gyamfi, F. A. Diawuo, and A. S. Dagoumas, "Power generation expansion pathways: A policy analysis of the Cameroon power system," *Energy Strategy Reviews*, vol. 44, p. 101004, 2022.
- [60] M. A. Rahmanta *et al.*, "Towards a net zero-emission electricity generation system by optimizing renewable energy sources and nuclear power plant," *Energies*, vol. 17, no. 8, p. 1958, 2024.
- [61] M. A. Raza, M. A. Al-Khasawneh, Y. Z. Alharthi, M. Faheem, R. Haider, and L. Kumar, "Power Generation Expansion Planning With High Penetration of Geothermal Energy–Potential, Prospects and Policy," *Environmental and Sustainability Indicators*, p. 100614, 2025.
- [62] T. Wijayanto, D. F. Hakam, and P. N. Kemala, "Vision for Indonesia's 2050 power generation: Scenarios of hydrogen integration, nuclear energy prospects, and coal phase-out impact," *Sustainable Futures*, vol. 9, p. 100438, 2025.
- [63] L. Shen, Q. Yuan, Q. He, P. Jiang, H. Ji, and J. Shi, "Simulation and Pathway Selection for China's Carbon Peak: A Multi-Objective Nonlinear Dynamic Optimization Approach," *Sustainability*, vol. 17, no. 1, p. 154, 2025.
- [64] S. C. Obiora, O. Bamisile, Y. Hu, D. U. Ozsahin, and H. Adun, "Assessing the decarbonization of electricity generation in major emitting countries by 2030 and 2050: Transition to a high share renewable energy mix," *Heliyon*, vol. 10, no. 8, 2024.
- [65] N. Victor and C. Nichols, "Future of hydrogen in the US energy sector: MARKAL modeling results," *Applications in Energy and Combustion Science*, vol. 18, p. 100259, 2024.
- [66] E. Manirambona, S. M. Talai, and S. K. Kimutai, "Appraising Kenyan energy demand policies for energy efficiency improvement and GHG emissions mitigation," *Energy Strategy Reviews*, vol. 51, p. 101291, 2024.

- [67] M. Xu, C. Liao, Y. Huang, X. Gao, G. Dong, and Z. Liu, "LEAP model-based analysis to low-carbon transformation path in the power sector: a case study of Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 7405, 2024.
- [68] P. Golfam, P.-S. Ashofteh, and H. A. Loáiciga, "Forecasting long-term energy demand and reductions in GHG emissions," *Energy Efficiency*, vol. 17, no. 3, p. 19, 2024.
- [69] K. Karunanithi, S. Ramesh, and R. SP, "Generation Expansion Planning considering environmental impact and sustainable development for an Indian state using the LEAP platform," *Utilities Policy*, vol. 86, p. 101702, 2024.
- [70] B. Li, W. Zhou, Y. Xian, and X. Guan, "Forecasting the energy demand and CO₂ emissions of industrial sectors in China's Beijing-Tianjin-Hebei region under energy transition," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, no. 5, pp. 7283–7297, 2024.
- [71] M. Murugesan, L. Reedman, T. S. Brinsmead, W. Rifkin, J. Gordon, and M. Megharaj, "Modelling least-cost technology pathways to decarbonise the New South Wales energy system by 2050," *Renewable and Sustainable Energy Transition*, vol. 3, p. 100041, 2023.
- [72] M. Karatayev, J. Gaduš, and R. Lisiakiewicz, "Creating pathways toward secure and climate neutral energy system through EnergyPLAN scenario model: The case of Slovak Republic," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 2525–2536, 2023.
- [73] Y. Li, L. Yang, and T. Luo, "Energy system low-carbon transition under dual-carbon goals: the case of Guangxi, China using the EnergyPLAN tool," *Energies*, vol. 16, no. 8, p. 3416, 2023.
- [74] S. Battulga and S. Dhakal, "Energy Demand Modeling for the Transition of a Coal-Dependent City to a Low-Carbon City: The Case of Ulaanbaatar City," *Energies*, vol. 16, no. 17, p. 6291, 2023.
- [75] M. Kanté, S. Deng, Y. Li, and S. Coulibaly, "Long-term optimization of hydro & solar power electricity generation in the Taoussa area of Mali using the MESSAGE model," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 252–265, 2023.
- [76] M. A. Nyasapoh, S. K. Debrah, N. E. Anku, and S. Yamoah, "Estimation of CO₂

- emissions of fossil-fueled power plants in Ghana: message analytical model," *Journal of Energy*, vol. 2022, no. 1, p. 5312895, 2022.
- [77] M. A. W. Maulana *et al.*, "Nuclear Power Plant Implication on Supply and Demand Projection Analysis: A Case Study in the Sumatra Region," in *2023 6th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, 2023: IEEE, pp. 270-274.
- [78] H. Nourianfar and H. Abdi, "Solving power systems optimization problems in the presence of renewable energy sources using modified exchange market algorithm," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 26, p. 100449, 2021.
- [79] A. Abdel-Hameed, J. Kim, J.-H. Hyun, H. H. Ramadhan, S. R. Joseph, and M. Nandutu, "Optimization of electricity generation technologies to reduce carbon dioxide emissions in Egypt," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 18, p. 8788, 2021.
- [80] J. Kim, A. Abdel-Hameed, S. R. Joseph, H. H. Ramadhan, M. Nandutu, and J.-H. Hyun, "Modeling long-term electricity generation planning to reduce carbon dioxide emissions in Nigeria," *Energies*, vol. 14, no. 19, p. 6258, 2021.
- [81] I. Vincent, E.-C. Lee, K.-H. Cha, and H.-M. Kim, "The WASP model on the symbiotic strategy of renewable and nuclear power for the future of 'Renewable Energy 3020' policy in South Korea," *Renewable Energy*, vol. 172, pp. 929-940, 2021.
- [82] I. Kamdar, S. Ali, J. Taweekun, and H. M. Ali, "Wind farm site selection using WASP tool for application in the tropical region," *Sustainability*, vol. 13, no. 24, p. 13718, 2021.
- [83] G. Tosato, "Introduction to ETSAP and the MARKAL-TIMES models generators," in *International energy agency: Neet workshop on energy technology collaboration*, 2008.
- [84] R. Loulou, G. Goldstein, and K. Noble, "Documentation for the MARKAL Family of Models," *Energy Technology Systems Analysis Programme*, vol. 1, 2004.
- [85] G. Goldstein, A. Kanudia, A. Lehtilä, U. Remme, and E. Wright, "Documentation for the TIMES model: PART III," *Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP): Paris, France*, 2016.

- [86] M.-S. Tsai and S.-L. Chang, "Taiwan's 2050 low carbon development roadmap: An evaluation with the MARKAL model," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 178-191, 2015.
- [87] S. Messner and M. Strubegger, "User's Guide for MESSAGE III," 1995.
- [88] K. Riahi and R. A. Roehrl, "Greenhouse gas emissions in a dynamics-as-usual scenario of economic and energy development," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 63, no. 2-3, pp. 175-205, 2000.
- [89] D. A. Infante and C. J. Wigley III, "Verbal aggressiveness: An interpersonal model and measure," *Communications Monographs*, vol. 53, no. 1, pp. 61-69, 1986.
- [90] L. Suganthi and A. A. Samuel, "Energy models for demand forecasting—A review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1223-1240, 2012.
- [91] I. A. E. AGENCY, "Model for Analysis of Energy Demand (MAED-2)," VIENNA, 2006. [Online]. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CMS-18_web.pdf
- [92] I. A. E. Agency, "IAEA Tools and Methodologies for Energy System Planning and Nuclear Energy System Assessments," Vienna, 2009. [Online]. Available: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/19916IAEA_Brochure_ToolsMethodologies_for_Energy_System_Planning.pdf
- [93] I. A. E. Agency. (2001). Wien Automatic System Planning (WASP) Package Available: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CMS-16.pdf>
- [94] H. L. a. J. Z. Thellufsen. (2024). EnergyPLAN Advanced Energy Systems Analysis Computer Model. Available: <https://energyplan.eu/wp-content/uploads/2024/10/documentation.pdf>
- [95] C. Heaps, J. C. Kuylensstierna, K. Hicks, H. Vallack, and C. Malley, "The Long-range Energy Alternatives Planning–Integrated Benefits Calculator (LEAP-IBC)," 2017.
- [96] S. Ulloa, "Introduction to Low Emissions Analysis Platform," 2023. [Online]. Available: https://mrvhub.org/wp-content/uploads/2023/06/MRV-Hub_LEAP-Webinar.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [97] S. U. Charles Heaps, Jason Veysey (SEI). (2024). Training Exercises. Available: <https://leap.sei.org/documents/LEAP2024TrainingExercise2024.pdf>

- [98] S. E. I. (SEI). "LEAP INFORMATION."
https://leap.sei.org/help24/Concepts/History_of_LEAP.htm (accessed.
- [99] D. Connolly, H. Lund, B. V. Mathiesen, and M. Leahy, "A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems," *Applied energy*, vol. 87, no. 4, pp. 1059-1082, 2010.
- [100] A. M. Soto and M. F. Jentsch, "Comparison of prediction models for determining energy demand in the residential sector of a country," *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 38-55, 2016.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ

ศุภกร อุคำพันธ์

วันเกิด

5 ธันวาคม 2545

สถานที่เกิด

ปทุมธานี

สถานที่อยู่ปัจจุบัน

บ้านเลขที่ 184 หมู่ 3 ตำบลนาแก อำเภอนาวัง จังหวัดหนองบัวลำภู

ตำแหน่งหน้าที่การงาน

นักศึกษา

สถานที่ทำงานปัจจุบัน

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2561 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนนาแกวิทยา จังหวัดหนองบัวลำภู

พ.ศ. 2563 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนนาแกวิทยา จังหวัดหนองบัวลำภู

พ.ศ. 2567 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พ.ศ. 2568 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

และคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผลงานวิจัย

S. Ukumphan, Y. Xiao, C. Yang, B. Wattana, and S. Wattana,

"Assessing the Impacts of Solar Power and Battery Storage

System Integration in Thailand Using the LEAP-NEMO

Framework," Engineering, Technology & Applied Science

Research, vol. 15, no. 6, pp. 30331-30339, 2025, doi:

<https://doi.org/10.48084/etasr.14750>.

พูน ปณ ทัต ชีเว