

การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบของเทคโนโลยีด้านพลังงานเพื่อการลด ก๊าซเรือนกระจกและความเป็นกลางทางคาร์บอนในประเทศไทย

A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW OF ENERGY TECHNOLOGIES FOR GREENHOUSE GAS REDUCTION AND CARBON NEUTRALITY IN THAILAND

มณี คิวเจริญ^{1*} เสรีย์ ตูปรากาย² และชญาณิษฐ์ วิทยากรมย์³

Manee Kiewcharoen^{1*}, Seree Tuprakay² and Chayanid Witthayaphirom³

^{1*} สาขาวิศวกรรมความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

^{1*} Doctor of Philosophy Program in Safety Engineering, Occupational Health and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

² สาขาวิศวกรรมความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรามคำแหง

² Department of Safety Engineering, Occupational Health and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

³ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

³ Department of Environmental Science, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University

* Corresponding author, E-mail: maneeekiewc@gmail.com

Received: December 19, 2025 Revised: April 9, 2026 Accepted: April 9, 2026

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Literature Review: SLR) กระบวนการคัดเลือกบทความดำเนินการตามขั้นตอนของ PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) เพื่อวิเคราะห์เทคโนโลยีพลังงานและแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน โดยรวบรวมบทความวิจัยจากฐานข้อมูล ScienceDirect, Springer และ Gale OneFile ในช่วงปี 2023–2025 ภายใต้เกณฑ์การคัดเลือกและคัดออกอย่างเป็นระบบ จากการสืบค้นพบบทความจำนวน 4,704 ฉบับ โดยฐานข้อมูล ScienceDirect 596 ฉบับ Springer Nature ที่มีบทความจำนวน 2,643 ฉบับ และ Gale OneFile จำนวน 1,465 ฉบับ ซึ่งได้รับการคัดกรองโดยพิจารณาจากชื่อเรื่องและบทคัดย่อ จากนั้นจึงทำการประเมินเนื้อหาฉบับเต็มตามเกณฑ์การคัดเข้าและคัดออกอย่างเป็นระบบจนเหลือบทความจำนวน 42 ฉบับ สำหรับการวิเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่า แนวทางสำคัญสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ (1) มาตรการเชิงนโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน (2) โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) และโรงไฟฟ้าเสมือน (VPP) (3) การบูรณาการพลังงานหมุนเวียน และ (4) การจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยพลังงานหมุนเวียนและการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานมีศักยภาพสูงในระยะสั้น ขณะที่เทคโนโลยีขั้นสูง เช่น ไฮโดรเจนและการดักจับคาร์บอนเหมาะสำหรับการพัฒนาในระยะยาว งานวิจัยนี้เสนอแนวทางเชิงนโยบายและการพัฒนาระบบพลังงานที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย เพื่อสนับสนุนการบรรลุเป้าหมาย Carbon Neutrality ในปี 2050 และ Net Zero ในปี 2065

คำสำคัญ: ความเป็นกลางทางคาร์บอน ก๊าซเรือนกระจก การทบทวนเชิงระบบ

Abstract

This study employs a Systematic Literature Review (SLR), and the article selection process follows the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) framework to analyze energy

technologies and approaches for reducing greenhouse gas emissions toward Carbon Neutrality. Research articles were collected from the ScienceDirect, Springer Nature, and Gale OneFile databases, covering the period from 2023 to 2025, based on systematically defined inclusion and exclusion criteria. A total of 4,704 articles were initially identified, including 596 from ScienceDirect, 2,643 from Springer Nature and 1,465 from Gale OneFile. These articles were screened based on titles and abstracts, followed by a full-text assessment according to the established criteria, resulting in 42 articles selected for in-depth analysis. The findings indicate that the key approaches can be categorized into four main groups (1) Policy Measures and Carbon Market mechanisms, (2) Smart Grid systems and Virtual Power Plants (VPP), (3) Renewable Energy integration; and (4) Waste Management and the Circular Economy. Renewable Energy and Energy Efficiency Improvements show high potential in the short term, whereas advanced technologies such as Hydrogen and Carbon Capture are more suitable for long-term development. This study proposes policy recommendations and energy system development pathways tailored to the Thai context to support the achievement of Carbon Neutrality by 2050 and Net Zero Emissions by the year 2065.

Keywords: Carbon Neutrality, Greenhouse Gas, Systematic Review

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นหนึ่งในความท้าทายสำคัญระดับโลกที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) จากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะในภาคพลังงานซึ่งเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลักของโลก ความตกลงปารีส (Paris Agreement) [1] จึงได้กำหนดกรอบความร่วมมือระหว่างประเทศเพื่อควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกไม่ให้เกิน 2 องศาเซลเซียสและพยายามจำกัดให้อยู่ที่ 1.5 องศาเซลเซียส ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในภาคพลังงานที่มีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ

สำหรับประเทศไทยภาคพลังงานถือเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลักเมื่อเปรียบเทียบกับภาคส่วนอื่น เช่น ภาคเกษตรกรรมและภาคของเสีย โดยประเทศไทยได้กำหนดเป้าหมายภายใต้ Nationally Determined Contribution (NDC) [2] ได้แก่ การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงร้อยละ 40 ภายในปี 2030 การบรรลุความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี 2050 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) ภายในปี 2065 ซึ่งได้รับการสนับสนุนผ่านยุทธศาสตร์ชาติและเครื่องมือเชิงนโยบายต่าง ๆ เช่น ร่างพระราชบัญญัติการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ระบบซื้อขายสิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Trading System: ETS) และภาษีคาร์บอน [3]

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาด้านเทคโนโลยีและแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก แต่ยังคงมีช่องว่างทางการวิจัย (Research Gap) ที่สำคัญหลายประการ ได้แก่ (1) งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นเทคโนโลยีเฉพาะด้านซึ่งขาดการสังเคราะห์ภาพรวมของเทคโนโลยีพลังงานในลักษณะบูรณาการทั้งระบบ (2) ขาดการเชื่อมโยงองค์ความรู้จากบริบทระดับโลกเข้าสู่บริบทเฉพาะของประเทศไทยทั้งในมิติด้านเศรษฐกิจ นโยบาย และโครงสร้างพลังงาน (3) ยังมีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบอย่างเป็นระบบที่จำกัด ระหว่างแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น พลังงานหมุนเวียน โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ เทคโนโลยีด้านพลังงาน โดยเฉพาะในแง่บทบาทของเทคโนโลยีในระยะสั้นและระยะยาว

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว โดยใช้วิธีการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Literature Review: SLR) จากงานวิจัยในช่วงปี 2023–2025 โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้ (1) เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของเทคโนโลยีพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (2) เพื่อสังเคราะห์แนวทางสำคัญในการ

ลดคาร์บอนในระบบพลังงานอย่างเป็นระบบ (3) เพื่อเสนอแนวทางเชิงนโยบายและการพัฒนาระบบพลังงานที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย เพื่อสนับสนุนการบรรลุเป้าหมาย Carbon Neutrality และ Net Zero อย่างยั่งยืน

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ใช้วิธีการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Literature Review: SLR) โดยดำเนินการตามแนวทางของ PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [4] เพื่อให้กระบวนการสืบค้น คัดเลือก และสังเคราะห์ข้อมูลเป็นไปอย่างมีระบบ โปร่งใส และสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้

การสืบค้นบทความดำเนินการผ่านฐานข้อมูลวิชาการที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล ได้แก่ ScienceDirect, Springer Nature และ Gale OneFile โดยกำหนดช่วงเวลาของบทความระหว่างปี 2023–2025 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ทันสมัยและสอดคล้องกับแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานในปัจจุบัน ทั้งนี้ ได้กำหนดคำค้น (Search Strings) โดยครอบคลุมประเด็นสำคัญ ได้แก่ ความเป็นกลางทางคาร์บอน เทคโนโลยีพลังงาน และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น “Carbon Neutrality”, “Net Zero Emissions” ในการสืบค้น

กระบวนการคัดเลือกบทความดำเนินการตามขั้นตอนของ PRISMA ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การระบุบทความ (Identification) การคัดกรองเบื้องต้น (Screening) การพิจารณาความเหมาะสม (Eligibility) และการคัดเลือกบทความเข้าสู่การวิเคราะห์ (Included) จากการสืบค้นพบบทความจำนวน 4,704 ฉบับ โดยฐานข้อมูล ScienceDirect 596 ฉบับ Springer Nature จำนวน 2,643 ฉบับ และ Gale OneFile จำนวน 1,465 ฉบับ ซึ่งได้รับการคัดกรองโดยพิจารณาจากชื่อเรื่องและบทคัดย่อ จากนั้นจึงทำการประเมินเนื้อหาฉบับเต็มตามเกณฑ์การคัดเข้าและคัดออกอย่างเป็นระบบจนเหลือบทความจำนวน 42 ฉบับ สำหรับการวิเคราะห์เชิงลึกเกณฑ์การคัดเข้าประกอบด้วย บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในช่วงปีที่กำหนดมีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีพลังงานและการลดก๊าซเรือนกระจกและสามารถเข้าถึงฉบับเต็มได้ ขณะที่เกณฑ์การคัดออก ได้แก่ บทความที่ไม่เกี่ยวข้องกับภาคพลังงาน บทความซ้ำ และบทความที่ไม่มีความชัดเจนด้านระเบียบวิธีวิจัย นอกจากนี้บทความที่ผ่านการคัดเลือกยังได้รับการประเมินคุณภาพ โดยพิจารณาจากความชัดเจนของวัตถุประสงค์ ความเหมาะสมของวิธีวิจัย และความน่าเชื่อถือของผลการศึกษา เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่นำมาใช้มีคุณภาพ และสามารถสนับสนุนการวิเคราะห์ได้อย่างเหมาะสม

ในขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการสังเคราะห์เชิงเนื้อหา (Thematic Synthesis) ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) โดยเริ่มจากการจัดกลุ่มบทความตามประเด็นหลัก จากนั้นจึงวิเคราะห์แนวโน้มร่วม ความแตกต่าง และข้อจำกัดของแต่ละแนวทางเทคโนโลยี พร้อมทั้งประเมินศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในบริบทของประเทศไทย การสังเคราะห์ดังกล่าวนำไปสู่การจำแนกประเด็นสำคัญออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ (1) นโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน (2) โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะและโรงไฟฟ้าเสมือน (3) การบูรณาการพลังงานหมุนเวียน และ (4) การจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียน ซึ่งเป็นกรอบสำคัญในการวิเคราะห์ผลการศึกษในส่วนถัดไป

3. ผลการวิจัย

จากการทำ Systematic Literature Review (SLR) สามารถอธิบายผลได้ดังนี้

3.1 นโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน

งานวิจัยในกลุ่มนี้สะท้อนให้เห็นว่าการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคพลังงานจำเป็นต้องอาศัย เครื่องมือเชิงนโยบายและกลไกตลาดควบคู่กับเทคโนโลยี โดยสามารถจำแนกแนวทางหลักออกเป็น 3 มิติ ได้แก่ (1) ระบบติดตามและประเมินการปล่อยคาร์บอน (Carbon Monitoring And Tracking) (2) กลไกตลาด เช่น Emission Trading System (ETS) และ Carbon Pricing และ (3) การบูรณาการระบบพลังงาน (Integrated Energy Systems: IES)

ในเชิงสังเคราะห์ งานวิจัยจำนวนมากชี้ให้เห็นแนวโน้มร่วมว่าการพัฒนาเครื่องมือด้านข้อมูล เช่น Carbon Flow Tracking [5, 8] ขณะที่เทคโนโลยีดิจิทัล เช่น Blockchain [6] ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความโปร่งใสและความน่าเชื่อถือของ

ตลาดคาร์บอนและแบบจำลอง IES [7] เป็นรากฐานสำคัญของการกำหนดนโยบายที่มีประสิทธิภาพ สะท้อนการเปลี่ยนผ่านจาก “Policy-Driven” ไปสู่ “Data-Driven Governance”

เมื่อวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบพบว่าประเทศพัฒนาแล้วสามารถใช้กลไกตลาดคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีโครงสร้างข้อมูลและกฎระเบียบที่เข้มแข็ง [7, 11] ในขณะที่ประเทศกำลังพัฒนายังมีข้อจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐานและความไม่เท่าเทียมด้านพลังงาน [9, 10] ในบริบทของประเทศไทยแม้ว่าจะมีแนวทางนำ ETS มาใช้และนโยบายด้านคาร์บอน แต่ยังขาดระบบ MRV และฐานข้อมูลคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญในการดำเนินนโยบายเชิงระบบ

การเชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์ผลการวิเคราะห์นี้ตอบวัตถุประสงค์ข้อ (2) โดยการสังเคราะห์มาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับระบบและตอบวัตถุประสงค์ข้อ (3) โดยเสนอแนวทางเชิงนโยบาย เช่น การพัฒนา ETS และ MRV สำหรับประเทศไทย

3.2 โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะและโรงไฟฟ้าเสมือน

งานวิจัยในกลุ่มนี้แสดงให้เห็นบทบาทของ Smart Grid และ Virtual Power Plant (VPP) ในฐานะ โครงสร้างพื้นฐานสำคัญ สำหรับระบบพลังงานคาร์บอนต่ำ โดยเฉพาะในระบบที่มีสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนสูง ในเชิงสังเคราะห์ งานของ Hu [12] และ Guo [14] แสดงให้เห็นว่า VPP สามารถรวมแหล่งพลังงานและบริหารจัดการผ่านระบบดิจิทัลเพื่อลดความผันผวนของพลังงานหมุนเวียน ขณะที่ Fan [13] แสดงให้เห็นว่า Microgrid และ EV ในการเพิ่ม Flexibility ของระบบไฟฟ้า

ในเชิงเปรียบเทียบเทคโนโลยี Smart Grid มีข้อได้เปรียบด้านความยืดหยุ่นและเสถียรภาพ แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุนและความซับซ้อนของระบบควบคุม โดยเฉพาะในประเทศที่ยังไม่มีโครงสร้างพื้นฐานด้านดิจิทัลรองรับ สำหรับในประเทศไทยการพัฒนา Smart Grid ยังอยู่ในระยะเริ่มต้น แต่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการรองรับ Renewable Energy ที่เพิ่มขึ้น การเชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์ผลการศึกษานี้ตอบวัตถุประสงค์ข้อ (1) โดยแสดงให้เห็นแนวโน้มและบทบาทของเทคโนโลยีพลังงานสมัยใหม่ในการสนับสนุนระบบพลังงานคาร์บอนต่ำ

3.3 การบูรณาการพลังงานหมุนเวียน

การบูรณาการพลังงานหมุนเวียนเป็นกลไกหลักในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยงานวิจัยในกลุ่มนี้เน้นทั้งการเพิ่มสัดส่วนพลังงานสะอาดและการแก้ปัญหาความไม่แน่นอนของพลังงาน ในเชิงสังเคราะห์ งานวิจัยชี้ให้เห็นว่าการผสมผสาน Renewable Energy เข้ากับ Hydrogen System สามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบ [11, 16] ขณะที่ Hydrogen ถูกมองเป็นพลังงานในอนาคต [15]

เมื่อเปรียบเทียบพบว่า Renewable Energy มีความพร้อมใช้งานสูงและต้นทุนลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่มีข้อจำกัดด้านความไม่แน่นอน (Intermittency) ขณะที่ Hydrogen มีศักยภาพสูงในระยะยาว แต่ยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุนและเทคโนโลยี ในบริบทของประเทศไทยพลังงานหมุนเวียน เช่น Solar และ Biomass มีความเหมาะสมสูงในระยะสั้น ขณะที่ Hydrogen ควรได้รับการพัฒนาในระยะยาว

การเชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์ผลการศึกษานี้ตอบวัตถุประสงค์ข้อ (1) ในด้านการวิเคราะห์เทคโนโลยีพลังงาน และ วัตถุประสงค์ข้อ (2) ในการสังเคราะห์แนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

3.4 การจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียน

งานวิจัยในกลุ่มนี้แสดงให้เห็นว่า Waste-to-Energy (WtE) และ Circular Economy เป็นแนวทางเสริมที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจ ในเชิงสังเคราะห์ งานของ Bjelic [19] และ Khalid [20] แสดงให้เห็นว่า WtE สามารถลดปริมาณของเสียและผลิตพลังงานได้ ขณะที่ Nieto [21] ชี้ให้เห็นความท้าทายของการจัดการขยะจากแผงโซลาร์เซลล์ในอนาคตเมื่อเปรียบเทียบพบว่า WtE มีข้อดีด้านการลดของเสีย แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุนและเทคโนโลยี ขณะที่ Circular Economy ต้องอาศัยนโยบายสนับสนุนที่เข้มแข็ง

การเชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์ผลการศึกษานี้ตอบ วัตถุประสงค์ข้อ (2) และ (3) โดยแสดงแนวทางลดคาร์บอนและเสนอการประยุกต์ใช้ในบริบทประเทศไทย

การปิด Research Gap จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบพบว่างานวิจัยนี้สามารถเติมเต็มช่องว่างทางการวิจัย (Research Gap) ได้ในหลายมิติ ได้แก่

จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบตามแนวทาง PRISMA การศึกษานี้ไม่เพียงแต่รวบรวมองค์ความรู้ที่มีอยู่ แต่ยังมีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์และเชื่อมโยงองค์ความรู้เพื่อเติมเต็มช่องว่างทางการวิจัยที่ปรากฏในงานก่อนหน้าอย่างเป็นระบบ

ประการแรก งานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการศึกษาเทคโนโลยีเฉพาะด้าน เช่น พลังงานหมุนเวียน โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะหรือเทคโนโลยีดักจับคาร์บอนแบบแยกส่วน ส่งผลให้ขาดมุมมองเชิงระบบของการเปลี่ยนผ่านพลังงาน การศึกษานี้ได้แก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวโดยใช้กระบวนการสังเคราะห์เชิงธีม (Thematic Synthesis) เพื่อบูรณาการเทคโนโลยีและมาตรการหลักออกเป็น 4 กลุ่มสำคัญ ได้แก่ นโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ การบูรณาการพลังงานหมุนเวียนและการจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียนการจัดกลุ่มและวิเคราะห์เชิงระบบดังกล่าวช่วยให้เห็นความเชื่อมโยงระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบพลังงาน ซึ่งเป็นการเติมเต็มช่องว่างด้านการสังเคราะห์แบบบูรณาการทั้งระบบอย่างชัดเจน

ประการที่สอง งานวิจัยระดับสากลส่วนใหญ่อ้างอิงบริบทของประเทศพัฒนาแล้ว ซึ่งมีโครงสร้างพลังงาน นโยบาย และศักยภาพทางเศรษฐกิจที่แตกต่างจากประเทศไทย การศึกษานี้จึงได้ดำเนินการวิเคราะห์เชิงบริบท (Contextual Analysis) โดยประเมินความเหมาะสมของเทคโนโลยีและมาตรการต่าง ๆ ภายใต้ข้อจำกัดและโอกาสของประเทศไทย ทั้งในด้านโครงสร้างพื้นฐานพลังงาน ความพร้อมทางเทคโนโลยีและกลไกนโยบาย ส่งผลให้สามารถเชื่อมโยงองค์ความรู้จากระดับสากลสู่การประยุกต์ใช้ในระดับประเทศได้อย่างเป็นรูปธรรม

ประการที่สาม การศึกษานี้ได้เสริมการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) ระหว่างเทคโนโลยีและแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยพิจารณาทั้งจุดแข็ง ข้อจำกัด ความพร้อมเชิงเทคโนโลยี และความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ของแต่ละแนวทาง พร้อมทั้งจัดลำดับบทบาทของเทคโนโลยีตามช่วงเวลา ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มักนำเสนอผลในลักษณะการสรุปรายบทความ การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบนี้ช่วยให้สามารถระบุเส้นทางการเปลี่ยนผ่านพลังงานที่เหมาะสมได้อย่างมีระบบและเติมเต็มช่องว่างด้านการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม การปิดช่องว่างดังกล่าวอยู่ในระดับของการสังเคราะห์เชิงแนวคิดและข้อเสนอเชิงนโยบายเป็นหลัก โดยยังมีข้อจำกัดในด้านการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) และการจำลองสถานการณ์ (Scenario Modeling) ซึ่งควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในงานวิจัยอนาคตเพื่อยืนยันความเหมาะสมของแนวทางในเชิงปฏิบัติ

4. บทสรุป

จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ บทความที่ผ่านการคัดเลือกจำนวน 42 ฉบับสามารถสังเคราะห์ออกเป็น 4 ประเด็นหลัก ได้แก่ (1) นโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน (2) โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะและโรงไฟฟ้าเสมือน (3) การบูรณาการพลังงานหมุนเวียนและ (4) การจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในเชิงวิพากษ์พบว่าเทคโนโลยีและมาตรการแต่ละกลุ่มมีระดับความพร้อม ศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจก ต้นทุน และความเหมาะสมกับบริบทประเทศไทยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่อาจสรุปได้ว่าแนวทางใดแนวทางหนึ่งเพียงลำพังจะเป็นคำตอบต่อเป้าหมาย Carbon Neutrality และ Net Zero แต่จำเป็นต้องใช้การออกแบบเชิงระบบที่บูรณาการหลายแนวทางเข้าด้วยกัน

ในมิติแรก กลุ่มนโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน มีจุดเด่นตรงที่เป็นเครื่องมือที่สามารถกำหนดทิศทางและแรงจูงใจให้ภาคพลังงานและภาคอุตสาหกรรมปรับตัวพร้อมกัน งานของ Hu และคณะ [5] และ Liang และคณะ [8] แสดงให้เห็นว่าการติดตามการไหลของคาร์บอนและการใช้แบบจำลองระบบพลังงานแบบบูรณาการช่วยให้การประเมินการ

ปล่อยมีความแม่นยำมากขึ้น ขณะที่ Li และคณะ [6] เสนอการประยุกต์ใช้ Blockchain เพื่อเพิ่มความโปร่งใสของการซื้อขายคาร์บอน และ Lyu และคณะ [7] ชี้ให้เห็นบทบาทของการค้าพลังงานข้ามภูมิภาคในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรพลังงานสะอาด โดยในเชิงวิเคราะห์กลุ่มมาตรการนี้มีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือสามารถขยายผลในระดับประเทศได้รวดเร็วหากมีการออกแบบกฎหมายและระบบกำกับดูแลรองรับ แต่ข้อจำกัดสำคัญคือการพึ่งพาความพร้อมของข้อมูลระบบ MRV และความเข้มแข็งของสถาบันกำกับดูแล ซึ่งยังเป็นจุดอ่อนในหลายประเทศกำลังพัฒนา [9, 10] รวมถึงประเทศไทยด้วย ดังนั้นแม้ ETS, Carbon Pricing และ Carbon Tracking จะมีศักยภาพสูงในเชิงนโยบาย แต่ในบริบทไทยยังต้องลงทุนกับโครงสร้างพื้นฐานข้อมูล การทวนสอบโดยบุคคลที่สาม และความพร้อมของภาคอุตสาหกรรมก่อน จึงจะเกิดผลจริงในทางปฏิบัติ กลุ่มนี้จึงตอบวัตถุประสงค์ข้อ 2 ในด้านการสังเคราะห์มาตรการลดคาร์บอนและวัตถุประสงค์ข้อ 3 ในด้านการเสนอแนวทางเชิงนโยบายที่เหมาะสมกับประเทศไทย

ในมิติที่สอง โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) และโรงไฟฟ้าเสมือน (VPP) เป็นกลุ่มเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในฐานะโครงสร้างพื้นฐานรองรับการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงาน งานของ Hu และคณะ [12], Fan และคณะ [13] และ Guo และคณะ [14] สะท้อนแนวโน้มร่วมกันว่า Smart Grid, Microgrid และ VPP ช่วยลดความผันผวนของพลังงานหมุนเวียน เพิ่มความยืดหยุ่นของระบบและบริหารทรัพยากรกระจายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในเชิงเปรียบเทียบจุดแข็งของเทคโนโลยีกลุ่มนี้คือไม่เพียงช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า แต่ยังเป็น “เทคโนโลยีเชื่อมต่อ” ที่ทำให้ Renewable Energy, Storage และ EV ทำงานร่วมกันได้ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของกลุ่มนี้คือเงินลงทุนเริ่มต้นสูง ความซับซ้อนของระบบควบคุมและสื่อสารและความจำเป็นต้องมีบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญสูง อีกทั้งผลตอบแทนทางเศรษฐกิจมักไม่เกิดขึ้นทันทีเหมือนการลงทุนด้านการผลิตไฟฟ้าโดยตรง ดังนั้นในบริบทประเทศไทย กลุ่ม Smart Grid และ VPP จึงมีความเหมาะสมในระยะกลางมากกว่าระยะสั้น โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีพลังงานหมุนเวียนหนาแน่น เขตเมืองอัจฉริยะ เขตอุตสาหกรรม และโครงข่ายที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง กลุ่มนี้จึงตอบวัตถุประสงค์ข้อ 1 ในด้านการวิเคราะห์แนวโน้มเทคโนโลยีพลังงานและเชื่อมโยงบางส่วนกับวัตถุประสงค์ข้อ 3 ในแง่การออกแบบระบบไฟฟ้าในอนาคต

ในมิติที่สาม การบูรณาการพลังงานหมุนเวียน งานของ Qian และคณะ [11], Deng และคณะ [17], Beyazit [16], Wang และคณะ [15] และ Liu และคณะ [18] แสดงให้เห็นว่า Renewable Energy โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลมและการเชื่อมต่อกับระบบไฮโดรเจน มีบทบาทสูงต่อการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ในเชิงเปรียบเทียบพลังงานหมุนเวียนมีจุดแข็งสำคัญคือเทคโนโลยีมีความพร้อมสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ต้นทุนของพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมลดลงมากและสามารถลดการปล่อยได้จริงในระยะสั้นเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีเกิดใหม่ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดสำคัญคือปัญหาความไม่แน่นอนของการผลิต การต้องพึ่งพาระบบกักเก็บพลังงานหรือโครงข่ายอัจฉริยะและข้อจำกัดด้านพื้นที่ ขณะที่ไฮโดรเจนมีศักยภาพสูงในฐานะเทคโนโลยีระยะยาว มีข้อจำกัดเรื่องต้นทุน การจัดเก็บ ความปลอดภัย และโครงสร้างพื้นฐาน [15, 16, 17] ดังนั้นหากพิจารณาความพร้อมเชิงเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์ร่วมกันจะเห็นว่าพลังงานหมุนเวียนเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประเทศไทยในระยะสั้นถึงระยะกลาง โดยเฉพาะ Solar, Biomass และรวมเข้ากับ Storage ส่วน Hydrogen ควรถูกวางเป็นการลงทุนเชิงยุทธศาสตร์ในระยะยาวมากกว่าการใช้งานเชิงพาณิชย์เต็มรูปแบบในปัจจุบัน กลุ่มนี้จึงตอบวัตถุประสงค์ข้อ 1 ในด้านการวิเคราะห์เทคโนโลยีพลังงานและวัตถุประสงค์ข้อ 2 ในด้านการสังเคราะห์แนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ในมิติที่สี่ การจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียนเป็นกลุ่มที่มีลักษณะเด่นต่างจากกลุ่มอื่น เนื่องจากมุ่งลดการปล่อยผ่านการจัดการทรัพยากรและของเสียมากกว่าการเปลี่ยนแหล่งผลิตพลังงานโดยตรง งานของ Bjelic และคณะ [19] ชี้ว่า Waste-to-Energy (WtE) สามารถเป็นกลไกสำคัญในการลดของเสียและเพิ่มการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า ขณะที่ Khalid และคณะ [20] แสดงศักยภาพของวัสดุเหลือใช้ เช่น ขี้เลื่อยในการใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล และ Nieto และคณะ [21] เตือนถึงปัญหาขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาจกลายเป็นความเสี่ยงใหม่ของการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานในอนาคต ในเชิงสังเคราะห์กลุ่มนี้มีข้อได้เปรียบตรงที่เชื่อมโยงเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจหมุนเวียนและความ

มันคงทางพลังงานเข้าด้วยกัน แต่ข้อจำกัดคือประสิทธิภาพและความคุ้มค่าขึ้นอยู่กับชนิดของของเสีย ปริมาณการรวบรวม ระบบคัดแยก และความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐานท้องถิ่น ดังนั้นความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ของ WtE จึงมักสูงในเขตเมืองหรือพื้นที่อุตสาหกรรมที่มีของเสียต่อเนื่องมากกว่าพื้นที่ชนบท ในบริบทประเทศไทยแนวทางนี้มีศักยภาพในระยะสั้นถึงระยะกลาง โดยเฉพาะในเมืองใหญ่ เขตอุตสาหกรรม และระบบจัดการขยะเทศบาล แต่จำเป็นต้องพัฒนาคู่ขนานไปกับกฎระเบียบด้านสิ่งแวดล้อม การคัดแยกของเสียและการวางแผนการกำจัดขยะเทคโนโลยีพลังงานสะอาดในอนาคต เช่น PV Waste กลุ่มนี้จึงตอบวัตถุประสงค์ข้อ 2 ในด้านการสังเคราะห์แนวทางลดคาร์บอนและวัตถุประสงค์ข้อ 3 ในด้านข้อเสนอเชิงประจักษ์สำหรับประเทศไทย

เมื่อพิจารณาร่วมกันทั้ง 4 กลุ่ม พบข้อค้นพบสำคัญ 3 ประการ ประการแรก ไม่มีเทคโนโลยีใดสามารถตอบโจทย์การลดก๊าซเรือนกระจกได้ครบทุกมิติด้วยตนเอง แต่ละแนวทางมีบทบาทต่างกันในแต่ละช่วงเวลา ประการที่สอง เทคโนโลยีที่มีความพร้อมสูงและคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในปัจจุบัน เช่น Renewable Energy, Energy Efficiency และ WtE มีศักยภาพในการขับเคลื่อนระยะสั้นมากกว่าเทคโนโลยีเกิดใหม่อย่าง Hydrogen หรือ CCS ที่แม้มีศักยภาพเชิงเทคนิคสูง แต่ยังมีต้นทุนและความไม่พร้อมเชิงโครงสร้างพื้นฐาน ประการที่สาม ความสำเร็จของการเปลี่ยนผ่านพลังงานไม่ได้ขึ้นกับเทคโนโลยีอย่างเดียว แต่ขึ้นกับการออกแบบเชิงระบบซึ่งรวมถึงนโยบาย โครงสร้างตลาดไฟฟ้า ข้อมูล การกำกับดูแลและการยอมรับของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

ดังนั้นหากพิจารณาในบริบทประเทศไทย การสังเคราะห์นี้นำไปสู่ข้อเสนอเชิงระบบว่า การบรรลุ Carbon Neutrality และ Net Zero ควรใช้แนวทางแบบลำดับขั้น กล่าวคือ ระยะสั้น ควรเร่งขยายพลังงานหมุนเวียน การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน และระบบ WtE ที่พร้อมใช้งาน ระยะกลาง ควรลงทุนใน Smart Grid, VPP, ระบบกักเก็บพลังงาน และกลไกตลาดคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพ และระยะยาวควรพัฒนา Hydrogen, CCS และโครงสร้างพื้นฐานคาร์บอนต่ำขั้นสูง ทั้งนี้ การจัดลำดับดังกล่าวไม่ได้เป็นเพียงการเรียงตามระดับเทคโนโลยี แต่สะท้อนถึงความสมดุลระหว่างศักยภาพ การลดการปล่อย ความพร้อมเชิงเทคโนโลยี ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และความเหมาะสมต่อโครงสร้างพลังงานของประเทศไทย

ตารางที่ 1 ตารางสังเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเทคโนโลยีและแนวทางหลัก

กลุ่มเทคโนโลยี/ แนวทาง	จุดแข็ง	ข้อจำกัด	ความพร้อมเชิงเทคโนโลยี	ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์	ความเหมาะสมกับประเทศไทย	ช่วงเวลา
นโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน [5, 6, 7, 8, 11]	สร้างแรงจูงใจเชิงเศรษฐกิจ	ต้องมีระบบกำกับดูแลที่เข้มแข็ง	ปานกลาง	ปานกลางถึงสูง	เหมาะสมแต่ต้องพัฒนาฐานข้อมูลก่อน	สั้น-กลาง
Smart Grid และ VPP [12, 13, 14]	เพิ่มเสถียรภาพระบบ	ลงทุนสูง ระบบซับซ้อน	ปานกลางถึงสูง	ปานกลาง	เหมาะสมในพื้นที่เมือง/อุตสาหกรรม	กลาง
Renewable Energy Integration [11, 15, 16]	ลด GHG ได้สูง	ต้องมี Storage/Grid Support	สูงสำหรับ Solar/Biomass ปานกลางสำหรับ Hydrogen	สูงสำหรับ Solar/Biomass ยังต่ำสำหรับ Hydrogen	เหมาะสมมาก โดยเฉพาะ Solar และ Biomass	สั้น-ยาว

กลุ่มเทคโนโลยี/ แนวทาง	จุดแข็ง	ข้อจำกัด	ความพร้อมเชิงเทคโนโลยี	ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์	ความเหมาะสมกับประเทศไทย	ช่วงเวลา
Waste-to-Energy / Circular Economy [19, 20, 21]	ลดของเสียและสร้างมูลค่าเพิ่ม	ขึ้นกับระบบคัดแยกและปริมาณของเสีย	ปานกลาง	ปานกลางถึงสูง	เหมาะสมในเขตเมืองและอุตสาหกรรม	สั้น-กลาง

โดยสรุปการทบทวนวรรณกรรมครั้งนี้ไม่ได้เพียงรวบรวมเทคโนโลยีหรือมาตรการที่เกี่ยวข้องกับการลดก๊าซเรือนกระจก แต่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าแต่ละแนวทางมีบทบาทแตกต่างกันในเชิงเวลา เชิงระบบ และเชิงบริบทประเทศ การสังเคราะห์เชิงเปรียบเทียบช่วยให้เห็นว่าแนวทางที่มีความพร้อมสูงในปัจจุบัน เช่น พลังงานหมุนเวียนและการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานควรเป็นฐานหลักของการลดการปล่อยในระยะสั้น ขณะที่ Smart Grid, VPP และกลไกตลาดคาร์บอนเป็นตัวเร่งสำคัญในระยะกลาง ส่วน Hydrogen และเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำขั้นสูงควรได้รับการพัฒนาเชิงยุทธศาสตร์ในระยะยาว ข้อค้นพบนี้ช่วยยกระดับบทความจากการสรุปผลรายบทความไปสู่การสร้างองค์ความรู้เชิงระบบสำหรับการออกแบบนโยบายพลังงานคาร์บอนต่ำของประเทศไทย

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังปิดช่องว่างได้ในระดับการสังเคราะห์เชิงแนวคิดและข้อเสนอเชิงนโยบายมากกว่าการยืนยันเชิงปริมาณ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรต่อยอดด้วยการวิเคราะห์เชิงแบบจำลอง การประเมินต้นทุนและประโยชน์เฉพาะสำหรับประเทศไทย

5.เอกสารอ้างอิง

- [1] United Nations Framework Convention on Climate Change, *Paris Agreement*, 2015. [Online]. Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [2] National Institute for Environmental Studies (NIES), *Thailand Net Zero 2050 Roadmap*, 2023. [Online]. Available: https://www-iam.nies.go.jp/aim/pdf/Thailand_Net_Zero_2050Roadmap.pdf
- [3] Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, *Draft Climate Change Act*, 2024. [Online]. Available: <https://www.dcce.go.th/datacenter/3345/>
- [4] Matthew J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, 2021. [Online]. Available: <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n71>
- [5] J. Hu, K. Qin, R. Ma, W. Liu, J. Zhang, L. Pang, and J. Zhang, "A study on carbon emission flow tracking for new type power systems," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 151, 110455, 2025. doi: 10.1016/j.ijepes.2025.110455
- [6] J. Li, X. Liu, and X. Shao, "Collaborative carbon emission reduction in power supply and demand," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 157, 109840, 2024. doi: 10.1016/j.ijepes.2024.109840
- [7] W. Lyu, Z. Cui, M. Yuan, and E. Shan, "Cooperation for trans-regional electricity trading from the perspective of carbon quota: A cooperative game approach," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 156, 109773, 2023. doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109773
- [8] H. Liang, L. Xu, Y. Zhao, S. Zhang, C. Chen, J. Tang, L. Yang, and Z. Lin, "Day-ahead joint scheduling of multiple park-level integrated energy systems considering coupling uncertainty of electricity-carbon-gas prices,"

- International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 158, 109933, 2024. doi: 10.1016/j.ijepes.2024.109933
- [9] C. G. Ogbonna, C. C. Nwachi, I. O. Okeoma, and O. A. Fagbami, "Understanding Nigeria's transition pathway to carbon neutrality using the multilevel perspective," *Carbon Neutrality*, vol. 2, no. 24, 2023. doi: 10.1007/s43979-023-00065-5
- [10] O. Ideki, B. Barikor, and O. Ajoku, "Assessment of natural resources for energy transition in Rivers State," *Discover Energy*, vol. 4, 119, 2024. doi: 10.1007/s43937-024-00039-3
- [11] T. Qian, Q. Wu, Q. Hu, Z. Guo, and Z. Wu, "Coordinated planning for offshore wind and electricity–hydrogen system based on stochastic dual dynamic programming: A case study of coastal provinces in China," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 163, 110341, 2024. doi: 10.1016/j.ijepes.2024.110341
- [12] S. Hu, Y. Chen, and J. Feng, "A flexible interactive coordination control method of commercial virtual power plant based on WCVAR," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 160, 110128, 2024. doi: 10.1016/j.ijepes.2024.110128
- [13] P. Fan, S. Ke, J. Yang, Y. Wen, L. Xie, Y. Li, and S. Kamel, "A frequency cooperative control strategy for multimicrogrids with electric vehicles based on improved evolutionary deep reinforcement learning," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 159, 109991, 2024. doi: 10.1016/j.ijepes.2024.109991
- [14] J. Guo, C. Dou, D. Yue, B. Zhang, Z. Zhang, and Z. Zhang, "Cloud-edge-end collaboration-based joint design of frequency control and transmission communication for virtual power plants," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 166, 110564, 2025. doi: 10.1016/j.ijepes.2025.110564
- [15] L. Wang, X. Guo, J. Liu, C. Wang, Y. Wang, Y. Qiu, Z. Ling, X. Zeng, and D. Yuan, "Plasma-assisted hydrogen production: Technologies, challenges, and future prospects," *Processes*, vol. 13, no. 4, 1157, 2025. doi: 10.3390/pr13041157
- [16] N. I. Beyazit, "Comparative study of hydrogen storage and metal hydride systems: Future energy storage solutions," *Processes*, vol. 13, no. 5, 1506, 2025. doi: 10.3390/pr13051506
- [17] Z. Deng, J. Du, J. Tian, Z. Gan, B. Wang, and C. Zhao, "Toward hydrogen energy of electric power: Characteristics and main case studies in Shenzhen," *Processes*, vol. 11, no. 3, 728, 2023. doi: 10.3390/pr11030728
- [18] J. Liu, L. Wei, M. Zhou, Z. Zhang, B. Yuan, and Z. Wu, "Evaluating the substitution of coal-fired power plants with renewable energy," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 168, 110716, 2025. doi: 10.1016/j.ijepes.2025.110716
- [19] D. Bjelic, D. Neskovic Markic, D. Prokic, B. N. Malinovic, and A. Andrejevic Panic, "Waste to energy as a driver towards a sustainable and circular energy future for the Balkan countries," *Energy, Sustainability and Society*, vol. 14, no. 3, 2023. doi: 10.1186/s13705-023-00435-y
- [20] Y. Khalid, A. Tahir, N. Akhtar, I. Khan, F. Tahir, M. Arshad, and A. Raza, "From waste to energy: Investigating sawdust combustion as a cleaner alternative to coal," *Carbon Neutral Systems*, vol. 1, no. 10, 2025. doi: 10.1007/s44438-025-00010-2
- [21] M. Nieto, B. Morone, F. Garcia Rosillo, M. A. Munoz-Garcia, and M. d. C. Alonso-Garcia, "Photovoltaic waste generation in the context of sustainable energy transition in EU member states," *Resources*, vol. 14, no. 3, 37, 2025. doi: 10.3390/resources14030037