Journal of Energy and Environment Technology ISSN 2392-5701
http://jeet.siamtechu.net Review Article

การทบทวนงานวิจัยอย่างมีระบบ: การลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์และการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์เพื่อความยั่งยืน

A Systematic Review: Carbon Footprint Reduction and Technological Transition in the Compressor Industry for Sustainability

อริศโนชา เพ็ญหนู[1] เสรีย์ ตู้ประกาย[1*] กฤษดา พิศลยบุตร[1] อนุวัต เจริญสุข[2] นันท์นภัสร อินยิ้ม[1] วัฒนา จันทะโคตร[1]
Aritsanocha Pennoo[1] Seree Tuprakay[1*] Krissada Phitsanlabut[1] Anuwat Charoensuk[2] Nannapasorn Inyim[1]
Wattana Chanthakhot[1]

[1] *สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง*
[1] *Safety, Occupation Health and Environmental Engineering Program, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University*
[2] *สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ*
[2] *Logistics and Supply Chain Management Program, Faculty of Business Administration, Huachiew Chalermprakiew University*
[*] Corresponding author e-mail: seree.t@ru.ac.th

Received: October 30, 2025
Revise: November 26, 2025
Accepted: December 18, 2025

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอุตสาหกรรมการผลิตคอมเพรสเซอร์ โดยประเมินทั้งในระดับองค์กรและในบริบทเชิงอุตสาหกรรม พบว่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต (Scope 2) เป็นแหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สูงที่สุดของโรงงานคอมเพรสเซอร์ เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะ การทดสอบระบบ และการเดินเครื่องจักรต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวนมาก โดย Scope 2 มีสัดส่วนมากกว่า Scope 1 (เชื้อเพลิงและการรั่วไหลของสารทำความเย็น) อย่างชัดเจน ขณะที่ Scope 3 แม้จะครอบคลุมคาร์บอนฝังตัวในวัตถุดิบโลหะ กระบวนการผลิตวัตถุดิบ และการขนส่งผลิตภัณฑ์ไปยังตลาดส่งออก แต่ยังมีความแปรผันสูงขึ้นกับข้อมูลรายซัพพลายเออร์และโครงสร้างซัพพลายเชนของแต่ละบริษัท ในการศึกษาตลาดโลกพบว่า จีนครองส่วนแบ่งตลาดคอมเพรสเซอร์สูงสุดราว 42–43% รองลงมาได้แก่ยุโรป สหรัฐฯ และอินเดีย ซึ่งต่างเร่งปรับตัวด้านเทคโนโลยีสอดคล้องกับกฎระเบียบด้านสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวด ส่งผลต่อความสามารถแข่งขันของผู้ผลิตไทย ทางด้านเทคโนโลยี พบว่าการปรับปรุงประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์คอมเพรสเซอร์ การเลือกใช้สารทำความเย็นที่มีค่า GWP ต่ำ การออกแบบเชิงวิศวกรรมขั้นสูง และระบบบริหารจัดการพลังงาน เป็นมาตรการที่ช่วยลดการปล่อยรวมได้ราว 20–38% โดยเฉพาะมาตรการที่ช่วยลดการใช้ไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อ Scope 2 มากที่สุด เมื่อประเมินบริบทอุตสาหกรรมพบว่า คอมเพรสเซอร์เป็นอุตสาหกรรมที่สามารถลดการปล่อยได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมหนักอื่นที่พึ่งพาเทคโนโลยีต้นทุนสูง จึงมีบทบาทสำคัญในการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร เพิ่มความสามารถแข่งขัน และเตรียมความพร้อมสู่ตลาดส่งออกที่มีมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมเข้มงวด ตลอดจนสนับสนุนยุทธศาสตร์ความยั่งยืนของอุตสาหกรรมไทยในการมุ่งสู่เป้าหมาย Net Zero ในระยะยาว

คำสำคัญ: คาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร การประเมินวัฏจักรชีวิต การเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยี ความเป็นกลางทางคาร์บอน อุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์

Abstract

This study examines greenhouse gas (GHG) emissions in the compressor manufacturing industry at both the organizational level and the broader industrial context. The objective is to assess mitigation potential across the value chain (Scope 1–3) under ongoing technological transitions and evolving global market demands. The analysis reveals that electricity consumption (Scope 2) is the largest source of GHG emissions in compressor manufacturing. High electricity use in metal forming, machining, system testing, and continuous machine operation contributes to Scope 2 emissions that clearly exceed those from Scope 1 sources (fuel combustion and refrigerant leakage). Although Scope 3 emissions include embodied carbon in metal raw materials, upstream material processing, and transportation to export markets, these values vary significantly depending on supplier-specific data and supply-chain structures. A global market review shows that China dominates the compressor market with a 42–43% share, followed by Europe, the United States, and India. Each region is rapidly adapting to environmental regulations and low-carbon technology requirements, which directly influence the competitiveness of Thai manufacturers within international supply chains. On the technological front, key mitigation opportunities include efficiency improvements in inverter compressors, adoption of low-GWP refrigerants, advanced engineering design, and comprehensive energy-management systems. These measures can collectively achieve approximately 20–38% emission reduction, with the most significant impact linked to reductions in electricity consumption—therefore directly targeting Scope 2, the highest-emitting category. From an industrial perspective, the compressor sector is considered a “fast-transition” industry compared to heavy industries that depend on high-cost decarbonization technologies. As such, it plays an important role in lowering organizational carbon footprints, enhancing competitiveness, and meeting stricter environmental requirements in export markets. These developments also support the long-term sustainability strategy of Thai manufacturers as they progress toward Net Zero targets.

Keywords: Carbon Footprint of Organization, Life Cycle Assessment, Technological Transition, Carbon Neutrality, Compressor Industry

1. บทนำ

อุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์เป็นส่วนสำคัญของระบบทำความเย็นที่ใช้พลังงานคิดเป็นประมาณร้อยละ 20 ของพลังงานโลก [1] ทำให้อุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์มีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในภาคอุตสาหกรรม ในประเทศไทยตลาดอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์มีการเติบโตต่อเนื่อง ปี ค.ศ. 2023 ที่ส่งออกคอมเพรสเซอร์ 163.68 ล้านกิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 5.25 ของตลาดโลก และมีแนวโน้มเติบโตทั้งเชิงปริมาณและมูลค่าตลาดในอนาคต [2, 3] อย่างไรก็ตามการเติบโตนี้มีผลกระทบหลายมิติ ได้แก่ การเพิ่มสูงของอุณหภูมิโลก การสูญพันธุ์ของแนวปะการัง และการเพิ่มความรุนแรงของภัยธรรมชาติ (ด้านระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม) การเพิ่มภาระต้นทุนการดำเนินในอนาคตจากมาตรการการค้าคาร์บอนระหว่างประเทศ CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism) ในปี ค.ศ. 2026–2027 (ด้านเศรษฐกิจ) และส่งผลต่อคุณภาพอากาศ และความเสี่ยงด้านสุขภาพในระยะยาว (ด้านสุขภาพและสังคม) [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]

ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีคอมเพรสเซอร์และการปรับปรุงประสิทธิภาพจึงเป็นกลไกสำคัญ เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของภาคอุตสาหกรรม ช่วยให้ผู้ประกอบการในห่วงโซ่อุปทานสามารถแข่งขันได้ในระยะยาวภายใต้มาตรการคาร์บอนระหว่างประเทศ สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ได้แก่ SDG 7 การเข้าถึงพลังงานสะอาด, SDG 9 การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน อุตสาหกรรมและนวัตกรรม, และ SDG 13

การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [12] รวมทั้งขาดการศึกษาเปรียบเทียบเชิงระบบในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ของไทย จึงดำเนินการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของคอมเพรสเซอร์ประเภทต่าง ๆ เปรียบเทียบศักยภาพการลดการปล่อยของเทคโนโลยีในปัจจุบันและอนาคต เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนของภาคอุตสาหกรรม [13]

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ทบทวนและสังเคราะห์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ โดยสำรวจแนวทางการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากงานวิจัยในระดับสากลและประเทศไทย เพื่อแสดงภาพรวมและแนวโน้มการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ และ (2) วิเคราะห์และเปรียบเทียบศักยภาพของเทคโนโลยีคอมเพรสเซอร์ที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก พร้อมเสนอแนวทางเชิงกลยุทธ์เพื่อสนับสนุนการยกระดับอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ของไทยในการเปลี่ยนผ่านสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนและการแข่งขันในตลาดโลกอย่างยั่งยืน

3. เครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้แนวทาง การทบทวนเชิงระบบ (Systematic Research Synthesis) เพื่อรวบรวม ความรู้ด้านการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ โดยอ้างอิงแนวทาง PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [13] เพื่อให้การคัดเลือกงานวิจัยมีความโปร่งใส และตรวจสอบได้ด้วยการกำหนด n คือ จำนวนงานวิจัยตามวิธีการ ดังนี้

3.1 การระบุงานวิจัย (Identification)

ทำการสืบค้นเอกสารจากฐานข้อมูลวิชาการหลัก ได้แก่ Scopus, ScienceDirect, SN Applied Sciences และ ResearchGate รวมทั้งรายงานจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยใช้คำสำคัญทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ได้แก่ life cycle assessment, carbon footprint, compressor, carbon neutrality, greenhouse gas emissions, compressor technology efficiency [14, 15] ครอบคลุมช่วงปี ค.ศ. 2015–2025

3.2 การคัดกรอง (Screening)

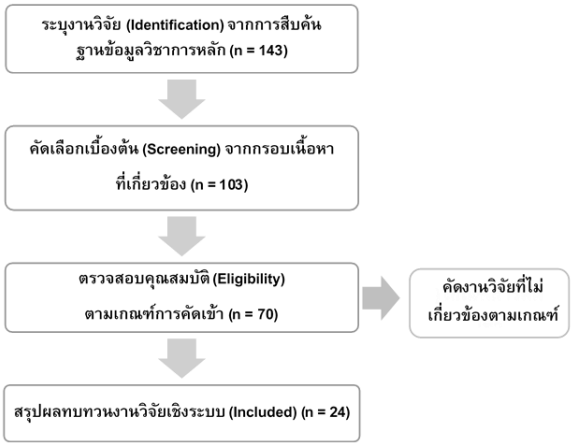
คัดกรองเอกสารเบื้องต้นตามประเด็นที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ ได้แก่ (1) แนวทางการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศโดยอ้างอิงข้อมูลจากเอกสารสืบเนื่องการประชุมวิชาการนานาชาติว่าด้วยคอมเพรสเซอร์ รายงานจากการประชุมนานาชาติว่าด้วยความก้าวหน้าในการวิจัยพลังงานสะอาด รายงานด้านความยั่งยืนของบริษัทเครื่องปรับอากาศชั้นนำ ตลอดจนข้อมูลจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) และ (2) เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ และตัดทิ้งเอกสารที่ไม่เกี่ยวข้องกับภาคอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์หรือไม่มีข้อมูลด้านการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงออก

3.3 การตรวจสอบคุณสมบัติ (Eligibility)

ประเมินคุณภาพและความเหมาะสมของเอกสาร โดยคัดเข้า: งานวิจัยที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ (peer-reviewed) และรายงานจากองค์กรระหว่างประเทศหรือหน่วยงานวิชาการด้านอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ พลังงาน นวัตกรรม เทคโนโลยีและก๊าซเรือนกระจก และคัดออก: เอกสารที่ไม่สามารถตรวจสอบข้อมูลได้ หรือเป็นงานด้านสิ่งแวดล้อมทั่วไปที่ไม่เชื่อมโยงกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการปรับปรุงด้านเทคโนโลยีภาคอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์

3.4 การสรุปผล (Included)

หลังคัดเลือกงานวิจัยอย่างเป็นระบบได้จำนวน 24 เรื่อง เพื่อนำไปวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบตามประเด็นหลัก ได้แก่ รูปแบบและปริมาณการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ และเทคโนโลยีและศักยภาพการลดก๊าซเรือนกระจกของกิจกรรม หรือกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์โดยกรอบการทบทวนเหล่านี้ช่วยสนับสนุนทิศทางการวิจัย และนโยบายด้านการลดก๊าซเรือนกระจกให้สอดคล้องกับ SDGs



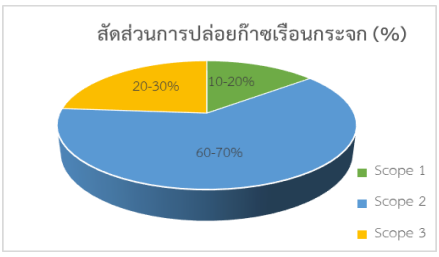
รูปที่ 1 เครื่องมือและวิธีการดำเนินการทบทวนงานวิจัยเชิงระบบ

4. ผลการศึกษางานวิจัย

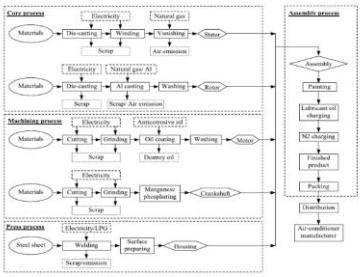
จากการทบทวนและสังเคราะห์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์

4.1 การวิเคราะห์สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามขอบเขต (GHG Scopes)

สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโรงงานคอมเพรสเซอร์ แบ่งออกเป็น 3 ขอบเขตหลัก ได้แก่ Scope 1, Scope 2 และ Scope 3 ซึ่งแต่ละ Scope มีแหล่งกำเนิดและข้อมูลกิจกรรม (Activity Data) ที่แตกต่างกัน โดยมีผลกระทบต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในสัดส่วนไม่เท่ากัน



รูปที่ 2 สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ [16, 17, 18]



รูปที่ 3 กระบวนการผลิตโรตารีคอมเพรสเซอร์

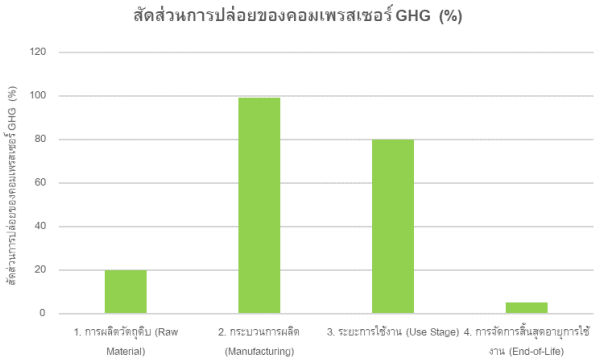
จากรูปที่ 2 พบว่าสัดส่วนการปล่อยจาก Scope 2 สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนให้เห็นว่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตคอมเพรสเซอร์เป็นจุดวิกฤตของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โรงงานต้องใช้เครื่องจักรความแม่นยำสูงต่อเนื่อง เช่น กลึง เจียร อบชุบ และทดสอบ (รูปที่ 3) ทำให้ไฟฟ้าเป็นต้นทุนพลังงานหลัก [16] ดังนั้น การลด Scope 2 จึงต้องมุ่งเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องจักร ลด Idle Time ปรับปรุงกระบวนการผลิต ใช้พลังงานสะอาด และใช้ข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์เพื่อสร้างความได้เปรียบเชิงการแข่งขัน [17]

Scope 3 รองลงมา โดยส่วนใหญ่มาจากคาร์บอนฝังตัวในวัตถุดิบต้นน้ำ โดยเฉพาะเหล็กและทองแดงประมาณ 20–30% (รูปที่ 3) รวมถึงการขนส่งวัตถุดิบ [18] จึงสามารถลดได้ผ่านการเลือกวัสดุอย่างเหมาะสม การใช้โลหะรีไซเคิล และการบริหารห่วงโซ่อุปทานสีเขียว ซึ่งเป็นมาตรการสำคัญในระยะกลางถึงระยะยาว

Scope 1 มีสัดส่วนน้อยที่สุด แต่มีความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อมสูง เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงและการรั่วไหลของสารทำความเย็น ซึ่งมี GWP สูงมาก [19] แม้ปริมาณการปล่อยจะต่ำ แต่ผลกระทบต่อโลกร้อนต่อหน่วยสูง จึงต้องให้ความสำคัญกับการควบคุมการรั่วไหลและการเปลี่ยนไปใช้สารทำความเย็นแบบ Low-GWP

โดยสรุป ผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 Scopes ชี้ว่า การลดการปล่อยอย่างมีประสิทธิภาพต้องดำเนินการทั้งด้านเทคโนโลยีและการบริหารจัดการ ได้แก่ 1) เพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและพลังงานหมุนเวียนเพื่อลด Scope 2 (สนับสนุน SDG 7 และ SDG 13) 2) จัดการสารทำความเย็นและลดการรั่วไหลเพื่อลด Scope 1 (สอดคล้องกับ SDG 12) และ 3) พัฒนาห่วงโซ่อุปทานสีเขียวเพื่อลด Scope 3 (สนับสนุน SDG 9 และ SDG 12)

4.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบสัดส่วนวงจรชีวิตของคอมเพรสเซอร์ (Life Cycle Inventory Analysis) ในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก



รูปที่ 4 สัดส่วนวงจรชีวิตของคอมเพรสเซอร์ [21, 22, 23, 24, 25]

จากกราฟที่ 4 วงจรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของคอมเพรสเซอร์ครอบคลุมตั้งแต่ การผลิตวัตถุดิบ (Raw Material) เช่น เหล็กและทองแดง ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลักเนื่องจากมีคาร์บอนฝังตัวสูง โดยพลังงานหลักที่ใช้ในการผลิตได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมันดิบ คิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 15–20 ของการปล่อยรวมตลอดวงจรชีวิต [21] ต่อมาคือกระบวนการผลิต (Process/Manufacturing) ที่ใช้ไฟฟ้าปริมาณมากในขั้นตอนการกลึง อบชุบ และทดสอบ ส่งผลให้การปล่อยใน Scope 2 ของโรงงานเป็นแหล่งสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 99.1–99.3 ของการใช้พลังงานทั้งหมด [22, 23] อีกทั้งยังมีการปล่อยจากการรั่วไหลของสารทำความเย็นในระบบทดสอบ [24]
มากกว่าระยะการใช้งาน (Use Stage) ของผู้บริโภค ถือเป็นจุดที่ปล่อยสูงที่สุด โดยมีการใช้ไฟฟ้าสูงถึง 70–80% เนื่องจากคอมเพรสเซอร์ต้องทำงานต่อเนื่อง ทั้งนี้การปรับอุณหภูมิขึ้นเพียง 1°C สามารถลดการปล่อย CO_2 ได้ราว 6.37% ซึ่งสะท้อนถึงบทบาทสำคัญของเทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์และพฤติกรรมผู้บริโภค [23, 25] ส่วนการกำจัด (Disposal) และระยะสุดท้ายของการใช้งาน (End-of-Life) ส่วนมากมาจากการรั่วไหลของสารทำความเย็นที่มีค่าศักยภาพในการทำลายชั้นโอโซน (ODP) และค่า GWP สูง แม้ผลกระทบด้าน Climate Change จะมีสัดส่วนต่ำมาก (<5% ของก๊าซเรือนกระจกรวมตลอดวงจรชีวิต) แต่หากมีการจัดการอย่างเป็นระบบ เช่น การรีไซเคิลโลหะ จะสามารถลดการปล่อยเพิ่มเติมและสร้างโอกาสของเศรษฐกิจหมุนเวียนได้ (Circular Economy) [23, 24, 25]

ดังนั้น เมื่อพิจารณาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวงจรคอมเพรสเซอร์ พบว่าช่วงกระบวนการผลิตของคอมเพรสเซอร์เป็นแหล่งปล่อยที่สูงกว่าขั้นอื่น เนื่องจากการพึ่งพาไฟฟ้าปริมาณมาก โดยเฉพาะในขั้นตอนการผลิตชิ้นงาน

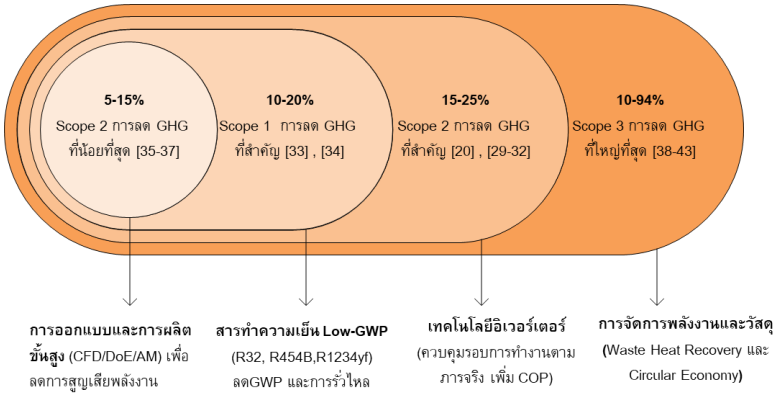
เพื่อส่งเข้าประกอบและการทดสอบทุกเครื่องก่อนส่งมอบ สะท้อนถึงความจำเป็นในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตที่ประหยัดพลังงาน การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักร และการเปลี่ยนไปใช้พลังงานหมุนเวียนในโรงงาน เพื่อช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตได้

4.3 ศักยภาพการลดคาร์บอนของคอมเพรสเซอร์แต่ละประเภท

จากการประเมินข้อ 4.2 พบว่าระยะการใช้งานเป็นแหล่งการปล่อยสูงสุดของคอมเพรสเซอร์ โดยเฉพาะไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับ Scope 2 รองลงมาคือ Scope 3 จากวัตถุดิบและการขนส่ง และ Scope 1 จากการรั่วไหลของสารทำความเย็น ดังนั้นการลด GHG จึงเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและใช้สารทำความเย็น GWP ต่ำ เช่น อินเวอร์เตอร์โรตารี่คู่ใช้ R32 ลดได้สูงสุด ~38% เหมาะกับตลาดเอเชีย ส่วนสโครลลดได้ ~20–35% ใช้กับอาคาร คอมเพรสเซอร์สกรูลด ~15–30% ในอุตสาหกรรม และลูกสูบลด ~10–20% ยังนิยมเพราะราคาต่ำ สรุปคือเทคโนโลยีด้านพลังงานและสารทำความเย็นสำคัญในปัจจุบัน ขณะที่การพัฒนาซัพพลายเชนและรีไซเคิลเป็นมาตรการระยะยาวเพื่อความยั่งยืนของอุตสาหกรรม [26-29]

4.4 เทคโนโลยีและนวัตกรรมในการลดคาร์บอนของคอมเพรสเซอร์

การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์สามารถทำได้หลายแนวทาง ทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน ารใช้สารทำความเย็นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนการจัดการวัตถุดิบและพลังงานหมุนเวียนดังแสดงรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเชื่อมโยงแนวทางด้านเทคโนโลยีและศักยภาพการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์

จากรูปที่ 5 พบว่าเทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์เป็นมาตรการที่นำไปใช้ได้ทันที ลดการสูญเสียจากการเปิด–ปิด เพิ่ม COP ช่วยลด Scope 2 ได้ราว 15–25% [20], [29–32] สารทำความเย็น Low-GWP เช่น R32, R454B ช่วยลดทั้งการใช้พลังงานและการรั่วไหล (Scope 1) ได้ 10–20% โดยพบว่าการฉีดไอ (vapor injection) เพิ่ม COP ได้ 4.3–4.4% [33], [34] Advanced Design เช่น CFD/DoE การจัดการอุณหภูมิ twin screw และ motion efficiency ของ scroll ช่วยลดพลังงานลง 5–15% [35–37] ระบบจัดการพลังงานทิ้ง เช่น WHR ใน oil-free screw compressors นำความร้อนกลับมาใช้ได้ 90–94% และ Circular Economy ลด Scope 3 ได้อย่างมีนัยสำคัญ [38–43] สรุปแนวทางที่เน้นประสิทธิภาพพลังงานตอบโจทย์การลดการปล่อยช่วงใช้งานที่มีสัดส่วนสูงสุด สอดคล้อง SDG 7 และ SDG 13 ขณะที่สารทำความเย็น Low-GWP และการจัดการวัสดุสนับสนุน SDG 9 และ SDG 12 ส่งเสริมการเปลี่ยนผ่านสู่อุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์คาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน

4.5 กรณีศึกษาการเปลี่ยนผ่านด้านเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์

การเปลี่ยนผ่านด้านเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ไม่เพียงช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก แต่ยังสร้างโอกาสทางธุรกิจใหม่ทั้งด้านผลิตภัณฑ์ ตลาด และห่วงโซ่อุปทาน แนวทางสำคัญ ได้แก่ การใช้มอเตอร์อินเวอร์เตอร์ เพื่อลดพลังงานในช่วง Use Stage ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยคาร์บอนสูงสุด และการเปลี่ยนสารทำความเย็นไปสู่ชนิด Low-GWP หรือสารธรรมชาติ ได้แก่ ญี่ปุ่น: ผู้ผลิต Daikin และ Panasonic ใช้เทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์ร่วมกับ R32 ตั้งแต่ทศวรรษ 1990 ช่วยลดการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 20–30% ตลอดอายุการใช้งาน และลดการปล่อยคาร์บอนจากการรั่วไหลของสารทำความเย็นราว

67% เมื่อเทียบกับ R410A นอกจากนี้ยังสร้างรายได้จากการขาย carbon credits โดยเฉพาะในตลาดเอเชีย–แปซิฟิกที่มีอัตราเติบโตสูง [16, 26, 44], ยุโรป: Bitzer และ GEA Group พัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้สารทำความเย็นธรรมชาติ สอดคล้องกับ EU F-gas Regulation การเปลี่ยนผ่านนี้ช่วยลดศักยภาพการก่อโลกร้อนจากสารทำความเย็นเกือบทั้งหมด อีกทั้งเปิดตลาดใหม่ด้านบริการรวบรวมและรีไซเคิลสารทำความเย็น สนับสนุน circular economy และเป้าหมาย Net Zero ของ European Green Deal ภายในปี 2050 [30, 45–48] จีนและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้: ผู้ผลิตใหญ่ เช่น Midea และ Gree ลงทุนในอินเวอร์เตอร์คอมเพรสเซอร์และ R32 อย่างต่อเนื่อง ลดการใช้ไฟฟ้าของผู้บริโภคจำนวนมาก และช่วยลดการปล่อยคาร์บอนระดับประเทศ พร้อมเพิ่มโอกาสในตลาดส่งออกผ่านฉลาก Energy Star และ Carbon Label ซึ่งเสริมความสามารถแข่งขันในอนาคต [49–51] จากกรณีศึกษาพบว่า การเปลี่ยนผ่านด้านเทคโนโลยีที่เน้นอินเวอร์เตอร์และสารทำความเย็น Low-GWP เป็นมาตรการสำคัญที่ลดการปล่อยคาร์บอน สร้างมูลค่าเพิ่ม และสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน รวมทั้งการตอบสนองต่อกฎหมายและเป้าหมายความยั่งยืนระดับสากล

4.6 การเปลี่ยนผ่านด้านเทคโนโลยีในภาคอุตสาหกรรม

การเปลี่ยนผ่านด้านเทคโนโลยีในภาคอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์สู่เทคโนโลยีคาร์บอนต่ำแตกต่างกันตามต้นทุน เวลา และความพร้อมของนวัตกรรมอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์จัดเป็นกลุ่ม Quick Win สามารถลดการปล่อยก๊าซ 20–38% ในระยะสั้นผ่านการใช้ระบบอินเวอร์เตอร์ สารทำความเย็น Low-GWP และการออกแบบประสิทธิภาพสูง โดยไม่ต้องลงทุนโครงสร้างพื้นฐานใหม่ [52, 53] ในทางตรงข้าม อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และเหล็ก จัดเป็นกลุ่ม hard-to-abate sectors เนื่องจากแหล่งปล่อยหลักมาจากกระบวนการพื้นฐาน ต้องอาศัยเทคโนโลยีใหม่ที่มีต้นทุนสูงและใช้เวลาพัฒนา เช่น การดักจับคาร์บอนและไฮโดรเจน [54, 55] อุตสาหกรรมยานยนต์ แม้ศักยภาพลดการปล่อยสูง 25–50% ผ่านการเปลี่ยนไปสู่รถยนต์ไฟฟ้า แต่ยังถูกจำกัดด้วยห่วงโซ่อุปทานและความท้าทายด้านวัตถุดิบและความยั่งยืน [56, 57]

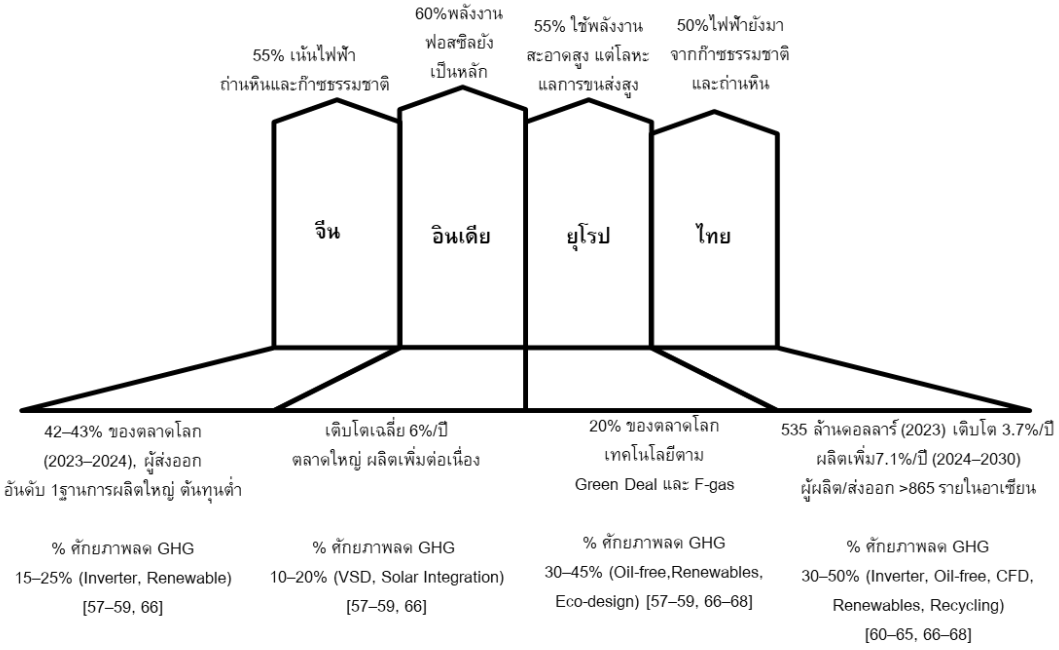
4.7 ตลาดคอมเพรสเซอร์กับการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

จีนครองสัดส่วนตลาดคอมเพรสเซอร์โลกสูงสุด 42–43% ในปี 2023–2024 และเป็นผู้ส่งออกอันดับหนึ่ง อินเดียเติบโตเฉลี่ย 6% ต่อปี ยุโรปประมาณ 20% ของตลาดเน้นเทคโนโลยีสอดคล้อง European Green Deal และ F-gas Regulation ส่วนสหรัฐฯ มีจุดแข็งด้านคอมเพรสเซอร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยีขั้นสูง [57–59]

สำหรับไทย แม้ตลาดเล็กกว่าจีน แต่เติบโตต่อเนื่อง มูลค่าปี 2023 ประมาณ 535.3 ล้านดอลลาร์ คาดเติบโต 3.7% ต่อปี ผลิตเพิ่มเฉลี่ย 7.1% ต่อปี (2024–2030) ส่งออกปี 2023 อยู่ที่ 163.68 ล้านกก. คาดเพิ่มเป็น 187 ล้านกก. ในปี 2028 ตลาดหลัก ได้แก่ เวียดนาม อินเดีย และอินโดนีเซีย โดยมีผู้ผลิตและผู้ส่งออกกว่า 865 ราย [63–65]

การเพิ่มขึ้นของการผลิตและส่งออกไทยส่งผลต่อการปล่อย GHG ทั้ง Scope 1 จากเชื้อเพลิงและการรั่วไหลสารทำความเย็น, Scope 2 จากไฟฟ้าที่พึ่งพาก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน, และ Scope 3 จากคาร์บอนฝังตัวในโลหะและการขนส่งไปตลาดส่งออก (~80% ของการส่งออกทั้งหมด) [60–65]

แม้เอเชีย–แปซิฟิกครองตลาดสูง แต่จีนและอินเดียยังพึ่งพาพลังงานฟอสซิล แตกต่างจากยุโรปและสหรัฐฯ ที่มีมาตรฐานสิ่งแวดล้อมเข้มงวด เช่น European Green Deal, F-gas Regulation และ CBAM [66, 67] ดังนั้นผู้ผลิตไทยจำเป็นต้องลงทุนเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูง เช่น อินเวอร์เตอร์ คอมเพรสเซอร์ออยล์ฟรี และการออกแบบ CFD พร้อมกลยุทธ์จัดการคาร์บอน เพื่อรักษาความสามารถแข่งขันและสอดคล้องทิศทาง carbon neutrality [66–68] ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเชื่อมโยงตลาดคอมเพรสเซอร์ และศักยภาพลด GHG โดยเทคโนโลยีหลัก

5. สรุปผลการสังเคราะห์งานวิจัยเชิงระบบ

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในภาคอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ สามารถสะท้อนภาพรวมของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งจากการใช้พลังงานจากการผลิตในโรงงาน (Scope 2), การใช้เชื้อเพลิงและการรั่วไหลของสารทำความเย็น (Scope 1) และคาร์บอนฝังตัวจากวัตถุดิบและการขนส่ง (Scope 3) โดยข้อมูลที่ได้จากการทบทวนเชิงระบบชี้ว่า Scope 2 เป็นแหล่งปล่อยสูงสุดของโรงงาน ผลลัพธ์นี้สะท้อนความสำคัญของการบริหารจัดการพลังงานและการลงทุนด้านพลังงานสะอาด การใช้เทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์และการจัดการวัตถุดิบสีเขียวที่เกี่ยวเนื่องกับการได้มาซึ่งวัตถุดิบสามารถลดการปล่อยก๊าซอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่การปรับปรุงกระบวนการผลิตและการรีไซเคิลช่วยลด Scope 3 และสร้างโอกาสในเชิงเศรษฐกิจหมุนเวียน

การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างโรงงานและผู้ผลิตในระดับภูมิภาคยังชี้ให้เห็นว่าการลงทุนในเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูงและการจัดการคาร์บอนอย่างเป็นระบบช่วยลดความเสี่ยงจาก มาตรการการค้าคาร์บอนระหว่างประเทศ (CBAM) และสนับสนุนความสามารถแข่งขันของผู้ผลิตไทยในตลาดโลก นอกจากนี้ ผลการศึกษาเชื่อมโยงอย่างชัดเจนกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) โดยเฉพาะ SDG 7 การใช้พลังงานสะอาด, SDG 9 การเข้าถึงอุตสาหกรรม นวัตกรรม และโครงสร้างพื้นฐาน และมุ่งสู่ SDG 13 การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ทำให้ชี้ชัดได้ว่าการจัดการคาร์บอนในระดับภาคอุตสาหกรรมสอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาระดับโลก และสามารถใช้เป็นกรอบสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ของผู้บริหารได้อีกด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Ritchie H. (2024). Air conditioning causes around 3% of greenhouse gas emissions. How will this change in the future? [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://ourworldindata.org/air-conditioning-causes-around-greenhouse-gas-emissions-will-change-future

[2] MarkNtel Advisors. (2025). Thailand Portable Diesel Air Compressor Market Size. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.marknteladvisors.com/research-library/thailand-portable-diesel-air-compressor-market.htmlNext Move

Strategy Consulting. Thailand Air Compressor Market Analysis. [อินเทอร์เน็ต]. 25 ก.พ. 2025 [เข้าถึงเมื่อ 22 ส.ค. 2568]. เข้าถึงได้จาก: https://www.nextmsc.com/report/thailand-air-compressor-market

[3] Next Move Strategy Consulting. (2025). Thailand Air Compressor Market Analysis. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.nextmsc.com/report/thailand-air-compressor-market

[4] ตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย. (2565). ทำความรู้จัก CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.set.or.th/th/about/setsource/insights/article/55-cbam

[5] ถลัชนันท์ ตันติเวชวุฒิกุล, กรรณิการ์ ธรรมพานิชวงค์, จิรายุ จันทรสาขา, จิดาภา ลู่วิโรจน์, รินรดา ฑีฆธนานนท์. (2567). มาตรการ CBAM กระทบการส่งออกไทยแค่ไหน อย่างไร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.pier.or.th/abridged/2024/13/

[6] National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2024). What is the greenhouse effect? [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://science.nasa.gov/climate-change/faq/what-is-the-greenhouse-effect/

[7] Allen MR, Shine KP, Fuglestvedt JS, Millar RJ, Cain M, Frame DJ, Macey AH. (2018). A solution to the misrepresentations of CO_2-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. NPJ Climate and Atmospheric Science. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.nature.com/articles/s41612-018-0026-8

[8] Hoegh-Guldberg O, Jacob D, Taylor M, Bindi M, Brown S, Camilloni I, Zhou G, et al. (2018). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H-O, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, et al., editors. Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report. Cambridge: Cambridge University Press. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.cambridge.org/core/books/global-warming-of-15c/impacts-of-15c-global-warming-on-natural-and-human-systems/DB3792F393E5009842EE23B9532B4654

[9] World Health Organization (WHO). (2023). Climate change and health. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health

[10] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). The Paris Agreement. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement

[11] United States Environmental Protection Agency (EPA). (2025). Global Greenhouse Gas Overview. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-overview

[12] ศูนย์วิจัยและสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Centre for SDG Research and Support: SDG Move). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.sdgmove.com/intro-to-sdgs/

[13] Page MJ, Moher D, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hróbjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald S, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch VA, Whiting P, McKenzie JE. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n160. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://dx.doi.org/10.1136/bmj.n160

[14] Schulze R, Knödl S. (2023). Digital Twin Technology for Compressor and Turbine Efficiency Evaluation – Application to Energy and GHG savings. Singapore: Gastech Exhibition & Conference; 5–8 ก.ย. 2023. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.researchgate.net/publication/373917175_Digital_Twin_Technology_for_Compressor_and_Turbine_Efficiency_Evaluation-Application_to_Energy_and_GHG_savings

[15] Tătaru AC, Tătaru D, Petrilean D. (2025). Reduction of energy consumption and greenhouse gas emissions in oil injected helical screw compressors. Revista Minelor, 31(1), 100–106. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://doi.org/10.2478/minrv-2025-0009

[16] International Energy Agency (IEA). (2018). World Energy Outlook 2018. Paris: International Energy Agency; 13 พ.ย. 2018. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018

[17] Kobos PH, Malczynski LA, Walker LTN, Borns DJ, Klise GT. (2018). Timing is everything: A technology transition framework for regulatory and market readiness levels. Technological Forecasting and Social Change. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004016251830252X

[18] Ouyang T, Zhao Z, Lu J, Su Z, Li J, Huang H. (2020). Waste heat cascade utilisation of solid oxide fuel cell for marine applications. J Clean Prod. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620341780

[19] United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). Technical Options Report: Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps. Nairobi: UNEP Ozone Secretariat. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://ozone.unep.org/resources

[20] Rewlay-ngoen C, Papong S. (2020). Environmental impact assessment of a rotary compressor in Thailand based on life cycle assessment methodology. SN Applied Sciences. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-03278-w

[21] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

[22] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

[23] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

[24] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

[25] International Energy Agency (IEA). (2020). World Energy Outlook 2020. Paris: International Energy Agency. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020

[26] International Energy Agency (IEA). (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. Paris: International Energy Agency. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050

[27] International Energy Agency (IEA). (2023). Energy Technology Perspectives 2023. Paris: International Energy Agency. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023

[28] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). World Energy Transitions Outlook 2023. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.irena.org/publications/2023/Jun/WETO-2023

[29] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Green Hydrogen Cost and Potential. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Global-Hydrogen-Trade-to-Meet-Climate-Goal

[30] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). World Energy Transitions Outlook 2023. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.irena.org/publications/2023/Jun/WETO-2023

[31] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Green Hydrogen Cost and Potential. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Global-Hydrogen-Trade-to-Meet-Climate-Goal

[32] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). The Paris Agreement. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement

[33] European Commission. (2019). The European Green Deal. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

[34] European Commission. (2019). The European Green Deal. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

[35] European Commission. (2023). Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en

[36] International Monetary Fund (IMF). (2022). Climate Change and the Global Economy. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.imf.org/en/Topics/climate-change

[37] World Bank. (2023). State and Trends of Carbon Pricing 2023. Washington, DC: World Bank. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/publications/state-and-trends-of-carbon-pricing-2023

[38] World Economic Forum (WEF). (2023). The Global Risks Report 2023. Geneva: World Economic Forum. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2023

[39] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2023). Industrial Policy for the Green Transition. Paris: OECD. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.oecd.org/greengrowth/industrial-policy-for-the-green-transition.htm

[40] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2022). Industrial Development Report 2022: The Future of Industrialization in a Post-Pandemic World. Vienna: UNIDO. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.unido.org/resources-publications-flagship-industrial-development-report

[41] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2024). Industrial Development Report 2024: Green Industrialization. Vienna: UNIDO. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.unido.org/resources-publications-flagship-industrial-development-report

[42] United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). Emissions Gap Report 2023. Nairobi: UNEP. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023

[43] United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People. Cambridge: Cambridge University Press. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-6

[44] International Energy Agency (IEA). (2023). Tracking Industry 2023. Paris: International Energy Agency. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2023

[45] International Energy Agency (IEA). (2023). Energy Efficiency 2023. Paris: International Energy Agency. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023

[46] International Energy Agency (IEA). (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: International Energy Agency. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions

[47] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Renewable Power Generation Costs in 2022. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.irena.org/publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022

[48] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). Innovation Outlook: Renewable Methanol. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.irena.org/publications/2021/Sep/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol

[49] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Green Hydrogen: A Guide to Policy Making. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen-A-guide-to-policy-making

[50] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2023). Nationally Determined Contributions (NDCs). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs

[51] European Commission. (2022). REPowerEU Plan. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/repowereu-plan_en

[52] European Commission. (2021). Fit for 55. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/fit-55_en

[53] European Environment Agency (EEA). (2023). Greenhouse gas emission statistics – emission inventories. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emission-statistics-emission-inventories

[54] World Bank. (2023). World Development Report 2023: Migrants, Refugees, and Societies. Washington, DC: World Bank. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2023

[55] World Bank. (2023). Global Economic Prospects, June 2023. Washington, DC: World Bank. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.worldbank.org/en/publication/global-economic-prospects

[56] World Economic Forum (WEF). (2023). Net-Zero Industry Tracker 2023. Geneva: World Economic Forum. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.weforum.org/publications/net-zero-industry-tracker-2023

[57] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2023). OECD Green Growth Indicators 2023. Paris: OECD. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.oecd.org/greengrowth/green-growth-indicators-2023.htm

[58] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2021). Aligning Energy Policies with Climate Goals. Paris: OECD. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.oecd.org/energy/aligning-energy-policies-with-climate-goals.htm

[59] United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2023). World Investment Report 2023: Investing in Sustainable Energy for All. Geneva: UNCTAD. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://unctad.org/webflyer/world-investment-report-2023

[60] United Nations Development Programme (UNDP). (2024). Human Development Report 2023/24: Breaking the Gridlock. New York: UNDP. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://hdr.undp.org/content/2023-24-human-development-report

[61] United Nations Development Programme (UNDP). (2023). Sustainable Development Goals Report 2023. New York: UNDP. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/

[62] United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). Global Methane Assessment: 2030 Baseline Report. Nairobi: UNEP. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.unep.org/resources/global-methane-assessment-2030-baseline-report

[63] United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). Cooling Emissions and Policy Synthesis Report 2020. Nairobi: UNEP. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.unep.org/resources/report/cooling-emissions-and-policy-synthesis-report-2020

[64] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). Special Report on Global Warming of 1.5°C. Geneva: IPCC. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.ipcc.ch/sr15/

[65] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Geneva: IPCC. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/

[66] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva: IPCC. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/