

การศึกษาวิเคราะห์การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตที่ยั่งยืน : กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ

AN ANALYTICAL STUDY ON THE PRODUCT CARBON FOOTPRINT ASSESSMENT BASED ON LIFE CYCLE ASSESSMENT APPROACH FOR THE DEVELOPMENT OF SUSTAINABLE PRODUCTION TECHNOLOGIES: A CASE STUDY OF CONCENTRATED CAR WASH PRODUCTS IN A CHEMICAL MANUFACTURING INDUSTRY IN SAMUT PRAKAN PROVINCE

อิงค์ณภัศ กรศิริชัยวัชร¹ กวินเวทย์ พิพิธนัทธยธร^{1*} วันเพ็ญ วิโรจน์เจริญวงศ์²

Ingnaphat Kornsirichaiwat¹ Kawinwet Pipitthanathunyathorn^{1*} Wanphen Wirojcharoenwong²

¹หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะโลจิสติกส์และเทคโนโลยีการbin มหาวิทยาลัยเซาท์อีสต์ยางกอก

²นักวิจัยอิสระ

*Corresponding author, E-mail: prachak@sbu.southeast.ac.th

Received: November 5, 2025

Revise: December 23, 2025

Accepted: December 26, 2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์แหล่งที่มาหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น และนำเสนอแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ โดยประยุกต์ใช้แนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ครอบคลุมตั้งแต่ขั้นตอนการจัดหาวัตถุดิบจนถึงการจัดการซากผลิตภัณฑ์ (Cradle-to-Grave) ภายใต้ระบบธุรกิจกับผู้บริโภค (Business to Consumer: B2C) ผลการศึกษาพบว่า ขั้นตอนการใช้งานของผลิตภัณฑ์เป็นแหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีสัดส่วนสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 81.40 ของการปล่อยทั้งหมด รองลงมาคือขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ คิดเป็นร้อยละ 15.75 การจัดการซากร้อยละ 1.23 การกระจายสินค้าร้อยละ 1.08 และการผลิตร้อยละ 0.53 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์สะท้อนให้เห็นว่าการออกแบบผลิตภัณฑ์และรูปแบบการใช้งานของผู้บริโภคเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ แนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ได้จากการศึกษานี้ประกอบด้วย การเลือกใช้วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่สามารถรีไซเคิลหรือย่อยสลายได้ การจัดหาวัตถุดิบที่มีการปล่อยคาร์บอนต่ำ การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตด้วยการใช้พลังงานหมุนเวียนและแนวคิด Lean Manufacturing การเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ ตลอดจนการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ประหยัดพลังงานและน้ำควบคู่กับการส่งเสริมโครงการ Reuse/Refill และการจัดการซากตามหลัก 3Rs โดยสรุป ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการบูรณาการแนวคิด LCA เข้ากับการออกแบบผลิตภัณฑ์ การจัดการพลังงาน และการบริหารห่วงโซ่อุปทานอย่างยั่งยืน สามารถลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางเชิงกลยุทธ์สำหรับการจัดการคาร์บอนในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ของประเทศไทย ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนด้านการผลิตและการบริโภคอย่างยั่งยืน (SDG 12) และการรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (SDG 13) รวมถึงแนวทางการมุ่งสู่สังคมคาร์บอนต่ำ ภายใต้กรอบ Net Zero และเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

คำสำคัญ: คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ การประเมินวัฏจักรชีวิต ผลิตภัณฑ์ล้างรถ

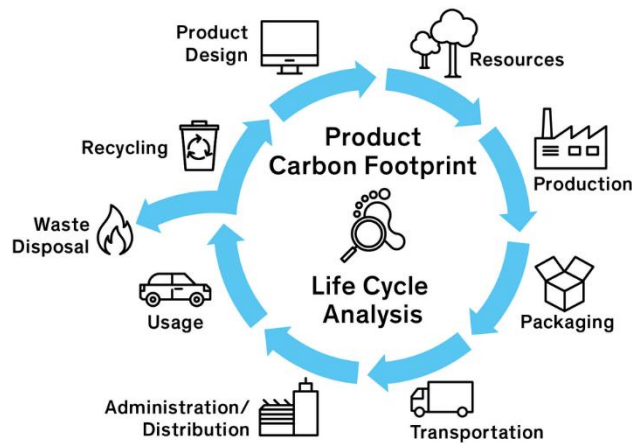
ABSTRACT

This study aims to evaluate the primary sources of greenhouse gas (GHG) emissions from concentrated car wash products manufactured by Standard Manufacturing Co., Ltd., and to propose appropriate, sustainable strategies for reducing these emissions. The assessment employs a cradle-to-grave Life Cycle Assessment (LCA) framework within a Business-to-Consumer (B2C) system, providing foundational data for analyzing and mitigating GHG emissions across the entire supply chain. The process is divided into five key stages: raw material acquisition, production, product distribution, consumer use, and end-of-life waste management. Results indicate that the consumer use stage contributes the highest GHG emissions at 81.4% of the total, followed by raw material acquisition (15.75%), waste management (1.23%), distribution (1.08%), and production (0.53%). Reduction strategies encompass all life cycle phases: adopting recycled or biodegradable packaging materials; prioritizing domestic raw materials and environmentally certified suppliers; enhancing production efficiency through high-efficiency motors, renewable energy systems, and Lean Manufacturing principles; optimizing logistics via route planning, consolidated delivery schedules, and clean-energy vehicles; designing energy- and water-efficient products, promoting Reuse/Refill programs, and providing sustainable usage guidelines; implementing the 3Rs (Reduce, Reuse, Recycle) for waste management, developing packaging return initiatives, and partnering with certified waste disposal facilities. Additionally, corporate carbon management plans, employee and supplier training, and regular Carbon Footprint of Product (CFP)/Carbon Footprint Organization (CFO) reporting foster continuous improvement aligned with Net Zero goals. The integration of LCA and targeted GHG reduction measures across the supply chain is essential for enhancing product sustainability and effectively minimizing environmental impacts.

Keywords: Product Carbon Footprint, Life Cycle Assessment, Concentrated Car Wash Products

1. บทนำ

ภาคอุตสาหกรรมการผลิตนับเป็นแหล่งกำเนิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs) ที่มีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ ซึ่งมีลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้า วัตถุดิบจากปิโตรเคมี และบรรจุภัณฑ์พลาสติกในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง งานวิจัยด้านการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ซึ่งให้เห็นว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์ในกลุ่มนี้ไม่ได้จำกัดอยู่เพียงขั้นตอนการผลิต แต่เกิดขึ้นตลอดวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ การผลิต การกระจายสินค้า การใช้งาน ไปจนถึงการจัดการซากผลิตภัณฑ์ [1], [2] ภายใต้บริบทดังกล่าวการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ (Carbon Footprint of Products: CFP) จึงได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในฐานะเครื่องมือเชิงปริมาณที่ใช้วัดและวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Cradle-to-Grave) ตามกรอบการประเมิน LCA ภายใต้มาตรฐานสากล เช่น ISO 14067 และ GHG Protocol ซึ่งช่วยให้องค์กรสามารถระบุแหล่งหรือขั้นตอนที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูง (carbon hotspots) และนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบมาตรการลดการปล่อยที่มีประสิทธิภาพและสามารถตรวจสอบได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มักมุ่งเน้นการประเมิน CFP ในระดับผลิตภัณฑ์ทั่วไปหรือในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ขณะที่การศึกษาการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดในระดับโรงงานผลิต โดยเฉพาะในบริบทของผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ยังมีอยู่อย่างจำกัด ทั้งนี้แนวโน้มอุตสาหกรรมและความสำคัญของการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ (CFP) ในยุคที่ความยั่งยืนกลายเป็นหัวใจหลักของธุรกิจ [3]



รูปที่ 1 การประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) [4]

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ยังขาดงานวิจัยที่วิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซเรือนกระจกระหว่างขั้นตอนหลักของวัฏจักรชีวิต ได้แก่ ขั้นตอนการผลิต การกระจายสินค้า และการใช้งานของผู้บริโภค ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรูปแบบการใช้พลังงานและทรัพยากรที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ช่องว่างดังกล่าวทำให้การกำหนดมาตรการลดคาร์บอนในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดยังขาดความแม่นยำและไม่สอดคล้องกับสภาพการดำเนินงานจริงของโรงงานผลิตงานวิจัยนี้จึงมุ่งเติมเต็มช่องว่างดังกล่าวผ่านการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นในระดับโรงงานผลิต

อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการซึ่งเป็นผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นสำหรับทั้งภาคอุตสาหกรรมและผู้บริโภคทั่วไป ถูกเลือกเป็นกรณีศึกษาเพื่อสะท้อนความท้าทายที่ผู้ประกอบการ SMEs เผชิญในการบริหารจัดการผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ในปี พ.ศ. 2567 ชี้ให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นมีระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($\text{CO}_2\text{-eq}$) สูงกว่าค่าเฉลี่ยของอุตสาหกรรม โดยแหล่งปล่อยที่สำคัญมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผสมและบรรจุ รวมถึงการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิด HDPE ในปริมาณมาก ขณะเดียวกัน บริษัทฯ ยังขาดระบบติดตามและบริหารจัดการพลังงานและคาร์บอนอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้ไม่สามารถระบุจุดที่เกิดการสูญเสียพลังงานและกำหนดมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพจากบริบทดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ในระดับโรงงานผลิต พร้อมทั้งวิเคราะห์แหล่งที่มาหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรชีวิต เพื่อนำไปสู่การเสนอแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมกับบริบทของผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ในประเทศไทย

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังมีส่วนสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) โดยเฉพาะ SDG 12 การผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน ผ่านการส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและการออกแบบกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และ SDG 13 การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ผ่านการพัฒนาแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรม ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการพัฒนาแนวทางลดการปล่อยคาร์บอนในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์และเป็นต้นแบบการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ในระดับ SMEs ของประเทศไทย ซึ่งจะช่วยเสริมสร้างศักยภาพการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมควบคู่ไปกับการขับเคลื่อนสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนในระยะยาว

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประเมินแหล่งที่มาหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ
2. เพื่อเสนอแนวทางเชิงกลยุทธ์ในการลดและบริหารจัดการการปล่อยก๊าซเรือนกระจกผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น อย่างยั่งยืน กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ

3. ขอบเขตของการวิจัย

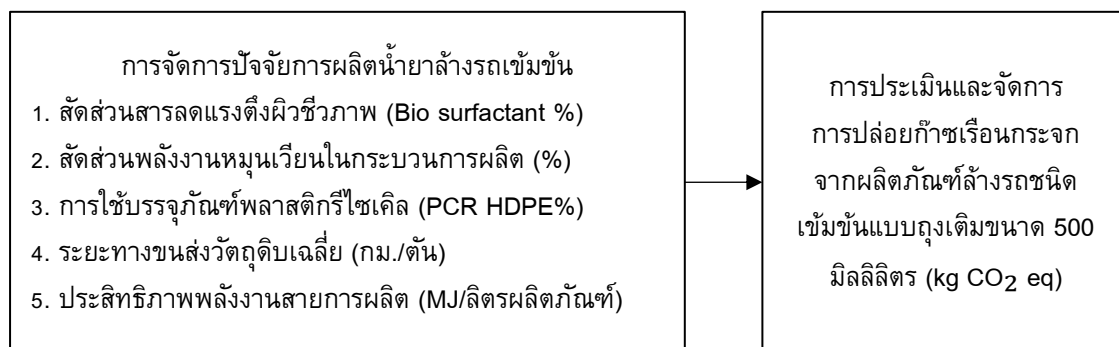
แนวทางการลดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ มีขอบเขตการวิจัย ดังนี้

ขอบเขตด้านเนื้อหาที่ใช้ศึกษาวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย 1) แนวคิดเกี่ยวกับก๊าซเรือนกระจก 2) แนวคิดเกี่ยวกับการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment - LCA) 3) แนวคิดเกี่ยวกับมาตรฐานการทำบัญชีก๊าซเรือนกระจก (GHG Protocol) 4) มาตรฐานการวัดปริมาณและการรายงานคาร์บอนฟุตพริ้นต์ผลิตภัณฑ์ ISO - 14067

ขอบเขตด้านประชากร ประชากรสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น แบบถุงเติม ขนาด 500 มิลลิลิตร เท่านั้น

ขอบเขตด้านพื้นที่การวิจัยครั้งนี้ เน้นศึกษาขอบเขตด้านการผลิตผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ เท่านั้น โดยดำเนินการศึกษาวิจัยตั้งแต่ มกราคม – ธันวาคม พ.ศ. 2567

4. กรอบแนวคิดที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัย

5. ประโยชน์ที่ได้รับการศึกษาวิจัย

1. สามารถประเมินแหล่งที่มาหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ
2. สามารถนำเสนอแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ
3. สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการบริหารจัดการเชิงกลยุทธ์ด้านสิ่งแวดล้อม กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ

6. การทบทวนวรรณกรรม

แนวคิดเกี่ยวกับก๊าซเรือนกระจก

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นการเปลี่ยนแปลงระยะยาวของอุณหภูมิ ปริมาณฝน และรูปแบบภูมิอากาศอื่นๆ ซึ่งส่วนใหญ่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การตัดไม้ทำลายป่า และการผลิตภาคอุตสาหกรรมที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs) ออกสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) และความไม่สมดุลระบบนิเวศในระดับโลก จากรายงานคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [5]

ก๊าซเรือนกระจก (GHGs) [6] คือก๊าซในบรรยากาศที่ดูดซับและแผ่รังสีความร้อนกลับสู่พื้นโลก ส่งผลให้เกิด “ปรากฏการณ์เรือนกระจก” ซึ่งช่วยรักษาอุณหภูมิโลกให้อยู่ในระดับเหมาะสมต่อการดำรงชีวิต อย่างไรก็ตาม การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล การตัดไม้ทำลายป่า และกิจกรรมอุตสาหกรรมหลังยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมได้เพิ่มปริมาณก๊าซเหล่านี้อย่างรวดเร็ว ทำให้สมดุลพลังงานของโลกถูกรบกวนและนำไปสู่ภาวะโลกร้อนปัจจุบัน UNFCCC และ IPCC (2023) กำหนดให้ติดตามก๊าซหลัก 7 ชนิด ได้แก่ CO_2 , CH_4 , N_2O , HFCs, PFCs, SF_6 และ NF_3 ซึ่งแต่ละชนิดมีศักยภาพในการกักเก็บความร้อนต่างกัน ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทั่วโลก แม้อิอน้ำ (H_2O) จะเป็นก๊าซเรือนกระจกตามธรรมชาติที่มีผลมากที่สุด แต่ไม่อยู่ในขอบควบคุมเนื่องจากสามารถปรับสมดุลตามอุณหภูมิโลก

แนวคิดเกี่ยวกับการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment : LCA)

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ (CFP) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิของผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต (Cradle-To-Grave) หรือบางกรณีจำกัดถึงขั้นตอนผลิต (cradle-to-gate) โดยอิงตามมาตรฐาน ISO14040/44, ISO 14067 และ GHG Protocol กระบวนการเริ่มจากการกำหนดขอบเขตและหน่วยหน้าที่ (Goal & Scope) ก่อนเก็บข้อมูลปริมาณวัตถุดิบ พลังงาน และการขนส่ง (LCI) เพื่อคำนวณค่าการปล่อยเป็น kgCO_2e ตามค่า GWP₁₀₀ ของ IPCC จากนั้นวิเคราะห์ผลกระทบ (LCIA) เช่น ภาวะโลกร้อน การเป็นกรด และยูโทรฟิเคชัน ก่อนสรุปผลและเสนอแนวทางลดการปล่อย เช่น ใช้วัสดุรีไซเคิล พลังงานหมุนเวียน หรือปรับปรุงกระบวนการผลิตที่สามารถประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เชิงสถานการณ์ (Scenario analysis) LCA แบบไดนามิกและ Consequential LCA เพื่อประเมินผลกระทบในมิตินโยบายและเศรษฐกิจ ช่วยให้องค์กรออกแบบกลยุทธ์สิ่งแวดล้อมได้อย่างยั่งยืนยิ่งขึ้น

แนวคิดเกี่ยวกับมาตรฐานการทำบัญชีก๊าซเรือนกระจก (GHG Protocol)

แนวคิดของ GHG Protocol เป็นกรอบมาตรฐานสากลในการคำนวณ รายงาน และบริหารการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยพัฒนาโดย WRI และ WBCSD เพื่อให้องค์กรสามารถดำเนินการตามข้อกำหนดด้านสภาพภูมิอากาศ เช่น CDP, TCFD และ SBTi ได้อย่างถูกต้อง โปรโตคอลนี้ยึดหลัก 5 ประการ คือ ความเกี่ยวข้อง ความครบถ้วน ความสม่ำเสมอ ความโปร่งใส และความแม่นยำ พร้อมกำหนดขอบเขตการปล่อยเป็น Scope 1, 2 และ 3 ครอบคลุมทั้งองค์กรและห่วงโซ่อุปทาน มาตรฐานสำคัญ ได้แก่ Corporate Standard, Product Life Cycle, Scope 3 Standard, และ Land Sector Guidance รวมถึง Net Zero Standard ที่มุ่งสอดคล้องกับเป้าหมาย 1.5°C โดยรวม GHG Protocol เป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยองค์กรลดการปล่อยคาร์บอนอย่างเป็นระบบ เพิ่มความโปร่งใส และสร้างความเชื่อมั่นต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ท่ามกลางแนวโน้ม Net Zero และ CBAM ในระดับโลก [4]

มาตรฐานการวัดปริมาณและการรายงานคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ ISO 14067

มาตรฐาน [6] ISO 14067: 2018 เป็นแนวทางสากลสำหรับการคำนวณและรายงานคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ (CFP) โดยอิงหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) ครอบคลุมตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบจนถึงการจัดจำหน่ายสินค้า เพื่อให้ข้อมูลโปร่งใส ตรวจสอบได้ และใช้ระบุจุดที่ปล่อยคาร์บอนสูง (hot spots) เช่น บรรจุภัณฑ์หรือกระบวนการขนส่ง องค์ประกอบสำคัญได้แก่การกำหนดขอบเขตระบบ หน่วยการทำงาน เกณฑ์การตัดข้อมูล และคุณภาพข้อมูล พร้อมการทวนสอบโดยบุคคลที่สามเพื่อความน่าเชื่อถือ ผลการศึกษาหลายงานชี้ว่าการปรับปรุงบรรจุภัณฑ์สามารถลด CFP ได้กว่าร้อยละ 10 ทั้งนี้ ISO 14067 ยังสนับสนุนการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ยั่งยืนและลดต้นทุนโลจิสติกส์ แต่ความท้าทายคือการเก็บ

ข้อมูลครบถ้วนในห่วงโซ่อุปทานและการจัดการความไม่แน่นอนของข้อมูล
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าแนวโน้มการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ (CFP) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในหลายภาคส่วน ทั้งภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และพลังงาน [4] ประสิทธิภาพของมาตรการกำหนดราคาคาร์บอนต่อเศรษฐกิจมหภาค [6] ซึ่งศักยภาพของเทคโนโลยีจัดการน้ำแบบ AWD ในการลด CH₄ โดยไม่กระทบผลผลิต ขณะที่การสร้างฐานข้อมูล LCI และ CFP มาตรฐานสำหรับอุตสาหกรรมชีวภาพไทย ช่วยยกระดับการขอฉลากคาร์บอนของ TGO ในภาคอุตสาหกรรมเคมีแสดงให้เห็นว่าการปรับสูตรผลิตภัณฑ์ การใช้พลังงานหมุนเวียน และระบบ LCA แบบผสมสามารถลด CFP ได้ร้อยละ 18 - 35 โดยยังคงความคุ้มค่า ส่วนงานต่างประเทศ [7] และ [8] สนับสนุนแนวคิดการใช้วัตถุดิบชีวภาพ บรรจุภัณฑ์ยั่งยืน และสูตรเข้มข้นเพื่อลดผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต โดยรวมงานวิจัยสะท้อนทิศทางการพัฒนาเทคโนโลยีสะอาดและมาตรการเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่สอดคล้องกับเป้าหมาย Net Zero ภาคการผลิตไทย

7. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงประยุกต์ (Applied research) ซึ่งเป็นวิธีการแสวงหาความรู้ เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นตลอดทั้งห่วงโซ่อุปทาน ตั้งแต่การได้มาซึ่งน้ำยาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นจนถึงผู้ค้าปลีกในลักษณะธุรกิจกับลูกค้า (Business to Consumer : B2C) ซึ่งกำหนดแผนการดำเนินงานของการประเมินวัฏจักรชีวิต ประกอบด้วย

1. การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and scope definition) งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการผลิตผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นกรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ โดยศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น ขนาด 500 มิลลิลิตร วิเคราะห์และประเมินการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิต ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบจนถึงการส่งมอบให้กับลูกค้าซึ่งเป็นลักษณะธุรกิจกับลูกค้า (Business to Consumer : B2C) โดยพิจารณาข้อมูลตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง ธันวาคม 2567 รวมทั้งสิ้น 12 เดือน

2. การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ รวบรวมข้อมูลการได้มาซึ่งวัตถุดิบ จนถึง การส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้าลักษณะธุรกิจต่อธุรกิจ (Business to Consumer: B2C) ซึ่งประกอบด้วย

1. การได้มาซึ่งวัตถุดิบและการขนส่งวัตถุดิบ เป็นการเก็บข้อมูล ปริมาณการใช้วัตถุดิบ 1 ชิ้น และนำมาคำนวณค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor: EF) ในส่วนของการขนส่งวัตถุดิบมายังโรงงานผลิตจะคำนวณตามระยะทางระหว่างโรงงานผู้ผลิตวัตถุดิบจนถึงโรงงานผลิต โดยในการคำนวณจะคำนวณทั้งขาไปที่มีอัตราการบรรทุกร้อยละ 100 และขากลับ มีอัตราการบรรทุกร้อยละ 0

2. กระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ

3. การบรรจุภัณฑ์ ก่อนการบรรจุภัณฑ์จะต้องทดสอบเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้หรือไม่ และบรรจุภัณฑ์ลงกล่องลังกระดาษ เพื่อขนส่งไปยังลูกค้าในที่ต่าง ๆ

4. การขนส่งผลิตภัณฑ์ จะคำนวณจากระยะทางตั้งแต่โรงงานผลิตจนถึงศูนย์กระจายสินค้าลูกค้า ซึ่งในการคำนวณการขนส่งจะคำนวณทั้งขาไปที่มีน้ำหนักในการขนส่งผลิตภัณฑ์และขากลับที่ไม่มีน้ำหนักในการขนส่ง

3. การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Life cycle impact assessment) การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากข้อมูลการใช้ทรัพยากรและการปลดปล่อยของเสียจากสารขาเข้าและขาออกแต่ละกระบวนการจากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการวัฏจักรชีวิต (Life cycle inventory) การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม คำนวณได้จากสมการ [6] ดังนี้

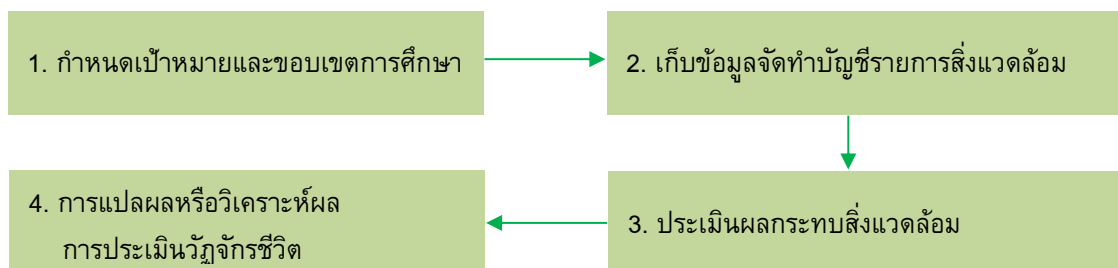
$$\text{Impact score} = \text{Emission factor} \times \text{Inventory value}$$

โดยที่ Impact Score	คือ	ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น
Emission factor	คือ	ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดผลกระทบ
Inventory value	คือ	ปริมาณสารที่ใช้หรือปล่อยออกมา

ทั้งนี้ค่า Emission Factor อ้างอิงแหล่งข้อมูล [4] ดังนี้

- 1) ค่า Emission Factor แบ่งตามประเภทกลุ่มอุตสาหกรรม
- 2) ค่า Emission Factor สำหรับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ขององค์กร
- 3) ข้อกำหนดเฉพาะกลุ่มผลิตภัณฑ์ (Product Category Rules)

4. การแปลผลหรือวิเคราะห์ผลการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle interpretation) การแปลผลเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยในขั้นตอนนี้เป็นการนำผลการศึกษาจากการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมและการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นมาสรุปผลการประเมินวัฏจักรชีวิต ทั้งนี้ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตต้องสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตการศึกษาที่กำหนดไว้ โดยเนื้อหาผลสรุปจะสามารถบ่งชี้ถึงกระบวนการที่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมมากที่สุด และนำไปสู่แนวทางในการปรับปรุงกระบวนการ เพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้วิธีดำเนินการวิจัยตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินการประเมินวัฏจักรชีวิต

ประชากร กลุ่มตัวอย่าง และวิธีการสุ่มตัวอย่าง

ประชากรในการวิจัย ได้แก่ กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นแบบถุงเติม ขนาด 500 มิลลิลิตร ทั้งนี้ผู้ให้ข้อมูลสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ได้แก่ ผู้อำนวยการฝ่ายขายและหัวหน้าฝ่ายขาย ผู้จัดการฝ่ายผลิต และหัวหน้างานฝ่ายผลิต ผู้จัดการแผนกจัดหาวัตถุดิบ หัวหน้าฝ่ายวางแผนการผลิต หัวหน้างานขนส่ง จำนวนทั้งหมด 8 คน คัดเลือกแบบเจาะจง เป็นวิธีการเลือกกลุ่มเป้าหมาย โดยเฉพาะผู้ที่มีความรู้ ความชำนาญ และประสบการณ์ในด้านการผลิต ทั้งนี้เครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ 1) การวิเคราะห์เอกสาร (Document Analysis) เป็นการตรวจสอบบันทึกการผลิต รายงานการใช้พลังงาน บันทึกการซื้อวัตถุดิบ และรายงานการจัดการของเสียจากบริษัท 2) การประเมินวงจรชีวิต (LCA) 3) การวัดปริมาณตรวจสอบและรายงานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตาม GHG Protocol Tools และ ISO 14064 และ 4) มิเตอร์วัดการใช้ไฟฟ้า น้ำ หรือเชื้อเพลิงในโรงงาน

วิธีการเก็บข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยตนเอง ทั้งนี้เนื่องจากผู้วิจัยได้ปฏิบัติงานในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นกรณีศึกษาโดยดำเนินการรวบรวมข้อมูลที่ครอบคลุม ดังนี้ 1) ทำหนังสือจากคณะโลจิสติกส์และเทคโนโลยีการบิน มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอกเพื่อขอความอนุเคราะห์ในการเข้าไปเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง 2) นัดหมายวันเวลา เพื่อชี้แจงประสานงานกับเจ้าหน้าที่ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นกรณีศึกษา 3) จัดเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ โปรแกรม Microsoft Excel จากรูปแบบขององค์กรการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) เพื่อใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลการผลิต กระบวนการทำงาน

หรือพฤติกรรมของพนักงาน รวมถึงการสังเกต การสัมภาษณ์ (Interview) หรือการบันทึกข้อมูลจากเอกสารภายใน และ 4) จัดเก็บข้อมูลที่เก็บรวบรวม บันทึกในรูปแบบตาราง ฐานข้อมูล หรือบันทึกย่อ เพื่อจัดระเบียบและวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงการปกป้องความลับของข้อมูลพนักงานหรือข้อมูลที่เป็นความลับทางการค้าของบริษัท ทั้งนี้การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนา และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงอนุมาน เพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มและลักษณะทั่วไปของข้อมูลที่รวบรวมได้ ได้แก่ 1) ความถี่ (Frequency) ใช้เพื่อแสดงจำนวนครั้งที่เหตุการณ์หรือปรากฏการณ์เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่ง 2) ร้อยละ (Percentage) ใช้เพื่อแสดงสัดส่วนของคำตอบแต่ละประเภทในรูปของเปอร์เซ็นต์ ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลได้ง่ายและชัดเจนและ 3) ค่าเฉลี่ย (Mean) ใช้เพื่อแสดงค่ากลางของข้อมูล

8. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิตกรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นกรณีศึกษาตลอดห่วงโซ่การผลิต ตั้งแต่การได้มาซึ่งน้ำยาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นในลักษณะธุรกิจกับลูกค้า (Business to Consumer : B2C) ที่แสดงให้เห็นลำดับกระบวนการครบวงจร ตั้งแต่ต้นน้ำ (การได้มาซึ่งวัตถุดิบ) จนถึงปลายน้ำ (การกำจัดของเสีย) ตามรูปที่ 3 ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ผลิตภัณฑ์และเป็นระบบที่สามารถนำไปวิเคราะห์การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนของห่วงโซ่อุปทานได้อย่างมีประสิทธิภาพรายละเอียด ดังนี้

1. ขอบเขตของกระบวนการ (System Boundary) โดยกระบวนการทั้งหมดอยู่ภายใต้ระบบ Business to Consumer (B2C) ครอบคลุมตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ (Cradle-to-Grave) ได้แก่ การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การผลิตวัตถุดิบ การกระจายสินค้า การใช้งานผลิตภัณฑ์ การจัดการของเสียหลังการใช้งาน

2. รายละเอียดกระบวนการ (Process Description) ประกอบด้วย

2.1 เป็นการได้มาซึ่งวัตถุดิบ (Raw Material Acquisition) โดยมุ่งเน้นการจัดหาวัตถุดิบและทรัพยากรที่จำเป็นในการผลิต ได้แก่ วัตถุดิบหลัก / วัสดุขายผลิต (เช่น ขวดพลาสติก ฉลาก บรรจุภัณฑ์) พลังงานไฟฟ้า บรรจุภัณฑ์ (ขวด, กล่อง) น้ำประปา เชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการผลิตหรือขนส่ง ซึ่งวัตถุดิบทั้งหมดถูกตรวจสอบคุณภาพก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต เพื่อให้มั่นใจว่ามีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด

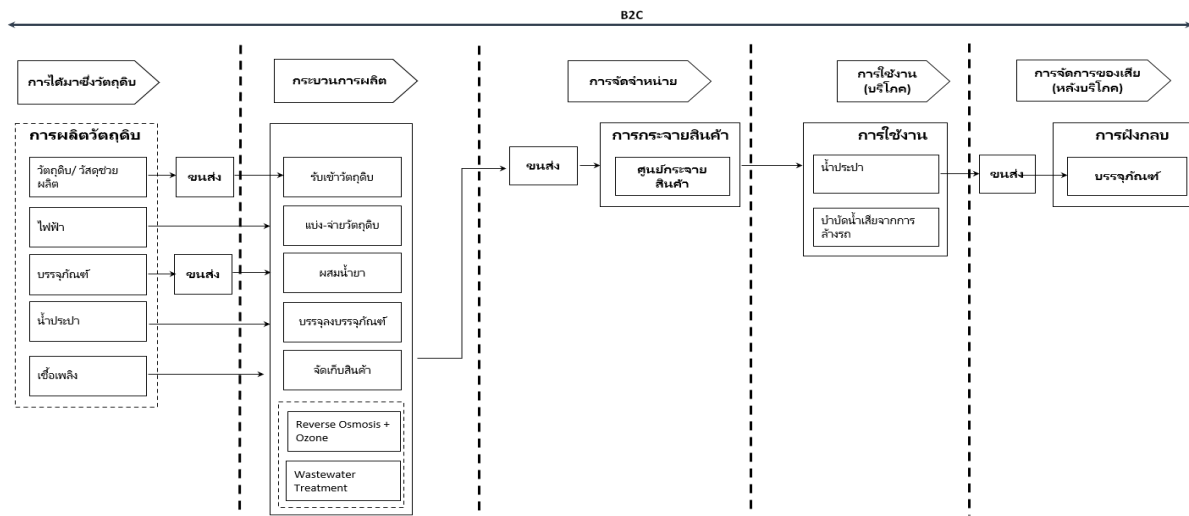
2.2 การผลิตวัตถุดิบ (Production Process) เป็นกระบวนการผลิตประกอบด้วยขั้นตอนย่อย การรับเข้าวัตถุดิบ เป็นการตรวจสอบ ปริมาณและคุณภาพก่อนการผลิต การแบ่ง – จำยวัตถุดิบ เป็นการจัดเตรียมและแบ่งส่วนตามสูตรการผลิต การผสมวัตถุดิบ คือผสมตามสัดส่วนที่กำหนด เพื่อให้ได้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน บรรจุภัณฑ์ เป็น การนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ผ่านการตรวจสอบเข้าสู่ภาชนะบรรจุ การจัดเก็บสินค้าในคลัง เป็นการนำเข้าสู่คลังเก็บเพื่อรอการกระจายสินค้า โดยระบบสนับสนุนภายในโรงงานประกอบด้วย Reverse Osmosis + Ozone System สำหรับใช้ในการกรองและฆ่าเชื้อน้ำให้ได้มาตรฐานคุณภาพ Wastewater Treatment System เป็นระบบบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

2.3 การกระจายสินค้า (Distribution Process) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเสร็จสมบูรณ์จะถูกส่งไปยังศูนย์กระจายสินค้า (Distribution Center) ซึ่งทำหน้าที่รวบรวมสินค้า จัดเรียงตามคำสั่งซื้อ และจัดเตรียมเพื่อการขนส่ง โดยใช้ยานพาหนะที่เหมาะสมเพื่อลดการปล่อยคาร์บอนจากการขนส่ง

2.4 การใช้งาน (Product Use Phase) เป็นขั้นตอนเมื่อลูกค้าได้รับผลิตภัณฑ์แล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนการใช้งานจริง เช่น การใช้น้ำประปาในการบริโภคหรือการผลิตต่อเนื่อง การเกิดน้ำเสียจากการใช้งาน ซึ่งจะต้องผ่านการบำบัดก่อนปล่อยคืนสู่ระบบ การใช้งานของลูกค้ามีส่วนสำคัญในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ เพราะเป็นช่วงที่มีการใช้พลังงานและทรัพยากรโดยตรง

2.5 การจัดการของเสีย (Waste Management Process) เป็นขั้นตอนเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์หรือบรรจุภัณฑ์ จะมีการจัดการของเสีย ได้แก่ รวบรวมบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้ว เพื่อเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลหรือกำจัดอย่างถูกวิธีขนส่งของเสีย ไปยังหน่วยกำจัดหรือศูนย์รีไซเคิลตามหลักสิ่งแวดล้อม ของเสียที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้จะเข้าสู่

กระบวนการกำจัดขั้นสุดท้าย เช่น การฝังกลบหรือเผาทำลาย

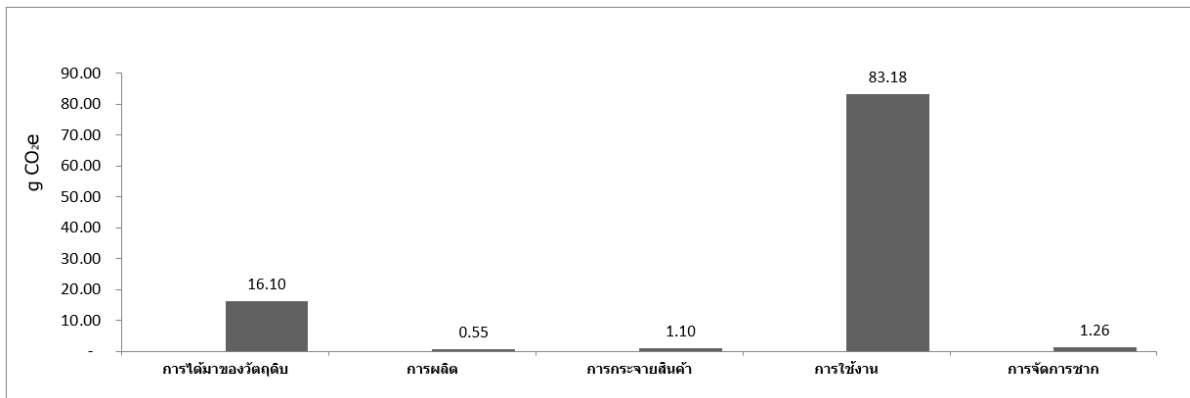


รูปที่ 3 วัฏจักรน้ำยาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นจนถึงลูกค้า

การวิเคราะห์การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นแบบถุงเติม ขนาด 500 มิลลิลิตร ตลอดทั้งห่วงโซ่การผลิต ตั้งแต่การได้มาซึ่งน้ำยาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นในลักษณะธุรกิจกับลูกค้า (Business to Consumer : B2C) ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จากรูปแบบขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) โดยกระบวนการที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างรถชนิดเข้มข้น มากที่สุดคือ การใช้งาน ปล่อย GHG รวมเท่ากับ 83.1832 gCO₂e รองลงมาคือ การได้มาซึ่งวัตถุดิบ รวมเท่ากับ 16.0961 gCO₂e การจัดการซาก รวมเท่ากับ 1.2576 gCO₂e การกระจายสินค้า รวมเท่ากับ 1.1031 gCO₂e และปล่อย GHG น้อยที่สุดคือ การผลิต รวมเท่ากับ 0.5462 gCO₂e ตามตารางที่ 1 และรูปที่ 4

ตารางที่ 1 สรุปการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างรถชนิดเข้มข้น แบบถุงเติม ขนาด 500 มิลลิลิตร

ลำดับ	ช่วงวัฏจักรชีวิต	การปล่อยจากวัตถุดิบ/ พลังงาน (gCO ₂ e)	การปล่อยจากการ ขนส่ง (gCO ₂ e)	ผลรวม (gCO ₂ e)	สัดส่วน (ร้อยละ)
1	การได้มาซึ่งวัตถุดิบ	16.0294	0.0667	16.0961	15.75
2	การผลิต	0.5462	0	0.5462	0.53
3	การกระจายสินค้า	0	1.1031	1.1031	1.08
4	การใช้งาน	83.1832	0	83.1832	81.40
5	การจัดการซาก	1.2488	0.0087	1.2576	1.23
รวม		101.008	1.179	102.186	100



รูปที่ 4 ร้อยละการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้ำยาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นแบบถุงเดิมขนาด 500 มิลลิลิตร

สำหรับแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG Mitigation Measures) ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเทคนิคและสังเคราะห์จากการสัมภาษณ์ผู้ให้ข้อมูลสำคัญจำนวน 8 คน ครอบคลุมทุกช่วงของวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Stages) ได้แก่ การได้มาของวัตถุดิบ การผลิต การกระจายสินค้า การใช้งาน และการจัดการซาก โดยรายละเอียดดังนี้

1. การได้มาวัตถุดิบ (Raw Material Acquisition Phase) แนวทางที่ผู้ให้ข้อมูลเสนอสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง ได้แก่
 - 1.1 ปรับเปลี่ยนวัสดุบรรจุภัณฑ์เป็นชนิดรีไซเคิลได้หรือย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Bio-based/Compostable Packaging)
 - 1.2 ส่งเสริมการใช้วัตถุดิบภายในประเทศ เพื่อลดการขนส่งระยะไกลและลดคาร์บอนจาก Logistics
 - 1.3 ประสานงานกับซัพพลายเออร์ให้มีมาตรฐานสิ่งแวดล้อม ISO 14001 หรือ Carbon Footprint for Organization (CFO)
 - 1.4 พัฒนา Green Procurement Policy เพื่อกำหนดเกณฑ์เลือกวัตถุดิบที่มีคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่ำ
 - 1.5 สร้างระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) เพื่อควบคุมแหล่งวัตถุดิบที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ
2. การผลิต (Production Phase) แนวทางการลด GHG ที่สามารถดำเนินการได้ในโรงงาน ได้แก่
 - 2.1 ปรับปรุงประสิทธิภาพระบบผสมและบรรจุผลิตภัณฑ์โดยใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง (High-efficiency Motors)
 - 2.2 ใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น ติดตั้งโซลาร์เซลล์ (Solar Rooftop) สำหรับผลิตไฟฟ้าใช้ในกระบวนการผลิต
 - 2.3 ปรับเปลี่ยนระบบ ไฟส่องสว่างและอุปกรณ์ในสายการผลิต เป็นแบบ LED ประหยัดพลังงาน
 - 2.4 นำระบบ Lean Manufacturing / Kaizen / TPM มาใช้เพื่อลดของเสียและลดการใช้พลังงาน
 - 2.5 จัดทำระบบ Monitoring พลังงานแบบเรียลไทม์ (Energy Management System) ควบคุมจุดที่มีการใช้ไฟฟ้าสูงผิดปกติ
3. การกระจายสินค้า (Distribution Phase) แนวทางลดคาร์บอนในห่วงโซ่อุปทานที่ผู้ให้ข้อมูลเสนอ
 - 3.1 วางแผนเส้นทางการขนส่งด้วยระบบ Route Optimization เพื่อประหยัดเชื้อเพลิง
 - 3.2 รวมรอบการขนส่ง (Shipment Consolidation) เพื่อเพิ่มอัตราบรรทุกสินค้าในแต่ละเที่ยว
 - 3.3 ส่งเสริมการใช้รถขนส่งพลังงานไฟฟ้า (EV Truck) หรือรถที่ใช้เชื้อเพลิงสะอาด เช่น B20
 - 3.4 บำรุงรักษารถขนส่งอย่างสม่ำเสมอ เช่น ตรวจลมยาง น้ำมันเครื่อง ให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพสูงสุด
 - 3.5 ลดการใช้วัสดุบรรจุภัณฑ์ชั่วคราว เช่น พาเลทหรือฟิล์มห่อ ด้วยการใช้ระบบคืนบรรจุภัณฑ์ (Returnable)

Packaging System)

4. การใช้งานของผลิตภัณฑ์ (Use Phase) เป็นช่วงที่มีการปล่อย GHG สูงสุดจึงควรเน้นมาตรการ ดังนี้
 - 4.1 ออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ ประหยัดพลังงานและทรัพยากรน้ำมากขึ้น
 - 4.2 พัฒนา คู่มือการใช้งานอย่างยั่งยืน (Eco-use Manual) เพื่อให้ผู้บริโภคเข้าใจวิธีใช้ที่ลดคาร์บอน
 - 4.3 ส่งเสริมให้ลูกค้านำผลิตภัณฑ์กลับมาใช้ซ้ำ (Reuse / Refill Program)
 - 4.4 ใช้เทคโนโลยี Reverse Osmosis + Ozone ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นลดพลังงานในขั้นตอนบำบัดน้ำ
 - 4.5 สื่อสารและสร้างแรงจูงใจให้ผู้บริโภคมีพฤติกรรมลดการใช้พลังงาน เช่น การตั้งอุณหภูมิ การเปิดปิดเครื่องอัตโนมัติ
5. ระยะการจัดการซาก (End-of-Life Phase) แนวทางที่ผู้ให้ข้อมูลเห็นว่าควรดำเนินการในเชิงระบบ ได้แก่
 - 5.1 ส่งเสริมการจัดการของเสียตามหลัก 3Rs (Reduce–Reuse–Recycle)
 - 5.2 พัฒนาโครงการคืนบรรจุภัณฑ์เก่าแลกส่วนลด ดึงบรรจุภัณฑ์กลับเข้าสู่ระบบ
 - 5.3 ทำงานร่วมกับผู้รับกำจัดของเสียที่มีมาตรฐาน โรงงานกำจัดของเสียที่ผ่านการรับรองจากกรมโรงงานฯ
 - 5.4 ใช้ระบบ Wastewater Treatment และการกรองน้ำด้วย Reverse Osmosis เพื่อลดของเสียก่อนปล่อยคืนสิ่งแวดล้อม
 - 5.5 สำรวจและปรับปรุงช่องทางรีไซเคิลให้ครอบคลุมพื้นที่จำหน่ายสินค้า
6. แนวทางเสริมเชิงกลยุทธ์ (Cross-cutting Strategies) จากข้อเสนอรวมของผู้ให้สัมภาษณ์ ดังนี้
 - 6.1 จัดทำแผนการจัดการคาร์บอนองค์กร (Corporate Carbon Management Plan) เพื่อกำหนดเป้าหมายและตัวชี้วัด (KPIs)
 - 6.2 จัดอบรมพนักงานและซัพพลายเออร์เรื่องการจัดการคาร์บอนฟุตพริ้นต์และแนวทาง Net Zero
 - 6.3 จัดทำรายงาน CFP และ CFO เป็นประจำทุกปี เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการปรับปรุงต่อเนื่อง
 - 6.4 เข้าร่วมโครงการ T-VER โครงการลดก๊าซเรือนกระจกโดยสมัครใจ เพื่อรับรองผลการลดคาร์บอน

9. สรุปและอภิปรายผล

การศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยใช้กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นแบบถุงเติม ขนาด 500 มิลลิลิตร กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ผลการศึกษาพบว่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) ในแต่ละช่วงของวัฏจักรชีวิตมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยขั้นตอนการใช้งาน (Use Phase) เป็นแหล่งปล่อย GHG สูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 81.40 ของการปล่อยทั้งหมด รองลงมาคือ ขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ (Raw Material Acquisition) คิดเป็นร้อยละ 15.75 ขณะที่ขั้นตอนการผลิต การกระจายสินค้า และการจัดการซาก มีสัดส่วนการปล่อยรวมกันน้อยกว่าร้อยละ 2 ของการปล่อยทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าในกลุ่มผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและผลิตภัณฑ์เคมีสำหรับผู้บริโภค พบว่าสัดส่วนการปล่อย GHG ในขั้นตอนการใช้งานของกรณีศึกษาที่สูงกว่าค่าเฉลี่ยของอุตสาหกรรม ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 60–70 ของการปล่อยทั้งหมด ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่ารูปแบบการใช้งานของผู้บริโภคที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำและพลังงานโดยตรง มีอิทธิพลต่อระดับคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ในระดับที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ในกลุ่มเดียวกัน

แนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงเทคนิคควบคู่กับการสัมภาษณ์ผู้ให้ข้อมูลสำคัญแสดงให้เห็นถึงมาตรการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ตลอดทุกช่วงของวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ในช่วงการได้มาซึ่งวัตถุดิบ แนวทางที่มีความสำคัญ ได้แก่ การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์รีไซเคิลหรือบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ การส่งเสริมการใช้วัตถุดิบภายในประเทศเพื่อลดการขนส่งระยะไกล และการกำหนดนโยบายการจัดซื้อสีเขียว (Green Procurement) เพื่อเป็นกรอบในการคัดเลือกซัพพลายเออร์ที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อม แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ชี้ว่าการจัดหาวัตถุดิบโดยให้ความสำคัญกับประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมสามารถช่วยลดการปล่อยคาร์บอน

จากห่วงโซ่อุปทานได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน SDG 12 ซึ่งมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและการสร้างความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อมห่วงโซ่อุปทาน [9], [10]

ในขั้นตอนการผลิต แนวทางการลดการปล่อย GHG ที่เหมาะสม [11] ได้แก่ การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ด้วยการเลือกใช้อุปกรณ์และมอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง การนำพลังงานหมุนเวียน เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ มาใช้ในกระบวนการผลิต และการปรับปรุงกระบวนการทำงานตามหลัก Lean Manufacturing และ Kaizen ซึ่งมีหลักฐานจากงานวิจัยสนับสนุนว่าการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในภาคการผลิตสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ในช่วงประมาณร้อยละ 10–20 มาตรการเหล่านี้ไม่เพียงช่วยลดต้นทุนด้านพลังงานขององค์กรในระยะสั้น แต่ยังมีส่วนสนับสนุนเป้าหมายการรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศตาม SDG 13 ในระยะยาว

ในขั้นตอนการกระจายสินค้า การบริหารจัดการโลจิสติกส์อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การวางแผนเส้นทางการขนส่งให้เหมาะสม (Route Optimization) การรวมรอบการขนส่ง และการเลือกใช้นานพาหนะพลังงานสะอาด สามารถช่วยลดการใช้พลังงานและการปล่อยคาร์บอนจากกิจกรรมด้านโลจิสติกส์ได้อย่างเป็นรูปธรรม ขณะเดียวกัน ในช่วงการใช้งานของผู้บริโภค ซึ่งเป็นช่วงที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด แนวทางที่มีความสำคัญ ได้แก่ การออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ช่วยลดการใช้และพลังงาน การจัดทำคู่มือการใช้งานที่ส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ และการสร้างความตระหนักรู้เพื่อปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้ผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคให้เอื้อต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก มาตรการเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนทั้ง SDG 12 ด้านการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน และ SDG 13 ด้านการรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับผู้ใช้อย่าง [12]

สำหรับขั้นตอนการจัดการซาก แนวทางที่เหมาะสมประกอบด้วยหลักการประยุกต์ใช้หลัก 3Rs (Reduce–Reuse–Recycle) การพัฒนาโครงการคืนบรรจุภัณฑ์หลังการใช้งาน และการสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานกำจัดของเสียที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน ซึ่งมาตรการเหล่านี้สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วงปลายน้ำของวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรของระบบการผลิตและการบริโภคโดยรวม ทั้งนี้ แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับหลักเศรษฐกิจหมุนเวียนและเป้าหมาย SDG 12 อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ ในระดับองค์กร การดำเนินมาตรการเชิงกลยุทธ์ เช่น การจัดทำแผนการจัดการคาร์บอนองค์กร การพัฒนาศักยภาพของพนักงานและซัพพลายเออร์ผ่านการอบรม การจัดทำและรายงานคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ (CFP) อย่างต่อเนื่อง รวมถึงการเข้าร่วมโครงการลดก๊าซเรือนกระจกโดยสมัครใจ เช่น โครงการ T-VER จะช่วยบูรณาการการลดการปล่อยคาร์บอนเข้าสู่การดำเนินงานขององค์กรอย่างเป็นระบบ และสนับสนุนการขับเคลื่อนสู่เป้าหมาย Net Zero ในระยะยาว [13], [14]

โดยสามารถจัดข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติออกเป็นสองระยะ ได้แก่ ระยะสั้น ซึ่งมุ่งเน้นมาตรการที่สามารถดำเนินการได้ทันทีภายในโรงงาน เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การปรับปรุงกระบวนการผลิต และการจัดการโลจิสติกส์อย่างมีประสิทธิภาพ และระยะยาว ซึ่งเน้นการกำหนดนโยบายองค์กรด้านการจัดการคาร์บอน การพัฒนาความร่วมมือกับซัพพลายเออร์และผู้บริโภค การรายงาน CFP/CFO อย่างต่อเนื่อง และการเข้าร่วมกลไกตลาดคาร์บอน เช่น T-VER จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) ไม่เพียงช่วยระบุช่วงของวัฏจักรชีวิตที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงเท่านั้น แต่ยังเป็นฐานข้อมูลสำคัญสำหรับการกำหนดมาตรการเชิงนโยบายและการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ เพื่อยกระดับความยั่งยืนของผลิตภัณฑ์ องค์กร และสังคมโดยรวม

10. ข้อเสนอแนะ

1. ควรส่งเสริมวิธีการล้างรถที่ใช้น้ำน้อย เช่น การล้างแบบพ่นละออง หรือ Dry Wash
2. ใช้พลังงานสะอาด เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ และระบบบำบัดน้ำกลับมาใช้ใหม่
3. ปรับปรุงเส้นทางการขนส่งให้เหมาะสมเพื่อลดระยะทางและการปล่อยคาร์บอน
4. ใช้ผลการประเมินนี้ในการยื่นขอฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นต์และจัดทำรายงานความยั่งยืนประจำปี

11. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ที่ได้ให้การสนับสนุนข้อมูลที่สำคัญและมีคุณค่าอย่างยิ่งต่อการศึกษาวิจัยครั้งนี้ การอนุญาตให้เข้าถึงกระบวนการผลิต ข้อมูลการจัดการวัตถุดิบ การกระจายสินค้า และการดำเนินงานด้านสิ่งแวดล้อม เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างรถชนิดเข้มข้นสามารถดำเนินการได้อย่างถูกต้อง ครบถ้วน และมีความน่าเชื่อถือ ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณในความเมตตา ความร่วมมือและความเอื้อเฟื้อของทีมงานทุกท่านเป็นอย่างสูง

12. เอกสารอ้างอิง

- [1] Finkbeiner M, Inaba A, Tan R, Christiansen K, Klüppel HJ. The new ISO standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *Int J Life Cycle Assess.* 2006;11(2):80–85.
- [2] Schmidt P, Kahl H, Müller C. Energy efficiency and carbon footprint reduction in manufacturing: A review. *J Manuf Syst.* 2017;45:291–304.
- [3] Accenture. *Powered for Change: 2023 Report* [Internet]. 2023 [cited 2025 Jan 29]. Available from: <https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/accenture-com/document-2/Accenture-Powered-for-Change-Report.pdf>
- [4] Lehmann M. *Life cycle assessments (LCA) and product carbon footprints (PCF)* [Internet]. 2025 [cited 2025 Jan 29]. Available from: <https://www.myclimate.org/en/get-active/corporate-clients/product-carbon-footprints-pcf-and-life-cycle-assessments-lca-myclimate/>
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Sixth assessment report (AR6): Synthesis report*. Geneva: IPCC; 2023.
- [6] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. *คาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร* [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 29 ม.ค. 2568]. แหล่งที่มา: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=YOhKdIpIVmpkSE5mYVhNPQ>
- [7] International Organization for Standardization. *ISO 14067:2018 Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification*. Geneva: ISO; 2018.
- [8] Sriphirom P, Rossopa B. Assessment of greenhouse gas mitigation from rice cultivation using alternate wetting and drying and rice straw biochar in Thailand. *Agric Water Manag.* 2023;290:108586.
- [9] Montazeri H, Montazeri F. CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop wind-catchers: Impact of outlet openings. *Renew Energy.* 2018;118:502–520.
- [10] Rahman A, Ali R, Kabir SN, Rahman M, Al Mamun R, Hossen A. Agricultural mechanization in Bangladesh: Status and challenges towards achieving the sustainable development goals (SDGs). *AMA Agric Mech Asia Afr Lat Am.* 2020;51(4):106–120.
- [11] Cucuzzella C, Salvia G. Consumer behavior and LCA: Implications for environmental sustainability. *J Clean Prod.* 2018;190:536–548.
- [12] Gu Y, Tan R, Chen Y. End-of-life management and carbon reduction strategies in product supply chains. *Resour Conserv Recycl.* 2018;135:1–10.
- [13] Zhu Q, Geng Y, Fujita T, Hashimoto S. Green supply chain management in leading manufacturers: Case studies in China. *Manag Res Rev.* 2013;36(4):365–384.
- [14] McKinnon A, Browne M, Whiteing A, Piecyk M. *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics*. London: Kogan Page; 2015.