

การประเมินวัฏจักรชีวิตและกลยุทธ์การลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์สู่ต้นแบบโรงงานเชือดไก่ฮาลาล

เชิงนิเวศ : กรณีศึกษาโรงงานเชือดไก่ฮาลาลในจังหวัดสระบุรี

Life Cycle Assessment and Carbon Footprint Reduction

Strategies towards an Eco-Halal Slaughterhouse Model: A Case Study of a Halal Chicken

Slaughterhouse in Saraburi Province

สุริยะ ขันธชัย¹ และ อนันต์ สะเล็ม¹Suriya Khanthachai¹ and Anan Salem¹

วิทยาลัยนานาชาติอิสลามกรุงเทพ มหาวิทยาลัยเกริก

International Islamic College Bangkok, Krirk University

E-mail: suriya.khanthachai786@gmail.com

Received: 2025-10-02; Revised: 2026-03-25; Accepted: 2026-03-26

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) วิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของโรงงานเชือดไก่ฮาลาลจังหวัดสระบุรี 2) ระบุปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานเรือนกระจกในกระบวนการผลิต และ 3) เสนอแนวทางลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ โดยใช้ระเบียบวิธีวิจัยแบบผสม (Mixed Methods) บนกรอบการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) ร่วมกับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ (CFP) และการสัมภาษณ์เชิงลึกผู้เชี่ยวชาญด้านฮาลาล การผลิต และการควบคุมคุณภาพ ข้อมูลเชิงปริมาณมาจากการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต คำนวณร่วมกับค่า Emission Factor จากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) เชิงคุณภาพใช้การวิเคราะห์กระบวนการเพื่อระบุจุดวิกฤติ (Hotspots) ตาม Halal Control Points (HCPs) ผลการวิจัยพบว่าการใช้พลังงานเรือนกระจกเฉลี่ยเท่ากับ 4.21 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่ากับ 1 กิโลกรัม โดยแหล่งปล่อยหลักมาจากฟาร์ม (93.40%) รองลงมาคือกระบวนการเชือดฮาลาล (4.66%) การลวกด้วยแก๊ส (1.81%) การใช้น้ำ (0.11%) และการขนส่ง (0.02%) ปัจจัยสำคัญที่เป็นจุดวิกฤติได้แก่ การใช้พลังงานในระบบทำความเย็น การใช้แก๊สในกระบวนการลวก การใช้น้ำในกระบวนการทำความสะอาด และของเสียที่ไม่เป็นไปตามหลักฮาลาล แนวทางลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เหมาะสมได้แก่ การใช้พลังงานสะอาด เช่น โซลาร์เซลล์ การลดระยะทางขนส่ง การนำน้ำกลับมาบำบัดใช้ใหม่ การลดของเสียตามหลัก HCPs และการนำเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) มาใช้เพื่อติดตามและเพิ่มประสิทธิภาพ

การใช้พลังงาน งานวิจัยนี้สามารถช่วยสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมฮาลาลให้สอดคล้องกับมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม หลักศาสนา และเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) รวมถึงการลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์

คำสำคัญ: คาร์บอนฟุตพริ้นท์; โรงเชือดไก่ฮาลาล; การประเมินวัฏจักรชีวิต; ก๊าซเรือนกระจก; คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์

Abstract

This study was undertaken to analyze the carbon footprint of a halal chicken slaughterhouse in Saraburi Province, to identify key factors influencing greenhouse gas (GHG) emissions throughout the production process and to propose effective mitigation strategies. A mixed-methods approach was adopted integrating the Life Cycle Assessment (LCA) framework with Carbon Footprint of Product (CFP) analysis alongside in-depth interviews with experts in halal compliance production systems and quality control. Quantitative data were obtained from energy consumption records within the production system and subsequently calculated using emission factors provided by the Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO). In parallel, qualitative data were systematically analyzed through process-based assessment to identify critical emission hotspots in accordance with Halal Control Points (HCPs). The findings revealed that the average GHG emission was 4.21 kg CO₂eq per kilogram of chicken produced. The dominant contribution originated from upstream farming activities (93.40%), followed by halal slaughtering operations (4.66%), gas-based scalding (1.81%), water utilization (0.11%), and transportation (0.02%). Critical hotspots were primarily associated with energy-intensive cooling systems, gas consumption during scalding, water usage in cleaning processes and non-compliant halal waste generation. To address these challenges several mitigation strategies were identified. These include the adoption of renewable energy sources, particularly solar power, optimization of transportation distances, implementation of water recycling systems, waste minimization in accordance with HCP principles and the integration of Internet of Things (IoT) technologies for real-time monitoring and enhanced energy efficiency. Overall the results provide empirical evidence to support the sustainable transformation of the halal poultry industry, ensuring alignment with environmental standards, Islamic principles and the Sustainable Development Goals (SDGs).

Furthermore, the study offers practical implications for advancing carbon labeling initiatives in the future.

Keywords: Carbon footprint; Halal chicken slaughterhouse; Life cycle assessment; Greenhouse gas emissions; Product carbon footprint.

บทนำ

ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ทวีความรุนแรงจนกลายเป็นวิกฤตสิ่งแวดล้อมระดับโลกที่ส่งผลโดยตรงต่อเศรษฐกิจ สังคม ความมั่นคงทางอาหาร และระบบอุตสาหกรรม (UN, 2023; IPCC, 2023) งานวิจัยและรายงานระดับนานาชาติระบุว่าภาคอาหารและเกษตรกรรมเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่า 31% ของการปล่อยทั้งหมดทั่วโลก โดยเฉพาะกระบวนการผลิตเนื้อสัตว์ การจัดการของเสีย และกิจกรรมการแปรรูป ซึ่งเป็นแหล่งสำคัญของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), มีเทน (CH₄) และไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ที่มีศักยภาพทำลายสภาพภูมิอากาศ (IPCC, 2023) ประเทศไทยในฐานะผู้ส่งออกผลิตภัณฑ์สัตว์ปีกชั้นนำของโลกจึงมีบทบาทสำคัญต่อตลาดอาหารฮาลาลที่มีมูลค่าเกินกว่า 2.4 ล้านล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี 2024 (World Halal Forum, 2024) อย่างไรก็ตาม โรงงานเชือดไก่ฮาลาลจำนวนมากในประเทศยังขาดระบบการประเมินและการจัดการคาร์บอนฟุตพริ้นต์อย่างเป็นระบบ แม้ว่ากระบวนการผลิตจะใช้พลังงานไฟฟ้า น้ำ และเชื้อเพลิงจำนวนมาก (Krungsri Research, 2024) ส่งผลให้เกิดช่องว่างด้านองค์ความรู้และการปฏิบัติ (knowledge-practice gap) ที่จำเป็นต้องได้รับการศึกษาวิเคราะห์อย่างจริงจัง งานวิจัยในแนวคิด “Halal for Sustainability” และ “Green Halal Industry” (Leanjamroon et al., 2008) สะท้อนความพยายามในการบูรณาการหลักศาสนาอิสลามเข้ากับการพัฒนาอย่างยั่งยืนและ ESG ซึ่งสอดคล้องกับประเด็นความโปร่งใส จริยธรรม และความรับผิดชอบต่อสังคม (Wiedmann & Minx, 2008) อย่างไรก็ตาม งานศึกษาที่มุ่งวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นต์ในบริบทโรงงานเชือดไก่ฮาลาลโดยเฉพาะยังไม่มี แต่ที่ค้นคว้ามาจะเป็นแค่ขั้นตอนการเลี้ยงไก่และยังขาดในกระบวนการเชือดแบบมาตรฐานฮาลาล จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่มุ่งศึกษาทางวิชาการด้านศาสนาและสิ่งแวดล้อมไปพร้อมๆ กัน

จังหวัดสระบุรีเป็นพื้นที่อุตสาหกรรมฮาลาลสำคัญของประเทศไทยที่มีโรงงานเชือดไก่ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่หลายแห่ง ซึ่งเป็นห่วงโซ่อุปทานหลักในการผลิตสินค้าส่งออกไปยังตะวันออกกลาง เอเชียใต้ และยุโรป การดำเนินงานในพื้นที่ที่มีการใช้พลังงานเข้มข้นทั้งในส่วนของการเชือด ระบบทำความเย็น การบำบัดน้ำเสีย และการจัดการของเสียชีวภาพ ทำให้เป็นพื้นที่เหมาะสมต่อการศึกษาวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นต์แบบเชิงลึก นักวิจัยมีประสบการณ์ทำงานร่วมกับโรงงานรวมถึงการเข้าถึงข้อมูลเชิงพื้นที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับต้นทุนพลังงาน การใช้ทรัพยากรน้ำ และแนวทางการจัดการของเสีย งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวข้องกับโรงงานในพื้นที่สระบุรียังมีข้อจำกัดในด้านข้อมูล และการบูรณาการหลักศาสนาอิสลามเข้ากับการจัดการสิ่งแวดล้อม จึงเปิดช่องให้การศึกษาครั้งนี้สามารถเติมเต็มองค์ความรู้ที่ยังขาดหายไป

การศึกษานี้มุ่งวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นต์โดยอาศัยแนวทางการประเมินตามมาตรฐาน อบก. และสากล เช่น PAS 2050 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) วัดและวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในทุกกระบวนการผลิต (2) ระบุจุดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ (hotspots) และ (3) เสนอแนวทางการลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่สอดคล้องกับหลักฮาลาล ความยั่งยืน และ SDGs ด้านสิ่งแวดล้อม อ้างอิงตามหลักคัมภีร์อัลกุรอาน อาทิ ซูเราะห์อัลอารอฟ (7:56) ที่เน้นห้ามมนุษย์ก่อความเสียหายในแผ่นดินหลังจากได้รับการปรับปรุงแล้ว และ (7:31) ที่เตือนให้ใช้ทรัพยากรอย่างไม่ฟุ่มเฟือย รวมถึงซูเราะห์อัลฮัจร์ (15:19) ที่สะท้อนถึงความสมดุลและระเบียบในธรรมชาติ ซึ่งเป็นรากฐานคิดสำคัญของการจัดการสิ่งแวดล้อมในอิสลาม (Muhamad et al., 2019) งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมฮาลาลที่มีความรับผิดชอบต่อหลักกฏและกอตร์ของพระองค์ (เชื่อว่าทุกสิ่งที่เกิดขึ้นบนโลกนี้มาจากพระเจ้าทั้งสิ้น) และเน้นบทบาทของมนุษย์ในฐานะ “ตัวแทนดูแล” (khalifah) บนโลกอย่างสมดุลและยั่งยืน

บทความวิจัยนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของโรงงานเชือดไก่ฮาลาลในจังหวัดสระบุรี พร้อมข้อเสนอเชิงปฏิบัติในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภายใต้แนวคิดฮาลาล และความยั่งยืน โดยจัดโครงสร้างเนื้อหาเป็น 4 ส่วน ได้แก่ (1) บริบทและทฤษฎีเกี่ยวกับคาร์บอนฟุตพริ้นต์และอุตสาหกรรมฮาลาล (2) ระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้การประเมินแบบผสมผสาน (Mixed Methods) (3) ผลการวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นต์และจุดปล่อยสำคัญในโรงงาน และ (4) แนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามหลักฮาลาล และมาตรฐานสากล ผลลัพธ์ที่ได้คาดว่าจะช่วยเสริมองค์ความรู้ด้านสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมฮาลาลของไทย รวมทั้งเป็นพื้นฐานเชิงนโยบายและเชิงปฏิบัติในการพัฒนาระบบผลิตอาหารฮาลาลที่ปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของโรงงานเชือดไก่ฮาลาล จ.สระบุรี
2. เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลต่อการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นต์ในกระบวนการผลิตไก่ฮาลาล
3. เพื่อศึกษาแนวทางการลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เหมาะสมสำหรับโรงงาน

การทบทวนวรรณกรรม

1. คาร์บอนฟุตพริ้นต์และกรอบการประเมินตาม อบก. และ PAS 2050 คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์เป็นตัวชี้วัดผลกระทบจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิต (Wiedmann & Minx, 2008). LCA และมาตรฐาน PAS 2050 ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากมีขั้นตอนที่ชัดเจน ตั้งแต่การกำหนดขอบเขต การเก็บข้อมูลกิจกรรม และการจัดหมวดหมู่ก๊าซเรือนกระจก งานวิจัยต่างประเทศหลายฉบับพบว่า สินค้าเนื้อสัตว์มีอัตราการปล่อยก๊าซสูงกว่าสินค้าเกษตรอื่น โดยเฉพาะกิจกรรมด้านพลังงาน

ระบบทำความเย็น และการจัดการของเสีย (Franchetti & Apul, 2013). งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดสำคัญด้านการอ้างอิงข้อมูลจากกรณีศึกษาในต่างประเทศซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในเขตอบอุ่น (Temperate Zone) ที่มีสภาพภูมิอากาศแตกต่างจากประเทศไทยอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในด้านอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำกว่า ส่งผลให้การทำความเย็น (Cooling Load) และประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น (Coefficient of Performance: COP) แตกต่างจากบริบทเขตร้อนอย่างชัดเจน ในบริบทของประเทศไทยซึ่งอยู่ในเขตร้อนชื้น (Tropical Climate) ภาระความร้อนไม่ได้เกิดจากความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) เพียงอย่างเดียว แต่ยังรวมถึงความร้อนแฝง (Latent Heat) จากความชื้นในอากาศในสัดส่วนที่สูง ส่งผลให้การใช้พลังงานในระบบทำความเย็นเพิ่มขึ้น และไม่สามารถใช้ค่ามาตรฐานหรือแบบจำลองจากต่างประเทศได้โดยตรง

2. ระบบฮาลาล-ไทยหัตถ์ และผลกระทบต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมตามหลักศาสนาอิสลาม การผลิตอาหารต้องคำนึงทั้งด้าน ฮาลาล (อนมุติ) และ ไทยหัตถ์ (ดี มีคุณภาพ และไม่ก่อโทษ) ซึ่งครอบคลุมมิติด้านสิ่งแวดล้อมและสวัสดิภาพสัตว์ (CICOT, 2023). การประยุกต์หลักไทยหัตถ์สู่ระบบการผลิตสมัยใหม่เชิงทฤษฎีระบบนิเวศอุตสาหกรรม (Industrial Ecology) และประสิทธิภาพเชิงนิเวศ (Eco-efficiency) ที่ซ่อนอยู่ในกระบวนการเชือดแบบฮาลาล คือการระบายเลือดออกจนหมดภายในระยะเวลาที่กำหนดไม่ได้เป็นเพียงข้อกำหนดทางศาสนา แต่ในทางทฤษฎีด้านสิ่งแวดล้อม สิ่งนี้คือการลดภาระความสกปรกในน้ำเสียหรือค่า COD ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต่อไปซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดการใช้พลังงานในการเติมอากาศและลดการเกิดก๊าซมีเทนที่สนับสนุนการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ตามธรรมชาติ

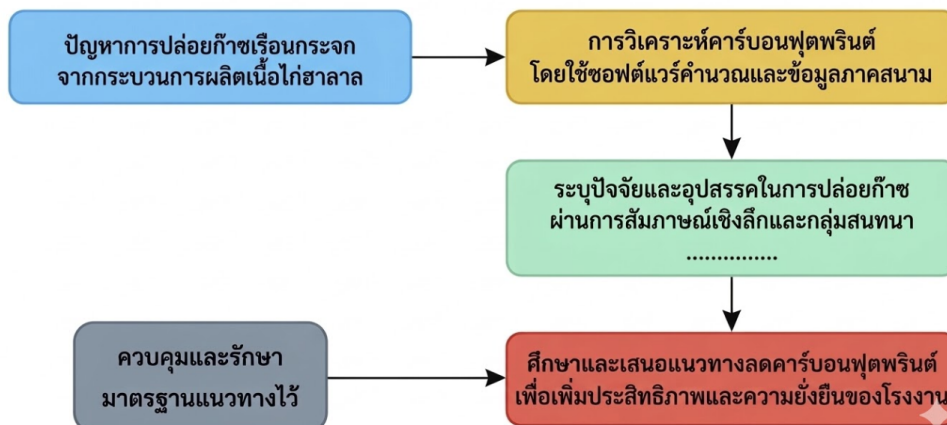
3. แนวทางการลดก๊าซเรือนกระจกในโรงงานเชือดไก่ฮาลาล งานวิจัยต่างประเทศแสดงให้เห็นว่าโรงงานเชือดสามารถลดการปล่อยก๊าซได้ผ่านมาตรการ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพระบบทำความเย็น การรีไซเคิลน้ำ การผลิตพลังงานชีวภาพจากน้ำเสีย และการปรับปรุงระบบไอน้ำ (Meat Sustainability Report, 2023). สำหรับประเทศไทย TGO ระบุว่าภาคปศุสัตว์เป็นหนึ่งในกลุ่มที่ยังขาดฐานข้อมูลเชิงลึกของคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ซึ่งจำเป็นต่อการออกแบบมาตรการที่เหมาะสมตามบริบทโรงงานแต่ละแห่ง (TGO, 2023). ขณะเดียวกัน โรงงานเชือดไก่ฮาลาลยังต้องมีข้อจำกัดด้านการจัดการตามหลักศาสนา ทำให้จำเป็นต้องพัฒนารูปแบบเฉพาะ

สรุปช่องว่างความรู้ (Knowledge Gap)

จากช่องว่างทางความรู้หรือ Knowledge Gap ในการทบทวนวรรณกรรม พบว่ายังมีสถานะสูญญากาศทางข้อมูลของอุตสาหกรรมฮาลาลไทยเมื่อเทียบกับคู่แข่งในตลาดโลก ซึ่งควรปรับปรุงโดยการขยายเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) ในข้อที่ 12 และ 13 อย่างเป็นรูปธรรม เพื่อตอบโจทย์ทางวิศวกรรมในระดับโรงงานและควรสร้างองค์ความรู้ใหม่ที่สามารถยกระดับมาตรฐานอุตสาหกรรมอาหารของประเทศให้ก้าวข้ามข้อกีดกันทางการค้าในอนาคต เพื่อความสมบูรณ์ทั้งในเชิงทฤษฎี เชิงปฏิบัติ และเชิงนโยบาย

ระเบียบวิธีวิจัย/วิธีดำเนินการวิจัย

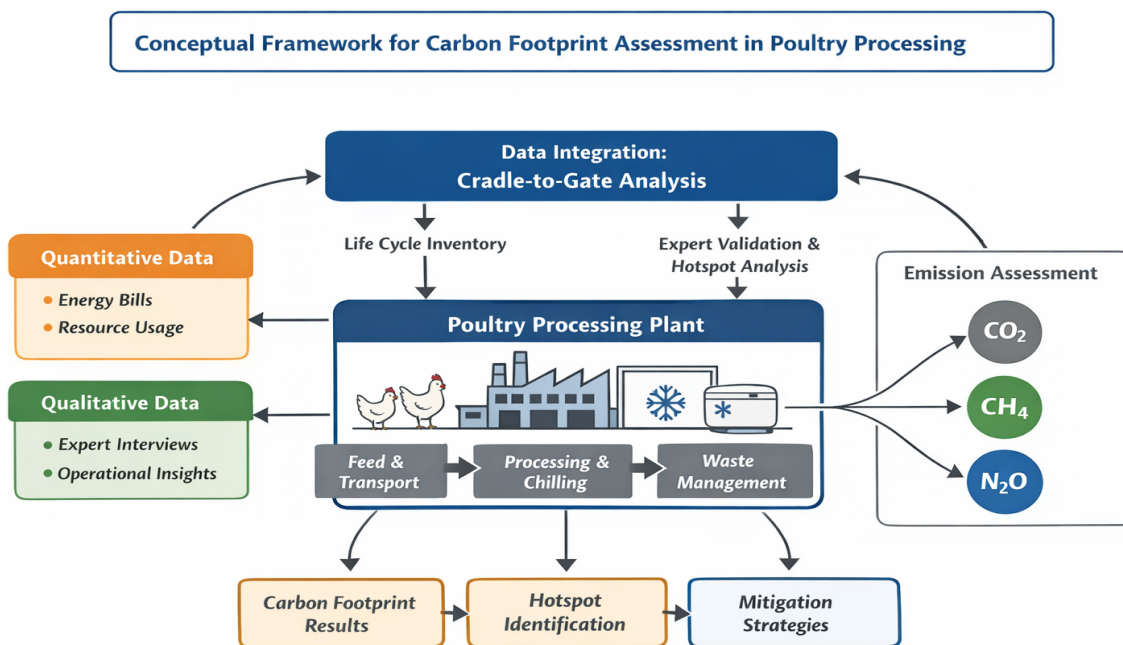
กรอบแนวคิดการวิจัย การลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์โรงงานเชือดไก่ฮาลาล



รูปที่1. กรอบแนวคิดการวิจัยเชิงทฤษฎี (ที่มา: ประยุกต์โดยผู้วิจัย)

การวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีแบบผสมผสาน (Mixed Methods Research) เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของโรงงานเชือดไก่ฮาลาลในจังหวัดสระบุรี โดยผสานข้อมูลเชิงปริมาณจากการวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นต์กับข้อมูลเชิงคุณภาพที่ได้จากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ และผู้ปฏิบัติงานจริง ทำให้สามารถระบุจุดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และปัจจัยเชิงกระบวนการที่ส่งผลต่อการปล่อยคาร์บอน (1) จุดเริ่มต้นของการวิจัยอุตสาหกรรมไก่ฮาลาลมีขั้นตอนซับซ้อนและใช้พลังงานสูงในแต่ละกระบวนการ (2) การวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นต์ เป็นหัวใจหลักเชิงปริมาณของงานวิจัย โดยใช้ข้อมูลจากโรงงานจริงร่วมกับมาตรฐานสากล ได้แก่ มาตรฐาน อบก. PAS 2050 ISO 14067 แนวคิด LCA (Life Cycle Assessment) ขอบเขตการประเมินครอบคลุมตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบจนถึงกระบวนการผลิตในโรงงาน (Cradle to Gate) โดยเก็บข้อมูลกิจกรรม แล้วนำมาคำนวณการปล่อยก๊าซ CO₂eq ของก๊าซเรือนกระจก 3 ชนิด ได้แก่ CO₂, CH₄ และ N₂O และจุดปล่อยสำคัญ (Hotspots) เพื่อระบุส่วนที่มีผลกระทบสูงสุดต่อคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ (3) การระบุปัจจัยและสาเหตุ ใช้ข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้เชี่ยวชาญในหลายฝ่าย ได้แก่ ผู้บริหาร ผู้ตรวจสอบฮาลาล ฝ่ายวิศวกรรม ฝ่ายสิ่งแวดล้อม คุณภาพ และผู้รับผิดชอบพลังงาน รวม 8 ท่าน มายืนยันสาเหตุและวิเคราะห์ปัจจัยเชิงคุณภาพที่ส่งผลต่อการปล่อยคาร์บอน เช่น การสูญเสียพลังงานในห้องเย็น ระบบล้างทำความสะอาดไก่ใช้น้ำมาก ระบบบำบัดน้ำเสีย ปัญหาของเสียที่เกิดจากกระบวนการไม่ฮาลาล ข้อมูลเชิงคุณภาพนี้ช่วยอธิบายสาเหตุเชิงกระบวนการ และเชื่อมโยงกับข้อมูลเชิงปริมาณ ทำให้ผลวิเคราะห์มีความลึกซึ้งสอดคล้องกับลักษณะงาน Mixed Methods (4) การศึกษามาตรการและแนวทางลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพถูกนำมาบูรณาการลดคาร์บอนของโรงงาน ได้แก่ มาตรการ ปรับอุณหภูมิห้องเย็น บริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าอย่างมีระบบ ลดของเสีย

ในสายการผลิต ปรับปรุงเทคโนโลยี ใช้พลังงานทดแทนติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar rooftop) เพิ่มระบบ Monitoring เพื่อควบคุมพลังงานแบบเรียลไทม์ ระบบ Automation ลดของเสียและพลังงาน (5) กระบวนการควบคุมและรักษา กรอบแนวคิดการวิจัยรวมถึงขั้นตอนติดตามผลและประเมินซ้ำ เพื่อให้มาตรการลดคาร์บอนได้นำไปสู่ความยั่งยืนจริงในกระบวนการผลิต การเชื่อมโยงกับมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมและฮาลาล ได้แก่ Halal Assurance System (HAS) ISO 14001, SDGs เป้าหมายที่ 7, 12 และ 13 สามารถอธิบายกระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบในบริบทของระบบ Cradle-to-Gate ได้ดังนี้



รูปที่2. รูปกระบวนการได้มาวัตถุดิบในกระบวนการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ (ที่มา: ประยุกต์โดยผู้วิจัย)

กระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบเริ่มต้นจากการจัดหาทรัพยากรหลักที่ใช้ในระบบการผลิต ซึ่งประกอบด้วยไก่มีชีวิต น้ำ พลังงาน และสารเคมี โดยวัตถุดิบเหล่านี้ไม่ได้เกิดขึ้นภายในโรงงาน แต่มีแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมต้นน้ำที่อยู่นอกขอบเขตของกระบวนการผลิตโดยตรง ในส่วนของไก่มีชีวิตถือเป็นวัตถุดิบหลักที่ได้มาจากฟาร์มเลี้ยง ซึ่งกระบวนการนี้ครอบคลุมกิจกรรมก่อนหน้า ได้แก่ การผลิตอาหารสัตว์ การเลี้ยงดู และการจัดการฟาร์ม ซึ่งล้วนเป็นแหล่งกำเนิดของการใช้ทรัพยากรและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสูง โดยเฉพาะจากระบบการย่อยสลายของเสียอินทรีย์และการใช้พลังงานในฟาร์ม นอกจากนี้ กระบวนการขนส่งจากฟาร์มมายังโรงงานแปรรูปถือเป็นส่วนหนึ่งของการได้มาซึ่งวัตถุดิบ โดยเกี่ยวข้องกับการใช้เชื้อเพลิงและก่อให้เกิดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากกิจกรรมการขนส่ง ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในกรอบการประเมินแบบ Cradle-to-Gate ในส่วน

ของทรัพยากรอื่น เช่น น้ำและพลังงานไฟฟ้า แม้จะถูกใช้ภายในโรงงาน แต่กระบวนการได้มาซึ่งทรัพยากรเหล่านี้ เช่น การผลิตไฟฟ้าและการจัดหาน้ำ ก็มีแหล่งกำเนิดจากระบบภายนอก และมีส่วนในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่นเดียวกัน เมื่อวัตถุดิบทั้งหมดเข้าสู่ระบบตามที่แสดงในแผนภาพ จะถูกส่งต่อเข้าสู่กระบวนการผลิต (Processing) ผ่านเส้นทางการไหลของมวลสาร (Mass Flow) ขณะที่พลังงานที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนจะออกมาเป็นของเสียในระบบต่อไป

งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพด้วยวิธี Coding อย่างเป็นระบบ โดยวิเคราะห์ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้บริหาร วิศวกร และผู้ตรวจสอบฮาลาล เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตกระบวนการ Coding แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ (1) Open Coding เพื่อแยกประเด็นสำคัญจากข้อมูลสัมภาษณ์ (2) Axial Coding เพื่อเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างประเด็นต่าง ๆ และระบุปัจจัยเชิงสาเหตุของการใช้พลังงาน (3) Selective Coding เพื่อสังเคราะห์ประเด็นหลักและเชื่อมโยงกับข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าและระบบทำความเย็น การบูรณาการข้อมูลทั้งสองประเภทช่วยให้สามารถระบุจุดวิกฤติ (Hotspots) ได้อย่างมีหลักฐานรองรับ และอธิบายสาเหตุของการใช้พลังงานในแต่ละกระบวนการได้อย่างชัดเจน ส่งผลให้ข้อเสนอแนะแนวทางลดคาร์บอนมีความน่าเชื่อถือและตั้งอยู่บนข้อมูลเชิงประจักษ์ ในการศึกษาครอบคลุมพื้นที่ โรงงานเชือดไก่ฮาลาลจังหวัดสระบุรี โดยผู้วิจัยทำการลงพื้นที่เก็บข้อมูลจริงระหว่างเดือนกรกฎาคม-กันยายน 2568 และเก็บข้อมูลอ้างอิงเฉพาะปี พ.ศ.2567 เพื่อทำเป็นฐานข้อมูลในการวิจัย และการตรวจสอบความน่าเชื่อถือด้วย Review triangulation รวม 8 คน ประกอบด้วย ผู้บริหาร 2 คน วิศวกรสิ่งแวดล้อม 2 คน ผู้ควบคุมคุณภาพ 1 คน ผู้ตรวจสอบฮาลาล 2 คน ผู้รับผิดชอบพลังงาน 1 คน ใช้การสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้าง เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกที่สอดคล้องกับการดำเนินงานจริง

การจำแนกแหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในงานวิจัยนี้อ้างอิงตามแนวทาง GHG Protocol โดยแบ่งออกเป็น 3 ขอบเขต ได้แก่ Scope 1 (การปล่อยโดยตรง เช่น การใช้ก๊าซธรรมชาติในระบบน้ำร้อนและ Boiler), Scope 2 (การปล่อยทางอ้อมจากการใช้ไฟฟ้า โดยเฉพาะระบบทำความเย็น), และ Scope 3 (การปล่อยทางอ้อมอื่น ๆ เช่น การได้มาของวัตถุดิบจากฟาร์มและการขนส่ง)

ผลการวิจัย

การวิเคราะห์และแนวทางการลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของโรงงานเชือดไก่ฮาลาล จังหวัดสระบุรี ผลสรุปแบ่งตามวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ที่ 1 จากผลการวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของกระบวนการผลิตไก่ฮาลาล

1.1 ค่า Carbon Footprint รวมต่อผลิตภัณฑ์ พบว่า คาร์บอนฟุตพริ้นต์รวมของผลิตภัณฑ์เนื้อไก่ฮาลาล คือ 4.21 kgCO₂eq ต่อเนื้อไก่ 1 kg คำนวณจากปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งโรงงาน 630,922,330 kgCO₂eq น้ำหนักไก่ฮาลาลขาออก 149,778,766 kg ผลนี้สะท้อนว่าโรงงานแห่งนี้มีโครงสร้างการปล่อยคาร์บอน

คล้ายโรงงานอุตสาหกรรมสัตว์ปีกในยุโรป โดยเทียบเฉพาะ กระบวนการเชือด พบว่า โรงงานสระบุรีคือ 0.28 kgCO₂eq/kg, โรงงานสเปนคือ 0.16 kgCO₂eq/kg (อ้างอิงงานวิจัย Tetteh et al., 2022) ค่า CFP ของไทย สูงกว่า ในความแตกต่างของค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกระหว่างโรงงานในจังหวัดสระบุรีและประเทศสเปน ไม่สามารถอธิบายได้เพียงปัจจัยด้านสภาพอากาศและความเข้มข้นในการใช้พลังงานเท่านั้น แต่ควรพิจารณาเชิงลึก ในด้านสมรรถนะของระบบทำความเย็น โดยเฉพาะค่า Coefficient of Performance (COP) ซึ่งสะท้อน ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบ หากระบบทำความเย็นมีค่า COP ต่ำ จะทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการ รักษาอุณหภูมิ ส่งผลให้การปล่อย คาร์บอนไดออกไซด์ สูงขึ้นเมื่อเทียบกับระบบที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าในยุโรป

1.2 จุด Hotspots สำคัญในกระบวนการผลิตผลการวิเคราะห์ข้อมูลพลังงานและการสัมภาษณ์พบว่า สองจุดปล่อยคาร์บอนสูงที่สุด ได้แก่ (1) ระบบทำความเย็น ใช้ไฟฟ้าปริมาณสูงที่สุดของโรงงานคิดเป็นสัดส่วน มากกว่า 40% ของการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดเป็น Hotspot หลักตามที่มีผู้เชี่ยวชาญทุกคนยืนยันตรงกัน (2) ระบบลวก ถอนขนและระบบน้ำร้อน (Scalding/Hot Water System) ใช้ก๊าซ NG ปริมาณสูง เป็นแหล่งปล่อยก๊าซ CO₂ และมีน้ำเสียที่ต้องบำบัด สองจุด Hotspot นี้สอดคล้องกับกรอบการประเมินของ PAS 2050, ISO 14067:2018, แนวคิด LCA ในอุตสาหกรรมเนื้อสัตว์ของ Franchetti & Apul (2013)

1.3 การใช้พลังงานและทรัพยากรตามข้อมูลจริง จากตารางการใช้พลังงานปี 2567 พบว่า ไก่มี คือแหล่ง ปล่อยก๊าซสูงถึง 93% ของทั้งหมด กระบวนการผลิตในโรงงาน ปล่อย 7%, ไฟฟ้า 29,390,476 kgCO₂eq, NG (Boiler) 11,411,781 kgCO₂eq, น้ำผิวดิน/น้ำบาดาล = 719,910 kgCO₂eq น้ำล้างไก่ 1.5 ลิตร/ตัว, Chiller overflow 2.5 ลิตร/ตัว, ข้อมูลนี้ยืนยันว่าแม้กระบวนการเชือดแบบฮาลาลจะมีสัดส่วน 7% แต่เป็นส่วนที่โรงงาน ควบคุมได้โดยตรงถ้าปฏิบัติตามหลักฮาลาล และสามารถลดคาร์บอนได้อย่างเป็นรูปธรรม

2. ผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ที่ 2 การวิเคราะห์ระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อการปล่อยคาร์บอน และการสัมภาษณ์ เชิงลึก การวิเคราะห์ข้อมูลพบปัจจัยหลักดังนี้

2.1 ปัจจัยด้านพลังงาน (Energy Factor) ผู้ให้สัมภาษณ์ทุกคน (8/8) ระบุว่าพลังงานไฟฟ้าคือปัจจัย ที่เกิดคาร์บอนสูงที่สุด รองลงมาคือพลังงานในระบบน้ำร้อน พลังงานในห้องเย็น ปริมาณ NG ในระบบการลวกขน

2.2 ปัจจัยด้านโลจิสติกส์และขนส่งไก่มีชีวิตใช้ดีเซลและไบโอดีเซล ปล่อย 138,014 kgCO₂e การขนส่ง ก่อนเชือดมีผลต่อความเครียดสัตว์และจำนวนซากคัตทิ้ง ซึ่งเพิ่มคาร์บอนโดยอ้อม ปัจจัยนี้สอดคล้องกับ Wiedmann & Minx (2008) ที่ชี้ว่าโลจิสติกส์เป็นองค์ประกอบสำคัญของ CFP ในอุตสาหกรรมอาหาร

2.3 ปัจจัยด้านการจัดการของเสีย (Waste Management) โรงงานมีของเสียจาก ซากไก่ เลือด ขน ไก่ตายก่อนเชือด (~17%) จุดนี้ถ้าควบคุมตามหลักฮาลาลได้ ก็จะลดการใช้พลังงานและค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ที่หลีกเลี่ยงได้ หรือ Avoided Emissions แม้มีการรีไซเคิลทำอาหารสัตว์ แต่ของเสียอินทรีย์ยังมีความเสี่ยงในการ ปล่อย มีเทน (CH₄) ซึ่งมีศักยภาพเรือนกระจกสูงกว่า CO₂ ถึง 25-28 เท่า (IPCC, 2006)

ข้อค้นพบเชิงคุณภาพในหลักการเชือดตามมาตรฐานฮาลาลส่งผลกับการลดคาร์บอน หรือ (Halal principle relate to carbon footprint reduction) โดยวิเคราะห์ในศาสตร์ฮาลาลร่วมกับ HCP (Halal Control Point) พบว่า จุด HCP หลายจุดลดคาร์บอนได้โดยธรรมชาติ เช่น Lairage (พักสัตว์ 30 นาที), ลดความเครียด ลดการตายก่อนเชือด ลด Waste ลด CH_4 จากการเน่าเสีย Stunning ที่ไม่ทำให้สัตว์ตายก่อนเชือดลดซากคัตทิ้ง ลด GHG จากการกำจัดซาก Slaughtering ตามหลักฮาลาล (ตัด 4 เส้นหลัก) เลือดออกหมด ลดการเกิดแบคทีเรีย ความเสี่ยงเน่าเสีย ลดการสูญเสียผลิตภัณฑ์ Bleeding 180 วินาที เพิ่ม Shelf life ลดความเสี่ยงสินค้าถูกคัตทิ้ง การล้างและ Chiller ใช้น้ำและพลังงานสูงที่สุด เป็น hotspot ที่ต้องจัดการ ผลพบว่าหลักศาสนา (Halal/Tayyib) มีผลส่งเสริมต่อแนวคิด Eco-Halal และสอดคล้องกับ SDG 12 และ SDG 13

3. ผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ที่ 3 ผลการวิเคราะห์แนวทางลดคาร์บอนของโรงงาน จากการสัมภาษณ์เชิงลึก ผู้เชี่ยวชาญเสนอแนวทางสำคัญ 3 ด้านดังนี้ 1) ด้านพลังงาน (Energy Reduction) แนวทางที่ได้รับการกล่าวถึงมากที่สุดคือ Solar Cell บนหลังคาโรงงาน ช่วยลดการใช้ไฟฟ้าได้ จากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นพบว่าการติดตั้งระบบ Solar Rooftop ในโรงงานสามารถลดค่าไฟฟ้าได้ประมาณ 15-25% ต่อปี โดยมีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) อยู่ที่ประมาณ 4-6 ปี ขึ้นอยู่กับขนาดระบบและรูปแบบการใช้พลังงานของโรงงาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามาตรการลดคาร์บอนดังกล่าวไม่เพียงมีประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม แต่ยังมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและสามารถนำไปใช้ได้จริงในภาคอุตสาหกรรม 2) ระบบการจัดการพลังงาน (Energy Monitoring /IoT) เพื่อลดการสูญเสียไฟฟ้าในห้องเย็นและระบบมอเตอร์ 3) การเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์ เช่น คอมเพรสเซอร์ประสิทธิภาพสูง เปลี่ยนมอเตอร์เป็น IE3/IE4 ปรับปรุงฉนวนห้องเย็น การจัดการของเสียแบบชีวภาพ (Bio-Waste to Energy) ทางโรงงานยืนยันว่าของเสียสามารถนำไปเพิ่มมูลค่าได้ เช่น ทำ Biogas จากซากและเลือด ช่วยลด CH_4 นำขน/เศษเนื้อไปทำอาหารสัตว์ การ Reuse น้ำในระบบล้างและ Chiller การรีไซเคิลน้ำและลด Water Footprint น้ำล้างไก่ 1.5 ลิตร/ตัว และ Chiller overflow 2.5 ลิตร/ตัว เป็นปริมาณที่สูง จึงเสนอให้ใช้ระบบ Recycle Water ในโรงบำบัด การแยกใช้น้ำอุณหภูมิต่ำในขั้นตอนที่ไม่สำคัญ 4) การพัฒนาผลิตภัณฑ์ Eco-Halal ผู้ถูกสัมภาษณ์ทั้งหมดตอบว่า พร้อม หากมีมาตรฐานนี้ในอนาคต โดยต้องปรับบรรจุภัณฑ์ลดพลาสติก ใช้น้ำพลังงานทดแทน เพิ่มความโปร่งใส เช่นระบบบันทึกเสียง “Bismillah Allahu Akbar” ระหว่างเชือด ซึ่งสอดคล้องตามหลักศาสนา

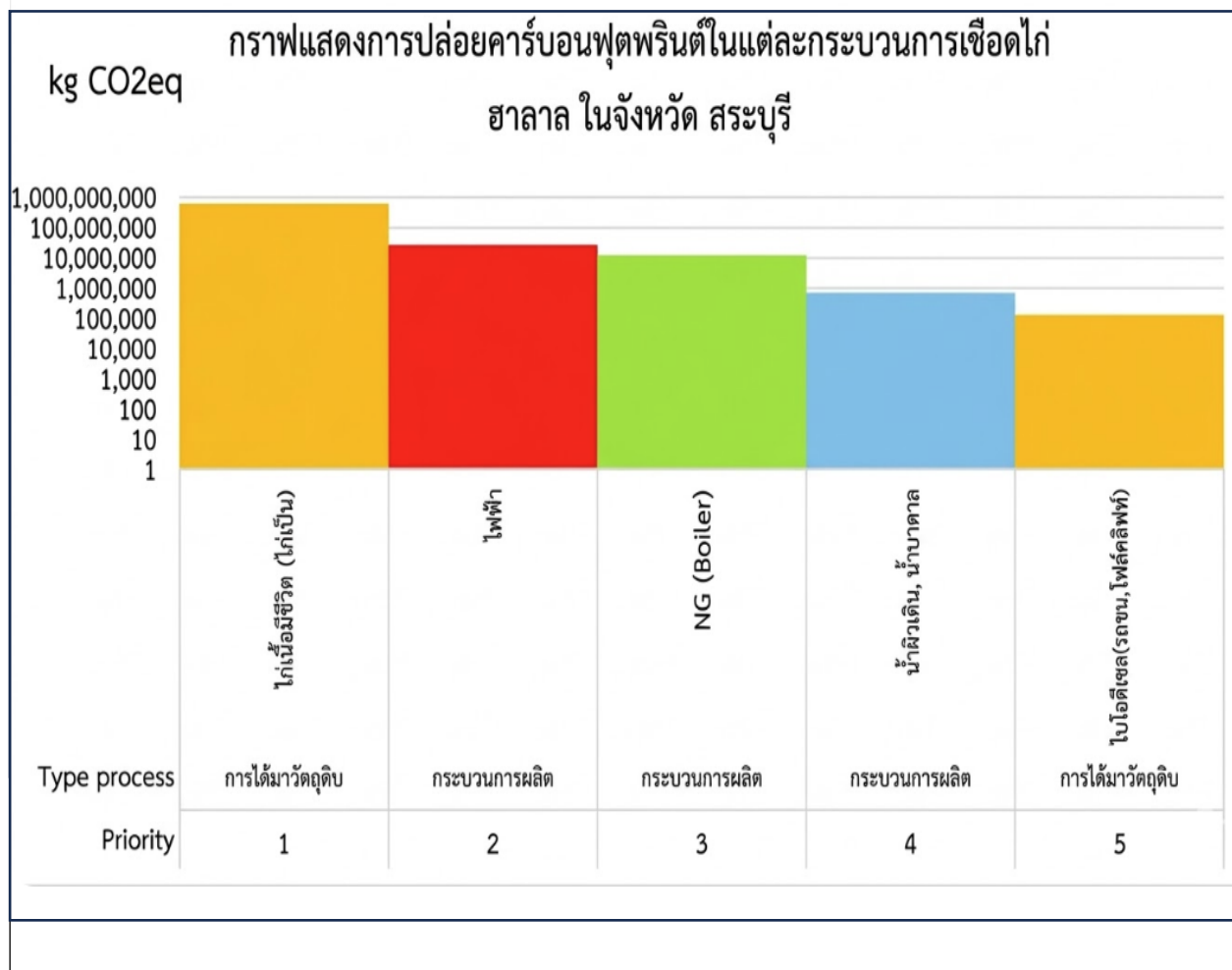
4) การบูรณาการข้อมูลด้วย Triangulation เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยผู้วิจัยใช้ 1) Data Triangulation ข้อมูลจากฝ่ายต่าง ๆ ให้ผลตรงกันว่า “ห้องเย็น” และ “ระบบน้ำร้อน” คือ Hotspot 2) Methodological Triangulation สัมภาษณ์เชิงลึก วิเคราะห์ข้อมูลพลังงานจริง สังเกตการณ์ที่หน่วยงานจริง 3) Theory Triangulation, PAS 2050, ISO 14067, อ้างอิงงานวิจัย Tetteh (2022), Franchetti (2013), Wiedmann (2008)

Item	Unit	Activity Total	EF	EF Unit	Reference	Method	Total (kgCO ₂ -eq)
NG (Boiler)NG (หม้อไอน้ำ)	MMBtu	151,892.00	0.06	kgCO ₂ - eq/MJ	TGO LESS guideline (NG 0.0562)	Activity (การเผาไหม้) (mmbtu*1055) x EF	9,005,839
NG (Boiler)	MMBtu	151,892.00	0.58	kgCO ₂ - eq/m ³	TGO LESS guideline (NG 0.58)	Activity (การได้มา) (MMBtu*27.31 m ³) x EF	2,405,942
น้ำบาดาล	m ³	136.00	0.25	kgCO ₂ - eq/m ³	TGO LESS guideline (0.2575)	Activity (m ³) x EF	34
น้ำผิวดิน	m ³	2,879,503.00	0.25	kgCO ₂ - eq/m ³	TGO LESS guideline (0.2575)	Activity (m ³) x EF	719,876
ไก่เนื้อมีชีวิต (ไก่เป็น)	kg	180,456,345.00	3.27	kgCO ₂ - eq/kg	TGO LESS guideline (3.2654)	Activity (kg) x EF	589,262,149
ไบโอดีเซล (รถ ขน, โฟล์คคลิฟต์)	ลิตร	45,977.00	2.71	kgCO ₂ - eq/L	TGO examples (Diesel 2.7078)	Activity (การเผาไหม้) (L) x EF	124,497
ไบโอดีเซล (รถ ขน, โฟล์คคลิฟต์)	ลิตร	45,977.00	0.35	kgCO ₂ - eq/kg	TGO examples (Diesel 0.3522)	Activity (การได้มา) (L/0.84kg) x EF	13,517
ไฟฟ้า	kWh	58,780,953.00	0.5	kgCO ₂ - eq/kWh	TGO	Activity (kWh) x EF	29,390,476

ผลการวิจัย พบว่าโรงงานเชือดไก่ฮาลาลในสระบุรีมีค่า Carbon Footprint เท่ากับ 4.21 kgCO₂eq/kg โดย Hotspot หลักคือ ระบบทำความเย็นและระบบน้ำร้อน รวมทั้งปัจจัยจากการขนส่งวัตถุดิบและการจัดการของเสียอันตราย ผลทดสอบเชิงคุณภาพชี้ว่าหลักฮาลาลช่วยลดของเสียได้จริง และมีศักยภาพพัฒนาเป็น “Eco-Halal Slaughterhouse” ในอนาคตได้ แนวทางลดคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ การใช้พลังงานทดแทน (Solar PV)

ตารางที่ 1 การปล่อยก๊าซคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ปี 2567

รวม Emissions carbon 630,922,330 (kgCO₂-eq) หรือ 4.21 kgCO₂-eq / ไก่ 1 kg



รูปที่3 กราฟแสดงการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นต์ในกระบวนการเชือดไก่ฮาลาล จ. สระบุรี ปี 2567

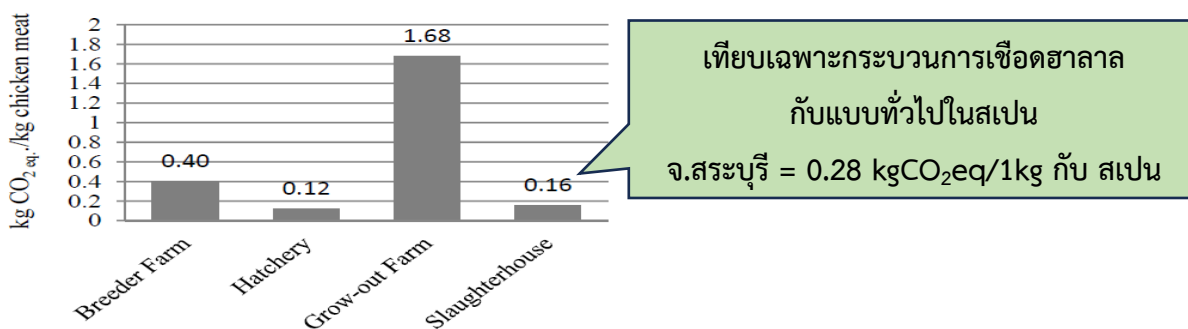
การอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้พบว่าโรงงานมีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์รวม 4.21 kgCO₂eq ต่อเนื้อไก่ 1 กิโลกรัม โดยมีแหล่งปล่อยสูงสุดจากไฟฟ้าในระบบทำความเย็นและการใช้ก๊าซ NG ในระบบน้ำร้อน ซึ่งสะท้อนลักษณะการใช้พลังงานเข้มข้นเหมือนโรงงานในยุโรป การอภิปรายเชิงทฤษฎี ผลวิจัย สอดคล้อง กับแนวคิดการประเมินวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment: LCA) ของ Franchetti & Apul (2013) ที่ระบุว่าอุตสาหกรรมเนื้อสัตว์ใช้พลังงานสูงและมีจุดปล่อยคาร์บอนหลักในกระบวนการแช่เย็นและลวกขน เช่นเดียวกับงานของ Tetteh et al. (2022) ซึ่งศึกษากระบวนการเชือดไก่ในยุโรปและพบว่า Cold Storage เป็น Hotspot ที่ก่อคาร์บอนสูงที่สุด ผลวิจัยยัง สอดคล้อง กับแนวคิดของ Wiedmann & Minx (2008) ที่ชี้ว่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของอาหารมักถูกรอบคลุมโดยการใช้พลังงานและโลจิสติกส์ มี Hotspot อยู่ในระบบทำความเย็นและระบบน้ำร้อน ผลวิจัยสอดคล้องเนื่องจากความเห็นของผู้เชี่ยวชาญทั้งหมดชี้ไปในทิศทางเดียวกัน คำอธิบายของผลที่เกิดขึ้นทั้งนี้อาจเป็นเพราะ

อุตสาหกรรมเชือดไก่ต้องพึ่งพาระบบควบคุมอุณหภูมิอย่างเข้มงวดเพื่อความปลอดภัยอาหารและการรักษาสถานะฮาลาล จึงใช้ไฟฟ้าปริมาณสูง อีกทั้งเครื่องจักรหลายส่วนยังเป็นแบบเดิมที่มีประสิทธิภาพต่ำ การเชื่อมโยงงานวิจัยที่ผ่านมาของ Pelletier (2017) ระบุว่ากว่า 40–60% ของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ในโรงงานเนื้อสัตว์มาจากระบบทำความเย็น ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยนี้ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการลดคาร์บอนในอุตสาหกรรมเชือดสัตว์จำเป็นต้องเริ่มที่ระบบพลังงานไฟฟ้าโดยเฉพาะการทำความเย็น เพื่อระบุจุดวิกฤติของการปล่อยคาร์บอนในกระบวนการผลิต พบว่า Hotspot หลัก ได้แก่ 1) ระบบทำความเย็น 2) ระบบน้ำร้อน/ลวกถอนขน 3) การขนส่งไก่มีชีวิต 4) การจัดการของเสียอินทรีย์ เช่น เลือดและซากไก่

การอภิปรายเชิงทฤษฎีนี้สอดคล้องกับโมเดล LCA ตามมาตรฐาน ISO 14067 ที่ระบุว่าจุดปล่อยสูงสุดมักมาจากการใช้พลังงานและของเสียอินทรีย์ เช่น มีเทน (CH_4) จากซากสัตว์ ซึ่งมีศักยภาพเรือนกระจกสูงกว่า CO_2 ถึง 25 เท่า นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานของ Moehh et al. (2021) ที่พบว่าการขนส่งสัตว์เป็นตัวแปรสำคัญของ CFP เพราะส่งผลต่ออัตราตายก่อนเชือด ซึ่งเพิ่ม Waste ในระบบการผลิต ผลวิจัยยัง ตรงตามทฤษฎีของ LCA ที่ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยด้านพลังงานและกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติมักเป็น Hotspot ในอุตสาหกรรมอาหาร อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยนี้ แตกต่าง จากงานของ Kanianska (2016) ที่พบว่าในบางโรงงาน ระบบ Boiler เป็น Hotspot สูงที่สุด แต่ในโรงงานสระบุรี ระบบทำความเย็นกลับเป็นปัจจัยหลัก ซึ่งอาจเป็นเพราะสภาพภูมิอากาศร้อนชื้นของไทยต้องอาศัยการทำความเย็นที่เข้มข้นกว่า การพิจารณาสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่า ของเสียอินทรีย์และโลจิสติกส์เป็นปัจจัยรองในการปล่อยคาร์บอน ผลวิจัยของ Nijdam et al. (2012) ยืนยันว่าความเครียดจากการขนส่งสัตว์ทำให้เกิดความสูญเสียมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยนี้ที่พบว่าของเสียจากไก่หลังเชือดถึง 17% ของซากคัตทิ้ง ผลวิจัยพบว่าแนวทางลดคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพที่สุด ได้แก่การติดตั้ง Solar PV ระบบ IoT/AI ในการจัดการพลังงาน Recycle น้ำล้างไก่และน้ำ Chiller ปรับปรุงอุปกรณ์ให้ประหยัดพลังงาน ใช้หลัก Halal Control Point (HCP) ลดการสูญเสีย การอภิปรายเชิงทฤษฎีแนวทางเหล่านี้ สอดคล้อง กับทฤษฎี Circular Economy ของ Ellen MacArthur Foundation (2015) ที่เน้นการหมุนเวียนทรัพยากร การใช้พลังงานทดแทน และลดของเสียจากต้นทาง ผลวิจัยยัง สอดคล้อง กับแนวคิด Eco-Halal ของ Talib et al. (2017) ที่ระบุว่าการผลิตฮาลาลควรเกื้อหนุนความยั่งยืน เช่น ลดของเสีย ลดการปนเปื้อน และใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า ซึ่งตรงกับผลวิจัยนี้ที่พบว่าการจัดการตามหลักฮาลาลช่วยลดความสูญเสียและคาร์บอนได้โดยตรง ผลที่แตกต่างจากทฤษฎีงานของ Rahman (2020) ระบุว่า Halal ไม่ได้เชื่อมโยงกับความยั่งยืนโดยตรงในระดับโรงงาน แต่ผลวิจัยนี้พบว่า HCP สามารถลดคาร์บอนโดยอ้อมได้จริง เช่น ลดไก่ตายก่อนเชือด ลดซากคัตทิ้ง ลดการเน่าเสีย เพิ่ม shelf life แสดงให้เห็นว่าฮาลาล และสิ่งแวดล้อมสามารถเกื้อหนุนกันได้ตามสมมติฐานที่กำหนดว่า “แนวทางที่เสนอจะสอดคล้องกับหลักฮาลาลและช่วยลดคาร์บอนได้จริง” ผลวิจัย สนับสนุนสมมติฐานทั้งหมด เพราะผู้เชี่ยวชาญทุกฝ่ายเห็นว่าแนวทางพลังงานทดแทน การปรับปรุงเครื่องจักร และการจัดการของเสียสามารถรองรับมาตรฐานฮาลาลได้อย่างสมบูรณ์ งานวิจัยที่สนับสนุนงานของ Sazelin et al. (2018) ชี้ว่าโรงงานฮาลาลที่บริหารจัดการ

water reuse และ energy recovery สามารถลดต้นทุนได้ถึง 18–25% ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยนี้เช่นเดียวกับงานของ Jamaludin (2019) ที่ระบุว่าการบูรณาการระบบฮาลาล สิ่งแวดล้อมช่วยเพิ่มความสามารถแข่งขันสู่ตลาดตะวันออกกลาง ดังนั้น การใช้แนวคิด Eco-Halal ร่วมกับเทคโนโลยีสีเขียวจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมเชือดสัตว์ในปัจจุบัน



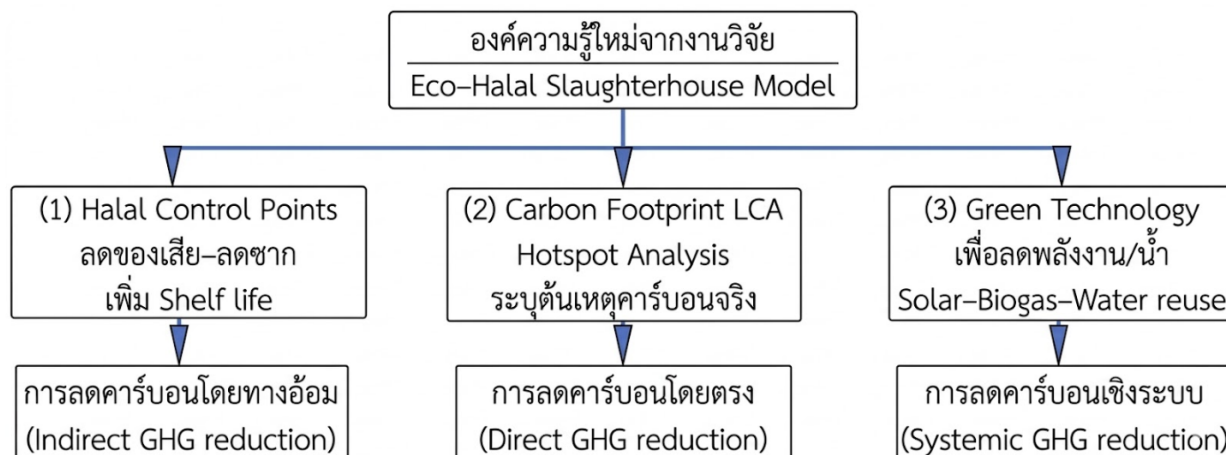
รูปที่4 กราฟเปรียบเทียบค่าการปล่อยคาร์บอนในกระบวนการเชือดไก่ฮาลาล จ.สระบุรี ประเทศไทย และโรงเชือดในประเทศสเปน

ที่มา (Harrison Tetteh 1 , Alba Bala 2, Pere Fullana-i-Palmer 2 , Mercè Balcells 3, María Margallo 4, Rubén Aldaco 4 and Rita Puig)

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าหลักฮาลาลไม่ได้เป็นเพียงข้อกำหนดทางศาสนา แต่ยังมีบทบาทเชิงสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในกระบวนการเชือด เช่น การเชือดที่ถูกต้องตามหลักศาสนา (Zabiha) ทำให้เลือดถูกระบายออกอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (COD/BOD) และลดภาระของระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยอ้อม นอกจากนี้ การลดซากคัตทิ้งและการเน่าเสียยังช่วยลดการเกิดก๊าซมีเทน (CH₄) จากของเสียอินทรีย์ สะท้อนให้เห็นถึงกลไก Eco-efficiency ของระบบ Halal-Tayyib อย่างเป็นรูปธรรม

องค์ความรู้ใหม่

งานวิจัยนี้ได้พัฒนา องค์ความรู้ โมเดลใหม่ สำหรับการประเมินและลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ในโรงงานเชือดไก่ฮาลาล จังหวัดสระบุรี โดยผสาน 3 มิติ ตามแผนภาพด้านล่าง



รูปที่ 5 แผนภูมิองค์ความรู้ใหม่ (Eco-Halal Slaughterhouse Knowledge Model)

สรุปองค์ความรู้ใหม่ คือ การบูรณาการฮาลาลร่วมกับการจัดการสิ่งแวดล้อม และเทคโนโลยี สามารถพัฒนาเป็นต้นแบบโรงงานเชือดไก่ฮาลาลที่ยั่งยืน (Eco-Halal) และการค้นพบงานวิจัยนี้นำเสนอองค์ความรู้ใหม่ใน 3 ประเด็นหลัก ได้แก่ (1) การพัฒนาโมเดล “Eco-Halal Slaughterhouse” ซึ่งบูรณาการหลักศาสนา เทคโนโลยี และการจัดการสิ่งแวดล้อมเข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ (2) การค้นพบ “Tropical Carbon Profile” ที่ชี้ให้เห็นว่าโรงงานในเขตร้อนมีโครงสร้างการปล่อยคาร์บอนแตกต่างจากยุโรป โดยมีระบบทำความเย็นเป็นปัจจัยหลักแทนระบบ Boiler (3) การอธิบายกลไกเชิงวิทยาศาสตร์ของ Halal ต่อการลดคาร์บอน (Halal-Carbon Nexus) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลักฮาลาลสามารถช่วยลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพทรัพยากรได้จริง องค์ความรู้ดังกล่าวสามารถใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาอุตสาหกรรมฮาลาลสู่ความยั่งยืนในระดับประเทศและระดับสากล

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะจากงานวิจัยเกี่ยวกับคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของโรงงานเชือดไก่ฮาลาลจังหวัดสระบุรี สามารถสรุปดังนี้

- 1) ควรเน้นการพัฒนากระบวนการผลิตพลังงานสะอาดโดยเร่งติดตั้งโซลาร์เซลล์ การใช้ IoT เพื่อติดตามพลังงาน และการปรับปรุงระบบทำความเย็นที่เป็น Hotspot หลักของการปล่อยคาร์บอน ลดของเสียในกระบวนการฮาลาล และการนำน้ำในระบบล้าง มาใช้ซ้ำ พร้อมทั้งใช้ Halal Control Points (HCP) ในการลดซากคัตทิ้งและการเน่าเสีย ซึ่งจะช่วยลดคาร์บอนได้โดยอ้อมอย่างมีประสิทธิภาพ
- 2) ควรจัดทำฐานข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นต์ระดับประเทศสำหรับอุตสาหกรรมฮาลาล และผลักดันภาพลักษณ์ Green Halal Thailand เพื่อเพิ่มศักยภาพการแข่งขันในตลาดตะวันออกกลางและยุโรป
- 3) ควรขยายการศึกษานวัตกรรมพลังงานใหม่ เช่น Heat Recovery, AI Cooling และศึกษาความเชื่อมโยงเชิงลึกระหว่างหลักฮาลาลกับ SDGs เพื่อพัฒนาเป็นมาตรฐาน Eco-Halal ที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยในการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- Abdulbutr, M. (n.d.). *Halal poultry slaughtering process in accordance with international standards*. Bureau of Livestock Product Standards and Certification, Department of Livestock Development.
- Ali, A., & Ali, A. (2011). Islamic marketing: An in-depth interview. *Journal of Islamic Marketing*, 2(2), 186–195. <https://doi.org/10.1108/17590831111139893>
- Aung, T. S., et al. (2023). Halal practices for responsible production and consumption towards sustainable future. <https://journal.ipb.ac.id/index.php/hass/article/view/59531>
- Ghoniya, N., Amilahaq, F., & Hartono, S. (2024). Business sustainability performance through sustainability awareness and business work ethics in Islamic institutions. *Cogent Business & Management*. <https://doi.org/10.1080/23311975.2024.2303789>
- British Standards Institution. (2011). *PAS 2050:2011 – Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. BSI Standards Limited.
- DinarStandard, & Dubai Islamic Economy Development Centre. (2023). *State of the global Islamic economy report 2023/24*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Greenhouse gas emissions from agrifood systems: Global, regional and country trends*. FAO.
- Franchetti, M., & Apul, D. (2013). *Carbon footprint analysis: Concepts, methods, implementation, and case studies*. CRC Press.
- Hussaini, M. (2025, May 9). Halal certification for meat & poultry. *Halal Foundation*. <https://halalfoundation.org/halal-meat-poultry-certification/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 14067:2018 – Greenhouse gases: Carbon footprint of products*. ISO.
- Journal of Fatwa Management and Research. (2024). *Jurnal pengurusan dan penyelidikan fatwa*, 29. <https://doi.org/10.33102/jfatwa.vol29no3.587>
- Krungsri Research. (2024). *Thailand poultry processing industry outlook*. Bank of Ayudhya.

- Muhamad, A., Syihab, A. H., & Achour, M. (2019). Quranic messages on environmental sustainability: An expository study of its relevance. *Al-Bayan: Journal of Qur'an and Hadith Studies*, 17(1), 38–59. <https://doi.org/10.1163/22321969-12340069>
- Priyakorn, P. (2018). The evolution and future trends of halal standard development and halal certification process in Thailand. *Journal of Public and Private Management*, 25(1), 151–172.
- Tetteh, H., Bala, A., Fullana-i-Palmer, P., Balcells, M., Margallo, M., Aldaco, R., & Puig, R. (2022). Carbon footprint: The case of four chicken meat products sold on the Spanish market. *Foods*, 11(22), 3712. <https://doi.org/10.3390/foods11223712>
- United Nations Environment Programme. (2023). *Global environmental outlook*. <https://www.unep.org/geo/>
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A definition of carbon footprint. In C. C. Pertsova (Ed.), *Ecological economics research trends* (pp. 1–11). Nova Science.
- Wongnitiphat, O. (2022, June 9). Electrical water bath stunning in poultry slaughterhouses. Department of Livestock Development, Ministry of Agriculture and Cooperatives.
- Zailani, S., Iranmanesh, M., Aziz, A. A., & Kanapathy, K. (2017). Halal logistics opportunities and challenges. *Journal of Islamic Marketing*, 8(1), 127–139. <https://doi.org/10.1108/JIMA-04-2015-0028>