



Srinakharinwirot University Journal of Sciences and Technology

Volume 18, Issue 1, January - June 2026, Pages 1 – 21 ISSN 2985-2641 (Online)



Research Article

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมในการจัดการตู้เย็นที่ใช้แล้ว

Environmental Impact Evaluation for Waste Refrigerator Management

สุรัส ตั้งไพฑูรย์^{1*}, แวบุญ แยมแสงสังข์¹, เสกสรร พาป่อง²Surus Tangpaitoon^{1*}, Weawboon Yamsaengsung¹, Sekson Papong²¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช¹School of Science and Technology, Sukhothai Thammathirat.²ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ²National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency.

*Corresponding author, e-mail: tangpaitoon@gmail.com

Received: 6 August 2025; Revised: 20 May 2026; Accepted: 20 May 2026

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันที่โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าประเภทตู้เย็นและอุปกรณ์ทำความเย็นมีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของมนุษย์เป็นอย่างมาก เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีการใช้สารทำความเย็นเป็นองค์ประกอบเหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและภาวะโลกร้อนเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าและการปลดปล่อยสารทำความเย็น การวิจัยมีวัตถุประสงค์ (1) เพื่อศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของตู้เย็นที่ใช้แล้วระหว่างหน่วยการจัดการซากผลิตภัณฑ์นอกระบบ และหน่วยการจัดการซากผลิตภัณฑ์ในระบบ (2) เพื่อเสนอแนวทางการจัดการของเสียอันตรายประเภทตู้เย็นที่เหมาะสมเพื่อรองรับมาตรการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทย กลุ่มตัวอย่างซากผลิตภัณฑ์ตู้เย็นชนิดที่ใช้ในบ้านและเป็นของเสียอันตรายจากชุมชน จำนวน 5 ตัวอย่างต่อพื้นที่ ภายใต้หน่วยหน้าที่การทำงาน ตู้เย็นขนาด 6.0-7.0 คิวที่ใช้สารทำความเย็น R134a ชนิด 1 ประตู อายุใช้งานมากกว่า 10 ปี งานวิจัยนี้ทำการศึกษาหน่วยการจัดการซากผลิตภัณฑ์ตู้เย็นนอกระบบ จังหวัดบุรีรัมย์ และในระบบ จังหวัดชลบุรี ขอบเขตการศึกษาตั้งแต่กระบวนการนำเข้าซากผลิตภัณฑ์ตู้เย็นจากครัวเรือนมายังจุดรวบรวม การรื้อคัดแยก การขนส่ง การรีไซเคิลและการกำจัดซากตู้เย็น การประเมินวัฏจักรชีวิตใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 8.3 ผลการทดลองพบว่า (1) กลุ่มผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ก่อนผลกระทบสูงสุดทั้งสองรูปแบบ รองลงมาคือ ผลกระทบด้านการเกิดความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก ที่เกิดขึ้นเฉพาะการจัดการซากผลิตภัณฑ์นอกระบบ และผลกระทบด้านการลดลงของโอโซน ในสัดส่วนที่แตกต่างกันตามลำดับ การจัดการซากผลิตภัณฑ์

ในระบบมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพียง 3.21 kg CO₂eq ขณะที่การจัดการซากผลิตภัณฑ์นอกระบบมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 192.20 kg CO₂eq โดยเป็นอัตราที่สูงกว่าถึง 59.87 เท่า (2) งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางการปรับปรุงกระบวนการเรียกคืน การรื้อแยกซากตู้เย็นที่ชำรุด การจัดการสารทำความเย็นและการจัดการวัสดุให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม; การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์; ซิมาโปร; ตู้เย็น

Abstract

At present, as global temperatures continue to rise, electrical appliances such as refrigerators and cooling equipment have become increasingly important to human well-being. These appliances, which use refrigerants as a key component, cause significant environmental impacts, particularly in terms of electricity consumption and refrigerant emissions. This research aimed to: (1) Study and comparatively analyze the environmental impacts of end-of-life refrigerators between informal e-waste management units and formal e-waste management units; and (2) Propose guidelines for managing hazardous waste from end-of-life refrigerators in order to support Thailand's electronic waste (e-waste) management measures. The sample group consisted of five household refrigerator waste samples per study area. The functional unit was defined as a 6.0–7.0 cubic-foot, single-door refrigerator using R134a refrigerant, with a service life of more than 10 years. This study examined informal refrigerator waste management units in Buriram Province and formal management units in Chonburi Province. The system boundaries covered the processes from collection of end-of-life refrigerators from households to collection points, dismantling and sorting, transportation, recycling, and final disposal. Life Cycle Assessment (LCA) was conducted using SimaPro 8.3 software. The results indicated that: (1) Climate change impact was the highest impact category in both management systems. This was followed by terrestrial ecotoxicity, which occurred only in the informal management system, and ozone depletion impacts, with differing proportions. The formal management system generated only 3.21 kg CO₂eq of greenhouse gas emissions, whereas the informal system emitted 192.20 kg CO₂ eq approximately 59.87 times higher. (2) The study proposed improvements in collection processes, dismantling of end-of-life refrigerators, refrigerant management, and material management to enhance environmental friendliness.

Keywords: environmental impact assessment; life cycle assessment; simapro; refrigerator

บทนำ

ปัจจุบันเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประเภทเครื่องทำความเย็นมีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพชีวิตของมนุษย์ โดยเฉพาะภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและอุณหภูมิโลกที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความต้องการใช้เครื่องทำความเย็นเพิ่มขึ้นทุกปี ไม่ว่าจะเป็นเครื่องปรับอากาศหรือตู้เย็นในทุกภาคส่วน ทั้งภาคอุตสาหกรรม ภาคครัวเรือน และภาคการขนส่ง (Center of Excellence on Hazardous Substance and Waste Management,

Chulalongkorn University, 2020) [1] อย่างไรก็ตาม การบริโภคเครื่องใช้ไฟฟ้าดังกล่าวมีส่วนทำให้ปัญหาภาวะโลกร้อนทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีสารทำความเย็นเป็นองค์ประกอบ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณสูงระหว่างการทำงานของอุปกรณ์ รวมถึงการรั่วไหลและการแพร่กระจายของสารทำความเย็นประเภทคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon: CFCs) สู่ชั้นบรรยากาศ อันเนื่องมาจากการจัดการที่ไม่เหมาะสม ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนและการทำลายชั้นโอโซนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศชุมชนซึ่งรวมถึงสารเคมีอันตรายที่ตกค้างในระบบนิเวศโดยเฉพาะอย่างยิ่งโฟม ฉนวนกันความร้อน ชิ้นส่วนพลาสติก และสารโลหะหนักที่ย่อยสลายได้ยาก เป็นต้น การรื้อคัดแยกและการรีไซเคิลซากตู้เย็นเพื่อนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ของประเทศไทยยังคงมีอัตราที่ต่ำเพียงร้อยละ 83 ขณะที่เครื่องปรับอากาศตัวในอาคาร เครื่องปรับอากาศตัวนอกอาคารและเครื่องคอมพิวเตอร์มีอัตราการนำกลับมาใช้ใหม่มากถึงร้อยละ 99.33 98.99 และ 100 ตามลำดับ (Center of Excellence on Hazardous Substance and Waste Management, Chulalongkorn University, 2021) [2] ความแตกต่างดังกล่าวมีสาเหตุมาจากลักษณะองค์ประกอบของวัสดุและสารเคมีภายในตู้เย็น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารที่มีความเป็นอันตรายสูง และต้องอาศัยกระบวนการจัดการเฉพาะทาง นอกจากนี้วัสดุบางประเภทภายในตู้เย็นยังมีข้อจำกัดในการนำกลับมาใช้ซ้ำหรือรีไซเคิล เช่น โฟม-พอลิยูรีเทน ฉนวนกันความร้อน และสารทำความเย็น (refrigerant) ซึ่งล้วนต้องผ่านกระบวนการจัดการอย่างเหมาะสมเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ ในปัจจุบันรูปแบบการจัดการซากผลิตภัณฑ์ด้วยการรื้อคัดแยกซากตู้เย็นที่ใช้แล้วที่อยู่นอกระบบ (Informal sector) มีการดำเนินการคัดแยกกันในบางชุมชนหรือบางหมู่บ้านในต่างจังหวัด (Phruksasit, 2021) [3] และการจัดการซากผลิตภัณฑ์ตู้เย็นในระบบ (Formal sector) ซึ่งเป็นการคัดแยกตามกฎหมายโรงงานลำดับที่ 105 106 ตามประกาศของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ต่างมีกระบวนการวิธีดำเนินการและเทคโนโลยีจัดการซากที่มีความแตกต่างกัน องค์ประกอบและมาตรฐานในการดำเนินการรื้อคัดแยกและการรีไซเคิลซากที่ไม่เหมือนกันย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่าง ๆ ในระดับความรุนแรงที่แตกต่างกัน (Electrical and Electronics Institute, 2022) [4] ในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีตัวแบบกระบวนการจัดการรื้อคัดแยกและรูปแบบเทคโนโลยีการรีไซเคิลซากตู้เย็นเพื่อนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ที่เหมาะสมชัดเจน ไม่สามารถรองรับสถานการณ์ด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงในปัจจุบัน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมในการจัดการซากการตู้เย็นที่ใช้แล้ว เปรียบเทียบระหว่างการจัดการซากผลิตภัณฑ์นอกระบบและการจัดการซากผลิตภัณฑ์ในระบบ เพื่อเป็นแนวทางการจัดการของเสียอันตรายประเภทซากตู้เย็นที่เหมาะสมในการรองรับมาตรการการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทยตาม (ร่าง) พระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Pollution Control Department, 2021) [5] ที่กำลังจะประกาศบังคับใช้

กรอบแนวคิดการวิจัย

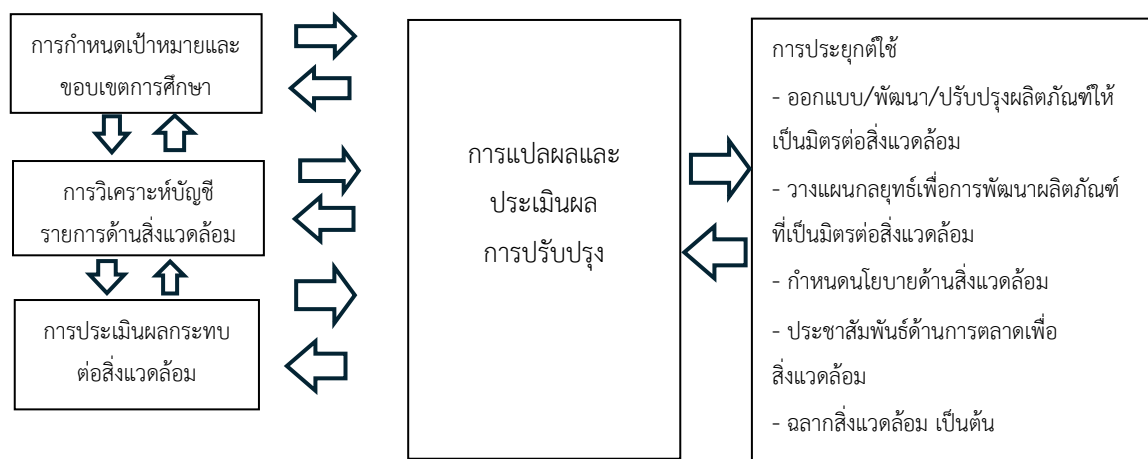
การศึกษามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมของตู้เย็นที่ใช้แล้ว เริ่มตั้งแต่กระบวนการนำเข้าซากตู้เย็นจากจุดรวบรวมกระบวนการรื้อคัดแยกซากตู้เย็น การขนส่ง การรีไซเคิล การเผาสารทำความเย็น และกำจัดฝังกลบ (Gate to Grave) ของหน่วยจัดการซากผลิตภัณฑ์ตู้เย็นที่ใช้แล้วนอกระบบ และหน่วยจัดการซากผลิตภัณฑ์ตู้เย็นที่ใช้แล้วในระบบ จำนวน 5 ตัวอย่างต่อพื้นที่ ภายใต้หน่วยหน้าที่การทำงาน (Functional unit) ตู้เย็นขนาด 6.0-7.0 คิวที่ใช้สารทำความเย็น R134a ชนิด 1 ประตุ นำข้อมูลมาวิเคราะห์ LCA (Life Cycle Analysis) และทำการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการจัดการซากผลิตภัณฑ์ตู้เย็นนอกระบบ และการจัดการซากผลิตภัณฑ์ตู้เย็นในระบบ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากตู้เย็นที่ใช้แล้ว วิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างหน่วยจัดการซากผลิตภัณฑ์นอกระบบ (Informal sector) และในระบบ (Formal sector)
2. เพื่อเสนอแนวทางการจัดการของเสียอันตรายประเภทตู้เย็นที่หมดอายุเพื่อการรองรับมาตรการการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทยตาม (ร่าง) พระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่กำลังจะประกาศบังคับใช้

วิธีดำเนินการวิจัย

การประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และการประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นภายใต้ นิยามขององค์กรระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน (International Organization for Standardization :ISO) ตามอนุกรม มาตรฐาน ISO 14040 (International standard ISO14040, 2006) ที่ระบุว่า LCA เป็นการเก็บรวบรวมและการประเมินค่า ของสารขาเข้าและสารขาออก ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การจำหน่าย การนำไปใช้งาน และการทำลายหรือทิ้งไป รวมถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่มีโอกาสเกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิต หรืออาจกล่าวได้ว่าการ พิจารณาผลกระทบของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เกิดจนถึงหลุมฝังกลบ (Cradle to Grave) ซึ่งเป็นการประเมินวัฏจักรชีวิตของ ผลิตภัณฑ์แบบสมบูรณ์โดยเริ่มตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบที่ใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ การนำ ผลิตภัณฑ์ไปใช้งานตลอดจนการบำบัดและกำจัดซากหลังหมดอายุการใช้งานโดยมีการอ้างอิงถึงปริมาณพลังงาน วัตถุดิบที่ใช้ และมลพิษที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมทั้งทางอากาศ น้ำ และดิน รวมถึงการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ครอบคลุมทั้ง ระบบนิเวศ สุขอนามัย และคุณภาพชีวิต เพื่อให้รู้ถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นระหว่างกิจกรรม และหาแนวทางในการ ปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุดอย่างเป็นรูปธรรม (Sampattagul, 2012) [6]



ภาพที่ 1 กรอบการดำเนินงาน LCA

วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตในการจัดการตู้เย็นที่ใช้แล้วในวิจัยครั้งนี้ ได้อ้างอิงมาวิธีการตามมาตรฐาน ISO 14040 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 8.3 ในการประมวลผลข้อมูลและการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and Scope Definition)

1.1 การกำหนดเป้าหมาย (Goal) เพื่อประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของระบบการจัดการซากตู้เย็นที่ใช้แล้ว โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบการจัดการแบบไม่เป็นทางการ (Informal sector) และระบบการจัดการที่เป็นทางการ (Formal sector) เพื่อเสนอแนวทางที่เหมาะสมในการจัดการ โดยสถานประกอบการถอดแยกซากผลิตภัณฑ์นี้

1) Informal sector เป็นหน่วยจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ตั้งอยู่ในบ้านเรือนหรือพื้นที่เฉพาะที่อยู่ในชุมชนถอดแยก ไม่ได้เป็นโรงงานลำดับที่ 105 106 ตามประกาศของกรมโรงงานอุตสาหกรรม วัตถุประสงค์เพื่อประโยชน์จากการขายวัสดุมีค่าที่ได้จากการถอดแยกซากผลิตภัณฑ์

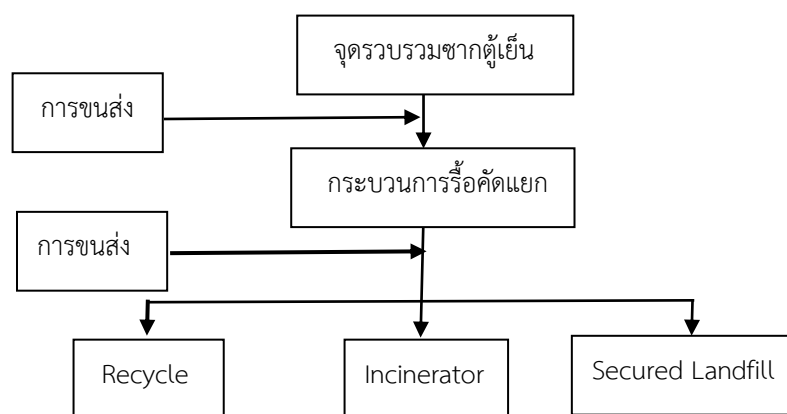
2) Formal sector เป็นหน่วยจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ขึ้นทะเบียนต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งโรงงานลำดับที่ 105 ประกอบกิจการเกี่ยวกับการคัดแยกหรือฝังกลบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และโรงงานลำดับที่ 106 ประกอบกิจการเกี่ยวกับการนำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ใช้แล้วหรือของเสียจากโรงงานมาผลิตเป็นวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ใหม่โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตทางอุตสาหกรรม และนำเศษเหลือทิ้งสุดท้ายไปฝังกลบหรือกำจัดในโรงงานลำดับที่ 101

1.2 หน่วยหน้าที่การใช้งาน (Functional Unit)

ในการวิจัยนี้กำหนดหน่วยหน้าที่การทำงาน คือ ซากตู้เย็นที่ใช้แล้วจากบ้านเรือนขนาด 6.0 -7.0 คิว (ลูกบาศก์ฟุต) ชนิด 1 ประตูล้วน 1 เครื่อง (น้ำหนักเฉลี่ย) โดยเป็นตู้เย็นที่มีอายุการใช้งานไม่น้อยกว่า 10 ปีที่ใช้สารทำความเย็นชนิด R134a โดยสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงจาก Informal sector และ Formal sector พื้นที่ละ 5 เครื่องแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละ sector

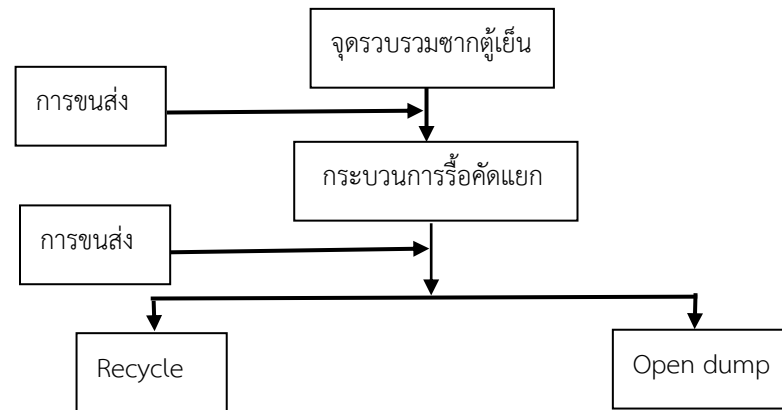
1.3 การกำหนดขอบเขตงานวิจัย (System boundary)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่กระบวนการขนส่งซากตู้เย็นที่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตรายชุมชน (Household hazardous waste) จากจุดรวบรวมกระบวนการรีไซเคิลแยก การขนส่งขึ้นส่วน การนำกลับมาใช้ใหม่ การกำจัดและบำบัด (Gate to Grave) โดยมีขอบเขตดังนี้ สำหรับ Formal sector ตั้งแต่การขนส่งจากจุดรวบรวมไปยังหน่วยรีไซเคิลแยก กระบวนการรีไซเคิลแยก การขนส่งขึ้นส่วนเพื่อไป Recycle (การนำกลับมาใช้ใหม่) การนำไปเผาที่เตาเผาอุณหภูมิสูง และการนำไปฝังกลบ (Secured Landfill) ดังภาพ



ภาพที่ 2 ขอบเขตงานวิจัย System boundary สำหรับ Formal sector

ขอบเขตงานวิจัย System boundary สำหรับ Informal sector ตั้งแต่การขนส่งจากจุดรวบรวมไปยังจุดรีไซเคิลแยก กระบวนการรีไซเคิลแยก การขนส่งขึ้นส่วนเพื่อไป Recycle (การนำกลับมาใช้ใหม่) และการกำจัดทิ้งกลางแจ้ง ดังภาพ



ภาพที่ 3 ขอบเขตงานวิจัย System boundary สำหรับ Informal sector

1.4 การตั้งสมมติฐานและข้อจำกัดในงานวิจัย (Limitation and Assumption)

การศึกษาเกี่ยวกับการประเมินวัฏจักรชีวิตในประเทศไทยได้มีการดำเนินการมาช่วงระยะเวลาหนึ่ง ปัจจุบันฐานข้อมูลการผลิตวัตถุดิบหลายชนิดในประเทศไทยมีการรวบรวมอย่างเป็นระบบมากขึ้น แต่ในส่วนของฐานข้อมูล End-of-Life ยังไม่มีการศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่จริงจัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการกำจัดและบำบัดซากผลิตภัณฑ์ที่เป็นซากของเสียอันตรายชุมชนทั้งหน่วยจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็น Informal sector และ Formal sector ซึ่งในแต่ละ sector ต่างมีกระบวนการในการจัดการรีไซเคิล การรีไซเคิล การบำบัดและกำจัดที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับความรุนแรงที่ต่างกัน ข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้จะได้มาจากการสำรวจภาคสนามเพื่อนำมาวิเคราะห์ในโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 8.3 โดยการวิจัยครั้งนี้ปรับใช้ฐานข้อมูลของประเทศไทยในสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2564 ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม แต่ละพื้นที่จะสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงซากตู้เย็นที่ใช้แล้วจำนวน 5 เครื่องที่มีองค์ประกอบสมบูรณ์และครบถ้วนเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของตัวแทนในการวิเคราะห์เปรียบเทียบจึงต้องเป็นขนาดความจุ(คิว) และน้ำหนักเฉลี่ย(กิโลกรัม)ที่ใกล้เคียงกันของทั้งสองพื้นที่ดังกล่าวจากภาพที่ 2 และ 3 แสดงให้เห็นความแตกต่างในส่วนวิธีการจัดการแบบ Informal ที่มีการจัดการ 2 วิธี ในขณะที่ Formal มีการจัดการ 3 วิธี ส่วนกระบวนการรีไซเคิลแยกกรรมวิธีของทั้งสองพื้นที่มีความแตกต่างกันจึงต้องศึกษารายละเอียดของกระบวนการทำงานเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด

ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้ ได้แก่ การรวบรวมซากตู้เย็นที่ใช้แล้วจำนวน 5 ตัวอย่างต่อพื้นที่ศึกษา โดยกำหนดให้จังหวัดบุรีรัมย์เป็นตัวแทนของการจัดการซากตู้เย็นในระบบนอกทางการ (informal sector) และจังหวัดชลบุรีเป็นตัวแทนของการจัดการซากตู้เย็นในระบบทางการ (formal sector) ทั้งนี้ ซากผลิตภัณฑ์ตู้เย็นที่นำมาศึกษาเป็นของเสียที่เกิดจากชุมชนเท่านั้น ไม่ได้ครอบคลุมถึงซากตู้เย็นที่เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมและอยู่ในพื้นที่ในช่วงระยะเวลาการเก็บข้อมูลระหว่างเดือนธันวาคม 2565 ถึงเดือนเมษายน 2566 พบว่าทั้งสองพื้นที่ที่มีสัดส่วนซากตู้เย็นขนาด 6.0–7.0 คิว เป็นประชากรส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 60 รองลงมาคือขนาด 5.0 คิวลงมา คิดเป็นร้อยละ 25 และขนาดมากกว่า 7.0 คิว คิดเป็นร้อยละ 15 โดยตู้เย็นส่วนใหญ่มีอายุการใช้งานเฉลี่ยมากกว่า 10 ปี ดังนั้น งานวิจัยจึงเลือกใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยกำหนดคุณลักษณะของกลุ่มตัวอย่างให้เป็นตู้เย็นชนิด 1 ประตู ขนาด 6.0–7.0 ลูกบาศก์ฟุต ใช้สารทำความเย็น R134a และมีอายุการใช้งานเฉลี่ยมากกว่า 10 ปี ทั้งนี้ ยังพิจารณาให้น้ำหนักเฉลี่ยของตู้เย็นจากทั้งสอง

พื้นที่ที่มีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากผลิตภัณฑ์แต่ละยี่ห้อมีความแตกต่างกันน้ำหนักรวมตามเทคโนโลยีการผลิตผลิตภัณฑ์แต่ละยี่ห้อ ซึ่งส่งผลต่อผลการประเมินวัฏจักรชีวิตอย่างมีนัยสำคัญ

2. การวิเคราะห์บัญชีรายการ (Inventory analysis)

การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Inventory : LCI) โดยการเก็บรวบรวมและคำนวณข้อมูลที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา ทำการสร้างแผนภูมิการตรวจสอบ Inventory ตลอดจนวงจรชีวิต ในขั้นตอนนี้มีการคำนวณหาปริมาณของสารขาเข้าและสารขาออกจากผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาถึงทรัพยากร พลังงานและมลพิษที่เกิดขึ้น มีการปล่อยของเสียแพร่กระจายลงสู่ดิน น้ำและอากาศในปริมาณเท่าไร เพื่อจัดทำรายละเอียดของบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม และนำไปใช้ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของขั้นตอน End-of-Life ของผลิตภัณฑ์ผู้ยื่นที่ใช้แล้ว

3. การประเมินผลกระทบ (Impact Assessment)

ในการวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 8.3 ประมวลผลข้อมูลและประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยใช้การประเมินผลกระทบด้วยวิธี ReCiPe ซึ่งเป็นวิธีที่ทันสมัย การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมเป็นการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมชั้นกลาง (Mark et al., 2017) [7] โดยดัชนีชี้วัดทางสิ่งแวดล้อมที่พิจารณาในงานวิจัยครั้งนี้ซึ่งเป็นผลกระทบจากกิจกรรมของการจัดการซากตู้เย็นที่ใช้แล้วตั้งแต่กระบวนการขนส่งจากสถานที่รวบรวมมายังหน่วยรีไซเคิลแยก การรีไซเคิลแยก การขนส่งวัสดุมีค่าไปยังโรงงานรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การขนส่งของเสียไปบำบัดและกำจัดทิ้งหมด 12 กลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

- 1) การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change)
- 2) การลดลงของโอโซน (Ozone depletion)
- 3) การเกิดภาวะความเป็นกรดทางดิน (Terrestrial Acidification)
- 4) การเกิดภาวะพิษน้ำเค็มโตผิดปกติ (Freshwater Eutrophication)
- 5) ความเป็นพิษต่อมนุษย์ (Human toxicity)
- 6) ศักยภาพในการเกิดออกซิเดชันเนื่องจากปฏิกิริยาแสง-เคมี (Photochemical oxidant formation)
- 7) การเกิดฝุ่นละออง (Particulate matter formation)
- 8) การเกิดภาวะพิษต่อระบบนิเวศบนบก (Terrestrial ecotoxicity)
- 9) การเกิดภาวะพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ (Freshwater ecotoxicity)
- 10) การลดลงของทรัพยากรน้ำ (Water depletion)
- 11) การลดลงของโลหะ (Metal depletion)
- 12) การลดลงของฟอสซิล (Fossil depletion)

4. การแปลผลการศึกษา (Life Cycle Interpretation)

นำผลการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตที่ได้มาวิเคราะห์และแปลผลการศึกษาโดยจะต้องมีความสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษาที่กำหนดไว้ ประเมินโอกาสที่เป็นไปได้ในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสามารถชี้ชัดลงไปถึงกระบวนการ กรรมวิธีที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้มากที่สุด เพื่อการปรับเปลี่ยนวิธีการ กระบวนการและแนวทางการปรับปรุงพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และกระบวนการในการจัดการซากตู้เย็นที่ใช้แล้วที่เหมาะสมที่สุด

ข้อมูลการวิจัย

1. การรวบรวมซากตู้เย็น การรวบรวมซากตู้เย็นที่ใช้แล้วจำนวน 5 ตัวอย่างต่อพื้นที่ ทั้งในพื้นที่ Formal sector และ Informal sector ระหว่างธันวาคม 2565 - เมษายน 2566 เป็นตู้เย็นชนิด 1 ประตู ขนาด 6.0-7.0 คิว ถูกบดทิ้งโดย

ใช้สารทำความเย็น R134a น้ำหนักเฉลี่ยของตู้เย็นของทั้งสองพื้นที่ มีค่าน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน และมีอายุการใช้งานเฉลี่ยมากกว่า 10 ปี การเลือกตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ที่จตุรบรรรม

ตารางที่ 1 ตัวอย่างซากผลิตภัณฑ์ตู้เย็น Informal sector

ตู้ที่	ยี่ห้อ	คิว	น้ำหนัก/กก.	ปี
1	Hitachi	6.6	36.46	2555
2	Sharp	5.9	37.00	2546
3	Hitachi	6.8	39.00	N/A
4	Hitachi	5.9	30.00	N/A
5	Hitachi	6.0	32.20	N/A

หมายเหตุ : N/A ไม่พบข้อมูล

ตารางที่ 2 ตัวอย่างซากผลิตภัณฑ์ตู้เย็น Formal sector

ตู้ที่	ยี่ห้อ	คิว	น้ำหนัก/กก.	ปี
1	Toshiba	5.9	33.59	N/A
2	Mitsubishi	5.9	33.90	2556
3	Mitsubishi	6.0	32.38	2557
4	Panasonic	6.0	28.93	2551
5	Hitachi	6.6	34.90	2554

หมายเหตุ : N/A ไม่พบข้อมูล

การขนส่ง (Transportation) จากจตุรบรรรมไปยังจุดรีไซเคิลแยก

1) ซากตู้เย็นที่ใช้แล้ว Informal sector นำเข้ามาจากภายในจังหวัดรวมไว้ที่ห้างสรรพสินค้าโรบินสัน จังหวัดบุรีรัมย์ขนส่งด้วยรถยนต์ 6 ล้อขนส่งครั้งละ 40 ตู้ต่อเที่ยว ระยะทางประมาณ 100 กิโลเมตร

2) ซากตู้เย็นที่ใช้แล้ว Formal sector นำเข้ามาจากจตุรบรรรม วัดสวนแก้ว จังหวัดนนทบุรีระยะทาง 160 กิโลเมตรขนส่งด้วยรถยนต์ 10 ล้อพ่วงขนส่งครั้งละ 104 ตู้ต่อเที่ยว (52 ตู้ต่อคัน)

2. กระบวนการรีไซเคิลแยกซากตู้เย็น ขั้นตอนกระบวนการเชิงวิศวกรรมและเทคโนโลยีการรีไซเคิลแยก ใช้การสังเกตด้วยสายตาและการจดบันทึกในแบบฟอร์มบันทึกข้อมูล

การถอดแยกองค์ประกอบภายในซากตู้เย็นของ Formal sector ซึ่งเป็นหน่วยจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นโรงงานลำดับที่ 105 106 ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม มีการวางแผนและออกแบบไลน์การรีไซเคิลแยกเป็นรุ่น(Lot) ชนิดของซากผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ เช่น เครื่องปรับอากาศ โทรทัศน์ ตู้เย็น เป็นต้น มีการใช้แรงงานที่ผ่านการฝึกอบรมอย่างเป็นระบบ มีขั้นตอนกระบวนการทำงาน วิธีการถอดแยกที่มีมาตรฐาน (Standard Operation Procedure) ในการศึกษาแนวทาง Formal sector ได้กำหนดสายการผลิตเฉพาะการรีไซเคิลแยกตู้เย็นจำนวน 5 เครื่อง ขนาด 6-7 คิว โดยมีการดำเนินการตามขั้นตอนกระบวนการมาตรฐานการรีไซเคิลแยก ผู้ปฏิบัติงานจำนวน 6 คนโดยมีเวลาการจัดเก็บสารทำความเย็นเฉลี่ย 20 นาทีต่อเครื่อง และเวลาการรีไซเคิลแยก Circle Time โดยเฉลี่ย 40 นาทีต่อ

เครื่อง การแต่งกายในชุดยูนิฟอร์มของบริษัท มีอุปกรณ์ป้องกันความปลอดภัยในการทำงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการถอดแยก ประกอบด้วย 1. ประแจ 2. ขวาน 3. คีม 4. ไขควง 5. ค้อน 6. เครื่องจับเก็บสารทำความเย็น 7. เครื่องปอกสายไฟฟ้า และอุปกรณ์ความปลอดภัยต่าง ๆ หน้ากากอนามัย ถุงมือ เครื่องครอบหู แว่นตา รองเท้าเซฟตี้ เป็นต้น ภายหลังการรื้อคัดแยก ซึ่งกระบวนการของ Formal sector มีการแยกชนิดชิ้นส่วนแบ่งประเภทอย่างชัดเจนเพื่อนำไปรีไซเคิล นำสารทำความเย็นไปเผาทำลาย และนำเศษเหลือทิ้งไปฝังกลบแบบ Secure landfill ภายใต้กฎหมายของกรมโรงงานอุตสาหกรรมอย่างเคร่งครัด

1. การขนส่ง (Transportation) ชิ้นส่วนที่มีค่า เช่น เหล็กทองแดง อลูมิเนียม พลาสติก ส่งไปยังโรงงานรีไซเคิล ในจังหวัดชลบุรีมีระยะทางขนส่งรัศมี 50 กิโลเมตร ด้วยรถกระบะ 4 ล้อ และ/หรือ 6 ล้อ

2. การขนส่ง (Transportation) สารทำความเย็น (Refrigerant) นำยาคอมเพรสเซอร์ PU โฟมเพื่อนำไปเผาทำลาย ในเตาเผาอุณหภูมิสูงที่โรงงาน BPEC (Bangpoo Environmental Complex) ตั้งอยู่ในนิคมฯ บางปู สมุทรปราการ มีระยะทางขนส่งประมาณ 150 กิโลเมตรด้วยรถกระบะ 4 ล้อ และ/หรือ 6 ล้อ ทำการเผาพร้อมกับขยะอันตรายอื่น ๆ โดยไม่ได้เติมพลังงานในขณะเผาทำลาย

3. เศษเหลือทิ้งอื่น ๆ จากการคัดแยกนำไปฝังกลบอย่างปลอดภัย (secured landfill) ขนส่งภายในพื้นที่บริเวณในรั้วโรงงาน ESBE (The Eastern Seaboard Environmental Complex) ในระยะทาง 50-100 เมตรด้วยรถโฟล์คลิฟท์

การถอดแยกองค์ประกอบภายในซากตู้เย็นของ Informal sector ซึ่งเป็นหน่วยจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ชุมชนถอดแยก บ้านเรือนหรือพื้นที่เฉพาะวัตถุประสงค์หลักเพื่อประโยชน์ในการขายวัสดุมีค่าจากการถอดแยกซากผลิตภัณฑ์ ผู้ประกอบการรื้อถอดแยกจะใช้พื้นที่บริเวณบ้านตนเองในการดำเนินกิจกรรมรื้อถอดแยก ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่องค์การบริหารส่วนตำบลแดงใหญ่ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ การรื้อคัดแยกซากตู้เย็นที่ใช้แล้วใช้แรงงานคนทั้งรายเออร์เซ็นต์ โดยแรงงานจะเป็นคนในครอบครัวหรือในหมู่บ้านที่ว่างมาช่วยเป็นกรณี ๆ ไป เป็นการทำงานรื้อคัดแยกซากตู้เย็นอย่างไม่เป็นระบบแบบแผน ไม่มีมาตรฐาน ไม่มีขั้นตอนในกระบวนการทำงาน การรื้อคัดแยกอาศัยประสบการณ์ ความเคยชินและความสะดวกของผู้ถอดแยกเองเช่น ในการคัดแยกชนิดของพลาสติกจะใช้การสังเกตด้วยตาเพื่อดูสีของพลาสติกว่าสีเข้ม ขาวใส หรือเป็นพลาสติกมีสีแล้วทำการแยกชนิดออกมา หรือมีการเคาะพลาสติกเพื่อฟังเสียงแล้วระบุชนิดของพลาสติก และที่สำคัญผู้ประกอบการทั้งหมดปล่อยทิ้งสารทำความเย็นออกสู่อากาศก่อนจะทำการผ่าชำแหละคอมเพรสเซอร์ของซากตู้เย็นที่ใช้แล้วทุกเครื่อง ภายหลังการรื้อคัดแยก Informal sector จะทำการเก็บรวบรวมชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่มีค่าเพื่อให้ได้ปริมาณในระดับหนึ่ง ก็จะนำไปขายต่อร้านรับซื้อเพื่อนำไปรีไซเคิล ขณะที่ทำการขนส่งเศษเหลือทิ้งอื่น ๆ ที่ไม่มีค่าทั้งหมดจากการคัดแยกเช่น กระจก ฉนวน PU โฟม เศษเหลือทิ้งอื่น ๆ นำไปทิ้งที่บ่อขยะของเทศบาลแบบกลางแจ้งด้วยรถซาเล้งหรือรถยนต์กระบะ 4 ล้อ โดยมีระยะทางสั้น ๆ ในเขตพื้นที่เทศบาลตำบล ประมาณ 0.5-1.0 กิโลเมตร ต่อเที่ยว (Center of Excellence on Hazardous Substance and Waste Management, Chulalongkorn University, 2020) [8]

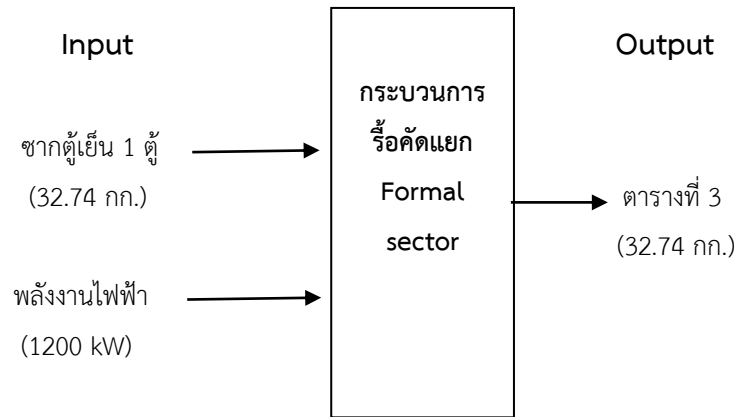
1. การขนส่ง (Transportation) ชิ้นส่วนจากการรื้อคัดแยกที่มีค่านำไปขายได้ เช่น พลาสติกทั้งที่บดย่อยและเป็นชิ้นส่วนเดิมๆเพื่อนำไปรีไซเคิลมีการขนส่งไปที่จังหวัดมหาสารคามมีระยะทางประมาณ 120 กิโลเมตรด้วยรถกระบะ 4 ล้อ และ/หรือ 6 ล้อ

2. การขนส่งชิ้นส่วนที่มีค่าที่นำไปขายได้ในส่วนของโลหะ เหล็ก อลูมิเนียม เพื่อนำไปรีไซเคิลมีการขนส่งไปที่จังหวัดขอนแก่นหรือนครราชสีมา มีระยะทางประมาณ 120 กิโลเมตร ด้วยรถกระบะ 4 ล้อ และ/หรือ 6 ล้อ

3. การขนส่งชิ้นส่วนที่มีค่าที่นำไปขายได้ในส่วนของทองแดง เพื่อนำไปรีไซเคิลมีการขนส่งไปที่อำเภอสตึก จังหวัดบุรีรัมย์มีระยะทางประมาณ 80 กิโลเมตร ด้วยรถกระบะ 4 ล้อ และ/หรือ 6 ล้อ ซึ่งมีมูลค่ามากที่สุด โดยในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจะใช้เส้นทางการขนส่งนี้เป็นตัวแทน

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการเก็บข้อมูลการรวบรวมและถอดแยกชิ้นส่วนตู้เย็นในพื้นที่ดำเนินงานแสดงขอบเขตของระบบ (System Boundary) ในการรื้อตัดแยกชิ้นส่วนตู้เย็น (Dismantling) ที่ดำเนินการในรูปแบบ Formal Sector ดังภาพที่ 4 และแสดงข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมจากการถอดแยกชิ้นส่วนตู้เย็น ในตารางที่ 3



ภาพที่ 4 ขอบเขตของระบบในการรื้อตัดแยกชิ้นส่วนที่ดำเนินการในรูปแบบ Formal Sector

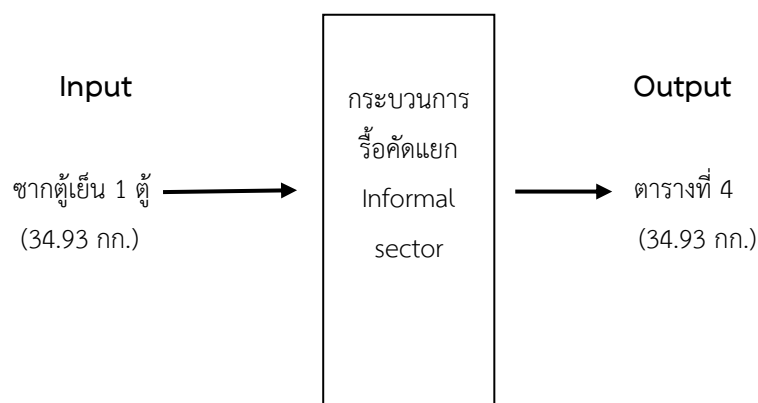
ตารางที่ 3 บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของการตัดแยกชิ้นส่วนและจัดการซากในรูปแบบ Formal Sector ต่อตู้เย็น 1 ตู้

เศษวัสดุจากการถอดแยกชิ้นส่วน	วิธีการจัดการ	น้ำหนัก	หน่วย
เศษเหล็กและเหล็กกล้า (Iron and steel scrap) {TH}	การรีไซเคิล (Recycling of steel and iron)	11.800	kg
เศษอะลูมิเนียม (Aluminium scrap) {TH}	การรีไซเคิล (Recycling of aluminium)	0.767	kg
เศษพลาสติกผสม (Mixed plastics waste) {TH}	การรีไซเคิล (Recycling of mixed plastics)	0.633	kg
เศษพลาสติก PS (Polystyrene waste) {TH}	การรีไซเคิล (Recycling of polystyrene)	3.461	kg
เศษพลาสติก PP (Polypropylene waste) {TH}	การรีไซเคิล (Recycling of Polypropylene)	1.317	kg
ชิ้นส่วนคอมเพรสเซอร์ (Compressor part) {TH}	แยกชิ้นส่วนและรีไซเคิล (Compressor recycling, formal)	7.340	kg
น้ำมันคอมเพรสเซอร์ (Used compressor oil) {RoW}	การเผาทำลายขยะอันตราย (Hazardous waste incineration)	0.300	kg
ของเสียนวนพอลิยูรีเทน (Polyurethane foam waste) {CH}	การเผาทำลายขยะอันตราย (Hazardous waste incineration)	3.793	kg
เศษพลาสติกเหลือทิ้ง (Plastics waste residues) {RoW}	การเผาทำลายขยะอันตราย (Hazardous waste incineration)	1.035	kg

เศษวัสดุจากการถอดแยกชิ้นส่วน	วิธีการจัดการ	น้ำหนัก	หน่วย
เศษสายไฟ PVC (Polyvinylchloride waste) {RoW}	การเผาทำลายขยะอันตราย (Hazardous waste incineration)	0.110	kg
เศษทองแดง (Copper scrap) {TH}	การรีไซเคิล (Electrolytic refining of copper)	0.994	kg
ขยะที่เผาไม่ได้ (Inert waste) {RoW}	การฝังกลบแบบปลอดภัย (Secured landfill)	0.849	kg
สารทำความเย็น R134a ใช้แล้ว (Used refrigerant R134a) {GLO}	การเผาทำลายสารทำความเย็น (Refrigerant incineration)	0.045	kg
	สารทำความเย็นรั่วไหล (Used refrigerant venting) จากกระบวนการรวบรวมซาก	0.035	kg
สูญเสีย (Loss) จากกระบวนการถอดแยกชิ้นส่วน		0.261	kg
น้ำหนักรวม		32.74	kg

หมายเหตุ : TH-ปรับฐานข้อมูลโดยใช้ไฟฟ้าของไทยแทนในฐานข้อมูลต่างประเทศ (Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), 2022) [9]

สำหรับ Informal Sector ได้ดำเนินการเก็บข้อมูลในพื้นที่ดำเนินงานจริงในอบต.แดงใหญ่ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ โดยแสดงขอบเขตของระบบ (System boundary) ดังภาพที่ 5 และแสดงข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมจากการถอดแยกชิ้นส่วนตู้เย็น ในตารางที่ 4



ภาพที่ 5 ขอบเขตของระบบในการรีไซเคิลแยกชิ้นส่วนที่ดำเนินการในรูปแบบ Informal sector

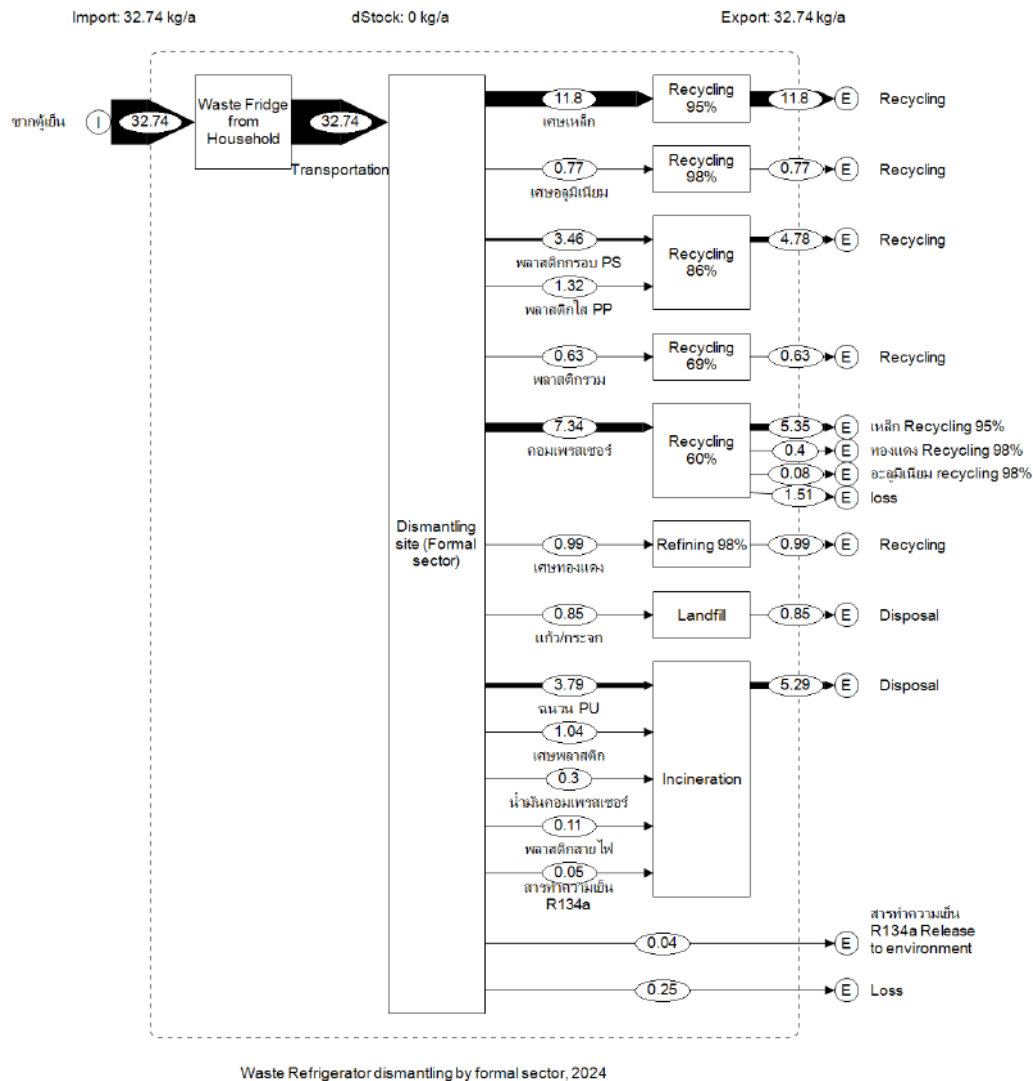
ตารางที่ 4 บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของการคัดแยกชิ้นส่วนและการจัดการซากในรูปแบบ Informal sector ต่อตู้เย็น 1 ตู้

เศษวัสดุจากการถอดแยกชิ้นส่วน	วิธีการจัดการ	น้ำหนัก	kg
เศษเหล็กและเหล็กกล้า (Iron and steel scrap) {TH}	การรีไซเคิล (Recycling of steel and iron)	10.563	kg
เศษอะลูมิเนียม (Aluminium scrap) {TH}	การรีไซเคิล (Recycling of aluminium)	0.943	kg
เศษพลาสติกโพลีสไตรีน (Polystyrene waste) {TH}	การรีไซเคิล (Recycling of polystyrene)	2.719	kg
เศษพลาสติกโพลิโพรพิลีน (Polypropylene waste) {TH}	การรีไซเคิล (Recycling of Polypropylene)	2.144	kg
เศษพลาสติกผสม (Mixed plastics waste) {TH}	การรีไซเคิล (Recycling of mixed plastics)	2.078	kg
เศษสายไฟ PVC (Polyvinylchloride waste) {RoW}	การกองทิ้ง (Open dumping)	0.141	kg
ชิ้นส่วนคอมเพรสเซอร์ (Compressor part) {TH}	การรีไซเคิล (Compressor recycling, informal)	7.60	kg
น้ำมันคอมเพรสเซอร์เสีย (Used compressor oil) {RoW}	การกองทิ้ง (Open dumping)	0.30	kg
ของเสียประเภทโฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane foam waste) {TH}	การกองทิ้ง (Open dumping)	3.787	kg
เศษพลาสติกเหลือทิ้ง (plastic waste residues) {TH}	การกองทิ้ง (Open dumping)	0.4275	kg
เศษทองแดง (Copper scrap) {TH}	การรีไซเคิล (Electrolytic refining of copper)	1.017	kg
แก้วและกระจก (glass waste) {RoW}	การกองทิ้ง (Open dumping)	0.68	kg
สารทำความเย็น R134a ใช้นแล้ว (Used refrigerant R134a) {GLO}	สารทำความเย็นรั่วไหล (Used refrigerant venting)	0.075	kg
สูญเสีย (Loss) จากกระบวนการถอดแยกชิ้นส่วน		2.456	kg
น้ำหนักรวม		34.93	kg

หมายเหตุ : TH-ปรับฐานข้อมูลโดยใช้ไฟฟ้าของไทยแทนในฐานข้อมูลต่างประเทศ (Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), 2022) [9]

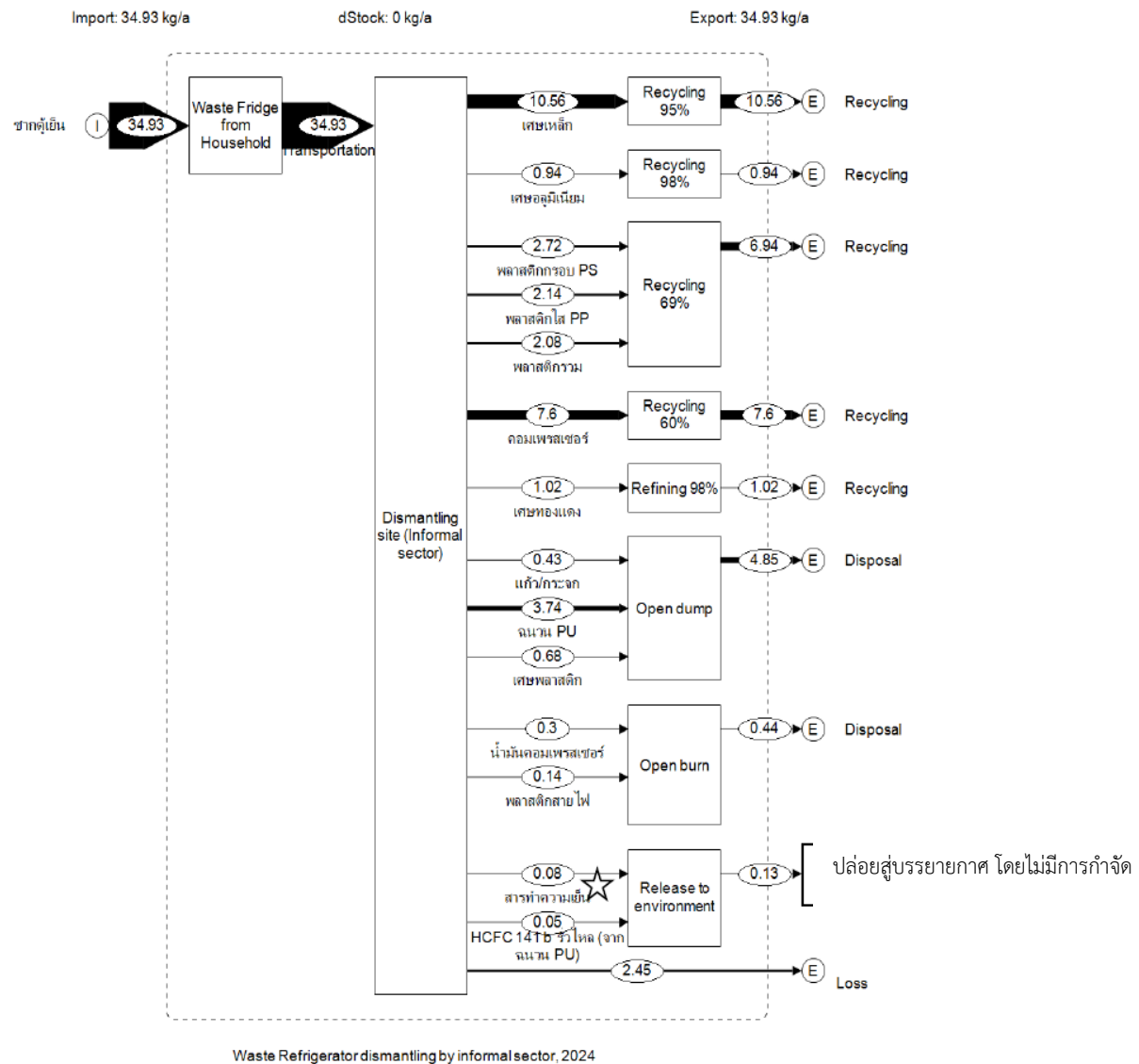
ผลการวิเคราะห์เส้นทางการไหลของวัสดุ

เส้นทางการไหลของวัสดุทั้ง Formal sector และ Informal sector แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 6 และภาพที่ 7 ตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการถอดแยกชิ้นส่วน คัดแยกประเภทและชนิดของชิ้นส่วน/วัสดุ รวมถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ในการปฏิบัติงานที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ผลผลิตที่ได้ (Output) ของแต่ละรูปแบบ จะมีชิ้นส่วนวัสดุที่ผ่านการรื้อคัดแยกทั้งชนิดและปริมาณที่ต่างกัน รวมถึงเส้นทางหรือวิธีการในการจัดการกับผลผลิตที่ได้ก็แตกต่างกัน (Center of Excellence on Hazardous Substance and Waste Management, Chulalongkorn University, (2022) [10])



ภาพที่ 6 เส้นทางการไหลของวัสดุของ Formal sector

เส้นทางการไหลของวัสดุใน Formal sector พบว่า ชิ้นส่วน/วัสดุที่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ ประกอบด้วย เศษเหล็ก เศษอลูมิเนียม เศษพลาสติกกรอบ (Polystyrene: PS) เศษพลาสติกใส (Polypropylene: PP) เศษพลาสติกกรวม เศษทองแดง และคอมเพรสเซอร์ โดยมีประสิทธิภาพในกระบวนการรีไซเคิล คิดเป็น 95%, 98%, 86%, 86%, 69%, 98% และ 95% ตามลำดับ ชิ้นส่วน/วัสดุที่นำไปกำจัดโดยการเผาทำลาย ได้แก่ เศษฉนวนประเภทโฟมพอลิยูรีเทน เศษพลาสติก น้ำมันคอมเพรสเซอร์ พลาสติกสายไฟ และสารทำความเย็น R134a ชิ้นส่วนที่นำไปกำจัดโดยการฝังกลบแบบปลอดภัย คือ แก้วและกระจก นอกจากนี้ ยังมีปริมาณการสูญหายจากกระบวนการถอดแยกชิ้นส่วน (Loss) 0.25 กิโลกรัม และมีสารทำความเย็น R134a ที่รั่วไหลสู่บรรยากาศ 0.04 กิโลกรัม



ภาพที่ 7 เส้นทางไหลของวัสดุของ Informal sector

หมายเหตุ : สารทำความเย็น R 134a

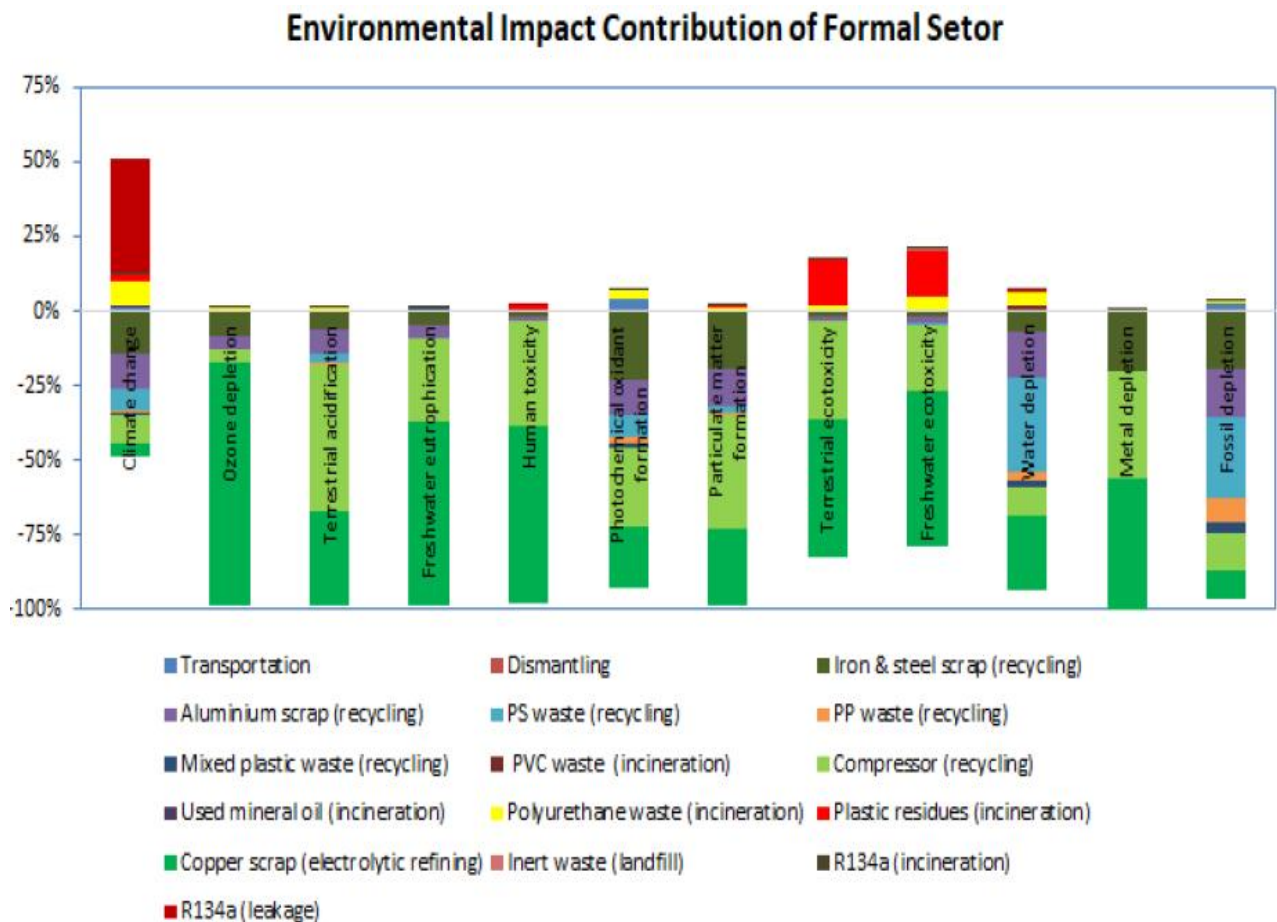


เส้นทางไหลของวัสดุของ Informal sector พบว่า ชิ้นส่วน/วัสดุที่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ ประกอบด้วย เศษเหล็ก เศษอลูมิเนียม เศษพลาสติกกรอบ (Polystyrene: PS) เศษพลาสติกใส (Polypropylene: PP) เศษพลาสติกขาว เศษทองแดง และคอมเพรสเซอร์ โดยมีประสิทธิภาพในกระบวนการรีไซเคิล คิดเป็น 95%, 98%, 69%, 69%, 69%, 98% และ 60% ตามลำดับ ชิ้นส่วน/วัสดุที่ไม่ถูกจัดเก็บ เช่น การกองทิ้ง การเผากลางแจ้ง เป็นต้น ได้แก่ เศษฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน เศษพลาสติก น้ำมันคอมเพรสเซอร์ พลาสติกสายไฟ และแก้ว/กระฉก ในขณะที่สารทำความเย็นชนิด R134a ถูกปล่อย และ HCFC141b รั่วไหลสู่บรรยากาศ 0.13 กิโลกรัม นอกจากนี้ ยังมีปริมาณการสูญเสียจากกระบวนการถอดแยกชิ้นส่วน (Loss) 2.45 กิโลกรัม

การประเมินวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Analysis)

ผลกระทบสิ่งแวดล้อมในเชิงปริมาณของแต่ละประเภทกลุ่มผลกระทบสำหรับ Formal sector มีหลายกระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่กระบวนการรีไซเคิลบ่งชี้ให้เห็นถึงผลกระทบเชิงบวกต่อสิ่งแวดล้อม

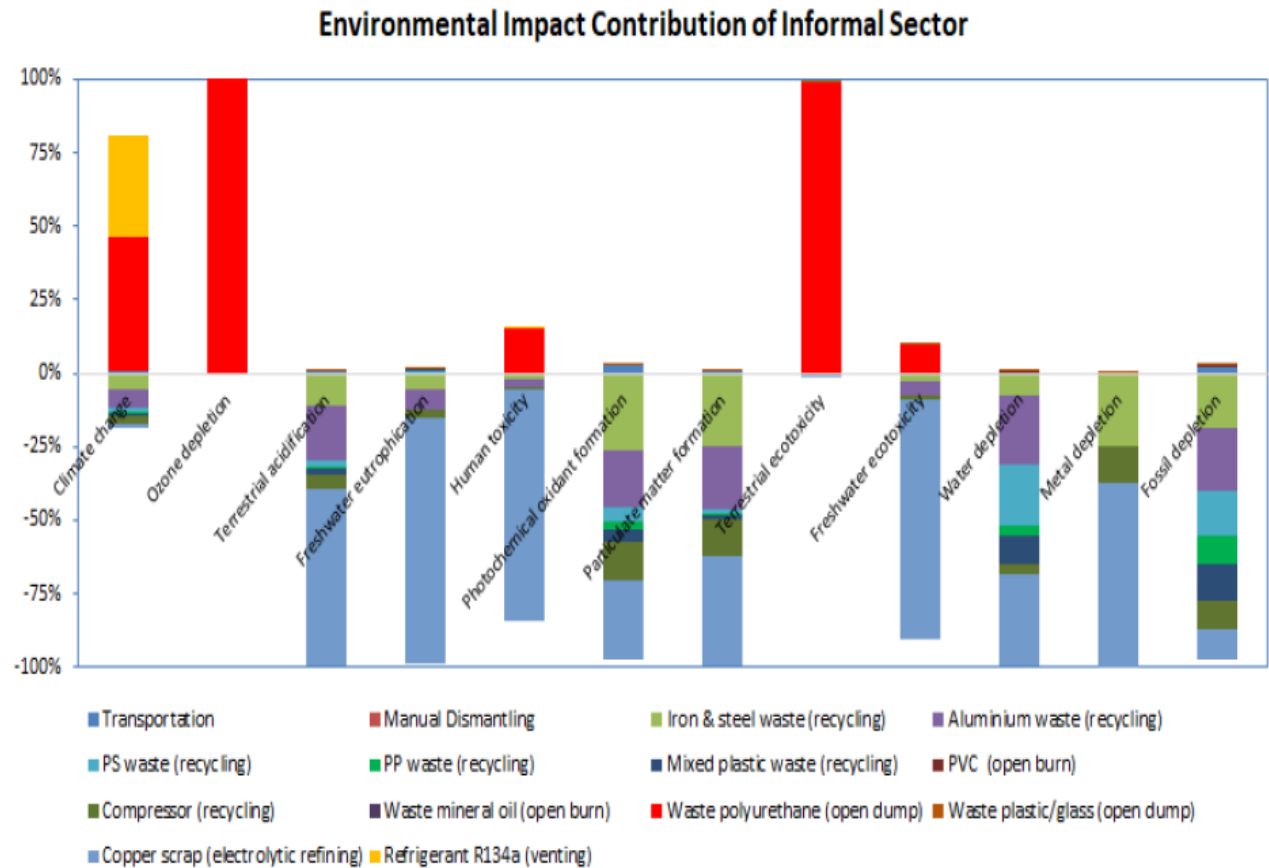
โดยผลกระทบ ของสารทำความเย็นมีผลกระทบเชิงลบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนมากที่สุด และกระบวนการในการรีไซเคิลชิ้นส่วนตู้เย็นในระบบปิดมีผลกระทบเชิงบวกต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด



ภาพที่ 8 สัดส่วนผลกระทบสิ่งแวดล้อมในแต่ละประเภทกลุ่มผลกระทบของการจัดการซากตู้เย็น formal sector

ผลกระทบสิ่งแวดล้อมในเชิงปริมาณของแต่ละประเภทกลุ่มผลกระทบสำหรับ Informal sector พบว่า กระบวนการรวบรวมซากตู้เย็นและการขนส่งเศษวัสดุเพื่อนำไปกำจัดหรือรีไซเคิล การถอดแยกชิ้นส่วนตู้เย็น การกำจัดเศษวัสดุที่ขายไม่ได้โดยการกองทิ้ง (เศษพลาสติกเหลือทิ้ง เศษสายไฟ PVC เศษฉนวน PU แก้วและกระจก และน้ำมันคอมเพรสเซอร์) และการรั่วไหลของสารทำความเย็นล้วนปล่อยก๊าซเรือนกระจกในค่าบวก กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ กระบวนการดังกล่าวข้างนี้ส่งผลกระทบเชิงลบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรั่วไหลของสารทำความเย็น ส่งผลกระทบสูงสุด นอกจากนี้การรีไซเคิลตู้เย็นในรูปแบบ Informal Sector ทำให้เกิดผลกระทบด้านศักยภาพการทำลายชั้นโอโซน (Ozone depletion) และการเกิดความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก (Terrestrial ecotoxicity) เนื่องจากกระบวนการรื้อแยก กองทิ้งและแอบเผากลางแจ้ง (Open dumping) จะปล่อยสาร HCFC-141b ออกมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โฟมโพลียูรีเทน (PU) เป็นส่วนผสมทางเคมีที่เกิดขึ้นจากผู้ผลิตโฟม ในขณะที่สารคลอโรฟลูโอโรคาร์บอน (HCFC-141b) เป็นส่วนประกอบเสริมที่ทอหุ้มด้วยโฟม PU และสารคลอโรฟลูโอโรคาร์บอนจะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อโฟม PU แตก (Yang, 2006) โดยสรุปผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน ผลกระทบด้านการเกิดความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก(Terrestrial ecotoxicity) และการทำลายชั้นโอโซนของ

การจัดการซากตู้เย็นในรูปแบบ Informal sector ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่ผลกระทบสิ่งแวดล้อมกลุ่มอื่น ๆ อีก 9 กลุ่มผลกระทบ ส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการรีไซเคิลวัสดุที่ได้จากคัดแยก/ถอดแยกชิ้นส่วนตู้เย็น ทำให้สามารถหลีกเลี่ยง หรือลดการใช้ทรัพยากรในการผลิตจากวัสดุใหม่



ภาพที่ 9 สัดส่วนผลกระทบสิ่งแวดล้อมในแต่ละประเภทกลุ่มผลกระทบของการจัดการซากตู้เย็น Informal sector

การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการจัดการซากตู้เย็นที่ใช้แล้ว

การเปรียบเทียบกลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการจัดการซากตู้เย็นในรูปแบบ Formal sector และ Informal sector แสดงดังตารางที่ 5 และภาพที่ 10 พบว่า กลุ่มผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) ก่อผลกระทบสูงสุด รองลงมา คือ กลุ่มผลกระทบด้านการเกิดความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก (Terrestrial ecotoxicity) เฉพาะในส่วนของ Informal sector และผลกระทบด้านการลดลงของโอโซน (Ozone depletion) ตามลำดับ ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 5 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการจัดการซากตู้เย็นในรูปแบบ Formal sector และ Informal sector

ประเภทกลุ่มผลกระทบสิ่งแวดล้อม	Unit / ตู้เย็น 1 ตู้	Formal	Informal
Climate change	kg CO ₂ eq	3.21	192.20
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	-9.40 x 10 ⁻⁶	0.023
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	-0.997	-0.542
Freshwater eutrophication	kg P eq	-0.113	-0.085
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	-263.72	-145.027
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	-0.311	-0.270
Particulate matter formation	kg PM10 eq	-0.369	-0.265
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-0.018	0.971
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-2.772	-2.522
Water depletion	m ³	-0.403	-0.372
Metal depletion	kg Fe eq	-66.619	-47.267
Fossil depletion	kg oil eq	-18.002	-17.016

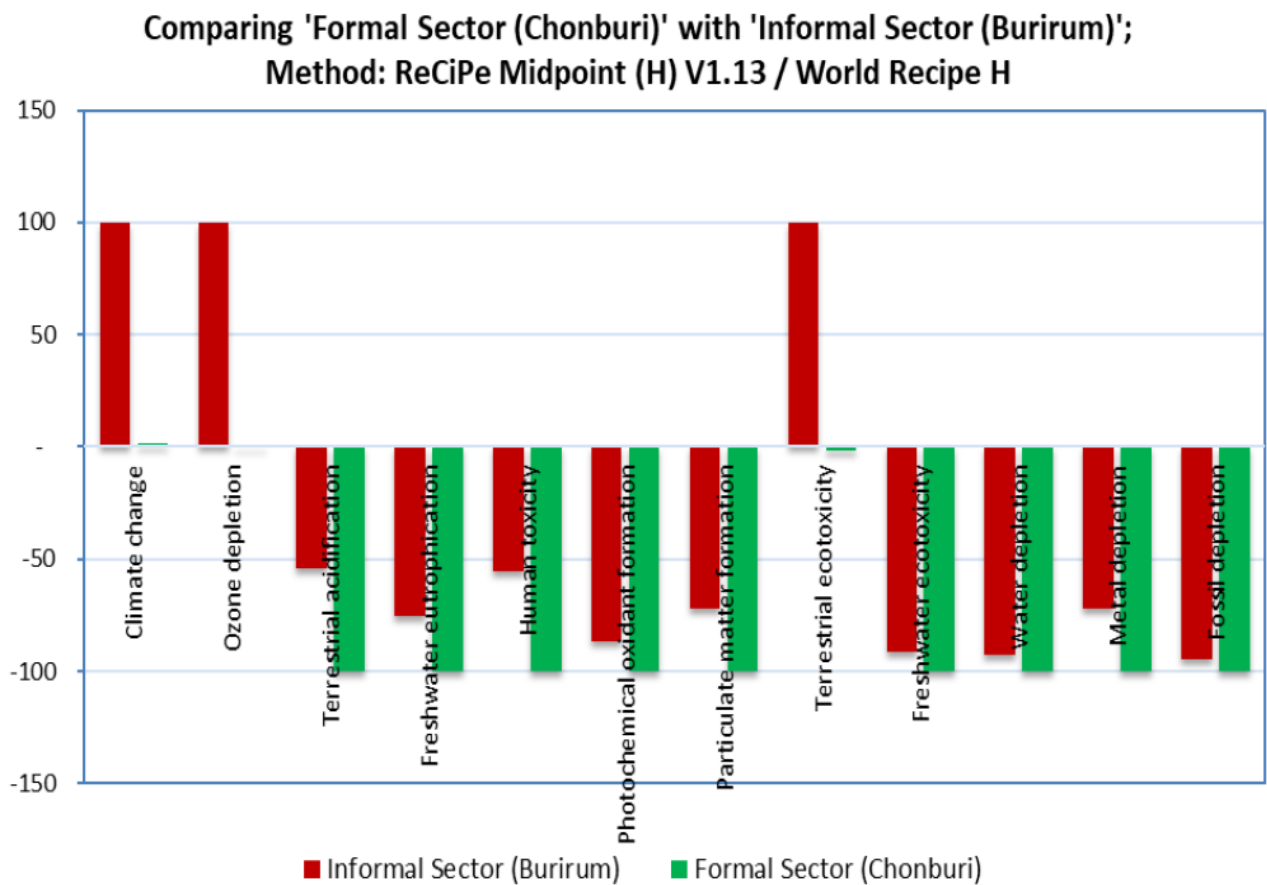
กลุ่มผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) หรือภาวะโลกร้อน (Global warming) ในส่วนของกระบวนการรีไซเคิลแยกในรูปแบบ Formal sector ซึ่งมีการจัดการที่เป็นระบบ มีขั้นตอนการดำเนินการที่ดีไม่ปล่อยสารทำความเย็นสู่ชั้นบรรยากาศ มีการจัดเก็บรวบรวมสารทำความเย็นแล้วนำไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง และมีการจัดการฉนวนตู้เย็น (PU โฟม) โดยการนำไปเผาทำลายอย่างเหมาะสม จึงส่งผลกระทบด้านการเกิดภาวะโลกร้อนต่ำกว่ากระบวนการรีไซเคิลแยกในรูปแบบ Informal sector ประมาณ 59.87 เท่า โดยที่ Informal sector มีค่าผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน 192.20 kg CO₂ eq ในขณะที่ Formal sector มีค่าเท่ากับ 3.21 kg CO₂eq

กลุ่มผลกระทบด้านการลดลงของโอโซน(Ozone depletion) ในส่วนของ Formal sector กระบวนการกำจัดฉนวน PU โฟม โดยการเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูงและนำสารทำความเย็นไปกำจัดโดยการเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง ส่งผลกระทบด้านการลดลงของชั้นโอโซนต่ำกว่า Informal sector ที่มีการรีไซเคิลแยกชิ้นส่วนและจัดการฉนวน PU ที่ไม่เหมาะสม เช่น นำไปทิ้งในสถานที่ทิ้งขยะมูลฝอยชุมชนก่อให้เกิดการรั่วไหลของสาร HCFC-141b ซึ่งส่งผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านการลดลงของโอโซนที่แตกต่างกันอย่างมา

กลุ่มผลกระทบด้านการเกิดความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก (Terrestrial ecotoxicity) ในส่วนของ Informal sector คิดเป็น 0.971 kg 1,4-DB eq ต่อตู้เย็น 1 ตู้ ซึ่งเกิดจากการเผา PU โฟม กลางแจ้งในบริเวณพื้นที่ Open dump ขณะที่ Formal sector มีกระบวนการกำจัดฉนวน PU โฟมที่เป็นระบบโดยการเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูงและนำสารทำความเย็นไปกำจัดโดยการเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง จะมีค่าผลในเชิงบวกคิดเป็น -0.018 kg 1,4-DB eq ต่อตู้เย็น 1 ตู้

ในขณะที่ กลุ่มผลกระทบสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ อีก 9 กลุ่มผลกระทบพบว่า การจัดการซากตู้เย็นในรูปแบบ Formal sector และ Informal sector มีค่าเป็นลบสามารถแปลผลได้ว่า การจัดการทั้งสองรูปแบบส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่หากพิจารณาในเชิงตัวเลขพบว่า การจัดการในรูปแบบ Formal sector มีค่าติดลบมากกว่า แสดงว่าส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการจัดการรูปแบบ Informal sector เนื่องจากการมีระบบและขั้นตอนการดำเนินการจัดการที่ดีและมีประสิทธิภาพ มีการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือช่วยในการทำงาน รวมถึงการมีองค์ความรู้และทักษะของผู้คัดแยก ทำให้ปริมาณชิ้นส่วน/วัสดุที่แยกได้มี

คุณภาพดีกว่า และสามารถนำไปรีไซเคิลได้ง่าย ประสิทธิภาพในการรีไซเคิลจึงสูงกว่า แม้ว่าปริมาณวัสดุที่แยกได้จะใกล้เคียงกัน แต่ในส่วนของการบำบัดและกำจัดที่เป็นระบบถูกต้องตามหลักวิชาการจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยกว่า



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการจัดการซากตู้เย็นที่ใช้แล้วในรูปแบบ Formal sector และ Informal Sector

สรุปและอภิปรายผล

ผลการศึกษาพบว่า ทั้งสองรูปแบบก่อให้เกิดผลกระทบสูงสุดด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รองลงมาคือการลดลงของโอโซน อย่างไรก็ตาม การจัดการในระบบมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพียง 3.21 kg CO₂ eq ขณะที่การจัดการนอกระบบมีการปล่อยสูงถึง 192.20 kg CO₂ eq หรือมากกว่าถึง 59.87 เท่า สาเหตุหลักมาจากการปล่อยสารทำความเย็น R134a สู่บรรยากาศโดยตรงในภาคนอกระบบ นอกจากนี้ ด้านการลดลงของโอโซนและความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก พบว่าการจัดการในระบบสามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบได้ เนื่องจากมีการควบคุมกระบวนการรีไซเคิลแยกและกำจัดฉนวน PU โฟม รวมถึงกำจัดสารทำความเย็นในระบบโดยใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง ขณะที่ภาคนอกระบบมีการเผากลางแจ้งและทิ้งของเสียแบบไม่ถูกต้อง ส่งผลให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าว งานวิจัยจึงเสนอแนวทางการจัดการของเสียอันตรายประเภทตู้เย็น โดยมุ่งเน้นการยกระดับการรีไซเคิลแยกและควบคุมสารทำความเย็นให้เป็นระบบตามมาตรฐาน กฎหมาย สนับสนุนการดำเนินงานภายใต้กรอบโรงงานที่ได้รับอนุญาต มีขั้นตอนปฏิบัติงานที่ชัดเจน (SOP) ใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่เหมาะสม รวมถึงมีการกำจัดของเสียอันตรายในระบบอย่างเคร่งครัด เพื่อลดการปลดปล่อยสารทำ

ความเย็นและมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม อันจะนำไปสู่การลดผลกระทบด้านก๊าซเรือนกระจก การปกป้องชั้นโอโซน และการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอย่างปลอดภัยและยั่งยืนในระยะยาว

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ด้านประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมจากการรีไซเคิลตู้เย็นอย่างเป็นระบบสามารถลดการปล่อยมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเรียกคืนและรีไซเคิลได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การรีไซเคิลตู้เย็นยังคงเพิ่มศักยภาพในการทำลายชั้นโอโซน เนื่องจากกระบวนการทำลายมีความเป็นไปได้ที่จะปลดปล่อยสาร CFC-11 สู่บรรยากาศอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ (Xiao et al., 2016) [11] ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษารั้วนี้ที่ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นของการจัดการของเสียอันตรายในระบบปิด เพื่อลดการรั่วไหลของสารทำความเย็นและมลพิษอื่น ๆ สู่สิ่งแวดล้อม แนวทางดังกล่าวมีส่วนช่วยลดผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ปกป้องชั้นโอโซน และส่งเสริมการจัดการซากอย่างปลอดภัยและยั่งยืนในระยะยาว นอกจากนี้ผลการศึกษายังสอดคล้องกับงานวิจัยที่สำรวจปัญหาในชุมชนรีไซเคิลซากผลิตภัณฑ์นอกระบบ ซึ่งระบุว่าโฟมโพลียูรีเทนจากกระบวนการรีไซเคิลตู้เย็นเป็นประเด็นสำคัญด้านการจัดการเศษวัสดุ เนื่องจากเป็นของเสียที่มีปริมาณมากและมีขนาดใหญ่ ส่งผลทำให้เกิดขีดความสามารถในการรองรับของพื้นที่ฝังกลบ ผู้ประกอบการส่วนใหญ่จึงเลือกใช้วิธีการเผาเพื่อลดปริมาณและพื้นที่จัดเก็บ (Phruksasit, 2021) [3] แนวทางดังกล่าวอาจก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศเพิ่มเติม หากไม่มีมาตรการควบคุมที่เหมาะสม และในส่วนของกระบวนการประเมินผลกระทบด้านภาวะโลกร้อนโดยเฉลี่ยจากทั้งระดับโรงงานและชุมชน พบว่ากิจกรรมการรีไซเคิลมีศักยภาพในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการจัดการอย่างเป็นระบบ การฝังกลบแบบปลอดภัย และการจัดการนอกระบบ การทิ้งแบบเทกอง (Electrical and Electronics Institute, 2022) [4] ทั้งนี้ ประสิทธิภาพของการลดผลกระทบดังกล่าวขึ้นอยู่กับการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการถอดแยก หากมีการจัดการอย่างเหมาะสมและสามารถนำวัสดุกลับเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลได้ในสัดส่วนที่สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ จะยิ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรวมและด้านภาวะโลกร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ

ข้อเสนอแนะ

1) การปรับปรุงกระบวนการจัดการสารทำความเย็น สารทำความเย็น เช่น R134a และ HCFC-141b เป็นองค์ประกอบสำคัญของตู้เย็นที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับสูง โดยเฉพาะด้านภาวะโลกร้อน ทั้งนี้ R134a ปริมาณ 1 กิโลกรัม มีศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) สูงถึง 1,300 kg CO₂ eq (Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization, 2022) [9] และยังส่งผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์ทางอากาศในระดับสูง ดังนั้น จึงควรมีมาตรการปรับปรุงกระบวนการจัดเก็บและควบคุมการปลดปล่อยสารทำความเย็นอย่างเป็นระบบ โดยกำหนดให้มีการดูดเก็บ (Recovery) ณ สถานที่รื้อคัดแยก (Dismantling site) พร้อมทั้งยกระดับการกำกับดูแลกลไกนอกระบบทั้งหมดเช่น ซาเล้ง รถเร่ ร้านซ่อมเครื่องใช้ไฟฟ้า และร้านรับซื้อของเก่า ไม่ให้ปล่อยสารทำความเย็นสู่ชั้นบรรยากาศผ่านการให้ความรู้และสนับสนุนอุปกรณ์พิเศษเฉพาะทาง ทั้งนี้ สารทำความเย็นที่รวบรวมได้ควรถูกนำไปกำจัดด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง หรือเข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Reclamation) (Xiao et al., 2016) [11] นอกจากนี้ ควรผลักดันแนวคิด EcoDesign ตั้งแต่ต้นทางโดยปรับเปลี่ยนไปใช้สารทำความเย็นที่มีค่า GWP ต่ำกว่าเดิม (Rüdenauer, I., and Gensch, C.O., 2007) [12] พัฒนาเทคโนโลยีคอมเพรสเซอร์ให้รองรับสารทำความเย็นชนิดใหม่ ตลอดจนหาแนวทางลดการปลดปล่อย HCFC-141b จากโฟมฉนวนกันความร้อน เช่น การเปลี่ยนชนิดวัสดุหรือปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปเพื่อลดการรั่วไหลในขั้นตอนถอดแยก

2) การยกระดับกระบวนการรีไซเคิลซากตู้เย็น การรีไซเคิล (Dismantling) ควรได้รับการพัฒนาให้เป็นไปตามหลักวิชาการและมาตรฐานความปลอดภัย โดยเริ่มจากการฝึกอบรมผู้ปฏิบัติงานให้มีความรู้ด้านวัสดุศาสตร์ สามารถจำแนกประเภทวัสดุที่นำกลับมาใช้ซ้ำ (Reuse) รีไซเคิล (Recycle) หรือเข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Reclamation) ได้อย่างถูกต้อง รวมถึงแยกวัสดุที่ต้องกำจัดหรือบำบัดอย่างเหมาะสม (Department of Primary Industries and Mines,

2021) [13] ควบคู่กับการจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ออกแบบตามหลักการยศาสตร์ (Ergonomics) และมีอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลอย่างครบถ้วน และที่สำคัญ ควรยกระดับสถานประกอบการในภาคเอกชนระบบให้เข้าสู่ระบบที่ถูกต้องตามกฎหมายและหลักวิชาการ สอดคล้องกับข้อกำหนดของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมอนามัย และการกำกับดูแลโรงงาน ลำดับที่ 105 (กิจการรีไซเคิล) เพื่อสร้างมาตรฐานเดียวกันทั่วประเทศ

3) การพัฒนาระบบเรียกคืนซากผลิตภัณฑ์และกฎหมายที่เกี่ยวข้อง การจัดการซากตู้เย็นที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องเริ่มตั้งแต่ต้นทาง โดยพัฒนาระบบเรียกคืนซากจากครัวเรือนอย่างเป็นระบบและสนับสนุนการออกกฎหมายเฉพาะด้าน เช่น พระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ภายใต้หลักการความรับผิดชอบที่เพิ่มขึ้นของผู้ผลิต (Extended Producer Responsibility: EPR) (Wang et al., 2017) [14] เพื่อควบคุมกระบวนการตั้งแต่การรับคืนจนถึงการกำจัดขั้นสุดท้าย ควบคู่กับการบังคับใช้กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับสถานประกอบการรีไซเคิล (โรงงานลำดับที่ 105) และโรงงานรีไซเคิล (โรงงานลำดับที่ 106) อย่างเคร่งครัด นอกจากนี้ ควรมีการประชาสัมพันธ์และรณรงค์ให้ประชาชนส่งคืนซากตู้เย็นผ่านช่องทางที่ถูกต้องเช่น การส่งมอบให้เทศบาลในรูปแบบขยะอันตรายหรือขยะกำพร้า และหลีกเลี่ยงการจำหน่ายให้ผู้รับซื้อที่ไม่ได้ขึ้นทะเบียนในระบบ

4) การจัดการวัสดุและกลไกสนับสนุนเชิงระบบเพื่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน การจัดการวัสดุควรมุ่งสู่ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมตั้งแต่ต้นทาง โดยส่งเสริมให้ประชาชนตระหนักถึงปัญหาภาวะโลกร้อนและเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีผลกระทบต่ำ ควบคู่กับการผลักดันการออกแบบเชิงนิเวศ (EcoDesign) ในทุกผลิตภัณฑ์ ทั้งการเปลี่ยนสารทำความเย็นและการเลือกใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงการศึกษาวិถีลดปริมาณเศษวัสดุที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ตั้งแต่ขั้นตอนออกแบบผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ควรใช้ผลการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) จากงานวิจัยเป็นฐานข้อมูลสนับสนุนการจัดทำฉลากคาร์บอน เช่น Carbon Footprint of Product (CFP) และ Carbon Footprint of Organization (CFO) ตลอดจนเพิ่มเงื่อนไขด้านการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสัดส่วนการใช้วัสดุหมุนเวียนในเกณฑ์การรับรองฉลากสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ

โดยสรุป ข้อเสนอแนะทั้งหมดสะท้อนให้เห็นว่า การยกระดับการจัดการซากตู้เย็นเข้าสู่ระบบที่เป็นทางการและมีมาตรฐานเดียวกันทั่วประเทศ ไม่เพียงช่วยลดผลกระทบจากสารทำความเย็นและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่านั้น หากยังเป็นกลไกสำคัญในการสนับสนุนการดำเนินงานด้านการรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Action) และการขับเคลื่อนเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ของประเทศให้เกิดผลอย่างเป็นรูปธรรมและยั่งยืนในระยะยาว และยังคงสามารถขยายขอบข่ายครอบคลุมไปถึงผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ ได้อย่างครบทุกชนิดผลิตภัณฑ์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Center of Excellence on Hazardous Substance and Waste Management, Chulalongkorn University. (2020). *Development of a collection, transportation, and management system for waste electrical and electronic equipment (WEEE) and hazardous community waste*. National Research Council of Thailand. (in Thai)
- [2] Center of Excellence on Hazardous Substance and Waste Management, Chulalongkorn University. (2021). *Research on target setting for collection and recycling of controlled waste electrical and electronic equipment (WEEE circular economy – target setting approach)*. National Research Council of Thailand. (in Thai)

- [3] Phruksasit, T. (2021). *Project on the adaptation of local administrative organizations and unlicensed community-level dismantling enterprises prior to compliance with Thailand's waste electrical and electronic equipment management Act*. National Research Council of Thailand. (in Thai)
- [4] Electrical and Electronics Institute. (2022). *Roleplay simulation of waste from electrical and electronic equipment*. Electricity Generating Authority of Thailand. (in Thai)
- [5] Pollution Control Department. (2021). *(Draft) The Act on the management of waste electrical and electronic equipment B.E.* Pollution Control Department. (Pending enforcement). (in Thai)
- [6] Sampattagul, S. (2012). *Life Cycle assessment of products*. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University. (in Thai)
- [7] Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138-147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- [8] Center of Excellence on Hazardous Substance and Waste Management, Chulalongkorn University. (2020). *Guidebook on Proper Community-Level Dismantling of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)*. National Research Council of Thailand. (in Thai)
- [9] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization). (2022). *Guidelines for Calculating and Reporting Organizational Carbon Footprint, 8th Edition* (6th Revision, July 2022), TGO (Annex 1).
- [10] Center of Excellence on Hazardous Substance and Waste Management, Chulalongkorn University. (2022). *Research on Flowchart Analysis and Development of a Database System for the Management of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) and Hazardous Community Waste in Thailand*. National Research Council of Thailand. (in Thai)
- [11] Xiao, R., Zhang, Y., and Yuan, Z. (2016). Environmental impacts of reclamation and recycling processes of refrigerators using life cycle assessment (LCA) methods. *Journal of Cleaner Production*, 131, 52-59.
- [12] Rüdener, I., and Gensch, C.O. (2007). *Environmental and economic evaluation of the accelerated replacement of domestic appliances: Case study refrigerators and freezers*. Öko-Institut e.V. Geschäftsstelle Freiburg.
- [13] Department of Primary Industries and Mines. (2021). *Project on Assessing the Potential for Developing and Upgrading Target Communities into Enterprises or Establishments for Proper, Safe, and Environmentally Friendly E-Waste Sorting to Serve as Raw Materials for Domestic Industries*. Center of Excellence on Hazardous Substance and Waste Management, Chulalongkorn University.
- [14] Wang, H., Gu, Y., Li, L., Liu, T., Wu, Y., and Zuo, T. (2017). *Operating models and development trends in the extended producer responsibility system for waste electrical and electronic equipment*. *Resources, Conservation & Recycling*, 127(C), 159-167.