

**การประเมินวัฏจักรชีวิตเชิงเปรียบเทียบของบรรจุภัณฑ์อาหารนำกลับไปบริโภคที่ใช้อยู่ใน
สหราชอาณาจักร**
**Comparative Life Cycle Assessment of Takeaway Packaging Currently Used in
United Kingdom**

ณัชชา ฐานิพานิชกุล¹

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช 9/9 หมู่ 9 ถ.แจ้งวัฒนะ ต.บางพูด อ.ปากเกร็ด จ.
นนทบุรี 11120, E-Mail nutcha.tan@stou.ac.th

Nutcha Taneepanichskul¹

¹School of science and technology , Sukhothai Thammathirat University, 9/9 Moo 9 Bang Phut, Pak Kret
District, Nonthaburi 11120 , E-Mail nutcha.tan@stou.ac.th

วันที่รับบทความ 15 กรกฎาคม 2568
วันแก้ไขบทความ 12 กันยายน 2568
วันตอบรับบทความ 17 กันยายน 2568

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการดำรงชีวิตในสหราชอาณาจักรที่เน้นความสะดวกรวดเร็วส่งผลให้ความต้องการบรรจุภัณฑ์ใช้ครั้งเดียวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลายมิติ ทั้งการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้ทรัพยากร และมลภาวะจากของเสียพลาสติก การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและเปรียบเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์อาหารแบบนำกลับบ้าน 2 ประเภท ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด และบรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิด โดยใช้การวิเคราะห์วัฏจักรชีวิต (LCA) ตามมาตรฐาน ISO 14040 ครอบคลุมระบบแบบต้นน้ำยังปลายน้ำ (cradle-to-grave) และหน่วยหน้าที่ (functional unit) ของภาชนะขนาด 750 มิลลิลิตร โดยใช้ฐานข้อมูล Ecoinvent เวอร์ชัน 3 และซอฟต์แวร์ SimaPro แบบ EF (Environmental Footprint) ร่วมกับการวิเคราะห์จุดวิกฤติ (Hotspot Analysis) เพื่อระบุกระบวนการที่ก่อให้เกิดผลกระทบสูงสุดในแต่ละประเภทของบรรจุภัณฑ์ ผลการศึกษาพบว่า บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดในหมวดหมู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การใช้ทรัพยากรด้านยูโทรฟิเคชัน และความเป็นกรด ขณะที่บรรจุภัณฑ์กระดาษส่งผลต่อการใช้ที่ดินมากที่สุด การวิเคราะห์จุดวิกฤติแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนการผลิตวัสดุ PET และกระดาษเป็นกระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ผลการศึกษานี้เป็นแนวทางให้ผู้ผลิตและผู้ประกอบการปรับปรุงกระบวนการผลิต เลือกรวดวัตถุดิบอย่างยั่งยืน และลงทุนในระบบรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพ รวมทั้งช่วยสร้างความตระหนักแก่ผู้บริโภคในการคัดแยกและเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม

คำสำคัญ: การวิเคราะห์วัฏจักรชีวิต (LCA) , บรรจุภัณฑ์ใช้ครั้งเดียว , การกำจัดขยะยั่งยืน , ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ABSTRACT

Contemporary lifestyle changes in the United Kingdom emphasizing convenience and speed have resulted in a continuous increase in single used packaging demand, generating multidimensional environmental

impacts including greenhouse gas emissions, resource consumption, and plastic waste pollution. This study aims to evaluate and compare the environmental impacts of two types of takeaway food packaging: PET containers with lids and water-resistant coated paper packaging. The research employed Life Cycle Assessment (LCA) methodology in accordance with ISO 14040 standards covering a cradle-to-grave system boundary and a functional unit of a 750-milliliter container. The assessment employed the Ecoinvent version 3 database and the SimaPro software with the Environmental Footprint (EF) method. A hotspot analysis was also conducted to identify the processes generating the highest environmental impacts for each packaging type. The results show that PET packaging demonstrates the highest environmental impact across climate change, resource use, eutrophication, and acidification categories, while paper packaging exhibits the greatest impact on land use. Hotspot analysis reveals that the material production stage of both packaging types represents the most significant environmental impact. The results serve as a guideline for producers and businesses to improve production processes, adopt sustainable raw materials, and invest in closed-loop recycling systems, while also raising consumer awareness on responsible packaging use and waste separation

KEYWORDS: Life Cycle Assessment , Single-use packaging , Sustainable waste management , Environmental impacts

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงของบริบททางสังคมและเศรษฐกิจในศตวรรษที่ 21 โดยเฉพาะการดำเนินชีวิตที่เน้นความสะดวกและรวดเร็ว ส่งผลให้พฤติกรรมการบริโภคของประชาชนในสหราชอาณาจักรเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ หนึ่งในปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นชัดเจนคือ การใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวจำนวนมาก (Besco, 2024) ปรากฏการณ์ดังกล่าวมีส่วนในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลากหลายมิติ อาทิ การปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่ไม่สามารถหมุนเวียนได้ ตลอดจนการสะสมของขยะพลาสติกในระบบนิเวศ เพื่อลดผลกระทบเชิงลบต่อสิ่งแวดล้อมหน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนได้พัฒนาและส่งเสริมการใช้บรรจุภัณฑ์ทางเลือกที่มีความยั่งยืนมากยิ่งขึ้น อาทิเช่น บรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากเยื่อกระดาษธรรมชาติ (Gerassimidou et al., 2022) อย่างไรก็ตาม แม้ทางเลือกเหล่านี้จะมีภาพลักษณ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่กระบวนการผลิต การใช้งาน และการจัดการในช่วงปลายวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ยังอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านอื่น ๆ ได้เช่นกัน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ได้มีการพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis: MFA) และการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของวัสดุพลาสติกในหลากหลายภาคอุตสาหกรรม อาทิ อุตสาหกรรมก่อสร้างและอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยในปี ค.ศ. 1969 บริษัทโคคาโคลาได้เริ่มการประยุกต์ใช้ LCA เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างบรรจุภัณฑ์ชนิดใช้ครั้งเดียวและบรรจุภัณฑ์ชนิดนำกลับมาใช้ซ้ำ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าบรรจุภัณฑ์ชนิดนำกลับมาใช้ซ้ำมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า เนื่องจากมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและสามารถนำกลับมาใช้เคลือบในสัดส่วนที่สูง ต่อมา Huang and Ma (2004) ได้ดำเนินการศึกษาที่ผสานการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพเพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์หลากหลายประเภท ได้แก่ ภาชนะโลหะ (เหล็กและอะลูมิเนียม) ขวดแก้ว กล่องกระดาษแข็ง และกระดาษเคลือบสำหรับบรรจุของเหลว (Liquid Paperboards: LBP) โดยผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณระบุว่าพลาสติกเป็นวัสดุที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ในขณะที่ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพกลับแสดงผลในทางตรงกันข้าม (Huang & Ma,

2004) ในปี ค.ศ. 2009 บริษัทเนสท์เล่ได้ดำเนินการประเมิน LCA เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมระหว่างขวดแก้วและถ้วยพลาสติก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าถ้วยพลาสติกมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า เนื่องจากมีน้ำหนักเบากว่า ซึ่งส่งผลให้การใช้พลังงานและทรัพยากรในกระบวนการผลิตมีค่าน้อยกว่าขวดแก้ว (Humbert et al., 2009)

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยข้างต้นยังคงมีข้อจำกัดสำคัญ กล่าวคือ มุ่งเน้นเฉพาะการเปรียบเทียบบรรจุภัณฑ์แบบดั้งเดิมเท่านั้น และยังไม่รวมถึงการประเมินบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งในปัจจุบันได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในฐานะทางเลือกที่ยั่งยืนกว่า ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์สองประเภท ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด ซึ่งเป็นบรรจุภัณฑ์ดั้งเดิมที่เป็นที่นิยม และบรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิด ซึ่งเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) ในการวิเคราะห์และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์ตลอดช่วงชีวิต ตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ การผลิต การขนส่ง การใช้งาน จนถึงการจัดการเมื่อหมดอายุการใช้งาน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและเปรียบเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด, บรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิด โดยใช้กรอบแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) เพื่อตรวจวัดผลกระทบในแต่ละหมวดหมู่ของผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม (Impact categories) พร้อมทั้งดำเนินการวิเคราะห์จุดวิกฤต (Hotspot Analysis) เพื่อระบุขั้นตอนหรือกระบวนการที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดของแต่ละบรรจุภัณฑ์ โดยวิธีการประเมินผลกระทบที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Environmental Footprint (EF) ซึ่งเป็นวิธีการตามมาตรฐานสากลในการจัดการสิ่งแวดล้อม

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 บรรจุภัณฑ์อาหารที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน

3.1.1 กระดาษและกระดาษลูกฟูก (Paper/ Paper board)

กระดาษและกระดาษลูกฟูกเป็นวัสดุแผ่นที่ประกอบจากเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งได้จากไม้ผ่านกระบวนการซัลไฟต์หรือซัลเฟต เพื่อผลิตเยื่อกระดาษ ฟอกขาว และปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารเคมี สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร มักเคลือบผิวด้วยสารกันน้ำหรือไขมันเพื่อเพิ่มความทนทานและป้องกันความชื้น โดยกระดาษที่นิยมใช้ ได้แก่ กระดาษคราฟท์ ซิปบอร์ด และบอร์ดแข็ง กระดาษคราฟท์เป็นที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน โดยเฉพาะชนิดสีน้ำตาลธรรมชาติที่มีความแข็งแรงสูง มักใช้ในการห่อหรือทำถุงบรรจุอาหารแห้ง เช่น น้ำตาล แป้ง และผลไม้อบแห้ง โดยมักเคลือบด้วยพลาสติก PE หรือ PLA ผ่านกระบวนการลามิเนตหรือโคเอ็กซ์ทรูชัน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติกันน้ำและความสามารถในการซีลความร้อน (Marsh & Bugusu, 2007)

3.1.2 พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate: PET, PETE)

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) และพอลิคาร์บอเนตจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแอลกอฮอล์และกรดคาร์บอกซิลิก พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตถือเป็นวัสดุหลักที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยมีคุณสมบัติในการป้องกันความชื้นและแก๊สได้อย่างมีประสิทธิภาพ อันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างกรดเทเรฟทาติกและเอทิลีนไกลคอล นอกจากนี้ PET ยังมีคุณสมบัติในการต้านทานความร้อน ตัวทำละลาย กรด และน้ำมันแร่ได้เป็นอย่างดี ในปัจจุบัน PET ได้รับการยอมรับว่าเป็นวัสดุพลาสติกที่ได้รับความนิยมสูงสุดสำหรับการผลิตบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มและน้ำแร่ ปัจจัยหลักที่ทำให้ PET ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ได้แก่ คุณสมบัติความใสคล้ายแก้ว ความต้านทานต่อการแตกหัก และน้ำหนักเบา ทั้งนี้ PET ยังมีคุณสมบัติทางกลที่โดดเด่น อันได้แก่ ความเหนียว ความแข็งแรง

3.2 ระเบียบวิธีวิจัยโดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA)

การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) เป็นวิธีการวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการในทุกช่วงของวงจรชีวิต ตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ การผลิต การใช้งาน ไปจนถึงการกำจัดของเสีย LCA ช่วยให้เข้าใจภาพรวมของผลกระทบสะสมในแต่ละขั้นตอนและใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจเพื่อเลือกทางเลือกที่ยั่งยืนมากขึ้น

แนวทางนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 14040 ซึ่งแบ่งกระบวนการ LCA ออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนที่หนึ่ง การกำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขต เป็นการระบุเป้าหมายของการศึกษา พร้อมกำหนดขอบเขตของระบบ หน่วยหน้าที่ และข้อสมมติในการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่สอง คือการวิเคราะห์ข้อมูล คือการรวบรวมข้อมูลนำเข้า เช่น วัตถุดิบ พลังงาน และข้อมูลส่งออก เช่น ของเสียและการปล่อยมลพิษ โดยอาจใช้ฐานข้อมูลสากล เช่น Ecoinvent ขั้นตอนที่สาม คือ การประเมินผลกระทบ การจัดกลุ่มและคำนวณผลกระทบจากข้อมูล LCI โดยใช้ปัจจัยการแปลง เช่น ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential – GWP) และ ขั้นตอนที่สี่ คือ การแปลผลและสรุปผล (Interpretation) เพื่อระบุขั้นตอนที่ส่งผลกระทบสูง วิเคราะห์ข้อจำกัด และเสนอแนวทางปรับปรุงกระบวนการให้มีความยั่งยืนมากขึ้น (Dervishaj & Gudmundsson, 2024) ดังนั้น LCA จึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้ภาคอุตสาหกรรมและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องตัดสินใจได้อย่างมีข้อมูลรองรับในมิติด้านสิ่งแวดล้อม (Jerald, 2013)

3.3 วิธีการกำจัดบรรจุภัณฑ์อาหาร

3.3.1 กระบวนการรีไซเคิล (Recycle)

กระบวนการรีไซเคิลคือการนำวัสดุที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่หรือแปรรูปเพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยประกอบด้วยสามขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเก็บรวบรวมวัสดุเหลือใช้ การแปรรูปวัสดุนั้นให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ และการนำผลิตภัณฑ์เหล่านั้นกลับมาใช้รีไซเคิลอีกครั้ง วัสดุที่นิยมรีไซเคิล ได้แก่ ขวดแก้ว กระป๋องอลูมิเนียม พลาสติก กระดาษ และไม้ ซึ่งการรีไซเคิลช่วยลดปริมาณของเสียที่ต้องฝังกลบและลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางน้ำ อากาศ และดิน การรีไซเคิลแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ การรีไซเคิลแบบวงจรเปิด (Open Loop Recycling) ซึ่งวัสดุจะถูกแปรรูปและนำไปใช้ในรูปแบบใหม่ที่ต่างจากเดิม โดยมักเกิดการเสื่อมคุณภาพของวัสดุ และการรีไซเคิลแบบวงจรปิด (Closed Loop Recycling) ซึ่งวัสดุสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำในผลิตภัณฑ์ชนิดเดิมได้ โดยมีการเสื่อมสภาพน้อยหรือแทบไม่มีของเสียเกิดขึ้น ส่งผลให้ระบบมีความยั่งยืนมากกว่า (Huysman et al., 2015)

3.3.2 การเผาขยะ (Incineration)

การเผาขยะ เป็นกระบวนการจัดการของเสียที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในวัสดุของเสีย กระบวนการนี้สามารถจัดอยู่ในประเภทของการบำบัดด้วยความร้อน (thermal treatment) การกำจัดของเสียด้วยวิธีนี้จะเปลี่ยนของเสียให้กลายเป็นก๊าซไอเสีย (flue gas) เถ้า (ash) และความร้อน เถ้าที่เกิดขึ้นมาจากองค์ประกอบอนินทรีย์ของของเสีย ซึ่งอาจอยู่ในรูปของก้อนของแข็งหรืออนุภาคละเอียดที่ลอยมากับก๊าซไอเสีย ก๊าซไอเสียที่เกิดจากกระบวนการเผาจะต้องได้รับการบำบัดเพื่อกำจัดมลพิษทั้งในรูปของอนุภาคและก๊าซก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ (Knox, 2005)

3.3.3 การฝังกลบ (landfill)

กระบวนการกำจัดของเสียโดยการฝังกลบในพื้นที่ที่จัดเตรียมไว้โดยเฉพาะ โดยของเสียจะถูกนำไปถมและกดทับเป็นชั้น ๆ พร้อมมีระบบควบคุมเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ระบบรองพื้นด้วยพลาสติกหรือดินเหนียวเพื่อกันน้ำชะขยะไม่ให้รั่วลงสู่ชั้นดินและแหล่งน้ำใต้ดิน รวมถึงระบบจัดการก๊าซมีเทนที่เกิดจากการย่อยสลายของขยะอินทรีย์ในสภาพไร้ออกซิเจน (Marsh & Bugusu, 2007)

3.4 งานวิจัยด้านการประเมินวัฏจักรชีวิตของบรรจุภัณฑ์อาหารที่ผ่านมา

การประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) ของบรรจุภัณฑ์อาหารในงานวิจัยที่ผ่านมา มักมุ่งเน้นไปที่บรรจุภัณฑ์ที่บรรจุอาหารที่มีความเน่าเสียง่ายและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูง เช่น เนื้อสัตว์ ผลิตภัณฑ์นม ผัก และผลไม้ โดยศึกษาบรรจุภัณฑ์พลาสติกมากที่สุด เช่น polyethylene terephthalate (PET), polyethylene (PE), polypropylene (PP) และฟิล์มหลายชั้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร (Bremenkamp & Gallagher, 2024; Desole et al., 2024) งานวิจัยหลายชิ้นยืนยันว่าประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมจากการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารด้วยบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง สามารถชดเชยหรือลดทอนผลกระทบที่เกิดจากการผลิตบรรจุภัณฑ์ได้ (Kumari et al., 2024) PET ถือเป็นพลาสติกที่ได้รับการศึกษา LCA มากที่สุด เนื่องจากถูกนำมาใช้ในหลากหลายรูปแบบ เช่น ขวด ถาด และฟิล์ม งานวิจัยส่วนใหญ่พบว่าการผลิตและการจัดการเมื่อหมดอายุการใช้งานของ PET ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูง ทั้งด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) ความต้องการใช้พลังงาน และการใช้ทรัพยากรฟอสซิล (Desole et al., 2022) อย่างไรก็ตาม งาน LCA หลายชิ้นได้ชี้ให้เห็นว่า เมื่อ PET ถูกใช้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหารสดหรืออาหารที่เสียง่าย ประโยชน์ที่เกิดจากการลดการสูญเสียอาหารสามารถชดเชยผลกระทบเชิงลบจากการผลิตบรรจุภัณฑ์ได้ (Rasines Elena et al., 2023) นอกจากนี้ PET ยังมีศักยภาพในการรีไซเคิล โดยเฉพาะในระบบแบบปิด (close loop recycling) ซึ่งช่วยลดทั้งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการใช้ทรัพยากร เมื่อเทียบกับการผลิตจากวัตถุดิบใหม่ (Caelli et al., 2024) งานวิจัยด้าน LCA ส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่บรรจุภัณฑ์แบบดั้งเดิมโดยเฉพาะพลาสติก PET ตามที่ได้กล่าวไปข้างต้น บรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เช่น กระดาษเคลือบกันน้ำ ยังถูกศึกษาอย่างจำกัด ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์สองประเภท ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด ซึ่งเป็นบรรจุภัณฑ์ดั้งเดิมที่เป็นที่นิยม และบรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิด ซึ่งเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) ในการวิเคราะห์และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์ตลอดวงจรชีวิต ตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ การผลิต การขนส่ง การใช้งาน จนถึงการจัดการเมื่อหมดอายุการใช้งาน

4. วิธีดำเนินการวิจัย/ระเบียบวิธีวิจัย/Research Methodology

กรอบการศึกษานี้ใช้มาตรฐาน ISO 14040 ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักในการดำเนินการประเมินวัฏจักรชีวิตด้านสิ่งแวดล้อม ซอฟต์แวร์ LCA ที่เลือกใช้ในโครงการนี้คือ SimaPro ซึ่งออกแบบมาเพื่อเป็นแหล่งข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่มีความโปร่งใสในการประมวลผล และหลีกเลี่ยงกระบวนการแบบกล่องดำ (black-box) SimaPro เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการรวบรวม วิเคราะห์ และติดตามข้อมูลด้านความยั่งยืนของผลิตภัณฑ์และบริการ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลายรูปแบบ เช่น การออกแบบผลิตภัณฑ์ การรายงานด้านความยั่งยืน และการกำหนดตัวชี้วัดด้านประสิทธิภาพหลัก สำหรับฐานข้อมูลพื้นฐาน (inventory data) ที่ใช้คือ Ecoinvent เวอร์ชัน 3 ซึ่งครอบคลุมกระบวนการมากกว่า 1,000 รายการ

อย่างไรก็ตาม ฐานข้อมูล Ecoinvent เวอร์ชัน 3 มีข้อจำกัดบางประการ กล่าวคือ การใช้ข้อมูลเฉลี่ยระดับยุโรปอาจไม่สะท้อนสภาพบริบทเฉพาะของสหราชอาณาจักร อีกทั้งข้อมูลบางส่วนมีความล้าสมัย โดยเฉพาะด้านการจัดการของเสียและเทคโนโลยีการผลิตบรรจุภัณฑ์รุ่นใหม่ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของการแปลผล

4.1 การกำหนดวัตถุประสงค์, ขอบเขต และ หน่วยหน้าที่ (Definition of goal , scope and functional unit)

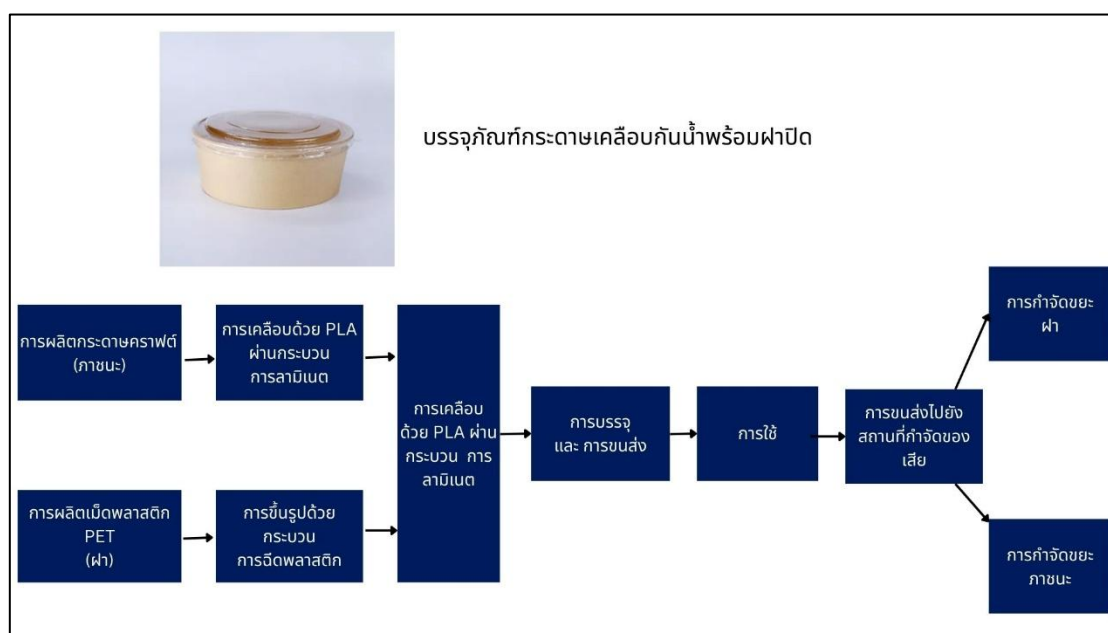
วัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้ คือการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์ที่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน ได้แก่ บรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิด และ บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด ขนาด 750 ml ขอบเขตของการศึกษานี้ครอบคลุมการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดจบ (cradle to grave) โดยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตวัสดุที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์แต่ละประเภท ไปจนถึงกระบวนการกำจัดหลังการใช้งาน การศึกษานี้พิจารณา 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การผลิต

วัสดุ การผลิตบรรจุภัณฑ์ การประกอบ การขนส่ง การใช้งาน และการกำจัดในขั้นสุดท้าย ส่วนหน่วยหน้าที่ (Functional Unit) ที่กำหนดไว้ คือบรรจุภัณฑ์ที่ขนาด 750 ml และ สามารถบรรจุคาโบนาราได้ปริมาณ 515 กรัม

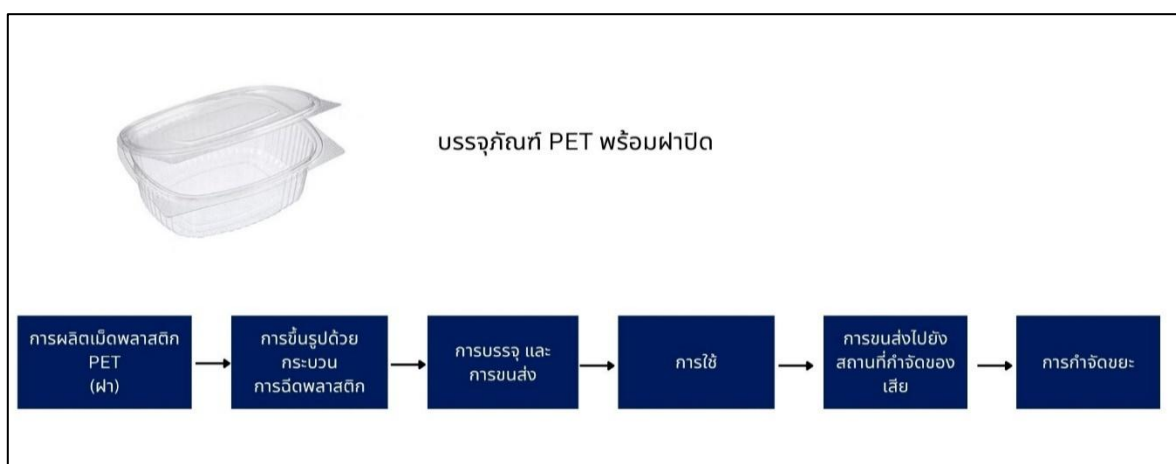
คาร์บอนาร่าถูกเลือกเป็นผลิตภัณฑ์ตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้เนื่องจากเป็นอาหารสำเร็จรูปที่มีความนิยมสูง ซึ่งทำให้เป็นตัวแทนที่ดีของกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารพาสต้า นอกจากนี้ คาร์บอนาร่ายังมีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์ทั้งสองประเภท โดยมีความชื้นปานกลางและส่วนผสมของไขมันที่สามารถประเมินความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของความชื้นและน้ำมัน

4.2 ขอบเขตของระบบ (System Boundary)

ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิด และ บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด จำเป็นต้องพิจารณา 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การผลิตวัสดุ การผลิต/ประกอบบรรจุภัณฑ์ การขนส่ง ขั้นตอนการใช้งาน และ ขั้นตอนการกำจัดหลังใช้งาน รูปที่ 1 และ 2 แสดงขอบเขตของระบบของบรรจุภัณฑ์ที่พิจารณา



รูปที่ 1 : ขอบเขตของระบบของบรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิด



รูปที่ 2 : ขอบเขตของระบบของบรรจุภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด

4.3 ข้อมูลและข้อกำหนดด้านคุณภาพของข้อมูล

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลการผลิตวัตถุดิบจากฐานข้อมูล Ecoinvent เวอร์ชัน 3 ซึ่งครอบคลุมวัสดุหลักที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ เม็ดพลาสติก PET กระดาษคราฟท์ และเม็ดพลาสติก PLA โดยรายละเอียดน้ำหนักของวัตถุดิบแต่ละประเภทแสดงในตารางที่ 1 สำหรับกระบวนการผลิต บรรจุภัณฑ์ PET และฝา PET ผลิตโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) ขณะที่ บรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำผลิตโดยกระบวนการรีดเคลือบด้วยพลาสติก PLA (PLA extrusion laminating) เมื่อบรรจุภัณฑ์ถูกจัดส่งถึงร้านอาหารในเขตใจกลางกรุงลอนดอน อาหารที่ปรุงสุกแล้วจะถูกบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์นั้นในขั้นตอนการใช้งาน

ตารางที่ 1 : น้ำหนักของวัสดุที่ใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์

ประเภทบรรจุภัณฑ์	บรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อม ฝาปิด (เคลือบ PLA)	บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด
ภาชนะหลัก	17.5 กรัม	34.6 กรัม
ฝา PET	4.2 กรัม	-
น้ำหนักรวมของบรรจุภัณฑ์	21.7 กรัม	34.6 กรัม

สำหรับการขนส่ง แบ่งออกเป็นสองช่วงหลัก โดยช่วงแรกคือการขนส่งบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตเสร็จแล้วจากโรงงานในเมืองเซฟฟีลด์ไปยังร้านอาหารในกรุงลอนดอน ซึ่งมีระยะทาง 268.7 กิโลเมตร โดยใช้รถบรรทุกติเซล 10 ล้อ เป็นพาหนะ หลังจากใช้งานแล้ว บรรจุภัณฑ์จะถูกขนส่งต่อไปยังสถานที่จัดการของเสีย โดยเฉลี่ยอยู่ห่างจากใจกลางลอนดอนประมาณ 10 กิโลเมตร โดยใช้รถบรรทุกขยะเป็นพาหนะในการขนส่ง ส่วนในขั้นตอนสุดท้ายของวัฏจักรชีวิตหรือการกำจัดของเสีย การศึกษานี้ สมมติว่าผู้บริโภคแยกภาชนะหลักออกจากฝาปิดก่อนทิ้ง และระบบคัดแยกสามารถส่งองค์ประกอบแต่ละชนิดเข้าสู่เส้นทางจัดการที่สอดคล้องกัน (เช่น รีไซเคิล/เผาทำลาย/ฝังกลบ) ตารางที่ 2 รายงานเป็น สัดส่วนปลายทางสุดท้าย (final end-of-life fate) ของแต่ละชนิดบรรจุภัณฑ์ หลังหักการสูญเสียระหว่างการเก็บรวบรวม-คัดแยก-แปรรูปรีไซเคิลแล้ว

ตารางที่ 2: สัดส่วนการจัดการของเสียของบรรจุภัณฑ์แต่ละประเภท

ประเภทการจัดการ	ฝังกลบ	เผาทำลาย	รีไซเคิล
กระดาษเคลือบกันน้ำ	5%	22%	73%
บรรจุภัณฑ์ PET และ ฝาปิด PET	70%	17%	13%

4.4 การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Impact Assessment: LCIA)

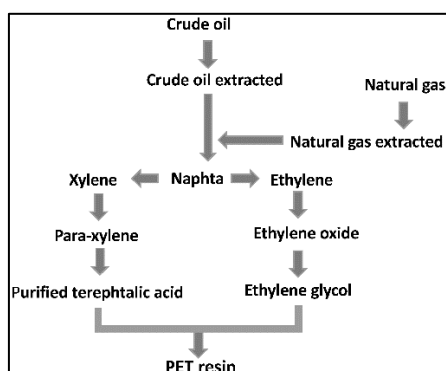
หลังจากรวบรวมข้อมูลนำเข้าแล้ว ข้อมูลเหล่านี้จะถูกป้อนเข้าสู่ซอฟต์แวร์ Simapro เพื่อดำเนินการประเมินผลกระทบวัฏจักรชีวิต (LCIA) ข้อมูลนำเข้าทั้งหมดจะถูกใช้เพื่อสร้างกระแสของกระบวนการ (process flows) ที่จำเป็น และจัดสร้างระบบผลิตภัณฑ์ (product systems) เมื่อระบบผลิตภัณฑ์ถูกสร้างขึ้นแล้ว จะใช้ Simapro เพื่อคำนวณผลการประเมินผลกระทบซอฟต์แวร์ Simapro มีแบบจำลองหลายรูปแบบ ซึ่งใช้จัดหมวดหมู่ข้อมูล (inventory data) และระบุว่าการกิจกรรมในการผลิตบรรจุภัณฑ์ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหมวดหมู่ใดบ้าง เมื่อระบุได้แล้ว Simapro จะประมวลผลการประเมินผลกระทบ โดยแสดงผลกระทบที่เกิดจากการปล่อยมลพิษตลอดวัฏจักรชีวิตของบรรจุภัณฑ์ ผลลัพธ์เหล่านี้จะแสดงในรูปแบบของร้อยละที่แต่ละกระบวนการมีส่วนร่วมในแต่ละหมวดหมู่ผลกระทบที่ระบุไว้ หลังจากนั้นข้อมูลจะถูกถ่วงน้ำหนักและทำการทำ

ให้เป็นมาตรฐาน (normalized) เพื่อใช้ในการแปลผลต่อไป ในการศึกษานี้ ได้เลือกใช้วิธีการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต (LCIA) แบบ EF (Environmental Footprint) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้วิเคราะห์หมวดหมู่ของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตและการใช้งานผลิตภัณฑ์

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

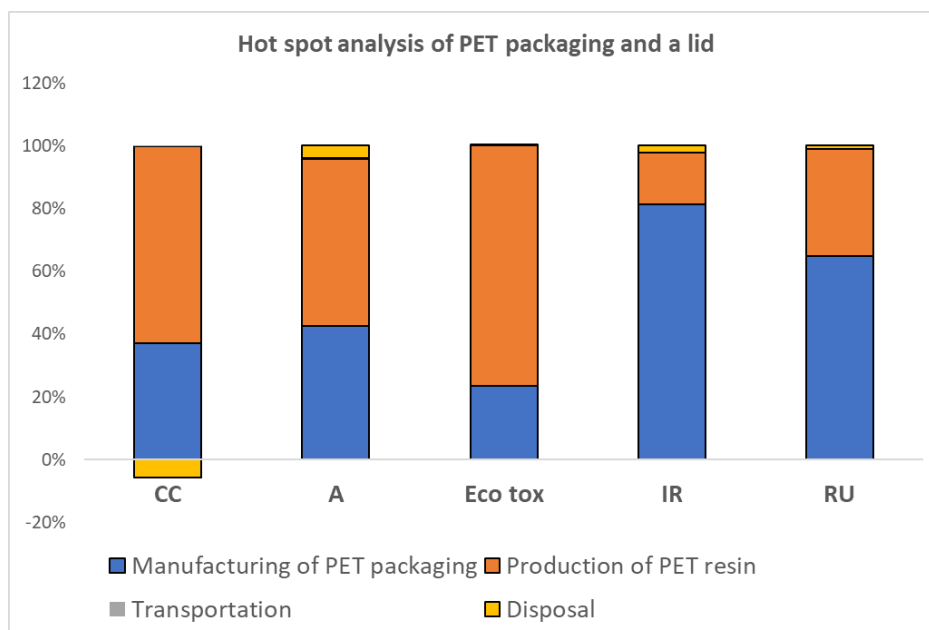
ผลการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต (LCIA) ที่ใช้วิธี EF แสดงผลโดยอ้างอิงข้อมูลสินค้าคงคลังจากฐานข้อมูล Ecoinvent 3 และแสดงผลการประเมินผลกระทบสำหรับ 2 รูปแบบของบรรจุภัณฑ์ที่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน ได้แก่ บรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิด และ บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด

5.1 ผลการประเมิน LCIA ของบรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด โดยใช้วิธี EF



รูปที่ 3 : กระบวนการผลิต PET Resin ที่มา : Bustamante et al (2022)

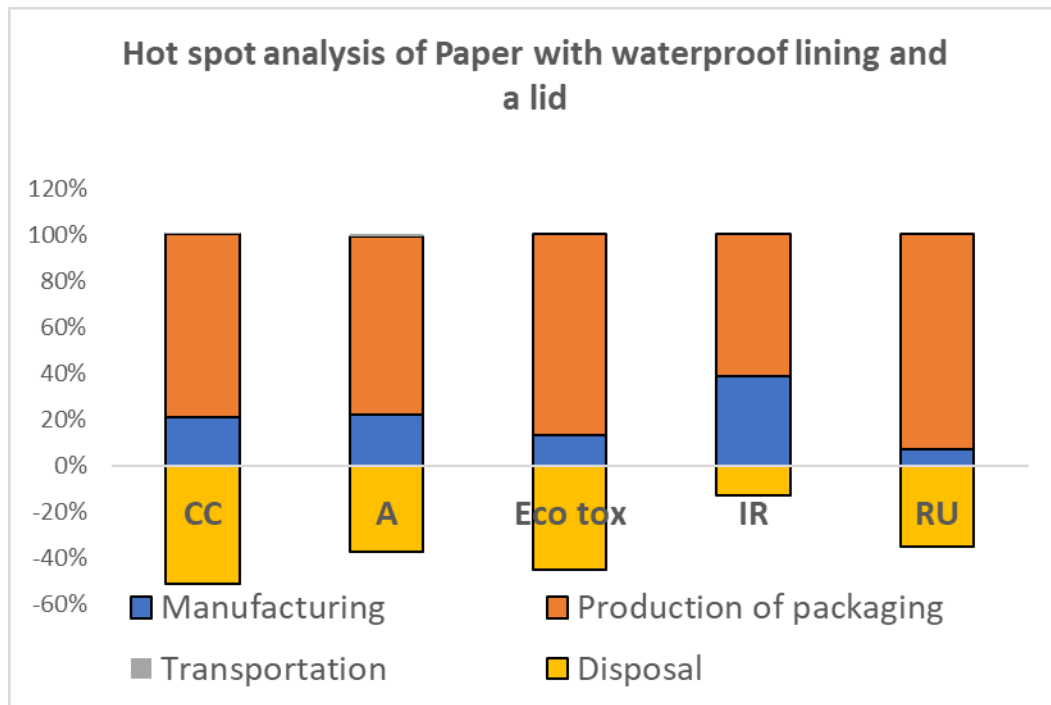
จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการผลิต PET resin (Production of PET resin) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อหลายหมวดหมู่ของสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change), ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ (ecotoxicity) และ การใช้ทรัพยากรประเภทแร่ธาตุ (resource use) ข้อมูลสำหรับการผลิต PET resin มาจากฐานข้อมูล Ecoinvent 3 โดยกระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการสกัดน้ำมันดิบและกระบวนการแตกตัว (cracking) เพื่อให้ได้ก๊าซที่สามารถเปลี่ยนเป็นสารตั้งต้น เช่น เอทิลีน นาฟทา เบนซีน และเอทิลีนออกไซด์ ซึ่งในขั้นสุดท้ายจะได้ PET เรซินเป็นวัตถุดิบหลัก (รูปที่ 3) (Bustamante et al., 2022) การผลิตนี้ต้องใช้ทรัพยากรธรรมชาติและเชื้อเพลิงฟอสซิลจำนวนมาก จึงเป็นสาเหตุที่กระบวนการผลิต PET resin มีส่วนร่วมสูงที่สุดในหมวดหมู่ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมแทบทั้งหมด ขั้นตอนการผลิตบรรจุภัณฑ์ PET (Manufacturing of PET packaging) ยังมีผลกระทบมากในบางหมวดหมู่ เช่น การแผ่รังสีไอออนซ์ ในขั้นตอนการกำจัดบรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด ให้ผลที่น่าสนใจในหมวดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) เนื่องจากพบว่าค่าผลกระทบของ disposal phase มีค่าเป็นลบ แสดงถึง ประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเกิดจากการรีไซเคิล กล่าวคือ เมื่อกระบวนการรีไซเคิลสามารถสร้างผลิตภัณฑ์พลอยได้ในระดับที่สูงกว่าผลกระทบจากการกำจัดของเสีย ระบบจะให้ เครดิต ในรูปของค่าลบ ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ค่าลบหมายถึงไม่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น CO₂ ซึ่งถือว่ามีส่วนดีต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์ สำหรับการขนส่ง ถือว่ามีผลกระทบต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่น ๆ ประมาณ 0%–0.5%



รูปที่ 4 : การวิเคราะห์ Hot spot ของบรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด ; CC = climate change , A = acidification , ECO Tox – ecotoxicity, IR – ionic radiation , RU = resource use

5.2 ผลการประเมิน LCIA ของบรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิด โดยใช้วิธี EF

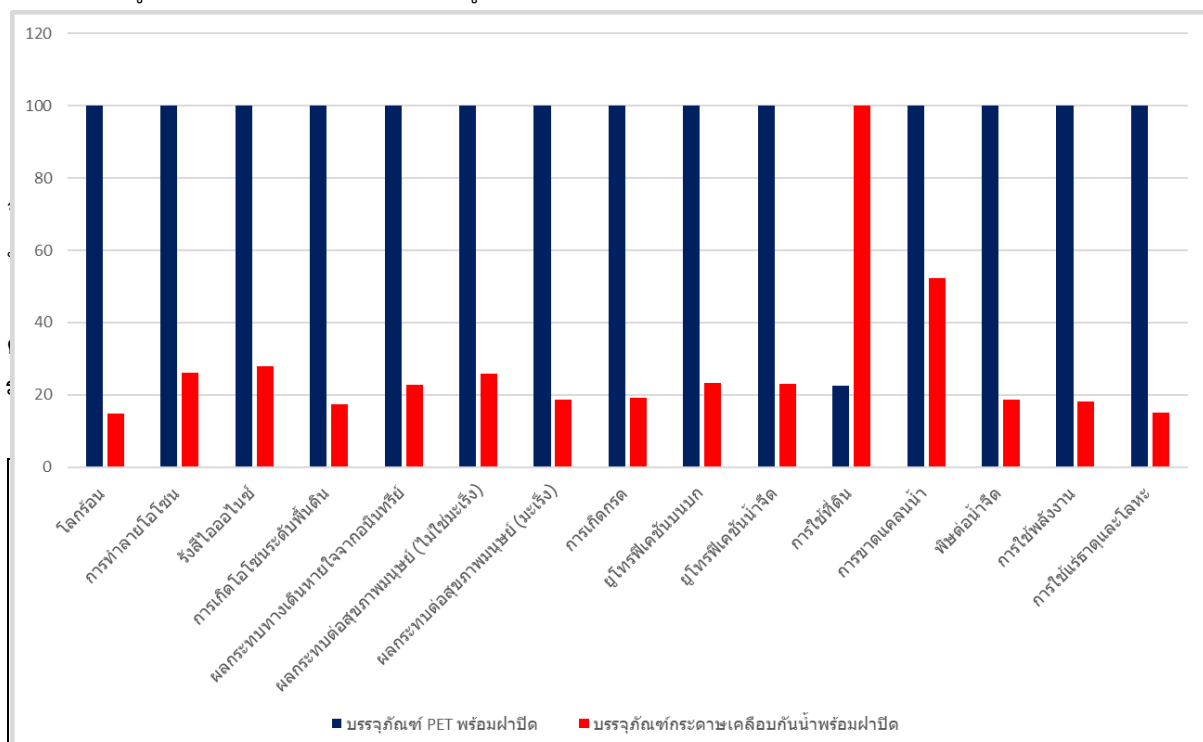
จากรูปที่ 5 การผลิตกระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิดส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนอื่น ๆ โดยเฉพาะในหมวดหมู่ เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) , การแผ่รังสีไอออนไนซ์ (ionic radiation) , ความเป็นพิษในน้ำจืด (ecotoxicity) และการใช้ทรัพยากรอื่น (resource use) สำหรับการผลิตบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้ แบ่งออกเป็นสองกระบวนการหลัก ได้แก่ การผลิตกระดาษคราฟท์เคลือบ PLA และการผลิตฝา PET โดยกระดาษคราฟท์มีผลกระทบสูงต่อมลพิษในดิน น้ำ และอากาศ ซึ่งผลิตจากกระบวนการคราฟท์หรือซัลไฟต์ที่แปรสภาพไม้ให้เป็นเยื่อไม้ที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก กระบวนการนี้ปล่อย NOx และ SOx ซึ่งเป็นสาเหตุของฝนกรด และ CO₂ ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีผลต่อภาวะโลกร้อน ส่วนการผลิตฝา PET มีลักษณะกระบวนการคล้ายกับการผลิตบรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิดตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ แม้จะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ก็อยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับภาชนะหลัก เนื่องจากน้ำหนักวัสดุมีสัดส่วนที่น้อยกว่า สำหรับขั้นตอนการกำจัดบรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิดให้ผลลัพธ์เป็นค่าลบในทุกหมวดหมู่ของผลกระทบ ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการรีไซเคิลของกระดาษที่สูง โดยเฉพาะในหมวดหมู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศซึ่งพบค่าลบถึง -51% แสดงให้เห็นว่าไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ด้านการขนส่งมีผลกระทบต่ำมากเช่นเดียวกับบรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด ตามที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้



รูปที่ 5 : การวิเคราะห์ Hot spot ของ บรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิด; CC = climate change , A = acidification , ECO Tox = ecotoxicity, IR = ionic radiation , RU = resource use

5.3 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของแต่ละสถานการณ์

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์ทั้ง 2 ประเภท ประกอบด้วย บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด และ บรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิด ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (รูปที่ 6) และตารางเปรียบเทียบข้อมูล (ตารางที่ 3)



หมวดหมู่ผลกระทบ	หน่วย	บรรจุมัณต์ PET พร้อมฝาปิด	กระดาษเคลือบกันน้ำ พร้อมฝาปิด
รังสีไอออไนซ์ (Ionising Radiation, Human Health)	กิโลเบคเคอเรล ยูเรเนียม-235 เทียบเท่า	0.033443363	0.009299433
การเกิดโอโซนระดับพื้นดิน (Photochemical ozone formation)	กิโลกรัม NMVOC เทียบเท่า	0.000470553	0.000082108
ผลกระทบทางเดินหายใจจากอนินทรีย์ (Respiratory inorganics)	อัตราการเกิดโรค	6.0589E-09	1.3849E-09
ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (ไม่ใช่ มะเร็ง)	CTUh (หน่วยผลกระทบต่อ มนุษย์)	1.46199E-08	3.79092E-09
ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (มะเร็ง)	CTUh	2.09015E-09	3.90352E-10
การเกิดกรด (Acidification)	โมล H ⁺ เทียบเท่า	0.000886615	0.000169489
ยูโทรฟิเคชันบนบก (Eutrophication terrestrial)	โมล N เทียบเท่า	0.001637103	0.000381459
ยูโทรฟิเคชันน้ำจืด (Eutrophication freshwater)	กิโลกรัม P เทียบเท่า	6.05831E-05	1.39001E-05
การใช้ที่ดิน (Land Use)	คะแนน (Pt)	1.64579721	7.34112082
การขาดแคลนน้ำ (Water Scarcity)	ลูกบาศก์เมตรเทียบเท่าระดับ โลก (m ³ world eq)	0.063599456	0.033202015
พิษต่อน้ำจืด (Ecotoxicity freshwater)	CTUe (หน่วยพิษต่อระบบ นิเวศ)	0.087011026	0.016258199
การใช้พลังงาน (ทรัพยากรพลังงาน)	เมกะจูล (MJ)	3.731402118	0.680103137
การใช้แร่ธาตุและโลหะ (Resource use – minerals and metals)	กิโลกรัม Sb เทียบเท่า	4.57619E-07	6.89015E-08

จากตารางที่ 3 ในด้าน ภาวะโลกร้อน (Global warming) บรรจุมัณต์ PET พร้อมฝาปิดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงกว่ากระดาษถึง 7 เท่า (0.1592 kg CO₂ eq เทียบกับ 0.0235 kg CO₂ eq) ซึ่งสอดคล้องกับการใช้พลังงานฟอสซิลในกระบวนการผลิตของบรรจุมัณต์ PET พร้อมฝาปิดที่มากกว่า โดยในหมวด Resource use, energy carriers บรรจุมัณต์ PET พร้อมฝาปิดใช้พลังงานสูงถึง 3.73 MJ ขณะที่บรรจุมัณต์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิดใช้เพียง 0.68 MJ เท่านั้น ผลกระทบด้าน Ozone depletion และ Photochemical ozone formation ของ บรรจุมัณต์ PET พร้อมฝาปิด ก็สูงกว่ามาก แสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศและสารระเหยที่เกิดจากกระบวนการผลิตและขนส่ง อีกด้านหนึ่งที่ บรรจุมัณต์ PET พร้อมฝาปิดส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ (Respiratory inorganics), โรคที่ไม่ใช่มะเร็ง (Non-cancer effects), และโรคมะเร็ง (Cancer effects) ซึ่งล้วนมีค่ามากกว่าบรรจุมัณต์

กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิดหลายเท่าตัว โดยเฉพาะ ค่าความเสี่ยงต่อมะเร็ง ซึ่ง บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด สูงกว่า บรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิดถึง 5 เท่า แสดงถึงสารอันตรายที่ปล่อยในวงจรชีวิตของพลาสติกที่เกี่ยวข้องกับ สารเคมีและโลหะหนัก ในประเด็น Ecotoxicity freshwater ซึ่งสะท้อนผลกระทบต่อสัตว์น้ำและระบบนิเวศน้ำจืด บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด ก็ส่งผลร้ายมากกว่ากระดาษกว่า 5 เท่า เช่นเดียวกับด้าน Water scarcity ซึ่ง บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด ใช้น้ำในรูปแบบที่มีผลต่อความขาดแคลนน้ำมากกว่า ($0.0636 \text{ m}^3 \text{ world eq}$ เทียบกับ $0.0332 \text{ m}^3 \text{ world eq}$) แสดงถึงภาระ เชิงทรัพยากรน้ำที่มากกว่า อย่างไรก็ตาม ในหมวด การใช้ที่ดิน (Land Use) บรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิดกลับ มีผลกระทบสูงอย่างมาก (7.34 Pt เทียบกับ 1.65 Pt) ซึ่งสะท้อนถึงการใช้พื้นที่เพาะปลูกและการจัดการทรัพยากรที่ดินใน กระบวนการผลิตกระดาษ เช่น การปลูกต้นไม้ การแปรรูปเยื่อไม้ และ ระบบโลจิสติกส์ที่อิงกับปัจจัยเชิงภูมิศาสตร์

การตัดสินใจเลือกใช้วัสดุบรรจุภัณฑ์ควรมองในลักษณะการถ่วงดุลระหว่างผลกระทบสิ่งแวดล้อมในมิติต่างๆ โดย บรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิดมีข้อได้เปรียบในด้านการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลพิษทางอากาศ ในขณะที่บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด มีประสิทธิภาพดีกว่าในการลดแรงกดดันต่อการใช้ที่ดินและผลกระทบต่อระบบนิเวศ บนบก ความเหมาะสมของแต่ละทางเลือกขึ้นอยู่กับระบบการจัดการปลายทาง (end-of-life management) และโครงสร้าง พื้นฐานด้านการรีไซเคิล ซึ่งแตกต่างกันในแต่ละประเทศหรือภูมิภาค (Bustamante et al., 2022) การพัฒนาระบบรีไซเคิล PET ที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถลดผลกระทบในหลายหมวดได้อย่างมีนัยสำคัญ (Caelli et al., 2024) ส่วนการผลิตกระดาษ จากวัตถุดิบที่มาจากป่าไม้ที่ได้รับการรับรองความยั่งยืนก็สามารถลดแรงกดดันจากการใช้ที่ดินได้เช่นกัน

การกำหนดนโยบายและการออกแบบเชิงอุตสาหกรรมควรให้ความสำคัญกับการลดผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต พร้อมทั้งส่งเสริมระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนที่เน้นการยืดอายุการใช้งานวัสดุและเพิ่มอัตราการนำกลับมาใช้ใหม่ (Dervishaj & Gudmundsson, 2024) งานวิจัยนี้สะท้อนให้เห็นว่าการเลือกใช้วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ยั่งยืนต้องมีการวิเคราะห์แบบบูรณาการ โดย พิจารณาผลกระทบสิ่งแวดล้อมหลายมิติควบคู่กัน มิใช่การมุ่งเน้นเพียงตัวชี้วัดเดียว เช่น คาร์บอนฟุตพริ้นท์ แนวทางนี้จึงเป็น การเปิดมุมมองใหม่สำหรับการพัฒนานโยบายและกลยุทธ์ด้านการบริหารจัดการวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ยั่งยืนในอนาคต

5.4 การวิเคราะห์ความไวเชิงคุณภาพ (Qualitative Sensitivity Analysis)

แม้ว่าการศึกษานี้จะไม่ได้ทำการวิเคราะห์ความไวเชิงปริมาณ (quantitative sensitivity analysis) แต่ได้พิจารณา เชิงคุณภาพถึงความเป็นไปได้ที่ผลลัพธ์อาจเปลี่ยนแปลงได้หากมีการปรับสมมติฐานหรือค่าพารามิเตอร์หลักบางประการ โดยเฉพาะตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์

ประการแรก อัตราการรีไซเคิล (recycling rate) ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่สุด เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อผลการประเมิน สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในหมวดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการใช้ทรัพยากรพลังงาน (Bustamante et al., 2022) หากสมมติว่าอัตราการรีไซเคิลของบรรจุภัณฑ์ PET เพิ่มขึ้นผลกระทบด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการใช้พลังงาน ฟอสซิลจะลดลงอย่างชัดเจน และอาจทำให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับบรรจุภัณฑ์กระดาษมากขึ้น (Creadore & Castaldi, 2023) ในประเด็นการขนส่ง (transportation) แม้ว่าผลการวิเคราะห์ hotspot จะพบว่ามีส่วนรวมเพียง 0–0.5% ของผลกระทบ ทั้งหมด แต่การปรับเปลี่ยนระยะทางหรือประเภทพาหนะก็อาจมีผลในเชิงเปรียบเทียบได้บ้าง หากโรงงานผลิตตั้งอยู่ใกล้ พื้นที่ใช้งานมากขึ้น จะช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนจากการขนส่งลง แม้ไม่ใช่ตัวแปรหลัก แต่ก็สะท้อนความสำคัญของการ เลือกทำเลโรงงานผลิต (Jørgensen et al., 1996)

สำหรับเทคโนโลยีการผลิต (production technology) หากโรงงานสามารถปรับใช้กระบวนการที่มีประสิทธิภาพ ด้านพลังงานมากขึ้น เช่น การใช้หม้อไอน้ำชีวมวลแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตเยื่อกระดาษ หรือการพัฒนาเทคโนโลยี polymerization ที่ใช้พลังงานต่ำในการผลิต PET ก็จะสามารถลดผลกระทบได้อย่างชัดเจนในหลายหมวดหมู่

สุดท้าย ปัจจัยที่มีความสำคัญมากในปัจจุบันคือประสิทธิภาพของระบบคัดแยก (sorting technologies) เนื่องจากการรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพต้องพึ่งพาการคัดแยกที่แม่นยำ เทคโนโลยีใหม่ เช่น Near-Infrared (NIR) sorting,

Hyperspectral Imaging (HSI) และการคัดแยกอัตโนมัติที่ใช้ปัญญาประดิษฐ์ ช่วยเพิ่มอัตราการแยก PET จากของเสียผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Taneepanichskul et al., 2025) หากระบบเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในเมืองใหญ่ เช่น ลอนดอน อัตราการรีไซเคิล PET อาจสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ในการศึกษาอย่างมาก ซึ่งจะช่วยให้ผลกระทบด้าน Climate change, Resource use, Ecotoxicity freshwater และ Human health ลดลงอย่างชัดเจน ในทางกลับกัน หากระบบคัดแยกยังเป็นแบบ manual หรือมีอัตราการปนเปื้อนสูง ประสิทธิภาพการรีไซเคิลจริงอาจต่ำกว่าที่คาด ทำให้ PET ยังคงมีผลกระทบสูงกว่า (Schwarz et al., 2021)

6. สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์อาหารแบบนำกลับบ้าน 2 ประเภท ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด และบรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิด โดยใช้ระเบียบวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ตามมาตรฐาน ISO 14040 และการวิเคราะห์จุดวิกฤต (Hotspot Analysis) ผลการประเมินพบว่า บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด มีผลกระทบสิ่งแวดล้อมสูงในหมวด การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (0.1592 kg CO₂-eq), การใช้พลังงาน (3.73 MJ) และ การใช้ทรัพยากรแร่ธาตุ รวมถึงส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ทั้งแบบก่อมะเร็งและไม่ก่อมะเร็งมากกว่าบรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำพร้อมฝาปิดอย่างมีนัยสำคัญ โดยเป็นผลจากกระบวนการผลิตที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล อย่างไรก็ตาม ในขั้นตอนการกำจัดบรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด พบว่าผลกระทบในหมวดภาวะโลกร้อนเป็นลบ ซึ่งสะท้อนถึงประโยชน์ที่ได้รับจากกระบวนการรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพ โดยการรีไซเคิลสามารถทดแทนการผลิตเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์ (virgin PET) ที่มีความเข้มข้นทั้งด้านการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูง อีกทั้งยังช่วยลดความเสี่ยงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการกำจัดแบบดั้งเดิม เช่น การฝังกลบหรือการเผา ซึ่งมักก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลพิษสู่ดิน น้ำ และอากาศ สำหรับ บรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำ แม้จะมีผลกระทบสูงในขั้นตอนการผลิต โดยเฉพาะในหมวด เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (79%), การทำลายชั้นโอโซน (81%), และสุขภาพมนุษย์ (มากกว่า 80%) แต่กลับแสดงผลกระทบต่ำในภาพรวมและปรากฏค่าลบเมื่อพิจารณาขั้นตอนการกำจัด ซึ่งสามารถรีไซเคิลได้ดี โดยเฉพาะในหมวดโลกร้อนที่พบค่าลบสูงถึง -51% สะท้อนศักยภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทั้งนี้ กระดาษมีข้อจำกัดด้านการใช้ที่ดินที่สูงกว่า บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิดอย่างมีนัยสำคัญ (7.34 Pt เทียบกับ 1.65 Pt) เนื่องจากต้องใช้พื้นที่เพาะปลูกในการผลิตวัตถุดิบ

โดยสรุป แม้ว่าบรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด จะมีความได้เปรียบในด้านความแข็งแรงและการใช้งาน แต่ผลกระทบสิ่งแวดล้อมในกระบวนการผลิตยังคงสูง ในขณะที่บรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบกันน้ำ แม้ใช้ที่ดินมาก แต่โดยรวมแล้วมีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า โดยเฉพาะในบริบทของเมืองที่มีระบบรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงให้ข้อมูลสำคัญสำหรับผู้กำหนดนโยบายและผู้ประกอบการในการตัดสินใจเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมกับแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืนในอนาคต

7. ข้อเสนอแนะ

ด้านผู้บริโภค บรรจุภัณฑ์ PET พร้อมฝาปิด แม้จะมีผลกระทบสูงในกระบวนการผลิต แต่กลับแสดงศักยภาพในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมเมื่อเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล ในขณะที่บรรจุภัณฑ์กระดาษแม้ใช้ที่ดินมาก แต่เมื่อเข้าสู่ระบบการกำจัดกลับให้ค่าผลกระทบเชิงลบสูง (โดยเฉพาะการลดโลกร้อน) ดังนั้น ผู้บริโภคจึงควรมีบทบาทสำคัญในการคัดแยกขยะบรรจุภัณฑ์ให้ถูกต้องและเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่สามารถเข้าสู่ระบบรีไซเคิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ การส่งเสริมความรู้ ความเข้าใจ และพฤติกรรมที่รับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อมของผู้บริโภคจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบรีไซเคิลและลดผลกระทบโดยรวมได้จริง

ด้านผู้ผลิต ผลกระทบหลักของ บรรจภัณฑ์ PET เกิดจากการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและกระบวนการผลิตที่เข้มข้นด้านพลังงาน ในขณะที่บรรจภัณฑ์กระดาษมีข้อจำกัดด้านการใช้ที่ดินจากการเพาะปลูกวัตถุดิบ ดังนั้น ผู้ผลิตควรปรับปรุงกระบวนการผลิต PET เพื่อลดการใช้พลังงานและสารเคมีที่เป็นอันตราย รวมถึงลงทุนในระบบรีไซเคิลแบบปิด (closed-loop) เพื่อให้ PET หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้มากขึ้น สำหรับผู้ผลิตบรรจภัณฑ์กระดาษ ควรเน้นการใช้เยื่อไม้หรือวัตถุดิบจากแหล่งที่ยั่งยืนที่ได้รับการรับรองมาตรฐานสิ่งแวดล้อม เพื่อลดผลกระทบจากการใช้ที่ดิน

ด้านนโยบาย พบว่าระบบจัดการหลังการบริโภค โดยเฉพาะการรีไซเคิล มีบทบาทสำคัญในการชดเชยผลกระทบสิ่งแวดล้อมของบรรจภัณฑ์ทั้งสองประเภท ดังนั้น ภาครัฐควรสนับสนุนการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการรีไซเคิลในเขตเมืองให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น พร้อมทั้งจัดทำฉากแสดงประเภทวัสดุและแนวทางจัดการที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มคุณภาพการคัดแยกขยะ นอกจากนี้ รัฐบาลยังสามารถออกมาตรการจูงใจ เช่น การลดหย่อนภาษีหรือเงินอุดหนุนแก่ผู้ประกอบการที่ลงทุนในเทคโนโลยีรีไซเคิลและการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่บรรจภัณฑ์ที่สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน

8. เอกสารอ้างอิง

- Besco, L. (2024). The opening of the single-use plastics policy window in the United Kingdom: societal interest and corporate action align. In *Research Handbook on Plastics Regulation* (pp. 354-373). Edward Elgar Publishing.
- Bremenkamp, I., & Gallagher, M. J. S. (2024). Life cycle assessment methods for investigating novel food packaging systems. *Environmental Science: Advances*, 3(10), 1337-1350.
- Bustamante, G., Giannetti, B. F., Agostinho, F., Liu, G., & Almeida, C. M. (2022). Prioritizing cleaner production actions towards circularity: Combining LCA and emergy in the PET production chain. *Sustainability*, 14(11), 6821.
- Caelli, C., Arfelli, F., Caraceni, F., Cespi, D., Cordara, M., Brondi, C., & Ballarino, A. (2024). Implementation of LCA in the Circular Economy context: methodological issues for application in PET packaging. *Procedia CIRP*, 122, 719-724.
- Creadore, L. T., & Castaldi, M. J. (2023). Quantitative comparison of life cycle assessments of advanced recycling technologies for end-of-life plastics. *Journal of Energy Resources Technology*, 145(4), 042201.
- Dervishaj, A., & Gudmundsson, K. (2024). From LCA to circular design: A comparative study of digital tools for the built environment. *Resources, Conservation and Recycling*, 200, 107291.
- Desole, M. P., Aversa, C., Barletta, M., Gisario, A., & Vosooghnia, A. (2022). Life cycle assessment (LCA) of PET and PLA bottles for the packaging of fresh pasteurised milk: The role of the manufacturing process and the disposal scenario. *Packaging Technology and Science*, 35(2), 135-152.
- Desole, M. P., Gisario, A., Fedele, L., & Barletta, M. (2024). Life Cycle Assessment (LCA) and Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) of eco-friendly packaging for dairy products and fourth range. *Procedia CIRP*, 122, 927-932.

- Gerassimidou, S., Lovat, E., Ebner, N., You, W., Giakoumis, T., Martin, O. V., & Iacovidou, E. (2022). Unpacking the complexity of the UK plastic packaging value chain: A stakeholder perspective. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 657-673.
- Huang, C.-C., & Ma, H.-W. (2004). A multidimensional environmental evaluation of packaging materials. *Science of the Total Environment*, 324(1-3), 161-172.
- Humbert, S., Rossi, V., Margni, M., Joliet, O., & Loerincik, Y. (2009). Life cycle assessment of two baby food packaging alternatives: glass jars vs. plastic pots. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14, 95-106.
- Huysman, S., Debaveye, S., Schaubroeck, T., De Meester, S., Ardente, F., Mathieux, F., & Dewulf, J. (2015). The recyclability benefit rate of closed-loop and open-loop systems: A case study on plastic recycling in Flanders. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, 53-60.
- Jerald, A. L. (2013). Life Cycle Assessment for Food Processing. *indicators*, 6(7), 8.
- Jørgensen, A.-M. M., Ywema, P. E., Frees, N., Exner, S., & Bracke, R. (1996). Transportation in LCA: a comparative evaluation of the importance of transport in four LCAs. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(4), 218-220.
- Knox, A. (2005). An overview of incineration and EFW technology as applied to the management of municipal solid waste (MSW). *ONEIA Energy Subcommittee*.
- Kumari, S., Debbarma, R., Nasrin, N., Khan, T., Taj, S., & Bhuyan, T. (2024). Recent advances in packaging materials for food products. *Food Bioengineering*, 3(2), 236-249.
- Marsh, K., & Bugusu, B. (2007). Food packaging—roles, materials, and environmental issues. *Journal of food science*, 72(3), R39-R55.
- Rasines Elena, L., Castillejo Montoya, N., San Miguel Alfaro, G., & Aguayo Giménez, E. (2023). Can household storage conditions reduce food waste and environmental impact? A broccoli case study.
- Schwarz, A., Lighthart, T., Bizarro, D. G., De Wild, P., Vreugdenhil, B., & van Harmelen, T. (2021). Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach. *Waste management*, 121, 331-342.
- Taneeapanichskul, N., Hailes, H. C., & Miodownik, M. (2025). Using hyperspectral imaging and machine learning to identify food-contaminated compostable and recyclable plastics. *UCL Open Environment*, 7, e3237.



อาจารย์ ดร.ณัชชา รุานีพานิชกุล

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช 9/9 หมู่ 9 ถ.แจ้ง

วัฒนธรรม ต.บางพูด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 1112

E-Mail nutchana.tan@stou.ac.th , โทรศัพท์ : 02 5048191 – 3