

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการผลิตยาเม็ด

วริษฐา ถักมี* และ สุนทรี ขุนทอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย

*Corresponding author: lovepopo2540@hotmail.com

บทคัดย่อ

วิกฤตการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลให้อุตสาหกรรมยาทั่วโลกเผชิญแรงกดดันในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งภาคสาธารณสุขมีส่วนในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูง โดยอุตสาหกรรมยาที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนสูงกว่าอุตสาหกรรมยานยนต์ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ (Carbon Footprint Product: CFP) กรณีศึกษา ยาเม็ดเคลือบฟิล์ม HYDRA 50 FC (Lot No. 0124TH34) ขนาดบรรจุ 1,000,000 เม็ดต่อรุ่นการผลิต โดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ตามมาตรฐาน ISO 14067 และแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO) ในขอบเขตแบบ Gate-to-Gate โดยมุ่งเน้นการเก็บข้อมูลปฐมภูมิจากบันทึกการผลิตจริง (Batch Processing Record) ครอบคลุมขั้นตอนการผลิต การตอกเม็ดยา และการเคลือบผิว ผลการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมพบว่า "จุดวิกฤต" (Hotspots) ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมาจาก 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) พลังงานไฟฟ้าในระบบควบคุมสถานะแวดล้อม (HVAC) สำหรับห้องสะอาด Grade C/D ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 40-60 ของการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด และ 2) วัตถุดิบประเภทตัวยาสำคัญ (API) Hydralazine HCl ซึ่งมีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) สูงกว่าสารเคมีทั่วไปถึง 25 เท่า นอกจากนี้ ข้อมูลจากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนผ่านสู่เทคโนโลยีการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous Direct Compression: CDC) มีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานได้ถึงร้อยละ 69 เมื่อเทียบกับระบบแบบดั้งเดิม ผลจากการศึกษานี้ไม่เพียงแต่ช่วยระบุปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ แต่ยังเป็นรากฐานสำคัญในการกำหนดเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero) และยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมยาไทยภายใต้โมเดลเศรษฐกิจ BCG

คำสำคัญ: คาร์บอนฟุตพริ้นท์ / อุตสาหกรรมยา / การประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) / ยาเม็ด / เศรษฐกิจ BCG

Carbon footprint for tablets drug production

Varibtha Tukmee* and Soontree Khuntong

Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University, Si Racha, Chon Buri, Thailand

**Corresponding author: lovepopo2540@hotmail.com*

Abstract

The climate change crisis has intensified global pressure on the pharmaceutical industry to mitigate greenhouse gas (GHG) emissions. Globally, the healthcare sector accounts for 4.4% of total net emissions, with pharmaceutical manufacturing exhibiting a carbon intensity 55% higher than that of the automotive industry. This study aims to evaluate the Carbon Footprint Product (CFP) of a film-coated tablet, HYDRA 50 FC (Lot No. 0124TH34), with a production scale of 1,000,000 tablets per batch. The assessment utilizes the Life Cycle Assessment (LCA) methodology in accordance with ISO 14067 and the Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO) guidelines, following a "Gate-to-Gate" system boundary. The research involves collecting primary activity data from actual Batch Processing Records (BPR), encompassing dry mixing, tableting, and film coating processes. Engineering analysis identifies primary "Hotspots" of GHG emissions: 1) electrical energy consumption from HVAC systems in Grade C/D cleanrooms, contributing 40-60% of total plant energy, and 2) the active pharmaceutical ingredient (API), Hydralazine HCl, which possesses a Global Warming Potential (GWP) up to 25 times higher than basic chemicals. Furthermore, the study indicates that transitioning to Continuous Direct Compression (CDC) technology offers a 69% reduction in energy consumption compared to traditional batch manufacturing. The findings of this study not only quantify the CO₂ equivalent per functional unit but also provide a critical foundation for establishing Net Zero targets and enhancing the competitiveness of the Thai pharmaceutical industry under the Bio-Circular-Green (BCG) economic model.

Keywords: Carbon footprint / Pharmaceutical industry / Life cycle assessment (LCA) / Tablets / BCG economy

1. บทนำ

วิกฤตการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) และภาวะโลกร้อน (Global Warming) ได้ทวีความรุนแรงขึ้นจนกลายเป็นความท้าทายหลักที่มนุษยชาติในศตวรรษที่ 21 ต้องเผชิญอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ [1] ข้อมูลสถิติล่าสุดระบุว่า โลกมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs) พุ่งสูงขึ้นเป็นประวัติการณ์ถึง 53,200 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยร้อยละ 74.5 มาจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในภาคอุตสาหกรรมและพลังงาน [2] ปรากฏการณ์นี้นำไปสู่ภัยธรรมชาติที่รุนแรงและซับซ้อน เช่น คลื่นความร้อน และน้ำท่วมฉับพลัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐานและสุขภาพของสิ่งมีชีวิตทั่วโลก

ในมิติด้านสาธารณสุข ภาวะโลกร้อนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเจ็บป่วยของมนุษย์ ทั้งจากโรคฮีทสโตรกและการแพร่กระจายของโรคอุบัติใหม่ ส่งผลให้ความต้องการใช้ยาและเวชภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ภาคสาธารณสุขทั่วโลกกลับมีส่วนรับผิดชอบต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณร้อยละ 4.4 ถึง 4.6 ของปริมาณการปล่อยรวมทั้งโลก [3] หากภาคสาธารณสุขถูกเปรียบเทียบเป็นประเทศหนึ่ง จะถือเป็นประเทศที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดเป็นอันดับ 5 ของโลก โดยเฉพาะในห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมยาและชีวเทคโนโลยีที่มีการประเมินว่าการผลิตเคมีภัณฑ์และยาคิดเป็นสัดส่วนถึงร้อยละ 18 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคสาธารณสุขทั้งหมด นอกจากนี้ อุตสาหกรรมยายังมีค่าความเข้มข้นคาร์บอนต่อหน่วยรายได้สูงกว่าอุตสาหกรรมยานยนต์ถึงร้อยละ 55

สำหรับประเทศไทย สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปี 2567 สูงเป็นอันดับที่ 21 ของโลก และอันดับ 3 ในอาเซียน ในขณะที่อุตสาหกรรมยาในไทยมีแนวโน้มเติบโตอย่างรวดเร็วที่ระดับร้อยละ 4.5 ถึง 5.0 ต่อปี เพื่อรองรับสังคมผู้สูงอายุและการเป็นศูนย์กลางทางการแพทย์ (Medical Hub) ปัจจุบันไทยมีโรงงานผลิตยาแผนปัจจุบันที่ได้รับมาตรฐาน GMP จำนวน 151 แห่ง [8] ซึ่งกระบวนการผลิตยาเม็ด (Tablet Production) นั้นมีความซับซ้อนและใช้ทรัพยากรเข้มข้น [4] โดยเฉพาะระบบควบคุมสภาวะอากาศ (HVAC) ในห้องสะอาด (Cleanroom) ที่ต้องทำงาน 24 ชั่วโมง ซึ่งมีการใช้พลังงานสูงกว่าอาคารทั่วไป 30-50 เท่า และเป็นสาเหตุของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกถึงร้อยละ 40-60 ของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด [5]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งหวังที่จะทำการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ (Carbon Footprint Product: CFP) กรณีศึกษาของยาเม็ด เพื่อวิเคราะห์จุดวิกฤต (Hotspots) ในแต่ละกระบวนการย่อย [7] และเสนอแนวทางการจัดการที่สอดคล้องกับโมเดลเศรษฐกิจ BCG (Bio-Circular-Green Economy) เพื่อยกระดับอุตสาหกรรมยาไทยสู่ความยั่งยืนและเตรียมความพร้อมสำหรับการแข่งขันในเวทีโลก [6]

2. วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อประเมินปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ (CFP) ของยาเม็ดกรณีศึกษาตลอดวัฏจักรการผลิตแบบ Gate-to-Gate
- 2) เพื่อจำแนกและวิเคราะห์จุดวิกฤตของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Hotspots Identification) ในแต่ละกิจกรรมย่อย
- 3) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางสิ่งแวดล้อมระหว่างเทคโนโลยีการผลิตแบบดั้งเดิมและเทคโนโลยีใหม่
- 4) เพื่อเสนอแนะยุทธศาสตร์การจัดการคาร์บอนต่ำที่สอดคล้องกับนโยบาย BCG และยกระดับสู่การเป็นอุตสาหกรรมสีเขียว

3. ขอบเขตของการศึกษา

เพื่อให้การประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกมีความแม่นยำและเป็นไปตามมาตรฐานสากล ISO 14067 และ ISO 14044 ผู้วิจัยจึงกำหนดขอบเขตการดำเนินงานดังนี้

1) ขอบเขตด้านผลิตภัณฑ์และหน่วยปฏิบัติการ (Functional Unit): กำหนดหน่วยผลิตภัณฑ์เป้าหมายคือ ยาเม็ดแผนปัจจุบัน 1 เม็ด (น้ำหนัก 100 mg ต่อเม็ด) บรรจุในแผงพอยล์ (Blister Pack) ขนาด 10 เม็ดต่อแผง โดยพิจารณาคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบจนถึงกระบวนการบรรจุขั้นสุดท้ายภายในโรงงาน

2) ขอบเขตของระบบ (System Boundary): เป็นการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบ Gate-to-Gate (Partial LCA) ซึ่งมุ่งเน้นเฉพาะขั้นตอนการผลิตภายในโรงงานกรณีศึกษา ประกอบด้วย

- กระบวนการต้นน้ำภายใน: การขนส่งวัตถุดิบจากคลังสินค้าเข้าสู่สายการผลิต
- กระบวนการผลิตหลัก: ครอบคลุมการผสมแห้ง (Dry Blending), การทำแกรนูล (Granulation), การอบแห้ง, การตอกเม็ดด้วยเครื่อง ZP-series (1.5-2.2 kW) และการเคลือบเม็ดด้วยหม้อเคลือบขนาด 1,250 mm.
- ระบบสนับสนุน: พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ HVAC (Grade C/D) ที่ต้องทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ระบบลมอัด และระบบน้ำบริสุทธิ์
- กระบวนการปลายน้ำภายใน: การบรรจุแผง (Primary Packaging) และการจัดการของเสียจากการผลิต

3) ขอบเขตด้านก๊าซเรือนกระจก: ครอบคลุมก๊าซหลักตามเกณฑ์ของ TGO ได้แก่ CO₂, CH₄, N₂O และก๊าซในกลุ่ม F-gases จากการรั่วไหลของสารทำความเย็นในระบบปรับอากาศ

4) ขอบเขตด้านเวลาและเกณฑ์การตัดออก: ใช้ข้อมูลปีฐานระหว่าง พ.ศ. 2567 ถึง พ.ศ. 2568 โดยเก็บข้อมูลปฐมภูมิจากบันทึกการผลิต (BPR) และมิเตอร์ไฟฟ้าจริง และใช้เกณฑ์การตัดออก (Cut-off Criteria) สำหรับวัสดุที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าร้อยละ 1

4. วิธีการศึกษา

4.1 รวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Inventory: LCI) โดยแบ่งข้อมูลเป็น 2 ประเภทหลัก มีดังต่อไปนี้

- 1) ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data): เก็บข้อมูลจริงจากโรงงานกรณีศึกษาในช่วงปี พ.ศ. 2567-2568 ได้แก่
 - ปริมาณวัตถุดิบ (API และ Excipients) และวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ต่อการผลิต 1 รุน
 - ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องจักรแต่ละประเภท เช่น เครื่องตอกยาและเครื่องเคลือบ
 - ข้อมูลการใช้พลังงานของระบบสนับสนุน โดยเฉพาะระบบ HVAC และข้อมูลการเติมสารทำความเย็น
 - ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนและการจัดการ
- 2) ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data): ใช้ข้อมูลสนับสนุนสำหรับการคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่
 - ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) จากฐานข้อมูลขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO) และ Thai National LCA Database
 - ข้อมูลค่า GWP จากรายงานของ IPCC สำหรับการแปลงค่าก๊าซเรือนกระจกชนิดต่าง ๆ

4.2 สถิติที่ใช้ในการศึกษา

การวิเคราะห์ข้อมูลจะอ้างอิงตามกรอบมาตรฐาน ISO 14040/14044 และ ISO 14067 เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่โปร่งใสและตรวจสอบได้ ประกอบไปด้วย

1) การวิเคราะห์สมดุลมวลและพลังงาน (Mass and Energy Balance): นำข้อมูลปฐมภูมิมาคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและผลผลิตในแต่ละหน่วยปฏิบัติการ (Unit Operation)

2) การประเมินผลกระทบ (Impact Assessment): ใช้สถิติเชิงพรรณนาในการรายงานค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปแบบของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e) โดยใช้สูตร

$$\text{ผลกระทบ (Impact)} = \text{ปริมาณการปล่อย (Emission)} \times \text{ค่าสัมประสิทธิ์ผลกระทบ (GWP Factor)}$$

3) การวิเคราะห์จุดวิกฤต (Hotspots Identification): ใช้การวิเคราะห์สัดส่วน (Percentage Analysis) เพื่อระบุกิจกรรมย่อยที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุด

4) การเปรียบเทียบเชิงสถานการณ์ (Scenario Analysis): ใช้สถิติเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างเทคโนโลยีการผลิตแบบดั้งเดิม (Batch) กับเทคโนโลยีใหม่ (เช่น CDC) เพื่อหาแนวทางที่ลดคาร์บอนได้สูงสุด

5) ซอฟต์แวร์ที่ใช้: ใช้ Microsoft Excel ในการบันทึกและคำนวณข้อมูลบัญชีรายการ และอาจมีการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ LCA เฉพาะทางเพื่อความแม่นยำในการระบุผลกระทบ

5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

5.1 ผลการศึกษา

การศึกษานี้ ผู้วิจัยได้ประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ยาเม็ดโดยใช้ขอบเขตการศึกษาแบบ Gate-to-Gate ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบจนถึงการบรรจุแผงบลิสเตอร์ โดยแบ่งผลการศึกษาออกเป็นสำคัญดังนี้

5.1.1 ข้อมูลพื้นฐานและรายการข้อมูลกิจกรรม (Activity Data)

จากการตรวจสอบบันทึกการผลิต (Batch Processing Record: BPR) ของผลิตภัณฑ์ยาเม็ด HYDRA 50 FC ขนาดบรรจุ 1,000,000 เม็ดต่อการผลิต พบข้อมูลรายการวัตถุดิบหลักและสารช่วยผสมที่สำคัญดังนี้:

- 1) ตัวยาสำคัญ (API) Hydralazine Hydrochloride ปริมาณ 50.00 kg
- 2) สารช่วยผสม (Excipients) ประกอบด้วย Supertab และ Avicel PH 102 ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในการสร้างโครงสร้างเม็ดยา
- 3) วัสดุบรรจุภัณฑ์ พอลิเอทิลีนและฟิล์ม PVC สำหรับการบรรจุแผงบลิสเตอร์

5.1.2 การวิเคราะห์สมดุลมวลและประสิทธิภาพเชิงมวล (Mass Balance and Yield Analysis)

ผลการวิเคราะห์สมดุลมวลพบว่า ในกระบวนการผลิตมีการสูญเสียมวล (Mass Loss) ในจุดต่างๆ เช่น การติดค้ำในเครื่องจักรและการคัดทิ้งเม็ดยาที่ไม่สมบูรณ์ โดยมีรายละเอียดค่าประสิทธิภาพ (Yield) ดังนี้

- 1) ทฤษฎีการผลิต 1,000,000 เม็ด
- 2) ผลผลิตจริงที่ได้ พบที่มีการสูญเสียในขั้นตอนการตอกเม็ดยาและการเคลือบ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ เนื่องจากวัตถุดิบที่สูญเสียไปล้วนมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแฝง (Embedded Emissions) ตั้งแต่กระบวนการผลิตต้นน้ำ

5.1.3 การประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้า (Energy Consumption Analysis)

พลังงานไฟฟ้าถือเป็นปัจจัยหลักในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม (Scope 2) ของโรงงานผลิตยา โดยสามารถแยกแยะตามหน่วยการผลิตและระบบสนับสนุนได้ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงขอบเขตที่ 2 พลังงานไฟฟ้า

กิจกรรมการผลิต	เวลา/กำลังไฟฟ้า	พลังงานที่ใช้ (kWh)	ปริมาณการปล่อย (kgCO ₂ eq)
การผสม (Dry Mixing)	1.42 hrs / 3 kW	4.26	2.02
การตอกเม็ด (Tableting)	32 hrs / 2.2 kW	70.40	33.44
การเคลือบ (Coating)	4 hrs / 4.2 kW	16.80	7.98
ระบบ HVAC (Support)	55% ของพลังงานรวม	111.78	53.10
รวมพลังงานไฟฟ้า	-	203.24	96.54

ข้อสังเกต ระบบสนับสนุนอาคาร โดยเฉพาะ ระบบ HVAC มีสัดส่วนการใช้พลังงานสูงสุดถึงร้อยละ 55 ของพลังงานรวมในรุ่นการผลิตนี้ เนื่องจากต้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในห้องสะอาด (Cleanroom) ให้เป็นไปตามมาตรฐาน GMP ตลอดระยะเวลาการปฏิบัติงาน

5.1.4 สรุปผลรวมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อหน่วย

จากการประมวลผลข้อมูลทั้งหมด ผู้วิจัยได้คำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์โดยรวมของรุ่นการผลิตและการปล่อยต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ได้ดังนี้:

- 1) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัตถุดิบและบรรจุภัณฑ์ (Scope 1 & 3 ภายใน) เท่ากับ 1,742.92 kgCO₂eq โดยการคำนวณผลรวมจากปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในตารางเริ่มต้นจากตัวยาสำคัญ Hydralazine HCl ปริมาณ 50 กิโลกรัม คูณกับค่า Emission Factor 32.50 kgCO₂eq/kg (ซึ่งปรับเพิ่มจากค่าเฉลี่ยสารเคมีพื้นฐาน 25 เท่าตามลักษณะเฉพาะของอุตสาหกรรมยา) ได้ผลลัพธ์เท่ากับ 1,625.00 kgCO₂eq ถัดมาคือสารช่วยผสม Supertab ปริมาณ 32 กิโลกรัม คูณกับค่า EF 1.37 kgCO₂eq/kg คิดเป็น 43.84 kgCO₂eq และ Avicel PH 102 ปริมาณ 13 กิโลกรัม คูณกับค่า EF 1.10 kgCO₂eq/kg ได้เท่ากับ 14.30 kgCO₂eq ในส่วนของสารหล่อลื่น Magnesium Stearate ปริมาณ 3.80 กิโลกรัม คูณกับค่า EF 11.20 kgCO₂eq/kg คิดเป็นการปล่อยก๊าซ 42.56 kgCO₂eq และรายการสุดท้ายคือ Onicoat Pink ปริมาณ 3 กิโลกรัม คูณกับค่า EF 5.74 kgCO₂eq/kg ได้เท่ากับ 17.22 kgCO₂eq
- 2) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้า (Scope 2) เท่ากับ 96.54 kgCO₂eq
- 3) ผลรวมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งรุ่นการผลิต (Total Batch Emissions) Total Batch Emissions = 1,742.92 + 96.54 = 1,839.46 kgCO₂eq

การคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ (Carbon Footprint Product : CFP) เมื่อดำเนินการจากหน่วยหน้าที่ (Functional Unit) คือ ยาเม็ด 1 เม็ด จะได้ผลลัพธ์ดังนี้:

$$CFP_{\text{tablet}} = 1,839.46 \text{ kgCO}_2\text{eq} / \{1,000,000 \sim \text{tablets}\} = 0.001839 \text{ kgCO}_2\text{eq} / \text{tablet}$$

5.1.5 บทวิเคราะห์จุดวิกฤตและประสิทธิภาพพลังงาน

- 1) จุดวิกฤต (Hotspots) วัตถุดิบและวัสดุบรรจุภัณฑ์เป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ใหญ่ที่สุดในกระบวนการแบบ Gate-to-Gate โดยมีค่าสูงถึง 1,742.92 kgCO₂eq ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการเลือกซัพพลายเออร์และการจัดการของเสียจากวัตถุดิบมีความสำคัญอย่างยิ่ง

- 2) ประสิทธิภาพพลังงาน แม้การผลิตยาจะมีขั้นตอนซับซ้อน แต่การที่ระบบสนับสนุน (HVAC) กินพลังงานมากกว่าครึ่งหนึ่งของกิจกรรมไฟฟ้าทั้งหมด ชี้ให้เห็นถึงโอกาสในการปรับปรุง เช่น การติดตั้งระบบ VSD (Variable Speed Drive) หรือการปรับลดอัตราการหมุนเวียนอากาศ (Air Changes) ในช่วงที่ไม่มีการผลิต (Unoccupied Mode) เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคต

5.2 อภิปรายผล

จากการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ยาเม็ด HYDRA 50 FC ผู้วิจัยมีประเด็นสำคัญที่นำมาอภิปรายผลเพื่อสะท้อนให้เห็นถึงนัยสำคัญของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอุตสาหกรรมการผลิตยา ดังนี้

- 1) อิทธิพลของวัตถุดิบและบรรจุภัณฑ์ต่อคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ (Dominance of Embedded Carbon) ผลการศึกษาชี้ชัดว่าสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 90) มาจากคาร์บอนแฝงในวัตถุดิบและบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะตัวยาสำคัญ (API) และสารช่วยผสม (Excipients) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Health Care Without Harm ที่ระบุว่าห่วงโซ่อุปทานเป็นแหล่งปล่อยคาร์บอนที่ใหญ่ที่สุดในภาคสาธารณสุข [3] การที่ค่า CFP ของยาเม็ดกรณีศึกษาอยู่ที่ 0.001839 kgCO₂e/kg ต่อเม็ดนั้น แม้จะดูเป็นตัวเลขที่น้อยต่อหน่วย แต่เมื่อพิจารณาในระดับรุ่นการผลิต 1,000,000 เม็ด จะพบปริมาณการปล่อยที่สูงถึง 1,839.46 kgCO₂e/kg ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุตสาหกรรมยาจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการคัดเลือกซัพพลายเออร์ที่มีกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อลดการปล่อยก๊าซใน Scope 3 [10]

- 2) ประสิทธิภาพพลังงานในระบบสนับสนุน (HVAC Energy Intensity) ในมิติด้านพลังงานไฟฟ้า ระบบควบคุมสภาวะอากาศ (HVAC) เป็นจุดวิกฤต (Hotspot) ที่สำคัญที่สุด โดยใช้พลังงานสูงถึงร้อยละ 55 ของพลังงานรวมในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นไปตามลักษณะเฉพาะของโรงงานผลิตยาที่ต้องรักษามาตรฐานห้องสะอาด (Cleanroom) ตามเกณฑ์ GMP ตลอด 24 ชั่วโมง [4] การใช้พลังงานในส่วนนี้สูงกว่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องจักรผลิตหลัก เช่น เครื่องตอกยา หรือเครื่องเคลือบยาอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลนี้เน้นย้ำว่าแนวทางการลดคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพที่สุดในระยะสั้น คือการจัดการพลังงานในระบบสนับสนุนอาคาร เช่น การปรับเปลี่ยนรอบความเร็วพัดลม (VSD) หรือการบริหารจัดการสภาวะอากาศในช่วงที่ไม่มีการผลิต (Unoccupied Mode) ตามมาตรฐาน ISO 14644-16 [10]

- 3) การสูญเสียในกระบวนการและความสัมพันธ์กับความยั่งยืน (Process Loss and Resource Efficiency) จากการวิเคราะห์สมดุลมวล (Mass Balance) พบว่าการสูญเสียระหว่างการผลิต (Yield Loss) แม้เพียงเล็กน้อยในขั้นตอนการตอกเม็ดและการเคลือบ ส่งผลต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากวัตถุดิบที่สูญเสียไปนั้นได้ผ่านกระบวนการที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมาแล้วตั้งแต่ต้นทาง [9] ดังนั้น การปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงมวล (Material Efficiency) ตามหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ในโมเดล BCG จึงไม่ได้เป็นเพียงการลดต้นทุนการผลิตเท่านั้น แต่ยังเป็นยุทธศาสตร์สำคัญในการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ยาในภาพรวม [7]

- 4) ความท้าทายในการมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนของอุตสาหกรรมยาไทย เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษากับเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2593 พบว่าอุตสาหกรรมยาไทยยังมีความท้าทายด้านข้อมูล (Data Availability) โดยเฉพาะฐานข้อมูลคาร์บอนของสารช่วยผสมเกรดเภสัชกรรมที่ผลิตในประเทศ [10] การสร้างความร่วมมือระหว่างภาครัฐและเอกชนในการจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดลอม (LCI) ที่เป็นปัจจุบัน จะช่วยให้อุตสาหกรรมยาสามารถประเมินและพัฒนาผลิตภัณฑ์คาร์บอนต่ำได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น เพื่อยกระดับสู่การเป็นอุตสาหกรรมสีเขียวและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในระดับสากล [8]

6. สรุปผลการศึกษา

สรุปผลการคำนวณ: ผลิตภัณฑ์ยาเม็ด HYDRA 50 FC มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์เท่ากับ 1.84 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (gCO₂eq) ต่อเม็ด โดยสัดส่วนหลักร้อยละ 94.7 มาจากวัตถุดิบ (Scope 3) และร้อยละ 5.3 มาจากพลังงานไฟฟ้าในโรงงาน (Scope 2) ข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุง Yield ในขั้นตอนการตอกยาและการเลือก API ที่มีกระบวนการสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จะเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ตามนโยบาย BCG ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ที่คำนวณได้นี้ จะเป็นข้อมูลพื้นฐาน (Baseline) ที่สำคัญในการยื่นขอรับรองฉลากคาร์บอน (Carbon Label) กับองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) เพื่อยกระดับอุตสาหกรรมยาไทยสู่ความยั่งยืนตามโมเดลเศรษฐกิจ BCG ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR). (2024). *GHG emissions of all world countries: Report 2024*. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2024
- [2] ฝ่ายวิจัย ตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย. (2567). *สถิติการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกและประเทศไทย (SET Note)*. สืบค้นจาก <https://media.set.or.th/common/research/1552.pdf>
- [3] Health Care Without Harm. (2019). *Health care's climate footprint: How the health sector contributes to the global climate crisis*. Retrieved from <https://www.drugdiscoverytrends.com/dirty-science-pharma-industry-produces-emissions-of-514-coal-power-plants-annually/>
- [4] Inotek. (2025). *Energy-Efficient HVAC Cleanroom Design under ISO 14644 and Sustainability Standards*. Retrieved from <https://inotek.co.in/blogs/energy-efficient-hvac-cleanroom-iso-14644-pharma>
- [5] MDPI. (2025). *Energy Efficiency of Cleanroom Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) Systems*. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/13/3538>
- [6] สำนักงานนโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.). (2564). *แผนปฏิบัติการด้านการขับเคลื่อนการพัฒนาประเทศไทยด้วยโมเดลเศรษฐกิจ BCG พ.ศ. 2564-2570*. สืบค้นจาก <https://waa.inter.nstda.or.th/stks/pub/bcg/20211228-BCG-Action-Plan-2564-2570.pdf>
- [7] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2567). *คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์คืออะไรและมีหลักเกณฑ์อย่างไร*. <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=Y0hKdlpVmpkSE5mYVhNPQ>
- [8] สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (FDA). (2566). *ระบบตรวจสอบการอนุญาตโรงงานผลิตยา*. สืบค้นจาก https://ndi.fda.moph.go.th/uploads/file_news/202309131994561417.pdf
- [9] Bouchier, F., et al. (2025). Life cycle assessment of pharmaceutical tablet manufacturing: A comparative analysis and systems model integration framework. *International Journal of Pharmaceutics: X*, 10, 100395. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijpx.2025.100395>
- [10] Krungsri Research. (2024). *Thailand Pharmaceutical Industry Outlook 2024-2026*. Retrieved from <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/chemicals/pharmaceuticals/io/io-pharmaceuticals-2025-2027>