

Health and Environmental Impact Assessment Using Life Cycle Assessment of Biomass Fuel and Liquefied Petroleum Gas Usage in Khao Lam Production Processes in Chon Buri Province

Siwapa Sirijamorn¹, Rutaichanok Poopuang² Sunutcha Phopongsin³ Taddao Pahasup-anan⁴
Rotruedee Chotigawin^{5*}

1 Plan and Policy Annalist, Office of the Permanent Secretary, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation.

2 Sanitation Technical Officer, Saensuk Municipality.

3 Lecturer, School of Health Science, Sukhothai Thammathirat Open University

4 Lecturer, Faculty of Public Health, Burapha University.

5 Assistant Professor, Faculty of Public Health, Burapha University

*Corresponding author: e-mail : rotruedee@go.buu.ac.th.

Original article

OPEN ACCESS

Citation: Sirijamorn, S. ., Poopuang, R. ., Phopongsin, S., Pahasup-anan, T. ., & Chotigawin, R. (2026). Health and Environmental Impact Assessment Using Life Cycle Assessment of Biomass Fuel and Liquefied Petroleum Gas Usage in Khao Lam Production Processes in Chon Buri Province. *Public Health Policy and Laws Journal*, 12(1), 155–171. retrieved from https://so05.tci-thaijo.org/index.php/journal_law/article/view/286280

Received: 9 January 2026

Revised: 25 January 2026

Accepted: 27 January 2026.

Abstract

Biomass-based Khao Lam production significantly impacts health and the environment. This study compared biomass fuel versus Liquefied Petroleum Gas (LPG) in Saensuk, Chon Buri, integrating health risk assessment and Life Cycle Assessment (LCA). Using mixed-methods, including on-site PM2.5/PM10 measurements and ISO 14040/14044-compliant analysis via OpenLCA, the research evaluated four dimensions: human health, ecosystems, resources, and climate change.

The results indicated that biomass combustion emitted PM10 concentrations as high as $166.86 \pm 11.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$, exceeding those from LPG ($97.51 \pm 10.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and surpassing ambient air quality standards by 39.05%. The global warming potential associated with biomass fuel was 4.3 times higher than that of LPG (216.415 vs. 49.6 kg CO₂ eq). In terms of health impacts, biomass use resulted in a total disability-adjusted life year (DALY) loss of 2.87×10^{-4} DALYs, which was 5.2 times greater than that attributable to LPG. Regarding particle size distribution, biomass combustion primarily produced coarse particles, whereas LPG combustion generated a higher proportion of ultrafine particles smaller than $0.43 \mu\text{m}$.

Overall, LPG offers superior performance in both health and environmental dimensions. Nevertheless, socioeconomic constraints remain a key barrier to fuel transition. The findings support policies that promote a transition toward clean energy while safeguarding traditional food knowledge, to enhance community health and foster the sustainability of grassroots economies in tourism-oriented areas.

Keywords: Particulate Matter; Environmental impacts; Health impacts; Life Cycle Assessment

การประเมินผลกระทบด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อมด้วยการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์จากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซปิโตรเลียมเหลวของกระบวนการผลิตข้าวหลามในจังหวัดชลบุรี

ศิวา สิริจามร¹ ฤทัยชนก ภูพวง² สุนัฐชา เผ่าพงษ์ศิลป์³ ทัดดาว พาหาทรัพย์อนันต์⁴ และ รชฤดี โชติกาวิรินทร์⁵*

1 นักวิเคราะห์นโยบายและแผนชำนาญการ สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

2 นักวิชาการสาธารณสุขชำนาญการ เทศบาลเมืองแสนสุข

3 อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

4 อาจารย์ ดร. คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

5 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร., คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* อีเมลติดต่อ rotruede@go.buu.ac.th.

นิพนธ์ต้นฉบับ

วันรับ 9 มกราคม 2569

วันแก้ไข 25 มกราคม 2569

วันตอบรับ 27 มกราคม 2569

บทคัดย่อ

มลพิษทางอากาศจากการผลิตข้าวหลามด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas: LPG) ในการผลิตข้าวหลาม พื้นที่ตำบลแสนสุข จังหวัดชลบุรี โดยประยุกต์ใช้แนวทางบูรณาการระหว่างการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพและการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) วิจัยใช้รูปแบบผสมวิธี (Mixed-methods) ประกอบด้วย การตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นละออง PM_{2.5} และ PM₁₀ ณ จุดผลิต และการวิเคราะห์ LCA ตามมาตรฐาน ISO 14040/14044 ด้วยซอฟต์แวร์ OpenLCA ครอบคลุม 4 มิติ คือ ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ ทรัพยากร และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ผลการศึกษาพบว่า การเผาไหม้ชีวมวลปล่อยฝุ่น PM₁₀ เฉลี่ยสูงกว่า LPG (166.86 ± 11.93 เทียบกับ $97.51 \pm 10.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$) และเกินมาตรฐานคุณภาพอากาศ 39.05% ขณะที่ศักยภาพการก่อภาวะโลกร้อนจากชีวมวลสูงกว่า LPG ถึง 4.3 เท่า (216.415 เทียบกับ $49.6 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$) ด้านผลกระทบต่อสุขภาพ ชีวมวลก่อให้เกิดการสูญเสียสุขภาพรวม 2.87×10^{-4} DALY ซึ่งสูงกว่า LPG ถึง 5.2 เท่า นอกจากนี้ LPG มีสัดส่วนฝุ่นละอองพิษขนาดเล็กกว่า 0.43 ไมครอนสูงกว่า แต่ก่อผลกระทบโดยรวมต่ำกว่า งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า LPG มีประสิทธิภาพดีกว่าในมิติสุขภาพและสิ่งแวดล้อม และสนับสนุนนโยบายการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาด ควบคู่การอนุรักษ์ภูมิปัญญาอาหารพื้นถิ่นเพื่อความยั่งยืนของเศรษฐกิจฐานราก

คำสำคัญ : ฝุ่นละอองขนาดเล็ก; ผลกระทบสิ่งแวดล้อม; ผลกระทบด้านสุขภาพ; การประเมินวัฏจักรชีวิต

บทนำ

มลพิษทางอากาศจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (ชีวมวล ถ่านไม้ และถ่านหิน) เป็นปัจจัยเสี่ยงสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประชากรกว่าร้อยละ 40 ทั่วโลก และเป็นสาเหตุของการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรหลายล้านรายต่อปี การสัมผัสควันพิษจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์มีความเชื่อมโยงโดยตรงกับโรคไม่ติดต่อร้ายแรง (NCDs) ทั้งในระบบทางเดินหายใจและระบบหัวใจและหลอดเลือด นอกจากนี้ฝุ่นละอองขนาดเล็ก ($PM_{2.5}$) ยังส่งผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง ก่อให้เกิดการอักเสบและทำลายเซลล์สมอง (World Health Organization, 2023) โดยเฉพาะกลุ่มเปราะบาง เช่น เด็ก หญิงตั้งครรภ์ และผู้สูงอายุ ที่มักใช้เวลานานในพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของมลพิษสูง (Chitralada School Study, 2025; Shackelford et al., 2025) สถานการณ์นี้รุนแรงในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และประเทศไทย ซึ่งภาคเศรษฐกิจนอกระบบ (Informal economy) ยังพึ่งพิงเชื้อเพลิงชีวมวลโดยขาดการกำกับดูแลด้านอาชีวอนามัยที่เข้มงวด

ในบริบทของประเทศไทย ภาคเศรษฐกิจนอกระบบมีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างเศรษฐกิจและสังคม โดยมีแรงงานมากกว่าครึ่งหนึ่งของประเทศ และเป็นฐานสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจชุมชน (Kongtip et al., 2015) กลุ่มผู้ประกอบการผลิตอาหารพื้นบ้านเป็นหนึ่งในกลไกสำคัญที่สร้างรายได้และดำรงรักษาอัตลักษณ์ทางวัฒนธรรมท้องถิ่น “ข้าวหลาม” นับเป็นตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารพื้นถิ่นที่มีชื่อเสียงของจังหวัดชลบุรี โดยตำบลแสนสุข อำเภอเมือง เป็นแหล่งผลิตหลักที่ขึ้นทะเบียนเป็นผลิตภัณฑ์ OTOP มีผู้ประกอบการ 16 ร้าน ผลิตรวม 12,000-15,000 กระบอก/วัน กระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมอาศัยการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (ฟืน กาบมะพร้าว และเศษไม้ไผ่) เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ได้กลิ่นและรสชาติเฉพาะตัว ปัจจุบันร้อยละ 12.5 ยังคงใช้ชีวมวลเนื่องจากต้นทุนต่ำ (0.80-1.20 บาท/กก.) อย่างไรก็ตาม กระบวนการเผาไหม้ดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองขนาดเล็กและมลพิษทางอากาศอื่นๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพผู้ปฏิบัติงาน คุณภาพอากาศในชุมชน และทัศนวิสัย (Tian et al., 2009) ขณะที่ร้อยละ 75 เปลี่ยนมาใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas: LPG) ซึ่งสามารถลดการปล่อยฝุ่นได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่มีต้นทุนสูงกว่า 15-18 เท่า (18-22 บาท/กก.) และร้านที่ทำการ

เผาข้าวหลามทั้งแบบเผาด้วย LPG และชีวมวล ร้อยละ 12.5 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องประเมินผลกระทบในภาพรวมอย่างรอบด้าน เพื่อหาทางเลือกที่สมดุลระหว่างสุขภาพสิ่งแวดล้อม และความยั่งยืนทางเศรษฐกิจ

การตัดสินใจเชิงนโยบายและการเลือกเทคโนโลยีการผลิตที่ยั่งยืน จำเป็นต้องอาศัยการประเมินภายใต้มุมมองวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ซึ่งเป็นเครื่องมือสากลที่ประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอย่างเป็นระบบ ครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการต้นน้ำจนถึงปลายน้ำ งานวิจัยก่อนหน้านี้ชี้ให้เห็นความซับซ้อนของผลกระทบจากการเลือกใช้เชื้อเพลิง โดย Tonne et al. (2023) รายงานว่า แม้ก๊าซธรรมชาติจะลดผลกระทบด้านสุขภาพ ณ จุดใช้งาน แต่กลับมีการปล่อยก๊าซมีเทนในกระบวนการต้นน้ำ ขณะที่ผลกระทบของชีวมวลขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและกระบวนการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพจากกระบวนการผลิตข้าวหลามในตำบลแสนสุข จังหวัดชลบุรี โดยเปรียบเทียบการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซ LPG ผ่านการประเมินเชิงบูรณาการทั้งด้านปริมาณและการกระจายตัวของฝุ่นละอองขนาดเล็กทางอากาศ รวมถึงการประเมิน LCA ภายใต้กรอบมาตรฐาน ISO 14040/14044 ครอบคลุม 4 มิติ ได้แก่ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ การใช้ทรัพยากร และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยใช้โปรแกรม OpenLCA 2.1.0 ผลการศึกษามุ่งสร้างหลักฐานเชิงประจักษ์เพื่อสนับสนุนการกำหนดนโยบายการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาดที่สมดุลระหว่างการคุ้มครองสุขภาพ การลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม และการส่งเสริมความยั่งยืนของเศรษฐกิจฐานราก สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนด้านสุขภาพ พลังงาน การผลิตที่ยั่งยืน และการรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

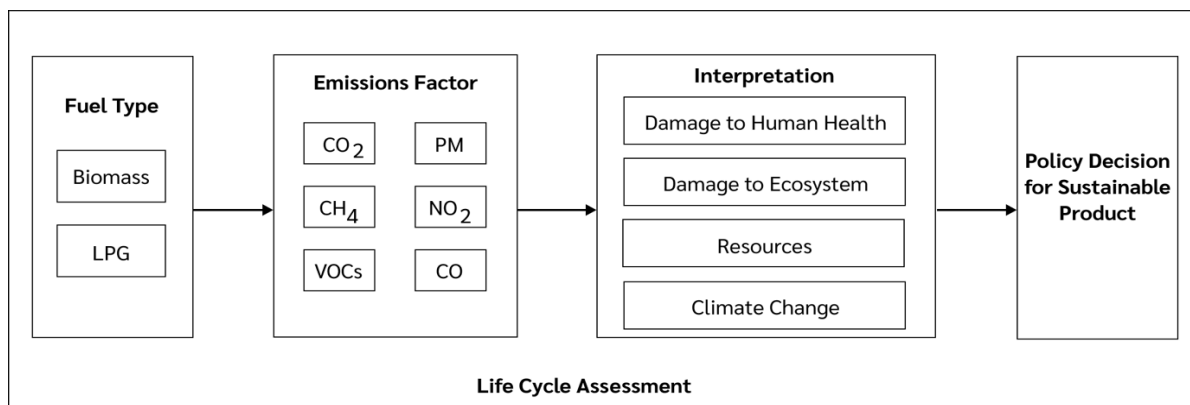
1. เพื่อประเมินปริมาณและการกระจายตัวของมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ที่เกิดจากกระบวนการผลิตข้าวหลามที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซปิโตรเลียมเหลว ในพื้นที่ตำบลแสนสุข จังหวัดชลบุรี

2. เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพภายใต้มุมมองวัฏจักรชีวิตระหว่างกระบวนการผลิตข้าวหลามที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ในพื้นที่ตำบลแสนสุข จังหวัดชลบุรี

กรอบแนวคิดการวิจัย

กรอบแนวคิดในการวิจัยแสดงลำดับความสัมพันธ์เป็นขั้นตอนจากการเลือกชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตข้าวหลาม (เชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซปิโตรเลียมเหลว) ซึ่งมีผลต่อปริมาณและชนิดของมลพิษที่ปล่อย

ออกมา (เช่น CO₂ , PM, CH₄, NO₂, VOCs, CO) จากนั้นนำข้อมูลการปลดปล่อยมลพิษไปประเมินผลกระทบผ่านกระบวนการ Life Cycle Assessment (LCA) ใน 4 มิติ ได้แก่ ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ผลกระทบต่อระบบนิเวศ การใช้ทรัพยากร และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายในการผลิตข้าวหลามที่ยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในจังหวัดชลบุรี ดังภาพ



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

วิธีการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจภาคตัดขวาง (cross-sectional study) เพื่อประเมินความเข้มข้นและการกระจายขนาดของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM) จากกระบวนการเผาข้าวหลามในตำบลแสนสุข จังหวัดชลบุรี โดยประยุกต์ใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ตามมาตรฐาน ISO 14040 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) การวิเคราะห์ครอบคลุมตั้งแต่การจัดหาเชื้อเพลิง การปลดปล่อยมลพิษจนถึงผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายและแนวทางการผลิตที่ยั่งยืนในระดับชุมชน การดำเนินงานแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment: LCA)

1.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and Scope)

ในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and Scope Definition) ของการประเมินวัฏจักรชีวิต จะระบุวัตถุประสงค์หลักของ LCA อย่างชัดเจน เพื่อประเมินสมรรถนะด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการหรือระบบที่ศึกษา พร้อมกำหนดขอบเขตของระบบและช่วงวัฏจักรชีวิตที่พิจารณา โดยครอบคลุมการกำหนดหน่วยหน้าที่ (functional unit) ขอบเขตของระบบ ข้อสมมติฐานข้อจำกัด และขั้นตอนการปันส่วน (allocation procedures) ตามกรอบมาตรฐานสากล (Bora, 2023)

1.2 การวิเคราะห์เพื่อทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Inventory; LCI)

การวิเคราะห์บัญชีรายการวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Inventory: LCI) เป็นขั้นตอนสำคัญของ LCA ที่มุ่งรวบรวมข้อมูลเชิงระบบของปัจจัยนำเข้าและผลผลิตตลอดวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิต โดยครอบคลุมวัตถุดิบ พลังงาน น้ำ ผลิตภัณฑ์ ของเสีย และการปล่อยมลพิษ เพื่อสะท้อนผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในภาพรวมอย่างเป็นองค์รวม (Klöpffer, 2006) การวิเคราะห์ดำเนินการโดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis: MFA) ภายใต้อาณัติหลักสมดุลมวล

เพื่อประเมินทิศทางและปริมาณของวัสดุภายในขอบเขตพื้นที่และเวลาที่กำหนดอย่างเป็นระบบ

1.3 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Impact Assessment; LCIA)

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต ดำเนินการโดยนำข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกของทุกกระบวนการมาคำนวณด้วยโปรแกรม OpenLCA version 2.1.0 โดยประยุกต์ใช้วิธี ReCiPe 2016 v1.1 (Midpoint, Hierarchist) และใช้ค่า normalization factors ระดับโลกสำหรับปีอ้างอิง 2010 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในหมวดต่าง ๆ ได้อย่างเป็นมาตรฐานสากล (Huijbregts et al., 2016) เป็นวิธีการประเมินผลกระทบของวัฏจักรชีวิต สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1) ดังนี้

$$\text{Emission} = \sum (\text{Activity} \times \text{Emission Factor}) \quad (1)$$

โดย Emission คือ ปริมาณมลพิษที่ถูกปล่อยออก

Activity คือ ปริมาณสารที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่างๆ

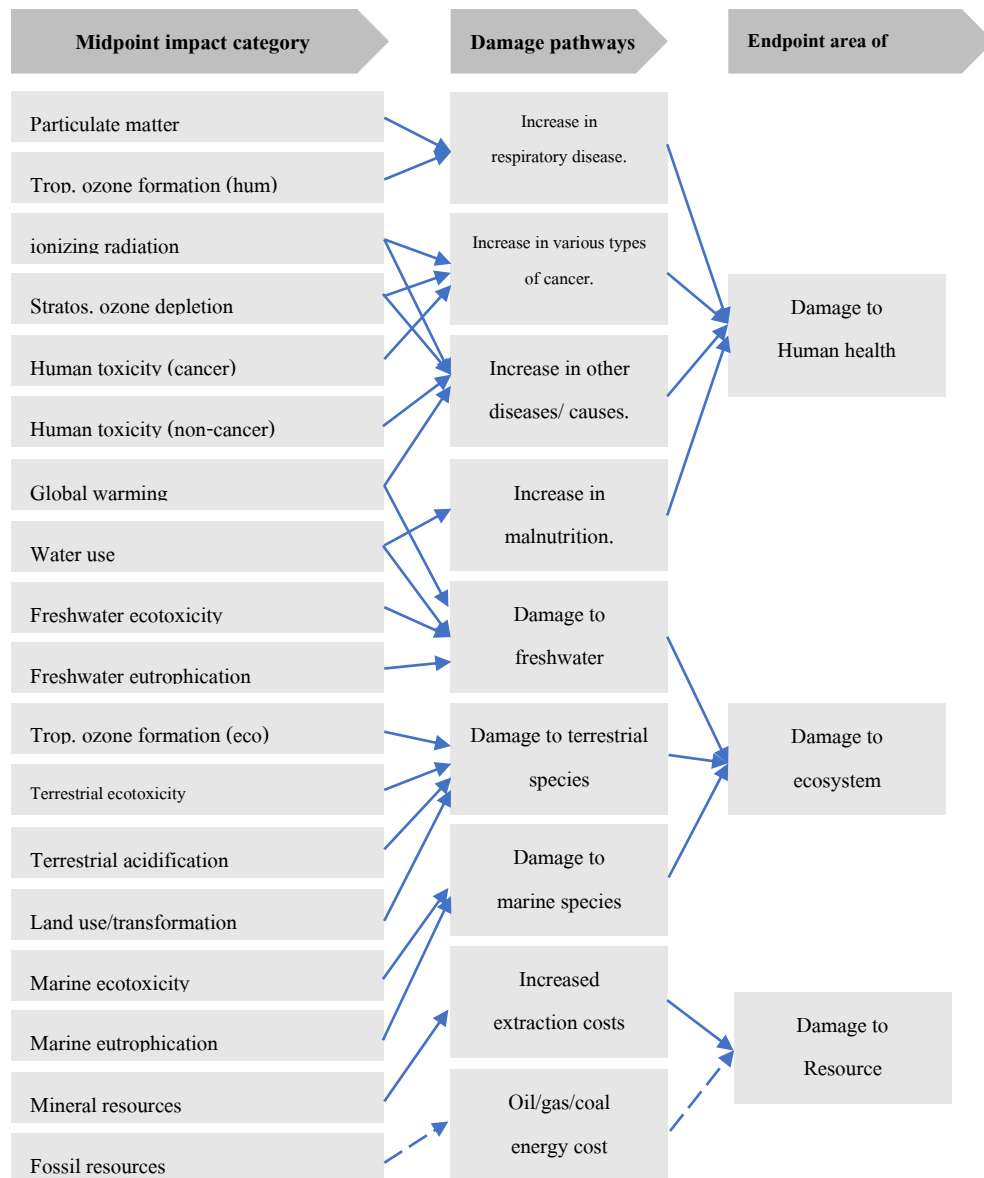
Emission Factor คือ ค่าแฟกเตอร์ของสารต่างๆ

การประเมินผลกระทบเลือกใช้คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (kg CO₂ equivalent) เป็นหน่วยหลักในการแปลง

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ศักยภาพการเกิดผลกระทบช่วยให้สามารถระบุประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญหรือจุดวิกฤตของระบบ (environmental hotspots) ได้อย่างชัดเจนและเป็นระบบ

1.4 การวิเคราะห์และการแปลผล (Interpretation)

การแปลผลการศึกษาเป็นขั้นตอนสุดท้ายของ LCA โดยนำผลจากการวิเคราะห์บัญชีรายการและการประเมินผลกระทบทั้งระดับ midpoint และ endpoint โดยใช้ซอฟต์แวร์ OpenLCA version 2.1.0 และฐานข้อมูล Ecoinvent 3.5 สังเคราะห์เป็นข้อสรุปและข้อเสนอแนะให้สอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา ภายใต้กรอบ ReCiPe 2016 ตามมาตรฐาน ISO 14040 และ ISO 14044 ครอบคลุม 4 มิติ คือ ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ผลกระทบต่อระบบนิเวศ การใช้ทรัพยากร และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ นอกจากนี้ ยังครอบคลุมเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) โดยเฉพาะ SDG 3 (Good Health) SDG 7 (Clean Energy) SDG 12 (Responsible Consumption and Production) และ SDG 13 (Climate Action) ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ภาพรวมของหมวดหมู่ผลกระทบที่ครอบคลุมในวิธีการ ReCiPe2016

ที่มา: Huijbregts et al., 2016

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณและการกระจายตัวของฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาข้าวหลามประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในตำบลแสนสุข จังหวัดชลบุรี (13°18'18.7"N, 100°00'23.0"E) ซึ่งเป็นพื้นที่ชานเมืองชายฝั่งที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินแบบผสมผสานและมีกิจกรรมการเผาข้าวหลามตลอดทั้งปี ประชากรในการศึกษาคือ ร้านผลิตข้าวหลามทั้งหมด 16 ร้านในตำบลแสนสุข (ข้อมูลจากสำนักงานเทศบาลตำบลแสนสุข, 2565)

การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างใช้วิธี purposive sampling โดยคัดเลือกร้านตัวแทน 2 ร้าน ตามเกณฑ์ ต่อไปนี้

- การใช้เชื้อเพลิง: ร้านที่ 1 ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นหลัก และร้านที่ 2 ใช้ LPG เป็นหลัก
- ปริมาณการผลิต: ร้านที่กำลังการผลิตใกล้เคียงค่ามัธยฐานของพื้นที่ (800-1,000 กระบอก/วัน)
- ความยินยอมและความพร้อมของพื้นที่ในการเข้าร่วมวิจัย: เจ้าของร้านให้ความยินยอม มีพื้นที่เหมาะสมและอนุญาตให้ติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพอากาศ

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแอนเดอร์เซนอิมแพคเตอร์ (Andersen Impactor) 8 ชั้น (Non-viable Anderson impactors) จำแนกตามขนาดทั้งหมด 9 ขนาด ได้แก่ 9.1 - 10.0, 5.9 - 9.0, 4.8 - 5.8, 3.4 - 4.7, 2.2 - 3.3, 1.2 - 2.1, 0.66 - 1.1, 0.43 - 0.65 และ <0.43 ไมครอน เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Rotameter) บั้มเก็บตัวอย่างอากาศ (High flow pump) เครื่องปรับเทียบอัตราการไหลของอากาศ (Calibrator) กระดาษกรองใยแก้ว แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium Foil) ตู้ดูดความชื้น (Dessicator) เครื่องชั่งน้ำหนัก งานเพาะเชื้อสำหรับบรรจุกระดาษกรอง เครื่องวัดความชื้น เครื่องวัดความเร็วลม ทำการปรับเทียบอุปกรณ์และเครื่องมือ โดยการปรับเทียบบั้มก่อนเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศแบบ Primary standard โดยมีอัตราการไหล 28.3 ลิตร/นาที่ สำหรับการปรับเทียบเครื่องมือให้ต่อเครื่องมือ เมื่อปรับเทียบเครื่องมือเรียบร้อยแล้วให้เอาเครื่องวัดอัตราการไหลออก แล้วจึงนำไปเก็บตัวอย่างอากาศต่อไป

วิธีเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองดำเนินการเป็นระยะเวลา 7 วัน (30 มีนาคม–9 เมษายน) โดยทำการเก็บชั่วโมง 3 ตำแหน่ง ระหว่างช่วงเวลาที่มีการเผา (04.30–07.30 น. และ 03.00–06.00 น.) ครึ่งละ 3 ชั่วโมง เครื่องเก็บตัวอย่างอากาศติดตั้งตามหลักปฏิบัติมาตรฐาน โดยคำนึงถึงทิศทางลมซึ่งวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลมดิจิทัล (ความแม่นยำ ± 0.1 m/s) วางที่ความสูง 1.5 เมตรจากพื้นดินและห่างจากแหล่งกำเนิด 2 เมตร เพื่อสะท้อนระดับการรับสัมผัสของมนุษย์อย่างเหมาะสม ดังนี้

1. ดำเนินการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นของร้านตัวอย่างเพื่อประกอบการวิเคราะห์ โดยรวบรวมข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมและการดำเนินงาน ได้แก่ ปริมาณวัตถุดิบ ลักษณะพื้นที่เผา ประเภทและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ระยะเวลาและช่วงเวลาการเผา จำนวนครั้งในการเผาต่อวัน และปริมาณข้าวหลามที่ผลิตต่อวัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอย่างเป็นระบบ

2. ระหว่างการเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง มีการตรวจวัดความชื้น อุณหภูมิ และความเร็วลมในอากาศควบคู่กัน พร้อมดำเนินการควบคุมคุณภาพโดยตรวจสอบรอยรั่วและรอยต่อของสายยาง รวมถึงตรวจสอบอัตราการ

ไหลของอากาศ เพื่อให้มั่นใจถึงความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

3 หลังการเก็บตัวอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แผ่นเยื่อกรองและแผ่นรองรับถูกบรรจุในจานเพาะเชื้อพลาสติกและพักในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการดูดซับความชื้น ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักด้วยวิธี กราวิเมตริกเพื่อคำนวณมวลฝุ่นละอองจากบรรยากาศและแยกตามแต่ละชั้นการกักเก็บ

การวิเคราะห์ข้อมูล

การคำนวณความเข้มข้นของฝุ่นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังสมการที่ (2) ปริมาณฝุ่นละอองในหน่วยมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (mg/m^3)

$$= (A - B) / QT \quad (2)$$

เมื่อ A = น้ำหนักแผ่นกรองหลังเก็บตัวอย่าง (mg)

B = น้ำหนักแผ่นกรองก่อนเก็บตัวอย่าง (mg)

Q = อัตราการไหลของอากาศ (m^3/min)

T = เวลาที่เก็บตัวอย่าง (min)

การวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการโดยคำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM_{10}) พร้อมวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาค เพื่อเปรียบเทียบปริมาณและลักษณะฝุ่นละอองระหว่างการเผาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซ รวมถึงช่วงเวลาที่ไม่มีมีการเผา ผลลัพธ์นำเสนอในรูปแบบการเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป พ.ศ. 2535 พร้อมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับฝุ่นละอองกับปัจจัยทางกายภาพ เพื่อประเมินผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

ผลการวิจัย

1. การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment: LCA)

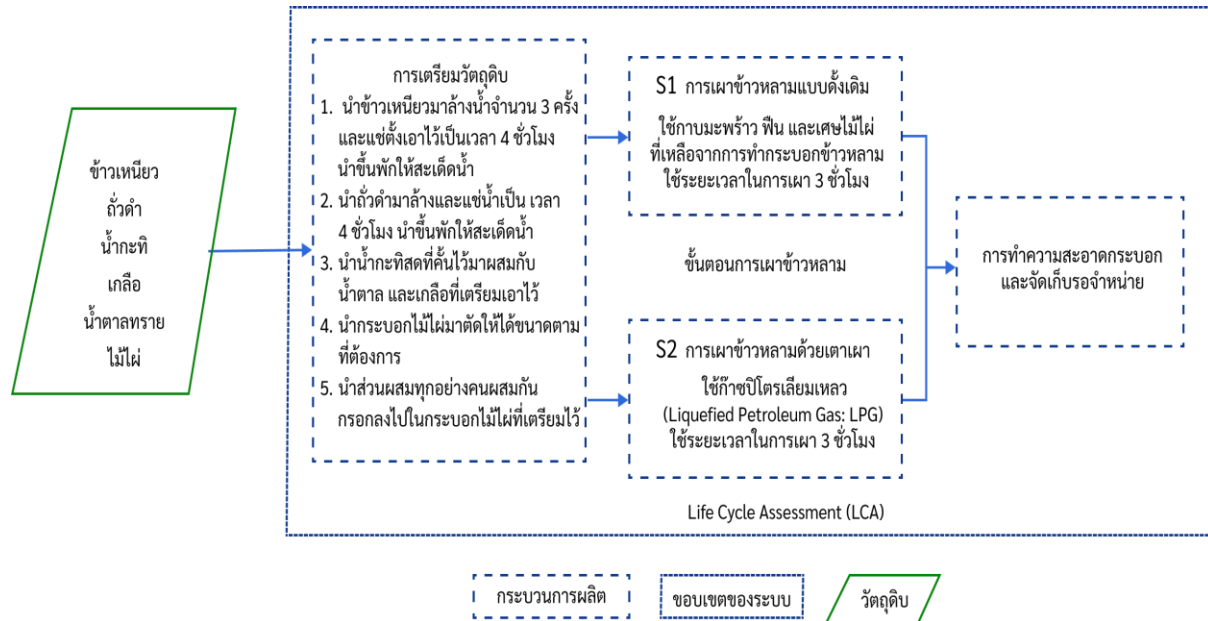
1.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and Scope)

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพจากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ในกระบวนการผลิตข้าวหลาม เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายด้านการผลิตที่ยั่งยืนของผู้ประกอบการในตำบลแสนสุข จังหวัดชลบุรี การประเมินกำหนดขอบเขตระบบแบบ gate-to-gate ครอบคลุมตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบ การเผาด้วย

เชื้อเพลิง การใช้ทรัพยากร การปล่อยมลพิษและการจัดการของเสียภายในสถานที่ผลิต โดยกำหนดหน่วยการทำงานเป็นการผลิตข้าวหลาม 100 กระบอก เพื่อใช้เป็นฐานเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างสถานการณ์การใช้เชื้อเพลิงทั้งสองประเภทภายใต้กรอบสมมติฐานที่กำหนดดังภาพที่ 3

Scenario 1: S1 กระบวนการผลิตข้าวหลามโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวล

Scenario 2: S2 กระบวนการผลิตข้าวหลามโดยใช้เชื้อเพลิง LPG



ภาพที่ 3 ขอบเขตของการศึกษาการประเมิน LCA ของการผลิตข้าวหลาม

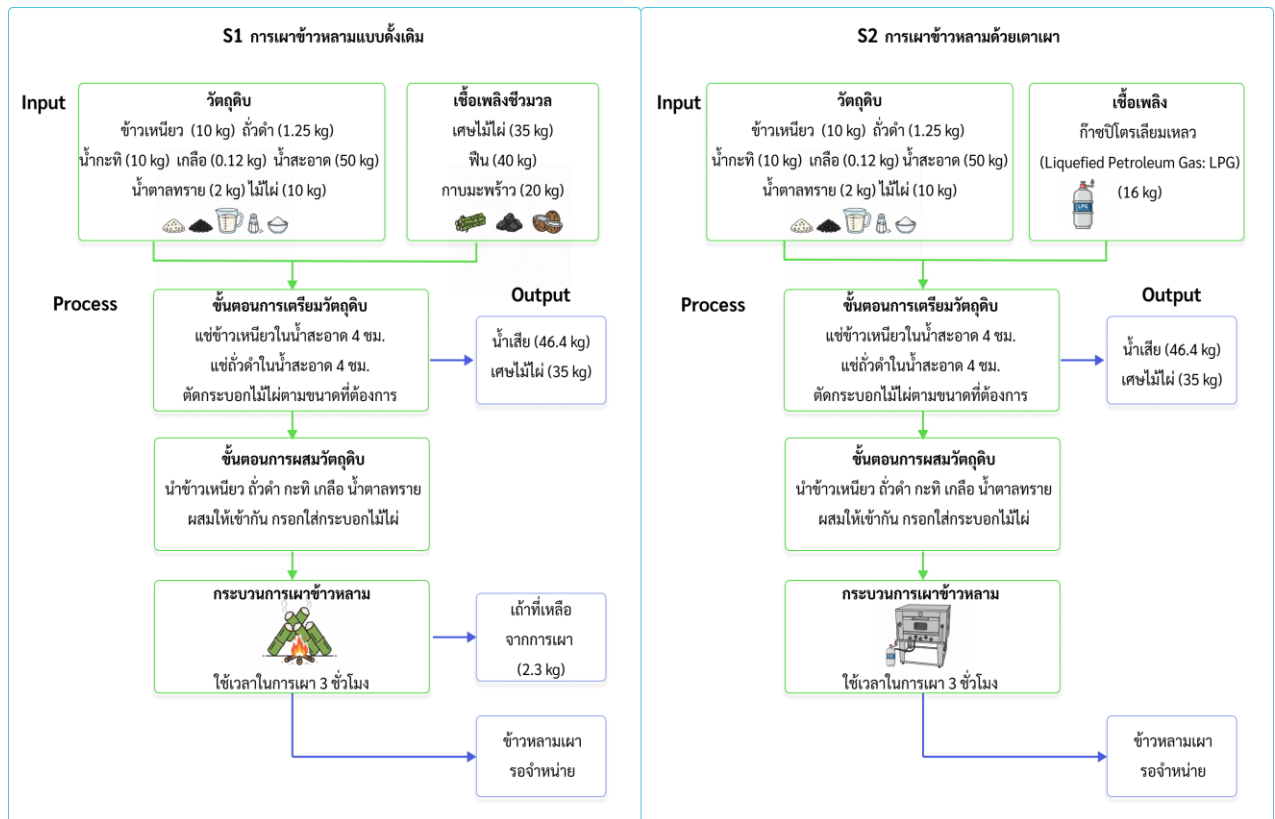
1.2 การวิเคราะห์เพื่อทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Inventory; LCI)

การจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของการผลิตข้าวหลามกำหนดขอบเขตการศึกษาแบบ Gate-to-Gate โดยมุ่งเน้นการเก็บรวบรวมข้อมูลมวลสารและพลังงานขาเข้า-ขาออกในกระบวนการผลิตข้าวหลามสำเร็จรูป จำนวน 100 กระบอก ภายใต้สองสถานการณ์การใช้เชื้อเพลิง ได้แก่ S1: เชื้อเพลิงชีวมวล และ S2: ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG)

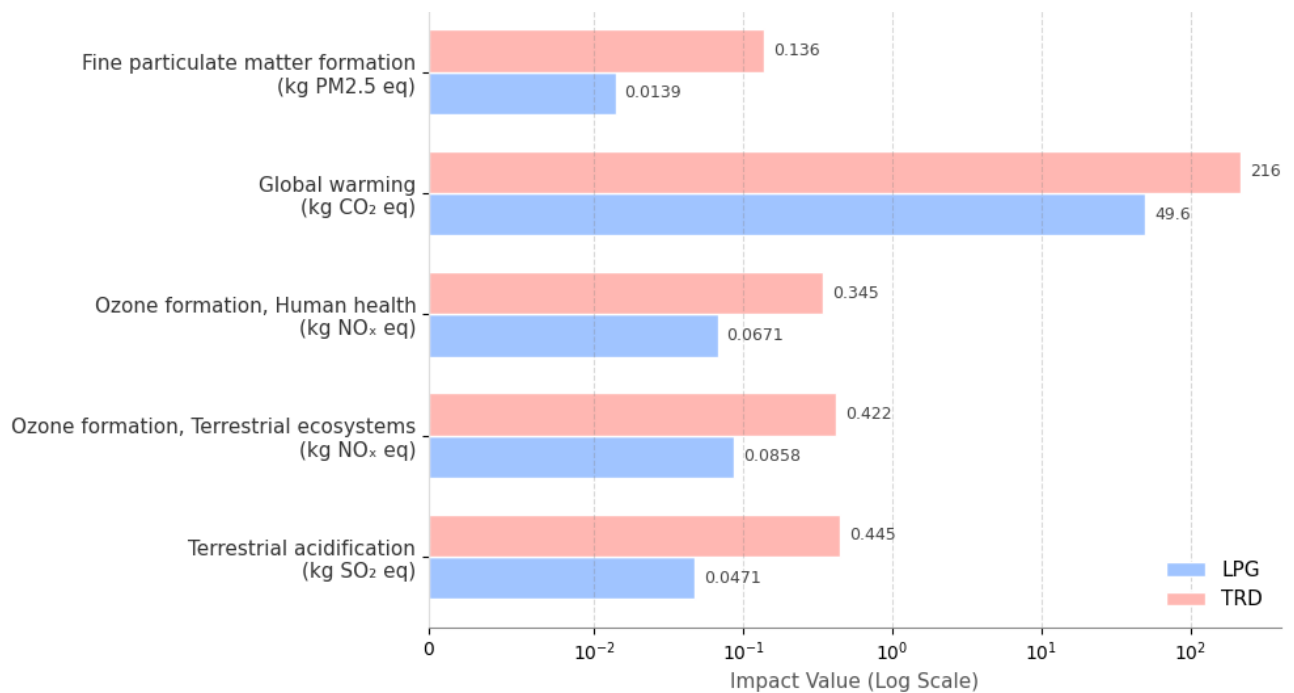
มวลสารขาเข้า (Inputs) ประกอบด้วย ข้าวเหนียว ถั่วดำ กะทิ น้ำตาลทราย น้ำประปา พลังงานไฟฟ้า เชื้อเพลิงหลัก (LPG หรือชีวมวล) และกระบอกไม้ไผ่ มวล

สารขาออก (Outputs) ประกอบด้วย น้ำเสียจากการล้างวัตถุดิบ และของเสียแข็ง ได้แก่ ถัง และเศษไม้ไผ่

ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data) ได้มาจากการลงพื้นที่สำรวจ ณ ร้านข้าวหลาม 2 แห่ง โดยดำเนินการบันทึกปริมาณการใช้วัตถุดิบ พลังงาน และน้ำ รวมถึงชั่งน้ำหนักของเสียตลอดกระบวนการผลิต พร้อมทั้งสัมภาษณ์ผู้ประกอบการในแต่ละขั้นตอน ตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ การเผาข้าวหลาม การบรรจุ จนถึงการจัดการของเสีย ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) ได้มาจากรฐานข้อมูลในโปรแกรม OpenLCA งานวิจัย และเอกสารวิชาการที่เกี่ยวข้อง รูปแบบการเก็บข้อมูล LCI ของการเผาข้าวหลามตาม Scenario S1 และ S2 ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (LCI)



ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบผลกระทบชั้นกลางของการผลิตข้าวหลาม 100 กระบอก โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (TRD) และเชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG)

1.3 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Impact Assessment; LCIA)

การวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตข้าวหอม โดยใช้รูปแบบการประเมินตาม ReCiPe 2016 ในการประเมินผลกระทบชั้นกลางและผลกระทบชั้นปลาย ในรูปแบบการประเมินความเสียหายด้วยโปรแกรม Open LCA 2.0 โดยคำนวณในการผลิตข้าวหอม 1 Function Unit (100 กระบอ) ผลการวิเคราะห์มีดังนี้

1) ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมชั้นกลาง (Mid-point category)

ก. กระบวนการผลิตข้าวหอมโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (S1)

ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตข้าวหอมที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยระเบียบวิธี ReCiPe 2016 Midpoint (H) แสดงให้เห็นว่ากิจกรรมดังกล่าวก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญในหลายหมวด โดยการวิเคราะห์เชิงปริมาณสะท้อนความเชื่อมโยงโดยตรงระหว่างการใช้พลังงานชีวมวลกับการปลดปล่อยมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ดังนี้

- ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) โดยมีค่า Global Warming Potential เท่ากับ 216.415 kg CO₂ eq ซึ่งสะท้อนถึงการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจำนวนมาก อันมีสาเหตุหลักจากการเผาไหม้ชีวมวลในเตาหุงต้มที่มีประสิทธิภาพต่ำ

- มลพิษทางอากาศและผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (Air Pollution and Human Health) กระบวนการผลิตข้าวหอมเกิดการก่อตัวของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Fine particulate matter formation) มีค่าเท่ากับ 0.136 kg PM_{2.5} eq ในขณะที่การก่อตัวของโอโซนที่ส่งผลต่อสุขภาพมนุษย์ (Ozone formation, Human health) มีค่าเท่ากับ 0.344 kg NO_x eq ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าการเผาไหม้ไม้พื้นหรือเศษวัสดุทางการเกษตรในเตาแบบดั้งเดิมเป็นแหล่งกำเนิดอนุภาคแขวนลอยและก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในระดับที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อระบบทางเดินหายใจของประชากรในพื้นที่อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

- ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศและมนุษย์ (Toxicity Levels) ผลการประเมินพบค่า Terrestrial

ecotoxicity สูงถึง 25.611 kg 1,4-DCB ซึ่งเป็นหมวดความเป็นพิษที่มีค่าสูงที่สุด สะท้อนการสะสมของสารมลพิษในดินจากเถ้าถ่านและอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ ขณะที่ความเป็นพิษต่อมนุษย์พบค่า human non-carcinogenic toxicity เท่ากับ 3.444 kg 1,4-DCB และ human carcinogenic toxicity เท่ากับ 0.030 kg 1,4-DCB ซึ่งบ่งชี้ถึงความเสี่ยงสะสมของสารพิษในสิ่งแวดล้อมและห่วงโซ่อาหารรอบสถานประกอบการ

- การสะสมความเป็นกรดและการใช้ทรัพยากร (Acidification and Resource Depletion) การสะสมความเป็นกรดในดิน (Terrestrial acidification) มีค่าเท่ากับ 0.444 kg SO₂ eq ซึ่งเกิดจากการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ชีวมวล

- การบริโภคน้ำและที่ดิน (Water and Land Use) เป็นที่น่าสังเกตว่าค่า Water consumption มีค่าติดลบเท่ากับ -0.203 m³ ซึ่งอาจหมายถึงความสมดุลของน้ำในระบบหรือการหมุนเวียนน้ำกลับสู่ระบบในบางขั้นตอนของวัฏจักรชีวิต เช่น การระเหยของน้ำจากการเผา

ข. กระบวนการผลิตข้าวหอมโดยใช้เชื้อเพลิง LPG (S2)

- ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) มีค่า Global Warming Potential เท่ากับ 49.6 kg CO₂ eq ซึ่งต่ำกว่ากระบวนการที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (216.415 kg CO₂ eq) มากกว่า 4 เท่า ความแตกต่างดังกล่าวสะท้อนถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงและค่าความร้อนที่สม่ำเสมอของเตาก๊าซ ซึ่งช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยผลิตได้

- ผลกระทบต่อคุณภาพอากาศในระดับต่ำ โดยมีการก่อตัวของฝุ่นละอองขนาดเล็กเท่ากับ 0.0139 kg PM_{2.5} eq และการก่อตัวของโอโซนที่ส่งผลต่อสุขภาพมนุษย์เท่ากับ 0.0671 kg NO_x eq ซึ่งต่ำกว่ากระบวนการที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเกือบ 10 เท่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล สะท้อนถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงและการปลดปล่อยคาร์บอนดำและเถ้าที่ต่ำกว่าของ LPG เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงแข็งอย่างมีนัยสำคัญ

- การสะสมความเป็นกรดและการใช้ทรัพยากร (Acidification and Resources) แสดงผลกระทบด้านการสะสมความเป็นกรดในดินในระดับต่ำ โดยมีค่า terrestrial

acidification เท่ากับ 0.0471 kg SO₂ eq ซึ่งต่ำกว่าระบบที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอย่างชัดเจน

- ความเป็นพิษและการบริโภคน้ำ (Toxicity and Water Consumption) ผลการวิเคราะห์ในหมวดหมู่ความเป็นพิษทั้งหมด ทั้งในมนุษย์และระบบนิเวศ (Terrestrial, Freshwater, and Marine ecotoxicity) รวมถึงการสะสมธาตุอาหารในน้ำ (Eutrophication) มีค่าเป็นศูนย์ (0 kg 1,4-DCB / kg P/N eq) สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการใช้ LPG แทบไม่มีการปลดปล่อยสารโลหะหนักหรือสารเคมีตกค้างสู่แหล่งน้ำและดินในขั้นตอนการดำเนินงาน สำหรับการบริโภคน้ำ (Water consumption) มีค่าอยู่ที่ 0.045 m³ ซึ่งแสดงถึงปริมาณน้ำที่ใช้จริงในกระบวนการผลิต

2) การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมชั้นปลาย (Endpoint category)

ก. กระบวนการผลิตข้าวหลามโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (S1)

- ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (Damage to Human Health) จากการประเมินในหน่วย DALY (Disability-Adjusted Life Years) หรือปีสุขภาวะที่สูญเสียไป พบว่ากระบวนการผลิตนี้ส่งผลกระทบผ่านปัจจัยหลักสองประการ ได้แก่ การทำให้โลกร้อน (Global warming, Human health) มีค่าเท่ากับ 2.00842E-04 DALY ซึ่งถือเป็นแหล่งกำเนิดความเสียหายที่สูงที่สุดในหมวดสุขภาพมนุษย์ การก่อตัวของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Fine particulate matter formation) มีค่าเท่ากับ 8.57091E-05 DALY ความเป็นพิษต่อมนุษย์ พบค่าความเสียหายจากสารที่ไม่ก่อมะเร็ง (7.84224E-07 DALY) และสารก่อมะเร็ง (1.00753E-07 DALY) ตามลำดับ สิ่งที่น่าสนใจคือมีการแสดงค่า ติดลบในส่วนของการบริโภคน้ำต่อสุขภาพมนุษย์ (-4.51182E-07 DALY) ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะของแบบจำลองวัฏจักรชีวิตที่มีการชดเชยการใช้น้ำในระบบ ผลรวมของผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ทั้งหมดคือ 2.873 x 10⁻⁴ DALY หรือประมาณ 0.000287 DALY ซึ่งหมายถึงทุกๆ 1 รอบการผลิต (Functional Unit) ของกระบวนการนี้ จะส่งผลกระทบให้ประชากรโดยรวมสูญเสียปีสุขภาวะที่ดีไปประมาณ 2 ชั่วโมง 31 นาที

- ผลกระทบต่อคุณภาพระบบนิเวศ (Damage to Ecosystem Quality) ความเสียหายต่อความหลากหลายทางชีวภาพวัดในหน่วย species.yr (จำนวนสายพันธุ์ที่คาดว่าจะสูญพันธุ์ต่อปี) โดยมีประเด็นสำคัญ คือ

ผลกระทบต่อระบบนิเวศทางบก ปัจจัยหลักมาจากการทำให้โลกร้อน (Global warming, Terrestrial ecosystems) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.05963E-07 species.yr การก่อตัวของโอโซน (5.43526E-08 species.yr) และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก (2.91904E-10 species.yr) ตามลำดับ และผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำพบความเสียหายในระดับที่ต่ำกว่าทางบกอย่างชัดเจน โดยมีค่าการสะสมธาตุอาหารในน้ำจืด (Freshwater eutrophication) อยู่ที่ 7.79324E-11 species.yr และความเป็นพิษในน้ำจืดเท่ากับ 2.35918E-12 species.yr โดยที่ผลรวมของผลกระทบต่อระบบนิเวศทั้งหมดเท่ากับ: 7.518 x 10⁻⁷ species.yr (หรือประมาณ 0.000000752 species.yr) แสดงให้เห็นว่าในการผลิตข้าวหลาม 1 รอบ มีส่วนทำให้เกิดความเสี่ยงที่จะสูญเสายพันธุ์สิ่งมีชีวิตไปเป็นสัดส่วนที่น้อยมากต่อปี

- ผลกระทบด้านความขาดแคลนทรัพยากร (Damage to Resource Scarcity) ความเสียหายในมิตินี้วัดด้วยต้นทุนส่วนเพิ่มที่สังคมต้องแบกรับในอนาคต (หน่วย USD2013) พบว่า การขาดแคลนทรัพยากรฟอสซิล (Fossil resource scarcity) มีค่าเท่ากับ 4.995 USD2013 การขาดแคลนทรัพยากรแร่ธาตุ (Mineral resource scarcity) มีค่าเพียง 0.002 USD2013 ผลรวมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 4.997 USD2013 ซึ่งหมายถึง การผลิตข้าวหลาม 1 หน่วยการผลิต สามารถสร้างต้นทุนการใช้ทรัพยากรไว้ให้สังคมในอนาคตที่ต้องแบกรับเป็นมูลค่าประมาณ 5 ดอลลาร์สหรัฐ (ตามค่าเงินปี 2013) โดยภาระเกือบทั้งหมด (ร้อยละ 99.9) เกิดจากการพึ่งพาพลังงานฟอสซิลที่แฝงอยู่ในวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

ข. กระบวนการผลิตข้าวหลามโดยใช้เชื้อเพลิง LPG (S2)

- ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (Damage to Human Health) พบค่า Global warming, Human health เท่ากับ 4.60288E-05 DALY ค่า Fine particulate matter formation เท่ากับ 8.71482E-06 DALY และ Ozone formation, Human health มีผลกระทบอยู่ที่ 6.1032E-08 DALY โดยที่ ค่าความเป็นพิษต่อมนุษย์ทั้งกลุ่มที่ก่อมะเร็งและไม่ก่อมะเร็ง (Human toxicity) รวมถึงการแผ่รังสี (Ionizing radiation) มีค่าเป็น 0 DALY ชี้ให้เห็นว่าการใช้ LPG ในขั้นตอนการผลิต (Gate-to-Gate) ปลอดภัยต่อสุขภาพในมิติของสารเคมีตกค้างและสารก่อมะเร็งมากกว่ากระบวนการผลิตแบบ

ดั้งเดิม ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์มีค่าผลรวมเท่ากับ 5.491×10^{-5} DALY ซึ่งหมายถึง ในการผลิตข้าวหลามโดยใช้เชื้อเพลิง LPG เกิดความสูญเสียปีสุขภาวะที่ดีไปประมาณ 0.020 วัน หรือเทียบเท่ากับ 29 นาที ต่อหนึ่งรอบการผลิต

- ผลกระทบต่อคุณภาพระบบนิเวศ (Damage to Ecosystem Quality) พบว่าอยู่ในระดับที่ต่ำ ค่า Global warming Terrestrial ecosystems มี ค่า $1.3888\text{E-}07$ species.yr Ozone formation, Terrestrial ecosystems มีค่าเท่ากับ $1.10569\text{E-}08$ species.yr และ Terrestrial acidification พบค่าการสะสมความเป็นกรดเพียง $9.97782\text{E-}09$ species.yr ผลรวมทั้งหมดต่อระบบนิเวศเท่ากับ 1.60522×10^{-7} species.yr แสดงให้เห็นว่าในการผลิตข้าวหลามด้วยเชื้อเพลิง LPG หนึ่งหน่วยการผลิต จะมีส่วนทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการสูญเสียสายพันธุ์สิ่งมีชีวิตในระดับที่น้อยมากเมื่อเทียบกับระบบนิเวศโดยรวม

- ผลกระทบด้านความขาดแคลนทรัพยากร (Damage to Resource Scarcity) พบว่าเกิดผลกระทบด้าน Fossil resource scarcity และ Mineral resource scarcity มีค่าเท่ากับ 0 USD2013 ข้อมูลนี้บ่งชี้ว่าภายใต้ขอบเขตการศึกษาและฐานข้อมูลที่ใช้ กระบวนการผลิตด้วย LPG ไม่ได้สร้างต้นทุนให้กับสังคมในอนาคตในมิติของความขาดแคลนทรัพยากรที่สกัดจากธรรมชาติโดยตรงในขั้นตอนการดำเนินงาน

2. การศึกษาปริมาณและการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากการเผาข้าวหลาม ตำบลแสนสุข จังหวัดชลบุรี

2.1 ความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM_{10})

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณฝุ่นละออง PM_{10} ระหว่างการใช้เชื้อเพลิงทั้งสองประเภท ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของฝุ่น PM_{10} จากการผลิตข้าวหลามจำแนกตามประเภทเชื้อเพลิง

การทดลอง	เชื้อเพลิงชีวมวล ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	LPG ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
ครั้งที่ 1	139.38	74.60
ครั้งที่ 2	131.53	106.01
ครั้งที่ 3	182.57	43.19
ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD	166.86 ± 11.93	97.51 ± 10.06
Background	184.53	239.50

การเผาข้าวหลามด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลปล่อยฝุ่น PM_{10} สูงกว่าการใช้ LPG อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (166.86 ± 11.93 เทียบกับ $97.51 \pm 10.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $p < 0.05$) โดยมีอัตราส่วนความแตกต่าง 1.71:1 และมีค่าความเข้มข้นเกินมาตรฐานคุณภาพอากาศ 24 ชั่วโมงถึง 39.05% ขณะที่การใช้ LPG ให้ค่าฝุ่นต่ำกว่ามาตรฐาน 18.74% นอกจากนี้การพบค่า PM_{10} พื้นหลังของระบบ LPG สูงกว่าช่วงการเผาอย่างเด่นชัด สะท้อนถึงอิทธิพลของแหล่งกำเนิดมลพิษอื่นในพื้นที่ เช่น การจราจรหรือกิจกรรมก่อสร้าง ซึ่งอาจ

ส่งผลต่อคุณภาพอากาศโดยรวมมากกว่ากระบวนการเผาเอง

2.2 การกระจายตัวของฝุ่นละอองตามขนาดอนุภาค

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของฝุ่นในระบบ 9 ชั้น (stage 1-9) แสดงให้เห็นรูปแบบที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างทั้งสองประเภทเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การกระจายตัวของฝุ่นละอองตามขนาดอนุภาคจากการผลิตข้าวหลาม

ชั้นที่	ขนาดของฝุ่น ละออง (μm)	เชื้อเพลิงชีวมวล ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	LPG ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	อัตราส่วน
1	9.1-10.0	43.84 ± 6.31	16.36 ± 12.77	2.68:1
2	5.9-9.0	13.09 ± 5.67	12.43 ± 8.85	1.05:1
3	4.8-5.8	8.51 ± 4.09	3.93 ± 0.00	2.17:1
4	3.4-4.7	9.82*	5.89*	1.67:1
5	2.2-3.3	13.74 ± 7.08	2.94 ± 1.39	4.67:1
6	1.2-2.1	13.74 ± 12.26	7.85 ± 0.00	1.75:1
7	0.66-1.1	17.01 ± 1.13	1.96*	8.68:1
8	0.43-0.65	33.37 ± 5.89	11.78 ± 5.55	2.83:1
9	<0.43	13.74*	34.35*	0.40:1
รวม	78.10 (46.82%)	58.92 (60.46%)		

หมายเหตุ * เมื่อคำนวณค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean) พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าเฉลี่ย (x) และข้อมูลขนาดของฝุ่นละอองบางจำนวนมีค่าเป็นศูนย์จึงไม่สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric Mean) ได้

การวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคฝุ่น PM_{10} เผยให้เห็นความแตกต่างเชิงโครงสร้างระหว่างเชื้อเพลิงทั้งสองประเภทอย่างมีนัยสำคัญ การเผาไหม้ชีวมวลแสดงการกระจายแบบไบโมดัล (bimodal distribution) โดยมีการสะสมสูงสุดในช่วงฝุ่นหยาบขนาด 9.10–10.0 μm ($43.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 26.27% ของ PM_{10}) อย่างไรก็ตาม พบการสะสมของอนุภาคละเอียดในช่วง 0.43–0.65 μm คิดเป็น 20.00% ส่งผลให้ $\text{PM}_{2.5}$ มีสัดส่วน 46.82% ของ PM_{10} ทั้งหมด สะท้อนความเสี่ยงต่อสุขภาพจากฝุ่นละเอียดที่สามารถแทรกซึมเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนปลายได้ ในทางตรงกันข้าม การเผาไหม้ LPG แสดงรูปแบบการกระจายที่เอนเอียงไปทางอนุภาคขนาดเล็ก (fine-dominated profile) โดยอนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.43 μm มีสัดส่วนสูงสุด (35.23%) และ $\text{PM}_{2.5}$ คิดเป็น 60.46% ของ PM_{10} ทั้งหมด ซึ่งชี้ให้เห็นว่า LPG เป็นแหล่งกำเนิดฝุ่นละเอียดพิเศษ (ultrafine particles) ที่มีความสามารถในการแทรกซึมเข้าสู่กระแสเลือดและก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบหลายอวัยวะได้

ผลการศึกษาปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาชี้ให้เห็นว่า สภาวะความเร็วลมต่ำ ความชื้นสัมพัทธ์สูง และอุณหภูมิอากาศที่ต่ำกว่าค่าพื้นหลัง เป็นปัจจัยจำกัดการแพร่กระจายและส่งเสริมการสะสมตัวของฝุ่นละอองจากกระบวนการเผาข้าวหลาม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเช้ามืด ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงและอุณหภูมิที่ลดต่ำลงมีบทบาทสำคัญในการเร่งปฏิกิริยาการรวมตัวของอนุภาค (Particle

Agglomeration) ส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของ PM_{10} และ $\text{PM}_{2.5}$ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมในระดับพื้นที่จึงจำเป็นต้องผนวกปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาเหล่านี้เข้าสู่การวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสภาพแวดล้อมทางกายภาพกับปริมาณฝุ่น PM_{10} จากการเผาข้าวหลามพบรูปแบบความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละปัจจัย ดังนี้

1) ความเร็วลมแสดงความสัมพันธ์แบบผกผันกับปริมาณฝุ่น การเผาด้วยชีวมวลที่ความเร็วลม 0.63 m/s ให้ปริมาณฝุ่น 151.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ แต่เมื่อลมลดเหลือ 0.45 m/s ปริมาณฝุ่นเพิ่มเป็น 184.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับ LPG ที่ความเร็วลม 0.29 m/s เกิดฝุ่น 74.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ แต่พบค่าผิดปกติใน Background (239.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ที่ความเร็วลม 0.55 m/s บ่งชี้ถึงอิทธิพลของแหล่งกำเนิดมลพิษภายนอก ผลการศึกษาสอดคล้องกับทฤษฎีการกระจายตัวของมลพิษทางอากาศที่ความเร็วลมสูงช่วยเจือจางความเข้มข้นของฝุ่น

2) ความชื้นสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์แบบผกผันเช่นกัน การเผาด้วยชีวมวลที่ความชื้น 86.10% เกิดฝุ่น 151.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ แต่เมื่อความชื้นลดเหลือ 63.60% ฝุ่นเพิ่มขึ้นเป็น 184.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ รูปแบบเดียวกันพบในการเผาโดยใช้ LPG กลไกที่เป็นไปได้คือความชื้นสูงส่งเสริม wet

deposition และการจับตัวของฝุ่น ในขณะที่สภาวะแห้งเอื้อต่อการลอยตัวของอนุภาค

3) อุณหภูมิแสดงความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณฝุ่น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 28.98°C เป็น 34.64°C ในการเผาด้วยชีวมวล ปริมาณฝุ่นเพิ่มจาก 151.16 เป็น 184.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 29.26°C เป็น 35.90°C ใน LPG ฝุ่นเพิ่มเป็น 239.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าสภาพแวดล้อมทางกายภาพมีอิทธิพลสำคัญต่อการกระจายตัวและความเข้มข้นของฝุ่นละออง โดยเฉพาะความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งควรนำไปประกอบการพิจารณาในการออกแบบมาตรการควบคุมมลพิษอากาศสำหรับกิจการผลิตข้าวหลาม

อภิปรายผลการวิจัย

1. มิติด้านสุขภาพและความเหลื่อมล้ำทางสังคม

ผลการศึกษานี้ให้เห็นความขัดแย้งระหว่างการใช้เชื้อเพลิงดั้งเดิมกับความยั่งยืนด้านสุขภาพ โดยการเผาไหม้ชีวมวลก่อให้เกิดมลพิษ $\text{PM}_{2.5}$ สูงถึง 0.1365 kg $\text{PM}_{2.5}$ eq ซึ่งสูงกว่าก๊าซ LPG เกือบ 10 เท่า สะท้อนถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าของ LPG (Himanshu et al., 2021) ความแตกต่างนี้ส่งผลให้ค่าการสูญเสียสุขภาพ (DALY) ของชีวมวล (2.873×10^{-4}) สูงกว่า LPG อย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับระดับฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ (151.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ที่เกินมาตรฐานถึง 26% ซึ่งยืนยันว่ากิจกรรมนี้เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่สำคัญในชุมชน

แม้ชีวมวลจะมีสัดส่วนเถ้าต่ำ (0.5–3.0% wt) (Oberberger et al., 2006) แต่กระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เป็นแหล่งแพร่กระจายของโลหะหนัก คาร์บอนมอนอกไซด์และสารก่อมะเร็งกลุ่ม PAHs (Vassilev et al., 2010; Tejpal et al., 2019) ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงต่อโรคปอดอุดกั้นเรื้อรังและโรกระบบหัวใจหลอดเลือดในกลุ่มประชากรเปราะบาง (Kodgule & Salvi, 2012) ข้อค้นพบนี้สะท้อนถึงอุปสรรคต่อการบรรลุเป้าหมาย SDG 3 (Good Health and Well-being) โดยประสิทธิภาพของเตาชีวมวลที่ต่ำเพียง 13.5% เมื่อเทียบกับ LPG ได้ตอกย้ำถึงช่องว่างทางเทคโนโลยีที่สร้างความเหลื่อมล้ำด้านสุขภาพ โดยเฉพาะในสตรีและเด็กจากครัวเรือนรายได้น้อยที่มีความเสี่ยงสูงจากการสัมผัสมลพิษในระยะยาว

2. มิติด้านสิ่งแวดล้อม ผลกระทบต่อระบบนิเวศและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

การวิเคราะห์ LCA ระดับ Midpoint แสดงให้เห็นว่าการใช้ชีวมวลส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสูงถึง 216.415 kg CO_2 eq ซึ่งมากกว่า LPG ถึง 4.3 เท่า ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการบรรลุเป้าหมาย SDG 13 เนื่องด้วยโครงสร้างทางเคมีของชีวมวลเอื้อต่อการปล่อย Black Carbon และ $\text{PM}_{2.5}$ ในปริมาณสูง (Bond et al., 2013) ในขณะที่ LPG แม้จะมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า แต่มีการปลดปล่อย SO_2 NO_x และ VOCs ซึ่งก่อให้เกิดอนุภาคหยาบ (Ultrafine particles) ที่สามารถแทรกซึมเข้าสู่กระแสเลือด เพิ่มความเสี่ยงต่อภาวะกล้ามเนื้อหัวใจตายเฉียบพลันอย่างมีนัยสำคัญ (Pope & Dockery, 2006; Zhu et al., 2021)

ในด้านผลกระทบต่อระบบนิเวศ ชีวมวลส่งผลกระทบต่อสูงกว่า LPG อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีปัจจัยหลักจากภาวะโลกร้อนที่คุกคามความหลากหลายทางชีวภาพตามกรอบ SDG 13 (Climate Action) ข้อค้นพบนี้สะท้อนว่าสถานะพลังงานหมุนเวียนของชีวมวลเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการประกันความยั่งยืนหากขาดเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การประเมินแบบ Cradle-to-Grave ในอนาคตควรครอบคลุมผลกระทบแอบแฝงจากกระบวนการสกัดและขนส่งในระบบ LPG เพื่อให้เกิดการวิเคราะห์เปรียบเทียบที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

3. มิติด้านเศรษฐกิจ ต้นทุนทรัพยากรและความยั่งยืนทางเศรษฐกิจ

การวิเคราะห์ระดับ Endpoint พบว่าระบบชีวมวลมีต้นทุนการขาดแคลนทรัพยากร สูงถึง 4.99 USD2013 เนื่องจากการพึ่งพาพลังงานฟอสซิลแฝงในห่วงโซ่อุปทานและความไม่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแบบดั้งเดิมที่มีค่าเพียง 13.5% (Gangavarapu, 2024) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนแฝงด้านแรงงาน เวลา และโลจิสติกส์ที่สูงกว่าระบบ LPG แม้ราคาวัตถุดิบชีวมวลจะต่ำกว่าแต่กลับให้ผลประโยชน์ต่อขนาดที่น้อยกว่าเมื่อพิจารณาจากต้นทุนภายนอก

ข้อค้นพบนี้เชื่อมโยงกับ SDG 7 (Affordable and Clean Energy) SDG 8 (Decent Work and Economic Growth) และ SDG 12 (Responsible Consumption and Production) โดยชี้ให้เห็นว่าการยกระดับเทคโนโลยีเตาเผาชีวมวลให้มีประสิทธิภาพสูงเป็นกุญแจสำคัญในการลดต้นทุนต่อหน่วยพลังงาน แม้การลงทุนเริ่มต้นจะสูงแต่จะส่งผลดีต่อเศรษฐกิจชุมชนในระยะยาวผ่านการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่เกินความจำเป็น

อย่างไรก็ตาม การใช้ชีวมวลในปริมาณมากยังเผชิญความท้าทายด้านความยั่งยืนของห่วงโซ่อุปทานและการฟื้นตัวของทรัพยากรธรรมชาติ การพิจารณาความยั่งยืนทางเศรษฐกิจจึงต้องสร้างสมดุลระหว่างประสิทธิภาพการใช้งาน ความเสถียรของอุปทาน และการลดผลกระทบเชิงลบต่อเศรษฐกิจท้องถิ่นอย่างเป็นระบบ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้เชิงนโยบาย

1. พัฒนาระบบเฝ้าระวังคุณภาพอากาศและสุขภาพกลุ่มเปราะบางในพื้นที่ผลิตอาหารพื้นถิ่น ควบคุมการสื่อสารความเสี่ยงและการส่งเสริมการใช้อุปกรณ์ป้องกัน เพื่อลดการเจ็บป่วยจากมลพิษทางอากาศและ

สนับสนุน SDG 3.9 (Reduce illness from air pollution) โดย กรมควบคุมมลพิษ กรมอนามัย และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น

2. ส่งเสริมการพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูงเพื่อลดการใช้พลังงานและมลพิษ พร้อมมาตรการสนับสนุนทางการเงินและการอุดหนุนพลังงานสะอาดในระดับชุมชน เพื่อสนับสนุน SDG 7.1 (Access to affordable clean energy) และ SDG 12.2 (Sustainable resource use) โดย กระทรวงพลังงาน กระทรวงอุตสาหกรรม และสถาบันการศึกษา

3. พัฒนากลไกคาร์บอนเครดิตเชื่อมโยงตลาดระดับชาติและนานาชาติ ควบคุมการส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียนจากเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสนับสนุน SDG 13.2 (Climate action integration) และ SDG 12.5 (Waste reduction) โดย องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก และกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

4. กำหนดมาตรฐานการปล่อยมลพิษและระยะทางปลอดภัยของแหล่งผลิตอาหารในชุมชน พร้อมส่งเสริมการมีส่วนร่วมของประชาชนในการกำหนดนโยบาย

เพื่อสนับสนุน SDG 11.6 (Reduce urban environmental impact) และการจัดการสิ่งแวดล้อมในระดับท้องถิ่น โดย กรมควบคุมมลพิษ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และภาคประชาชน

5. ส่งเสริมเทคโนโลยีลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และพัฒนาระบบจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลอย่างปลอดภัย เพื่อลดความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพตลอดวัฏจักรชีวิตการผลิตอาหารพื้นถิ่น สนับสนุน SDG 12.4 (Environmentally sound management of pollutants) และ SDG 13 (Climate action) โดย กระทรวงพลังงาน กระทรวงอุตสาหกรรม และหน่วยงานวิจัย

6. จัดตั้งกลไกบูรณาการทุกภาคส่วนและพัฒนาระบบติดตามประเมินผลตัวชี้วัด SDGs ในระดับพื้นที่อย่างต่อเนื่อง เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายบนฐานข้อมูลและการพัฒนาที่ยั่งยืน SDG 17.17 (Multi-stakeholder partnerships) โดย สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ หน่วยงานรัฐเอกชน และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น

ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคต

1. ควรขยายขอบเขตการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบ Cradle-to-Grave ให้ครอบคลุมกระบวนการผลิต การขนส่งเชื้อเพลิง และการจัดการของเสียหลังการใช้งาน เพื่อให้ได้ภาพรวมผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่สมบูรณ์ตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์

2. เปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมและประสิทธิภาพของเทคโนโลยีและเชื้อเพลิงทางเลือก ได้แก่ เตาเผาประสิทธิภาพสูง เตาไฟฟ้า เตาแก๊สชีวภาพ และการใช้ชีวมวลอัดแท่ง เพื่อระบุทางเลือกที่เหมาะสมและยั่งยืนที่สุดในบริบทของประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง (ภาษาอังกฤษ)

- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Bernsten, T., DeAngelo, B. J., ... & Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5380–5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Bora, R. (2023). Life-cycle assessment of humidity sensors printed with forest-based ink and laser graphitization (Master's thesis, KTH Royal Institute of Technology). Department of Energy Technology. Retrieved from /mnt/data/6b348557-5979-4dcb-a88d-81825fb43759.pdf

- Chitralada School Study. (2025). The impact of PM2.5 on the health of primary school students aged 10–13 in Bangkok. *International Journal of Research in Social Sciences*.
<https://doi.org/10.47772/URISS.2025.905000411>
- Gangavarapu, V. T. (2024). Life cycle assessment of cooking fuels: A case study in Tamil Nadu, India (TRITA-ITM-EX 2024:115) [Master's thesis, KTH Royal Institute of Technology]. DiVA.
- Himanshu, Pal, K., Jain, S., & Tyagi, S. K. (2021). Energy and exergy analysis and emission reduction from forced draft gasifier cookstove models: A comparative study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/S10973-021-11137-Y>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., Hollander, A., Zijp, M., & van Zelm, R. (2016). ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization (RIVM Report 2016-0104). National Institute for Public Health and the Environment (RIVM).
- Klöpffer, W. (2006). Book review: The Hitch Hiker's Guide to LCA: An orientation in LCA methodology and application, by Baumann, H., & Tillman, A.-M. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(2), 142. <https://doi.org/10.1065/lca2006.02.008>
- Kodgule, R., & Salvi, S. (2012). Exposure to biomass smoke as a cause for airway disease in women and children. *Current opinion in allergy and clinical immunology*, 12(1), 82–90.
<https://doi.org/10.1097/ACI.0b013e32834ecb65>
- Kongtip, P., Nankongnab, N., Chaikittiporn, C., Laohaudomchok, W., Woskie, S., & Slatin, C. (2015). Informal workers in Thailand: Occupational health and social security disparities. *New Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy*, 25(2), 189–211. <https://doi.org/10.1177/1048291115586036>
- Obernberger, I., Brunner, T., & Bärnthaler, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels: Significance and impact—Standardisation of solid biofuels in Europe. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 973–982.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>
- Pope III, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709–742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Shackelford, B. B., Steenland, K., Kirby, M. A., Balakrishnan, K., Chiang, M., Diaz-Artiga, A., McCracken, J. P., Thompson, L. M., Rosa, G., Waller, L. A., Jabbarzadeh, S., Wang, J., Pillarisetti, A., Johnson, M. A., Peel, J. L., Checkley, W., & Clasen, T. F. (2025). Gestational and postnatal exposures to fine particulate matter (PM2.5) and their association with acute ear infections, diarrhea, respiratory symptoms, and mortality: A longitudinal study of infants in the multicountry Household Air Pollution Intervention Network (HAPIN) trial. *Environmental Research*, 285(1), 122258. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122258>
- Tejpal, N., Swaranjit, & Sharma, P. (2019). Study of effects of cooking fuels biomass and LPG on pulmonary function tests in rural women of Punjab. *International Journal of Current Medical and Applied Sciences*, 23(1), 1–5. <http://www.ijcmaas.com>
- Tian, D., Hu, Y., Wang, Y., Boylan, J. W., Zheng, M., & Russell, A. G. (2009). Assessment of biomass burning emissions and their impacts on urban and regional PM 2.5: A Georgia case study. *Environmental Science & Technology*, 43(2), 299–305. <https://doi.org/10.1021/es801827s>
- Tonne, C., Adair-Rohani, H., Amann, M., Ceston, J., Häslér, B., Kieseewetter, G., Lee, J., Nagendra, S. M. S., Sambandam, S., Thondoo, M., & Usmani, F. (2023). Health and climate impacts of scaling adoption of liquefied petroleum gas (LPG) for clean household cooking in Cameroon: A modeling study. *Environmental Health Perspectives*, 131(4), 047003. <https://doi.org/10.1289/EHP11361>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>

- World Health Organization. (2023). Household air pollution and health. <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/thailand/environmental-health-thailand/household-air-pollution.pdf>
- Zhu, W., Cai, J., Hu, Y., Zhang, H., Han, X., Zheng, H., & Wu, J. (2021). Long-term exposure to fine particulate matter relates with incident myocardial infarction (MI) risks and post-MI mortality: A meta-analysis. *Chemosphere*, 267, 128903. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128903>

