

การประเมินศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์
เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทางเลือกเพื่อลดหมอกควันในจังหวัดเชียงใหม่
Assessment of the Potential of Forage Maize Residues
as an Alternative Biomass Fuel for Mitigating Haze Pollution in Chiang Mai

จินตามณี ป็อกสอน^{1*}

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

Chindamanee Pokson^{1*}

School of Renewable Energy, Maejo University

pokson.chindamanee@gmail.com

Received 2 June 2025

Revised 19 June 2025

Accepted 14 August 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดเชียงใหม่ เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนประเภทชีวมวลสำหรับระบบเผาไหม้ขนาดเล็ก (ไม่เกิน 50 kW) เปรียบเทียบกับการเผาไหม้ในทีโล่ง ซึ่งเป็นแนวทางดั้งเดิมที่นิยมดำเนินการในภาคการเกษตร ผลการศึกษาพบว่า เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของจังหวัดเชียงใหม่ในปี พ.ศ.2566-2567 มีปริมาณรวมทั้งสิ้น 1,159,316.84 ตัน โดยเศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าประมาณ 731,910.66 ตัน เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีพบว่า เศษข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ให้ค่าความร้อนต่ำเฉลี่ยประมาณ 17.15 MJ/kg ส่งผลให้ศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลด้านพลังงานความร้อน เท่ากับ 12,552,267.82 GJ ผลการประเมินสารมลพิษทางอากาศ พบว่า การนำเศษข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถลดมลพิษได้ 31,387.55 ตัน หรือคิดเป็นปริมาณสารมลพิษที่ลดลงได้ 63.08% นอกจากนี้ การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับชั้นปลายด้วยวิธี ReCiPe 2016 พบว่า ทางเลือกการนำเศษข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มาใช้ประโยชน์ด้านเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถลดผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ได้ 2.43×10^{-6} DALY/kg และลดผลกระทบต่อระบบนิเวศได้ 6.63×10^{-10} species·y/kg สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของการใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนเพื่อการลดการเผาในที่โล่ง

คำสำคัญ: วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร, ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์, เชื้อเพลิงชีวมวล, มลพิษทางอากาศ, ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

Abstract

This study aims to assess the potential of maize residues in Chiang Mai as an alternative biomass fuel for small-scale combustion systems (< 50 kW), as an alternative to conventional open-

field burning practices. The results indicate that the total amount of agricultural residues generated in Chiang Mai during the 2023–2024 cropping season was approximately 1,159,316.84 tons, of which maize residues accounted for 731,910.66 tonnes. Analysis of their thermal properties shows an average lower heating value for maize residues of approximately 17.15 MJ/kg. Based on this value, the estimated thermal energy potential from maize residues is approximately 12,552,267.82 GJ. In terms of air pollution, utilizing maize residues as biomass fuel could reduce air pollutant emissions by approximately 31,387.55 tons, representing a reduction of about 63.08% compared to open-field burning. Furthermore, the environmental impact assessment using the ReCiPe 2016 methodology indicates that using maize residues as biomass fuel could mitigate human health impacts by 2.43×10^{-6} DALY/kg and ecosystem impacts by 6.63×10^{-10} species-y/kg, relative to open-field burning. The findings reveal that maize residues possess significant potential for energy production and environmental impact mitigation, representing a sustainable alternative to open-field burning.

Keywords: Agricultural Residue, Maize, Biomass Fuel, Haze Pollution, Environmental Impact

1. บทนำ

จังหวัดเชียงใหม่และพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยประสบปัญหาหมอกควันและมลพิษทางอากาศอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในฤดูแล้ง (ช่วงเดือนมกราคม-เมษายน) ซึ่งจากข้อมูลปี พ.ศ.2567 พบว่าในช่วงเดือนเมษายน พื้นที่อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ มีความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมโครเมตร (Particulate Matter Less than 2.5 micrometers, PM_{2.5}) สูงถึง 224.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ซึ่งจัดอยู่ในระดับที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพตามเกณฑ์ดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย [1] และด้วยลักษณะภูมิประเทศของจังหวัดเชียงใหม่เป็นแอ่งที่ถูกล้อมรอบด้วยภูเขาสูง จึงส่งผลให้การระบายอากาศในแนวตั้งเป็นไปอย่างจำกัด และเอื้อต่อการสะสมของมลพิษทางอากาศในระดับพื้นดิน ซึ่งจากผลการบินสำรวจและเก็บข้อมูลคุณภาพอากาศในประเทศไทยเมื่อวันที่ 16-26 มีนาคม พ.ศ.2567 โดยองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (National Aeronautics and Space Administration, NASA) พบว่าการเผาชีวมวลในที่โล่ง (Open Biomass Burning) เป็นแหล่งกำเนิดหลักของฝุ่นละอองในบรรยากาศ และมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดมลพิษในระดับภูมิภาค [2] สอดรับกับงานวิจัยของ Ponsawansong et al. [3] ซึ่งได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นร่วมกับแบบจำลองเชิงสถิติในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และลำพูน พบว่า แหล่งที่ทำให้เกิดปริมาณฝุ่นมากที่สุดคือการเผาชีวมวล โดยคิดเป็นสัดส่วนสูงถึง 57.9% ของแหล่งกำเนิดฝุ่นทั้งหมด และจากข้อมูลการบริหารจัดการเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของสำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดเชียงใหม่ในปีการผลิต พ.ศ. 2566-2567 [4] พบว่า ปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีจำนวนรวมประมาณ 1,159,316.84 ตัน โดยวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดมีสัดส่วนสูงสุดถึง 63% ของปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทั้งหมด

เพื่อลดผลกระทบจากการเผาไหม้ชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร จึงมีงานวิจัยที่ได้นำเสนอการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงาน อาทิ Ruggeri et al. [5] Pradeep et al. [6] และ Cortazar et al. [7] ซึ่งได้นำชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร คือ เศษซากพืชที่ประกอบด้วยวัสดุจากพืชที่ผ่านการแปรรูป เช่น ลำต้น ใบ และเปลือก เป็นต้น มักถูกนำมาใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน เป็นอาหารสัตว์ และใช้ในการผลิตเป็นพลังงาน ซึ่งแม้จะมีข้อจำกัดในการใช้ชีวมวลในอดีต แต่ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในปัจจุบันทำให้การเปลี่ยนรูปชีวมวลเป็นพลังงานมีความหลากหลายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น อาทิ ไฟฟ้า ความร้อน เชื้อเพลิงชีวภาพ และสารชีวเคมี โดยผ่านกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical) และชีวเคมี (Biochemical) ซึ่ง Zhu et al. [8] ได้ศึกษา

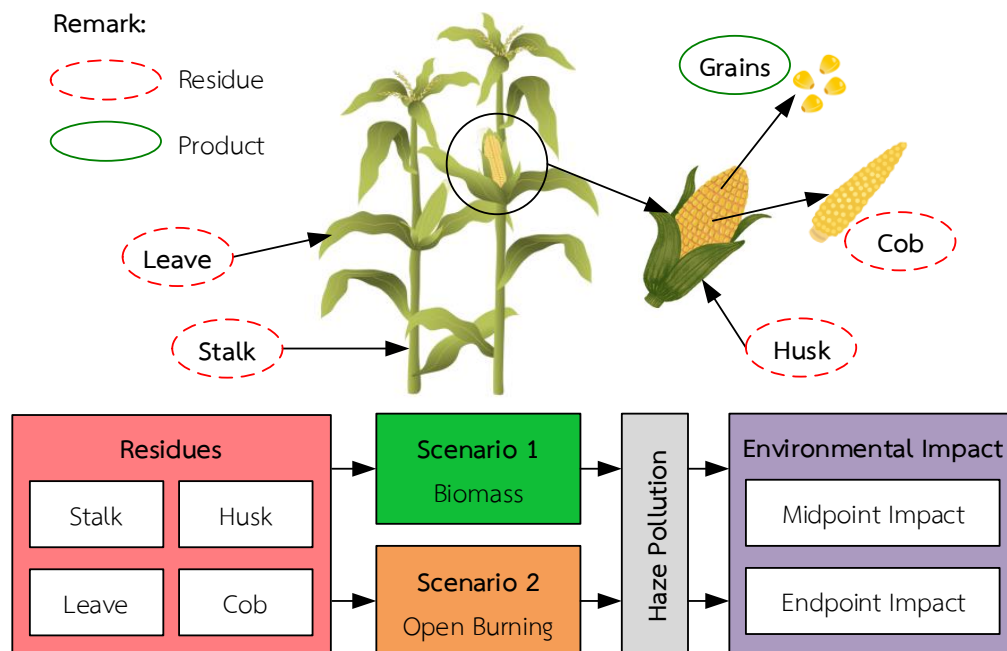
เทคโนโลยีการเปลี่ยนรูปชีวมวล 4 ประเภท ได้แก่ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร วัสดุเหลือทิ้งภาคป่าไม้ มูลสัตว์ และเศษอาหารจากขยะชุมชน ให้เป็นพลังงาน โดยพิจารณาเทคโนโลยีกระบวนการทางชีวเคมีและทางเคมีความร้อน ผลการศึกษาพบว่า เทคโนโลยีทางเคมีความร้อนให้ค่าพลังงาน 0.1-15.8 MJ/kg ขณะที่เทคโนโลยีทางชีวเคมีให้ค่าพลังงานอยู่ในช่วง 1.0-12.7 MJ/kg โดยค่าพลังงานสูงสุดของกระบวนการทางเคมีความร้อน สูงกว่าทางชีวเคมีประมาณ 3.1 MJ/kg หรือราว 24% สอดรับกับงานวิจัยของ Chen et al. [9] และ Siwal et al. [10] ได้กล่าวถึงเทคโนโลยีทางเคมีความร้อนเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและง่ายต่อการบริโภคเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งสามารถนำชีวมวลมาเผาไหม้โดยตรงหรือเผาพร้อมกับถ่านหินเพื่อสร้างความร้อนและพลังงาน นอกจากการนำมาเผาไหม้โดยตรง ยังมีการแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า เช่น การอัดแท่ง (Briquettes) การอัดเม็ด (Pellets) ทอรรีไฟเคชัน (Torrefaction) เป็นต้น โดย Nunes et al. [11] และ Chen et al. [12] รายงานว่าการอัดแท่งและอัดเม็ดเป็นกระบวนการเชิงกายภาพที่ช่วยเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุ ช่วยลดต้นทุนในการขนส่งและการจัดเก็บ ขณะที่ Granado et al. [13] พบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผ่านกระบวนการทอรรีไฟเคชันนี้มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น 9-13 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ไม่ผ่านกระบวนการ ในแง่ของผลด้านสิ่งแวดล้อม Kinyar และ Bothongo [14] ได้เปรียบเทียบผลกระทบของแหล่งพลังงานต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 µm (PM_{2.5}) ในสหราชอาณาจักร โดยพบว่าก๊าซธรรมชาติส่งผลต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.25% และการเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก 0.18% ต่อการใช้การที่เพิ่มขึ้น 1% ในขณะที่เชื้อเพลิงชีวมวลส่งผลต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.21% และการเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็กเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สอดรับกับงานวิจัยของ Bilgili et al. [15] Ulucak [16] และ Sulaiman et al. [17] ที่ยืนยันว่าเชื้อเพลิงชีวมวลช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะการปล่อยก๊าซเรือนกระจก นอกจากนี้ Shen et al. [18] ยังได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ชีวมวลในการผลิตไฟฟ้าสามารถลดมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และฝุ่นละอองขนาดเล็ก

จากปัญหาและข้อค้นพบจากงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงถึงศักยภาพและประสิทธิภาพของการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อผลิตพลังงานและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังคงขาดการศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยการเผาในที่โล่ง ซึ่งเป็นแนวทางดั้งเดิมที่ยังคงเป็นที่นิยมในการเกษตร และการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ที่ครอบคลุมการศึกษาปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม โดยอาศัยข้อมูลการปล่อยมลพิษจากกิจกรรมตามแนวทางจัดทำบัญชีรายการปล่อยมลพิษทางอากาศ (EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook) [19] ร่วมกับการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) ด้วยวิธี ReCiPe 2016 [20] ศึกษาชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งของการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดเชียงใหม่ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงประจักษ์ที่สามารถสนับสนุนการจัดการวัสดุเหลือทิ้งของภาคการเกษตรอย่างยั่งยืนต่อไป

2. ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 1 เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (Forage Maize Residues) ได้แก่ ลำต้น (Stalk) ใบ (Leaf) เปลือก (Husk) และซังข้าวโพด (Cob) จะถูกนำมาศึกษาภายใต้เงื่อนไข คือ การใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนประเภทชีวมวล (Biomass) และการเผาในที่โล่ง (Open Burning) เพื่อประเมินการปลดปล่อยสารมลพิษในการอากาศ (Haze Pollution) ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ในแต่ละสถานการณ์ตามแนวทางจัดทำบัญชีรายการปล่อยมลพิษทางอากาศ และวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับชั้นกลาง (Midpoint Impact) และระดับชั้นปลาย (Endpoint Impact) ตามกรอบการประเมินวัฏจักรชีวิต ด้วยวิธี ReCiPe 2016 โดยที่สารมลพิษที่สนใจศึกษาประกอบด้วย ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 µm (PM_{2.5}) ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 µm (PM₁₀) ฝุ่นแขวนลอยรวม (Total Suspended Particles, TSP) คาร์บอนดำ (Black Carbon, BC) คาร์บอนมอนอกไซด์

(Carbon Monoxide, CO) ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxide, NO_x) สารอินทรีย์ระเหยที่ก่อให้เกิดโอโซน (Non-methane Volatile Organic Compounds, NMVOC) ซัลเฟอร์ออกไซด์ (Sulfur Oxide, SO_x) และแอมโมเนีย (Ammonia, NH₃)



รูปที่ 1 ขอบเขตงานวิจัย

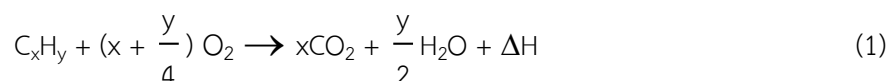
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

3.1 การเผาไหม้ของชีวมวล

การเผาไหม้ (Combustion) เป็นกระบวนการออกซิเดชันอย่างรวดเร็วขององค์ประกอบในเชื้อเพลิง โดยเฉพาะคาร์บอนและไฮโดรเจนในสถานะที่มีออกซิเจน ซึ่งจะปล่อยพลังงานในรูปของความร้อนและก๊าซต่าง ๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไอน้ำ ผุนละออง และก๊าซมลพิษอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการเผาไหม้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะสนใจศึกษากระบวนการเผาไหม้ 2 เงื่อนไข คือ (1) การใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นเชื้อเพลิงทดแทนประเภทชีวมวลภายใต้ระบบควบคุม เช่น หม้อไอน้ำ เตาเผา เป็นต้น เพื่อเปลี่ยนรูปเป็นพลังงาน ซึ่งโดยทั่วไปจะเกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ และ (2) การเผาไหม้ในที่โล่ง ซึ่งเป็นแนวทางปฏิบัติทั่วไปในภาคเกษตรกรรม และมักเกิดการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์

การเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Complete Combustion) เกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์หลักคือ คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ พร้อมทั้งปล่อยพลังงานความร้อนออกมา (Heat, ΔH) กระบวนการนี้พบได้ในระบบที่มีการควบคุม โดยสมการการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนทั่วไป (C_xH_y) ดังแสดงในสมการที่ 1



การเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) เกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอ หรือมีปัจจัยที่ส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่สมบูรณ์ เช่น การควบคุมอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม หรือการถ่ายเทอากาศที่ไม่ดี ซึ่งกรณีนี้พบได้บ่อยในสถานการณ์การเผาในที่โล่งหรือการเผาที่ไม่ได้ควบคุม ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นมลพิษ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ เหม้าคาร์บอน (C) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ (Hydrocarbons, HCs) สามารถเขียนสมการการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ดังสมการที่ 2



3.2 ศักยภาพเชิงพลังงานของเชื้อเพลิงชีวมวล

ศักยภาพเชิงพลังงานของเชื้อเพลิงชีวมวล สามารถประเมินได้จากมวลของชีวมวล (Mass of Biomass, $M_{Biomass}$) และค่าความร้อน (Heating Value) ซึ่งงานวิจัยนี้จะพิจารณาใช้ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV) เพื่อแสดงถึงปริมาณพลังงานความร้อนสุทธิที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยไม่รวมพลังงานจากการควบแน่นของไอน้ำที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งเป็นแนวทางที่นิยมใช้ในงานศึกษาด้านพลังงาน สอดคล้องกับเงื่อนไขการใช้งานจริงในระบบพลังงานความร้อนทั่วไป โดยเฉพาะระบบผลิตความร้อนขนาดเล็กถึงขนาดกลาง ดังนั้น ศักยภาพพลังงานความร้อนจากชีวมวล (Heat Capacity of Biomass, $Q_{Biomass}$) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$Q_{Biomass} (MJ) = M_{Biomass} (kg) \cdot LHV_{Biomass} (MJ/kg) \quad (3)$$

3.3 การปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้

การปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ (Haze Pollutant Emission, E_p) สามารถประเมินได้จากอัตรากิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้เชื้อเพลิงเพื่อเผาไหม้ (Activity Rate, AR) ซึ่งหมายถึงปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้หรือพลังงานที่ผลิตได้ ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยสารมลพิษ (Pollutant Emission Factor, EF_p) ดังแสดงในสมการที่ 4 เมื่อ p คือ ประเภทของสารมลพิษที่สนใจศึกษา และ i คือ ประเภทของกิจกรรมที่สนใจศึกษา

$$E_{i,p} (kg_p) = AR_i (Unit) \cdot EF_{i,p} (kg_p/Unit) \quad (4)$$

การใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงทดแทนประเภทชีวมวลภายใต้ระบบควบคุม พลังงานความร้อนที่ได้จากกระบวนการสามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพในรูปของพลังงานความร้อนโดยตรง จึงสามารถอ้างอิงอัตรากิจกรรมด้วยค่าพลังงานความร้อนจากชีวมวล ($AR_{Biomass} = Q_{Biomass}$) ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยมลพิษต่อหน่วยพลังงาน เพื่อประเมินสารมลพิษดังแสดงในสมการที่ 5

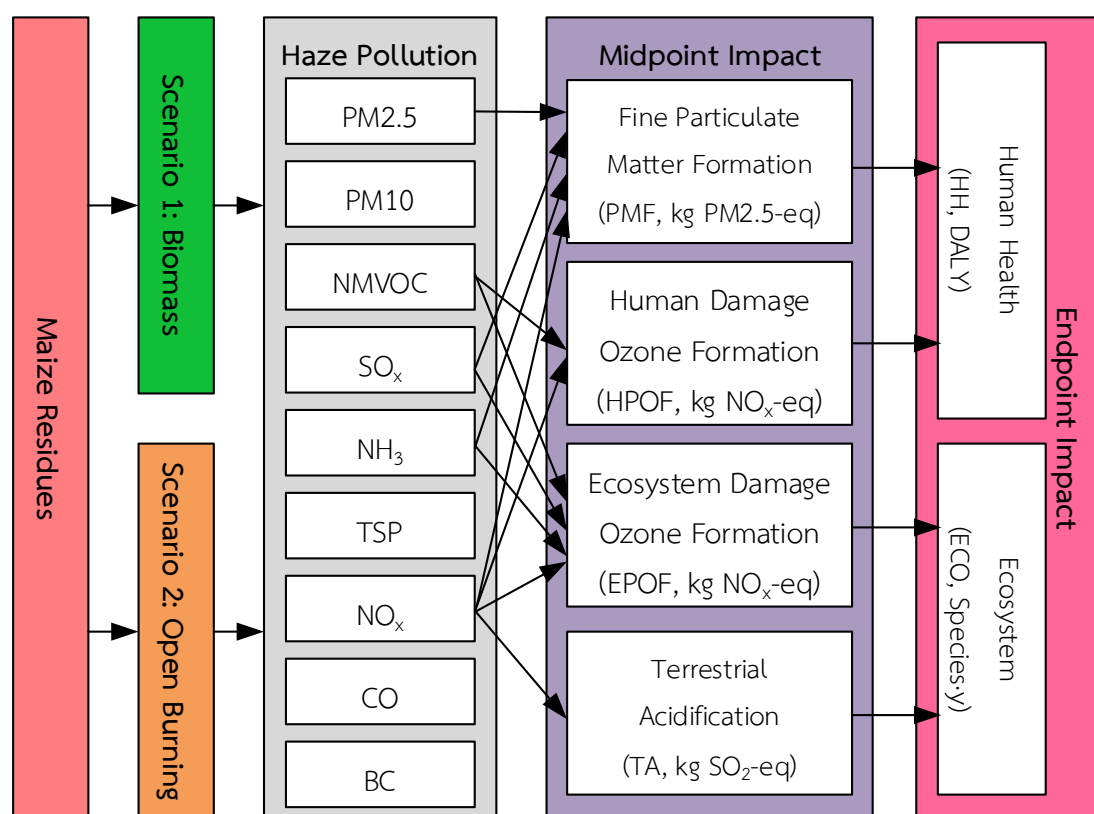
$$E_{Biomass,p} (kg_p) = Q_{Biomass} (GJ) \cdot EF_{Biomass,p} (kg_p/GJ) \quad (5)$$

ขณะที่การเผาในที่โล่งสามารถประเมินการปลดปล่อยมลพิษโดยอ้างอิงปริมาณหรือมวลของชีวมวลที่ถูกเผา ($AR_{OpenBurning} = M_{Biomass}$) และค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยมลพิษต่อหน่วยมวลวัสดุชีวมวล ดังแสดงในสมการที่ 6

$$E_{OpenBurning,p} (kg_p) = M_{Biomass} (kg) \cdot EF_{OpenBurning,p} (kg_p/kg) \quad (6)$$

3.4 การวิเคราะห์ผลด้านสิ่งแวดล้อม

ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้หลักการประเมินตามแนวทางการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต ด้วยวิธี ReCiPe 2016 ประเมินผลกระทบในระดับชั้นกลาง (Midpoint) เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อม และระดับชั้นปลาย (Endpoint) เพื่อบ่งชี้ผลกระทบสุดท้ายต่อมนุษย์และระบบนิเวศ ซึ่งมีแนวคิดดังแสดงในรูปที่ 2 สารมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ทั้ง 2 เจริญไข จะถูกจำแนก (Classification) ไปยังหมวดหมู่ผลกระทบที่เกี่ยวข้อง เพื่อประเมินผลกระทบระดับชั้นกลาง ประกอบด้วย การก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Fine Particulate Matter Formation, PMF) การก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อสุขภาพมนุษย์ (Human Damage Ozone Formation, HPOF) การก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อระบบนิเวศ (Ecosystem Damage Ozone Formation, EPOF) และความเป็นกรดต่อระบบนิเวศบนบก (Terrestrial Acidification, TA) จากนั้นปริมาณของผลกระทบชั้นกลางจะถูกแปลงและถ่วงน้ำหนัก (Normalization and Weighting) เพื่อประเมินผลกระทบระดับชั้นปลาย ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (Human Health, HH) และผลกระทบต่อระบบนิเวศ (Ecosystem, ECO)



รูปที่ 2 แนวคิดการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมด้วยวิธี ReCiPe 2016

ผลกระทบสิ่งแวดล้อมระดับชั้นกลาง (Characterized Value of Midpoint Impact, $CV_{m,p}$) สามารถประเมินได้โดยการนำปริมาณสารมลพิษ ($E_{i,p}$) ซึ่งจำแนกตามชนิดของมลพิษ p และแหล่งกำเนิด i มาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงผลกระทบชั้นกลาง ($CF_{m,p,k}$) ของสารมลพิษ p ในหมวดหมู่ผลกระทบ k โดยผลลัพธ์ที่ได้จะถูกรวบรวมเป็นค่าผลกระทบในหมวดหมู่นั้น ๆ ในหน่วยกิโลกรัมเทียบเท่าสารอ้างอิง (kg Emission-eq) เช่น หมวดหมู่ผลกระทบของการก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PMF) สามารถคำนวณได้จากการนำปริมาณสารมลพิษที่มีศักยภาพในการก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาด 2.5 ไมครอนเมตร (PM2.5) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)

แอมโมเนีย (NH₃) และไนโตรสออกไซด์ (NO_x) มาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงผลกระทบ และรวมค่าทั้งหมดให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน คือ กิโลกรัมฝุ่นละอองขนาด 2.5 ไมครอนเทียบเท่า (kg PM_{2.5}-eq) เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในสมการที่ 7

$$CVm_k \text{ (kg Emission-eq)} = \sum (E_{i,p} [kg_p] \cdot CF_{m,pk} [kg \text{ Emission-eq}/kg_p]) \quad (7)$$

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมชั้นปลาย (Characterized Value of Endpoint Impact, CV_{e,j}) เป็นขั้นตอนต่อเนื่องจากการประเมินผลกระทบชั้นกลาง โดยนำค่าผลกระทบชั้นกลาง (CV_{m,k}) ในแต่ละหมวดหมู่ผลกระทบ k มาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงผลกระทบชั้นปลาย (CF_{e,kj}) ของหมวดหมู่ผลกระทบ k สู่ผลกระทบชั้นปลาย j โดยผลลัพธ์จะถูกนำเสนอในรูปของหน่วยที่สื่อถึงผลกระทบโดยตรง ประกอบด้วย ผลกระทบชั้นปลายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (HH) แสดงในหน่วยจำนวนปีสุขภาพที่สูญเสียสุขภาพ (Disability Adjusted Life Years, DALY) และผลกระทบชั้นปลายต่อระบบนิเวศ (ECO) แสดงในหน่วยการความสูญเสียของความหลากหลายทางชีวภาพต่อปี (Species-y) เช่น ผลกระทบชั้นปลายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ สามารถคำนวณได้จากการนำค่าผลกระทบชั้นกลาง ได้แก่ การก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PMF) และการก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อสุขภาพมนุษย์ (HPOF) มาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงผลกระทบ และรวมค่าทั้งหมดให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน คือ ปีสุขภาพที่สูญเสียสุขภาพ (DALY) เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในสมการที่ 8

$$CVe_j \text{ (Unit)} = \sum (CVm_k [kg \text{ Emission-eq}] \cdot CF_{e,kj} [\text{Unit}/kg \text{ Emission-eq}]) \quad (8)$$

4. การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

4.1 รวบรวมข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก ผลผลิต และเศษวัสดุเหลือทิ้ง

รวบรวมข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก ผลผลิต และเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยอ้างอิงจากหน่วยงานภาครัฐหรือแหล่งข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ ได้แก่ สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดเชียงใหม่ เพื่อประเมินศักยภาพวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และวิเคราะห์อัตราส่วนวัสดุเหลือทิ้งต่อผลผลิต (Residue-to-Product Ratio, RPR) โดยข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรต้นสำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

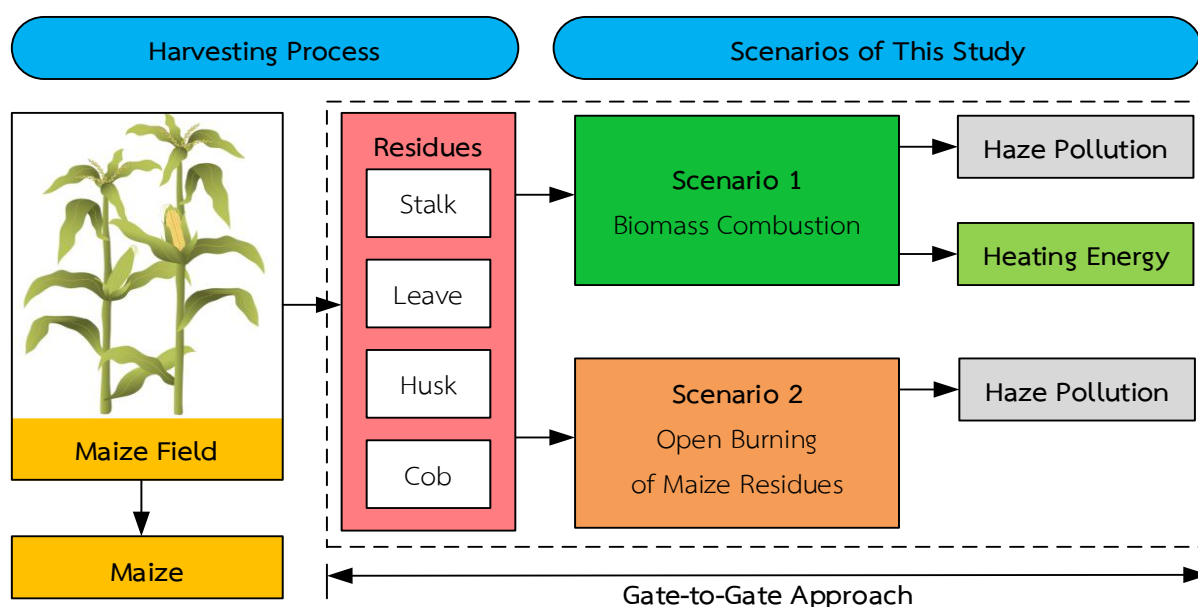
4.2 วิเคราะห์ผลด้านพลังงาน

รวบรวมข้อมูลคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงเคมีของวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ประกอบด้วย ค่าความชื้น องค์ประกอบธาตุหลัก (เช่น คาร์บอนและไนโตรเจน) ค่าความร้อนจำเพาะ และปริมาณเถ้า ซึ่งการวิเคราะห์จะดำเนินการโดยอ้างอิงจากข้อมูลเชิงวิชาการในวรรณกรรมและรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อประเมินศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งของการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สำหรับการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลผลิตพลังงานความร้อน

4.3 วิเคราะห์ผลด้านสิ่งแวดล้อม

ทำการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต กำหนดขอบเขตการศึกษาแบบเกต-ทู-เกต (Gate-to-Gate) ดังแสดงในรูปที่ 3 พิจารณาตั้งแต่วัสดุเหลือทิ้งจากการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ถูกเผาไหม้ภายใต้ 2 เงื่อนไข คือ การใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานความร้อนในระบบเผาไหม้แบบควบคุม และการเผาไหม้ในที่โล่ง ซึ่งเป็นวิธีปฏิบัติดั้งเดิมตามวิถีชุมชนในบางพื้นที่ เพื่อกำจัดเศษวัสดุเหลือทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวผล

ผลผลิต โดยสารมลพิษที่ปลดปล่อยจากกระบวนการเผาไหม้ในแต่ละเงื่อนไขจะถูกคำนวณโดยอ้างอิงค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยสารมลพิษ ตามแนวทางจัดทำบัญชีรายการปล่อยมลพิษทางอากาศ ของสำนักงานสิ่งแวดล้อมแห่งยุโรป [19] ซึ่งเป็นแนวทางมาตรฐานสากลในการจัดทำข้อมูลรายการมลพิษทางอากาศ โดยเงื่อนไขที่ 1 จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยมลพิษของการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับระบบเผาไหม้ขนาดเล็ก (ไม่เกิน 50 kW) เพื่อผลิตพลังงานความร้อนในระดับชุมชนหรือระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อมในลักษณะที่มีการควบคุมกระบวนการเผาไหม้ [21] สำหรับเงื่อนไขที่ 2 จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยมลพิษของการเผาในที่โล่งของเศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ [22] จากนั้นสารมลพิษทางอากาศที่ได้จากการคำนวณในแต่ละเงื่อนไขจะถูกนำมาวิเคราะห์ผลกระทบต่อด้านสิ่งแวดล้อมในสองระดับ คือ ผลกระทบระดับชั้นกลางและผลกระทบระดับชั้นปลาย โดยใช้วิธีการประเมินผลกระทบแบบ ReCiPe 2016 [20] ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลสำหรับการแปลงข้อมูลการปลดปล่อยมลพิษเป็นค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแปลงผลกระทบในแต่ละหมวดหมู่ โดยกำหนดหน่วยหน้าที่การทำงาน (Functional Unit) ของการศึกษาเท่ากับ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จำนวน 1 kg เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมระหว่างสองเงื่อนไข



รูปที่ 3 ขอบเขตการศึกษาด้านสิ่งแวดล้อม

5. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

5.1 รวบรวมข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก ผลผลิต และเศษวัสดุเหลือทิ้ง

จากข้อมูลของสำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดเชียงใหม่เกี่ยวกับการบริหารจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร พบว่า ในปี พ.ศ. 2566-2567 มีวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จำนวน 731,910.66 ตัน จากปริมาณผลผลิต 255,620 ตัน บนพื้นที่เพาะปลูกรวม 269,415 ไร่ เทียบเท่าผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 950 กิโลกรัมต่อไร่ [4] ซึ่งสามารถคำนวณอัตราส่วนวัสดุเหลือทิ้งต่อผลผลิตได้เท่ากับ 2.86:1 ใกล้เคียงกับรายงานการศึกษาโดย Supasri และ Sampattagul [23] ที่ได้ประเมินสถานการณ์การผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดเชียงใหม่เมื่อปี พ.ศ. 2559 โดยพบว่าวัสดุเหลือทิ้งประมาณ 253,063 ตัน จากผลผลิต 121,665 ตัน หรือคิดเป็นอัตราส่วนวัสดุเหลือทิ้งต่อผลผลิตเท่ากับ 2.08:1 จากข้อมูลทั้งสองชุดจะเห็นว่า การผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ส่งผลให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งในปริมาณมากกว่า 2

เท่าของผลผลิตหลัก สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งในการนำไปใช้ประโยชน์ สอดรับเป้าหมายยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี ในมิติการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะชีวมวลจากภาคเกษตร [24] ดังนั้นการจัดการปัญหาวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จึงควรดำเนินการภายใต้กลไกความร่วมมือแบบบูรณาการระหว่างหน่วยงานภาครัฐในระดับท้องถิ่น เช่น องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) และสำนักงานเกษตรจังหวัด ร่วมกับภาคเอกชนที่มีศักยภาพในการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้ง เพื่อพัฒนาให้เกิดระบบบริหารจัดการอย่างเป็นระบบ ครอบคลุมตั้งแต่ต้นทาง (แหล่งผลิต) จนถึงปลายทาง (การใช้ประโยชน์) อันจะนำไปสู่เกษตรกรรมที่ยั่งยืนในระดับจังหวัดอย่างเป็นรูปธรรม

5.2 วิเคราะห์ผลด้านพลังงาน

จากข้อมูลขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) ภายใต้โครงการความร่วมมือระหว่างประเทศในเอเชีย เพื่อส่งเสริมการใช้พลังงานจากไม้และชีวมวลอย่างยั่งยืน [25] ได้มีการรายงานงานขององค์ประกอบทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ดังแสดงในตารางที่ 1 ส่วนของลำต้นและใบเป็นองค์ประกอบหลักที่มีสัดส่วนของวัสดุเหลือทิ้งมากที่สุด ด้านค่าความชื้น (Moisture Content, MC) พบว่า ลำต้นและใบมีความชื้นสูงที่สุด ขณะที่ข้าวโพดมีค่าความชื้นต่ำกว่าส่วนอื่นอย่างชัดเจน ในด้านองค์ประกอบทางเคมีพบว่า วัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีสัดส่วนของคาร์บอน (Carbon, C) เฉลี่ยที่ 45.12% และสัดส่วนของไนโตรเจน (Nitrogen, N) เฉลี่ยที่ 8.55% ซึ่งสะท้อนถึงคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากมีสัดส่วนคาร์บอนสูงกว่าไนโตรเจน เมื่อพิจารณาค่าความร้อนต่ำพบว่ามีความเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 17.15 MJ/kg ใกล้เคียงกับค่าความร้อนของชีวมวลทั่วไป เช่น ฟางข้าว (14–17 MJ/kg) กากอ้อยและใบอ้อย (10–18 MJ/kg) เป็นต้น ซึ่งจากข้อมูลเชิงปริมาณพบว่า วัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดเชียงใหม่มีปริมาณสูงมาก เมื่อเทียบกับชีวมวลจากพืชชนิดอื่น โดยคิดเป็นสัดส่วนถึง 68% ของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้งหมดในพื้นที่ [4] จึงสามารถสรุปได้ว่าวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นแหล่งพลังงานชีวมวลหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง ทั้งในเชิงปริมาณและคุณลักษณะทางพลังงาน ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปใช้ผลิตพลังงานทดแทน นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณเถ้า (Ash Content) เฉลี่ยของเศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อยู่ที่ประมาณ 7.68% ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลชนิดอื่น เช่น ฟางข้าว มีค่าเฉลี่ยของปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 10–25% เป็นต้น

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีความร้อน [25]

ประเภท	สัดส่วน (RPR, %)	ความชื้น (MC, %)	คาร์บอน (C, %)	ไนโตรเจน (N, %)	ค่าความร้อน (LHV, MJ/kg)	เถ้า (Ash, %)
ลำต้นและใบ	1.00-2.50	11.50-22.00	47.09	0.81	19.66	5.77-14.20
ชัง	0.20-1.80	7.00-8.60	43.14	16.28	14.64-16.28	2.40-13.8
เปลือก	0.20-1.00	11.11	n/a	n/a	n/a	1.15
ค่าต่ำสุด		7.00	43.14	0.81	14.64	1.15
ค่าสูงสุด		22.00	47.09	16.28	19.66	14.20
ค่าเฉลี่ย		14.50	45.12	8.55	17.15	7.68

หมายเหตุ: n/a คือ ไม่ปรากฏการรายงานข้อมูล

จากข้อมูลองค์ประกอบทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี พบว่า เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีศักยภาพเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในกระบวนการแปรรูปทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีความพร้อมสูง ทั้งในด้านการดำเนินการและการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับ

ชุมชนหรืออุตสาหกรรมขนาดเล็กถึงขนาดกลาง เนื่องจากมีต้นทุนเริ่มต้นต่ำ ติดตั้งและใช้งานได้ง่าย อีกทั้งสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงสภาพวัสดุที่ซับซ้อน ซึ่งจากข้อมูลเชิงปริมาณของชีวมวลเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดเชียงใหม่ ในปีการผลิต พ.ศ. 2566-2567 พบว่า เศษวัสดุเหลือทิ้งหรือปริมาณชีวมวล (M_{Biomass}) จำนวน 731,910.66 ตัน (731,910,660 kg) เมื่อคูณกับค่าความร้อนต่ำ (LHV) เท่ากับ 17.15 MJ/kg จะได้ศักยภาพพลังงานความร้อนรวมจากชีวมวล (Q_{Biomass}) เท่ากับ 12,552,267.82 GJ และเมื่อพิจารณาร่วมกับบริบทเชิงนโยบายด้านพลังงานของประเทศและมาตรการส่งเสริมจากภาครัฐในปัจจุบัน ซึ่งมุ่งเน้นการใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อเสริมความมั่นคงด้านพลังงานในระดับท้องถิ่น [26] เทคโนโลยีการเผาไหม้ชีวมวลจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม

5.3 วิเคราะห์ผลด้านสิ่งแวดล้อม

ผลการประเมินศักยภาพพลังงานความร้อนรวมของชีวมวล เท่ากับ 12,552,267.82 GJ และข้อมูลปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เท่ากับ 731,910.66 ตัน จะถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณสารมลพิษจากการเผาไหม้ ภายใต้สองเงื่อนไข ได้แก่ (1) การใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในระบบเผาไหม้ขนาดเล็กที่มีการควบคุมการเผาไหม้ เช่น ในระดับชุมชนหรืออุตสาหกรรมขนาดย่อม และ (2) การเผาไหม้ในที่โล่ง ซึ่งเป็นแนวทางปฏิบัติทั่วไปของเกษตรกรบางพื้นที่ เพื่อกำจัดเศษวัสดุหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต ผลการประเมินปริมาณสารมลพิษดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าการใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในระบบเผาไหม้ขนาดเล็กที่มีการควบคุม สามารถลดการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศได้อย่างชัดเจน โดยมีมวลรวมของสารมลพิษเท่ากับ 18,367.73 ตัน ขณะที่กรณีการเผาไหม้ในที่โล่งปลดปล่อยมลพิษรวม 49,755.29 ตัน ส่งผลให้สามารถลดปริมาณการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศได้ 31,387.55 ตัน คิดเป็นอัตราการลดลง 63.08% เมื่อเทียบกับการเผาไหม้ในที่โล่ง ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการจัดการเศษวัสดุเหลือทิ้งด้วยการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในระบบเผาไหม้ที่มีการควบคุม มีศักยภาพในการลดมลพิษทางอากาศได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการเผาในที่โล่ง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ยังพบว่า สารมลพิษประเภทแอมโมเนียลดลงได้มากที่สุด โดยคิดเป็นสัดส่วนการลดลงเท่ากับ 99.29% เมื่อเทียบกับการเผาในที่โล่ง เนื่องจากการเผาไหม้ภายใต้ระบบควบคุมสามารถรักษาอุณหภูมิและอัตราการจ่ายอากาศให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ส่งผลให้ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซไนโตรเจนแทนการเกิดแอมโมเนีย ในขณะที่การเผาไหม้ในที่โล่งซึ่งปราศจากการควบคุมเงื่อนไขสำคัญ เช่น อุณหภูมิและออกซิเจน จึงก่อให้เกิดสภาวะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้มีการปลดปล่อยแอมโมเนียในปริมาณสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bray et al. [27] พบว่า การเผาไหม้ชีวมวลที่ไม่สมบูรณ์เป็นแหล่งสำคัญของการปล่อยแอมโมเนีย นอกจากนี้ผลการประเมินยังชี้ให้เห็นว่าสารมลพิษประเภทคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 μm (PM10) ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm (PM2.5) คาร์บอนดำ (BC) ฝุ่นแขวนลอยรวม (TSP) มีปริมาณการปลดปล่อยลดลงมากกว่า 50% ของปริมาณที่เกิดจากการเผาในที่โล่ง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการควบคุมกระบวนการเผาไหม้ช่วยลดการก่อตัวและการปลดปล่อยสารมลพิษทางอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 ปริมาณสารมลพิษทางอากาศ

ประเภทสารมลพิษ	สารมลพิษ (ตัน)			มลพิษที่ลดลง เทียบกับการเผา ในที่โล่ง (%)
	สถานการณ์ 1 เชื้อเพลิงชีวมวล	สถานการณ์ 2 เผาไหม้ในที่โล่ง	ผลต่าง	
แอมโมเนีย (NH_3)	12.55	1,756.59	1,744.03	99.29
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	7,154.79	28,398.13	21,243.34	74.81
ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 μm (PM10)	2,046.02	4,537.85	2,491.83	54.91
ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm (PM2.5)	2,008.36	4,391.46	2,383.10	54.27

ประเภทสารมลพิษ	สารมลพิษ (ตัน)			มลพิษที่ลดลง เทียบกับการเผา ในที่โล่ง (%)
	สถานการณ์ 1 เชื้อเพลิงชีวมวล	สถานการณ์ 2 เผาไหม้ในที่โล่ง	ผลต่าง	
คาร์บอนดำ (BC)	562.34	1,229.61	667.27	54.27
ฝุ่นแขวนลอยรวม (TSP)	2,133.89	4,611.04	2,477.15	53.72
ไนโตรเจนออกไซด์ (NO _x)	1,142.26	1,317.44	175.18	13.30
สารอินทรีย์ระเหยที่ก่อให้เกิดโอโซน (NMVOC)	3,169.45	3,366.79	197.34	5.86
ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO _x)	138.07	146.38	8.31	5.68
รวมทั้งหมด	18,367.73	49,755.29	31,387.55	63.08

ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบเชื้อเพลิงชีวมวลแทนการเผาไหม้ในที่โล่งต่อหน่วยพื้นที่การทำงาน (ต่อ 1 kg ของวัสดุเหลือทิ้ง) เพื่อเปรียบเทียบการจัดการวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดบนฐานที่เทียบเคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าแนวทางดังกล่าวสามารถลดการก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PMF) เท่ากับ 3.86×10^{-3} kg PM2.5-eq/kg ลดการก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อสุขภาพมนุษย์ (HPOF) เท่ากับ 2.88×10^{-4} kg NO_x-eq/kg ลดการก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อระบบนิเวศ (EPOF) เท่ากับ 5.00×10^{-3} kg NO_x-eq/kg และลดความเป็นกรดต่อระบบนิเวศบนบก (TA) เท่ากับ 8.62×10^{-5} kg NO_x-eq/kg โดยคิดเป็นการลดผลกระทบชั้นปลายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (HH) เท่ากับ 2.43×10^{-6} DALY/kg และการลดผลกระทบต่อระบบนิเวศ (ECO) เท่ากับ 6.63×10^{-10} Species-y/kg ซึ่งชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในรูปแบบเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับการเผาไหม้ในที่โล่ง นอกจากนี้ เมื่อดำเนินการประเมินด้านเศรษฐศาสตร์โดยแปลงค่าผลกระทบชั้นปลายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์เป็นต้นทุนทางเศรษฐกิจ (Monetary Valuation) โดยใช้หลักเกณฑ์ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของนโยบายหรือมาตรการด้านสุขภาพ ตามแนวทางขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization – Choosing Interventions that are Cost Effective, WHO-CHOICE) ซึ่งเสนอให้ใช้ค่าเทียบเท่า 3 เท่าของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศต่อหัวประชากร (GDP per Capital) ต่อ 1 DALY เป็นเกณฑ์ในการประเมินความคุ้มค่าของนโยบายด้านสุขภาพ [28] ซึ่งในปี พ.ศ. 2567 ประเทศไทยมีค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศต่อหัวประชากร เท่ากับ 7,496 USD หรือประมาณ 254,264.32 บาท [29] ดังนั้นมูลค่าทางเศรษฐกิจของ 1 DALY คิดเป็น 762,792.96 บาท เมื่อพิจารณาผลกระทบต่อสุขภาพที่ลดลงจากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเท่ากับ 2.43×10^{-6} DALY/kg จะเทียบเท่ากับมูลค่าความเสียหายที่สามารถหลีกเลี่ยงได้ประมาณ 3.28 บาทต่อกิโลกรัมของวัสดุเหลือทิ้ง ซึ่งสะท้อนถึงต้นทุนทางสุขภาพที่สามารถลดลงผ่านการจัดการชีวมวลอย่างยั่งยืน

แม้ว่าการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบเชื้อเพลิงชีวมวลจะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพด้านพลังงานและความสามารถในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับการเผาในที่โล่ง แต่ในทางปฏิบัติกลับพบว่าการประยุกต์ใช้แนวทางดังกล่าวยังไม่แพร่หลายในระดับพื้นที่ เนื่องจากอุปสรรคและข้อจำกัดหลายประการทั้งในเชิงโครงสร้าง เศรษฐกิจ และนโยบาย อาทิ ข้อจำกัดด้านการเก็บรวบรวมและขนส่ง เนื่องจากมีการกระจายตัวตามพื้นที่การเพาะปลูก การขาดแรงจูงใจทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากไม่มีระบบสนับสนุนราคาหรือเงินอุดหนุนให้กับผู้ผลิตหรือผู้ใช้ชีวมวล รวมถึงความรู้ ความเข้าใจและการมีส่วนร่วมของเกษตรกรและชุมชน ดังนั้นเพื่อให้เกิดการส่งเสริมการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอย่างเป็นรูปธรรม จำเป็นต้องมีการดำเนินการในระดับนโยบายอย่างบูรณาการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดำเนินงานให้สอดคล้องกับ

ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580) ในมิติการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [24] และ แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 ที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและการส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียน [30] ซึ่งแนวทางที่ควรได้รับการส่งเสริมในเชิงนโยบาย ได้แก่ การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน สำหรับการจับเก็บ แปรรูป และขนส่งชีวมวลในระดับท้องถิ่น การส่งเสริมแรงจูงใจทางเศรษฐกิจโดยอุดหนุนราคาหรือภาษี สนับสนุนสำหรับการใช้พลังงานชีวมวล การพัฒนาองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยี บูรณาการนโยบายพลังงานและสิ่งแวดล้อม เพื่อสร้างระบบการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน

ตารางที่ 3 ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่ลดลงต่อหน่วยเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 1 kg

ผลกระทบชั้นกลาง		ผลกระทบชั้นปลาย	
		ผลกระทบต่อสุขภาพ อนามัยของมนุษย์ (HH, DALY)	ผลกระทบต่อ ระบบนิเวศ (ECO, Species-y)
การก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PMF, kg PM _{2.5} -eq)	3.86×10^{-3}	2.43×10^{-6}	0
การก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อ สุขภาพมนุษย์ (HPOF, kg NO _x -eq)	2.88×10^{-4}	2.62×10^{-10}	0
การก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อ ระบบนิเวศ (EPOF, kg NO _x -eq)	5.00×10^{-3}	0	6.45×10^{-10}
ความเป็นกรดต่อระบบนิเวศบนบก (TA, kg SO _x -eq)	8.62×10^{-5}	0	1.83×10^{-11}
รวมขนาดผลกระทบ	9.23×10^{-3}	2.43×10^{-6}	6.63×10^{-10}

6. สรุป

ผลการประเมินศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทางเลือกเพื่อลดหมอกควัน ในจังหวัดเชียงใหม่ เปรียบเทียบระหว่างการนำวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในระบบที่มีการควบคุม กับการเผาไหม้ในที่โล่ง ซึ่งเป็นวิธีปฏิบัติดั้งเดิมของเกษตรกร มีผลลัพธ์ที่สำคัญดังนี้

- เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของจังหวัดเชียงใหม่ในปีการผลิต พ.ศ. 2566-2567 มีปริมาณรวมทั้งสิ้น 1,159,316.84 ตัน โดยเศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีเท่ากับ 731,910.66 ตัน คิดเป็น 63% ของปริมาณรวมของเศษวัสดุเหลือทิ้ง
- เศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลด้านพลังงานความร้อน เท่ากับ 12,552,267.82 GJ และมีค่าความร้อนต่ำ ประมาณ 17.15 MJ/kg
- มวลรวมของมลพิษที่เกิดจากการนำเศษข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เท่ากับ 18,367.73 ตัน ขณะที่การเผาในที่โล่งมีมวลรวมมลพิษ เท่ากับ 49,755.29 ตัน คิดเป็นมลพิษทางอากาศที่สามารถลดลงได้เท่ากับ 31,387.55 ตัน หรือสัดส่วนของมลพิษที่สามารถลดลงได้ เท่ากับ 63.08%
- ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมชั้นกลาง สามารถลดการก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PMF) เท่ากับ 3.86×10^{-3} kg PM_{2.5}-eq/kg ลดการก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อสุขภาพมนุษย์ (HPOF) เท่ากับ 2.88×10^{-4} kg NO_x-eq/kg ลดการก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อระบบนิเวศ (EPOF) เท่ากับ 5.00×10^{-3} kg NO_x-eq/kg และลดความเป็นกรดต่อระบบนิเวศบนบก (TA) เท่ากับ 8.62×10^{-5} kg NO_x-eq/kg

- ผลกระทบชั้นปลาย สามารถลดผลกระทบชั้นปลายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (HH) เท่ากับ 2.43×10^{-6} DALY/kg และการลดผลกระทบต่อระบบนิเวศ (ECO) เท่ากับ 6.63×10^{-10} Species-y/kg

7. ข้อเสนอแนะ

แม้การนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในระบบเผาไหม้ที่มีการควบคุมจะสามารถลดมลพิษทางอากาศและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับการเผาในที่โล่ง อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมมีความครอบคลุมและสะท้อนความเป็นจริงของระบบ ควรมีการศึกษาผลกระทบเพิ่มเติมในประเด็นการจัดการเศษวัสดุชีวมวลในระดับห่วงโซ่อุปทาน เช่น ขั้นตอนการเก็บรวบรวม การแปรรูปเบื้องต้น การขนส่ง รวมถึงการแปรรูปเป็นพลังงาน เป็นต้น เพื่อรายงานผลกระทบได้ในทุกระบวนการของระบบ นอกจากนี้ควรศึกษาวิจัยในมิติด้านนโยบาย เพื่อวิเคราะห์กรอบกฎหมาย มาตรการจูงใจทางเศรษฐศาสตร์ และบทบาทของภาครัฐในแต่ละระดับที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อเสนอแนวทางเชิงนโยบายที่เอื้อต่อการขยายผลและประยุกต์ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในระดับพื้นที่อย่างยั่งยืน

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดเชียงใหม่ สำหรับการจัดทำข้อมูลปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของจังหวัดในรายงานข้อมูลพื้นฐานของจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นแหล่งข้อมูลสำคัญที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์และประเมินศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลในงานวิจัยฉบับนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ, “ข้อมูลย้อนหลัง (รายปี): สถานการณ์หมอกควัน (ภาคเหนือ) ปี พ.ศ. 2567,” Air4Thai: ระบบรายงานคุณภาพอากาศประเทศไทย [ออนไลน์]. Available: <http://air4thai.pcd.go.th/webV3/#/History> (เข้าถึงเมื่อ: 28 พฤษภาคม 2568).
- [2] สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), “ASIA-AQ บินเก็บคุณภาพอากาศ..เติมเต็มข้อมูล-ตอบโจทย์แหล่งที่มา PM 2.5,” [ออนไลน์]. Available: https://www.gistda.or.th/news_view.php?n_id=8474&lang=EN (เข้าถึงเมื่อ: 28 พฤษภาคม 2568).
- [3] P. Ponsawansong et al., “Sources of PM_{2.5} oxidative potential during haze and non-haze seasons in Chiang Mai, Thailand,” *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 23, no. 10, pp. 1-17, October, 2023.
- [4] สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดเชียงใหม่, “ข้อมูลพื้นฐานของจังหวัดเชียงใหม่,” [ออนไลน์]. Available: https://www.opsmoac.go.th/chiangmai-dwl-files-461691791926?utm_source=chatgpt.com (เข้าถึงเมื่อ: 28 พฤษภาคม 2568).
- [5] G. Ruggeri, C. Mazzocchi, E. De Marchi, A. Banterle, and G. Sali, “Provincial assessment of agricultural biomass residues for renewable energy in Italy,” *Energy Reports*, vol. 13, pp. 2946–2957, June, 2025.
- [6] M. Pradeep, N. L. Panwar, and N. Divyangkumar, “Torrefaction of agricultural biomass: A state-of-the-art review on transforming waste into clean energy,” *Energy 360*, vol. 3, pp. 1-17, June, 2025.

- [7] M. Cortazar et al., “A comprehensive review of primary strategies for tar removal in biomass gasification,” *Energy Conversion and Management*, vol. 276, pp.1-36, January, 2023.
- [8] J. Zhu, X. Fei, and K. Yin, “Assessment of waste-to-energy conversion technologies for biomass waste under different shared socioeconomic pathways,” *Energy & Environmental Sustainability*, vol. 1, no. 2, pp. 1-10, June, 2025.
- [9] W. H. Chen et al., “Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 82, pp. 1-34, January, 2021.
- [10] S. S. Siwal, K. Sheoran, A. K. Saini, D. V. N. Vo, Q. Wang, and V. K. Thakur, “Advanced thermochemical conversion technologies used for energy generation: Advancement and prospects,” *Fuel*, vol. 321, August, 2022.
- [11] L. J. Nunes, J. C. D. O. Matias, and J. P. D. S. Catalão, *Torrefaction of biomass for energy applications: from fundamentals to industrial scale*, 1st ed. Amsterdam, The Netherlands: Academic Press, 2017.
- [12] W. H. Chen, J. Peng, X. T. Bi, “A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 847-866, April, 2015.
- [13] M. P. P. Granado, A. M. T. Gadelha, D. S. Rodrigues, G. C. Antonio, and A. C. De Conti, “Effect of torrefaction on the properties of briquettes produced from agricultural waste,” *Bioresource Technology Reports*, vol. 21, February, 2023.
- [14] A. Kinyar and K. Bothongo, “The impact of natural gas, biomass, and energy from waste on CO₂ and PM_{2.5} emissions in the UK: Does eco-innovation matter?,” *Renewable Energy*, vol. 249, August, 2025.
- [15] F. Bilgili, E. Koçak, Ü. Bulut, and S. Kuşkaya, “Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development?,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 830–845, May, 2017.
- [16] R. Ulucak, “Linking biomass energy and CO₂ emissions in China using dynamic Autoregressive-Distributed Lag simulations,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 250, March, 2020.
- [17] C. Sulaiman, A. S. Abdul-Rahim, and C. A. Ofozor, “Does wood biomass energy use reduce CO₂ emissions in European Union member countries? Evidence from 27 members,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 253, April, 2020.
- [18] Y. Shen, S. Sun, S. Yun, and L. Huang, “Impacts of biomass power generation on ambient air quality–evidence from China,” *Applied Economics Letters*, vol. 31, no. 16, pp. 1494–1498, March, 2024.
- [19] European Environment Agency (EEA), “*EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023*.” [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023> (Accessed: May. 25, 2025).

- [20] M. A. J. Huijbregts et al., “ReCiPe 2016 v1.1: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization.” [Online]. Available: https://www.rivm.nl/sites/default/files/2018-11/Report%20ReCiPe_Update_20171002_0.pdf (Accessed: May. 25, 2025).
- [21] European Environment Agency (EEA), “1.A.4 Small combustion.” [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-small-combustion-2023/view> (Accessed: May. 25, 2025).
- [22] European Environment Agency (EEA), “3.F Field burning of agricultural residues.” [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/3-agriculture/3-f-field-burning-of/view> (Accessed: May. 25, 2025).
- [23] T. Supasri and S. Sampattagul, “Attributional and consequential life cycle assessment for biomass energy production from maize cob in Chiang Dao district,” *Thai Environmental Engineering Journal*, vol. 33, no. 1, pp. 11–19, January-April, 2019.
- [24] สำนักงานเลขาธิการของคณะกรรมการยุทธศาสตร์ชาติ และสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, “ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561-2580,” [ออนไลน์]. Available: https://www.nesdc.go.th/download/document/SAC/NS_SumPlanOct2018.pdf (เข้าถึงเมื่อ: 16 กรกฎาคม 2568).
- [25] A. Koopmans and J. Koppejan, “Agricultural and forest residues – generation, utilization and availability.” [Online]. Available: <https://www.fao.org/4/ad576e/ad576e00.pdf> (Accessed: May. 20, 2025).
- [26] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, “แผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580,” [ออนไลน์]. Available: https://www.eppo.go.th/images/Information_service/public_relations/PDP2018/PDP2018Rev1.pdf (เข้าถึงเมื่อ: 29 พฤษภาคม 2568).
- [27] C. D. Bray, W. Battye, V. P. Aneja, D. Q. Tong, P. Lee, and Y. Tang, “Ammonia emissions from biomass burning in the continental United States,” *Atmospheric Environment*, vol. 187, pp. 50–61, August, 2018.
- [28] R. Daroudi, A. A. Sari, A. Nahvijou, and A. Faramarzi, “Cost per DALY averted in low, middle- and high-income countries: evidence from the global burden of disease study to estimate the cost-effectiveness thresholds,” *Cost Effectiveness and Resource Allocation*, vol. 19, no. 7, February, 2021.
- [29] Thailand Board of Investment, “Macroeconomics: Facts about Thailand.” [Online]. Available: <https://www.boi.go.th/index.php?page=macroeconomics> (Accessed: July. 2, 2025).
- [30] สภาพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, “ร่างแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13,” [ออนไลน์]. Available: https://www.nesdc.go.th/download/Plan13/Doc/Plan13_DraftFinal.pdf (เข้าถึงเมื่อ: 2 กรกฎาคม 2568).