

การประเมินศักยภาพระบบผลิตพลังงานร่วมผสมผสานจากพลังงานขยะ
และแสงอาทิตย์: กรณีศึกษา อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
Potential assessment of a hybrid multigeneration system from
waste-solar energy: case study Mae Moh District, Lampang Province

ศักราช ความหมั่น¹ และนัฐพร ไชยญาติ^{2*}

Sakkarat Khwamman¹ and Nattaporn Chaiyat^{2*}

^{1,2*}วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ห้องวิจัยการออกแบบและเทคโนโลยีด้านอุณหภาพ

^{1,2*}School of Renewable Energy, Maejo University

Thermal Design and Technology Laboratory (TDeT Lab)

E-mail: benz178tii@hotmail.com

วันที่รับบทความ 28 กันยายน 2567

วันที่รับแก้ไขบทความ 18 ธันวาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 19 ธันวาคม 2567

Received: Sep. 28, 2024

Revised: Dec. 18, 2024

Accepted: Dec. 19, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบด้านพลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตพลังงานร่วมผสมผสานจากพลังงานขยะและแสงอาทิตย์ในเขตพื้นที่ ตำบลแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีปริมาณขยะมูลฝอยเกิดขึ้น 17.85 Ton/d คิดเป็นสัดส่วนปริมาณขยะที่เผาไหม้ได้ ร้อยละ 31.63 ถูกนำไปใช้สำหรับการผลิตความร้อนในรูปของของไหลร้อนอุณหภูมิ 110 °C ป้อนให้แก่วัฏจักรแรงดันอินทรีย์แบบ 2 stage ความสามารถในการผลิตไฟฟ้า 63.19 kW_e ความสามารถของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน 91.06 kW และห้องอบแห้งขยะความสามารถ การทำความร้อน 207.39 kW ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 847 kW_p โดยระบบผลิตพลังงานร่วมผสมผสานมีความสามารถในการผลิตพลังงานรวม (พลังงานไฟฟ้า ความเย็น และความร้อน) 5,211.44 kWh/d พลังงานไฟฟ้าสุทธิ 2,823.86 kWh/d และมีประสิทธิภาพร้อยละ 18.34 จากผลการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า ต้นทุนการผลิตพลังงานเท่ากับ 5.38 Baht/kWh มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 57,710,801.41 Baht และอัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 7.97 สามารถคืนทุน ภายในระยะเวลา 9.63 y การประเมินผลด้านสิ่งแวดล้อมแสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลง สภาพภูมิอากาศ 6.01E-02 kg CO₂ eq/kWh การเกิดภาวะเป็นพิษต่อมนุษย์ 5.04E-02 kg 1,4-DB eq/kWh และการลดลงของปริมาณแร่ธาตุ 1.74E-02 kg Fe eq/kWh ซึ่งเกิดจากใช้งานวัสดุประเภทคอนกรีต ทองแดง เหล็ก และยิปซัมที่เป็นวัสดุหลักจากก่อสร้างโรงงาน

คำสำคัญ: การเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน, วัฏจักรแรงดันอินทรีย์, ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน, ห้องอบแห้ง, ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

Abstract

This study presents the energy, economic, and environmental implications of a hybrid multigeneration system from waste-solar energy in the Mae Moh District of Lampang Province. The survey data imply a total municipal solid waste (MSW) generation of 17.85 Ton/d, with 31.63% of this being combustible waste. Combustion heat is used to produce hot fluid at 110 °C, supplied to a two-stage organic Rankine cycle generating 55.57 kW_e, an absorption chiller of 91.06 kW, a drying room of 207.39 kW, and a solar photovoltaic rooftop system of 847 kW_p. The hybrid multigeneration system shows a total energy output of 5,211.44 kWh/d, a net power output of 2,823.86 kWh/d, and an overall efficiency of 18.34%. A levelized energy cost of 5.38 Baht/kWh, a net present value of 57,710,801.41 Baht, an internal rate of return of 7.97%, and a payback period of 9.63 y are achieved from an economic perspective. The environmental impact assessment shows a climate change impact of 6.01E-02 kg CO₂ eq/kWh, human toxicity of 5.04E-02 kg 1,4-DB eq/kWh, and mineral resource depletion of 1.74E-02 kg Fe eq/kWh. These impacts are primarily driven from concrete, copper, steel, and gypsum in building construction.

Keywords: Waste to energy, Organic Rankine cycle, Absorption chiller, Drying room, Solar photovoltaic system

1. บทนำ

สถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทยในปัจจุบัน ตามรายงานของกรมควบคุมมลพิษ ปี พ.ศ. 2565 ระบุว่าขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นสูงถึง 25.70 million Ton และขยะมูลฝอยที่ยังไม่ได้รับการกำจัดอย่างถูกต้อง ขยะตกค้างจากปีที่ผ่านมาที่ยังรอการกำจัดรวม 17.01 million Ton (Pollution Control Department, 2022) ส่งผลให้เกิดมลพิษที่กระจายกระจายไปยังพื้นดิน แหล่งน้ำ และอากาศ และยังเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนรวมไปถึงการเสื่อมโทรมของระบบนิเวศ ดังนั้น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ร่วมกับเทศบาลตำบลแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จึงมีความพยายามในการนำขยะมูลฝอยมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีการเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน (Waste to energy: WtE) ร่วมกับการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนแบบอื่น ๆ เพิ่มเติมเพื่อเสริมสร้างศักยภาพในการผลิตพลังงาน และสอดคล้องกับเป้าหมายของแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศไทย พ.ศ. 2561 - 2580 (Ministry of Energy, 2022)

มีบทความวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน ที่เขียนด้วยนักวิจัยหลายท่านรวมถึง Markphan et al. (2021) ศึกษาการเกิดขยะของเทศบาลพรหมโลก จังหวัดนครราชสีมา ที่มีปริมาณขยะมูลฝอยเกิดขึ้นเฉลี่ย 3.47 Ton/d แบ่งเป็นขยะที่เผาได้ร้อยละ 43.33 ขยะที่เผาไม่ได้ร้อยละ 48.33 และขยะอื่น ๆ ร้อยละ 8.33 นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้ประโยชน์จากขยะในรูปแบบพลังงานความร้อน โดยงานวิจัยของ Chaibat (2021) และ Pokson and Chaibat (2024) เพื่อผลิตไฟฟ้าร่วมทำความเย็นและความร้อน (Combined cooling heating and power: CCHP)

ร่วมกับการกำจัดขยะติดเชื้อทางการแพทย์ที่บำบัดเชื้อด้วยไอน้ำ ป้อนให้แก่เตาเผาขยะ (Incinerator) ที่อัตราการไหลเชิงมวล 250 kg/h เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (Organic Rankine cycle: ORC) ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption chiller) และห้องอบแห้ง (Drying room) ความสามารถผลิตพลังงานรวม 33.63 kW มีประสิทธิภาพด้านพลังงานอยู่ที่ร้อยละ 13.40 และค่าต้นทุนไฟฟ้าต่อหน่วยที่ 11.45 Baht/kWh นอกจากนี้ Sorgulu et al. (2021) ศึกษากระบวนการผลิตพลังงานร่วมกับการจัดการขยะประเภทมูลไก่ในอุตสาหกรรมอาหาร ด้วยการอบแห้งแบบสายพานแนวนอนที่สามารถลดปริมาณความชื้นลงเหลือประมาณร้อยละ 30 ทำให้ค่าความร้อนต่ำเพิ่มขึ้นเป็น 13.91 MJ/kg ก่อนที่จะส่งเข้าเตาเผากำจัดขยะสำหรับการผลิตไฟฟ้าโดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอยู่ที่ประมาณร้อยละ 29.45 และ Sajid Khan et al. (2022) แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานขยะและแสงอาทิตย์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเดิมถึงร้อยละ 5.68 สามารถผลิตไฟฟ้าสุทธิได้ประมาณ 21.10 MW_e โดยมีต้นทุนไฟฟ้าต่อหน่วย 1.13 Baht/kWh การประเมินผลทางด้านสิ่งแวดล้อมของ Hosseini et al. (2022) ทำประเมินผลกระทบทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมของการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติในประเทศอิหร่านด้วยวิธีการประเมินแบบ ReCiPe 2016 แบบเกรตเล-ทู-เกรฟ (Cradle-to-grave) ซึ่งก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 511 g CO₂ eq/kWh

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาแนวทางการนำขยะมูลฝอยชุมชนที่ผ่านการคัดแยกมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาขยะ โดยมีเป้าหมายเพื่อลดข้อจำกัดด้านคุณภาพและความสม่ำเสมอของเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการอบแห้ง ก่อนเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นพลังงานความร้อนด้วยกระบวนการเผาไหม้ จากนั้นพลังงานความร้อนที่ได้จะถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้า ความเย็น และความร้อน โดยออกแบบให้สอดคล้องกับลำดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่เหมาะสมกับเทคโนโลยี ตามลักษณะการใช้งานแบบอนุกรม ผสมผสานกับการทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar photovoltaic system) ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย ส่งผลให้เกิดการบริหารจัดการขยะมูลฝอยได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ เพื่อสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานในอนาคตอย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานร่วมผสมผสานจากพลังงานขยะและแสงอาทิตย์
- 2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบด้านพลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม ของระบบผลิตพลังงานร่วมผสมผสานจากพลังงานขยะและแสงอาทิตย์

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สํารวจและจัดเก็บข้อมูลทางกายภาพ

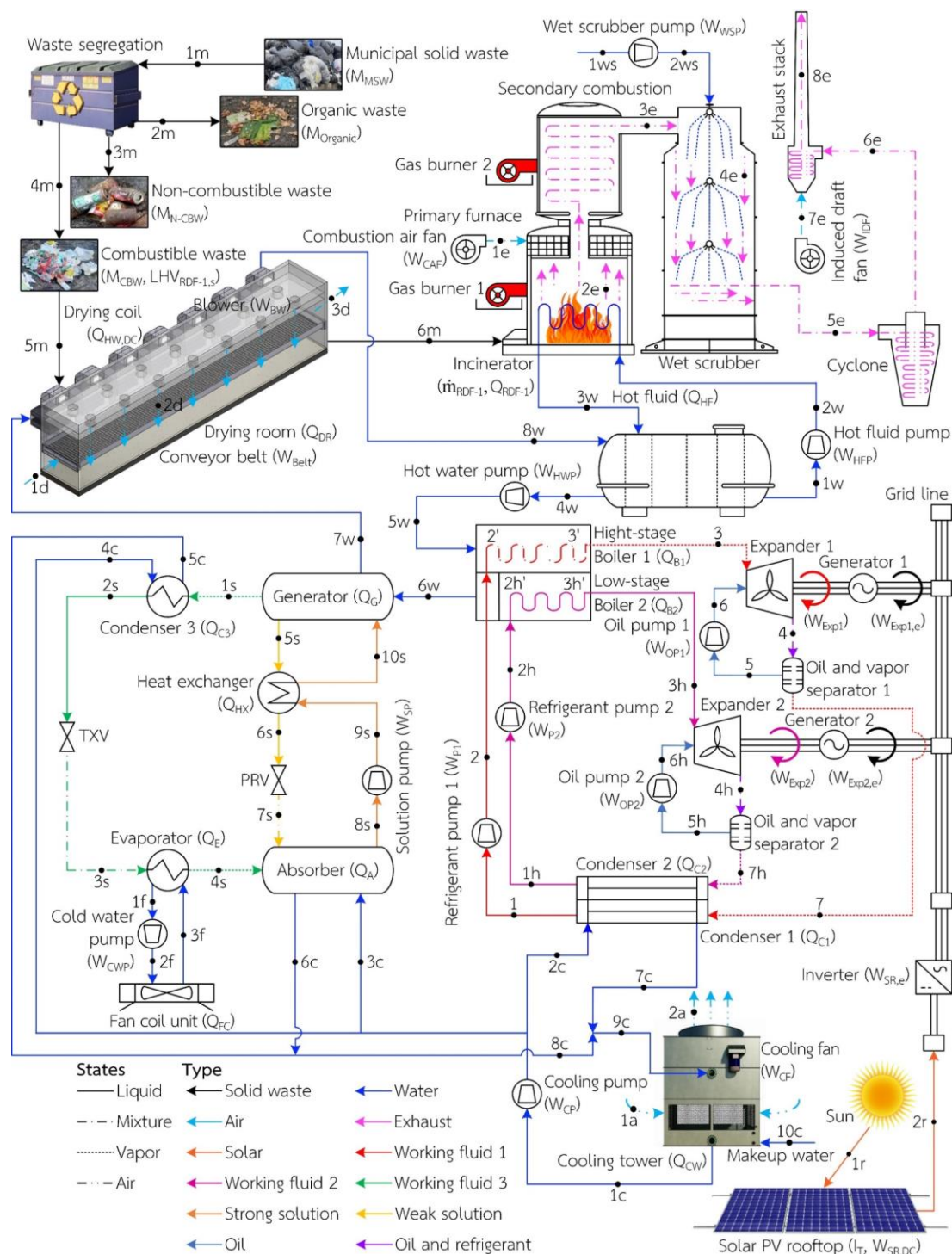
ทำการสำรวจปริมาณขยะมูลฝอยในเขตพื้นที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแม่เมาะ และอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยการคัดแยกองค์ประกอบทางกายภาพของขยะที่สามารถนำไปผลิตพลังงานด้วยวิธีการเผา หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์สัดส่วนองค์ประกอบขยะสำหรับการออกแบบเทคโนโลยีที่เหมาะสม

3.2 ประเมินศักยภาพทางด้านพลังงานของระบบผลิตพลังงานร่วมผสมผสานจากพลังงานขยะและแสงอาทิตย์

ทำการประเมินศักยภาพทางด้านพลังงานด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการสมดุลพลังงาน สมดุลมวล และสมดุลความเข้มข้นของอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามทิศทางการเคลื่อนของกระแสพลังงาน โดยการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานที่เกี่ยวข้องอ้างอิงข้อมูลการทดสอบของ Pokson and Chaiyat (2024) Mujumdar (2006) ร่วมกับฐานข้อมูลสภาพอากาศรายชั่วโมงจาก Thai Meteorological Department (2023) ตามแผนภาพการทำงานดังแสดงในภาพที่ 1 โดยหลักการทำงานเริ่มต้นจากขยะมูลฝอยชุมชน ที่ผ่านกระบวนการคัดแยกขยะที่สามารถเผาไหม้ได้จุดที่ 1m - 4m เพื่อส่งไปยังห้องอบแห้งผ่านสายพานลำเลียง เข้าสู่กระบวนการลดความชื้นของขยะก่อนส่งเข้าสู่เตาเผาขยะจุดที่ 5m-6m เข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ และเกิดการเปลี่ยนรูปขยะเป็นพลังงานความร้อนด้วยกระบวนการเผาไหม้ (Q_{RDF-1}) จุดที่ 1e - 8e เมื่อห้องเผาไหม้อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนจะทำการจ่ายน้ำสะอาด เข้าสู่เตาเผาขยะด้วยปั๊มของไหลร้อน ($W_{HFP,e}$) เกิดการถ่ายโอนความร้อนจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะโดยตรง ให้แก่ของไหลร้อนอุณหภูมิเกิน 105 °C และวนกลับเข้าสู่ถังเก็บของไหลร้อน เพื่อใช้ประโยชน์ต่อไปในวัฏจักรแรงดันอินทรีย์แบบ 2 stage โดยผ่านปั๊มน้ำร้อน ($W_{HWP,e}$) ส่งเข้าสู่หม้อต้มสารทำงานด้านอุณหภูมิสูงจุดที่ 1w - 5w และไหลออกมายังหม้อต้มสารทำงานอุณหภูมิต่ำ สำหรับการถ่ายเทความร้อนให้แก่คู่สารทำงาน R-245fa (Q_{B1} , Q_{B2}) ผ่านปั๊มสารทำงาน ($W_{P1,e}$, $W_{P2,e}$) จุดที่ 1 - 2 และ 1h - 2h จนกระทั่งสารทำงานเข้าสู่สภาวะกลายเป็นไอร้อนยวดยิ่ง ไหลเข้าสู่เครื่องขยายตัวภายใต้สภาวะความดันสูงเพื่อขับเพลาท่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับการผลิตไฟฟ้า ($W_{ORC} = W_{Exp1,e} + W_{Exp2,e}$) จุดที่ 3 - 4 และ 3h-4h โดยน้ำมันหล่อลื่นที่แยกตัวออกจากสารทำงานจะถูกปั๊มเข้าไปยังเครื่องขยายตัวอีกครั้งผ่านปั๊มน้ำมัน ($W_{OP1,e}$, $W_{OP2,e}$) จากนั้นไอสารทำงานจะเข้าสู่เครื่องควบแน่นและถูกกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวภายใต้สภาวะความดันต่ำ หลังจากถูกถ่ายโอนความร้อนให้แก่ น้ำหล่อเย็น (Q_{C1} , Q_{C2}) จุดที่ 5-7 และ 5h-7h ซึ่งสามารถพิจารณาประสิทธิภาพวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ได้จากสมการ $[\eta_{ORC} = (W_{ORC} - W_{P1,e} - W_{P2,e} - W_{OP1,e} - W_{OP2,e}) / (Q_{B1} + Q_{B2})]$

ของไหลร้อนที่ออกจากวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จะไหลเข้าสู่เจนเนอเรเตอร์จุดที่ 6w ถ่ายเทความร้อนให้แก่สารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ (Q_G) เกิดเป็นไอสารทำงาน และถูกลดอุณหภูมิด้วยน้ำหล่อเย็นจากเครื่องควบแน่น (Q_{C3}) ในจุดที่ 1s - 2s หลังจากนั้นสารทำงานจะเกิดการคายความร้อนกลายเป็นของเหลวความดันสูงไหลเข้าสู่วาล์วลดความดัน เพื่อลดความดันก่อนเข้าสู่เครื่องระเหยในการผลิตความเย็น (Q_E) จุดที่ 3s - 4s ทำให้สารทำงานในระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเดือดเป็นไอภายใต้สภาวะความดันต่ำ ก่อนถูกลดอุณหภูมิอีกครั้งด้วยน้ำหล่อเย็นภายในตัวดูดกลืน (Q_A) ด้วยกระบวนการดูดกลืนระหว่างไอสารทำงานและสารละลายความเข้มข้นต่ำ และถูกควบคุมความดันด้วยวาล์วลดความดันในจุดที่ 5s - 7s กลายเป็นสารละลายความเข้มข้นสูงจุดที่ 8s ไหลเข้าสู่กระบวนการระเหยของสารละลายผ่านปั๊มสารละลาย (W_{SP}) เพื่อรับความร้อนจากของไหลร้อนอีกครั้ง โดยสามารถพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นจากสมการ $[COP_{AB} = Q_E / (Q_G + W_{SP})]$

ของไหลร้อนที่ออกจากระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจุดที่ 7w จะถูกส่งไปที่แผงแลกเปลี่ยนความร้อน ($Q_{HW,DC}$) เพื่อถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำและอากาศ ทำให้อุณหภูมิกระเปาะเปียกสูงขึ้นในจุดที่ 1d - 2d ขณะที่ปริมาณน้ำในอากาศจะมีค่าคงที่เป็นกระบวนการทำความร้อน และหลังจากนั้นอากาศร้อนที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะถูกกระจายเข้าสู่พื้นที่อบแห้งผ่านผิวขยะเปียก เกิดการถ่ายเทความร้อนไปสู่วัสดุ (Q_{DR}) ทำให้ความชื้นในขยะเปียกเกิดการเคลื่อนที่ออกจากผิวและระเหยออกสู่อากาศ อากาศที่ออกจากห้องอบแห้งจะมีอุณหภูมิลดลง แต่อัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นเท่ากับปริมาณน้ำที่ระเหยออกในจุดที่ 3d ซึ่งการทำงานของห้องอบแห้งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากพัดลมดูดอากาศ ($W_{BW,e}$) และสายพานลำเลียงที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เกียร์ ($W_{Belt,e}$) โดยสามารถพิจารณาประสิทธิภาพการอบแห้งได้จากสมการ $[\eta_{DR} = Q_{DR} / (Q_{HW,DC} + W_{BW,e} + W_{Belt,e})]$ นอกจากนี้ยังมีการผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ที่ทะลุผ่านชั้นบรรยากาศ (I_T) ตกกระทบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ($A_{PV} N_{PV}$) เกิดการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในอะตอมของวัสดุสารกึ่งตัวนำหลุดออกจากพันธะ และเกิดเป็นไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านเข้าสู่อุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ($W_{SR,e}$) จุดที่ 1r - 2r เข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าส่วนกลาง ซึ่งสามารถพิจารณาประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้จากสมการ $[\eta_{SR} = W_{SR,e} / (I_T A_{PV} N_{PV})]$ ดังนั้น ระบบผลิตพลังงานร่วมผสมผสานจากพลังงานขยะและแสงอาทิตย์สามารถใช้ประโยชน์จากผลิตพลังงานไฟฟ้า ความเย็น และความร้อน ($W_{HB,net} = W_{ORC} + W_{SR,e} - W_{out,e} + Q_E + Q_{DR}$) พิจารณาประสิทธิภาพรวมได้จากสมการ $[\eta_{HB} = W_{HB,net} / (Q_{RDF-1} + (I_T A_{PV} N_{PV}))]$



ภาพที่ 1 แผนภาพระบบผลิตพลังงานร่วมผสมผสานจากพลังงานขยะและแสงอาทิตย์

3.3 ประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์

ทำการวิเคราะห์ค่าหาต้นทุนพลังงานต่อหน่วย (Levelized energy cost: LEnC) โดยสามารถพิจารณาจากการผลิตพลังงานร่วมผสมผสาน ($E_{HB,net}$) ค่าใช้จ่ายจากการลงทุนติดตั้งของโครงการ (Investment cost: Inv) ค่าใช้จ่ายสำหรับการผลิตพลังงาน (Production energy

cost: PEC) ค่าอัตราส่วนลด (Discount rate: r) ค่าอัตราดอกเบี้ยที่แท้จริง (Real interest: i_{Real}) ค่าอัตราเงินเฟ้อ (Inflation rate: $i_{Inflation}$) และปัจจัยความเสื่อมสภาพ (Deterioration factor: DF) ตลอดอายุการใช้งาน (N) 20 y ร่วมกับการวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายใน (Net present value: NPV) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Internal rate of return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB) ดังแสดงในสมการที่ 1 - 4 โดยมีเงื่อนไขการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 1

$$LEnC = \frac{Inv + \sum_{t=1}^N \frac{PEC}{(1+r)^t}}{\left(\sum_{t=1}^N \frac{(E_{HB,net})_{OT}}{(1+DF)^{(t-1)}} \right)} \quad (1) \quad -Inv + \sum_{t=1}^N [NR_t / (1+IRR)^t] = 0 \quad (3)$$

$$NPV = \sum_{t=1}^N [NR_t / (1+r)^t] - Inv \quad (2) \quad PB = Inv / NR \quad (4)$$

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์

รายละเอียด	ปริมาณ	อ้างอิง
ค่าแรงงานขั้นต่ำของประเทศไทย (OM_{Man} , Baht/d)	330	Ministry of Labour (2023)
ค่าบริการกำจัดขยะ (r_{MSW} , Baht/kg)	1.67	Department of Local Administration (2023)
ค่ารับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานขยะ (FiT_{MSW} , Baht/kWh)	5.08	Energy Regulatory Commission (2023)
ค่ารับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (FiT_{PV} , Baht/kWh)	2.20	
ค่าไฟฟ้าฐาน (C_e , Baht/kWh)	4.48	Energy News Center (2023)
อัตราดอกเบี้ยแท้จริง (i_{Real} , %)	2.50	Bank of Thailand (2023)
ค่าอัตราเงินเฟ้อ ($i_{Inflation}$, %)	1.20	
ปัจจัยความเสื่อมสภาพ (DF , %)	2	Chaiyat (2021)

3.4 ประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม

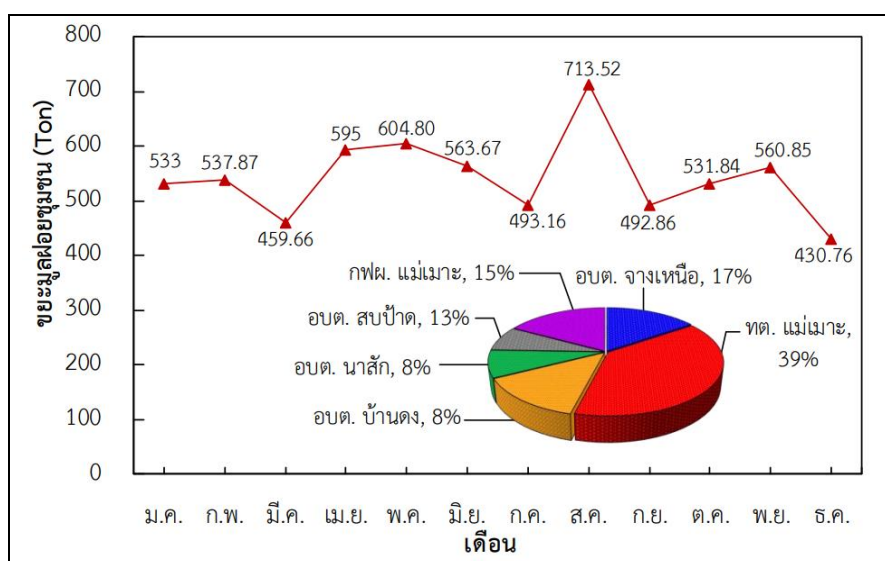
ทำการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้วยวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment) ตามมาตรฐาน ISO 14040 และ ISO 14044 โดยการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษาแบบ แกรเดิล-ทู-เกรฟ จากการรวบรวมข้อมูลการใช้วัตถุดิบ พลังงานและของเสียที่เกิดขึ้นในการก่อสร้าง การดำเนินงาน และการรื้อถอน ตลอดอายุการใช้งาน 20 y การประเมินใช้วิธี ReCiPe (SimaPro, 2023) เพื่อพิจารณาผลกระทบชั้นกลาง (Midpoint impact) ที่เกี่ยวข้อง 18 ผลกระทบ และมีหน่วยการทำงาน (Functional unit) คือ การผลิตพลังงานรวม 1 kWh

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการสำรวจและจัดเก็บข้อมูลทางกายภาพ

ผลการสำรวจและจัดเก็บข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอยในเขตอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จากแหล่งกำเนิดขยะมูลฝอยจำนวน 6 แหล่ง พบว่า เทศบาลตำบลแม่เมาะ องค์การบริหารส่วนตำบลจางเหนือ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแม่เมาะ มีปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 70 ของปริมาณขยะทั้งหมด 6,516.96 Ton/y เฉลี่ยประมาณ 17.85 Ton/d ดังแสดงในภาพที่ 2 คิดเป็นอัตราการเกิดขยะมูลฝอยเฉลี่ยประมาณ 1.52 kg/(person·d) (National Statistical Office, 2023)

และจากการสุ่มเก็บตัวอย่างขยะจากรถเก็บขนของเทศบาล พบว่า มีสัดส่วนขยะที่สามารถเผาไหม้ได้เฉลี่ยร้อยละ 33.13 ของปริมาณขยะทั้งหมด โดยส่วนใหญ่เป็นบรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับใส่อาหาร ขวดพลาสติก ร้อยละ 20.65 เศษผ้า ร้อยละ 4.19 กระดาษ ร้อยละ 4.09 ยาง ร้อยละ 1.67 กระดาษลัง ร้อยละ 1.63 และเศษไม้ ร้อยละ 0.90 ซึ่งเป็นขยะที่ใช้ระยะเวลานานในการย่อยสลายตามธรรมชาติ จึงเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในเผาไหม้ผลิตพลังงานและลดปริมาณขยะที่ต้องไปสุ่งพื้นที่หลุมฝังกลบ



ภาพที่ 2 ปริมาณการเกิดขยะมูลฝอย

4.2 ผลการประเมินศักยภาพทางด้านพลังงานของระบบผลิตพลังงานร่วมผสมผสานจากพลังงานขยะและแสงอาทิตย์

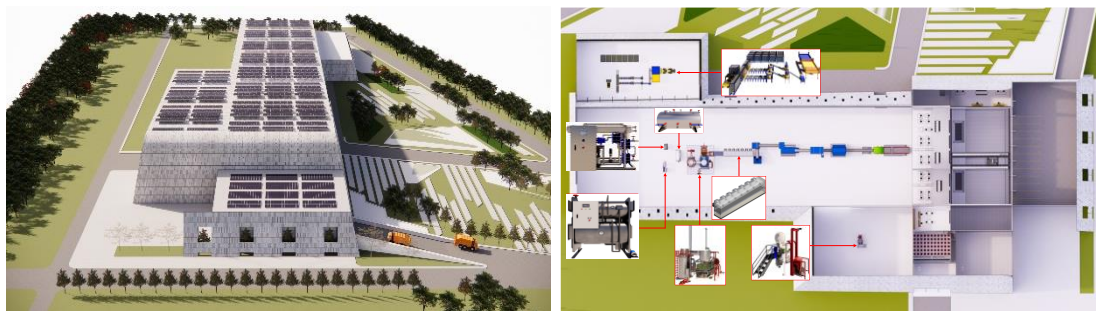
ผลการประเมินศักยภาพทางด้านพลังงานจากปริมาณขยะที่ผ่านการคัดแยกแล้ว แพลสสภาพให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแข็งประเภทที่ 1 มีมวลอยู่ที่ ($M_{RDF-1,S}$) 5,913.30 kg/d ปริมาณความชื้น ($MC_{RDF-1,S}$) ร้อยละ 41.92 จะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการอบแห้งเป็นระยะเวลาประมาณ 8 h ทำให้น้ำหนักหลังการอบแห้งเหลืออยู่ที่ประมาณ ($M_{RDF-1,F}$) 3,434.16 kg/d และมีค่าความร้อนต่ำประมาณ ($LHV_{RDF-1,F}$) 11.50 MJ/kg ซึ่งเป็นการลดข้อจำกัดของคุณภาพและความสม่ำเสมอของเชื้อเพลิงเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ก่อนที่จะถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาขยะที่อัตราการไหลเชิงมวล ($\dot{m}_{RDF-1}$) 429.27 kg/h ปริมาณความร้อน (Q_{RDF-1}) 1,371.73 kW ความร้อนส่วนหนึ่งจะถูกถ่ายโอนให้กับของไหล (Q_{HF}) 434.29 kW ทำให้อุณหภูมิของของไหลเพิ่มขึ้นจนถึงสภาวะคงที่ (T_{sw}) 110 °C สะสมไว้ในถังเก็บน้ำความจุ 24 m³ มาใช้งานในการผลิตพลังงานตามลำดับอุณหภูมิของของไหลร้อนแบบอนุกรม

ของไหลร้อนจะถูกถ่ายเข้าสู่วัฏจักรแรงดันอินทรีย์แบบ 2 stag ด้านอุณหภูมิสูงถ่ายเทความร้อนให้แก่คู่สารทำงาน R-245fa ที่อุณหภูมิสูง (T_{B1}) 100 °C และอุณหภูมิต่ำ (T_{B2}) 89 °C อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม ($Q_{B1} + Q_{B2}$) 714.96 kW เกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นไอความดันสูงที่ความดันเกจ (P_{H1}) 12.65 bar และ (P_{H2}) 9.82 bar เพื่อผันกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กระแสสลับ ($W_{Exp1,e} + W_{Exp2,e}$) 63.19 kW_e ที่ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (η_{ORC}) ร้อยละ 7.77 หลังจากนั้นของไหลร้อนที่ลดอุณหภูมิลงเหลือ (T_{6w}) 88 °C จะถูกใช้เพื่อระเหยน้ำภายในเจนเนอเรเตอร์ และเกิดการแยกตัวออกจากสารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์อุณหภูมิ (T_G) 85 °C อัตราการถ่ายเทความร้อน (Q_G) 122.76 kW ที่อุณหภูมิสารทำงานในเครื่องระเหย (T_E) 4 °C สามารถผลิตน้ำเย็นอุณหภูมิ (T_{1f}) ประมาณ 7 °C เพื่อใช้ในการทำความเย็นภายในห้องสำนักงานและมีอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องระเหย (Q_E) 91.06 kW เครื่องควบแน่น (Q_{C3}) 96.16 kW ตัวดูดกลืน (Q_A) 93.82 kW ระหว่างการทำงานมีการใช้ไฟฟ้าจากปั๊มสารละลาย ($W_{SP,e}$) 0.002 kW_e และปั๊มน้ำเย็น ($W_{CWP,e}$) 0.71 kW_e เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP_{AB}) เท่ากับ 0.63 และมีการระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น เพื่อลดอุณหภูมิน้ำที่ออกจากเครื่องควบแน่น และตัวดูดกลืนผ่านปั๊มน้ำหล่อเย็น ($W_{CP,e}$) 6.22 kW_e อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ($\dot{m}_{CW}$) 39.85 kg/s สัมผัสกับอากาศผ่านพัดลมระบายความร้อน ($W_{CF,e}$) 11.26 kW_e จากนั้นของไหลร้อน (T_{7w}) 83 °C จะถูกป้อนให้กับแผงแลกเปลี่ยนความร้อน ผ่านการควบคุมอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศร้อน (T_{2d}) ประมาณ 80 °C สำหรับการอบแห้งขยะเปียกที่ถูกลำเลียงผ่านสายพานด้วยความเร็วคงที่ (v_{Belt}) 0.003 m/s การทำงานของห้องอบแห้งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากพัดลม ($W_{BW,e}$) 1.75 kW_e และมอเตอร์เกียร์ ($W_{Belt,e}$) 17.52 kW_e เกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศขึ้น (Q_{DR}) 207.39 kW โดยมีประสิทธิภาพการอบแห้ง (η_{DR}) ร้อยละ 30.18

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาดกำลังการติดตั้ง 847 kW_p ที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 550 W_p ยี่ห้อ ซันเพาเวอร์ (Sun power) รุ่น SPR-P6-550-COM-M-BF จำนวน 1,540 Panel แผงหันไปทางทิศใต้ทำมุมเอียง 4° ตามแนวระนาบของหลังคา ครอบคลุมพื้นที่ 4,008 m² ทำให้มีค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมงที่ตกกระทบแผงในช่วงเวลา 06.00 - 18.00 น. พบว่าค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมงสูงสุดตลอดทั้งปีเกิดขึ้นในช่วงเวลา 12.00 น. เฉลี่ยอยู่ที่ 804.65 W/m² และจากการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพอุณหภูมิอากาศของจังหวัดลำปาง พบว่า การผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรายวันส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิของแผง ณ เวลา 12.00 น. สูงที่สุดเท่ากับ (T_{PV}) 51.38 °C เป็นผลทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงเหลือเพียง (V_{PV}) 29.58 V กระแสไฟฟ้า (I_{PV}) 11.35 A กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ($W_{SR,e}$) 485.40 kW_e ภายใต้ประสิทธิภาพการทำงาน (η_{SR}) ร้อยละ 16.28

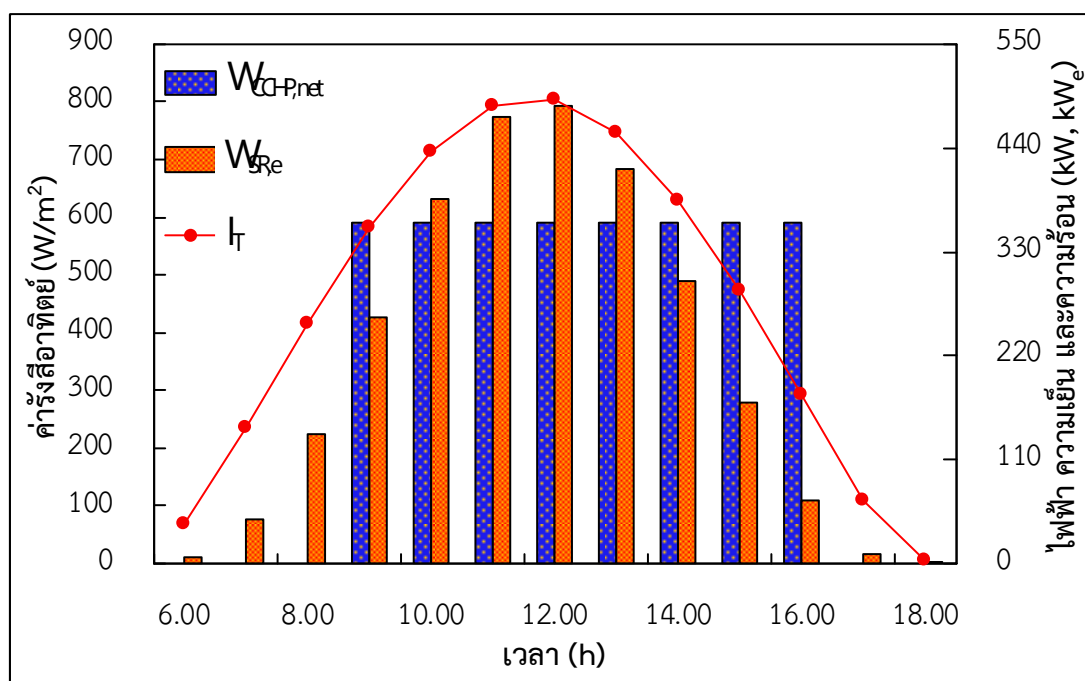
ผลด้านพลังงานของระบบผลิตพลังงานร่วมผสมผสาน สามารถใช้ประโยชน์จากการผลิตพลังงานไฟฟ้า ความเย็น และความร้อนได้รวมทั้งสิ้น (E_{HB}) 5,211.44 kWh/d และมีกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ ($E_{HB,e}$) 3,261.11 kWh/d คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าสุทธิ ($E_{HB,net}$) 2,823.86 kWh/d ที่ประสิทธิภาพการทำงาน (η_{HB}) ร้อยละ 18.34 และได้มีการออกแบบทางกายภาพในการนำเสนอแผนภาพเสมือนของโรงไฟฟ้าขยะที่มีพื้นที่ใช้สอยทั้งหมด 4,608 m² พื้นที่ด้านหน้าอาคารถูกออกแบบเป็นบ่อพักขยะมูลฝอยภายในอาคารปิด นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการติดตั้งเสริมที่คาดว่าจะมีความจำเป็นในอนาคต ได้แก่ ระบบผลิตอิฐบล็อกแบบอัตโนมัติ และระบบบำบัดขยะที่ติดเชื้อเพื่อรองรับขยะติดเชื้อจากโรงพยาบาลใกล้เคียงดังแสดงในภาพที่ 3 - 5



(ก) โรงไฟฟ้าขยะ (ด้านหน้า)

(ข) โรงไฟฟ้าขยะ (ด้านบน)

ภาพที่ 3 แบบแปลนโรงไฟฟ้าขยะ



ภาพที่ 4 รังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมงและพลังงานที่ผลิตได้



ภาพที่ 5 ผลด้านพลังงานของระบบผลิตพลังงานร่วมผสมผสานจากพลังงานขยะและแสงอาทิตย์

4.3 ผลการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนจากแบบแปลนการออกแบบทางกายภาพ พบว่า ระบบมีมูลค่าการเงินลงทุนรวม 80,201,177 Baht ค่าใช้จ่ายจากการดำเนินงาน 4,973,658.85 Baht/y คิดจากต้นทุนการลงทุนร้อยละ 5 และมีผลตอบแทนจากการดำเนินงานจะแบ่งเป็น การบริการรับกำจัดขยะ การจำหน่ายกระแสไฟฟ้า และผลประโยชน์พลังงานจากระบบทำความเย็นคิดเป็นผลตอบแทนสุทธิ

8,332,291.54 Baht ส่งผลให้มีค่าต้นทุนพลังงานต่อหน่วยพลังงาน 5.38 Baht/kWh มูลค่าปัจจุบันสุทธิ 57,710,801.41 Baht และมีระยะเวลาคืนทุนภายใน 9.63 y ดังแสดงในตารางที่ 2

การเปรียบเทียบระบบเดิมที่มีต้นทุนการผลิตพลังงานที่ค่อนข้างสูงเช่นเดียวกับ Pokson and Chaiyat (2024) เนื่องจากต้องแบกรับต้นทุนในการก่อสร้าง การจัดการวัตถุดิบ ค่าบำรุงรักษา และการจัดการของเสียที่เกิดจากการผลิตพลังงานที่ค่อนข้างสูง ประเด็นดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sajid Khan et al. (2022) เป็นการจัดการขยะให้เหมาะสมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานแบบบูรณาการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผสมผสานการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีต้นทุนต่ำกว่า ง่ายต่อการบำรุงรักษา และไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการจัดหาวัตถุดิบ

ตารางที่ 2 รายละเอียดการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์

รายละเอียด	ปริมาณ	รายละเอียด	ปริมาณ
เงินลงทุน		ผลตอบแทน	
โรงเรือน (Z _{Builing} , Baht)	25,050,000	การรับบริการกำจัดขยะ (R _{MSW} , Baht/y)	10,858,750
เตาเผาขยะและระบบคัดแยก (Z _{IC} , Baht)	15,700,627	การจำหน่ายกระแสไฟฟ้า (R _{HB,e} , Baht/y)	2,339,292.88
วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (Z _{ORC} , Baht)	3,042,439	ผลการประหยัดพลังงาน (R _{AB,e} , Baht/y)	100,681.56
ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Z _{AB} , Baht)	642,013	ผลตอบแทนสุทธิรายปี (NR, Baht/y)	8,332,291.54
ห้องอบแห้ง (Z _{DR} , Baht)	5,000,000	ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์	
ถังเก็บของไหลร้อนและอุปกรณ์ติดตั้ง (Z _{HF} , Baht)	7,050,097	อัตราส่วนลด (r, %)	1.28
ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Z _{SR} , Baht)	23,716,000	พลังงานที่ผลิตได้สุทธิต่อปี (E _{HB,e} , kWh/y)	1,902,175.95
รวมเงินลงทุนทั้งหมดของโครงการ (Inv, Baht)	80,201,177	อายุของโครงการ (N, y)	20
ค่าดำเนินงาน		ต้นทุนพลังงานต่อหน่วย (LEnC, Baht/kWh)	5.38
ค่าแรงงาน (OM _{Man,y} , Baht/y)	963,600	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV, Baht)	57,710,801.41
ค่าบำรุงรักษา (OM _{Service} , Baht/y)	4,010,058.85	อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR, %)	7.97
ค่าดำเนินงานและบำรุงรักษา (PEC, Baht/y)	4,973,658.85	ระยะเวลาคืนทุน (PB, y)	9.63

4.4 ผลการประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม

ผลการรวบรวมข้อมูลเชิงปริมาณตลอดวัฏจักรชีวิตของระบบผลิตพลังงานดังกล่าว โดยแบ่งแยกตามขั้นตอนต่าง ๆ พบว่า กระบวนการก่อสร้างมีการใช้วัสดุประเภทคอนกรีตในปริมาณสูงที่สุด 13,785,391 kg รองลงมาเป็นวัสดุประเภทเหล็ก 519,468 kg ดินเหนียว 339,958 kg และทราย 154,870 kg วัสดุส่วนใหญ่กว่าร้อยละ 98.96 ถูกใช้ในก่อสร้างโรงเรือน ส่วนที่เหลือแบ่งเป็นงานสร้างเตาเผาขยะร้อยละ 0.48 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร้อยละ 0.41 และระบบอื่น ๆ ร้อยละ 0.15

การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมชั้นกลางทั้งหมด 18 กลุ่มผลกระทบ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการก่อสร้าง การรื้อถอน และการดำเนินงานที่มีสัดส่วนถึงร้อยละ 89.97, ร้อยละ 8.07 และร้อยละ 1.96 ตามลำดับ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 6.01E-02 kg CO₂ eq/kWh

ภาวะความเป็นพิษที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ $5.04\text{E-}02 \text{ kg 1,4-DB eq/kWh}$ และการลดลงของปริมาณแร่ธาตุ $1.74\text{E-}02 \text{ kg Fe eq/kWh}$ ดังแสดงในตารางที่ 3

การเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่คล้ายคลึงกันชี้ให้เห็นถึง (Suvamabol and Chaayat, 2024) ความแตกต่างในด้านประสิทธิภาพที่สูงและการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงขยะในการผลิตพลังงานที่หลากหลาย ร่วมกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีบทบาทสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ควรมีการปรับปรุงการแบบแปลนในขั้นตอนการออกแบบระบบให้เหมาะสม และสามารถปรับใช้ให้เข้ากับลักษณะทางกายภาพของแต่ละชุมชน โดยต้องพิจารณาถึงต้นทุน ความปลอดภัย และปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 3 ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมชั้นกลาง 18 กลุ่มผลกระทบ

ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม	ก่อสร้าง	ดำเนินงาน	รื้อถอน	1 kWh
การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (kg CO ₂ eq)	3.40E+06	1.14E+05	2.04E+06	6.01E-02
การลดลงของชั้นโอโซน (kg CFC-11 eq)	2.26E-01	3.08E-05	9.31E-02	5.66E-09
ภาวะฝนกรด (kg SO ₂ eq kg)	1.47E+04	4.77E+02	8.53E+03	3.27E-04
การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืด (kg P eq)	1.06E+03	6.08E-02	4.72E+02	1.62E-05
การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในน้ำทะเล (kg N eq)	6.45E+02	4.06E+01	6.31E+02	2.10E-05
ภาวะเป็นพิษต่อมนุษย์ (kg 1,4-DB eq)	2.11E+06	4.43E+04	5.58E+05	5.04E-02
ภาวะก่อตัวของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (kg NMVOC)	1.13E+04	6.92E+02	9.99E+03	2.62E-04
ภาวะก่อตัวของฝุ่นละอองหมอกควัน (kg PM ₁₀ eq)	6.74E+03	1.77E+02	7.20E+03	1.21E-04
ภาวะที่เป็นพิษต่อดิน (kg 1,4-DB eq)	5.98E+02	2.86E-01	8.25E+01	1.53E-05
ภาวะที่เป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด (kg 1,4-DB eq)	3.68E+05	3.69E+02	1.91E+04	9.38E-03
ภาวะที่เป็นพิษต่อน้ำทะเล (kg 1,4-DB eq)	3.28E+05	3.64E+02	1.81E+04	8.34E-03
การเกิดรังสีชนิดกัมมันตรังสีไอออน (kBq U ₂₃₅ eq)	2.72E+05	2.45E+01	3.96E+04	6.97E-03
การใช้พื้นที่ในการเกษตรกรรม (m ² a)	1.32E+05	2.08E+01	2.24E+04	3.12E-03
การใช้พื้นที่ในเขตตัวเมือง (m ² a)	1.03E+05	1.07E+01	3.43E+04	2.77E-03
การเปลี่ยนแปลงที่ดินตามธรรมชาติ (m ²)	7.64E+02	9.41E-01	-4.32E+02	2.86E-06
การลดลงของทรัพยากรน้ำ (m ³)	3.77E+04	-7.02E+01	4.93E+03	9.88E-04
การลดลงของแร่ธาตุ (kg Fe eq)	1.39E+06	4.90E+03	7.50E+05	1.74E-02
การลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิล (kg oil eq)	6.98E+05	2.83E+04	4.79E+05	1.51E-02

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 ผลการสำรวจและจัดเก็บข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอยมีปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในชุมชนประมาณ 6,516.96 Ton/y มีสัดส่วนปริมาณขยะที่เผาไหม้ได้ทั้งหมดร้อยละ 31.63

5.2 ระบบผลิตพลังงานร่วมแบบผสมผสานจากพลังงานขยะและแสงอาทิตย์ มีความสามารถในการผลิตพลังงาน 5,211.44 kWh/d กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 3,261.11 kWh/d คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าสุทธิ 2,823.86 kWh/d และมีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 18.34

5.3 การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า ระบบมีต้นทุนการผลิตพลังงานเท่ากับ 5.38 Baht/kWh มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 57,710,801.41 Baht อัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 7.97 และมีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 9.63 y

5.4 ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ $6.01\text{E-}02 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/kWh}$ การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ $5.04\text{E-}02 \text{ kg 1,4-DB eq/kWh}$ และการลดลงของปริมาณแร่ธาตุ $1.74\text{E-}02 \text{ kg Fe eq/kWh}$

จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่า แนวทางการต่อยอดงานวิจัยควรมีการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงขยะด้วยวิธีการนำขยะที่สามารถเผาไหม้ได้ มาผสมกับขยะติดเชื้อเพลิงทางการแพทย์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง เพื่อใช้ประโยชน์ต่อในกระบวนการเผาไหม้ผลิตพลังงาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และวิทยาลัยพลังงานทดแทนภายใต้โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา (2566) และทุนเรียนดี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่มอบทุนการสนับสนุนสำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Bank of Thailand. (2023). *Policy interest rate and forecast summary*. [online], Available: <https://www.bot.or.th>. access on March 20, 2024. (in Thai)
- Chaiyat, N. (2021). *Energy, exergy, economic, and environmental analysis of an organic Rankine cycle integrating with infectious medical waste incinerator*. Thermal Science and Engineering Progress, 22, 100810.
- Department of Local Administration. (2023). *Rate for municipal waste disposal services*. [online], <https://www.dla.go.th>. access on March 9, 2024. (in Thai)
- Energy News Center. (2023). *Base Tariff*. [online], Available: <https://www.energynewscenter.com>. access on March 9, 2024. (in Thai)
- Energy Regulatory Commission of Thailand. (2023). *Feed-in Tariff*. [online], Available: <https://www.erc.or.th>. access on March 9, 2024. (in Thai)
- Hosseini, S. M., Aslani, A., & Kasaeian, A. (2022). *Energy, water, and environmental impacts assessment of electricity generation in Iran*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 52, 102193.
- Markphan, W., Thanyarat, R., & Udom, T. (2021). Potential of Heating Energy Generation of Municipal Solid Waste: A Case Study of Promlok Municipality. *Thai Science and Technology Journal*, 587-603. (in Thai)
- Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of industrial drying (3th ed.)*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781420017618>
- Ministry of Energy. (2022). *Thai Integrated Energy Blueprint (TIEB)*. [online], Available: www.eppo.go.th. access on March 9, 2024. (in Thai)

- Ministry of Labour. (2023). *The minimum labor cost in Thailand*. [online], Available: <https://www.mol.go.th/wpcontent/uploads/sites/2/2022/09/PrakadWageMOL2565-11-for20Sep2565.pdf>. access on March 9, 2024. (in Thai)
- National Statistical Office. (2023), *Population counts*. [online], Available: <http://statbbi.nso.go.th>. access on March 9, 2024. (in Thai)
- Pokson, C., & Chaayat, N. (2024). *Energy, economic, and environmental analysis of a novel combined cooling, heating, and power (CCHP) from infectious medical waste*. Cleaner Waste Systems, 8, 100155. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100155>
- Pollution Control Department. (2022). *Solid waste situation in Thailand. Ministry of natural resources and environment*. [online], Available: www.pcd.go.th/publication/29509. access on March 9, 2024. (in Thai)
- Sajid Khan, M., Huan, Q., Lin, J., Zheng, R., Gao, Z., & Yan, M. (2022). *Exergoeconomic analysis and optimization of an innovative municipal solid waste to energy plant integrated with solar thermal system*. Energy Conversion and Management, 258, 115506.
- SimaPro. (2023). *SimaPro Demo (Release 9.4.0.1)*. [online], Available: <https://simapro.com>. access on March 20, 2024.
- Sorgulu, F., Akgul, M. B., Cebeci, E., Yilmaz, T. O., & Dincer, I. (2021). *A new experimentally developed integrated organic Rankine cycle plant*. Applied Thermal Engineering, 187, 116561.
- Suvarnabol, C., & Chaayat, N. (2024). *Thermal and environmental analysis of an infectious medical waste-to-energy*. Sustainable Chemistry for Climate Action, 4, 100039.
- Thai Meteorological Department. (2023). *Air temperature of Lampang province*. [online], Available: www.aws-observation.tmd.go.th. access on March 20, 2024. (in Thai)