การประเมินศักยภาพและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าพลังงานเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก: กรณีศึกษาเทศบาลตำบลลานกระบือ

Potential Assessment and Economic Feasibility of Power Plant with Plastic Refuse-Derived Fuel: A Case Study of Lankrabue Municipality

ปพน ไชยถาวร[1] อรรถกร อาสนคำ[2*] ธรณิศวร์ ดีทายาท[2] และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์[2]

Paphon Chaithaworn[1] Attakorn Asanakham[2*] Thoranis Deethayat [2] and Tanongkiat kiatsiriroat[2]

[1] สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

[2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

[1]Energy Engineering Program, Faculty of Engineering,
Chiang Mai University, Chiang Mai 50200

[2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200

[1]Corresponding author: Tel.: 053-94144. E-mail address: attakorn.asana@cmu.ac.th

Received: 7 June 2024, Revised: 19 July 2024, Accepted: 12 December 2024, Published online: 30 December 2024

Abstract

This research analyzes the potential of a power plant utilizing plastic waste as fuel. The waste management is carried out by the Lan Krabue Subdistrict Municipality in Ban Fak Thung, Moo 2, Lan Krabue District, Kamphaeng Phet Province, covering an area of 21,872.00 m². The study simulates the design of a power generation system, which includes a diesel engine with a capacity of 110.00 kW and a generator rated at 100.00 kW/125.00 kVAR, operating 8.00 hours daily. Pyrolysis oil produced from plastic waste using a batch-type pyrolysis machine serves as the fuel for electricity generation. The analysis evaluates the potential energy output of the power plant and other by-products such as fertilizer and carbon powder from the processes of plant. The quantities of electricity and by-products directly impact the revenue of plant. Additionally, the study evaluates available municipal solid waste to produce pyrolysis oil for electricity generation. The simulation results, based on a project duration of 20 years, indicated that the plant can generate 5,568.00 MWh of electricity. This required 154.13 t/month of solid waste to produce the necessary pyrolysis oil, which was 48.62 % of the total 300 t/month of waste received at the landfill, sufficient for the project duration. The feasibility of investment was evaluated by considering production costs, the payback period, and the internal rate of return (IRR). With a project duration of 20 years and an annual discount rate of 6.00%, the cost of electricity production was 9.94 THB/kWh if revenue comes solely from selling electricity. This cost is higher than the feed-in tariff

(FIT) rate for Very Small Power Producers (VSPP) generating electricity from municipal waste, which is 5.08 THB/kWh, making the project unfeasible. However, when additional revenue from by-products was considered, the production cost dropped to 0.83 THB/kWh. The payback period was reduced to 7.80 years, with an IRR of 11.22 %, making the investment more viable than relying solely on electricity sales. Furthermore, exploring renewable energy technologies to reduce the energy costs of machinery in processes could enhance project revenues through carbon credit sales and reduce electricity expenses.

Keywords: Plastic waste to energy, Refuse-derived fuel, Power plant, Investment viability, Lankrabue municipal district.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ศักยภาพโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกของบ่อขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ ตั้งอยู่ที่ บ้านฝากทุ่ง หมู่ 2 อำเภอลานกระบือ จังหวัดกำแพงเพชร มีพื้นที่กำจัดขยะเท่ากับ 21,872.00 m^2 โดยทำการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้า ประกอบด้วย ต้นกำลังที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซล พิกัดกำลังของเครื่องยนต์ดีเซล 110.00 kW และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาด 100.00 kW/125.00 kVAR ผลิตไฟฟ้าวันละ 8.00 hours ใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกที่ผลิตได้จากเครื่องไพโรไลซิสแบบกะ (Batch type) เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งการวิเคราะห์ศักยภาพโรงไฟฟ้าประกอบด้วย การประเมินปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ รวมถึงผลผลิตอื่นๆ ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ ของโรงไฟฟ้า ได้แก่ ปุ๋ย และผงคาร์บอน ซึ่งปริมาณไฟฟ้าและผลผลิตดังกล่าวจะส่งผลถึงรายรับของระบบผลิตไฟฟ้ายิ่งผลิตได้มาก นอกจากนั้นแล้วยังมีการประเมินถึงปริมาณขยะมูลฝอยที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสที่มีต่อความสามารถในกการผลิตพลังงานไฟฟ้า ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้า ในระยะเวลาดำเนินโครงการเท่ากับ 20 years พบว่า สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 5,568.00 MWh โดยใช้ขยะมูลฝอยเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสซึ่งเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเดือนละ 154.13 t เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าบ่อกำจัดขยะเดือนละ 300.00 t โดยใช้ขยะมูลฝอยในการผลิตไฟฟ้าต่อเดือนเพียง 48.62 % ของปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าบ่อกำจัดขยะต่อเดือน ซึ่งเพียงพอตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ ในส่วนของการพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการลงทุน จะพิจารณาถึงต้นทุนในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return) โดยกำหนดให้ระยะเวลาดำเนินโครงการเท่ากับ 20 years อัตราคิดลดต่อปีที่ 6.00 % สำหรับการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน โดยพบว่า หากรายได้มาจากการขายพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ต้นทุนในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 9.94 THB/kWh ซึ่งสูงกว่าอัตรารับซื้อไฟฟ้าจากโครงการผลิตไฟฟ้าจากขยะชุมชนในรูปแบบ Fit สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.08 TBH/kWh ไม่คุ้มค่าในการลงทุน แต่เมื่อรวมรายได้จากการขายผลผลิตอื่นๆ ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเหลือเพียง 0.83 THB/kWh ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 7.80 years และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 11.22 % ซึ่งคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่ากรณีที่รายได้มาจากการขายไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว นอกจากนั้นแล้ว หากมีการศึกษาเพิ่มเติมในการใช้เทคโนโลยีพลังงานทดแทนเพื่อลดค่าใช้จ่ายในส่วนของพลังงานไฟฟ้าในแต่ละเครื่องจักร จะสามารถเพิ่มรายรับของโครงการจากการขายคาร์บอนเครดิตและลดรายจ่ายค่าพลังงานไฟฟ้าได้

คำสำคัญ: ขยะพลาสติกเป็นพลังงาน, เชื้อเพลิงจากขยะ, โรงไฟฟ้า, ความเป็นไปได้ในการลงทุน, เทศบาลตำบลลานกระบือ

บทนำ

บ่อขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ ตั้งอยู่ที่ บ้านฝากทุ่ง หมู่ 2 อำเภอลานกระบือ จังหวัดกำแพงเพชร มีพื้นที่กำจัดขยะทั้งหมด 21,872.00 m^2 ปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าสถานที่กำจัดขยะทั้งหมดวันละ 10.00 t [1] โดยเป็นขยะจากชุมชน ขยะจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นอื่นๆ และขยะจากสถานประกอบกิจการของเอกชน ปัจจุบันใช้วิธีบำบัดขยะด้วยระบบเชิงกล-ชีวภาพ (Mechanical and Biological Treatment) โดยทำการคัดแยกขยะออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) ขยะที่มีมูลค่า เช่น แก้ว หรือโลหะ เป็นต้น ขยะส่วนนี้สามารถนำไปขายสร้างเป็นรายได้ให้แก่เทศบาลฯ และ 2) ขยะที่นำไปบำบัด เช่น พลาสติก เศษอาหาร เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบใช้อากาศด้วยวิธีธรรมชาติ (Passive aeration) ซึ่งใช้เวลาในการย่อยสลาย 6-7 เดือน ขยะที่ย่อยสลายได้จำพวกเศษอาหารจะแปรสภาพเป็นปุ๋ยหมักสามารถนำไปขายหรือใช้ประโยชน์ในงานเกษตรกรรม ส่วนขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้จำพวกพลาสติกจะดำเนินการส่งขายให้กับเอกชนเพื่อนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-Derived Fuel)

อย่างไรก็ตามการกำจัดขยะด้วยวิธีดังกล่าวใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายค่อนข้างนาน และจากสถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชน ปี 2565 มีขยะมูลฝอยเกิดขึ้น 25.70 Mt เพิ่มขึ้นจากปี 2564 เท่ากับ 3.00 % [2] ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อปัญหาพื้นที่กำจัดขยะไม่เพียงพอในอนาคตได้ เพื่อเป็นการลดใช้พื้นที่ของบ่อกำจัดขยะ และสร้างมูลค่าจากขยะพลาสติก จึงมีแนวคิดการบริการจัดการขยะโดยทำการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้า โดยใช้ขยะพลาสติกจากบ่อขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือเป็นเชื้อเพลิง ขยะมูลฝอยจะถูกคัดแยกและนำขยะส่วนที่ใช้เป็นวัตถุดิบเข้ากระบวนการปรับสภาพขยะเพื่อลดความชื้นโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying ของ พิสิษฏ์ มณีโชติ [3] ผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบใช้อากาศด้วยวิธีเชิงกล (Active aeration) พบว่า ใช้เวลาในการย่อยสลาย เพียง 20-30 วัน เมื่อเทียบกับการย่อยสลายแบบใช้อากาศด้วยวิธีธรรมชาติ (Passive aeration) จะเห็นได้ว่ากระบวนการดังกล่าวจะช่วยลดปัญหาขยะเต็มบ่อไวกว่ากำหนดหรือพื้นที่กำจัดขยะไม่เพียงพอได้ หลังจากนั้นขยะพลาสติกที่ได้จะถูกนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลัง แนวคิดการใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกมาทดแทนน้ำมันดีเซลมีพอสมควร คงเดช พะสีนาม และธันวมาส กาศสนุก [4] ได้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อใช้น้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์กับน้ำมันดีเซลจากขยะพลาสติกที่สัดส่วนต่างๆ โดยปริมาตร (0:100 25:75 50:50 75:25 100:0) ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เล็กน้อย โดยทำให้กำลังลดลงประมาณ7.00 % แรงบิดลดลงประมาณ 3.00 % และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมากกว่าประมาณ 1.00 % Kalargaris, I. et al [5] ได้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบแบบฉีดตรง เมื่อใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกกับเชื้อเพลิงดีเซลที่สัดส่วนตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 100 ภาระการทำงานของเครื่องยนต์ ตั้งแต่ร้อยละ 25 ถึง 100 พบว่าเครื่องยนต์สามารถทำงานได้ดี เมื่อภาระการทำงานของเครื่องยนต์อยู่ที่ระดับสูง โดยมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ดังนั้นจะเห็นได้ว่าน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากขยะพลาสติกมีศักยภาพที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าได้ โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ หากการดำเนินโครงการดังกล่าวได้รับการสนับสนุน ตามประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่อง ประกาศรับซื้อไฟฟ้าโครงการผลิตไฟฟ้าจากขยะชุมชน พ.ศ. 2565 [6] ไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถขายให้กับการไฟฟ้าในอัตรารับซื้อไฟฟ้าจากโครงการผลิตไฟฟ้าจากขยะชุมชนในรูปแบบ Fit สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) สำหรับปี 2565 ในราคา 5.08 THB/kWh อีกทั้งการดำเนินโครงการดังกล่าวยังได้ผลผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากการปรับสภาพขยะด้วยตู้ Bio–drying ซึ่งสามารถนำไปขายให้กับเกษตรกร และผงคาร์บอน (Carbon Black) ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ยังสามารถนำไปขายให้กับอุตสาหกรรมการผลิตยางรถยนต์โดย

ใช้เป็นสารตัวเติมทดแทนเขม่าดำทางการค้าเพื่อลดต้นทุนการผลิต กนกวรรณ พละศักดิ์ และคณะ [7] ได้ศึกษาการใช้ผงคาร์บอนจากกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolyzed carbon black, PCB) เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับเขม่าดำทางการค้าเกรด N774 (Commercial carbon black, CCB) ปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ตั้งแต่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ส่วน ต่อ 100 ส่วนของเนื้อยาง โดยทำการผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องผสมแบบปิดและเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง พบว่าการเติม PCB ที่ 40 ส่วนต่อ 100 ส่วนของเนื้อยาง ทั้งในยางบ่มเร่งและไม่บ่มเร่งให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่ายางบ่มเร่งที่เติม CCB ทำให้เห็นว่ายางที่เติม PCB ในปริมาณที่มากขึ้นมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิต พบว่า PCB มีต้นทุนการผลิตต่อ 1.00 kg ต่ำกว่า CCB เท่ากับ 26.65 THB นอกจากนั้นแล้วการดำเนินโครงการโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องใช้เงินในการก่อสร้างอาคารและติดตั้งเครื่องจักรในการผลิตไฟฟ้า รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินโครงการเช่น ค่าจ้างแรงงาน และค่าซ่อมบำรุงเครื่องจักร เป็นต้น หากไม่ได้ประเมินถึงรายรับและรายจ่ายของโครงการ ย่อมมีโอกาสเสี่ยงที่จะขาดทุนจากการลงทุน เพื่อลดความเสี่ยงดังกล่าวควรที่จะประเมินถึงความคุ้มค่าในการลงทุนโครงการโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกด้วย สุริยล อุดชาชน [8] ได้ศึกษาถึงความคุ้มค่าในการลงทุนโครงการโรงไฟฟ้าขยะในพื้นที่จังหวัดพิจิตร โดยประเมินจากศักยภาพของการจัดหาเชื้อเพลิง จากการเปรียบเทียบระหว่างการรวบรวมเชื้อเพลิงขยะจากจังหวัดโดยรอบโรงไฟฟ้า กับการซื้อเชื้อเพลิงจากบริษัทผู้ผลิตเชื้อเพลิง และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์โดยประเมินจากราคาต้นทุนจากการจัดหาเชื้อเพลิงทั้ง 2 กรณี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return) และระยะเวลาคืนทุน (Discounted payback period)

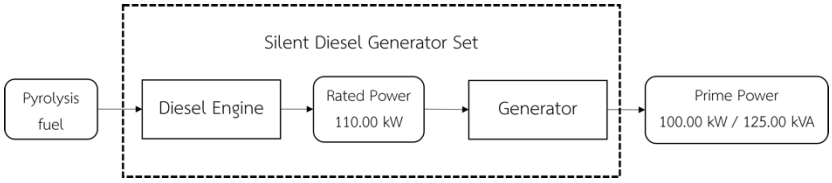
จากการสำรวจผลการศึกษาแนวทางการจัดการขยะที่ผ่านมาข้างต้น จึงทำให้บทความนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาศักยภาพในการดำเนินโครงการโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก โดยทำการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าในพื้นที่บ่อขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ เพื่อประเมินถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และผลผลิตอื่นๆ ที่ได้จากกระบวนการต่างๆของโรงไฟฟ้า ได้แก่ ปุ๋ย และผงคาร์บอน ซึ่งการประเมินดังกล่าวจะส่งผลต่อรายรับของโครงการโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก นอกจากนั้นแล้วยังประเมินถึงปริมาณขยะมูลฝอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานไฟฟ้าว่าเพียงพอสำหรับใช้ผลิตน้ำมันไพโรไลซิสเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือไม่ รวมไปถึงต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า รายรับ และรายจ่าย ตลอดทั้งระยะเวลาดำเนินโครงการ เพื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการลงทุนโดยพิจารณาจากต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return, IRR) โดยต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าจะพิจารณาเปรียบเทียบจากกรณีที่รายได้จากการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้ามาจากการขายไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว กับกรณีที่รายได้มาจากการขายไฟฟ้าและการขายผลผลิตอื่นๆ (ปุ๋ยหมัก ผงคาร์บอน และขยะประเภทแก้วและโลหะ) ที่ได้จากการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้า

วิธีการวิจัย

พื้นที่ศึกษาของโครงการตั้งอยู่ในพื้นที่บ่อกำจัดขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ ตั้งอยู่ที่ บ้านฝากทุ่ง หมู่ 2 อำเภอลานกระบือ จังหวัดกำแพงเพชร มีพื้นที่กำจัดขยะทั้งหมด 21,872.00 m^2 ปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าสถานที่กำจัดขยะวันละ 10.00 t [1] ดังแสดง ในภาพที่ 1

ภาพที่ 1 พื้นที่ศึกษาของโครงการโรงไฟฟ้าขยะในพื้นที่เทศบาลตำบลลานกระบือ [1]

โดยกำหนดให้ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีกำลังการผลิตไฟฟ้า 100.00 kW [11] ผลิตไฟฟ้าวันละ 8.00 hours ประกอบด้วย ต้นกำลังที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซล พิกัดกำลังของเครื่องยนต์ดีเซล (P_b) 110.00 kW และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาด 100.00 kW / 125.00 kVAR โดยใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง ดังแสดงใน ภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนผังแสดงระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลัง ซึ่งใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง

น้ำมันไพโรไลซิสผลิตจากเครื่องไพโรไลซิสแบบกะ (Batch type) ขนาดกำลังไฟฟ้า 225.00 kW จะมีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว (HV_{fuel}) เท่ากับ 44.30 x 10^3 kJ/kg และความหนาแน่น (ρ_{fuel}) เท่ากับ 0.89 kg/l [11] โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{bth}) จะใช้ข้อมูลจาก Kalargaris, I. et al [5] เท่ากับ 33.00 % หากต้องการผลิตไฟฟ้าวันละ 8.00 hours ($T_{hour\ per\ day}$ = 8.00 hours/day) สามารถคำนวณปริมาตรเชื้อเพลิงเหลวที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 วัน ($V_{fuel\ per\ day}$) ได้ดังนี้ [11]

$$\eta_{bth} = \frac{P_b}{Mass\ of\ fuel/s \times HV_{fuel}} \quad (1)$$

และ

$$V_{fuel\ per\ day} = \frac{3600.00 \cdot P_b}{\eta_{bth} \cdot HV_{fuel} \cdot \rho_{fuel}} \cdot T_{hour\ per\ day} \quad (2)$$

เมื่อ η_{bth} = ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

$Mass\ of\ fuel$ = มวลของเชื้อเพลิง (kg)

$V_{fuel\ per\ day}$ = ปริมาตรเชื้อเพลิงเหลวที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 วัน (l/day)

P_b = พิกัดกำลังของเครื่องยนต์ดีเซล (kW)

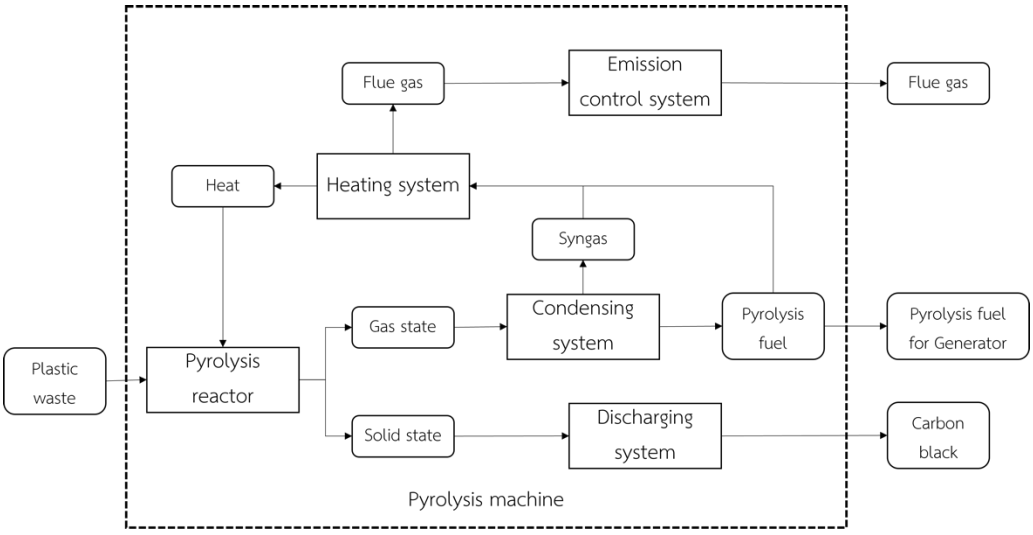
HV_{fuel} = ค่าความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิส (kJ/kg)

ρ_{fuel} = ความหนาแน่นน้ำมันไพโรไลซิส (kg/l)

$T_{hour\ per\ day}$ = เวลาที่ผลิตไฟฟ้าต่อวัน (hour/day)

ระบบผลิตเชื้อเพลิง ใช้เครื่องไพโรไลซิสแบบกะ (Batch type) ขนาดกำลังไฟฟ้า 225.00 kW สามารถผลิตน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis fuel) ผงคาร์บอน (Carbon black) และก๊าซที่ติดไฟ (Syn gas) โดยใช้ขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการ

ปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio-drying ($m_{plastic,bio}$) เป็นวัตถุดิบ โดยกระบวนการผลิต 1 รอบ ใช้ระยะเวลาประมาณ 15 ชั่วโมง ดังแสดงใน ภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนผังแสดงระบบผลิตเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่องไพโรไลซิสแบบกะ (Batch type)

จากภาพที่ 3 ปฏิกรณ์ของเครื่องไพโรไลซิสใช้น้ำมันไพโรไลซิสประมาณ 267.00 l และแก๊สที่ติดไฟที่ได้จากการผลิตทั้งหมดเป็นเชื้อเพลิง หากอัตราส่วนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis fuel) กับปริมาณขยะพลาสติก (Plastic waste) เท่ากับ 35.00 % (PF/PW) และเครื่องไพโรไลซิสดังกล่าวสามารถบรรจุขยะพลาสติกได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิตเท่ากับ 4,000.00 kg ($m_{pyrolysis\ per\ batch} = 4{,}000.00\ kg$) จะสามารถคำนวณปริมาตรน้ำมันไพโรไลซิส (V_{fuel}) ที่ผลิตได้ ดังนี้

$$V_{fuel\ per\ batch} = \frac{m_{pyrolysis\ per\ batch} \cdot (PF/PW)}{\rho_{fuel}} - V_{Reactor\ fuel} \quad (3)$$

เมื่อ $V_{fuel\ per\ batch}$ = ปริมาตรน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (l)

$m_{pyrolysis\ per\ batch}$ = มวลของขยะพลาสติกที่เครื่องไพโรไลซิสสามารถบรรจุขยะได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (kg)

PF/PW = อัตราส่วนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสกับปริมาณขยะพลาสติก

ρ_{fuel} = ความหนาแน่นน้ำมันไพโรไลซิส (kg/l)

$V_{Reactor\ fuel}$ = ปริมาตรน้ำมันไพโรไลซิสที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงของเตาปฏิกรณ์ (l)

เมื่อทราบค่าของ $V_{fuel\ per\ batch}$ จากสมการ (3), $V_{fuel\ per\ day}$ จากสมการ (2) และหากสัดส่วนการผลิตผงคาร์บอน (Carbon black) กับปริมาณขยะพลาสติก เท่ากับ 35.00 % (CB/PW) สามารถนำไปคำนวณเพื่อหาปริมาณผงคาร์บอน ($m_{carbon\ per\ batch}$) และจำนวนวันที่ใช้ผลิตไฟฟ้า ($D_{fuel\ per\ batch}$) สำหรับ 1 รอบการผลิตน้ำมันไพโรไลซิส ได้จากสมการ ดังนี้

$$m_{carbon\ per\ batch} = \frac{(CB/PW) \cdot V_{fuel\ per\ batch} \cdot \rho_{fuel}}{(PF/PW)} \quad (4)$$

และ

$$D_{fuel\ per\ batch} = \frac{V_{fuel\ per\ batch}}{V_{fuel\ per\ day}} \quad (5)$$

เมื่อ $m_{carbon\ per\ batch}$ = ปริมาณผงคาร์บอนที่ผลิตได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (kg)

CB/PW = อัตราส่วนการผลิตผงคาร์บอนกับปริมาณขยะพลาสติก

$V_{fuel\ per\ batch}$ = ปริมาตรน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (l)

PF/PW = อัตราส่วนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสกับปริมาณขยะพลาสติก

$D_{fuel\ per\ batch}$ = จำนวนวันที่สามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้าสำหรับน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (day)

$V_{fuel\ per\ day}$ = ปริมาตรน้ำมันไพโรไลซิสที่สามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้าใน 1 วัน (l/day)

จาก $m_{carbon\ per\ batch}$ ในสมการที่ (4), $D_{fuel\ per\ batch}$ ในสมการที่ (5) และ $m_{pyrolysis\ per\ batch}$ = 4,000.00 kg สามารถนำไปคำนวณเพื่อหาปริมาณผงคาร์บอนที่ผลิตได้สำหรับ 1 เดือน ($m_{carbon\ per\ month}$) และปริมาณขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 เดือน ($m_{plastic,bio,month}$) ได้จากสมการ ดังนี้ หากจำนวนวันในการผลิตไฟฟ้า 1 เดือน เท่ากับ 29.00 days ($D_{electric\ per\ month}$ = 29.00 days) ซึ่งวันที่หายไปจะใช้สำหรับการบำรุงรักษาเครื่องผลิตไฟฟ้า

$$m_{plastic,bio,month} = \frac{m_{pyrolysis\ per\ batch} \cdot D_{electric\ per\ month}}{D_{fuel\ per\ batch}} \quad (6)$$

และ

$$m_{carbon\ per\ month} = \frac{m_{carbon\ per\ batch} \cdot D_{electric\ per\ month}}{D_{fuel\ per\ batch}} \quad (7)$$

เมื่อ $m_{plastic,bio,month}$ = ปริมาณขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 เดือน (kg)

$m_{pyrolysis\ per\ batch}$ = มวลของขยะพลาสติกที่เครื่องไพโรไลซิสสามารถบรรจุขยะได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (kg)

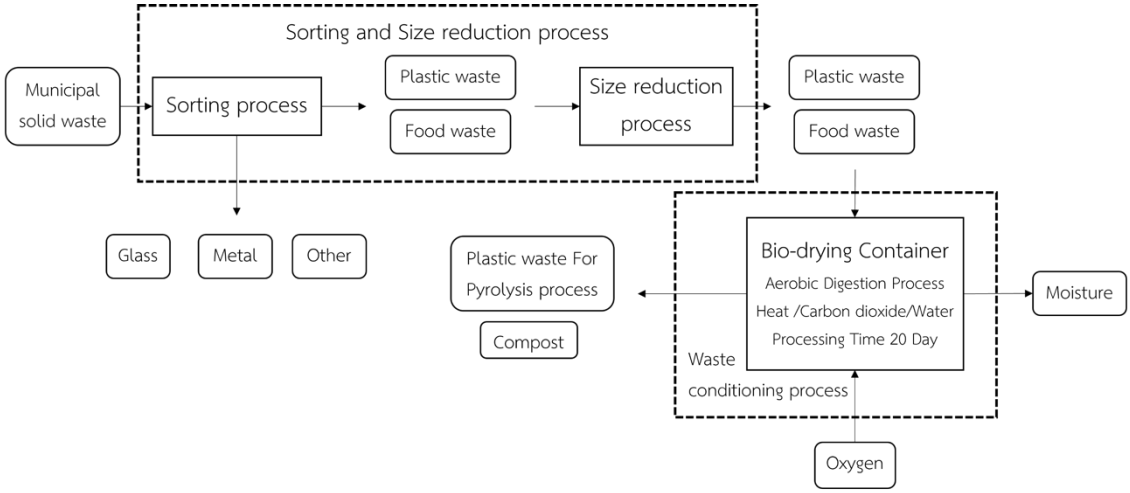
$D_{electric\ per\ month}$ = จำนวนวันในการผลิตไฟฟ้า 1 เดือน (day)

$D_{fuel\ per\ batch}$ = จำนวนวันที่สามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้าสำหรับน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (day)

$m_{carbon\ per\ month}$ = ปริมาณผงคาร์บอนที่ผลิตได้สำหรับ 1 เดือน (kg)

$m_{carbon\ per\ batch}$ = ปริมาณผงคาร์บอนที่ผลิตได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (kg)

กระบวนการปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying ของ พิสิษฏ์ มณีโชติ [3] เป็นกระบวนการลดความชื้นของขยะมูลฝอย โดยนำขยะที่ผ่านกระบวนการคัดแยกและลดขนาดแล้วหมักด้วยตู้คอนเทนเนอร์แบบเปิดฝาด้านบน การหมักจะอาศัยกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์โดยทำการป้อนอากาศด้วยเครื่องเป่าลมเข้าไปให้เพียงพอ ซึ่งวิธีดังกล่าวจะไม่ให้ก่อให้เกิดแก๊สมีเทน ซึ่งสามารถช่วยลดกลิ่นรบกวนลงได้ แหล่งอาหารของจุลินทรีย์ ได้แก่ ขยะอินทรีย์ หรือขยะที่มีธาตุคาร์บอนและไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบ รวมไปถึงองค์ประกอบอื่นๆ ในขยะมูลฝอย เมื่อจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายจะผลิต คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นทำให้อุณหภูมิในระบบสูงขึ้น เป็นการไล่ความชื้นส่วนเกินออกจากขยะได้ ดังแสดงใน ภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนผังแสดงระบบปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying ของขยะประเภทพลาสติกและอาหารหลังจากผ่านระบบคัดแยกและลดขนาดแล้ว

จากภาพที่ 4 ขยะมูลฝอย (Municipal solid waste) ประกอบไปด้วย ขยะประเภทอาหาร (Food), พลาสติก (Plastic), แก้ว (Glass), โลหะ (Metal) และขยะอื่นๆ (Others) เมื่อทราบ $m_{plastic,bio,month}$ ได้จากสมการที่ (6) สามารถคำนวณหาปริมาณขยะพลาสติกก่อนผ่านกระบวนการปรับสภาพขยะเพื่อลดความชื้นโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying ที่ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 เดือน ($m_{w,plastic,month}$) โดยใช้ข้อมูลน้ำหนักของขยะมูลฝอยหลังจากนำไปหมักด้วยตู้ Bio–drying เป็นระยะเวลา 20 วัน ของพิสิษฐ์ มณีโชติ [3] พบว่าน้ำหนักลดลงประมาณ 56.00 % ปริมาณน้ำหนักที่หายไปจะเป็นน้ำ (Moisture content = 56.00 %) ในระยะเวลา 30 วันได้จากสมการ

$$\text{Moisture content} = [1 - (\frac{m_{plastic,bio,month}}{m_{w,plastic,month}})] \cdot 100 \quad (8)$$

เมื่อ Moisture content = ปริมาณความชื้นที่ออกจากขยะ (%)

$m_{plastic,bio,month}$ = ปริมาณขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 เดือน (kg)

$m_{w,plastic,month}$ = ปริมาณขยะพลาสติกก่อนผ่านกระบวนการปรับสภาพขยะเพื่อลดความชื้นโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying ที่ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 เดือน (kg)

เมื่อได้ $m_{w,plastic,month}$ จากสมการที่ (8) แล้ว สามารถนำไปคำนวณปริมาณขยะประเภทต่างๆ และปริมาณขยะมูลฝอยสำหรับที่ใช้วัตถุดิบในการผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 เดือน ($m_{msw,month}$) โดยการเทียบอัตราส่วนของขยะประเภทต่างๆกับขยะมูลฝอยของบ่อขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ ซึ่งใช้ข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษ [12] อัตราส่วนของขยะประเภทอาหาร (Food), พลาสติก (Plastic), แก้ว (Glass), โลหะ (Metal) และขยะอื่นๆ (Others) กับขยะมูลฝอย (Municipal solid waste) มีค่าเท่ากับ 44.61, 35.39, 4.30, 7.86, และ 7.84 % ตามลำดับ ได้จากสมการดังนี้

$$m_{msw,month} = m_{w,plastic,month} + m_{w,food,month} + m_{w,glass,month} + m_{w,metal,month} + m_{w,other,month} \quad (9)$$

และ

$$m_{msw,month} = m_{w,plastic,month} + \frac{(FW/MSW) \cdot m_{w,plastic,month}}{(PW/MSW)} + \frac{(GW/MSW) \cdot m_{w,plastic,month}}{(PW/MSW)} + \frac{(MW/MSW) \cdot m_{w,plastic,month}}{(PW/MSW)} + \frac{(OW/MSW) \cdot m_{w,plastic,month}}{(PW/MSW)} \quad (10)$$

เมื่อ $m_{msw,month}$ = ปริมาณขยะมูลฝอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไฟฟ้าใน 1 เดือน (kg)

$m_{w,plastic,month}$ = ปริมาณขยะประเภทพลาสติกใน 1 เดือน (kg)

$m_{w,food,month}$ = ปริมาณขยะประเภทอาหารใน 1 เดือน (kg)

$m_{w,glass,month}$ = ปริมาณขยะประเภทแก้วใน 1 เดือน (kg)

$m_{w,metal,month}$ = ปริมาณขยะประเภทโลหะใน 1 เดือน (kg)

$m_{w,other,month}$ = ปริมาณขยะประเภทอื่นๆใน 1 เดือน (kg)

FW/MSW = อัตราส่วนปริมาณขยะประเภทอาหารกับปริมาณขยะมูลฝอย

GW/MSW = อัตราส่วนปริมาณขยะประเภทแก้วกับปริมาณขยะมูลฝอย

MW/MSW = อัตราส่วนปริมาณขยะประเภทโลหะกับปริมาณขยะมูลฝอย

OW/MSW = อัตราส่วนปริมาณขยะประเภทอื่นๆกับปริมาณขยะมูลฝอย

PW/MSW = อัตราส่วนปริมาณขยะประเภทพลาสติกกับปริมาณขยะมูลฝอย

ขยะประเภทอาหารเมื่อนำไปหมักด้วยตู้ Bio–drying จะเปลี่ยนสภาพเป็นปุ๋ยหมัก (Compost) โดยน้ำหนักจะลดลงประมาณ 56.00 % ซึ่งน้ำหนักที่หายไปจะเป็นน้ำ (Moisture content = 56.00 %) เมื่อได้ปริมาณขยะประเภทอาหารสำหรับ 1 เดือน ($m_{w,food,month}$) จากสมการที่ (9) และสมการที่ (10) $m_{w,plastic,month}$ ที่ได้จากสมการ (8) สามารถนำไปคำนวณเพื่อหาปริมาณปุ๋ยหมักที่ผลิตได้สำหรับ 1 เดือน ($m_{compost,month}$) และปริมาณขยะที่ต้องนำไปปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying สำหรับ 1 เดือน ($m_{w,container,month}$) ได้จากสมการ ดังนี้

$$m_{compost\ per\ month} = (1 - Moisture\ content) \cdot m_{w,food,month} \quad (11)$$

และ

$$m_{w,container,month} = m_{w,plastic,month} + m_{w,food,month} \quad (12)$$

เมื่อ $m_{compost\ per\ month}$ = ปริมาณปุ๋ยหมักที่ผลิตได้สำหรับ 1 เดือน (kg)

$Moisture\ content$ = ร้อยละความชื้นที่ออกจากขยะ (%)

$m_{w,food,month}$ = ปริมาณขยะประเภทอาหารสำหรับ 1 เดือน (kg)

$m_{w,container,month}$ = ปริมาณขยะประเภทพลาสติกและอาหารที่ต้องนำไปปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying สำหรับ 1 เดือน (kg)

$m_{w,plastic,month}$ = ปริมาณขยะประเภทพลาสติกสำหรับ 1 เดือน (kg)

$m_{w,container,month}$ ที่ได้จากสมการที่ (12) จะนำไปวิเคราะห์เพื่อเลือกขนาดของตู้คอนเทนเนอร์ ที่เหมาะสม โดยกำหนดให้ตู้คอนเทนเนอร์ 1 ตู้ สามารถบรรจุขยะประเภทพลาสติกและอาหารที่ต้องนำไปปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying เพื่อผลิตไฟฟ้าสำหรับ 5 วัน ดังนั้นต้องใช้ตู้คอนเทนเนอร์จำนวน 6.00 ตู้ ($n_{container}$ = 6.00 Unit) เพื่อบรรจุขยะประเภทพลาสติกและอาหารที่ต้องนำไปปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying สำหรับ 1 เดือน ($m_{w,container,month}$) ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณขยะที่ตู้คอนเทนเนอร์สามารถบรรจุได้ต่อ 1 ตู้ ($m_{container}$) จากสมการ

$$m_{container} = \frac{m_{w,container,month}}{n_{container}} \quad (13)$$

เมื่อ $m_{container}$ = ปริมาณขยะที่ตู้คอนเทนเนอร์สามารถบรรจุได้ (kg/Unit)

$m_{w,container,month}$ = ปริมาณขยะประเภทพลาสติกและอาหารที่ต้องนำไปปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying สำหรับ 1 เดือน (kg)

$n_{container}$ = จำนวนตู้คอนเทนเนอร์ (Unit)

ค่าต่างๆ ที่หาได้จากสมการข้างต้น จะนำไปจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าโดยประเมินปริมาณขยะมูลฝอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสว่ามีเพียงพอสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือไม่ และพิจารณาความคุ้มค่าในการลงทุนโดยการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งพิจารณาจากจำนวนเงินลงทุนในปีแรกและเงินลงทุนเปลี่ยนเครื่องจักรใหม่ในปีที่ 10 ที่ใช้ในการดำเนินโครงการ รวมไปถึงค่าใช้จ่ายและรายได้ที่ได้จากการดำเนินโครงการตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ หากกำหนดให้ระยะเวลาในการดำเนินโครงการเท่ากับ 20.00 years และอัตราคิดลดที่ 6.00 % แล้วนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณต้นทุนการผลิตต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) โดยใช้หลักการดังนี้

ต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้า คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนผลิตพลังงานไฟฟ้า 1 หน่วย หรือ 1 kWh โดยเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้ากับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ยิ่งต้นทุนการผลิตไฟฟ้า ต่ำกว่าอัตรารับซื้อมากเพียงใดยิ่งมีความน่าลงทุน โดยจะคิดแยกเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 พิจารณาจากต้นทุนการผลิตไฟฟ้ากับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยพิจารณาจากจำนวนเงินลงทุนของโครงการรวมค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ กับจำนวนหน่วยของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ผลิตได้ตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{ต้นทุนการผลิตไฟฟ้ากรณีที่ 1} = \frac{\text{จำนวนเงินลงทุน} + \text{ค่าดำเนินการ ตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ}}{\text{จำนวนหน่วยของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ตลอดทั้งโครงการ}} \quad (14)$$

ส่วนกรณีที่ 2 พิจารณาจากจำนวนเงินลงทุนของโครงการรวมค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการหักลบกับรายได้อื่นๆ นอกเหนือจากการผลิตไฟฟ้า กับจำนวนหน่วยพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ผลิตได้ตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{ต้นทุนการผลิตไฟฟ้ากรณีที่ 2} = \frac{\text{จำนวนเงินลงทุน} + \text{รวมค่าดำเนินการ} - \text{รายได้อื่นๆ ตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ}}{\text{จำนวนหน่วยของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ตลอดทั้งโครงการ}} \quad (15)$$

ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิในแต่ละปีมีค่าเท่ากับเงินลงทุนในปีแรกและเงินลงทุนเปลี่ยนเครื่องจักรใหม่ในปีที่ 10 ที่ใช้ในการดำเนินโครงการ หรือหมายถึงการดำเนินโครงการไม่มีกำไรหรือขาดทุน โดยระยะเวลาคืนทุนน้อยเพียงใดยิ่งมีความน่าลงทุน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ [8]

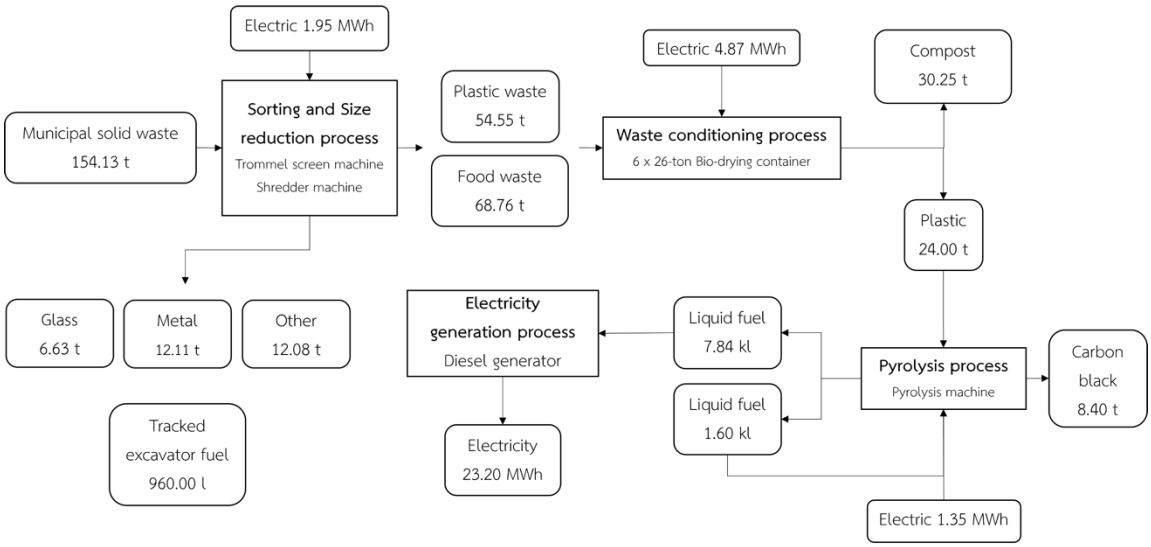
$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (PB)} = \frac{\text{ค่าเงินลงทุนเบื้องต้นที่ใช้ในการดำเนินโครงการ}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิในแต่ละปี}} \quad (16)$$

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return : IRR) คือ การกำหนดอัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (Net present value : NPV) เท่ากับศูนย์ หรือหมายถึง IRR เป็นค่าแสดงถึงอัตราผลตอบแทนของโครงการ เพื่อใช้พิจารณาว่าโครงการจะคืนทุนในอัตราเท่าใด โดย IRR ควรมีค่ามากกว่าศูนย์และยิ่งมีค่ามากเพียงใดยิ่งมีความคุ้มค่าในลงทุน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ [8]

$$\text{มูลค่าปัจจุบันสุทธิ } (NPV) = 0 = \sum_{t=0}^{n} \frac{B_t - C_t}{(1 + IRR)^t} \quad (17)$$

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากข้อมูลพื้นที่ศึกษาของโครงการตั้งอยู่ในพื้นที่บ่อกำจัดขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ และเงื่อนไขในการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก ผลิตไฟฟ้าวันละ 8.00 hours ระยะเวลาดำเนินโครงการเท่ากับ 20.00 years ผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลพิกัดกำลัง (P_b) 110.00 kW เป็นต้นกำลัง ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 125.00 kVAR/100.00 kW ใช้น้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้จากเครื่องไพโรไลซิสแบบกะ (Batch type) เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสเป็นขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการคัดแยกและลดขนาด แล้วนำไปลดความชื้นโดยกระบวนการปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying ซึ่งอาศัยกระบวนการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ แสดงตามใน ภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แผนผังแสดงการจำลองออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงขยะในระยะเวลา 1 เดือน

จากภาพที่ 5 ขยะมูลฝอยจะถูกนำไปเข้ากระบวนการคัดแยก (Sorting process) คัดแยกขยะด้วยแรงงานคน และเครื่องคัดแยกขยะแบบตะแกรงหมุน (Trommel screen machine) โดยทำการคัดแยกขยะออกเป็น 5 ประเภทดังนี้ 1) ขยะประเภทพลาสติก (Plastic waste) 2) ขยะประเภทอาหาร (Food waste) 3) ขยะประเภทแก้ว (Glass waste) 4) ขยะประเภทโลหะ (Metal waste) และ 5) ขยะประเภทอื่นๆ (Other waste) ขยะประเภทพลาสติกและอาหารจะนำไปเข้ากระบวนการลดขนาด (Size reduction process) โดยใช้เครื่องบด (Shredder machine) หลังจากนั้นนำไปเข้ากระบวนการปรับสภาพขยะ (Waste conditioning process) โดยใช้ตู้ Bio-drying ปรับสภาพขยะด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนของเชื้อจุลินทรีย์เป็นระยะเวลา 20 วัน ขยะประเภทอาหารจะเปลี่ยนสภาพเป็นปุ๋ยหมักและขยะประเภทพลาสติกจะถูกปรับสภาพให้มีความชื้นลดลง ขยะประเภทพลาสติกจะนำไปเข้ากระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) โดยใช้เครื่องไพโรไลซิส (Pyrolysis machine) เพื่อผลิตน้ำมันไพโรไลซิสและผงคาร์บอน น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากกระบวนการจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าและเป็นเชื้อเพลิงสำหรับปฏิกรณ์ของเครื่องไพโรไลซิส โดยระบบผลิตไฟฟ้าดังกล่าวจะใช้รถขุดตักขยะ (Tracked excavator) เพื่อช่วยในการป้อนขยะในแต่ละกระบวนการ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณการจำลองออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก พบว่า ใช้ขยะมูลฝอยเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องจักรในแต่ละกระบวนการ และน้ำมันสำหรับรถขุดตักขยะในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 154.13 t 8,171.00 kWh และ 960.00 l ตามลำดับ สำหรับการผลิตไฟฟ้าในระยะเวลา 1 เดือน สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 2.32 MWh ปุ๋ยหมัก 30.252 t และผงคาร์บอน 8.40 t โดยปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าบ่อกำจัดขยะเดือนละ 300.00 t เมื่อเปรียบกับปริมาณขยะมูลฝอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไฟฟ้าสำหรับระยะเวลา 1 เดือน พบว่า ใช้ขยะมูลฝอยในการผลิตไฟฟ้าต่อเดือนเพียง 48.62 % ของปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าบ่อกำจัดขยะต่อเดือน

ซึ่งเพียงพอต่อระบบผลิตไฟฟ้าดังกล่าว ปริมาณขยะที่เหลือสามารถสร้างเสถียรภาพของโครงการโดยใช้เป็นวัตถุดิบสำรองในการผลิตไฟฟ้า หรือเพิ่มมูลค่าให้กับโครงการได้โดยขายเป็นเชื้อเพลิงขยะประเภท RDF2 หรือเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้า

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณการจำลองออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก สามารถนำไปประเมินต้นทุนการก่อสร้าง รายได้ และค่าดำเนินการต่างๆ ของโครงการ โดยเงื่อนไข อัตรารับซื้อไฟฟ้าจากโครงการผลิตไฟฟ้าจากขยะชุมชนในรูปแบบ Fit สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) สำหรับปี 2565 ระยะเวลาสนับสนุน 20.00 years เท่ากับ 5.08 TBH ราคาขายปุ๋ยหมักเท่ากับ 2,500.00 TBH/t และผงคาร์บอนเท่ากับ 30,000.00 TBH/t ส่วนอัตรารับซื้อขยะประเภทแก้วเท่ากับ 800.00 TBH/t และโลหะเท่ากับ 3,000.00 TBH/t [13] อัตราค่าจ้างขั้นต่ำของจังหวัดกำแพงเพชรเท่ากับ 332.00 TBH/day [14] ค่ากระแสไฟฟ้าของโครงการ ประเภทกิจการขนาดกลาง แรงดัน 22.00 - 33.00 kV ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า 196.26 TBH/kW ค่าพลังงานไฟฟ้า 3.17 TBH/kWh ค่าบริการ 312.24 TBH/month [15] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากระบบประมาณการค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [16] และค่าน้ำมันของรถขุดตักขยะซึ่งใช้น้ำมันดีเซล B7 เป็นเชื้อเพลิง ราคา 31.94 TBH/l [17] สามารถแสดงผลได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 3 ผลการการประเมินต้นทุนและรายรับ-รายจ่ายของการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงขยะ

รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	ระยะเวลา	จำนวนเงิน (TBH)
ต้นทุน			20 years	25,501,680.16
- เครื่องคัดแยกขยะ	1.00 Unit	3,300,000.00 TBH/Unit		3,300,000.00
- เครื่องสับขยะ	6.00 Unit	394,900.00 TBH/Unit		2,369,400.00
- สายพานลำเลียง	6.00 Unit	110,000.00 TBH/Unit		660,000.00
- ตู้ Bio-drying	6.00 Unit	273,900.00 TBH/Unit		1,643,400.00
- ตะแกรงร่อนขยะ	2.00 Unit	157,190.00 TBH/Unit		314,380.00
- เครื่องไพโรไลซิส	1.00 Unit	1,897,500.00 TBH/Unit		1,897,500.00
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นกำลังเครื่องยนต์ดีเซล	1.00 Unit	770,000.00 TBH/Unit		770,000.00
- รถขุดตักขยะ	1.00 Unit	1,210,000.00 TBH/Unit		1,210,000.00
- ค่าโครงสร้าง	1.00 Unit	6,001,600.00 TBH/Unit		6,001,600.00
- ค่าเชื้อเพลิงเดือนแรกของโครงการ	8.00 kl	31.94 TBH/l		281,072.00
- ค่าเปลี่ยนเครื่องจักรปีที่ 10	1.00 Unit	7,054,328.16 TBH/Unit		7,054,328.16
รายรับ (รายปี)			1 year	5,845,530.00
- ค่ากระแสไฟฟ้า	278.40 MWh	5.08 TBH/kWh		1,414,272.00
- ค่าปุ๋ยหมัก	363.00 t	2,500.00 TBH/t		907,500.00
- ค่าผงคาร์บอน	100.80 t	30,000.00 TBH/t		3,024,000.00
- ค่าขยะประเภทแก้ว	79.56 t	800.00 TBH/t		63,648.00
- ค่าขยะประเภทเหล็ก	145.37 t	3,000.00 TBH/t		436,110.00
มูลค่าซาก				1,038,245.49
- มูลค่าซาก ปลายปีที่ 10	1.00 Unit	250,914.69 TBH/Unit	(10% ของต้นทุน)	250,914.69
- มูลค่าซาก ปลายปีที่ 20	1.00 Unit	787,330.80 TBH/Unit	(10% ของต้นทุน)	787,330.80
รายจ่าย (รายปี)			1 year	2,698,688.64
- ค่าแรงงาน	5.00 Unit	119,520.00 TBH/Unit		597,600.00
- ค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องจักร	96.27 MWh	คำนวณจากระบบของ กฟภ.		863,139.84
- ค่าน้ำมันของรถขุดตักขยะ	11.52 kl	31.94 THB/l		367,948.80
- ค่าซ่อมบำรุงเครื่องจักร	1.00 Unit	870,000.00 TBH/Unit		870,000.00

จากผลการคำนวณตามตารางที่ 1 สามารถนำมาประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในแง่ของความน่าคุ้มค่าในการลงทุนดำเนินโครงการ โดยพิจารณาจากต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาคืนทุน (PB) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) โดยเงื่อนไข ระยะเวลาดำเนินโครงการ 20.00 years และอัตราคิดลดที่ 6.00 % ซึ่งพบว่า หากรายได้ของการจำลองออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก คือ มีการขายพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 9.94 THB/kWh สูงกว่าอัตรารับซื้อซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.08 THB/kWh ซึ่งไม่คุ้มค่าในการลงทุน ในอีกกรณี หากมีการรวมรายได้จากการขายปุ๋ยหมัก ผงคาร์บอน ขยะประเภทแก้ว และโลหะแล้ว จะทำให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.83 THB/kWh ซึ่งต่ำกว่าอัตรารับซื้อเท่ากับ 4.25 THB/kWh ทำให้มีความคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่ากรณีแรก ส่วนการพิจารณาระยะเวลาคืนทุนและอัตราผลตอบแทนภายในพบว่า มีค่าระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 7.80 years และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 11.22 % สูงกว่าอัตราคิดลดเท่ากับ 5.20 % ซึ่งมีความคุ้มค่าในการลงทุน จากการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าดังกล่าว สามารถช่วยจัดการแก้ไขปัญหาขยะล้นบ่อได้โดยการนำขยะประเภทอาหารไปผลิตเป็นปุ๋ยหมักและนำขยะประเภทพลาสติกไปผลิตเป็นน้ำมันไพโรไลซิส ซึ่งการแก้ไขปัญหาดังกล่าวหากมีการศึกษาเพิ่มเติมจะสามารถเพิ่มรายได้ให้กับระบบผลิตไฟฟ้า โดยการขายคาร์บอนเครดิตจากโครงการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจตามมาตรฐานของประเทศไทย (Thailand Voluntary Emission Reduction Program, T-VER) ตามระเบียบวิธีการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจสำหรับการผลิตปุ๋ยหรือสารปรับปรุงดินจากขยะอินทรีย์ (T-VER-S-METH-09-02) และการผลิตเชื้อเพลิงขยะจากขยะมูลฝอยชุมชน (T-VER-S-METH-09-03) [18] นอกจากนั้นแล้วในส่วนของแก๊สร้อนที่ปลดปล่อยจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลังและจากปฏิกรณ์ของเครื่องไพโรไลซิส หากมีการศึกษาเพิ่มเติมจะสามารถนำแก๊สร้อนดังกล่าวไปผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำโดยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle, ORC) ซึ่งจะสามารถเพิ่มมูลค่าและความคุ้มค่าในการลงทุนให้กับระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะดังกล่าวได้

สรุปผลการวิจัย

ศักยภาพของการจำลองออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการคัดแยกและลดขนาด แล้วนำไปลดความชื้นโดยกระบวนการปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio–drying ซึ่งอาศัยกระบวนการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ ณ พื้นที่บ่อกำจัดขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ โดยกำหนดให้ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีกำลังการผลิตไฟฟ้า 100.00 kW ผลิตไฟฟ้าวันละ 8.00 hours ประกอบด้วย ต้นกำลังที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซล พิกัดกำลังของเครื่องยนต์ดีเซล (P_b) 110.00 kW และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาด 100.00 kW/125.00 kVAR ใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกที่ผลิตได้จากเครื่องไพโรไลซิสแบบกะ (Batch type) เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาดำเนินโครงการ 20.00 years และอัตราคิดลดที่ 6.00 % สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า, ปุ๋ยหมัก และผงคาร์บอนได้ 5,568.00 MWh, 7.30 kt และ 2.02 kt ตามลำดับ ปริมาณขยะมูลฝอยสำหรับใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าดังกล่าว พบว่าใช้เพียง 154.13 t/month ซึ่งปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าบ่อกำจัดขยะดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือเท่ากับ 300.00 t/month มีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าหากรายได้มาจากการขายไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวและรายได้มาจากการขายไฟฟ้าและการขายผลผลิตอื่นๆ (ปุ๋ยหมัก, ผงคาร์บอน และขยะประเภทแก้วและโลหะ) เท่ากับ 9.94 และ 0.83 THB/kWh ตามลำดับ สำหรับกรณีที่รายได้มาจากการขายไฟฟ้าและการขายผลผลิตอื่นๆ ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 7.80 years และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 11.22 % จากผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณสามารถสรุปได้ว่าบ่อกำจัดขยะดังกล่าวมีศักยภาพเพียงพอที่จะดำเนินโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก และมีความคุ้มค่าในการลงทุนสำหรับกรณีที่รายได้ของโรงไฟฟ้าดังกล่าวมาจากการขายไฟฟ้าและการขายผลผลิตอื่นๆ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโดยกองทุนเงินอุดหนุนจากสัญญาโรงกลั่นปิโตรเลียม และขอขอบคุณ คุณเกยูร ช่ออัญชัญ พลังงานจังหวัดกำแพงเพชร สำนักงานพลังงานจังหวัดกำแพงเพชร ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำวิจัย คุณพชร เพชรอ่อน ผู้อำนวยการกองสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อม เทศบาลตำบลลานกระบือ ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับบ่อกำจัดขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ คุณเอกวัฒน์ จูห้อง ผู้จัดการทั่วไป บริษัท มัลติเฟส คอร์เปอเรชั่น จำกัด และคุณชุมพล เมฆอารี วิศวกรโครงการบริษัท เอ ทีม เมนเทนแนนท์ แอนด์ เซอร์วิส จำกัด ที่ให้คำปรึกษาและข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงจากขยะ

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมควบคุมมลพิษ. **บ่อขยะทต.ลานกระบือ**. สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม 2566, จาก https://thaimsw.pcd.go.th/search_storage.php?storage_id=797&year=2564&fbclid=IwAR1sXIwr7oxtnFJmbhp0ly_22NaVNuLGWfabCQvDsbU8bVMuAX6NhTvZNvc

[2] กองจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ. (2566). **รายงานสถานการณ์สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2565** สืบค้นเมื่อ 3 สิงหาคม 2566, จาก https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2023/04/pcdnew-2023-05-23_07-53-42_299799.pdf

[3] พิสิษฏ์ มณีโชติ (2565). การนำชีวมวลและของเสียเหลือทิ้งเป็นแหล่งพลังงานสำหรับชุมชนเขียว ภายใต้โครงการการเสริมสร้างชุมชนสีเขียวอย่างยั่งยืนด้วยพลังงานทดแทน โดย ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ **(2565)** รายงานวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563

[4] คงเดช พะสีนาม และธันวมาส กาศสนุก. (2565). การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กเมื่อใช้น้ำมัน ดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลจากขยะพลาสติก. **วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัย กาฬสินธุ์. 1**(2), 1-13.

[5] Kalargaris, I., Tian, G., & Gu, S. (2017). Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. **Fuel Processing Technology.** 157, 108-115.

[6] เสมอใจ ศุขสุเมฆ. (2564). “ประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่อง ประกาศรับซื้อไฟฟ้าโครงการผลิตไฟฟ้าจากขยะชุมชน พ.ศ. 2565”, ใน **การประชุมมติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ครั้งที่ 3/2565 (ครั้งที่ 158)**, 6 พฤษภาคม 2565 ณ ตึกภักดีบดินทร์ ทำเนียบรัฐบาล

[7] กนกวรรณ พละศักดิ์, สิทธิชัย จันทาสูงเนิน, และสราวุธ ประเสริฐศร (2558). “การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมผงเถ้าเขม่าดำจากกระบวนการไพโรไลซิสกับเขม่าดำทางการค้า”, ใน **การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภาคตะวันออกเฉียงเหนือ**, 21 กุมภาพันธ์ 2558 ณ อาคารวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

[8] สุริยล อุดชาชน (2564). **การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์และความเสี่ยงในการลงทุนโครงการโรงไฟฟ้าขยะในพื้นที่จังหวัดพิจิตร.** วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. พิษณุโลก : มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[9] Weifang Power Machinery Equipment Co., Ltd. **เครื่องกำเนิดไฟฟ้า**. สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม 2566,

จาก https://www.alibaba.com/product-detail/Power-generator-125KVA-silent-generator-set_62178931583.html?fbclid=IwAR1q56ZAbP1Mr65hl9_LPreP4yTwxmtIVYzNRGCaLhCOJMvC0MQTOl0ZYsw

[10] XinXiang Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd. **เครื่องไพโรไลซิส**. สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม 2566, จาก https://www.huayinenergy.com/products/d_62a1b9c5e61684006d2408e7.html?5xyFrom=google-NT

[11] GANESAN V. (2012). **IC Engines (4th Edition).** New Delhi. McGraw Hill Education, Inc.

[12] กองจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ. **การศึกษาองค์ประกอบขยะมูลฝอย ปี 2564**. สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม 2566, จาก https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2022/08/pcdnew-2022-08-09_08-58-28_103322.pdf

[13] บริษัท วงษ์พาณิชย์ อินเตอร์เนชั่นเนล จำกัด. **อัตรารับซื้อขยะ**. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2566, จาก https://wongpanit.com/print_history_price/539?fbclid=IwAR10kLQ08-Er7iWwuJE9vf-9hNJkutQs3Cmn0figzgKsH8RUOliemgT5Lew

[14] สำนักงานแรงงานจังหวัดกำแพงเพชร. **อัตราค่าจ้างขั้นต่ำ**. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2566, จาก https://kamphaengphet.mol.go.th/%E0%B8%AD%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%84%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%88%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%82%E0%B8%B1%E0%B9%89%E0%B8%99%E0%B8%95%E0%B9%88%E0%B8%B3?fbclid=IwAR0T6qWt8J69uq4vpQxYcQyDqZkmGrAGIOayBvbA7z3kBOmnxiLRz4synr4

[15] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. **อัตราค่าไฟฟ้า**. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2566, จาก https://www.pea.co.th/Portals/0/Document/Rate2015Update.pdf?fbclid=IwAR1Qqls1CWCQ2-8FwBhPeJMgFHYI1G7xMZAyvxlShWs9kG1bVFznYcCZ3ww

[16] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. **ระบบประมาณการค่าไฟฟ้า**. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2566, จาก https://eservice.pea.co.th/EstimateBill/?fbclid=IwAR1JcqKEnnbXNX9m2N4E3_0xr-oe_c15AP_X3H2eHWHR5MgZfFzLhqRttgI

[17] กระทรวงพลังงาน. **ราคาขายปลีก น้ำมัน**. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2566, จาก https://www.energy.go.th/

[18] องค์การบริการก๊าซเรือนกระจก. **ระเบียบวิธีการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจ**. สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2566, จาก https://ghgreduction.tgo.or.th/th/tver-method/t-ver-classify-methodology/t-ver-methodology9.html