



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.

UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การประเมินวัฏจักรชีวิต และวัฏจักรชีวิตเอ็กเซอร์จิติคของผลิตภัณฑ์ ควอตซ์ คริสตัล ยูนิท ร่วมกับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยใช้เชื้อเพลิงขยะ

Conventional and Exergetic Life Cycle Assessments of Quartz Crystal Unit Product Combined with Organic Rankine Cycle by Using Refuse Derived Fuel

วรพันธ์ กันธิยะ¹ นัฐพร ไชยญาติ^{1*} วรธรรมล เลิศจตุรนนท์¹

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

Woraphan Kantiya¹ Nattaporn Chaiyat^{1*} Wassamon Lertjaturanon¹

¹ School of Renewable Energy, Maejo University, Sansi District, Chiang Mai 50290

* Corresponding author.

E-mail: benz178tii@hotmail.com; Telephone: 08 8252 3088

วันที่รับบทความ 18 ธันวาคม 2561; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 1 13 มกราคม 2562; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 2 17 พฤษภาคม 2562; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 3 14 มิถุนายน 2562; วันที่ตอบรับบทความ 27 มิถุนายน 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต และการประเมินวัฏจักรชีวิตเอ็กเซอร์จิติคของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิท บริษัท เคียวเซรา คริสตัล ดีไวซ์ (ประเทศไทย) จำกัด ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยใช้ขยะในเขตนิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ โดยทำการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมทั้งหมด 6 ด้าน ร่วมกับต้นทุนด้านเศรษฐศาสตร์ ผลการศึกษา พบว่า การนำเชื้อเพลิงขยะมาผลิตไฟฟ้า เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิท สามารถลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมได้ โดยสามารถลดพิษต่อระบบนิเวศนับบวกได้มากที่สุด คือ 9.65E+05 kg 1,4 DB-eq ลดลงร้อยละ 57.43 รองลงมา คือ การลดลงของชั้นโอโซน 2.13E+06 kg CFC-11-eq ลดลงร้อยละ 34.33 ภาวะฝนกรด 9.56E+06 kg SO₂-eq ลดลงร้อยละ 3.81 ความเป็นพิษต่อมนุษย์ 1.95E+10 kg 1,4 DB-eq ลดลงร้อยละ 0.54 ภาวะโลกร้อน 1.36E+10 kg CO₂-eq ลดลงร้อยละ 0.16 และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด 9.49E+07 kg 1,4 DB-eq ลดลงร้อยละ 0.15 ตามลำดับ การประเมินวัฏจักรชีวิตเอ็กเซอร์จิติค พบว่า ระบบหลังการปรับปรุงสามารถลดความต้องการพลังงานสะสมรวมได้ 370,506.67 MJ โดยมีค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยจากเชื้อเพลิงขยะ 1.50 บาท/kWh และสามารถลดค่าต้นทุนการผลิตของผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิท ได้เท่ากับ 1.44 บาท/ชิ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตก่อนการปรับปรุงเท่ากับ 1.47 บาท/ชิ้น ซึ่งสามารถลดต้นทุนได้ร้อยละ 2.04

คำสำคัญ

การประเมินวัฏจักรชีวิต การประเมินวัฏจักรชีวิตเอ็กเซอร์จิติค ควอตซ์ คริสตัล ยูนิท ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย ค่าต้นทุนการผลิตต่อหน่วย

Abstract

This research studies the conventional and exergetic life cycle assessments of a Quartz Crystal Unit production processes of Kyocera Crystal Device (Thailand) Company Limited combined with an Organic Rankine Cycle by using municipal solid waste in the Northern Region Industrial Estate. The environmental impact of 6 indicators and the economic results are analyzed. From the study results, it can be seen that the electrical process from a refuse derived fuel for using in the Quartz Crystal Unit production processes can be reduced the environmental effects. An ecotoxicity at a value of $9.67\text{E}+05$ kg 1,4 DB-eq is the highest impact, which mostly reduce at approximately 57.43%. The second environmental impact is an ozone depletion as $2.13\text{E}+06$ kg CFC-11-eq at a reduction ratio of 34.33%. After that, the impacts a terrestrial acidification of $9.56\text{E}+06$ kg SO_2 -eq at a reduction ratio of 3.81%, a human toxicity of $1.95\text{E}+10$ kg 1,4 DB-eq at a reduction ratio of 0.54%, a climate change of $1.36\text{E}+10$ kg CO_2 -eq at a reduction ratio of 0.16%, and a freshwater ecotoxicity $9.49\text{E}+07$ kg 1,4 DB-eq at a reduction ratio of 0.15% are revealed, respectively. Exergetic life cycle assessment shows that a cumulative energy demand of the modified system can be decreased 370,506.67 MJ. The economic results, a levelized electricity cost from the refuse derived fuel is 1.50 Baht/kWh. This electricity cost can decrease a levelized cost of the Quartz Crystal Unit production processes to be 1.44 Baht/piece at a reduction ratio of 2.04%, which is compared with that of the normal processes as 1.47 Baht/piece.

Keywords

life Cycle Assessment; exergetic life cycle assessment; quartz crystal unit; levelized electricity cost; levelized cost

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมถือเป็นสิ่งสำคัญในทุกภาคส่วนยังเกี่ยวกับผลกระทบต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศ เช่น ภาวะโลกร้อน (global warming) การลดลงของชั้นโอโซน (ozone level depletion) ภาวะฝนกรด (acidification) ความเป็นพิษต่อมนุษย์ (human toxicology) พิษต่อระบบนิเวศบนบก (terrestrial eco toxicity) และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด (freshwater eco toxicity) เป็นต้น ซึ่งประเทศไทยได้ดำเนินการแก้ไขและป้องกันผลกระทบดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาที่มีต้นเหตุมาจากขยะมูลฝอย และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี จากข้อมูลในปี พ.ศ. 2559 ประเทศไทยมีปริมาณขยะมูลฝอยประมาณ 27.06 MT คิดเป็น 1.14 kg/คน·วัน [1] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหามลพิษจากขยะมูลฝอย ในเขตนิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ เพื่อลดปัญหามลพิษด้านสิ่งแวดล้อม

โดยงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมประกอบไปด้วย เลิศชัย [2] ได้ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต (life cycle assessment, LCA) ของขวดแก้วบรรจุน้ำดื่มขนาด 500 ml พบว่าผลกระทบหลัก คือ ความเป็นพิษในอากาศต่อมนุษย์มาจากการได้มาซึ่งวัตถุดิบในการผลิตขวดแก้วร้อยละ 98.71 เนตรชนากานต์และเศรษฐ์ [3] ได้ศึกษาการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้า จากขยะเทศบาลด้วยระบบวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ขนาด 1 kWh พบว่า สามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 0.93 kg CO_2 -eq เจนจิรา พัทธวรรณ และ โชติมา [4] ได้ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของไส้กรองปลา พบว่า กระบวนการผลิตไส้กรองปลาหมักส่งผลกระทบท่อสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 0.57 kg CO_2 -eq/250 g ของผลิตภัณฑ์สุรรัตน์ และคณะ [5] ได้ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตเอ็กเซอร์จิกติก โดยการดำเนินการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน ร่วมกับวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน ซึ่งสามารถลด

ปริมาณขยะมูลฝอยที่จะนำไปฝังกลบลงได้ และลดการบริโภคทรัพยากรได้ถึงร้อยละ 79 นวัตกรรม และนันทิยา [6] ได้ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตสี่เคลือบป้องกันสนิมพบว่า ในการผลิตสี่เคลือบป้องกันสนิม 1 ตัน เกิดจากการผลิตวัตถุดิบมากที่สุด รองลงมา คือ กระบวนการผลิตสีในบริษัท และการขนส่งวัตถุดิบมายังบริษัทผลิตสี ผลกระทบส่วนใหญ่เกิดจากความเป็นพิษในแหล่งน้ำทะเล ความเป็นพิษของแหล่งน้ำจืด และศักยภาพทำให้เกิดฝนกรด วิทยา และหาญพล [7] ได้ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตน้ำตาลทรายแดง พบว่า กระบวนการตกผลึกของน้ำตาลทรายแดงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด โดยเกิดภาวะโลกร้อนร้อยละ 81 การลดลงของชั้นโอโซนร้อยละ 56 ของกระบวนการน้ำตาลทรายแดง 1 ตัน นิติวิศว์ [8] ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตและจ่ายน้ำประปา กรณีศึกษาการประปาส่วนภูมิภาคสาขาเชียงราย พบว่า ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกเป็นปริมาณเท่ากับ $0.173 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$ โดยมีก๊าซที่เกิดจากกระบวนการผลิต $0.101 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$ และปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่จ่ายน้ำประปาเท่ากับ $0.072 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$ Ana และคณะ [9] ประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตกระดาษเขียนและกระดาษพิมพ์ในโปรตุเกส พบว่า การผลิตกระดาษปลดปล่อยมลพิษทางอากาศมากที่สุด และไม่มีการนำกลับมาใช้ ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนมากที่สุด รองลงมาเป็นส่วนกระบวนการผลิตกระดาษเกิดมลพิษทางน้ำของค่า COD และ AOX คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Sotoodehnia และ Agamuthu [10] และ Asmae และคณะ [11]

จากงานวิจัยที่กล่าวมาเบื้องต้น พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดทำการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต และวัฏจักรเอ็กเซอร์จิดิกของผลิตภัณฑ์ ควอตซ์ คริสตัล ยูนิต ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์โดยใช้เชื้อเพลิงขยะ ซึ่งเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่ต้องการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมร่วมกับความเป็นไปได้ ด้านพลังงานและด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตควอตซ์ คริสตัล ยูนิต โดยใช้ขยะมูลฝอย

ที่เกิดขึ้นในเขตนิคมอุตสาหกรรม มาผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ เพื่อลดการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ของกระบวนการผลิตควอตซ์ คริสตัล ยูนิต บริษัท เคียวเซร่า คริสตัล ดีไวซ์ (ประเทศไทย) จำกัด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตเชื้อเพลิงขยะมูลฝอย

เชื้อเพลิงขยะ (refuse derived fuel, RDF) เป็นรูปแบบของการจัดการขยะเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงวิธีหนึ่ง โดยการปรับปรุงและแปลงสภาพของขยะมูลฝอยให้เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณสมบัติในด้านค่าความร้อน (heating value) ความชื้น ขนาด และความหนาแน่น เหมาะสมในการใช้เป็นเชื้อเพลิงป้อนหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าหรือความร้อน และมีองค์ประกอบทั้งทางเคมีและกายภาพสม่ำเสมอ เชื้อเพลิงขยะสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ชนิด ตามมาตรฐาน ASTM E-75

การประเมินค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะ สามารถหาได้จากการวิเคราะห์แบบละเอียด (ultimate analysis) หรือการวิเคราะห์หาสัดส่วนขององค์ประกอบธาตุ อันประกอบไปด้วย คาร์บอน (carbon, C) ไฮโดรเจน (hydrogen, H) ออกซิเจน (oxygen, O) ซัลเฟอร์ (sulfur, S) ขี้เถ้า (ash content, Ash) และค่าความชื้น (moisture content, Mc) โดยการหาค่าความร้อนสูง (high heating value, HHV) และค่าความร้อนต่ำ (low heating value, LHV) ของเชื้อเพลิงขยะ นิยมใช้สมการ Dulong Formula [12] ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$\text{HHV} = 33.801C + 144.158 [H - (0.125O)] + 9.413S \quad (1)$$

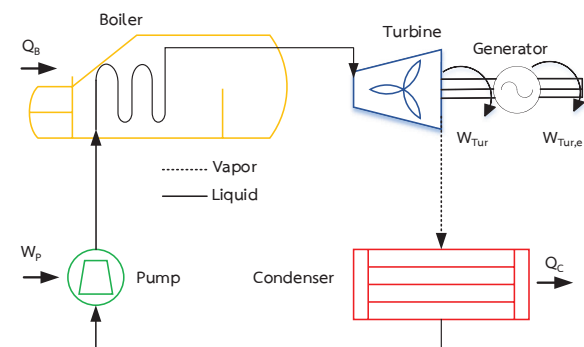
$$\text{LHV} = \text{HHV} - 22.604 H - 2.581 \text{ Mc} \quad (2)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำ (MJ/kg)

2.2 วัฏจักรแรงดันอินทรีย์

วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (organic Rankine cycle, ORC) มีหลักการทำงาน คือ การเปลี่ยนพลังงานความร้อนอุณหภูมิต่ำในช่วง $90\text{--}110^\circ\text{C}$ มาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ในโรงจักรแรงดันอินทรีย์

ผ่านโรงจักรแรงดันอินทรีย์ เป็นระบบการทำงานที่ใช้หลักการของโรงจักรแรงดัน แต่ใช้สารทำงานในกลุ่มสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลสูง สามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำ หรือมีจุดเดือดต่ำ (boiling point) เมื่อเปรียบเทียบกับจุดเดือดของน้ำที่ใช้เป็นสารทำงานในระบบแรงดัน ทำให้ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบโรงจักรแรงดันอินทรีย์ สามารถทำให้สารทำงานกลายสถานะจากของเหลวเป็นไอ เพื่อใช้ขับเคลื่อนและผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้โดยใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ โดยอุปกรณ์หลักในโรงจักรแรงดันอินทรีย์มีทั้งหมด 5 ตัว คือ หม้อต้ม (boiler) กังหัน (turbine) เครื่องควบแน่น (condenser) ปั๊ม (pump) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) [13] รายละเอียดแสดงในรูปที่ 1

2.3 โรงจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

การประเมินโรงจักรชีวิต คือ กระบวนการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาครอบคลุมถึงกระบวนการผลิตและกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวเนื่องกันในรูปของวัตถุดิบและพลังงาน ซึ่งการประเมินนี้จะทำตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์อย่างละเอียด ภายใต้มาตรฐาน ISO 14040-14043 แบ่งขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตเป็น 4 ขั้นตอนหลัก อันประกอบไปด้วย 1. การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา 2. การวิเคราะห์บัญชีรายการ 3. การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และ 4. การแปลผลวิเคราะห์ ตามหน่วย

การทำงาน (functional unit, FU) โดยสามารถคำนวณออกมาในรูปผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม [14] ดังสมการต่อไปนี้

$$IC = \sum_i (A_i \times EF_i) \quad (3)$$

เมื่อ IC คือ ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม (kg CO₂-eq, kg CFC-11-eq, kg SO₂-eq, kg 1,4 DB-eq)

A_i คือ กิจกรรมต่าง ๆ (unit)

EF_i คือ ค่าแฟกเตอร์ของผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภท (kg CO₂-eq/unit, kg CFC-11-eq/unit, kg SO₂-eq/unit, kg 1,4 DB-eq/unit)

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอย

ข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอย ในเขตนิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ และบริษัท เคียวเซระ คริสตัล ดีไวซ์ (ประเทศไทย) จำกัด ในปี พ.ศ. 2560 และทำการสำรวจองค์ประกอบของขยะดังกล่าว โดยใช้ระดับความน่าเชื่อถือทางสถิติร้อยละ 20 เพื่อประเมินค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะ

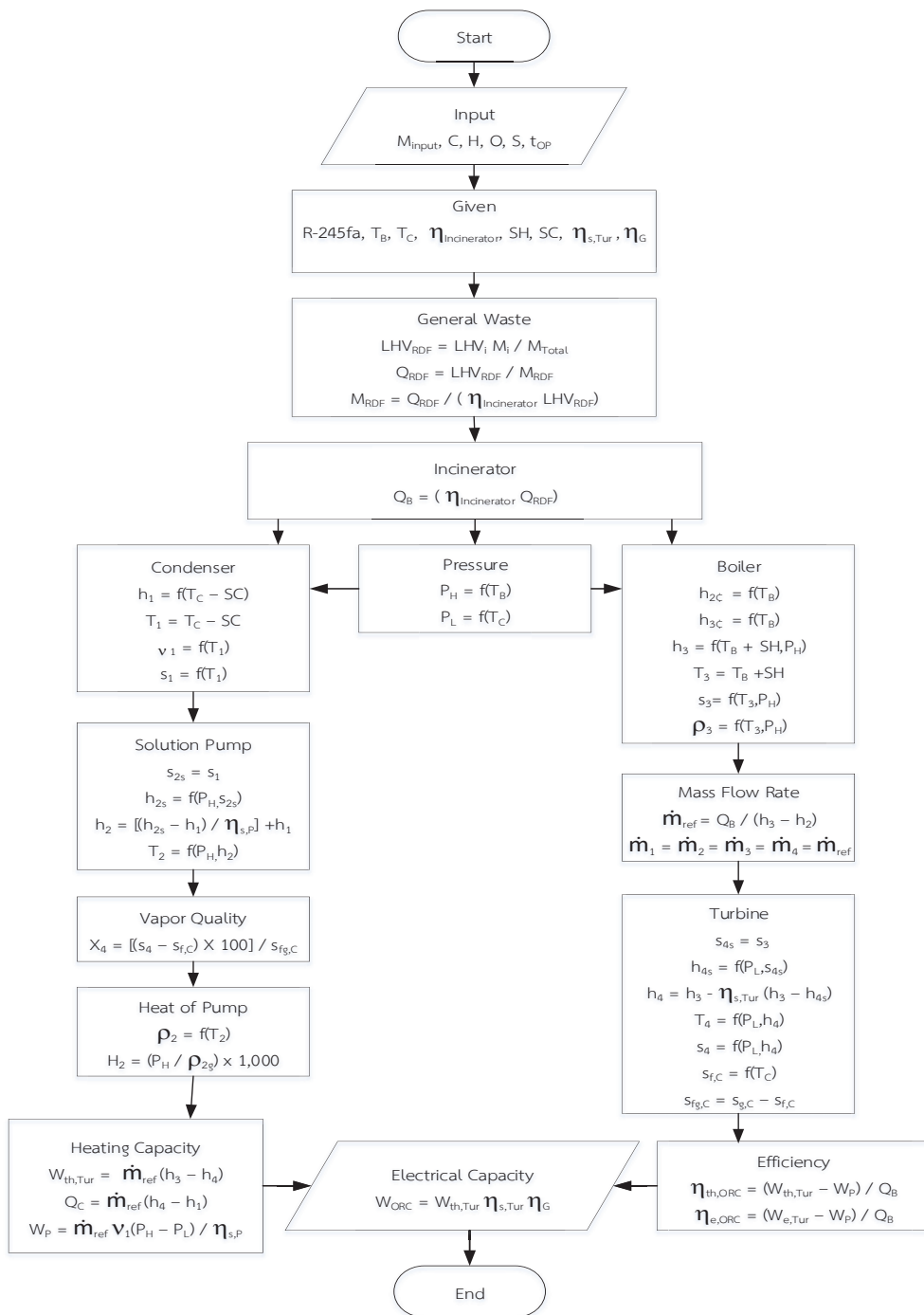
3.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบผลิตไฟฟ้าโรงจักรแรงดันอินทรีย์ โดยมีแหล่งความร้อนเป็นเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยในเขตนิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ เพื่อนำไปคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าโรงจักรแรงดันอินทรีย์ รายละเอียดขั้นตอนการคำนวณ แสดงในรูปที่ 2

3.3 วิเคราะห์ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย

วิเคราะห์ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย ของระบบผลิตไฟฟ้าโรงจักรแรงดันอินทรีย์โดยใช้เชื้อเพลิงขยะ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$LC = \frac{Inv + \sum_{t=1}^n \frac{PEC1-PEC2}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{W_{ORC} t_{OP}}{(1+r)^t}} \quad (1)$$



รูปที่ 2 แผนผังแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน

เมื่อ LEC คือ ค่าต้นทุนไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kg)
 PEC คือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าต่อปี (บาท/ปี)
 W_{ORC} คือ ปริมาณการผลิตไฟฟ้าที่ผลิตได้ (kW_e)

3.4 วิเคราะห์ค่าต้นทุนการผลิตต่อหน่วย

วิเคราะห์ค่าต้นทุนการผลิตต่อหน่วย ของผลิตภัณฑ์
 คิวคอตซ์ คริสตัล ยูนิท ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน

สารอินทรีย์โดยใช้เชื้อเพลิงขยะจำนวน 1 ชัน โดยรายละเอียด
ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$LC = \frac{Inv + \sum_{t=1}^n \frac{PC}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n M_{SMD} t_{OP}} \quad (2)$$

เมื่อ LC คือ ค่าต้นทุนต่อหน่วย (บาท/kg_{SMD})

Inv คือ มูลค่าการลงทุน (บาท)

PC คือ ค่าใช้จ่ายรายปี (บาท/ปี)

M_{SMD} คือ มวลของผลิตภัณฑ์ (kg_{SMD})

n คือ อายุของบริษัท (ปี)

r คือ ค่าอัตราส่วนลด (%)

t_{OP} คือ เวลาการทำงานต่อปี (ชั่วโมง/ปี)

3.5 ศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของ ผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิต ก่อนการปรับปรุง

3.5.1) กำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา
เป้าหมายการศึกษา คือ ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต
ของผลิตภัณฑ์ ควอตซ์ คริสตัล ยูนิต ตลอดวัฏจักรชีวิต
ก่อนการปรับปรุง ตลอดอายุการใช้งาน 30 y ขอบเขต
การศึกษา คือ ศึกษาวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์แบบ เคร
เดิล ทู เกรฟ (Cradle to Grave) โดยพิจารณาตั้งแต่การ
รับวัตถุดิบ พลังงาน โครงสร้างอาคาร กระบวนการผลิต
การรีไซเคิลวัสดุอุปกรณ์ จนถึงการใช้ซึ่งผลิตภัณฑ์ และ
การกำจัดซาก ทั้งนี้ไม่พิจารณาในส่วนการส่งออก โดยมี
หน่วยการทำงาน คือ ผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิต
จำนวน 1 ชัน

3.5.2) จัดทำบัญชีรายการข้อมูลของกระบวนการผลิต
เพื่อประเมินผลกระทบด้านโครงสร้างอาคาร การ
ดำเนินงาน และการรีไซเคิล รายละเอียดแสดงในรูปที่ 3

3.5.3) การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมทั้ง 6 ด้าน
คือ

1) ภาวะโลกร้อน (CC, kg CO₂-eq)

2) การลดลงของชั้นโอโซน (OD, kg CFC-11-eq)

3) ภาวะฝนกรด (TA, kg SO₂-eq)

4) ความเป็นพิษต่อมนุษย์ (HT, kg 1,4 DB-eq)

5) พิษต่อระบบนิเวศน้ำบก (TE, kg 1,4 DB-eq)

6) ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด (FE, kg 1,4 DB-
eq)

โดยใช้โปรแกรม SimaPro เวอร์ชัน 8.5.0

โดยวิธี ReCiPi midpoint (H) (SimaPro, 2018)

หรือ การวิเคราะห์ผลกระทบชั้นกลางแบบลำดับขั้น
[12] เพื่อหาปริมาณการปลดปล่อยผลกระทบด้าน
สิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลกระทบดังกล่าวมีการ
ควบคุม ให้เป็นไปตามมาตรฐานของระบบการ
ดำเนินกิจการของบริษัทและในเขตนิคม
อุตสาหกรรม

3.5.4) ทำการแปรผลและประเมินผลกระทบด้าน
สิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิต ก่อน
ปรับปรุง

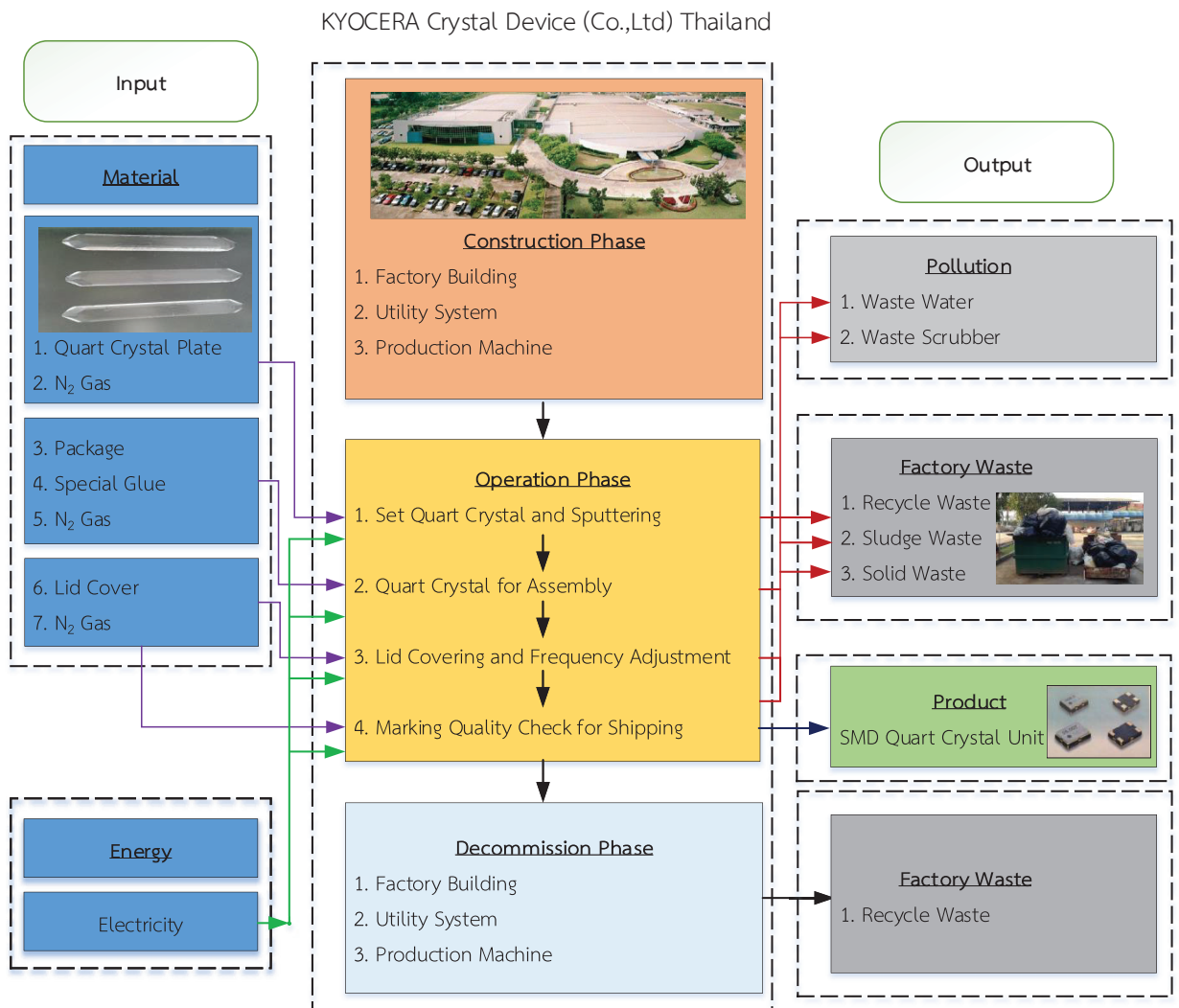
3.6 ศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของ เตาเผาขยะ

เพื่อนำผลที่ได้ไปประเมินกระบวนการผลิตของควอตซ์
คริสตัล ยูนิต หลังทำการปรับปรุง เมื่อมีการติดตั้งเตาเผาขยะ
ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

3.6.1) กำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา
เป้าหมายการศึกษา คือ ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต
เตาเผาขยะตลอดอายุใช้งาน 30 ปี ขอบเขตการศึกษา คือ
ศึกษาวัฏจักรชีวิตของเตาเผาขยะ แบบ เครเดิล ทู เกรฟ
หน่วยการทำงาน คือ ขยะมูลฝอยจำนวน 1 kg

3.6.2) จัดทำบัญชีรายการข้อมูลของเตาเผาขยะ เพื่อ
ประเมินผลกระทบในด้านโครงสร้าง การดำเนินงาน และ
การรีไซเคิล รายละเอียดแสดงในรูปที่ 4

3.6.3) การประเมินผลกระทบทั้ง 6 ด้าน โดยใช้โปรแกรม
SimaPro เวอร์ชัน 8.5.0 โดยวิธี ReCiPi Midpoint (H)



รูปที่ 3 วัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิต ก่อนปรับปรุง

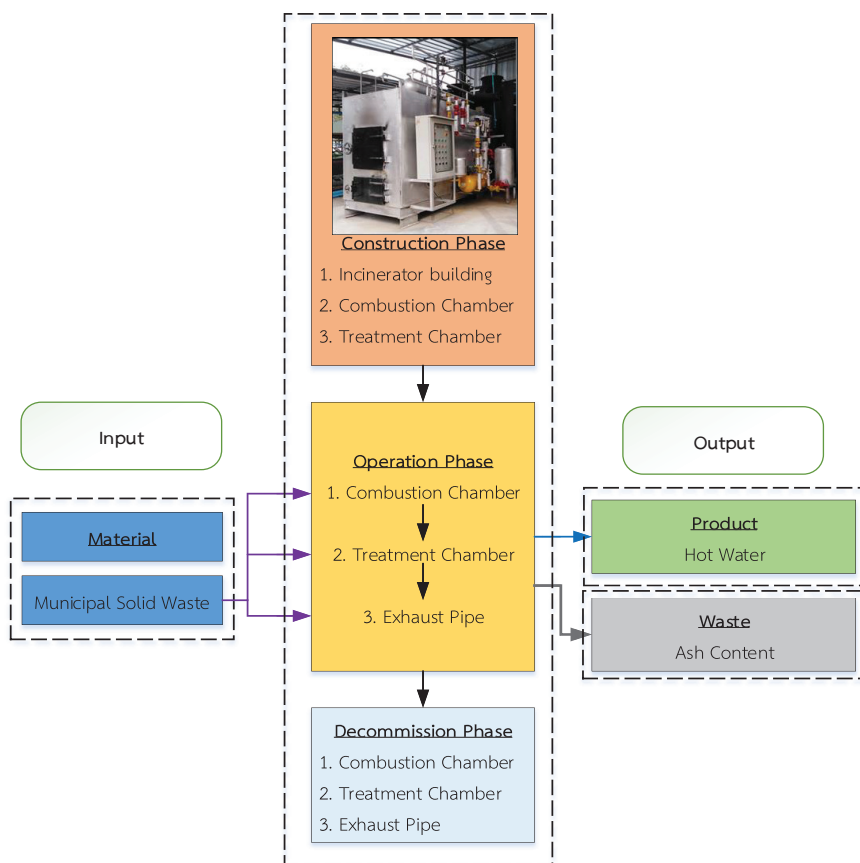
3.6.4) ทำการแปรผลและประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของเตาเผาขยะชนิดเผาตรง

3.7 ศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

เพื่อนำผลที่ได้ไปประกอบผลการประเมินกระบวนการผลิตของควอตซ์ คริสตัล ยูนิต หลังทำการปรับปรุง เมื่อมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ เพื่อใช้ในการผลิตของโรงงาน

3.7.1) กำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา

- 1) เป้าหมายการศึกษา คือ วัฏจักรชีวิตของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ตลอดอายุใช้งาน 30 ปี
- 2) ขอบเขตการศึกษา คือ วัฏจักรชีวิตของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์แบบ เครเดิล ทุ เกรพ
- 3) หน่วยการทำงาน คือ พลังงานไฟฟ้า 1 kWh



รูปที่ 4 การประเมินวัฏจักรชีวิตของเตาเผาขยะชนิดเผาตรง

3.7.2) จัดทำบัญชีรายการข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าจาก
จักรแรงดันอินทรีย์ เพื่อประเมินผลกระทบในส่วน
โครงสร้าง ส่วนการดำเนินงาน และส่วนการรื้อถอน [14]
รายละเอียดแสดงในรูปที่ 5

3.7.3) การประเมินผลกระทบทั้ง 6 ด้าน โดยใช้โปรแกรม
SimaPro เวอร์ชัน 8.5.0 โดยวิธี ReCiPi Midpoint (H)

3.7.4) ทำการแปรผลและประเมินผลกระทบด้าน
สิ่งแวดล้อมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

3.8 ศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของ ผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิท หลังการปรับปรุง

3.8.1) กำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา

- 1) เป้าหมายการศึกษา คือ ศึกษาการประเมินวัฏจักร
ชีวิตของผลิตภัณฑ์ ควอตซ์ คริสตัล ยูนิท หลังการ
ปรับปรุง ตลอดอายุการใช้งาน 30 ปี

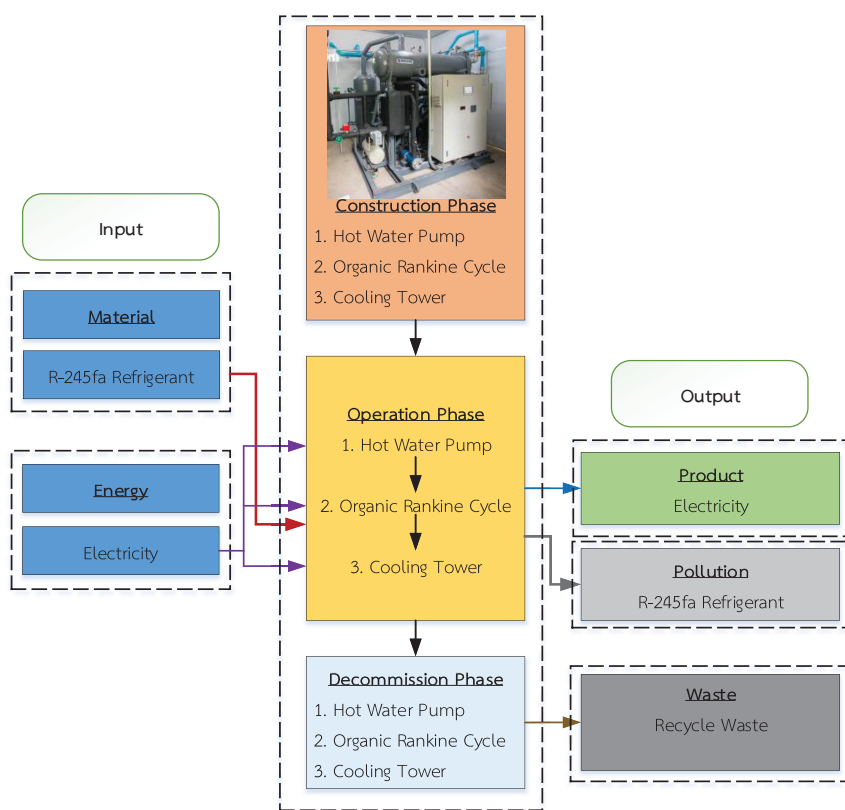
- 2) ขอบเขตการศึกษา คือ ศึกษาวัฏจักรชีวิตของ
ผลิตภัณฑ์แบบ เครดิต พู เกรฟ

- 3) หน่วยการทำงาน คือ ผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยู
นิท จำนวน 1 ชิ้น

3.8.2) จัดทำบัญชีรายการข้อมูลของกระบวนการผลิต
เพื่อประเมินผลกระทบในด้านโครงสร้างอาคาร การ
ดำเนินงาน และการรื้อถอน ตลอดวัฏจักรชีวิตของ
ผลิตภัณฑ์ ควอตซ์ คริสตัล ยูนิท หลังการปรับปรุง
รายละเอียดแสดงในรูปที่ 6

3.8.3) การประเมินผลกระทบทั้ง 6 ด้าน โดยใช้โปรแกรม
SimaPro เวอร์ชัน 8.5.0 โดยวิธี ReCiPi Midpoint (H)

3.8.4) ทำการแปรผลและประเมินผลกระทบด้าน
สิ่งแวดล้อม ของผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิท หลังการ



รูปที่ 5 วัฏจักรชีวิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

ปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยการทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

3.9 ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตเอ็กเซอร์จิติก

การประเมินวัฏจักรชีวิตเอ็กเซอร์จิติก ของผลิตภัณฑ์ คิวบิต คริสตัล ยูนิท ก่อนและหลังการปรับปรุงของกระบวนการผลิตคิวบิต คริสตัล ยูนิท โดยทำการประเมินผลกระทบเหมือนหัวข้อ 3.5–3.8 ซึ่งมีหน่วยการทำงาน คือ พลังงานความร้อนสะสม 1 MJ โดยทำงานร่วมกับเตาเผาขยะและระบบผลิตไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

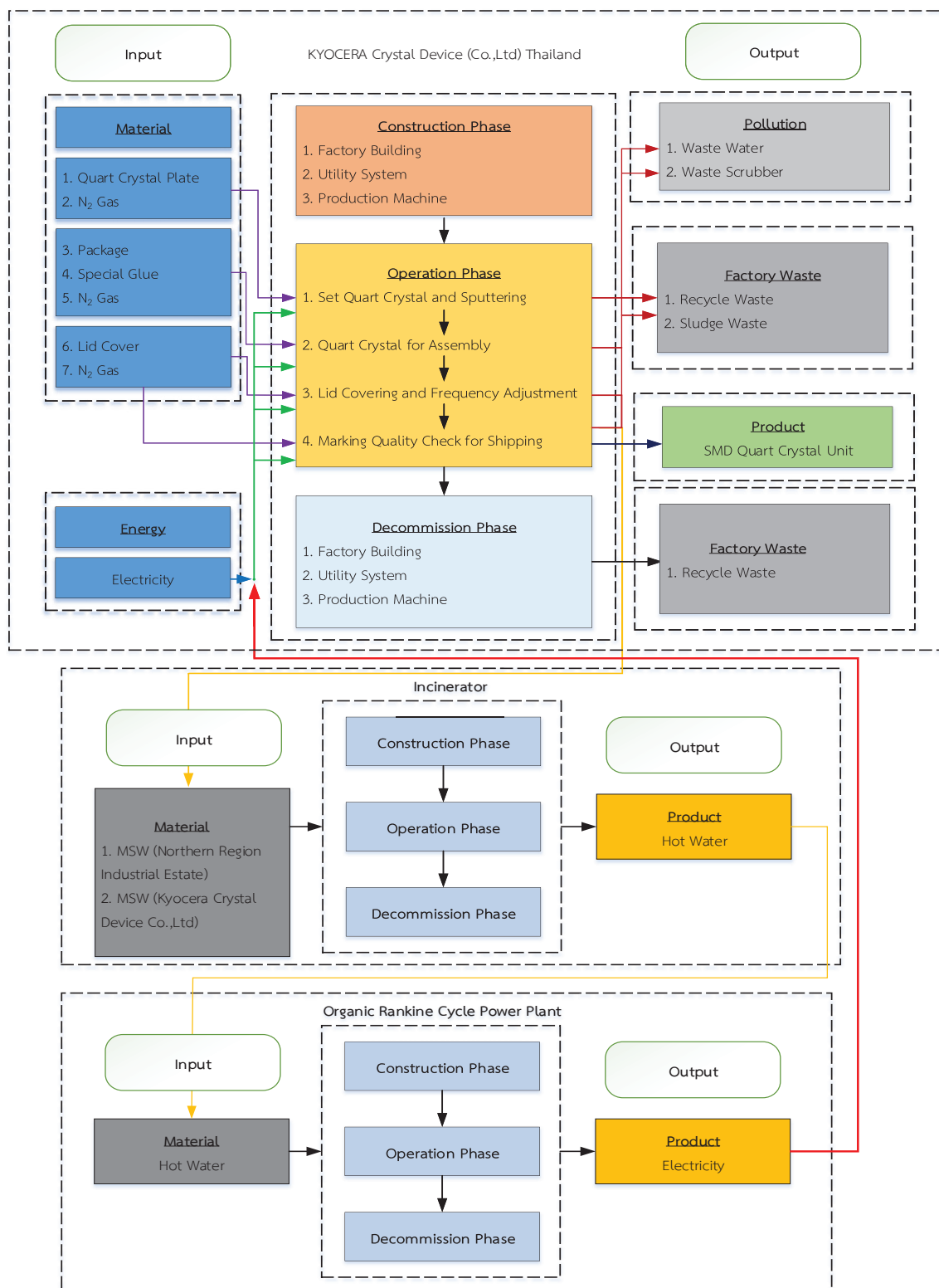
4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ปริมาณขยะมูลฝอยในเขตนิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ

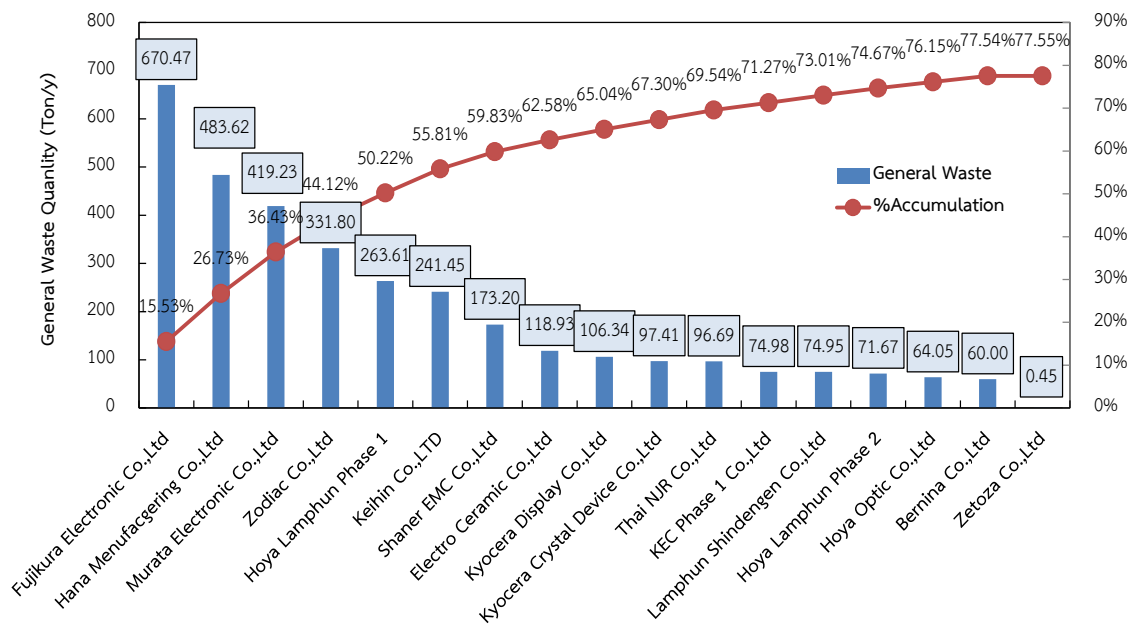
ผลสำรวจปริมาณขยะมูลฝอยในเขตนิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือในปี พ.ศ. 2560 พบว่า ปริมาณขยะมูลฝอยที่สำรวจจำนวน 68 บริษัท มีปริมาณขยะมูลฝอยรวมทั้งหมด 4,318

ตัน/ปี โดยอันดับที่ 1 คือ บริษัท พูจิตูระ อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด 670.47 ตัน/ปี อันดับที่ 2 คือ บริษัท ฮานา แมนูแฟคเจอร์ (ประเทศไทย) จำกัด 485.62 ตัน/ปี บริษัท มูราตะ อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด 419.23 ตัน/ปี และอันดับที่ 10 คือ บริษัท เคียวเซร่า คริสตัล ดีไวส์ (ประเทศไทย) 97.41 ตัน/ปี รายละเอียดแสดงในรูปที่ 7

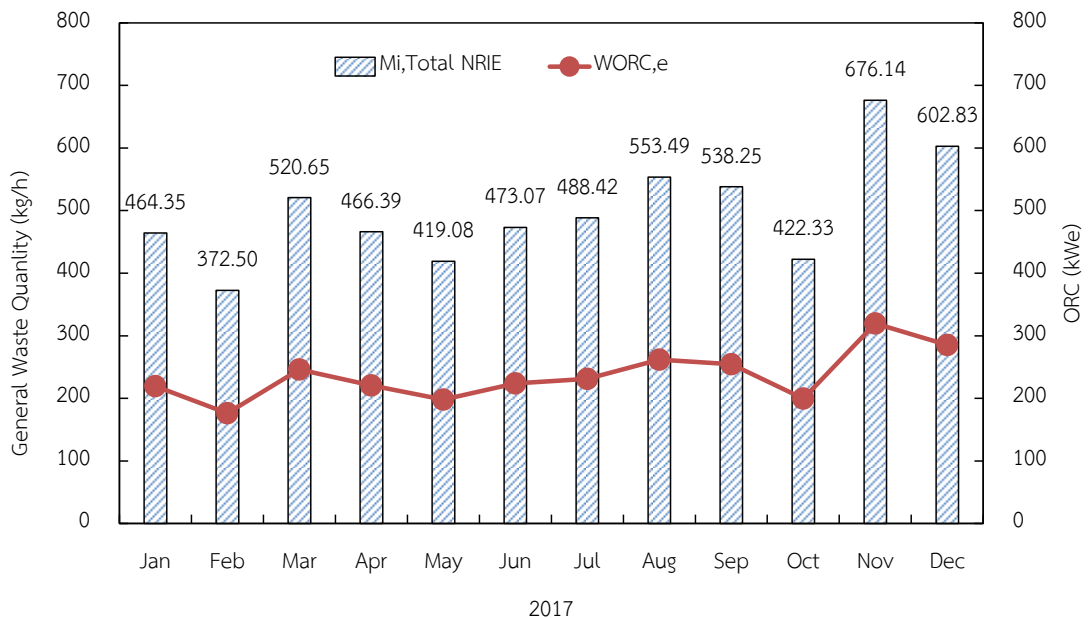
จากนั้นทำการสำรวจและคัดแยกองค์ประกอบของขยะในเขตนิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ พบว่า พลาสติก (ถุงชนิดทนร้อน ถุงหิ้วพลาสติก) มีมากที่สุดในส่วนร้อยละ 48.64 รองลงมา คือ เศษอาหารร้อยละ 19.25 ที่เหลือประกอบไปด้วย เศษไม้ร้อยละ 10.56 ผ้าปัดจุ่มร้อยละ 8.85 พลาสติก (แก้วน้ำ ขวดเครื่องดื่ม) ร้อยละ 5.76 กระดาษ และกล่องกระดาษร้อยละ 4.76 และอื่น ๆ ร้อยละ 2.35 ซึ่งผลจากการคำนวณ พบว่า ขยะดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงขยะที่มีค่าความร้อนต่ำ (LHV_{RDF}) เท่ากับ 20.62 MJ/kg



รูปที่ 6 วัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิต์ หลังการปรับปรุง



รูปที่ 7 วัฏจักรชีวิตของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์



รูปที่ 8 ปริมาณขยะมูลฝอยและขนาดระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

4.2 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

รูปที่ 8 แสดงผลการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า ปริมาณขยะมูลฝอยที่ต้องกำจัดในแต่ละชั่วโมงอยู่ในช่วง

ระหว่าง 372.50–676.14 kg/ชั่วโมง (อ้างอิงตามปริมาณขยะของแต่ละเดือน) และเมื่อนำขยะดังกล่าวไปเข้าเตาเผากำจัดขยะเพื่อผลิตน้ำร้อน จ่ายให้กับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ สามารถผลิตไฟฟ้าได้ในช่วง 176.19–319.81

kWe ดังนั้นขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่เหมาะสม คือ 150 kWe จำนวน 2 เครื่อง ที่มีประสิทธิภาพวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ประมาณร้อยละ 11.02

4.3 ค่าต้นทุนผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย

ผลการวิเคราะห์ค่าต้นทุนผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย ของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยใช้เชื้อเพลิงขยะ พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.50 บาท/kWh ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้ดังกล่าวไปเทียบกับค่าไฟฟ้าสุทธิของบริษัท เคียวเซร่า คริสตัล ดีไวซ์ (ประเทศไทย) จำกัด ในปี พ.ศ. 2560 ซึ่งมีเฉลี่ยค่าเท่ากับ 3.22 บาท/kWh จะสามารถลดค่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 1.72 บาท/kWh รายละเอียดในตารางที่ 1

4.4 ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิต

การวิเคราะห์ค่าต้นทุนการผลิตต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิต ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยใช้เชื้อเพลิงขยะ พบว่ามีค่าต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตเท่ากับ 1.44 บาท/ชิ้น ซึ่งมีค่าต้นทุนการผลิตต่อหน่วยลดลง 0.07 บาท/ชิ้น ซึ่งกระบวนการผลิตเดิมมีค่าอยู่ที่ 1.47 บาท/ชิ้น รายละเอียดในตารางที่ 2

4.5 การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิตก่อนการปรับปรุง

บริษัท เคียวเซร่า คริสตัล ดีไวซ์ (ประเทศไทย) จำกัด ได้ดำเนินการผลิตชิ้นงานหลักอยู่ 2 ชนิด คือ SMD Quartz Crystal Unit ในปริมาณ 5.24 Million ชิ้น/ปี คิดเป็นร้อยละ 86 และ Lead Quartz Crystal Unit ปริมาณการผลิต 0.84 Million ชิ้น/ปี คิดเป็นร้อยละ 14

จากผลการจัดทำบัญชีรายการข้อมูลด้านโครงสร้างอาคารโรงงานของบริษัท พบว่า ด้านโครงสร้างอาคารมีอยู่ด้วยกัน 5 เฟส ซึ่งเฟสที่ 1-3 เป็นอาคารสำนักงาน กระบวนการผลิตรวมอยู่ในอาคารโรงงานเดียวกันมีขนาด 13,971 m2 ส่วนเฟสที่ 4 เป็นโรงอาหาร สถานที่พักผ่อน และเฟสที่ 5 เป็นคลังสินค้าและการส่งออกมีขนาดพื้นที่รวมกัน 9,407 m2 เป็น

ตารางที่ 1 ค่าต้นทุนผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย ของควอตซ์ คริสตัล ยูนิต

รายละเอียด	ข้อมูล
อายุการใช้งานของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (N, y)	30
ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดทั้งปี ($PW_{ORC} = W_{ORC} t_{OP}$, kWh/y)	2,747,798
มูลค่าในการลงทุนโครงการรวม ($Inv = Z_{ORC} + Z_{Land} + Z_{Buildind} + Z_{Piping} + Z_{Cooling\ tower} + Z_{Incinerator}$, Baht)	25,935,250
ค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าต่อปีของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($PEC_2 = PEC_{RDF-1} + PEC_e + \dot{Z}_{OM,1} + \dot{Z}_{OM,2}$, Baht/y)	2,830,110
ค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าต่อปีของบริษัทเคียวเซร่า คริสตัล ดีไวซ์ (PEC_1 , Baht/y)	5,250,432
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของปั้มน้ำร้อน ปั้มน้ำร้อนระบายความร้อน และพัดลมของห้องฝังระบายความร้อน ($PW_e = [W_{HW} + W_{CW} + W_{CT}] t_{OP}$, kWh/y)	610,032
อัตราการใช้เชื้อเพลิง RDF-1 ($\dot{m}_{RDF-1} = [3600 Q_B] / \eta_{Incinerator} [LHV_{RDF-1} / 1000]$, kg/h	612.19
ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าหลังการติดตั้งระบบเชื้อเพลิงขยะร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (LEC, Baht/kWh)	1.50

อาคารปูน โครงสร้างเหล็ก และหลังคาเป็นแผ่นเมทัลชีท โดยผลการประเมิน แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

ผลรวมตลอดอายุการใช้งาน ของการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ด้านโครงสร้างอาคาร การดำเนินงาน และการรื้อถอนวัสดุโครงสร้างอาคารโรงงาน พบว่า ผลการปลดปล่อยผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นมากที่สุด คือ ความเป็นพิษต่อมนุษย์ 1.95E+10 kg 1,4 DB-eq รองลงมา คือ ภาวะโลกร้อน 1.36E+10 kg CO2-eq และผลกระทบที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด

ตารางที่ 2 แสดงผลค่าต้นทุนผลิตต่อหน่วย ก่อนและหลังการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

รายละเอียด	ข้อมูลก่อนปรับปรุง	ข้อมูลหลังปรับปรุง
มูลค่าการลงทุนรวมของบริษัท (Inv _{Company} , Baht)	1,552,000,000	1,552,000,000
ราคาไฟฟ้าต่อปี (PC _{Electricity} , Baht/y)	5,673,317	2,420,322
ราคาค่าน้ำดิบต่อปี (PC _{Water} , Baht/y)	165,000	165,000
ราคาค่าก๊าซไนโตรเจน (PC _{Nitrogen} , Baht/y)	823,000	823,000
มวลผลิตภัณฑ์ขึ้นต่อปี (M _{SMD} , Piece/y)	63,062,000	63,062,000
ระยะเวลาในการทำงาน (t _{OP} , h/y)	8,592	8,592
อายุการใช้งาน (N, y)	30	30
ค่าต้นทุนต่อหน่วย (LC, Baht/Piece)	1.47	1.44

ตารางที่ 3 ผลรวมการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม	ส่วนผลกระทบย่อย			ผลรวมผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม	
	โครงสร้าง	ดำเนินการ	การรื้อถอน	ตลอดอายุการใช้งาน	1 Piece
ความเป็นพิษต่อมนุษย์ (kg 1,4 DB-eq)	6.49E+08	4.29E+04	2.78E+06	1.95E+10	1.24E+02
ภาวะโลกร้อน (kg CO ₂ -eq)	4.57E+08	3.84E+04	-4.11E+06	1.36E+10	8.64E+01
ภาวะฝนกรด (kg SO ₂ -eq)	3.32E+05	9.09E+01	-9.50E+03	9.67E+06	6.15E-02
ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด (kg 1,4 DB-eq)	2.46E+06	2.83E+03	-8.39E+03	7.36E+07	4.68E-01
พิษต่อระบบนิเวศบก (kg 1,4 DB-eq)	3.24E+04	2.04E+00	4.32E+04	2.27E+06	1.44E-02
การลดลงของชั้นโอโซน (kg CFC-11-eq)	7.10E+04	1.86E-03	3.71E+04	3.24E+06	2.06E-02

คือ พิษต่อระบบนิเวศบก 2.27E+06 kg 1,4 DB-eq โดยผลิตภัณฑ์ 1 ชิ้น เกิดผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์มากที่สุด 1.24E+02 kg 1,4 DB-eq ตามลำดับ รายละเอียดในตารางที่ 3

ผลการแปลผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ คิวบิต คริสตัล ยูนิท ก่อนการปรับปรุงเป็นระยะเวลา 30 ปี โดยมีระยะเวลาการทำงาน 24 ชั่วโมง/วัน หรือ 360 วัน/ปี มีสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมสำคัญมากที่สุด คือ ความเป็นพิษต่อมนุษย์ร้อยละ 99.70 ภาวะโลกร้อนร้อยละ 99.51 ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืดร้อยละ 77.44 ภาวะฝนกรดร้อยละ 99.80 พิษต่อระบบนิเวศบกร้อยละ 99.87 และการลดลงของชั้นโอโซนร้อยละ 99.99 ที่เกิดจากช่วงก่อสร้างอาคารโรงงานเป็น

หลัก อันประกอบไปด้วยพื้นคอนกรีต 56,107,200 kg และวัสดุหลักจากเหล็กเส้น 40,381,125 kg

4.6 การประเมินวัฏจักรชีวิตเตาเผาขยะชนิดเผาตรง

จัดทำบัญชีรายการข้อมูลเตาเผาขยะมูลฝอยซึ่งในที่นี้เลือกใช้เตาเผา ที่มีการออกแบบและสร้างเพื่อทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยเฉพาะ ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดขยะประมาณ 2 ตัน/วัน เพื่อประเมินหาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมทั้ง 6 ด้าน ต่อการกำจัดขยะ 1 kg และใช้ค่าดังกล่าวในการวิเคราะห์ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ในกระบวนการผลิตคิวบิต คริสตัล ยูนิท ต่อไป รายละเอียดในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อมูลวัสดุอุปกรณ์ และองค์ประกอบเตาเผาขยะมูลฝอย

ส่วนประกอบเตาเผาขยะมูลฝอย	วัสดุ	ปริมาณ (kg)
โครงสร้างห้องเผาไหม้	ดินภูเขาไฟห้องเผาไหม้	5,800
	ดินภูเขาไฟเคลือบห้องเผาไหม้	580
	เหล็กเกรด ASTM-A36	1,000
	เหล็กไร้สนิม	1,070
โครงสร้างโดยรอบ	ท่อเหล็กโครเมียม	500
	เหล็ก นิกเกิล โครเมียม อัลลอย	250
มอเตอร์	ทองแดง	4.5
	เหล็กเกรด ASTM-A36	10
อุปกรณ์ตรวจวัด	เหล็ก นิกเกิล โครเมียม อัลลอย	25
ท่อต่าง ๆ ส่วนห้องเผาไหม้	ท่อกล้าวไนซ์	150
ตู้ควบคุม	เหล็ก นิกเกิล โครเมียม อัลลอย	50
ปล่องควัน	เหล็กไร้สนิม	500
ฉนวนกันความร้อน	ใยแก้วสังเคราะห์	60

การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมด้านโครงสร้างเตาเผาขยะ พบว่า มีปริมาณการปลดปล่อยผลกระทบที่ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ $1.90\text{E}+05$ 1,4 DB-eq มากที่สุด อันประกอบไปด้วยโครงสร้างโดยรอบที่มีส่วนผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม อัลลอย $1.41\text{E}+05$ kg 1,4 DB-eq คิดเป็นร้อยละ 74.47 รองลงมา คือ ผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน $5.47\text{E}+04$ kg CO₂-eq อันประกอบไปด้วยโครงสร้างโดยรอบที่มีส่วนผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม อัลลอย $3.76\text{E}+05$ kg CO₂-eq คิดเป็นร้อยละ 68.74 ตามลำดับ

ผลรวมตลอดอายุการใช้งานของการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม พบว่า มีการปลดปล่อยผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นมากที่สุด คือ ความเป็นพิษต่อมนุษย์

$5.69\text{E}+06$ 1,4 DB-eq รองลงมา คือ ภาวะโลกร้อน $1.58\text{E}+06$ kg CO₂-eq ภาวะฝนกรด $2.45\text{E}+05$ kg SO₂-eq และผลกระทบที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด คือ การลดลงของชั้นโอโซน $1.16\text{E}-01$ kg CFC-11-eq โดยปริมาณขยะมูลฝอย 1 kg ก่อให้เกิดผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์มากที่สุด $9.48\text{E}+01$ kg 1,4 DB-eq ตามลำดับ รายละเอียดในตารางที่ 5 โดยผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมทั้ง 6 ด้านดังกล่าว มีสาเหตุมากจากการใช้เหล็กทำโครงสร้าง 250 kg และปล่องควัน 500 kg ซึ่งคิดเป็นสัดส่วน ความเป็นพิษต่อมนุษย์ร้อยละ 99.53 ภาวะโลกร้อนร้อยละ 98.08 ภาวะฝนกรดร้อยละ 100 ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืดร้อยละ 38.96 พิษต่อระบบนิเวศบนบกร้อยละ 99.94 และการลดลงของชั้นโอโซนร้อยละ 99.82 ตามลำดับ

4.7 การประเมินวัฏจักรชีวิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแรงดันอินทรีย์

จัดทำบัญชีรายการข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแรงดันอินทรีย์ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ต้นแบบการประเมินวัสดุโครงสร้างของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพของกิจการน้ำพุร้อนสันกำแพงขนาด 10 kWe (ปาณิสตา, 2561) เพื่อหาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมทั้ง 6 ด้าน ต่อการผลิตไฟฟ้า 1 kWh และใช้ค่าดังกล่าวในการวิเคราะห์ร่วมกับเตาเผากำจัดขยะในหัวข้อที่ผ่านมา ในกระบวนการผลิตควอตซ์ คริสตัล ยูนิท หลังการปรับปรุง โดยมีรายละเอียดในตารางที่ 6

ผลรวมตลอดอายุการใช้งานของการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม พบว่า มีการปลดปล่อยผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นมากที่สุด คือ ความเป็นพิษต่อมนุษย์ $7.04\text{E}+05$ kg 1,4 DB-eq รองลงมา คือ พิษต่อระบบนิเวศบนบก $1.49\text{E}+03$ 1,4 DB-eq การลดลงของชั้นโอโซน $4.49\text{E}-01$ kg CFC-11-eq โดยพลังงานไฟฟ้า 1 kWh ก่อให้เกิดผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์มากที่สุด $1.28\text{E}-02$ kg 1,4 DB-eq ตามลำดับ รายละเอียดในตารางที่ 7

ตารางที่ 5 ผลรวมการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของเตาเผาขยะ

ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม	ส่วนผลกระทบย่อย			ผลรวมผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม	
	โครงสร้าง	ดำเนินการ	การรื้อถอน	ตลอดอายุการใช้งาน	1 kg
ความเป็นพิษต่อมนุษย์ (kg 1,4 DB-eq)	1.90E+05	8.84E+02	-9.84E+02	5.69E+06	9.48E+01
ภาวะโลกร้อน (kg CO ₂ -eq)	5.47E+04	1.01E+03	-3.07E+03	1.58E+06	2.63E+01
ภาวะฝนกรด (kg SO ₂ -eq)	8.19E+03	2.50E-01	-1.38E+01	2.45E+05	4.09E+00
ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด (kg 1,4 DB-eq)	2.55E+02	3.30E+02	-4.40E+01	1.62E+04	2.70E-01
พิษต่อระบบนิเวศบก (kg 1,4 DB-eq)	3.07E+01	1.92E-02	-1.08E-01	9.18E+02	1.53E-02
การลดลงของชั้นโอโซน (kg CFC-11-eq)	3.91E-03	6.78E-06	-5.49E-05	1.16E-01	1.93E-06

ตารางที่ 6 ข้อมูลวัสดุอุปกรณ์และองค์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

ข้อมูลระบบ	ข้อมูลวัสดุ	น้ำหนัก (kg)	ข้อมูลวัสดุ	น้ำหนัก (kg)
วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ และหอผึ่งระบายความร้อน	เหล็กกล้าผสม	2,319.53	ออกไซด์ พราหมเมอร์	24
	ทองแดง	365.9	พลาสติกแข็ง	220
	สแตนเลส	337	พีวีซี	35.94
	ทองเหลือง	98.4	ปูนซีเมนต์	250
	โพลียูรีเทน	2	ทราย	1,174
	HDPE	1	หิน	785
	พอลิสไตรีน	1.5	น้ำ	185
	ยางพารา	0.5	เหล็กชุบกัลวาไนซ์	7.5
	พอลิสไตรีน	1	น้ำมัน	40
วัฏจักรแรงดันอินทรีย์	อลูมิเนียม	0.5	กระจก	0.3

ผลการแปลผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์เป็นระยะเวลา 30 ปี โดยมีระยะเวลาการทำงาน 24 ชั่วโมง/วัน หรือ 360 วัน/ปี มีผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมสำคัญ คือ ความเป็นพิษต่อมนุษย์ร้อยละ 52.02 พิษต่อระบบนิเวศบกร้อยละ 13.09 การลดลงของชั้นโอโซนร้อยละ 54.19 เกิดจากช่วงการก่อสร้างระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์เป็นหลัก อันประกอบไปด้วยทองแดง 100 kg ในส่วนประกอบเครื่องควบแน่น โดยสามารถลดผลกระทบด้านภาวะโลกร้อนร้อยละ 49.49 ภาวะฝนกรดร้อยละ 53.18 และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืดร้อยละ 41.11

4.8 การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิต หลังการปรับปรุง

การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิต เพื่อปรับปรุงกระบวนการ โดยการลดปริมาณไฟฟ้าจากการซื้อไฟฟ้าของ กฟภ. โดยกำหนดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในส่วนโครงสร้างอาคารโรงงานมีค่าเท่าเดิม และนำผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของเตาเผากำจัดขยะและระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จากหัวข้อที่ผ่านมา นำมาประเมินในส่วนของการดำเนินงาน สาระขาเข้าวัตถุดิบ และพลังงาน หรือคิดผลกระทบในรูปแบบการซื้อไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานขยะมาใช้งาน ทดแทนการซื้อไฟฟ้าจาก กฟภ. นั้นเอง

ตารางที่ 7 รวมผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม	ส่วนผลกระทบย่อย			ผลรวมผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม	
	โครงสร้าง	ดำเนินการ	การรื้อถอน	ตลอดอายุการใช้งาน	1 kWh
ความเป็นพิษต่อมนุษย์ (kg 1,4 DB-eq)	5.22E+04	1.69E+04	-3.39E+04	7.04E+05	1.28E-02
ภาวะโลกร้อน (kg CO ₂ -eq)	8.34E+03	1.26E+05	-2.57E+05	-2.46E+06	-4.48E-02
ภาวะฝนกรด (kg SO ₂ -eq)	8.24E+01	4.72E+02	-1.09E+03	-1.07E+04	-1.95E-04
ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด (kg 1,4 DB-eq)	6.02E+02	5.49E+02	-1.53E+03	-7.67E+03	-1.39E-04
พิษต่อระบบนิเวศบนบก (kg 1,4 DB-eq)	3.07E+00	8.43E+01	-1.28E+01	1.49E+03	2.71E-05
การลดลงของชั้นโอโซน (kg CFC-11-eq)	4.98E-04	3.69E-02	-1.35E-02	4.79E-01	8.71E-09

ตารางที่ 8 รวมผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม	ส่วนผลกระทบย่อย			ผลรวมผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม	
	โครงสร้าง	ดำเนินการ	การรื้อถอน	ตลอดอายุการใช้งาน	1 Piece
ความเป็นพิษต่อมนุษย์ (kg 1,4 DB-eq)	6.49E+08	3.85E+04	-7.32E+05	1.94E+10	1.24E+02
ภาวะโลกร้อน (kg CO ₂ -eq)	4.57E+08	9.14E+04	-4.89E+06	1.36E+10	8.62E+01
ภาวะฝนกรด (kg SO ₂ -eq)	3.32E+05	8.66E+01	-2.18E+04	9.30E+06	5.91E-02
ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด (kg 1,4 DB-eq)	2.46E+06	6.26E+02	-9.98E+03	7.35E+07	4.67E-01
พิษต่อระบบนิเวศบนบก (kg 1,4 DB-eq)	3.24E+04	1.65E+00	-2.35E+02	9.65E+05	6.14E-03
การลดลงของชั้นโอโซน (kg CFC-11-eq)	7.10E+04	1.69E-03	-2.30E-01	2.13E+06	1.35E-02

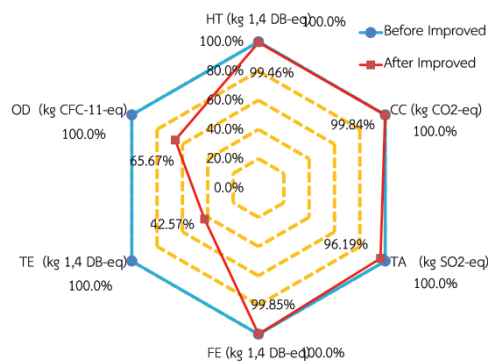
ผลรวมตลอดอายุการใช้งาน ของการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมด้านโครงสร้างอาคารโรงงาน การดำเนินงาน และการรื้อถอนวัสดุอาคารโรงงานบางชนิด เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ พบว่า มีการปลดปล่อยผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นมากที่สุด คือ ความเป็นพิษต่อมนุษย์ 1.94E+10 kg 1,4 DB-eq รองลงมา คือ ภาวะโลกร้อน 1.36E+10 kg CO₂-eq และผลกระทบที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด คือ ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก 9.65E+05 kg 1,4 DB-eq โดยผลิตภัณฑ์ 1 ชิ้น เกิดผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์ มากที่สุด 1.24E+02 kg 1,4 DB-eq รายละเอียดในตารางที่ 8

ผลการแปลผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ควอตซ์ คริสตัล ยูนิต หลังการปรับปรุง มีสาเหตุหลักคิดเป็นร้อยละ 99.99 ของทั้ง 6 ผลกระทบ เกิดขึ้นในช่วงการก่อสร้างอาคารของโรงงาน อันประกอบไปด้วยพื้นคอนกรีต

56,107,200 kg และเหล็กเส้น 40,381,125 kg ตามลำดับ โดยเมื่อนำผลการประเมินดังกล่าว มาทำการเปรียบเทียบกับผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตก่อนการปรับปรุง พบว่า ผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์ ภาวะโลกร้อน ภาวะฝนกรด ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด พิษต่อระบบนิเวศบนบก และการลดลงของชั้นโอโซนมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 0.54 0.16 3.81 0.15 57.43 และ 34.33 ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ผลกระทบลดลง เนื่องจากการลดลงของปริมาณขยะมูลฝอยจำนวน 97.41 ตัน/ปี ในกระบวนการผลิต แสดงในรูปที่ 9

4.9 การประเมินวัฏจักรชีวิตเอ็กเซอร์จีติกของผลิตภัณฑ์
ควอตซ์ คริสตัล ยูนิต

การประเมินวัฏจักรชีวิตเอ็กเซอร์จีติกของควอตซ์ คริสตัล ยูนิต เป็นการประเมินปริมาณและคุณภาพด้านพลังงานความ



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบผลกระทบของการประเมินวัฏจักรชีวิตก่อนและหลังการปรับปรุง

ร้อน โดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นพื้นฐาน และหน่วยการประเมินทางด้านพลังงานความร้อน คือ เมกะจูล (MJ) โดยวิธี single issue และคำนวณออกมาในรูปแบบความต้องการพลังงานสะสม (cumulative exergy demand) โดยผลการวิเคราะห์ พบว่า ก่อนการปรับปรุงผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเอ็กเซอร์จิดิกของควอตซ์ คริสตัล ยูนิท โครงสร้างอาคารโรงงานมีความต้องการพลังงานสะสมมากที่สุด คือ พื้นคอนกรีต $1.07\text{E}+10$ MJ ในขั้นตอนการดำเนินงาน พบว่า พลังงานไฟฟ้ามีความต้องการพลังงานสะสมมากที่สุด $3.58\text{E}+05$ MJ และขั้นตอนการรื้อถอน พบว่า โครงสร้างหลังคาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งสามารถลดความต้องการการใช้พลังงานสะสมได้เท่ากับ $-8.75\text{E}+06$ MJ การ

ประเมินวัฏจักรชีวิตเอ็กเซอร์จิดิกของระบบหลังการปรับปรุงพบว่า ความต้องการพลังงานสะสมในด้านโครงสร้างไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ในขั้นตอนการดำเนินงานสามารถลดความต้องการพลังงานสะสมได้ $-5.67\text{E}+03$ MJ และสามารถลดความต้องการพลังงานสะสมรวมได้ $370,506.67$ MJ รายละเอียดในตารางที่ 9

5. สรุปผลงานวิจัย

จากผลการศึกษาสามารถสรุปเนื้อหาสำคัญของการประเมินวัฏจักรชีวิต และวัฏจักรชีวิตเอ็กเซอร์จิดิกของผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัล ยูนิท ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์โดยใช้เชื้อเพลิงขยะได้ดังนี้

- 1) การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมก่อนปรับปรุงตลอดอายุการใช้งาน พบว่า ผลิตภัณฑ์ 1 ชิ้นก่อให้เกิดผลกระทบในด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์สูงที่สุด $1.24\text{E}+02$ kg 1,4 DB-eq
- 2) การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมเตาเผาขยะตลอดอายุการใช้งาน พบว่า ขยะมูลฝอย 1 kg ก่อให้เกิดผลกระทบในด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์สูงที่สุด $9.48\text{E}+01$ kg 1,4 DB-eq
- 3) การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ตลอดอายุการใช้งาน พบว่า พลังงานไฟฟ้า 1 kWh ก่อให้เกิดผลกระทบใน

ตารางที่ 9 ผลการประเมินของวัฏจักรเอ็กเซอร์จิดิกของผลิตภัณฑ์ควอตซ์ คริสตัลยูนิท

Item (ELCA)	Before Improvement	Incinerator	ORC	After Improvement
1. Construction Phase (MJ)	$1.10\text{E}+10$	$1.97\text{E}+04$	$9.26\text{E}+05$	$1.10\text{E}+10$
2. Operation Phase				
● Raw Material (MJ)	$1.63\text{E}+04$	$1.39\text{E}+03$	-	$1.63\text{E}+04$
● Energy (MJ)	$3.58\text{E}+05$	$3.28\text{E}+04$	$1.67\text{E}+05$	$-5.67\text{E}+03$
● Factory Waste (MJ)	$6.84\text{E}+03$	-	-	-
3. Decommissioning Phase				
● Recycle Waste (MJ)	$-8.75\text{E}+06$	$-1.18\text{E}+04$	$-5.55\text{E}+05$	$-8.75\text{E}+06$
Total	$1.101809\text{E}+10$	$4.75\text{E}+04$	$5.37\text{E}+05$	$1.101773\text{E}+10$

ด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์สูงสุด $1.28E-02$ kg
1,4 DB-eq

- 4) การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมหลังปรับปรุงตลอดอายุการใช้งาน พบว่า ผลิตภัณฑ์ 1 ขึ้นก่อให้เกิดผลกระทบในด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์สูงสุด $1.24E+02$ kg 1,4 DB-eq
- 5) ผลการเปรียบเทียบก่อน และหลังการปรับปรุง พบว่า งานวิจัยนี้สามารถลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมได้ในทุก ๆ ส่วน โดยความเป็นพิษต่อมนุษย์ลดลงร้อยละ 0.54 ภาวะโลกร้อนร้อยละ 0.16 ภาวะฝนกรดร้อยละ 3.81 ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืดร้อยละ 0.15 พิษต่อระบบนิเวศบนบกร้อยละ 57.43 และการลดลงของชั้นโอโซนร้อยละ 34.33
- 6) ผลการวิเคราะห์ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์โดยใช้เชื้อเพลิงขยะ พบว่า มีค่าเท่ากับ 1.50 บาท/kWh และต้นทุนการผลิตต่อหน่วย หลังปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 1.44 บาท/ชิ้น ซึ่งสามารถลดต้นทุนการผลิตต่อหน่วยได้ร้อยละ 2.04
- 7) การประเมินวัฏจักรชีวิตเอ็กเซอร์จีติก หลังการปรับปรุง พบว่า ระบบหลังการปรับปรุงสามารถลดความต้องการพลังงานสะสมรวมได้ 370,506.67 MJ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และบริษัท เคียวเซรา คริสตัล ดีไวซ์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ในการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ (Pollution Control Department). รายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย

ปี พ.ศ. 2559. เข้าถึงได้จาก: www.deqp.go.th [เข้าถึงเมื่อ 9 ธันวาคม 2560].

- [2] เลิศชัย ศรีเฉลิม. การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของขวดแก้วโดยหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (Environmental Impact Evaluation of Glass Bottle Using Life Cycle Assessment). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2553.
- [3] เนตรชนากานต์ สุนันตา, เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล. การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากขยะเทศบาลด้วยวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ (Greenhouse Gases Evaluation of Power Generation Technology from Municipal Waste by Organic Rankine Cycle System). *วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม*. 2560; 1(1): 1–14.
- [4] เจนจิรา เปี่ยมดี, พัชรวรรณ สุขสร้อย, โชติมา โคตรพัฒน์. การประเมินวัฏจักรของไส้กรอกปลา กรณีศึกษา (Life Cycle Assessment of Fish Sausage, A Case Study). ใน: *การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 นครปฐม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์*. 2557.
- [5] Sedpho S, Sampattagul S, Chaiyat N, Gheewala HS. Conventional and Exergetic Life Assessment of Organic Rankine Cycle Implementation to Municipal Waste Management: The Case Study of Nae Hong Son (Thailand). *Int J Life Cycle Assessment*. 2016; 22: 1773–1784.
- [6] นวรัตน์ จงมีสุข, นันทิยา หาญศุภลักษณ์. การประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตสีเคลือบป้องกันสนิม (Life Cycle Assessment of Protective Coating Paint Production). *วิศวกรรมสาร มก.* 2556; 26(63): 63–75.
- [7] วิทยา กันยา, หาญพล พึ่งรัศมี. การประเมินวัฏจักรชีวิตน้ำตาลทรายแดง (Life Cycle Assessment of Brown

- Sugar). *วารสารงานวิจัย มทร.พระนคร*. 2551; 2(1): 77–84.
- [8] นิติวีศว์ แต่งไทย. การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตและจ่ายน้ำประปา กรณีศึกษาการประปาส่วนภูมิภาคสาขาเชียงราย (Lift Cycle Assessment of Water Supply Production and Distribution System: Case Study of Chiang Rai Water Work Authority). วิทยาพนธ์ปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2556.
- [9] Dias CA, Arroja L, Capela I. Life Cycle Assessment of Printing and Writing Paper Produced in Portugal. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2007; 12(7): 521–528.
- [10] Poopak S, Agamuthu P. Life cycle impact assessment (LCIA) of paper making process in Iran. *African Journal of Biotechnology*. 2011; 10(24): 4860–4870.
- [11] M’hamdi IA, Kandri IN, Zerouale A, Blumberga D, Gusca J. Life cycle assessment of paper production from treated wood. *Energy Procedia*. 2017; 128(2017): 461–468.
- [12] ปาณิสรา อ่อนดอกไม้, นัฐพร ไชยญาติ, จุฑาภรณ์ ชนะถาวร, วรขมมล เลิศจตุรนนท์, สุรัตน์ เศษโพธิ์. การประเมินวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์จากพลังงานความร้อนใต้พิภพของกิจการน้ำพุร้อนสันกำแพง อำเภอแม่เมาะ ตามพระราชดำรินน. 428-442. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 3. ชุมพร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตอุดมศักดิ์*. 2561.
- [13] นัฐพร ไชยญาติ. *การออกแบบระบบพลังงานทดแทน (Renewable Energy System Design)*. เชียงใหม่: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้; 2560.
- [14] SimaPro. SimaPro for Education (Release 8.5.2.0). เข้าถึงได้จาก: https://simapro.com/education/?fbclid=IwAR2FnkiKK7CdEJzqDXrAKoiT6Sd_QXhiWovm12PDO0hQpIIZ8j20LihV5l0