



การประเมินปริมาณวัสดุจากของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานในประเทศไทย

อิงฉัตร สุภาพยาม* และ พิชญ์ รัชฎาวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 3008 1595 อีเมล: engchartkeur@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.12.007

รับเมื่อ 10 มิถุนายน 2565 แก้ไขเมื่อ 22 สิงหาคม 2565 ตอรับเมื่อ 6 กันยายน 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 12 ธันวาคม 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

แผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนถือเป็นเทคโนโลยีนิยมใช้มากที่สุดทั้งในต่างประเทศและในประเทศไทย สำหรับแผงกลุ่มผลึกซิลิกอนประกอบด้วย 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ ซิลิกอนผลึกเดี่ยว และซิลิกอนผลึกรวม ซึ่งแผงในกลุ่มผลึกซิลิกอนมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ กระจก กรอบอะลูมิเนียม แผ่นเซลล์ซิลิกอน วัสดุห่อหุ้ม (EVA) แผ่นปิดด้านหลังและซิลิโคน รวมถึงโลหะมีค่า (ทองแดง และเงิน) สำหรับประเทศไทยใน พ.ศ. 2550 เป็นปีที่เริ่มมีการสนับสนุนระบบผลิตไฟฟ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนพื้นดินแบบเชื่อมต่อระบบจำหน่ายตามนโยบายของรัฐ เห็นได้ว่าในอนาคตประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเผชิญกับปัญหาของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในปริมาณมาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการประเมินปริมาณวัสดุจากของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานในประเทศไทย เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการจัดการของเสียแผงให้สามารถนำกลับของวัสดุที่มีค่าและเป็นที่ต้องการในท้องตลาดแทนที่การนำไปฝังกลบ ช่วยให้เกิดระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนได้ในอนาคต โดยพิจารณาจากปริมาณของเสียแผงที่เกิดขึ้นจากข้อมูลการใช้แผงระหว่าง พ.ศ. 2550-2562 และค่าเฉลี่ยน้ำหนักองค์ประกอบของแผง ผลการดำเนินงานพบว่า ภายใน พ.ศ. 2582 จะมีปริมาณของเสียแผงสะสมสูงถึง 237,394 ตัน (ไม่รวมปริมาณของเสียแผงชำรุด) มีปริมาณกระจกมากที่สุด 163,921 ตัน ตามด้วยอะลูมิเนียม แผ่นเซลล์ซิลิกอน ทองแดง (รีบบอน) และเงินอยู่ที่ 30,007 7,620 2,089 และ 119 ตัน ตามลำดับ สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ (วัสดุห่อหุ้ม แผ่นปิดด้านหลัง และซิลิโคน) มีปริมาณรวมกัน 31,384 ตัน นอกจากนี้ยังพบว่า มีปริมาณตะกั่วที่ถือเป็นมลพิษ (สัดส่วนของตะกั่วร้อยละ 0.06 ของน้ำหนักแผง) สะสมถึง 142 ตัน

คำสำคัญ: ของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การประเมินปริมาณ ประเทศไทย



Assessment of Materials from End-of-life (EoL) Photovoltaic Waste in Thailand

Engchart Supapyam* and Pichaya Rachdawong

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 3008 1595, E-mail: engchartkeur@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.12.007

Received 10 June 2021; Revised 22 August 2022; Accepted 16 September 2022; Published online: 12 December 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Crystalline silicon (c-Si) photovoltaic (PV) panels are the most popular technology in Thailand and other countries. There are two types of silicon: monocrystalline silicon and polycrystalline silicon. PV modules consist of glass, aluminum frame, silicon cell, copper (ribbons), encapsulate (EVA), backsheet and silicone glue. In Thailand the installation of ground-mounted connected to the distribution system has been supported by the government since 2007. It is likely that Thailand may face the problem of PV waste in the near future. The purpose of this study is to assess the amount of waste materials from End-of-life (EoL) photovoltaic waste in Thailand to develop the waste management system that can bring back valuable and sought-after materials in the market instead of landfills, helping to create a circular economy in the future. Based on the amount of EoL panel waste installed between 2017 and 2019 and the average weight of panel composition, in 2039, the cumulative panels waste will reach 237,394 tons (excluding the amount of damaged panel waste), with the largest amount of glass at 163,921 tons, aluminum, silicon solar cell, copper (ribbon), and silver at 30,007 7,620 2089 and 119 tons, respectively. Polymer materials (EVA, backsheet and silicone) will be 31,384 tons. In addition, the amount of lead considered pollutant (0.06% of the panel weight) accumulates up to 142 tons.

Keywords: Photovoltaic Waste, Assessment, Thailand

1. บทนำ

แผงพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV Panel) หรือเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์สร้างจากสารกึ่งตัวนำ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงได้ [1] ประเภทของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งตามเทคโนโลยีได้ 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ กลุ่มผลึกซิลิกอน (Crystalline Silicon Solar Cells; c-Si) กลุ่มฟิล์มบาง (Thin Film) และกลุ่มที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ [2] โดยเทคโนโลยีแผงกลุ่มผลึกซิลิกอนถือเป็นเทคโนโลยีที่เก่าแก่ที่สุด ซึ่งในปัจจุบันมีการติดตั้งใช้งานกันอย่างแพร่หลายคิดเป็นร้อยละ 92 ของส่วนแบ่งการตลาดจากกำลังการผลิตติดตั้งทั่วโลก [3] และเช่นเดียวกับประเทศไทยที่มีการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 85.19 [4]

โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ซิลิกอนผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon) และซิลิกอนผลึกรวม (Polycrystalline Silicon) [3] ซึ่งแผงในกลุ่มผลึกซิลิกอนจะมีโครงสร้างประกอบด้วยส่วนต่างๆ 4 ส่วนหลัก ได้แก่ กระจก (Glass) เป็นส่วนคลุมด้านหน้าชั้นบนสุด โดยทั่วไปจะใช้เป็นกระจกนิรภัยหรือกระจกเทมเปอร์ (Tempered Glass) ที่มีความโปร่งแสง ถัดลงมาเป็นชั้นของวัสดุห่อหุ้มเพื่อป้องกันความชื้น (Encapsulate) โดยทั่วไปจะใช้วัสดุอีวีเอ (Ethylene Vinyl Acetate; EVA) สำหรับวัสดุห่อหุ้มนี้ จะถูกนำมาประกบด้านบนและด้านล่างของแผ่นเซลล์ซิลิกอน (Silicon Solar Cells) โดยแผ่นเซลล์แต่ละแผ่นจะมีโลหะทองแดงทำหน้าที่นำไฟฟ้า ที่เรียกว่าริบบอน (Ribbon) เชื่อมเข้าไว้ด้วยกัน และสุดท้ายเป็นส่วนของแผ่นปิดด้านหลัง (Backsheet) โดยทั่วไปนิยมใช้วัสดุพอลิฟลูออไรด์ (Polyvinyl Fluoride; PVF) หรือเรียกว่าเทดลาร์ (Tedlar) [2], [5] และหลังจากที่แผงพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านกระบวนการลามิเนต (Laminate) แล้วจะถูกนำไปติดตั้งกรอบอะลูมิเนียม (Aluminum Frame) เพื่อยึดส่วนประกอบต่างๆ ไว้ด้วยกัน ซึ่งจะมีการอัดวัสดุเชื่อมประสานหรือซิลิโคน (Adhesive) เพื่อยึดติดกรอบกับตัวแผงช่วยเพิ่มความแข็งแรง [2]

สำหรับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย นับตั้งแต่ พ.ศ. 2545 เป็นต้นมา ประเทศไทยเริ่มมีการลงทุนผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ [6] โดยที่ใน พ.ศ. 2550 เป็นปีที่เริ่มมีการสนับสนุนระบบผลิตไฟฟ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนพื้นดินแบบเชื่อมต่อระบบจำหน่ายตามนโยบายของรัฐ [7] จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานฉบับใหม่ มีเป้าหมายในการติดตั้งแผงรวมทั้งสิ้น 14,864 เมกะวัตต์ ภายใน พ.ศ. 2580 [1]

แผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปมีอายุการใช้งานเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 20–30 ปี โดยอายุการใช้งานเฉลี่ยขึ้นอยู่กับประเภทวัสดุ สภาพแวดล้อม และการบำรุงรักษา [8] แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน (End-of-life; EoL) หมายถึง แผงที่เสื่อมประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า จนหมดความคุ้มค่าในการใช้งานต่อไป หรือเรียกว่าการสูญเสียปกติ (Regular Loss) หมายถึง แผงที่ผลิตไฟฟ้าได้น้อยกว่าร้อยละ 80 ของความจุตั้งต้นของอายุการใช้งานตามใบรับประกัน และแผงที่ชำรุดเสียหายจากการใช้งาน (Early Loss) เช่น เสียหายจากการขนส่ง การติดตั้ง และเสียหายในระหว่างใช้งาน เป็นต้น [3], [4], [9] สำหรับแผงที่หมดอายุการใช้งานจะถูกจัดเป็นของเสียอิเล็กทรอนิกส์หรือของเสียกลุ่ม E (Electronic Waste) ซึ่งจะต้องคำนึงถึงแนวทางในการจัดการตามที่กฎหมายกำหนดต่อไป [8]

สำหรับการจัดการของเสียแผงในประเทศไทย ใช้วิธีการกำจัดอย่างง่ายโดยทำการคัดแยกวัสดุเบื้องต้น และส่วนที่เหลือนำไปกำจัดที่หลุมฝังกลบ [1] การฝังกลบไม่ใช่ทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและไม่ยั่งยืนในระยะยาวที่อาจส่งผลให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากองค์ประกอบภายในแผงมีทั้งส่วนที่ไม่เป็นอันตรายและส่วนที่เป็นโลหะหนัก จากองค์ประกอบที่ใช้ในกระบวนการผลิตพบว่า ตะกั่วที่ใช้ในการบัดกรีมีความเป็นพิษสูงที่สุด สามารถชะหรือปนเปื้อนในดินหรือน้ำใต้ดิน และอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ [4], [10] นอกจากนี้ยังสูญเสียโอกาสในการนำกลับของโลหะมีค่า เช่น เงิน และทองแดง เป็นต้น รวมถึงกระจกที่มีสัดส่วนมากที่สุดของแผง มีสัดส่วนอยู่ในช่วงร้อยละ 65.5–76.00 โดยน้ำหนัก ถือเป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้



แผงพลังงานแสงอาทิตย์มีน้ำหนัก และอะลูมิเนียมที่มีสัดส่วนรองลงมาอยู่ในช่วงร้อยละ 8-18 โดยน้ำหนัก [4], [11]-[16]

จากแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศไทย ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แสดงให้เห็นว่าในอนาคตอันใกล้ ประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเผชิญกับปัญหาของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณวัสดุจากของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานในประเทศไทย สำหรับนำไปพัฒนาระบบการจัดการของเสียแผงให้สามารถนำกลับของวัสดุที่มีค่าและเป็นที่ต้องการในท้องตลาด แทนที่การนำไปฝังกลบ ซึ่งจะช่วยให้เกิดระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนในอุตสาหกรรมการจัดการของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในอนาคต

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทบทวนเอกสารเรื่องกำลังการผลิตติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

รวบรวมข้อมูลกำลังการผลิตติดตั้งใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ใน พ.ศ. 2550-2562 จากคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) (เนื่องจากใน พ.ศ. 2550 เป็นปีที่เริ่มมีการสนับสนุนระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนพื้นดินแบบเชื่อมต่อบริษัทจำหน่ายตามนโยบายของรัฐ) [7]

2.1.2 ทบทวนเอกสารเรื่องสัดส่วนองค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ทำการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสัดส่วนองค์ประกอบหลักของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอน ได้แก่ กระจก กรอบอะลูมิเนียม แผ่นเซลล์ซิลิกอน ทองแดง (ส่วนของริบบอน) เงิน ตะกั่ว และวัสดุพอลิเมอร์ (วัสดุห่อหุ้ม แผ่นปิดด้านหลัง และซิลิโคน)

2.2 การประเมินปริมาณวัสดุจากของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน

ขอบเขตการศึกษาในงานวิจัยนี้กำหนดให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในประเทศไทยเป็นประเภทเดียวกัน ได้แก่ แผง

เซลล์กลุ่มผลึกซิลิกอน เนื่องจากในประเทศไทยมีความนิยมติดตั้งแผงกลุ่มผลึกซิลิกอนมากที่สุด [4] และมีองค์ประกอบแตกต่างกันน้อย

จะพิจารณาจากแผงที่หมดอายุการใช้งานเมื่อครบ 20 ปี หลังการผลิต [17], [18] เพื่อนำไปประเมินหาปริมาณวัสดุที่จะเกิดขึ้น จากปริมาณของเสียแผงที่หมดอายุการใช้งานในหัวข้อ 2.2.1 กับค่าเฉลี่ยน้ำหนักองค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำได้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ ในหัวข้อ 2.2.2 และใช้ข้อมูลของเงินและตะกั่วจากงานวิจัยของ [4], [11]-[16] เท่านั้น เนื่องจากไม่ได้อยู่ในขอบเขตของการดำเนินการในห้องปฏิบัติการในงานวิจัยนี้

2.2.1 ประเมินปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน

พิจารณาจากแผงที่เสื่อมประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจนหมดความคุ้มค่าในการใช้งานต่อไป (การสูญเสียปกติ) หมายถึง แผงที่ผลิตไฟฟ้าได้น้อยกว่าร้อยละ 80 ของความจุตั้งต้นของอายุการใช้งานตามใบรับประกัน [9] โดยประเมินจากปริมาณกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ติดตั้ง การคำนวณการประเมินปริมาณของเสียแผงแสดงดังสมการที่ (1)-(3)

1) ปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ตัน)

$$y = x + z \quad (1)$$

เมื่อ y คือ ปีที่จะเกิดเป็นของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์

x คือ ปีที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

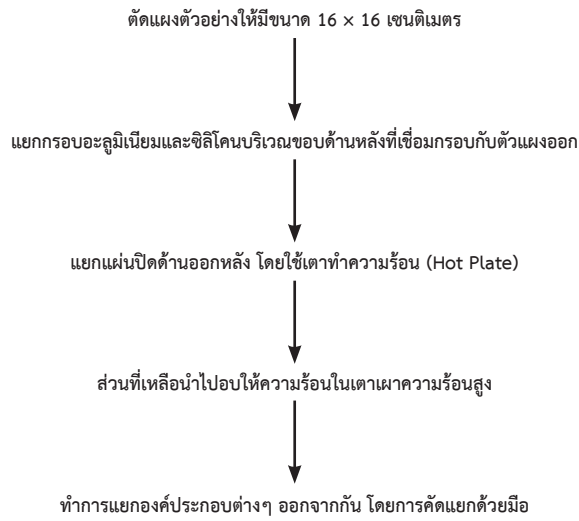
z คือ อายุการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามใบรับประกัน (20 ปี)

$$w_y = u_x \times w \quad (2)$$

เมื่อ w_y คือ ปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อปี (ตัน)

w คือ น้ำหนักของแผงต่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ติดตั้ง (ตันต่อเมกะวัตต์)

u_x คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ติดตั้ง (เมกะวัตต์)



รูปที่ 1 ขั้นตอนการแยกองค์ประกอบจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2) ปริมาณรวมของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์

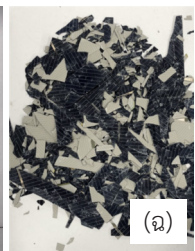
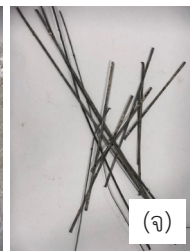
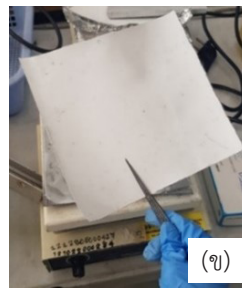
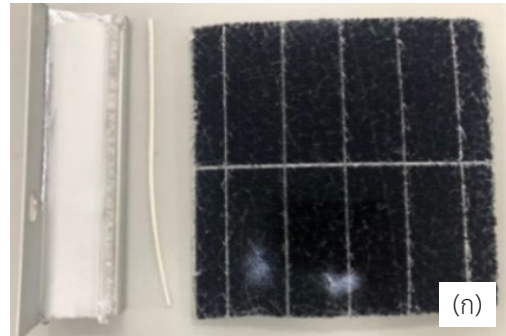
$$w_y = \sum_{x=1}^y u_x \times w \quad (3)$$

2.2.2 หาค่าเฉลี่ยองค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การหาองค์ประกอบจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอน ที่มีสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 1 ดำเนินการทั้งหมด 3 ชั่วโมงในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยมีขั้นตอนการแยกองค์ประกอบจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 1 และองค์ประกอบที่แยกได้ ดังแสดงในรูปที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของแผงชนิดผลึกซิลิกอนที่ใช้ในการศึกษานี้

คำบรรยาย	
Watt Peak (W)	390
Dimension (mm)	2008 x 1002 x 40
Weight (kg)	22.5
Watt per kg	17.33
Watt per Area (m ²)	198.84



รูปที่ 2 (ก) กรอบอะลูมิเนียม ซิลิโคน และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ข) แผ่นปิดด้าน (ค) แผงเซลล์แสงอาทิตย์หลังผ่านการอบแยก (ง) กระจก (จ) ทองแดง (ริบบอน) และ (ฉ) แผ่นเซลล์ซิลิกอน

3. ผลการดำเนินงาน

3.1 ผลการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 ผลการรวบรวมข้อมูลกำลังการผลิตติดตั้งภาพรวมกำลังการผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย จากฐานข้อมูลของคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) [19] สำหรับกำลังการผลิตติดตั้งใช้แผงของโรงไฟฟ้าในประเทศไทยใน พ.ศ. 2550-2562 พบว่า ใน พ.ศ. 2559 มีกำลังการผลิตติดตั้งสูงที่สุดอยู่ที่ 901.24 เมกะวัตต์ และมีกำลังการผลิตติดตั้งลดลงใน พ.ศ. 2560 อยู่ที่ 51.33 เมกะวัตต์ โดยใน พ.ศ. 2562 จะมีกำลังการผลิตติดตั้ง

สะสมสูงถึง 2,930.16 เมกะวัตต์ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กำลังการผลิตติดตั้งรายปีและสะสม

ปีที่ติดตั้ง	กำลังการผลิตติดตั้งรายปี (เมกะวัตต์)	กำลังการผลิตติดตั้งสะสม (เมกะวัตต์)
2550	1.40	1.40
2551	0.32	1.71
2552	3.44	5.15
2553	15.11	20.26
2554	163.88	184.13
2555	233.00	417.14
2556	485.21	902.34
2557	345.67	1,248.01
2558	594.74	1,842.48
2559	901.24	2,743.72
2560	51.33	2,793.75

อ้างอิงข้อมูลการติดตั้งจากคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) [19]

3.1.2 ผลการรวบรวมข้อมูลสัดส่วนองค์ประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยองค์ประกอบของแผงกลุ่มผลึกซิลิกอนที่มีโครงสร้างหลักดังแสดงในรูปที่ 3 และจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า แผงกลุ่มผลึกซิลิกอนมีกระจกในสัดส่วนมากที่สุด อยู่

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักองค์ประกอบแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน จากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

องค์ประกอบวัสดุ	สัดส่วนวัสดุในแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)							ค่าเฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ช่วงน้ำหนัก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	[4]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]			
กระจก	74.16	74.16	74.16	70.00	67.8	76.00	65.40	71.67	65.50–76.00	3.9671
กรอบอลูมิเนียม	10.30	10.30	10.30	18.00	16.9	8.00	16.50	12.9	8.00–18.00	4.0673
แผ่นซิลิกอน	3.48	3.48	3.48	3.65	6.1	5.00	0.80	3.71	0.80–5.00	1.6333
วัสดุห่อหุ้มป้องกันความชื้น (อีวีเอ)	6.53	6.53	6.53	5.10	6.73	8.00	6.50	6.56	5.10–8.00	0.8407
แผ่นปิดด้านหลัง	3.60	3.60	3.60	1.50	0.8	-	-	2.62	0.80–3.60	1.3646
วัสดุเชื่อมประสาน (ซิลิโคน)	1.16	1.16	1.16	-	-	-	-	1.16	1.16	0.0000
ลวดทองแดง (ริบบอน)	0.57	0.57	0.57	1.00	0.77	1.00	0.70	0.74	0.57–1.00	0.1934
โลหะเงิน	0.005	0.01	0.004–0.006	0.053	-	0.1	0.1	0.05	0.004–0.1	0.0463
ตะกั่ว	0.06	0.07	0.06	0.053	-	-	0.05	0.06	0.053–0.07	0.0077

อิงฉัตร สุภาพยาม* และ พิชญ รัชฎาวงศ์, “การประเมินปริมาณวัสดุจากของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานในประเทศไทย.”

Aluminum frame
Glass
EVA
Silicon wafer + ribbon
EVA
Backsheet

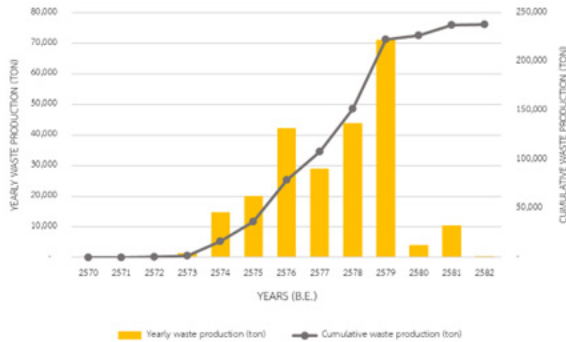
รูปที่ 3 โครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอน

ในช่วงร้อยละ 65.5–76 ตามด้วย กรอบอะลูมิเนียมร้อยละ 8–18 สำหรับโลหะมีค่า ได้แก่ ทองแดง และเงินมีสัดส่วนอยู่ในช่วงร้อยละ 0.57–1 และ 0.004–0.1 ตามลำดับ และพบว่า มีตะกั่วร้อยละที่น้อยที่สุดอยู่ในช่วงร้อยละ 0.053–0.07 สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ (วัสดุห่อหุ้ม แผ่นปิดด้านหลังและซิลิโคน) พบว่ามีสัดส่วนของวัสดุห่อหุ้มมากที่สุดในช่วงร้อยละ 5.10–8.00 แสดงดังในตารางที่ 3

3.2 การประเมินปริมาณวัสดุจากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน

3.2.1 การประเมินปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์

สำหรับการประเมินปริมาณของเสียแผงที่หมดอายุการใช้งาน 20 ปีหลังการติดตั้ง ที่จะเกิดขึ้นใน พ.ศ. 2570–2582 จากข้อมูลการติดตั้งจริง (พ.ศ. 2550–2562) ข้อมูลจาก



รูปที่ 4 ปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดอายุการใช้งาน 20 ปีหลังการติดตั้ง (ตัน)

คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานพบว่า จะเริ่มมีของเสียแผงเกิดขึ้นใน พ.ศ. 2570 จำนวน 126 ตัน (1.4 เมกะวัตต์) และภายใน พ.ศ. 2579 จะเกิดปริมาณของเสียแผงมากที่สุด 71,198 ตัน (คิดเป็น 901.24 เมกะวัตต์) เป็นผลเนื่องจากการกำลังติดตั้งใน พ.ศ. 2559 และในปีถัดมาที่มีกำลังติดตั้งลดลง ส่งผลให้ปริมาณของเสียแผงสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น โดยใน พ.ศ. 2582 จะมีปริมาณของเสียแผงสะสมอยู่ที่ประมาณ 237,394 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 4

3.2.2 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักองค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

จากองค์ประกอบของแผงกลุ่มผลึกซิลิกอนที่ทำได้ในห้องปฏิบัติการดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า ส่วนใหญ่มีค่าร้อยละโดยน้ำหนักอยู่ในช่วงขององค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยของ [4], [11]–[16] ดังแสดงในตารางที่ 3 ยกเว้นวัสดุห่อหุ้ม และซิลิโคน จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนเป็นกระจก โดยมีสัดส่วนมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 69.05 (พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 65.5–76) ตามด้วยกรอบอะลูมิเนียมร้อยละ 12.64 (พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 8–18) แผงเซลล์ซิลิกอนร้อยละ 3.21 (พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.8–5) และทองแดง (รีบบอน) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 0.88 (พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.57–1) สำหรับวัสดุพอลิเมอร์พบว่ามีสัดส่วนของวัสดุห่อหุ้มมากที่สุด เช่นเดียวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยสัดส่วนที่ทำให้คิดเป็น

ร้อยละ 8.95 ของน้ำหนักแผง (พบว่ามีค่ามากกว่าค่าช่วงในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง) ตามด้วยแผ่นปิดด้านหลังที่เป็นวัสดุพอลิไวนิลฟลูออไรด์หรือที่เรียกว่าเทตลาร์ คิดเป็นร้อยละ 3.29 (พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.8–3.6) และซิลิโคนคิดเป็นร้อยละ 0.98 โดยค่าที่ทำได้มีค่าน้อยกว่าในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น (ร้อยละ 1.16)

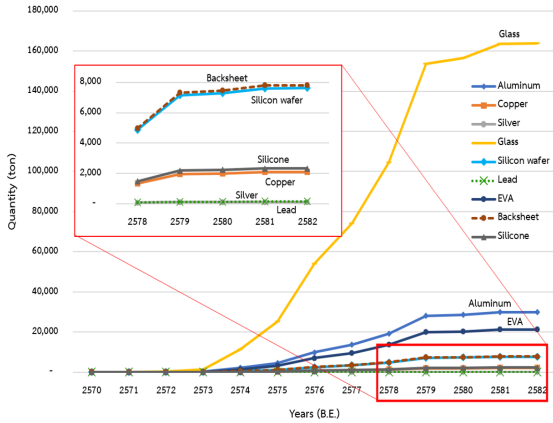
ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบวัสดุของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนในงานนี้

องค์ประกอบวัสดุ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
กระจก	69.05
กรอบอลูมิเนียม	12.64
แผ่นซิลิกอน	3.21
วัสดุห่อหุ้มป้องกันความชื้น (อีวีเอ)	8.95
แผ่นปิดด้านหลัง	3.29
วัสดุเชื่อมประสาน (ซิลิโคน)	0.98
ลวดทองแดง (รีบบอน)	0.88

3.2.3 การประเมินปริมาณวัสดุจากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดอายุการใช้งานในประเทศไทย

การหาปริมาณวัสดุของเสียที่จะเกิดขึ้น หาได้จากการประเมินปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในหัวข้อ 3.2.1 และสัดส่วนองค์ประกอบวัสดุของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในตารางที่ 4 สำหรับสัดส่วนของเงินที่เป็นองค์ประกอบภายในแผงเซลล์ซิลิกอน และตะกั่วที่ใช้ในการบัดกรีเชื่อมทองแดง (รีบบอน) กับแผงเซลล์ซิลิกอน จะใช้ค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 3

พบว่าใน พ.ศ. 2582 ปริมาณวัสดุสะสมที่เกิดจากของเสียแผงกลุ่มผลึกซิลิกอนส่วนใหญ่เป็นกระจก โดยมีปริมาณสะสมประมาณ 163,921 ตัน ตามด้วยกรอบอะลูมิเนียม 30,007 ตัน แผงเซลล์ซิลิกอน 7,620 ตัน ทองแดง (รีบบอน) 2,089 ตัน และมีปริมาณของเงินน้อยที่สุด 119 ตัน สำหรับส่วนของวัสดุพอลิเมอร์พบว่า มีวัสดุห่อหุ้มปริมาณมากที่สุด อยู่ที่ประมาณ 21,247 ตัน แผ่นปิดด้านหลัง 7,810 ตัน และซิลิโคนปริมาณน้อยที่สุดอยู่ที่ 2,326 ตัน นอกจากองค์ประกอบต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว ยังพบปริมาณ



รูปที่ 5 ปริมาณวัสดุจากของเสียแผงสะสม (ตัน)

มลพิษ (ตะกั่ว) สะสมอยู่ที่ 142 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 5

จากปริมาณวัสดุสะสมที่เกิดขึ้นนั้นพบว่า หากมีการแยกองค์ประกอบวัสดุจะมีปริมาณของวัสดุที่มีค่า และเป็นที่ต้องการในท้องตลาดเกิดขึ้นจำนวนมาก ได้แก่ อะลูมิเนียม ทองแดง และเงิน และทำการประเมินมูลค่าของวัสดุเหล่านี้ จะเห็นได้ว่าแม้เงินจะมีปริมาณน้อยที่สุด แต่สามารถสร้างมูลค่าได้มากที่สุดคิดเป็น 2,888.13 ล้านบาท ตามด้วย อะลูมิเนียม 2,100.49 ล้านบาท และทองแดง 0.59 ล้านบาท ดังแสดงในตารางที่ 5 และหากพิจารณาในของเสียแผง 1 ตัน มีมูลค่าวัสดุรวมอยู่ที่ 23,482.20 บาท คิดเป็นเงิน 12,135.00 บาท อะลูมิเนียม 8,848.00 บาท และทองแดง 2,499.20 บาท

ตารางที่ 5 มูลค่าที่เกิดจากวัสดุมีค่า (เงิน อะลูมิเนียม และทองแดงส่วนของรีบบอน)

องค์ประกอบวัสดุ	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณ (ตัน)	ราคา (ล้านบาท)
เงิน	24,270*	119	2,888.13
อลูมิเนียม	70**	30,007	2,100.49
ทองแดง	284**	2,089	0.59

หมายเหตุ: *ราคาอ้างอิงจากกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ วันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ. 2565

** ราคาซื้อเศษวัสดุจาก บริษัท วงษ์พาณิชย์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด วันที่ 8 มิถุนายน พ.ศ. 2565

สำหรับวัสดุองค์ประกอบที่เกิดขึ้นจากของเสียแผง นอกจากวัสดุที่มีค่าแล้ว ยังพบว่าวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถใช้ในเชิงพลังงานได้จาก [20] พบว่า ค่าความร้อนของวัสดุห่อหุ้มมีค่าสูงมากเทียบได้กับไบโอดีเซลที่มีค่าความร้อนเท่ากับ 40.2 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งจากการประเมินปริมาณของวัสดุพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้พบว่า มีปริมาณสะสมรวมกันอยู่ที่ 31,383 ตัน (โดยมีปริมาณวัสดุห่อหุ้มมากที่สุด) และพบว่า ปริมาณพลังงานของวัสดุพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น อาจเทียบได้กับ 29,876.62 ตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบ (toe)* หรือคิดเป็นมูลค่าประมาณ 916.73 ล้านบาท**

หมายเหตุ:

* 1 ตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เท่ากับ 42.244 จิกะจูล [21]

** ราคาน้ำมันดิบ 1 บาร์เรล เท่ากับ 121.51 ดอลลาร์ (USD) ราคาวันที่ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2565 [22]

** 1 ดอลลาร์ (USD) เท่ากับอัตรากลาง 34.5269 บาท ราคาวันที่ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2565 [23]

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการประเมินปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานในประเทศไทยจากข้อมูลการติดตั้งใช้งานแผงระหว่าง พ.ศ. 2550-2562 พบว่า ในอีก 17 ปีข้างหน้า (พ.ศ. 2582) จะมีปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์เกิดขึ้นสะสมอยู่ที่ประมาณ 237,394 ตัน (ไม่รวมปริมาณของเสียแผงชำรุดเสียหาย) ส่งผลให้มีปริมาณวัสดุจากของเสียแผงที่หมดอายุการใช้งานเกิดขึ้นในปริมาณมากด้วยเช่นกัน พบว่า มีปริมาณกระจุกมากเกินครึ่งของปริมาณของเสียแผงสะสมอยู่ที่ 163,921 ตัน

พบว่าหากนำของเสียแผงทั้งหมดที่เกิดขึ้นไปกำจัดโดยการฝังกลบจะสูญเสียวัสดุมีค่า (เงิน อะลูมิเนียม และทองแดง) ที่มีปริมาณรวมกัน 32,215 ตัน หรือคิดเป็นมูลค่ารวมอยู่ที่ประมาณ 5,582 ล้านบาท โดยของเสียแผง 1 ตัน จะมีมูลค่าของเงิน 12,135.00 บาท อะลูมิเนียม 8,848.00 บาท และทองแดง 2,499.20 บาท นอกจากนี้ยังมีวัสดุที่สามารถนำไปใช้ในเชิงพลังงานได้ คือ วัสดุห่อหุ้ม แผ่นปิดด้านหลัง และซิลิโคนที่มีปริมาณรวมกัน 31,634 ตัน ในทำนองเดียวกัน

หากนำไปกำจัดโดยการฝังกลบจะทำให้สูญเสียค่าความร้อนที่เกิดขึ้นโดยเปล่าประโยชน์ เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะดึงเอาพลังงานความร้อนที่ได้ออกมาใช้ประโยชน์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Farrell และคณะ [18] Uçar และคณะ [24] และ Ratner และคณะ [25] หรือสูญเสียปริมาณพลังงานไปประมาณ 29,876.62 ตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (toe) หรือคิดเป็นมูลค่าประมาณ 916.73 ล้านบาท

และจากการประเมินปริมาณวัสดุจากของเสียแผงที่เกิดขึ้นพบว่า จะมีปริมาณตะกั่วสะสมอยู่ที่ 142 ตัน (ใน 1 แผงมีค่าเฉลี่ยของตะกั่วร้อยละ 0.06) ถือเป็นปริมาณมลพิษที่อาจเกิดขึ้นจากของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนได้ในอนาคตหากมีการจัดการที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงควรมีการรีไซเคิลของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น การใช้กระบวนการทางความร้อน การใช้กระบวนการทางเคมี เป็นต้น เพื่อนำเอาวัสดุมีค่าที่ได้กลับมาแล้วข้างต้น รวมถึงตะกั่ว ที่สามารถนำไปส่งต่อให้กับอุตสาหกรรมต่อเนื่องได้ เช่น จำหน่ายให้ร้านรับซื้อวัสดุ อุตสาหกรรมโรงหล่อ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องประดับ เป็นต้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ พิชญ และคณะ [4] และศูนย์วิจัยกสิกร [8]

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ และสถานที่ในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณคณะกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) และผู้ประกอบการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และบริษัท วงษ์พาณิชย์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ที่เอื้อเฟื้อข้อมูล รวมไปถึงโครงการการพัฒนากระบวนการรีไซเคิลของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในการสนับสนุนวัตถุดิบ และสำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย จนทำให้งานวิจัยครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

[1] N. Buranasingha, (2019, July). *Solar panels: toxic waste should not be overlooked*. [Online].

(in Thai). Available: www.parliament.go.th/ewtadmin/ewt/parliparli_parcy/ewt_dl_link.php?nid=51485&filenamf=thai_national_assembly

[2] *Environmental Impact Prevention Guidelines and Waste Disposal Methods from Solar Power Projects for Thailand Manual*, Development and Efficiency, Ministry of Energy, Thailand, pp. 1–29, 2017 (in Thai).

[3] W. Stephanie, W. Andreas, and H. Garvin. (2020, April). *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels (IEA-PVPS Task 12)*. [Online]. Available: www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels

[4] P. Rachadawong, S. Ratanathamphan, D. Banjerdpongchai, T. Boonpramote, and S. Sampattavanija. (2016, September). Management of expired solar PV panels. Thailand Science Research and Innovation. Bangkok. [Online]. (in Thai). Available: https://elibrary.trf.or.th/project_content.asp?PJ=RDG58D0006

[5] B. Wiengmoon, “Analysis of solar cells deterioration,” Doctor of Philosophy, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2010 (in Thai).

[6] Information and Communication Technology Center Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. (2021, April). *Energy Balance of Thailand 2020*. [Online]. (in Thai). Available: <https://webkcdede.go.th/testmax/node/5736>

[7] Development and Efficiency, Ministry of Energy,



- Thailand PV Status Report B.E. 2561*, pp. 1–58, 2018 (in Thai).
- [8] M. Pibanwong, “Expired/damaged Solar Cell Management: A case study of Ubonratchatane Province,” Master of Science (Environmental Management), National Institute of Development Administration, Bangkok, Thailand, 2016 (in Thai).
- [9] V. Tan, P. R. Dias, N. Chang, and R. Deng, “Estimating the lifetime of solar photovoltaic modules in Australia,” *Sustainability*, vol. 14, no. 9, pp. 1–19, 2022.
- [10] C. C. Farrell, A. I. Osman, R. Doherty, M. Saad, X. Zhang, A. Murphy, J. Harrison, A. S. M. Vennard, V. Kumaravel, A. H. Al-Muhtaseb, and D. W. Rooney, “Technical challenges and opportunities in realizing a circular economy for waste photovoltaic modules,” *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 128, pp. 1–18, 2020.
- [11] V. Fiandra, L. sannino, C. Andreozzi, and G. Graditi, “End-of-life of silicon PV panels: A sustainable materials recovery process,” *Waste Management*, vol. 84, pp. 91–101, 2019.
- [12] A. Paiano, “Photovoltaic waste assessment in Italy,” *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 41, pp. 99–112, 2015.
- [13] Ç. Gönen, and E. Kaplanoğlu, “Environmental and economic evaluation of solar panel wastes recycling,” *Waste Management & Research*, pp. 1-7, April 2019.
- [14] T. Maani, I. Celik, M.J. Heben, R.J. Ellingson, and D. Apul, “Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CDTE) solar panels,” *Science of the Total Environment*, vol. 735, pp. 1–11, 2020.
- [15] J. D. Santos and M. C. Alonso-García, “Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, pp. 1613–1628, 2018.
- [16] H. Kim and H. Park, “PV waste management at the Crossroads of circular economy and energy transition: The case of South Korea,” *Sustainability*, vol. 10, no. 10, pp. 1–15, 2018.
- [17] Kasikornresearch. (2020, November). What to do with the solar panel waste problem. [Online]. (in Thai). Available: <https://www.kasikornresearch.com/th/analysis/k-social-media/Pages/FB-sola-30-01-20.aspx>
- [18] F. Cucchiella, I. D’Adamo, and P. Rosa, “End-of-life of silicon PV panels: A financial analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 552–561, 2015.
- [19] Energy Regulatory Commission. (2022, March). SPP/VSP database system. [Online]. (in Thai). Available: <http://www.erc.or.th/ERCSP/Detail.aspx?ListDetail.aspx?>
- [20] C. Farrell, A. I. Osman, X. Zhang, A. Murphy, R. Doherty, K. Morgan, D. W. Rooney, J. Harrison, R. Coulter, and D. Shen, “Assessment of the energy recovery potential of waste Photovoltaic (PV) modules,” *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, pp. 1–14, 2019.
- [21] Thai Gasifier. (2022, June). The heating value of various sources. [Online]. (in Thai). Available: <http://www.thaigasifier.com>
- [22] Investing. (2022, June). Forward contract of West Texas Intermediate (WTI) crude oil. [Online]. (in Thai). Available: <https://th.investing.com/commodities/crude-oil-historical-data>
- [23] Bangkok of Thailand. (2022, June). Average



- exchange rate. [Online]. (in Thai). Available: www.bot.or.th/App/BTWS_STAT/statistist/BOTBOTWEBS.aspx?reportID=123&language=TH
- [24] S. Uçar, A. R. Ozkan, J. Yanik, and S. Karagöz, “The influence of the waste ethylene vinyl acetate copolymer on the thermal degradation of the waste polypropylene,” *Fuel Processing Technology*, vol. 89, no. 11, pp. 1201–1206, 2008.
- [25] S. Ratner, K. Gomonov, S. Revinova, and I. Lazanyuk, “Eco-design of energy production systems: the problem of renewable energy capacity recycling,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 12, pp. 1–29, 2020.

