



## การประเมินและการหาแนวทางเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ ภายหลังหมดอายุการใช้งานสำหรับประเทศไทย

พุทธรดี อุบลสุข ฉัตรแก้ว ชัยลือชา\* และ สุรัตน์ เศษโพธิ์  
คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 0406 8074 อีเมล: chatkaew.ch@up.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.05.006

รับเมื่อ 30 ตุลาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 18 ธันวาคม 2563 ตอรับเมื่อ 23 ธันวาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 17 พฤษภาคม 2565

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

การกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ถือเป็นขั้นตอนจำเป็นในการใช้เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยพิจารณาถึงการขนส่ง การตัดแยก และการรีไซเคิลเพื่อได้คืนวัสดุจากแผงโซลาร์เซลล์ เมื่อประเมินการส่งแผงโซลาร์เซลล์ที่หมดอายุการใช้งานไปกำจัดในประเทศญี่ปุ่นเรียกว่าการกำจัดซากแบบทั่วไป (Conv.) เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 8.6370 kgCO<sub>2</sub>eq/แผง โดยแบ่งออกเป็นสองกระบวนการ คือ การขนส่ง 2.1295 kgCO<sub>2</sub>eq/แผง และการรีไซเคิล 6.5075 kgCO<sub>2</sub>eq/แผง เพื่อขยายแนวทางกำจัดซาก ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มสถานการณ์ในการประเมิน 4 สถานการณ์ คือ การลดภาระน้ำหนักในการขนส่งโดยตัดแยกองค์ประกอบของแผงโซลาร์เซลล์ก่อนส่งไปกำจัดยังประเทศญี่ปุ่น (Sc1) การกำจัดซากโดยโรงงานรีไซเคิลในประเทศไทย (Sc2) การแยกองค์ประกอบของแผงโซลาร์เซลล์ก่อนนำไปกำจัดยังโรงงานรีไซเคิลในประเทศไทย (Sc3) การแยกองค์ประกอบ และกำจัดซากในประเทศไทยโดยโรงงานรีไซเคิลใช้พลังงานทดแทนสำหรับการผลิตไฟฟ้า (Sc4) มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 6.3826 kgCO<sub>2</sub>eq/แผง, 8.7892 kgCO<sub>2</sub>eq/แผง, 6.0445 kgCO<sub>2</sub>eq/แผง และ 4.5811 kgCO<sub>2</sub>eq/แผง ตามลำดับ พบว่า Sc4 สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแบบ Conv. ได้ถึงร้อยละ 46.96 ทั้งนี้เพื่อพัฒนาการวางแผนกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ในประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพควรมีการวิเคราะห์เทคนิคการรีไซเคิลที่หลากหลายยิ่งขึ้น

**คำสำคัญ:** แผงโซลาร์เซลล์ กำจัดซาก ก๊าซเรือนกระจก หมดอายุการใช้งาน สถานการณ์

การอ้างอิงบทความ: พุทธรดี อุบลสุข, ฉัตรแก้ว ชัยลือชา และ สุรัตน์ เศษโพธิ์, “การประเมินและการหาแนวทางเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ภายหลังหมดอายุการใช้งานสำหรับประเทศไทย,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 4, หน้า 978-988, ต.ค.-ธ.ค. 2565.



## Assessment and Approach to Reduce Greenhouse Gas Emissions from End of Life Solar Panel Waste for Thailand

Putthadee Ubolsook, Chatkaew Chailuecha\* and Surat Sedpho

School of Energy and Environment, University of Phayao, Phayao, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 08 0406 8074, E-mail: chatkaew.ch@up.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.05.006

Received 30 October 2020 ; Revised 18 December 2020 ; Accepted 23 December 2020; Published online: 17 May 2022

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

Solar panel waste management is an important step for the utilization of solar technology. This research evaluated the greenhouse gas emissions based on the life cycle assessment. The transportation, waste sorting and recycling to recover materials from solar panels have been considered. Greenhouse gas assessment for disposal of used solar panels in Japan is called the conventional disposal (Conv.) because it is commonly used in the moment. The result showed that the total greenhouse gases released from the conventional disposal was 8.6370 kgCO<sub>2</sub>eq/module which can be divided into two factors, 2.1295 kgCO<sub>2</sub>eq/module for the transportation and 6.5075 kgCO<sub>2</sub>eq/module for the recycling process. To expand the approach of waste management, therefore, the researcher increased more four scenarios which were: Sc1: reduction of the transport weight by separating the elements of the solar panels before shipping to Japan, Sc2: disposal of solar wastes in Thailand by the local recycling plant, Sc3: solar panel disassembly before delivering to a recycling facility in Thailand, and Sc4: disassembling and disposing the components in Thailand by the recycling plant that used renewable energy for electricity generation. The greenhouse gas evaluation of four scenarios were 6.3826 kgCO<sub>2</sub>eq/module, 8.7892 kgCO<sub>2</sub>eq/module, 6.0445 kgCO<sub>2</sub>eq/module and 4.5811 kgCO<sub>2</sub>eq/module, respectively. It was found that Sc4 could reduce greenhouse gas emissions from Conv. by 46.96%. To develop the effective planning for solar panel waste management in Thailand, the analysis of various recycling techniques should be conducted in further research.

**Keywords:** Solar Cell, Disposal, Greenhouse Gas Emission, End of Life, Scenario

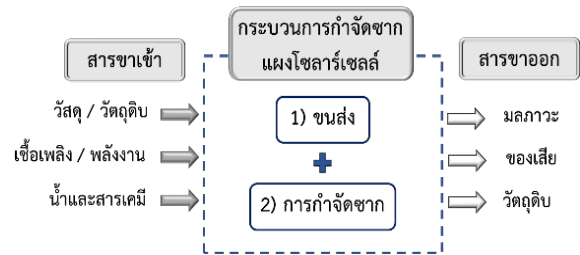
Please cite this article as: P. Ubolsook, C. Chailuecha, and S. Sedpho, "Assessment and approach to reduce greenhouse gas emissions from end of life solar panel waste for Thailand," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 4, pp. 978–988, Oct.–Dec. 2022 (in Thai).

## 1. บทนำ

ปัจจุบันโลกกำลังเผชิญหน้ากับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นวงกว้าง เป็นผลมาจากก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการทำกิจกรรมของมนุษย์เพื่ออำนวยความสะดวกและการพัฒนาต่างๆ [1] ส่วนหนึ่งของก๊าซเรือนกระจกมาจากการใช้ไฟฟ้า ซึ่งประเทศไทยใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นหลัก [2] ทำให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณที่สูง กระทรวงพลังงาน จึงกำหนดนโยบายสนับสนุนการผลิตไฟฟ้าด้วยแผงโซลาร์เซลล์ มาตั้งแต่ พ.ศ. 2545 และกำหนดให้ภายใน พ.ศ. 2579 ต้องผลิตไฟฟ้าด้วยแผงโซลาร์เซลล์ไม่น้อยกว่า 8,700 MW แต่ทั้งนี้แผงโซลาร์เซลล์มีอายุการใช้งานเฉลี่ยเพียง 20-25 ปี [3], [4] ดังนั้นสิ่งที่จะเกิดขึ้นภายหลังหมดอายุการใช้งานคือ ซากแผงโซลาร์เซลล์ โดย พ.ศ. 2565 ประเทศไทยจะมีแผงโซลาร์เซลล์ที่ต้องกำจัดประมาณ 11,560 แผง และใน 20 ปี ข้างหน้าจะมีแผงโซลาร์เซลล์ที่ต้องกำจัดมากกว่า 24 ล้านแผง คิดเป็นน้ำหนักขยะเกินกว่า 480 ล้านตัน [5] ซึ่งในกระบวนการกำจัดแผงโซลาร์เซลล์เหล่านี้ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดภาวะโลกร้อน

การกำจัดแผงโซลาร์เซลล์ในต่างประเทศส่วนใหญ่กำจัดด้วยการรีไซเคิล [6] เนื่องจากสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย สำหรับประเทศไทย ณ ปัจจุบัน ยังไม่มีโรงงานรีไซเคิลแผงโซลาร์เซลล์ จึงต้องส่งแผงโซลาร์เซลล์ไปกำจัดยังต่างประเทศ ซึ่งมีแล้วในหลายประเทศทั้งในยุโรปและเอเชีย [7] แต่การส่งไปกำจัดยังต่างประเทศก็ยังคงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มาจากการขนส่งที่มีระยะไกล น้ำหนักแผงที่มีปริมาณมาก และการรีไซเคิลซึ่งแล้วแต่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาในทุกกระบวนการ

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ และเสนอแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากที่เหมาะสมกับประเทศไทย รวมถึงสามารถกำหนดแนวทางและยุทธศาสตร์ในการพัฒนาพลังงานทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและยั่งยืนต่อไป



รูปที่ 1 กรอบการประเมินก๊าซเรือนกระจก

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

วิธีการดำเนินการมี 2 ขั้นตอน คือ 1) ประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์แบบทั่วไป (Conventional; Conv.) และ 2) ประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากสถานการณ์การกำจัดซาก (Scenario; Sc) ที่กำหนดขึ้นเพิ่มเติม เพื่อหาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

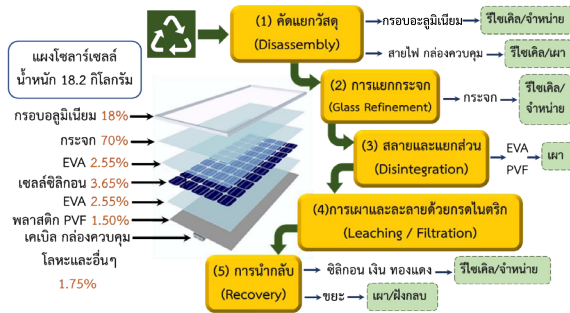
### 2.1 ขอบเขตการประเมินก๊าซเรือนกระจก

ขอบเขตการประเมินก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์แบบ Conv. เริ่มต้นภายหลังจากการรีไซเคิลแผงโซลาร์เซลล์ที่หมดอายุการใช้งานและส่งไปกำจัดต่างประเทศ ทำการประเมิน 2 ส่วน คือ การขนส่งจากจุดรีไซเคิลไปยังโรงงานรีไซเคิล และการกำจัดซากในโรงงานรีไซเคิลและกำจัดของเสีย (รูปที่ 1)

1) พื้นที่รีไซเคิล คือ มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา

2) โรงงานรีไซเคิล คือ PV Techno Cycle Co., Ltd., Keihinjima Park, Tokyo [8] ประเทศญี่ปุ่น รีไซเคิลและกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์

3) หน่วยการศึกษา (Functional Unit) แผงโซลาร์เซลล์ที่หมดอายุการใช้งานจำนวน 1 แผง ขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า 250 วัตต์ น้ำหนักแผง 18.2 กิโลกรัม [9]-[11] เป็นแผงประเภทซิลิคอน เนื่องจากมีการใช้งานมากถึง 55.85% ของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในประเทศไทย [12] มีรายละเอียดและองค์ประกอบแผงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 2



รูปที่ 2 องค์ประกอบ ขั้นตอนการรีไซเคิลและการกำจัดแผงโซลาร์เซลล์ [3], [9], [16]–[23]

ตารางที่ 1 รายละเอียดองค์ประกอบแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง

วัสดุ	น้ำหนักขาเข้า (กิโลกรัม)	ปริมาณสัมพัทธ์ (%)	รายละเอียด
กระจก	12.740	70.000	กระจกนิรภัยหนา 3.2 มม.
กรอบอะลูมิเนียม	3.270	18.000	อะลูมิเนียม
พอลิเมอร์/ยาง	0.920	5.100	Ethylene Vinyl Acetate (EVA) หนา 0.5 มม.
เซลล์ซิลิคอน	0.660	3.650	มี 60 เซลล์ ใช้ซิลิคอนเป็นองค์ประกอบหลัก
แผ่นพลาสติก	0.270	1.500	Polyvinyl Fluoride (PVF)
สายเคเบิล	0.180	1.000	อยู่ในกล่องควบคุมประจุไฟฟ้า
อะลูมิเนียม	0.090	0.530	ส่วนประกอบ
ทองแดง	0.020	0.110	ในวงจรไฟฟ้าของ
เงิน	0.009	0.055	แผงโซลาร์เซลล์
อื่นๆ	0.009	0.055	-
Total	18.200	100.00	-
แผงโซลาร์เซลล์หลายผลึก (Poly crystalline)			กำลังไฟฟ้า 250 วัตต์
ขนาด			1640 × 992 × 35 มม.
ประสิทธิภาพ			18%
อายุการใช้งาน			20 ปี

## 2.2 การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การประเมินก๊าซเรือนกระจกเป็นการประเมินตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต [13] สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1) [14]

$$GHG_i = \sum A_i \times EF_i \quad (1)$$

เมื่อ  $GHG_i$  คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรม ( $\text{kgCO}_2\text{eq}$ )  $A_i$  คือ ปริมาณวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ (หน่วย)  $EF_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการ วัตถุดิบ และสารเคมี ( $\text{kgCO}_2\text{eq/หน่วย}$ ) และ  $i$  คือ กิจกรรม หรือขั้นตอนที่ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก อ้างอิงตามฐานข้อมูล Ecoinvent โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 9.0 และคู่มือของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยเรื่องการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate; IPCC) โดยผลที่ได้จากการศึกษารายงานในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ( $\text{kgCO}_2\text{eq}$ ) ต่อหน่วยการศึกษา

## 2.3 การกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์แบบ Conv.

การประเมินก๊าซเรือนกระจกประกอบไปด้วย 2 กระบวนการ คือ กระบวนการการขนส่ง เริ่มต้นจากจุดรีดออน คือ มหาวิทยาลัยพะเยา ไปยังโรงงานรีไซเคิล ประเทศญี่ปุ่น [15] มีรายละเอียดการขนส่งดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขั้นตอนและระยะทางในการขนส่ง [15]

ที่	ต้นทาง	ปลายทาง	พาหนะ	ระยะทาง (กม.)
1	ม.พะเยา จ. พะเยา	ท่าเรือแหลมฉบัง จ.ชลบุรี	รถบรรทุก 10 ล้อ	791
2	ท่าเรือแหลมฉบัง ประเทศไทย	ท่าเรือโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น	เรือบรรทุก	7,320 [8]
3	ท่าเรือโตเกียว	โรงงาน PV Techno Cycle	รถบรรทุก 10 ล้อ	12

กระบวนการที่ 2 คือ การรีไซเคิลแผงโซลาร์เซลล์ และการกำจัดของเสีย มี 5 ขั้นตอน [3], [16] (รูปที่ 2) ขั้นตอนที่ 1 คือ การตัดแยกวัสดุ (Disassembly) [17] เป็นการแยกกรอบอะลูมิเนียม [18] กล่องควบคุมและสายไฟ เพื่อรีไซเคิลและเผา [19] ขั้นตอนที่ 2 คือ การแยกกระจก (Glass Refinement) [20] เป็นการแยกกระจกเพื่อส่งเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล



สำหรับกลับไปใช้งานใหม่ ขั้นตอนที่ 3 คือ การสลายและแยกส่วน (Disintegration) เป็นการละลาย EVA (Ethylene Vinyl Acetate) ที่เป็นวัสดุประเภทพอลิเมอร์หรือยาง ทำหน้าที่เป็นกาวยึดเซลล์ซิลิคอนกับกระจกและแผ่นพลาสติก PVF (Polyvinyl Fluoride) ที่เป็นแผ่นพลาสติกแข็งสีขาววางด้านหลังของแผงโซลาร์เซลล์ ทำหน้าที่ป้องกันความชื้น ฝุ่นละออง สารเคมีและให้ความแข็งแรงกับแผงโซลาร์เซลล์ [21], [22] โดยการให้ความร้อน จากนั้นกำจัดแผ่นพลาสติก PVF ด้วยการเผาในเตาหลอม ขั้นตอนที่ 4 คือ การเผาและละลายด้วยกรดไนตริก (Leaching/Filtration) [9] เป็นการเผาและละลายวัสดุยึดเซลล์ซิลิคอนโดยใช้กรดไนตริก ขั้นตอนที่ 5 คือ การนำกลับ (Recovery) เป็นการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าแยก ซิลิคอน เงิน สำหรับสารละลายที่เหลือถูกทำให้มีสถานะเป็นกลางและส่งกำจัดด้วยการฝังกลบต่อไป [23] โดยรายละเอียดแหล่งข้อมูลอ้างอิงของขั้นตอนการขนส่งและการรีไซเคิล เพื่อประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในการกำจัด

ซากแผงโซลาร์เซลล์แสดงในตารางที่ 3

#### 2.4 การหาแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การหาแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นการกำหนดสถานการณ์ (Scenario; Sc) ภายหลังจากได้ผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์แบบ Conv. และนำผลการประเมินที่ได้จากแต่ละ Sc คาดการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ที่จะเกิดขึ้นในช่วง 20 ปี [24] เมื่อแผงหมดอายุหรือหมดความคุ้มค่าในการใช้งาน โดยการสร้าง Sc อาศัยหลักการและวิธีการจาก 2 ส่วน คือ

1) การขนส่ง ใช้หลักการลดภาระน้ำหนักในการขนส่งด้วยวิธีการการคัดแยกขยะ [25], [26] และหลักการลดระยะทางในการขนส่ง [27]

2) การรีไซเคิลและการกำจัดซาก ใช้หลักการใช้พลังงานทดแทนสำหรับผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในกระบวนการ [28]

ตารางที่ 3 บัญชีรายการข้อมูลและรายละเอียดแหล่งอ้างอิงข้อมูลค่า Emission Factor

กระบวนการ	ขั้นตอน	รายละเอียด	ข้อมูล	ปริมาณ	หน่วย	แหล่งข้อมูลอ้างอิง
ขนส่ง	การขนส่ง	ขนส่งภายในประเทศ	รถบรรทุก 10 ล้อ	791 (km)	tkm	[29], [30]
		ขนส่งต่างประเทศ	(16 ตัน) น้ำมันดีเซล	12 (km)		
		ขนส่งระหว่างประเทศ	ขนส่งเรือบรรทุก (Transport, Transoceanic Freight Ship)	7,320 (km)	tkm	[29]
รีไซเคิล	(1) การคัดแยกวัสดุ (Disassembly)	กรอบอะลูมิเนียม / ล่องควมคุม / สายไฟ	น้ำมันดีเซล	0.020	Liter	[29]
			ไฟฟ้า	0.100	kWh	[30], [31]
	(2) การแยกกระจก (Glass Refinement)	กระจก (รีไซเคิล)	ไฟฟ้า	0.075	kWh	[9], [30], [31]
	(3) การสลายและแยกส่วน (Disintegration)	ละลายอีวีเอ (EVA) / แผ่นพลาสติก (PVF)	ใช้ไฟฟ้าให้ความร้อน	0.700	kWh	[21], [30], [31]
			เผาไหม้ด้วยเตาหลอม	0.150	MJ	[22], [29]
	(4) การเผาและละลายด้วยไนตริก (Leaching/Filtration)	ละลายด้วยไนตริก	กรดไนตริก	0.140	kg	[9], [29]
			เผาไหม้ด้วยเตาหลอม	0.015	MJ	[29]
	(5) การนำกลับ (Recovery)	การแยกโลหะ (ซิลิคอนเงิน ทองแดง)	แยกสารละลายด้วยไฟฟ้า	1.330	kWh	[23], [30], [31]
ปรับสภาพของเสียให้			1.110	kg	[23], [30]	
เป็นกลางและส่งกำจัด			การฝังกลบตะกอน	0.190	kg	[23], [30]
		การฝังกลบของเสียอันตราย				

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 3.1 ก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแพลงก์ตอนเซลล์แบบ Conv.

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแพลงก์ตอนเซลล์แบบ Conv. ด้วยการส่งแพลงก์ตอนเซลล์ไปกำจัดยังประเทศญี่ปุ่น [รูปที่ 3 (C)] พบว่า ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่ง มีค่าเท่ากับ 2.1295 kgCO<sub>2</sub>e/แพลง โดยเป็นค่าจากการขนส่งภายในประเทศ การขนส่งระหว่างประเทศและการขนส่งในต่างประเทศ และค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการรีไซเคิลมีค่าเท่ากับ 6.5075 kgCO<sub>2</sub>e/แพลง ผลรวมตลอดกระบวนการเท่ากับ 8.6370 kgCO<sub>2</sub>e/แพลง [15] ดังตารางที่ 4

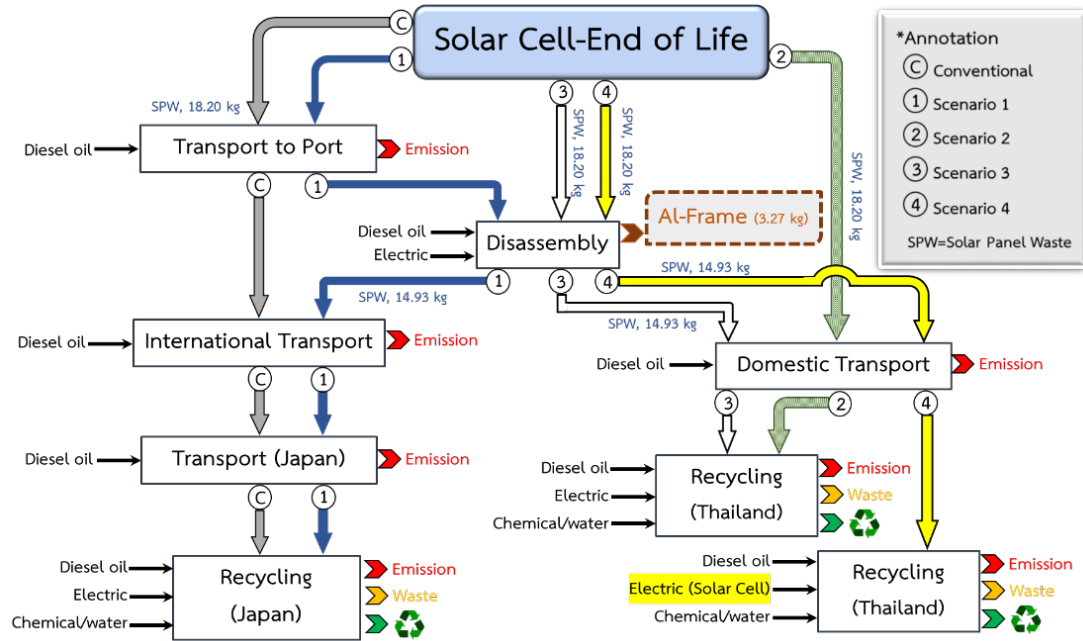
ตารางที่ 4 ก๊าซเรือนกระจกในการกำจัดซากแพลงก์ตอนเซลล์แบบ Conv. [15]

กระบวนการ	GHG, (kgCO <sub>2</sub> e/แพลง)	สัดส่วน (%)
การขนส่งภายในประเทศ	0.6926	8.02
การขนส่งระหว่างประเทศ	1.4253	16.50
การขนส่งในต่างประเทศ	0.0116	0.13
การรีไซเคิล	6.5075	75.34
รวม	8.6370	100.00

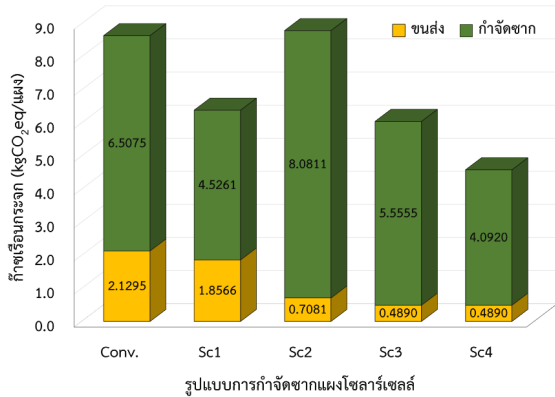
เมื่อเปรียบเทียบผลการประเมินกับ Philippe และ Rolf [32] และ Cynthia และคณะ [9] ที่ได้ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของการกำจัดซากแพลงก์ตอนเซลล์ มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 2.2834 และ 6.7340 kgCO<sub>2</sub>e/แพลง จะเห็นได้ว่าค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแพลงก์ตอนเซลล์แบบ Conv. มีค่าสูงกว่า ส่วนหนึ่งมาจากระยะทางจากการขนส่งไปต่างประเทศที่มากกว่า และอีกส่วนหนึ่งมาจากภาระน้ำหนักของแพลงก์ตอนเซลล์ในการขนส่ง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูง แต่หากมีการคัดแยกวัสดุตามหลักการกำจัดขยะอย่างถูกวิธี จะช่วยลดน้ำหนักในการขนส่ง ส่งผลให้ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ตั้งแต่ 9–50% [25], [26] ดังนั้นจึงใช้หลักการนี้กำหนดสถานการณ์ที่ 1 (Scenario 1, Sc1) ให้มีการคัดแยกอะลูมิเนียมโดยใช้แรงงานคน และจำหน่ายในพื้นที่ตั้งแต่ต้นทางเพื่อนำ

ไปใช้งานต่อไป หลังจากนั้นจึงส่งส่วนที่เหลือไปรีไซเคิลที่ประเทศญี่ปุ่น [รูปที่ 2 (1)] ผลการประเมินพบว่า ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมของ Sc1 เท่ากับ 6.3826 kgCO<sub>2</sub>e/แพลง โดยค่า 1.8566 และ 4.5261 kgCO<sub>2</sub>e/แพลง มาจากการขนส่งและการรีไซเคิล (รูปที่ 4-Sc1) จะเห็นได้ว่าผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก Sc1 ลดลงจาก Conv. 2.2544 kgCO<sub>2</sub>e/แพลง เท่ากับ 26.10% ซึ่งเป็นไปตามหลักการคัดแยกขยะ [25], [26] ก่อนขนส่งไปรีไซเคิลจะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ ทั้งนี้ควรมีแนวทางที่จะลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากกว่านี้ แต่ด้วยข้อจำกัดของ Sc1 คือ ต้องส่งไปกำจัดต่างประเทศ นอกจากการลดน้ำหนักในการขนส่งแล้ว ยังไม่มีวิธีการแก้ปัญหาได้เพิ่มเติม แต่จากผลการวิจัยของ Lunardi และคณะ [27] พบว่า การที่ระยะทางขนส่งเพิ่มขึ้นทุก 50 กิโลเมตร มีผลทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นกว่า 20% จึงได้นำแนวทางนี้กำหนดสถานการณ์ที่ 2 (Scenario 2, Sc2) โดยให้มีการสร้างโรงงานรีไซเคิลและกำจัดของเสียในประเทศไทย ตามเงื่อนไขคือ มีระบบสาธารณสุขปลอดภัยครบถ้วน คมนาคมขนส่งสะดวก อยู่ในศูนย์กลางจากทุกภูมิภาค [5], [11] และมีโรงงานที่อยู่ในกลุ่มโรงงานประเภท 106 (โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการนำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ใช้แล้วหรือของเสียมาผลิตเป็นวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ (Recycle) โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตทางอุตสาหกรรม) [33] ซึ่งพื้นที่เหมาะสมตามเงื่อนไขคือ นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร และให้ใช้เทคโนโลยีการรีไซเคิลระบบเดียวกันกับการกำจัดซากแพลงก์ตอนเซลล์แบบ Conv. [รูปที่ 3 (2)] ทำให้มีระยะทางขนส่งจากมหาวิทยาลัยพะเยาไปโรงงานรีไซเคิล 737 กิโลเมตร ผลการประเมิน Sc2 มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งในประเทศ 0.7081 kgCO<sub>2</sub>e/แพลง การรีไซเคิลในโรงงาน 8.0811 kgCO<sub>2</sub>e/แพลง ผลรวมเท่ากับ 8.7892 kgCO<sub>2</sub>e/แพลง (รูปที่ 4-Sc2)

แม้ว่าการกำจัดซากแพลงก์ตอนเซลล์ที่ดำเนินการภายในประเทศตาม Sc2 จะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งมากกว่า 66% ก็ตาม แต่ในกระบวนการรีไซเคิลมีการใช้ไฟฟ้าเป็นหลัก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือน



รูปที่ 3 กระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์



รูปที่ 4 ค่าก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์

กระจกของประเทศไทยเท่ากับ 0.5813 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh [30] ต่างจากของประเทศญี่ปุ่นที่มีค่าเท่ากับ 0.2067 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh [31] ส่งผลให้ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวมของ Sc2 เพิ่มขึ้นจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์แบบ Conv. 0.1522 kgCO<sub>2</sub>eq/แผง และ Sc1 2.4066 kgCO<sub>2</sub>eq/แผง หากนำวิธีการคัดแยกวัสดุตามหลักการกำจัดขยะก่อนขนส่งไปรีไซเคิล มากำหนดใช้ในสถานการณ์ที่ 3 (Scenario 3, Sc3)

[รูปที่ 3(3)] เพื่อหาแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยให้คัดแยกอะลูมิเนียมด้วยแรงงานคนและจำหน่ายที่ต้นทาง วัสดุที่เหลือส่งไปโรงงานรีไซเคิลในประเทศ พบว่าค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของ Sc3 รวมเท่ากับ 6.0445 kgCO<sub>2</sub>eq/แผง โดยค่า 0.4890 และ 5.5554 kgCO<sub>2</sub>eq/แผง มาจากการขนส่งในประเทศและการรีไซเคิลในโรงงาน (รูปที่ 4-Sc3) ผลจากการประเมิน Sc3 มีค่าก๊าซเรือนกระจก ลดลงจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์แบบ Conv. 2.5925 kgCO<sub>2</sub>eq/แผง เท่ากับ 30.02% แสดงให้เห็นว่าหลักการคัดแยกขยะมีส่วนช่วยในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ นอกจากนี้แนวทางที่สามารถนำมาใช้ได้เพิ่มเติมอีกคือ การใช้พลังงานทดแทนหรือพลังงานสะอาดมาผลิตไฟฟ้าเช่นเดียวกับยุโรป [28] ดังนั้นสถานการณ์ที่ 4 (Scenario 4, Sc4) [รูปที่ 3(4)] จึงกำหนดให้โรงงานรีไซเคิลใช้ไฟฟ้าจากระบบโซลาร์เซลล์เป็นหลัก ทำงานในเวลากลางวัน และใช้ไฟฟ้าจากสายส่งเพื่อเสริมไม่เกิน 10% ร่วมกับการคัดแยกอะลูมิเนียมเพื่อจำหน่ายตั้งแต่ต้นทางพบว่า ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมของ Sc4 เท่ากับ 4.5811 kgCO<sub>2</sub>eq/แผง

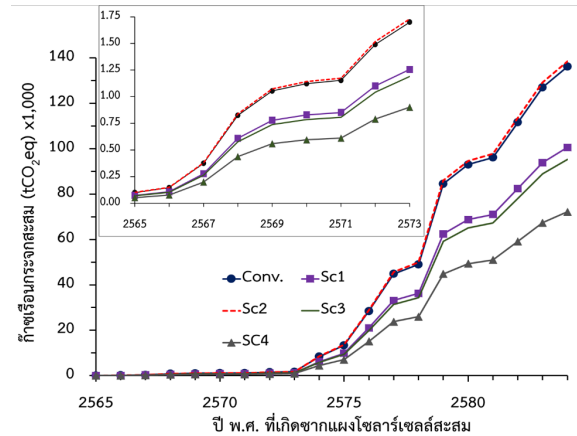
พุทธดี อุบลคุช และคณະ, “การประเมินและการหาแนวทางเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ภายหลังหมดอายุการใช้งานสำหรับประเทศไทย.”

เป็นค่าจากการขนส่ง  $0.4890 \text{ kgCO}_2\text{eq/แผง}$  และการรีไซเคิล  $4.0920 \text{ kgCO}_2\text{eq/แผง}$  (รูปที่ 4-Sc4) ผลจากการประเมิน Sc4 มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลงจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์แบบ Conv.  $4.0559 \text{ kgCO}_2\text{eq/แผง}$  เท่ากับ  $46.96\%$  เป็นผลมาจากการใช้ระบบโซลาร์เซลล์ผลิตไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานทดแทนหรือพลังงานสะอาดมีส่วนช่วยในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่นเดียวกันกับการใช้พลังงานลม [34] การใช้พลังงานชีวมวล [35]

โดยค่าการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ได้จากทุก Sc นี้ เป็นการแสดงค่าเพื่อให้เห็นแนวโน้มของข้อมูลการเกิดก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์แบบต่างๆ สำหรับเป็นแนวทางในการกำหนดนโยบาย คาดการณ์ และเตรียมการแก้ปัญหาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่กำลังจะเกิดขึ้นต่อไป

### 3.2 การคาดการณ์ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสะสมจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ใน 20 ปี

จากการที่ประเทศไทยเริ่มมีการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์เพื่อผลิตไฟฟ้าตั้งแต่ พ.ศ. 2545 ประกอบกับแผงโซลาร์เซลล์มีอายุการใช้งานเฉลี่ยเพียง 20 ปี [4], [24] ทำให้ พ.ศ. 2565 ประเทศไทย จะเริ่มมีแผงโซลาร์เซลล์ที่ต้องกำจัดประมาณ 11,560 แผง และหากมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแผงโซลาร์เซลล์ที่เป็นไปตามนโยบายของกระทรวงพลังงาน จะทำให้อีก 20 ปี ข้างหน้ามีแผงโซลาร์เซลล์ที่ต้องกำจัดมากกว่า 24 ล้านแผง [5] เพื่อคาดการณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแผงแบบ Conv. และ 4 สถานการณ์ (Sc1-Sc4) ที่จะเกิดขึ้นในช่วง 20 ปีนี้ (รูปที่ 5) โดยเริ่มตั้งแต่ พ.ศ. 2565-2584 ด้วยการนำค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกคูณจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ทั้งหมดอายุการใช้งานสะสม [36] พบว่า การกำจัดแบบ Conv. มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสะสม  $136,120.53 \text{ tCO}_2\text{eq}$  สำหรับ Sc1 (คัดแยกต้นทาง) มีค่า  $100,590.64 \text{ tCO}_2\text{eq}$ , Sc2 (สร้างโรงงานในประเทศ) มีค่า  $138,518.21 \text{ tCO}_2\text{eq}$ , Sc3 (คัดแยกต้นทางและส่งโรงงานรีไซเคิลในประเทศ) มีค่า  $95,261.33 \text{ tCO}_2\text{eq}$  และ Sc4 (คัดแยกต้นทางและโรงงานรีไซเคิลใช้



รูปที่ 5 ก๊าซเรือนกระจกสะสมจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ตั้งแต่ปี 2565-2584

ไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์) มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสะสม  $72,197.44 \text{ tCO}_2\text{eq}$

### 4. สรุป

ผลการประเมินค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์แบบ Conv. เป็นการส่งแผงโซลาร์เซลล์ทั้งหมดอายุการใช้งานไปกำจัดในต่างประเทศ มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการขนส่งและรีไซเคิลเท่ากับ  $8.6370 \text{ kgCO}_2\text{eq/แผง}$  สำหรับแนวทางที่เหมาะสม และปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่น้อยที่สุดสำหรับประเทศไทย คือ การตั้งโรงงานรีไซเคิลในประเทศ ร่วมกับการคัดแยกชิ้นส่วนและเลือกใช้พลังงานสะอาดในกระบวนการกำจัดซาก จะสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึง  $46.96\%$  เมื่อคาดการณ์ในช่วง 20 ปีข้างหน้า จะสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากถึง  $63,923 \text{ tCO}_2\text{eq}$

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เป็นการเสนอข้อมูลเพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเกิดก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์และวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเบื้องต้นเพียงด้านเดียวเท่านั้น แต่หากมีการวิเคราะห์เพื่อเลือกเทคโนโลยีรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพสูง ประหยัดพลังงาน ร่วมกับการใช้พลังงานทดแทนอื่นๆ และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติม จะทำให้เกิดแนวทางในการเตรียม





การแก้ปัญหาการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยและสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลงยิ่งขึ้น

##### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจาก The Coordinating Center for Thai Government Science and Technology Scholarship Students (CSTS), National Science and Technology Development Agency (NSTDA)

##### เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Sparrevik and S. Utstøl, "Assessing life cycle greenhouse gas emissions in the Norwegian defence sector for climate change mitigation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 248, 2020.
- [2] K. Chaivanich and S. Sedpho, "An evaluation method of greenhouse gas reduction by the installation of a photovoltaic cells system: Case study of smart grid network in the University of Phayao," *RMUTSB Academic Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 194–206, 2018 (in Thai).
- [3] J. Tao and S. Yu, "Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 141, pp.108–124, 2015.
- [4] S. Weckend, A. W. Wade, and G. Heath, "End-of-Life management solar photovoltaic panels," in *Proceedings International Renewable Energy Agency (IRENA) and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems (IEA-PVPS)*, 2016, pp. 11–15.
- [5] P. Rachdawong, S. Ratanathamphan, D. Banjerdpongchai, T. Boonpramote, and S. Sampattavanija, "Management of expired solar PV panels," Chulalongkorn University, Thailand, Final Rep., 2016 (in Thai).
- [6] A. T. David, D. Ian, and S. K. Williams, "Greenhouse gas emission factors recycling of source-segregated waste materials," *Resources Conservation and Recycling*, vol. 105, pp. 186–197, 2015.
- [7] A. Auer, "Photovoltaic module decommissioning and recycling in Europe and Japan: Current methodologies, norms and future trends," M.S. thesis, Department of Urban and Rural Development, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, 2015.
- [8] Solar Trade Platform and Directory of Solar Companies, (2018), PV Techno Cycle. Access on 30/03/2020. [Online]. Available: <https://pvtechno.info/reuse-panel-sales>
- [9] E. L. Latunussa Cynthia, A. Fulvio, A. B. Gian, and M. Lucia, "Life cycle assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 156, pp. 101–111, 2016.
- [10] K. Wambach, (2017), *Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module Recycling Processes in Europe*. [Online]. Available: <https://iea-pvps.org/key-topics/lci-of-current-european-pv-recycling-wambach-heath-2017-by-task-12/>
- [11] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, "The study focusing on spatial potential of PV panel waste management of Thailand," Penergy Co., Ltd., Thailand, Final Rep., 2019. (in Thai).
- [12] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, "Thailand alternative energy

- situation 2019,” Ministry of Energy, Thailand, Rep. No.17, January–December, 2019 (in Thai).
- [13] S. Sampattagul, “Life cycle impact assessment: LCIA,” in *Life Cycle Assessment of Products*. Chiang Mai: Chiang Mai University Publishing, Thailand, 2012, pp.76–115 (in Thai).
- [14] N. Sununta and S. Sampattagul, “Greenhouse gases evaluation of power generation technology from municipal waste by organic rankine cycle system,” *Journal of Innovative Technology Research*, vol. 1, no. 1, pp. 1–14, 2017 (in Thai).
- [15] P. Ubolsook, C. Chailuecha, and S. Sedpho, “The Study and Assessment of Greenhouse Gas Emissions from the Solar Panel Waste Management Process: Case Study at the University of Phayao”, *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 12-23, 2020 (in Thai).
- [16] Seaports: info marketplace, (2018), *Sea Rout and Distance*. [Online]. Available: <http://ports.com/sea-route>
- [17] H. Wen-Hsi, W. J. Shin, L. Wang, S. Wen-Cheng, and T. Meng, “Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules,” *Solar Energy*, vol. 144, pp. 22–31, 2017.
- [18] P. Dias, S. Javimczik, M. Benevit, H. Veit, and A. M. Bernardes, “Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules,” *Waste Management*, vol. 57, pp. 220–225, 2016.
- [19] K. Kemp and R. Almakhlouq, “Photovoltaic: Life cycle analysis and end of life management for materials reuse and waste recycling,” in *Proceedings Renewable Energy World International Conference*, 2016.
- [20] S. Kang, S. Yoo, J. Lee, B. Boo, and H. Ryu, “Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules,” *Renewable Energy*, vol. 47, pp. 152–159, 2012.
- [21] Y. Kim and J. Lee, “Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 98, pp. 317–322, 2012.
- [22] K. Sukmin, Y. Sungyeol, L. Jina, B. Bonghyun, and R. Hojin, “Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules,” *Renewable Energy*, vol. 47, pp. 152–159, 2012.
- [23] S. Daniela, M. Ornella, S. Stefania, T. Mario, and C. L. Maria, “Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular Economy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2934–2945, 2018.
- [24] K. Chaivanich, S. Sedpho and N. Yaiwong, “Analysis and development of energy efficiency of smart grid system,” *Thaksin Journal*, vol. 22, no. 2, pp. 59–66, 2019. (in Thai).
- [25] D. Maga, M. Hiebel, and N. Thonemann, “Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid,” *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 149, pp. 86–93, 2019.
- [26] G. A. Kristanto and W. Koven, “Estimating greenhouse gas emissions from municipal solid waste management in Depok, Indonesia,” *City and Environment Interactions*, vol. 4, 2019.
- [27] M. M. Lunardi, J. P. Alvarez-Gaitan, J. I. Bilbao, and R. Corkish, “Comparative life



- cycle assessment of end-of-life silicon solar photovoltaic modules,” *Apply Sciences*, vol. 8, pp. 1–15, 2018.
- [28] M. L. Parisi, S. Maranghi, R. Basosi, and A. Sinicropi, “Life cycle inventories datasets for future European electricity mix scenarios,” *Data in Brief*, vol. 30, 2020.
- [29] The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2020). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. [Online]. Available: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- [30] THAILAND Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization). (2020). *Emission Factor*. [Online]. Available: <https://www.tgo.or.th/>
- [31] H. Hondo, “Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case,” *Energy*, vol. 30, pp. 2042–2056, 2005.
- [32] S. Philippe and F. Rolf, “Life cycle assessment of current photovoltaic module recycling,” IEA International Energy Agency, National Renewable Energy Laboratory, USA, Rep. IEA-PVPS. T12-13, 2018.
- [33] Department of Primary Industries and Mines. (2019). *Recycle Technology for PV End of Life*. [Online]. Available: <https://www.energynewscenter.com>
- [34] R. Bhandari, B. Kumar, and F. Mayer, “Life cycle greenhouse gas emission from wind farms in reference to turbine sizes and capacity factors,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 227, 2020.
- [35] J. M. Cooper, G. Butler, and C. Leifert, “Life cycle analysis of greenhouse gas emissions from organic and conventional food production systems, with and without bio-energy options,” *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, vol. 58, pp. 185–192, 2011.
- [36] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, “Thailand PV status report 2016–2017,” Ministry of Energy, Thailand, 2017 (in Thai).