

การศึกษาและประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการกำจัดซาก

แผงโซลาร์เซลล์: กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยพะเยา

The Study and Assessment of Greenhouse Gas Emissions

from the Solar Panel Waste Management Process:

Case Study at the University of Phayao

พุทธิ อุบลสุข¹, ฉัตรแก้ว ชัยลือชา^{2*} และสุรัตน์ เศษโพธิ์³

Putthadee Ubolsook¹, Chatkaew Chailuecha^{2*} and Surat Sedpho³

^{1,2*,3}คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา 19 หมู่ 2 ตำบลแม่กา อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา 56000

โทร 08 0406 8074 E-mail: chatkaew.ch@up.ac.th

^{1,2*,3}School of Energy and Environment, University of Phayao

19 Moo 2 Tambon Maeka Amphur Muang Phayao 5600

วันที่รับบทความ 24 สิงหาคม 2563

Received: Aug. 18, 2020

วันที่รับแก้ไขบทความ 19 ธันวาคม 2563

Revised: Dec. 19, 2020

วันที่ตอบรับบทความ 28 ธันวาคม 2563

Accepted: Dec. 28, 2020

บทคัดย่อ

ประเทศไทยมีการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานสะอาดจากโซลาร์เซลล์จำนวนมาก แต่ปัญหาที่ตามมาคือ ซากแผงโซลาร์เซลล์เมื่อหมดอายุการใช้งาน ซึ่งการกำจัดซากเหล่านี้สร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะการปล่อยก๊าซเรือนกระจก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ที่หมดอายุการใช้งานของมหาวิทยาลัยพะเยา และประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 2 ขั้นตอน คือ 1) ขั้นตอนการขนส่งโดยส่งไปกำจัด ณ ประเทศญี่ปุ่น และ 2) ขั้นตอนการรีไซเคิลและกำจัดของเสีย ตามหลักการบริหารจัดการของเสีย อิเล็กทรอนิกส์ ของยุโรป (WEEE Directive: Waste Electrical and Electronic Equipment) ของแผงโซลาร์เซลล์ ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ จำนวน 1 แผง ขนาด 250 วัตต์ พบว่ามีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมเท่ากับ 8.6370 kgCO₂eq/module เป็นค่าจากการขนส่ง 2.1295 kgCO₂eq/module และการรีไซเคิล 6.5075 kgCO₂eq/module ซึ่งหากมีโรงงานรีไซเคิลในประเทศไทยจะสามารถลดค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งลงได้และแนวทางอื่น ๆ ที่สามารถทำได้คือ เลือกใช้เทคโนโลยีการรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพสูงใช้พลังงานต่ำ และสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนในการผลิตไฟฟ้าเพื่อมีส่วนช่วยในลดการสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: การปล่อยก๊าซเรือนกระจก, การกำจัดซาก, แผงโซลาร์เซลล์, ผลกระทบสิ่งแวดล้อม

Abstract

Thailand has promoted the generation of electricity using solar power renewable energy. However, the disposal of solar panels at the end of their life impacts on the environment, especially in terms of greenhouse gas emissions. This research focused on an evaluation of greenhouse gas release in the processes of solar panel waste disposal. This study conducted a scenario analysis of expired solar panels located at the

University of Phayao sent for disposal in Japan, and assessed the WEEE Directive (Waste Electrical and Electronic Equipment) in the recycling process. Two processes were evaluated: the transportation and recycling of 250-watt, polycrystalline silicon solar cells, based on a product life cycle assessment. The results found that the total greenhouse gas emission value was 8.6370 kgCO₂eq/ module- 2.1295 kgCO₂eq/ module from transportation and 6.5075 kgCO₂eq/ module from the recycling processes in Japan. Establishing a recycling plant in Thailand will diminish the greenhouse gas emissions from transportation. In addition, the use of renewable energy in electricity generation should be encouraged, as well as the selection of highly-efficient recycling technology to reduce the environmental impact.

Keywords: Greenhouse Gas Emission, Disposal, Solar cell, Environmental Impact

1. บทนำ

ประเทศไทยในปัจจุบันนี้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นทุกปี กระทรวงพลังงานจึงมีนโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ.2558 – 2579 กำหนดให้ภายใน 15 ปี นับจากนี้ต้องมีการผลิตไฟฟ้าด้วยแผงโซลาร์เซลล์มากกว่า 8,700 เมกะวัตต์ ทำให้มีการลงทุนผลิตไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์เพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่องทุกปี ซึ่งแผงโซลาร์เซลล์มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 20 - 25 ปี (Tao, J. & Yu, S., 2015; Weckend, S. et al., 2016) ถึงแม้พลังงานที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์นับเป็นพลังงานสะอาดไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างการผลิตไฟฟ้า แต่ภายหลังจากหมดอายุการใช้งานจะเกิดขยะที่มาจากซากแผงโซลาร์เซลล์ที่ต้องกำจัด โดยพบว่าปี พ.ศ.2565 ประเทศไทยจะเริ่มมีซากแผงโซลาร์เซลล์ที่ต้องกำจัด และท้ายที่สุดจะมีปริมาณมากถึง 24 ล้านแผง ในอีก 15 - 25 ปี (Rachdawong, P. et al., 2016) และหากไม่มีการเตรียมการบริหารจัดการหรือมาตรการในการกำจัดที่เหมาะสม ปัญหาที่จะเกิดขึ้นคือ ซากแผงโซลาร์เซลล์ปริมาณสูง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในวงกว้างมากขึ้น

สำหรับประเทศไทยขยะส่วนใหญ่จะถูกดำเนินการจัดการโดยใช้วิธีการฝังกลบเป็นหลัก (Sununta, N. & Sampattagul, S., 2017) ผลที่ตามมาคือ ก๊าซเรือนกระจกจากการฝังกลบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน (David, A. et al., 2015) ที่เป็นวิกฤติการณ์สิ่งแวดล้อมที่สำคัญ ทำให้ภาครัฐมุ่งเน้นการลดอัตราการสร้างปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพื่อบรรลุเป้าหมายตามแผนสนับสนุนในระดับประเทศ (Nationally Determined Contributions: NDCs) ที่แสดงถึงเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกกลางภายใต้สนธิสัญญาปารีส (Chaiyadecha, V., 2018) ซึ่งวิธีการกำจัดขยะที่สร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดคือ การรีไซเคิลหรือการนำกลับมาใช้ใหม่ (Lunardi, M. M. et al., 2018) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ แต่ถึงอย่างไรในการรีไซเคิลยังคงมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้พลังงาน และปัจจุบันประเทศไทยนั้นยังไม่มีโรงงานรีไซเคิลแผงโซลาร์เซลล์ ดังนั้นวิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้คือ การส่งแผงโซลาร์เซลล์ไปกำจัดยังประเทศที่มีการตั้งโรงงานรีไซเคิลแล้ว โดยกลุ่มประเทศแถบเอเชียที่มีความตื่นตัวและพร้อมรับรีไซเคิลแผงโซลาร์เซลล์คือ ประเทศจีน ญี่ปุ่น อินเดีย

และเกาหลีใต้ และขณะนี้ประเทศไทยญี่ปุ่นได้ทำการวิจัยและเผยแพร่แนวทางการจัดการแผงโซลาร์เซลล์ (Auer, A., 2015) โดยใช้หลักการบริหารจัดการของยุโรป (WEEE Directive: Waste Electrical and Electronic Equipment) (Dias, P. et al., 2016) และมีบริษัท PV Techno Cycle Co., Ltd. (Solar Trade Platform and Directory of Solar Companies, 2019) ที่รับรีไซเคิลแผงตั้งแต่ปี พ.ศ.2562 เป็นต้นมา

ด้วยเหตุนี้ มหาวิทยาลัยพะเยาจึงได้เริ่มมีการวางแผนสำหรับการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งบนหลังคาขนาด 500 กิโลวัตต์ ภายหลังจากหมดอายุการใช้งานเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่กำลังจะเกิดตามมา คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในกระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ที่สามารถดำเนินการได้ตามสถานการณ์ปัจจุบันคือการส่งไปกำจัดยังต่างประเทศ เพื่อให้ทราบถึงปริมาณของก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการที่สร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องได้ตระหนักพิจารณาวางแผนล่วงหน้าสำหรับการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ที่กำลังเพิ่มมากขึ้นในประเทศไทยต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและประเมินก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ภายหลังจากหมดอายุการใช้งาน กรณีศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา

3. วิธีดำเนินการวิจัย

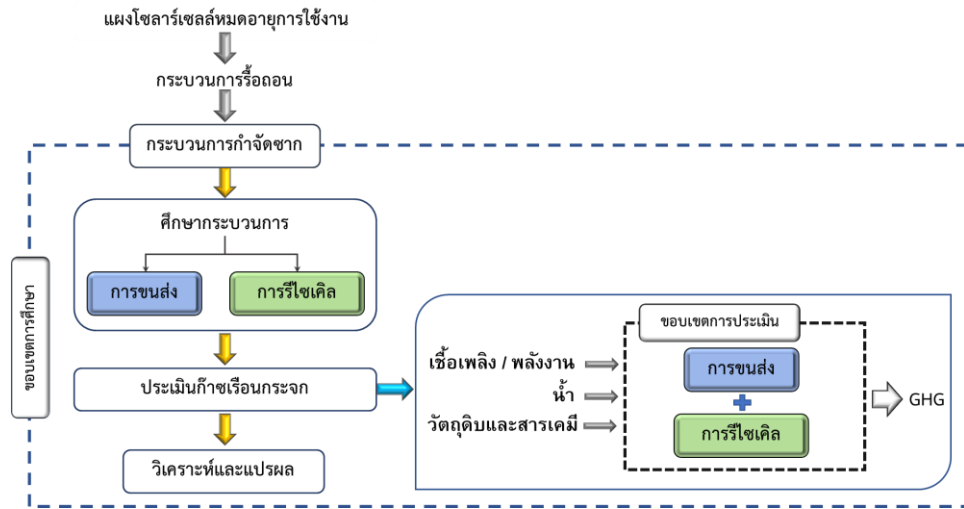
3.1 กำหนดขอบเขตการศึกษาและประเมินก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ภายหลังจากหมดอายุการใช้งานของมหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา เริ่มต้นภายหลังจากกระบวนการรื้อถอน (ภาพที่ 1) ประกอบด้วย

1) ศึกษากระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ที่หมดอายุการใช้งาน

2) ประเมินก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ กำหนดขอบเขตของการประเมินแบบ Cradle to gate มีหน่วยการศึกษา (Functional Unit) คือ แผงโซลาร์เซลล์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline Silicon Solar Cells) จำนวน 1 แผง (Module) ขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า 250 วัตต์ น้ำหนักแผง 18.2 กิโลกรัม ใน 2 ขั้นตอน คือ

(2.1) ประเมินขั้นตอนการขนส่ง กำหนดให้ขนส่งจากมหาวิทยาลัยพะเยา ไปกำจัดในโรงงาน PV Techno Cycle Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น

(2.2) ประเมินขั้นตอนการรีไซเคิล ตามหลักการบริหารจัดการของยุโรป (WEEE Directive: Waste Electrical and Electronic Equipment) (Dias, P. et al., 2016)



ภาพที่ 1 ขอบเขตการศึกษาและประเมินก๊าซเรือนกระจก (ในกรอบเส้นประ)

3.2 การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การวิเคราะห์โดยการคำนวณตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ดังสมการ (1) (Sampattagul, S., 2012)

$$GHG\ emission = EL_i \times EF_i \tag{1}$$

โดยที่ GHG emission คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรม (kgCO₂eq) EL_i คือ ข้อมูลกิจกรรมที่ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Unit) และ EF_i (Emission Factor) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO₂eq/Unit) และ i คือ กิจกรรมที่ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเก็บข้อมูลแยกตามช่วงวัฏจักรชีวิตของระบบ จากฐานข้อมูล Ecoinvent โปรแกรมสำเร็จรูป Simapro 9.0 และคู่มือของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยเรื่องการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate: IPCC) โดยผลที่ได้จากการศึกษาจะรายงานในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่ากับต่อ 1 แผง (kgCO₂eq/module)

4. ผลการวิจัย

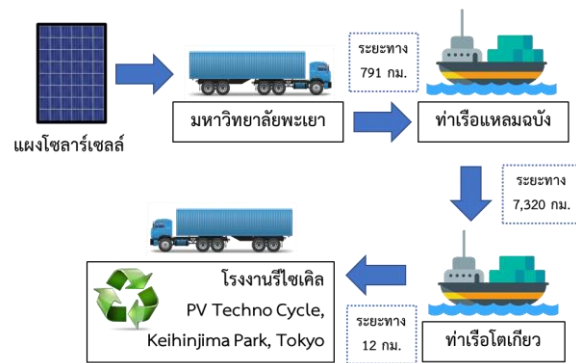
4.1 ผลการศึกษากระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ด้วยการส่งไปกำจัดยังต่างประเทศ ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการขนส่งและขั้นตอนการรีไซเคิลและกำจัดของเสีย มีผลการศึกษาดังนี้

1) ขั้นตอนการขนส่งแผงโซลาร์เซลล์ไปโรงงานรีไซเคิลในต่างประเทศ เส้นทางขนส่งมี 3 ช่วง (ภาพที่ 2) คือ การขนส่งภายในประเทศ การขนส่งด้วยเรือบรรทุกระหว่างประเทศ และการขนส่งในต่างประเทศ มีรายละเอียดแต่ละช่วงดังนี้

(1.1) การขนส่งภายในประเทศ เริ่มต้นจากจุดรีดถอนคือ มหาวิทยาลัยพะเยา สามารถขนส่งทางถนนด้วยรถบรรทุก 10 ล้อ ไปยังท่าเรือแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี ระยะทาง 791 กิโลเมตร

(1.2) การขนส่งด้วยเรือบรรทุกระหว่างประเทศ เป็นการขนส่งไปยังท่าเรือโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ระยะทาง 7,320 กิโลเมตร (Sea route and distance, 2020)

(1.3) การขนส่งในต่างประเทศ เป็นการขนส่งจากท่าเรือโตเกียวไปยัง PV Techno Cycle Co., Ltd., Keihinjima Park, Tokyo ด้วยรถบรรทุก 10 ล้อ ด้วยระยะทาง 12 กิโลเมตร



ภาพที่ 2 เส้นทางการขนส่งแผงโซลาร์เซลล์เพื่อกำจัดซาก

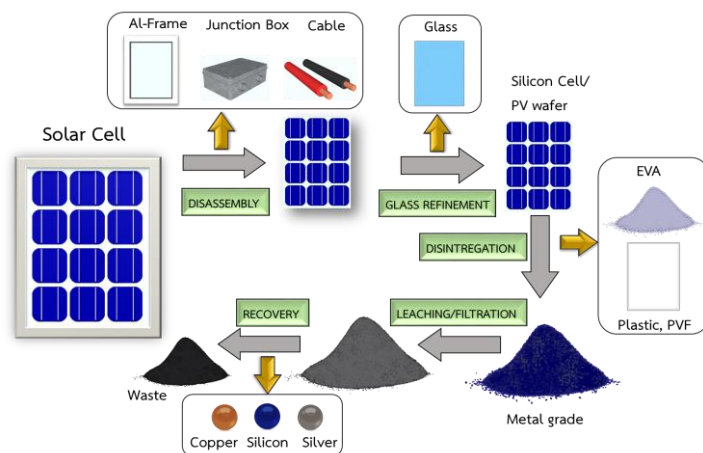
2) ขั้นตอนการรีไซเคิลและกำจัดของเสีย แบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน คือ องค์ประกอบแผงโซลาร์เซลล์ ประเภทซิลิกอน ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ และขั้นตอนการรีไซเคิลแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อนำข้อมูลไปใช้สำหรับการประเมินก๊าซเรือนกระจก มีผลการศึกษาดังนี้

(2.1) องค์ประกอบแผงโซลาร์เซลล์ประเภทซิลิกอน ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ คือ กรอบอลูมิเนียม กระจกใส ยางอีวีเอ เซลล์ซิลิกอน แผ่นพลาสติก และกล่องควบคุม สำหรับเซลล์ซิลิกอน ประกอบไปด้วยฟิล์มเคลือบกันสะท้อน ขั้วไฟฟ้า (โลหะเงิน ทองแดง) ซิลิกอน และฟิล์มเคลือบอลูมิเนียม มีน้ำหนักประกอบแผงแสดงดังตารางที่ 1 (Wambach, K., 2017; Cynthia, E.L. et al., 2016; Shahariar, M.C. et al., 2020; Philippe, S. & Rolf, F., 2018)

ตารางที่ 1 น้ำหนักวัสดุของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง (ขนาด 250 วัตต์) (Wambach, K., 2017; Cynthia, E.L. et al., 2016)

วัสดุ	น้ำหนักวัสดุ (กิโลกรัม)	ปริมาณสัมพันธ์ (%)	รายละเอียด
กระจก	12.740	70.000	กระจกนิรภัย
กรอบอลูมิเนียม	3.270	18.000	-
โพลีเมอร์	0.920	5.100	เอทิลีนไวนิลแอสีเตด, EVA
เซลล์ซิลิกอน	0.660	3.650	เซลล์ 36 เซลล์ ต่ออนุกรม ชนิดโพลีคริสตัลไลน์
แผ่นพลาสติก	0.270	1.500	โพลีไวนิลฟลูออไรด์ (PVF)
สายเคเบิล	0.180	1.000	อยู่ภายในกล่องควบคุมประจุไฟฟ้า
อลูมิเนียม	0.090	0.530	ส่วนประกอบวงจรไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์
ทองแดง	0.020	0.110	ส่วนประกอบวงจรไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์
เงิน	0.009	0.055	ส่วนประกอบวงจรไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์
อื่น ๆ	0.009	0.055	-
Total	18.200	100.00	-

(2.2) ขั้นตอนการรีไซเคิลแผงโซลาร์เซลล์ เริ่มมีการศึกษาและวิจัยตั้งแต่ปี ค.ศ.1990 (Weckend, S. et al., 2016; Corcelli, F. et al., 2017) ปัจจุบัน เทคโนโลยีการรีไซเคิลนั้นมีหลากหลายขั้นตอนและหลากหลายวิธี (Kang, S. et al., 2012; Granata, G., 2014; Kemp, K. & Almakhloq, R. 2016; Cynthia, E.L. et al., 2016) มีการพัฒนาต่อเนื่องโดยการใช้เทคโนโลยีผสมผสานตามหลักทางกลศาสตร์ เคมี และฟิสิกส์ (Tammaro, M. et al, 2015; Lunardi M. M. et al., 2018; Komoto, K. & Jin-Seok, L., 2018; Pagnanelli, F. et al., 2017; Corcelli, F., 2017) จึงนำหลักการบริหารจัดการของยุโรปที่เรียกว่า WEEE Directive (Waste Electrical and Electronic Equipment) (Dias, P. et al., 2016) มาใช้ในการประเมินการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ โดยสามารถจัดกลุ่มขั้นตอนการรีไซเคิลได้ 5 ขั้นตอน (ภาพที่ 3) ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 คือ การถอดแยกวัสดุ (Disassembly) (Wen-His, H. et al., 2017) คือการถอดกรอบอลูมิเนียม กล่องควบคุม และสายเคเบิล ซึ่งกรอบอลูมิเนียมสามารถนำกลับมาใช้หรือนำไปเป็นวัตถุดิบตั้งต้นใหม่ (Dias, P. et al., 2016) กล่องควบคุมและสายเคเบิล จะนำเข้าสู่กระบวนการเผา เพื่อแยกโลหะและนำกลับไปใช้ใหม่ (Kemp, K. & Almakhloq, R., 2016) ขั้นตอนที่ 2 คือ การแบ่งละเอียด (Glass Refinement) ใช้ความร้อนแยกชิ้นกระจกออกจากเซลล์ซิลิกอน ซึ่งกระจกสามารถนำไปใช้หรือรีไซเคิลได้ (Kang, S. et al., 2012) ขั้นตอนที่ 3 คือ การสลายและแยกส่วน (Disintegration) เป็นขั้นตอนการละลายอีวีเอ (Ethylene Vinyl Acetate: EVA) ซึ่งเป็นยางทำหน้าที่ยึดระหว่างเซลล์ซิลิกอน กับแผ่นพลาสติกแข็ง (Polyvinyl Fluoride: PVF) ที่อยู่ด้านหลังแผงโซลาร์เซลล์ ลักษณะสีขาว แข็ง (Kim, Y. & Lee, J., 2012) เพื่อแยกเซลล์ซิลิกอนออกจากแผ่นพลาสติกแข็ง หลังจากนั้นจะนำยางอีวีเอและแผ่นพลาสติกแข็งไปเผา เพื่อให้ได้ค่าพลังงานย้อนคืนกลับเข้ามาใช้ในกระบวนการ (Sukmin, K. et al., 2012) สำหรับเซลล์ซิลิกอนจะนำไปบดย่อยเพื่อส่งเข้าสู่ ขั้นตอนที่ 4 คือ การเผาและละลายด้วยกรดไนตริก (Leaching / Filtration) (Cynthia, E.L. et al., 2016) เป็นการใช้ไฟฟ้าในกระบวนการให้ความร้อนกับเซลล์ซิลิกอน ขั้นตอนที่ 5 คือ การนำกลับ (Recovery) ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าแยกโลหะซิลิกอน เงินและทองแดง สำหรับวัสดุและสารละลายที่เหลือจะถูกทำให้มีสถานะเป็นกลางและส่งกำจัดด้วยการฝังกลบต่อไป (Daniela, S. et al., 2018)

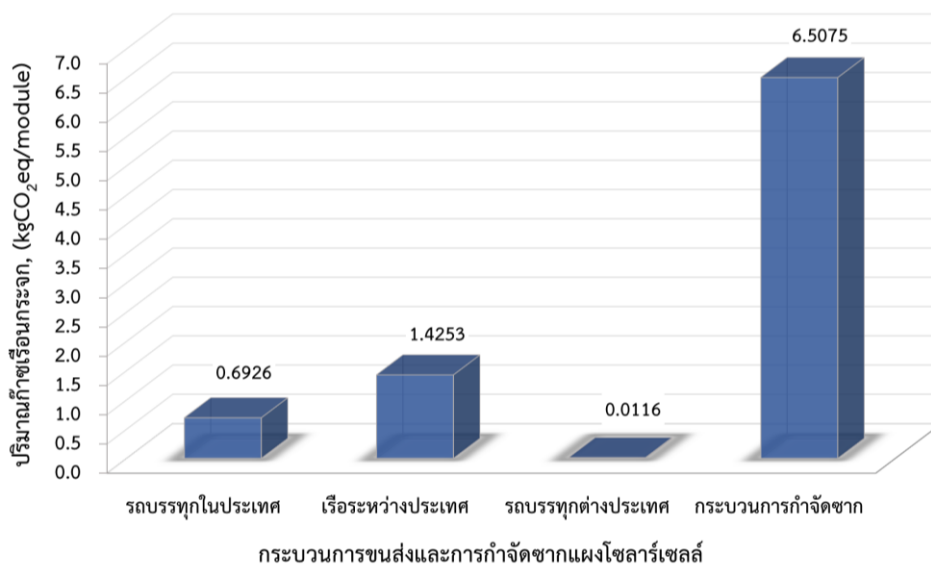


ภาพที่ 3 กระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ (Cynthia, E.L. et al., 2016)

4.2 ผลการประเมินก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ภายหลังหมดอายุการใช้งานของ มหาวิทยาลัยพะเยา เริ่มต้นประเมินภายหลังการรื้อถอนจาก 2 ส่วน คือ ขั้นตอนการขนส่ง และขั้นตอนการรีไซเคิลและกำจัดของเสีย ตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต และค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามตารางที่ 2 มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก รวมเท่ากับ 8.6370 kgCO₂eq/module เป็นผลมาจากการขนส่ง 2.1295 kgCO₂eq/module และการรีไซเคิล 6.5075 kgCO₂eq/module

1) ผลการประเมินก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งแผงโซลาร์เซลล์ที่หมดอายุการใช้งาน (ภาพที่ 4) เป็นค่าจากการขนส่งภายในประเทศ การขนส่งด้วยเรือบรรทุกระหว่างประเทศและการขนส่ง ด้วยรถบรรทุกในต่างประเทศ มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.6926, 1.4253 และ 0.0116 kgCO₂eq/module ตามลำดับ

2) ผลการประเมินก๊าซเรือนกระจกจากการรีไซเคิลแผงโซลาร์เซลล์และการกำจัด ของเสียที่เกิดขึ้นในโรงงานรีไซเคิล ประเทศญี่ปุ่น (ภาพที่ 4) เป็นค่าจาก ขั้นตอนการถอดแยกวัสดุ 1.9814 kgCO₂eq/module ซึ่งใช้น้ำมันและไฟฟ้าในการขนย้ายวัสดุที่มีน้ำหนักมาก การแยกชิ้นส่วน และการกำจัดกล่องควบคุมและสายเคเบิล ขั้นตอนการแบ่งละเอียด 0.7188 kgCO₂eq/module ใช้ไฟฟ้าในการให้ความร้อนเพื่อแยกกระจกและรีไซเคิลกระจก ขั้นตอนการสลายและแยกส่วน 2.2529 kgCO₂eq/module ใช้ไฟฟ้าในการแยกยางอีวีเอและแผ่นพลาสติกเพื่อนำไปเผาและบดย่อย เซลล์ซิลิกอน ขั้นตอนการเผาและละลายด้วยกรดไนตริก 0.3548 kgCO₂eq/module มีการใช้ไฟฟ้า ในกระบวนการเผา และขั้นตอนการนำกลับ 1.1997 kgCO₂eq/module ใช้ไฟฟ้าเพื่อทำให้โลหะ ซิลิกอน ทองแดง และเงิน ตกตะกอน (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 4 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการขนส่งและกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์

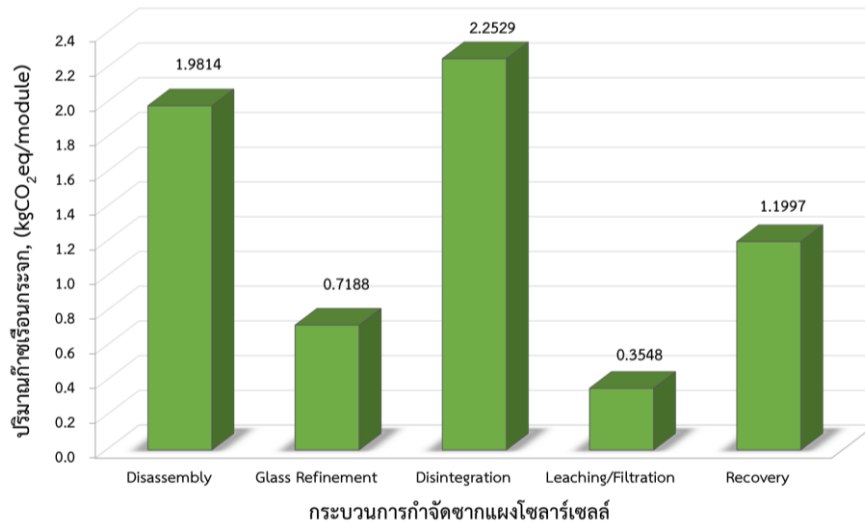
ตารางที่ 2 ค่าปริมาณและแหล่งข้อมูลอ้างอิงสำหรับอ้างอิงการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรือนกระจก

ขั้นตอน	รายละเอียด	ข้อมูล	ปริมาณ	Unit	แหล่งข้อมูลอ้างอิง
การขนส่ง	ภายในประเทศ	รถบรรทุก 10 ล้อ	791	tkm	Thai National LCI Database/MTEC (with TGO Electricity 2014)
	ต่างประเทศ	(น้ำมันดีเซล)	12		
	ระหว่างประเทศ	เรือบรรทุก	7,320	tkm	
(1) การถอดแยกวัสดุ ¹	อลูมิเนียม ก่อถ่วง	น้ำมันดีเซล	0.02	kg	Thai National LCI Database/MTEC
(2) การแบ่งละเอียด ¹	ควมคุม, เคเบิล	ไฟฟ้า	0.1	MJ	Electricity medium voltage at grid/ JP ³
	กระจก	ไฟฟ้า	0.075	MJ	Electricity medium voltage at grid/ JP
(3) การสลายและแยกส่วน ²	ละลาย EVA	ไฟฟ้า	0.7	MJ	Electricity medium voltage at grid/ JP
	เผา PVF	ความร้อน	0.15	MJ	Heat natural gas at industrial furnace more than 100 kW, IPCC GWP 100a ³
(4) การเผาและละลายด้วยไนตริก ¹	ละลายไนตริก	ไนตริก	0.14	kg	Nitric acid, in water (60% - HNO ₃) ³
		ความร้อน	0.015	MJ	Heat natural gas at industrial furnace more than 100 kW, IPCC GWP 100a
(5) การนำกลับ ¹	โลหะ (Si, Ag Cu) ปรับสภาพ สภาวะเป็นกลาง และส่งกำจัด	ไฟฟ้า	1.33	kWh	Electricity medium voltage at grid/ JP
		การฝังกลบ	1.11	kg	Disposal, limestone residue, 5% water, to inert material landfill ³
		ตะกอน การฝังกลบของเสียอันตราย	0.19	kg	Disposal, sludge, pig iron production, to residual material landfill ³

หมายเหตุ ¹ อ้างอิงข้อมูลจาก Cynthia, E.L. et al. (2016) และ Dias, P. et al. (2016)

² อ้างอิงข้อมูลจาก Wen-His, H. et al. (2017)

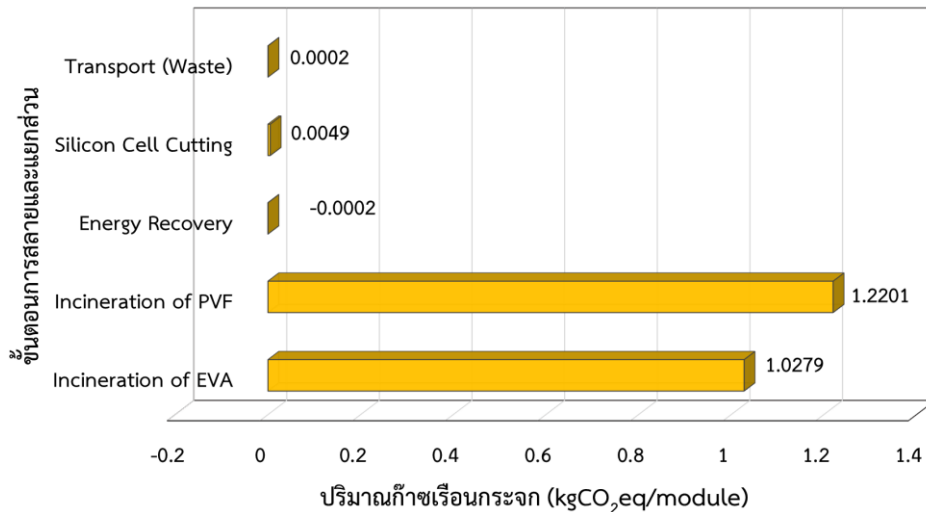
³ อ้างอิงข้อมูลจาก SimaPro 9.0



ภาพที่ 5 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกขั้นตอนการรีไซเคิลแผงโซลาร์เซลล์

(2.1) ก๊าซเรือนกระจกขั้นตอนการสลายและแยกส่วน มีค่าสูงที่สุดจากขั้นตอนทั้งหมด จึงวิเคราะห์ขั้นตอนนี้เพิ่มเติม พบว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมาจาก (ภาพที่ 6) การแยกและเผาอีวีเอ (Incineration of EVA) 1.0279 kgCO₂eq/module การแยกและเผาแผ่นพลาสติก (Incineration of PVF) 1.2201 kgCO₂eq/module การตัดและบดย่อยเซลล์ซิลิกอน (Silicon Cell Cutting) 0.0049 kgCO₂eq/module การขนส่งขยะไปกำจัด (Transport-waste) 0.0002 kgCO₂eq

/module และค่าพลังงานคืนกลับ (Energy Recovery) $-0.0002 \text{ kgCO}_2\text{eq/module}$ ซึ่งมาจากการนำอิวีเอและแผ่นพลาสติกบางส่วนมาเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนคืนกลับ ทำให้เห็นว่าขั้นตอนนี้ประกอบไปด้วยหลายวิธีการในการกำจัดของเสียใช้ไฟฟ้าในปริมาณมาก



ภาพที่ 6 ก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการสลายและแยกส่วน

การคาดการณ์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ด้วยการส่งไปกำจัดต่างประเทศของมหาวิทยาลัยพะเยา เมื่อหมดอายุการใช้งานที่กำลังการผลิต 500 กิโลวัตต์ มีแผงจำนวน 2,000 แผง จะมีค่า $17,274 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ สำหรับประเทศไทยที่อนาคตจะมีแผงโซลาร์เซลล์ที่ต้องเตรียมการกำจัดถึง 24 ล้านแผง (Rachdawong, P. et al., 2016) หากส่งไปกำจัดต่างประเทศ จะมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากถึง $207 \times 10^6 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ แต่หากมีความเป็นไปได้ในการที่จะลดระยะทางในการขนส่งด้วยการรีไซเคิลในประเทศไทย นั้นหมายถึงมีการตั้งโรงงานรีไซเคิลในประเทศ จะทำให้มีโอกาที่จะสามารถลดค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 16.7 จากขั้นตอนการขนส่ง

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 การศึกษาและประเมินก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ ภายหลังจากหมดอายุการใช้งานของมหาวิทยาลัยพะเยา สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การศึกษากระบวนการกำจัดซากแผงประกอบไปด้วยการศึกษา 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการขนส่ง แบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ขนส่งภายในประเทศ ขนส่งระหว่างประเทศ และขนส่งในต่างประเทศ และขั้นตอนการรีไซเคิลและการกำจัดของเสีย แบ่งเป็น 5 ขั้นตอน คือ การถอดแยกวัสดุ การแบ่งละเอียด การสลายและแยกส่วน การเผาและละลายด้วยไนตริก และการนำกลับ โดยจะมีวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ คือ อลูมิเนียม กระจก ซิลิกอน เงิน และทองแดง

2) การประเมินก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในกระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ จาก 2 ส่วน คือ มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 8.6370 kgCO₂eq/module ซึ่งเป็นค่าที่มาจากขั้นตอนการขนส่งร้อยละ 25 และอีกร้อยละ 75 จากขั้นตอนการรีไซเคิลและกำจัดของเสีย

5.2 จากการศึกษากระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ในครั้งนี้เป็นรูปแบบที่เหมือนกันกับ Philippe, S. และ Rolf, F. (2018) ที่ได้ประเมินวัฏจักรชีวิตของการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ ขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า 3 กิโลวัตต์สูงสุด มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเทียบได้เท่ากับ 2.2834 kgCO₂eq/module และ Cynthia, E.L. et al. (2016) ที่ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ รวมน้ำหนักแผง 1,000 กิโลกรัม มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 6.734 kgCO₂eq/module ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลการประเมินในงานวิจัยนี้ เนื่องจากกระบวนการรีไซเคิลจะใช้ไฟฟ้าเป็นหลักและค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของไฟฟ้าในยุโรปมีค่าที่ต่ำกว่าประเทศญี่ปุ่น (SimaPro 9.0) จึงส่งผลให้ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแตกต่างกัน นอกจากนี้ระยะทางในการขนส่งเป็นเพียงการขนส่งภายในประเทศเท่านั้น

การศึกษาและประเมินก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อร่วมเป็นส่วนหนึ่งในการบริการจัดการกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ที่กำลังจะเกิดขึ้นในมหาวิทยาลัยพะเยา พบว่าการวางแผนกำจัดซากแผงโซลาร์เซลล์ ตามแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก คือ การลดระยะทางขนส่ง นั้นหมายถึงควรมีการสร้างโรงงานรีไซเคิลในประเทศไทย นอกจากนี้แนวทางที่จะสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก คือ การเลือกใช้เทคโนโลยีการรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้พลังงานต่ำ และสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งคาดการณ์ว่าจะมีส่วนทำให้ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลง และเป็นการสนับสนุนการบรรลุเป้าหมายตามเจตจำนงลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยร้อยละ 20 - 25 ในปี 2573 ซึ่งประโยชน์สูงสุดต่อการบริหารทรัพยากรภายในประเทศตามแนวทางการส่งเสริมการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในการพัฒนาอย่างยั่งยืนต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- Auer, A. (2015). **Photovoltaic Module Decommissioning and Recycling in Europe and Japan: Current Methodologies, Norms and Future Trends**. Master's Thesis, Department of Urban and Rural Development, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences.
- Chaiyadecha, V. (2018). Legal Measures on the Reduction of Greenhouse Gas Emission from the Land Transportation. **Graduate Law Journal**, 11(2), April-June 2018. (in Thai)
- Corcelli, F., Ripa M.B. and Ulgiati, S. (2017). End-of-life treatment of crystalline silicon photovoltaic panels An energy-based case study. **Journal of Cleaner Production**, 161, 1129-1142.

- Cynthia, E.L., Fulvio, A., Gian, A.B. and Lucia, M. (2016). Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 156, 101-111.
- Daniela, S., Ornella, M., Stefania, S., Mario, T. and Maria, C.L. (2018). Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular Economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 82, 2934–2945.
- David A.T., Ian, D. and Williams, S.K. (2015). Greenhouse gas emission factors recycling of source-segregated waste materials. **Resources Conservation and Recycling**, 105, 186-197.
- Dias, P., Javimczik, S., Benevit, M., Veit, H. and Bernardes, A.M. (2016). Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules. **Waste Management**, 57, 220–225.
- Granata, G., et al. (2014). Recycling of photovoltaic panels by physical operations. **Sol. Energy Mater. Sol. Cells**, 123, 239–248.
- Kang, S., Yoo, S., Lee, J., Boo, B. and Ryu, H. (2012). Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. **Renewable Energy**, 47, 152–159.
- Komoto, K. and Jin-Seok, L. (2018). **End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies**. Japan: New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).
- Kemp, K. and Almakhloq, R. (2016). Photovoltaic: Life Cycle Analysis and End of Life Management for Materials Reuse and Waste Recycling. **Conference 2016: Renewable Energy World International**, University of South Florida, USA.
- Kim, Y. and Lee, J. (2012). Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 98, 317–322.
- Lunardi M. M., Alvarez-Gaitan, J. P., Bilbao, J. I., and Corkish, R. (2018). Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules. **Apply Sciences**, 8, 1-15.
- Pagnanelli, F., et al. (2017). Physical and chemical treatment of end of life panels: An integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies. **Waste Management**, 59, 422-431.
- Philippe, S. and Rolf, F. (2018). **Life Cycle Assessment of current photovoltaic module recycling**. USA: IEA International Energy Agency, National Renewable Energy Laboratory.

- Rachdawong, P., et al. (2016). **Management of expired solar PV panels**. Bangkok: Office for Research and Development, Chulalongkorn University. (in Thai).
- Sampattagul, S. (2012). **Life Cycle Assessment of Products**. Chiang Mai: Faculty of Engineering, Chiang Mai University Publishing. (in Thai)
- Seaports: info, marketplace. (2018). **Sea rout and distance**. [online], Available: [http:// ports.com/sea-route/](http://ports.com/sea-route/). Access on February 1, 2020.
- Shahariar, M.C., et al. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. **Energy Strategy Reviews**, 27, 100430.
- Solar Trade Platform and Directory of Solar Companies. (2018). **PV Techno Cycle**, [online], Available: <https://pvtechno.info/reuse-panel-sales>. Access on March 30, 2020.
- Sukmin, K., et al. (2012). Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. **Renewable Energy**, 47, 152-159.
- Sununta, N. and Sampattagul, S. (2017). Greenhouse Gases Evaluation of Power Generation Technology from Municipal Waste by Organic Rankine Cycle System. **Journal of Innovative Technology Research**, 1(1), 1-14. (in Thai)
- Tamaro, M., Rimauro, J., Fiandra, V., and Salluzzo, A. (2015). Thermal treatment of waste photovoltaic module for recovery and recycling: Experimental assessment of the presence of metals in the gas emissions and in the ashes. **Renewable Energy**, 81, 103-112.
- Tao, J. and Yu, S. (2015). Review on Feasible Recycling Pathways and Technologies of Solar Photovoltaic Modules. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 141, 108-124.
- Wambach, K. (2017). **Life Cycle Inventory of current photovoltaic module recycling processes in Europe**. USA: The United States Department of Energy and Electric Power Research Institute.
- Weckend, S., Wade, A.W. and Heath, G. (2016). **End-of-Life management solar photovoltaic panels**. USA: International Renewable Energy Agency (IRENA) and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems.
- Wen-His, H., et al. (2017). Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules. **Solar Energy**, 144, 22–31.