

วิธีการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่
เหมาะสมสำหรับประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Optimal management methods for waste crystalline silicon solar PV panels from
solar farm for Thailand



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

a

| | |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | วิธีการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึก ซิลิกอนจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมสำหรับ ประเทศไทย |
| โดย | น.ส.อิงฉัตร สุภาพยาม |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตระการ ประภัสพงษา)

อิงฉัตร สุภาพยาม : วิธีการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนจาก
โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย. (Optimal
management methods for waste crystalline silicon solar PV panels from
solar farm for Thailand) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์

นับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 ประเทศไทยเริ่มมีการลงทุนผลิตไฟฟ้าจากแผงพลังงาน
แสงอาทิตย์ และมีการติดตั้งใช้งานเพิ่มขึ้นต่อเนื่องโดยเฉพาะแผงในกลุ่มผลึกซิลิกอน ในอนาคต
ประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเผชิญกับปัญหาจากของเสียแผงในปริมาณมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมี
วัตถุประสงค์เพื่อการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผง และประเมินแนวทางการจัดการของเสียแผง
ชนิดผลึกซิลิกอน ผลการดำเนินงานพบว่าปริมาณของเสียแผงสะสมที่จะเกิดขึ้น ในปี พ.ศ. 2582
จากทั้ง 2 มุมมอง (1. แผงหมดอายุการใช้งานเมื่อครบ 20 ปี 2. แผงที่ชำรุดรวมกับแผงหมดอายุ
การใช้งานเมื่อครบ 20 ปี) มีปริมาณอยู่ในช่วง 237,394 - 322,856 ตัน ซึ่งเป็นกระจุ้มากเกินครึ่ง
ของปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นสะสมอยู่ในช่วง 163,921 - 222,932 ตัน สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ (วัสดุ
ห่อหุ้ม แผ่นปิดด้านหลัง และซิลิโคน) มีปริมาณรวมกันอยู่ในช่วง 31,384 - 42,682 ตัน และจาก
การประเมินแนวทางการจัดการทั้ง 3 (1.แนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน 2.แนวทางการบดหยาบ 3.แนว
ทางการอบแยก) พบว่าทุกแนวทางมีรายได้มากกว่าต้นทุนการจัดการเบื้องต้น แสดงให้เห็นถึงความ
เป็นไปได้ของระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน และในแนวทางการอบแยกที่มีการใช้ความร้อนจะทำให้เกิด
การสลายตัวของวัสดุพอลิเมอร์ ในรูปค่าความร้อนของเชื้อเพลิง โดยวัสดุห่อหุ้มมีค่าความร้อนมาก
ที่สุดอยู่ในช่วง 38.46 - 40.54 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (มีค่าใกล้เคียงกับไบโอดีเซล 40.2 เมกะจูลต่อ
กิโลกรัม) มีโอกาสที่จะนำเอาพลังงานที่เกิดขึ้นกลับคืนมาใช้ในกระบวนการ เพื่อช่วยลดการใช้
เชื้อเพลิง และจากการนำกลับของวัสดุในปริมาณที่มากที่สุด จะช่วยลดเขยผลกระทบทาง
สิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น ถือเป็นเครดิตที่เกิดขึ้นจากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170496921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Photovoltaic waste Forecasting Management Thailand

Engchart Supapayam : Optimal management methods for waste crystalline silicon solar PV panels from solar farm for Thailand . Advisor: Assoc. Prof. PICHAYA RACHDAWONG, Ph.D.

Since 2002, Thailand has started investing in the production of electricity from solar panels. And the installation has been increasing continuously, especially crystalline silicon solar panels. In the future, Thailand is likely to face the problems from large panel waste. The purpose of this study is to forecast the amount of panel waste and assess crystalline silicon panel waste management. The results showed that the cumulative amount of panel waste that will occur in the year 2039 from both perspectives (1. end-of-life panels at 20 years and 2. damaged panels combined with end-of-life panels at 20 years) in the range of 237,394 - 322,856 tons, with the highest volume of glass in range of 163,921 – 222,932 tons and the total volume of polymer materials (EVA, backsheet and silicone) are in the range of 31,384 – 42,6682 tons. And the result from the management methods found that the income from all methods is more than management costs. And in the thermal treatment method where heat is applied, the decomposition of the polymer material will occur in terms of heating value. EVA has the highest heating value in the range of 38.46 – 40.54 MJ/kg (Comparable to biodiesel 40.2 MJ/kg). There is a chance to recover the energy generated in the process. It can help to reduce fuel consumption. In this method can recover the largest amount of material will help offset the environmental impact that occurs. It is considered a credit arising from the environmental impact assessment.

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ก่อนอื่นใดผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาสผู้วิจัยสำหรับการทำวิทยานิพนธ์นี้ ตลอดจนความรู้ คำปรึกษา ข้อชี้แนะและอบรมสั่งสอนตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่เสียสละเวลามาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ทั้งยังให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณโครงการ การพัฒนาระบบการวิจัยเชิงคลังของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ ในการสนับสนุนวัตถุดิบในการวิจัย และคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) ในการสนับสนุนทุนวิจัย รวมถึงผู้ช่วยนักวิจัยในโครงการที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน และขอขอบคุณผู้ประกอบการทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง ในการเอื้อเฟื้อข้อมูล จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อบรมและถ่ายทอดวิชาความรู้ต่าง ๆ อีกทั้งยังให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่ และเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ รวมถึงเจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการติดต่อประสานงานและด้านเอกสาร ที่ช่วยให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคน โดยเฉพาะนางสาวครองขวัญ ช่างบุญ และนายชินวัตร ชนะปะปาโมกข์ และขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทีมมหาวิทยาลัยศิลปากรทุกคน และเพื่อนทุกคนที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่คอยให้คำปรึกษา ให้กำลังใจและช่วยเหลือมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณพระเจ้า และขอขอบคุณนายสาโรจน์ และนางสิริวรรณ สุภาพยาม บิดาและมารดาของผู้วิจัย รวมถึงญาติพี่น้องทุกคนในครอบครัว ที่คอยสนับสนุนให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน เป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยมาโดยตลอด และขอบคุณตัวผู้วิจัยเองที่มีความอดทน ไม่ยอมแพ้ และพยายามจนถึงที่สุด จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

อิงฉัตร สุภาพยาม

a

สารบัญ

| | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| | ค |
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ค |
| | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ง |
| กิตติกรรมประกาศ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญรูปภาพ..... | ฎ |
| บทที่ 1 | 1 |
| บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ..... | 1 |
| 1.2 ขอบเขตงานวิจัย | 3 |
| 1.2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.2.2 ขอบเขตงานวิจัย..... | 3 |
| 1.2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 5 |
| 2.1 สถานการณ์การใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทย | 5 |
| 2.2 แผงพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV panel) | 6 |
| 2.2.1 แผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline silicon)..... | 7 |
| 2.2.2 แผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มซิลิกอนแบบผลึกรวม (Multicrystalline silicon)..... | 8 |
| 2.2.3 ส่วนประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ | 10 |

| | | |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.4 | ค่าเฉลี่ยปริมาณวัสดุตามประเภทของแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 14 |
| 2.3 | แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน (End of Life: EoL)..... | 15 |
| 2.3.1 | การเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 15 |
| 2.3.2 | ความเป็นพิษของแผงพลังงานแสงอาทิตย์หลังหมดอายุการใช้งาน..... | 16 |
| 2.4 | การจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน..... | 17 |
| 2.4.1 | วิธีการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 18 |
| 2.5 | การจัดการความเป็นพิษที่เกิดจากการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 24 |
| 2.5.1 | การจัดการความเป็นพิษจากกระบวนการใช้ความร้อน..... | 24 |
| 2.5.2 | การจัดการความเป็นพิษจากวิธีการฝังกลบ..... | 28 |
| 2.6 | แนวทาง กฎหมายและระเบียบที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์.... | 29 |
| 2.6.1 | การจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ..... | 29 |
| 2.6.2 | การจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย..... | 32 |
| 2.7 | การคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 35 |
| 2.8 | เชื้อเพลิงและการเผาไหม้..... | 36 |
| 2.8.1 | การเผาไหม้..... | 36 |
| 2.8.2 | การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating Value)..... | 36 |
| 2.8.3 | การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิง..... | 38 |
| 2.8.4 | การทดสอบทางความร้อนโดยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)..... | 38 |
| 2.9 | การประเมินวัฏจักรชีวิต..... | 39 |
| 2.10 | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 41 |
| 2.10.1 | การเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์จากประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า..... | 41 |
| 2.10.2 | การคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 42 |
| 2.10.3 | การจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน..... | 45 |
| บทที่ 3 | ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย..... | 49 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 การดำเนินงานในห้องปฏิบัติการ | 50 |
| 3.1.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ | 50 |
| 3.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 50 |
| 3.1.3 การหาค่าองค์ประกอบทางกายภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 52 |
| 3.2 การสัมภาษณ์และเก็บข้อมูล..... | 52 |
| 3.3 การคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ และปริมาณของเสียวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 53 |
| 2. การคำนวณ..... | 54 |
| 3.4 การประเมินแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ | 55 |
| บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย | 59 |
| 4.1 ผลการดำเนินงานในห้องปฏิบัติการ | 59 |
| 4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate Analysis) | 59 |
| 4.1.2. การวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA..... | 60 |
| 4.1.3 การวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Heating value) | 64 |
| 4.1.4 องค์ประกอบทางกายภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 65 |
| 4.2 การสัมภาษณ์และเก็บข้อมูล..... | 66 |
| 4.2.1 ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการโรงไฟฟ้า | 66 |
| 4.3 การคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ และปริมาณวัสดุจากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 70 |
| 4.3.1 คำนวณสถานการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย | 70 |
| 4.3.2 การคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต | 73 |
| 4.3.3 ปริมาณวัสดุจากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ | 76 |
| 4.4 การประเมินแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ | 77 |
| 4.4.1 แผนภาพการไหลของมวล สำหรับแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (Mass flow)..... | 77 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.2 แผนภาพการไหลของตัวเงิน สำหรับแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงาน แสงอาทิตย์ (Cash flow)..... | 81 |
| 4.4.3 การเปรียบเทียบรายได้และต้นทุนในการดำเนินการจัดการเบื้องต้น..... | 86 |
| 4.4.4 การประเมินด้านพลังงาน..... | 89 |
| 4.4.5 การประเมินด้านผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม | 89 |
| 4.4.5.1 ผลวิเคราะห์ความเป็นอันตรายของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ | 89 |
| 4.4.5.2 การประเมินด้านผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม | 91 |
| บทที่ 5 | 99 |
| บทสรุป..... | 99 |
| 5.1 สรุปผลวิจัย | 99 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 101 |
| บรรณานุกรม..... | 102 |
| ภาคผนวก ก..... | 112 |
| ภาคผนวก ข..... | 122 |
| ภาคผนวก ค..... | 123 |
| ภาคผนวก ง..... | 127 |
| ภาคผนวก จ..... | 131 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 138 |

a

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 1 สัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน และปริมาณการใช้พลังงานทดแทนในปี พ.ศ. 2563..... | 5 |
| ตารางที่ 2 ข้อดี ข้อเสียของแผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว..... | 8 |
| ตารางที่ 3 ข้อดี ข้อเสียของแผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนแบบผลึกรวม..... | 9 |
| ตารางที่ 4 ตัวอย่างส่วนประกอบของอีวีเอ..... | 11 |
| ตารางที่ 5 คุณสมบัติของอีวีเอ..... | 12 |
| ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยวัสดุตามประเภทของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)..... | 14 |
| ตารางที่ 7 สรุปวิธีการจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอน..... | 23 |
| ตารางที่ 8 คุณสมบัติทางกายภาพของแผงชนิดผลึกซิลิกอนยี่ห้อที่ 1 ที่ใช้ในการศึกษานี้..... | 50 |
| ตารางที่ 9 คุณสมบัติทางกายภาพของแผงชนิดผลึกซิลิกอนยี่ห้อที่ 2 ที่ใช้ในการศึกษานี้..... | 50 |
| ตารางที่ 10 รายได้และต้นทุนของสถานการณ์ของแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 56 |
| ตารางที่ 11 หมวดยุทธศาสตร์ที่ถูกประเมินในงานวิจัยนี้..... | 58 |
| ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ทางเคมี (Ultimate Analysis) วัสดุอินทรีย์ที่ได้จากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยี่ห้อที่ 1..... | 59 |
| ตารางที่ 13 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate Analysis) วัสดุอินทรีย์ที่ได้จากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยี่ห้อที่ 2..... | 60 |
| ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยี่ห้อที่ 1..... | 63 |
| ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยี่ห้อที่ 2..... | 63 |
| ตารางที่ 16 ค่าความร้อนของวัสดุที่ได้จากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยี่ห้อ 1..... | 64 |
| ตารางที่ 17 ค่าความร้อนของวัสดุที่ได้จากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยี่ห้อ 2..... | 64 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ตารางที่ 18 สัดส่วนน้ำหนักองค์ประกอบแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 65 |
| ตารางที่ 19 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบวัสดุของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการศึกษานี้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)..... | 66 |
| ตารางที่ 20 สรุปสาเหตุการชำรุดเสียหายแยกตามปีที่ติดตั้ง..... | 68 |
| ตารางที่ 21 จังหวัดที่มีกำลังการผลิตติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์สูงสุด 10 อันดับแรก | 72 |
| ตารางที่ 22 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแผงพลังงานแสงอาทิตย์ต่อปีติดตั้ง | 73 |
| ตารางที่ 23 องค์ประกอบเข้า-ออก สำหรับแต่ละแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ | 80 |
| ตารางที่ 24 ต้นทุน และรายได้ของแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ | 83 |
| ตารางที่ 25 สมมติฐานต้นทุนการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์เบื้องต้น (ต่อ 1 ต้น) (คิดที่น้ำหนักแผงพลังงานแสงอาทิตย์ 22.5 kg/แผง)..... | 85 |
| ตารางที่ 26 สมมติฐานราคาวัสดุที่ได้จากการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์เบื้องต้น (ต่อ 1 ต้น)..... | 85 |
| ตารางที่ 27 สมมติฐานรายได้และต้นทุนที่ได้จากการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ตามแนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน | 86 |
| ตารางที่ 28 สมมติฐานรายได้และต้นทุนที่ได้จากการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ตามแนวทางการบดหยาบ..... | 87 |
| ตารางที่ 29 สมมติฐานรายได้และต้นทุนที่ได้จากการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ตามแนวทางการอบแยก | 88 |
| ตารางที่ 30 ผลการวิเคราะห์ TTLC | 90 |
| ตารางที่ 31 ผลการวิเคราะห์ STLC..... | 90 |
| ตารางที่ 32 เปรียบเทียบรายได้และต้นทุนการจัดการเบื้องต้น และปริมาณเสียอันตรายที่เหลือนำไปกำจัดทั้ง 3 แนวทาง | 100 |

a

สารบัญรูปรูปภาพ

| | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 1 หลักการทำงานของแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 6 |
| รูปที่ 2 ลักษณะเซลล์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว..... | 7 |
| รูปที่ 3 แผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว..... | 7 |
| รูปที่ 4 ลักษณะเซลล์ซิลิกอนแบบผลึกรวม..... | 8 |
| รูปที่ 5 แผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนแบบผลึกรวม..... | 9 |
| รูปที่ 6 โครงสร้างของแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 10 |
| รูปที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของ EVA..... | 11 |
| รูปที่ 8 (A) โครงสร้างหลายของ Tedlar (TPT) (B) โครงสร้างทางเคมีของแผ่นฟิล์ม PVF Tedlar.. | 13 |
| รูปที่ 9 แผ่นปิดด้านหลัง Tedlar (TPT)..... | 13 |
| รูปที่ 10 ลำดับขั้นการจัดการขยะ..... | 18 |
| รูปที่ 11 ขั้นตอนการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 36 |
| รูปที่ 12 กราฟการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมิ..... | 39 |
| รูปที่ 13 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์..... | 40 |
| รูปที่ 14 ภาพรวมของการดำเนินการทั้งหมด..... | 49 |
| รูปที่ 15 (A) ตัวอย่างวัสดุสำหรับวิเคราะห์ค่าความร้อน (B) วิเคราะห์หาค่าประกอบทางเคมี..... | 51 |
| รูปที่ 16 ขั้นตอนการหาสัดส่วนองค์ประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 52 |
| รูปที่ 17 ขั้นตอนการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน..... | 54 |
| รูปที่ 18 การวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุของแผงยี่ห้อที่ 1 เมื่อได้รับความร้อน..... | 62 |
| รูปที่ 19 การวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุของแผงยี่ห้อที่ 2 เมื่อได้รับความร้อน..... | 62 |
| รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างปีที่ติดตั้งและน้ำหนักต่อเมกะวัตต์ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์..... | 67 |
| รูปที่ 21 สัดส่วนยี่ห้อของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่นิยมติดตั้งใช้งาน..... | 67 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 22 สัดส่วนการเสียหายของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ | 68 |
| รูปที่ 23 จำนวนโรงไฟฟ้าที่เกิดการชำรุดเสียหายจากปัจจัยต่าง ๆ จำแนกตามปีที่ติดตั้ง | 70 |
| รูปที่ 24 กำลังการผลิตติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์รายปี และ สะสม | 71 |
| รูปที่ 25 กำลังการผลิตติดตั้งสะสมตามภาค | 72 |
| รูปที่ 26 ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์หมดอายุการใช้งาน 20 ปี (ต้น) | 75 |
| รูปที่ 27 ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์สะสม (ต้น) (ชำรุดก่อนหมดอายุ และหมดอายุการ ใช้งาน) | 75 |
| รูปที่ 28 ปริมาณวัสดุของเสียที่เกิดขึ้นตามมุมมองที่ 1 (ต้น) | 76 |
| รูปที่ 29 (A) (B) ปริมาณวัสดุของเสียที่เกิดขึ้นตามมุมมองที่ 2 (ต้น) อัตราการชำรุดเสียหายต่ำ..... | 77 |
| รูปที่ 30 ผังการไหลของมวลสำหรับแนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน..... | 78 |
| รูปที่ 31 ผังการไหลของมวลสำหรับแนวทางการบดหยาบ..... | 78 |
| รูปที่ 32 ผังการไหลของมวลสำหรับแนวทางการอบแยก | 79 |
| รูปที่ 33 กระจกที่ได้จากการอบแยก | 80 |
| รูปที่ 34 ผังการไหลของตัวเงิน สำหรับแนวทางการจัดการที่ใช้ในปัจจุบัน | 82 |
| รูปที่ 35 ผังการไหลของตัวเงิน สำหรับแนวทางการบดหยาบ | 82 |
| รูปที่ 36 ผังการไหลของตัวเงิน สำหรับแนวทางการอบแยก..... | 83 |
| รูปที่ 37 ตัวอย่างแผ่นเซลล์ซิลิกอน และทองแดง (รีบบอน)..... | 90 |
| รูปที่ 38 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงาน แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน..... | 98 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันนี้โลกกำลังเผชิญกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่รุนแรงมากยิ่งขึ้น รวมถึงผลกระทบจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความต้องการพลังงานสะอาดมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน (Faircloth และคณะ, 2019) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) นับเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกหรือพลังงานสะอาดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell) (ณิชชา บุรณสิงห์, 2561) เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง และในปัจจุบันทั่วโลกกำลังให้ความสนใจเป็นอย่างมาก รวมถึงประเทศไทยที่มีการเจริญเติบโตของการใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยเช่นกัน โดยในสิ้นปี พ.ศ. 2562 ทั่วโลกมีกำลังการผลิตติดตั้งสะสมของแผงพลังงานแสงอาทิตย์อย่างน้อย 627 กิกะวัตต์ สำหรับประเทศผู้นำในการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ได้แก่ จีน สหภาพยุโรป สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และเยอรมนี มีการติดตั้งสะสมคิดเป็น 253.4 151.3 93.2 71.4 และ 53.9 กิกะวัตต์ ตามลำดับ (International Energy Agency (IEA), 2021)

นับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 ประเทศไทยเริ่มมีการลงทุนผลิตไฟฟ้าจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่องจากการสนับสนุนของภาครัฐ รวมไปถึงภาคเอกชนที่ให้ความสนใจ (ศูนย์วิจัยกสิกร, 2563) ในปี พ.ศ. 2562 ประเทศไทยได้ดำเนินการใช้แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 - 2580 (AEDP 2018) ฉบับปรับปรุงใหม่ จากแผนพัฒนานี้ได้มีการเพิ่มเป้าหมายกำลังการผลิตติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยเพิ่มมากขึ้น เป้าหมายในปี พ.ศ. 2580 จะต้องมีการติดตั้งรวมทั้งสิ้นคิดเป็น 14,864 เมกะวัตต์ (กระทรวงพลังงาน, 2563)

เทคโนโลยีแผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอน (Crystalline Silicon Solar Cells: c-Si) ถือเป็นเทคโนโลยีแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่เก่าแก่ที่สุดคิดเป็นร้อยละ 92 ของส่วนแบ่งการตลาดจากกำลังการผลิตติดตั้งทั่วโลก (Weckend และคณะ, 2016) และสำหรับประเทศไทยมีการใช้แผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 88.6 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561) แผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนประกอบด้วย 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ ซิลิกอนผลึกเดี่ยว (Monocrystalline silicon) และซิลิกอนผลึกรวม (Polycrystalline silicon) สำหรับส่วนประกอบหลักของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้

ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนคลุมด้านหน้า ส่วนห่อหุ้มป้องกันความชื้น ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ และโลหะนำไฟฟ้า และส่วนคลุมปิดด้านหลัง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2560)

การใช้งานแผงพลังงานแสงอาทิตย์จะคุ้มทุนเมื่อมีการใช้งานในระยะยาว ส่วนมากมีอายุการใช้งานเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 20 – 30 ปี ขึ้นอยู่กับประเภท สภาพแวดล้อม และการบำรุงรักษา สำหรับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุ (End-of-life : EoL) หมายถึง แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่เสื่อมประสิทธิภาพจนหมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าเมื่อครบตามกำหนดอายุการใช้งาน หรือแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ชำรุดเสียหายจากการใช้งาน (Weckend และคณะ, 2016) ทั้งที่เกิดขึ้นในระหว่างการขนส่ง การติดตั้ง หรือจากเหตุการณ์ไม่คาดคิดที่มีโอกาสเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น ปัญหาสภาพภูมิอากาศ เป็นต้น (Kim และคณะ, 2018) และความเสียหายที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน เช่น เกิดฟองอากาศและความชื้นภายใน การผุกร่อนของส่วนที่เป็นโลหะทั้งภายในและภายนอก และการแตกหักของเซลล์ เป็นต้น (บัณฑิต เวียงมูล, 2553) (Oliveira และคณะ, 2018) เมื่อแผงพลังงานแสงอาทิตย์เสื่อมสภาพจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าลดลงหรือไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ แผงพลังงานแสงอาทิตย์เหล่านี้จึงกลายเป็นของเสียที่ต้องมีการจัดการต่อไป

ในส่วนของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่า หมดอายุการใช้งานจัดเป็นขยะประเภทอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic waste) จำเป็นต้องมีการจัดการอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ โดยจะต้องคำนึงถึงโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ เช่น ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) เป็นต้น ถือเป็นโลหะควบคุมตามกฎหมายระดับสิ่งแวดล้อม ที่ทำให้เกิดความกังวลเกี่ยวกับปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก จึงจำเป็นต้องมีการจัดการที่ดีเพื่อป้องกันการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม (Fthenakis, 2000) และเป็นที่ทราบกันดีว่าของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ถูกนำไปฝังกลบ เนื่องจากกระบวนการรีไซเคิลยังไม่มีความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ (Lunardi และคณะ, 2018) และสำหรับการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยยังไม่มีศักยภาพมากพอเนื่องจากยังไม่มีโรงงานรีไซเคิลอย่างครบวงจร จึงใช้วิธีการกำจัดอย่างง่ายโดยทำการคัดแยกอย่างง่าย และส่วนที่เหลือนำไปปรับเสถียรก่อนทำการกำจัดที่หลุมฝังกลบอุตสาหกรรม (Secured landfill) (พิชญ รัชฎาวงศ์ และคณะ, 2559) (ณิชชา บูรณสิงห์, 2561)

จากแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แสดงให้เห็นว่าในอนาคตอันใกล้ประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเผชิญกับปัญหาขยะจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ และจาก

การคาดการณ์พบว่าปริมาณของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่องในช่วงปี พ.ศ. 2565 – 2588 (พิชญ์ รัชฎาวงศ์ และคณะ, 2559) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการประเมินแนวทางการจัดการแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย โดยใช้องค์ประกอบของการสัมภาษณ์เก็บข้อมูลจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และทำการคาดการณ์ปริมาณของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะเกิดขึ้น รวมทั้งทำประเมินค่าความร้อนของวัสดุของแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน เพื่อประเมินแนวทางการจัดการของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์

1.2 ขอบเขตงานวิจัย

1.2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อทำการคาดการณ์ปริมาณของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย
2. เพื่อประเมินการจัดการของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน

1.2.2 ขอบเขตงานวิจัย

1. ใช้ฐานข้อมูลจากคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) สำหรับกำล้งการผลิตติดตั้งแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในปี พ.ศ. 2550 – 2562
2. สัมภาษณ์เพื่อเก็บข้อมูลรายละเอียดของแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน ที่ติดตั้งในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
3. ทำการคาดการณ์ปริมาณของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ และปริมาณวัสดุของเสียในของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ ในสถานการณ์การสูญเสียปกติ (Regular loss) และชำรุดก่อนหมดอายุการใช้งาน (Early loss)
4. ทำการวิเคราะห์ประเภทวัสดุ โดยหาค่าความร้อน (Heating value) ของวัสดุของแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน ได้แก่ วัสดุห่อหุ้ม (EVA) แผ่นปิดด้านหลัง (Backsheet) และซิลิโคน (Adhesive) ทำการวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน (TGA) และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate analysis) เพื่อประเมินค่าความร้อนและมลพิษที่มีโอกาสเกิดขึ้น รวมถึงทำการหาองค์ประกอบทางกายภาพของวัสดุ
5. ทำการทบทวนเอกสารแนวทางการจัดการของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนที่มีความเป็นไปได้ และประเมินแนวทางการจัดการของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึก

ซิลิกอน โดยพิจารณาจากปริมาณวัสดุที่ได้ มูลค่าในเชิงวัสดุและเชิงพลังงาน และต้นทุนในการจัดการต่าง ๆ เช่น ค่าจ้างกำจัด เป็นต้น

1.2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงปริมาณการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย และเป็นการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์รวมถึงปริมาณองค์ประกอบวัสดุที่มีแนวโน้มเกิดขึ้นในอนาคต

2. สามารถนำข้อมูลจากการประเมินแนวทางการจัดการที่เกิดขึ้น มาใช้เป็นแนวทางสำหรับการเตรียมความพร้อมของประเทศไทยในการรับมือและจัดการกับของเสียแผงในอนาคตได้



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงภาพรวมการใช้พลังงานของประเทศไทย เนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับแผนพลังงาน แสงอาทิตย์ได้แก่ สถานการณ์การใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทย ประเภทและองค์ประกอบต่าง ๆ ของแผนพลังงานแสงอาทิตย์ไปจนถึงการจัดการแผนพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่หมดอายุการใช้งาน รวมถึงการวิเคราะห์ค่าความร้อนของวัสดุอินทรีย์ของแผนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน มี ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

2.1 สถานการณ์การใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทย

ประเทศไทยมีการพัฒนาพลังงานเพิ่มขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจ และจากมาตรการและการสนับสนุนของรัฐบาลส่งผลให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการใช้พลังงานทดแทนที่ผลิตได้เองภายในประเทศ ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ ขยะ และเชื้อเพลิงชีวภาพ พบว่าในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทนรวมทั้งสิ้น 11,997 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ซึ่งลดลงจากในปีก่อนหน้าร้อยละ 15.1 มีการใช้ในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ คิดเป็นร้อยละ 16.5 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2563) สัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนและปริมาณการใช้พลังงานทดแทนแสดงดังตาราง 3.1

ตารางที่ 1 สัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน และปริมาณการใช้พลังงานทดแทนในปี พ.ศ. 2563

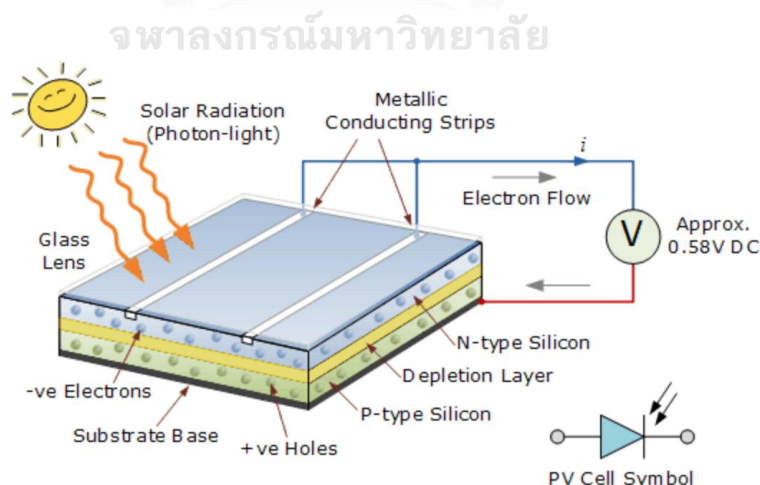
| รูปแบบการใช้พลังงานทดแทน | สัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน (ร้อยละ) | ปริมาณ (พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ) |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. ไฟฟ้า (แสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชีวมวล ขยะ ก๊าซชีวภาพ และพลังความร้อนใต้พิภพ) | 24.2 | 2,903 |
| 2. ความร้อน (แสงอาทิตย์ ชีวมวล ขยะ และ ก๊าซธรรมชาติ) | 56.0 | 6,717 |
| 3. เชื้อเพลิงชีวภาพ - ไบโอดีเซล | 13.4 | 1,612 |

| | | |
|-----------|-----|--------|
| - เอทานอล | 6.4 | 765 |
| รวม | 100 | 11,997 |

2.2 แผงพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV panel)

แผงพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV panel) หรือโซลาร์เซลล์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกในปีค.ศ. 1954 โดยแชปปีน ฟูลเลอร์ และเพียสัน ที่ได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ P-N ของผลึกซิลิคอนจนสามารถผลิตแผงพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นมาได้ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 6 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเริ่มต้นได้นำไปใช้งานในการผลิตพลังงานไฟฟ้าทางด้านอวกาศดาวเทียม จนกระทั่งปัจจุบันนี้มีการผลิตใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากความต้องการผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีสะอาดเพิ่มขึ้น และการพัฒนาเทคโนโลยีส่งผลให้แผงพลังงานแสงอาทิตย์มีราคาถูกลงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554)

ระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อสายส่ง (On-grid system) ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) และอุปกรณ์ประกอบระบบ (Balance of system: BOS) ได้แก่ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) หม้อแปลง (Transformer) สายไฟ และอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดนี้จะเชื่อมต่อและทำงานร่วมกัน เพื่อเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเมื่อแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำที่อยู่ในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนทำให้เกิดเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC current) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2560) (Shubbak, 2019) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการทำงานของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

ที่มา: (www.electronics-tutorials.ws)

แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นในปัจจุบันแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาของเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต และแต่ละประเภทจะตอบสนองต่อความต้องการและวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่แตกต่างกันไป โดยประเภทของแผงพลังงานแสงอาทิตย์แบ่งตามเทคโนโลยีได้ 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอน (Crystalline Silicon Solar Cells: c-Si) เซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มฟิล์มบาง (Thin film) และเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ เซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดทั้งในต่างประเทศและประเทศไทยคือ เซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนทั้งในรูปของซิลิกอนผลึกเดี่ยว (Monocrystalline silicon) และซิลิกอนผลึกรวม (Multicrystalline silicon หรือ Polycrystalline silicon) (Weckend และคณะ, 2016)

2.2.1 แผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline silicon)

แผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 15 – 22 โดยที่ประสิทธิภาพนั้นจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต และส่วนมากจะใช้กระบวนการ Czochralski ในการสร้างตัวเซลล์ขึ้นมา โดยกระบวนการนี้มีการใช้ซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99.9999 (Mesquita และคณะ, 2019) ขั้นตอนของการทำเป็นตัวเซลล์ คือ นำแท่งซิลิกอนทรงกระบอกที่ได้จากกระบวนการนี้มาทำการตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ตัดมุมทั้ง 4 มุม และโครงสร้างของซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวลักษณะของผลึกจะมองเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน โดยไม่เห็นขอบของผลึก ตัวเซลล์จะมีสีดำเข้มสม่ำเสมอที่สามารถมองเห็นได้ชัดเจน (Paiano, 2015) (Amerisolar, 2018)



รูปที่ 2 ลักษณะเซลล์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว

ที่มา: (www.wholesalesolar.com)



รูปที่ 3 แผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว

ที่มา: (www.home.co.th)

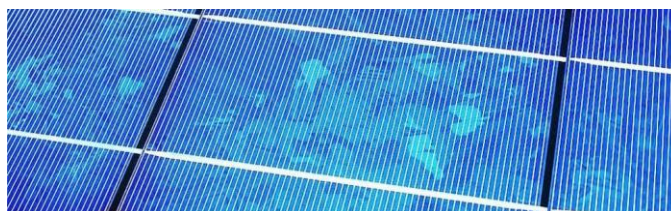
ตารางที่ 2 ข้อดี ข้อเสียของแผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว

| ข้อดี | ข้อเสีย |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| มีประสิทธิภาพสูงสุดเพราะผลิตมาจากซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์สูงสุด | มีราคาสูงเนื่องจากผลิตด้วยกระบวนการที่ซับซ้อน |
| ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยลงเมื่อเทียบกับแผงประเภทอื่น และมีประสิทธิภาพต่อพื้นที่สูงสุด | เมื่อแผงพลังงานแสงอาทิตย์ถูกปกคลุมด้วยสิ่งสกปรกหรือบริเวณที่มีร่มเงา จะส่งผลให้ตัววงจรเสียหายได้ เพราะอาจทำให้เกิดโวลต์สูงเกินไป |
| มีอายุการใช้งานที่ยาวนานโดยเฉลี่ยประมาณ 25 ปี | มีประสิทธิภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น |
| มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ดีภายใต้สภาวะที่มีแสงแดดน้อย | อาจเกิดการเสียหายของซิลิกอนในระหว่างกระบวนการผลิต เป็นผลให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงขึ้น |

ที่มา: (Amerisolar, 2018)

2.2.2 แผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มซิลิกอนแบบผลึกรวม (Multicrystalline silicon)

แผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มซิลิกอนแบบผลึกรวมมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 14 – 20 ซึ่งต่ำกว่าแบบผลึกเดี่ยว (Mesquita และคณะ, 2019) และมีการใช้แผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มซิลิกอนแบบผลึกรวมมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 63 ของตลาดโลก (Paiano, 2015) ในส่วนของกระบวนการผลิตจะนำเอาซิลิกอนขนาดเล็กจำนวนมากมาหลอมเข้าด้วยกัน แล้วนำมาเทใส่โมลด์สี่เหลี่ยม ทำให้เย็นตัวลงก่อนที่จะนำมาตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ไม่มีการตัดมุม (Amerisolar, 2018) ผลที่ได้จากการหลอมแล้วทำเป็นผลึกคือจะได้ลักษณะของผลึกที่ไม่เป็นเนื้อเดียว มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าจากลักษณะของผลึกที่มีรอยต่อของขอบผลึกมากมาย และจากการแต่งพื้นผิวของเซลล์ทำให้ตัวเซลล์มีสีฟ้าที่เป็นเอกลักษณ์



รูปที่ 4 ลักษณะเซลล์ซิลิกอนแบบผลึกรวม

ที่มา: (www.wholesalesolar.com)



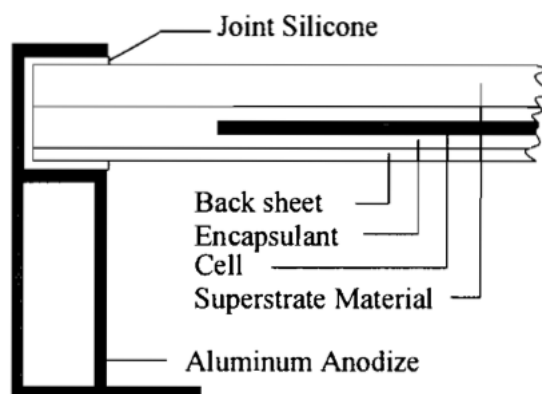
รูปที่ 5 แผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนแบบผลึกรวม
ที่มา: (www.amp-solar.com)

ตารางที่ 3 ข้อดี ข้อเสียของแผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอนแบบผลึกรวม

| ข้อดี | ข้อเสีย |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| มีกระบวนการผลิตที่ง่าย ไม่ซับซ้อนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการถูกกว่า | ตัวเซลล์มีประสิทธิภาพต่ำลง เนื่องจากใช้ซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์ต่ำ |
| ใช้ซิลิกอนในกระบวนการผลิตน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบบผลึกเดี่ยว และไม่มีเศษซิลิกอนเหลือทิ้งในระหว่างขั้นตอนการผลิต | ต้องการพื้นที่มากกว่าในการติดตั้งมากกว่าแบบผลึกเดี่ยว |
| ราคาถูกกว่าแบบผลึกเดี่ยว | รูปลักษณะไม่สวยงาม เนื่องจากตัวเซลล์มีสีที่ไม่สม่ำเสมอและมองเห็นขอบของผลึก |
| มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น | |

ที่มา: (Amerisolar, 2018)

2.2.3 ส่วนประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 6 โครงสร้างของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

ที่มา: (บัณฑูร เวียงมูล, 2553)

แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้งานโดยทั่วไปมีโครงสร้าง แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุที่ทำหน้าที่ต่างกัน ได้แก่ กรอบโครง (Frame) วัสดุปิดด้านบน (Superstrate Materials) วัสดุห่อหุ้ม (Encapsulant) ตัวเซลล์ (Cell) และแผ่นปิดด้านหลัง (Backsheet) (บัณฑูร เวียงมูล, 2553)

1. กรอบโครง (Frame)

ส่วนใหญ่ทำจากอลูมิเนียม ทำหน้าที่ในการยึดส่วนประกอบต่าง ๆ ของแผงไว้ด้วยกัน โดยการอัดวัสดุเชื่อมประสาน (Silicone sealant) เพื่อยึดติดกับขอบของตัวแผง ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงทนทาน และป้องกันการกระแทกจากด้านข้างของตัวแผง (บัณฑูร เวียงมูล, 2553) สำหรับแผงกลุ่มผลึกซิลิกอน (c-Si) จะนิยมใช้กรอบโครงเป็นอลูมิเนียมชุบอินไดซ์ (anodized aluminum) (Satpathy และคณะ)

2. วัสดุปิดด้านบน (Superstrate Materials)

โดยทั่วไปจะใช้เป็นกระจกนิรภัยหรือกระจกเทมเปอร์ (tempered glass) ที่มีความโปร่งใสสูง มีส่วนผสมของธาตุเหล็กต่ำ และมีการเคลือบป้องกันแสงสะท้อน โดยผิวของกระจกด้านหนึ่งเรียบ อีกด้านขรุขระ ปัจจุบันความหนาของกระจกที่ใช้กันทั่วไปคือ 3.2 มิลลิเมตร (Satpathy และคณะ) การนำกระจกมาใช้เพื่อความแข็งแรงของวัสดุ เพื่อทนต่อแรงกระแทก ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า และกระจกที่ใช้ต้องมีความทนทานต่อสภาพกลางแจ้ง (บัณฑูร เวียงมูล, 2553)

3. วัสดุห่อหุ้ม (Encapsulant)

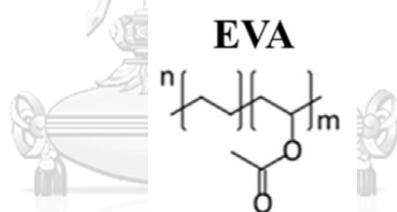
วัสดุห่อหุ้มเป็นสิ่งจำเป็นถูกนำมาใช้เพื่อให้เกิดการประกบหรือลามิเนต (laminated) ของแผ่นเซลล์ซิลิกอนเข้ากับกระจกและแผ่นปิดด้านหลัง ซึ่งการใช้วัสดุห่อหุ้มจะเพิ่มคุณสมบัติทางกลที่ดี และป้องกันความชื้นให้กับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ได้ โดยวัสดุห่อหุ้มนี้จะต้องให้แสงผ่านได้ดี มีความ

ยึดหยุ่นเนื่องจากการหดและขยายตัวของเซลล์กับกระจกที่แตกต่างกัน มีความแข็งแรงของพันธะหรือการยึดเกาะระหว่างวัสดุที่ดี ซึ่งจะแสดงถึงประสิทธิภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ นอกจากนี้จำเป็นต้องมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ดี (บัณฑูร เวียงมูล, 2553) จากงานวิจัยของ (Satpathy และคณะ) กล่าวว่าวัสดุห่อหุ้มที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่ Ethylene vinyl acetate (EVA) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Oliveira และคณะ, 2018)

3.1 Ethylene vinyl acetate (EVA)

ประกอบด้วยเอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ (EVA) ข้อดีคือ มีการถ่ายเทความร้อนสูง ทนทานต่อรังสียูวี ยึดเกาะได้ดีกับกระจก และทนต่อสภาพอากาศ ตัวอย่างส่วนประกอบและคุณสมบัติของ EVA แสดงดังตารางที่ 4 และ 5 และสมบัติเด่นที่ทำให้ EVA ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับห่อหุ้ม ดังนี้

- 1.) มีสภาพต้านทานทางไฟฟ้าสูง แสดงถึงการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
- 2.) การหลอมละลายและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจากโมโนเมอร์เป็นโพลิเมอร์ (Polymerization temperature) มีค่าต่ำ
- 3.) มีอัตราการดูดซึมน้ำน้อยมาก
- 4.) มีการส่งผ่านแสงได้ดี



รูปที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของ EVA
ที่มา : (Geretschläger และคณะ, 2016)

ตารางที่ 4 ตัวอย่างส่วนประกอบของอีวีเอ

| องค์ประกอบ | สัดส่วนโดยมวล (%) |
|----------------------------------------------------------------|-------------------|
| ไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate) | 32 - 34 |
| สารการบ่ม (Curing agent) | 1.50 |
| สารยับยั้งการรวมตัวของออกซิเจนทางแสง (Photo-antioxidant) | 0.10 |
| สารยับยั้งการรวมตัวของออกซิเจนทางความร้อน (Thermo-antioxidant) | 0.20 |
| ตัวดูดซับรังสียูวี (UV absorber) | 0.25 |
| สารยึดเกาะ (Adhesive agent) Silane A174 | 1 |

หมายเหตุ : ส่วนประกอบของ EVA ของบริษัท Dupont de Nemour รุ่น ELVAX 150

ที่มา : (บัณฑิต เวียงมูล, 2553)

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของอีวีเอ

| | |
|---------------------------------------------|---------------------------------|
| ความหนา | ≈ 0.45 mm |
| ความหนาแน่น | 0.957 g/cm ³ |
| การยืดตัว (Breakdown Elongation) | 900 - 1100 % |
| มอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Elasticity Modulus) | 4.8 MPa |
| สภาพต้านไฟฟ้า (Electrical Resistivity) | 10 ¹⁴ Ω cm |
| การหลอมเหลว (Melt index 190 °C/2.16 kg) | 43 g/10 min |
| จุดหลอมเหลว (Melting Point) | 63 °C |
| การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) | 0.05 – 0.13 % |
| ดัชนีหักเหแสง (Refractive index) | 1.482 |
| การส่งผ่านทางแสงของ EVA | 400 – 1,100 nm (ใกล้เคียงกระจก) |

ที่มา : (บัณฑิต เวียงมูล, 2553)

4. เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพ และรูปลักษณะของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถมีจำนวนเซลล์ที่แตกต่างกันได้ เช่น 36, 48, 54, 60, 72 และ 96 เซลล์ เป็นต้น หรือมีจำนวนเซลล์ที่ขึ้นอยู่กับความต้องการกำลังไฟและแรงดันไฟฟ้า (Satpathy และคณะ, 2020)

โดยทั่วไปแรงดันของแต่ละเซลล์ซิลิกอนมีค่าประมาณ 0.5 โวลต์ และให้กระแสต่ำกว่าเงื่อนไขการใช้งาน ดังนั้นในการใช้งานจึงต้องนำเซลล์มาต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดัน และต่อขนานเพื่อรวมกระแส สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์จะใช้แถบโลหะบาง (Ribbon) เชื่อมต่อโดยการบัดกรี (Soldering) (บัณฑิต เวียงมูล, 2553)

5. แผ่นปิดด้านหลัง (Backsheet)

สำหรับแผงพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นกระจก/แผ่นปิดด้านหลัง มีวัสดุรองรับเป็นพลาสติกจะปิดผนึกเซลล์เพื่อป้องกันการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมโดยตรง ป้องกันอากาศและความชื้นเข้าไปภายในเซลล์ ซึ่งประเภทของแผ่นปิดด้านหลังบอกถึงคุณภาพและประสิทธิภาพในระยะยาวของตัวแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (Satpathy และคณะ, 2020) แผ่นปิดด้านหลังที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ พอลิไวนิลฟลูออไรด์ (PVF) เป็นฟิล์มจาก DuPont ที่ขายภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อว่า Tedlar (TPT)

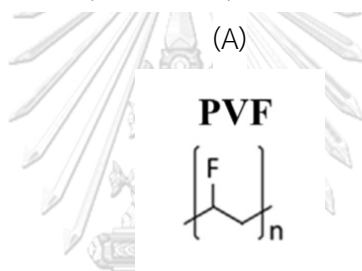
5.1 Tedlar (TPT)

โครงสร้างฟิล์มหลายชั้นที่ประกอบด้วยชั้นของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) ที่ถูกเคลือบด้วยพอลิไวนิล ฟลูออไรด์ (PVF) ดังรูปที่ 8 แผ่นฟิล์มที่มีโครงสร้างของฟลูออโรโพลีเมอร์ที่ประกอบด้วยธาตุฟลูออรีน จะมีความทนต่อสภาพอากาศ ในสภาพอากาศที่รุนแรงสามารถป้องกันรังสียูวีได้สูง มีลักษณะเหนียว มีเสถียรภาพทางแสง มีความต้านทานทางเคมี ไม่มีผลกระทบในระยะยาวจากความชื้น และมีลักษณะเด่นคือมีสีขาวที่เห็นได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 9

TEDLAR® TPT™ BACKSHEET



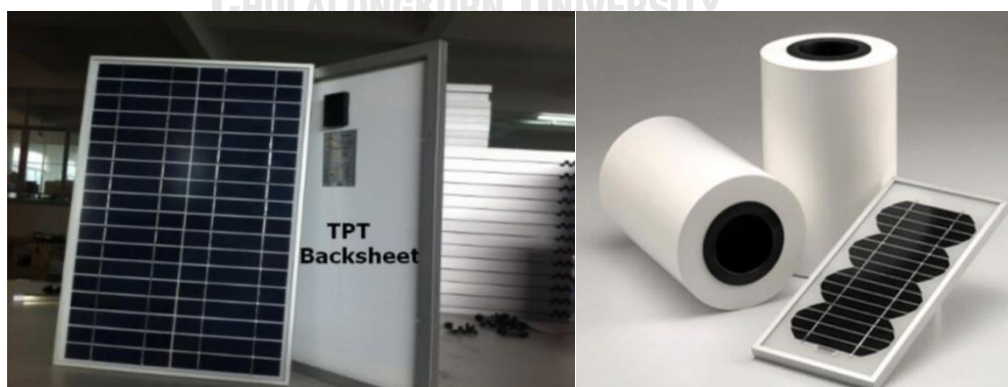
ที่มา : (<https://www.dupont.com/products/tedlar-backsheets.html>)



ที่มา : (Geretschläger และคณะ, 2016)



รูปที่ 8 (A) โครงสร้างหลายของ Tedlar (TPT) (B) โครงสร้างทางเคมีของแผ่นฟิล์ม PVF Tedlar



รูปที่ 9 แผ่นปิดด้านหลัง Tedlar (TPT)

ที่มา : (<http://agathec.com.br>)

2.2.4 ค่าเฉลี่ยปริมาณวัสดุตามประเภทของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตแผงพลังงานแสงอาทิตย์แบ่งเป็น 3 ประเภทหลักใหญ่ๆ และในท้องตลาดปัจจุบันนิยมใช้แผงพลังงานแสงอาทิตย์ 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มผลึกซิลิกอน (c-Si) กลุ่มฟิล์มบางซิลิกอน (a-Si) กลุ่มสารประกอบแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) และกลุ่มสารประกอบทรูกลคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดเซเลไนด์ (CIGS) ตารางที่ 6 แสดงปริมาณและวัสดุที่เป็นองค์ประกอบหลักของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 4 กลุ่ม

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยวัสดุตามประเภทของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ที่มา: (Paiano, 2015)

| ประเภท | c-Si | a-Si | CdTe | CIGS |
|-----------------|--------------|--------|------|--------|
| องค์ประกอบ | | | | |
| กระจก | 74.16 | 86 | 95 | 84 |
| อลูมิเนียม | 10.30 | 0.035 | 0.35 | 12 |
| พอลิเมอร์ (EVA) | 6.55 | - | - | - |
| แผ่นปิดด้านหลัง | 3.6 | - | - | - |
| สารยึดเกาะ | 1.16 | 0.02 | - | - |
| พอลีเอทิลีน | - | 12 | - | - |
| ทองแดง | 0.57 | 0.9 | 1 | 0.8 |
| เงิน | 0.004 - 0.06 | - | - | - |
| ดีบุก | 0.12 | 0.043 | - | - |
| สังกะสี | 0.12 | - | 0.01 | 0.12 |
| ซิลิกอน | 3.35 | 0.0064 | - | - |
| ตะกั่ว | 0.06 | - | - | 0.05 |
| แคดเมียม | - | - | 0.07 | 0.0005 |
| เทลลูเรียม | - | - | 0.07 | - |
| อินเดียม | - | 0.5 | - | 0.02 |
| ซีลีเนียม | - | - | - | 0.03 |
| แกลเลียม | - | - | - | 0.01 |
| เจอร์มาเนียม | - | 0.5 | - | - |

2.3 แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน (End of Life: EoL)

การติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยมีปริมาณรวมสะสมเพิ่มขึ้นในทุกปีเป็นผลจากการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนของกระทรวงพลังงานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 ซึ่งแผงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยม (ณิชชา บุรณสิงห์, 2561) เนื่องจากการส่งเสริมให้ภาคเอกชนสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีการสนับสนุนด้านภาษี และการให้สิทธิต่างๆ เพื่อสร้างแรงจูงใจ รวมถึงสนับสนุนทางการเงิน และจากราคาของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ปรับลดลงทำให้ประชาชนมีความสนใจติดตั้งบนหลังคาบ้านเพิ่มขึ้น เป็นที่ทราบกันว่าอายุการใช้งานของแผงพลังงานแสงอาทิตย์โดยทั่วไปอยู่ที่ 20 – 25 ปี และภายหลังจากการผ่านการใช้งานในเวลาดังกล่าว จำเป็นต้องมีการจัดการขยะแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2560)

แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานถูกกำหนดให้เป็นของเสียอิเล็กทรอนิกส์หรือของเสียกลุ่ม E (E-waste) ของเสียกลุ่ม E จัดอยู่ในกลุ่มของเสียอันตรายแบบ HA (Hazardous Waste-Absolutely Entry) หรือของเสียอันตรายแบบ HM (Hazardous Waste Mirror Entry) ซึ่งจะต้องคำนึงถึงแนวทางในการจัดการตามที่กฎหมายกำหนด (มนัสนันท์ พิบาลวงศ์, 2559) ปัจจุบันกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้จัดทำ “แผนแม่บทการจัดการซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ : เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells)” แผงพลังงานแสงอาทิตย์มีทั้งส่วนที่ไม่เป็นอันตรายและส่วนที่เป็นโลหะหนักที่สามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ (ณิชชา บุรณสิงห์, 2561)

2.3.1 การเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

การเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าลดลง ปัญหาการเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์มีสาเหตุจากวัสดุห่อหุ้มแผงเซลล์หรือวัสดุเคลือบคือ กระจก วัสดุห่อหุ้มป้องกันความชื้นหรือฟิล์มอีวีเอ และแผ่นปิดด้านหลัง ได้รับความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ หรืออุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อการยึดขยายตัวของวัสดุไม่เท่ากัน เป็นสาเหตุทำให้ความชื้นในอากาศซึมผ่านเข้าไปทำลายแผงเซลล์ โลหะนำไฟฟ้า และจุดต่อของโลหะนำไฟฟ้ากับบัสบาร์ของแผงเซลล์ การสูญเสียของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์คือ การสูญเสียทางแสง ได้แก่ การสูญเสียจากการส่งผ่านของแสง จากการสะท้อนแสง และจากการบังเงาของแสง และการสูญเสียทางไฟฟ้า ได้แก่ การ

สูญเสียจากความต้านทาน และการรวมกันภายในของพาหะ (สันติ มั่นคง และสมชัย หิรัญวโรดม, 2559)

2.3.2 ความเป็นพิษของแผงพลังงานแสงอาทิตย์หลังหมดอายุการใช้งาน

ปัญหาต่าง ๆ ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นที่นำไปสู่การหมดอายุการใช้งาน ไม่ว่าจะจากการเสื่อมสภาพ การชำรุดเสียหายจำเป็นต้องมีการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์เหล่านี้ หลังจากที่หมดอายุการใช้งานหรือไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ เนื่องจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์มีองค์ประกอบของวัสดุที่มีความเป็นพิษอยู่ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้

1. กลุ่มผลึกซิลิกอน

จากองค์ประกอบและวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตพบว่าตะกั่ว (Pb) มีความเป็นพิษสูงที่สุด โดยในกระบวนการผลิตมีการใช้ตะกั่วในการบัดกรี สามารถพบตะกั่วได้ทั่วไปในธรรมชาติทั้งในดิน หิน น้ำ พืช และอากาศ ตะกั่วเป็นโลหะที่มีความสามารถในการสะสมได้ทั้งในมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ตะกั่วจะเข้าสู่ร่างกายได้ ทางปากโดยรับประทานอาหารหรือดื่มน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่ว ทางการหายใจ เมื่อเข้าสู่ร่างกายไม่ว่าทางใด จะถูกดูดซึมเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิต ไปจับกับเม็ดเลือดแดง แทนที่เหล็กทำให้เกิดอาการโลหิตจาง และสะสมในกระดูกทำให้มีอาการปวดตามข้อ กระดูกผุ และหักง่าย และเมื่อมีการสะสมในปริมาณมากขึ้นจะเป็นอันตรายต่อระบบประสาท ระบบภูมิคุ้มกัน ระบบสืบพันธุ์และไตได้ เรียกว่า โรคพิษตะกั่ว (กุลธิดา ถาวรกิจการ และกิจชัย ศิริวัฒน์, 2563)

สำหรับความเป็นอันตรายของตะกั่วที่มาจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุนี้มาจากการละลายออกมาของตะกั่ว ที่ค่าพีเอช 6 – 7 ตะกั่วสามารถละลายออกมาได้ประมาณร้อยละ 13 ของปริมาณทั้งหมด และที่ค่าพีเอช 3 – 4 ตะกั่วสามารถละลายออกมาได้ประมาณร้อยละ 90 ของปริมาณทั้งหมด หากคิดเป็นค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่ว 12.67 กรัมต่อแผง และแผงมีน้ำหนัก 22.4 กิโลกรัม ที่ค่าพีเอช 6-7 และ 3 – 4 ตะกั่วสามารถละลายออกมาได้ 75 และ 518 กรัมต่อตันของเสียตามลำดับ (Bio Intelligence Service, 2011)

2. กลุ่มฟิล์มบาง

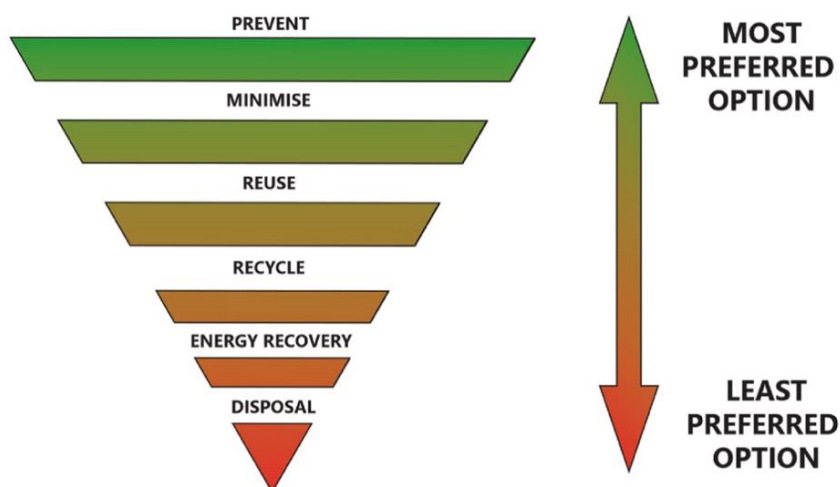
จากองค์ประกอบและวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตสำหรับเทคโนโลยี CIGS และ CdTe พบว่าแคดเมียม (Cd) มีความเป็นพิษสูงที่สุด แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่สะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิต มีความเป็นพิษเฉียบพลันสูงและมีศักยภาพในการสะสมสูงในมนุษย์ แคดเมียมเป็นสารก่อมะเร็งที่สามารถทำ

ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพยาธิสรีรวิทยาอย่างรุนแรงภายใต้สภาวะของการได้รับสารซ้ำ โดยวงจรชีวิตของแคดเมียมในคนค่อนข้างยาว 16 - 33 ปี ทำให้การขับแคดเมียมที่เข้าในร่างกายมนุษย์ค่อนข้างช้ามาก (เขมชิต ธนากิจชาญเจริญ และคณะ, 2551)

พบว่าในช่วงค่าพีเอชปกติของแผลงพลังงานแสงอาทิตย์ แคดเมียมจะละลายออกมาได้ประมาณร้อยละ 7 ของปริมาณทั้งหมด และในช่วงค่าพีเอช 3 - 4 แคดเมียมสามารถละลายออกมาได้ประมาณร้อยละ 40 ของปริมาณทั้งหมด หากคิดเป็นค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียม 4.6 กรัมต่อแผลงและแผลงมีน้ำหนัก 12 กิโลกรัม ที่ค่าพีเอชปกติ และที่ค่าพีเอช 3 - 4 แคดเมียมสามารถละลายออกมาได้ 27 และ 153 กรัมต่อตันของเสียตามลำดับ (Bio Intelligence Service, 2011)

2.4 การจัดการแผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน

จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจัดการแผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน หรือซากแผลง พบว่ายังไม่มีมาตรการที่ชัดเจนในการจัดการ ในปัจจุบันนี้หลายประเทศทั่วโลกมีการจัดการกับขยะแผลงเหล่านี้โดยการฝังกลบ (Farrell และคณะ, 2020) ซึ่งการฝังกลบไม่ใช่ทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและไม่ยั่งยืนในระยะยาว อาจส่งผลให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากองค์ประกอบภายในแผลงมีโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว สามารถชะหรือปนเปื้อนในดินหรือน้ำใต้ดิน (Bogacka และคณะ, 2020) นอกจากนี้ยังสูญเสียโอกาสในการนำกลับโลหะมีค่า เช่น เงิน และทองแดง เป็นต้น จึงมีการเปลี่ยนมุมมองจากการจัดการแบบเดิมมาเป็นการจัดการอย่างยั่งยืนตามลำดับขั้นของการจัดการขยะ (Waste Management Hierarchy) โดยให้ความสำคัญในการลดปริมาณและความเป็นอันตราย การนำมาใช้ซ้ำ การนำกลับมาใช้ใหม่ รวมถึงการแปลงขยะเป็นพลังงาน ก่อนนำส่วนที่เหลือไปจัดการอย่างถูกต้องเหมาะสมต่อไป ดังนั้นในหลายประเทศจึงมีการพัฒนาวิธีการรีไซเคิลแผลงที่หมดอายุการใช้งานทั่วโลก เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเพื่อนำกลับวัสดุมีค่าบางส่วนจากแผลง (Lunardi และคณะ, 2018)



รูปที่ 10 ลำดับชั้นการจัดการขยะ

(Farrell และคณะ, 2020)

2.4.1 วิธีจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์

กรรมวิธีที่ใช้ในการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ การจัดการส่วนใหญ่ที่พบคือการฝังกลบ (Farrell และคณะ, 2020) ทั้งฝังกลบร่วมกับขยะชุมชนอย่างถูกกฎหมายในหลายประเทศ (Deng และคณะ, 2019) และฝังกลบในหลุมฝังกลบของเสียอันตราย และการเผา (Ratner และคณะ, 2020) รวมทั้งทำการรีไซเคิลด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อนำกลับวัสดุก่อนนำไปฝังกลบ

1. การฝังกลบ

เป็นวิธีการจัดการที่นิยมใช้สำหรับกำจัดแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว และพบว่าขยะแผงจะถูกฝังกลบพร้อมกับขยะในครัวเรือนอื่นๆ อย่างที่ทราบกันดีว่าการกำจัดโดยตรงนี้ทำให้สูญเสียทรัพยากรที่ใช้ซ้ำได้อย่างถาวร และอาจนำไปสู่การปนเปื้อนในดิน ในอากาศ และในน้ำได้ (Deng และคณะ, 2019)

2. การรีไซเคิลอย่างง่าย

การรีไซเคิลอย่างง่าย ก่อนการนำไปฝังกลบแนวทางนี้พบได้ในยุโรปเป็นส่วนใหญ่ ขั้นตอนของการรีไซเคิลอย่างง่ายนี้จะเป็นการแยกกรอบอลูมิเนียม และกระจก ขั้นตอนแรกคือการถอดกรอบอลูมิเนียม กล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (junction box) และลวดทองแดงออกก่อน จากนั้นส่วนที่เหลือจะถูกตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ตามด้วยการบด และทำการคัดแยกด้วยมือหรือเครื่องจักรเพื่อให้ได้กระจกออกมาแนวทางนี้จะได้กระจกที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากมีสิ่งเจือปนที่ไม่สามารถแยกออกจากกันผสมอยู่ จากนั้น

จะถูกส่งไปทำการฝึกลบ ซึ่งวิธีการรีไซเคิลอย่างง่ายเช่นนี้เป็นลดต้นทุนการใช้พลังงานและการดำเนินการ ช่วยไม่ไห้มวลของเสียแผงขนาดใหญ่ถูกฝึกลบ (Deng และคณะ, 2019) (Tao และคณะ, 2020)

3. การรีไซเคิลขั้นสูง

เป็นการจัดการเพื่อนำวัสดุมีค่ากลับมาใช้ใหม่ จะมีกระบวนการที่ซับซ้อนมากขึ้นเพื่อให้ได้วัสดุที่มีความบริสุทธิ์ มีคุณภาพมากขึ้น และลดสารพิษตกค้างในการกำจัดให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งต้องใช้เงินลงทุน บุคลากร และเทคโนโลยีมากขึ้นเช่นกัน (ณิชา บวรณสิงห์, 2561) ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน

3.1 การแยกชั้น เป็นการแยกส่วนของกระจกออก สามารถดำเนินการได้ 3 วิธี

1.) การแยกด้วยวิธีทางกล (Mechanical delamination)

1.1) Shredding/ Milling

กระจกที่ได้จะยังมีซิลิกอนและส่วนของพอลิเมอร์ติดอยู่ จำเป็นต้องใช้กระบวนการทางความร้อน หรือใช้ตัวทำละลายเพื่อแยกเอากระจกออกมา ได้กระจกกลับมาร้อยละ 80 – 85 โดยมวล (Deng และคณะ, 2019)

1.2) Cutting (hot knife)

เป็นวิธีนำร่องที่นำมาใช้ในโครงการนำกลับวัสดุอย่างสมบูรณ์ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน (FRELP) ในกระบวนการนี้สามารถแยกกระจกได้อย่างรวดเร็วภายในเวลาประมาณ 40 วินาที (TOMIOKA, 2016) ได้กระจกกลับมาร้อยละ 98 โดยมวล ส่วนที่เหลือถูกนำไปกำจัดโดยวิธีการเผาต่อไป (Deng และคณะ, 2019)

1.3) Cryogenic

กระบวนการนี้เป็นการใช้การแช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -196°C แทนการใช้ความร้อนในการกำจัด EVA ทำให้การยึดเกาะระหว่างผิวของโครงสร้างที่ติดกันเป็นชั้นอ่อนตัวลงจากนั้นจะใช้เครื่องเจียรนัยในการแยกผงซิลิกอนออกจากผงของพลาสติกและแก้ว (Deng และคณะ, 2019)

1.4) Hydrothermal

เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อแยกกระจกออกมาโดยที่ไม่แตก แต่กระบวนการ 3.) และ 4.) นี้ผลการรีไซเคิลที่ได้ยังไม่ชัดเจนจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไป (Deng และคณะ, 2019)

2.) การแยกด้วยวิธีทางความร้อน (Thermal delamination)

2.1) Pyrolysis

ทำให้ชั้นของวัสดุห่อหุ้มที่เป็น EVA สลายตัวแบบไพโรไลติกภายใต้บรรยากาศที่เป็นแก๊สเฉื่อยในเตาหลอมที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C การแยกตัวด้วยไพโรไลติกนี้จะใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดและเตาเผาที่มีก๊าซที่ติดไฟได้ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่เป็นความร้อนหรือไฟฟ้า กระบวนการนี้ได้กระจกออกมาเกือบทั้งหมด และได้ซิลิกอนเกรดพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความบริสุทธิ์สูง (Deng และคณะ, 2019)

2.2) Combustion

ชั้นของวัสดุห่อหุ้มที่เป็น EVA จะถูกเผาภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจน เพื่อให้พลังงานแก่เตาเผาความร้อนต่อไปได้ (Deng และคณะ, 2019) เป็นกระบวนการเดียวกับที่องค์กรพัฒนาพลังงานและเทคโนโลยีอุตสาหกรรมแห่งใหม่ของญี่ปุ่นหรือ NEDO ใช้ในการจัดการกับขยะแผง (Lunardi และคณะ, 2018)

3.) การแยกด้วยวิธีทางเคมี (Chemical delamination)

3.1) แยกด้วยตัวทำละลายอินทรีย์

เป็นการแยกกระจกออกโดยการนำแผงพลังงานแสงอาทิตย์ไปแช่ไว้ในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Deng และคณะ, 2019)

3.2) แยกด้วยตัวทำละลายอินทรีย์

ทำการละลายชั้นของวัสดุห่อหุ้ม EVA โดยตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น ไตรคลอโรเอทิลีน อะซิโตน และโทลูอีน เป็นต้น (Doi และคณะ, 2001) และบางกรณีตัวทำละลายอินทรีย์ไม่สามารถขจัด EVA ที่บวมซึ่งหลงเหลืออยู่บนพื้นผิว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นที่สอง เช่น ไพโรไลซิส เป็นต้น ซึ่งจะเพิ่มความซับซ้อนในกระบวนการมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้การใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic irradiation) ร่วมกับวิธีทางเคมีสามารถเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของชั้นวัสดุห่อหุ้ม (EVA) ได้ (Deng และคณะ, 2019)

3.2 การสกัดโลหะมีค่า

1.) การชะละลายหรือการสกัดด้วยสารเคมี

เพื่อแยกซิลิกอนและโลหะมีค่าออกมา ทำให้ได้ซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์สูง สามารถส่งต่อไปยังอุตสาหกรรมที่ผลิตซิลิกอนเกรดพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไปได้ (Deng และคณะ, 2019)

2.) การสกัดโลหะ

เป็นกระบวนการที่ทำให้โลหะบริสุทธิ์ด้วยวิธีพื้นฐาน 3 วิธี ได้แก่ กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) การแทนที่ด้วยโลหะ (Metal replacement) และการตกตะกอน (Precipitation) กระบวนการสกัดโลหะไม่เพียงแต่นำวัสดุที่มีค่ากลับคืนมาเท่านั้น แต่ยังกำจัดองค์ประกอบที่เป็นอันตราย เช่น ตะกั่ว ออกจากของเสียแผงเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Deng และคณะ, 2019)

จากการทบทวนกรรมวิธีที่ใช้ในการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ และจากที่ (พิชญ์ รัชฎาวงศ์ และคณะ, 2559) ได้สรุปเป็นแนวทางการจัดการหลักๆ 4 แนวทาง ได้แก่

1. คัดแยกเบื้องต้น และฝังกลบ

ขั้นตอนการคัดแยกเบื้องต้นจะแยกได้เฉพาะวัสดุที่แยกออกมาได้ง่าย ได้แก่ กรอบอลูมิเนียม อุปกรณ์กล่องสายไฟ และลวดทองแดง โดยส่วนที่เหลือนับเป็นขยะอุตสาหกรรมจะถูกกำจัดตามแนวทางของกรมโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การบด ปรับเสถียรก่อนทำการฝังกลบ (Latunussa และคณะ, 2016) แนวทางการจัดการนี้มีเงื่อนไขในเรื่องของปริมาณของเสียแผงที่เกิดขึ้นน้อย ซึ่งพิจารณาได้จากกำลังการผลิตตั้งสะสมจากรายงานของ (Weckend และคณะ, 2016) และประเทศที่ไม่มีโรงงานรีไซเคิลภายในประเทศ เช่น ประเทศที่กำลังพัฒนา เป็นต้น ในแนวทางนี้ค่าใช้จ่ายหลักมาจากการขนส่ง และค่าการฝังกลบในส่วนที่เหลือ

2. คัดแยกเบื้องต้น บดหยาบ คัดแยกวัสดุภายหลังการบด และฝังกลบ

ขั้นตอนการคัดแยกเบื้องต้นจะแยกได้เฉพาะวัสดุที่แยกออกมาได้ง่าย ได้แก่ กรอบอลูมิเนียม อุปกรณ์กล่องสายไฟ และลวดทองแดง ส่วนที่เหลือจะนำไปบดและคัดแยกเอากระจกออกมาดำเนินการเช่นเดียวกับที่ยุโรปโดย PV CYCLE และที่สหรัฐอเมริกา (SEIA) (Tao และคณะ, 2020)

แต่กระจกที่ได้ออกมาจะไม่สมบูรณ์เนื่องจากมีสิ่งเจือปนผสมอยู่ เช่น พลาสติก แผงเซลล์ซิลิกอน และวัสดุห่อหุ้ม (EVA) เป็นต้น ทำให้กระจกบางส่วนไม่สามารถนำมารีไซเคิลต่อได้จำเป็นต้องนำไปฝังกลบ สำหรับแนวทางนี้จะเหมาะสมเมื่อมีปริมาณของเสียแผงเกิดขึ้นที่มากพอในระดับหนึ่ง มีความเป็นไปได้ในการตั้งโรงงานในการแยก ในแนวทางนี้ค่าใช้จ่ายหลักมาจากค่าไฟฟ้าของเครื่องบด และค่าแรงในการคัดแยก

3. คัดแยกเบื้องต้น ใช้เครื่องมือในการแยกกระจก และฝังกลบ

แนวทางนี้เป็นแนวทางที่พัฒนาขึ้นมาจากแนวทางที่ 2 เนื่องจากแนวทางที่ไม่สามารถแยกกระจกออกมาได้อย่างสมบูรณ์ โดยเริ่มจากการแยกอย่างง่ายก่อน จากนั้นจะใช้กระบวนการทางความร้อนในการอบแผงพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้วัสดุห่อหุ้ม (EVA) สลายตัวทำให้กระจกกับแผงเซลล์ซิลิกอนแยกออกจากกัน กระจกที่ได้จะมีความบริสุทธิ์มากขึ้น (Tammaro และคณะ, 2015) สำหรับกระจกที่แยกออกมาได้สามารถนำไปขายหรือรีไซเคิลต่อได้ เป็นแนวทางเดียวกับที่องค์กรพัฒนาพลังงานและเทคโนโลยีอุตสาหกรรมแห่งใหม่ของญี่ปุ่นหรือ NEDO ใช้ในการจัดการกับขยะแผงพลังงานแสงอาทิตย์ แต่ในขณะเดียวกันแนวทางนี้สามารถนำวัสดุกลับมาใช้ประโยชน์ต่อได้ในปริมาณมาก อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณการนำซากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ไปฝังกลบได้ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนที่ต้องจ่ายสำหรับค่าการฝังกลบได้เป็นอย่างมาก

4. คัดแยกเบื้องต้น และแยกส่วนของวัสดุเพื่อนำกลับมาผลิตแผงพลังงานแสงอาทิตย์ใหม่

เป็นแนวทางที่พัฒนาขึ้นมาจากแนวทางที่ 3 และสำหรับแนวทางนี้มีความพยายามที่จะนำเอาวัสดุภายในแผงพลังงานแสงอาทิตย์ได้แก่ แผ่นซิลิกอน โดยที่แยกออกมาได้ไม่เสียหายและมีความบริสุทธิ์สูง (Deng และคณะ, 2019) และส่งกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตแผงพลังงานแสงอาทิตย์ต่อได้ และในระหว่างกระบวนการทางเคมีจะได้โลหะมีค่าอื่น ๆ เช่น เงิน (Tao และคณะ, 2020) โดยแนวทางนี้เป็นการจัดการที่ครบวงจรที่สุดเนื่องจากสามารถนำวัสดุของแผงพลังงานแสงอาทิตย์กลับมารีไซเคิลได้เกือบทั้งหมด แต่ต้นทุนในการดำเนินการก็สูงที่สุดเช่นกัน แนวทางนี้เหมาะกับประเทศที่มีโรงงานปลายทางที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแผ่นซิลิกอน หรือเป็นประเทศที่มีโรงงานครบตามห่วงโซ่อุปทาน

จากการจัดการทั้ง 4 แนวทางเห็นได้ว่าแนวทางที่ 3 และแนวทางที่ 4 เป็นแนวทางการจัดการตามหลักระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) คือ เพิ่มการนำวัสดุกลับไปใช้ประโยชน์ และลดปริมาณขยะลง และอาจจะมีการกู้คืนพลังงาน (energy recovery) จากการใช้ความร้อนทำลายวัสดุห่อหุ้ม (EVA) และวัสดุปิดแผ่นหลัง (Backsheet) ได้เช่นกันสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Latunussa และคณะ, 2016) (Farrell และคณะ, 2019)

ตารางที่ 7 สรุปวิธีการจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มผลึกซิลิกอน

| ขั้นตอน | กระบวนการ | ข้อดี | ข้อเสีย |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| การแยกชั้น (Delamination) | วิธีทางกายภาพ (Physical disintegration) | - เป็นการจัดการอย่างมี ประสิทธิภาพ - ดำเนินการง่าย | - วัสดุอื่น ๆ ยังคงติดอยู่ด้วยกัน - เซลล์แสงอาทิตย์แตก - มีการกักความร้อนของอุปกรณ์ - เกิดฝุ่นที่มีโลหะหนักปนอยู่ |
| ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvent) | - แยกชั้นวัสดุที่เป็นสารพอลิ เมอร์ออกจากกระจก - นำสารเคมีที่ใช้แล้วกลับมาใช้ ซ้ำ - ง่ายต่อการแยก EVA | - แยกชั้นวัสดุที่เป็นสารพอลิ เมอร์ออกจากกระจก - นำสารเคมีที่ใช้แล้วกลับมาใช้ ซ้ำ - ง่ายต่อการแยก EVA | - ใช้เวลาในการแยกค่อนข้างนาน - มีค่าใช้จ่ายสูง - มีการปล่อยมลพิษและของเสีย อันตราย - เป็นอันตรายต่อมนุษย์ |
| ใช้ตัวทำละลายอินทรี รีย์ เช่น กรดไนตริก (Solvent dissolution) | - แยก EVA และชั้นของโลหะ ออกจากแผ่นเซลล์ซิลิกอนได้ สมบูรณ์ | - แยก EVA และชั้นของโลหะ ออกจากแผ่นเซลล์ซิลิกอนได้ สมบูรณ์ | - มีการปล่อยมลพิษและของเสีย อันตราย - เกิดความผิดปกติของเซลล์ เนื่องจากกรดอินทรีย์ |
| วิธีทางความร้อน (Thermal treatment) | - EVA ถูกกำจัดออกไปสมบูรณ์ - นำแผ่นเซลล์ซิลิกอนกลับมาใช้ ใหม่ได้ | - EVA ถูกกำจัดออกไปสมบูรณ์ - นำแผ่นเซลล์ซิลิกอนกลับมาใช้ ใหม่ได้ | - ใช้พลังงานสูง - มีการปล่อยมลพิษ |

| | | | |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| | | - เป็นกระบวนการที่มีความ เป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ | |
| | ใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic irradiation) | - เป็นกระบวนการเสริมเพื่อเร่ง กระบวนการละลายของ สารอินทรีย์ - ง่ายต่อการกำจัด EVA | - มีค่าใช้จ่ายสูง - มีการปล่อยมลพิษและของเสีย อันตราย |
| การแยก ส่วนประกอบ (Material Seperation) | กระบวนการทางกล แบบแห้งและแบบเปียก (Dry and wet mechanical process) | - ไม่ใช่กระบวนการทางเคมี - เป็นกระบวนการที่ง่าย - ต้องการพลังงานต่ำ มีอุปกรณ์ให้เลือกใช้หลากหลาย | - ไม่มีการกำจัดของแข็งละลายน้ำ |
| | การสกัดด้วยสารเคมี (Chemical etching) | - เป็นกระบวนการที่ง่าย และมี ประสิทธิภาพ - สามารถแยกโลหะมีค่าที่มีความ บริสุทธิ์สูงได้ | - ใช้สารเคมีในกระบวนการ |

ที่มา: (Lunardi และคณะ, 2018) (Chowdhury และคณะ, 2020)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.5 การจัดการความเป็นพิษที่เกิดจากการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์

จากการใช้ความร้อนในกระบวนการอบแยก และการฝังกลบจะมีมลพิษต่าง ๆ เกิดขึ้น ทั้งนี้
มลพิษที่เกิดขึ้นสามารถจัดการได้โดยวิธีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.5.1 การจัดการความเป็นพิษจากกระบวนการใช้ความร้อน

การใช้ความร้อนในการอบแยกองค์ประกอบวัสดุอินทรีย์ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่
วัสดุท่อหุ้ม วัสดุเชื่อมประสาน และแผ่นปิดด้านหลัง (Huang และคณะ, 2017) ในการแยกมีโอกาสที่
จะเกิดเป็นมลพิษทางอากาศได้เช่นเดียวกับการกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ ที่จะทำให้เกิดการ
แพร่กระจายของโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม และสารปรอทสู่บรรยากาศ เป็นต้น และหากมี

ส่วนประกอบของพลาสติกที่มีสารประกอบกลุ่มฮาโลเจน สามารถทำให้เกิดการแพร่กระจายของสารไดออกซิน สารพีวแรน ฟลูออโรคาร์บอน (Danz และคณะ, 2019) ที่เป็นสารก่อมะเร็งและสารอินทรีย์ระเหย (VOCs) (อรรวรรณ พุทธิสุทธิ และศุภสิพร แสงกระจ่าง, 2553) ซึ่งโลหะที่อยู่ในเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของก๊าซและกากของเสีย หรือเถ้าตามรายงานของ (Tamaro และคณะ, 2015)

1. ของเสียในรูปก๊าซ

ปริมาณของเสียในรูปก๊าซแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับปริมาณชนิด และคุณสมบัติของเสียที่จะนำมาเผา (อัคคีปราการ, 2558)

1.1 ชนิดของเสียในรูปก๊าซที่เกิดจากกระบวนการเผา ประกอบด้วย

- ฝุ่นรวม (Total Suspended Particulate, TSP)
- กรดเกลือ (Hydrogen Chloride, HCl)
- คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide, CO)
- ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxides, NOx)
- ไดออกซิน/ฟูราน (Dioxins/Furans)
- โลหะหนัก (Heavy Metals) ได้แก่ปรอท (Mercury, Hg) ตะกั่ว (Lead, Pb) แคดเมียม (Cadmium, Cd) และโลหะรวม (Sb, As, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Sn)
- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide, SO₂)
- ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (Hydrogen Fluoride, HF)

2. การควบคุมสารมลพิษก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ (สิตาวีร์ ธีรวิรุฬห์, 2558) มีดังนี้

2.1 การควบคุมอนุภาคขนาดเล็กก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ

- 1.) การเปลี่ยนทิศทางของอากาศเสีย เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีน้ำหนักมากกว่าอากาศเคลื่อนที่ขนานของอุปกรณ์ที่ใช้ จะทำให้เกิดการตกตะกอน เช่น การใช้ไซโคลน

2.) การกรองอนุภาคขนาดเล็กออกจากอากาศ เป็นการปล่อยให้อากาศเสียไหลผ่านตัวกลางหรือตัวกรอง ทำให้อนุภาคส่วนหนึ่งถูกดักเอาไว้ เช่น การใช้ถุงกรอง

3.) การใช้แรงดึงดูดกระแสไฟฟ้าสถิต ทำให้อนุภาคขนาดเล็กแสดงอำนาจทางประจุไฟฟ้าจากนั้นใช้แรงดึงดูดที่มีประจุตรงข้ามแยกอนุภาคออกมา

4.) การเพิ่มน้ำหนักของอนุภาค เมื่อมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจะทำให้ตกตะกอนแยกตัวออกจากอากาศได้ง่าย โดยใช้ น้ำสัมผัสกับอากาศเสีย เช่น เครื่องเก็บอนุภาคแบบสครับเบอร์

2.2 การควบคุมสารมลพิษที่เป็นก๊าซ

สารมลพิษที่เป็นก๊าซจะถูกควบคุมและขจัดโดยใช้ตัวกลางดูดซับเอาไว้ หรือทำการสันดาปเชื้อเพลิงโดยสมบูรณ์ หรือใช้การดูดซึมก๊าซไว้ในตัวกลางหรือลดความเข้มข้นลง

1.) การดูดซับ (Adsorption) ตัวดูดซับที่นำมาใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนที่เป็นก๊าซ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซิลิกาเจล และบอริกไซด์กัมมันต์ เป็นต้น

2.) การดูดซึม (Absorption) นิยมใช้ตัวกลางที่เป็นของเหลวเช่น น้ำหรือน้ำมัน ในการดูดซึมเอาสารปนเปื้อนในอากาศเสียไว้

3.) การเจือจาง (Dilution) โดยใช้พัดลมดูดอากาศ หรือพัดลมดูดอากาศร่วมกับปล่องระบายควัน (Stack)

4.) การควบแน่น (Vapor Condensers) เป็นการทำให้ก๊าซหรือไอในอากาศเสียเกิดการควบแน่นเป็นของเหลว โดยการเพิ่มความดัน หรือลดอุณหภูมิของก๊าซหรือไอในกระแสอากาศเสียก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ

2.3 การควบคุมสารอินทรีย์ระเหย (วราวุธ เสือดี, 2555)

1.) ระบบการเผาไหม้โดยตรง (Thermal Incineration) เป็นการทำให้อากาศเสียที่มีสารที่ก่อให้เกิดสารอินทรีย์ระเหย ถูกทำให้ร้อนอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 550 – 800 องศาเซลเซียส เพื่อออกซิไดซ์ และสลายสารอินทรีย์ระเหย และเผาไหม้ได้ซึ่งจะทำให้สารอินทรีย์ระเหยนั่นเจือจางลงหรือไม่มีกลิ่น

2.) ระบบการเผาไหม้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Incineration) คล้ายกับการเผาไหม้โดยตรง ต่างกันตรงที่อากาศเสียจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst bed) ซึ่งจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าคืออยู่ระหว่างอุณหภูมิ 350 – 650 องศาเซลเซียส

3.) ระบบออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นระบบออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอากาศเสียที่มีสารอินทรีย์ระเหย ถูกทำให้ร้อนอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 250 – 350 องศาเซลเซียส และผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst bed) ซึ่งเป็นการเผาที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นสารที่ก่อให้เกิดสารอินทรีย์ระเหยจะอยู่ภายใต้สภาวะออกซิเดชันบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ถูกเผาไหม้ทำให้สารอินทรีย์ระเหยเจือจางลง หรือไม่มีกลิ่น

4.) ระบบกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นการใช้ตัวกรองชีวภาพ (Biofiltration) ในการบำบัดมลพิษอากาศที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งระบบนี้จะอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นมลพิษ โดยที่ไอของสารอินทรีย์ระเหยจะต้องมีการปรับเสถียรก่อน เพื่อควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ หรือฝุ่นละอองให้มีค่าที่เหมาะสมก่อนนำเข้าสู่ระบบตัวกรองชีวภาพ

5.) ระบบกำจัดกลิ่น (Chemical Scrubbing) เป็นการเติมสารละลายกรดและด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ระเหยที่มีสภาพความเป็นกรด ต่างต่างกันไป เพื่อให้ได้สารประกอบต่าง ๆ ที่เป็นกลาง หรือสารประกอบใหม่ที่ไม่มีกลิ่นหรือมีกลิ่นลดลง

6.) ระบบดูดซับ

6.1.) ระบบดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon – Adsorption) เป็นการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยด้วยผงถ่านกัมมันต์ ซึ่งระบบนี้จะใช้เพื่อเสริมการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยร่วมกับระบบอื่น ๆ เช่น ใช้ร่วมกับระบบสครับบิง เพื่อกำจัดสารที่เป็นกลางต่อไป

6.2.) ระบบดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ที่เคลือบสารเคมี (Impregnated Activated Carbon (A/C) – Adsorption) มีกระบวนการบำบัดกลิ่นโดยใช้ Impregnated A/C ที่ถูกเคลือบด้วยสารเคมีบางชนิด เช่น กรด หรือด่างอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อให้ความสามารถในการดูดซับมีประสิทธิภาพสูงขึ้นไปกว่าสปีทเทอของผงถ่านกัมมันต์ธรรมดา ทั้งนี้ผงถ่านกัมมันต์ที่เคลือบสารเคมีสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการบำบัดสารที่ดูดซับไว้และทำการปรับสภาพใหม่

7.) การควบแน่นและนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นการเพิ่มความดันหรือลดอุณหภูมิให้ไอระเหยกลายเป็นของเหลว เพื่อลดการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหย ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้จะขึ้นกับคุณสมบัติ

ของสารนั้น ๆ การควบคุมมีประสิทธิภาพและได้ผลที่คุ้มค่าในการนำสารที่ควบคุมกลับมาได้มาใช้ใหม่ ในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารนั้นสูงเพียงพอ เช่น อากาศที่ดูดจากหม้อผสมสี เป็นต้น โดยทั่วไปการควบคุมจะใช้เครื่องทำความเย็น และมีค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่เป็นค่าไฟฟ้า

2. กากของเสีย

กากของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผา (อัคคีปรากการ, 2558) ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) และเถ้าหนัก (Bottom Ash) โดยปริมาณเถ้าลอยที่เกิดจากกระบวนการเผาจะขึ้นอยู่กับประเภท คุณสมบัติ และสัดส่วนของเสียแต่ละ ประเภทที่จะนำมาเผา โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 5 - 10 ของปริมาณของเสียที่จะนำมาเผา และปริมาณเถ้าหนักจะเกิดจากกระบวนการเผาในห้อยเผาไหม้ ปริมาณเถ้าหนักที่เกิดจาก กระบวนการเผาจะขึ้นอยู่กับประเภท คุณสมบัติ และสัดส่วนของเสียแต่ละประเภท โดยทั่วไปมีประมาณร้อยละ 2 - 8 ของปริมาณของเสียที่จะนำมาเผาเถ้าหนักที่เกิดขึ้น

เถ้าลอยจะปนไปกับอากาศเสียเข้าสู่ระบบบำบัดอากาศ ซึ่งนิยมใช้ชุดดงกรอง (Bag Filter) หรือเครื่องดัก จับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) ก่อนที่จะระบายออกสู่บรรยากาศ จากนั้นจะแยกออกมาเพื่อนำไปทำเป็นก้อน (Solidification) และนำไปฝังกลบที่หลุมฝังกลบ

เถ้าหนักที่เหลืออยู่ในเตาเผาจะถูกส่งออกสู่ระบบลำเลียงเปียกเพื่อลดอุณหภูมิของเถ้าหนัก และแยกเถ้าหนักนี้ออกไป โดยเถ้าหนักที่แยกออกมาจะถูกส่งต่อไปยังหลุมฝังกลบ (เชาว์ นกอยู่, 2561) (อัคคีปรากการ, 2558)

2.5.2 การจัดการความเป็นพิษจากวิธีการฝังกลบ

ของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์จัดเป็นกากอุตสาหกรรมประเภทของเสียอันตราย (Chowdhury และคณะ, 2020) หมายถึง สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบ หรือปนเปื้อนสารอันตราย โดยองค์ประกอบและวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนพบว่าตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ที่มีความเป็นพิษสูงสุด สำหรับการจัดการกากอุตสาหกรรมที่เป็นของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบในหลุมฝังกลบ (Secure Landfill) ถือเป็น การกำจัดของเสียขั้นสุดท้าย (Farrell และคณะ, 2020) และก่อนการนำไปฝังกลบจะต้องดำเนินการ ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด ดังนี้

1. การปรับเสถียร (Stabilization/ Fixation) เป็นการเติมสารเคมี เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ และแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ เป็นต้น เข้าไปผสมกับของเสียอันตราย เพื่อลดความเป็นพิษ และทำให้มีอัตราการปลดปล่อยของสารอันตรายลดลง ด้วยวิธีปรับสภาพความเป็นกรดต่างของกากของเสียให้มีค่าเป็นกลาง

2. การทำก้อนแข็ง (Solidification) เป็นการนำกากของเสียไปผสมกับปูนซีเมนต์ เพื่อให้ปูนซีเมนต์ห่อหุ้มกากของเสีย ป้องกันการชะล้าง เพื่อให้กากของเสียอยู่ในสภาพคงตัวก่อนนำไปฝังกลบอย่างปลอดภัยต่อไป จัดเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม และลดอัตราการปลดปล่อยสารปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554)



2.6 แนวทาง กฎหมายและระเบียบที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์

2.6.1 การจัดการแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ

สำหรับประเทศที่มีความก้าวหน้าในการพัฒนาในด้านเทคโนโลยีมีความตื่นตัวในการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้ในการบริหารจัดการซากหรือของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งประเทศที่มีการจัดการที่โดดเด่นที่สุดคือประเทศเยอรมนี รองลงมาคือประเทศญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา จีน และอิตาลี (Weckend และคณะ, 2016) (ณิชา บุรณสิงห์, 2561) ดังนี้

1. การจัดการแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศเยอรมนี

ได้ดำเนินการจัดการของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ตามระเบียบเศษเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) ซึ่งเป็นกฎระเบียบในการบริหารจัดการผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ในสหภาพยุโรป และทำการปรับปรุงกรอบกฎหมายให้ครอบคลุมถึงของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์

จากรายงานการคาดการณ์พบว่าในปี พ.ศ. 2559 ปริมาณของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์สะสมของประเทศเยอรมนีจะมีประมาณ 3,500 – 70,000 ตัน และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกจำนวนมาก และมีโอกาสที่จะเกิดการรีไซเคิลของแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานเป็นประเทศแรก และสำหรับการจัดการซากของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศเยอรมนีอยู่ภายใต้การควบคุมของสำนักทะเบียนผู้ก่อขยะอิเล็กทรอนิกส์ National Register for Waste Electrical Equipment (Stiftung Elektro-Altgeräte Register หรือ Stiftung EAR) ที่เป็นหน่วยงาน

รับผิดชอบชั้นทะเบียนและออกเลขทะเบียนให้แก่ผู้ผลิตที่จะต้องเป็นผู้รับผิดชอบแผงหลังหมดอายุการใช้งาน โดยจะต้องทำการเรียกคืนและทำการรีไซเคิล และสำหรับบทบาทของภาคเอกชนในการบริหารจัดการของเสียแผงจะมีกฎหมาย Electrical and Electronic Equipment (ElektroG) มีการระบุไว้ว่าต้องถอดแยกส่วนประกอบ และรีไซเคิลแผง โดยต้องมีอัตราการนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างน้อยร้อยละ 80 โดยน้ำหนักรวม และในอนาคตมีการตั้งเป้าหมายในการลดราคาการรีไซเคิล และเพิ่มรายได้จากวัสดุที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล

2. การจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศญี่ปุ่น

ประเทศญี่ปุ่นยังไม่มีกฎหมายที่มีผลบังคับเรื่องการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์โดยเฉพาะ มีเพียงกฎหมายที่ใช้ในการจัดการกับขยะอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นกฎหมายที่ส่งเสริมให้ลดการเกิดขยะจำพวกอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และจากรายงานการคาดการณ์พบว่าในปี พ.ศ. 2559 ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์สะสมของประเทศญี่ปุ่นจะมีประมาณ 7,000 – 35,000 ตัน และถึงแม้จะไม่มีข้อมูลทางสถิติเกี่ยวกับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานจริงๆ แต่คาดว่าน่าจะมีปริมาณลดลง ในประเทศญี่ปุ่นมีศูนย์รวบรวมจำนวน 380 แห่งทั่วประเทศเพื่อรวบรวมและส่งต่อไปทำการรีไซเคิลตามกฎหมายต่อไป นอกจากนี้ทางภาคอุตสาหกรรมของญี่ปุ่นโดยเฉพาะกลุ่มผู้ผลิตแผงพลังงานแสงอาทิตย์ได้มีการเก็บรวบรวมของเสียแผงเหล่านี้ และมีมาตรการเพื่อการสนับสนุนนโยบายการรีไซเคิลของภาครัฐ โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการถอดแยกขนส่ง และแปรรูปของเสียอุปกรณ์การผลิตไฟฟ้า และส่งเสริมให้มีการแยกวัสดุมีค่า เช่น เงิน ทองแดง และแร่ธาตุหายากชนิดต่าง ๆ ออกมา เพื่อเป็นการสงวนแหล่งทรัพยากรของประเทศ เนื่องจากประเทศญี่ปุ่นต้องนำเข้าแร่ธาตุจากต่างประเทศจำนวนมาก

ประเทศญี่ปุ่นได้ทำการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลแผงพลังงานแสงอาทิตย์ดำเนินการโดย The New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) ที่ได้ทำการสร้างเทคโนโลยีการรีไซเคิลแผงต้นทุนต่ำ ถือเป็นจัดการที่เหมาะสมที่สุด โดยพยายามที่จะแยกชิ้นส่วนออกมาให้ได้ในปริมาณมากที่สุด ส่วนวัสดุที่ยากต่อการแยกจะทำไปทิ้งในหลุมฝังกลบ

3. การจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ของสมาคมอุตสาหกรรมพลังงานแสงอาทิตย์ (SEIA) ประเทศสหรัฐอเมริกา

จากรายงานการคาดการณ์พบว่าในปี พ.ศ. 2559 ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์สะสมของประเทศสหรัฐอเมริกาจะมีประมาณ 6,500 – 24,000 ตัน และการกำจัดแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานแล้วจะถูกควบคุมโดยนโยบายของรัฐในการควบคุมของเสียพระราชบัญญัติการอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากร (RCRA) โดยจะมีการทดสอบความเป็นพิษของแผงจากการสกัดด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) หากผ่านการทดสอบจะจัดว่าไม่เป็นอันตรายและไม่ควบคุม

4. การจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศจีน

จากรายงานการคาดการณ์พบว่าในปี พ.ศ. 2559 ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์สะสมของประเทศจีนจะมีประมาณ 8,000 - 100,000 ตัน และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นจำนวนมากจากการพัฒนาการใช้แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่มากขึ้น ทำให้รัฐบาลจีนให้ความสนใจในการพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลแผงพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งในขณะนี้จีนยังไม่มีข้อบังคับสำหรับการจัดการซากแผงพลังงานแสงอาทิตย์โดยเฉพาะ ในปี พ.ศ. 2552 ได้มีการประกาศใช้กฎระเบียบการจัดการขยะเครื่องใช้ไฟฟ้าและผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีข้อกำหนดให้รวบรวมขยะอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และนำไปรีไซเคิลในระบบของส่วนกลาง โดยผู้ผลิตสามารถรวบรวมและรีไซเคิลผลิตภัณฑ์ด้วยตัวเองหรือให้หน่วยงานบริการหลังการขายหรือผู้รับรีไซเคิล นำไปรีไซเคิลหรือกำจัดต่อไป อย่างไรก็ตามปัจจุบันแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยังไม่ได้เข้าสู่ระบบของการจัดการขยะเครื่องใช้ไฟฟ้าและผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากยังมีปริมาณขยะน้อย จึงไม่มีอุตสาหกรรมรีไซเคิลแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ครบวงจร โดยจีนได้มีการสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการรีไซเคิลแผงพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมุ่งเน้นวิธีการรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำและใช้พลังงานต่ำ แบ่งออกเป็น 2 วิธีสำหรับ c-Si PV ภายใต้โครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูงแห่งชาติ (China's National High-tech R&D Programme PV Recycling and Safety Disposal Research) แบ่งออกเป็นวิธีทางกายภาพและวิธีทางความร้อน ในวิธีทางกายภาพจะประกอบด้วยกระบวนการต่างๆรวมถึงการบดและการแยกด้วยความเย็น จะได้ อลูมิเนียม เศษแก้ว ทองแดง ฟิล์ม EVA แผ่นปิดด้านหลัง และ Silicon powder mixture อัตราการรีไซเคิลอยู่ที่ร้อยละ 90 แต่ซิลิกอนไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้เนื่องจากมีความบริสุทธิ์ต่ำ ส่วนวิธีทางความร้อนจะใช้สำหรับการรีไซเคิล ซิลิกอน เงิน และอลูมิเนียม

5. การจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ของสมาคม REMDIA (Milano) ประเทศอิตาลี

ดำเนินการจัดการขยะที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยหลักการจัดการต้องอยู่ภายใต้ระเบียบของ WEEE ซึ่งต้องพิจารณาการจัดการโดยการนำมารีไซเคิลเป็นลำดับแรก ได้มีการอธิบายขั้นตอนการรีไซเคิล (มนัสนันท์ พิบาลวงศ์, 2559) ดังนี้

- 1.) หลังจากการคัดแยกตัวแผงออกจากอุปกรณ์ต่างๆ ให้นำส่วนที่เป็นซิลิกอน และกระจกมาทำการบดให้มีขนาดน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร
- 2.) นำส่วนที่ผ่านการบดแล้วเข้าสู่กระบวนการคัดแยก โดยวัสดุห่อหุ้ม (EVA) ที่เคลือบอยู่จะถูกแยกออก
- 3.) สำหรับวัสดุห่อหุ้ม (EVA) จะถูกเก็บรวบรวมและนำไปกำจัดต่อ ส่วนของซิลิกอนและกระจกจะนำไปทำความสะอาด และนำไปรีไซเคิลต่อไป
- 4.) ชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ และบางส่วนของซิลิกอนที่มีโลหะหนักปนอยู่จะทำการตกตะกอนและปรับค่า pH ให้เป็นกลาง จากนั้นโลหะจะถูกหลอมขึ้นใหม่เป็นของแข็ง และนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตแผงพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไปได้

จากการศึกษากฎหมายของประเทศต่างๆ ทำให้เห็นถึงมาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ของต่างประเทศ เป็นการนำหลักการจัดการของเสียอย่างยั่งยืน (Sustainable Waste Management) มาบัญญัติอย่างเป็นทางการเป็นรูปธรรม จะใช้การนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) การรีไซเคิล (Recycle) และการปรับสภาพกลับมาใช้ใหม่ (Recovery) เป็นอันดับแรก

2.6.2 การจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

การจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยในปัจจุบันส่วนใหญ่ดำเนินการในรูปแบบของการคัดแยกเบื้องต้น และฝังกลบส่วนที่เหลือ โดยการทิ้งลงหลุมฝังกลบขยะอุตสาหกรรมหรือบางกรณีนำไปทิ้งลงหลุมฝังกลบเลย และสำหรับกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการขยะที่ใกล้เคียงกับขยะจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2560) มีดังนี้

1. พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535

พระราชบัญญัตินี้เป็นการวางกรอบนโยบายเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม การกำหนดมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม การวางแผนจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อม การประกาศเขตอนุรักษ์และพื้นที่คุ้มครองสิ่งแวดล้อม แต่ไม่ได้มีบัญญัติเกี่ยวกับการเก็บรวบรวมหรือการรีไซเคิลของเหลือทิ้งประเภทแผงพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่ได้ระบุไว้ในมาตรา 39 ที่ระบุถึงการควบคุมมลพิษเกี่ยวกับมลพิษอื่น และของเสียอันตรายไว้ว่า “ในกรณีที่ไม่มีความหมายบัญญัติไว้ โดยเฉพาะ ให้รัฐมนตรีโดยคำแนะนำของคณะกรรมการควบคุมมลพิษมีอำนาจออกกฎกระทรวงกำหนดชนิดและประเภทของของเสียอันตราย ที่เกิดจากการผลิต การใช้สารเคมี หรือวัตถุอันตรายในกระบวนการผลิต”

2. ประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน

ตามประกาศของคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน มีการแบ่งมาตรการออกเป็น 2 เรื่อง ได้แก่

2.1 มาตรการป้องกัน แก๊ส และติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากเทคโนโลยีแผงโฟโตโวลเทอิกที่เข้าข่ายต้องได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการพลังงานไฟฟ้า พ.ศ. 2557 ($\geq 1,000$ kVA) ได้มีการกำหนดให้ผู้ประกอบกิจการที่เข้าข่ายต้องได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการผลิตไฟฟ้า ปฏิบัติตามมาตรการป้องกันแก๊ส และติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามประมวลหลักการปฏิบัติการ (Code of Practice: CoP) ที่ระบุมาตรการด้านการออกแบบติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และมาตรการด้านการจัดการขยะและกากของเสีย

2.2 มาตรการด้านการออกแบบติดตั้ง และการจัดการขยะและกากของเสียสำหรับผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากเทคโนโลยีแผงโฟโตโวลเทอิกที่เข้าข่ายต้องได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการพลังงานไฟฟ้า พ.ศ. 2557 ($< 1,000$ kVA) ได้มีการกำหนดให้ผู้ประกอบกิจการที่เข้าข่ายต้องได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการผลิตไฟฟ้า ปฏิบัติตามมาตรการป้องกันแก๊ส และติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามประมวลหลักการปฏิบัติการ (Code of Practice: CoP) ที่ระบุมาตรการด้านการออกแบบระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และมาตรการด้านการจัดการขยะและกากของเสีย

ในส่วนของมาตรการด้านการจัดการขยะและกากของเสีย จะเป็นมาตรการที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการและกำจัดกากขยะจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมี 2 กรรมวิธี สำหรับดำเนินการจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ชำรุดหรือหมดอายุการใช้งาน คือ

1. กรณีส่งออกไปจัดการนอกประเทศ ต้องปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎหมายว่าด้วยวัตถุอันตราย และข้อกำหนดระหว่างประเทศ โดยเมื่อมีการดำเนินการแล้วเสร็จต้องแจ้งสำนักงานทราบภายใน 30 วัน นับจากที่มีการส่งออกไปจัดการนอกประเทศ

2. กรณีจัดการภายในประเทศ ต้องดำเนินการฝังกลบในหลุมฝังกลบของเสียอันตราย (Secure Landfill) หรือเผาทำลายด้วยเตาเผาเฉพาะของเสียอันตราย หรือจัดการด้วยวิธีอื่น ให้เป็นไปตามกฎหมายว่าด้วยโรงงาน และต้องแจ้งต่อสำนักงานให้ทราบทุกปี

3.) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

ตามประกาศฯ นี้ผู้ก่อกำเนิดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วต้องไม่ครอบครองสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ไว้ภายในโรงงานเกินระยะเวลา 90 วัน ต้องมีผู้ควบคุมดูแลระบบป้องกันสิ่งแวดล้อมที่มีความรู้เฉพาะด้าน มีการจัดทำแผนป้องกันอุบัติเหตุฉุกเฉิน มีการจัดส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ที่เป็นของเสียอันตรายให้กับผู้รวบรวมและขนส่ง หรือบำบัด กำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเท่านั้น ต้องมีใบกำกับการขนส่งเมื่อนำของเสียอันตรายออกนอกบริเวณโรงงาน ห้ามมิให้นำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงาน เว้นแต่ได้รับอนุญาตจากอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม ต้องทำการตรวจสอบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และต้องรับผิดชอบต่อภาระความรับผิด (liability) จนกว่าผู้บำบัดและกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจะรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วไว้ในครอบครอง ในกรณีสูญหาย เกิดอุบัติเหตุ การทิ้งผิดที่ หรือการลักลอบทิ้ง และการรับคืน สำหรับผู้รับบำบัด และกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วต้องปฏิบัติเกี่ยวกับการจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ตามหลักเกณฑ์และวิธีการที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

4. พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2551 (ฉบับที่ 3)

พระราชบัญญัตินี้ถูกตราขึ้นเพื่อกำหนดถึงการกำหนดนโยบาย มาตรการและแผนการกำกับดูแลวัตถุอันตราย มีการกำหนดปริมาณ องค์ประกอบ คุณสมบัติและสิ่งเจือปน ภาชนะบรรจุ วิธีตรวจและทดสอบภาชนะ ฉลาก การผลิต การนำเข้า การส่งออก การขาย การขนส่ง การเก็บรักษา การกำจัด การทำลาย การปฏิบัติกับภาชนะของวัตถุอันตราย การให้ข้อเท็จจริง การให้ส่งตัวอย่าง หรือ

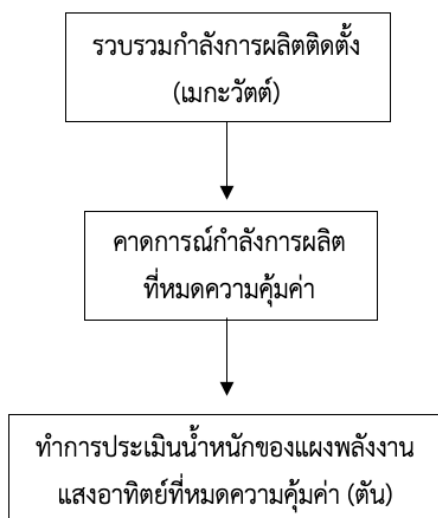
การอื่นใดที่เกี่ยวกับวัตถุอันตรายเพื่อควบคุม ป้องกัน บรรเทา หรือระงับอันตรายที่จะเกิดแก่บุคคล สัตว์ พืช ทรัพย์ หรือสิ่งแวดล้อม โดยต้องคำนึงถึงสนธิสัญญาและข้อผูกพันระหว่างประเทศ ประกอบด้วย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

5. ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

มีการกำหนดหลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขการจัดระบบรับคืน รวบรวม เก็บรักษา การขนส่ง การรีไซเคิล และการกำจัดซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Waste Electrical and Electronic Equipment: WEEE) หรือขยะอิเล็กทรอนิกส์ (E-waste) และของเสียอันตรายจากชุมชนอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ ใช้หลักการการมีส่วนร่วมของทุกภาคส่วนควบคู่กับหลักการ ความรับผิดชอบต่อที่เพิ่มขึ้นของผู้ผลิต (Extended Producer Responsibility: EPR) คือกำหนดให้ ผู้ผลิตและนำเข้าผลิตภัณฑ์เป็นผู้รับผิดชอบหลักในการนำซากผลิตภัณฑ์ฯ กลับมาจัดการอย่างถูกต้อง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2560) (สุจิตรา วาสนาดำรงดี, 2556) (สุจิตรา วาสนาดำรงดี, 2556)

2.7 การคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์

แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน (End-of-life: EoL) สามารถจำแนกได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ แผงที่เสื่อมประสิทธิภาพจนหมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าหรือเรียกว่าการสูญเสียปกติ (Regular loss) หมายถึงการเสื่อมประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเมื่อครบตามกำหนดอายุการใช้งาน และแผงที่ชำรุดเสียหายจากการใช้งาน (Damage) หรือเรียกว่าการสูญเสียก่อนกำหนด (Early loss) จะพิจารณาในส่วนของความล้มเหลวช่วงต้น (Infant failure) ความล้มเหลวช่วงกลาง (Midlife failure) และความล้มเหลวจากการสึกหรอ (Wear-out failure) (Weckend และคณะ, 2016) ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการขนส่ง การติดตั้ง จากเหตุการณ์ไม่คาดคิดที่มีโอกาสเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น ปัญหาสภาพภูมิอากาศ เป็นต้น (Kim และคณะ, 2018) สำหรับการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้ามีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 11 (พิชญ รัชฎาวงศ์ และคณะ, 2559)



รูปที่ 11 ขั้นตอนการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์

2.8 เชื้อเพลิงและการเผาไหม้

2.8.1 การเผาไหม้

การเผาไหม้ หมายถึง การรวมตัวของเชื้อเพลิงกับอากาศอย่างรวดเร็ว ในทางปฏิบัติ ออกซิเจนในอากาศจะรวมตัวกับอนุภาคของเชื้อเพลิงเป็นสารผสมที่มีออกซิเจนปนอยู่และปล่อยความร้อนออกมา ซึ่งในเชื้อเพลิงส่วนมากจะมีธาตุเผาไหม้ได้หลัก 3 ตัว คือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และกำมะถัน (S) โดยการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2551) ปัจจัยที่สำคัญในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง มี 3 ประการ ดังนี้

1. เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ ต้องนานเพียงพอเพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้โดยไม่ถูกอากาศส่วนเกินนำออกไปทางปล่องคว้นก่อนเผาไหม้
2. อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ ต้องสูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง
3. การผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ต้องอยู่ในรูปแบบการไหลผสมแบบปั่นป่วน

2.8.2 การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating Value)

ค่าความร้อน (Heating value) หมายถึง ปริมาณของความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้น ๆ 1 หน่วยมวลสำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งและของเหลว หรือ 1 หน่วยปริมาตรสำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ ภายใต้การทำให้สารที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงเย็นลงถึงอุณหภูมิเริ่มต้นของอากาศและเชื้อเพลิงนั้น มีหน่วยเป็น kJ/kg, MJ/kg หรือ kcal/kg โดยที่ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงยิ่งสูงยิ่งแสดงถึงคุณสมบัติที่ดีของเชื้อเพลิง เครื่องมือที่ใช้ในการหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะใช้บอมบ์ แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) เฉพาะเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งและของเหลว ค่าความร้อนที่ได้จากบอมบ์ แคลอรีมิเตอร์จะให้ความร้อนทั้งหมด (HHV) และสำหรับ

เชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซจะใช้ก๊าซแคลอริมิเตอร์ (Gas Calorimeter) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2551) การแสดงค่าความร้อนมี 2 แบบ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556) ดังนี้

1. ค่าความร้อนทั้งหมด (Gross Calorific Value, GVC) หรือค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV) คือ ปริมาณความร้อนที่ได้หลังการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ภายใต้สภาวะนี้น้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงและที่เป็นผลผลิตจากการเผาไหม้จะอยู่ในสถานะของเหลว ซึ่งค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้รวมกับค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการกลั่นตัวของไอน้ำ ที่เกิดจากไฮโดรเจนเผาไหม้กับออกซิเจนในอากาศ

2. ค่าความร้อนสุทธิ (Net Calorific Value, NCV) หรือค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV) คือ ปริมาณความร้อนที่ได้หลังจากการเผาไหม้สมบูรณ์ ภายใต้สภาวะนี้น้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงและที่เป็นผลผลิตจากการเผาไหม้จะเปลี่ยนรูปจากของเหลวเป็นไอน้ำ ค่าความร้อนที่ได้นี้จะไม่รวมค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการกลั่นตัวของไอน้ำเข้ามาด้วย

ดังนั้นความแตกต่างระหว่างค่าความร้อนทั้งหมดและค่าความร้อนสุทธิ มีค่าเท่ากับความร้อนของการระเหยน้ำที่เกิดระหว่างการเผาไหม้และที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงเริ่มต้น ซึ่งค่าความร้อนทั้งหมด (HHV) สามารถหาได้โดยใช้เครื่องบอมบ์ แคลอริมิเตอร์ และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนสุทธิ (LHV) ดังสมการที่ (1) และ (2) และสำหรับการหาค่าความร้อนสุทธิ (LHV) โดยประมาณสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (3) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553)

$$\text{HHV} = \text{LHV} + 23.95 (9\text{H} + \text{M}) \quad \text{kJ/kg} \quad (1)$$

$$\text{HHV} = \text{LHV} + 5.72 (9\text{H} + \text{M}) \quad \text{kcal/kg} \quad (2)$$

โดยที่ H คือ ปริมาณร้อยละของธาตุไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง

M คือ ปริมาณร้อยละค่าความชื้นในเชื้อเพลิง

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 5,400\text{H} \quad \text{kcal/kg fuel} \quad (3)$$

โดยที่ H คือ เศษส่วนน้ำหนักของธาตุไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง

สำหรับการคำนวณหาค่าความร้อนทั้งหมด (HHV) ของเชื้อเพลิงเมื่อทราบองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเป็นร้อยละของ (C, H, O และ S) สามารถคำนวณได้ตามสมการของดูลอง (Dulong's equation) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2551) ดังนี้

$$\text{HHV} = 33.7\text{C} + 144 \left(\text{H} - \frac{\text{O}}{8} \right) + 9.4\text{S} \quad \text{MJ/kg} \quad (4)$$

$$\text{HHV} = 81\text{C} + 342.5 \left(\text{H} - \frac{\text{O}}{8} \right) + 22.5\text{S} \quad \text{kcal/kg} \quad (5)$$

$$HHV = 14,600C + 62,000 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 4,050S \quad \text{Btu/lb}_m \quad (6)$$

โดยที่ C H O และ S คือ ส่วนประกอบของเศษส่วนน้ำหนักของเชื้อเพลิง

* เมื่อ $C + H + O + S = 1 \text{ kg}$

2.8.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของเชื้อเพลิง (Proximate analysis)

การวิเคราะห์โดยประมาณสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ส่วนที่เผาไหม้ได้ ได้แก่ สารที่ระเหยได้ และคาร์บอนคงตัว และส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือส่วนเฉื่อย ได้แก่ ความชื้น และเถ้า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2551)

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง (Ultimate analysis)

เป็นการวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และอื่น ๆ ซึ่งเป็นธาตุที่ทำปฏิกิริยาแล้วให้พลังงานความร้อน การวิเคราะห์นี้มีประโยชน์ในการคำนวณเกี่ยวกับการเผาไหม้ เช่น การคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องการเพื่อการเผาไหม้ เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2551) ดำเนินการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN Analyzer ตามวิธี ASTM D 5373 โดยเผาเชื้อเพลิงในบรรยากาศของออกซิเจน จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และน้ำ (สุนี ลาวัญยากุล, 2545)

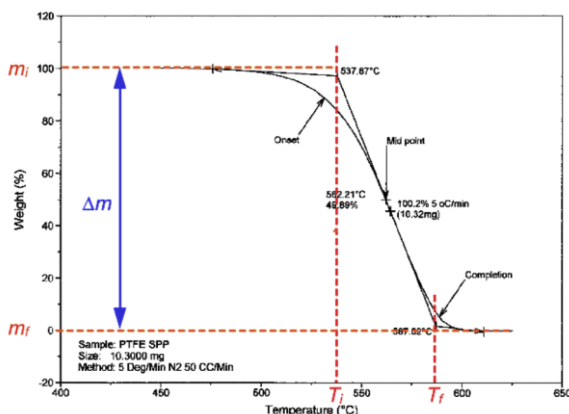
โดยที่ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จะถูกรีดิวส์เป็นก๊าซไนโตรเจน (N_2) จากนั้นปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำจะถูกคำนวณเป็นปริมาณของคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยมี IR (Infrared) cells เป็นเครื่องตรวจวัด สำหรับก๊าซไนโตรเจน (N_2) จะถูกตรวจสอบโดย TC (Thermal conductivity) cell แล้วคำนวณเป็นปริมาณไนโตรเจน สำหรับปริมาณกำมะถันจะปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การหาปริมาณกำมะถันหาได้ตามวิธี ASTM D 3177 (สุนี ลาวัญยากุล และศิริวรรณ ศิลป์สกุลสุข, 2545)

2.8.4 การทดสอบทางความร้อนโดยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

เทคนิค TGA เป็นการวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน โดยวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุหรือสารตัวอย่างในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องซึ่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะกับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุ หรือสารตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซ หรือการระเหยของน้ำ การตกผลึกเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะ การแตกตัวของวัสดุ หรือแม้กระทั่งการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือปริมาณสารสัมพันธ์ (พัทธนันท์ สงเดช, 2557)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้มวลของวัสดุ หรือสารตัวอย่างที่ถูกบรรจุอยู่ในบรรยากาศที่ถูกควบคุมจะถูกบันทึกน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง กราฟที่ได้เรียกว่า TGA Thermogram หรือ Thermal

Decomposition curve เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมวลเทียบกับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 12 โดยที่ m_i คือ น้ำหนักมวลเริ่มต้นของสารตัวอย่าง m_f คือ น้ำหนักมวลที่เหลือหลังการสลายตัว T_i , T_{onset} คือ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่าง และ T_f คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่าง (เฉลิมชัย ไชยธรรมรัตน์, 2553)

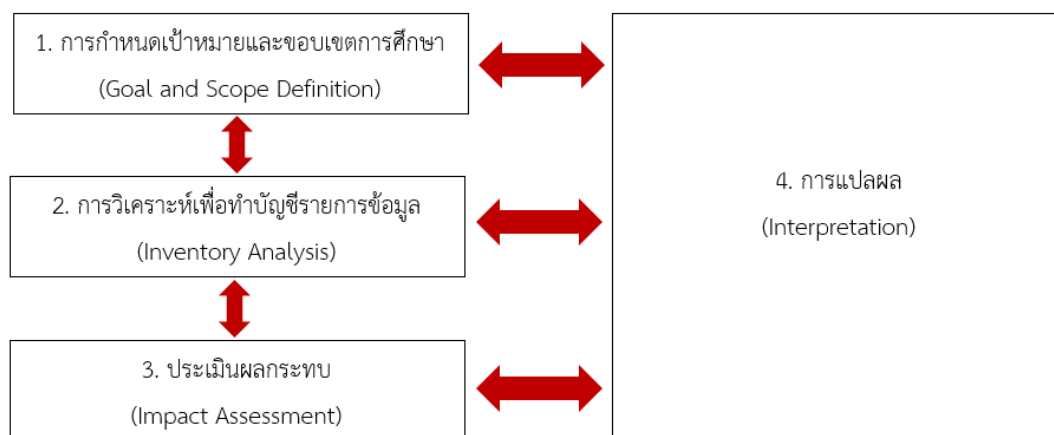


รูปที่ 12 กราฟการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมิ

ที่มา: (www.iitk.ac.in/che/PG_research_lab/pdf/resources/TGA-DSC-reading-material.pdf)

2.9 การประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment: LCA) เป็นเครื่องมือการจัดการสิ่งแวดล้อม ในการความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร (Frischknecht และคณะ, 2015) ใช้หลักการวิเคราะห์และประเมินเชิงปริมาณของการใช้ทรัพยากร มลพิษที่เกิดขึ้นและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อันเนื่องมาจากการผลิตและบริการ โดยพิจารณาตลอดวัฏจักรชีวิตตั้งแต่การจัดการวัตถุดิบ การผลิต การขนส่ง การใช้ผลิตภัณฑ์ รวมทั้งการนำไปกำจัด ขั้นตอนที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน (คุณัญญา ทัดเทียมพร, 2560) ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา (Goal & Scope definition)

เป็นขั้นตอนแรกของการดำเนินงาน ซึ่งมีความสำคัญมาก ประกอบด้วย เป้าหมายและขอบเขตของ

ผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษา ขอบเขตระบบ (System boundary) หน่วยการศึกษา (Functional unit) ซึ่งจะ

ต้องระบุอย่างละเอียด ชัดเจน และครอบคลุมกับผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษา สำหรับขอบเขตการประเมินวัฏจักรมี 4 รูปแบบ ดังนี้

- 1.) Gate to gate เป็นการพิจารณาเฉพาะกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งจากทั้งสายโซ่
- 2.) Cradle to gate เป็นการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต ตั้งแต่การสกัดวัตถุดิบจนได้ผลิตภัณฑ์ออกมา แต่ไม่รวมขั้นตอนการใช้งานหรือกำจัดซาก
- 3.) Cradle to grave เป็นการประเมินผลกระทบเต็มรูปแบบตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ การผลิต การนำไปใช้งานตลอดจนการกำจัดซากหลังหมดอายุการใช้งาน
- 4.) Cradle to cradle เป็นรูปแบบพิเศษของ Cradle to grave ในกรณีที่ขั้นตอนของการกำจัดซากหลังหมดอายุการใช้งานเป็นขั้นตอนของการรีไซเคิล ซึ่งจะทำให้ได้สินค้าเดิมออกมา

ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์เพื่อทำบัญชีรายการข้อมูล (Inventory analysis)

เป็นการจำแนกและเก็บรวบรวมข้อมูลสิ่งที่น่าสนใจที่นำเข้าระบบ (Input) และสิ่งที่ผลิตได้ (Output) แล้วนำไปสร้างแผนผังแบบจำลองเส้นทางการไหลของขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาถึงการใช้ทรัพยากรและพลังงานรวมถึงการปล่อยของเสียอีกด้วย

ขั้นตอนที่ 3 การประเมินผลกระทบ (Impact assessment)

เป็นการนำข้อมูลจากการวิเคราะห์เพื่อทำบัญชีรายการข้อมูล สำหรับประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนที่ 4 การแปลผลการศึกษา (Interpretation)

เป็นการนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาทำบัญชีรายการข้อมูล (Inventory analysis) และการประเมินผลกระทบ (Impact assessment) รวมกันเพื่อสรุปผลและจัดทำข้อเสนอแนะ จากการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ผลที่สรุปได้จะต้องมีความสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษาที่กำหนดไว้

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 การเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์จากประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า

Jordan และคณะ (2012) ศึกษาการเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนที่ติดตั้งก่อนและหลังปี 2000 โดยทำการเก็บข้อมูลปริมาณแผงพลังงานแสงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่าอัตราการเสื่อมสภาพของประเทศสวีเดนทางตอนเหนืออยู่ที่ร้อยละ 0.15 ต่อปี สเปนอยู่ที่ร้อยละ 0.5 และ 1.0 ต่อปี ลิเบียอยู่ที่ร้อยละ 1.0 ต่อปี สหรัฐอเมริกา รัฐออริกอนอยู่ที่ร้อยละ 0.6 และ 1.0 ต่อปี และรัฐฟลอริดา น้อยกว่าร้อยละ 1.0 ต่อปี และเมลเบิร์น ออสเตรเลียอยู่ที่ร้อยละ 0.4 ต่อปี สามารถสรุปรวมได้จากการศึกษาการเก็บข้อมูลร้อยละ 78 ของข้อมูลทั้งหมดรายงานว่า อัตราการเสื่อมสภาพมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1.0 ต่อปี

Park และคณะ (2013) ศึกษาการชำรุดที่เกิดจากการเปลี่ยนสีและการหลุดลอกของวัสดุห่อหุ้มในแผง จากการตรวจสอบแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอายุการใช้งาน 25 ปี กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยลดลงร้อยละ 17.9 เมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น และพบว่าการเปลี่ยนสีมีผลต่อการเสื่อมสภาพของตัวเซลล์ อีกทั้งการหลุดลอกของวัสดุห่อหุ้มนี้ จะส่งผลต่อการกัดกร่อนของโลหะบัดกรีในบริเวณใกล้เคียง ถือเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้แผงชำรุดก่อนหมดอายุการใช้งาน

International Energy Agency (IEA) (2018) พิจารณาแผนพลังงานแสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานปกติอยู่ที่ 30 ปีที่ติดตั้งในหลายประเทศ เช่น จีน ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา เยอรมนี อิตาลี และอินเดีย เป็นต้น พบว่าแผนพลังงานแสงอาทิตย์เกิดเป็นของเสียเร็วกว่าอายุการใช้งานที่ระบุไว้ เนื่องจากความเสียหายระหว่างขั้นตอนการขนส่งและการติดตั้ง ความล้มเหลวเริ่มต้นหลังจากการดำเนินการ ความล้มเหลวทางเทคนิคและทางกายภาพในระหว่างการดำเนินการเกิดจากสภาพแวดล้อมที่รุนแรง และปัจจัยภายนอกที่ไม่คาดคิดรวมถึงภัยธรรมชาติ

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการเสื่อมสภาพของแผนพลังงานแสงอาทิตย์จากประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า ทำให้ผู้วิจัยทราบว่าอัตราการเสื่อมสภาพของแผงแต่ละพื้นที่ไม่เท่ากัน และอัตราการเสื่อมสภาพมักมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1.0 ต่อปี ตามรายงานของ (Jordan และคณะ, 2012) ซึ่งการเสื่อมสภาพอาจเกิดจากปัจจัยภายในของตัวแผง หรือเกิดจากปัจจัยภายนอกตามรายงาน (International Energy Agency (IEA), 2018) จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเก็บรวบรวมข้อมูลอัตราการเสื่อมสภาพของแผงจากกลุ่มตัวอย่างในงานวิจัยนี้ด้วย

2.10.2 การคาดการณ์ปริมาณของเสียแผนพลังงานแสงอาทิตย์

Paiano (2015) ทำการวิเคราะห์ปริมาณและคุณภาพของวัสดุในแผนพลังงานแสงอาทิตย์ และได้ทำการระบุวัสดุผ่านการไหลของวัสดุในช่วงที่แผนพลังงานแสงอาทิตย์หมดอายุในการใช้งาน โดยการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงที่อาจเกิดขึ้นในประเทศอิตาลีใน 2 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงแรกเป็นข้อมูลแผงที่ติดตั้งจริงในปี 1987 – 2013 และช่วงที่สองเป็นการคาดการณ์แผนพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะติดตั้งในอนาคตในปี 2014 – 2025 กำหนดอายุการใช้งานเฉลี่ย 25 ปี โดยเก็บข้อมูลจากการคำนวณจากการเติบโตเฉลี่ยต่อปี และข้อมูลการติดตั้งแผงในหน่วยเมกะวัตต์ต่อเทคโนโลยีต่อปี พบว่าปริมาณของเสียแผงทั้งหมดที่เกิดขึ้นในปี 2012 – 2038 มีปริมาณ 1,957,099 ตัน และในปี 2039 – 2050 มีปริมาณของเสียแผงอยู่ที่ 6,281,868 ตัน รวมปริมาณของเสียจากแผงที่ติดตั้งตั้งแต่ปี 1987 – 2025 มีปริมาณ 8,238,967 ตัน เป็นแผงชนิดผลึกซิลิกอนสูงสุด คิดเป็น 4,843,891 ตัน และมีองค์ประกอบของวัสดุส่วนใหญ่เป็นกระจก อลูมิเนียม และอีวีเอมีปริมาณ 3,592,229 498,921 และ 317,275 ตันตามลำดับ และปริมาณวัสดุอื่น ๆ ได้แก่ ซิลิกอน ทองแดง และเงินอยู่ที่ 162,270 27,610 และ 242 ตันตามลำดับ

Peeters และคณะ (2017) ทำการวิเคราะห์ปริมาณของเสียแผงที่รวบรวมไว้ในโปรแกรม PV CYCLE ของยุโรป โดยทำการแบ่งการสถานการณ์การเกิดของเสียเป็น 2 สถานการณ์ ตามอายุการใช้

งานเฉลี่ย และที่ชำรุดก่อนหมดอายุการใช้งาน พบว่ามีของเสียแผงชนิดผลึกซิลิกอนสูงถึง 22,000 ตันต่อปี มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกระจก และอลูมิเนียม

Kim และคณะ (2018) ทำการประมาณการปริมาณของเสียแผงที่เกิดขึ้น องค์ประกอบวัสดุของของเสีย และปริมาณโลหะที่สามารถรีไซเคิลได้ ในประเทศเกาหลีใต้ ในปี 2080 โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายของ Weibull ใช้ปัจจัยรูปร่าง (β) เท่ากับ 5.3759 และ 3.5 สำหรับการสูญเสียปกติและการสูญเสียก่อนกำหนด อายุการใช้งาน ที่ 25 และ 30 ปี โดยทำการวิเคราะห์ตามสถานการณ์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ RL-1 ($\beta=5.3759$, 30 ปี) RL-2 ($\beta=5.3759$, 25 ปี) EL-1 ($\beta=3.5$, 30 ปี) และ EL-2 ($\beta=3.5$, 25 = ปี) ผลการศึกษาพบว่าของเสียแผงสะสมที่ติดตั้งในปี 2080 ภายใต้สถานการณ์ EL-2 RL-2 EL-1 และ RL-1 จะมีปริมาณเท่ากับ 5,764,000 5,538,000 4,574,000 และ 4,299,000 ตันตามลำดับ และสำหรับองค์ประกอบวัสดุของของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจะพิจารณาการสถานการณ์ EL-2 เนื่องจากเกิดขยะปริมาณมากที่สุดและเกิดเร็วที่สุด

Sica และคณะ (2018) ทำการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วโลก โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายของ Weibull และแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 สถานการณ์คือ การสูญเสียปกติและการสูญเสียก่อนกำหนด สมมติอายุการใช้งานของแผงพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ที่ 30 ปี พบว่าภายในปี 2030 จะเกิดของเสียแผงสะสมอยู่ที่ 1.7 ล้านตัน นอกจากนี้วัสดุที่สามารถนำกลับมาได้จากของเสียแผงสามารถสร้างมูลค่าสะสมได้สูงถึง 540 ล้านยูโร และอาจเพียงพอสำหรับการผลิตแผงพลังงานแสงอาทิตย์ใหม่ได้ 72 ล้านแผง ที่มีความจุมรวมอยู่ที่ 21 กิกะวัตต์ของกำลังการผลิตไฟฟ้า ดังนั้นจากงานวิจัยนี้พบว่าการนำกลับวัสดุที่สามารถนำกลับไปผลิตแผงได้ จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการถลุงแร่และช่วยให้เกิดระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนได้

Mahmoudi และคณะ (2019) ทำการคาดการณ์ปริมาณแผงที่เลิกใช้งานระหว่างปี 2031 – 2047 โดยอาศัยข้อมูลการติดตั้งจริงในปี 2001 – 2018 พบว่าของเสียสะสมที่จะเกิดในปี 2047 มีประมาณ 1 ล้านตัน ส่วนใหญ่เป็นกระจก อลูมิเนียม เหล็ก และทองแดงปริมาณ 541,209 116,483 71,329 และ 8,375 ตัน ตามลำดับ การนำกลับวัสดุของแผงพลังงานแสงอาทิตย์สามารถนำไปสู่การสร้างมูลค่าเกือบ 1.2 พันล้านดอลลาร์ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการนำกลับของวัสดุที่จะนำไปสู่ระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน

Gautam และคณะ (2021) คาดการณ์ปริมาณขยะแผงพลังงานแสงอาทิตย์ และอุปกรณ์ประกอบระบบ (BOS) รวมถึงปริมาณวัสดุที่นำกลับมาได้จากการรีไซเคิล เพื่อนำไปสู่เศรษฐกิจ

หมุนเวียนของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในประเทศอินเดีย จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งแผงในอินเดียจะมีปริมาณ 347.5 กิกะวัตต์ภายในปี 2030 และในระหว่างปี 2020 – 2047 จะเกิดของเสียรวมประมาณ 2.95 ล้านตัน คิดเป็นกระจก กรอบอลูมิเนียม ทองแดงจากสายไฟ และซิลิกอนคิดเป็นร้อยละ 51 31 6 และ 1 ตามลำดับ

พิชญ รัชฎาวงศ์ และคณะ (2559) ได้ทำการคาดการณ์ปริมาณแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2545 – 2558 และแบ่งกำลังการผลิตติดตั้งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วน 3,000 เมกะวัตต์ที่หนึ่ง พบว่าจะมีปริมาณของเสียสะสมรวม 354,924 – 519,217 ตัน ทำการเปรียบเทียบกับ 3,000 เมกะวัตต์ที่สองที่มีปริมาณของเสียสะสมรวม 271,377 – 275,623 ตัน สาเหตุจากการติดตั้งแผงทดแทนแผงที่มีการชำรุด หรือเสียหายระหว่างการใช้งานและมีการทิ้งแผงที่ชำรุดออกไป และคาดว่าจะมีการสะสมของของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นไปอีกในอนาคต

ศุภย์วิจักกสิกร (2563) กล่าวว่า การกำจัดซากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์หลังหมดอายุการใช้งาน ซึ่งมีอายุเฉลี่ยประมาณ 20 ปี โดยประเทศไทยจะต้องเผชิญกับประเด็นปัญหาดังกล่าวในอีกระยะ 3 ปีข้างหน้า ซึ่งคาดว่าจะมีของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ปริมาณ 488 ตัน และมีปริมาณสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องถึง 122,408 ตันในปี พ.ศ. 2581 และหากไม่มีมาตรการการกำจัดที่เหมาะสม ของเสียดังกล่าวจะการสะสมเป็นปริมาณมากในอนาคต เกือบ 5 แสนตัน และมีโอกาสส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในวงกว้าง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผง ผู้วิจัยได้นำข้อมูลในส่วนของอายุการใช้งานเฉลี่ยของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ 20 ปีของ (ศุภย์วิจักกสิกร, 2563) มาใช้ ทำการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงตามการสูญเสียปกติโดยอาศัยข้อมูลการติดตั้งจริงตาม (Sica และคณะ, 2018) และ (Mahmoudi และคณะ, 2019) ทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักเฉลี่ยของแผงต่อปี โดยใช้วิธีการคำนวณปริมาณของเสียแผงที่จะเกิดขึ้นตาม (Paiano, 2015) และจากการรายงานของ (พิชญ รัชฎาวงศ์ และคณะ, 2559) พบว่ามีแผงที่มีการชำรุดหรือเสียหายในระหว่างการใช้งาน และมีการทิ้งแผงเหล่านี้ออกไปด้วย ผู้วิจัยจึงทำการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงที่รวมการติดตั้งทดแทนด้วยเพื่อให้ครอบคลุมในส่วนของการคาดการณ์ทั้งปริมาณของเสียแผง และปริมาณวัสดุองค์ประกอบที่จะเกิดขึ้นด้วย รวมทั้งปริมาณวัสดุที่สามารถนำกลับมาได้จากการรีไซเคิลเพื่อนำไปสู่เศรษฐกิจหมุนเวียนของแผงตามงานวิจัยของ (Gautam และคณะ, 2021)

2.10.3 การจัดการแผนพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน

Fthenakis (2000) ศึกษาความเป็นไปได้ของแนวทางการรีไซเคิลของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน โดยการคัดแยกอย่างง่ายและนำส่วนที่เหลือไปทำการบด ใช้กระบวนการด้านโลหวิทยาในการนำกลับโลหะจากของเสียแผง และกระบวนการฝังกลบ โดยพิจารณาค่าใช้จ่ายของการเก็บรวบรวม การกำจัดหรือการรีไซเคิล และเปรียบเทียบต้นทุนของการรีไซเคิลและการฝังกลบ พบว่ากรณีของการใช้งานที่กระจายและการขนส่งจากสถานที่ติดตั้งแผงไปยังโรงกลึงแร่มีต้นทุนที่อยู่ที่ประมาณ 0.11 ดอลลาร์สหรัฐต่อวัตต์ และต้นทุนของการรีไซเคิลอยู่ที่ประมาณ 0.08 ดอลลาร์สหรัฐต่อวัตต์ สำหรับต้นทุนของการฝังกลบอยู่ที่ประมาณ 0.01 ดอลลาร์สหรัฐต่อวัตต์ สำหรับของเสียที่ไม่เป็นอันตราย และ 0.23 ดอลลาร์สหรัฐต่อวัตต์ สำหรับของเสียที่เป็นอันตราย ดังนั้นจากงานวิจัยนี้พบว่าการฝังกลบของเสียอันตรายมีต้นทุนสูงที่สุด รองลงมาคือการขนส่งของเสียแผงจากสถานที่ติดตั้งไปยังโรงกลึงแร่ในสหรัฐอเมริกา

Choi และคณะ (2014) พบว่ามีความจำเป็นต้องใช้เวลาในการสะสมรวบรวมแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานให้เพียงพอจึงจะมีความคุ้มค่า รวมถึงราคาตลาดของวัสดุที่สามารถนำกลับมาได้ เป็นอีกเป็นปัจจัยในการตัดสินใจความสามารถในการทำกำไรของกระบวนการรีไซเคิล จากการดำเนินการแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการนำกลับกระจกที่มีปริมาณมากที่สุด และโลหะที่มีราคาสูงจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน

Cucchiella และคณะ (2015) พิจารณามูลค่าด้านการเงินของกระบวนการรีไซเคิลแผงพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้ WEEE ใช้กรณีศึกษาของประเทศอิตาลี มีปริมาณของเสียแผงอยู่ที่ 185 และ 1,480 ตันต่อปี สำหรับโรงไฟฟ้าระดับนำร่อง และที่เป็นอุตสาหกรรม ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าการลงทุนของการรีไซเคิลสามารถช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ดี แต่ในทางเศรษฐกิจยังไม่คุ้มค่า เนื่องจากประเทศอิตาลีมีปริมาณของเสียแผงไม่มากพอ ดังนั้นในกระบวนการรีไซเคิลจึงจำเป็นต้องพิจารณาในเรื่องของปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นให้มีปริมาณที่เพียงพอซึ่งจะทำให้ต้นทุนต่อหน่วยของกระบวนการรีไซเคิลลดลง ช่วยให้เกิดความยั่งยืนในแง่ของทรัพยากรที่มีอยู่ และลดความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นจากงานวิจัยนี้เห็นได้ชัดว่าปริมาณของเสียแผงมีความสำคัญส่งผลให้ต้นทุนต่อหน่วยของการรีไซเคิลลดลงได้

Tao และคณะ (2015) ทำการศึกษาการจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน และชนิดฟิล์มบางที่หมดอายุการใช้งาน โดยพิจารณา 3 แนวทาง ได้แก่ การรีไซเคิลของเสียจากการ

ผลิตแผง การรีไซเคิลวัสดุจากแผงที่หมดอายุการใช้งานเพื่อนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตใหม่ และการนำแผงกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการรีไซเคิลวัสดุต่าง ๆ จากแผงที่หมดอายุการใช้งานมีผลกระทบต่อภาระสิ่งแวดล้อม แต่ในปัจจุบันยังขาดแรงจูงใจทางเศรษฐกิจในการรีไซเคิลแผง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากที่จะทำให้เศรษฐกิจการรีไซเคิลวัสดุจากของเสียแผงอยู่รอดได้ ดังนั้นจากงานวิจัยนี้พบว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น และความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการจัดการของเสียแผง

Huang และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษากระบวนการรีไซเคิลแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนในการกำจัดและนำกลับวัสดุต่าง ๆ กลับมาใช้ใหม่โดยไม่เหลือวัสดุที่ต้องนำไปฝังกลบ พบว่าสามารถนำกลับวัสดุได้มากกว่าร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก รายได้จากการนำกลับวัสดุและส่งต่อไปยังอุตสาหกรรมผลิตแผงพลังงานแสงอาทิตย์สามารถสร้างรายได้มากกว่า 12 เหรียญต่อแผง ซึ่งมีความคุ้มค่าและช่วยทำกำไรให้ธุรกิจการรีไซเคิลได้ ด้วยเหตุนี้ กระบวนการรีไซเคิลที่ใช้สำหรับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนจึงมีความยั่งยืนในทางเทคนิค สิ่งแวดล้อม และการเงิน ดังนั้นจากงานวิจัยนี้พบว่า การดำเนินการแยกโลหะข้างในตัวแผ่นเซลล์ออกมาได้ ต้องทำในประเทศที่มีอุตสาหกรรมผลิตแผ่นซิลิกอนเกรดสำหรับการทำแผงพลังงานแสงอาทิตย์

Lunardi และคณะ (2018) ศึกษาความเป็นไปได้ของการพัฒนาการจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน ซึ่งของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์สะสมทั่วโลกสูงถึง 250,000 ตัน ภายในสิ้นปี 2016 โดยการเปรียบเทียบวิธีการจัดการทั้ง 5 วิธี ได้แก่ การฝังกลบ การนำแผงกลับมาใช้ใหม่ การรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางความร้อน ทางเคมี และทางกล จากการศึกษาพบว่าของเสียแผงส่วนใหญ่ยังคงจัดการโดยการฝังกลบ เพราะกระบวนการรีไซเคิลยังไม่มีความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ และถูกระเบียบในประเทศส่วนใหญ่ยังไม่เป็นที่ยอมรับ

Deng และคณะ (2019) ศึกษาวิธีการจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนที่หมดอายุการใช้งานทั้ง 4 วิธี ได้แก่ การฝังกลบ การรีไซเคิลกระจก การรีไซเคิลด้วยวิธีทางกล และวิธีทางความร้อน และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ เพื่อประเมินต้นทุนและรายได้ที่เกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่า การฝังกลบเป็นตัวเลือกที่มีค่าใช้จ่ายถูกที่สุดแต่ไม่ยั่งยืนในระยะยาว ส่วนการรีไซเคิลถึงแม้จะมีต้นทุนที่ค่อนข้างสูง แต่จะได้วัสดุต่าง ๆ ออกมาที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้

Gönen และคณะ (2019) ทำการรีไซเคิลวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของแผง ได้แก่ กระจก ทองแดง อลูมิเนียม และเงิน แทนการนำไปฝังกลบ โดยใช้กระบวนการทางเคมี ทางกล และใช้เลเซอร์ ในการดำเนินการจะพิจารณาที่ปริมาณวัสดุที่ได้ มูลค่าโดยรวมของวัสดุที่สามารถนำกลับมาได้ และพบว่าหากนำวัสดุเหล่านี้ไปเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่จะช่วยเพิ่มมูลค่าให้สูงขึ้น และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ เช่น ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการหาวัดถุดิบลงได้

Mahmoudi และคณะ (2020) กล่าวถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นและความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจของการจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนที่หมดอายุการใช้งานในประเทศออสเตรเลีย ได้นำวิธีการรีไซเคิล 2 วิธีมารวมกัน ได้แก่ กระบวนการทางความร้อน และกระบวนการทางเคมี ผลลัพธ์โดยรวมของการรีไซเคิลยืนยันถึงการลดภาระด้านสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับภาระที่เกิดจากการฝังกลบ และจากผลการวิเคราะห์ ด้านเศรษฐศาสตร์ทำให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของโรงงานรีไซเคิลที่มีปริมาณของเสียแผงอยู่ที่ 20,000 ตัน ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณที่จะเกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2578 เนื่องจากปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ต่อปีมีเพียงพอ ไม่ส่งผลกระทบต่อทางการเงิน มีความเป็นไปได้ของการดำเนินการ ดังนั้นจากงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงความสมเหตุสมผลสำหรับการจัดการที่ยั่งยืน และปัจจัยด้านการเงินที่จะช่วยให้ระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนได้

พิชญ รัชฎาวงศ์ และคณะ (2559) พบว่าการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยในปัจจุบันส่วนใหญ่ดำเนินการตามแนวทางที่ 1 คือ การคัดแยกเบื้องต้น และฝังกลบส่วนที่เหลือ โดยการทิ้งลงหลุมฝังกลบขยะอุตสาหกรรม หรือบางกรณีนำไปทิ้งลงหลุมฝังกลบเลย เนื่องจากปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นในตอนนี้ยังมีปริมาณไม่มากพอ และส่งผลให้การรีไซเคิลเพื่อนำกลับวัสดุ เช่น กระจก หรือวัสดุมีค่าจึงยังไม่มี ความคุ้มค่าที่มากพอ และในประเทศไทยมีโรงงานปลายทางที่มารองรับวัสดุที่นำกลับมาได้ไม่ครบทั้งระบบหรือไม่ครบห่วงโซ่อุปทาน

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการจัดการแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน ผู้วิจัยสามารถประยุกต์ใช้ข้อมูลในส่วนของดำเนินการจัดการกับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานจาก (พิชญ รัชฎาวงศ์ และคณะ, 2559) ได้ โดยพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น (LCA) (Tao และคณะ, 2015) (Tao และคณะ, 2015) (Mahmoudi และคณะ, 2020) และความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจก็เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการดำเนินการจัดการ ซึ่งพิจารณาระหว่างต้นทุนและรายได้ของกระบวนการที่ใช้ (Choi และคณะ, 2014) (Cucchiella และคณะ, 2015) ทำ

ให้ผู้วิจัยได้ตระหนักในเรื่องของปริมาณของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องมีปริมาณที่เพียงพอสำหรับแต่ละวิธีการจัดการ ซึ่งจะช่วยให้ต้นทุนต่อหน่วยของกระบวนการจัดการลดลง ช่วยให้เกิดความยั่งยืนและนำไปสู่เศรษฐกิจหมุนเวียนได้

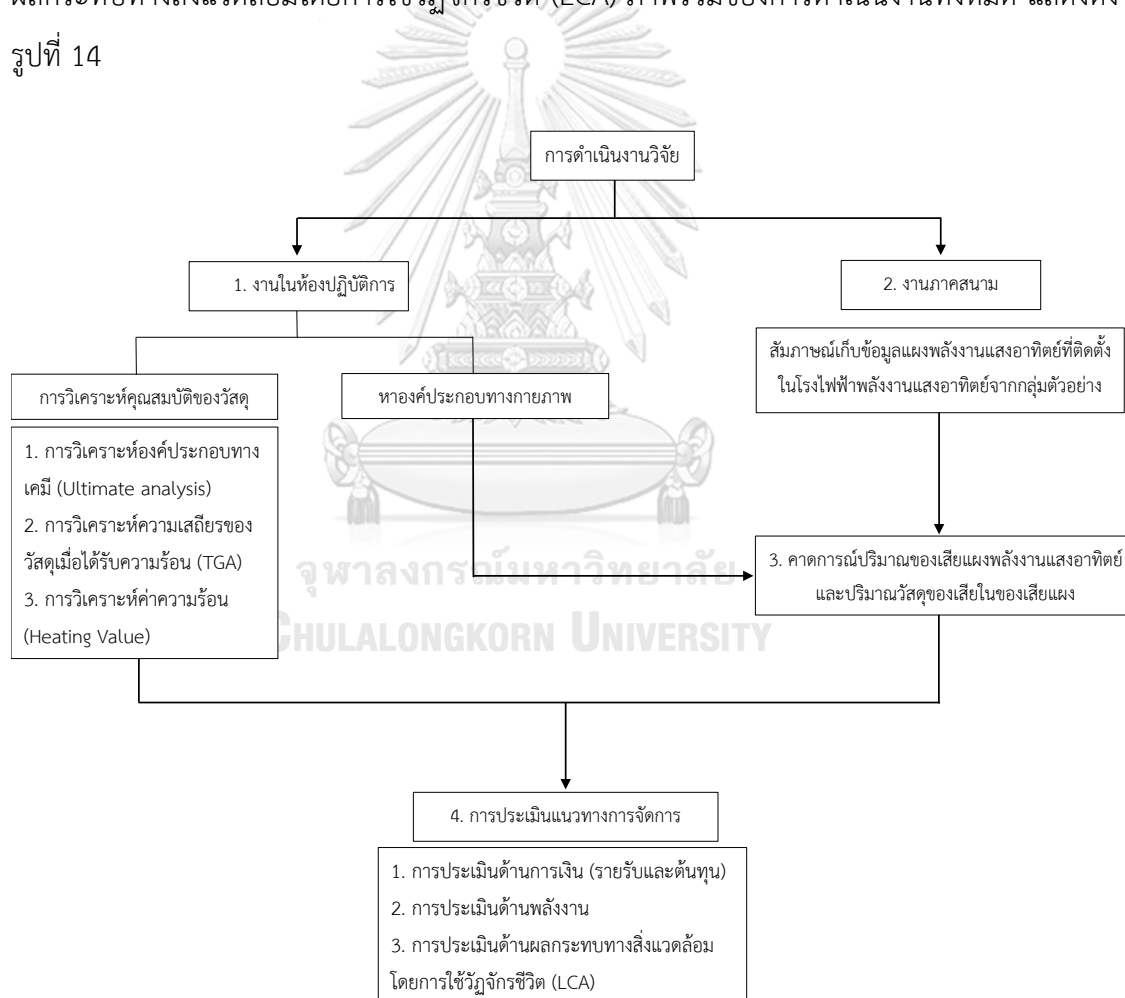
จากการทบทวนวรรณกรรมในการศึกษาครั้งนี้เป็นการรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ ผู้ศึกษาได้ทราบถึงสถานการณ์การใช้พลังงานทดแทน โดยเฉพาะสถานการณ์การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2563 ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดและองค์ประกอบวัสดุของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ และเนื้อหาด้านการวิเคราะห์หาค่าความร้อน รวมถึงการจัดการของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ผู้ศึกษาได้ทราบประเด็นที่ต้องการศึกษา และสามารถนำข้อเท็จจริงจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนี้ไปสู่ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยต่อไป



บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินงาน ดังนี้ 1. งานในห้องปฏิบัติการ เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุผงทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ 2. งานภาคสนาม เป็นการสัมภาษณ์เก็บข้อมูลของผง 3. การคาดการณ์ปริมาณของเสียผงและปริมาณวัสดุในของเสียผง โดยใช้ข้อมูลจากส่วนที่ 1. และ 2. ในการประเมินปริมาณของเสีย และ 4. การประเมินแนวทางการจัดการของเสียผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน โดยจะพิจารณาในด้านการเงิน (รายได้และต้นทุน) ศักยภาพด้านพลังงาน และผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมโดยการใช้วัฏจักรชีวิต (LCA) ภาพรวมของการดำเนินงานทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ภาพรวมของการดำเนินการทั้งหมด

3.1 การดำเนินงานในห้องปฏิบัติการ

3.1.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้

1. แผงพลังงานแสงอาทิตย์
 3. เตาให้ความร้อน (hotplate)
 4. มีดคัตเตอร์, กรรไกร, แผ่นรองตัด, ถุงพลาสติก
 5. เทอร์โมคัปเปิล
 6. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง และ 1 ตำแหน่ง
 7. เตาเผาความร้อนสูง ยี่ห้อ Nabertherm รุ่น Muffle furnace L 9/11/SKM
- 3.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์
1. ดำเนินการโดยใช้แผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน 2 ยี่ห้อ มีสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 8 และ 9

ตารางที่ 8 คุณสมบัติทางกายภาพของแผงชนิดผลึกซิลิกอนยี่ห้อที่ 1 ที่ใช้ในการศึกษานี้

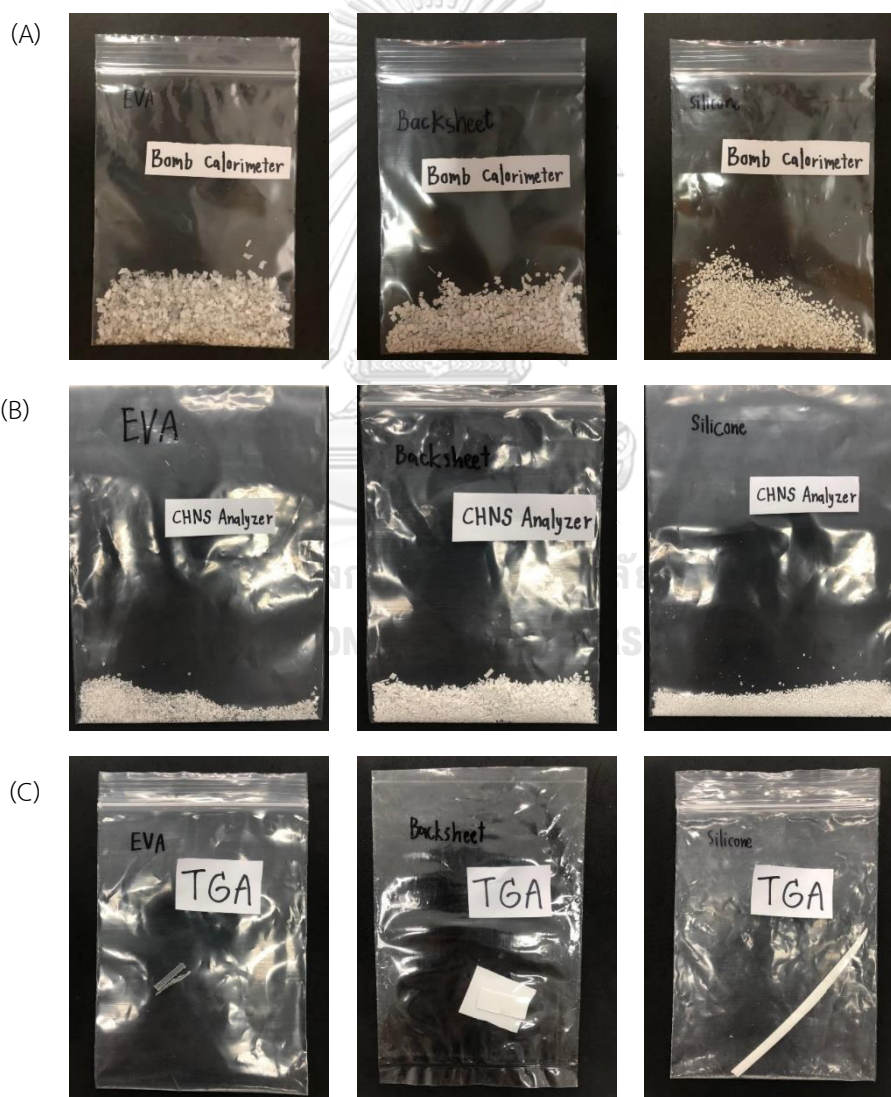
| | |
|-----------------------------|-----------------|
| กำลังวัตต์สูงสุด | 170 |
| ขนาดแผง (มิลลิเมตร) | 1580 x 808 x 35 |
| น้ำหนักแผง (กิโลกรัม) | 15.5 |
| วัตต์ต่อน้ำหนักแผง | 10.97 |
| วัตต์ต่อพื้นที่ (ตารางเมตร) | 132.8 |

ตารางที่ 9 คุณสมบัติทางกายภาพของแผงชนิดผลึกซิลิกอนยี่ห้อที่ 2 ที่ใช้ในการศึกษานี้

| | |
|-----------------------------|------------------|
| กำลังวัตต์สูงสุด | 390 |
| ขนาดแผง (มิลลิเมตร) | 2008 x 1002 x 40 |
| น้ำหนักแผง (กิโลกรัม) | 22.5 |
| วัตต์ต่อน้ำหนักแผง | 17.33 |
| วัตต์ต่อพื้นที่ (ตารางเมตร) | 198.84 |

2. การเตรียมวัสดุห่อหุ้ม (EVA) แผ่นปิดด้านหลัง (Backsheet) และวัสดุเชื่อมประสานหรือซิลิโคน (Adhesive) ดังนี้

ทำการแยกซิลิโคนบริเวณขอบที่ติดกับกรอบอลูมิเนียมด้วยมีดคัตเตอร์ จากนั้นแยกแผ่นปิดด้านหลังโดยใช้เตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 – 230 องศาเซลเซียส เมื่อแยกแผ่นปิดด้านหลังออกแล้ว จะสามารถแยกวัสดุห่อหุ้มทางด้านหลังโดยใช้มีดคัตเตอร์ จากนั้นตัดตัวอย่างให้มีขนาด 0.5 – 1 เซนติเมตร น้ำหนัก 1 กรัม สำหรับการวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Heating value) และการหาองค์ประกอบทางเคมี (Ultimate analysis) และเตรียมตัวอย่างน้ำหนัก 10 – 15 มิลลิกรัม สำหรับการวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA ดังรูปที่ 15

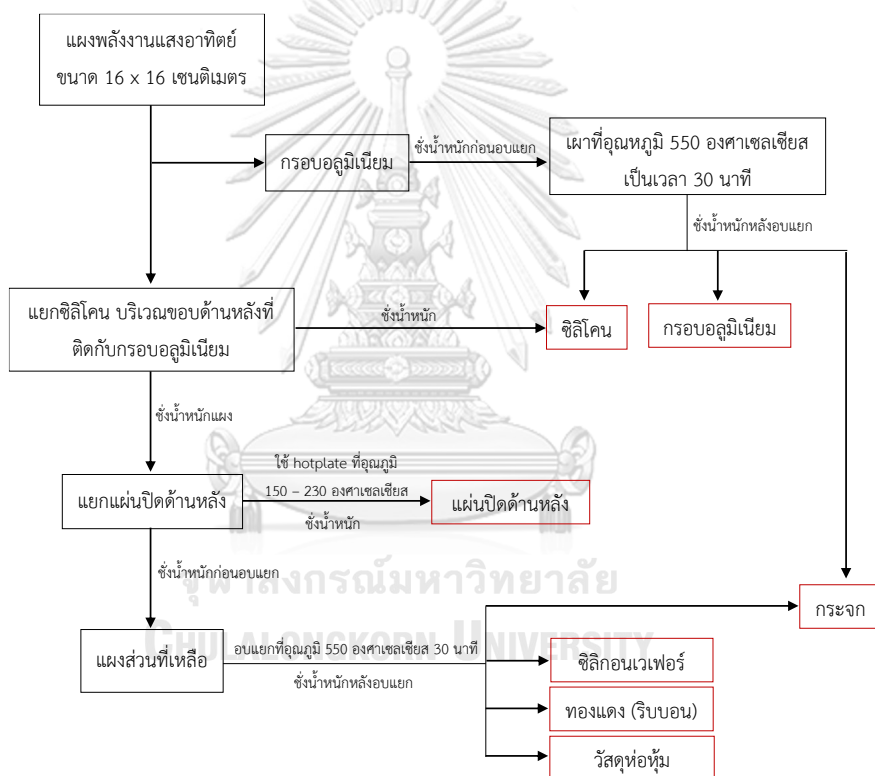


รูปที่ 15 (A) ตัวอย่างวัสดุสำหรับวิเคราะห์ค่าความร้อน (B) วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี และ (C) วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน

3. การวิเคราะห์หาค่าความร้อน และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ดำเนินการโดยการส่งตรวจวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน ส่งตรวจวิเคราะห์ที่ศูนย์บริการวิเคราะห์และทดสอบ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี

3.1.3 การหาลักษณะองค์ประกอบทางกายภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

การหาค่าเฉลี่ยองค์ประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ ซิลิโคน กรอบอลูมิเนียม แผ่นปิดด้านหลัง กระจก แผ่นเซลล์ซิลิกอน ทองแดง (ริบบอน) และวัสดุห่อหุ้ม ดำเนินการโดยใช้แพคเกจที่ 2 โดยมีขั้นตอนการดำเนินการ ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ขั้นตอนการหาสัดส่วนองค์ประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

3.2 การสัมภาษณ์และเก็บข้อมูล

1. การกำหนดขอบเขตการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง

1.1 ใช้ฐานข้อมูลปริมาณการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์จากคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.)

1.2 พิจารณาโรงไฟฟ้าที่ติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน และดำเนินการจ่ายไฟเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้า

1.3 เป็นโรงไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิตติดตั้ง ตั้งแต่ 8 เมกะวัตต์ขึ้นไป

1.4 เป็นโรงไฟฟ้าที่คาดว่าจะเริ่มเกิดของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์แล้ว โดยเริ่มดำเนินการมาแล้วไม่น้อยกว่า 2 ปี (Weekend และคณะ, 2016)

1.5 เงื่อนไขการสัมภาษณ์ต้องเป็นโรงไฟฟ้าที่สามารถเปิดเผยข้อมูลได้เท่านั้น เนื่องจากปัญหาในเรื่องข้อจำกัดในการเข้าถึงของข้อมูล เช่น นโยบายการเผยแพร่ข้อมูลของแต่ละที่ หรือการอนุญาตเข้าสัมภาษณ์ เก็บข้อมูล เป็นต้น

2. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์ ใช้สำหรับการหาค่าน้ำหนักแผงต่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย (ton/MW) และข้อมูลการชำรุดเสียหายของแผง มีรายละเอียดดังนี้

2.1 ค่าน้ำหนักต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย (ton/MW)

$$\text{น้ำหนักต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย (ton/MW)} = \frac{\text{น้ำหนักเฉลี่ยของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (ton)}}{\text{กำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย (MW)}}$$

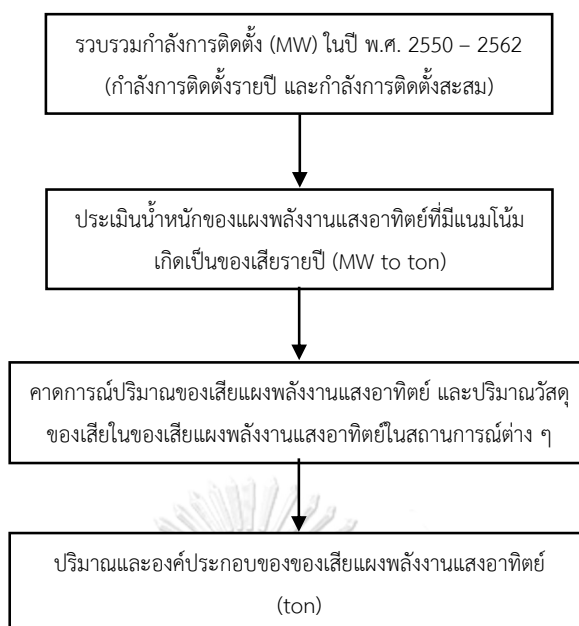
2.2 หาค่าอัตราการชำรุดของแผงสูงสุดและต่ำสุด

$$\text{อัตราการชำรุดของแผง (\%)} = \left(\frac{\text{จำนวนแผงเสียต่อปี}}{\text{จำนวนแผงที่ติดตั้งต่อปี}} \right) \times 100$$

3.3 การคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ และปริมาณของเสียวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

การดำเนินงานในส่วนนี้จะใช้ฐานข้อมูลปริมาณการผลิตแผงพลังงานแสงอาทิตย์ ในปี พ.ศ. 2550 – 2562 จากคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) และข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์และปริมาณองค์ประกอบทางกายภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์จากหัวข้อ 3.1.3

1. ขั้นตอนการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน



รูปที่ 17 ขั้นตอนการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน

2. การคำนวณ

2.1 การสูญเสียปกติ เมื่อครบอายุการใช้งาน 20 ปี (Regular loss)

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

เมื่อ y คือ ปีที่แผงพลังงานแสงอาทิตย์จะเกิดเป็นของเสีย

x คือ ปีที่ติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์

z คือ อายุการใช้งานของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ตามใบรับประกัน (20 ปี)

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

เมื่อ w_y คือ ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (ton)

w คือ น้ำหนัก (ton/MW)

u_x คือ กำลังการผลิตติดตั้งต่อปี (MW/ปี)

หมายเหตุ: อายุการใช้งาน 20 ปี อ้างอิงตาม (Cucchiella และคณะ, 2015) (ศูนย์วิจัยกสิกร, 2563)

2.2 ขำรุดก่อนหมดอายุการใช้งาน

$$W_y = \% \times u_x \times w \quad (3)$$

เมื่อ $\%$ คือ อัตราขำรุดต่อปี

2.3 ปริมาณรวมของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์

$$w_y = \sum_{x=1}^y u_x * w \quad (4)$$

เมื่อ w_y คือ ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์

w คือ น้ำหนัก (ton/MW)

u_x คือ กำลังการผลิตติดตั้งต่อปี (MW/ปี)

x คือ ปีที่ติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์

y คือ ปีที่แผงพลังงานแสงอาทิตย์จะเกิดเป็นของเสีย

3. การหาปริมาณวัสดุจากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งาน

หาได้จากการนำค่าเฉลี่ยองค์ประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ และปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์จากการคาดการณ์

3.4 การประเมินแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแนวทางการจัดการทั้ง 4 จากรายงานของ (พิชญ รัชฎาวงศ์ และคณะ, 2559) พบว่าแนวทางที่ 4 มีต้นทุนในการดำเนินงานสูง และในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีอุตสาหกรรมปลายทางที่รองรับการผลิตแผ่นซิลิกอนเกรดพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเพียง 3 แนวทางที่มีความเป็นไปได้ ที่จะนำมาใช้กับการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนที่จะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้ ดังนี้

1. แนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน คือ การคัดแยกเบื้องต้น และฝังกลบส่วนที่เหลือ
2. แนวทางการบดหยาบ คือ การคัดแยกเบื้องต้น บดและคัดแยกกระจกหลังการบด และฝังกลบส่วนที่เหลือ
3. แนวทางการอบแยก คือ การคัดแยกเบื้องต้น ใช้กระบวนการทางความร้อนในการแยกกระจก และฝังกลบส่วนที่เหลือ

สำหรับการประเมินแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน จะพิจารณา 3 ด้าน สำหรับเกณฑ์การตัดสินใจอ้างอิงจากงานวิจัยของ (McDonald และคณะ, 2010) (Deng และคณะ, 2019) (Gönen และคณะ, 2019) ได้แก่

1. การประเมินด้านการเงิน คือ กำไรทางการเงิน พิจารณาจากมูลค่าที่เกิดขึ้นในเชิงของวัสดุ กับต้นทุนการจัดการเบื้องต้น

เป็นการประเมินประสิทธิภาพด้านเศรษฐกิจของแนวทางการจัดการของเสียแข็งขั้นต้น โดยมุ่งเน้นไปที่กำไรและต้นทุนที่ใช้ในการดำเนินการ เช่น รายได้จากการขายวัสดุที่แยกออกมาได้ กำไรทางการเงิน และการลดค่าใช้จ่ายของการนำไปฝังกลบ เป็นต้น สำหรับรายละเอียดรายได้และต้นทุนของแนวทางการจัดการ ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 รายได้และต้นทุนของสถานการณ์ของแนวทางการจัดการของเสียแข็งพลังงานแสงอาทิตย์

| แนวทางการจัดการ | รายได้ | ต้นทุน |
|----------------------------|--------------------|----------------------------------------------|
| แนวทางที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน | กรอบโครงอลูมิเนียม | ค่าแรงถอดแยก |
| | ทองแดง (สายไฟ) | ค่าดำเนินการหลุมฝังกลบ |
| แนวทางการบดหยาบ | กรอบโครงอลูมิเนียม | ค่าแรงถอดแยก |
| | ทองแดง (สายไฟ) | ค่าไฟฟ้าสำหรับเครื่องบด |
| | กระจก | ค่าแรงคัดแยก |
| | | ค่าดำเนินการหลุมฝังกลบ |
| แนวทางการอบแยก | กรอบโครงอลูมิเนียม | ค่าแรงถอดแยก |
| | ทองแดง (สายไฟ) | ค่าไฟฟ้า และค่าเชื้อเพลิง ในการเดินระบบอบแยก |
| | กระจก | ค่าแรงคัดแยก |
| | ทองแดง (ริบบอน) | ค่าดำเนินการหลุมฝังกลบ |

2. การประเมินด้านพลังงาน คือ ศักยภาพด้านพลังงาน ในเชิงพลังงานความร้อนของวัสดุ ห่อหุ้ม (EVA) แผ่นปิดด้านหลัง (Back sheet) และวัสดุเชื่อมประสานหรือซิลิโคน (Adhesive)

3. การประเมินด้านผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม SimaPro 9.0.0.35 เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของทางเลือกการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 3 แนวทาง ได้แก่ แนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน (S1) แนวทางการบดหยาบ (S2) และแนวทางการอบแยก (S3) โดยขั้นตอนการประเมินผลกระทบประกอบด้วย

1.) การตั้งเป้าหมายและกำหนดขอบเขต

กำหนดเป้าหมายเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของสถานการณ์จำลองต่าง ๆ และขอบเขตสำหรับการประเมินอยู่ในรูปแบบ Gate to gate ซึ่งในงานวิจัยนี้จะประเมินในช่วงที่เป็นของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์หลังหมดอายุการใช้งาน (EoL) แล้วถึงขั้นตอนการจัดการ (Treatment) หรือกำจัด (Disposal) เท่านั้น โดยกำหนดหน่วยหน้าที่ (Function Unit) คือของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้าสู่การจัดการต่าง ๆ

2.) การจัดทำบัญชีรายการวงจรชีวิต (Life Cycle Inventory, LCI)

คิดที่ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน 1 ตัน โดยใช้ฐานข้อมูล Ecoinvent v.3 Database สำหรับปริมาณการใช้ไฟฟ้าในแนวทางการบดหยาบ อ้างอิงจากงานวิจัยของ (Faircloth และคณะ, 2019) และข้อมูลการใช้เชื้อเพลิง (LPG) และไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินระบบการอบแยก อ้างอิงจากการใช้งานจริงสำหรับเตาระดับต้นแบบ ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และข้อมูลการใช้น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องจักรที่ใช้ดำเนินการในหลุมฝังกลบ อ้างอิงจาก (Yang และคณะ, 2014) ทั้งนี้ข้อมูลด้านการขนส่ง และข้อมูลการใช้น้ำไม่ได้ถูกคำนวณ

3.) การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม (Impact assessment)

เป็นการนำเอาผลลัพธ์ที่ได้จากการทำบัญชีรายการข้อมูลมาทำการจำแนกกลุ่มผลกระทบ (Characterization) เพื่อให้ทราบว่ากลุ่มผลกระทบใดมีความสำคัญ หรือก่อให้เกิดผลกระทบรุนแรงที่สุดและเกิดจากกระบวนการหรือขั้นตอนใด

ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม SimaPro 9.0.0.35 วิธีการ ReCiPe 2016 ผลลัพธ์การประเมินผลกระทบแบบชั้นกลาง (Midpoint (H) V1.03 / World (2010) H) การประเมินผลกระทบในงานวิจัยนี้ จะทำการประเมินตามขั้นตอนการจำแนกผลกระทบ (Characterization) ของแนวทางการจัดการว่ามีผลกระทบอย่างไร เช่น สาร CO₂ ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน PM2.5 ทำให้เกิดการก่อตัวของอนุภาคละเอียด เป็นต้น

ตารางที่ 11 หมวดหมู่ผลกระทบที่ถูกประเมินในงานวิจัยนี้

| ผลกระทบ | หน่วย |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| สภาวะการเกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) | kg CO ₂ eq |
| การก่อตัวของอนุภาคละเอียด (Fine particulate matter formation) | kg PM2.5 eq |
| การเกิดภาวะความเป็นกรด (Terrestrial acidification) | kg SO ₂ eq |
| ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก (Terrestrial ecotoxicity) | kg 1,4-DCB |
| ความเป็นพิษต่อมนุษย์ ที่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Human carcinogenic toxicity) | kg 1,4-DCB |
| ความเป็นพิษต่อมนุษย์ ที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Human non-carcinogenic toxicity) | kg 1,4-DCB |
| การขาดแคลนทรัพยากรแร่ (Mineral resource scarcity) | kg Cu eq |
| การขาดแคลนทรัพยากรฟอสซิล (Fossil resource scarcity) | kg oil eq |

อ้างอิงหมวดหมู่ของการประเมินผลกระทบจากงานวิจัยของ (Pero และคณะ, 2019) (Ansanelli และคณะ, 2021)

4.) การตีความผลการประเมิน (Interpretation)

การนำผลการศึกษาจากการทำบัญชีรายการข้อมูล และการประเมินผลกระทบมารวมกัน เพื่อให้ได้ข้อสรุปถึงสาเหตุของปัญหา ซึ่งค่าผลกระทบที่ได้เป็นค่าบวกและค่าลบ คือ ภาวะหรือผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเครดิตหรือประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม ตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการดำเนินงานในห้องปฏิบัติการ

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate Analysis)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate Analysis) ด้วยเครื่อง CHNS Analyzer เพื่อให้ทราบปริมาณค่าคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ จากตารางที่ 12 และ 13 แสดงค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุห่อหุ้ม (EVA) แผ่นปิดด้านหลัง (Backsheet) และวัสดุเชื่อมประสานหรือซิลิโคน (Adhesive) ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ยี่ห้อ จะเห็นว่าวัสดุเหล่านี้ที่เป็นองค์ประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูงสามารถนำมาแปรสภาพทางความร้อนให้เป็นเชื้อเพลิงได้ ทั้งยังไม่มีซัลเฟอร์จึงทำให้ไม่เกิดซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ของกระบวนการจัดการของเสียแผงทางความร้อน และมีปริมาณไนโตรเจนน้อยมากจึงลดการเกิดปัญหาไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ซึ่งมีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ทางเคมี (Ultimate Analysis) วัสดุอินทรีย์ที่ได้จากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยี่ห้อที่ 1

| วัสดุ | องค์ประกอบ | ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%) |
|-----------------------------|--------------|-------------------------|
| วัสดุห่อหุ้ม (EVA) | คาร์บอน (C) | 75.41 |
| | ไฮโดรเจน (H) | 11.94 |
| | ไนโตรเจน (N) | 0.21 |
| | ซัลเฟอร์ (S) | 0.00 |
| แผ่นปิดด้านหลัง (Backsheet) | คาร์บอน (C) | 56.84 |
| | ไฮโดรเจน (H) | 3.91 |
| | ไนโตรเจน (N) | 0.00 |
| | ซัลเฟอร์ (S) | 0.00 |
| ซิลิโคน (Adhesive) | คาร์บอน (C) | 21.07 |
| | ไฮโดรเจน (H) | 3.81 |
| | ไนโตรเจน (N) | 0.06 |
| | ซัลเฟอร์ (S) | 0.00 |

ตารางที่ 13 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate Analysis) วัสดุอินทรีย์ที่ได้จากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยี่ห้อที่ 2

| วัสดุ | องค์ประกอบ | ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%) |
|-----------------------------|--------------|-------------------------|
| วัสดุห่อหุ้ม (EVA) | คาร์บอน (C) | 76.45 |
| | ไฮโดรเจน (H) | 13.17 |
| | ไนโตรเจน (N) | 0.02 |
| | ซัลเฟอร์ (S) | 0.00 |
| แผ่นปิดด้านหลัง (Backsheet) | คาร์บอน (C) | 61.48 |
| | ไฮโดรเจน (H) | 5.23 |
| | ไนโตรเจน (N) | 0.00 |
| | ซัลเฟอร์ (S) | 0.00 |
| ซิลิโคน (Adhesive) | คาร์บอน (C) | 23.14 |
| | ไฮโดรเจน (H) | 4.74 |
| | ไนโตรเจน (N) | 0.00 |
| | ซัลเฟอร์ (S) | 0.00 |

4.1.2. การวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer, TGA เป็นการวิเคราะห์ความเสถียรหรือการสลายตัวของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ และทำให้ทราบปริมาณความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัวและเถ้า ถือเป็น การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุห่อหุ้ม (EVA) ของแผงยี่ห้อที่ 1 และ 2 เมื่อได้รับความร้อน พบว่ามีการสลายตัวเป็น 2 ช่วง และมีความเสถียรของวัสดุใกล้เคียงกัน สำหรับแผงยี่ห้อที่ 1 มีการสลายตัวช่วงแรกไปร้อยละ 21.89 ที่ช่วงอุณหภูมิ 300 – 385 องศาเซลเซียส ช่วงที่สองสลายตัวไปร้อยละ 75.84 ที่ช่วงอุณหภูมิ 385 - 475 องศาเซลเซียส สำหรับแผงยี่ห้อที่ 2 มีการสลายตัวช่วงแรกไปร้อยละ 17.99 ที่ช่วงอุณหภูมิ 300 – 370 องศาเซลเซียส ช่วงที่สองสลายตัวไปร้อยละ 74.46 ที่ช่วงอุณหภูมิ 370 – 475 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 18 (A) และ 19 (A) ตามลำดับ

โดยในช่วงแรกที่เกิดการสลายตัวของวัสดุห่อหุ้ม จะเป็นการสลายตัวของหมู่ไวนิลอะซิเตท ในรูปของกรดอะซิติกที่อุณหภูมิ 300 – 385 °C และในช่วงที่สองของการสลายตัวที่อุณหภูมิ 385 –

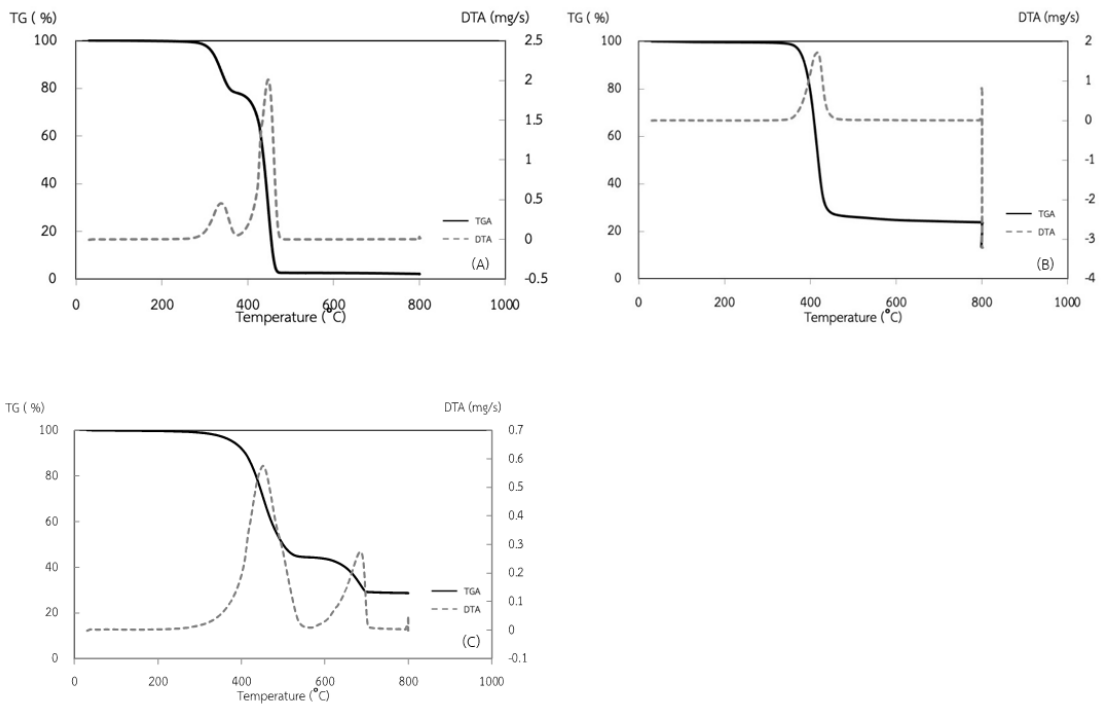
500 °C จะเกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ของสายโซ่หลักไฮโดรคาร์บอนที่ถูกปล่อยออกมาในรูปของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Chitra และคณะ, 2020) (Lovato และคณะ, 2021)

สำหรับการวิเคราะห์ความเสถียรของแผ่นปิดด้านหลังเมื่อได้รับความร้อน สำหรับแผงยี่ห้อที่ 1 พบว่ามีการสลายตัวช่วงเดียว โดยสลายตัวไปร้อยละ 76.18 ช่วงอุณหภูมิ 350 – 450 องศาเซลเซียส และสำหรับแผงยี่ห้อที่ 2 พบว่ามีการสลายตัว 2 ช่วง ในช่วงแรกมีการสลายตัวไปร้อยละ 2.98 ที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เนื่องจากในระหว่างการแยกมีส่วนของวัสดุห่อหุ้มติดอยู่ด้วย และช่วงที่สองสลายตัวไปร้อยละ 77.62 ช่วงอุณหภูมิ 360 – 475 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 18 (B) และ 19 (B) ตามลำดับ

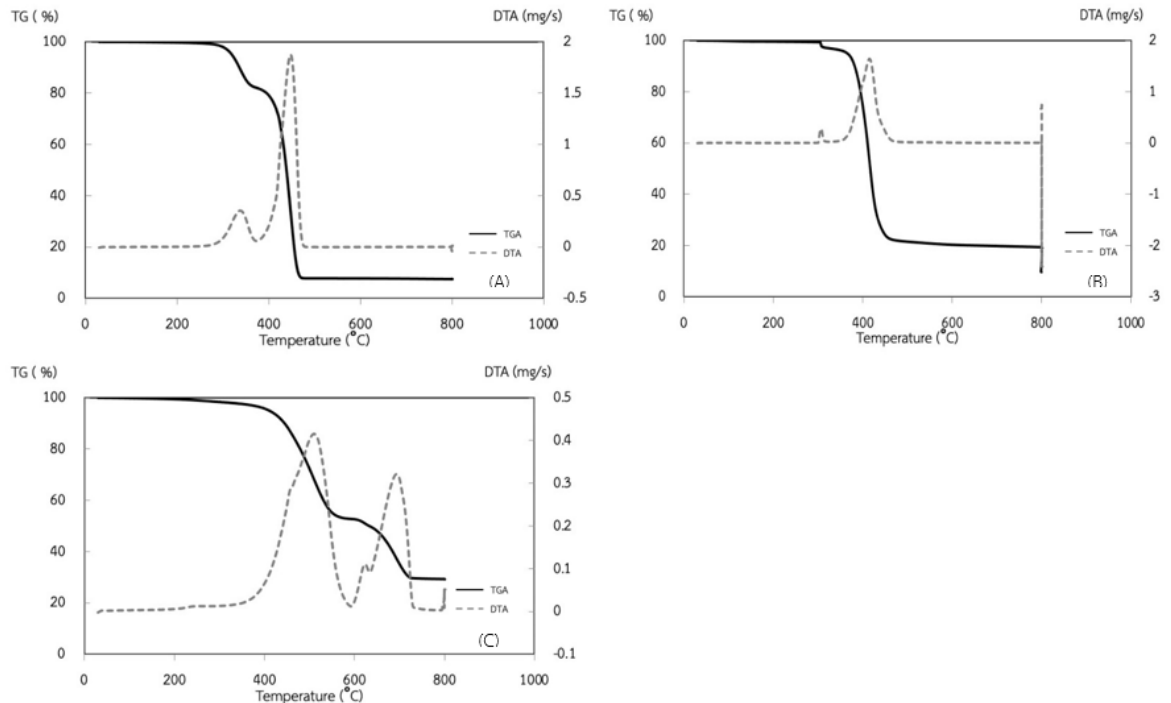
การสลายตัวของแผ่นปิดด้านหลังที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปจะเกิดการสลายตัวเพียงช่วงเดียว ซึ่งเป็นการสลายตัวของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) และพอลิไวนิลฟลูออไรด์ (PVF) ที่ช่วงอุณหภูมิใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิ 440 °C และ 450 °C (Lovato และคณะ, 2021)

สำหรับการวิเคราะห์ความเสถียรของซิลิโคน ของแผงทั้ง 2 ยี่ห้อเมื่อได้รับความร้อน พบว่ามีการสลายตัว 2 ช่วง โดยแผงยี่ห้อที่ 1 มีการสลายตัวไปร้อยละ 55.59 ที่ช่วงอุณหภูมิ 340 – 550 องศาเซลเซียส และสลายตัวครั้งที่สองไปร้อยละ 15.66 ที่ช่วงอุณหภูมิ 580 – 700 องศาเซลเซียส และสำหรับแผงยี่ห้อที่ 2 มีการสลายตัวช่วงแรกไปร้อยละ 47.21 ที่ช่วงอุณหภูมิ 400 – 560 องศาเซลเซียส และสลายตัวครั้งที่สองไปร้อยละ 23.42 ที่ช่วงอุณหภูมิ 600 – 725 องศาเซลเซียส จากผลการวิเคราะห์เห็นได้ว่าซิลิโคนของแผงยี่ห้อที่ 2 มีความเสถียรทางความร้อนมากกว่าแผงยี่ห้อที่ 1 ดังรูปที่ 18 (C) และ 19 (C) ตามลำดับ

โดยการสลายตัวที่เกิดขึ้นของซิลิโคน ในช่วงแรกเป็นการสลายตัวของสารระเหย และมีการสลายตัวของพันธะที่เชื่อมขวางระหว่างสายของซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ให้ออกจากกันที่อุณหภูมิประมาณ 450 °C และการสลายตัวช่วงที่สอง เป็นการสลายตัวของคาร์บอนที่เหลืออยู่ภายในโครงสร้างที่อุณหภูมิ 630 – 670 °C (Lui และคณะ, 2004)



รูปที่ 18 การวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุของแผงยี่ห้อที่ 1 เมื่อได้รับความร้อน



รูปที่ 19 การวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุของแผงยี่ห้อที่ 2 เมื่อได้รับความร้อน

จากตารางที่ 14 และ 15 พบว่าวัสดุทั้ง 3 ชนิด ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ยี่ห้อ มีสารระเหยมากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 70.63 – 97.73 ไม่มีสารประกอบคาร์บอนคงตัว และมีความชื้นต่ำอยู่ที่ร้อยละ 0.04 – 0.27

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยี่ห้อที่ 1

| วัสดุ | องค์ประกอบ | wt. % |
|-----------------------------|-----------------------------|-------|
| วัสดุห่อหุ้ม (EVA) | ความชื้น (Moisture content) | 0.04 |
| | สารระเหย (Volatile matter) | 97.73 |
| | คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) | 0.00 |
| | เถ้า (Ash) | 2.23 |
| แผ่นปิดด้านหลัง (Backsheet) | ความชื้น (Moisture content) | 0.27 |
| | สารระเหย (Volatile matter) | 76.28 |
| | คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) | 0.00 |
| | เถ้า (Ash) | 23.45 |
| ซิลิโคน (Adhesive) | ความชื้น (Moisture content) | 0.16 |
| | สารระเหย (Volatile matter) | 71.25 |
| | คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) | 0.00 |
| | เถ้า (Ash) | 28.59 |

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยี่ห้อที่ 2

| วัสดุ | องค์ประกอบ | wt. % |
|-----------------------------|-----------------------------|-------|
| วัสดุห่อหุ้ม (EVA) | ความชื้น (Moisture content) | 0.05 |
| | สารระเหย (Volatile matter) | 92.45 |
| | คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) | 0.00 |
| | เถ้า (Ash) | 7.50 |
| แผ่นปิดด้านหลัง (Backsheet) | ความชื้น (Moisture content) | 0.27 |
| | สารระเหย (Volatile matter) | 80.78 |
| | คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) | 0.00 |

| | | |
|-----------------------|-----------------------------|-------|
| | เถ้า (Ash) | 18.95 |
| | ความชื้น (Moisture content) | 0.21 |
| ซีลีโคน (Adhesive) | สารระเหย (Volatile matter) | 70.63 |
| | คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) | 0.00 |
| | เถ้า (Ash) | 29.16 |

4.1.3 การวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Heating value)

1. ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของวัสดุห่อหุ้ม แผ่นปิดด้านหลัง และซีลีโคนที่เป็นองค์ประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter จะแสดงเป็นค่าความร้อนสูง (HHV) และสามารถคำนวณค่าความร้อนต่ำ (LHV) ได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{HHV} = \text{LHV} + 5.72 (9\text{H}+\text{M}) \quad \text{kcal/kg}$$

$$\text{HHV} = \text{LHV} + 23.95 (9\text{H}+\text{M}) \quad \text{kJ/kg}$$

โดยที่ H= ปริมาณธาตุไฮโดรเจนในวัตถุดิบ (%)

M= ปริมาณของความชื้นในวัตถุดิบ (%)

จากตารางที่ 16 และ 17 พบว่าวัสดุห่อหุ้มของแผงทั้ง 2 ยี่ห้อ มีค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 38.46 และ 40.54 MJ/kg แผ่นปิดด้านหลังมีค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 21.52 และ 24.15 MJ/kg และวัสดุเชื่อมประสานที่มีค่าความร้อนสูงใกล้เคียงกันอยู่ที่ 11.91 และ 11.79 MJ/kg

ตารางที่ 16 ค่าความร้อนของวัสดุที่ได้จากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยี่ห้อ 1

| วัสดุ | สมบัติทางความร้อน | |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|
| | ค่าความร้อนสูง (MJ/kg) | ค่าความร้อนต่ำ (MJ/kg) |
| วัสดุห่อหุ้ม (EVA) | 38.46 | 35.89 |
| แผ่นปิดด้านหลัง (Backsheet) | 21.52 | 20.67 |
| ซีลีโคน (Adhesive) | 11.91 | 11.08 |

ตารางที่ 17 ค่าความร้อนของวัสดุที่ได้จากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ยี่ห้อ 2

| วัสดุ | สมบัติทางความร้อน | |
|--------------------|------------------------|------------------------|
| | ค่าความร้อนสูง (MJ/kg) | ค่าความร้อนต่ำ (MJ/kg) |
| วัสดุห่อหุ้ม (EVA) | 40.54 | 37.30 |

| | | |
|-----------------------------|-------|-------|
| แผ่นปิดด้านหลัง (Backsheet) | 24.15 | 23.02 |
| ซีลีโคน (Adhesive) | 11.79 | 10.77 |

4.1.4 องค์ประกอบทางกายภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบวัสดุของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ที่สามารถแยกออกมาได้ในห้องปฏิบัติการ ที่ใช้เป็นตัวแทนของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน เนื่องจากค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบที่สามารถแยกออกมาได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าช่วงร้อยละโดยน้ำหนักจากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง (พิชญ รัชฎาวงศ์ และคณะ, 2559) (Paiano, 2015) (Kim และคณะ, 2018) (Santos และคณะ, 2018) (Fiandra และคณะ, 2019) (Gönen และคณะ, 2019) (Maani และคณะ, 2020) ดังตารางที่ 18

จากองค์ประกอบของแผงชนิดผลึกซิลิกอนที่หาได้ ดังแสดงในตารางที่ 19 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับช่วงร้อยละโดยน้ำหนักจากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนเป็นกระจก โดยมีสัดส่วนมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 69.05 (พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 65.5 – 76 ซึ่งเป็นสัดส่วนของกระจกจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในตารางที่ 18) ตามด้วยกรอบอลูมิเนียมร้อยละ 12.64 (พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 8 – 18) แผ่นเซลล์ซิลิกอน 3.21 (พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.8 – 5) และทองแดง (รีบบอน) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 0.88 (พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.57 – 1) สำหรับวัสดุพอลิเมอร์พบว่ามีสัดส่วนของวัสดุห่อหุ้มมากที่สุด เช่นเดียวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยสัดส่วนของอีวีเอที่หาได้คิดเป็นร้อยละ 8.95 ของน้ำหนักแผง (พบว่ามีค่ามากกว่าค่าช่วงในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง) ตามด้วยแผ่นปิดด้านหลัง คิดเป็นร้อยละ 3.29 (พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.8 – 3.6) และซีลีโคนคิดเป็นร้อยละ 0.98 โดยค่าที่หาได้มีค่าน้อยกว่าในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น (ร้อยละ 1.16)

ตารางที่ 18 สัดส่วนน้ำหนักองค์ประกอบแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

| องค์ประกอบ | ร้อยละโดยน้ำหนักของแผงชนิดผลึกซิลิกอน | | | | | | | ช่วงร้อยละโดยน้ำหนัก |
|----------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
| กระจก | 74.16 | 74.16 | 74.16 | 70.00 | 67.80 | 76.00 | 65.40 | 65.50 - 76.00 |
| กรอบอลูมิเนียม | 10.30 | 10.30 | 10.30 | 18.00 | 16.90 | 8.00 | 16.50 | 8.00 - 18.00 |

| | | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| แผ่นเซลล์ ซิลิกอน | 3.48 | 3.48 | 3.48 | 3.65 | 6.10 | 5.00 | 0.80 | 0.80 – 5.00 |
| วัสดุห่อหุ้ม | 6.53 | 6.53 | 6.53 | 5.10 | 6.73 | 8.00 | 6.50 | 5.10 – 8.00 |
| แผ่นปิด ด้านหลัง | 3.60 | 3.60 | 3.60 | 1.50 | 0.80 | - | - | 0.80 – 3.60 |
| กาวซิลิโคน | 1.16 | 1.16 | 1.16 | - | - | - | - | 1.16 |
| ทองแดง (ริบบอน) | 0.57 | 0.57 | 0.57 | 1.00 | 0.77 | 1.00 | 0.70 | 0.57 – 1.00 |

ตารางที่ 19 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบวัสดุของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการศึกษานี้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

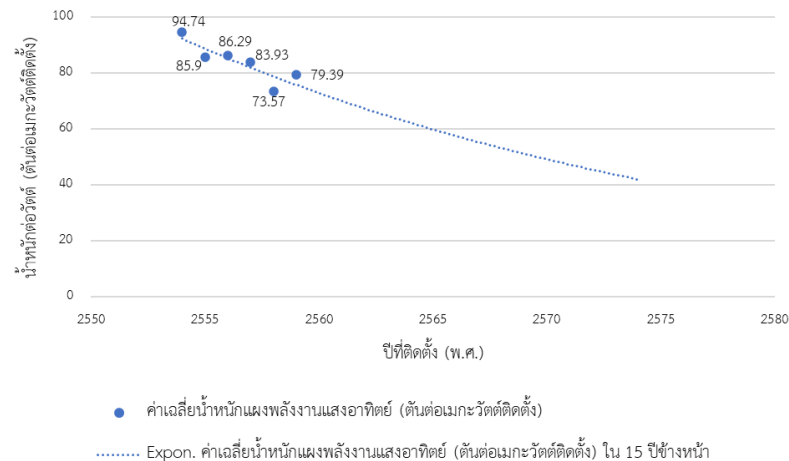
| องค์ประกอบ | ร้อยละโดยน้ำหนักองค์ประกอบ ของแผงชนิดผลึกซิลิกอน |
|--------------------|-----------------------------------------------------|
| กระจก | 69.05 |
| อลูมิเนียม | 12.64 |
| วัสดุห่อหุ้ม (EVA) | 8.95 |
| วัสดุปิดแผ่นหลัง | 3.29 |
| กาวซิลิโคน | 0.98 |
| ทองแดง (ริบบอน) | 0.88 |
| แผ่นเซลล์ซิลิกอน | 3.21 |

4.2 การสัมภาษณ์และเก็บข้อมูล

4.2.1 ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการโรงไฟฟ้า

จากการสัมภาษณ์และรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 34 แห่ง สรุปข้อมูลได้ ดังนี้

1.) น้ำหนักของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในแต่ละปีมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักของแผงพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าไม่คงที่ และมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 20 จะเห็นได้ว่าในอนาคตน้ำหนักของแผงรุ่นใหม่อาจจะมีค่าลดลงไปอีกซึ่งสอดคล้องกับ (Weckend และคณะ, 2016)



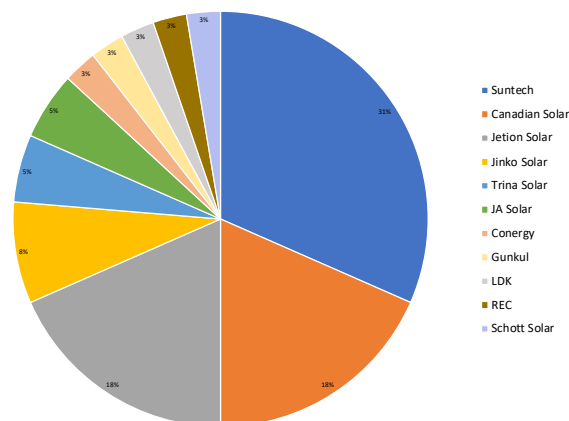
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างปีที่ติดตั้งและน้ำหนักต่อเมกะวัตต์ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

2.) ค่าอัตราการชำรุดเสียหายของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

การประเมินปริมาณอัตราชำรุดเสียหายของแผง ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการ พบว่าอัตราการชำรุดเสียหายของแผงก่อนหมดอายุการใช้งานมีค่าต่ำสุด และค่าสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 0.027 และ 1.8 ต่อปี ตามลำดับ

3.) ยี่ห้อของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่นิยมติดตั้ง

สำหรับยี่ห้อของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับความนิยมติดตั้งมากที่สุด 5 อันดับแรก พบว่าเป็นแผงที่ผลิตจากประเทศจีนเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ ยี่ห้อ Suntech ซึ่งเป็นแผงของประเทศจีน คิดเป็นร้อยละ 31 ตามด้วยยี่ห้อ Canadian Solar ซึ่งเป็นแผงของประเทศแคนาดาและยี่ห้อ Jietion Solar เป็นแผงของประเทศจีนคิดเป็นร้อยละ 18 เท่ากัน และยี่ห้อ Jinko Solar และ Trina Solar เป็นแผงของประเทศจีนคิดเป็นร้อยละ 8 และ 5 ตามลำดับ ดังรูปที่ 21

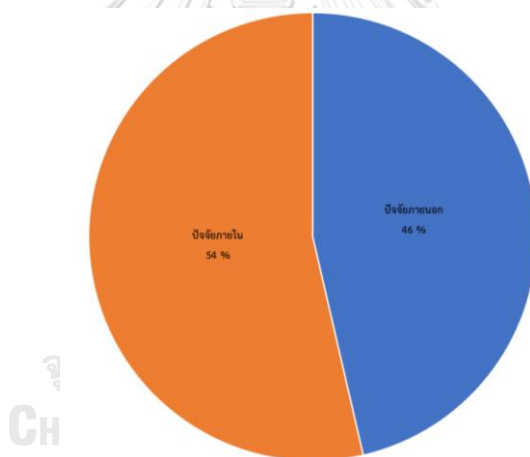


รูปที่ 21 สัดส่วนยี่ห้อของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่นิยมติดตั้งใช้งาน

4.) สาเหตุการชำรุดเสียหาย หรือเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

สาเหตุการชำรุดเสียหายของแผงพลังงานแสงอาทิตย์จากที่ได้ทำการรวบรวมข้อมูล พบว่า สัดส่วนของสาเหตุการชำรุดเสียหายที่เกิดจากปัจจัยภายใน ได้แก่ ด้านวัสดุ ด้านระบบ ด้านกระบวนการผลิต และด้านอื่น ๆ และปัจจัยภายนอก ได้แก่ ด้านสถานที่ และด้านคนงาน คิดเป็นร้อยละ 54 และ 46 ตามลำดับ ดังรูปที่ 22

จากตารางที่ 20 และจากรูปที่ 23 พบว่าแผงที่ติดตั้งก่อนปี พ.ศ. 2558 มีสาเหตุส่วนใหญ่มาจากปัจจัยภายในด้านวัสดุ ด้านระบบ และด้านกระบวนการผลิต สำหรับแผงที่ติดตั้งในปี พ.ศ. 2558 – 2559 พบว่าสาเหตุส่วนใหญ่มาจากปัจจัยภายนอกด้านสถานที่ และด้านคนงาน สาเหตุที่พบมากที่สุด คือ กระจกแตกเนื่องจากมีของแข็งตกกระทบ เช่น กระจุนป็นรวมถึงที่ไม่ทราบสาเหตุ สาเหตุที่พบน้อยที่สุด คือ ไดโอดเสีย ชำรุดจากระบบไฟฟ้า ตัวเชื่อมต่อ (MC4) เกิดรอยไหม้ และตัวกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อบวมหรือเสียหาย

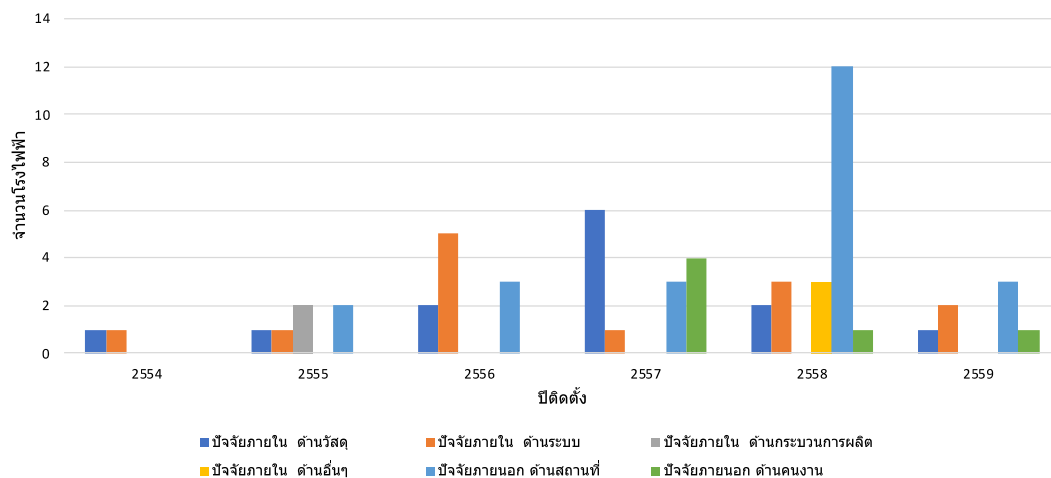


รูปที่ 22 สัดส่วนการเสียหายของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

ตารางที่ 20 สรุปสาเหตุการชำรุดเสียหายแยกตามปีที่ติดตั้ง

| ปีติดตั้ง | สาเหตุการชำรุดเสียหาย |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2554 | 1. ตัวกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) ไหม้ 2. เซลล์ซิลิกอน และวงจรไหม้ 3. เกิดศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (PID) |
| 2555 | 1. ตัวกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) ไหม้ 2. เซลล์ซิลิกอน และวงจรเกิดการไหม้ |

| | |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | <ol style="list-style-type: none"> 3. เกิดศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้มีการเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (PID) 4. เกิดจุดขาว (White spot) 5. กระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบ เช่น กระจุนปืน |
| 2556 | <ol style="list-style-type: none"> 1. ตัวกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) ใหม่ 2. เซลล์ซิลิกอน และวงจรเกิดการไหม้ 3. เกิดศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (PID) 4. เกิดจุดร้อน (Hot spot) 5. กระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบ 6. ชำรุดจากระบบไฟฟ้า |
| 2557 | <ol style="list-style-type: none"> 1. ตัวกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) ใหม่ 2. เซลล์ซิลิกอน และวงจรเกิดการไหม้ 3. เกิดจุดร้อน (Hot spot) 4. กระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบ เช่น กระจุนปืน, ก้อนหิน, การตัดหญ้า 5. ไดโอดเสียหาย 6. ปัญหาจากแผ่นปิดด้านหลังและวัสดุห่อหุ้ม |
| 2558 | <ol style="list-style-type: none"> 1. ตัวกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) บวม 2. เซลล์ซิลิกอน และวงจรไหม้ 3. เกิดจุดร้อน (Hot spot) 4. กระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบ เช่น กระจุนปืน, ก้อนหิน และไม้ทราบสาเหตุ 5. ไฟผ่า 6. แรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop) 7. ตัวแผงเสื่อมสภาพเกินการรับประกัน |
| 2559 | <ol style="list-style-type: none"> 1. เกิดจุดร้อน (Hot spot) 2. กระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบ 3. ไฟผ่า 4. แรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop) 5. ตัวเชื่อมต่อ (MC4) ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อไฟฟ้าเกิดความร้อนทำให้เกิดรอยไหม้ |



รูปที่ 23 จำนวนโรงไฟฟ้าที่เกิดการชำรุดเสียหายจากปัจจัยต่าง ๆ จำแนกตามปีที่ติดตั้ง

5.) การจัดการแผนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ชำรุด หรือเสื่อมสภาพของโรงไฟฟ้า

โรงไฟฟ้าแต่ละแห่งยังคงเก็บซากของเสียที่เกิดขึ้นไว้ในพื้นที่โครงการ เพื่อรอการจัดการที่เหมาะสมตามระเบียบของกรมโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป และสำหรับโรงไฟฟ้าบางแห่งประกอบกิจการภายใต้กฎหมาย และสัญญาที่ใช้ในการจัดการแผนที่เสื่อมสภาพ หรือหมดอายุการใช้งาน ดังนี้

5.1) ข้อตกลงที่ทำร่วมกับสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (Board of Investment; BOI)

5.2) พ.ร.บ. โรงงาน ที่ผู้ประกอบการต้องจัดทำเอกสารดังต่อไปนี้

1. แบบแจ้งขอขยายระยะเวลาในการกักเก็บสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุไม่ใช้แล้ว สก.1
2. แบบคำขออนุญาตนำสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงาน สก.2
3. ใบแจ้งเกี่ยวกับรายละเอียดสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุไม่ใช้แล้ว สก.3

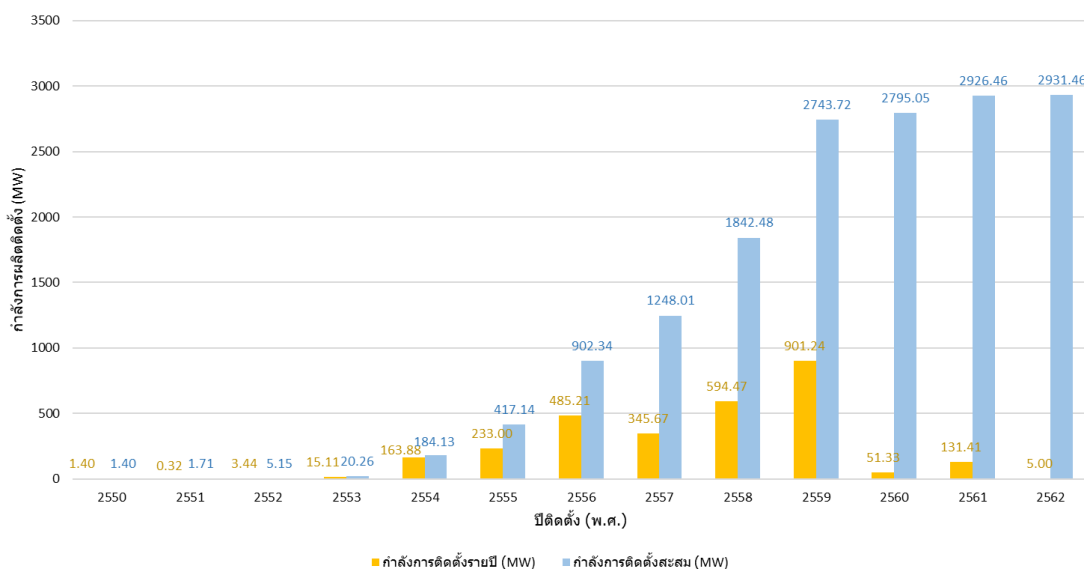
5.3) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

4.3 การคาดการณ์ปริมาณของเสียแผนพลังงานแสงอาทิตย์ และปริมาณวัสดุจากของเสียแผนพลังงานแสงอาทิตย์

4.3.1 คาดการณ์สถานการณ์ปริมาณของเสียแผนพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

จากฐานข้อมูลของคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) สำหรับกำลังการผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2550 – 2562 พบว่าในปี พ.ศ. 2559 มีกำลังการผลิตติดตั้งสูง

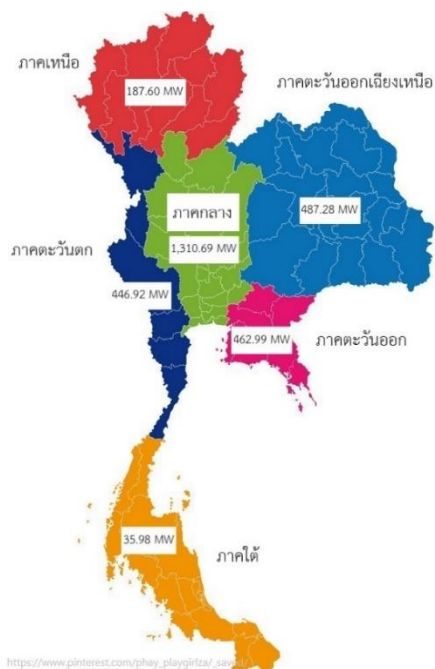
ที่สุดอยู่ที่ 901.24 เมกะวัตต์ และมีกำลังการผลิตติดตั้งสะสมอยู่ที่ 2,742.42 เมกะวัตต์ และมีจำนวนกำลังการผลิตติดตั้งแผงลดลงอย่างเห็นได้ชัดในปีถัดมา ดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 กำลังการผลิตติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์รายปี และสะสม

จากข้อมูลกำลังการผลิตติดตั้งสะสมถึงปี พ.ศ. 2562 พบว่าโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กระจายอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศไทย โดยภาคกลางมีกำลังติดตั้งสูงสุดอยู่ที่ 1,310.69 เมกะวัตต์ ตามด้วยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก ภาคตะวันตกที่มีกำลังติดตั้งใกล้เคียงกันอยู่ที่ 487.28 462.99 446.92 เมกะวัตต์ ตามลำดับ สำหรับภาคเหนือมีกำลังติดตั้งสะสมอยู่ที่ 187.60 เมกะวัตต์ และภาคใต้มีกำลังติดตั้งน้อยที่สุดอยู่ที่ 35.98 เมกะวัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 25

ทั้งนี้จังหวัดที่มีกำลังติดตั้งสูงสุด 10 อันดับแรก ได้แก่ สระแก้ว ลพบุรี เพชรบุรี นครปฐม นครสวรรค์ พระนครศรีอยุธยา ลำปาง พิษณุโลก กาญจนบุรี และปราจีนบุรี ดังตารางที่ 21



รูปที่ 25 กำลังการผลิตติดตั้งสะสมตามภาค

ตารางที่ 21 จังหวัดที่มีกำลังการผลิตติดตั้งแรงแลังงานแสงอาทิตย์สูงที่สุด 10 อันดับแรก

| จังหวัด | จำนวนโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในจังหวัด | กำลังติดตั้ง (MW) |
|-----------------|-----------------------------------------|-------------------|
| สระแก้ว | 51 | 283.67 |
| ลพบุรี | 23 | 247.47 |
| เพชรบุรี | 43 | 206.14 |
| นครปฐม | 23 | 157.46 |
| นครสวรรค์ | 6 | 149.79 |
| พระนครศรีอยุธยา | 18 | 149.25 |
| ลำปาง | 6 | 138.98 |
| พิษณุโลก | 1 | 133.92 |

| | | |
|------------|----|--------|
| กาญจนบุรี | 16 | 110.71 |
| ปราจีนบุรี | 17 | 101.32 |

4.3.2 การคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

การคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงที่หมดอายุการใช้งาน 20 ปี ที่จะเกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2570 – 2582 จากข้อมูลการติดตั้งจริง (พ.ศ. 2550 – 2562) โดยทำการพิจารณาใน 2 มุมมอง ได้แก่ 1. แผงที่หมดอายุการใช้งานเมื่อครบ 20 ปี (Regular loss) และ 2. ชำรุดก่อนหมดอายุการใช้งาน (Early loss) โดยใช้ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแผงต่อปีติดตั้ง ดังตารางที่ 22 และกำลังการผลิตติดตั้งดังรูปที่ 24 มาใช้ในการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผง

ตารางที่ 22 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแผงพลังงานแสงอาทิตย์ต่อปีติดตั้ง

| ปีติดตั้ง | ค่าเฉลี่ยต้นต่อกำลังการผลิตติดตั้ง (ต้นต่อเมกะวัตต์) |
|-----------|------------------------------------------------------|
| 2550 | 90 ¹ |
| 2551 | 90 ¹ |
| 2552 | 90 ¹ |
| 2553 | 90 ¹ |
| 2554 | 90 ² |
| 2555 | 86 ³ |
| 2556 | 86 ³ |
| 2557 | 84 ³ |
| 2558 | 74 ³ |
| 2559 | 79 ³ |
| 2560 | 79 ¹ |
| 2561 | 79 ¹ |
| 2562 | 79 ¹ |

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยน้ำหนักของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ คิดโดยการถ่วงน้ำหนักเมกะวัตต์ติดตั้ง

¹ เนื่องจากไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ จึงใช้ค่าโดยประมาณ อ้างอิงจาก IEA-PVPS 2016

² ข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์ไม่เพียงพอ จึงใช้ค่าโดยประมาณ อ้างอิงจาก IEA-PVPS 2016

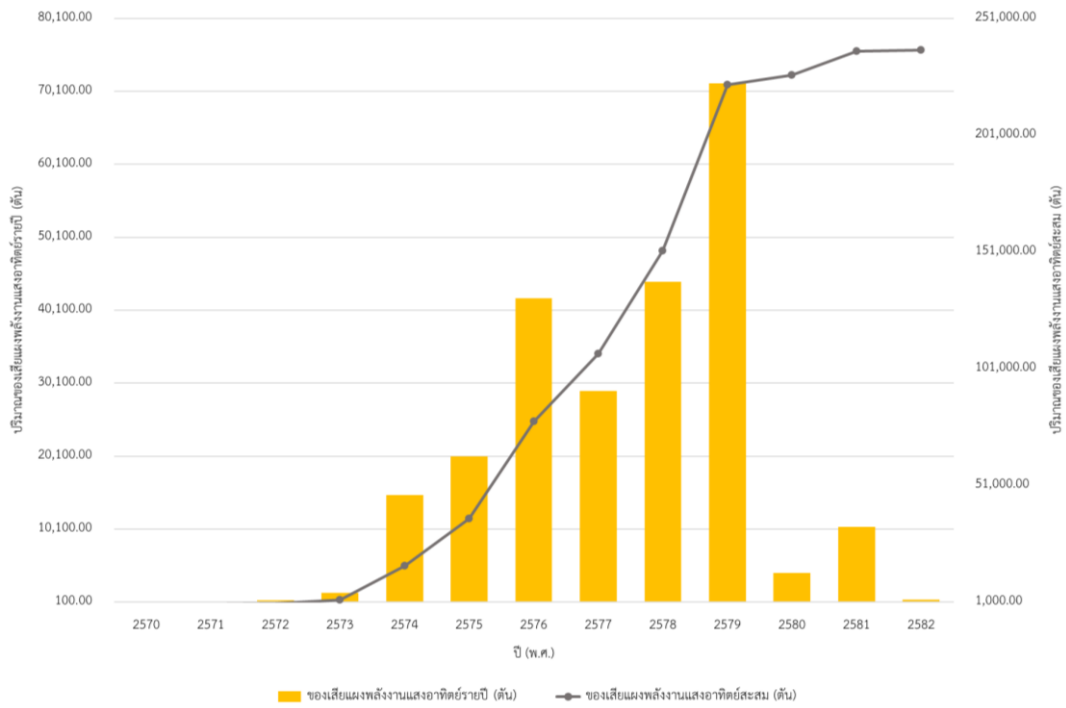
³ ข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์โรงไฟฟ้า

มุมมองที่ 1

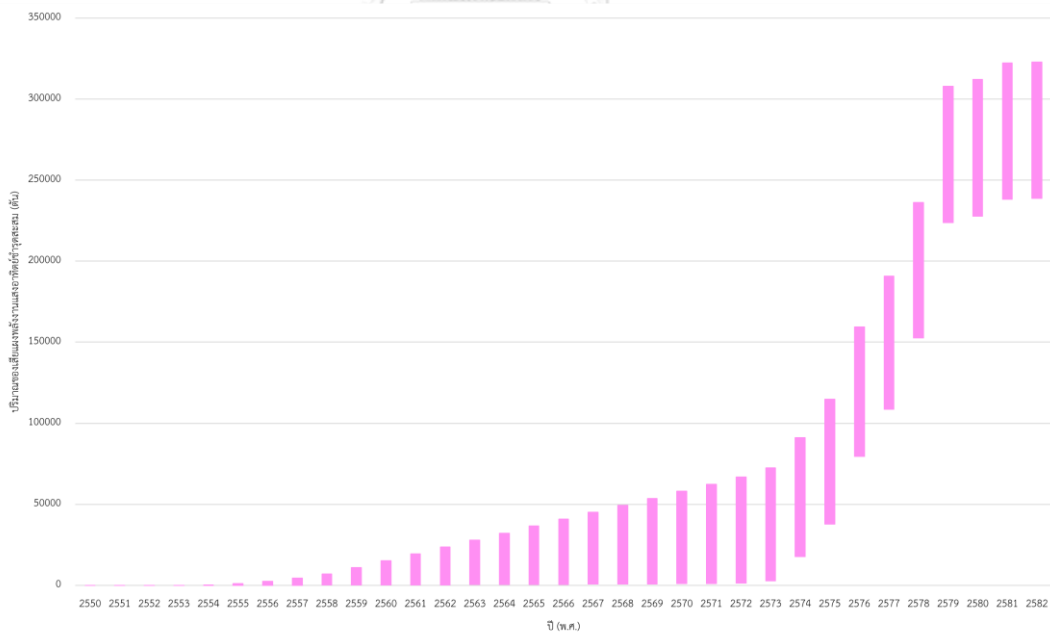
พิจารณาจากกำลังการติดตั้งจริงในปี พ.ศ. 2550 – 2562 พบว่าจะเกิดเป็นของเสียเมื่อหมดอายุการใช้งานที่ 20 ปี โดยจะเริ่มมีของเสียแผงเกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2570 จำนวน 1.4 เมกะวัตต์ หรือคิดเป็น 125.69 ตัน และในปี พ.ศ. 2579 จะเกิดของเสียแผงมากที่สุด 901.24 เมกะวัตต์ หรือคิดเป็น 71,197.96 ตัน เป็นผลเนื่องมาจากกำลังติดตั้งในปี พ.ศ. 2559 และในปีถัดมาที่มีกำลังติดตั้งลดลง ทำให้ปริมาณของเสียแผงสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยในปี พ.ศ. 2582 จะมีปริมาณของเสียแผงสะสมอยู่ที่ 237,394.29 ตัน ดังรูปที่ 26

มุมมองที่ 2

พิจารณาจากกำลังการติดตั้งจริงในปี พ.ศ. 2550 – 2562 ร่วมกับค่าอัตราการชำรุดเสียหายของแผงที่อยู่ในช่วงร้อยละ 0.027 - 1.8 ต่อปี ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์เก็บข้อมูลจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จากรูปที่ 27 จะเห็นว่าแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกติดตั้งไปแล้วจะมีการชำรุดก่อนหมดอายุการใช้งานทุกปี และมีการสะสมเพิ่มจำนวนมากขึ้น ของเสียแผงที่เกิดจากการชำรุดผู้ประกอบการส่วนใหญ่จะเก็บไว้ในพื้นที่โรงไฟฟ้าเพื่อรอดำเนินการจัดการต่อไป กล่าวคือในปีปัจจุบัน พ.ศ. 2565 มีปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ชำรุดก่อนหมดอายุการใช้งาน 20 ปี สะสมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 - 2565 อยู่ในช่วง 547.72 – 36,514.49 ตัน และเมื่อถึงปี พ.ศ. 2570 จะเริ่มมีปริมาณของเสียแผงที่หมดอายุการใช้งาน 20 ปี จำนวน 125.69 ตัน (เป็นแผงที่ถูกติดตั้งไปในปี พ.ศ. 2550) เข้ามาสมทบ โดยของเสียแผงสะสมที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณอยู่ในช่วง 993.88 – 58,003.42 ตัน คิดเป็นของเสียแผงชำรุดสะสม 869.8 – 57,986.20 ตัน จากนั้นปริมาณของเสียแผงที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยในปี พ.ศ. 2582 จะมีปริมาณของเสียแผงสะสมรวมทั้งหมดอยู่ในช่วง 238676.24 – 322856.27 ตัน



รูปที่ 26 ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์หมดอายุการใช้งาน 20 ปี (ต้น)

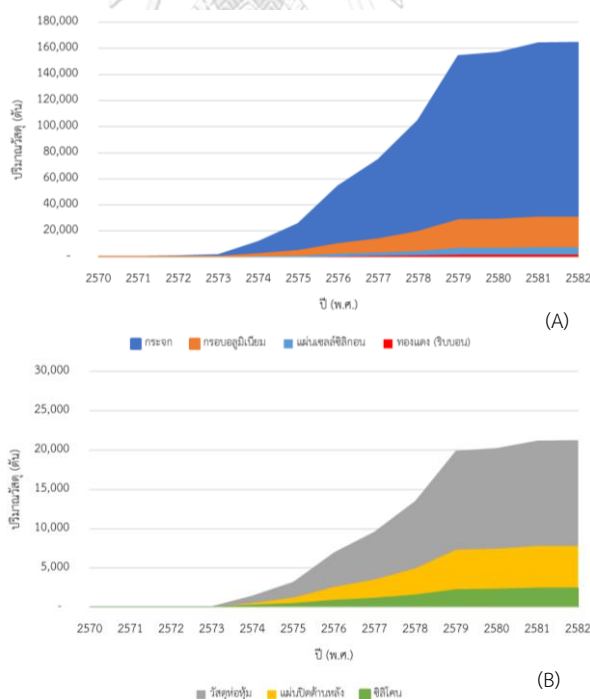


รูปที่ 27 ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์สะสม (ต้น) (ชำรุดก่อนหมดอายุ และหมดอายุการใช้งาน)

4.3.3 ปริมาณวัสดุจากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์

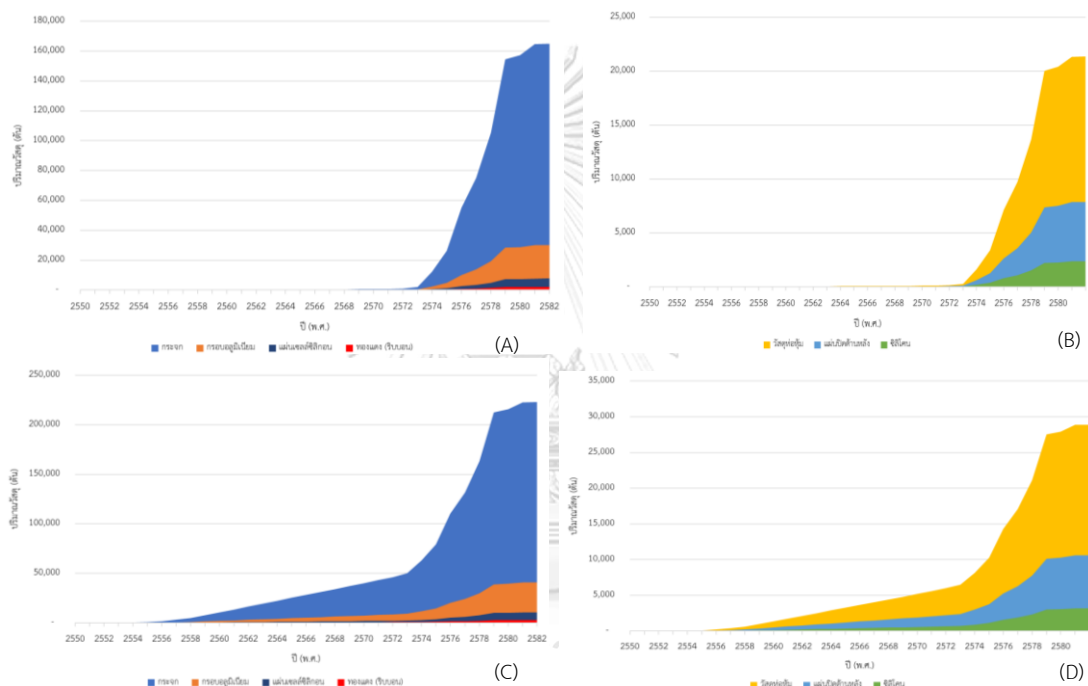
การประเมินปริมาณวัสดุในของเสียแผง พิจารณาในส่วนวัสดุที่มีมูลค่าและเป็นที่ต้องการในท้องตลาด ได้แก่ กระจก กรอบอลูมิเนียม ทองแดง (รีบอบน) และแผ่นเซลล์ซิลิกอน และวัสดุที่สามารถเอาไปใช้ในเชิงพลังงานได้ หรือเรียกว่าวัสดุพอลิเมอร์ ได้แก่ วัสดุห่อหุ้ม แผ่นปิดด้านหลัง และซิลิโคน ซึ่งจากการคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงที่จะเกิดขึ้นในหัวข้อ 4.3.2 และค่าเฉลี่ยองค์ประกอบวัสดุของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในตารางที่ 19 สามารถนำมาหาปริมาณวัสดุของเสียที่เกิดขึ้นได้

ปริมาณวัสดุจากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์จากมุมมองที่ 1 พบว่าในปี พ.ศ. 2582 จะมีปริมาณกระจกสะสมมากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 163,921 ตัน ตามด้วยกรอบอลูมิเนียม 30,007 ตัน แผ่นเซลล์ซิลิกอน 7,620 และทองแดง 2,089 ตัน ดังรูปที่ 28 (A) ในส่วนของวัสดุพอลิเมอร์ พบว่ามีปริมาณวัสดุห่อหุ้มสะสมมากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 21,247 ตัน แผ่นปิดด้านหลัง 7,810 ตัน และซิลิโคนปริมาณน้อยที่สุดอยู่ที่ 2,326 ตัน ดังรูปที่ 28 (B)



รูปที่ 28 ปริมาณวัสดุของเสียที่เกิดขึ้นตามมุมมองที่ 1 (ตัน)

ปริมาณวัสดุจากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์จากมุมมองที่ 2 (อัตราการชำรุดเสียหายต่ำ และอัตราการชำรุดเสียหายสูง) พบว่าในปี พ.ศ. 2582 จะมีปริมาณกระจกสะสมมากที่สุดอยู่ในช่วง 164,806 - 222,932 ตัน ตามด้วยกรอบอลูมิเนียมที่มีปริมาณอยู่ในช่วง 30,169 - 40,809 ตัน แผ่นเซลล์ซิลิกอนมีปริมาณอยู่ในช่วง 7,662 - 10,364 ตัน และทองแดงมีปริมาณอยู่ในช่วง 2,100 - 2,841 ตัน ดังรูปที่ 29 (A) (C) ในส่วนของวัสดุพอลิเมอร์ พบว่ามีปริมาณวัสดุห่อหุ้มสะสมมากที่สุดอยู่ในช่วง 21,362 - 28,896 ตัน ตามด้วยแผ่นปิดด้านหลัง และซิลิโคนที่มีปริมาณอยู่ในช่วง 7,852 - 10,622 และ 2,339 - 3,164 ตัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 29 (B) (D)



รูปที่ 29 (A) (B) ปริมาณวัสดุของเสียที่เกิดขึ้นตามมุมมองที่ 2 (ต้น) อัตราการชำรุดเสียหายต่ำ
(C) (D) ปริมาณวัสดุของเสียที่เกิดขึ้นตามมุมมองที่ 2 (ต้น) อัตราการชำรุดเสียหายสูง

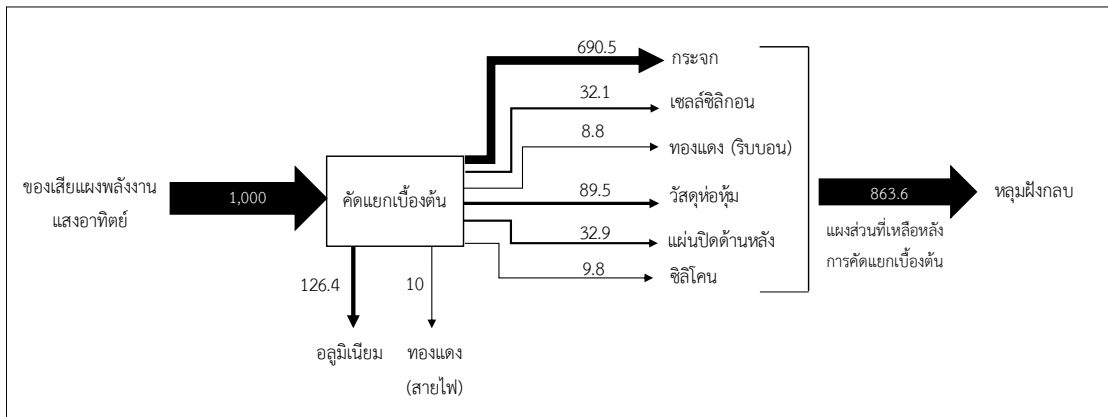
4.4 การประเมินแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์

4.4.1 แผนภาพการไหลของมวล สำหรับแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (Mass flow)

1. แนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน

เมื่อของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่กระบวนการ ขั้นตอนแรกคือการคัดแยกเบื้องต้นจะแยกได้เฉพาะวัสดุที่แยกออกมาได้ง่าย ได้แก่ กรอบอลูมิเนียม ทองแดงจากสายไฟ แผงพลังงาน

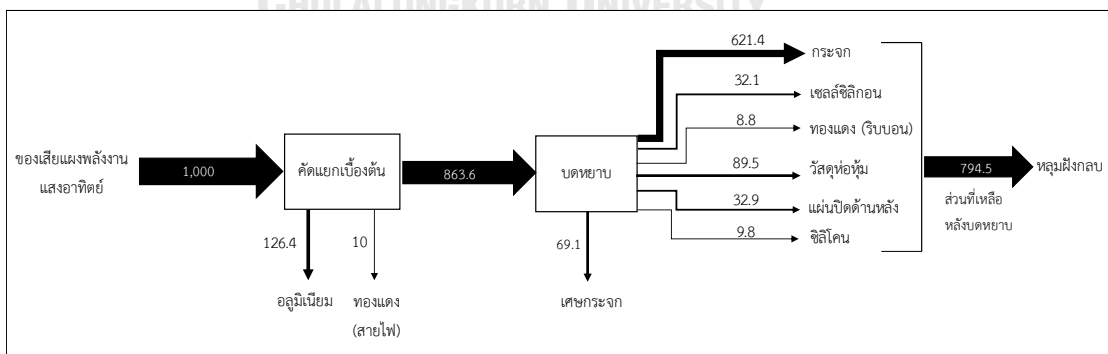
แสงอาทิตย์ส่วนที่เหลือนับเป็นขยะอุตสาหกรรมจะถูกกำจัดตามแนวทางของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ก่อนการฝังกลบ จากรูปที่ 30 จะเห็นว่าวัสดุที่ถูกคัดแยกออกมาได้ จะสามารถจำหน่ายต่อได้ เช่น จำหน่ายให้โรงหลอมอลูมิเนียม โรงหลอมทองแดง หรือร้านที่รับซื้อเศษวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 30 ผังการไหลของมวลสำหรับแนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน

2. แนวทางการบดหยาบ

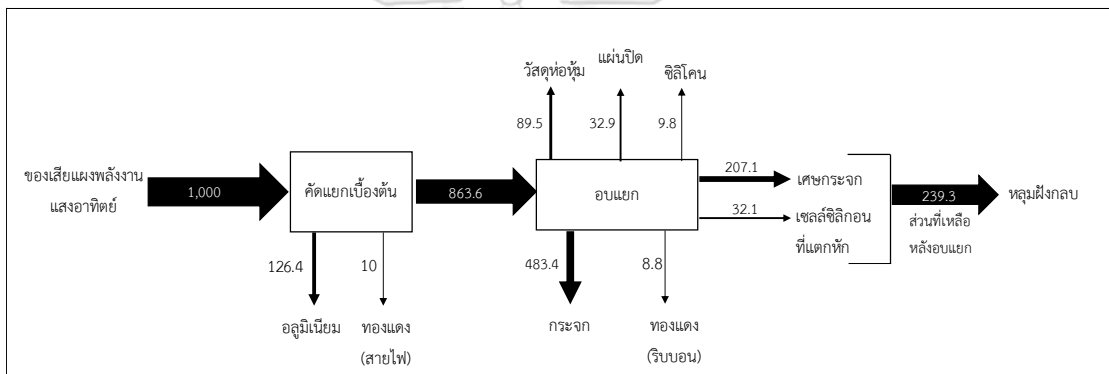
เมื่อของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่กระบวนการ ขั้นตอนแรกคือการคัดแยกเบื้องต้นจะแยกได้เฉพาะวัสดุที่แยกออกมาได้ง่าย ได้แก่ กรอบอลูมิเนียม ทองแดงจากสายไฟ แผงพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนที่เหลือจะนำไปบดหยาบ มีการคัดแยกเศษกระจกเพื่อนำไปรีไซเคิลหรือส่งต่อได้ แต่กระจกที่แยกได้จากแนวทางนี้จะมีความบริสุทธิ์ต่ำ เนื่องจากเป็นเศษกระจกที่ติดอยู่กับส่วนของวัสดุท่อหุ้ม ต้องอาศัยแรงคนในการคัดแยกเศษกระจกนี้ออกมา ทำให้ปริมาณที่คัดแยกได้จริงมีปริมาณไม่มากนัก และส่วนที่เหลือจะถูกกำจัดโดยการฝังกลบ ดังรูปที่ 31



รูปที่ 31 ผังการไหลของมวลสำหรับแนวทางการบดหยาบ

3. แนวทางการอบแยก

แนวทางการอบแยก เมื่อของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่กระบวนการ ขั้นตอนแรกคือการคัดแยกเบื้องต้นจะแยกได้เฉพาะวัสดุที่แยกออกมาได้ง่ายเช่นเดียวกับแนวทางที่ 1 โดยแนวทางนี้มีความต่างกับแนวทางก่อนหน้าในขั้นตอนของการแยกกระจก คือมีการใช้กระบวนการทางความร้อนเพื่ออบแยก โดยความร้อนจะไปทำให้ชั้นของวัสดุห่อหุ้ม แผ่นปิดด้านหลัง และซิลิโคนละลายไปในขั้นตอนนี้ จากนั้นจะทำการคัดแยกกระจกและทองแดงจากรีบอบออกมาได้ สำหรับเศษแผ่นเซลล์ซิลิกอนที่แตกหักถูกส่งไปหลุมฝังกลบต่อไป ดังรูปที่ 32 วัสดุที่ถูกคัดแยกออกมาได้ จะสามารถจำหน่ายต่อได้ เช่น จำหน่ายให้โรงหลอมอลูมิเนียม โรงหลอมทองแดง หรือร้านที่รับซื้อเศษวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 32 ผังการไหลของมวลสำหรับแนวทางการอบแยก

ซึ่งการใช้ความร้อนทำให้กระจกแยกตัวออกจากแผ่นเซลล์ซิลิกอน ซึ่งกระจกที่ได้จะแตกเป็นเม็ดๆ ดังรูปที่ 33 การใช้ความร้อนในการแยกจะทำให้ได้สัดส่วนของเศษกระจกที่มากกว่า และเป็นกระจกที่สะอาดกว่าแนวทางก่อนหน้า



รูปที่ 33 กระจกที่ได้จากการอบแยก

จากแนวทางการจัดการของเสียพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 3 แนวทาง สามารถสรุปองค์ประกอบขาเข้าและขาออกของแต่ละกระบวนการในแต่ละแนวทางได้ ดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 องค์ประกอบเข้า-ออก สำหรับแต่ละแนวทางการจัดการของเสียพลังงานแสงอาทิตย์

| การจัดการ | กระบวนการ | องค์ประกอบขาเข้า | องค์ประกอบขาออก |
|------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| แนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน คัดแยกเบื้องต้น และฝังกลบ | • คัดแยกเบื้องต้น | • ของเสียพลังงานแสงอาทิตย์ | • กรอบอลูมิเนียม • ทองแดง (สายไฟ) |
| | • หลุมฝังกลบ | • ส่วนประกอบอื่นที่เหลือของแผง | |
| แนวทางการบดหยาบ คัดแยกเบื้องต้น บดหยาบ และฝังกลบ | • คัดแยกเบื้องต้น | • ของเสียพลังงานแสงอาทิตย์ | • กรอบอลูมิเนียม • ทองแดง (สายไฟ) |
| | • บดแยก | • ส่วนประกอบอื่นที่เหลือของแผง | • เศษกระจก |

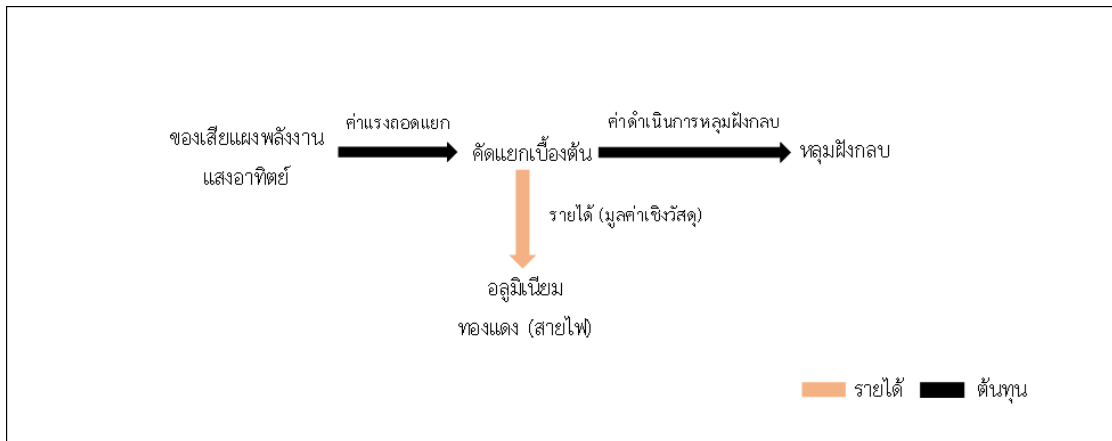
| | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| | • หลุมฝังกลบ | • ส่วนประกอบอื่นที่เหลือของ แผง | |
| แนวทางการอบ แยก คัดแยกเบื้องต้น ใช้เครื่องมือใน การแยกกระจก และฝังกลบ | • คัดแยกเบื้องต้น | • ของเสียแผงพลังงาน แสงอาทิตย์ • ส่วนประกอบอื่นที่เหลือของ แผง | • กรอบอลูมิเนียม • ทองแดง (สายไฟ) |
| | • กระบวนการ ทางความร้อน | • ก๊าซเชื้อเพลิง (LPG) และ ไฟฟ้าสำหรับเครื่องเป่า อากาศ (blower) | • กระจก • ทองแดง (ริบบอน) • พลังงานความร้อน ในรูป ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง |
| | • หลุมฝังกลบ | • แผ่นซิลิกอนที่แตกหัก และ เศษกระจกส่วนที่เหลือ | |

4.4.2 แผนภาพการไหลของตัวเงิน สำหรับแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (Cash flow) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาจาก
ต้นทุนและรายได้ที่ได้ของกระบวนการจัดการเบื้องต้น คิดที่ปริมาณของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์
พื้นฐานที่ 1 ตัน

1.) แนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน

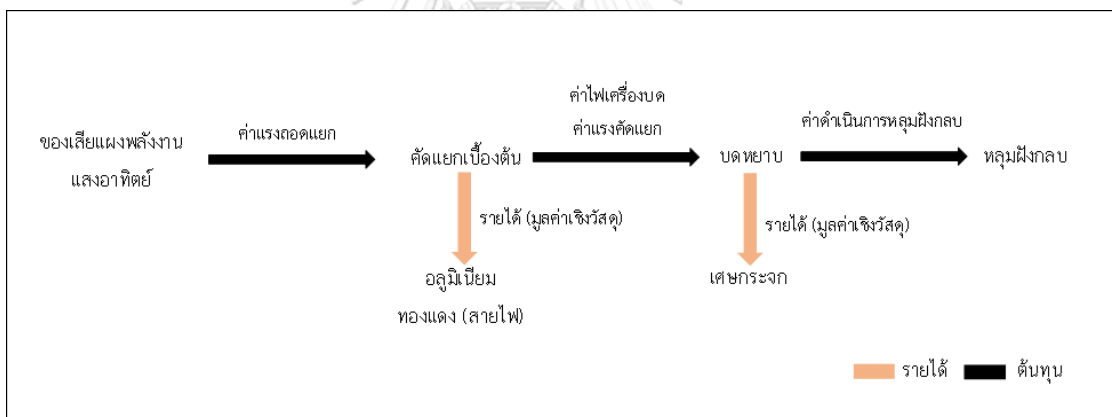
สำหรับแนวทางนี้จะมีต้นทุนหลักจากค่าแรงถอดแยกวัสดุ และค่าดำเนินการหลุมฝังกลบ
ส่วนของรายได้จากการจัดการ จะมาจากวัสดุที่คัดแยกออกมาได้ ได้แก่ กรอบอลูมิเนียม และทองแดง
จากสายไฟ ดังรูปที่ 34



รูปที่ 34 ผังการไหลของตัวเงิน สำหรับแนวทางการจัดการที่ใช้ในปัจจุบัน

2.) แนวทางการบดหยาบ

สำหรับแนวทางนี้จะมีต้นทุนหลักจากค่าแรงถอดแยกวัสดุ ค่าไฟฟ้าในขั้นตอนการบดหยาบ และค่าดำเนินการหลุมฝังกลบ ส่วนของรายได้จากการจัดการ จะมาจากวัสดุที่ตัดแยกออกมาได้ ได้แก่ กรอบอลูมิเนียม ทองแดงจากสายไฟ และเศษกระจกที่ได้ในขั้นตอนการบดหยาบ ดังรูปที่ 35

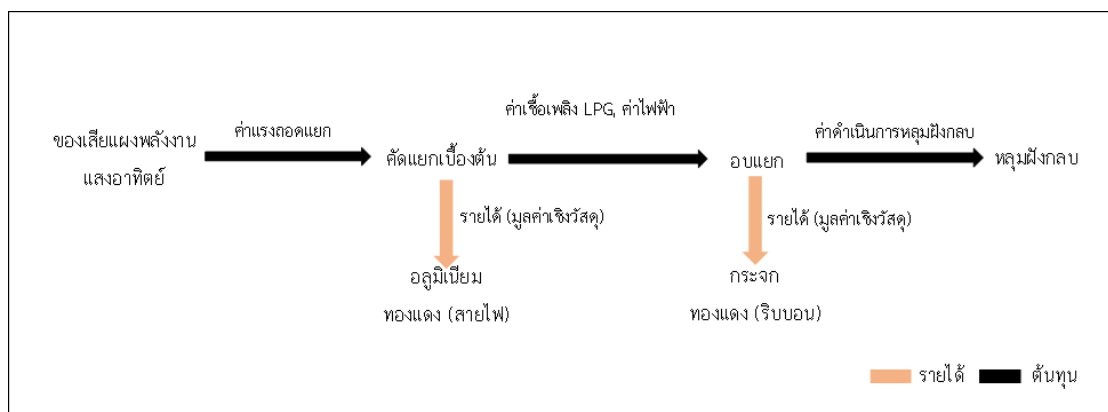


รูปที่ 35 ผังการไหลของตัวเงิน สำหรับแนวทางการบดหยาบ

3.) แนวทางการอบแยก

แนวทางนี้จะมีต้นทุนหลักจากค่าแรงถอดแยกวัสดุ ค่าก๊าซเชื้อเพลิงและไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแยก และค่าดำเนินการหลุมฝังกลบ ส่วนของรายได้จากการจัดการ จะมาจากวัสดุที่ตัดแยกออกมาได้ ได้แก่ กรอบอลูมิเนียม ทองแดงจากสายไฟ และเศษกระจกที่ได้ในขั้นตอนการอบแยก

สำหรับขั้นตอนการอบแยก วัสดุห่อหุ้ม แผ่นปิดด้านหลัง และซิลิโคนจะสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนทำให้เกิดศักยภาพด้านพลังงานในรูปแบบของพลังงานความร้อนขึ้น ดังรูปที่ 36



รูปที่ 36 ผังการไหลของตัวเงิน สำหรับแนวทางการอบแยก

แนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 3 แนวทาง สามารถสรุปต้นทุนที่ใช้และรายได้ที่ได้ ดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 ต้นทุน และรายได้ของแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์

| การจัดการ | กระบวนการ | ต้นทุนต่อ 1 ตัน | รายได้ต่อ 1 ตัน |
|------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| แนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน | ตัดแยกเบื้องต้น | <ul style="list-style-type: none"> ค่าแรงถอดแยก | <ul style="list-style-type: none"> กรอบอลูมิเนียม ทองแดง (สายไฟ) |
| | หลุมฝังกลบ | <ul style="list-style-type: none"> ค่าดำเนินการหลุมฝังกลบ | |
| แนวทางการบดหยาบ | ตัดแยกเบื้องต้น | <ul style="list-style-type: none"> ค่าแรงถอดแยก | <ul style="list-style-type: none"> กรอบอลูมิเนียม ทองแดง (สายไฟ) |
| | กระบวนการทางกล | <ul style="list-style-type: none"> ค่าไฟเครื่องบด ค่าแรงคัดแยกกระฉก | <ul style="list-style-type: none"> เศษกระฉก |

| | | | |
|--------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | หูลุมฝึงกลบ | <ul style="list-style-type: none"> • ค่าแรงค้ดแยก • ค่าดำเนินการหูลุมฝึงกลบ | |
| แนวทางการ อบแยก | ค้ดแยกเป็องต้้น | <ul style="list-style-type: none"> • ค่าแรงถอดแยก | <ul style="list-style-type: none"> • กรอบอลูมิเนียม • ทองแดง (สายไฟ) |
| | กระบวนการทาง ความร้อน | <ul style="list-style-type: none"> • ค่าไฟฟ้า และค่าเชื้อเพลิงใน การเดินระบบอบแยกวัสดุ • ค่าแรงค้ดแยกกระจก | <ul style="list-style-type: none"> • กระจก (สมบูร์ม) • ทองแดง (ริบบอน) |
| | หูลุมฝึงกลบ | <ul style="list-style-type: none"> • ค่าดำเนินการหูลุมฝึงกลบ | |

จากตารางที่ 25 พบว่าค่าหูลุมฝึงกลบของเสียอันตรายคิดเป็นต้นทุนที่สูงที่สุดของการจัดการของเสียแผง 1 ตัน รองมาคือค่าก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแยกซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในแนวทางการจัดการโดยการอบแยก และจากตารางที่ 26 ราคาวัสดุที่ได้จากการค้ดแยก พบว่าทองแดงมีมูลค่าต่อหน่วยน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาคือกรอบอลูมิเนียม แต่กระจกที่มีปริมาณมากที่สุดในแผงกลับมีราคาขายต่อหน่วยค่อนข้างถูก

ตารางที่ 25 สมมติฐานต้นทุนการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์เบื้องต้น (ต่อ 1 ต้น)
(คิดที่น้ำหนักแผงพลังงานแสงอาทิตย์ 22.5 kg/แผง)

| รายการ | สมมติฐาน | ต้นทุนต่อซากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ 1 ต้น (บาท) |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| ค่าแรงถอดแยก ¹ | 405 บาท/คน/วัน (1 คนจัดการได้ 30 แผง) | 600 |
| ค่าก๊าซเชื้อเพลิง (LPG) ในการอบแยก ² | 22.39 บาท/กิโลกรัม | 5,516.72 |
| ค่าไฟฟ้าสำหรับเครื่องเป่าอากาศในระบบการอบแยก ² | หน่วยละ 4.42 บาท | 1,167 |
| ค่าแรงคัดแยกกระจกหลังอบ ¹ | เท่ากับค่าแรงถอดแยก | 600 |
| ค่าไฟเครื่องบด ³ | 30 บาท/แผง | 1,320 |
| ค่าหลุมฝังกลบอันตราย ⁴ (ฝังกลบกากอุตสาหกรรมที่เป็นอันตราย) | | 3,500 บาท ต่อของเสียอันตราย 1 ต้น |

หมายเหตุ: ¹ สมมติฐานค่าแรงแยกแผง อ้างอิงจากค่าแรงช่างอูมิเนียมก่อสร้างระดับที่ 1 จากประกาศคณะกรรมการค่าจ้าง เรื่อง อัตราค่าจ้างตามมาตรฐานฝีมือ (ฉบับที่ 9)

² ปริมาณก๊าซเชื้อเพลิง (LPG) และไฟฟ้าที่ใช้ในการดำเนินการอบแยก (อ้างอิงจากการใช้งานจริงสำหรับเตาระดับต้นแบบ ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

- ราคาก๊าซเชื้อเพลิง (LPG) อ้างอิงจากราคาสินค้าอุตสาหกรรมที่สำคัญเดือนกันยายน ธนาคารแห่งประเทศไทย

- ราคาค่าไฟฟ้า อ้างอิงประกาศการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เรื่องการทบทวนอัตราค่าไฟฟ้าตามหลักเกณฑ์การกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าปี 2558 สำหรับประเภทที่ 2 กิจการขนาดเล็กที่ใช้ไฟ 400 หน่วยขึ้นไป

³ สมมติฐานค่าไฟเครื่องบด 30 บาท/แผง (ที่มา: โครงการการจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายการบริหารจัดการซากอย่างครบวงจร ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ)

⁴ ค่าหลุมฝังกลบ อ้างอิงจากบริษัท เบตเตอร์ เวิลด์ กรีน จำกัด (มหาชน)

ตารางที่ 26 สมมติฐานราคาวัสดุที่ได้จากการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์เบื้องต้น (ต่อ 1 ต้น)

| วัสดุ | ราคา (บาท/กิโลกรัม) | สัดส่วนน้ำหนักในแผง 1 ต้น (%) | สัดส่วนที่ได้คืนจากการรีไซเคิลแผง (%) | ราคาอ้างอิงวันที่ |
|----------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| กรอบอลูมิเนียม | 76 ¹ | 12.64 | 100 | 05/06/2565 |

| | | | | |
|-----------------|-------------------|-------|-------------------------------------|------------|
| (อลูมิเนียมฉาก) | | | | |
| ทองแดง (สายไฟ) | 296 ² | 1.00 | 100 | 03/06/2565 |
| ทองแดง (รีบบอน) | 280 ² | 0.88 | 100 | 03/06/2565 |
| กระจก | 1.80 ² | 69.05 | 10 ³ และ 70 ³ | 03/06/2565 |

หมายเหตุ: ¹ ราคาซื้อเฉลี่ยจากโรงงานหลอม วัสดุโดยตรง (บริษัท อัมพรประเสริฐ อลูมิเนียมอินกอต จำกัด) วันที่ 5 มิถุนายน 2565

² ราคาซื้อวัสดุ (บริษัท วงษ์พาณิชย์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด) วันที่ 3 มิถุนายน 2565

³ สัดส่วนร้อยละของกระจกที่ได้นั้นจากการรีไซเคิลแผง (Duflou และคณะ, 2018; Pagnanelli และคณะ, 2017)

4.4.3 การเปรียบเทียบรายได้และต้นทุนในการดำเนินการจัดการเบื้องต้น

จากสมมติฐานต้นทุนและราคาวัสดุที่ของการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ 1 ตัน ตามตารางที่ 23 และ 24 สามารถนำมาประเมินรายได้และต้นทุนของการจัดการเบื้องต้นได้ ดังนี้

1. แนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน

สำหรับแนวทางนี้จะใช้แรงคนในการคัดแยกเบื้องต้น ได้แก่ การถอดแยกกรอบอลูมิเนียม และทองแดงจากสายไฟภายนอก เป็นแนวทางพื้นฐานที่มีการใช้งานจริง เนื่องจากเป็นวิธีการจัดการอย่างง่าย สามารถดำเนินการได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์หรือขั้นตอนที่ซับซ้อน จากตารางที่ 27 พบว่าต้นทุนหลักมาจากค่าดำเนินการหลุมฝังกลบ สำหรับการขายวัสดุที่เป็นองค์ประกอบในของเสียแผงทำให้มีกำไรจากการจัดการ 9,062.30 บาท

ตารางที่ 27 สมมติฐานรายได้และต้นทุนที่ได้จากการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ตามแนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน

| รายได้ | | | | ต้นทุน | |
|----------------|------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| วัสดุ | ราคา (บาท ต่อกิโลกรัม) | ปริมาณวัสดุที่ได้จากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ 1 ตัน (กิโลกรัม) | มูลค่าเชิงวัสดุ (บาท) | รายการ | ต้นทุนต่อ 1 ตัน (บาท) |
| กรอบอลูมิเนียม | 76 | 126.4 | 9,606.40 | ค่าแรงถอดแยก | 600 |
| ทองแดง (สายไฟ) | 296 | 10 | 2,960.00 | ค่าดำเนินการหลุมฝังกลบ | 3,022.6 |

| | | | | | |
|-----|--|-------|-----------|--|----------|
| รวม | | 136.4 | 12,566.40 | | 3,622.62 |
|-----|--|-------|-----------|--|----------|

2. แนวทางการบรรเทา

สำหรับแนวทางนี้วัสดุที่สามารถแยกได้ ได้แก่ กรอบอลูมิเนียม ทองแดงจากสายไฟภายนอก และเศษกระจกที่ได้จากขั้นตอนการบรรเทาคิดเป็นประมาณร้อยละ 10 ของกระจกทั้งหมด (Duflo และคณะ, 2018) ซึ่งกระจกส่วนที่เหลือจะมีสิ่งปนเปื้อนหรือกลายเป็นผงจนไม่สามารถนำไปขายต่อได้จากตารางที่ 28 พบว่าต้นทุนหลักมาจากค่าไฟที่ใช้ในการบด และค่าดำเนินการหลุมฝังกลบ สำหรับการขายวัสดุที่เป็นองค์ประกอบในของเสียแพงทำให้มีกำไรจากการจัดการ 7,389.77 บาท

ตารางที่ 28 สมมติฐานรายได้และต้นทุนที่ได้จากการจัดการของเสียพลังงานแสงอาทิตย์ตามแนวทางการบรรเทา

| รายได้ | | | | ต้นทุน | |
|----------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| วัสดุ | ราคา (บาท ต่อ กิโลกรัม) | ปริมาณวัสดุที่ได้จากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ 1 ตัน (กิโลกรัม) | มูลค่าเชิงวัสดุ (บาท) | รายการ | ต้นทุนต่อ 1 ตัน (บาท) |
| กรอบอลูมิเนียม | 76 | 126.4 | 9,606.40 | ค่าแรงถอดแยก | 600 |
| ทองแดง (สายไฟ) | 296 | 10 | 2,960.00 | ค่าไฟฟ้าสำหรับเครื่องบด | 1,320.00 |
| กระจก | 1.80 | 69.1 | 124.29 | ค่าแรงคัดแยกกระจก | 600.00 |
| | | | | ค่าดำเนินการหลุมฝังกลบ | 2,780.93 |
| รวม | | 205.45 | 12,690.69 | | 5,300.93 |

3. แนวทางการอบแยก

สำหรับแนวทางนี้วัสดุที่สามารถแยกได้ ได้แก่ กรอบอลูมิเนียม ทองแดงจากสายไฟภายนอก และรีบบอน และกระจกที่ได้จากขั้นตอนการอบแยกคิดเป็นประมาณร้อยละ 70 ของกระจกทั้งหมด (Pagnanelli และคณะ, 2017) และมีความบริสุทธิ์มากขึ้นจากการที่ไม่มีวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ พลาสติก หรือกาวเข้ามาปะปนกับเศษกระจก ถือเป็นสัดส่วนที่ทำให้มีรายได้สูงกว่าสองแนวทางก่อนหน้า แต่ก็ทำให้ต้นทุนที่ต้องใช้ในการจัดการสูงกว่าเช่นกัน จากตารางที่ 29 ต้นทุนหลักจากค่าก๊าซ เชื้อเพลิงและไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินระบบอบแยก (ปริมาณก๊าซเชื้อเพลิง (LPG) และค่าไฟที่ใช้ในการดำเนินการอบแยก อ้างอิงจากการใช้งานจริงสำหรับเตาระดับต้นแบบ ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) และค่าดำเนินการหลุมฝังกลบ สำหรับการขายวัสดุที่เป็นองค์ประกอบในของเสียผงทำให้มีกำไรจากการจัดการ 7,179.34 บาท

ตารางที่ 29 สมมติฐานรายได้และต้นทุนที่ได้จากการจัดการของเสียผงพลังงานแสงอาทิตย์ตามแนวทางการอบแยก

| รายได้ | | | | ต้นทุน | |
|-----------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| วัสดุ | ราคา (บาท ต่อ กิโลกรัม) | ปริมาณวัสดุที่ได้จากของเสียผงพลังงานแสงอาทิตย์ 1 ตัน (กิโลกรัม) | มูลค่าเชิงวัสดุ (บาท) | รายการ | ต้นทุนต่อ 1 ตัน (บาท) |
| กรอบอลูมิเนียม | 76 | 126.4 | 9,606.40 | ค่าแรงถอดแยก | 600.00 |
| ทองแดง (สายไฟ) | 296 | 10 | 2,960.00 | ค่าก๊าซเชื้อเพลิง (LPG) | 5,516.72 |
| กระจก | 1.8 | 483.4 | 870.03 | ค่าไฟฟ้า | 1,167.00 |
| ทองแดง (รีบบอน) | 280 | 8.8 | 2,464.00 | ค่าแรงคัดแยก กระจก | 600.00 |

| | | | | | |
|-----|--|--------|-----------|----------------------------|----------|
| | | | | ค่าดำเนินการ หลุมฝังกลบ | 837.38 |
| รวม | | 628.55 | 15,900.43 | | 8,721.10 |

4.4.4 การประเมินด้านพลังงาน

การประเมินด้านพลังงานในส่วนของคุณภาพด้านพลังงานของวัสดุพอลิเมอร์ (วัสดุห่อหุ้มแผ่นปิดด้านหลัง และซิลิโคน) ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถเอาไปใช้ในเชิงพลังงานได้ โดยเมื่อวัสดุเหล่านี้ได้รับความร้อน จะเกิดการสลายตัวทำให้เกิดพลังงานความร้อนเกิดขึ้นในรูปค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (heating value) ซึ่งจากการประเมินปริมาณของเสียจากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในหัวข้อ 4.3.2 พบว่าในปี พ.ศ. 2582 จะมีปริมาณของวัสดุพอลิเมอร์เกิดขึ้นค่อนข้างสูง หากนำไปจัดการโดยวิธีการอบแยก (กระบวนการทางความร้อน) มีโอกาสที่จะนำเอาพลังงานกลับคืนมาใช้ประโยชน์ได้ และดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.1.3 ซึ่งค่าความร้อนที่ได้จากวัสดุห่อหุ้มมีค่าสูงมากและเทียบได้กับไบโอดีเซล น้ำมันทำความร้อน น้ำมันดีเซล และก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่มีค่าความร้อนเท่ากับ 40.2 42.6 45.09 และ 46 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และสำหรับค่าความร้อนของวัสดุห่อหุ้มและแผ่นปิดด้านหลัง มีค่ามากกว่าพืชพลังงานที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น พางข้าว และเปลือกเมล็ดปาล์ม (11.5 และ 16.75 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) จึงมีความเป็นไปได้ในการที่จะดึงเอาความร้อน หรือพลังงานที่ได้ออกมาใช้ประโยชน์ (Uçara และคณะ, 2008) (Farrell และคณะ, 2019) (Satlewal และคณะ, 2017) (Okoli, 2020) เช่น ใช้ในการผลิตไอน้ำ ทำน้ำร้อน และผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น (Energy Next, 2564)

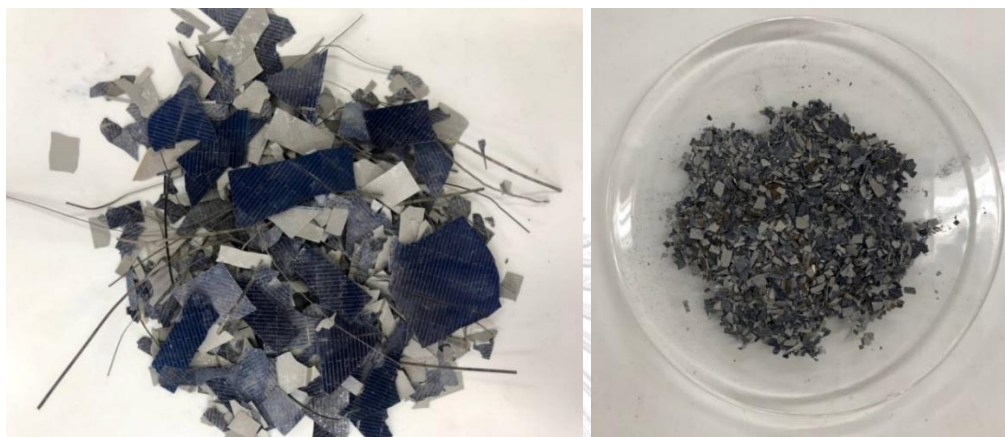
พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการเพื่อช่วยลดการใช้เชื้อเพลิง เช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้าของ (Ratner และคณะ, 2020) กล่าวว่าวัสดุห่อหุ้มที่สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือแหล่งความร้อนสำหรับใช้ในกระบวนการอื่น ที่จะสามารถช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้บางส่วน

4.4.5 การประเมินด้านผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

4.4.5.1 ผลวิเคราะห์ความเป็นอันตรายของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

จากการทำการชะละลาย (Leaching Test) ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน โดยนำแผ่นเซลล์ซิลิกอนและทองแดง (ริบบอน) ดังรูปที่ 37 โดยผลวิเคราะห์ TTLC และ STLC ตาม

นิยามของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 สามารถระบุได้ว่าแผงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นของเสียอันตรายเนื่องจากมีค่า TTLC และ STLC ของทองแดงและตะกั่วเกินค่ามาตรฐานอยู่ที่ 206,035 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 65.4 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับทองแดง 7847 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 672 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับตะกั่ว ดังตารางที่ 30 และ 31



รูปที่ 37 ตัวอย่างแผ่นเซลล์ซิลิกอน และทองแดง (รีบบอน)

ตารางที่ 30 ผลการวิเคราะห์ TTLC

| การวิเคราะห์ | หน่วย | รายงาน ผล | ค่ามาตรฐาน | วิธีที่ใช้ |
|--------------|--------------------------|--------------|------------|-----------------------------------------|
| ทองแดง | มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม | 209,035 | <2500 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D |
| ตะกั่ว | มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม | 7,847 | <1000 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D |

อ้างอิงตาม: Notification of the Ministry of Industry regarding Waste or Used Material Disposal, published in the Royal Government Gazette, Vol.123, Special Part 11D, dated January 25, B.E. 2549 (2006).

ตารางที่ 31 ผลการวิเคราะห์ STLC

| การวิเคราะห์ | หน่วย | รายงาน ผล | ค่ามาตรฐาน | วิธีที่ใช้ |
|--------------|------------------|--------------|------------|---------------|
| ทองแดง | มิลลิกรัมต่อลิตร | 65.4 | <25 | MOI, B.E.2548 |
| ตะกั่ว | มิลลิกรัมต่อลิตร | 672 | <5 | MOI, B.E.2548 |

อ้างอิงตาม: Notification of the Ministry of Industry regarding Waste or Used Material Disposal, published in the Royal Government Gazette, Vol.123, Special Part 11D, dated January 25, B.E. 2549 (2006)

4.4.5.2 การประเมินด้านผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

ผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เป็นหนึ่งในข้อมูลที่ใช้เพื่อประเมินแนวทางการจัดการของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนปริมาณ 1 ตัน ของทั้ง 3 แนวทาง ได้แก่ 1. แนวทางที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (S1) 2. แนวทางการบดหยาบ (S2) 3. แนวทางการอบแยก (S3) ที่เป็นไปได้สำหรับประเทศไทยในอนาคต ซึ่งค่าที่เป็นบวกแสดงถึงภาระหรือส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และค่าที่เป็นลบแสดงถึงเครดิตหรือประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม

จากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการจัดการของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน โดยทำการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม 8 ด้าน ดังรูปที่ 38 มีรายละเอียดดังนี้

ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านการเกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) ที่เป็นค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังรูปที่ 38(A) โดยแนวทาง S1 มีเครดิตต่อสิ่งแวดล้อมสูงที่สุดในภาพรวมเท่ากับ $-2,404.87 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ เนื่องจากแนวทางนี้ไม่มีการใช้เครื่องมือที่ซับซ้อนและมีการใช้พลังงานน้อยที่สุด จึงทำให้เกิดมลพิษทางอากาศน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแนวทางอื่น สำหรับแนวทาง S2 พบว่ามีเครดิตต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวมรองมาเท่ากับ $-1,467.50 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ โดยผลกระทบหลักที่เกิดขึ้นสำหรับแนวทางนี้คือส่วนของการบดหยาบแฉงและการใช้ไฟฟ้า และในแนวทาง S3 พบว่ามีเครดิตต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวมน้อยที่สุดเท่ากับ $-485.72 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ เนื่องจากการอบแยกตัวแฉงที่ถือเป็นของเสียอันตรายซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงที่สุดในด้านนี้ ทั้งนี้สาเหตุหลักมาจากการใช้ไฟฟ้าและเชื้อเพลิงในขั้นตอนการดำเนินการ

ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านการก่อตัวของอนุภาคขนาดเล็ก (Fine particulate matter formation) ที่แสดงในหน่วยกิโลกรัมของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน เทียบเท่า จะเห็นได้จากรูปที่ 38(B) พบว่าแนวทาง S3 มีเครดิตต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวมสูงที่สุดเท่ากับ $-6.03 \text{ kg PM}_{2.5} \text{ eq}$ แม้ว่าในขั้นตอนของการอบแยกและการใช้ก๊าซเชื้อเพลิงในการเดินระบบ จะทำให้เกิดผลกระทบมากที่สุดตามลำดับ แต่การนำกลับของวัสดุ ได้แก่ ทองแดง (รีบบอน) และกระจก สามารถชดเชยค่าผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ รองลงมาคือแนวทาง S1 มีเครดิตในภาพรวมเท่ากับ $-5.89 \text{ kg PM}_{2.5} \text{ eq}$ โดยผลกระทบหลักที่เกิดขึ้นสำหรับแนวทางนี้คือการฝังกลบที่เกิดจากส่วนของกระจก และสำหรับแนวทาง S2 พบว่ามีเครดิตต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวมน้อยที่สุดเท่ากับ $-5.59 \text{ kg PM}_{2.5} \text{ eq}$ เนื่องจากในส่วนการบดหยาบของแฉงในแนวทางนี้จะทำให้เกิดผลกระทบมากที่สุด

ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านการเกิดภาวะความเป็นกรด (Terrestrial acidification) ที่แสดงในหน่วยกิโลกรัมของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่า ดังรูปที่ 38(C) พบว่าในแนวทาง S3 เกรดติดต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดในภาพรวมเท่ากับ $-14.51 \text{ kg SO}_2 \text{ eq}$ แม้ว่าในขั้นตอนของการอบแยกจะทำให้เกิดผลกระทบมากที่สุด แต่การนำกลับของวัสดุ ได้แก่ ทองแดง (รีบบอน) และกระจก สามารถชดเชยค่าผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ รองลงมาคือแนวทาง S1 และ S2 ที่มีเกรดติดต่อสิ่งแวดล้อมใกล้เคียงกันเท่ากับ -13.57 และ $-12.97 \text{ kg SO}_2 \text{ eq}$ ตามลำดับ

ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์บนบก (Terrestrial ecotoxicity) เป็นค่าศักยภาพของสารพิษต่อดิน ที่แสดงผลในหน่วยของกิโลกรัมของสาร 1,4 ไดคลอโรเบนซีน ดังรูปที่ 38(D) พบว่าในแนวทาง S3 มีเกรดติดต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดในภาพรวมสูงที่สุดเท่ากับ $-39,802.30 \text{ kg 1,4-DCB}$ เนื่องจากมีการนำกลับทองแดงในส่วนรีบบอนที่ทำให้มีเกรดติดเกิดขึ้นสูงที่สุด จึงไปชดเชยผลกระทบที่เกิดจากการอบแยกแผงได้ สำหรับแนวทาง S1 มีเกรดติดต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวมรองลงมาเท่ากับ $-22,512.02 \text{ kg 1,4-DCB}$ โดยผลกระทบหลักที่เกิดขึ้นสำหรับแนวทางนี้คือการฝังกลบที่เกิดจากส่วนกระจก และสำหรับแนวทาง S2 พบว่ามีเกรดติดต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวมน้อยที่สุดเท่ากับ $-17,398.29 \text{ kg 1,4-DCB}$ โดยผลกระทบหลักที่เกิดขึ้นสำหรับแนวทางนี้คือ ส่วนของกระบวนการบัดหยาบ

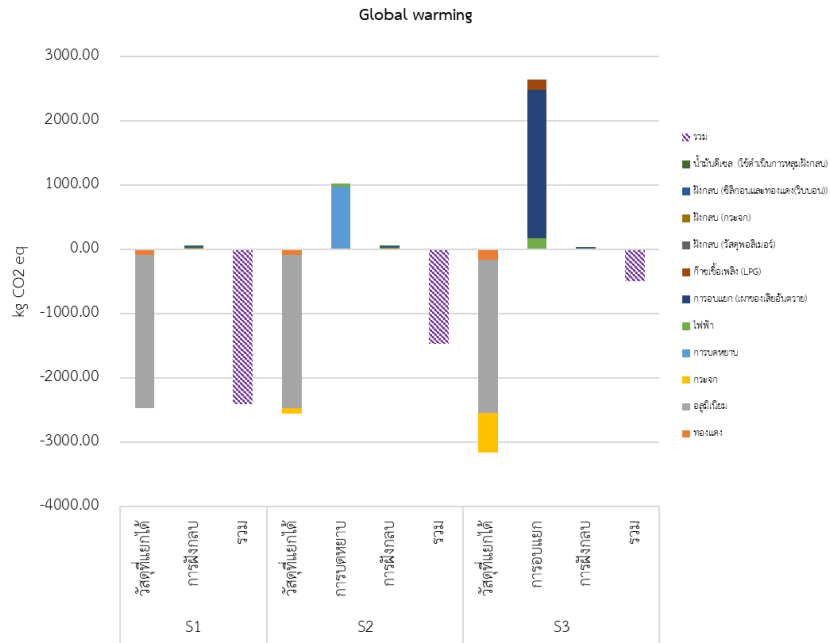
ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์ที่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Human carcinogenic toxicity) เป็นค่าศักยภาพของสารพิษที่ก่อให้เกิดมะเร็งได้ ที่แสดงผลในหน่วยของกิโลกรัมของสาร 1,4 ไดคลอโรเบนซีน ดังรูปที่ 38(E) พบว่าแนวทาง S1 และแนวทาง S2 มีเกรดติดต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดในภาพรวมใกล้เคียงกันเท่ากับ -385.92 และ $-359.41 \text{ kg 1,4-DCB}$ ตามลำดับ และในแนวทาง S3 มีเกรดติดต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวมน้อยที่สุดเท่ากับ $-193.64 \text{ kg 1,4-DCB}$ เนื่องจากในส่วนของกระบวนการอบแยกตัวแผงที่ถือเป็นของเสียอันตราย จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงที่สุด ซึ่งการสลายตัวของวัสดุพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน จะมีการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยได้ออกมา และแผ่นปิดด้านหลังที่มีองค์ประกอบของฟลูออรีน อาจก่อให้เกิดสารประกอบไดออกซินในกระบวนการได้

ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์ที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Human non-carcinogenic toxicity) เป็นค่าศักยภาพของสารพิษที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง ที่แสดงผลในหน่วยของกิโลกรัมของสาร 1,4 ไดคลอโรเบนซีน ดังรูปที่ 38(F) พบว่าแนวทาง S3 มีเกรดติดสูงที่สุด

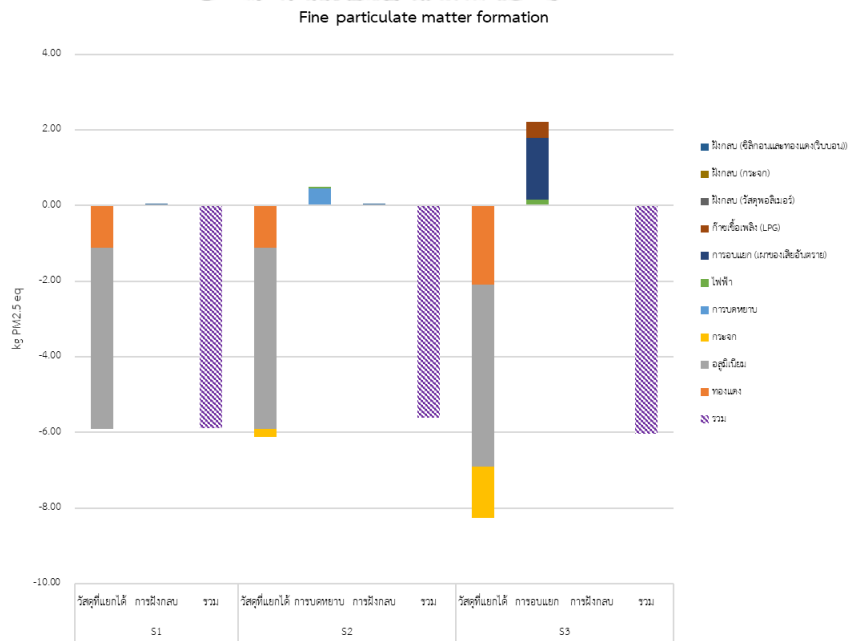
ในภาพรวมของการประเมินผลกระทบเท่ากับ $-10,066.10 \text{ kg } 1,4\text{-DCB}$ โดยการนำกลับของทองแดงในส่วนของรีบบอนทำให้เกิดเครดิตสูงที่สุดในแนวทางนี้ ซึ่งสามารถชดเชยผลกระทบที่เกิดจากการอบแยกแ่งได้ สำหรับแนวทาง S1 มีเครดิตต่อสิ่งแวดลอมในภาพรวมรองลงมาเท่ากับ $-4,810.23 \text{ kg } 1,4\text{-DCB}$ โดยผลกระทบหลักที่เกิดขึ้นสำหรับแนวทางนี้คือการฝังกลบที่เกิดจากส่วนของวัสดุพอลิเมอร์ ส่วนของซิลิกอนและทองแดง(รีบบอน) และสำหรับแนวทาง S2 พบว่ามีเครดิตในภาพรวมน้อยที่สุดเท่ากับ $-3,555.04 \text{ kg } 1,4\text{-DCB}$ โดยผลกระทบหลักที่เกิดขึ้นสำหรับแนวทางนี้เกิดจากขั้นตอนการบดหยาบ เนื่องจากมีส่วนวัสดุตกค้างเกิดขึ้นจากกระบวนการ

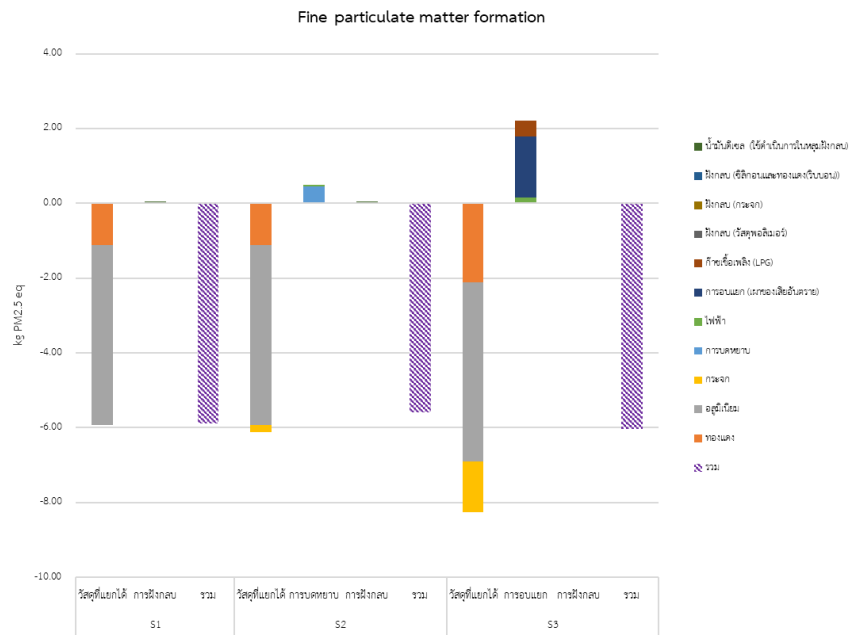
ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านการขาดแคลนทรัพยากรแร่ (Mineral resource scarcity) ที่แสดงในหน่วยกิโลกรัมของทองแดงเทียบเท่า ดังรูปที่ 38(G) พบว่าแนวทาง S3 มีเครดิตในภาพรวมของการประเมินผลกระทบสูงที่สุดเท่ากับ -43.80 kg Cu eq โดยในแนวทางนี้ที่มีการใช้กระบวนการทางความร้อน ทำให้สามารถแยกกระจกและทองแดงในส่วนของรีบบอนออกมาได้จึงชดเชยผลกระทบจากการอบแยกได้ และการนำกลับวัสดุสามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการผลิตในขั้นต้นได้เช่นกัน สำหรับแนวทาง S1 และ S2 มีเครดิตต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวมใกล้เคียงกันเท่ากับ -33.76 และ -30.17 kg Cu eq เนื่องจากสูญเสียกระจก และทองแดงไปโดยการฝังกลบ

ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านการขาดแคลนทรัพยากรฟอสซิล (Fossil resource scarcity) ที่แสดงในหน่วยกิโลกรัมของน้ำมันเทียบเท่า ดังรูปที่ 38(H) พบว่าแนวทาง S1 เครดิตในภาพรวมของการประเมินผลกระทบสูงที่สุดเท่ากับ $-501.93 \text{ kg oil eq}$ เนื่องจากมีการใช้พลังงานในกระบวนการน้อยที่สุด รองลงมาได้แก่แนวทาง S2 เท่ากับ $-465.73 \text{ kg oil eq}$ โดยผลกระทบหลักสำหรับแนวทางนี้เกิดจากการบดหยาบแ่ง ที่มีการใช้ไฟฟ้าในการดำเนินการ และสำหรับแนวทาง S3 พบว่ามีเครดิตต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวมน้อยที่สุดเท่ากับ $-137.06 \text{ kg oil eq}$ โดยในแนวทางนี้มีการใช้เชื้อเพลิงและไฟฟ้าในขั้นตอนการกำจัดปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านนี้มากที่สุด เนื่องจากกระบวนการของการได้มาของผลิตภัณฑ์ก๊าซและปิโตรเลียม จึงส่งผลให้เกิดการขาดแคลนทรัพยากรฟอสซิลได้

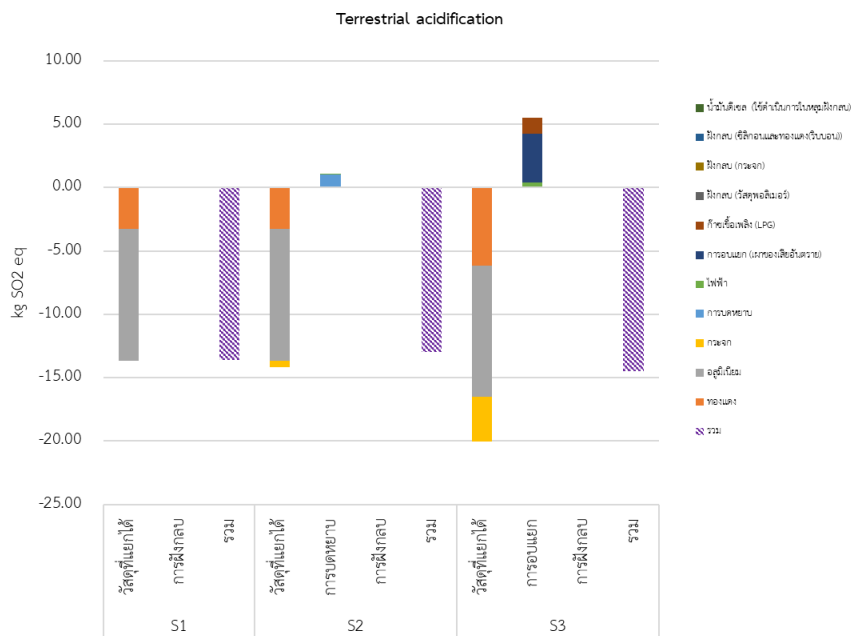


(A) การเกิดภาวะโลกร้อน (Global warming)

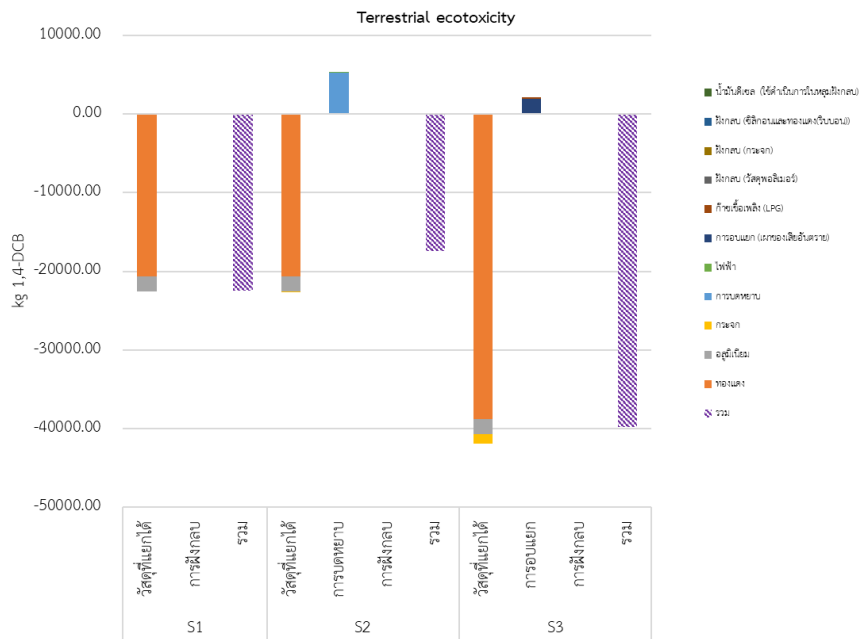




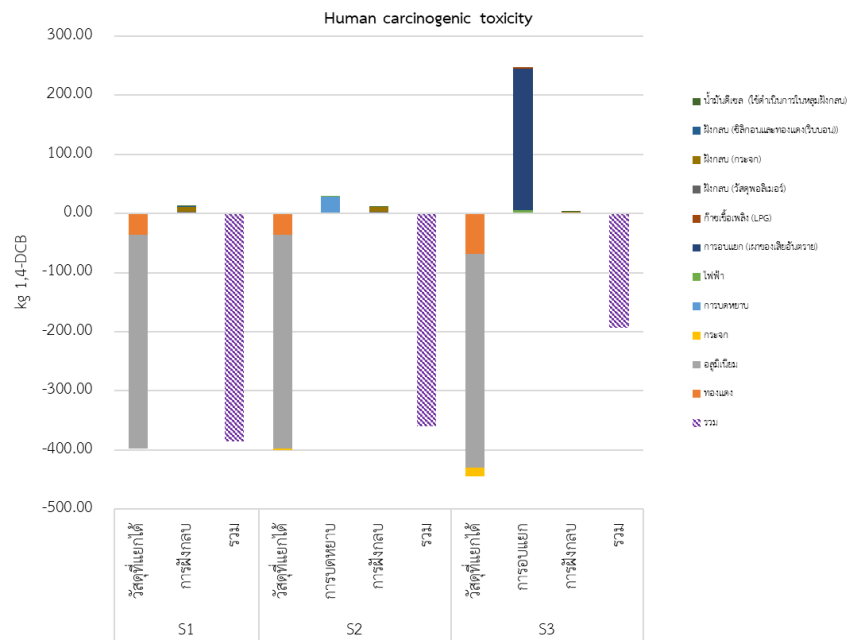
(B) การก่อตัวของอนุภาคขนาดเล็ก (Fine particulate matter formation)



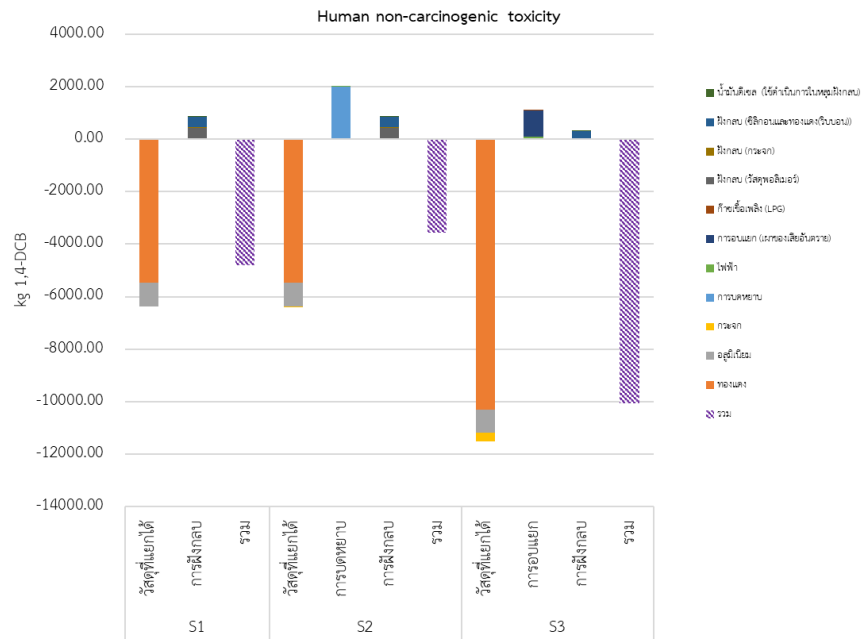
(C) การเกิดภาวะความเป็นกรด (Terrestrial acidification)



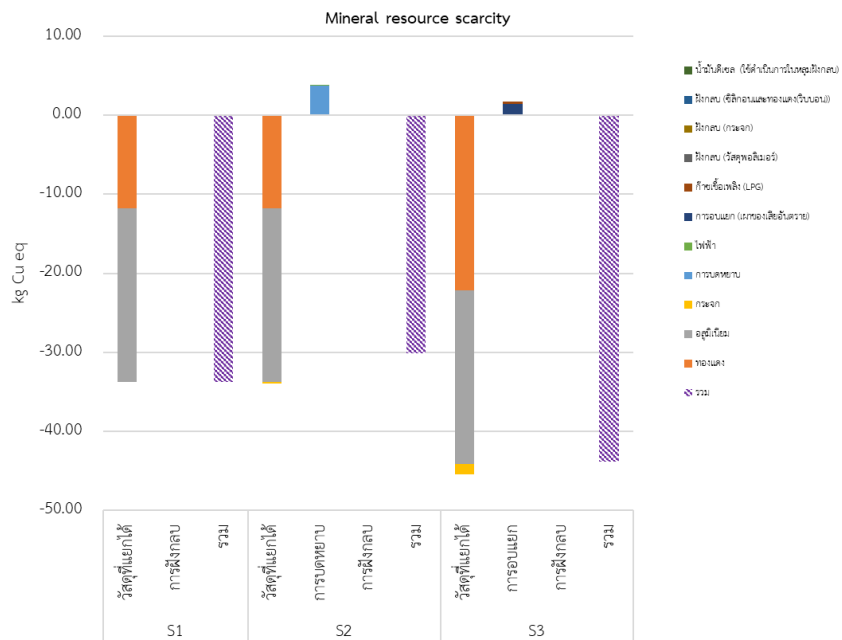
(D) ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก (Terrestrial ecotoxicity)



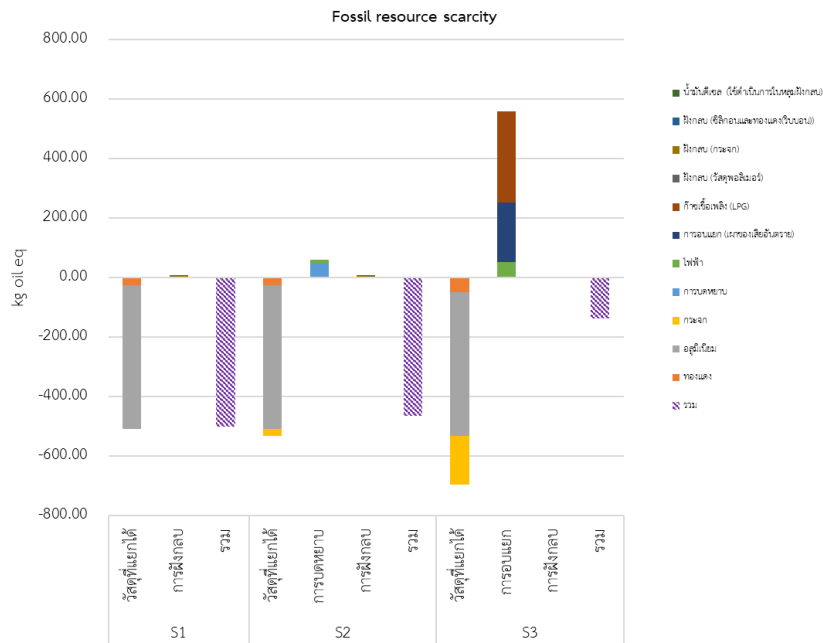
(E) ความเป็นพิษต่อมนุษย์ที่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Human carcinogenic toxicity)



(F) ความเป็นพิษต่อมนุษย์ที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Human non-carcinogenic toxicity)



(G) การขาดแคลนทรัพยากรแร่ (Mineral resource scarcity)



(H) การขาดแคลนทรัพยากรฟอสซิล (Fossil resource scarcity)

รูปที่ 38 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงาน

แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อคาดการณ์ปริมาณของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และเพื่อประเมินการจัดการของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1.) การคาดการณ์ปริมาณของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ และปริมาณวัสดุจากของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์

พบว่าทั้ง 2 มุมมอง (1. แฉงหมดอายุการใช้งานเมื่อครบ 20 ปี 2. แฉงที่ชำรุดรวมกับแฉงหมดอายุการใช้งานเมื่อครบ 20 ปี) จะมีปริมาณของเสียแฉงที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน โดยในปี พ.ศ. 2582 จากการคาดการณ์ทั้ง 2 มุมมอง สามารถสรุปได้ว่าปริมาณของเสียแฉงสะสมรวมที่จะเกิดขึ้นอยู่ในช่วง 237,394 - 322,856 ตัน โดยที่มีปริมาณของกระจกมากเกินครึ่งของปริมาณของเสียแฉงสะสม อยู่ในช่วงประมาณ 163,921 - 222,932 ตัน สำหรับวัสดุที่สามารถนำไปใช้ในเชิงพลังงานหรือวัสดุพอลิเมอร์ (วัสดุห่อหุ้ม แผ่นปิดด้านหลัง และซิลิโคน) มีปริมาณรวมกันอยู่ในช่วง 31,384 - 42,682 ตัน

2.) การประเมินการจัดการของเสียแฉงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

2.1) ด้านการเงิน (รายได้ ต้นทุนสำหรับการจัดการเบื้องต้น)

จากแนวทางทั้ง 3 จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันในส่วนของต้นทุนและรายได้ที่เกิดขึ้น กล่าวคือหากมีกระบวนการที่ใช้งานขึ้นก็จะยิ่งได้วัสดุออกมาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดปริมาณที่จะต้องนำไปฝังกลบได้มากขึ้นอีกด้วยทำให้ค่ากำจัดโดยการฝังกลบน้อยลง วัสดุที่มีราคาับซื้อสูงที่สุดได้แก่ ทองแดงทั้งจากสายไฟและริบบอน แต่มีปริมาณน้อยที่สุดในของเสียแฉง ต่างกับกระจกที่มีปริมาณมากที่สุดแต่กลับมีราคาับซื้อค่อนข้างต่ำ และสำหรับทุกแนวทางพบว่ามียาได้มากกว่าต้นทุนใช้ในการดำเนินการจัดการของเสียแฉงเบื้องต้น

ดังตารางที่ 32 พบว่าแนวทางที่ 1 (แนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน) สามารถแยกวัสดุได้น้อยที่สุดได้แก่ โลหะอลูมิเนียม และทองแดงจากสายไฟ ทำให้เหลือวัสดุที่ต้องนำไปฝังกลบปริมาณมากที่สุด ซึ่งต่างจากแนวทางที่ 2 (แนวทางการบดหยาบ) และ 3 (แนวทางการอบแยก) ที่มีการใช้เครื่องมือเพิ่มเติมทำให้ได้เศษกระจกออกมา แต่กระจกที่ได้จากแนวทางที่ 2 ยังมีวัสดุห่อหุ้มติดอยู่ด้วยทำให้มีความบริสุทธิ์ต่ำกว่า นอกจากนี้ในแนวทางที่ 3 ที่มีการใช้ความร้อนทำให้สามารถแยกกระจกออกจาก

แผ่นเซลล์ซิลิกอนได้อย่างสมบูรณ์ และทำให้ได้ทองแดงในส่วนของริบบอนที่เชื่อมระหว่างแผ่นเซลล์อีกด้วย ซึ่งจะทำให้ลดปริมาณการนำไปฝังกลับได้

ตารางที่ 32 เปรียบเทียบรายได้และต้นทุนการจัดการเบื้องต้น และปริมาณเสียอันตรายที่เหลือนำไปกำจัดทั้ง 3 แนวทาง

| แนวทางการจัดการ | รายได้ (บาท) | ต้นทุนการจัดการเบื้องต้น (บาท) | ปริมาณของเสียที่เหลือนำไปกำจัด (กิโลกรัม) |
|---------------------------|--------------|--------------------------------|-------------------------------------------|
| 1. แนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน | 12,566.40 | 3,622.62 | 863.60 |
| 2. แนวทางการบดหยาบ | 12,690.69 | 5,300.93 | 794.55 |
| 3. แนวทางการอบแยก | 15,900.43 | 8,721.10 | 239.30 |

2.2) ด้านพลังงาน

สำหรับการประเมินด้านพลังงานในส่วนของศักยภาพด้านพลังงานของวัสดุพอลิเมอร์ (วัสดุห่อหุ้ม แผ่นปิดด้านหลัง และซิลิโคน) พบว่าจากการประเมินปริมาณของวัสดุพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในของเสียแผงที่จะเกิดขึ้นในอนาคต หากนำของเสียแผงไปจัดการโดยวิธีการอบแยก (กระบวนการทางความร้อน) มีโอกาสที่จะนำเอาพลังงานจากการสลายตัวของวัสดุพอลิเมอร์กลับคืนมาใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งยืนยันได้จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของวัสดุเหล่านี้ พบว่าวัสดุห่อหุ้มมีค่าความร้อนมากที่สุดอยู่ในช่วง 38.46 – 40.54 เมกะจูลต่อกิโลกรัม จึงมีความเป็นไปได้ในการที่จะดึงเอาความร้อน หรือพลังงานที่ได้ออกมาใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต ถือเป็นประโยชน์ทั้งด้านสิ่งแวดล้อม และทางเศรษฐกิจมากกว่าการนำวัสดุเหล่านี้ไปฝังกลับ ทำให้แนวทางการอบแยกมีผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมในเรื่องของการลดปริมาณการฝังกลับสูงที่สุด

2.3) ด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

จากการทำการชะละลาย (Leaching Test) ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน โดยผลวิเคราะห์ TTLC และ STLC สามารถระบุได้ว่าแผงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นของเสียอันตราย เนื่องจากมีค่าของตะกั่วและทองแดงเกินมาตรฐาน จึงจำเป็นต้องมีการจัดการที่เหมาะสมต่อไป

และจากการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งหมด 8 ด้าน พบว่าแนวทางการอบแยก (S3) มีเครดิตต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด 5 ด้าน ได้แก่ ด้านการก่อตัวของอนุภาคขนาดเล็ก ด้านการเกิดภาวะความเป็นกรด ด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์บนบก ด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์ที่ไม่ก่อให้เกิด

มะเร็ง และด้านการขาดแคลนทรัพยากรแร่ ถึงแม้ในบางขั้นตอนจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดแต่จะถูกชดเชยผลกระทบจากการนำกลับของวัสดุ เช่น กระจก และทองแดง(รีบบอน) นอกจากนี้ในระหว่างกระบวนการแยกจะเกิดพลังงานความร้อนที่สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการ เพื่อช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงได้ อีกทั้งวัสดุที่แยกออกมาได้จะทำให้เกิดรายได้ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy)

2.4) การพิจารณาแนวทางเลือกทั้งสามนั้น จึงควรนำปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมมาพิจารณาควบคู่กับส่วนของรายได้ และต้นทุนของระบบด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบางตัวอาจจะลดลงได้อีก หากมีการใช้ก๊าซชีวภาพแทนการใช้ LPG ในกระบวนการ S



a

บรรณานุกรม

- Amerisolar. (2018). What is the difference between monocrystalline and polycrystalline solar panels? แหล่งที่มา: <https://www.weamerisolar.eu/the-difference-between-monocrystalline-and-polycrystalline-solar-panels/?fbclid=IwAR00w5Nk2CDT5ofumUjyM1STgt4YalI74eubMnUOKr0HaTsCZALpIdZD8Lo> [25 ตุลาคม 2563]
- Ansanelli, G., Fiorentino, G., Tammaro, M., & Zucaro, A. (2021). A Life Cycle Assessment of a recovery process from End-of-Life Photovoltaic Panels. *Applied Energy*, 290. doi:10.1016/j.apenergy.2021.116727
- Bio Intelligence Service. (2011). *STUDY ON PHOTOVOLTAIC PANELS SUPPLEMENTING THE IMPACT ASSESSMENT FOR A RECAST OF THE WEEE DIRECTIVE* [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/944769fa-6545-41c1-8d1f-de5f2061c3c0>
- Bogacka, M., Potempa, M., Milewicz, B., Lewandowski, D., Pikon, K., Klejnowska, K., . . . Misztal, E. (2020). PV Waste Thermal Treatment According to the Circular Economy Concept. *Sustainability*, 12(24), 1-13. doi:10.3390/su122410562
- Choi, J.-K., & Fthenakis, V. (2014). Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 66, 443-449. doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.022
- Chowdhury, S. M., Rahman, S. K., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, M., . . . Amin, N. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews* 27, 1-11. doi:10.1016/j.esr.2019.100431
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., & Rosa, P. (2015). End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 552-561. doi:10.1016/j.rser.2015.03.076
- Danz, P., Aryan, V., Möhle, E., & Nowara, N. (2019). Experimental Study on Fluorine

- Release from Photovoltaic Backsheet Materials Containing PVF and PVDF during Pyrolysis and Incineration in a Technical Lab-Scale Reactor at Various Temperatures. *Toxics*, 7(3), 1-11. doi:10.3390/toxics7030047
- Deng, R., Chang, L. N., Ouyang, Z., & Chee, C. M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 532-550. doi:10.1016/j.rser.2019.04.020
- Doi, T., Tsuda, I., Unagida, H., Murata, A., Sakuta, K., & Kurokawa, K. (2001). Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 67(1-4), 397-403. doi:10.1016/S0927-0248(00)00308-1
- Duflou, J. R., Peeters, J. R., Altamirano, D., Bracquene, E., & Dewulf, W. (2018). Demanufacturing photovoltaic panels: Comparison of end-of-life treatment strategies for improved resource recovery. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 67, 29-32. doi:0.1016/j.cirp.2018.04.053
- Energy Next. (2564). การแปรรูปขยะมูลฝอยไปเป็นพลังงานความร้อนโดยใช้เตาเผา (Incineration). แหล่งที่มา: <https://energynext.co.th/2021/02/> [2 กรกฎาคม 2564]
- Faircloth, C. C., Wagner, K. H., Woodward, K. E., Rakkwamsuk, P., & Gheewala, S. H. (2019). The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand. *Resources, Conservation and Recycling*, 143, 260-272. doi:10.1016/j.resconrec.2019.01.008
- Farrell, C., Osman, A. I., Zhang, X., Murphy, A., Doherty, R., Morgan, K., . . . Shen, D. (2019). Assessment of the energy recovery potential of waste Photovoltaic (PV) modules. *Scientific Reports*, 9(1), 1-14. doi:10.1038/s41598-019-41762-5
- Farrell, C. C., Osman, A. I., Doherty, R., Saad, M. M., Zhang, X., Murphy, A., . . . Rooney, D. W. (2020). Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 1-17. doi:10.1016/j.rser.2020.109911
- Fiandra, V., Sannino, L., Andreozzi, C., & Graditi, G. (2019). End-of-life of silicon PV panels: A sustainable materials recovery process. *Waste Manag*, 84, 91-101. doi:10.1016/j.wasman.2018.11.035

Frischknecht, R., Itten, R., Sinha, P., Wild-Scholten, M., & Zhang, J. (2015). *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems* (T12-04:2015).

[ออนไลน์] แหล่งที่มา:

https://www.researchgate.net/publication/279180644_Life_Cycle_Inventories_and_Life_Cycle_Assessment_of_Photovoltaic_Systems

Fthenakis, V. M. (2000). End-of-life management and recycling of PV modules. *Energy Policy*, 28(14), 1051-1058. doi:10.1016/s0301-4215(00)00091-4

Gautam, A., Shankar, R., & Vrat, P. (2021). End-of-life solar photovoltaic e-waste assessment in India: a step towards a circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 65-77. doi:10.1016/j.spc.2020.09.011

Geretschläger, K. J., Wallner, G. M., & Fischer, J. (2016). Structure and basic properties of photovoltaic module backsheet films. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 144, 451-456. doi:10.1016/j.solmat.2015.09.060

Gönen, Ç., & Kaplanoğlu, E. (2019). Environmental and economic evaluation of solar panel wastes recycling. *Waste Management & Research* 1-7. doi:10.1177/0734242X19826331

Huang, W.-H., Shin, W. J., Wang, L., Sun, W.-C., & Tao, M. (2017). Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules. *Solar Energy* 144, 22-31. doi:10.1016/j.solener.2017.01.001

International Energy Agency (IEA). (2018). *End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies* (IEA-PVPS T12-10:2018).

[ออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://iea-pvps.org/key-topics/end-of-life-management-of-photovoltaic-panels-trends-in-pv-module-recycling-technologies-by-task-12/>

International Energy Agency (IEA). (2021). *Snapshot of Global PV Markets 2021* (IEA-PVPS T1-39:2021). [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2021/>

Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2012). Photovoltaic Degradation Rates — An Analytical Review. *The National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, 1 - 32. แหล่งที่มา <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf>

Kim, H., & Park, H. (2018). PV Waste Management at the Crossroads of Circular Economy

and Energy Transition: The Case of South Korea. *Sustainability*, 10(10).

doi:10.3390/su10103565

Latunussa, C. E. L., Mancini, L., Blengini, G. A., Ardente, F., & Pennington, D. (2016).

Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels. [ออนไลน์]

แหล่งที่มา: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC100783>

Lunardi, M., Alvarez-Gaitan, J., Bilbao, J., & Corkish, R. (2018). Comparative Life Cycle

Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules. *Applied Sciences*,

8(8). doi:10.3390/app8081396

Maani, T., Celik, I., Heben, M. J., Ellingson, R. J., & Apul, D. (2020). Environmental impacts

of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CDTE) solar panels.

Science of the Total Environment, 735, 1-11.

doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138827

0048-9697/

Mahmoudi, S., Huda, N., & Behnia, M. (2019). Photovoltaic waste assessment:

Forecasting and screening of emerging waste in Australia. *Resources*,

Conservation & Recycling, 146, 192-205. doi:10.1016/j.resconrec.2019.03.039

Mahmoudi, S., Huda, N., & Behnia, M. (2020). Environmental impacts and economic

feasibility of end of life photovoltaic panels in Australia: A comprehensive

assessment. *Journal of Cleaner Production*, 260, 1-20.

doi:10.1016/j.jclepro.2020.120996

McDonald, N. C., & Pearce, J. M. (2010). Producer responsibility and recycling solar

photovoltaic modules. *Energy Policy*, 38(11), 7041-7047.

doi:10.1016/j.enpol.2010.07.023

Mesquita, D. d. B., Silva, J. L. d. S., S., M. H., Kitayama, M., & G., V. M. (2019). *A review*

and analysis of technologies applied in PV modules. Paper presented at the

2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America
Gramado.

https://www.researchgate.net/publication/337195909_A_review_and_analysis_of_technologies_applied_in_PV_modules

Okoli, I. C. (2020). Oil Palm Tree Wastes 6: Uses of the palm kernel shell. แหล่งที่มา:

<https://researchtropica.com/oil-palm-tree-wastes-6-uses-of-the-palm-kernel-shell/> [14 เมษายน 2565]

- Oliveira, M. C. C. d., Diniz Cardoso, A. S. A., Viana, M. M., & Lins, V. d. F. C. (2018). The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 2299-2317. doi:10.1016/j.rser.2017.06.039
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Granata, G., Atia, T. A., Altimari, P., Havlik, T., & Toro, L. (2017). Physical and chemical treatment of end of life panels: An integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies. *Waste Management* *59*, 422-431. doi:10.1016/j.wasman.2016.11.011
- Paiano, A. (2015). Photovoltaic waste assessment in Italy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *41*, 99-112. doi:10.1016/j.rser.2014.07.208
- Park, N. C., Jeong, J. S., Kang, B. J., & Kim, D. H. (2013). The effect of encapsulant discoloration and delamination on the electrical characteristics of photovoltaic module. *Microelectronics Reliability*, *53*(9-11), 1818-1822. doi:10.1016/j.microrel.2013.07.062
- Peeters, J. R., Altamirano, D., Dewulf, W., & Dufloy, J. R. (2017). Forecasting the composition of emerging waste streams with sensitivity analysis: A case study for photovoltaic (PV) panels in Flanders. *Resources, Conservation and Recycling*, *120*, 14-26. doi:10.1016/j.resconrec.2017.01.001
- Pero, F. D., Delogu, M., Berzi, L., & Escamilla, M. (2019). Innovative device for mechanical treatment of End of Life photovoltaic panels: Technical and environmental analysis. *Waste Management*, *95*, 535-548. doi:10.1016/j.wasman.2019.06.037
- Ratner, S., Gomonov, K., Revinova, S., & Lazanyuk, I. (2020). Eco-Design of Energy Production Systems: The Problem of Renewable Energy Capacity Recycling. *Applied Sciences*, *10*, 1-29. doi:10.3390/app10124339
- Santos, J. D., & Alonso-García, M. C. (2018). Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050. *Journal of Cleaner Production*, *196*, 1613-1628.

doi:10.1016/j.jclepro.2018.05.252

Satlewal, A., Agrawal, R., Bhagia, S., Das, P., & Ragauskas, A. J. (2017). Rice straw as a feedstock for biofuels: Availability, recalcitrance, and chemical properties.

Biofuels Bioproducts and Biorefining 12(9), 1-25. doi:10.1002/bbb.1818

Satpathy, R., & Pamuru, V. (2020). *Solar PV Power design, manufacturing and applications from sand to systems*(1st ed.). แหล่งที่มา

<https://books.google.co.th/books?id=azbDDwAAOBAJ&pg=PA134&lpg=PA135&focus=viewport&dq=The%25&hl=th#v=onepage&q=The%25&f=false>

Shubbak, M. H. (2019). Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115.

doi:10.1016/j.rser.2019.109383

Sica, D., Malandrino, O., Supino, S., Testa, M., & Lucchetti, M. C. (2018). Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 2934-2945.

doi:10.1016/j.rser.2017.10.039

Tammaro, M., Rimauro, J., Fiandra, V., & 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. doi:10.1016/j.renene.2015.03.014

Tao, J., & Yu, S. (2015). Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 141, 108-124.

doi:10.1016/j.solmat.2015.05.005

Tao, M., Fthenakis, V., Ebin, B., Steenari, B.-M., Butler, E., Sinha, P., . . . Simon, E. S.

(2020). Major challenges and opportunities in silicon solar module recycling.

Photovoltaics Research and Applications, 28(10), 1077-1088. doi:

10.1002/pip.3316

TOMIOKA, O. (2016). Japanese companies work on ways to recycle a mountain of solar panels. แหล่งที่มา: <https://asia.nikkei.com/Business/Biotechnology/Japanese-companies-work-on-ways-to-recycle-a-mountain-of-solar-panels> [13 พฤษภาคม

2564]

Uçara, S., Ozkan, A. R., Yanik, J., & Karagöz, S. (2008). The influence of the waste

ethylene vinyl acetate copolymer on the thermal degradation of the waste polypropylene. *Fuel Processing Technology*, 89(11), 1201-1206.

doi:10.1016/j.fuproc.2008.05.010

Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. (2016). *END-OF-LIFE MANAGEMENT Solar*

Photovoltaic Panels. [ออนไลน์] แหล่งที่มา:

https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_ieapvps_end-of-life_solar_pv_panels_2016.pdf

Yang, N., Damgaard, A., Lü, F., Shao, L.-M., Brogaard, L. K.-S., & He, P.-J. (2014).

Environmental impact assessment on the construction and operation of municipal solid waste sanitary landfills in developing countries: China case study. *Waste Management*, 34, 929-937. doi:10.1016/j.wasman.2014.02.017

เขมชาติ ธนาภิกษาญเจริญ, นงนาถ เมฆรังสีมันต์, & สุรัชย์ ศิลาภณีโชติ. (2551). ประโยชน์และความเป็นพิษของโลหะหนักแคดเมียม. แหล่งที่มา: [https://www.dss.go.th/images/st-](https://www.dss.go.th/images/st-article/cp_4_2551_Cadmium.pdf)

[article/cp_4_2551_Cadmium.pdf](https://www.dss.go.th/images/st-article/cp_4_2551_Cadmium.pdf) [6 มิถุนายน 2563]

เฉลิมชัย ไชยรงค์รัตน์. (2553). การวิเคราะห์ปัจจัยทางความร้อนที่มีผลต่อวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสม. (ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.[ออนไลน์] แหล่งที่มา:

<http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/4423/2/Fulltext.pdf>

เขาว์ นกอยู่. (2561). การกำจัดขยะมูลฝอยชุมชนเพื่อผลิตพลังงาน. แหล่งที่มา: [https://eit.or.th/wp-](https://eit.or.th/wp-content/uploads/2018/08/การกำจัดขยะมูลฝอยชุมชนเพื่อผลิตพลังงาน-โดย-ดร.เขาว์-นกอยู่_6-สิงหาคม-2561.pdf)

[content/uploads/2018/08/การกำจัดขยะมูลฝอยชุมชนเพื่อผลิตพลังงาน-โดย-ดร.เขาว์-นกอยู่_6-สิงหาคม-2561.pdf](https://eit.or.th/wp-content/uploads/2018/08/การกำจัดขยะมูลฝอยชุมชนเพื่อผลิตพลังงาน-โดย-ดร.เขาว์-นกอยู่_6-สิงหาคม-2561.pdf) [25 มิถุนายน 2564]

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2548). ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.

2548. Retrieved from <http://www2.diw.go.th/PIC/download/waste/waste11.pdf>

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2551). พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย (ฉบับที่3) พ.ศ. 2551. Retrieved from

http://www2.diw.go.th/Haz_o/hazard/lawsnew/3.pdf

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2554). คู่มือหลักปฏิบัติที่ดีสำหรับการให้บริการบำบัด กำจัดกากอุตสาหกรรม โครงการจัด

ระดับโรงงานจัดการกากอุตสาหกรรมประเภท 101 105 และ 106. [ออนไลน์] แหล่งที่มา:

<http://www2.diw.go.th/iwmb/form/factory1.pdf>

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2551). คู่มือการบริหารจัดการพลังงานความ

ร้อน. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: [http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/](http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/คู่มือความร้อน.pdf)

[คู่มือความร้อน.pdf](http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/คู่มือความร้อน.pdf)

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2553). ตำราอบรม "ผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน อาวุโส ด้านปฏิบัติการ" ด้านความร้อน. แหล่งที่มา:

http://www2.dede.go.th/bhrd/old/file_handbook.html [12 พฤษภาคม 2564]

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2554). คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิต พลังงานทดแทน ชุดที่ 2 พลังงานแสงอาทิตย์. [ออนไลน์] แหล่งที่มา:

https://www.dede.go.th/article_attach/h_solar.pdf

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2556). โครงการสนับสนุนเพื่อการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการพลังงานสีเขียว *Distributed-Green-Generation : DGG* (โครงการศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการสร้างโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชน 15 แห่ง). [ออนไลน์] แหล่งที่มา:

http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib15057_CBES_14.pdf

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2560). แนวทางป้องกันผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและวิธีกำจัดกากขยะที่เกิดจากโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย. [ออนไลน์] แหล่งที่มา:

https://www.dede.go.th/download/banner_60/1_Quotation009-2560.pdf

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2561). รายงานสถานภาพการผลิตไฟฟ้าด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย ปี 2561. [ออนไลน์] แหล่งที่มา:

<http://webkc.dede.go.th/testmax/node/4537>

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2563). รายงานดุลยภาพพลังงานของประเทศไทย 2563. [ออนไลน์] แหล่งที่มา:

https://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/Energy_Balance_of_Thailand_2563_for_web.pdf

กระทรวงพลังงาน. (2563). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP2018).

[ออนไลน์] แหล่งที่มา:

http://www.eppo.go.th/images/Infomation_service/public_relations/PDP2018/PDP2018Rev1.pdf

กุลธิดา ถาวรกิจการ และกิจชัย ศิริวัฒน์. (2563). พิษจากโลหะตะกั่ว. แหล่งที่มา:

http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=41 [26

ตุลาคม 2563]

คุณัญญา ทัดเทียมพร. (2560). การศึกษาวิธีการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เหมาะสมสำหรับ กรณีศึกษาข้าวหอมมะลิ. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี. [ออนไลน์] แหล่งที่มา:

http://digital_collect.lib.buu.ac.th/dcms/files/57920731.pdf

ณิชา บุรณสิงห์. (2561). แผงโซลาร์เซลล์ : ขยะพิษที่ไม่ควรมองข้าม. [ออนไลน์] แหล่งที่มา:

https://library2.parliament.go.th/ejournal/content_af/2561/sep2561-1.pdf

บัณฑูร เวียงมูล. (2553). การวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ. [ออนไลน์] แหล่งที่มา:

<https://dric.nrct.go.th/index.php?/Search/SearchDetail/232898>

พัทธนันท์ สงเดช. (2557). การวิเคราะห์ชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค TGA และ FTIR เพื่อประโยชน์ทางนิติวิทยาศาสตร์. (ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.

[ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/handle/123456789/281>

พิชญ รัชฎาวงศ์, สมชัย รัตนธรรมพันธ์, เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย, ฐิติศักดิ์ บุญปราโมทย์, & สันต์ สัมปตตะวนิช.

(2559). โครงการ “การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า (*Management of expired solar PV panels*)”. [ออนไลน์] แหล่งที่มา:

https://elibrary.trf.or.th/download_fullstep1.asp

มนัสนันท์ พิบาลวงศ์. (2559). การจัดการแผงโซลาร์เซลล์ที่หมดอายุการใช้งาน กรณีศึกษา จังหวัดอุบลราชธานี.

(วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, กรุงเทพฯ. [ออนไลน์]

แหล่งที่มา: <http://libdcms.nida.ac.th/thesis6/2559/b194268.pdf>

วรารุณ เสือดี. (2555). แนวทางการจัดการสารอินทรีย์ระเหย *Volatile Organic Compounds (VOCs) Management Guideline*. [ออนไลน์] แหล่งที่มา:

<http://hawk.diw.go.th/eis/content/dl/20160209100216.pdf>

ศุนย์วิจัยกสิกรรม. (2563). จะทำอย่างไร? กับปัญหาขยะแผงโซลาร์. แหล่งที่มา:

<https://www.kasikornresearch.com/th/analysis/k-social-media/Pages/FB-sola-30-01-20.aspx> [19 สิงหาคม 2563]

สันติ มั่นคง และสมชัย หิรัญวโรดม. (2559). การศึกษาสมบัติของวัสดุแผ่นปิดหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการทดสอบความชื้น. วารสารวิศวกรรมศาสตร์, 1(12), 63 - 74. แหล่งที่มา

<https://journal.engineer.rmutt.ac.th/ejournal/index.php/ejournal/article/view/101>

สิตาวีร์ ธีรวิรุฬห์. (2558). มลพิษอากาศ: การบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมของไทย (ISSN 2287-0520).

[ออนไลน์] แหล่งที่มา:

https://library2.parliament.go.th/ejournal/content_af/2558/may2558-2.pdf

สุจิตรา วาสนาดำรงดี. (2556). ปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์ (*e-waste*) แก้ไขได้ถ้ามีกฎหมาย. [ออนไลน์]

แหล่งที่มา: http://www.hsm.chula.ac.th/research/paper/e-wate_management/e-wate_management5.pdf

สุนี ลาวัณยากุล และศิริวรรณ ศิลป์สกุลสุข. (2545). ถ่านหินและการทดสอบคุณภาพ. แหล่งที่มา: https://www.dss.go.th/images/st-article/cp_3_2545_coal.pdf [10 พฤษภาคม 2564]

อรรวรรณ พุฒิสุทธิ และศุภสิทธิ์ แสงกระจ่าง. (2553). ความเป็นพิษของขยะอิเล็กทรอนิกส์. วารสารพิษวิทยาไทย, 25(1), 67-76.

อัคคีปราการ. (2558). รายงานผลการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อม และมาตรการติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการศูนย์บริหารจัดการวัสดุเหลือใช้อุตสาหกรรม (เตาเผาขยะอุตสาหกรรม). [ออนไลน์] แหล่งที่มา: http://eiadoc.onep.go.th/eialibrary/monitor/2industry/M58_6391.pdf



a

ภาคผนวก ก

ข้อมูลสัมภาษณ์ผู้ประกอบการโรงไฟฟ้า

1. แบบสอบถาม

รูปที่ ก. 1 แบบสอบถามที่ใช้ในการเก็บข้อมูลแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง

แบบสอบถามข้อมูลแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้ง

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป

- 1.1 ปีที่ดำเนินการจ่ายไฟเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้า
- 1.2 จำนวนแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งทั้งหมด แผง
- 1.3 จำนวนแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการสำรอง แผง
- 1.4 ข้อมูลเบื้องต้นของแผงพลังงานแสงอาทิตย์
 - ยี่ห้อ และชนิดของแผงพลังงานแสงอาทิตย์
.....
 - ขนาดของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (กว้าง x ยาว)
.....
 - ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Wp) ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (จำนวนวัตต์ต่อแผง)
.....
 - น้ำหนักของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (kg)
.....

ส่วนที่ 2 การชำรุดเสียหาย/เสื่อมสภาพ

- 2.1 จำนวนแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ชำรุดเสียหาย/เสื่อมสภาพ แผง
- 2.2 สาเหตุของการชำรุดเสียหาย/เสื่อมสภาพ
.....
.....
.....
.....
.....
- 2.3 แนวทางการจัดการเบื้องต้น
.....
.....
.....
.....
.....

2. ข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการ

โรงไฟฟ้าที่ 1

ตั้งอยู่บริเวณภาคเหนือของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2556 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งทั้งหมดจำนวน 38,880 แผลง และพบว่ามึแผลงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 700 แผลง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตก เนื่องจากมึวัตถุตกกระทบ และการชำรุดที่เกิดขึ้นจากระบบไฟฟ้า สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการจัดเก็บเพื่อรอดำเนินการกำจัดต่อ

โรงไฟฟ้าที่ 2

ตั้งอยู่บริเวณภาคเหนือของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2558 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผลงทั้งหมดจำนวน 424,800 แผลง และมีการเตรียมแผลงสำรองคิดเป็นร้อยละ 1 ถึง 3 ของจำนวนติดตั้งทั้งหมด สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการแจ้ง และเก็บรวบรวมและทำการจ้างบริษัทกำจัดให้ดำเนินการต่อไป

โรงไฟฟ้าที่ 3

ตั้งอยู่บริเวณภาคเหนือของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2559 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผลงทั้งหมดจำนวน 25,800 แผลง มีการเตรียมแผลงสำรองประมาณ 25 แผลง และพบว่ามึแผลงชำรุดเสียหายจำนวน 443 แผลง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบโดยไม่ทราบสาเหตุ และจากภัยธรรมชาติ ได้แก่ ฟ้าผ่า สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการเปลี่ยนแผลงใหม่ แยกแผลงที่ชำรุดแยกเก็บไว้ในโครงการ และบันทึกซากของเสียในโครงการ(สก.1, สก.2, สก.3) เตรียมเข้าสู่กระบวนการกำจัดแผลงตามกระบวนการ และระเบียบของกรมโรงงาน

โรงไฟฟ้าที่ 4

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2554 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผลงทั้งหมดจำนวน 33,140 แผลง มีการเตรียมแผลงสำรองคิดเป็นประมาณร้อยละ 1 ของจำนวนติดตั้งทั้งหมด และพบว่ามึแผลงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 500 แผลง ซึ่งสาเหตุส่วนมากที่พบได้แก่ การเกิดศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของแผลงพลังงานแสงอาทิตย์ (PID), ตัวกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) ตัวเซลล์ซิลิกอน และวงจรเกิดการไหม้ สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นในส่วนองแผลงที่ยังสามารถใช้งานต่อได้จะทำการซ่อมใช้ชั่วคราว เช่น เปลี่ยนตัวกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) หรือทำการส่งเคลม ส่วนแผลงที่ไม่สามารถเปลี่ยนหรือซ่อมได้จะดำเนินการจัดเก็บในพื้นที่ของโครงการ ขึ้นทะเบียนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ก่อนดำเนินการจัดการตามขั้นตอน

โรงไฟฟ้าที่ 5

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2555 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 118,740 แผง มีการเตรียมแผงสำรองคิดเป็นประมาณร้อยละ 1 ของจำนวนติดตั้งทั้งหมด และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 500 แผง ซึ่งสาเหตุส่วนมากที่พบได้แก่ การเกิดศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (PID), ตัวกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) ตัวเซลล์ซิลิกอน และวงจรเกิดการไหม้ สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นในส่วนของแผงที่ยังสามารถใช้งานต่อไปได้จะทำการซ่อมใช้ชั่วคราว เช่น เปลี่ยนตัวกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) หรือทำการส่งเคลม และแผงที่ไม่สามารถเปลี่ยนหรือซ่อมได้จะดำเนินการจัดเก็บในพื้นที่ของโครงการเนื่องจากติด BOI สก.1 และสก.3 ต้องขึ้นทะเบียนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ก่อนดำเนินการจัดการตามขั้นตอน

โรงไฟฟ้าที่ 6

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2555 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 38,525 แผง มีการเตรียมแผงสำรองน้อยกว่าร้อยละ 1 ของจำนวนติดตั้งทั้งหมด และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 46 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากแผงแตกเนื่องจากมีของแข็งตกกระทบเช่น ลูกกระสุน และจุดขาว (white spot) สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะจัดเก็บภายในโครงการรวบรวมส่งให้ผู้ประกอบการที่ได้รับอนุญาตนำไปทำลายตามกฎหมายกำหนดต่อ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548

โรงไฟฟ้าที่ 7

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2555 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 41,300 แผง มีการเตรียมแผงสำรองน้อยกว่าร้อยละ 1 ของจำนวนติดตั้งทั้งหมด และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 91 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากแผงแตกเนื่องจากมีของแข็งตกกระทบเช่น ลูกกระสุน และจุดขาว (white spot) สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะจัดเก็บภายในโครงการรวบรวมส่งให้ผู้ประกอบการที่ได้รับอนุญาตนำไปทำลายตามกฎหมายกำหนดต่อ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548

โรงไฟฟ้าที่ 8

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2556 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 84,760 แผง มีการเตรียมแผงสำรองคิดเป็นประมาณร้อยละ 1 ของจำนวนติดตั้งทั้งหมด และพบว่ามีแผงที่ชำรุด

เสียหายจำนวน 800 แผง ซึ่งสาเหตุส่วนมากที่พบได้แก่ การเกิดศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (PID), ตัวกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) ตัวเซลล์ซิลิกอน และวงจรเกิดการไหม้ สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นในส่วนของแผงที่ยังสามารถใช้งานต่อได้จะทำการซ่อมใช้ชั่วคราว เช่น เปลี่ยนกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) หรือทำการส่งเคลม และสำหรับแผงที่ไม่สามารถเปลี่ยนหรือซ่อมได้จะดำเนินการจัดเก็บในพื้นที่ของโครงการ ขึ้นทะเบียนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ก่อนดำเนินการจัดการตามขั้นตอน

โรงไฟฟ้าที่ 9

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2556 แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 33,800 แผง มีการเตรียมแผงสำรองประมาณ 25 แผง และพบว่าแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 90 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากแผงแตกเนื่องจากมีของแข็งตกกระทบ และเกิดจุดร้อน (hot spot) สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการบันทึกซากของเสียในโครงการ(สก.1, สก.2, สก.3) เตรียมเข้าสู่กระบวนการกำจัดแผงตามกระบวนการ และระเบียบของกรมโรงงาน

โรงไฟฟ้าที่ 10

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2556 แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 33,800 แผง มีการเตรียมแผงสำรองประมาณ 25 แผง และพบว่าแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 136 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากแผงแตกเนื่องจากมีของแข็งตกกระทบ และเกิดจุดร้อน (hot spot) สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการบันทึกซากของเสียในโครงการ(สก.1, สก.2, สก.3) เตรียมเข้าสู่กระบวนการกำจัดแผงตามกระบวนการ และระเบียบของกรมโรงงาน

โรงไฟฟ้าที่ 11

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2557 แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 32,900 แผง และพบว่าแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 70 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากแผงแตกเนื่องจากมีของแข็งตกกระทบเช่น ลูกกระสุน ก้อนหิน สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการเก็บส่วนที่ชำรุดไว้ พร้อมทั้งทำป้ายแจ้งระบุไว้

โรงไฟฟ้าที่ 12

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2557 แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 32,900 แผง และพบว่าแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 70 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากแผงแตกเนื่องจาก

มีของแข็งตกกระทบเช่น ลูกกระสุน ก้อนหิน สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการเก็บส่วนที่ชำรุดไว้ พร้อมทั้งทำป้ายแจ้งระบุไว้

โรงไฟฟ้าที่ 13

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2557 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 32,900 แผง และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 70 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากแผงแตกเนื่องจากมีของแข็งตกกระทบเช่น ลูกกระสุน ก้อนหิน สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการเก็บส่วนที่ชำรุดไว้ พร้อมทั้งทำป้ายแจ้งระบุไว้

โรงไฟฟ้าที่ 14

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2557 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 34,524 แผง มีการเตรียมแผงสำรองจำนวน 70 แผง และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 67 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกจากการตัดหญ้า ไตโอดเสีย และเกิดจุดร้อน (hot spot) สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการแจ้งกับบริษัทผู้ผลิตแผง และส่งทำลายตามที่กฎหมายระบุไว้สำหรับแผงเสีย

โรงไฟฟ้าที่ 15

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2558 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 134,430 แผง มีการเตรียมแผงสำรองจำนวน 300 แผง และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 224 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากแผงแตกเนื่องจากมีของแข็งตกกระทบ และแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop) สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการเก็บรวบรวมแยกไว้เพื่อนำส่งไปทำการกำจัดต่อ

โรงไฟฟ้าที่ 16

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2558 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงรวมทั้งหมดจำนวน 25,800 แผง มีการเตรียมแผงสำรองจำนวน 100 แผง และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 233 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบ จากภัยธรรมชาติ ได้แก่ ฟ้าผ่า จากการเสื่อมสภาพของตัวแผง, แรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop) และแผงไหม้ สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะ รวมแผงที่ชำรุดแยกเก็บไว้ในโครงการ เพื่อรอการนำส่งไปทำการกำจัดต่อ

โรงไฟฟ้าที่ 17

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2558 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 25,800 แผง มีการเตรียมแผงสำรองจำนวน 100 แผง และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 137 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบ จากการเสื่อมสภาพของตัวแผง, แรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop), เกิดจุดร้อน (hot spot) และกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) บวม สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะ รวมแผงที่ชำรุดแยกเก็บไว้ในโครงการ เพื่อรอการนำส่งไปทำการกำจัดต่อ

โรงไฟฟ้าที่ 18

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2559 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 26,230 แผง มีการเตรียมแผงสำรองจำนวน 100 แผง และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 15 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบ จากการเสื่อมสภาพของตัวแผง, แรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop) และตัวเชื่อมต่อ MC4 ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อไฟฟ้าเกิดความร้อนทำให้เกิดรอยไหม้ สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะ รวมแผงที่ชำรุดแยกเก็บไว้ในโครงการ เพื่อรอการนำส่งไปทำการกำจัดต่อ

โรงไฟฟ้าที่ 19

ตั้งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2559 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 24,990 แผง มีการเตรียมแผงสำรองจำนวน 40 แผง และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 8 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกเนื่องจากการตัดหญ้าในพื้นที่ จากภัยธรรมชาติ ได้แก่ ฟ้าผ่า และเกิดจุดความร้อน (hot spot) สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นยังคงเก็บแผงเสียไว้ในโครงการ ในอนาคตจะดำเนินการส่งออกไปกำจัดยังบริษัทกำจัดขยะ

โรงไฟฟ้าที่ 20

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันตกของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2558 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 25,800 แผง มีการเตรียมแผงสำรองประมาณ 25 แผง และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 184 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากภัยธรรมชาติ ได้แก่ ฟ้าผ่า และแผงเสื่อมสภาพเกิดการรับประกกัน สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการบันทึกซากของเสียในโครงการ(สก.1, สก.2, สก.3) เตรียมเข้าสู่กระบวนการกำจัดแผงตามกระบวนการ และระเบียบของกรมโรงงาน

โรงไฟฟ้าที่ 21

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันตกของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2558 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 26,220 แผง มีการเตรียมแผงสำรองประมาณ 25 แผง และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 30 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบ เช่น ก้อนหิน กระสุนปืน สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการเปลี่ยนแผ่น แยกแผงที่ชำรุดแยกเก็บไว้ในโครงการ และทำเอกสารรายงานแจ้งให้วิศวกรทราบ บันทึกซากของเสียในโครงการ(สก.1, สก.2, สก.3) เตรียมเข้าสู่กระบวนการกำจัดแผงตามกระบวนการ และระเบียบของกรมโรงงาน

โรงไฟฟ้าที่ 22

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันตกของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2558 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 25,800 แผง มีการเตรียมแผงสำรองประมาณ 25 แผง และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 25 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบ สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการเปลี่ยนแผ่น แยกแผงที่ชำรุดแยกเก็บไว้ในโครงการ และบันทึกซากของเสียในโครงการ(สก.1, สก.2, สก.3) เตรียมเข้าสู่กระบวนการกำจัดแผงตามกระบวนการ และระเบียบของกรมโรงงาน

โรงไฟฟ้าที่ 23

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันตกของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2558 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 25,800 แผง มีการเตรียมแผงสำรองประมาณ 25 แผง และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 90 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบโดยไม่ทราบสาเหตุ สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการเปลี่ยนแผ่น แยกแผงที่ชำรุดแยกเก็บไว้ในโครงการ และบันทึกซากของเสียในโครงการ(สก.1, สก.2, สก.3) เตรียมเข้าสู่กระบวนการกำจัดแผงตามกระบวนการ และระเบียบของกรมโรงงาน

โรงไฟฟ้าที่ 24

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันตกของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2558 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 25,800 แผง มีการเตรียมแผงสำรองประมาณ 25 แผง และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 77 แผง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบโดยไม่ทราบสาเหตุ และแผงเสื่อมสภาพเกินการรับประกัน สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการเปลี่ยนแผ่น แยกแผงที่

ชำรุดแยกเก็บไว้ในโครงการ และบันทึกซากของเสียในโครงการ(สก.1, สก.2, สก.3) เตรียมเข้าสู่กระบวนการกำจัดแผลงตามกระบวนการ และระเบียบของกรมโรงงาน

โรงไฟฟ้าที่ 25

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันตกของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2558 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผลงทั้งหมดจำนวน 25,800 แผลง มีการเตรียมแผลงสำรองประมาณ 25 แผลง และพบว่ามีการชำรุดเสียหายจำนวน 87 แผลง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบโดยไม่ทราบสาเหตุ และแผลงเสื่อมสภาพเกินการรับประกัน สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการเปลี่ยนแผลง แยกแผลงที่ชำรุดแยกเก็บไว้ในโครงการ และบันทึกซากของเสียในโครงการ (สก.1, สก.2, สก.3) เตรียมเข้าสู่กระบวนการกำจัดแผลงตามกระบวนการ และระเบียบของกรมโรงงาน

โรงไฟฟ้าที่ 26

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันตกของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2558 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผลงทั้งหมดจำนวน 25,800 แผลง มีการเตรียมแผลงสำรองประมาณ 25 แผลง และพบว่ามีการชำรุดเสียหายจำนวน 7 แผลง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบโดยไม่ทราบสาเหตุ สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการเปลี่ยนแผลง แยกแผลงที่ชำรุดแยกเก็บไว้ในโครงการ และบันทึกซากของเสียในโครงการ(สก.1, สก.2, สก.3) เตรียมเข้าสู่กระบวนการกำจัดแผลงตามกระบวนการ และระเบียบของกรมโรงงาน

โรงไฟฟ้าที่ 27

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันตกของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2558 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผลงทั้งหมดจำนวน 25,800 แผลง มีการเตรียมแผลงสำรองประมาณ 25 แผลง และพบว่ามีการชำรุดเสียหายจำนวน 966 แผลง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบโดยไม่ทราบสาเหตุ และจากภัยธรรมชาติ ได้แก่ ฟ้าผ่า สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการเปลี่ยนแผลง แยกแผลงที่ชำรุดแยกเก็บไว้ในโครงการ และบันทึกซากของเสียในโครงการ(สก.1, สก.2, สก.3) เตรียมเข้าสู่กระบวนการกำจัดแผลงตามกระบวนการ และระเบียบของกรมโรงงาน

โรงไฟฟ้าที่ 28

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันตกของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2558 แผลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผลงทั้งหมดจำนวน 25,800 แผลง มีการเตรียมแผลงสำรองประมาณ 25 แผลง และพบว่ามีการชำรุดเสียหายจำนวน 180 แผลง ซึ่งสาเหตุการชำรุดเสียหายเกิดจากกระจกแตกเนื่องจากของแข็งตกกระทบโดยไม่ทราบสาเหตุ และจากภัย

ธรรมชาติ ได้แก่ ฟิวส์ สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการเปลี่ยนแผ่น แยกแผงที่ชำรุด แยกเก็บไว้ในโครงการ และบันทึกซากของเสียในโครงการ(สก.1, สก.2, สก.3) เตรียมเข้าสู่กระบวนการกำจัดแรงแบบตามกระบวนการ และระเบียบของกรมโรงงาน

โรงไฟฟ้าที่ 29

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2557 แแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 84,760 แผง มีการเตรียมแผงสำรองคิดเป็นประมาณร้อยละ 1 ของจำนวนติดตั้งทั้งหมด และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 300 แผง ซึ่งสาเหตุส่วนมากที่พบได้แก่ ตัวกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) ตัวเซลล์ซิลิกอน และวงจรเกิดการไหม้ สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นในส่วนของแผงที่ยังสามารถใช้งานต่อไปได้จะทำการซ่อมใช้ชั่วคราว เช่น เปลี่ยนกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) หรือทำการส่งเคลมแผง และสำหรับแผงที่ไม่สามารถเปลี่ยนหรือซ่อมได้จะดำเนินการจัดเก็บในพื้นที่ของโครงการ ขึ้นทะเบียนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ก่อนดำเนินการจัดการตามขั้นตอน

โรงไฟฟ้าที่ 30

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2556 แแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 84,760 แผง มีการเตรียมแผงสำรองคิดเป็นประมาณร้อยละ 1 ของจำนวนติดตั้งทั้งหมด และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 800 แผง ซึ่งสาเหตุส่วนมากที่พบได้แก่ การเกิดศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (PID), ตัวกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) ตัวเซลล์ซิลิกอน และวงจรเกิดการไหม้ สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นในส่วนของแผงที่ยังสามารถใช้งานต่อไปได้จะทำการซ่อมใช้ชั่วคราว เช่น เปลี่ยนกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) หรือทำการส่งเคลม และสำหรับแผงที่ไม่สามารถเปลี่ยนหรือซ่อมได้จะดำเนินการจัดเก็บในพื้นที่ของโครงการ ขึ้นทะเบียนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ก่อนดำเนินการจัดการตามขั้นตอน

โรงไฟฟ้าที่ 31

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2557 แแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 42,380 แผง มีการเตรียมแผงสำรองคิดเป็นประมาณร้อยละ 1 ของจำนวนติดตั้งทั้งหมด และพบว่ามีแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 300 แผง ซึ่งสาเหตุส่วนมากที่พบได้แก่ กล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) ตัวเซลล์ซิลิกอน และวงจรเกิดการไหม้ สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นในส่วนของแผงที่ยังสามารถใช้งานต่อไปได้จะทำการซ่อมใช้ชั่วคราว เช่น กล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) หรือทำการส่งเคลมแผง และสำหรับแผงที่ไม่สามารถเปลี่ยนหรือซ่อมได้จะดำเนินการจัดเก็บในพื้นที่ของโครงการ ขึ้นทะเบียนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ก่อนดำเนินการจัดการตามขั้นตอน

โรงไฟฟ้าที่ 32

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2557 แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 42,380 แผง มีการเตรียมแผงสำรองคิดเป็นประมาณร้อยละ 1 ของจำนวนติดตั้งทั้งหมด และพบว่าแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 300 แผง ซึ่งสาเหตุส่วนมากที่พบได้แก่ กล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) ตัวเซลล์ซิลิกอน และวงจรเกิดการไหม้ สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นในส่วน of แผงที่ยังสามารถใช้งานต่อได้จะทำการซ่อมใช้ชั่วคราว เช่น เปลี่ยนกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) หรือทำการส่งเคลมแผง และสำหรับแผงที่ไม่สามารถเปลี่ยนหรือซ่อมได้จะดำเนินการจัดเก็บในพื้นที่ของโครงการ ขึ้นทะเบียนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ก่อนดำเนินการจัดการตามขั้นตอน

โรงไฟฟ้าที่ 33

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2557 แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงทั้งหมดจำนวน 41,666 แผง มีการเตรียมแผงสำรองคิดเป็นประมาณร้อยละ 1 ของจำนวนติดตั้งทั้งหมด และพบว่าแผงที่ชำรุดเสียหายจำนวน 300 แผง ซึ่งสาเหตุส่วนมากที่พบเกิดจากตัว EVA และ Backsheet สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการส่งเปลี่ยนแผงใหม่ และสำหรับแผงที่ไม่สามารถเปลี่ยนหรือซ่อมได้จะดำเนินการจัดเก็บในพื้นที่ของโครงการ ขึ้นทะเบียนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ก่อนดำเนินการจัดการตามขั้นตอน

โรงไฟฟ้าที่ 34

ตั้งอยู่บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เริ่มดำเนินการติดตั้งและขายไฟในปี พ.ศ. 2557 แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Polycrystalline โดยทำการติดตั้งแผงฯ จำนวน 41,666 แผง มีการเตรียมแผงฯ สำรองคิดเป็นประมาณร้อยละ 1 ของจำนวนติดตั้งทั้งหมด และพบว่า มีแผงฯ เสียจำนวน 300 แผง ซึ่งสาเหตุส่วนมากที่พบเกิดจาก EVA, Backsheet สำหรับแนวทางการจัดการในเบื้องต้นจะทำการส่งเคลมเปลี่ยนแผงใหม่ และแผงฯ ที่ไม่สามารถเปลี่ยนหรือซ่อมได้จะดำเนินการจัดเก็บในพื้นที่ของโครงการ ขึ้นทะเบียนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ก่อนดำเนินการจัดการตามขั้นตอน

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการดำเนินการในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ ข. 1 สัดส่วนองค์ประกอบแผงพลังงานแสงอาทิตย์

| แผง | 1 | 2 | 3 | ค่าเฉลี่ย (kg) | ร้อยละโดย น้ำหนัก | ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน |
|----------------------|-------|-------|-------|----------------|----------------------|-------------------------|
| วัสดุ (kg) | | | | | | |
| กระจก | 15.20 | 15.96 | 15.45 | 15.54 | 69.05 | 0.39 |
| แผ่นเซลล์ ซิลิกอน | 0.71 | 0.76 | 0.70 | 0.72 | 3.21 | 0.04 |
| กรอบอลูมิเนียม | 2.78 | 2.81 | 2.94 | 2.84 | 12.64 | 0.09 |
| ทองแดง (ริบ บอน) | 0.20 | 0.19 | 0.20 | 0.20 | 0.88 | 0.00 |
| วัสดุห่อหุ้ม | 1.68 | 1.76 | 2.60 | 2.01 | 8.95 | 0.51 |
| แผ่นปิดด้านหลัง | 0.74 | 0.77 | 0.71 | 0.74 | 3.29 | 0.03 |
| ซิลิโคน | 0.24 | 0.28 | 0.15 | 0.22 | 0.98 | 0.07 |

ภาคผนวก ค

การคำนวณ

1. คำนวณการคาดการณ์ปริมาณของเสียแฉง

1.1 แฉงหมดอายุการใช้งาน 20 ปี (Regular loss)

เช่น ในปี พ.ศ. 2550 มีกำลังการผลิตติดตั้ง 1.4 เมกะวัตต์ น้ำหนักแฉง 90 ตันต่อเมกะวัตต์

$$\text{ปริมาณของเสียแฉง} = 1.397 \text{ เมกะวัตต์} \times 90 \text{ ตัน/เมกะวัตต์} \approx 126 \text{ ตัน}$$

1.2 แฉงชำรุดเสียหายก่อนหมดอายุการใช้งาน (Early loss)

1. เช่น ในปี พ.ศ. 2550 มีกำลังการผลิตติดตั้ง 1.4 เมกะวัตต์ น้ำหนักแฉง 90 ตันต่อเมกะวัตต์ อัตราการชำรุดเสียหายของแฉงร้อยละ 1.8 ต่อปี

$$\text{ปริมาณของเสียแฉง} = 1.397 \text{ เมกะวัตต์} \times 90 \text{ ตัน/เมกะวัตต์} \times \frac{1.8}{100} \approx 2 \text{ ตัน}$$

2. ในปี พ.ศ. 2551 มีกำลังการผลิตติดตั้ง 0.317 เมกะวัตต์ น้ำหนักแฉง 90 ตันต่อเมกะวัตต์ อัตราการชำรุดเสียหายของแฉงร้อยละ 1.8 ต่อปี

ปริมาณของเสียแฉง = ปริมาณของเสียแฉงชำรุดจากปี 2550 + ปริมาณของเสียแฉงชำรุดในปี 2551

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นจะมีปริมาณของเสียแฉง} &= 2 \text{ ตัน} + (0.317 \text{ เมกะวัตต์} \times 90 \text{ ตัน/เมกะวัตต์} \times \frac{1.8}{100}) \\ &\approx 3 \text{ ตัน} \end{aligned}$$

2. คำนวณต้นทุนสำหรับแนวทางการจัดการของเสียแฉงเบื้องต้น

2.1 ต้นทุนก๊าซเชื้อเพลิง (LPG)

ในการอบแยกแฉง 1 รอบ (จำนวน 5 แฉง) ใช้ LPG 28 กิโลกรัม (อ้างอิงจากการใช้งานจริงสำหรับเตาระดับต้นแบบ ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

∴ ราคาก๊าซเชื้อเพลิง (LPG) ในการอบแยกแฉงจำนวน 5 แฉง คิดเป็น 626.92 บาท

$$\text{ราคา LPG/แฉง} = \frac{626.92 \text{ บาท}}{5 \text{ แฉง}} \approx 125.38 \text{ บาท/แฉง}$$

แผงพลังงานแสงอาทิตย์หนัก 22.5 กิโลกรัม/แผง = 0.0225 ตัน/แผง

จาก 0.0025 ตัน คิดเป็น 1 แผง

$$\text{ดังนั้น น้ำหนัก 1 ตัน คิดเป็น} = \frac{1 \text{ ตัน} \times 1 \text{ แผง}}{0.0225 \text{ ตัน}} \approx 44 \text{ แผง}$$

∴ ต้นทุนก๊าซ LPG ต่อของเสียแผงฯ 1 ตัน = 125.38 บาท/แผง × 44 แผง ≈ 5,516.72 บาท

2.2 ต้นทุนค่าไฟฟ้าในส่วนของเครื่องเป่าลม (blower) ในการอบแยก

ในการอบแยกแผง 1 รอบ (จำนวน 5 แผง) ใช้ไฟฟ้า 30 หน่วย (อ้างอิงจากการใช้งานจริงสำหรับเตา
ระดับต้นแบบ ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

คิดที่ค่าไฟฟ้าหน่วยละ 4.42 บาท

∴ ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแยกแผงจำนวน 5 แผง คิดเป็น 132.6 บาท

$$\text{ราคา ไฟฟ้า/แผง} = \frac{132.6 \text{ บาท}}{5 \text{ แผง}} \approx 26.52 \text{ บาท/แผง}$$

แผงพลังงานแสงอาทิตย์หนัก 22.5 กิโลกรัม/แผง = 0.0225 ตัน/แผง

จาก 0.0025 ตัน คิดเป็น 1 แผง

$$\text{ดังนั้น น้ำหนัก 1 ตัน คิดเป็น} = \frac{1 \text{ ตัน} \times 1 \text{ แผง}}{0.0225 \text{ ตัน}} \approx 44 \text{ แผง}$$

∴ ต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ใช้ต่อของเสียแผง 1 ตัน = 26.52 บาท/แผง × 44 แผง ≈ 1,167 บาท

2.3 ต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องบด

คิดที่ 30 บาท/แผง (อ้างอิงจากโครงการการจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายการบริหารจัดการซาก
อย่างครบวงจร ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ)

∴ ต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ใช้ต่อการบดของเสียแผง 1 ตัน = 30 บาท/แผง × 44 แผง = 1,320 บาท

3. คำนวณปริมาณวัสดุที่ได้จากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (1 ตัน)

3.1 แนวทางที่ใช้ในปัจจุบัน สามารถแยกกรอบอลูมิเนียม และทองแดง (สายไฟ) ออกมาได้ ดังนี้

1. สัดส่วนอลูมิเนียมคิดเป็นร้อยละ 12.64 ในของเสียแผง 1 ตัน

คิดเป็นน้ำหนักของอลูมิเนียม $\approx 0.126 \times 1,000$ กิโลกรัม = 126.4 กิโลกรัมต่อของเสียแผงฯ 1 ตัน (โดยมีสัดส่วนในการรีไซเคิลร้อยละ 100)

2. สัดส่วนทองแดง (สายไฟ) คิดเป็นร้อยละ 1 ในของเสียแผง 1 ตัน

คิดเป็นน้ำหนักของทองแดง (สายไฟ) $0.01 \times 1,000 = 10$ กิโลกรัมต่อของเสียแผง 1 ตัน (โดยมีสัดส่วนในการรีไซเคิลร้อยละ 100)

3.2 แนวทางการอบแยก สามารถแยกกรอบอลูมิเนียม และทองแดง (สายไฟ) และเศษกระจกได้ ดังนี้

1. สัดส่วนอลูมิเนียมคิดเป็นร้อยละ 12.64 ในของเสียแผง 1 ตัน

คิดเป็นน้ำหนักของอลูมิเนียม $\approx 0.126 \times 1,000$ กิโลกรัม = 126.4 กิโลกรัมต่อของเสียแผง 1 ตัน (โดยมีสัดส่วนในการรีไซเคิลร้อยละ 100)

2. สัดส่วนทองแดง (สายไฟ) คิดเป็นร้อยละ 1 ในของเสียแผง 1 ตัน

คิดเป็นน้ำหนักของทองแดง (สายไฟ) $0.01 \times 1,000 = 10$ กิโลกรัมต่อของเสียแผง 1 ตัน (โดยมีสัดส่วนในการรีไซเคิลร้อยละ 100)

3. สัดส่วนกระจกคิดเป็นร้อยละ 69.05 ในของเสียแผง 1 ตัน

คิดเป็นน้ำหนักกระจก $0.69 \times 0.1 \times 1000 = 69.1$ กิโลกรัมต่อของเสียแผง 1 ตัน (โดยมีสัดส่วนในการรีไซเคิลร้อยละ 10)

3.3 แนวทางการอบแยก สามารถแยกกรอบอลูมิเนียม และทองแดง (สายไฟ) เศษกระจก และทองแดง (ริบบอน) ได้ ดังนี้

1. สัดส่วนอลูมิเนียมคิดเป็นร้อยละ 12.64 ในของเสียแผง 1 ตัน

คิดเป็นน้ำหนักของอลูมิเนียม $\approx 0.126 \times 1,000$ กิโลกรัม = 126.4 กิโลกรัมต่อของเสียแผง 1 ตัน (โดยมีสัดส่วนในการรีไซเคิลร้อยละ 100)

2. สัดส่วนทองแดง (สายไฟ) คิดเป็นร้อยละ 1 ในของเสียแผง 1 ตัน

คิดเป็นน้ำหนักของทองแดง (สายไฟ) $0.01 \times 1,000 = 10$ กิโลกรัมต่อของเสียแผง 1 ตัน (โดยมี สัดส่วนในการรีไซเคิลร้อยละ 100)

3. สัดส่วนกระจกคิดเป็นร้อยละ 69.05 ในของเสียแผง 1 ตัน

คิดเป็นน้ำหนักกระจก $0.69 \times 0.7 \times 1,000 = 483.4$ กิโลกรัมต่อของเสียแผง 1 ตัน (โดยมีสัดส่วนในการรีไซเคิลร้อยละ 70)

4. สัดส่วนของทองแดง (ริบบอน) คิดเป็นร้อยละ 0.88 ในของเสียแผง 1 ตัน

คิดเป็นน้ำหนักของทองแดง (ริบบอน) $0.0088 \times 1,000 = 8.8$ กิโลกรัมต่อของเสียแผง 1 ตัน (โดยมี สัดส่วนในการรีไซเคิลร้อยละ 100)

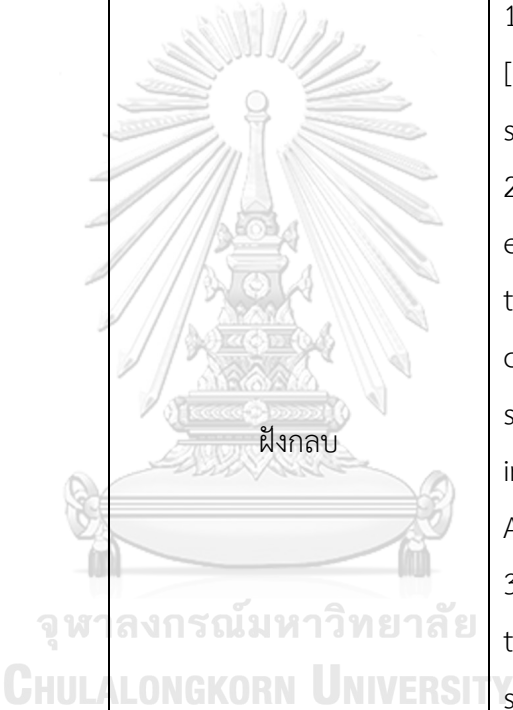



ภาคผนวก ง

การศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากแนวทางการจัดการของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์

ตารางที่ ง. 1 กระบวนการที่ใช้มาประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากฐานข้อมูล Ecoinvent ซอฟต์แวร์ SimaPro 9.0.0.35

| แนวทางที่ใช้ในการจัดการ | วิธีการจัดการ | กระบวนการที่ใช้มาประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม |
|-------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S1 | คัดแยกด้วยมือ | - |
| | ฝังกลบ | 1. Municipal solid waste [RoW] treatment of, sanitary landfill APOS, U 2. Waste plastic, consumer electronics [GLO] treatment of waste plastic, consumer electronics, sanitary landfill, wet infiltration class (500mm) APOS, U 3. Waste glass [GLO] treatment of waste glass, sanitary landfill APOS, U 4. Diesel, burned in building machine [GLO] processing APOS, U |
| S2 | คัดแยกด้วยมือ | - |
| | บดหยาบ | Shredder fraction after manual dismantling of used electronic product [GLO] treatment of |

| | | |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | shredder fraction from manual dismantling, shredding APOS, U |
| | | Electricity, medium voltage [TH] electricity voltage transformation from high to medium voltage APOS, U |
| | คัดแยกด้วยมือ | - |
| |  | <p>1. Municipal solid waste [RoW] treatment of, sanitary landfill APOS, U</p> <p>2. Waste plastic, consumer electronics [GLO] treatment of waste plastic, consumer electronics, sanitary landfill, wet infiltration class (500mm) APOS, U</p> <p>3. Waste glass [GLO] treatment of waste glass, sanitary landfill APOS, U</p> <p>4. Diesel, burned in building machine [GLO] processing APOS, U</p> |
| | คัดแยกด้วยมือ | - |
| S3 | อบแยก (กระบวนการทางความร้อน) | Hazardous waste, for incineration [RoW] treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration APOS, U |

| | | |
|--|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | Liquefied petroleum gas [RoW] petroleum refinery operation APOS, U |
| | | Electricity, medium voltage [TH] electricity voltage transformation from high to medium voltage APOS, U |
| | คัดแยกด้วยมือ | - |
| |  | 1. Municipal solid waste [RoW] treatment of, sanitary landfill APOS, U 2. Waste glass [GLO] treatment of waste glass, sanitary landfill APOS, U 3. Diesel, burned in building machine [GLO] processing APOS, U |

ตารางที่ ง. 2 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม โดยใช้วิธี ReCiPe 2016 การประเมินผลแบบ Midpoint (H) V1.03 / World (2010) H

| Impact category | Unit | S1 | S2 | S3 |
|-----------------------------------|--------------|----------|----------|----------|
| Global warming | kg CO2 eq | -2404.87 | -1467.49 | -485.719 |
| Stratospheric ozone depletion | kg CFC11 eq | -0.00074 | -0.00012 | -0.00024 |
| Ionizing radiation | kBq Co-60 eq | -85.1978 | -74.794 | -83.2797 |
| Ozone formation, Human health | kg NOx eq | -6.33255 | -5.83253 | -6.13652 |
| Fine particulate matter formation | kg PM2.5 eq | -5.88571 | -5.59241 | -6.02634 |

| | | | | |
|--------------------------------------------|-------------|----------|----------|----------|
| Ozone formation, Terrestrial ecosystems | kg NOx eq | -6.37577 | -5.86945 | -6.14238 |
| Terrestrial acidification | kg SO2 eq | -13.5743 | -12.9662 | -14.5059 |
| Freshwater eutrophication | kg P eq | -1.59574 | -1.41678 | -1.48696 |
| Marine eutrophication | kg N eq | 0.083758 | 0.102825 | -0.09122 |
| Terrestrial ecotoxicity | kg 1,4-DCB | -22512 | -17398.3 | -39802.3 |
| Freshwater ecotoxicity | kg 1,4-DCB | -78.9776 | 1389.872 | -286.895 |
| Marine ecotoxicity | kg 1,4-DCB | -149.343 | 1617.879 | -416.662 |
| Human carcinogenic toxicity | kg 1,4-DCB | -385.923 | -359.406 | -193.637 |
| Human non-carcinogenic toxicity | kg 1,4-DCB | -4810.23 | -3555.04 | -10066.1 |
| Land use | m2a crop eq | -36.3271 | -36.0307 | -57.9443 |
| Mineral resource scarcity | kg Cu eq | -33.7628 | -30.1742 | -43.8041 |
| Fossil resource scarcity | kg oil eq | -501.928 | -465.734 | -137.059 |
| Water consumption | m3 | -15.5849 | -12.1738 | -11.0516 |

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบ

รูปที่ จ. 1 ผลการทดสอบหาค่าความร้อนของแผ่นยี่ห้อมี่ 1

ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter AC - 500

โดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่าง : EVA, BACKSHEET, SILICONE

รหัสงาน 640904-0557

เจ้าของตัวอย่าง : อิงฉัตร สุภาพยาม

ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| ชื่อตัวอย่าง | ค่าความร้อน (cal/g) | | |
|--------------|---------------------|---------------|-----------|
| | วัดครั้งที่ 1 | วัดครั้งที่ 2 | ค่าเฉลี่ย |
| BACKSHEET | 5188.1 | 5092.1 | 5140.1 |
| SILICONE | 2822.2 | 2866.5 | 2844.4 |
| EVA | 9160.2 | 9213.8 | 9187.0 |



นางอารี สิมนิรัตน์

เจ้าหน้าที่วิเคราะห์

รูปที่ จ. 2 ผลการทดสอบหาค่าความร้อนของแผ่นยี่ห้อมี่ 2

ผลการวิเคราะห์

| | |
|---------------------|--------------------------------------------------|
| ตัวอย่าง | eva, backsheet, silicone |
| เจ้าของตัวอย่าง | อิงฉัตร สุภาพยาม |
| รหัสงาน | 640610-7015 |
| วันที่วิเคราะห์ | 18 ตุลาคม 2564 |
| วัตถุประสงค์ | หาค่าพลังงานความร้อน |
| เครื่องมือวิเคราะห์ | Automatic Bomb Calorimeter ; Leco model AC - 500 |

| ชื่อตัวอย่าง | ค่าความร้อน (cal/g) | | |
|--------------|---------------------|---------------|-----------|
| | วัดครั้งที่ 1 | วัดครั้งที่ 2 | ค่าเฉลี่ย |
| eva | 9750.2 | 9615.3 | 9682.8 |
| backsheet | 5760.7 | 5775.5 | 5768.1 |
| silicone | 2777.9 | 2854.8 | 2816.4 |



อารี สิมนิรัตน์

เจ้าหน้าที่วิเคราะห์

รูปที่ จ. 3 ผลการทดสอบหาค่าองค์ประกอบทางเคมีของแผงยี่ห้อที่ 1

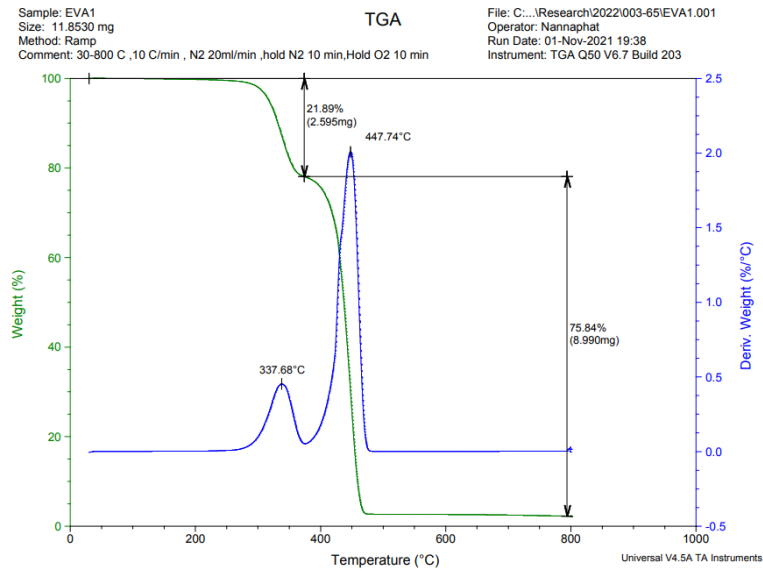
| Summarize Results | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------|--------------------|--------------|----------|------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--|
| Date : | | 4/26/2021 | | 16:00:00 | | | | | | |
| Method Name : | | NCHS | | | | | | | | |
| Method Filename : | | CHNS method.mth | | | | | | | | |
| Group | Sample name | Filename | Inj Date | Inj Time | Weight (g) | %Carbon | %Hydrogen | %Nitrogen | %Sulphur | |
| 1 | 1869 | EVA | 04/26/2021 | 13:49 | 0.006001 | 75.28 | 11.76 | 0.22 | 0.00 | |
| 1 | 1869 | EVA | 04/26/2021 | 14:01 | 0.003006 | 75.53 | 12.12 | 0.20 | 0.00 | |
| | | | | | | 75.41 | 11.94 | 0.21 | 0.00 | |
| 2 Sample(s) in Group No : 1 | | | | | | | | | | |
| Component Name | Average | Std. Dev. | % Rel. S. D. | Variance | | | | | | |
| Nitrogen | 0.21 | 0.01414213 | 6.7343 | 0.0002 | | | | | | |
| Carbon | 75.4 | 0.1767767 | 0.2344 | 0.0313 | | | | | | |
| Hydrogen | 11.94 | 0.2545582 | 2.132 | 0.0648 | | | | | | |
| Sulphur | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| Group | Sample name | Filename | Inj Date | Inj Time | Weight (g) | %Carbon | %Hydrogen | %Nitrogen | %Sulphur | |
| 2 | 1869 | Backsheet | 04/26/2021 | 14:25 | 0.004195 | 57.37 | 3.95 | 0.00 | 0.00 | |
| 2 | 1869 | Backsheet | 04/26/2021 | 15:13 | 0.00422 | 56.30 | 3.87 | 0.00 | 0.00 | |
| | | | | | | 56.84 | 3.91 | 0.00 | 0.00 | |
| 2 Sample(s) in Group No : 2 | | | | | | | | | | |
| Component Name | Average | Std. Dev. | % Rel. S. D. | Variance | | | | | | |
| Nitrogen | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| Carbon | 56.83 | 0.7566041 | 1.3312 | 0.5724 | | | | | | |
| Hydrogen | 3.91 | 0.05656866 | 1.4468 | 0.0032 | | | | | | |
| Sulphur | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| Group | Sample name | Filename | Inj Date | Inj Time | Weight (g) | %Carbon | %Hydrogen | %Nitrogen | %Sulphur | |
| 3 | 1869 | Silicone | 04/26/2021 | 14:37 | 0.006439 | 21.20 | 3.81 | 0.06 | 0.00 | |
| 3 | 1869 | Silicone | 04/26/2021 | 14:49 | 0.011149 | 20.93 | 3.81 | 0.06 | 0.00 | |
| | | | | | | 21.07 | 3.81 | 0.06 | 0.00 | |
| 2 Sample(s) in Group No : 3 | | | | | | | | | | |
| Component Name | Average | Std. Dev. | % Rel. S. D. | Variance | | | | | | |
| Nitrogen | 0.06 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| Carbon | 21.07 | 0.1909192 | 0.9063 | 0.0365 | | | | | | |
| Hydrogen | 3.81 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| Sulphur | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |

รูปที่ จ. 4 ผลการทดสอบหาค่าองค์ประกอบทางเคมีของแผงยี่ห้อที่ 2

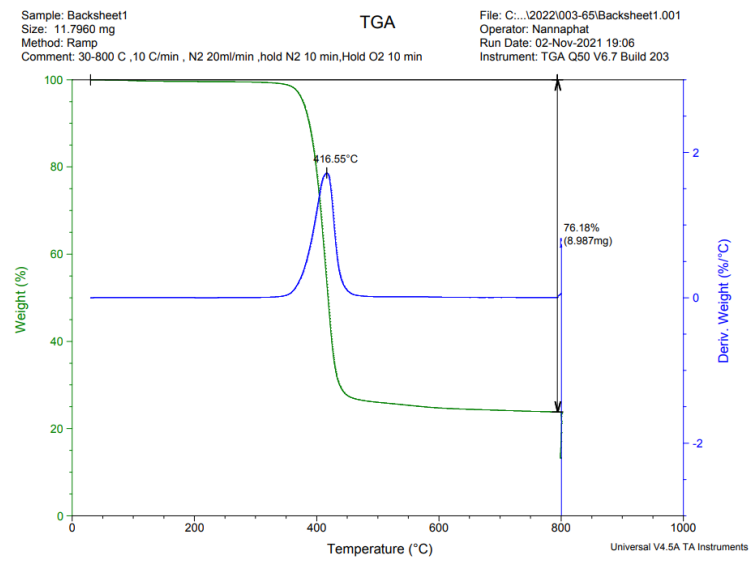
| Summarize Results | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------|-----------------|--------------|----------|------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--|
| Date : | | 10/20/2021 | | 16:48:35 | | | | | | |
| Method Name : | | NCHS | | | | | | | | |
| Method Filename : | | CHNS method.mth | | | | | | | | |
| Group | Sample name | Filename | Inj Date | Inj Time | Weight (g) | %Carbon | %Hydrogen | %Nitrogen | %Sulphur | |
| 1 | 2519 | silicone | 10/20/2021 | 14:40 | 0.00301 | 23.78 | 4.92 | 0.00 | 0.00 | |
| 1 | 2519 | silicone | 10/20/2021 | 14:52 | 0.004768 | 22.50 | 4.55 | 0.00 | 0.00 | |
| | | | | | | 23.14 | 4.74 | 0.00 | 0.00 | |
| 2 Sample(s) in Group No : 1 | | | | | | | | | | |
| Component Name | Average | Std. Dev. | % Rel. S. D. | Variance | | | | | | |
| Nitrogen | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| Carbon | 23.14 | 0.9050972 | 3.9114 | 0.8192 | | | | | | |
| Hydrogen | 4.74 | 0.2616294 | 5.5254 | 0.0684 | | | | | | |
| Sulphur | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| Group | Sample name | Filename | Inj Date | Inj Time | Weight (g) | %Carbon | %Hydrogen | %Nitrogen | %Sulphur | |
| 2 | 2519 | Backsheet | 10/20/2021 | 15:04 | 0.003598 | 61.29 | 5.25 | 0.00 | 0.00 | |
| 2 | 2519 | Backsheet | 10/20/2021 | 15:16 | 0.002585 | 61.66 | 5.21 | 0.00 | 0.00 | |
| | | | | | | 61.48 | 5.23 | 0.00 | 0.00 | |
| 2 Sample(s) in Group No : 2 | | | | | | | | | | |
| Component Name | Average | Std. Dev. | % Rel. S. D. | Variance | | | | | | |
| Nitrogen | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| Carbon | 61.48 | 0.2616287 | 0.4256 | 0.0684 | | | | | | |
| Hydrogen | 5.23 | 0.02828424 | 0.5408 | 0.0008 | | | | | | |
| Sulphur | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| Group | Sample name | Filename | Inj Date | Inj Time | Weight (g) | %Carbon | %Hydrogen | %Nitrogen | %Sulphur | |
| 3 | 2519 | eva | 10/20/2021 | 15:28 | 0.003192 | 75.94 | 13.02 | 0.01 | 0.00 | |
| 3 | 2519 | evar | 10/20/2021 | 15:40 | 0.003367 | 76.96 | 13.31 | 0.03 | 0.00 | |
| | | | | | | 76.45 | 13.17 | 0.02 | 0.00 | |
| 2 Sample(s) in Group No : 3 | | | | | | | | | | |
| Component Name | Average | Std. Dev. | % Rel. S. D. | Variance | | | | | | |
| Nitrogen | 0.02 | 0.01414214 | 70.7107 | 0.0002 | | | | | | |
| Carbon | 76.45 | 0.7212465 | 0.9434 | 0.5202 | | | | | | |
| Hydrogen | 13.17 | 0.2050609 | 1.5576 | 0.042 | | | | | | |
| Sulphur | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |

รูปที่ จ. 5 ผลการทดสอบ TGA ของแผงยี่ห้อที่ 1 (A) EVA (B) Backsheet (C) Silicone

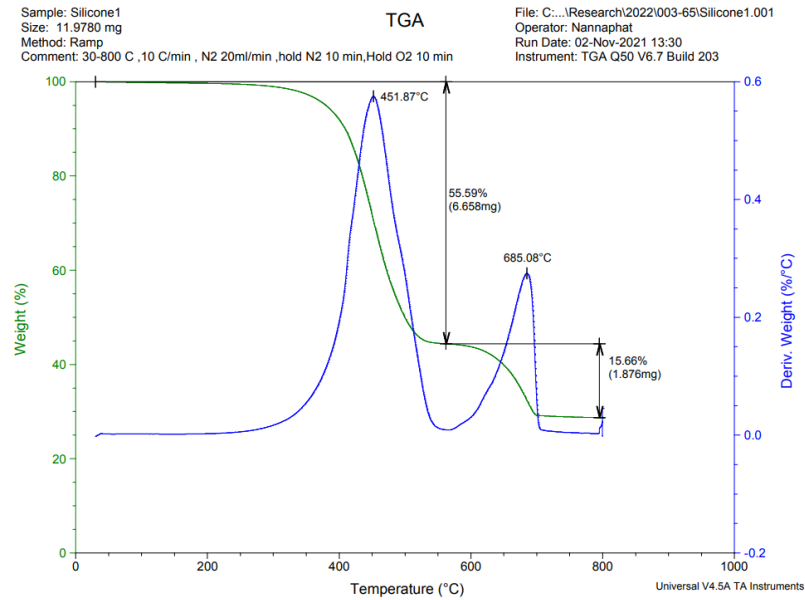
(A)



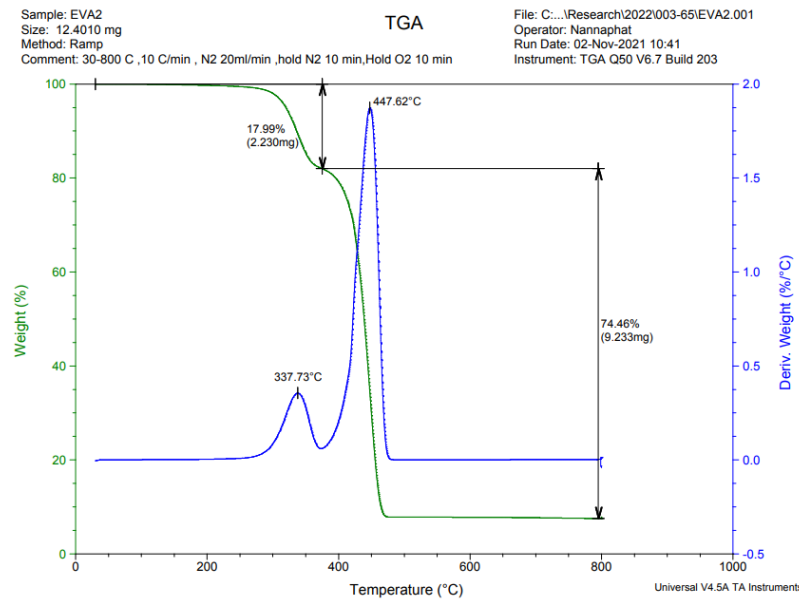
(B)



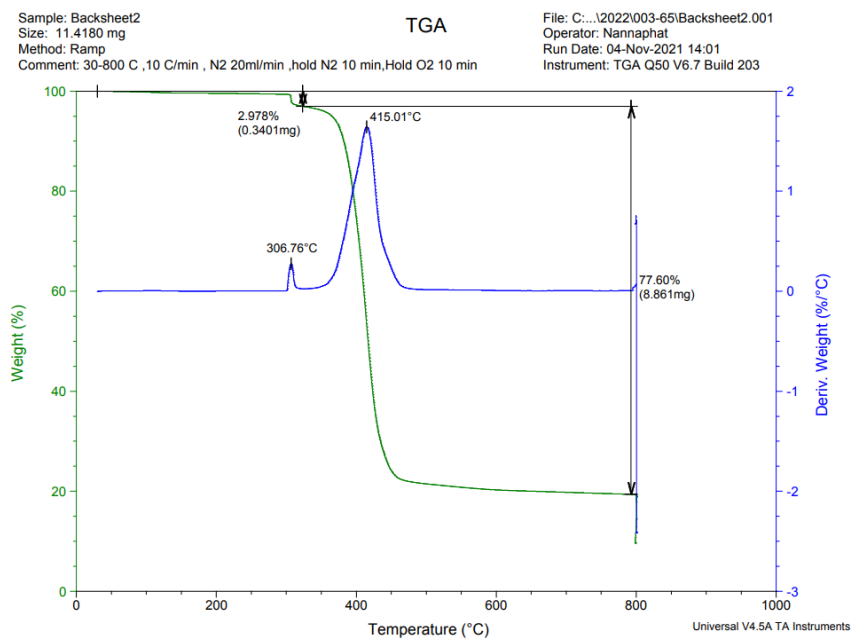
(C)



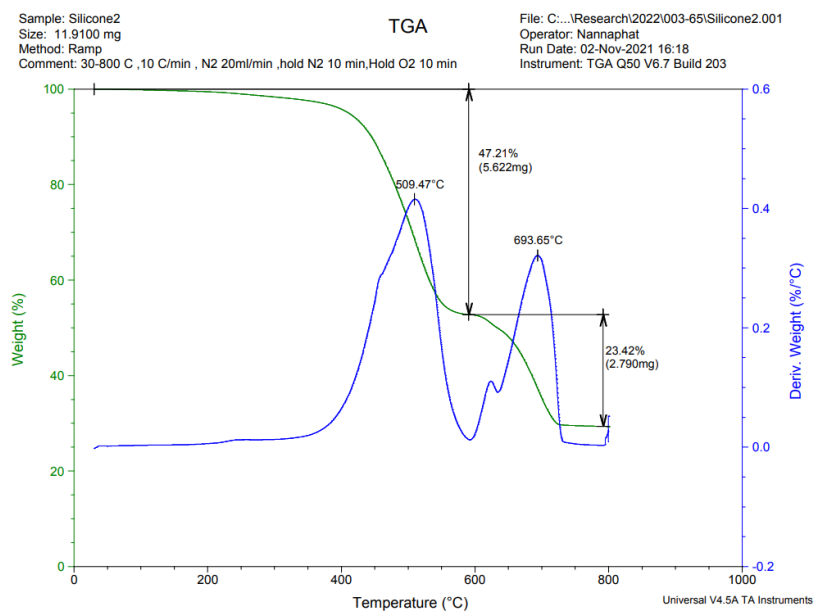
รูปที่ จ. 6 ผลการทดสอบ TGA ของแผ่นยี่ห้อที่ 2 (A) EVA (B) Backsheet (C) Silicone (A)



(B)



(C)



รูปที่ จ.7 ผลวิเคราะห์ TTLC ของแผ่นเซลล์ซิลิกอนและทองแดง (รีบบอน)



Analysis / Test Report

Client : Chula Unisearch Chulalongkorn University
 254 Research Building Floor 3-4, Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok Thailand 10330
 P/O :
 Project Name :
 Project Location :
 Lot ID: 2221588
 Date Received : Feb 17, 2022
 Date Reported : Mar 02, 2022
 Report Number : 2235458-1

Page 1 of 3

| Analyte | Unit | LOD | LOQ (LOR) | Result | Guideline / Specification | Method | Testing Location |
|-------------------------------------------------|-------|-----|-----------|--------|---------------------------|-----------------------------------------|------------------|
| Total Concentration Test (TTLC) : Metals | | | | | | | |
| Antimony | mg/kg | - | 1.00 | 14.6 | <500 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Arsenic | mg/kg | - | 0.50 | <0.50 | <500 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Barium | mg/kg | - | 1.00 | 69.7 | <10000 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Beryllium | mg/kg | - | 0.50 | <0.50 | <75 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Cadmium | mg/kg | - | 0.50 | <0.50 | <100 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Chromium | mg/kg | - | 1.00 | <1.00 | <2500 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Cobalt | mg/kg | - | 1.00 | <1.00 | <8000 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Copper | mg/kg | - | 1.00 | 209035 | <2500 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Hexavalent Chromium | mg/kg | - | 1.00 | <1.00 | <500 | Based on US EPA, Method 3060A and 7196A | Bangkok |
| Lead | mg/kg | - | 1.00 | 7847 | <1000 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Mercury | mg/kg | - | 0.10 | <0.10 | <20 | Based on US EPA, Method 7471B | Bangkok |
| Molybdenum | mg/kg | - | 1.00 | <1.00 | <3500 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Nickel | mg/kg | - | 1.00 | 3.31 | <2000 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Selenium | mg/kg | - | 0.50 | <0.50 | <100 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Silver | mg/kg | - | 1.00 | 56.2 | <500 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Thallium | mg/kg | - | 5.00 | <5.00 | <700 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Trivalent Chromium | mg/kg | - | 1.00 | <1.00 | <2500 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |
| Vanadium | mg/kg | - | 5.00 | 38.4 | <2400 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |

Approved by *Savitree N.*
 Savitree Nisangam
 Assistant Manager

ADDRESS 104 Phatthanakan 40, Phatthanakan Rd., Khwaeng Phatthanakan, Khet Suan Luang, Bangkok 10250 Thailand | PHONE +66 0 2760 3000 | FAX +66 0 2760 3197
 ALS LABORATORY GROUP THAILAND CO., LTD. An ALS Limited Company
 www.alsglobal.com
 3082-AJ-ENGL / CASR RIGHT SOLUTIONS RIGHT PARTNER © Report: AL_01-09 (22-04/16)



Analysis / Test Report

Client : Chula Unisearch Chulalongkorn University
 254 Research Building Floor 3-4, Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok Thailand 10330
 P/O :
 Project Name :
 Project Location :
 Lot ID: 2221588
 Date Received : Feb 17, 2022
 Date Reported : Mar 02, 2022
 Report Number : 2235458-1

Page 2 of 3

| Analyte | Unit | LOD | LOQ (LOR) | Result | Guideline / Specification | Method | Testing Location |
|-------------------------------------------------|-------|-----|-----------|--------|---------------------------|-----------------------------------------|------------------|
| Total Concentration Test (TTLC) : Metals | | | | | | | |
| Zinc | mg/kg | - | 1.00 | 37.5 | <5000 | Based on US EPA, Method 3050B and 6010D | Bangkok |

Guideline : Notification of the Ministry of Industry regarding Waste or Used Material Disposal, published in the Royal Government Gazette, Vol.123, Special Part 110, dated January 25, B.E. 2549 (2006).
 Remark :
 - LOD : Limit of Detection
 - "C" : Lower than LOQ (Limit of Quantitation) / LOR (Limit of Reporting)

Approved by *Savitree N.*
 Savitree Nisangam
 Assistant Manager

ADDRESS 104 Phatthanakan 40, Phatthanakan Rd., Khwaeng Phatthanakan, Khet Suan Luang, Bangkok 10250 Thailand | PHONE +66 0 2760 3000 | FAX +66 0 2760 3197
 ALS LABORATORY GROUP THAILAND CO., LTD. An ALS Limited Company
 www.alsglobal.com
 3082-AJ-ENGL / CASR RIGHT SOLUTIONS RIGHT PARTNER © Report: AL_01-09 (22-04/16)

รูปที่ จ.8 ผลวิเคราะห์ STLC ของแผ่นเซลล์ซิลิกอนและทองแดง (รีบบอน)



Analysis / Test Report

Client : Chula Unisearch Chulalongkorn University
254 Research Building Floor 3-4, Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok Thailand 10330
P/O :
Project Name :
Project Location :

Lot ID: 2221588
Date Received : Feb 17, 2022
Date Reported : Mar 02, 2022
Report Number : 2235458-1

Page 2 of 3

Sample Number : 2221588-2
Sampled Date : Feb 14, 2022
Sample Description : c-Si Solar Cell
Date Analysis Commenced : Feb 18, 2022
Condition of Sample : Packed in one plastic zip bag

| Analyte | Unit | LOD | LOQ (LOR) | Result | Guideline / Specification | Method | Testing Location |
|----------------------------------------------|------|-----|-----------|--------|---------------------------|---------------|------------------|
| Waste Extraction Test (STLC) : Metals | | | | | | | |
| Arsimony | mg/L | - | 0.01 | 0.86 | No Standard | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Arsenic | mg/L | - | 0.01 | <0.01 | <5 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Barium | mg/L | - | 0.01 | 7.51 | <100 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Beryllium | mg/L | - | 0.01 | <0.01 | <0.75 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Cadmium | mg/L | - | 0.01 | <0.01 | <1 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Chromium | mg/L | - | 0.03 | <0.03 | <5 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Cobalt | mg/L | - | 0.01 | <0.01 | <80 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Copper | mg/L | - | 0.01 | 65.4 | <25 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Hexavalent Chromium | mg/L | - | 0.03 | <0.03 | <5 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Lead | mg/L | - | 0.01 | 672 | <5 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Mercury | mg/L | - | 0.001 | <0.001 | <0.2 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Molybdenum | mg/L | - | 0.01 | <0.01 | <350 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Nickel | mg/L | - | 0.01 | 0.07 | <20 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Selenium | mg/L | - | 0.01 | <0.01 | <1 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Silver | mg/L | - | 0.01 | 0.54 | <5 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Thallium | mg/L | - | 0.01 | <0.01 | <7 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Trivalent Chromium | mg/L | - | 0.03 | <0.03 | <5 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Vanadium | mg/L | - | 0.01 | 3.12 | <24 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |
| Zinc | mg/L | - | 0.01 | 1.12 | <250 | MOI, B.E.2548 | Bangkok |

Guideline : Notification of the Ministry of Industry regarding Waste or Used Material Disposal, published in the Royal Government Gazette, Vol.123, Special Part 110, dated January 25, B.E. 2549 (2006).

Remark :

- LOD : Limit of Detection
- "<" : Lower than LOQ (Limit of Quantitation) / LOR (Limit of Reporting)

Approved by

Sawitree Nisangam
Assistant Manager

The above results are valid only for the unspiked/unaltered sample(s) as indicated in this report. No part of this report or certificate may be reproduced in any form without written consent from the laboratory, ALS Laboratory Group (Thailand) strongly recommends that this report is not reproduced except in full.

ADDRESS 104 Phatthanakan 40, Phatthanakan Rd., Khwaeng Phatthanakan, Khet Suan Luang, Bangkok 10250 Thailand | PHONE +66 0 2760 3000 | FAX +66 0 2760 3197
ALS LABORATORY GROUP THAILAND CO., LTD. An ALS Limited Company

Life is Scientific

www.alsglobal.com

RIGHT SOLUTIONS RIGHT PARTNER

© 08ppm_AL_01 (22-489)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

a

ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------|
| ชื่อ-สกุล | อิงฉัตร สุภาพยาม |
| วัน เดือน ปี เกิด | 17 เมษายน 2539 |
| สถานที่เกิด | กรุงเทพมหานคร |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 133/74 ถนนหทัยราษฎร์ แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510 |



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY