

คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

นายธนวุฒิ ไชยลังกา

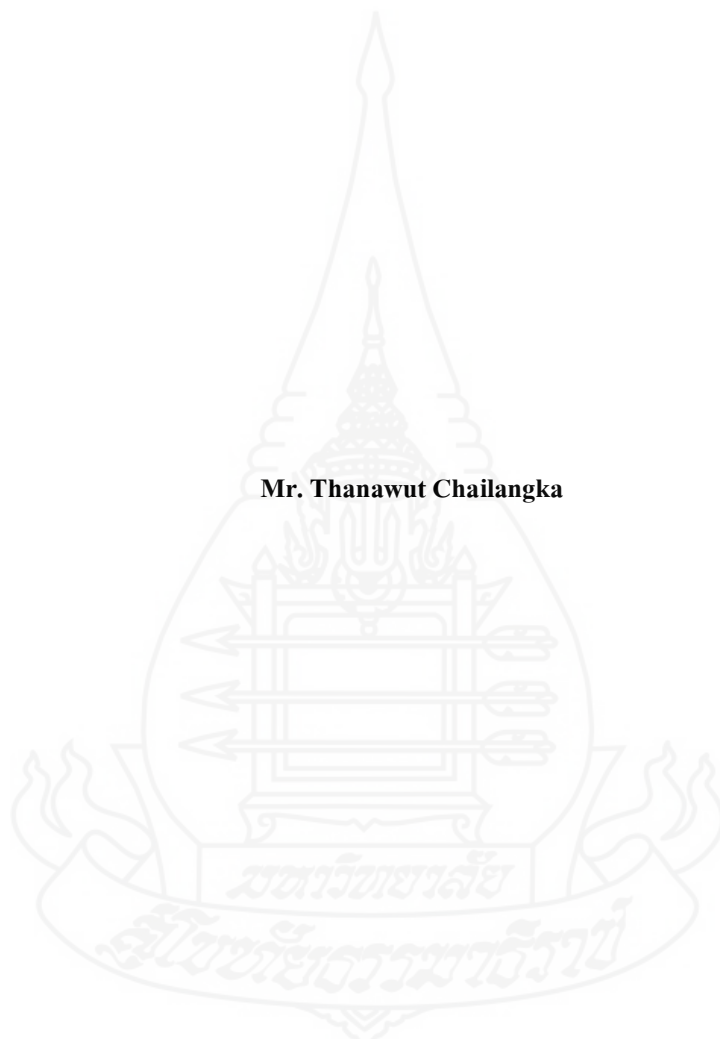


การศึกษาค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
วิชาเอกการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช

พ.ศ. 2564

Manual on Disposal of Expired Solar Cells

Mr. Thanawut Chailangka



An Independent Study Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Science in Industrial Environment Management

School of Health Science

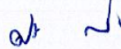
Sukhothai Thammathirat Open University

2021

หัวข้อการศึกษาค้นคว้าอิสระ	คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์
ชื่อและนามสกุล	นายธนาวุฒิ ไชยลังกา
วิชาเอก	การจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ศรีศักดิ์ สุนทรไชย

การศึกษาค้นคว้าอิสระนี้ ได้รับความเห็นชอบให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรระดับปริญญาโท เมื่อวันที่ 3 มีนาคม 2564

คณะกรรมการสอบการศึกษาค้นคว้าอิสระ



..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศรีศักดิ์ สุนทรไชย)



..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุดาว เลิศวิสุทธิไพบูลย์)



..... (รองศาสตราจารย์ ดร.อารยา ประเสริฐชัย)

ประธานกรรมการประจำสาขาวิชาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ

ชื่อการศึกษาค้นคว้าอิสระ คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์
ผู้ศึกษา นายธนาวุฒิ ไชยลังกา รหัสนักศึกษา 2585000629
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม)
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริศักดิ์ สุนทรไชย ปีการศึกษา 2564

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากที่สุด เซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีอายุการใช้งานประมาณ 30 ปี และด้วยความต้องการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณ จำนวนซากเซลล์แสงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นมากเช่นกันหลังจากเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านั้นเสื่อมสภาพหรือประสิทธิภาพการทำงานลดลง ซึ่งจะกลายมาเป็นของเสียอันตราย ซึ่งกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้จัดให้เป็นของเสียอันตรายแล้ว ซึ่งอาจจะเกิดผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม การศึกษาค้นคว้าอิสระนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำคู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

วิธีการการศึกษาเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์จากสื่อต่างๆ เว็บไซต์ หนังสือ เอกสารคู่มือ วิทยานิพนธ์ จากนั้นจึงสืบค้นวิธีการจัดการของเสียแต่ละชนิดตามหลักวิชาการ ข้อกฎหมายที่เกี่ยวข้อง และระบบคุณภาพตามมาตรฐานสากล แล้วจึงนำข้อมูลมาสังเคราะห์และเรียบเรียงจัดทำร่างคู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทำการประเมินคุณภาพของคู่มือ โดยผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน นำผลการประเมินและข้อเสนอแนะที่ได้มาปรับปรุงแก้ไข และจัดทำคู่มือฉบับสมบูรณ์

คู่มือประกอบด้วยเนื้อหาจำนวน 5 บทคือ (1) เซลล์แสงอาทิตย์ และส่วนประกอบ (2) ปริมาณและผลกระทบจากซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมสภาพ (3) สถานการณ์ของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และการกำจัด (4) แนวทางการจัดการและการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และ (5) ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และบทสรุปของการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ การจัดการของเสีย เซลล์แสงอาทิตย์ ซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Independent Study title: Manual on Disposal of Expired Solar Cells
Author: Mr. Thanawut Chailangka **ID:** 2585000629
Degree: Master of Science (Industrial Environmental Management)
Independent Study advisor: Dr. Sarisak Soontornchai, Associate Professor
Academic year: 2021

Abstract

Photovoltaic technology is one of the most environmentally friendly technologies. Solar cells have a lifetime of about 30 years with exponentially increasing demand. The number of solar cells also increases greatly after their deterioration or decreasing performance. Afterwards they become hazardous waste as classified by the Department of Industrial Works and affect human health and the environment. Therefore, the objective of independent study was to create a manual on disposal of expired solar cells.

The manual preparation involved the review and collection of relevant information on solar cells in various media, websites, books, handbooks, theses, and disposal methods for each type of wastes according to technical principles, related laws, and quality systems based on international standards. After that, the information was synthesized and compiled as a draft manual on solar cell waste management. The draft manual was then assessed by three experts, whose recommendations were used to finalize the manual.

The contents of the manual include five chapters: (1) Solar Cells and Their Components; (2) Quantities and Impact of Deteriorated Solar Panels; (3) Solar Panel Waste Situation and Disposal; (4) Guidelines for Solar Panel Waste Management and Recycling; and (5) Economic Worthiness and Summary of Solar Panel Waste Management.

Keywords: Waste management, Solar cells, Solar panel waste

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้าอิสระเรื่อง คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ฉบับนี้ ผู้ศึกษา ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีศักดิ์ สุนทรไชย อาจารย์ที่ปรึกษา การศึกษาค้นคว้าอิสระ ซึ่งได้ให้คำแนะนำ และแนวทางในการจัดทำคู่มือ ทำให้ผู้ศึกษาสามารถ จัดทำคู่มือได้สำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สุเทพ ศิลปานันทกุล ดร.ไชยยศ นุญญา กิจ และคุณชัยพุกษ์ ทองเปี่ยม ผู้อำนวยการศูนย์บริหารและจัดการกากอุตสาหกรรมบริษัท เบตเตอร์ เวิลด์ กรีน จำกัด (มหาชน) ที่ได้สละเวลาอันมีค่าพิจารณาคู่มือ รวมทั้งให้คำแนะนำและ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการปรับแก้ไขคู่มือให้มีความสมบูรณ์ทั้งในด้านเนื้อหาทาง วิชาการที่ถูกต้อง และการเรียบเรียงเนื้อหาที่เหมาะสม

ธนาวุฒิ ไชยลังกา

ธันวาคม 2564



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
3. ขอบเขตของการศึกษา	2
4. นิยามศัพท์เฉพาะ	2
5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
1. เซลล์แสงอาทิตย์	4
2. ปริมาณการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์และผลกระทบจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	25
3. กฎหมายที่เกี่ยวข้องในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	30
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	55
บทที่ 3 วิธีดำเนินการศึกษา	66
1. การศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์	66
2. การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ และผลกระทบ	66
3. การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสถานการณ์ของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และการกำจัด	67
4. การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแนวทางการจัดการและวิธีการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์	67
5. การศึกษาความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของการรีไซเคิลและบทสรุปของการจัดการ	67
ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	
6. การจัดทำร่างคู่มือ	68

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7. การประเมินคุณภาพของกลุ่มการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	68
8. การวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบประเมิน.....	69
9. การปรับปรุงร่างคู่มือเป็นคู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ฉบับสมบูรณ์.....	70
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	71
1. การศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์.....	71
2. ผลการประเมินคู่มือและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงคู่มือ.....	71
3. ผลการปรับปรุงร่างคู่มือเป็นคู่มือฉบับสมบูรณ์.....	73
บทที่ 5 สรุปการศึกษากิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	75
1. สรุปการศึกษา.....	75
2. อภิปรายผล.....	76
3. ข้อเสนอแนะ.....	79
บรรณานุกรม.....	81
ภาคผนวก.....	87
ก คู่มือเรื่อง การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	88
ข แบบประเมินการใช้งาน คู่มือเรื่องการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	89
ค ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาคู่มือ.....	91
ประวัติผู้ศึกษา.....	96

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อายุใช้งานของอุปกรณ์หลักในระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์.....	22
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	24
ตารางที่ 2.3 พระราชบัญญัติที่ใช้บังคับสำหรับการประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าจาก พลังงานแสงอาทิตย์จำแนกตามประเภท และขนาดกำลังการผลิต.....	39



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน.....	5
ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน.....	6
ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน.....	7
ภาพที่ 2.4 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน.....	8
ภาพที่ 2.5 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์.....	9
ภาพที่ 2.6 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดเซเลไนต์.....	11
ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ฟิล์มบาง.....	11
ภาพที่ 2.8 หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์.....	13
ภาพที่ 2.9 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว.....	14
ภาพที่ 2.10 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกรวม.....	16
ภาพที่ 2.11 ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายในครัวเรือน.....	18
ภาพที่ 2.12 ภาพรวมกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงงานพลังงานแสงอาทิตย์.....	20
ภาพที่ 2.13 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน.....	21
ภาพที่ 2.14 สัดส่วนมูลค่ารวมของอุปกรณ์หลักในโครงการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์.....	22
ภาพที่ 2.15 แผงผังแสดงการเกิดของเสียในกระบวนการ.....	23
ภาพที่ 2.16 อัตราปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ จากการประเมินวัฏจักรชีวิต.....	28

บทที่ 1

บทนำ

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เซลล์แสงอาทิตย์หรือ โซลาร์เซลล์ (solar cell) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทั้งในภาคครัวเรือน อุตสาหกรรม และภาคส่วนอื่นๆ ซึ่งแบ่งประเภทผู้ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ออกเป็น 2 กลุ่มหลักคือ ผู้ติดตั้งเพื่อนำพลังงานมาใช้เองภายในครัวเรือนหรือองค์กร และผู้ติดตั้งที่เน้นการผลิตไฟฟ้าเพื่อขาย ด้วยศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยมีค่อนข้างมาก ด้วยภูมิประเทศที่อยู่ในเส้นศูนย์สูตร ร่วมกับทางภาครัฐที่ได้ส่งเสริมภาคครัวเรือน และภาคเอกชนในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการสนับสนุนทางด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นมาตรการด้านภาษี การส่งเสริมการลงทุน (Board Of Investment; BOI) โครงการการรับซื้อไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ solar rooftop และการให้สิทธิประโยชน์ต่างๆ เพื่อสร้างแรงจูงใจในการติดตั้งและการลงทุน อีกทั้งในปัจจุบันมีอุปกรณ์ประเภทต่างๆ ได้ถูกออกแบบพัฒนามาให้ใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์เป็นจำนวนมากและสามารถเข้าถึงผู้บริโภคได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ประเทศไทยมีปริมาณการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

มีการคาดการณ์ว่าจะมีแผงเซลล์อาทิตย์ที่หมดอายุประมาณสะสมตั้งแต่ปี 2545 - 2565 จะทยอยหมดอายุและต้องถูกนำมากำจัดถึงประมาณ 620,000 – 790,000 ตัน (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย Center of Excellence on Hazardous Substance Management ; HSM, 2562)

แต่ในความเป็นจริงทุกๆ เทคโนโลยีส่วนแต่มีการเสื่อมสภาพและมีวันหมดอายุการใช้งาน เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ก็เช่น เมื่อเสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งานลงไป จะต้องมีการเปลี่ยนหรือซ่อมแซม และของเสียเหล่านั้นจะกลายเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้จัดให้เป็นของเสียอันตราย) ซึ่งของเสียเหล่านี้มีองค์ประกอบที่อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ สารจำพวก โลหะหนักหรือพลาสติก จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ประเทศไทยจะต้องศึกษาและวางแผนรองรับในการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์พวกนี้ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพ ให้น้อยที่สุด

การจัดทำคู่มือ เรื่องการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ฉบับนี้ ได้ศึกษาถึง ส่วนประกอบและวิธีการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมุ่งเน้นการศึกษารวบรวม ข้อมูลจากสื่อการเรียนรู้ต่างๆ และเรียบเรียงจัดทำเป็นคู่มือ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดการของ เสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมุ่งเน้นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ สอดคล้องกับ แผนการจัดการกากอุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อจัดทำคู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

3. ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้มีขอบเขตในด้านการค้นคว้า รวบรวมข้อมูล การสังเคราะห์เพื่อการจัดทำ คู่มือและแนวทางปฏิบัติในการจัดการของเสียที่เกิดจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอนและเซลล์ แสงอาทิตย์แบบผสม เริ่มตั้งแต่ กระบวนการถอดแยกชิ้นส่วน กระบวนการบำบัด และกระบวนการ กำจัดอย่างถูกต้องเหมาะสม สอดคล้องกับข้อกำหนดและมาตรฐานสากล

4. นิยามศัพท์เฉพาะ

4.1 เซลล์แสงอาทิตย์ หมายถึง สิ่งประดิษฐ์กรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างขึ้นมาเพื่อ เป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

4.2 ขยะอิเล็กทรอนิกส์ หมายถึง ของเสียที่เกิดจากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ที่เสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งาน ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการจากผู้ใช้งาน ซึ่งครอบคลุม ไปถึงผลิตภัณฑ์ทุกประเภทที่เกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

4.3 ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ หมายถึง ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจาก กระบวนการผลิต การขนส่ง การเสื่อมคุณภาพจากการใช้งาน หรือหมดอายุการใช้งาน รวมถึงซาก ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการจากเปลี่ยนหรือซ่อมแซม

4.4 ของเสียทั่วไป หมายถึง ของเสีย มูลฝอย ซากหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วซึ่งไม่มีการ ปนเปื้อนหรือมีสารอันตรายเป็นส่วนประกอบ

4.5 ของเสียอันตราย หมายถึง วัสดุที่ไม่ได้ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นสารไวไฟ หรือกัด กร่อน หรือเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย มีสารพิษปะปนหรือมีตัวทำละลาย อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อม

4.6 การกำจัด หมายถึง การทำลายเป็นวิธีการขั้นสุดท้ายของกระบวนการจัดการของเสีย เพื่อทำให้ของเสียที่ไม่ต้องการนั้นไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสภาพแวดล้อม อันอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพต่อไป เช่น การปรับเสถียรและการฝังกลบกากอุตสาหกรรมอันตราย

4.7 การบำบัด หมายถึง การทำลายฤทธิ์โดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ หรือทางเคมีของของเสียหรือสารพิษที่เจือปนอยู่ในของเสีย เช่น การทำให้หมดความเป็นพิษ หรือมีความเป็นพิษน้อยลง หรืออยู่ในลักษณะที่ไม่สามารถแสดงความเป็นพิษออกมาได้ เพื่อสะดวกต่อการกำจัดต่อไป เช่น การทำให้เป็นก้อนแข็ง การทำให้เป็นกลาง การใช้เตาเผาของเสียอันตราย เป็นต้น

4.8 การจัดการของเสียอันตราย หมายถึง การจัดการของเสียที่มีส่วนประกอบอันตรายอย่างถูกต้องเหมาะสม ขั้นตอนในการจัดการควรทำเป็นระบบครบวงจร เริ่มด้วย การลดปริมาณการผลิตของเสีย การเก็บกักของเสีย การเก็บขนและการขนส่ง การบำบัดหรือทำลายฤทธิ์ การนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ และการกำจัดของเสียในขั้นตอนสุดท้าย

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

5.1 ประโยชน์ต่อภาคประชาชน มีคู่มือสำหรับสร้างความรู้ความเข้าใจ การเลือกใช้ งาน และการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพ

5.2 ประโยชน์ต่อภาครัฐ และองค์กรที่เกี่ยวข้อง มีคู่มือสำหรับสร้างความรู้ความเข้าใจ สร้างความตระหนักถึงข้อดีและข้อเสียของการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ ความจำเป็นในการศึกษา และการวางแผนรองรับในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

5.3 ประโยชน์ต่อภาคของผู้รับกำจัดบำบัด มีคู่มือสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการจัดเก็บรวบรวม การบำบัด การกำจัด และการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างถูกต้องเหมาะสม สอดคล้องกับข้อกำหนดและมาตรฐานสากล

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาค้นคว้าอิสระเล่มนี้ผู้ศึกษาได้ทำการทบทวนเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

- 1) เซลล์แสงอาทิตย์
- 2) ปริมาณการใช้งานและผลกระทบจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 3) กฎหมายที่เกี่ยวข้องในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทย
- 4) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซึ่งในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์มีชื่อเรียกกันไปหลากหลายชื่อ เช่น เซลล์สุริยะ โซลาร์เซลล์ (solar cell) หรือเซลล์ PV (Photovoltaic; PV) ซึ่งต่างก็มีที่มาจากคำว่า Photovoltaic โดยแยกออกเป็น Photo หมายถึง แสง และ Volt หมายถึง แรงดันไฟฟ้า เมื่อรวมคำแล้วหมายถึง กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของแสงบนวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้

เซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกค้นพบมานานแล้ว ตั้งแต่ พ.ศ. 2436 ถึงจะมีการค้นพบนานแล้วแต่ก็ยังไม่มีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมา จนเมื่อเวลาผ่านไป อีก 61 ปี จึงได้มีการสร้างขึ้นมาครั้งแรกในปี ค.ศ. 1954 (พ.ศ. 2497) โดย แชปปีน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียสัน (Pearson) แห่งเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephone) โดยทั้ง 3 ท่านนี้ ได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น (P-N) แบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สารเข้าไปในผลึกของซิลิคอน จนได้เซลล์แสงอาทิตย์อันแรกของโลก ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 6 ซึ่งปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาขึ้นจนมีประสิทธิภาพสูงกว่าร้อยละ 15 แล้ว ในระยะแรกเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะใช้สำหรับ โครงการด้านอวกาศ ดาวเทียมหรือยานอวกาศที่ส่งจากพื้นโลกไปโคจรในอวกาศ ก็ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน ต่อมาจึงได้มีการนำเอาแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้บนพื้นโลกเช่นในปัจจุบันนี้ เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรกๆ ส่วนใหญ่จะมีสีดำ แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์มีสีต่างๆ กันไป เช่น แดง น้ำเงิน เขียว ทอง เป็นต้น เพื่อความสวยงาม

1.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์และส่วนประกอบ ปัจจุบันมีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ ขึ้นหลายประเภท ซึ่งหากจำแนกตามเทคโนโลยีการผลิตและส่วนประกอบได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่

1.1.1 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน (crystalline silicon solar cells; c-Si) ปัจจุบันมีการติดตั้งใช้งานกันอย่างแพร่หลายประกอบไปด้วยชนิดผลึกเดี่ยว (single/monocrystalline silicon) ชนิดผลึกรวม (poly/multi-crystalline silicon) ริบบอน (ribbon-crystalline silicon) นอกจากนี้แล้วเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้นำเทคโนโลยีฟิล์มบางซิลิคอนมาผนวกกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนหรือที่เรียกว่า Heterojunction with Intrinsic Thin layer (HIT) ก็กำลังมีแนวโน้มที่จะมีการใช้งานมากขึ้นเช่นกัน ตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากผลึกซิลิคอนทั้งแบบผลึกเดี่ยวและแบบผลึกรวม (ภาพที่ 2.1)



ชนิดผลึกเดี่ยว

(single crystalline silicon solar cell)

ชนิดผลึกรวม

(polycrystalline silicon solar cell)

ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน

ที่มา : www.98solar.com

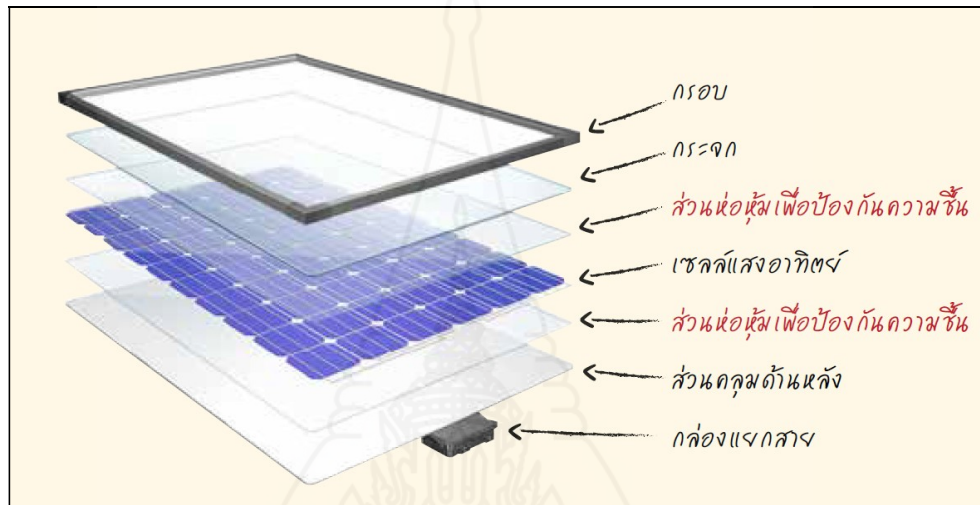
แสงอาทิตย์ชนิดผลึกกลุ่มที่ 1 ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (single crystalline silicon solar cell) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Mono crystalline silicon solar cell มีลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก ซิลิคอนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในโลกชนิดหนึ่ง สามารถถลุงได้จากหินและทราย เรานิยมใช้ธาตุซิลิคอนในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้ทำทรานซิสเตอร์และไอซีและเซลล์แสงอาทิตย์ เทคโนโลยี c-Si ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย นิยมใช้งานในพื้นที่เฉพาะ ได้แก่ ในชนบท หมู่บ้าน สวน ไร่ นา ที่ไม่มีไฟฟ้าใช้เป็นหลัก

แสงอาทิตย์ชนิดผลึกกลุ่มที่ 2 ชนิดผลึกรวมซิลิคอน (poly crystalline silicon solar cell) มีลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลีได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาต้นทุนสูงของแบบผลึกเดี่ยวซิลิคอนแบบผลึกโพลีหรือโพลีซิลิคอน ก็คือก้อนซิลิคอน

ที่เกิดจากการรวมตัวกันของชิ้นเล็กๆ (ขนาดระดับไมโครเมตร - มิลลิเมตร) ของผลึกเดี่ยวของซิลิคอน

ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากผลึกซิลิคอนทั้งแบบผลึกเดี่ยวและแบบผลึกรวม จะมีโครงสร้างประกอบด้วยส่วนต่างๆ 4 ส่วนหลัก (ภาพที่ 2.2)



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน

ที่มา : <http://www.dupont.com>

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากผลึกซิลิคอนทั้งแบบผลึกเดี่ยวและแบบผลึกรวม มีโครงสร้างและส่วนประกอบด้วย

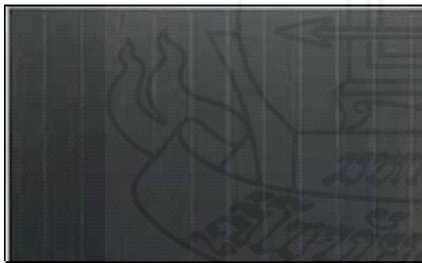
- 1) ส่วนคลุมด้านหน้า (front cover) หรือฝาครอบกระจก ซึ่งเป็นวัสดุโปร่งแสง โดยทั่วไปจะเป็นกระจกและอาจมีบางรุ่นที่เป็นพลาสติก
- 2) ส่วนห่อหุ้มเพื่อป้องกันความชื้น (encapsulate) โดยทั่วไปจะใช้วัสดุ Ethylene - vinyl acetate (EVA) หรือ Polyvinyl butyryl (PVB)
- 3) ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ (silicon solar cells) และ โลหะนำไฟฟ้า (ribbon)
- 4) ส่วนคลุมด้านหลัง (back cover) โดยทั่วไปจะใช้วัสดุ Polyvinyl fluoride หรือเรียกว่า Tedlar หรือใช้กระจกในบางโครงสร้าง

หลังจากนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการ Laminate แล้วก็จะถูกนำไปติดตั้งกรอบนอก (frame) เพื่อความแข็งแรงและใช้สำหรับยึดกับโครงสร้างที่จะใช้ติดตั้ง ซึ่งวัสดุที่

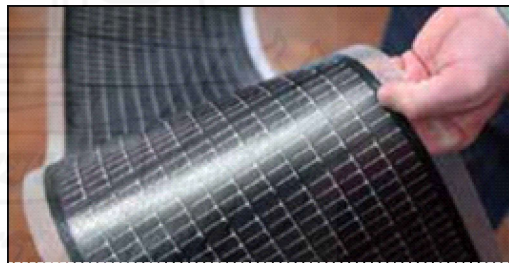
นิยมใช้คืออลูมิเนียม นอกจากนี้แล้วยังมีส่วนของกล่องสำหรับต่อขั้วไฟฟ้า (junction-box) ซึ่งภายในจะมีขั้วสำหรับยึดสกรูและมีการติดตั้งบายพาสไดโอด (bypass diode) อีกด้วย

1.1.2 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม เซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้ถูกออกแบบพัฒนาเพื่อให้สามารถประกอบและใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม กลุ่มที่ 1 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous silicon solar cell; a-Si) หรืออีกชื่อคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนอสัญฐานมีลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมโครเมตร (0.0005 มิลลิเมตร) นานักเบามาก และประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 5-10 ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมโครเมตร (0.0005 มิลลิเมตร) นานักเบามาก และประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 5-10 เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ธาตุซิลิคอนเช่นกัน แต่จะไม่เป็นผลึก แต่ผลของสารอะมอร์ฟัสจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางของซิลิคอน ซึ่งมีความบางประมาณ 300 นาโนเมตร ทำให้ไม่สิ้นเปลืองเนื้อวัสดุ ราคาถูก นานักเบา การผลิตทำได้ง่าย และข้อดีของ a-Si ไม่เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม จึงเหมาะที่จะประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่กินไฟฟ้าน้อย เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ วิทยุทรานซิสเตอร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนยังมีปัญหาในด้านการเสื่อมสภาพของชั้นดูดกลืนแสง (degradation) ส่งผลให้แนวโน้มการผลิตลดจนการนำมาใช้งานยังน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น ตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (ภาพที่ 2.3)



ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน



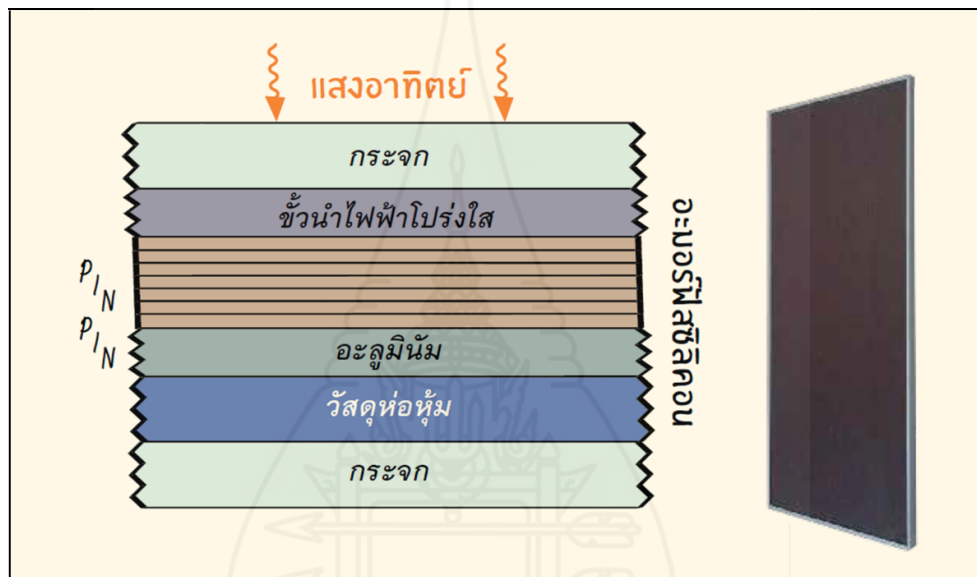
ลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si

ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน

ที่มา : <http://hq.prd.go.th>; <http://www.mysolargenerator.info>

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนถูกสร้างบนวัสดุฐานรองขนาดใหญ่โดยเคลือบสารหรือฟิล์มบนวัสดุ (transparent conductive oxide : TCO) ทำให้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการผลิตจะต้องทำการตัดแบ่งเซลล์ออกเป็นเซลล์เล็กๆ ที่เท่ากันด้วยแสงเลเซอร์ ซึ่งจะใช้เทคนิคในการเลือกความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต่างกันเพื่อตัดวัสดุที่แตกต่างกันก่อนนำมา

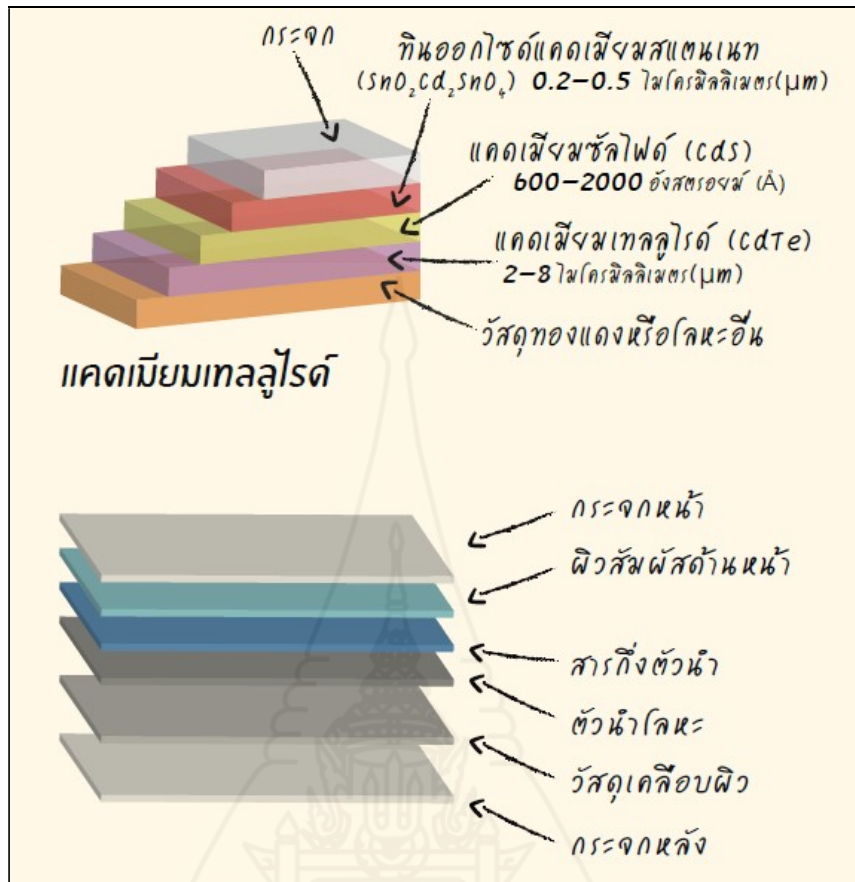
ต่อเข้าด้วยกันด้วยขั้วโลหะเพื่อนำไปสู่กระบวนการประกอบแผงเซลล์ต่อไปภายหลังจากสิ้นสุดกระบวนการตัดด้วยแสงเลเซอร์และทำการต่อวงจรด้วยโลหะแล้วแผงเซลล์จะถูกนำไปเคลือบ ซึ่งโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนจะมีเพียงส่วนที่เป็น EVA และแผ่นกระจกปิดทับด้านหลังเท่านั้น อย่างไรก็ตามในการนำไปติดตั้งใช้งานนั้นอาจมีการเสริมกรอบอลูมิเนียมเพื่อเสริมความแข็งแรงและใช้เป็นจุดยึดแผงกับโครงสร้างติดตั้งลักษณะ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบางซิลิคอน (ภาพที่ 2.4)



ภาพที่ 2.4 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน
ที่มา : <http://ywang13.myweb.usf.edu>

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง กลุ่มที่ 2 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ (cadmium telluride; CdTe)

เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานในปัจจุบันอีกชนิดหนึ่ง คือ ชนิดฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ (cadmium telluride : CdTe) เนื่องจากประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 15) ซึ่งการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdTe นี้ จะมีโครงสร้าง วัสดุที่ใช้ ตลอดจนขั้นตอนการผลิตที่ใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน จะแตกต่างกันในส่วนองวัสดุของเซลล์และสารที่ใช้เคลือบ โดย โครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ (ภาพที่ 2.5)



ภาพที่ 2.5 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์

ที่มา : National Renewable Energy Laboratory, NREL: Photovoltaics Research - Polycrystalline Thin-Film Materials and Devices R and D. webpage, October 2011 <http://www.firstsolar.com>

ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe จะมีการสร้างขั้ว P-N แล้วผ่านกระบวนการเคลือบสารต่างๆ และประกอบเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์เช่นเดียวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน แต่ละชั้นของวัสดุและโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe มีหน้าที่แตกต่างกันดังนี้

1. กระจกนำไฟฟ้าด้านหน้า ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของแผงเซลล์ โดยกระจกชนิดนี้จะเคลือบด้วยขั้วโลหะนำไฟฟ้าทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาจ่ายโหลด โดยขั้วโลหะนำไฟฟ้าที่นิยมใช้คือ ทินออกไซด์แคดเมียมสแตนนิก ($\text{SnO}_2\text{Cd}_2\text{SnO}_4$)

2. ชั้นบัฟเฟอร์ (buffer-layer) เป็นชั้นที่ถูกสร้างทับชั้นกระจกโดยวัสดุที่ใช้คือ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เพื่อให้เป็นชั้น n โดยความหนาที่ใช้จะอยู่ในช่วง 60-200 นาโนเมตร (nm)
3. ชั้นดูดกลืนแสง (absorber-layer) จะถูกสร้างทับชั้นบัฟเฟอร์ด้วยวัสดุชนิดฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) ที่ความหนาประมาณ 2-8 ไมโครเมตร (μm)
4. ขั้วโลหะด้านหลัง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น โลหะทองแดง (copper; Cu) จะถูกสร้างเป็นชั้นสุดท้ายเพื่อเป็นขั้วต่อไฟฟ้าด้านหลัง

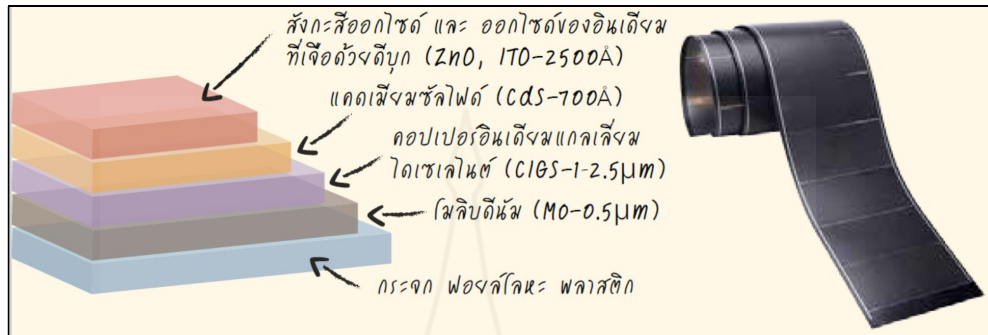
ปัจจุบันผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe มีอยู่เพียงไม่กี่ราย เนื่องจากความนิยมในการใช้งานน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน แม้ว่าประสิทธิภาพจะสูงกว่าก็ตาม แต่เพราะยังมีความกังวลเรื่องสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นจากสารแคดเมียมที่เป็นโลหะหนักอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งปัจจุบันเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นเรื่องสำคัญที่ทั่วโลกต่างให้ความสนใจ รวมถึงประเทศไทยที่มีการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังไม่แพร่หลายนัก

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง กลุ่มที่ 3 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดเซเลไนด์ (copper indium gallium di selenide: CIGS)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดเซเลไนด์ ถือเป็นเซลล์แสงอาทิตย์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งได้รับการพัฒนาประสิทธิภาพตลอดจนมีส่วนแบ่งการตลาดที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จัดอยู่ในประเภทฟิล์มบางมีลักษณะ โครงสร้างคล้ายกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์จะแตกต่างกันในส่วนของสารเคมีที่ใช้ สำหรับโครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1. กระจกนำไฟฟ้าด้านหลังทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของแผงเซลล์โดยกระจกชนิดนี้จะเคลือบด้วยขั้วโลหะนำไฟฟ้าทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาจ่ายโหลดโดยขั้วโลหะนำไฟฟ้าที่ใช้ คือ สังกะสีออกไซด์ (ZnO) และ ออกไซด์ของอินเดียมที่เจือด้วยดีบุก (ITO)
2. ชั้นบัฟเฟอร์ (buffer-layer) เป็นชั้นที่ถูกสร้างทับชั้นกระจกโดยวัสดุที่ใช้คือ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เพื่อให้เป็นชั้น n โดยความหนาที่ใช้จะอยู่ในช่วง 700 นาโนเมตร (nm)
3. ชั้นดูดกลืนแสง (absorber-layer) จะถูกสร้างทับชั้นบัฟเฟอร์ด้วยวัสดุ CIGS ที่ความหนาประมาณ 1-2.5 ไมโครเมตร (μm)
4. กระจกเคลือบขั้วโลหะโมลิบดีนัม (Mo) ลักษณะโครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดเซเลไนด์

ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไคเซเลไนด์ (copper indium gallium di selenide: CIGS) (ภาพที่ 2.6)

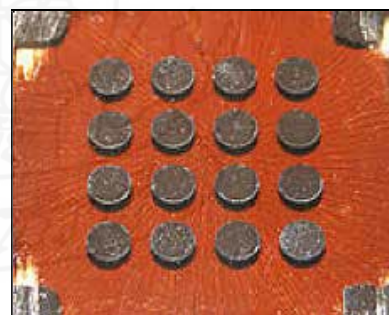


ภาพที่ 2.6 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไคเซเลไนด์ ที่มา : www.solarmade.com

1.1.3 เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ฟิล์มบาง เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (dye-sensitized solar cells) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอต (quantum dot solar cells) เป็นต้น อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่พัฒนาใหม่นี้ยังไม่มีการผลิต และจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ จึงยังไม่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ฟิล์มบาง (ภาพที่ 2.7)



ชนิดสีย้อมไวแสง



ชนิดควอนตัมดอต

ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ฟิล์มบาง

ที่มา : assets.inhabitat.com; <https://th.wikipedia.org>

1.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

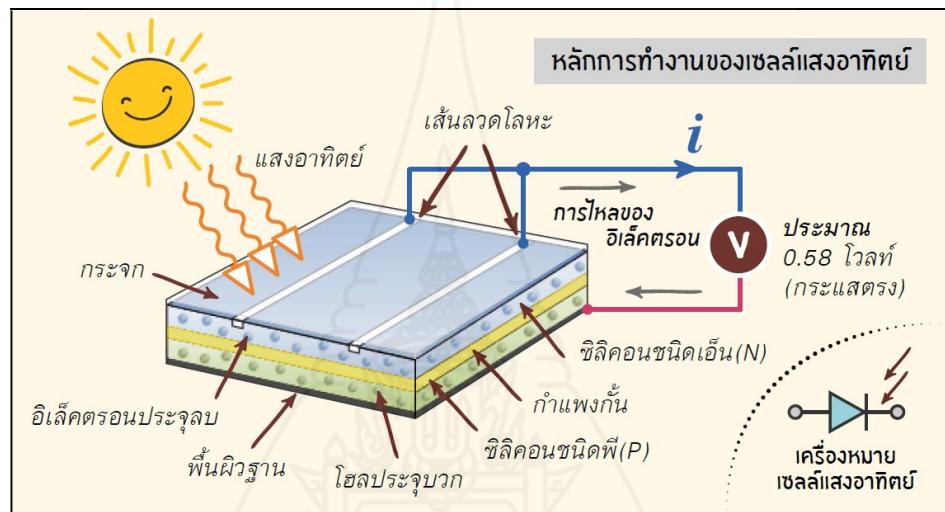
หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าที่มีประจุลบและไฟฟ้าประจุบวกขึ้น คือ อิเล็กตรอนและ โฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็น (PN) จะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก ที่ฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ถ้าต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลเวียนขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว จะให้กระแสไฟฟ้าประมาณ 2-3 แอมแปร์ และให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดประมาณ 0.6 โวลต์

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีไม่มากนัก ถ้าจะให้ได้กำลังไฟฟ้ามักเพียงพอสำหรับใช้งาน จึงมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ เซลล์มาต่อกันเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (solar modules) ลักษณะการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่ว่าต้องการกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าถ้ามีการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน ก็จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าแอมป์เพิ่มมากขึ้น ถ้ามีการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมก็จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าโวลต์สูงขึ้น

เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและบวกขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอนและ โฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอน ไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก (ปกติที่ฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น

ปัจจุบันโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย ทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก จะมีการเลือกเทคโนโลยีในการติดตั้งแผงเซลล์อาทิตย์ที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงินลงทุนของแต่ละบริษัท ที่นิยมใช้กันอยู่เวลานี้จะมีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ การติดตั้งแบบคงที่ (fixed system) ซึ่งเป็นการติดตั้งแบบระบุตำแหน่งชัดเจน โดยใช้การคำนวณจากข้อมูลเฉลี่ยของระดับความเข้มของแสงในแต่ละพื้นที่ เพื่อกำหนดองศาของการติดตั้งแผงเพื่อรับแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด และการติดตั้งแบบหมุนตามดวงอาทิตย์ (tracking system) อย่างไรก็ตาม การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอยู่กับที่นี้ ทำให้ได้รับค่าพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้ดีเพียงบางช่วงเวลาหรือประมาณ 5 - 6 ชั่วโมงต่อวัน เนื่องจากดวงอาทิตย์มีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาจาก ทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันตก แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ จะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ได้เต็มที่ในเวลาเที่ยง

วันเท่านั้น จึงทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เต็มศักยภาพเท่าที่ควร แต่ข้อดีของการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้จะมีต้นทุนในการติดตั้งไม่สูงมากนัก และการดูแลรักษาง่ายนอกจากการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบคงที่ (fixed system) ซึ่งโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ในประเทศไทยนิยมใช้กันแล้ว ยังมีเทคโนโลยีที่ช่วยให้การผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นด้วย นั่นคือ การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามดวงอาทิตย์ (tracking system) หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ (ภาพที่ 2.8)



ภาพที่ 2.8 หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา : <http://www.electronics-tutorials.ws/diode/bypass-diodes.html>

หลักการทำงานของการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามดวงอาทิตย์นี้เป็นการติดตั้งที่ให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหมุนตามดวงอาทิตย์ เพื่อรับความเข้มของแสงได้สูงสุดตลอดวัน โดยการหมุนจะถูกควบคุมด้วยระบบเซ็นเซอร์หรือการตั้งเวลา เพื่อควบคุมตำแหน่งของแผงให้หมุนไปตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ตามช่วงเวลาระหว่างวัน ซึ่งจะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เก็บพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นั่นคือ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบคงที่ประมาณร้อยละ 20

1.3 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

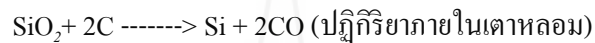
วัสดุสำคัญที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบันได้แก่ สารซิลิคอน (Si) ซึ่งเป็นสารชนิดเดียวกับที่ใช้ทำชิพในคอมพิวเตอร์และเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ ซิลิคอนเป็นสารซึ่งไม่เป็นพิษ มีการนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะมีราคาถูก คงทน และ

เชื่อถือได้ นอกจากนี้ยังมีวัสดุชนิดอื่นที่สามารถนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ CIS และ แคดเมียมเทลลูไรด์ แต่ยังมีราคาสูง และบางชนิดยังไม่มีการพิสูจน์เรื่องอายุการใช้งานว่าสามารถใช้งานได้ยาวนาน

ข้อเสียของสารซิลิคอน (Si) คือ การทำให้บริสุทธิ์และอยู่ในรูปสารที่พร้อมใช้งาน มีราคาแพง และ แรกหักง่ายในกระบวนการผลิต

ขั้นตอนการผลิตสารซิลิคอนบริสุทธิ์

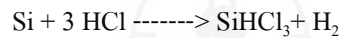
1) การผลิต MG-Si จากหินควอทซ์หรือทราย



ความบริสุทธิ์ของ Si ร้อยละ 98 - 99

2) การผลิต SeG-Si จาก MG-Si

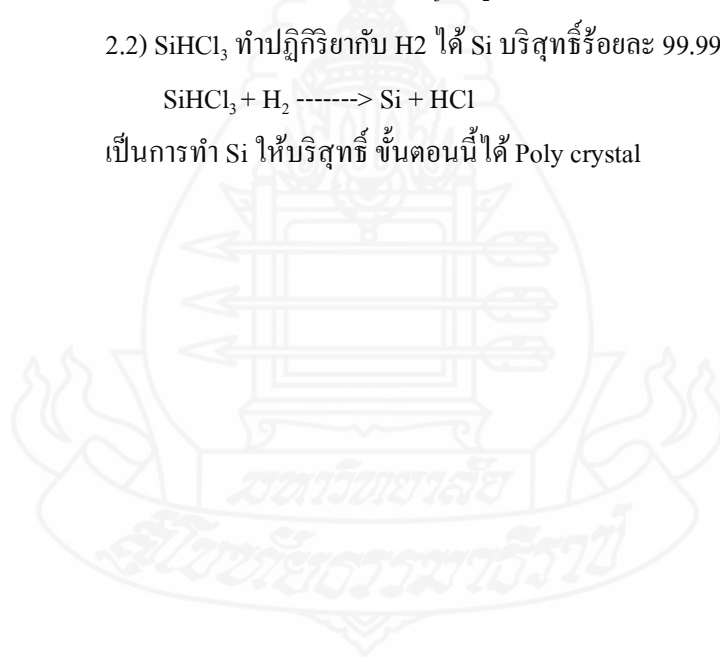
2.1) เปลี่ยนสถานะ Si เป็นแก๊ส โดยวิธี Fractional distillation



2.2) SiHCl_3 ทำปฏิกิริยากับ H_2 ได้ Si บริสุทธิ์ร้อยละ 99.99

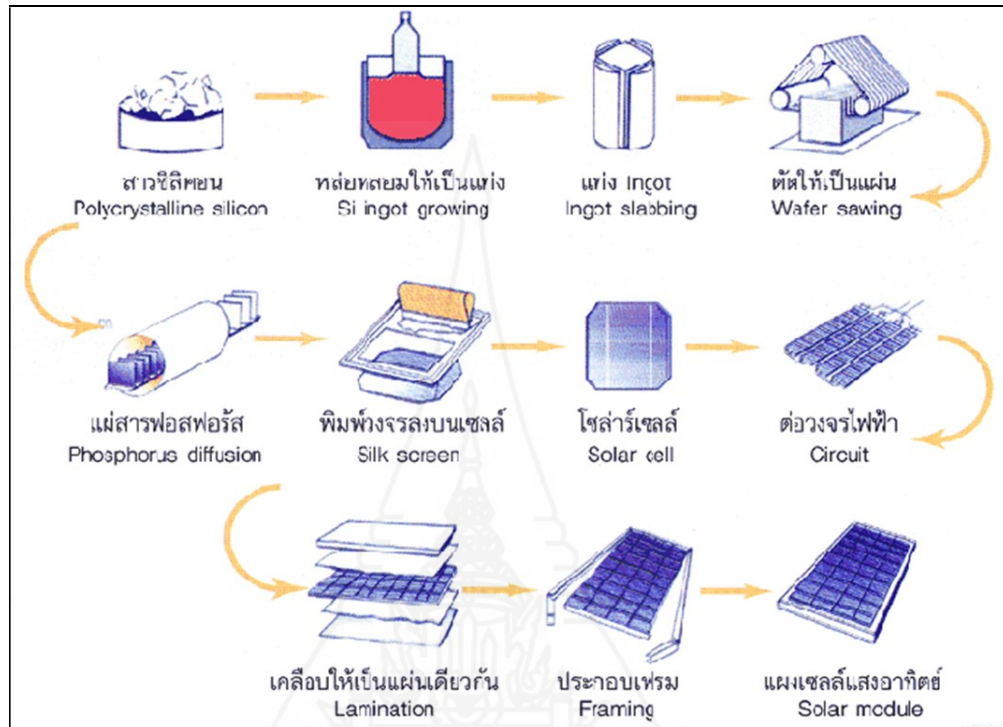


เป็นการทำ Si ให้บริสุทธิ์ ขั้นตอนนี้ได้ Poly crystal



1.3.1 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว (single crystalline)

กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว (single crystalline) (ภาพที่ 2.9)



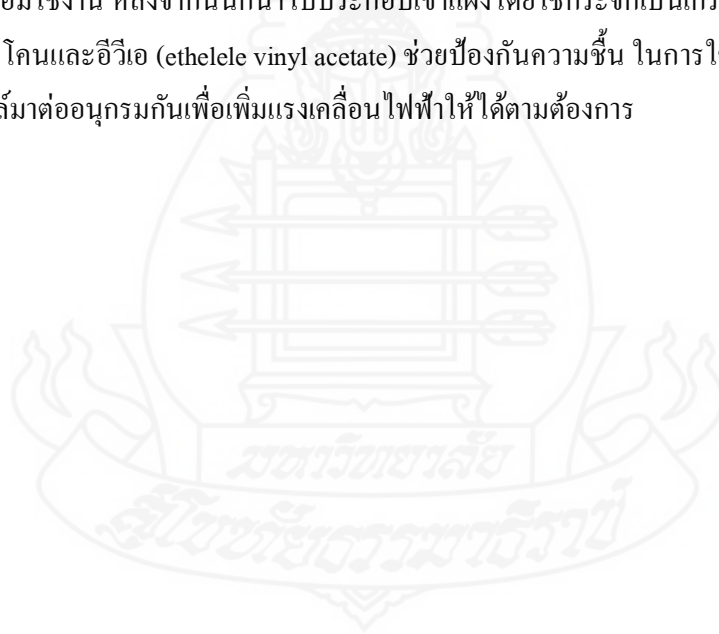
ภาพที่ 2.9 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว

ที่มา : <http://www2.egat.co.th/re/solarcell/solarcell.html>

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว (single crystalline) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Mono-crystalline มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

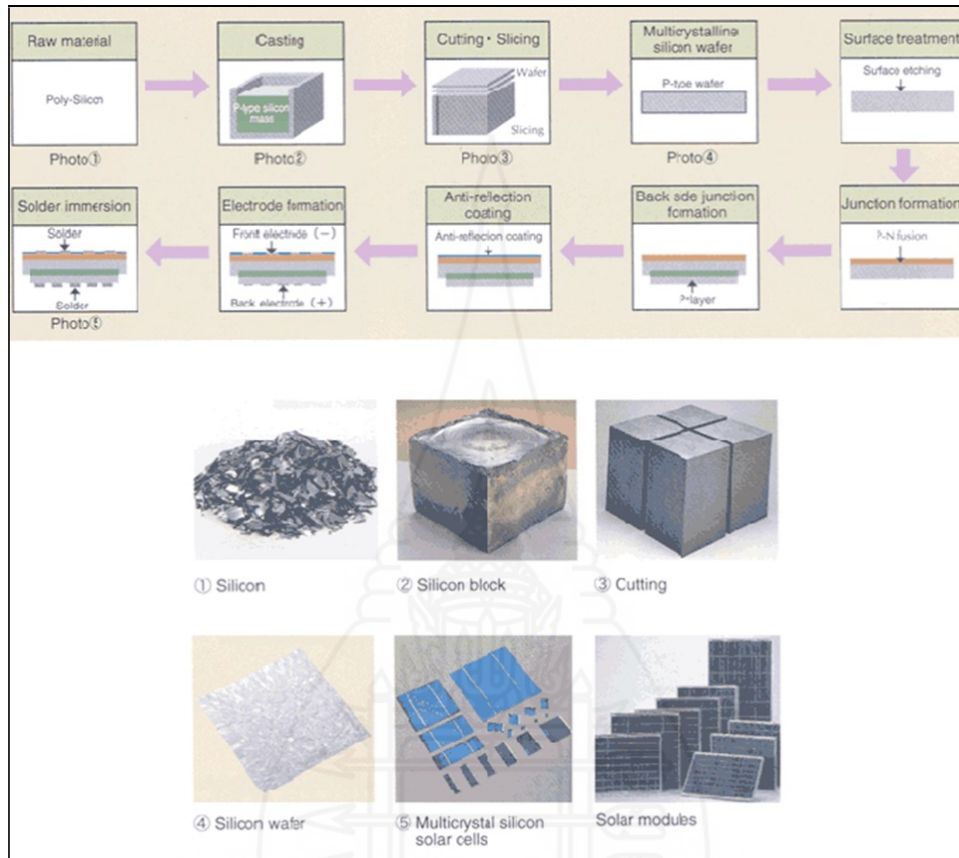
1. นำซิลิคอนที่ถลุงได้มาหลอมเป็นของเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1400 องศาเซลเซียส แล้วดึงผลึกออกจากของเหลว โดยลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ จนได้แท่งผลึกซิลิคอนเป็นของแข็ง แล้วนำมาตัดเป็นแว่นๆ
2. นำผลึกซิลิคอนที่เป็นแว่น มาแพร่ซึมด้วยสารเจือปนต่างๆ เพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็นภายในเตาแพร่ซึมที่มีอุณหภูมิประมาณ 900-1000 องศาเซลเซียส แล้วนำไปทำชั้นด้านการสะท้อนแสงด้วยเตาออกซิเดชันที่มีอุณหภูมิสูง
3. ทำขั้วไฟฟ้าสองด้านด้วยการฉาบไอโลหะภายใต้สุญญากาศ เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วจะต้องนำไปทดสอบประสิทธิภาพด้วยแสงอาทิตย์เทียม และวัดหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

การเตรียมสารซิลิคอนชนิดนี้ เริ่มต้นจากนำสารซิลิคอนซึ่งผ่านการทำให้เป็นก้อนที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก (ร้อยละ 99.99) มาหลอมละลายในเตาเหนี่ยวนำ (induction furnace) ที่อุณหภูมิสูงถึง 1400-1500 องศาเซลเซียส เพื่อทำการสร้างแท่งผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6-8 นิ้ว) พร้อมกับใส่สารเจือปน โบรอน (boron, B) เพื่อทำให้เกิด P-type แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวจับตัวกันเป็นผลึกด้วย Seed ซึ่งจะตกผลึกมีขนาดหน้าตัดใหญ่ แล้วค่อยๆ ดึงแท่งผลึกนี้ขึ้นจากเตาหลอม ด้วยเทคโนโลยีการดึงผลึก จะได้แท่งผลึกยาวเป็นรูปทรงกระบอก คุณภาพของผลึกเดี่ยวจะสำคัญมากต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำแท่งผลึกมาตัดให้เป็นแผ่นบางๆ ด้วยลวดตัดเพชร (wire cut) เรียกว่า เวเฟอร์ (wafer) ซึ่งจะได้แผ่นผลึกมีความหนาประมาณ 300 ไมโครเมตร และจัดความเรียบของผิว จากนั้นก็จะนำไปเจือสารที่จำเป็นในการทำให้เกิดเป็น p-n junction ขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์ ด้วยวิธีการ Diffusion ที่อุณหภูมิระดับ 900-1000 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทำขั้วไฟฟ้าเพื่อนำกระแสไฟออกใช้ ที่ผิวบนจะเป็นขั้วลบ ส่วนผิวล่างเป็นขั้วบวก ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการเคลือบฟิล์มผิวหน้าเพื่อป้องกันการสะท้อนแสงให้น้อยที่สุด ตอนนี้จะได้เซลล์ที่พร้อมใช้งาน หลังจากนั้นก็นำไปประกอบเข้าแผงโดยใช้กระจกเป็นเกราะป้องกันแผ่นเซลล์ และใช้ซิลิโคนและอีวีเอ (ethylele vinyl acetate) ช่วยป้องกันความชื้น ในการใช้งานจริงจะนำเซลล์แต่ละเซลล์มาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้ได้ตามต้องการ



1.3.2 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกรวม (poly crystalline)

กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกรวม (poly crystalline) (ภาพที่ 2.10)



ภาพที่ 2.10 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกรวม

ที่มา : <http://www2.egat.co.th/re/solarcell/solarcell.html>

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกรวม (poly crystalline) มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1. นำซิลิคอนที่ถลุงและหลอมละลายเป็นของเหลวแล้ว นำมาเทลงในแบบพิมพ์ เมื่อซิลิคอนแข็งตัว จะได้เป็นแท่งซิลิคอนเป็นแบบผลึกรวม แล้วนำมาตัดเป็นแผ่นๆ
2. จากนั้นนำมาแพร่ซึมด้วยสารเจือปนต่างๆ และทำขั้วไฟฟ้าสองด้านด้วยวิธีการเช่นเดียวกับที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธีนี้ จะมีค่าใช้จ่ายที่ถูกลงกว่าวิธีแรก คือการทำแผ่นเซลล์ จะใช้วิธีการหลอมสารซิลิคอนให้ละลายพร้อมกับใส่สารเจือปน โบรอน (boron, B) เพื่อทำให้เกิด P-type แล้วเทลงในแบบพิมพ์ เมื่อสารละลายซิลิคอนแข็งตัวก็จะได้เป็นแท่งซิลิคอนแบบผลึก

รวม (ตกผลึกไม่พร้อมกัน) จากนั้นนำไปตัดเป็นแผ่นเช่นเดียวกับแบบผลึกเดี่ยว ความแตกต่างระหว่างแบบผลึกเดี่ยวและแบบผลึกรวมสังเกตได้จากผิวผลึก ถ้ามีโทโนลีที่แตกต่างกันซึ่งเกิดจากผลึกเล็กๆ หลายผลึกในแผ่นเซลล์จะเป็นแบบผลึกรวม ในขณะที่แบบผลึกเดี่ยวจะเห็นเป็นผลึกเนื้อเดี่ยว คือ มีสีเดี่ยวตลอดทั้งแผ่น ส่วนกรรมวิธีการผลิตเซลล์ที่เหลือจะเหมือนกัน เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวม (poly crystalline) จะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบผลึกเดี่ยว ประมาณร้อยละ 2-3 อย่างไรก็ตามเซลล์ทั้ง 2 ชนิด มีข้อเสียในการผลิตคือ แดกหักง่ายเช่นกัน

1.3.3 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง อะมอร์ฟัส ซิลิคอน (amorphous silicon solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง อะมอร์ฟัส ซิลิคอน (amorphous silicon solar cell) มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

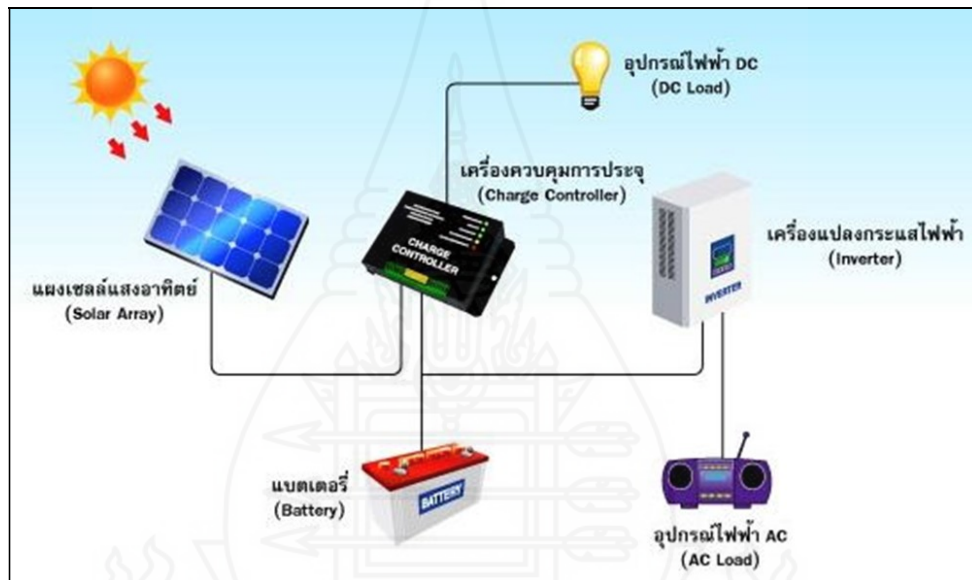
1. ทำการแยกสลายก๊าซซิลิโคน (silone gas) ให้เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่อง Plasma CVD (chemical vapor deposition) เป็นการผ่านก๊าซซิลิโคนเข้าไปในส่วนกรอบแก้วที่มีขั้วไฟฟ้าความถี่สูง จะทำให้ก๊าซแยกสลายเกิดเป็นพลาสมา และอะตอมของซิลิคอนจะตกลงบนฐานหรือสแตนเลสสตีลที่วางอยู่ในส่วนกรอบแก้ว เกิดเป็นฟิล์มบางขนาดไม่เกิน 1 ไมโครเมตร (0.001 มิลลิเมตร)
2. ขณะที่แยกสลายก๊าซซิลิโคน จะผสมก๊าซฟอสฟีนและโคโบเรนเข้าไปเป็นสารเจือปน เพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็นสำหรับใช้เป็น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์
3. การทำขั้วไฟฟ้า มักใช้ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่ทำจาก ITO (indium tin oxide)

1.3.4 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดที่ทำจากแกเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium arsenide: GaAs) เซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดที่ทำจากแกเลียม อาร์เซไนด์ มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1. ขั้นตอนการปลูกชั้นผลึก ใช้เครื่องมือ คือ เตาปลูกชั้นผลึกจากสถานะของเหลว (LPE; liquid phase epitaxy)
2. ขั้นตอนการปลูกชั้นผลึกที่เป็นรอยต่อเอ็นพี ใช้เครื่องมือ คือ เครื่องปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุล (MBE; molecular beam epitaxy)

1.4 ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 3 ระบบ ดังนี้

1.4.1 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV stand-alone system) เซลล์แสงอาทิตย์ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบจ่ายโหลดโดยตรง หรือแบบอิสระทำงานร่วมกับแบตเตอรี่ เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า นิยมนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ภาคครัวเรือน (rooftop) โดยนำกระแสไฟฟ้าไปใช้ได้เฉพาะกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง หากต้องการนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับหรือเก็บสะสมพลังงานไว้ใช้ต่อไป จะต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ อีก โดยรวมเข้าเป็นระบบที่ผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (ภาพที่ 2.11) อุปกรณ์สำคัญๆ มีดังนี้



ภาพที่ 2.11 ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายในครัวเรือน

ที่มา: <https://energyresearch.ucf.edu/consumer/solar-technologies/solar-electricity-basics/types-of-pv-systems/> คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทน

1.1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (solar module) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและมีหน่วยเป็นวัตต์ (watt) มีการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ เซลล์มาต่อกันเป็นแถวหรือเป็นชุด (solar array) เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าใช้งานตามที่ต้องการ โดยการต่อกันแบบอนุกรม จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และการต่อกันแบบขนาน จะเพิ่มพลังงานไฟฟ้า หากสถานที่ตั้งทางภูมิศาสตร์แตกต่างกัน ก็จะมีผลให้ปริมาณของค่าเฉลี่ยพลังงานสูงสุดในหนึ่งวันไม่เท่ากันด้วย รวมถึงอุณหภูมิก็มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า หากอุณหภูมิสูงขึ้น การผลิตพลังงานไฟฟ้าจะลดลง

1.2) เครื่องควบคุมการประจุ (charge controller) ทำหน้าที่ประจุกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่แบตเตอรี่ และควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าให้มีปริมาณเหมาะสมกับแบตเตอรี่ เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ รวมถึงการจ่ายกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ด้วย ดังนั้น การทำงานของเครื่องควบคุมการประจุ คือ เมื่อประจุกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่จนเต็มแล้ว จะหยุดหรือลดการประจุกระแสไฟฟ้า (และมักจะมีคุณสมบัติในการตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า กรณีแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงด้วย) ระบบพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าในกรณีที่มีการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่เท่านั้น

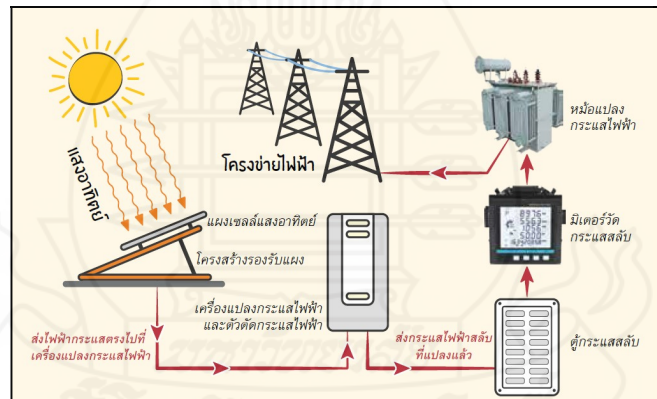
1.3) แบตเตอรี่ (battery) ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ใช้เวลาที่ต้องการ เช่น เวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เวลากลางคืน หรือนำไปประยุกต์ใช้งานอื่นๆ แบตเตอรี่มีหลายชนิดและหลายขนาดให้เลือกใช้งานตามความเหมาะสม

1.4) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (inverter) ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าจากกระแสตรง (DC) ที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อให้สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ Sine wave inverter ใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับทุกชนิด และ Modified sine wave inverter ใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่มีส่วนประกอบของมอเตอร์และหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เป็น Electronic ballast โดยจะรับกระแสไฟฟ้าตรงไม่ว่าจากการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือไฟฟ้าตรงจากแบตเตอรี่ก็ตาม หลังจากนั้นกระแสก็จะผ่านวงจรไฟฟ้าภายในตัวอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ซึ่งจะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันให้สลับกันไปมาระหว่างความต่างศักย์ที่เป็นบวกและลบจนได้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่เป็นไฟกระแสสลับ โดยมีความถี่ 50-60 เฮิรตซ์ (Hz) 220 หรือ 380 โวลต์ (V) สำหรับใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ในบ้าน ในระบบที่มีขนาดเล็ก ผู้ผลิตอาจจะรวมวงจรอินเวอร์เตอร์เข้าเป็นชุดเดียวกับวงจรควบคุมการประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ (charger and inverter)

1.5) ระบบป้องกันฟ้าผ่า (lightning protection) ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายที่เกิดกับอุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อฟ้าผ่า หรือเกิดการเหนี่ยวนำทำให้ความต่างศักย์สูง ในระบบทั่วไปมักไม่ใช้อุปกรณ์นี้ จะใช้สำหรับระบบขนาดใหญ่และมีความสำคัญเท่านั้น รวมถึงต้องมีระบบสายดินที่มีประสิทธิภาพด้วย

1.4.2 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (PV grid connected system) ระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับโรงงานผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ อุปกรณ์ของระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งนำมาต่อให้ได้แรงดันตามความต้องการของอินเวอร์เตอร์ โดยต่อผ่านกล่องต่อสายและเบรกเกอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและ

กำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการใช้งานของโหลด ซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรงโดยการต่อกับโหลดไฟฟ้ากระแสตรง หรือแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถนำไปใช้กับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับและในขณะเดียวกัน ก็สามารถต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ผ่านสวิตช์ตัดตอนและมิเตอร์กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมืองแบบเชื่อมต่อสายส่ง หรือพื้นที่ที่มีระบบโครงข่ายไฟฟ้าเข้าถึง จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง แล้วผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนกระแสตรงให้กลายเป็นกระแสสลับ จากนั้นกระแสสลับจะผ่านระบบป้องกันและมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า และผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเพิ่มแรงดันให้เข้ากับระบบสายส่ง หม้อแปลงไฟฟ้า (transformer) เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าแรงต่ำและระบบไฟฟ้าแรงสูง โดยมีความจำเป็นคือกระแสไฟฟ้าตรงที่ออกจากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะต้องไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นตามแรงดันของโครงข่าย เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าได้ ภาพรวมระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (ภาพที่ 2.12)



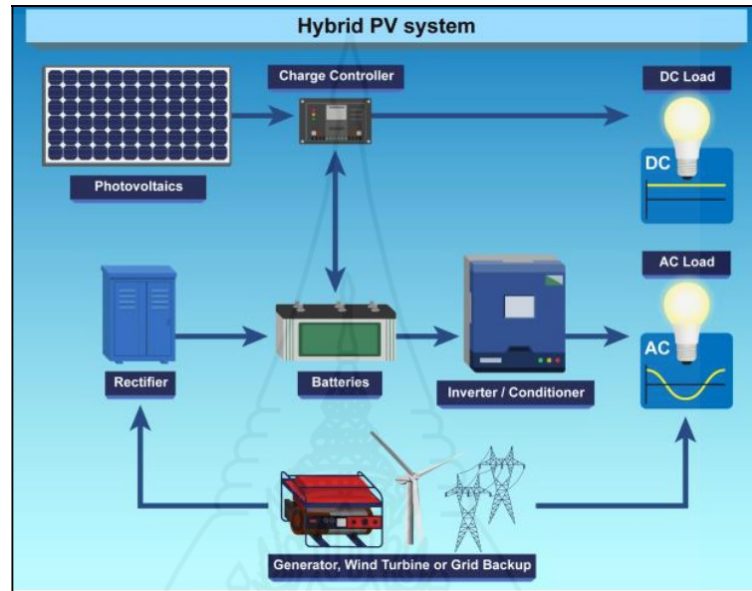
ภาพที่ 2.12 ภาพรวมกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงงานพลังงานแสงอาทิตย์

ที่มา: <https://energyresearch.ucf.edu/consumer/solar-technologies/solar-electricity-basics/types-of-pv-systems/> คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทน

1.4.3 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV hybrid system)

ระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบพัฒนาให้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานได้หลายรูปแบบ และสามารถผลิตไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ ได้ อุปกรณ์ของระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งนำมาต่อให้ได้แรงดันตามความต้องการของอุปกรณ์แปลงผันพลังงาน แบบ

ผสมผสาน (hybride inverter) (ภาพที่ 2.13) โดยสามารถใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอื่นๆ ได้ เช่น เครื่องผลิตไฟฟ้าพลังงานกล กังหันลมผลิตไฟฟ้า กังหันน้ำผลิตไฟฟ้า เป็นต้น โดยไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้สามารถนำไปใช้กับโวลต์ไฟฟ้ากระแสสลับ 230 Vac และในขณะเดียวกันก็สามารถต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าได้อีกด้วย



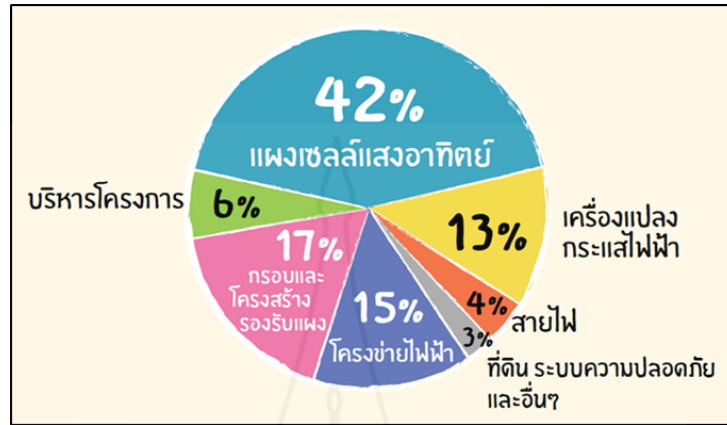
ภาพที่ 2.13 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

ที่มา: <https://energyresearch.ucf.edu/consumer/solar-technologies/solar-electricity-basics/types-of-pv-systems/> คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทน

1.5 ของเสียที่เกิดจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module) โครงสร้างรองรับแผง (mounting) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (inverter) และหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer) โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง แล้วผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนกระแสตรงให้กลายเป็นกระแสสลับ จากนั้นกระแสสลับจะผ่านระบบป้องกันและมีเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า และผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเพิ่มแรงดันให้เข้ากับระบบสายส่ง หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าแรงต่ำและระบบไฟฟ้าแรงสูง โดยมีความจำเป็นคือกระแสไฟฟ้าตรงที่ออกจากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะต้องไหลมาผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นตามแรงดันของโครงข่าย เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าได้ และเมื่อ

พิจารณาสัดส่วนของอุปกรณ์ตามมูลค่าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วไปแสดงเป็นสัดส่วนมูลค่ารวมของอุปกรณ์หลักในการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (ภาพที่ 2.14)



ภาพที่ 2.14 สัดส่วนมูลค่ารวมของอุปกรณ์หลักใน โครงการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์
ที่มา : PV Cycle study, 2007

เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอุปกรณ์ต่างๆถูกนำมาใช้ในปริมาณมากเพื่อการผลิตไฟฟ้า ทำให้มีแนวโน้มของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอุปกรณ์ต่างๆจะกลายเป็นขยะปริมาณมากในอนาคต หากเทียบกับอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้า และอายุการใช้งานของอุปกรณ์หลัก โรงงานผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (อ้างอิงตามระยะเวลารับประกัน) (ตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 อายุใช้งานของอุปกรณ์หลักในระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์

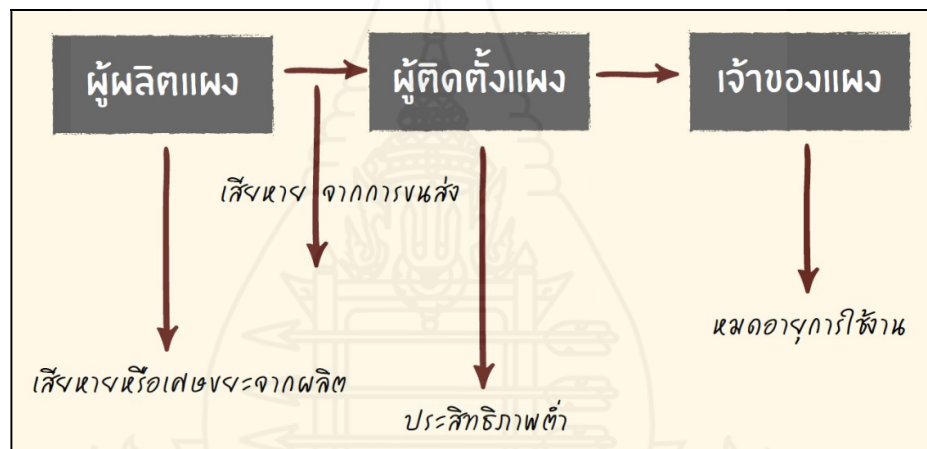
อุปกรณ์	อายุการรับประกัน (ปี)	อายุการใช้งาน (ปี)
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module)	25	>25
เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter)	5 - 10	10
โครงสร้างรองรับแผง (Mounting)	10	25
หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)	3 - 5	10
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น (Electronics devices)	2	5

ที่มา : PV Cycle study, 2007

ของเสียที่เกิดจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับสายส่ง ประกอบด้วย ขยะที่เกิดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า สายไฟฟ้า และ

เหล็กโครงสร้างรองรับแผง รวมทั้งฐานรากแบบเข็มปูนหรือหล่อปูน ซึ่งขยะแต่ละประเภทจะมีวิธีการกำจัดที่แตกต่างกันไป เช่น อินเวอร์เตอร์ หม้อแปลง ไฟฟ้า และสายไฟฟ้า จะถูกจัดการโดยกระบวนการกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ เหล็กโครงสร้างรองรับแผงจะถูกนำกลับเข้าสู่กระบวนการหลอมและกลับมาใช้ใหม่ ส่วนฐานรากแบบปูนสามารถที่จะถูกฝังกลบได้ภายในพื้นที่ คงเหลือเฉพาะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีรูปแบบการจัดการที่แน่นอน

ในกระบวนการการผลิตทุกๆ กระบวนการนั้นย่อมมีของเสียเกิดขึ้นไม่มากก็น้อย และในการผลิต แผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็เช่นกัน การผลิต การติดตั้งและการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้นั้นย่อมมีเศษเสี้ยวหรือเศษขยะที่ถูกปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการต่างๆ รวมถึงเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมดอายุการใช้งานด้วย ของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการมีดังนี้ (ภาพที่ 2.15)



ภาพที่ 2.15 แผงผังแสดงการเกิดของเสียในกระบวนการ

ที่มา : PV Cycle study, 2007

ซึ่งเมื่อพิจารณาตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลงไปรายละเอียดแล้ว พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันที่จะกลายเป็นขยะเมื่อมีการทิ้งออกมา ทั้งนี้ ส่วนประกอบนั้นขึ้นอยู่กับผู้ผลิตว่าใช้เทคโนโลยีในการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ หรือลดค่าใช้จ่ายอย่างไรบ้าง โดยแผงแสงอาทิตย์แต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ ซึ่งสามารถจำแนกองค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกและชนิดฟิล์มบาง (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ประเภท	ชนิดผลึก ซิลิคอน (crystalline silicon :C- Si)	ชนิดฟิล์มบาง ซิลิคอน (amorphous silicon solar cell : A-Si)	ชนิดแคดเมียม เทลลูไรด์ (cadmium telluride :CdTe)	ชนิดคอปเปอร์ อินเดียมแกเลียมได เซเลไนต์ (copper indium gallium di selenide: CIGS)
ส่วนประกอบ (ร้อยละโดยประมาณ)				
กระจก	80	85	96	81
กรอบอลูมิเนียม	10	10	<0.01	12
ซิลิคอน	3	<0.1		
วัสดุห่อหุ้ม (EVA)	6.5	5	3.5	6
วัสดุ Tedlar	0.12	<0.1	0.01	0.12
กาวเชื่อมประสาน	<0.1	<0.1	<0.01	<0.1
ทองแดง (copper)	0.6		1.0	0.85
ดีบุก				0.02
สังกะสี				0.03
ตะกั่ว			0.07	
แคดเมียม (cadmium)			0.07	
โลหะเงิน (silver)	<0.006		<0.01	

ที่มา : PV Cycle study, 2007

2. ปริมาณการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์และผลกระทบจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีเซลล์แสงอาทิตย์เป็นส่วนประกอบ และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างทวีคูณ ส่งผลให้เกิดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สะสมตามมามากมาย

2.1 ปริมาณการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อมูลจากคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน 2562 (กทพ.) ระบุว่า ปัจจุบันประเทศไทยกำลังการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในรูปแบบโรงไฟฟ้าและโซลาร์ฟาร์ม (solar

roof) อยู่ที่ประมาณ 2,000 เมกะวัตต์ กระจายตัวมากที่สุด ในภาคกลางร้อยละ 53 ตามมาด้วย ภาคเหนือร้อยละ 24 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือร้อยละ 21 และน้อยที่สุดคือภาคใต้ร้อยละ 2 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภท ซิลิคอนผลึก (c-Si) คือ ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันอยู่มากที่สุดร้อยละ 85 ส่วนที่เหลือคือชนิดฟิล์มบาง ซึ่งแบ่งได้เป็น ซิลิคอนอสัณฐาน (a-Si) ร้อยละ 12 ทองแดง-อินเดียม-แกเลียม-เทลลูไรด์ (CIGS/CIS) ร้อยละ 2 และแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) และอื่นๆ ร้อยละ 1

ตามที่กระทรวงพลังงานมีนโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมาตั้งแต่ปี 2532 ผ่านมาตรการต่างๆ ทำให้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมีสัดส่วนเพิ่มสูงขึ้นทุกปี โดยในปี 2550 มีสัดส่วนปริมาณไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่ผลิตได้รวมการผลิตไฟฟ้านอกกริด (including off grid power generation) ทั้งประเทศร้อยละ 4.3 และเพิ่มเป็นร้อยละ 9.87 ในปี 2557 (ไม่รวมพลังน้ำขนาดใหญ่) และจากเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนแต่ละประเภท เชื้อเพลิงตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580 ฉบับปรับปรุง ครั้งที่ 1 (PDP 2018 Rev.1) ได้ผ่านการอนุมัติจากที่ประชุมคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพข.) เมื่อวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2563 มีกำลังการผลิตไฟฟ้ารวมปี 2580 คงเดิมที่ 77,211 เมกะวัตต์ และยังคงเป้าหมายกำลังผลิตไฟฟ้าใหม่ไว้ตลอดแผน ที่ 56,431 เมกะวัตต์ แล้วยังคงเดินหน้าโครงการรับซื้อไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาที่อยู่อาศัย หรือ โครงการเซลล์แสงอาทิตย์ภาคประชาชนในปี 2563 ต่อไป สำหรับโครงการเซลล์แสงอาทิตย์ภาคประชาชน ได้เปิดโครงการนำร่องให้ภาคประชาชนที่สนใจติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อใช้เอง และส่วนเหลือจากใช้เองสามารถขายเข้าระบบในอัตรา 1.68 บาทต่อหน่วย โดยมีเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานงานแสงอาทิตย์ไว้ถึง 9,290 เมกะวัตต์

ร่วมกับทางภาครัฐได้มีมาตรการส่งเสริมให้ผู้ประกอบการลงทุนในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ อาทิ มาตรการส่วนเพิ่มราคาซื้อขายไฟฟ้า (adder) และมาตรการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนระบบ Feed-in tariff เป็นต้น จากมาตรการจูงใจดังกล่าวทำให้ประเทศไทยมีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้น โดยกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นจากปี 2549 ที่มีกำลังการผลิตเพียง 0.01 เมกะวัตต์ และได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและแน่นอนว่าเมื่ออายุการใช้งานสิ้นสุดลง แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากก็จะกลายเป็นส่วนหนึ่งในกองขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่กำลังสร้างปัญหาให้กับประเทศไทยและโลกใบนี้ จากการปริมาณซากขยะที่จะเกิดขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ พบว่า ในการผลิตไฟฟ้า 1 เมกะวัตต์ เซลล์ชนิดซิลิคอนผลึกจะสร้างปริมาณขยะประมาณ 100 ตัน ขณะที่เซลล์ชนิดฟิล์มบาง จะสร้างปริมาณขยะตั้งแต่ 185 ไปจนถึง 285 ตัน ขึ้นกับประเภทของวัสดุ โดยทั่วไป

โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะมีการรับประกันประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 20 - 30 ปี หากคิดอายุเฉลี่ยของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 25 ปี ดังนั้นในอนาคต จะเริ่มมีขยะที่เกิดจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เกิดขึ้น และมีปริมาณสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าว แสดงการคาดการณ์ปริมาณของเสียของเซลล์แสงอาทิตย์สะสม นั้นจึงสามารถคาดการณ์ได้อีกว่า เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์หมดอายุการใช้งานตามอายุขัยในอีก 25 ปีข้างหน้า ประเทศไทยจะมีขยะจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันรวมแล้วกว่า 5.1 แสนตัน และในอีก 25 ปีข้างหน้า ประเทศไทยจะมีของเสียจากเซลล์เหล่านี้สะสมรวมกันสูงถึง 7.5 แสนตัน กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ทส.) ที่นายภาพว่า ปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ทุกประเภทรวมกันอยู่ที่จำนวน 3.8 แสนตัน นั้นหมายความว่า ในปีอีก 25 ปีข้างหน้า เฉพาะของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีปริมาณมากกว่าขยะอิเล็กทรอนิกส์ทั้งประเทศที่มีอยู่รวมกันในปัจจุบัน ดังนั้นคำว่า “ขยะอิเล็กทรอนิกส์สิ้นประเทศไทย” คงเกิดขึ้นแน่นอน ถ้าหากไม่มีการวางแผนการจัดการที่ถูกต้องเหมาะสมในการจัดการและรองรับขยะดังกล่าว

ส่วนทวีปยุโรปนั้น มีของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สะสมมากกว่า 15,000 ตัน ในสิ้นปี 2559 โดยประเมินจากวงจรชีวิตของเซลล์แสงอาทิตย์ (PV CYCLE) ส่วนใหญ่เป็นของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน c-Si และจากรายงานที่ดีพิมพ์โดย International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programmer (IEA PVPS) Task1 2 และ International Renewable Energy Agency (IRENA) ในปี 2559 คาดการณ์ว่าของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกจะมีจำนวนสะสมถึง 1.7-8.0 ล้านตันภายในปี 2537 และ 60-78 ล้านตันภายในปี 2593

2.2 ผลกระทบที่เกิดจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์เสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งานลงไป จะต้องมีการเปลี่ยนหรือซ่อมแซม และของเสียเหล่านั้นจะกลายเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งของเสียเหล่านี้มีองค์ประกอบที่อาจจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ได้แก่ สารจำพวกโลหะหนักหรือพลาสติก

2.2.1 ผลกระทบต่อสุขภาพ สารอันตรายจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมคุณภาพ หรือหมดอายุ มีสารเคมี สารโลหะหนักที่มีอันตรายต่อสุขภาพเมื่อสารพิษเหล่านั้นแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน มีสารอันตรายคือ ซิลิคอนเตตระคลอไรด์ (silicon tetrachloride) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำ เมื่อสัมผัสจะส่งผลให้ผิวหนังไหม้ ระคายเคืองผิวหนังและตา ระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ เมื่อทำการกำจัดโดยวิธีการเผาอย่างไม่ถูกวิธี หรืออยู่ในอุณหภูมิสูงจะปล่อยแคดเมียม ก๊าซซีลีเนียม ทั้งก๊าซเรือนกระจกในรูปแบบ

ของคาร์บอนไดออกไซด์ ตลอดจนสารไดออกซินจากการเผาที่ไม่ถูกต้องสู่สิ่งแวดล้อมส่งผลให้ทำลายคุณภาพอากาศ และชั้นบรรยากาศ เมื่อนำไปฝังกลบสารเคมีเหล่านี้จะเกิดการแพร่กระจายของโลหะหนัก เช่น ตะกั่วและแคดเมียม ในดินและแหล่งน้ำธรรมชาติจากการกำจัดโดยการฝังกลบ จนอาจเกิดวิกฤต ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำและอาหารในอนาคตซึมลงไปดินและทำลายชั้นดิน และแหล่งน้ำใต้ดินเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัย และระบบนิเวศ เช่น

1) ตะกั่ว (lead) เป็นส่วนประกอบในการบัดกรีแผ่นวงจรพิมพ์ วงจรไฟฟ้าต่างๆ โดยผลกระทบที่เกิดขึ้น ตะกั่วทำลายระบบประสาท ต่อมไร้ท่อ ไต ระบบเลือด และการพัฒนาสมองของเด็ก ส่วนพิษเรื้อรังจะค่อยๆ แสดงอาการภายหลังการได้รับสารตะกั่วทีละน้อยจนถึงระยะเวลาหนึ่ง จึงจะแสดงอาการ จะไปทำลายระบบประสาทส่วนกลาง ระบบโลหิต การทำงานของไต การสืบพันธุ์ และมีผลต่อการพัฒนาสมองของเด็กนอกจากนี้ พิษจะสามารถสะสมได้ในสิ่งแวดล้อมก่อให้เกิดผลเฉียบพลันหรือแบบเรื้อรังได้ในพืชและสัตว์

2) แคดเมียม (cadmium) มักพบในแผ่นวงจรพิมพ์ ตัวต้านทาน แคดเมียมมีพิษอย่างเฉียบพลัน ทางเดินหายใจทำให้เกิดปอดอักเสบรุนแรง ไตถูกทำลายมีโปรตีนในปัสสาวะ ร่างกายขับกรดอะมิโน กลูโคส แคลเซียม และฟอสเฟตในปัสสาวะมากขึ้น ทำให้เกิดเป็นนิ่วในปัสสาวะได้ โรคปวดกระดูก โรคอัมพาต-อัมพาต ปวดสะโพก (hip pain) ปวดแขน ขา (extremity pain) มีวงแหวนแคดเมียม (yellow ring) ปวดกระดูก (bone pain) ปวดข้อ (joint pain) มีความผิดปกติที่กระดูกสันหลัง ทำให้มีลักษณะเตี้ย หลังค่อม เป็นต้น ซึ่งสารนี้จะสะสมในร่างกาย โดยเฉพาะที่ไต ทำลายระบบประสาท ส่งผลกระทบต่อพัฒนาการและการมีบุตรหรืออาจมีผลกระทบต่อพันธุกรรม

3) ปรอท (mercury) มักพบในตัวตัดความร้อนสวิตช์ เป็นอันตรายต่อระบบประสาทส่วนกลาง ได้แก่ สมอง และไขสันหลัง ทำให้เสียการควบคุมเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวของแขน ขา การพูด ทำให้ระบบประสาทรับรู้สึกเสียไป เช่น การได้ยิน การมองเห็น ไม่สามารถรักษาให้ดีขึ้นได้โดย จะส่งผลในการทำลายอวัยวะต่าง ๆ รวมทั้งสมอง ไต และเด็กในครรภ์มารดาได้ และถ้าลงสู่แหล่งน้ำจะเปลี่ยนรูปเป็น Methylated mercury และตกตะกอน ซึ่งสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ง่าย และจะสะสมต่อไปตามห่วงโซ่

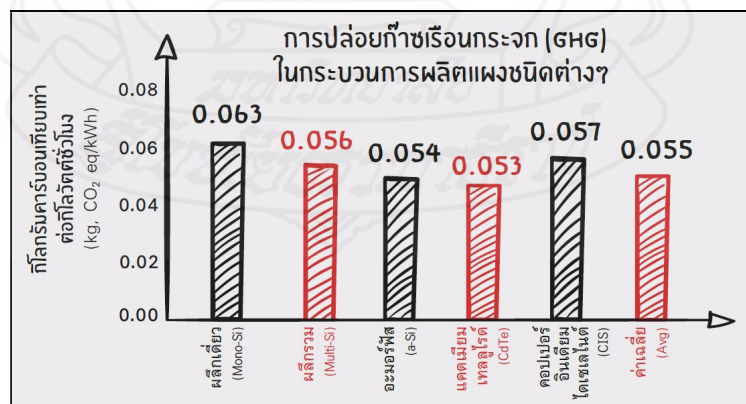
4) โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (hexavalent chromium) ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นโลหะเคลือบสังกะสี ซึ่งสามารถผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์ได้ง่าย จะส่งผลในการทำลายดีเอ็นเอ และเป็นสารก่อมะเร็งสำหรับมนุษย์

5) สารทนไฟทำจากโบรมีน (bromine) ใช้ในกล่องพลาสติกของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แผงวงจร และตัวเชื่อมต่อ ซึ่งเป็นสารที่มีพิษ และสามารถสะสมได้ในสิ่งมีชีวิต

โบรมีนเป็นสารก่อมะเร็ง และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี และรูปทรงของเส้นใยกล้ามเนื้อหัวใจ ถ้ามีทองแดงร่วมด้วยจะเพิ่มความเสี่ยงในการเกิด ไดออกซินและพีวเรนระหว่าง การเผา เนื่องจากตัวทนไฟทำจากโบรมีนมีอยู่หลายรูปแบบ แบบที่มีอันตรายมากจะเป็น โบรมีนมี อยู่หลายรูปแบบ แบบที่มีอันตรายมากจะเป็น โพลีโบรมิเตดไบฟีนิล (polybrominated biphenyls-PBBs) ซึ่งก่อให้เกิด ไดออกซิน ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งทำลายการทำงานของตับ มีผลกระทบต่อระบบประสาทและภูมิคุ้มกัน ทำให้การทำงานของต่อมไทรอยด์ผิดปกติ รวมถึงระบบต่อมไร้ท่อสามารถสะสมในน้ำนมของมนุษย์และกระแสเลือด สามารถถ่ายทอดในห่วงโซ่อาหาร (ขยะอิเล็กทรอนิกส์ใช้แล้วทิ้ง กระทบสิ่งแวดล้อม, 2559)

2.2.2 ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

(1) ผลกระทบต่ออากาศ การศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงอุตสาหกรรม (2559) จากการศึกษาการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะทำการประเมินโดย Sima Pro โดยใช้ Re Cipe 1.07 เป็นวิธีการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต (life cycle impact assessment: LCIA) โดยเน้นการประเมินในเรื่องของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) ของแผงชนิดต่างๆ ซึ่งจากการเปรียบเทียบระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ พบว่า วัฏจักรชีวิตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีลำดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทอื่น คือ ซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว (mono-crystalline silicon) ปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 63 กิโลกรัมคาร์บอนเทียบเท่าต่อกิโลวัตต์ ชั่วโมง (ภาพที่ 2.16)



ภาพที่ 2.16 อัตราปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ จากการประเมินวัฏจักรชีวิต

ที่มา :กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2559)

การทำลายชั้น โอโซนจากการผลิตไปจนถึงการกำจัดของเสียที่ไม่มีมูลค่า เหลือจากการถอดประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสียคุณภาพหรือหมดอายุการใช้งาน โดยการเผาทิ้งอย่างไม่ถูกวิธี ทำให้สารเกิดมลพิษ ระเหยสู่บรรยากาศและขึ้นไปทำลายชั้น โอโซนที่ป้องกันรังสีความร้อนแผ่เข้าสู่พื้นโลกมากเกินไป ส่งผลให้เกิดรูรั่วในชั้นโอโซน นอกจากนี้ในสารชนิดยังเป็นก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน

(2) ผลกระทบต่อดินและน้ำ การปนเปื้อนของสารพิษจากโลหะลงสู่ดินและน้ำ จากขั้นตอนที่ การรื้อของเก่าและการฝังกลบอย่างไม่ถูกวิธี เช่น การถอดประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสียคุณภาพหรือหมดอายุแล้ว การเทน้ำกรดจากแบตเตอรี่รถยนต์ทิ้งลงดิน การทิ้งเศษหรือสารอันตรายลงดิน การทิ้งเศษกระจกจากจอแสดงผลทำให้สารตะกั่ว ทำให้สารพิษแพร่กระจายสู่ดินและน้ำ รวมทั้งการกองเผาเศษวัสดุ ทำให้สารพิษในเศษวัสดุปนเปื้อนอยู่ในจีเอ็มที่เหลือน้อยู่สะสมในดิน การฝังเพื่อกำจัดชิ้นส่วนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีมูลค่าอย่างไม่ปลอดภัย ทำให้สารพิษแพร่กระจายสู่ดินและแพร่สู่แหล่งน้ำ การปนเปื้อนของสารพิษจากขยะชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมคุณภาพหรือหมดอายุในอากาศ ชาวบ้านใช้วิธีการ ถอดประกอบ และเผาชิ้นส่วนเพื่อแยกเอาวัสดุมีค่า เช่น โคโรเหล็ก โลหะ การเผาสายไฟเพื่อเอาทองแดง การเผาทำลายชิ้นส่วนพลาสติกเพื่อเอาชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ เป็นต้น การเผาชิ้นส่วนดังกล่าวส่งผลให้เกิดควันพิษ กลิ่นเหม็นและจีเอ็มที่สามารถฟุ้งกระจายไปได้ไกลตามกระแสลมและเกิดสารพิษต่าง ๆ ได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์คาร์บอนมอนอกไซด์ สารอินทรีย์ระเหยง่าย โลหะหนักและสารไดออกซินและฟูแรนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งที่ร้ายแรง

3. กฎหมายที่เกี่ยวข้องในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

มาตรการการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ และอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยที่ผ่านมายังไม่มีกฎหมายหรือพระราชบัญญัติที่เกี่ยวข้องโดยตรง แต่มีกฎหมายบางฉบับที่สามารถนำมาเป็นแนวทางหรือมาตรการในการจัดการของเสียจากอุปกรณ์ไฟฟ้า ของเสียจากอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ มาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทย คือ

- พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535
- พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535
- พระราชบัญญัติการนิคมอุตสาหกรรมแห่งชาติ พ.ศ. 2522
- พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2551
- พระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ฉบับที่ 6) พ.ศ. 2548

สืบเนื่องจากนโยบายของรัฐที่ต้องการส่งเสริมการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก โดยเฉพาะการส่งเสริมให้ประชาชนติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา (solar rooftop) ทำให้ประเทศไทยมีการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น โดยอาจแบ่งประเภทของผู้ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ภาคผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และภาคประชาชนทั่วไปอย่างไรก็ตาม อาจกล่าวได้ว่าประเทศไทยไม่มีการกำหนดมาตรการทางกฎหมายที่บังคับแก่การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ไว้โดยเฉพาะ แต่อาจพิจารณามาตรการทางกฎหมายตามพระราชบัญญัติและกฎหมายลำดับรองที่เกี่ยวข้องมา ตลอดจนแนวนโยบายที่สำคัญต่างๆ ของรัฐเพื่อให้เห็นถึงมาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทยในปัจจุบัน ดังนี้

3.1 มาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

พระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 กำหนดให้ผู้ที่ประกอบกิจการพลังงานต้องได้รับใบอนุญาตจากคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เว้นแต่มีการตราพระราชกฤษฎีกายกเว้นไว้ โดยบุคคลผู้มีความประสงค์จะประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ต้องได้รับใบอนุญาตประเภทใบอนุญาตผลิตไฟฟ้าจากคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน

นอกจากนั้นแล้วการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ยังถือว่าเป็นโรงงานตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 จึงต้องได้รับใบอนุญาตให้ประกอบกิจการโรงงานตามกฎหมายฉบับดังกล่าวอีกด้วย ทั้งนี้ ตามกฎกระทรวง (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ได้กำหนดให้โรงงานผลิตไฟฟ้าทุกขนาดเป็นโรงงานจำพวกที่ 3 ซึ่งโรงงานจำพวกดังกล่าวนี้ จะต้องได้รับใบอนุญาตก่อนการตั้งโรงงานตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เสียก่อน

จะเห็นได้ว่ามาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ต้องพิจารณาบทบัญญัติตามพระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 และพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 พร้อมกฎหมายลำดับรองที่เกี่ยวข้องซึ่งออกโดยอาศัยอำนาจตามพระราชบัญญัติทั้งสองฉบับดังกล่าวประกอบกัน

อย่างไรก็ตาม การที่กฎหมายบังคับให้ต้องมีการขอรับใบอนุญาตเสียก่อนจึงจะสามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้นั้น ทำให้เป็นอุปสรรคต่อประชาชนบางส่วนที่

ต้องการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าและขายไฟฟ้าที่ผลิตได้แก่หน่วยงานของรัฐ จึงได้มีการออกกฎหมายลำดับรองยกเว้นไว้สำหรับบางกรณี กล่าวคือ ใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 นั้น ได้มีการออกพระราชกฤษฎีกากำหนดประเภท ขนาด และลักษณะของกิจการพลังงานที่ได้รับการยกเว้นไม่ต้องขอรับใบอนุญาตประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2552 ยกเว้นให้ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าที่มีกำลังผลิตรวมกันต่ำกว่า 1,000 กิโลวัตต์แอมแปร์ ไม่ต้องขอรับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติฉบับนี้

ส่วนในกรณีของพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ได้มีการออกกฎกระทรวงฉบับที่ 23 (พ.ศ. 2557) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ยกเลิกกฎกระทรวงฉบับเดิมเฉพาะที่เกี่ยวกับโรงงานผลิตไฟฟ้า โดยยกเว้นไม่ต้องขอใบอนุญาตโรงงานจำพวกที่ 3 สำหรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในลักษณะที่เป็นการติดตั้งบนหลังคา าดฟ้า หรือส่วนหนึ่งส่วนใดบนอาคารซึ่งบุคคลอาจเข้าอยู่หรือใช้สอยได้ โดยมีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งสูงสุดรวมกันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เกิน 1,000 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นการยกเว้นเพื่อส่งเสริมให้ประชาชนที่สนใจหันมาติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา (solar rooftop) นั้นเอง อนึ่งกฎกระทรวงที่ใช้บังคับในปัจจุบัน คือ กฎกระทรวงที่ ฉบับที่ 24 (พ.ศ. 2558) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ได้มีการยกเลิกกฎกระทรวงฉบับที่ 23 (พ.ศ. 2557) อย่างไรก็ตาม สาระสำคัญที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับประเด็นที่ศึกษานั้นยังคงเดิม

การยกเว้นไม่ต้องขอใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติทั้งสองฉบับดังกล่าว จึงอาจทำให้เกิดปัญหาได้ว่า จะมีมาตรการทางกฎหมายในการกำกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในลักษณะนี้ได้อย่างไร ซึ่งต่อมาคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานได้ออกประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่อง มาตรการด้านการออกแบบติดตั้งและการจัดการขยะและกากของเสียสำหรับผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากเทคโนโลยีแผงโฟโตโวลเทอิกที่ได้รับการยกเว้นไม่ต้องขอรับใบอนุญาตประกอบกิจการผลิตไฟฟ้า พ.ศ. 2557 กำหนดให้ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในที่ได้รับการยกเว้นไม่ต้องขอรับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 ต้องปฏิบัติตามประมวลหลักการปฏิบัติ (Code of Practice : CoP) ที่แนบท้ายประกาศฉบับนี้ซึ่งมีมาตรการเกี่ยวกับการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย

อย่างไรก็ตาม การยกเว้นตามกฎหมายลำดับรองทั้งสองฉบับข้างต้นนั้น มีหลักเกณฑ์ที่จำกัดกล่าวคือ ตามพระราชกฤษฎีกากำหนดประเภท ขนาด และลักษณะของกิจการพลังงานที่ได้รับการยกเว้นไม่ต้องขอรับใบอนุญาตประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2552 บัญญัติยกเว้นให้ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าที่มีกำลังผลิตรวมกันต่ำกว่า 1,000 กิโลวัตต์แอมแปร์เท่านั้น

(1,000 กิโลวัตต์แอมแปร์ เท่ากับ 800 กิโลวัตต์) ส่วนกฎกระทรวง ฉบับที่ 23 (พ.ศ. 2557) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ยกเว้นสำหรับโรงงานผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เฉพาะที่ติดตั้งบนหลังคาอาคารและมีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งสูงสุดรวมกันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เกิน 1,000 กิโลวัตต์เท่านั้น จึงทำให้เกิดประเด็นที่น่าสนใจว่าจะมีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในลักษณะใดที่อยู่ภายใต้บทบัญญัติของพระราชบัญญัติฉบับใดฉบับหนึ่งเท่านั้นหรือไม่ ยกตัวอย่างเช่น

ผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในลักษณะที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนพื้นดิน (solar farm) มีขนาดกำลังการผลิตสูงสุดรวมกันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 700 กิโลวัตต์ ในกรณีนี้ผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้านี้ไม่ต้องขอใบอนุญาตผลิตไฟฟ้าจากคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานตามพระราชบัญญัติประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 เพราะมีขนาดกำลังผลิตไม่ถึง 1,000 กิโลวัตต์แอมแปร์ (1,000 กิโลวัตต์แอมแปร์ เท่ากับ 800 กิโลวัตต์) ได้รับยกเว้นตามพระราชกฤษฎีกากำหนดประเภท ขนาด และลักษณะของกิจการพลังงานที่ได้รับการยกเว้นไม่ต้องขอรับใบอนุญาตประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2552 อย่างไรก็ตาม ต้องได้รับใบอนุญาตโรงงานจำพวกที่ 3 ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เนื่องจากไม่ใช่การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

ผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในลักษณะที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาอาคาร (solar rooftop) มีขนาดกำลังการผลิตสูงสุดรวมกันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 900 กิโลวัตต์ กรณีนี้ผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้านี้ต้องขอใบอนุญาตผลิตไฟฟ้าจากคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานตามพระราชบัญญัติประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 เพราะมีขนาดกำลังผลิตเกิน 1,000 กิโลวัตต์แอมแปร์ (1,000 กิโลวัตต์แอมแปร์ เท่ากับ 800 กิโลวัตต์) แต่กลับได้รับยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาตโรงงานจำพวกที่ 3 ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เนื่องจากไม่ใช่การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารและมีขนาดกำลังการผลิตสูงสุดรวมกันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เกิน 1,000 กิโลวัตต์

3.1.1 ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทโรงงาน ซึ่งต้องได้รับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 และตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทนี้ สามารถนำมามาตรการทางกฎหมายของพระราชบัญญัติทั้งสองมาใช้บังคับได้ โดยอาจพอสรุปมาตรการทางกฎหมายต่างๆ ได้ดังนี้

(1) มาตรการตามพระราชบัญญัติประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 และกฎหมายลำดับรองที่เกี่ยวข้อง

การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าซึ่งต้องได้รับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 นั้น ต้องปฏิบัติตามประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่อง มาตรการ ป้องกัน แก้ไข และติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากเทคโนโลยีแผงโฟโตโวลเทอิกที่เข้าข่ายต้องได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการผลิตไฟฟ้า พ.ศ. 2557 ประกาศฉบับนี้กำหนดให้ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เข้าข่ายต้องได้รับใบอนุญาตผลิตไฟฟ้าต้องปฏิบัติตามประมวลหลักการปฏิบัติ (Code of Practice: CoP) แบบท้ายประกาศฉบับนี้ โดยแบ่งเป็นประเภทย่อยอีก 2 ประเภท กล่าวคือ

ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนพื้น (solar farm) ต้องปฏิบัติตามประมวลหลักการปฏิบัติทุกกรณีที่แบบท้ายประกาศฉบับนี้ ซึ่งเป็นไปตามข้อ 3 ของประกาศฉบับดังกล่าว ซึ่งรวมถึงมาตรการด้านการออกแบบติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และมาตรการด้านการจัดการขยะและกากของเสียด้วย

ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา (solar rooftop) ต้องปฏิบัติตามประมวลหลักการปฏิบัติเฉพาะกรณีมาตรการด้านการออกแบบติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และมาตรการด้านการจัดการขยะและกากของเสีย ซึ่งเป็นไปตามข้อ 4 ของประกาศฉบับดังกล่าว จะเห็นได้ว่าแม้ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าทั้งสองประเภทย่อยดังกล่าวจะปฏิบัติตามประมวลหลักการปฏิบัติไม่เท่ากันก็ตาม แต่สำหรับมาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามประมวลหลักการปฏิบัตินั้นถือว่าเป็นหลักการเดียวกัน จึงจะได้อธิบายในคราวเดียว โดยมีการกำหนดมาตรการต่างๆ ไว้ดังนี้

(2) กำหนดหลักเกณฑ์การปฏิบัติเพิ่มเติมโดยใช้มาตรการทางกฎหมายตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตรายและพระราชบัญญัติโรงงาน

ส่วนในขั้นตอนภายหลังทั้งในระบะการดำเนินการ (O8) และขั้นตอนการรื้อถอนอาคาร เครื่องจักร หรืออุปกรณ์ (D8) ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ต้องจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามวิธีการที่ได้เสนอต่อคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานไว้ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะในระบะการก่อสร้างนั้นประมวลหลักการปฏิบัติจะกำหนดให้เลือกใช้วิธีการนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิลเป็นลำดับแรก แต่ในขั้นตอนภายหลังกลับกำหนดวิธีการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยสอดคล้องกับวิธีการต่อไปนี้ กล่าวคือ กรณีส่งออกไปจัดการนอกประเทศต้องเป็นไปตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตรายฯ หรือเลือกใช้การฝังกลบในหลุมฝังกลบของเสีย

อันตราย (secure land fill) หรือเผาทำลายด้วยเตาเผาเฉพาะของเสียอันตราย หรือจัดการด้วยวิธีอื่นตามพระราชบัญญัติโรงงานฯ วิธีการดังกล่าวนี้ไม่ถือว่าเป็นการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนั้นแล้ว การส่งออกไปจัดการนอกประเทศ การฝังกลบ หรือการเผาทำลายนั้น ก็อาจทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาได้ ทั้งนี้เมื่อประมวลหลักการปฏิบัติได้นำเอามาตรการทางกฎหมายตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตรายฯ และพระราชบัญญัติโรงงานฯ มากำหนดไว้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว จึงควรศึกษามาตรการทางกฎหมายตามพระราชบัญญัติทั้งสองฉบับดังกล่าวด้วย

(3) มาตรการทางกฎหมายตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535

ประมวลหลักการปฏิบัติที่ใช้บังคับสำหรับผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าที่ต้องได้รับใบอนุญาตผลิตไฟฟ้าได้กำหนดหลักการปฏิบัติในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ว่า หากเลือกใช้กรณีการส่งออกไปจัดการนอกประเทศ ต้องดำเนินการตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 จึงต้องศึกษามาตรการทางกฎหมายตามพระราชบัญญัติฉบับนี้พร้อมกฎหมายลำดับรองที่เกี่ยวข้องด้วย

ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีส่วนประกอบของสารอันตรายต่างๆ ที่หากปราศจากการจัดการโดยถูกต้องแล้ว อาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและสร้างผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้ ซึ่งเมื่อพิจารณานิยามของคำว่า “วัตถุอันตราย” ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 ที่หมายถึงวัตถุมีพิษแล้ว ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงถือได้ว่าเป็นวัตถุอันตรายตามพระราชบัญญัติฉบับดังกล่าว มาตรการทางกฎหมายในการจัดการวัตถุอันตรายตามพระราชบัญญัติฉบับนี้ ต้องแยกแยะเสียก่อนว่าวัตถุอันตรายนั้นถูกจำแนกว่าเป็นวัตถุอันตรายชนิดใดตามกฎหมาย เพราะมาตรการทางกฎหมายในการจัดการวัตถุอันตรายแต่ละชนิดนั้นย่อมแตกต่างกัน โดยในปัจจุบันมีการออกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง บัญชีรายชื่อวัตถุอันตราย พ.ศ. 2556 ซึ่งอาศัยอำนาจความตามมาตรา 18 แห่งพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 เพื่อกำหนดชื่อและชนิดของวัตถุอันตราย ตลอดจนหน่วยงานที่รับผิดชอบ

สำหรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้น มีปัญหาว่าได้รับการระบุเป็นวัตถุอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง บัญชีรายชื่อวัตถุอันตรายดังกล่าวแล้วหรือไม่ในปัจจุบัน ไม่มีการกำหนดให้ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นวัตถุอันตรายโดยเฉพาะ แต่หากพิจารณาบัญชีรายชื่อวัตถุอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมข้างต้นแล้ว อาจสามารถตีความได้ว่าของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้แล้ว ตามบัญชี 5.3 และจัดเป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 3 ซึ่งการผลิต การนำเข้า การส่งออก หรือการมีไว้ในครอบครองต้องได้รับใบอนุญาต ดังนั้น มาตรการทางกฎหมายต่างๆ ที่นำมาใช้กับวัตถุอันตรายชนิดที่ 3 ย่อม

สามารถนำมาปรับใช้กับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ การส่งของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปจัดการนอกประเทศจึงต้องได้รับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตรายฯ ด้วย

อย่างไรก็ตาม การแปลความเช่นนี้อาจทำให้เกิดปัญหาหลายประการกล่าวคือ การส่งออกไปจัดการนอกประเทศอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนั้นแล้วการที่กำหนดให้ผู้ผลิต ผู้นำเข้า หรือผู้ส่งออกต้องมีใบอนุญาตก่อนอาจสร้างผลเสียต่อการส่งเสริมการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนได้ เนื่องจากมาตรการทางกฎหมายที่เข้มงวดอาจทำให้ผู้ที่ต้องการประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์หมดความสนใจในการประกอบกิจการดังกล่าวได้

(4) มาตรการทางกฎหมายตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

ผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉพาะที่ติดตั้งบนพื้น (solar farm) ต้องได้รับใบอนุญาตโรงงานจำพวกที่ 3 นอกจากนั้นแล้วตามประมวลหลักการปฏิบัติในระยะการดำเนินการ (O8) และขั้นตอนการรื้อถอนอาคาร เครื่องจักร หรืออุปกรณ์ (D8) ยังได้เปิดช่องให้ใช้วิธีการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามที่กำหนดไว้ในพระราชบัญญัติโรงงานฯ อีกด้วย มาตรการทางกฎหมายต่างๆ ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 พร้อมกฎหมายลำดับรองที่เกี่ยวข้องจึงได้เข้ามาบังคับแก่การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งต้องได้รับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 และตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ด้วย โดยได้มีการออกกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ในกฎกระทรวงฉบับดังกล่าว ในหมวด 4 ได้มีการกำหนดหลักเกณฑ์เกี่ยวกับการควบคุมการปล่อยของเสีย มลพิษหรือสิ่งใดๆ ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และในข้อ 13 ได้มีการกำหนดหลักเกณฑ์กว้างๆ เกี่ยวกับการกำจัดขยะ สิ่งปฏิกูล และวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเอาไว้ นอกจากนั้นแล้วยังได้มีการออกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยอาศัยอำนาจตามข้อ 13 ของกฎกระทรวงฉบับดังกล่าวเพื่อกำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับการกำจัดขยะ สิ่งปฏิกูล และวัสดุที่ไม่ใช้แล้วให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ได้นิยามคำว่า สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วว่าหมายถึง “สิ่งของที่ไม่ใช้แล้วหรือของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการประกอบกิจการโรงงาน...” ซึ่งจะเห็นได้ว่าของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ถือได้ว่าเป็นสิ่งของที่ไม่ใช้แล้วหรือของเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการของโรงงานผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์สำคัญในการผลิตกระแสไฟฟ้า จึงถือได้ว่าของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับนี้ ซึ่งหาก

พิจารณาภาคผนวกที่ 1 ที่แนบท้ายประกาศฉบับนี้แล้ว ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ถือได้ว่าเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วในหมวดที่ 16 คือ สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทต่างๆ ที่ไม่ได้ระบุในหมวดอื่นรหัส 16 02 “ของเสียจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์” อย่างไรก็ตาม ในรหัส 16 02 นี้ได้มีการแยกประเภทของของเสียจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ไว้หลายประเภท ซึ่งของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จัดอยู่ในรหัส 16 02 13 “อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ใช้งานแล้ว ที่มีชิ้นส่วนที่เป็นอันตราย”

นอกจากนั้น ยังได้มีการนิยามคำว่า “ของเสียอันตราย” ไว้ว่าหมายถึง “สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีองค์ประกอบ หรือปนเปื้อนสารอันตราย หรือมีคุณสมบัติที่เป็นอันตรายตามที่กำหนดในภาคผนวกที่ 2 ท้ายประกาศนี้” และเมื่อพิจารณาภาคผนวกที่ 2 ท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับนี้ประกอบกัน จะเห็นได้ว่าของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจมีสารอันตรายหลายชนิดตามที่ระบุไว้ในภาคผนวกที่ 2 ท้ายประกาศฉบับนี้เป็นส่วนประกอบ ไม่ว่าจะเป็นตะกั่ว แคดเมียม หรือสารหนู เป็นต้น ดังนั้นของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงถือได้ว่าเป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับนี้ และจึงนำมาตรการทางกฎหมายในการจัดการ ของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับนี้มาใช้ในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ กล่าวคือ

- 1) ห้ามนำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วหรือของเสียอันตรายออกนอกบริเวณโรงงาน เว้นแต่ได้รับอนุญาต และการขนส่งต้องมีใบกำกับการขนส่งในข้อ 9 ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับนี้ได้กำหนดห้ามไม่ให้ “ผู้ก่อกำเนิดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว” ซึ่งหมายความว่า ผู้ประกอบกิจการโรงงานที่ก่อให้เกิดและมีสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วไว้ในครอบครอง นำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วออกจากโรงงาน โดยไม่ได้รับอนุญาต นอกจากนั้น หากสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วนั้นเป็นของเสียอันตราย ข้อ 11 ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับนี้ ยังได้กำหนดให้ต้องมีใบกำกับการขนส่งในเมื่อมีการนำของเสียอันตรายออกจากโรงงานด้วย
- 2) การจัดการของเสียอันตรายต้องกระทำโดยผู้บำบัดและกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วเท่านั้น ในข้อ 10 ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับนี้ กำหนดให้การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เป็นของเสียอันตรายต้องจัดการ โดยผู้บำบัดและกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว หากต้องการให้บุคคลอื่นเป็นผู้จัดการต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ได้กำหนดนิยามคำว่า ผู้บำบัดและกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วไว้ว่าหมายถึง “ผู้ประกอบการโรงงานที่มีสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วไว้ในครอบครอง ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง ระบบเอกสารกำกับการขนส่งของเสียอันตราย พ.ศ. 2547 และโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการคัดแยกหรือฝังกลบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ตามประเภทหรือชนิดของโรงงานลำดับที่ 105” สำหรับผู้ประกอบการโรงงานที่มีสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วไว้ในครอบครองตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง ระบบเอกสารกำกับการขนส่งของเสียอันตราย พ.ศ. 2547 ได้แบ่งออกเป็น 7 ประเภท

จะเห็นได้ว่าการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งถือได้ว่าเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ซึ่งกฎหมายก็ได้กำหนดมาตรการการจัดการไว้แต่เพียงกว้างๆ เท่านั้น มิได้มีการกำหนดไว้โดยชัดเจนว่าของเสียอันตรายนั้นต้องจัดการด้วยวิธีการใด ซึ่งผู้ก่อของเสียอันตรายอาจให้ผู้บำบัดและกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ประเภทใดจัดการของเสียอันตรายนั้นก็ได้ซึ่งในบริบทของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควรจัดการโดยใช้การนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิลนั้น เมื่อไม่ได้มีการกำหนดวิธีการจัดการไว้โดยเฉพาะ ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจถูกนำไปจัดการ โดยการฝังกลบหรือเผาซึ่งอาจก่อปัญหาสิ่งแวดล้อมและสร้างผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้นอกจากนั้นแล้ว มาตรการทางกฎหมายตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ตามที่ได้กล่าวมายังกำหนดให้เป็นหน้าที่ของผู้ก่อของเสียอันตรายเป็นผู้จัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจากการประกอบกิจการ ซึ่งก็คือผู้ประกอบการ โรงงานผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์นั่นเอง โดยไม่มีการกำหนดหน้าที่แก่ผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เข้ามามีบทบาทในการจัดการดังกล่าวข้างต้น

(5) ผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งไม่ต้องได้รับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 และตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

ผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งไม่ต้องได้รับใบอนุญาตตามกฎหมายทั้งสองฉบับนั้น ย่อมไม่สามารถนำมามาตรการต่างๆ ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 มาใช้บังคับได้โดยตรง ส่วนมาตรการตามพระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 นั้น คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานได้ออกประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่อง มาตรการด้านการออกแบบติดตั้งและการจัดการขยะและกากของเสียสำหรับผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากเทคโนโลยีแผงโฟโตโวลเทอิกที่ได้รับการยกเว้นไม่ต้องขอรับ

ใบอนุญาตประกอบกิจการผลิตไฟฟ้า พ.ศ. 2557 กำหนดให้ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับยกเว้นไม่ต้องขอรับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 ต้องปฏิบัติตามประมวลหลักการปฏิบัติ (Code of Practice: CoP) ที่แนบท้ายประกาศฉบับนี้ ซึ่งได้มีการกำหนดมาตรการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เอาไว้ด้วย อย่างไรก็ตาม มาตรการต่างๆ ที่กำหนดไว้เหมือนกับมาตรการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ต้องได้รับใบอนุญาตผลิตไฟฟ้าซึ่งได้กล่าวไปโดยละเอียดแล้วแต่ประมวลหลักการปฏิบัตินั้นเป็นเพียงแนวทางให้ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าที่ได้รับยกเว้นไม่ต้องขอรับใบอนุญาตปฏิบัติเท่านั้น หากฝ่าฝืนยอมไม่มีสภาพบังคับตามพระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 แต่อย่างใด

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาพระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 แล้ว ได้นิยามว่า การประกอบกิจการพลังงานหมายความรวมถึงกิจการไฟฟ้า ซึ่งกิจการไฟฟ้าหมายถึง การผลิตไฟฟ้าด้วย และตามมาตรา 11 ซึ่งกำหนดว่าคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานมีอำนาจกำกับดูแลการประกอบกิจการพลังงานเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ตามพระราชบัญญัตินี้ และยังมีอำนาจออกประกาศและกำกับดูแลมาตรฐานและคุณภาพในการให้บริการ รวมทั้งมาตรการในการคุ้มครองผู้ใช้พลังงานจากการประกอบกิจการพลังงาน ดังนั้น คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานจึงมีอำนาจกำกับดูแลการประกอบกิจการพลังงานทั้งระบบ ซึ่งรวมถึงผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าที่ได้รับยกเว้นไม่ต้องขอรับใบอนุญาตประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าด้วย ดังนั้นเมื่อประกาศฉบับดังกล่าวกำหนดให้ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าต้องปฏิบัติตามประมวลหลักการปฏิบัติแล้ว หากมีการฝ่าฝืนไม่ปฏิบัติตาม พนักงานเจ้าหน้าที่ของสำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน ในฐานะพนักงานเจ้าหน้าที่ตามประมวลกฎหมายอาญาย่อมมีอำนาจสั่งให้ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าปฏิบัติให้ถูกต้องได้ตามประมวลหลักการปฏิบัติ และหากยังไม่ปฏิบัติตามคำสั่งของพนักงานเจ้าหน้าที่ พนักงานเจ้าหน้าที่ก็อาจใช้มาตรการบังคับทางปกครองหรือโทษปรับทางปกครองตามพระราชบัญญัติวิธีปฏิบัติราชการทางปกครอง พ.ศ. 2539 มาตรา 58 บังคับแก่ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ ยังมีความผิดฐานขัดคำสั่งเจ้าพนักงานตามประมวลกฎหมายอาญาอีกด้วย สภาพบังคับเพียงเท่านี้ถือว่าน้อยเกินไปและอาจทำให้ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าไม่เกรงกลัวและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้

(6) ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งต้องได้รับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 แต่ไม่ต้องได้รับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

สำหรับผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มนี้ยกตัวอย่างเช่น ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาซึ่งมีกำลังการผลิตรวมกัน 900 กิโลวัตต์ เป็นต้น มาตรการในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้ต้องเป็นไปตามประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่อง มาตรการป้องกันแก้ไข และติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากเทคโนโลยีแผงโฟโตโวลเทอิกที่เข้าข่ายต้องได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการผลิตไฟฟ้า พ.ศ. 2557 แต่จะนำมาตรการทางกฎหมายตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 มาใช้โดยตรงไม่ได้เพราะมิใช่ผู้รับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติฉบับนี้

(7) ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งไม่ต้องได้รับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 แต่ต้องได้รับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กลุ่มนี้ ยกตัวอย่างเช่น ผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งพื้น ซึ่งมีกำลังการผลิตรวมกัน 700 กิโลวัตต์ เป็นต้น มาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ประกอบกิจการกลุ่มนี้สามารถนำมาตรการต่างๆ ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 มาใช้ได้ เนื่องจากเป็นผู้รับใบอนุญาตโรงงานจำพวกที่ 3 สำหรับมาตรการตามพระราชบัญญัติประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 ได้ถูกบังคับตามประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่อง มาตรการด้านการออกแบบติดตั้งและการจัดการขยะและกากของเสียสำหรับผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากเทคโนโลยีแผงโฟโตโวลเทอิกที่ได้รับการยกเว้น ไม่ต้องขอรับใบอนุญาตประกอบกิจการผลิตไฟฟ้า พ.ศ. 2557

พระราชบัญญัติสำหรับผู้ประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และข้อยกเว้นแบ่งตามประเภท และขนาดกำลังการผลิตสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 พระราชบัญญัติที่ใช้บังคับสำหรับการประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จำแนกตามประเภท และขนาดกำลังการผลิต

กฎหมาย	ประเภท					
	Solar rooftop	Solar rooftop	Solar rooftop	Solar farm	Solar farm	Solar farm
	กำลังการผลิต	กำลังการผลิต	กำลังการผลิต	กำลังการผลิต	กำลังการผลิต	กำลังการผลิต
	1,100 Kw	900 Kw	700 Kw	1,100 Kw	900 Kw	700 Kw
พระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2551	√	√		√	√	
พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535	√			√	√	√
พระราชบัญญัติวัดถุอันตราย พ.ศ. 2535	√	√	√	√	√	√

3.1.2 มาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับภาคประชาชน

สำหรับประชาชนที่ซื้อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้ภายในครัวเรือนของตนโดยไม่มีลักษณะเป็นการประกอบกิจการผลิตไฟฟ้านั้น ในปัจจุบันไม่มีกฎหมายที่ใช้บังคับกับกรณีการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับประชาชนกำหนดไว้โดยเฉพาะ จึงต้องปรับใช้พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 และพระราชบัญญัติรักษาความสะอาดและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของบ้านเมือง พ.ศ. 2535 ซึ่งมีบทบัญญัติเกี่ยวกับการจัดการมูลฝอยทั่วไป นอกจากนี้แล้วการจัดการซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมาของประชาชน คือ การขายให้กับผู้ประกอบการรับซื้อของเก่า จึงต้องพิจารณาพระราชบัญญัติควบคุมการขายทอดตลาดและค้าของเก่า พ.ศ.2474 ควบคู่กันไปด้วย

(1) มาตรการทางกฎหมายตามพระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535

พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 เป็นกฎหมายที่ให้อำนาจองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการจัดการปัญหาสิ่งปฏิกูลและมูลฝอยต่างๆ สำหรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อพิจารณานิยามคำว่า “มูลฝอย” ตามพระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 ซึ่งให้หมายรวมถึงมูลฝอยที่เป็นพิษหรืออันตรายจากชุมชนด้วย ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประชาชนนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าใช้ในครัวเรือนจึงถือได้ว่าเป็น “มูลฝอย” ตามพระราชบัญญัตินี้ ดังนั้น จึงสามารถนำมาตราทางกฎหมายในการจัดการมูลฝอยตามพระราชบัญญัติการสาธารณสุขมาใช้ในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยมาตรการทางกฎหมายที่กำหนดไว้คือ

มาตรการทางกฎหมายในการเก็บ ขน และกำจัดมูลฝอย

พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 มาตรา 18 กำหนดให้การเก็บ ขน และกำจัดมูลฝอยเป็นอำนาจขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ทั้งนี้ การดำเนินการเก็บขน หรือกำจัดมูลฝอย องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นอาจร่วมกันดำเนินการกับหน่วยงานของรัฐอื่นๆ หรือองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นอื่นก็ได้ (พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535, มาตรา 18)

มาตรการในการออกข้อกำหนดท้องถิ่นเพื่อควบคุมการเก็บ ขน และกำจัดมูลฝอย

ตามพระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 มาตรา 20 ได้ให้อำนาจองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่จะออกข้อกำหนดท้องถิ่นเพื่อควบคุมการเก็บ ขน และกำจัดมูลฝอยไม่ว่าจะเป็นการห้ามทิ้งมูลฝอยในที่หรือทางสาธารณะ การให้เจ้าของหรือผู้ครอบครองอาคารจัดเก็บมูลฝอยด้วยวิธีการที่กำหนด ทั้งยังมีอำนาจออกข้อกำหนดเพื่อเก็บค่าธรรมเนียมในการให้บริการขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการเก็บ ขน และกำจัดสิ่งปฏิกูลอีกด้วย (พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535, มาตรา 20)

จะเห็นได้ว่าแม้พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 จะให้อำนาจองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการจัดการมูลฝอยที่เป็นพิษหรืออันตรายจากชุมชนอย่างกว้างขวางก็จริง แต่การจัดการมูลฝอยธรรมดานั้น แท้จริงแล้วย่อมแตกต่างจากการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีส่วนประกอบที่ซับซ้อนยากแก่การจัดการอย่างมาก นอกจากนั้น ยังไม่มีบทบัญญัติให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นคัดแยกของเสียอันตราย เช่น ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ออกจากขยะมูลฝอยทั่วไป รวมถึงพระราชบัญญัติการสาธารณสุขนั้นไม่ได้กำหนดบทลงโทษสำหรับประชาชนที่ฝ่าฝืนข้อกำหนดของท้องถิ่นดังกล่าว หากประชาชนฝ่าฝืนและทิ้งของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยขัดกับข้อกำหนดท้องถิ่น ก็ไม่มีโทษสำหรับการกระทำนั้น (วิลาสินี อินทรพรอุดม, “มาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียอันตรายจากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์,”

(วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตคณะ นิติศาสตร์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2549, หน้า 70) นอกจากปัญหากฎหมายดังกล่าวแล้ว การดำเนินการขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นยังมีปัญหาในด้านอื่นๆ อีก ไม่ว่าจะเป็นข้อจำกัดทางการเมืองในการเก็บค่าธรรมเนียมการจัดการขยะ ซึ่งนักการเมืองท้องถิ่นมองว่าเป็นมาตรการที่ไม่ได้รับความนิยมจากประชาชนในพื้นที่ ทั้งอัตราค่าธรรมเนียมในการเก็บและขนมูลฝอยส่วนมากก็กำหนดไว้ในระดับที่ต่ำมาก อีกทั้งองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นส่วนใหญ่ยังขาดทั้งกำลังคน และงบประมาณที่จะจัดการปัญหาดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย ทั้งนี้หากมีการนำหลักการขยายความรับผิดชอบของผู้ผลิตมาใช้แล้ว การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น

(2) การควบคุมกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

การจัดการของเสียจากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของประชาชนในประเทศไทยปัจจุบันนี้ วิธีการจัดการหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ การขายต่อให้ผู้ประกอบการรับซื้อของเก่า สำหรับมาตรการควบคุมการประกอบการรับซื้อของเก่านั้น พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 ให้อำนาจแก่รัฐมนตรีว่าการกระทรวงสาธารณสุขที่จะกำหนดให้กิจการใดเป็นกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพได้ โดยการประกาศในราชกิจจานุเบกษา (พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535, มาตรา 31) ทั้งนี้ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นหากเห็นว่ากิจการใดที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพซึ่งรัฐมนตรีประกาศกำหนดควรถูกควบคุมในท้องถิ่นของตน ก็อาจออกข้อกำหนดท้องถิ่นกำหนดให้ประเภทกิจการนั้นเป็นกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพซึ่งอาจถูกควบคุมในท้องถิ่นของตนได้ (พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535, มาตรา 32)

กรณีดังกล่าวเกี่ยวข้องกับจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเด็นที่เกี่ยวกับการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยผู้ประกอบการรับซื้อของเก่า กล่าวคือ ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง กิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ พ.ศ. 2558 (ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 132 ตอนพิเศษ 165 ง ลงวันที่ 17 กรกฎาคม 2558) ซึ่งออกโดยอาศัยอำนาจตามมาตรา 31 แห่งพระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 ได้กำหนดให้กิจการสะสมวัตถุหรือสิ่งของที่ชำรุด ใช้แล้วหรือเหลือใช้ เป็นกิจการอื่นๆ ที่เป็นกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง กิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ พ.ศ. 2558, ข้อ 3) จะเห็นได้ว่าผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าจะจัดอยู่ในข่ายกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพประเภทนี้ ดังนั้นหากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นใดเห็นว่ากิจการรับซื้อของเก่าควรถูกควบคุมในท้องถิ่นของตนแล้ว ก็อาจออกข้อกำหนดท้องถิ่นกำหนดให้กิจการรับซื้อของเก่าเป็นกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพในท้องถิ่นของตนได้ สำหรับการควบคุมกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพนั้น พระราชบัญญัติการสาธารณสุขฯ ได้นำวิธีการออกใบอนุญาตมาใช้ กล่าวคือ การประกอบกิจการรับซื้อของเก่าในลักษณะที่เป็น

การค้างจะกระทำไม่ได้เว้นแต่จะได้รับใบอนุญาตจากเจ้าพนักงานท้องถิ่นเสียก่อน ทั้งนี้ ในการออกใบอนุญาต เจ้าพนักงานท้องถิ่นอาจกำหนดเงื่อนไขใดๆ ให้ผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าต้องปฏิบัติตามก็ได้ (พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535, มาตรา 33) ซึ่งเมื่อพิจารณาประกอบกับกฎกระทรวงกำหนดหลักเกณฑ์ วิธีการ และมาตรการในการควบคุมสถานประกอบการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ พ.ศ. 2545 (ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 119 ตอนที่ 86 ก ลงวันที่ 9 กันยายน 2545) ข้อ 14 ซึ่งกำหนดว่า “สถานประกอบการใดที่การประกอบกิจการอาจก่อให้เกิดมลพิษทางเสียงหรือความสั่นสะเทือนมลพิษทางอากาศ มลพิษทางน้ำ ของเสียอันตราย หรือมีการใช้สารเคมีหรือวัตถุอันตรายจะต้องดำเนินการควบคุมและป้องกันมิให้เกิดผลกระทบจนเป็นเหตุรำคาญหรือเป็นอันตรายต่อสุขภาพของพนักงานและผู้อยู่อาศัยบริเวณใกล้เคียง”

ดังนั้น ในบริบทของการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยผู้ประกอบการรับซื้อของเก่านั้น อาจก่อให้เกิดมลพิษในหลายลักษณะ ทั้งส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังมีสารอันตรายบางอย่าง ผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าที่ได้รับใบอนุญาตจากเจ้าพนักงานท้องถิ่น จึงต้องควบคุมและป้องกันมิให้การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ก่อให้เกิดผลกระทบจนเป็นเหตุรำคาญหรือเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนใกล้เคียงได้

อย่างไรก็ตาม มีข้อสังเกตว่าของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ถือได้ว่าเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีส่วนประกอบที่ซับซ้อนและมีความจำเป็นที่ต้องใช้เทคโนโลยีในการรีไซเคิลที่ทันสมัยผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าอาจไม่มีทั้งเงินทุนและกำลังคนที่จะดำเนินการได้ นอกจากนี้แล้วสารอันตรายทั้งตะกั่ว สารหนูไฟ โบรมีน และแคดเมียมที่เป็นส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีความเป็นพิษสูง หากแก่การป้องกันมิให้รั่วไหลสู่ดิน ระบบน้ำใต้ดินหรือแหล่งน้ำธรรมชาติได้จึงอาจกล่าวได้ว่าไม่ควรให้ผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

(3) พระราชบัญญัติควบคุมการขายทอดตลาดและค่าของเก่า พุทธศักราช 2474

นอกจากการกำหนดให้ผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าเป็นกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพตามพระราชบัญญัติการสาธารณสุขแล้ว ยังมีพระราชบัญญัติควบคุมการขายทอดตลาดและค่าของเก่า พุทธศักราช 2474 กำหนดให้ผู้ประกอบการรับซื้อของเก่า (พระราชบัญญัติควบคุมการขายทอดตลาดและค่าของเก่า พุทธศักราช 2474, มาตรา 3) ต้องได้รับอนุญาตจากพนักงานเจ้าหน้าที่ (พระราชบัญญัติควบคุมการขายทอดตลาดและค่าของเก่า พุทธศักราช 2474, มาตรา 4) อย่างไรก็ตาม พระราชบัญญัติฉบับดังกล่าวไม่มีมาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการจัดการโดยขายต่อให้ผู้รับซื้อของเก่านั้นอาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม

ตามมาอย่างมากตามที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้น จึงควรมีการออกกฎหมายห้ามมิให้มีการขายของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แก่ผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าต่อไป

(4) พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522

การดัดแปลงตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 หมายถึง “เปลี่ยนแปลงต่อเติม เพิ่ม ลด หรือขยายซึ่งลักษณะขอบเขต แบบ รูปทรง สัดส่วน น้ำหนัก เนื้อที่ของโครงสร้างของอาคารหรือส่วนต่างๆ ของอาคารซึ่งได้ก่อสร้างไว้แล้วให้ผิดไปจากเดิม และมีใช้การซ่อมแซมหรือการดัดแปลงที่กำหนดในกฎกระทรวง” ดังนั้น การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับติดตั้งบนหลังคาบนอาคาร บ้านเรือนของประชาชน ย่อมต้องด้วยนิยามของคำว่าดัดแปลงตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคารฯ ดังกล่าว และอาจต้องได้รับใบอนุญาตหรือต้องแจ้งให้เจ้าพนักงานท้องถิ่นทราบก่อนดำเนินการด้วย (พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522, มาตรา 21) ด้วยผลจากพระราชบัญญัติฉบับดังกล่าว สร้างความลำบากให้แก่ประชาชนที่ต้องการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับติดตั้งบนหลังคาตามนโยบายการส่งเสริมการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนของรัฐบาล ต่อมาจึงได้มีการออกกฎกระทรวง ฉบับที่ 65 (พ.ศ. 2558) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 (ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 132 ตอนที่ 100 ก ลงวันที่ 16 ตุลาคม 2558) ซึ่งแก้ไขเพิ่มเติมกฎกระทรวง ฉบับที่ 11 (พ.ศ. 2528) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ยกเว้นสำหรับกรณีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารอยู่อาศัยที่มีขนาดพื้นที่ติดตั้งไม่เกิน 160 ตารางเมตร และมีน้ำหนักรวมไม่เกิน 20 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ไม่ให้ถือว่าเป็นการดัดแปลงตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคารฯ อันส่งผลให้ประชาชนไม่จำเป็นต้องขอใบอนุญาตดัดแปลงอาคารต่อเจ้าพนักงานท้องถิ่น และทำให้เห็นนโยบายการส่งเสริมการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนดำเนินไปด้วยดีมากขึ้น (กฎกระทรวง ฉบับที่ 11 (พ.ศ. 2528) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522, ข้อ 1)

อย่างไรก็ตาม พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 นั้น ไม่มีกลไกในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ไว้โดยเฉพาะแต่อย่างใด

(5) พระราชบัญญัติรักษาความสะอาดและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของบ้านเมือง พ.ศ. 2535

พระราชบัญญัติฉบับนี้เพิ่งมีการแก้ไขเพิ่มเติม (ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 134 ตอนที่ 5 ก ลงวันที่ 15 มกราคม 2560) และมีการกำหนดมาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียอันตรายซึ่งอาจนำมาใช้ในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยกำหนดให้เป็นอำนาจของราชการส่วนท้องถิ่นในการจัดการสิ่งปฏิกูลและมูลฝอยในพื้นที่ของตน อันมีลักษณะใกล้เคียงกับมาตรการทางกฎหมายตามพระราชบัญญัติการสาธารณสุขพ.ศ. 2535 อย่างไรก็ตาม พระราชบัญญัติฉบับนี้มี

การกำหนดการจัดการของเสียอันตรายไว้โดยเฉพาะ โดยให้เป็นไปตามกฎหมายว่าด้วยโรงงาน เว้นแต่กรณีของเสียอันตรายปะปนอยู่กับสิ่งปฏิกูลและมูลฝอยที่ราชการส่วนท้องถิ่นจัดเก็บให้ราชการส่วนท้องถิ่นแจ้งให้พนักงานเจ้าหน้าที่ตามกฎหมายว่าด้วยโรงงานมาดำเนินการตามกฎหมายว่าด้วยโรงงานต่อไปภายในสามวันนับแต่วันที่ได้รับแจ้ง หากมิได้ดำเนินการ ให้ราชการส่วนท้องถิ่นดำเนินการกับสิ่งปฏิกูลและมูลฝอยนั้นตามที่เห็นสมควร (พระราชบัญญัติรักษาความสะอาดและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของบ้านเมืองพ.ศ. 2535, มาตรา 34/1 วรรคหก)

จะเห็นได้ว่าตามพระราชบัญญัติฉบับนี้กำหนดให้นำกฎหมายว่าด้วยโรงงานมาใช้ในการจัดการของเสียอันตราย ซึ่งอาจพออนุมานได้ว่าของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นของเสียอันตรายตามกฎหมายว่าด้วยโรงงานด้วยดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และถือว่าพระราชบัญญัติฉบับนี้กำหนดมาตรการในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีที่เป็นรูปธรรมและเฉพาะเจาะจงมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีของเสียอันตรายปะปนกับสิ่งปฏิกูลและมูลฝอยที่ราชการส่วนท้องถิ่นจัดเก็บภายหลังแจ้งพนักงานเจ้าหน้าที่ตามกฎหมายว่าด้วยโรงงานแล้ว และพนักงานเจ้าหน้าที่มิได้จัดการภายในเวลา 3 วัน พระราชบัญญัติฉบับนี้กำหนดให้ราชการส่วนท้องถิ่นมีอำนาจจัดการกับของเสียอันตรายดังกล่าวตามสมควร โดยมีได้กำหนดให้ผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เข้ามามีส่วนร่วมในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่อย่างใด

3.2 ร่างพระราชบัญญัติ และนโยบายที่เกี่ยวข้องกับของเสียอิเล็กทรอนิกส์

ร่างพระราชบัญญัติ และนโยบายที่เกี่ยวข้องกับของเสียอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ มีดังนี้

3.2.1 ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์ แนวคิดในการจัดทำกฎหมายระดับพระราชบัญญัติที่เกี่ยวกับการจัดการของเสียจากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะในลักษณะเดียวกับประเทศในกลุ่มสหภาพยุโรปนั้นมีขึ้นเป็นระยะเวลานานแล้ว โดยเจตนารมณ์ในการร่างกฎหมายในลักษณะเช่นนี้ขึ้นก็เพื่อแก้ไขปัญหาจากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่หมดอายุการใช้งาน เช่น โทรทัศน์ คอมพิวเตอร์ เครื่องปรับอากาศ เครื่องซักผ้า โทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะอายุการใช้งานผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สั้นลงด้วยสาเหตุมาจากพฤติกรรมของผู้บริโภคที่ต้องการใช้เทคโนโลยีอันทันสมัย และการออกแบบผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตโดยร่างกฎหมายลักษณะนี้มีได้มุ่งหมายให้นำมาใช้ในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉพาะ แต่มักเปิดช่องให้สามารถกำหนดของเสียจาก

ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นให้อยู่ในบังคับของร่างกฎหมายดังกล่าวได้ อีกทั้งหลักการจัดการก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน

กรมควบคุมมลพิษจัดทำร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์และซากผลิตภัณฑ์อื่น พ.ศ. ... ขึ้นอันเป็นผลสืบเนื่องจากการศึกษากฎหมายและประสบการณ์การจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศต่างๆ กว่า 10 ประเทศ ตลอดจนมีการสัมมนาภาคส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งผู้ผลิต ผู้จัดจำหน่ายและโรงงานรีไซเคิล และได้มีการจัดประชุมรับฟังความคิดเห็นเกี่ยวกับร่างพระราชบัญญัติฉบับดังกล่าวหลายครั้ง ยิ่งไปกว่านั้น ได้มีการส่งหนังสือเวียนพร้อมแนบร่างพระราชบัญญัตินี้ให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องให้ความเห็นประกอบอีกด้วย แสดงให้เห็นว่าหลักการพื้นฐานและสาระสำคัญของร่างพระราชบัญญัตินี้ดังกล่าวผ่านกระบวนการมีส่วนร่วมของประชาชนและภาคส่วนต่างๆ อย่างครบถ้วน (สุจิตรา วาสนาดำรงดี, “ร่างพ.ร.บ. การจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (ฉบับปรับปรุงแก้ไข): ความหวังหรือความสิ้นหวัง?”, สืบค้นเมื่อวันที่ 11 มกราคม 2563, จาก <https://thaipublica.org/2015/11/sujittra-e-waste/>) รวมทั้งผ่านความเห็นชอบในหลักการจากคณะรัฐมนตรีแล้วเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 โดยคณะรัฐมนตรีมอบหมายให้สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกาพิจารณาปรับปรุงแก้ไขร่างพระราชบัญญัติฉบับดังกล่าว ซึ่งคณะกรรมการกฤษฎีกา (คณะพิเศษ) ได้ปรับแก้ไขแล้วเสร็จตามหนังสือสำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา ค่วนที่สุด ที่ นร 0907/570 ลงวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ.2559 (นภวิศ บัวสว่าง, “ร่าง) พระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์”) ซึ่งการปรับปรุงแก้ไขดังกล่าวเป็นการแก้ไขในหลักการสำคัญและแตกต่างจากหลักการที่กำหนดในร่างพระราชบัญญัติฉบับเดิมอย่างมาก ทั้งมีการเปลี่ยนแปลงชื่อร่างพระราชบัญญัติฉบับดังกล่าวเป็น “ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พ.ศ. ...” และกรมควบคุมมลพิษได้ดำเนินการรับฟังความคิดเห็นจากประชาชนต่อร่างพระราชบัญญัติฉบับดังกล่าวครั้งแรกเมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน พ.ศ. 2559 และได้มีการดำเนินการอย่างต่อเนื่องเป็นลำดับ โดยมีกำหนดการรับฟังความคิดเห็นจากประชาชนอีกครั้งในช่วงวันที่ 7-31 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 ทั้งนี้ มีข้อสังเกตในเบื้องต้นว่า ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตามนิยามของร่างพระราชบัญญัติฉบับนี้ให้หมายความรวมถึงเครื่องใช้หรืออุปกรณ์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าด้วย (ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ. ..., มาตรา 4) เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า จึงถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่งตามร่างพระราชบัญญัติฉบับนี้ และแม้ว่าตามมาตรา 5 แห่งร่างพระราชบัญญัติฉบับดังกล่าวได้กำหนดให้คอมพิวเตอร์เครื่อง โทรศัพท์และโทรศัพท์ไร้สาย

เครื่องปรับอากาศ เครื่องรับ โทรทัศน์ และตู้เย็น เป็นผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกควบคุมตามร่างพระราชบัญญัติฉบับนี้ก็ตาม แต่ในมาตราดังกล่าวก็ได้เปิดช่องไว้ด้วยว่าผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นก็อาจถูกควบคุมตามพระราชบัญญัติฉบับนี้ได้หากมีการกำหนดไว้ในกฎกระทรวง (ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ., มาตรา 5) อาศัยเหตุผลดังกล่าวจึงอาจนำมาตราทางกฎหมายที่กำหนดไว้ในร่างพระราชบัญญัติฉบับนี้มาปรับใช้ในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคตต่อไปได้ จึงควรรศึกษาร่างพระราชบัญญัตินี้เพิ่มเติมด้วย

3.2.2 มาตรการควบคุมเจ้าของหรือผู้ครอบครองซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และผู้ประกอบการรับซื้อของเก่า

มาตรา 7 แห่งร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ. ... กำหนดว่า “ห้ามมิให้ผู้ใดทิ้งซากผลิตภัณฑ์ในที่สาธารณะ ที่รกร้างว่างเปล่า หรือทิ้งปะปนกับขยะมูลฝอย” กรณีดังกล่าวเป็นการกำหนดให้เจ้าของหรือผู้ครอบครองจัดการกับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างเหมาะสมและเป็นการคัดแยกของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ออกจากมูลฝอยทั่วไปซึ่งใช้วิธีการจัดการที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นแล้วมีการกำหนดโทษทางอาญา กรณีมีการฝ่าฝืนบทบัญญัติดังกล่าวไว้ด้วย (ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ., มาตรา 23)

นอกจากนี้ ร่างพระราชบัญญัติฉบับนี้ยังกำหนดห้ามมิให้ถอดแยกชิ้นส่วนของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ เว้นแต่เข้ากรณีตามที่กฎหมายกำหนด (ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ., มาตรา 8) ทั้งยังห้ามมิให้มีการรับคืนจัดเก็บ หรือรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย เว้นแต่จัดทำโดยศูนย์รับคืนซากผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นทะเบียนตามกฎหมายแล้วเท่านั้น (ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ., มาตรา 9) กรณีดังกล่าวเป็นการควบคุมผู้ประกอบการรับซื้อของเก่ามิให้เข้ามายุ่งเกี่ยวกับการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและลดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนที่เกิดจากการประกอบการรับซื้อของเก่าเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นที่อำเภอเมืองชัย จังหวัดกาฬสินธุ์และชุมชนซอยเสือใหญ่ กรุงเทพมหานครได้ ทั้งนี้ หลักการดังกล่าวนี้แตกต่างจากที่กำหนดไว้ในร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์และซากผลิตภัณฑ์อื่น พ.ศ. ... ที่ยอมรับบทบาทของผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าในลักษณะของเครือข่ายรับคืนซากผลิตภัณฑ์ เหตุที่ร่างพระราชบัญญัติฉบับเดิมยังยอมรับผู้ประกอบการรับซื้อของเก่า นั้น เพราะตระหนักว่าประชาชนเคยชินกับการจัดการของเสียจากผลิตภัณฑ์จำหน่ายให้แก่ผู้ประกอบการรับ

ชื่อของเก่าและเป็นการยากที่จะยกเลิกการจัดการในลักษณะดังกล่าวในทันที แต่ต้องให้ประชาชนปรับตัวและสร้างความตระหนักถึงผลเสียของการจัดการในลักษณะดังกล่าว พร้อมขึ้นทะเบียนผู้ประกอบการรับซื้อของเก่ากับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นไว้ด้วย

3.2.3 มาตรการควบคุมผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีหน้าที่รับคืน จัดเก็บ และรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นของผู้ผลิตรายใด ตลอดจนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและของผู้ผลิตที่เลิกดำเนินกิจการแล้ว (ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ., มาตรา 14) อย่างไรก็ตาม มาตรการทางกฎหมายที่กำหนดหน้าที่และความรับผิดชอบของผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สำคัญที่สุด คือ การกำหนดให้ผู้ผลิตจัดทำแผนความรับผิดชอบในการจัดการซากผลิตภัณฑ์เสนอต่อกรมควบคุมมลพิษภายในวันที่ 31 มีนาคมของทุกปี หากกรมควบคุมมลพิษเห็นว่าแผนความรับผิดชอบดังกล่าวไม่ครบถ้วน หรือไม่มีประสิทธิภาพ หรือการดำเนินการตามแผนความรับผิดชอบดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือสุขภาพอนามัยของประชาชน กรมควบคุมมลพิษอาจมีคำสั่งให้ผู้ผลิตแก้ไขได้ หากผู้ผลิตฝ่าฝืนไม่แก้ไขภายในเวลาที่กำหนดให้ถือว่าผู้ผลิตไม่จัดทำแผนความรับผิดชอบในการจัดการซากผลิตภัณฑ์ (ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ., มาตรา 16)

กรณีที่ผู้ผลิตฝ่าฝืนไม่จัดทำแผนความรับผิดชอบในการจัดการซากผลิตภัณฑ์หรือกรณีที่กฎหมายถือว่าผู้ผลิตไม่จัดทำแผนความรับผิดชอบดังกล่าวตามมาตรา 16 วรรคสามนั้น ร่างพระราชบัญญัติดังกล่าวกำหนดโทษทางอาญาสำหรับการฝ่าฝืนเอาไว้ด้วย 126 แผนความรับผิดชอบในการจัดการซากผลิตภัณฑ์ต้องประกอบด้วยประมาณการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จำหน่ายในแต่ละปีและเป้าหมายในการรวบรวมของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนั้นแล้วต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับศูนย์รับคืนซากผลิตภัณฑ์ และวิธีการรับคืน การจัดเก็บ การรวบรวม และการเก็บรักษาซากผลิตภัณฑ์โดยคำนึงถึงความสะดวกของผู้บริโภค ตลอดจนวิธีการขนส่งของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังโรงงานที่ได้รับอนุญาตตามกฎหมาย ยิ่งไปกว่านั้นต้องมีรายงานผลการดำเนินการในรอบปีที่ผ่านมาอีกด้วย (ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ., มาตรา 15)

เป็นที่น่าสังเกตว่าตามร่างพระราชบัญญัติฉบับนี้กำหนดให้ผู้ผลิตเป็นผู้กำหนดเป้าหมายการรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตนเอง ซึ่งแตกต่างจากร่างพระราชบัญญัติเดิมที่ให้รัฐมนตรีว่าการกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยความเห็นชอบของคณะกรรมการจัดการซากผลิตภัณฑ์อาจออกประกาศกำหนดเป้าหมายที่ผู้ผลิตแต่ละรายต้องเก็บ

รวบรวมซากผลิตภัณฑ์และนำกลับมาใช้ใหม่ในแต่ละปี การกำหนดเป้าหมายการเก็บรวบรวมซากเซลล์แสงอาทิตย์นับเป็นเครื่องมือสำคัญของรัฐ ในการกระตุ้นให้ผู้ผลิตดำเนินการเรียกคืนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างจริงจังและเป็นกลไกสำคัญของหลักการขยายความรับผิดชอบของผู้ผลิต ดังนั้น เมื่อผู้ผลิตสามารถกำหนดเป้าหมายการรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้เองแล้ว ผู้ผลิตย่อมกำหนดให้เป็นประโยชน์แก่ตนเองและไม่อาจทำให้การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังเช่นที่เกิดขึ้นในประเทศอินเดียซึ่งกฎหมายว่าด้วยการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์มีกำหนดเป้าหมายการเก็บรวบรวมซากผลิตภัณฑ์ไว้ จนในที่สุดต้องมีการร่างกฎหมายใหม่ในปี ค.ศ. 2015

ทั้งนี้ ผู้ผลิตต้องดำเนินการตามแผนความรับผิดชอบต่อในการจัดการของเสียจากผลิตภัณฑ์ดังกล่าวให้ถูกต้องและครบถ้วน มิเช่นนั้นต้องระวางโทษปรับไม่เกินห้าแสนบาท และให้ปรับอีกวันละหนึ่งหมื่นบาทจนกว่าจะปฏิบัติให้ถูกต้อง (ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ., มาตรา 30)

มาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ การกำหนดให้ผู้ผลิตจัดตั้งศูนย์รับคืนซากผลิตภัณฑ์ขึ้นเพื่อรับคืน จัดเก็บ และรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จากเจ้าของหรือผู้ครอบครอง ทั้งนี้ ผู้ผลิตอาจร่วมกับผู้ผลิตรายอื่นหรือทำความตกลงกับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นเพื่อให้ดำเนินการจัดตั้งศูนย์รับคืนซากผลิตภัณฑ์ขึ้นแทนก็ได้ ต่อมาเมื่อศูนย์รับซากผลิตภัณฑ์รับคืนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปแล้ว ต้องนำส่งไปยังโรงงานตามกฎหมายว่าด้วยโรงงานต่อไป (ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ., มาตรา 10) นอกจากนั้นแล้วต้องมีการจัดทำรายงานชนิดและปริมาณของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำส่งในแต่ละปีเสนอต่อกรมควบคุมมลพิษอีกด้วย ลักษณะเช่นนี้มีความคล้ายคลึงกับศูนย์รวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ (collection facilities หรือ collection point) ของประเทศในสหภาพยุโรป

มีข้อสังเกตอีกประการหนึ่ง คือ ผู้ผลิตตามร่างพระราชบัญญัติฉบับนี้หมายความว่ารวมถึงผู้นำเข้าด้วยซึ่งจะช่วยอุดช่องว่างในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย

3.2.4 มาตรการทางกฎหมายและนโยบายที่เกี่ยวข้องในการจัดการซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามแผนแม่บทการบริหารจัดการขยะมูลฝอยของประเทศ พ.ศ. 2559 – 2564

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจัดทำแผนแม่บทการบริหารจัดการขยะมูลฝอยของประเทศ พ.ศ. 2559 – 2564 ขึ้น เพื่อลดปัญหาขยะมูลฝอยตามวาระแห่งชาติของรัฐบาล มีกรอบแนวคิดหลักเพื่อมุ่งเน้นการลดปริมาณขยะมูลฝอยจากแหล่งกำเนิด การนำขยะกลับมาใช้ซ้ำหรือใช้ใหม่ การกำจัดขยะมูลฝอยแบบเป็นศูนย์รวม ตลอดจน

สร้างความร่วมมือของทุกภาคส่วนในสังคม หากพิจารณาคำนิยามตามที่กำหนดในแผนแม่บทฉบับดังกล่าวแล้ว ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจถือได้ว่าเป็นของเสียอันตรายชุมชน ที่หมายความว่าของเสียที่เป็นพิษหรืออันตรายที่มาจากครัวเรือนหรือโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยข้อมูล ณ เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีสถานที่รวบรวมของเสียอันตรายเพื่อส่งไปกำจัดจำนวนเพียง 11 แห่งเท่านั้น

ดังนั้น เพื่อการบริหารจัดการของเสียอันตรายชุมชนอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นระบบ และสร้างความมีส่วนร่วมของทุกภาคส่วนในสังคม แผนแม่บทฉบับดังกล่าวจึงกำหนดเป้าหมายการดำเนินการจัดการของเสียอันตรายชุมชนไว้ โดยกำหนดว่าภายในปี พ.ศ. 2564 ต้องรวบรวมของเสียอันตรายชุมชนและนำไปกำจัดอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการในอัตราร้อยละ 30 ของปริมาณของเสียอันตรายชุมชนที่เกิดขึ้นทั้งหมด นอกจากนั้นแล้วยังกำหนดเป้าหมายให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นดำเนินการคัดแยกของเสียอันตรายที่ต้นทางให้ได้ในอัตราร้อยละ 50 ขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นทั้งหมดอีกด้วย

และเพื่อให้บรรลุเป้าหมายข้างต้น แผนแม่บทฉบับดังกล่าวจึงกำหนดแผนดำเนินการไว้โดยสรุป กล่าวคือ ให้อำนาจองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นดำเนินการคัดแยกของเสียอันตรายชุมชนแต่ละประเภทให้ถูกต้อง โดยเก็บรวบรวมในภาชนะรองรับขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นและส่งไปกำจัดอย่างถูกวิธี โดยให้จังหวัดจัดหาพื้นที่ที่เหมาะสมเพื่อจัดให้มีสถานที่รวบรวมและจัดการของเสียอันตรายชุมชนอย่างน้อยจังหวัดละ 1 แห่ง ตั้งอยู่ที่องค์การบริหารส่วนจังหวัดหรือองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่มีความพร้อม นอกจากนั้น ยังกำหนดให้มีการจัดระบบเรียกคืนซากผลิตภัณฑ์เมื่อหมดอายุการใช้งาน ตั้งแต่การเก็บรวบรวม การรีไซเคิล และการกำจัดอย่างปลอดภัยตามหลักการขยายความรับผิดชอบของผู้ผลิต (extended producer responsibility) ตลอดจนสนับสนุนการเพิ่มโรงงานคัดแยกและรีไซเคิลซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์รวมถึงการพัฒนากฎหมายใหม่ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

จะเห็นได้ว่าแผนแม่บทฉบับดังกล่าว นอกจากจะเป็นการกำหนดนโยบายการจัดการของเสียอันตรายชุมชนแล้ว ยังมีการกำหนดมาตรการการดำเนินการต่างๆ ไว้อย่างเป็นรูปธรรม และมีเป้าหมายชัดเจนสามารถนำมาเป็นแนวทางการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทยในอนาคตได้เป็นอย่างดี ทั้งการนำหลักการจัดการของเสียอย่างยั่งยืน (sustainable waste management) และหลักการขยายความรับผิดชอบของผู้ผลิตมาปรับใช้ยังสอดคล้องกับหลักการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และกฎหมายของต่างประเทศอีกด้วย

3.2.5 มาตรการอื่น

ร่างพระราชบัญญัติฉบับนี้กำหนดให้กรมควบคุมมลพิษทำหน้าที่เผยแพร่ความรู้ และข้อมูลเกี่ยวกับการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกต้อง เหมาะสมเพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องใช้เป็นแนวทางการปฏิบัติ (ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ., มาตรา 18)

นอกจากนี้แล้วกรมควบคุมมลพิษยังมีหน้าที่จัดตั้งศูนย์ประสานงานและเผยแพร่ความรู้และข้อมูลจากผลิตภัณฑ์เพื่อเผยแพร่ข้อมูลเกี่ยวกับการจัดการซากผลิตภัณฑ์และสถานที่ตั้งของศูนย์รับคืนซากผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ประชาชน ได้ทราบและปฏิบัติตามอีกด้วย (ร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ., มาตรา 19) ทั้งนี้บทบาทของศูนย์ประสานงานดังกล่าวทำหน้าที่เพียงให้ข้อมูลที่จำเป็นแก่ประชาชนเท่านั้น ซึ่งแตกต่างกับศูนย์ข้อมูลจากผลิตภัณฑ์ตามมาตรา 22 ของร่างพระราชบัญญัติฉบับเดิมที่ทำหน้าที่ประสานความร่วมมือและแลกเปลี่ยนข้อมูลที่สำคัญระหว่างภาคส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนเผยแพร่ข้อมูลเกี่ยวกับระบบการเก็บรวบรวมหรือช่องทางการส่ง คืนของเสียจากผลิตภัณฑ์ที่ดำเนินการโดยผู้ผลิต ข้อมูลเกี่ยวกับศูนย์รับคืนซากผลิตภัณฑ์ ข้อมูล โรงงานที่ให้บริการจัดการของเสียจากผลิตภัณฑ์ และข้อมูลอื่นเกี่ยวกับการจัดการของเสียจากผลิตภัณฑ์ ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นหน่วยงานรับเรื่องร้องเรียนอีกด้วย ศูนย์ข้อมูลดังกล่าวมีลักษณะคล้าย Clearing house ที่ผู้ผลิตในประเทศเยอรมนีจัดตั้งขึ้นที่เรียกว่า “Stiftung Elektro Altgeräte Register”

จะเห็นได้ว่าร่างพระราชบัญญัติฉบับนี้ได้นำหลักการขยายความรับผิดชอบของผู้ผลิตมาบัญญัติไว้อย่างเป็นรูปธรรม อันจะส่งผลให้ผู้ผลิตเข้ามามีบทบาทในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การกำหนดห้ามมิให้ประชาชนทิ้งของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับมูลฝอยทั่วไป ห้ามถอดแยกชิ้นส่วนของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งจัดตั้งศูนย์รับคืนของเสียจากผลิตภัณฑ์ อันเป็นการยุติการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าอย่างสิ้นเชิง นอกจากนี้ ยังกำหนดให้ผู้ผลิตมีหน้าที่รับคืน จัดเก็บ และรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ และจัดทำแผนความรับผิดชอบต่อในการจัดการของเสียจากผลิตภัณฑ์ ตลอดจนให้กรมควบคุมมลพิษจัดตั้งศูนย์ประสานงานและเผยแพร่ความรู้และข้อมูลของเสียจากผลิตภัณฑ์เพื่อเผยแพร่ความรู้ให้แก่ประชาชนอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ร่างพระราชบัญญัติฉบับนี้มีหลักการสำคัญหลายประการที่แตกต่างจากร่างพระราชบัญญัติเดิมที่คณะรัฐมนตรีให้ความเห็นชอบ เช่น การไม่มีคณะกรรมการจัดการซากผลิตภัณฑ์ ไม่กำหนดบทบาทขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ไม่มีมาตรการควบคุมขั้นตอนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ไม่มีการขึ้นทะเบียนผู้ผลิต

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และไม่กำหนดให้ผู้ผลิตต้องมีความรับผิดชอบทางการเงิน เป็นต้น ซึ่งหลักการที่เปลี่ยนแปลงนี้ล้วนแล้วแต่เป็นหลักการสำคัญของมาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของต่างประเทศซึ่งจะได้ศึกษาต่อไป

3.3 บทสรุปของมาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ และของเสียจากอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทย

แม้ประเทศไทยยังไม่มีกฎหมายเฉพาะในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามสามารถนำกฎหมายที่ใช้บังคับอยู่ในปัจจุบันหลายฉบับมาปรับใช้ในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ทั้งนี้ การพิจารณามาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นควรจำแนกออกเป็นมาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ประกอบการกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และสำหรับประชาชนทั่วไป

สำหรับผู้ประกอบการกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ กฎหมายที่นำมาปรับใช้กับการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ คือ พระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 และพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 พร้อมกฎหมายลำดับรองต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง บทบัญญัติดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังเป็นหน้าที่ของผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้า ซึ่งก็คือเจ้าของหรือผู้ครอบครองของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ไม่มีกฎหมายใดกำหนดให้เป็นหน้าที่ของผู้ผลิตในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่อย่างใด นอกจากนั้นแล้ว แม้ว่าจะมีการกำหนดวิธีการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยการนำกลับมาใช้ใหม่ (reuse) และรีไซเคิล (recycle) เป็นลำดับแรกก็ตาม แต่ก็มีได้มีการกำหนดไว้อย่างเป็นทางการเท่าที่ควร อีกทั้งยังมีผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าที่ไม่เข้าข่ายต้องขอรับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 ซึ่งต้องปฏิบัติตามประมวลหลักการปฏิบัติ (Code of Practice: CoP) นั้น ก็อาจกล่าวได้ว่าเป็นช่องโหว่ทางกฎหมายเนื่องจากการสภาพบังคับทางอาญาและทางปกครองในกรณีไม่ปฏิบัติตามคำสั่งเจ้าพนักงานเท่านั้น ซึ่งอาจทำให้ผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าไม่เกรงกลัวได้ ส่วนมาตรการการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ก็ไม่มีการกำหนดให้ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตรายโดยเฉพาะ เช่นเดียวกับไม่มีการกำหนดเป็นวัตถุอันตรายตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 โดยเฉพาะเช่นกัน แต่อาศัยการแปลความกับกฎหมายที่มีอยู่เท่านั้น

สำหรับการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประชาชนนั้น มาตรการทางกฎหมายที่บังคับใช้อยู่ในปัจจุบัน คือ พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 ซึ่งเป็นกฎหมายที่

ให้อำนาจองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการจัดการขยะ สิ่งปฏิกูล และมูลฝอยต่างๆ อย่างไรก็ตาม มาตรการดังกล่าวเป็นมาตรการที่กำหนดไว้ในการจัดการมูลฝอยทั่วไปเท่านั้น สำหรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นทั้งของเสียอันตรายและขยะอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบด้วยสารอันตรายและ ส่วนประกอบที่ซับซ้อน ทำให้ไม่สามารถจัดการของเสียจากเซลล์อาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังอาจสร้างปัญหาสิ่งแวดล้อมและผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้มากกว่า อันเนื่องมาจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นขาดศักยภาพ เงินทุน และเทคโนโลยีที่ทันสมัยเพียงพอ และแม้ว่าพระราชบัญญัติรักษาความสะอาดและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของบ้านเมือง พ.ศ. 2535 ที่แก้ไขเพิ่มเติมจะกำหนดให้นำกฎหมายว่าด้วยโรงงานมาใช้บังคับในการจัดการของเสียอันตรายก็ตาม แต่หากเป็นกรณีของเสียอันตรายนั้นปะปนกับสิ่งปฏิกูลหรือมูลฝอยที่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นจัดเก็บและพนักงานเจ้าหน้าที่ตามกฎหมายว่าด้วยโรงงานไม่ดำเนินการ ก็ยังคงให้อำนาจองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นจัดการตามสมควร ซึ่งยังสะท้อนความไม่เป็นรูปธรรม เช่นเดิม นอกจากนี้ พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 ยังให้อำนาจองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่จะควบคุมการประกอบการรับซื้อของเก่าในฐานะที่เป็นกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ โดยก่อนการประกอบการรับซื้อของเก่าในลักษณะที่เป็นการค้าจะต้องได้รับใบอนุญาตก่อนจึงจะสามารถประกอบกิจการได้ ทั้งยังสามารถกำหนดเงื่อนไขในการประกอบกิจการ ซึ่งอาจรวมถึงการ กำหนดเงื่อนไขให้ผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าต้องควบคุมและป้องกัน ไม่ให้เกิดมลพิษในรูปแบบต่างๆ ด้วยก็ตาม แต่ก็เป็นการกำหนดไว้เพียงกว้างๆ และไม่เหมาะสม

เมื่อในปัจจุบันมาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทยยังไม่เพียงพอ ทั้งไม่มีกฎหมายที่มีเจตนารมณ์เพื่อจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉพาะ จึงมีแนวความคิดที่จะจัดทำร่างกฎหมายว่าด้วยการจัดการของเสียจากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขึ้น ซึ่งต่อมากรมควบคุมมลพิษได้จัดทำร่างกฎหมายในลักษณะดังกล่าวขึ้นและคณะรัฐมนตรีมีมติเห็นชอบในหลักการและมอบหมายให้สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกาปรับปรุงแก้ไขร่างพระราชบัญญัติดังกล่าว จากนั้นสำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกาได้ตรวจพิจารณาแล้วเสร็จและได้จัดทำร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ. ... ทั้งนี้ ร่างพระราชบัญญัตินับดังกล่าวเป็นการนำหลักการขยายความรับผิดชอบของผู้ผลิตมากำหนดไว้เป็นครั้งแรก ทำให้ผู้ผลิตเข้ามามีบทบาทในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างเป็นระบบ และกำหนดวิธีการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของเจ้าของหรือผู้ครอบครองที่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ตั้งแต่การห้ามมิให้ประชาชนทิ้งของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับมูลฝอยทั่วไป ห้ามถอดแยกชิ้นส่วนของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งมีการจัดตั้งศูนย์รับคืนของเสียจากผลิตภัณฑ์อันเป็นการจำกัด

บทบาทของผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนั้นแล้วยังกำหนดให้ผู้ผลิตมีหน้าที่รับคืน จัดเก็บและรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ และจัดทำแผนความรับผิดชอบในการจัดการซากผลิตภัณฑ์อีกด้วย อย่างไรก็ตามร่างพระราชบัญญัติฉบับนี้ก็ยังมีหลักการแตกต่างจากมาตรการทางกฎหมายของต่างประเทศซึ่งอาจทำให้การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรจึงต้องมีการปรับปรุงร่างพระราชบัญญัตินี้ต่อไป

ในปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน อย่างไรก็ตาม มาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทยยังมีช่องโหว่ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในทางปฏิบัติอยู่มาก การพัฒนามาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจำเป็นต้องศึกษาหลักการในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนมาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของต่างประเทศ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาของประเทศไทยที่เกิดขึ้นด้วย

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาและเตรียมพร้อมเพื่อรองรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคตของประเทศไทย จำเป็นที่จะต้องศึกษาตัวอย่างโครงการวิจัยพัฒนารีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ โครงการวิจัยพัฒนารีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ศึกษารวบรวมในรายงานนี้ ส่วนใหญ่เป็นงานวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของต่างประเทศ มีบางโครงการที่เกือบจะอยู่ในเชิงพาณิชย์หรือขั้นตอนการสาธิต ในขณะที่บางโครงการยังอยู่ในห้องปฏิบัติการหรือขั้นตอนทดลอง

Noda, M., Kushiya, K., Saito, H., Komoto, K., and Matsumoto, T. (2557) มูลนิธิ Kitakyushu เพื่อความก้าวหน้าของอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประเทศญี่ปุ่น (Kitakyushu Foundation for the Advancement of Industry, Science and Technology, Japan; FAIS) และอื่นๆ ได้ศึกษาพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการถอดหรือโครงอลูมิเนียม และการรีไซเคิลด้วยความร้อน โดยการเผาไหม้ EVA เรซิน เครื่องมือทำการรีไซเคิลโดยใช้ อุปกรณ์ถ่ายโอนซิงโครไนซ์ (synchronized) โดยตัวควบคุมระบบอัตโนมัติเพื่อรักษาความสม่ำเสมอจากขั้นตอนแรกไปจนถึงการกู้คืนวัสดุที่มีค่า โดยขั้นตอนแรกโครงอลูมิเนียมจะถูกแยกออก ขั้นตอนถัดไป แผ่นรองด้านหลังจะถูกแยกออกโดยเครื่อง Milling เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยร้าวจากความร้อน ขั้นตอนหลังจากการถอดแยก โครงอลูมิเนียมถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในขณะที่แผ่นรองด้านหลังที่ถอดออกจะถูกกำจัดเป็นขยะอุตสาหกรรม ของเสีย

จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีกรอบอลูมิเนียมและแผ่นรองหลังถูกทำให้ร้อน เรซิน EVA ถูกย่อยสลายด้วยความร้อนในเตาหลอม และก๊าซที่สลายตัวจะถูกดูดแล้วบำบัดต่อ เตาหลอมกำหนดและควบคุมอุณหภูมิที่ (pre-heated) 350 - 500 องศาเซลเซียส (สำหรับ c-Si) แล้วจึงทำให้เย็นลงที่ (cooled down) 250 องศาเซลเซียส ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของ EVA เรซิน จะถูกนำความร้อนกลับไปใช้ยังเตาเผา ส่วนประกอบทั้งหมด รวมทั้งแผ่นแก้ว เซลล์ Si และ Electrodes จะได้รับการกู้คืนหลังจากผ่านกระบวนการหลักทั้งสามขั้นก่อน เทคโนโลยีนี้สามารถแยกโครงสร้างโมดูล PV ของ c-Si, ฟิล์มบาง Si และ CIS; สำหรับโมดูล CIS นั้น จะเพิ่มขึ้นขั้นตอนการชุบเพื่อแยกชั้นของอุปกรณ์ CIS หลังจากกระบวนการเหล่านี้ มีเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลเชิงพาณิชย์ และปริมาณการรีไซเคิลอยู่ที่ประมาณ 12 MW/ปี สำหรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si ขึ้นอยู่กับประเภทและขนาด อัตราการรีไซเคิลเกือบร้อยละ 95 รวมถึงการรีไซเคิลด้วยความร้อนของ EVA ซึ่งสามารถลดเชื้อเพลิงที่ใช้ได้ประมาณร้อยละ 90 สำหรับการทำความร้อนของเตาหลอม แก้วที่นำกลับมาใช้ใหม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่เป็น Float glass ได้โดยไม่เสียหายมากเกินไป แม้ว่ากระบวนการกู้คืนโลหะจากเซลล์ Si และ Electrodes จะไม่รวมอยู่ในเทคโนโลยีประเภทนี้ แต่การกู้คืนเงิน (Silver; Ag) อย่างมีประสิทธิภาพจากเซลล์ Si เป็นไปได้ เนื่องจากการแยกที่สมบูรณ์แบบระหว่างแก้วและเซลล์ Si และในทางกลับกัน เซลล์ Si จะได้รับการกู้คืนเป็นวัสดุ Si เทคโนโลยีนี้ถูกใช้ในบริษัทชินริียว Shimryo ตั้งแต่ปี 2015 และ Shimryo กำลังดำเนิน โครงการพัฒนาเพื่อปรับปรุงให้เป็นเทคโนโลยีเชิงพาณิชย์

Lee, J. -K., Lee, J. -S., *et al.* (2558) สถาบันวิจัยพลังงานแห่งเกาหลี (Korea Institute of Energy Research; KIER) ได้ศึกษากระบวนการกู้คืนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยต้นทุนต่ำ โครงการมุ่งเน้นไปที่การกู้คืน Si cells/Wafers และโลหะมากกว่าแก้ว โดยกระบวนการประกอบด้วยกำจัดการก่อกองจากโครงสร้างที่เคลือบลามิเนตเพื่อกู้คืน Si cells โดยไม่ให้เกิดความเสียหาย การรีไซเคิล Si cells ให้เป็นแผ่น Wafers Si และการกู้คืนโลหะบริสุทธิ์ เช่น Ag และทองแดง (Copper; Cu) จาก Si cells กระบวนการจะเผาไหม้ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิ 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส ภายใต้อุณหภูมิบรรยากาศเพื่อแยกแก้ว เซลล์ Si และ Electrode metals พบว่าขั้นตอนการแยก EVA เรซิน และการทำให้กระจกแตกก่อนกระบวนการเผาไหม้ ทำให้การกู้คืนเซลล์ Si ไม่เสียหาย นอกจากนี้ ยังได้พบว่าเซลล์ Si ที่กู้คืนมานั้น สามารถนำกลับมาใช้ใหม่เป็น Si wafers ได้โดยการกัดด้วยสารเคมี (เช่น กรดไนตริก และ แผ่น Wafers นั้นสามารถนำมาสร้างเซลล์ Si ใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง จึงถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน เซลล์ Si ไม่เพียงแต่สามารถกู้คืนได้หลังจากกระบวนการเผาไหม้ แต่ยังรวมไปถึง Electrode metals และ เศษแก้ว และเทคโนโลยีนี้ได้ขยายเป็น โรงงานต้นแบบในปี 2560

Park, J., *et al.* (2559) สถาบันเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์แห่งเกาหลี (Korea Electronics Technology Institute; KETI) ได้ดำเนินการวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si PV เทคโนโลยีนี้รวมถึงกระบวนการระบายความร้อนสำหรับการแยกโครงสร้างลามิเนต กระบวนการกัดกร่อนด้วยสารเคมีและกระบวนการเชิงกล เมื่อของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV เซลล์เดี่ยวถูกหลอมด้วยความร้อนอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มที่ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที เซลล์ Si จะถูกกู้คืนโดยไม่มีความเสี่ยงใดๆ ดังนั้นเซลล์ Si ที่กู้คืนได้จะถูกกัดกร่อนด้วยกรดไนตริก เพื่อแยก Ag ออก สารเคลือบป้องกันแสงสะท้อน emitter และจุดเชื่อมต่อ p-n ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำกู้คืนจะถูกแยกออกโดยการเจียร (mechanical grinding) ต่อจากนั้น อิเล็กโทรด (Electrode) ที่อยู่ด้านหลังจะถูกแยกออกโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide) Si wafers ที่กู้คืนมาจะถูกนำไปรีไซเคิลเป็น Si cell ก่อนนำมาใช้ใหม่ จากการทดลองประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้นั้นเกือบจะเหมือนกับเซลล์ Si ใหม่ พบว่าเทคโนโลยีนี้เหมาะสมสำหรับเซลล์ Si ที่มีความหนา 0.2 มิลลิเมตร และความหนาของเวเฟอร์ที่กู้คืนมาใช้ได้คือ 0.18 มิลลิเมตร

Yi, Y. -K., *et al.* (2557) มหาวิทยาลัย Chonnam National University ได้พัฒนาเทคโนโลยีที่ประกอบด้วยกระบวนการทางความร้อนสำหรับการแยกโครงสร้างลามิเนตและการกัดกร่อนด้วยสารเคมีเพื่อนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ด้วยการกัดกร่อนด้วยสารเคมี กรดไนตริก (nitric acid) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) ภายใต้การบำบัดด้วยคลื่นความถี่สูง หลังจากผ่านกระบวนการกัดกร่อน Si cell ที่กู้คืนได้นั้นบริสุทธิ์ถึง >ร้อยละ 99.998 ที่ 520 องศาเซลเซียส ด้วย CaO-CaF-SiO₂

Liu, J. (2557) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมแห่งชาติของจีน (The Chinese Research Academy of Environmental Sciences; CRAES) และสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์แห่งประเทศจีน (Electrical Engineering Institute, Chinese Academy of Sciences; IEE CAS) ได้ใช้วิธีการโดยใช้เตาหลอมหลอม อุณหภูมิการเผาไหม้มีสองขั้นตอน โดยที่อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายอยู่ที่ 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส กระบวนการทางความร้อนด้วยออกซิเจนและไนโตรเจนในเตาหลอม หลังจากผ่านกระบวนการเผาไหม้ แก้วและเซลล์ Si เมื่อได้ถูกกู้คืนมาแล้ว เซลล์ Si ถูกบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) กรดไนตริก (nitric acid) กรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) และสิ่งที่ได้หลังจากการกู้คืนคือ Si Ag และ อลูมิเนียม (Aluminum; Al) แม้ว่า จะไม่มีรายละเอียดมาก แต่พบว่ากระบวนการมีการใช้พลังงานสูงและจำเป็นต้องมีมาตรการรับมือในการปล่อยก๊าซพิษและของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาได้ จากการ

ทดลองของเตาหลอมหลอด CRAES ได้พัฒนาเตาเผาขยะสำหรับวิธีระบายความร้อนด้วยอุณหภูมิสูง เตาเผาขยะสามารถกำจัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV เซิงพาณิชย์ และยังได้รับการออกแบบเพื่อกำจัดก๊าซพิษในท้ายกระบวนการด้วยความร้อน ขณะนี้เตาเผาขยะอยู่ในระหว่างการทดลองใช้งาน และพบว่ากระบวนการรวบรวมและรีไซเคิลก๊าซพิษจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุง นอกจากนี้เทคโนโลยีการรีไซเคิล เซลล์ Si ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยการบำบัดด้วยสารเคมียังอยู่ระหว่างการพัฒนาอีกด้วย เซลล์ Si ที่ได้คาดว่าจะถูกนำมาใช้สำหรับผลิตเซลล์ PV

Wang, T. -Y., *et al.* (2555) สถาบันวิจัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมไต้หวัน (Industrial technology research institute, Taiwan; ITRI) และสถาบันอื่นๆ ได้ศึกษาวิจัยวิธีการให้ความร้อนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์เดี่ยว (ขนาดหกนิ้ว) ที่มีโพลีไวนิลฟลูออไรด์ (poly-vinyl-fluoride; PVF) เป็นแผ่นรองหลัง ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์หลังจากรับความร้อนที่ 330 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ในขั้นตอนแรก จากนั้น PVF จะถูกแยกออกจากพื้นผิวด้านหลัง ขั้นตอนที่สองจะให้ความร้อนที่เผาไหม้เพื่อแยก เรซิน EVA และ PVF ออก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาสองชั่วโมง หลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนทั้งสองขั้นตอนนี้แล้ว แก้ว, ชิ้นส่วนเซลล์ Si และ copper ribbons จะถูกกู้คืนมา ขั้นตอนต่อไปคือ

ขั้นตอนที่ 1 : Si chips ถูกกัดกร่อนด้วยกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) เพื่อขจัดขี้ไฟฟ้า Al

ขั้นตอนที่ 2 : ใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) เพื่อขจัดชั้น SiN_x สารเคลือบป้องกันแสงสะท้อน (anti-reflecting coating; ARC) และ Ag

ขั้นตอนที่ 3 : ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) เพื่อขจัดจุดเชื่อมต่อ p-n (p-n junction) และชั้นพื้นผิวด้านหลัง (back-surface-field; BSF)

Mitsubishi materials corporation (2559) กำลังพัฒนาวิธีการขูด (scraping) เพื่อกู้คืนนำกระจกกลับมาใช้ใหม่ กระบวนการขูด (scraping) ด้วยเครื่องจักรที่กระจกฝากรอบเพื่อไม่ให้กระจกเปื้อนด้วยชั้นการห่อหุ้ม (EVA) ด้วยเครื่องมือสามารถกู้คืนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้หนึ่งโมดูลต่อนาที แก้วที่กู้คืนได้จะถูกกรองเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และสันนิษฐานว่าเม็ดแก้วใสที่ได้ถูกนำไปใช้ในงานอื่นต่อไป ส่วนที่เหลือมีแก้วจำนวนเล็กน้อยสามารถบำบัดได้ด้วยเทคโนโลยีการกลั่นโลหะ (metal refinery technology)

Toho Kasei Co., Ltd. (2559) ได้ศึกษาแนวทางของ Toho Kasei คือการขูดชั้นที่ไม่ใช่กระจกด้วยเครื่องจักร สองขั้นตอนแรกคือการขูดแผ่นรองหลัง ชั้นของการห่อหุ้ม ซึ่งรวมถึงเซลล์ Si และชั้นอิเล็กทรอนิกส์ (encapsulation) ขั้นตอนต่อไป ชั้นการห่อหุ้มที่ขูดออกจะได้รับการบำบัดโดยตัวทำละลายที่พัฒนาขึ้น จากนั้นจึงกู้คืนนำ Si, โลหะและพอลิเมอร์อื่นๆ กลับคืนมา ในการนำ Si ที่

มีความบริสุทธิ์สูงกลับมาใช้ใหม่เป็นหนึ่งในเป้าหมายของโครงการ และพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มที่นำกลับมาใช้ใหม่นั้นจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบของเชื้อเพลิงหรือวัสดุทดแทน ในทางกลับกัน แผ่นรองหลังที่ขูดออกจะถูกกำจัดเป็นขยะอุตสาหกรรม ฝาครอบกระจกด้านหลังจะไม่ได้รับความเสียหายจากกระบวนการขูด แม้ว่าจะมีชั้นการห่อหุ้มติดมาเล็กน้อย ชั้นการห่อหุ้มที่ติดดังกล่าวสามารถกำจัดออกได้โดยตัวทำละลายที่ถูกพัฒนาขึ้น นอกจากนี้ตัวทำละลายสามารถใช้ได้กับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ และโครงสร้างก่อนการขูด อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ใช้เวลามากเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนที่ไม่มีกระบวนการขูด

Hamada corporation และ NPC Inc. (2559) ได้ศึกษาและร่วมกันพัฒนาวิธีการแยกชั้นการห่อหุ้มควบคู่ไปกับฝาครอบกระจกโดยใช้เครื่องตัดความร้อน หลังจากถอดโครงสร้างอลูมิเนียมด้วยเครื่องมือและขูดแผ่นรองหลัง โครงสร้างลามิเนตถูกผ่าด้วยเครื่องตัดความร้อน ไปมิดถูกติดตั้งในแนวระนาบของรอยประสานระหว่างกระจกกับชั้นการห่อหุ้ม เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายต่อพื้นผิวแก้ว หลังจากนั้นวัสดุที่ห่อหุ้มและติดอยู่กับพื้นผิวกระจกออกแล้ว แก้วจะถูกกู้คืนกลับมาใช้ใหม่เป็นหลอดแก้ว ชั้นอื่นที่เหลือสามารถบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการกลั่นโลหะเพื่อนำโลหะกลับมาใช้ใหม่

Ercole, P. (2559) Sasil, SpA ร่วมกับองค์กรอื่นๆ ได้พัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV ภายใต้โครงการ Full recovery end of life photovoltaic (FRELPA) ในยุโรป ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการในการถอดโครงสร้างอลูมิเนียมและกล่องขั้วต่อ สำหรับการกู้คืนแก้ว พอลิเมอร์ถูกเผาไหม้ การนำโลหะและอิเล็กโทรด (electrodes) ออกจากเซลล์ Si ชั้นแรก เครื่องจักรจะถอดโครงสร้างอลูมิเนียม และกล่องขั้วต่อออกจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV ต่อจากนั้น โครงสร้างที่เหลือจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 ถึง 120 องศาเซลเซียส โดยฮีตเตอร์อินฟราเรด (IR heater) และโครงสร้างนั้นจะถูกใส่เข้าไปในเครื่องลูกกลิ้ง (roller mill) และอุปกรณ์มีดสั่น (vibrating knife) ด้วยเครื่องมือนี้ กระจกจะถูกแยกและกู้คืน ในขั้นตอนถัดไป โครงสร้างที่เหลือที่มีการห่อหุ้ม เซลล์ Si อิเล็กโทรด (electrodes) และแผ่นรองหลังจะถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส เผาไหม้ที่ 850 องศาเซลเซียส เพื่อแยกโลหะในเซลล์ Si และอิเล็กโทรด ก๊าซเสียจากพอลิเมอร์ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ (burning) จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ (combustion) โลหะถูกแยกออกจากกันเมื่อผ่านกรรมวิธีทางเคมี เซลล์ Si ถูกกัดกร่อนด้วยกรดไนตริก (nitric acid) และเซลล์ Si ถูกกู้คืน หลังจากการกัดกร่อนด้วยอิเล็กโทรไลซิส (electrolysis) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) จะสามารถกู้คืนโลหะอื่นๆ (Ag และ Cu) กลับมาเป็นโลหะในรูปแบบไฮดรอกไซด์

Granata, G., *et al.* (2559) มหาวิทยาลัย Sapienza กรุงโรม (Sapienza university of Rome) ร่วมกับองค์กรอื่นๆ ได้ศึกษาการใช้กระบวนการหั่นย่อยอัตโนมัติภายใต้โครงการ Photolife ในยุโรป กระบวนการนี้ประกอบด้วยการใช้โครงสร้างอลูมิเนียมด้วยตนเอง การย่อยโครงสร้างลามิเนตและกระจกแยกแบบอัตโนมัติ กระบวนการกู้คืนโลหะกลับมาใช้ใหม่ โครงการนี้ครอบคลุมไปถึงของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก Si, Amorphous Si และ CdTe PV มีการทดสอบด้วยการกระบวนการหั่นย่อยอัตโนมัติสองแบบ แบบแรกคือวิธีการบดอย่างง่ายโดยใช้โรเตอร์สองใบมีด (two-bladed rotor) แบบที่สองคือกระบวนการกัดด้วยค้อน (hammer milling) จากการวิเคราะห์ด้วยตัวอย่างขนาดของชิ้นส่วนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านบดแล้ว สรุปได้คร่าวๆ ว่าแบบที่สองดีกว่า ชิ้นส่วนที่ผ่านการบดแล้วจะต้องนำมาผ่านกระบวนการต่อไป แบ่งแยกตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ส่วนที่ 1 ส่วนที่มีขนาด d (เส้นผ่านศูนย์กลาง) > 1 มิลลิเมตร จะถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เพื่อแยกพอลิเมอร์ (polymers) ส่วนที่ 2 ส่วนที่มีขนาด 1 มิลลิเมตร $> d > 0.08$ มิลลิเมตร จะถูกกู้คืนสภาพโดยตรงเป็นแก้ว และส่วนที่ 3 ส่วนที่มีขนาด $d < 0.08$ มิลลิเมตร จะถูกกู้คืนโดยกระบวนการไฮโดรเมทัลโลยี (hydrometallurgical) เพื่อกู้คืนโลหะ

PV-MOREDE เป็นหนึ่งในกลุ่มบริษัทที่กำลังพัฒนาระบบเซลล์แสงอาทิตย์ PV สำหรับมือถือภายใต้โครงการไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ Photo Voltaic panels Mobile Recycling Device (PV-MOREDE) ในยุโรป ได้พัฒนาระบบรีไซเคิลในสถานที่ โดยการลดปริมาณ การแยกเศษแก้ว การแยกเซลล์ Si และการแยกพอลิเมอร์ออกจากทองแดง อุปกรณ์ทั้งหมดสามารถเก็บไว้ในภาชนะเพื่อสะดวกต่อการขนส่ง ก่อนขั้นตอนการบำบัด โครงสร้างอลูมิเนียม และกล่องขั้วต่อจะถูกแยกออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการแยกชิ้นส่วนมาแล้วจะถูกตัดเป็นชิ้นขนาด 100×100 มิลลิเมตร โดยเครื่องจักร แล้วชิ้นส่วนจะถูกส่งไปยังเครื่องบดทุบขั้นที่ 1 (hammer mill 1) เพื่อบดเป็นเม็ดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 6 มิลลิเมตร และกรองด้วยตาข่ายที่มีรูขนาด 6 มิลลิเมตร เม็ดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จะถูกส่งไปยังเครื่องบดทุบขั้นที่ 2 (hammer mill 2) เพื่อให้เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร แล้วถูกกรองเป็นสามขนาด 2 มิลลิเมตร 0.315 มิลลิเมตร และเล็กกว่า 0.315 มิลลิเมตร ตามลำดับ พร้อมกันในเพลทของโต๊ะสั่น (shaking table) เนื่องจากเศษส่วนหยาบส่วนแรกประกอบด้วยพอลิเมอร์และทองแดงเป็นส่วนใหญ่ ส่วนนี้จะถูกกู้คืนทองแดงออก โลหะและพอลิเมอร์อื่นๆ จะถูกแยกออกโดยใช้เครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็ก เศษส่วนที่สองและสามจะถูกแยกออกเป็นแก้วที่มีระดับซิลิคอนต่ำและแก้วที่มีปริมาณซิลิคอนสูงตามลำดับ

Wang, Z. (2557) สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical engineering institute) และสถาบันวิทยาศาสตร์จีน (Chinese Academy of Sciences) ได้นำเทคโนโลยีการบดมาใช้ในสภาวะที่

เย็นจัด ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV ถูกแยกโครงสร้างอลูมิเนียมและกล่องขั้วต่อออก แล้วบด จากนั้นชิ้นส่วนจะถูกแช่เย็นที่อุณหภูมิ -197 องศาเซลเซียส โดยใช้ไนโตรเจนเหลว ชิ้นส่วนของชั้นห่อหุ้ม (EVA) แก้ว ผงผสมที่มี Si Ag Cu และวัสดุอื่นๆ จะถูกแยกออกด้วยลักษณะทางกายภาพ อัตรารังสีไซเคลที่คาดการณ์ไว้อยู่ที่ประมาณร้อยละ 90 แต่ Si ไม่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ได้เนื่องจากมีความบริสุทธิ์ต่ำ

Yokohama Oils & Fats Industry (2555) ได้พัฒนาตัวทำละลายและกระบวนการสำหรับการกำจัดสารห่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต ชั้นแรก โครงสร้างอลูมิเนียมและกล่องขั้วต่อถูกแยกออกจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV ด้วยมือ และแผ่นรองหลังจะถูกแยกออก เครื่องจักร ถัดไปโครงสร้างลามิเนตที่เหลือถูกแช่ในตัวทำละลายที่เป็นกลาง แก้วและชั้นต่างๆของสารห่อหุ้ม (EVA) เซลล์ Si และอิเล็กโทรด (electrodes) ถูกแยกออกจากกัน โดยปกติแล้วกระจกที่ถูกแยกจากกันจะไม่เกิดความเสียหายและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยง่าย ขั้นตอนต่อไป ชั้นที่เหลือถูกบดและแช่ในตัวทำละลายอัลคาไล (alkali) หลังจากขั้นตอนการแช่สารห่อหุ้ม EVA แล้วซิลิคอนและริบบอนอิเล็กโทรดก็ถูกกู้คืน ในการกู้คืน Ag ที่ติดอยู่กับซิลิคอน (silicon) นั้น จำเป็นต้องมีกระบวนการเพิ่มเติม เวลาดำเนินการประมาณหนึ่งวันสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เชิงพาณิชย์ แม้ว่ากระบวนการกู้คืนจะต้องใช้เวลานาน แต่ตัวทำละลายที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับกรดและสารอินทรีย์ ดังนั้นตัวทำละลายจะมีประสิทธิภาพหากใช้ร่วมกับกระบวนการแยกแก้วและการแยกโลหะ (กล่าวคือ หลังจากการบด การเจียร และการตัด)

Kang, S. (2555) สถาบันวิจัยเทคโนโลยีเคมีแห่งเกาหลี (Korea Research Institute of Chemical Technology; KRCT) ร่วมกับมหาวิทยาลัยแห่งชาติ Kangwon (Kangwon National University) ได้พัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการละลายสารห่อหุ้ม EVA โดยการแช่ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ลงในตัวทำละลายอินทรีย์และใช้ร่วมกับการฉายรังสีอัลตราซาวนด์ (ultrasound irradiation) วัตถุประสงค์ของการใช้การฉายรังสีอัลตราซาวนด์ (ultrasound irradiation) เพื่อลดเขยื้อนของกระบวนการแยกสารเคมีซึ่งโดยทั่วไปต้องใช้เวลาในการกู้คืนนาน สารห่อหุ้ม EVA ถูกแช่สารละลายที่ 70 องศาเซลเซียส และที่กำลังการฉายรังสีที่ 900 วัตต์ แล้วเซลล์ Si ถูกนำกลับคืนมา โดยไม่มีความเสียหาย ในเทคโนโลยีทั้งสอง จำเป็นต้องมีกระบวนการเพิ่มเติมสำหรับการกู้คืนโลหะจากซากเซลล์ Si หลังจากกำจัดสารห่อหุ้มออกจากโครงสร้างเคลือบลามิเนต (laminated) อย่างไรก็ตาม บางเทคโนโลยีต้องอาศัยวิธีการทางความร้อนและทางกลร่วมกัน ตัวอย่างเช่น การใช้กรด (acid) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxide) สำหรับการกัดกร่อนด้วยสารเคมีก็เป็นไปได้

Toho Kasei Co., Ltd. (2559) Accurec recycling ได้นำวิธีการที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีการกลั่นด้วยสุญญากาศไพโรไลซิ (vacuum-distillation pyrolysis) ภายใต้โครงการ Photorec แม้ว่ารายละเอียดจะไม่ชัดเจน แต่หลังจากการถอดโครงสร้างและกลองข้าวต่อแล้ว ชิ้นส่วนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV ได้ถูกเตรียมโดยการปรับสภาพล่วงหน้า แล้วกลั่นด้วยเครื่องไมโครเวฟแบบสุญญากาศ (Microwave Vacuum Distillation) และกระบวนการแยกทางกล (mechanical separation) โลหะ อย่างเช่น อินเดียม (indium; In) แกลเลียม (gallium; Ga) และเทลลูเรียม (tellurium; Te) รวมถึงแก้ว จะถูกกู้คืนจากชิ้นส่วนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

First solar (2558) ได้จำหน่ายเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe PV ซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่างกระบวนการบำบัดทางกลและกระบวนการทางเคมี เทคโนโลยีนี้เกี่ยวข้องกับการหั่นย่อย (shredding) และบดละเอียด (crushing in a hammer mill) ให้เป็นอนุภาคขนาดเล็กประมาณ 5 มิลลิเมตร เพื่อทำลายพันธะเคลือบ ส่วนฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการจะถูกรวบรวมในระบบดูดซึ่งติดตั้งแผ่นกรองอากาศแบบอนุภาคประสิทธิภาพสูง ลำดับต่อไปเป็นการกักกรองของชิ้นสารกึ่งตัวนำที่มีส่วนผสมของกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) แก้วและชิ้นส่วนขนาดใหญ่ของ EVA (ethylene-vinyl acetate) ถูกแยกจากกันในเครื่องแยก (classifier) และเครื่องร่อนแบบสั่น (vibrating screen) จากนั้นทำความสะอาดแก้วด้วยน้ำและทำให้แห้งบนเครื่องกรองแบบสายพาน (belt filter unit) ทรายสุดของเหลวที่มีโลหะผสมจะถูกแยกโดยเครื่องแลกเปลี่ยนไอออน (extracted via ion exchangers) หรือเครื่องตกตะกอน (precipitated) แคดเมียม (Cd) และเทลลูเรียม (Te) สามารถกู้คืนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในอุตสาหกรรมพลังงานแสงอาทิตย์ First solar ในเยอรมนี เริ่มใช้งานเทคโนโลยีครั้งแรก รุ่นแรกในปี 2549 (10 ตัน/วัน) รุ่นที่สองเป็นการพัฒนาของเทคโนโลยีและได้ดำเนินการในสหรัฐอเมริกาและมาเลเซียในปี 2554 (30 ตัน/วัน) และรุ่นที่สามเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีในประเทศสหรัฐอเมริกา ปี 2558 (50 ตัน/วัน) เทคโนโลยีรุ่นที่สามเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง (continuous process) ในขณะที่รุ่นก่อนหน้าเป็นกระบวนการแบบชุด (batch processes) และรุ่นที่ 4 คาดว่าจะพัฒนาให้มีกำลังการผลิต 350 ตัน/วัน นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีขนาดเล็กในสถานที่เพื่อลดต้นทุนการขนส่ง

Granata, G., et al. (2557) มหาวิทยาลัย Sapienza กรุงโรม (Sapienza University of Rome) ได้ใช้เครื่องหั่นย่อยอัตโนมัติภายใต้โครงการ Photolife ในยุโรป ซึ่งได้อธิบายว่าเป็นเทคโนโลยีประเภทหนึ่งสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si PV กระบวนการกู้คืนของโครงการนี้คือ การรีไซเคิลโครงสร้างอลูมิเนียมด้วยมือ การย่อยโครงสร้างลามิเนตและกระจกแยกโดยอัตโนมัติ และการกู้คืนโลหะเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โครงการนี้ครอบคลุมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe PV

นอกเหนือจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก c-Si และชนิดฟิล์มบาง a-Si มีการทดสอบกระบวนการหั่นย่อย สองวิธีดังนี้

วิธีที่หนึ่ง การบดอย่างง่ายด้วยใบพัดสองใบมีด (two-bladed rotor)

วิธีที่สอง การบดด้วยใบพัดสองใบมีด (two-bladed rotor) แล้วตามด้วยการบดทุบ (crushing with a hammer)

ชิ้นงานที่ผ่านการบดแล้วจะแยกบับัดตามขนาดด้วยสามวิธี

ส่วนที่ 1 ชิ้นงานที่มี $d > 1$ มิลลิเมตร จะถูกเผาไหม้ที่ 650 องศาเซลเซียส เพื่อแยกพอลิเมอร์

ส่วนที่ 2 ชิ้นงานที่มีขนาด $1 \text{ มิลลิเมตร} > d > 0.08 \text{ มิลลิเมตร}$ จะถูกกู้คืนมาโดยตรงเป็นแก้ว

ส่วนที่ 3 ชิ้นงานที่มีขนาด $d < 0.08 \text{ มิลลิเมตร}$ จะได้รับการบับัดและกู้คืนโดยกระบวนการกระบวนการแยกสกัดและการผลิตโลหะ โดยการใช้ตัวทำละลาย hydrometallurgical เพื่อนำโลหะกลับมาใช้ใหม่

Wiegiersma, S., Steeghs, W., (2559) โครงการ Reclaim (Reclamation of Gallium, Indium, and Rare-earth Elements from Photovoltaics, Solid-State Lighting, and Electronics Waste) ที่ นำ โดย Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (ประเทศเนเธอร์แลนด์) ได้แก้ปัญหาและพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลแกลเลียม (gallium) อินเดียม (indium) และ ธาตุหายากจากเซลล์แสงอาทิตย์ (CIGS) ไฟส่องสว่างโซลิดสเตต (solid-state lighting) และขยะอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น จอแบนและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ CIGS ถูกบดและแยกขนาด กระจกฝาครอบและพื้นผิวกระจกที่มีชั้น CIGS จะถูกแยกและนำกู้คืน พื้นผิวกระจกที่กู้คืนจะได้รับการบับัดทางเคมีด้วยกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) และโลหะหายาก เช่น อินเดียม (indium; In) และ แกลเลียม (gallium; Ga) จะถูกกู้คืน โลหะที่นำกลับมาใช้ใหม่จะถูกทำให้บริสุทธิ์โดยกระบวนการทางเคมีเพิ่มเติม

Solar Frontier K.K., (2559) ได้พัฒนาวิธีการแยกสารห่อหุ้มโดยใช้ใบมีดความร้อน หลังจากการถอดโครงอลูมิเนียม และกล่องขั้วต่อแล้ว ใบมีดจะถูกแทรกระหว่างฝาครอบแก้วกับพื้นผิวกระจก ปัจจุบันความเร็วในการกู้คืนคือ 400 วินาทีต่อชิ้น (เชิงพาณิชย์) นำฝาครอบแก้วซึ่งยังมีสารห่อหุ้ม EVA ติดอยู่บางส่วน กระจกพื้นผิวที่มีชั้น คอปเปอร์ อินเดียม แกลเลียม เซเลไนด์ (copper indium gallium selenide; CIGS) โมลิบดีนัม (molybdenum; Mo) และพอลิเมอร์บางตัวก็ถูกนำกลับมาใช้เช่นกัน แม้ว่าตามปกติแล้วพื้นผิวจะแตกหักก็ตาม แก้วทั้งสองประเภทผ่านการบับัด

ทางเคมี แก้วและโลหะก็ถูกกู้คืนกลับมาใช้ใหม่ ในปัจจุบันจะใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) เพื่อแยกสารห่อหุ้ม EVA แม้ว่าตัวทำละลายสำหรับการแยกโลหะจะอยู่ระหว่างการทดสอบ ตัวทำละลายที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก

ปรากฏว่าการผสมผสานระหว่างกระบวนการทางกลและทางเคมีเป็นวิธีการที่มีแนวโน้มดี นอกจากการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการแล้ว ตัวทำละลายที่ใช้จะต้องเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและต้องลดปริมาณการใช้ลง และการเพิ่มกระบวนการจัดการน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีนั้นเป็นสิ่งจำเป็น

Palitzsch, W. (2559) ได้พัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทางแสงสำหรับการแยกโครงสร้างแก้วและโครงสร้างแก้ว หลังจากการถอดโครงสร้างและกล่องขั้วต่อแล้ว ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV จะถูกใส่ลงในอุปกรณ์บำบัดด้วยแสงโดยอัตโนมัติ สำหรับวิธีการกู้คืนด้วยแสงนั้นมีสองวิธีการ วิธีการแรกคือการใช้เลเซอร์ วิธีการที่สองคือการอบอ่อนด้วยแสงแฟลช เวลาในการกู้คืนคือหนึ่งนาทิต่อชิ้น (เชิงพาณิชย์) หลังจากผ่านกระบวนการ ฝาครอบกระจกครอบและชั้นของพื้นผิวที่มีกระจกผสมจะถูกแยกออกจากกัน แล้วสารประกอบ เช่น CIGS และ CdTe ได้รับการบำบัดด้วยวิธีการทางเคมีโดยใช้กรดมีเทนซัลโฟนิก (methane sulfonic acid) ชั้นโลหะสามารถแยกออกและนำกลับมาใช้ใหม่เป็นสารประกอบโลหะของโลหะแต่ละชนิด จากนั้นนำไปรีไซเคิลและทำให้บริสุทธิ์โดยโรงกลั่นโลหะ

บทสรุปของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ การรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ เริ่มต้นจากการถอดแยกชิ้นส่วนของซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เช่น การแยกโครงสร้างโลหะและกล่องขั้วต่อออก ตามด้วยกระบวนการกำจัดสารห่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต และกระบวนการรีไซเคิล สามารถแบ่งประเภทและกระบวนการรีไซเคิล ออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

กระบวนการรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม กระบวนการถูกแบ่งคร่าวๆ ออกเป็น กระบวนการกำจัดสารห่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต และกระบวนการกู้คืนโลหะจากพื้นผิวกระจก ความแตกต่างที่สำคัญจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน c-Si คือวัตถุประสงค์ของการกำจัดสารห่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต เพื่อนำทั้งกระจกครอบและกระจกพื้นผิวที่มีชั้นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) กลับมาใช้โดย การเผาไหม้ทางความร้อน การตัดชั้นการห่อหุ้มเป็นวิธีการทางกล และวิธีการทางแสงคือการใช้เลเซอร์ ตามด้วยการกู้คืน แก้ว เซลล์ Si และ โลหะอื่นๆ

กระบวนการรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน c-Si กระบวนการถูกแบ่งคร่าวๆ ออกเป็น กระบวนการกำจัดสารห่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต และกระบวนการกู้

คืนโลหะออกจากเซลล์ Si การกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนตเป็นเรื่องสำคัญที่สุดของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีรีไซเคิลสามารถใช้วิธีการทางความร้อน วิธีการทางกล วิธีการทางเคมี และวิธีการผสมผสาน ส่วนการกู้คืนโลหะจากเซลล์ Si สามารถทำได้โดยใช้วิธีการทางเคมี เช่น การกัดกร่อน และวิธีการบำบัดโดยโรงกลั่นโลหะ



บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษาค้นคว้าอิสระนี้ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ และปริมาณการใช้งาน รวมไปถึงกระบวนการในการจัดการกับของเสียที่เกิดขึ้นเหล่านั้นจากแหล่งการศึกษาค้นคว้าสื่อต่างๆ เว็บไซต์ หนังสือที่เกี่ยวข้อง เอกสารคู่มือ งานวิจัยพัฒนาและกฎหมายที่เกี่ยวข้อง โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการศึกษา ดังนี้

1. การศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์

- 1.1 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.2 ความหมายของเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.3 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์และส่วนประกอบ
- 1.4 หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.5 ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายในครัวเรือน
- 1.6 ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

2. การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ และผลกระทบ

- 2.1 ข้อมูลเกี่ยวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย และต่างประเทศ
- 2.2 ข้อมูลเกี่ยวกับขยะที่เกิดจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
- 2.3 ผลกระทบต่อสุขภาพที่เกิดจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 2.4 ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 2.5 ข้อมูลเกี่ยวกับสภาพปัญหาขยะประเภทอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย
นโยบายและข้อกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

3. การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสถานการณ์ของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และการกำจัด

3.1 ข้อมูลเกี่ยวกับสถานการณ์ของเสียอันตราย

3.2 สถานการณ์ขยะอิเล็กทรอนิกส์

3.3 การกำจัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

4. การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแนวทางการจัดการและวิธีการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์

4.1 ความเป็นมาเกี่ยวกับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

4.2 ทิศทางในการรีไซเคิลของเสียประเภทขยะอิเล็กทรอนิกส์ E-Waste

4.3 ความเป็นมาและแนวคิดในการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

4.4 แนวทางการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

4.5 กระบวนการจัดเก็บรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

4.6 ภาพรวมกระบวนการคัดแยกทางกายภาพ/ ทางกล

4.7 วิธีการจัดการและการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

4.8 กระบวนการการปรับเสถียร และการฝังกลบของเสียที่เกิดจากกระบวนการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

4.9 กระบวนการฝังกลบกากอุตสาหกรรมอันตราย

5. การศึกษาความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของการรีไซเคิลและบทสรุปของการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

5.1 ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของวิธีการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

5.2 ภาพรวมของการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทย

5.3 บทสรุปของการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

6. การจัดทำร่างคู่มือ

หลังจากการศึกษารวบรวมข้อมูลแล้ว ได้ทำการวิเคราะห์ สังเคราะห์ข้อมูล และเรียบเรียงจัดทำเป็นร่างคู่มือขึ้น ร่างคู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จัดทำขึ้นได้รับคำปรึกษาและแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษา หลังจากปรับแก้แล้ว ได้จัดส่งให้ท่านผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน เพื่อทำการประเมินคุณภาพของคู่มือต่อไป

7. การประเมินคุณภาพของคู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จัดทำขึ้นถูกประเมิน โดยผู้เชี่ยวชาญในการจัดการของเสีย และผู้บริหารระดับสูงของหน่วยงานที่เกี่ยวกับการจัดการของเสียอันตรายและของเสียชนิดต่างๆ รวมทั้งหมด 3 ท่านคือ รองศาสตราจารย์ ดร. สุเทพ ศิลปานันท์กุล ดร. ไชยยศ บุญญากิจ และคุณชัยพฤกษ์ ทองเปี่ยม (ภาคผนวก ก) โดยมีข้อมูลการประเมินดังนี้

7.1 ข้อมูลที่ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินคุณภาพคู่มือมีดังนี้

7.1.1 เนื้อหา

- ก. เนื้อหาถูกต้อง ชัดเจน เข้าใจง่าย
- ข. เนื้อหาเป็นปัจจุบัน
- ค. การเรียงลำดับของเนื้อหา
- ง. ภาษาที่ใช้ถูกต้องเหมาะสม

7.1.2 รูปเล่ม

- ก. คู่มือมีรูปแบบน่าสนใจ น่าอ่าน
- ข. ขนาดและรูปแบบตัวอักษรอ่านง่าย สบายงาม
- ค. ขนาดรูปเล่มมีความเหมาะสม

7.1.3 การนำไปใช้ประโยชน์

- ก. คู่มือมีรูปแบบน่าสนใจ น่าอ่าน
- ข. ขนาดและรูปแบบตัวอักษรอ่านง่าย สบายงาม

7.1.4 ความพึงพอใจโดยภาพรวม

7.2 ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้คู่มือโดยผู้ปฏิบัติงาน

7.2.1 เนื้อหา

- ก. เนื้อหาถูกต้อง ชัดเจน เข้าใจง่าย
- ข. เนื้อหาเป็นปัจจุบัน
- ค. เนื้อหาครอบคลุม ครบถ้วน
- ง. มีการแนะนำแหล่งข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม

7.2.2 รูปเล่ม

- ก. คู่มือมีรูปแบบน่าสนใจ น่าอ่าน
- ข. ขนาดและรูปแบบตัวอักษรอ่านง่าย สวยงาม
- ค. การเก็บรักษาและค้นหามาใช้งานทำได้สะดวก

7.2.3 การนำไปใช้ประโยชน์

- ก. ความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน
- ข. สามารถนำคู่มือไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงได้

7.2.4 ความพึงพอใจโดยภาพรวม

8. การวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบประเมิน

ความคิดเห็นเกี่ยวกับการประเมินการใช้งาน คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยลักษณะคำถามเป็นแบบมาตราวัดลิเกิร์ต (likert scale) ใช้มาตราส่วนการประเมินค่า (rating scale method) โดยใช้ระดับการวัดข้อมูลประเภทอันตรภาค (interval scale) แบ่งออกเป็น 5 ระดับ ซึ่งมีเกณฑ์การกำหนดคะแนน ดังต่อไปนี้

คะแนน	ระดับความสำคัญ
5	มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด
4	มีระดับความพึงพอใจมาก
3	มีระดับความพึงพอใจปานกลาง
2	มีระดับความพึงพอใจน้อย
1	มีระดับความพึงพอใจน้อยที่สุด

การกำหนดเกณฑ์เฉลี่ยในการอภิปรายผลคำนวณ โดยใช้สูตรการคำนวณความกว้างของอันตรภาคชั้น ดังต่อไปนี้ (ศิริวรรณ เสรีรัตน์ และคณะ 2545, น.129)

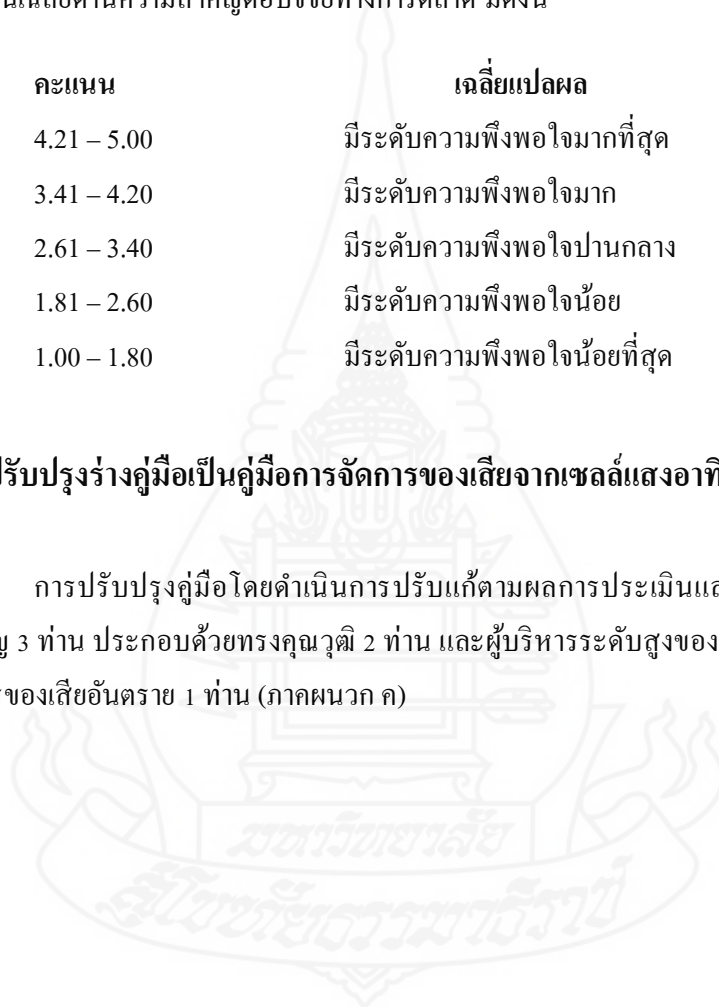
$$\begin{aligned}
 \text{ความกว้างของอันตรรกะชั้น} &= \frac{\text{ข้อมูลที่มีค่าสูงสุด} - \text{ข้อมูลที่มีค่าต่ำสุด}}{\text{จำนวนชั้น}} \\
 &= \frac{(5-1)}{5} \\
 &= 0.08
 \end{aligned}$$

นำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยเกณฑ์การแปลความหมายของคะแนนเฉลี่ยด้านความสำคัญต่อปัจจัยทางการตลาด มีดังนี้

คะแนน	เฉลี่ยแปลผล
4.21 – 5.00	มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด
3.41 – 4.20	มีระดับความพึงพอใจมาก
2.61 – 3.40	มีระดับความพึงพอใจปานกลาง
1.81 – 2.60	มีระดับความพึงพอใจน้อย
1.00 – 1.80	มีระดับความพึงพอใจน้อยที่สุด

9. การปรับปรุงร่างคู่มือเป็นคู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงคู่มือโดยดำเนินการปรับแก้ตามผลการประเมินและข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน ประกอบด้วยทรงคุณวุฒิ 2 ท่าน และผู้บริหารระดับสูงของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเสียอันตราย 1 ท่าน (ภาคผนวก ค)



บทที่ 4

ผลการศึกษา

1. การศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์

การจัดทำคู่มือ เรื่อง การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บท ประกอบด้วย

บทที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์ และส่วนประกอบ

บทที่ 2 ปริมาณและผลกระทบจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3 สถานการณ์ของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และการกำจัด

บทที่ 4 การจัดการและการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 5 บทสรุปของการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และความคุ้มค่าเชิง

เศรษฐศาสตร์ของการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

การประเมินคู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยประเมิน โดยผู้เชี่ยวชาญในการจัดการของเสีย และผู้บริหารระดับสูงของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเสีย รวม 3 ท่าน เพื่อทำการประเมินคุณภาพของคู่มือ ผลจากการประเมินคู่มือทำให้ได้รับคำแนะนำในการปรับแก้จนได้คู่มือที่มีความสมบูรณ์มากขึ้น และสามารถนำไปเป็นแนวปฏิบัติในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้

2. ผลการประเมินคู่มือและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงคู่มือ

2.1 ผลการประเมินคู่มือ

ผลการประเมินคุณภาพคู่มือจากผู้ทรงคุณวุฒิและผู้ใช้งาน (ตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการประเมินคุณภาพของคู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดย
ประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ และผู้บริหารระดับสูงของหน่วยงานที่เกี่ยวกับการจัดการของเสีย

หัวข้อการประเมิน	ระดับคะแนนการประเมิน				
	5 (มากที่สุด)	4 (มาก)	3 (ปานกลาง)	2 (น้อย)	1 (น้อยที่สุด)
1. เนื้อหา					
1.1 เนื้อหาถูกต้อง ชัดเจน เข้าใจง่าย	1	2			
1.2 เนื้อหาเป็นปัจจุบัน	1	2			
1.3 การเรียงลำดับของเนื้อหา		3			
1.4 ภาษาที่ใช้ถูกต้อง เหมาะสม	1	2			
2. รูปแบบของคู่มือ					
2.1 คู่มือมีรูปแบบน่าสนใจ น่าอ่าน		3			
2.2 ขนาดและรูปแบบตัวอักษรอ่านง่าย สบายงาม		3			
2.3 ขนาดรูปเล่มมีความเหมาะสม	1	1	1		
3. การนำไปใช้ประโยชน์					
3.1 ความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน	1	2			
3.2 สามารถใช้เป็นแหล่งอ้างอิงได้		3			
4. ความพึงพอใจโดยภาพรวม	1	2			

ผลระดับคะแนนจากการประเมินผล

1. เนื้อหา

- 1.1 เนื้อหาถูกต้อง ชัดเจน เข้าใจง่าย ระดับของคะแนนเฉลี่ยคือ 4.33
- 1.2 เนื้อหาเป็นปัจจุบัน ระดับของคะแนนเฉลี่ยคือ 4.33
- 1.3 การเรียงลำดับของเนื้อหา ระดับของคะแนนเฉลี่ยคือ 4.00
- 1.4 ภาษาที่ใช้ถูกต้อง เหมาะสม ระดับของคะแนนเฉลี่ยคือ 4.33

2. รูปแบบของคู่มือ

- 2.1 คู่มือมีรูปแบบน่าสนใจ น่าอ่าน ระดับของคะแนนเฉลี่ยคือ 4.00
- 2.2 ขนาดและรูปแบบตัวอักษรอ่านง่าย สบายงาม ระดับของคะแนนเฉลี่ยคือ 4.00

2.3 ขนาดรูปเล่มมีความเหมาะสม	ระดับของคะแนนเฉลี่ยคือ 4.00
3. การนำไปใช้ประโยชน์	
3.1 ความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน	ระดับของคะแนนเฉลี่ยคือ 4.33
3.2 สามารถใช้เป็นแหล่งอ้างอิงได้	ระดับของคะแนนเฉลี่ยคือ 4.00
4. ความพึงพอใจโดยภาพรวม	ระดับของคะแนนเฉลี่ยคือ 4.33

ผลสรุปของระดับของคะแนนเฉลี่ยทั้งหมดคือ 4.17 อยู่ในระดับความพึงพอใจมาก

2.2 ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงคู่มือ มีดังนี้

- 1) ปรับคำนำใหม่จากเขียนคู่มือเพื่อให้ปฏิบัติได้ตามบริบทของคณะฯ ให้สอดคล้องมาตรฐาน หลักวิชาการและความปลอดภัยระดับสากล
- 2) ปรับแก้ไข เนื้อหาบางส่วนให้สั้น กระชับ เหมาะสมขึ้น
- 3) ตรวจสอบแก้ไขคำที่ผิดให้ละเอียดทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- 4) ปรับแก้ไข เนื้อหาบางส่วนให้เป็นข้อมูลล่าสุด
- 5) ทบทวนการแบ่งหัวข้อย่อยให้ชัดเจนมากขึ้น
- 6) ทำการศึกษาข้อมูล และเพิ่มเติมเนื้อหาในส่วนของกรณีศึกษาของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จากแหล่งข้อมูล งานพัฒนาวิจัยที่เกี่ยวข้องจากหลายประเทศ
- 7) เพิ่มเติมเนื้อหาในส่วนของแผนการและนโยบายต่างๆ ของทางภาครัฐที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ และของเสียจากอิเล็กทรอนิกส์
- 8) เพิ่มเติมเนื้อหาในส่วนการวางแผนเศรษฐกิจ การวางแผนการจัดการของเสียจากอุตสาหกรรม และของเสียจากอิเล็กทรอนิกส์

3. ผลการปรับปรุงร่างคู่มือเป็นคู่มือฉบับสมบูรณ์

ภายหลังจากผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เชี่ยวชาญได้พิจารณาเนื้อหาของคู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ และได้ให้ข้อเสนอแนะดังกล่าวข้างต้นนั้น ผู้ศึกษาจึงได้นำข้อเสนอแนะมาเป็นแนวทางในการปรับแก้คู่มือดังนี้

3.1 ปรับแก้ไขคำนำใหม่

3.2 ปรับแก้ไขเนื้อหาบางส่วนให้กระชับ และตัดเนื้อหาที่ไม่จำเป็นออกเพื่อให้เนื้อหา มีความกระชับ เหมาะสม และทำให้ผู้ศึกษาสามารถเข้าใจภาพรวมได้ โดยการเพิ่ม Flow chart ดังนี้

- 1) ผังการกำจัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศในปัจจุบัน ในส่วนท้ายของบทที่ 3
- 2) ผังแนวทางการจัดการกับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในส่วนท้ายของบทที่ 4

3.3 ตรวจสอบ และแก้ไขคำที่ผิดให้ละเอียดทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

3.4 ปรับแก้ไขเนื้อหาให้เป็นปัจจุบันมากที่สุด

ทำการแก้ไข อัปเดตข้อมูลในส่วนของ แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ.2561-2580 (PDP 2018) มาเป็น แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580 ฉบับปรับปรุง ครั้งที่ 1 (PDP 2018 Rev.1) ได้ผ่านการอนุมัติจากที่ประชุมคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.) เมื่อวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2563

3.5 ทำการเพิ่มเติมข้อมูล เนื้อหาที่สรุปได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากต่างประเทศ ทำการเพิ่มเติมเนื้อหาในบทที่ 4 ในหัวข้อดังนี้

หัวข้อที่ 4.7.1 การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีของต่างประเทศเกี่ยวกับการรีไซเคิลเซลล์ แสงอาทิตย์แบบผลึก Si

หัวข้อที่ 4.7.3 การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีต่างประเทศที่เกี่ยวกับการรีไซเคิลเซลล์ แสงอาทิตย์แบบผสม

3.6 เพิ่มเติมเนื้อหาในส่วนของนโยบายต่างๆ ของทางภาครัฐที่เกี่ยวข้องกับเซลล์ แสงอาทิตย์ ทำการเพิ่มเติมเนื้อหาในบทที่ 2 ในหัวข้อที่ 2.5 ส่วนของยุทธศาสตร์การขับเคลื่อนพัฒนาประเทศไทยด้วยนโยบายหลักของการพัฒนาเศรษฐกิจตาม โมเดลเศรษฐกิจการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพ-เศรษฐกิจหมุนเวียน-เศรษฐกิจสีเขียว (Bio-Circular-Green; BCG) Economy พ.ศ. 2564 -2570)

บทที่ 5

สรุปการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยเนื้อหา ดังนี้

- 1) เซลล์แสงอาทิตย์ และส่วนประกอบ
- 2) ปริมาณและผลกระทบจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 3) สถานการณ์ของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และการกำจัด
- 4) การจัดการและการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 5) บทสรุปของการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

จัดทำขึ้น โดยมุ่งเน้นให้ผู้ที่ได้ศึกษาได้ตระหนักถึงความสำคัญของปัญหา ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมของการทำงานเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนสามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างถูกต้อง เหมาะสมตามหลักวิชาการและความปลอดภัย สอดคล้องกับข้อกำหนดกฎหมาย

1. สรุปการศึกษา

การจัดทำคู่มือเรื่อง การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้แยกชนิด ประเภท และส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นจึงศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อรวบรวมวิธีการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นตามประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสืบค้น รวบรวมข้อมูลจากหนังสือ คู่มือเอกสารประกอบการอบรม ฐานข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต โครงการพัฒนาวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้มาใช้อ้างอิงในการแบ่งประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ และการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทำการเรียบเรียงขั้นตอนในการจัดการกับของเสียแต่ละประเภทโดยอ้างอิงตามหลักวิชาการที่ได้รับการยอมรับ ตามระบบมาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้อง และสอดคล้องกับข้อกำหนดกฎหมายได้กำหนดไว้ เมื่อเรียบเรียงร่างคู่มือสมบูรณ์แล้วเสร็จ จึงได้ส่งให้อาจารย์ที่ปรึกษาพิจารณาเพื่อความถูกต้องเหมาะสมและวัตถุประสงค์ในการจัดทำ จากนั้นจึงส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เชี่ยวชาญ และผู้ที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดของเสียอันตรายพิจารณาให้คำแนะนำ เพื่อแก้ไขปรับปรุงเนื้อหาให้มี

ความถูกต้อง และสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยมีการประเมินผลความสมบูรณ์ของเนื้อหาโดยใช้ “แบบประเมินการใช้คู่มือ เรื่องการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์”

การพิจารณาคู่มือของผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เชี่ยวชาญ และผู้ที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดของเสียอันตราย ได้ทำขึ้น 2 รอบ โดยรอบแรกได้ส่งคู่มือให้ผู้พิจารณาคู่มือทั้งหมดอ่าน เพื่อให้ข้อเสนอแนะ และคำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขและเพิ่มเติมเนื้อหาในคู่มือให้มีความน่าสนใจ ถูกต้อง ครบถ้วน จากนั้นจึงส่งคู่มือฉบับที่ปรับปรุงแล้วให้ผู้พิจารณาคู่มือทั้งหมดเพื่อทำการประเมินคู่มืออีกครั้ง ผลจากการประเมินพบว่าคะแนนในการประเมินคู่มืออยู่ในเกณฑ์ที่ดี คู่มือที่ได้จัดทำขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้จริง เนื้อหามีความครอบคลุมกับของเสียที่เกิดขึ้นที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

2. อภิปรายผล

คู่มือเรื่องการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ฉบับนี้ ได้ผ่านการประเมินและให้ข้อเสนอแนะ โดยผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เชี่ยวชาญด้านการกำจัดของเสียอันตราย จำนวน 3 ท่าน ความคิดเห็นในการประเมินผลของแต่ละด้านมีความสอดคล้องกับการให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงคู่มือฯ สิ่งที่คุณศึกษาได้ทำการปรับปรุงแก้ไขคู่มือ ในแต่ละด้านดังต่อไปนี้

2.1 ด้านรูปแบบของคู่มือ

ผู้ทรงคุณวุฒิ ให้ความเห็นถึงรูปแบบของคู่มือฯ มีความเหมาะสมในการใช้งาน แต่ยังมีข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไข ในด้านนี้ ผู้ศึกษาได้มีการออกแบบคู่มือ ให้มีรูปแบบ สี สันวนน่าอ่าน ทั้งหน้าปกและภายในเล่มของคู่มือ

2.2 ด้านความสมบูรณ์ของเนื้อหา

ผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เชี่ยวชาญ ให้ความคิดเห็นว่าเนื้อหาของคู่มือฯ มีความสมบูรณ์มาก แต่ยังมีข้อเสนอแนะในการปรับปรุงเพิ่มเติมในด้านของเนื้อหา ผู้ศึกษาได้มีการปรับและเพิ่มเติมเนื้อหาของคู่มือเพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานมากขึ้น และเพื่อให้เนื้อหามีความสมบูรณ์เพิ่มมากยิ่งขึ้น ผู้ศึกษาจึงได้ปรับปรุงแก้ไขในประเด็นต่างๆ ต่อไปนี้

1) บทที่ 1 เพิ่มเติม เนื้อหาในส่วนของประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์มีหลากหลายรูปแบบ หลายประเภท การแบ่งประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีหลายแบบ เช่น การแบ่งประเภทตามรูปแบบและลักษณะของการใช้งาน และการแบ่งประเภทตามส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ ในคู่มือฉบับนี้ผู้ศึกษาได้อ้างอิงการแบ่งประเภทตาม

ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้สอดคล้องกับการแบ่งประเภทของการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

2) บทที่ 2 เพิ่มเติม เนื้อหาในส่วนของปริมาณและแนวโน้มของการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อแสดงให้เห็นสัดส่วนและแนวโน้มของการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละประเภท โดยอ้างอิงข้อมูลจาก คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) และนโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน (PDP)

3) บทที่ 2 เพิ่มเติม เนื้อหาในส่วนของ ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการจัดการซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างถูกต้องเหมาะสมและสอดคล้องกับข้อกำหนด โดยอ้างอิงข้อมูลในวรรณกรรมที่เกี่ยวกับมาตรการทางกฎหมายในการจัดการซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

4) บทที่ 2 เพิ่มเติม ในส่วนผลกระทบที่เกิดจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ยังอยู่ในระหว่างการใช้งาน ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงยังไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอย่างเป็นรูปธรรม ผู้ศึกษาจึงได้อ้างอิงผลกระทบจากของเสียจากส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ และขยะอิเล็กทรอนิกส์

5) บทที่ 3 เพิ่มเติม เนื้อหาในส่วนของ การกำจัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ของประเทศไทยส่วนใหญ่ยังอยู่ในระหว่างการใช้งาน ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงยังมีจำนวนสะสมไม่มากพอที่จะทำการรีไซเคิล วิธีการกำจัดจึงเป็นทางเลือกที่ดีในปัจจุบัน ผู้ศึกษาจึงได้อ้างอิงการวิธีการกำจัดของเสียจากการกำจัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ และขยะอิเล็กทรอนิกส์

6) บทที่ 4 เพิ่มเติม เนื้อหาในส่วนของ ตัวอย่างโครงการวิจัยพัฒนาการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยอ้างอิงข้อมูลจากวรรณกรรมที่เกี่ยวกับการวิจัยพัฒนาการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของต่างประเทศ

ข้อจำกัดในด้านข้อมูลและเนื้อหา ในปัจจุบันงานศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีในปัจจุบันมีน้อยมาก ข้อมูลที่เพิ่มเติมในคู่มือเป็น โครงการศึกษาวิจัยของต่างประเทศทั้งหมด จากการศึกษารวบรวมข้อมูลของผู้ศึกษา ไม่พบข้อมูลโครงการศึกษาวิจัยเกี่ยวข้องกับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทย

2.3 ด้านความเข้าใจง่ายในเนื้อหาของคู่มือฯ

ผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เชี่ยวชาญ มีความคิดเห็นว่าเนื้อหาของคู่มือฯ นี้เข้าใจง่าย แต่ยังมีข้อเสนอแนะในการปรับปรุงเพิ่มในด้านนี้ ผู้ศึกษาได้มีการเพิ่มเติมแผนผังเพื่อให้ผู้อ่านเห็นภาพรวม

และสามารถเข้าใจเนื้อหาของคู่มือได้ง่ายขึ้น โดยได้อ้างอิงเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้นนั้น แล้วนำมาสรุปเป็นแผนผังของกระบวนการต่างๆ และแผนผังจากโครงการวิจัยพัฒนา ดังนี้

1) บทที่ 3 เพิ่มเติม แผนผังการจัดทำจัดทำชากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศในปัจจุบัน (ภาพที่ 3.1) โดยอ้างอิง ข้อมูลจากการรายงานข้อมูลสถานการณ์มลพิษของกรมควบคุมมลพิษ พบว่าในปัจจุบันมีของเสียอันตรายและกากอุตสาหกรรมอันตรายที่ได้รับถูกจัดการอย่างถูกต้องเพียงประมาณร้อยละ 65 ซึ่งพบว่ามีช่องโหว่และจุดเสี่ยงหลายๆ จุดที่อาจจะมีการลักลอบทิ้งของเสียที่ไม่มีมูลค่า และการลักลอบปล่อยสารพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ หากไม่ได้รับการจัดการที่ถูกต้องเหมาะสม

2) บทที่ 4 เพิ่มเติม แผนผังแนวทางการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ (ภาพที่ 4.6) โดยอ้างอิง ข้อมูลจากกระบวนการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และขยะอิเล็กทรอนิกส์ ภายใต้หลักการของความปลอดภัยและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด สอดคล้องกับพระราชบัญญัติโรงงาน พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย และกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

3) บทที่ 4 เพิ่มเติม กระบวนการและแผนผังสรุปสำหรับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน (ภาพที่ 4.25) โดยอ้างอิง ข้อมูลจากวรรณกรรมที่เกี่ยวกับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกของต่างประเทศ [39]

4) บทที่ 4 เพิ่มเติม กระบวนการและแผนผังสรุปสำหรับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม (ภาพที่ 4.31) โดยอ้างอิง ข้อมูลจากวรรณกรรมที่เกี่ยวกับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมของต่างประเทศ [39]

ข้อจำกัดในด้านความเข้าใจง่ายในเนื้อหาของคู่มือๆ เนื่องจากโครงการวิจัยพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอยู่ในในปัจจุบันนี้ ยังไม่อยู่ในขั้นที่จะสามารถนำไปใช้ได้อย่างสมบูรณ์แบบ บางโครงการเกือบที่จะอยู่ในเชิงพาณิชย์หรือขั้นตอนการสาธิต บางโครงการยังอยู่ในห้องปฏิบัติการหรือขั้นตอนทดลองต้นแบบ ประกอบกับเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายประเภทหลากหลายรูปแบบ ส่งผลให้การรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายวิธีการ จึงไม่สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ชัดเจนและเข้าใจได้ง่าย การเลือกกระบวนการรีไซเคิลชากเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ส่วนใหญ่จะคำนึงถึงประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์และวัสดุที่ต้องการหลังจากผ่านกระบวนการรีไซเคิลเป็นหลัก

3. ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำคู่มือไปใช้งาน และข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงคู่มือ มีดังนี้

3.1 ข้อเสนอแนะในการนำคู่มือไปใช้งาน

1) การจัดการกับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องพิจารณาถึงความถูกต้องเหมาะสมควบคู่กับข้อกำหนด และกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

2) การรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องพิจารณาถึงกระบวนการรีไซเคิลที่เหมาะสม ปริมาณ อัตราการกู้คืน และความคุ้มค่า ตลอดจนผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นจากกระบวนการรีไซเคิลที่ไม่สมบูรณ์ โดยที่บางวิธีการรีไซเคิลนั้นอาจจะต้องมีกระบวนการบำบัดหรือกำจัดของเสียอันตรายต่อท้ายกระบวนการรีไซเคิล เพราะว่าการกู้คืนบางวิธีอาจสร้างของเหลวและก๊าซอันตรายที่จะต้องได้รับการบำบัดและกำจัดต่อไป

3) เพื่อให้ขั้นตอนของการรวบรวม และการจัดเก็บของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพ จำเป็นที่จะต้องได้รับความร่วมมือจากทุกภาคส่วน โดยเฉพาะภาครัฐ เช่น การกำหนดขอบเขตหน้าที่ความรับผิดชอบในการจัดเก็บรวบรวมไปจนถึงการกำจัดบำบัดในส่วนของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ภาคอุตสาหกรรม และการกำหนดจุดศูนย์กลางเพื่อการรวบรวม และการจัดเก็บ โดยเฉพาะกลุ่มของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่นอกโรงผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เป็นต้น

4) การเลือกวิธีการจัดการและกระบวนการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกต้องเหมาะสม เป็นวิธีการที่ดีเพื่อที่จะลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ แต่ในปัจจุบันประเทศไทยอาจจะยังไม่พร้อมในหลายๆ ด้าน และยังไม่สามารถดำเนินการได้ในเชิงพาณิชย์ ยิ่งเมื่อพิจารณาถึง เทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายในประเทศ อัตราการกู้คืน ความคุ้มค่า และผลตอบแทนที่ได้หลังจากผ่านการผลิต ส่วนหนึ่งเพราะว่า จำนวนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทยที่ยังมีปริมาณไม่มากพอ และยังไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนการสร้างระบบการรีไซเคิล การเลือกวิธีการที่รองลงมา คือการปรับสเถียรและฝังกลบภาคอุตสาหกรรมนั้น จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยในปัจจุบัน

3.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงคู่มือ

1) เนื่องจากความจำกัดของข้อมูลที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อให้คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สมบูรณ์ขึ้น ในอนาคตอาจเพิ่มเนื้อหาในส่วนของการขนส่ง การ

จัดเก็บ การรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ และเนื้อหาในส่วนของกระบวนการถอดประกอบซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้วัสดุมีค่าที่จะทำการรีไซเคิลต่อไปนั้นมีความเหมาะสมและเกิดการเสียน้อยที่สุด

2) กระบวนการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีในปัจจุบัน ยังไม่อยู่ในขั้นที่จะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างสมบูรณ์แบบ จำเป็นต้องมีการปรับข้อมูลในปัจจุบันอยู่เสมอ และจำเป็นที่จะต้องได้รับการส่งเสริม การศึกษาค้นคว้าวิจัยพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการ เพิ่มอัตราการกู้คืน ลดต้นทุนการรีไซเคิล ความคุ้มค่า และประสิทธิผลสูงสุดในด้านการรักษาสิ่งแวดล้อม





บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

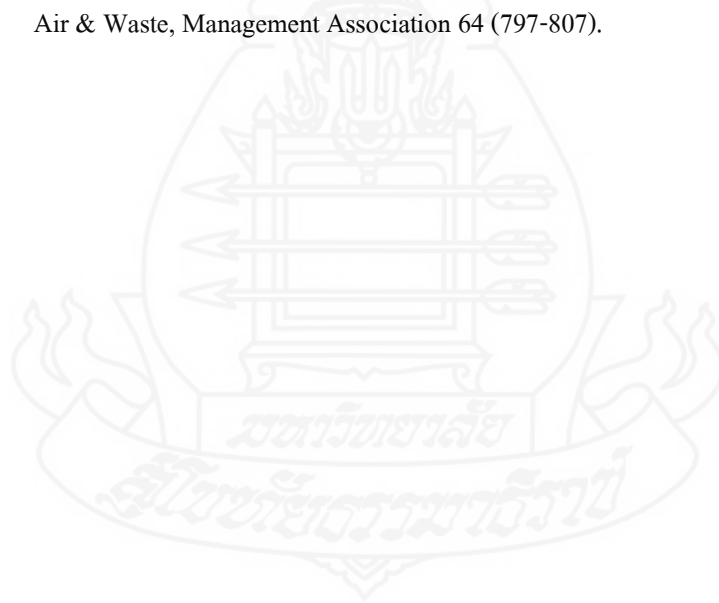
- กระทรวงอุตสาหกรรม. *แนวทางการขับเคลื่อนการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพ-เศรษฐกิจหมุนเวียน-เศรษฐกิจสีเขียว (Bio-Circular-Green Economy : BCG Model) พ.ศ. 2564 – 2570*: กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- กรมควบคุมมลพิษ. *แผนแม่บท การบริหารจัดการขยะมูลฝอยของประเทศ (พ.ศ. 2559 – 2564)*. กรมควบคุมมลพิษ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน. (2559). *พลังงานแสงอาทิตย์*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน. (2560). *คู่มือแนวทางป้องกันผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและวิธีการกำจัดกากขยะที่เกิดจากโครงการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน. กระทรวงพลังงาน
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน. (2560). *ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน. (2561). *การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน. (2563). *รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2560 -2563*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
- คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.). (2563). *แผนพัฒนากำลังไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 – 2580 ฉบับปรับปรุง ครั้งที่ 1 (PDP2018 Rev.1)*. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน: กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
- ณิชชา บุรณสิงห์. (2559). *แผงโซลาร์เซลล์ : ขยะพิษที่ไม่ควรมองข้าม* (เอกสารวิชาการ), ขยะอิเล็กทรอนิกส์. สำนักวิชาการ. สำนักงานเลขาธิการผู้แทนราษฎร ISBN 228 – 0520.
ดาวน์โหลดเอกสารจาก <http://www.parliament.go.th/library>

- มนัสนันท์ พิบาลวงศ์, วิชาชา ภูจินดา. (2559). *การจัดการแผงโซลาร์เซลล์ที่หมดอายุการใช้งาน: กรณีศึกษา จังหวัดอุบลราชธานี*. (การศึกษาค้นคว้าอิสระปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). คณะบริหารการพัฒนาสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี
- ปัญญา จันทร์ลออ. (2560). *มาตรการทางกฎหมายในการจัดการซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์*. (วิทยานิพนธ์นิเทศศาสตรมหาบัณฑิต). คณะนิเทศศาสตร์. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- พิชญ รัชฎาวงศ์, สมชัย รัตนธรรมพันธ์, เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย, จูดีศักดิ์ บุญปราโมทย์, สันต์ สัมปัตตะวนิ. (2559). *โครงการ การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า* (รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์). สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). มหาวิทยาลัยพลังงานมหาวิทาลัย, กรุงเทพฯ.
- เอกบุตร อุตมพงศ์. (2561). *เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) และการจัดการซากเซลล์แสงอาทิตย์* *อย่างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม*. (แผนแม่บทการจัดการซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์). กองบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม: กรมโรงงานอุตสาหกรรม
- Hamada Corporation and NPC Incorporated. (Oct. 2016). *Development of recycling technology using by heated knife for separation*, FY2015 NEDO debriefing session.
- IEA PVPS. (2016). *(International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programmer: Trends in Photovoltaic Applications 2016: Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015, Report IEA PVPS T1-30: 2016.*
- IRENA/IEA PVPS Task12. (2016). *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*.
- Keiichi Komoto (USA), Jin-Seok Lee (Belgium). (January 2018). *IEA INTERATION ENERGY AGENCY End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies: IEA PVPS Task12, Subtask 1, Recycling Report IEA-PVPS T12-10: 2018, New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Japan and Korea Energy Agency (KEA), Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), Republic of Korea.*
- Mitsubishi Materials Corporation. (Oct. 2016). *Development of recycling technology for crystalline Si PV modules*, FY2015 NEDO debriefing session.
- PV CYCLE. (2017). Annual Report 2016.

- PV-MOREDE Deliverable D3.3. (2017). *Second PV-Morede device manufactured*, Agreement Number: ECO/12/333078/SI2.658616.
- PVTEC. (1996). *(Photovoltaic Power Generation Technology Research Association, Research and Development on Recycling and Reuse Technology of Photovoltaic Power Generation System Fiscal year 1994 -1995 NEDO contract report.*
- Shinryo Corporation. (Oct. 2016). *Development of low-cost recycling technology for various kinds of PV modules*, FY2015 NEDO debriefing session.
- Solar Frontier K.K. (Oct. 2016). *Development of low-cost cover-glass separation techniques for laminated glass PV modules: FY2015 NEDO debriefing session.*
- Toho Kasei Co. Ltd., (Oct. 2016). *Development of high-performance recycling technology using wet-method for crystalline Si PV modules*, FY2015 NEDO debriefing session.
- Yokohama Oils & Fats Industry. (2012). *Development of an Advanced Recycling Treatment System for Photovoltaic Modules with Novel EVA Stripper*, Fiscal year 2011-2012 NEDO contract report.
- Bohland, J. R. (1997). et al., *Economic Recycling of CdTe Photovoltaic Modules*, 26th IEEE-PVSC.
- Bohland, J. R., et al. (1998). *Photovoltaics as Hazardous Materials; the Recycling*, 2nd WCPEC, Vienna, Austria.
- Bruton, T. M., et al., (1994). *Re-cycling of High Value, High Energy Content Components of Silicon PV Modules*, 12th EU-PVSEC, Nice, France.
- Doi, T., et al., (September 1999). *Experimental Study on PV Module Recycling with Organic Solvent Method*, 11th PVSEC, Sapporo, Japan.
- Doni, A., et al., (June 2012). *Electrothermal Heating Process Applied to c-Si PV Recycling*, 38th IEEE- PVSC, Austin, TX, USA.
- Ercole, P. (June 2016). *FRELP 2 Project - Full Recovery End of Life Photovoltaic*, 32nd EU-PVSEC, Munich, Germany.
- Frisson, L., et al., (1998). *Cost Effective Recycling of PV Modules and the Impact on Environment, Lifecycle, Energy Payback Time*, 2nd WCPEC, Vienna, Austria.
- Goozner, R. E., et al., (1997). *A Process to Recycle Thin Film PV Materials*, 26th IEEE-PVSC.

- Granata, G., et al., (2014). *Recycling of Photovoltaic Panels by Physical Operations*, Solar Energy Materials & Solar Cells 123 (239–248).
- Kang, S., et al., (2012). *Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules*, Renewable Energy 47 (152-159).
- Lee, J. -K., Lee, J. -S., et al., (November 2015). *Low-cost Recovery Process of Unbroken Solar Cell from PV Module*, 25th PVSEC, Busan, Korea.
- Lee, J. -S., (October 2016). *Recovery Technology of Intact Wafer from End-of-life c-Si PV Module*, 26th PVSEC, Singapore.
- Liu, J. (March 2014). *Experimental Study on Recycling of Waste Crystal Silicon PV Modules Technology*, PV Environmental Health and Safety Workshop, Beijing, China.
- Menezes, S. (1998). *Non-Destructive Approach for Recycling of CuInSe₂ and Related PV Modules*, 2nd WCPEC, Vienna, Austria.
- Noda, M., Kushiya, K., Saito, H., Komoto, K., and Matsumoto, T. (November 2014). *Development of the PV Recycling System for Various Kinds of PV Modules*, 6th WCPEC, Kyoto, Japan.
- Palitzsch, W., and Loser, U. (June 2012). *Economic PV Waste Recycling Solutions – Results from R&D and Practice*, 38th IEEE-PVSC, Austin, TX, USA.
- Palitzsch, W. (June 2016). *Recycling Technology for Thin Film Photovoltaic Scrap*, Workshop on ‘PV End-of-Life Management: Challenges and Opportunities’ at the 32nd EU-PVSEC.
- Park, J., et al., (2016). *An Eco-Friendly Method for Reclaimed Silicon Wafers from a Photovoltaic Module: from Separation to Cell Fabrication*, Green Chem. 18 (1706-1714).
- Steeghs, W. (June 2016). *Suez Water: Recovery of Indium and Gallium from Flat Panel Displays and Photovoltaic (CIGS) modules*, RECLAIM Workshop on Reclamation of Key Metals from Energy Efficient Lighting, Flat Panel Displays and Photovoltaic modules.
- Wade, A. (September 2014). *Evolution of First Solar’s Module Recycling Technology*, Workshop on PV Life Cycle Management and Recycling at the 29th EU-PVSEC, Amsterdam, the Netherlands.

- Wambach, K. (2004). *Recycling of Solar Cells and Photovoltaic Modules*, 19th EU-PVSEC, Paris, France.
- Wang, T. -Y., et al., (June 2012). *Recycling of Materials from Silicon Base Solar Cell Module*, 38th IEEE-PVSC, Austin, TX, USA.
- Wang, Z. (March 2014). *China PV Recycling technology -Physical Method*, *PV Environmental Health and Safety Workshop*, Beijing, China.
- Weyhe, R. (September 2014). *State-of-Research: Enhanced Recovery Technologies for Critical Raw Materials*, *Workshop on PV Life Cycle Management and Recycling* at the 29th EU-PVSEC, Amsterdam, Netherlands.
- Wiegersma, S. (June 2016). *Introduction to the FP7 RECLAIM project*, *RECLAIM Workshop on Reclamation of key metals from Energy Efficient Lighting, Flat Panel Displays and Photovoltaic modules*.
- Yi, Y. -K., et al., (2014). *Recovering Valuable Metals from Recycled Photovoltaic Modules*, *J. of Air & Waste, Management Association* 64 (797-807).



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คู่มือ

เรื่อง การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์



คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

Manual on Disposal of Expired Solar Cells

นายธนารุณี ไชยลังกา

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม)

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์
Manual on Disposal of Expired Solar Cells

นายธนวุฒิ ไชยลังกา

คำนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทั้งในภาคครัวเรือน อุตสาหกรรม และภาคส่วนอื่นๆ เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญต่อการพัฒนาทางด้านพลังงาน นอกจากข้อดีในด้านของความมั่นคงทางด้านพลังงานแล้ว เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากที่สุด เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีทางการผลิตพลังงานไฟฟ้าอื่นๆ ที่มีในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อประเมินจากวงจรชีวิต แต่ทุกๆ เทคโนโลยี ศักยภาพของการทำงานจะเสื่อมสภาพหรือลดระดับลงจนถึงจุดสิ้นสุดของวงจรชีวิต แล้วท้ายที่สุดต้องมีการทดแทนหรือเปลี่ยนใหม่ เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ก็เช่นกัน เซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีอายุการใช้งานประมาณ 30 ปี หลังจากเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านั้นเสื่อมสภาพหรือประสิทธิภาพการทำงานลดลง ซึ่งจะกลายมาเป็นของเสียสะสม ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้จะกลายเป็นขยะพิษ ซึ่งกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้จัดให้เป็นของเสียอันตรายแล้ว เพราะของเสียเหล่านี้มีองค์ประกอบที่อาจเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้แก่ สารจำพวกโลหะหนักหรือพลาสติกต่างๆ จึงจำเป็นต้องเริ่มศึกษาวิธีบริหารจัดการวางแผนทางเลือกที่เหมาะสมในการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์พวกนี้ เพื่อลดผลกระทบต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อม

สำหรับประเทศไทย รัฐบาลได้มีแผนการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ 15,574 MW ภายในปี 2580 ตามร่างแผน Alternative Energy Development Plan (AEDP) ปี 2561 และมีการส่งเสริมด้านอื่นๆ ซึ่งจะทำให้เกิดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์ประกอบสะสมเป็นจำนวนมากในอนาคต หากอายุการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ย 20 ปี คาดว่าปี 2565 จะมีของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เกิดขึ้น 112 ตัน และเพิ่มเป็น 1.55 ล้านตัน ในปี 2600 ทั้งนี้ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างเป็นระบบและครบวงจรในประเทศ และยังไม่มีระบบการบริหารจัดการและการวางแผนเพื่อรองรับของเสียเหล่านี้เป็นรูปธรรม

คู่มือเรื่องการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ฉบับนี้ เป็นประเภทคู่มือทั่วไป ไม่ได้ถูกกำหนดให้ใช้งานเฉพาะเจาะจงสำหรับหน่วยงานหรือองค์กรใดเป็นกรณีพิเศษ การจัดทำคู่มือโดยมุ่งเน้นทำการศึกษาส่วนประกอบ วิธีการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) รวบรวมข้อมูล จากสื่อการเรียนรู้ต่างๆ เพื่อเรียบเรียงและจัดทำเป็นคู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ข้อมูลและแนวทางจากคู่มือเล่มนี้จะช่วยให้ผู้ศึกษาได้สามารถเพิ่มเติมความรู้ความเข้าใจเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการจัดการกับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพ

ธนาวุฒิ ไชยลังกา

กรกฎาคม 2564

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์ และส่วนประกอบ	2
1.1 เซลล์แสงอาทิตย์	2
1.2 ความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์	2
1.3 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์และส่วนประกอบ	2
1.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	8
1.5 การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายในครัวเรือน	10
1.6 การผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	11
บทที่ 2 ปริมาณและผลกระทบจากของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์	13
2.1 ปริมาณการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์	13
2.2 ของเสียที่เกิดจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	15
2.3 ผลกระทบที่เกิดจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	17
2.4 กฎหมายที่เกี่ยวข้องในการจัดการของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์	21
บทที่ 3 สถานการณ์ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และการกำจัด	24
3.1 สถานการณ์ของขยะอิเล็กทรอนิกส์	24
3.2 สถานการณ์ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	25
3.3 การกำจัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน	27
บทที่ 4 การจัดการและการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์	29
4.1 ทิศทางในการรีไซเคิลของเสียประเภทขยะอิเล็กทรอนิกส์	29
4.2 แนวคิดและหลักการในการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	30
4.3 การรีไซเคิลของเสียจากระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	32
4.4 กระบวนการจัดเก็บรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	41
4.5 กระบวนการคัดแยกทางกล	43
4.6 วิธีการจัดการและการรีไซเคิลของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์	60
4.7 กระบวนการการปรับเสถียร และการฝังกลบของเสียที่เกิดจากกระบวนการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	91

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.8 กระบวนการฝังกลบกากอุตสาหกรรมอันตราย	93
บทที่ 5 บทสรุปของการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	96
5.1 ภาพรวมของการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทย	96
5.2 บทสรุปของการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	97
5.3 ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	102

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	อายุใช้งานของอุปกรณ์หลักในระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์	15
ตารางที่ 2.2	องค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกและชนิดฟิล์มบาง	17
ตารางที่ 3.1	กำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน	26
ตารางที่ 4.1	การเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบและแรงจูงใจในการรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์	38
ตารางที่ 4.2	บทบาทหน้าที่ของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในกระบวนการจัดเก็บรวบรวมของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์	41
ตารางที่ 4.3	ค่าความหนาแน่นของวัสดุต่างๆ	49
ตารางที่ 4.4	อัตราส่วนของการนำไฟฟ้าต่อความหนาแน่นของมวลโลหะชนิดต่างๆ	56
ตารางที่ 4.5	ผลการประยุกต์ใช้เครื่องคัดแยกด้วยกระแสสวนกับของเสียอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ	57
ตารางที่ 4.6	ผลการประยุกต์ใช้เครื่องคัดแยกด้วยไฟฟ้าสถิตโคโรนา กับของเสียอื่นๆ	58
ตารางที่ 4.7	วัสดุต่างๆ ที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน	66
ตารางที่ 4.8	ตัวอย่างงานวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน โดยกระบวนการทางความร้อน	71
ตารางที่ 4.9	สรุปเทคโนโลยีการรีไซเคิลด้วยวิธีการทางกล	75
ตารางที่ 4.10	การออกแบบพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม	89

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1.1	ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน	3
ภาพที่ 1.2	ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน	3
ภาพที่ 1.3	ตัวอย่างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง	5
ภาพที่ 1.4	ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง	5
ภาพที่ 1.5	ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์	6
ภาพที่ 1.6	ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดเซเลไนด์	7
ภาพที่ 1.7	ตัวอย่างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ฟิล์มบาง	8
ภาพที่ 1.8	การทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์	9
ภาพที่ 1.9	ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายในครัวเรือน	10
ภาพที่ 1.10	ภาพรวมกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงงานพลังงานแสงอาทิตย์	12
ภาพที่ 2.1	สัดส่วนมูลค่ารวมของอุปกรณ์หลักในโครงการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์	15
ภาพที่ 2.2	แผนผังแสดงการเกิดของเสียในกระบวนการ	16
ภาพที่ 2.3	ขอบเขตการศึกษาของไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	19
ภาพที่ 2.4	อัตราปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ จากการประเมินวัฏจักรชีวิต	20
ภาพที่ 3.1	แผนผังแนวทางการจัดการกับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน	28
ภาพที่ 4.1	แนวคิดการจัดการของเสียอันตรายด้วยหลัก 3R	31
ภาพที่ 4.2	แผนผังทั่วไปของการบำบัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อหมดอายุการใช้งาน	33
ภาพที่ 4.3	ผังกระบวนการรีไซเคิลกระจกลามิเนต	35
ภาพที่ 4.4	ผังกระบวนการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม	36
ภาพที่ 4.5	กระบวนการแยกชิ้นส่วนและรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์	39
ภาพที่ 4.6	แนวทางการจัดการกับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	40
ภาพที่ 4.7	การแบ่งชั้นอนุภาคเป็นชั้นๆ บนโต๊ะลาดเอียงที่อยู่ใต้น้ำ	49
ภาพที่ 4.8	แผนผังแสดงเครื่องร่อนที่ใช้แรงจากเครื่องสูบลม	51
ภาพที่ 4.9	เครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็กชนิดพักแบบถ้ง	53
ภาพที่ 4.10	เครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็กชนิดพักแบบสายพาน	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.11	เครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็กชนิดแขวน	54
ภาพที่ 4.12	แนวคิดของวัฏจักรหมุนเวียนของการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน	60
ภาพที่ 4.13	การรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยการคัดแยกเบื้องต้น	61
ภาพที่ 4.14	การรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยการสกัดเอาโลหะที่มีค่าออกจากเซลล์แสงอาทิตย์	61
ภาพที่ 4.15	ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกที่เสื่อมสภาพแล้ว	62
ภาพที่ 4.16	ผังขั้นตอนการจัดการกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน	63
ภาพที่ 4.17	การแยกส่วนประกอบต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่	63
ภาพที่ 4.18	ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกนำไปเผาด้วยความร้อน 600 องศาเซลเซียส	64
ภาพที่ 4.19	ส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์และสารเคลือบ	64
ภาพที่ 4.20	กระบวนการกัดและล้างชั้นป้องกันการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน	65
ภาพที่ 4.21	ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์หลังผ่านการกัดชั้นป้องกันการสะท้อนแสงออก	65
ภาพที่ 4.22	ตัวอย่างผลึกเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการหลอมใหม่	66
ภาพที่ 4.23	แนวทางการกำจัดสารห่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอนในระยะแรก	67
ภาพที่ 4.24	เทคโนโลยีล่าสุดสำหรับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน	77
ภาพที่ 4.25	กระบวนการและแผนผังสรุปสำหรับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน	80
ภาพที่ 4.26	ลักษณะโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน	81
ภาพที่ 4.27	ลักษณะตัวอย่างรูปแบบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน	81
ภาพที่ 4.28	วัฏจักรของเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมเทลลูไรด์	82
ภาพที่ 4.29	ขั้นตอนการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมเทลลูไรด์	83
ภาพที่ 4.30	การวิจัยและพัฒนาล่าสุดสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม	85
ภาพที่ 4.31	ผังกระบวนการรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม	90
ภาพที่ 4.32	ตัวอย่างของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการปรับเสถียร	91

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.33	การปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งซากแพลงจรรอเล็กทรอนิกส์	92
ภาพที่ 4.34	ก้อนตัวอย่างแข็ง (a) ตัวอย่างที่ไม่มีผงสารตกค้างและ (b) ตัวอย่างที่ผสมผงสารตกค้าง	92
ภาพที่ 4.35	หลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย	94
ภาพที่ 4.36	ชั้นปิดและชั้นปูรองหลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย	95

คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

Manual on Disposal of Expired Solar Cells

บทที่ 1

เซลล์แสงอาทิตย์ และส่วนประกอบ

1.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์มีชื่อเรียกกันไปหลากหลายชื่อ เช่น เซลล์สุริยะ โซลาเซลล์ (solar cell) หรือเซลล์ PV (Photovoltaic; PV) ซึ่งต่างก็มีที่มาจากคำว่า Photovoltaic โดยแยกออกเป็น Photo หมายถึง แสง และ Volt หมายถึง แรงดันไฟฟ้า เมื่อรวมคำแล้วหมายถึง กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของแสงบนวัตถุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้

1.2 ความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์

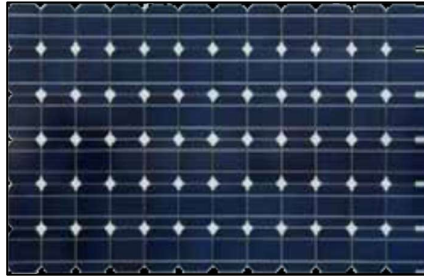
เซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกค้นพบมานานแล้ว ตั้งแต่ พ.ศ. 2436 ถึงจะมีการค้นพบมานานแล้วแต่ก็ยังไม่มีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมา จนเมื่อเวลาผ่านไป อีก 61 ปี จึงได้มีการสร้างขึ้นมาครั้งแรกในปี 1954 (พ.ศ. 2497) โดย แชปปิน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียสัน (Pearson) แห่งเบลล์เทลเลโฟน (Bell Telephone) โดยทั้ง 3 ท่านนี้ ได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น (P-N) แบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สารเข้าไปในผลึกของซิลิคอน จนได้เซลล์แสงอาทิตย์อันแรกของโลก ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 6 ซึ่งปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาขึ้นจนมีประสิทธิภาพสูงกว่าร้อยละ 15 แล้ว ในระยะแรกเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะใช้สำหรับโครงการด้านอวกาศ ดาวเทียมหรือยานอวกาศที่ส่งจากพื้นโลกไปโคจรในอวกาศ ก็ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน ต่อมาจึงได้มีการนำเอาแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้บนพื้นโลกเช่นในปัจจุบันนี้ เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรกๆ ส่วนใหญ่จะมีสีเทาๆ แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์มีสีต่างๆ กันไป เช่น แดง น้ำเงิน เขียว ทอง เป็นต้น เพื่อความสวยงาม

1.3 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์และส่วนประกอบ

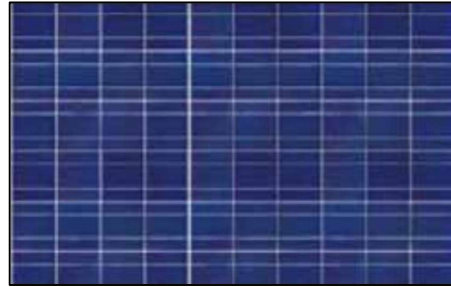
ปัจจุบันมีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ ขึ้นหลายประเภท ซึ่งหากจำแนกตามเทคโนโลยีการผลิตและส่วนประกอบได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่

1.3.1 กลุ่มที่ 1 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก (crystalline silicon solar cells; c-Si)

ปัจจุบันมีการติดตั้งใช้งานกันอย่างแพร่หลายประกอบไปด้วยชนิดผลึกเดี่ยว (single/monocrystalline silicon) ชนิดผลึกรวม (poly/Multi-crystalline silicon) ริบบอน (ribbon-crystalline silicon) นอกจากนี้แล้วเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้นำเทคโนโลยีฟิล์มบางซิลิคอนมาผนวกกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน (heterojunction with intrinsic thin layer; HIT) ก็กำลังมีแนวโน้มที่จะมีการใช้งานมากขึ้นเช่นกัน แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากผลึกซิลิคอนทั้งแบบผลึกเดี่ยวและแบบผลึกรวม (ภาพที่ 1.1)



ชนิดผลึกเดี่ยว (single crystalline silicon solar cell)



ชนิดผลึกรวม (polycrystalline silicon solar cell)

ภาพที่ 1.1 ตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน

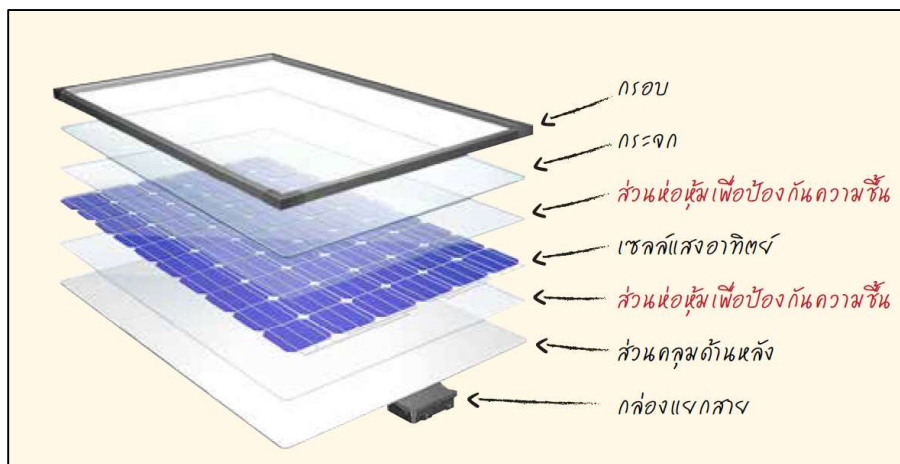
ที่มา : www.98solar.com

กลุ่มที่ 1.1 ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (single crystalline silicon solar cell) หรือที่รู้จักกันในชื่อ mono crystalline silicon solar cell มีลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก ซิลิคอนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในโลกชนิดหนึ่ง สามารถถลุงได้จากหินและทราย เรานิยมใช้ธาตุซิลิคอนในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้ทำทรานซิสเตอร์และไอซีและเซลล์แสงอาทิตย์ เทคโนโลยี c-Si ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย นิยมใช้งานในพื้นที่เฉพาะได้แก่ ในชนบท หมู่บ้าน สวน ไร่ นา ที่ไม่มีไฟฟ้าใช้เป็นหลัก

กลุ่มที่ 1.2 ชนิดผลึกรวมซิลิคอน (polycrystalline silicon solar cell) มีลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลีได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อแก้ปัญหาต้นทุนสูงของแบบผลึกเดี่ยวซิลิคอนแบบผลึกโพลีหรือโพลีซิลิคอน ก็คือก้อนซิลิคอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของชิ้นเล็กๆ (ขนาดระดับไมโครเมตร - มิลลิเมตร) ของผลึกเดี่ยวของซิลิคอน

ส่วนประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากผลึกซิลิคอน

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากผลึกซิลิคอนทั้งแบบผลึกเดี่ยวและแบบผลึกรวม จะมีโครงสร้างประกอบด้วยส่วนต่างๆ 4 ส่วนหลัก (ภาพที่ 1.2)



ภาพที่ 1.2 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน

ที่มา : <http://www.dupont.com>

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากผลึกซิลิคอนทั้งแบบผลึกเดี่ยวและแบบผลึกรวม มีโครงสร้างและส่วนประกอบด้วย

1. ส่วนคลุมด้านหน้า (front cover) ซึ่งเป็นวัสดุโปร่งแสง โดยทั่วไปจะเป็นกระจกและอาจมีบางรุ่นที่เป็นพลาสติก
2. ส่วนห่อหุ้มเพื่อป้องกันความชื้น (encapsulate) โดยทั่วไปจะใช้วัสดุ ethylene - vinyl acetate (EVA) หรือ polyvinyl butyryl (PVB)
3. ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ (silicon solar cells) และโลหะนำไฟฟ้า (ribbon)
4. ส่วนคลุมด้านหลัง (back cover) โดยทั่วไปจะใช้วัสดุ Polyvinyl fluoride หรือเรียกว่า Tedlar หรือใช้กระจกในบางโครงสร้าง

หลังจากนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการ Laminate แล้วก็จะถูกนำไปติดตั้งกรอบนอก (frame) เพื่อความแข็งแรงและใช้สำหรับยึดกับโครงสร้างที่จะใช้ติดตั้ง ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้คืออลูมิเนียม นอกจากนี้แล้วยังมีส่วนของกล่องสำหรับต่อขั้วไฟฟ้า (junction-box) ซึ่งภายในจะมีขั้วสำหรับยึดสกรูและมีการติดตั้งบายพาสไดโอด (bypass diode) อีกด้วย

1.3.2 กลุ่มที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม

เซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้ถูกออกแบบพัฒนาเพื่อให้สามารถประกอบและใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

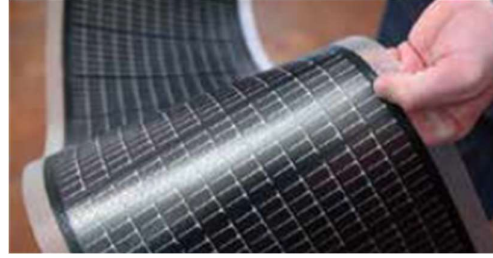
เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม กลุ่มที่ 1 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอน (amorphous silicon solar cell: A-Si)

มีลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมโครเมตร (0.0005 มิลลิเมตร) น้ำหนักเบามาก และประสิทธิภาพเพียง 5 - 10% ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมโครเมตร (0.0005 มิลลิเมตร) น้ำหนักเบามาก และประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 5 - 10 เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ธาตุซิลิคอนเช่นกัน แต่จะไม่ใช่ผลึก แต่ผลของสารอะมอร์ฟัสจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางของซิลิคอน ซึ่งมีความบางประมาณ 300 นาโนเมตร ทำให้ไม่สิ้นเปลืองเนื้อวัสดุ น้ำหนักเบา การผลิตทำได้ง่าย และข้อดีของ a-Si ไม่เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม จึงเหมาะที่จะประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่กินไฟฟ้าน้อย เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ วิทยุทรานซิสเตอร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนยังมีปัญหาในด้านการเสื่อมสภาพของชั้นดูดกลืนแสง (degradation) ส่งผลให้แนวโน้มการผลิตตลอดจนการนำมาใช้งานยังน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น (ภาพที่ 1.3)



ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

(Amorphous Silicon Solar Cell ; A-Si)

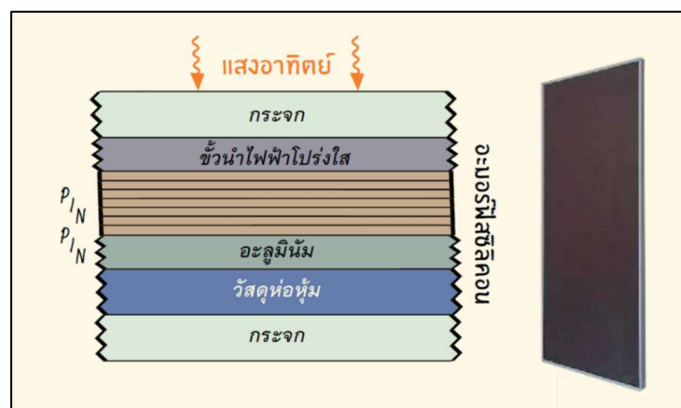


ชนิดฟิล์มบาง

ภาพที่ 1.3 ตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง

ที่มา : <http://hq.prd.go.th>; <http://www.mysolargenerator.info>

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนถูกสร้างบนวัสดุฐานรองขนาดใหญ่โดยเคลือบสารหรือฟิล์มบนวัสดุ (Transparent Conductive Oxide : TCO) ทำให้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการผลิตจะต้องทำการตัดแบ่งเซลล์ออกเป็นเซลล์เล็กๆ ที่เท่ากันด้วยแสงเลเซอร์ซึ่งจะใช้เทคนิคในการเลือกความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต่างกันเพื่อตัดวัสดุที่แตกต่างกันก่อนนำมาต่อเข้าด้วยกันด้วยขั้วโลหะเพื่อนำไปสู่กระบวนการประกอบแผงเซลล์ต่อไปภายหลังจากสิ้นสุดกระบวนการตัดด้วยแสงเลเซอร์และทำการต่อวงจรด้วยโลหะแล้วแผงเซลล์จะถูกนำไปเคลือบ ซึ่งโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนจะมีเพียงส่วนที่เป็น EVA และแผ่นกระจกปิดทับด้านหลังเท่านั้น อย่างไรก็ตามในการนำไปติดตั้งใช้งานนั้นอาจมีการเสริมกรอบอลูมิเนียมเพื่อเสริมความแข็งแรงและใช้เป็นจุดยึดแผงกับโครงสร้างติดตั้งลักษณะโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบางซิลิคอน (ภาพที่ 1.4)

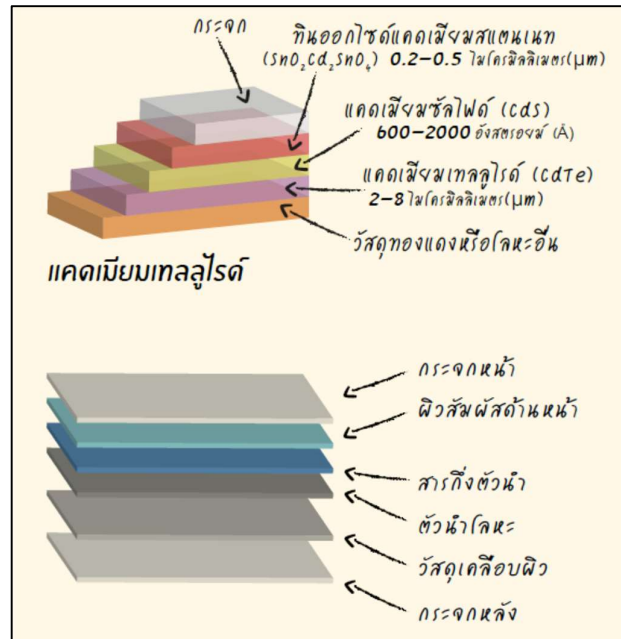


ภาพที่ 1.4 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง

ที่มา : <http://ywang13.myweb.usf.edu>

เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม กลุ่มที่ 2 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride : CdTe)

เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานในปัจจุบันอีกชนิดหนึ่ง คือ ชนิดฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride : CdTe) เนื่องจากประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 15) ซึ่งการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdTe นี้ จะมีโครงสร้าง วัสดุที่ใช้ ตลอดจนขั้นตอนการผลิตที่ใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน จะแตกต่างกันในส่วนของคุณสมบัติของวัสดุของเซลล์และสารที่ใช้เคลือบโดยโครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe (ภาพที่ 1.5)



ภาพที่ 1.5 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์

ที่มา : National Renewable Energy Laboratory. NREL: Photovoltaics Research - Polycrystalline Thin-Film Materials and Devices R and D. webpage, October 2011 <http://www.firstsolar.com>

ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe จะมีการสร้างขั้ว P-N แล้วผ่านกระบวนการเคลือบสารต่างๆ และประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน แต่ละชั้นของวัสดุและโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe มีหน้าที่แตกต่างกันดังนี้

1. กระจกนำไฟฟ้าด้านหน้า ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของแผงเซลล์โดยกระจกชนิดนี้จะเคลือบด้วยขั้วโลหะนำไฟฟ้าทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาจ่ายโหลด โดยขั้วโลหะนำไฟฟ้าที่นิยมใช้คือ ทินออกไซด์แคดเมียมสแตนนัท ($\text{SnO}_2\text{Cd}_2\text{SnO}_4$)
2. ชั้นบัฟเฟอร์ (buffer-layer) เป็นชั้นที่ถูกสร้างทับชั้นกระจกโดยวัสดุที่ใช้คือ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เพื่อให้เป็นชั้น n โดยความหนาที่ใช้จะอยู่ในช่วง 60-200 นาโนเมตร (nm)
3. ชั้นดูดกลืนแสง (absorber-layer) จะถูกสร้างทับชั้นบัฟเฟอร์ด้วยวัสดุชนิดฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) ที่ความหนาประมาณ 2-8 ไมครอนเมตร (μm)

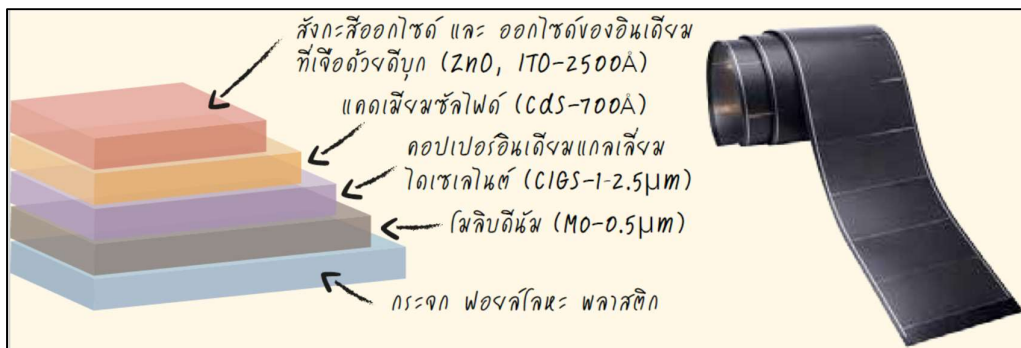
4. ขั้วโลหะด้านหลัง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นโลหะทองแดง (Copper; Cu) จะถูกสร้างเป็นชั้นสุดท้ายเพื่อเป็นขั้วต่อไฟฟ้าด้านหลัง

ปัจจุบันผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe มีอยู่เพียงไม่กี่ราย เนื่องจากความนิยมในการใช้งานน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนแม้ว่าประสิทธิภาพจะสูงกว่าก็ตาม เพราะยังมีความกังวลเรื่องสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นจากสารแคดเมียมที่เป็นโลหะหนักอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งปัจจุบันเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นเรื่องสำคัญที่ทั่วโลกต่างให้ความสนใจ รวมถึงประเทศไทยที่มีการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังไม่แพร่หลายนัก

เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม กลุ่มที่ 3 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดเซเลไนด์ (Copper Indium Gallium di Selenide: CIGS)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดเซเลไนด์ ถือเป็นเซลล์แสงอาทิตย์อีกชนิดหนึ่งซึ่งได้รับการพัฒนาประสิทธิภาพตลอดจนมีแนวโน้มแบ่งการตลาดที่มีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จัดอยู่ในประเภทฟิล์มบางมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์จะแตกต่างกันในส่วนของสารเคมีที่ใช้ สำหรับโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1. ฝาครอบแก้วด้านหน้าทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของแผงเซลล์โดยกระจกชนิดนี้จะเคลือบด้วยขั้วโลหะนำไฟฟ้าทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาจ่ายโหลดโดยขั้วโลหะนำไฟฟ้าที่ใช้ คือ สังกะสีออกไซด์ (ZnO) และ ออกไซด์ของอินเดียมที่เจือด้วยดีบุก (ITO)
2. ชั้นบัฟเฟอร์ (buffer-layer) เป็นชั้นที่ถูกสร้างทับชั้นกระจกโดยวัสดุที่ใช้คือ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เพื่อให้เป็นชั้น n โดยความหนาที่ใช้จะอยู่ในช่วง 700 นาโนเมตร (nm)
3. ชั้นดูดกลืนแสง (absorber-layer) จะถูกสร้างทับชั้นบัฟเฟอร์ด้วยวัสดุ CIGS ที่ความหนาประมาณ 1-2.5 ไมโครเมตร (μm)
4. กระจกเคลือบขั้วโลหะโมลิบดีนัม (Mo) ลักษณะโครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดเซเลไนด์ (ภาพที่ 1.6)



ภาพที่ 1.6 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดเซเลไนด์ (Copper Indium Gallium di Selenide ; CIGS)

ที่มา : www.solarmade.com

1.3.3 กลุ่มที่ 3 เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ฟิล์มบาง

เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (dye -sensitized solar cells) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอต (quantum dot solar cells) เป็นต้น อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่พัฒนาใหม่นี้ยังไม่มีการผลิตในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลายจึงยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์ (ภาพที่ 1.7)



ชนิดสีย้อมไวแสง



ชนิดควอนตัมดอต

ภาพที่ 1.7 ตัวอย่างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ฟิล์มบาง

ที่มา : assets.inhabitat.com; <https://th.wikipedia.org>

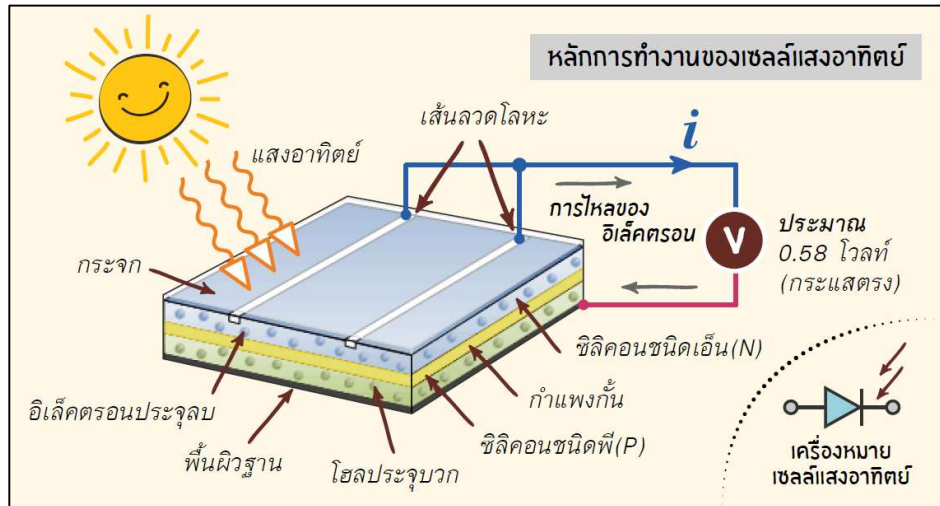
1.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ก็จะมีการสร้างพาหะนำไฟฟ้าที่มีประจุลบและไฟฟ้าประจุบวกขึ้น คือ อิเล็กตรอนและ โฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็น (PN) ก็จะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก ที่ฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิด P ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิด N ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ถ้าต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลเวียนขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว จะให้กระแสไฟฟ้าประมาณ 2 -3 แอมแปร์ และให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดประมาณ 0.6 โวลต์

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีไม่มากนัก ถ้าจะให้ได้กำลังไฟฟ้ามักเพียงพอสำหรับใช้งาน จึงมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ เซลล์มาต่อกันเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (solar modules) ลักษณะการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับความต้องการกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าถ้ามีการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน ก็จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าแอมป์ (amp; A) เพิ่มมากขึ้น ถ้ามีการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมก็จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้า (volt) สูงขึ้น

เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและบวกขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอนและ โฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็น) จะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะนำ

ไฟฟ้าชนิดอิเล็กทรอนิกส์ไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก (ปกติที่ฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น (ภาพที่ 1.8)



ภาพที่ 1.8 การทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา : <http://www.electronics-tutorials.ws/diode/bypass-diodes.html>

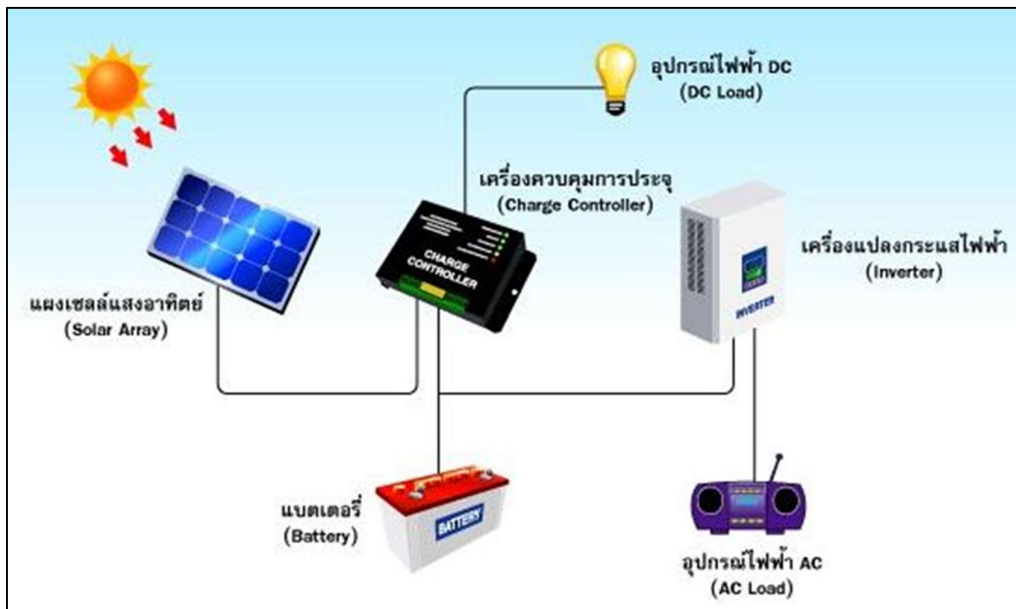
ปัจจุบันโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยมีทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก มีการเลือกเทคโนโลยีในการติดตั้งแผงเซลล์อาทิตย์ที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงินลงทุนของแต่ละบริษัท ที่นิยมใช้กันอยู่เวลานี้จะมีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ การติดตั้งแบบอยู่กับที่ (fixed system) ซึ่งเป็นการติดตั้งแบบระบุตำแหน่งชัดเจน โดยใช้การคำนวณจากข้อมูลเฉลี่ยของระดับความเข้มของแสงในแต่ละพื้นที่ เพื่อกำหนดองศาของการติดตั้งแผงเพื่อรับแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด และการติดตั้งแบบหมุนตามดวงอาทิตย์ (tracking system) การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอยู่กับที่นี้ ทำให้ได้รับค่าพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้ดีเพียงบางช่วงเวลาหรือประมาณ 5 - 6 ชั่วโมงต่อวัน เนื่องจากดวงอาทิตย์มีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา จากทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันตก แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่กับที่นี้จะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ได้เต็มที่ในเวลาเที่ยงวันเท่านั้น จึงทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เต็มศักยภาพเท่าที่ควร แต่ข้อดีของการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้จะมีต้นทุนในการติดตั้งไม่สูงมากนัก และการดูแลรักษาภายนอกจากการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบคงที่ (fixed system) ซึ่งโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ในประเทศไทยนิยมใช้กันแล้ว ยังมีเทคโนโลยีที่ช่วยให้การผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นด้วย นั่นคือ การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามดวงอาทิตย์ (tracking system)

หลักการทำงานของการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามดวงอาทิตย์นี้ เป็นการติดตั้งที่ให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหมุนตามดวงอาทิตย์ เพื่อรับความเข้มของแสงได้สูงสุดตลอดวัน โดยการหมุนจะถูกควบคุมด้วยระบบเซ็นเซอร์หรือการตั้งเวลา เพื่อควบคุมตำแหน่งของแผงให้หมุนไปตามการเคลื่อนที่ของดวง

อาทิตย์ตามช่วงเวลาระหว่างวัน ซึ่งจะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เก็บพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นั่นคือ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบคงที่ประมาณร้อยละ 20

1.5 การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายในครัวเรือน

เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง จึงนำกระแสไฟฟ้าไปใช้ได้เฉพาะกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น หากต้องการนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับหรือเก็บสะสมพลังงานไว้เพื่อใช้ต่อไป ต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ อีก โดยรวมเข้าเป็นระบบที่ผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์สำคัญๆ มีดังนี้ (ภาพที่ 1.9)



ภาพที่ 1.9 ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายในครัวเรือน

1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (solar module) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและมีหน่วยเป็นวัตต์ (watt) มีการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ เซลล์มาต่อกันเป็นแถวหรือเป็นชุด (solar array) เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าใช้งานตามที่ต้องการ โดยการต่อกันแบบอนุกรม จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และการต่อกันแบบขนาน จะเพิ่มพลังงานไฟฟ้า หากสถานที่ตั้งทางภูมิศาสตร์แตกต่างกัน ก็จะมีผลให้ปริมาณของค่าเฉลี่ยพลังงานสูงสุดในหนึ่งวันไม่เท่ากันด้วย รวมถึงอุณหภูมิก็มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าคือ หากอุณหภูมิสูงขึ้นการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะลดลง

2) เครื่องควบคุมการประจุ (charge controller) ทำหน้าที่ประจุกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่แบตเตอรี่ และควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าให้มีปริมาณเหมาะสมกับแบตเตอรี่ เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ รวมถึงการจ่ายกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ด้วย ดังนั้น การทำงานของเครื่องควบคุมการประจุ คือ เมื่อประจุกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่จนเต็มแล้ว จะหยุดหรือลดการประจุกระแสไฟฟ้า

(และมักจะมีคุณสมบัติในการตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า กรณีแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงด้วย) ระบบพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าในกรณีที่มีการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่เท่านั้น

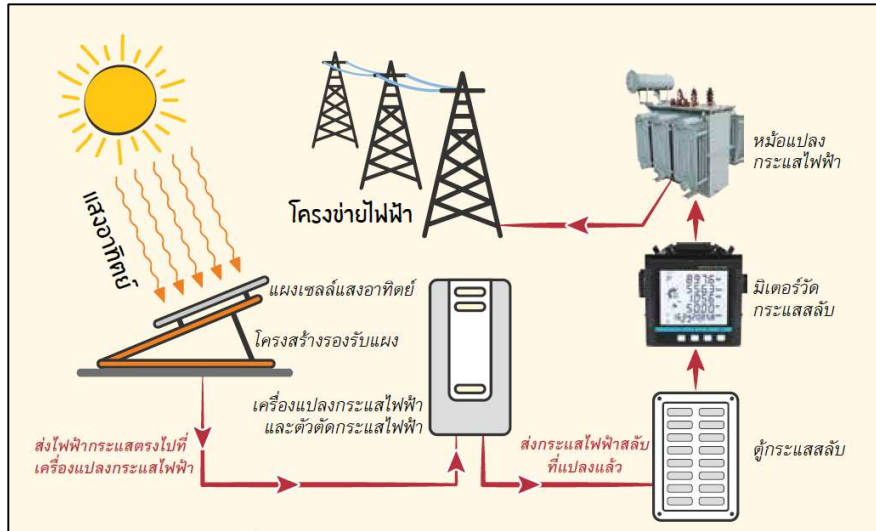
3) แบตเตอรี่ (battery) ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ใช้เวลาที่ต้องการ เช่น เวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เวลากลางคืน หรือนำไปประยุกต์ใช้งานอื่นๆ แบตเตอรี่มีหลายชนิดและหลายขนาดให้เลือกใช้งานตามความเหมาะสม

4) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (inverter) ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าจากกระแสตรง (DC) ที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อให้สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ Sine wave inverter ใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับทุกชนิดและ Modified sine wave inverter ใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่มีส่วนประกอบของมอเตอร์และหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เป็น Electronic ballast โดยจะรับกระแสไฟฟ้าตรงไม่ว่าจากการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือไฟฟ้าตรงจากแบตเตอรี่ หลังจากนั้นกระแสก็จะผ่านวงจรไฟฟ้าภายในตัวอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ซึ่งจะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันให้สลับกันไปมาระหว่างความต่างศักย์ที่เป็นบวกและลบจนได้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีความถี่ 50-60 เฮิร์ตซ์ (Hz) 220 หรือ 380 โวลต์ (V) สำหรับใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ในบ้าน ในระบบที่มีขนาดเล็กผู้ผลิตอาจจะรวมวงจรอินเวอร์เตอร์เข้าเป็นชุดเดียวกับวงจรควบคุมการประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ (charger and inverter)

5) ระบบป้องกันฟ้าผ่า (lightning protection) ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายที่เกิดกับอุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อฟ้าผ่าหรือเกิดการเหนี่ยวนำทำให้ความต่างศักย์สูง ในระบบทั่วไปมักไม่ใช้อุปกรณ์นี้จะใช้สำหรับระบบขนาดใหญ่และมีความสำคัญเท่านั้น รวมถึงต้องมีระบบสายดินที่มีประสิทธิภาพด้วย

1.6 การผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อสายส่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง แล้วผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนกระแสตรงให้กลายเป็นกระแสสลับ จากนั้นกระแสสลับจะผ่านระบบป้องกันและมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า และผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเพิ่มแรงดันให้เข้ากับระบบสายส่ง หม้อแปลงไฟฟ้า (transformer) เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าแรงต่ำและระบบไฟฟ้าแรงสูง โดยมีความจำเป็นคือกระแสไฟฟ้าตรงที่ออกจากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะต้องไหลมาผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นตามแรงดันของโครงข่าย เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าได้ ภาพรวมระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (ภาพที่ 1.10)



ภาพที่ 1.10 ภาพรวมกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงงานพลังงานแสงอาทิตย์

บทที่ 2

ปริมาณและผลกระทบจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากที่สุด เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีอื่นที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพราะไม่มีการปล่อยมลพิษระหว่างกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่ท้ายที่สุดของทุกๆ เทคโนโลยี เมื่อเกิดการเสื่อมสภาพหรือศักยภาพการทำงานลดลงจนถึงจุดสิ้นสุดของวงจรชีวิตก็ต้องมีการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนใหม่ เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ก็เช่นกัน ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้ก็จะกลายเป็นขยะอันตราย ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการจัดการที่ถูกต้องเหมาะสม เพื่อลดผลกระทบที่อาจจะเกิดกับสุขภาพและสิ่งแวดล้อมได้

2.1 ปริมาณการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อมูลจาก คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน 2562 (กกพ.) ระบุว่า ปัจจุบันประเทศไทยมีกำลังการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในรูปแบบโรงไฟฟ้าและโซลารูฟอยู่ที่ประมาณ 2,000 เมกะวัตต์ กระจายตัวมากที่สุด ในภาคกลางร้อยละ 53 ตามมาด้วยภาคเหนือร้อยละ 24 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือร้อยละ 21 และน้อยที่สุดคือภาคใต้ร้อยละ 2 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทซิลิคอนผลึก (c-Si) คือ ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันอยู่มากที่สุดร้อยละ 85 ส่วนที่เหลือคือชนิดฟิล์มบาง แบ่งได้เป็น ซิลิคอนอสัณฐาน (a-Si) ร้อยละ 12 ทองแดง-อินเดียม-แกเลียม-เทลลูไรด์ (CIGS/CIS) ร้อยละ 2 และแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) และอื่นๆ ร้อยละ 1

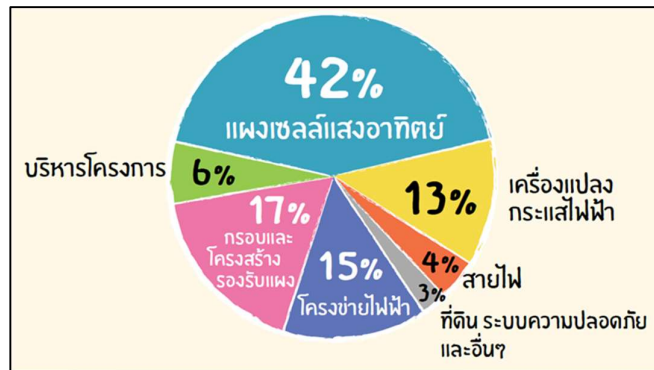
ตามที่กระทรวงพลังงานมีนโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมาตั้งแต่ปี 2532 ผ่านมาตรการต่างๆ ทำให้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมีสัดส่วนเพิ่มสูงขึ้นทุกปีโดยในปี พ.ศ. 2550 มีสัดส่วนปริมาณไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่ผลิตได้รวมการผลิตไฟฟ้านอกกริด (including off grid power generation) ทั้งประเทศร้อยละ 4.3 และเพิ่มเป็นร้อยละ 9.87 ในปี 2557 (ไม่รวมพลังน้ำขนาดใหญ่) และจากเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนแต่ละประเภทเชื้อเพลิงตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 - 2580 ฉบับปรับปรุง ครั้งที่ 1 (PDP 2018 Rev.1) ได้ผ่านการอนุมัติจากที่ประชุมคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.) เมื่อวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2563 มีกำลังการผลิตไฟฟ้ารวมปี 2580 คงเดิมที่ 77,211 เมกะวัตต์ แล้วยังคงเดินหน้าโครงการรับซื้อไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาที่อยู่อาศัย หรือโครงการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ภาคประชาชนในปี 2563 ต่อไป สำหรับโครงการเซลล์แสงอาทิตย์ภาคประชาชน ได้เปิดโครงการนำร่องให้ภาคประชาชนที่สนใจติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อใช้เอง และส่วนเหลือจากใช้เองสามารถขายเข้าระบบในอัตรา 1.68 บาทต่อหน่วยโดยมีเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานงานแสงอาทิตย์ไว้ถึง 9,290 เมกะวัตต์

ร่วมกับทางภาครัฐได้มีมาตรการส่งเสริมให้ผู้ประกอบการลงทุนในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ อาทิ มาตรการส่วนเพิ่มราคาซื้อขายไฟฟ้า (adder) และมาตรการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนระบบ Feed-in tariff เป็นต้น จากมาตรการจูงใจดังกล่าวทำให้ประเทศไทยมีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้น โดยกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นจากปี 2549 ที่มีกำลังการผลิตเพียง 0.01 เมกะวัตต์ และได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและแน่นอนว่าเมื่ออายุการใช้งานสิ้นสุดลง แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากก็จะกลายเป็นส่วนหนึ่งในกองขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่กำลังสร้างปัญหาให้กับประเทศไทยและโลกใบนี้ จากการปริมาณของเสียจากขยะที่จะเกิดขึ้นจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ พบว่า ในการผลิตไฟฟ้า 1 เมกะวัตต์ เซลล์ชนิดซิลิคอนผลึกจะสร้างปริมาณขยะประมาณ 100 ตัน ขณะที่เซลล์ชนิดฟิล์มบาง จะสร้างปริมาณขยะตั้งแต่ 185 ไปจนถึง 285 ตัน ขึ้นกับประเภทของวัสดุ โดยทั่วไปโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะมีการรับประกันประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 20 - 25 ปี หากคิดอายุเฉลี่ยของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 25 ปี ดังนั้น ในอนาคต จะเริ่มมีขยะที่เกิดจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เกิดขึ้น และมีปริมาณสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าว แสดงการคาดการณ์ปริมาณของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สะสม นั้นจึงสามารถคาดการณ์ได้อีกว่า เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์หมดอายุการใช้งานตามอายุขัยในอีก 25 ปี ข้างหน้า ประเทศไทยจะมีขยะจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันรวมแล้วกว่า 5.1 แสนตัน และในอีก 25 ปีข้างหน้า ประเทศไทยจะมีของเสียจากเซลล์เหล่านี้สะสมรวมกันสูงถึง 7.5 แสนตัน กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ทส.) ที่ฉายภาพว่า ปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ทุกประเภทรวมกันอยู่ที่จำนวน 3.8 แสนตัน นั้นหมายความว่า ในปีอีก 25 ปี ข้างหน้า เฉพาะของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีปริมาณมากกว่าขยะอิเล็กทรอนิกส์ทั้งประเทศที่มีอยู่รวมกันในปัจจุบันดังนั้นคำว่า “ขยะอิเล็กทรอนิกส์สิ้นประเทศไทย” คงเกิดขึ้นแน่นอน ถ้าหากไม่มีการวางแผนการจัดการที่ถูกต้องเหมาะสมในการจัดการและรองรับขยะดังกล่าว

ในทวีปยุโรป มีของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สะสมมากกว่า 15,000 ตัน ในสิ้นปี 2559 โดยประเมินจากวงจรชีวิตของเซลล์แสงอาทิตย์ (PV CYCLE) ส่วนใหญ่เป็นซากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน c-Si และจากรายงานที่ตีพิมพ์โดย International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programmer (IEA PVPS) Task12 และ International Renewable Energy Agency (IRENA) ใน พ.ศ. 2559 [1] คาดการณ์ว่าของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกจะมีจำนวนสะสมถึง 1.7 - 8.0 ล้านตันภายใน พ.ศ. 2573 และ 60 - 78 ล้านตันภายใน พ.ศ. 2593

2.2 ของเสียที่เกิดจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อสายส่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module) โครงสร้างรองรับแผง (mounting) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (inverter) และหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer) โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง แล้วผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนกระแสตรงให้กลายเป็นกระแสสลับ จากนั้นกระแสสลับจะผ่านระบบป้องกันและมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า และผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเพิ่มแรงดันให้เข้ากับระบบสายส่ง หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าแรงต่ำและระบบไฟฟ้าแรงสูง โดยมีความจำเป็นคือกระแสไฟฟ้าตรงที่ออกจากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะต้องไหลมาผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นตามแรงดันของโครงข่าย เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าได้ และเมื่อพิจารณาสัดส่วนของอุปกรณ์ตามมูลค่าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วไปแสดงเป็นสัดส่วนมูลค่าตามค่ารวมของอุปกรณ์หลักในการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (ภาพที่ 2.1)



ภาพที่ 2.1 สัดส่วนมูลค่ารวมของอุปกรณ์หลักในโครงการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์

ที่มา : PV Cycle study, 2007

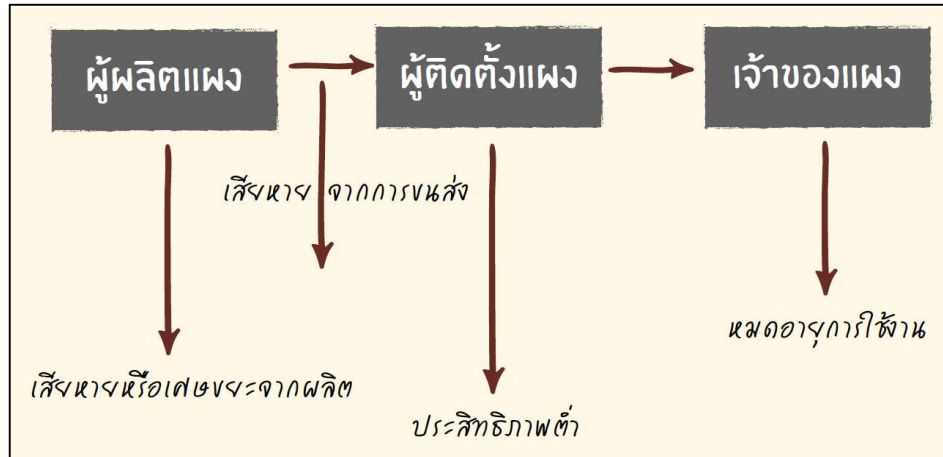
เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอุปกรณ์ต่างๆ ถูกนำมาใช้ในปริมาณมากเพื่อการผลิตไฟฟ้า ทำให้มีแนวโน้มของขยะในปริมาณมากในอนาคต หากเทียบกับอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้า และอายุการใช้งานของอุปกรณ์หลักในโรงผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (อ้างอิงตามระยะเวลารับประกัน) (ตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 อายุใช้งานของอุปกรณ์หลักในระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์

อุปกรณ์	อายุการรับประกัน (ปี)	อายุการใช้งาน (ปี)
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module)	25	>25
เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (inverter)	5 – 10	10
โครงสร้างรองรับแผง (mounting)	10	25
หม้อแปลงไฟฟ้า (transformer)	3 – 5	10
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น (electronics devices)	2	5

ที่มา : PV Cycle study, 2007

ในกระบวนการการผลิตทุกๆกระบวนการนั้นย่อมมีของเสียเกิดขึ้นไม่มากก็น้อย และในการผลิต แผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็เช่นกัน การผลิต การติดตั้งและการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้นั้นย่อมมีเศษเสี้ยวหรือเศษขยะที่ถูกปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการต่างๆ รวมถึงเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมดอายุการใช้งานด้วยของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการมีดังนี้ (ภาพที่ 2.2)



ภาพที่ 2.2 แผงผังแสดงการเกิดของเสียในกระบวนการ

ที่มา : PV Cycle study, 2007

ซึ่งเมื่อพิจารณาตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลงไปรายละเอียดแล้ว พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีส่วนประกอบที่ต่างกันไปที่จะกลายเป็นขยะเมื่อมีการทิ้งออกมา ทั้งนี้ส่วนประกอบนั้นขึ้นอยู่กับผู้ผลิตว่าใช้เทคโนโลยีในการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ หรือลดค่าใช้จ่ายอย่างไรบ้างโดยแผงแสงอาทิตย์แต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ ซึ่งสามารถจำแนกองค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกและชนิดฟิล์มบาง (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกและชนิดฟิล์มบาง

ประเภท	ชนิดผลึกซิลิคอน (Crystalline Silicon :C-Si)	ชนิดฟิล์มบาง ซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell : A-Si)	ชนิดแคดเมียม เทลลูไรด์ (Cadmium Telluride :CdTe)	ชนิดคอปเปอร์ อินเดียมแกเลเลียมได เซลไนด์ (Copper Indium Gallium diSelenide: CIGS)
ส่วนประกอบ (ร้อยละโดยประมาณ)				
กระจก	80	85	96	81
กรอบอลูมิเนียม	10	10	<0.01	12
ซิลิคอน	3	<0.1		
วัสดุห่อหุ้ม (EVA)	6.5	5	3.5	6
วัสดุ Tedlar	0.12	<0.1	0.01	0.12
กาวเชื่อมประสาน	<0.1	<0.1	<0.01	<0.1
- ทองแดง	0.6		1.0	0.85
- ดีบุก				0.02
- สังกะสี				0.03
- ตะกั่ว			0.07	
- แคดเมียม			0.07	
- โลหะเงิน	<0.006		<0.01	

ที่มา : PV Cycle study, 2007

2.3 ผลกระทบที่เกิดจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์เสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งานลงไป จะต้องมีการเปลี่ยนหรือซ่อมแซม และของเสียเหล่านั้นจะกลายเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งของเสียเหล่านี้มีองค์ประกอบที่อาจจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ได้แก่ สารจำพวกโลหะหนักหรือพลาสติก

2.3.1 ผลกระทบของสารพิษจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

สารอันตรายจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมคุณภาพ หรือหมดอายุ มีสารเคมี สารโลหะหนักที่มีอันตรายต่อสุขภาพเมื่อสารพิษเหล่านั้นแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน มีสารอันตรายคือ ซิลิคอนเตตระคลอไรด์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำ เมื่อสัมผัสจะส่งผลให้ผิวหนังไหม้ ระคายเคืองผิวหนังและตา ระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ เมื่อทำการกำจัดโดยวิธีการเผาอย่างไม่ถูกวิธี หรืออยู่ในอุณหภูมิสูงจะปล่อยแคดเมียม ก๊าซซีลีเนียม ทั้งก๊าซเรือนกระจกในรูปแบบของคาร์บอนไดออกไซด์

ตลอดจนสารไดออกซินจากการเผาที่ไม่ถูกต้องสู่สิ่งแวดล้อมส่งผลให้ทำลายคุณภาพอากาศ และชั้นบรรยากาศ เมื่อนำไปฝังกลบสารเคมีเหล่านี้จะเกิดการแพร่กระจายของโลหะหนัก เช่น ตะกั่วและแคดเมียม ในดินและแหล่งน้ำธรรมชาติจากการกำจัดโดยการฝังกลบ จนอาจเกิดวิกฤต ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำและอาหารในอนาคตซึมลงไปดินและทำลายชั้นดินและแหล่งน้ำใต้ดินเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัย และระบบนิเวศ เช่น

1) ตะกั่ว (lead) เป็นส่วนประกอบในการบัดกรีแผ่นวงจรพิมพ์ วงจรไฟฟ้าต่างๆ โดยผลกระทบที่เกิดขึ้น ตะกั่วทำลายระบบประสาท ต่อมไร้ท่อ ไต ระบบเลือด และการพัฒนาสมองของเด็ก ส่วนพืชเรื้อรังจะค่อยๆ แสดงอาการภายหลังการได้รับสารตะกั่วทีละน้อยจนถึงระยะเวลาหนึ่ง จึงจะแสดงอาการ จะไปทำลายระบบประสาทส่วนกลาง ระบบโลหิต การทำงานของไต การสืบพันธุ์ และมีผลต่อการพัฒนาสมองของเด็ก

2) แคดเมียม (cadmium) มักพบในแผ่นวงจรพิมพ์ ตัวต้านทาน แคดเมียมมีพิษอย่างเฉียบพลันทางเดินหายใจทำให้เกิดปอดอักเสบรุนแรง ไตวาย ไตถูกทำลายมีโปรตีนในปัสสาวะ ร่างกายขับกรดอะมิโน กลูโคส แคลเซียม และฟอสเฟตในปัสสาวะมากขึ้น ทำให้เกิดเป็นนิ่วในปัสสาวะได้ โรคปวดกระดูก โรค อีไต-อีไต ปวดสะโพก (hip pain) ปวดแขน ขา (extremity pain) มีวงแหวนแคดเมียม (yellow ring) ปวดกระดูก (bone pain) ปวดข้อ (joint pain) มีความผิดปกติที่กระดูกสันหลัง ทำให้มีลักษณะเตี้ย หลังค่อมเป็นต้น ซึ่งสารนี้จะ สะสมในร่างกาย โดยเฉพาะที่ไต ทำลายระบบประสาท ส่งผลต่อพัฒนาการ และการมีบุตรหรืออาจมีผลกระทบต่อพันธุกรรม

3) ปรอท (mercury) มักพบในตัวตัดความร้อน สวิตช์ เป็นอันตรายต่อระบบประสาทส่วนกลาง ได้แก่สมอง และไขสันหลัง ทำให้เสียการควบคุมเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวของแขน ขา การพูด ทำให้ระบบประสาทรับรู้สึกเสียไป เช่น การได้ยิน การมองเห็น ไม่สามารถรักษาให้ดีขึ้นได้โดย จะส่งผลในการทำลายอวัยวะต่าง ๆ รวมทั้งสมอง ไต และเด็กในครรภ์มารดาได้ และถ้าลงสู่แหล่งน้ำจะเปลี่ยนรูปเป็น Methylated mercury และตกตะกอน ซึ่งสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ง่าย และจะสะสมต่อไปตามห่วงโซ่อาหาร

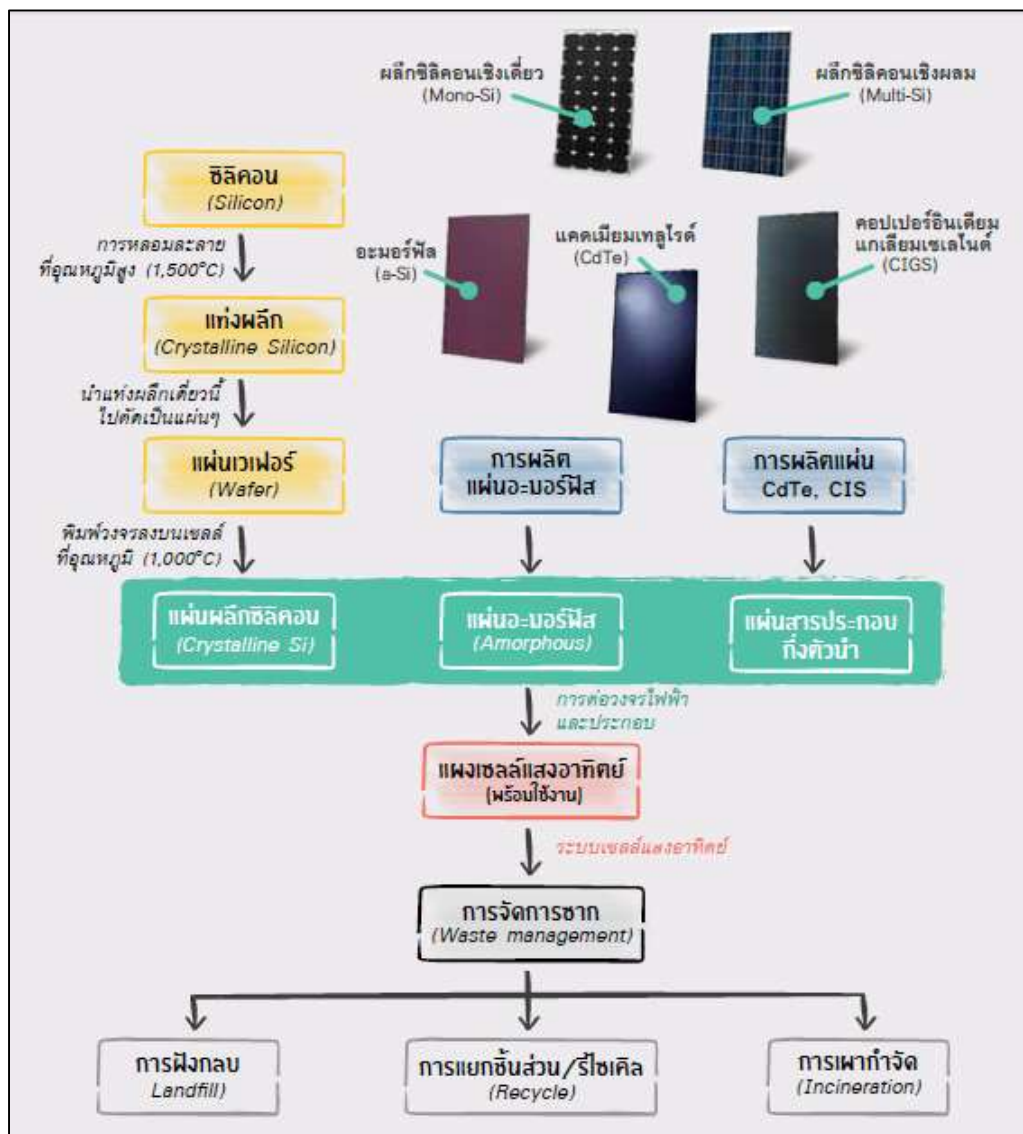
4) โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (hexavalent chromium) ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นโลหะเคลือบสังกะสี ซึ่งสามารถผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์ได้ง่าย จะส่งผลในการทำลายดีเอ็นเอ และเป็นสารก่อมะเร็งสำหรับมนุษย์

5) สารไฟทาจากโบรมีน (bromine) ใช้ในกล่องพลาสติกของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แผงวงจร และตัวเชื่อมต่อ ซึ่งเป็นสารที่มีพิษ และสามารถสะสมได้ในสิ่งมีชีวิต โบรมีนเป็นสารก่อมะเร็ง และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี และรูปทรงของเส้นใยกล้ามเนื้อหัวใจ ถ้ามีทองแดงร่วมด้วยจะเพิ่มความเสี่ยงในการเกิด ไดออกซินและพีวแรนระหว่างการเผา เนื่องจากตัวทนไฟทำจากโบรมีนมีอยู่หลายรูปแบบ แบบที่มีอันตรายมากจะเป็นโบรมีนมีอยู่หลายรูปแบบ แบบที่มีอันตรายมากจะเป็น พอลิโบรมีนเนเต็ดไบฟีนิล (polybrominated biphenyls-PBBs) ซึ่งก่อให้เกิดไดออกซิน ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งทำลายการทำงานของตับ มีผลกระทบต่อระบบประสาทและภูมิคุ้มกัน ทำให้การ

ทำงานของต่อมไทรอยด์ผิดปกติ รวมถึงระบบต่อมไร้ท่อสามารถสะสมในน้ำนมของมนุษย์และกระแสเลือด สามารถถ่ายทอดในห่วงโซ่อาหาร (ขยะอิเล็กทรอนิกส์ใช้แล้วทิ้ง กระดาษสิ่งแวดล้อม, 2559)

2.3.2 ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

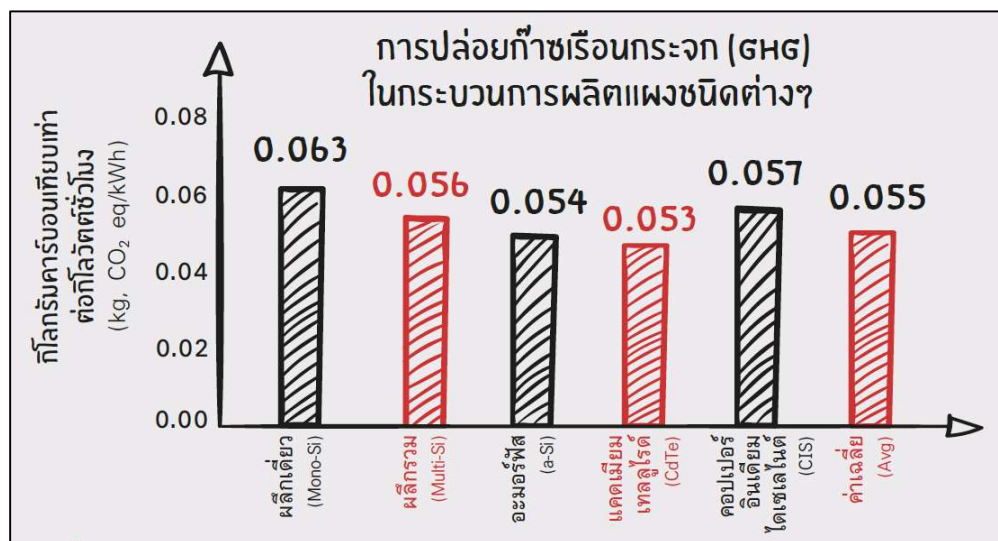
ในส่วนของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะขอกล่าวถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้หลักการการประเมิน วัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment : LCA) เพื่อวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมตลอดช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์ ซึ่งพิจารณาตั้งแต่ การผลิตวัตถุดิบ การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ การผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ การประกอบ การต่อวงจรไฟฟ้า การใช้งาน จนกระทั่งการกำจัดซากหลังการใช้งาน (ภาพที่ 2.3)



ภาพที่ 2.3 ขอบเขตการศึกษาของไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา :กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2559)

ผลกระทบต่ออากาศ การศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงอุตสาหกรรม (2559) จากการศึกษาการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะทำการประเมินโดย Sima Pro โดยใช้ Re Cipe 1.07 เป็นวิธีการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Impact Assessment : LCIA) โดยเน้นการประเมินในเรื่องของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) ของแผงชนิดต่างๆ ซึ่งจากการเปรียบเทียบระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ พบว่า วัฏจักรชีวิตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีลำดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทอื่น คือ ซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว (mono-crystalline silicon) ปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 63 กิโลกรัมคาร์บอนเทียบเท่าต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (ภาพที่ 2.4)



ภาพที่ 2.4 อัตราปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ จากการประเมินวัฏจักรชีวิต

ที่มา :กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2559)

การทำลายชั้นโอโซนจากการผลิตไปจนถึงการกำจัดของเสียที่ไม่มีมูลค่าเหลือจากการถอดประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมคุณภาพหรือหมดอายุการใช้งาน โดยการเผาทิ้งอย่างไม่ถูกวิธี ทำให้สารเกิดมลพิษระเหยสู่บรรยากาศและขึ้นไปทำลายชั้นโอโซนที่ป้องกันรังสีความร้อนแผ่เข้าสู่พื้นโลกมากเกินไป ส่งผลให้เกิดรูรั่วในชั้นโอโซน นอกจากนี้ในสารชนิดยังเป็นก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน

ผลกระทบต่อดินและน้ำ การปนเปื้อนของสารพิษจากโลหะลงสู่ดินและน้ำ จากขั้นตอนทั้ง การรื้อของเก่าและการฝังกลบอย่างไม่ถูกวิธี เช่น การถอดประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมคุณภาพหรือหมดอายุแล้ว การเทน้ำกรดจากแบตเตอรี่รถยนต์ทิ้งลงดิน การเททิ้งเศษหรือสารอันตรายลงดิน การทิ้งเศษกระจกจากจอแสดงผลทำให้สารตะกั่ว ทำให้สารพิษแพร่กระจายสู่ดินและน้ำ รวมทั้งการกองเผาเศษวัสดุ ทำให้สารพิษในเศษวัสดุปนเปื้อนอยู่ในซีเมนต์ที่เคลือบอยู่สะสมในดิน การฝังเพื่อกำจัดชิ้นส่วนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มี

มูลค่าอย่างไม่ปลอดภัย ทำให้สารพิษแพร่กระจายสู่ดินและแพร่สู่แหล่งน้ำ การปนเปื้อนของสารพิษจากขยะชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมคุณภาพหรือหมดอายุในอากาศ ชาวบ้านใช้วิธีการ ถอดประกอบ และเผาชิ้นส่วนเพื่อแยกเอาวัสดุมีค่า เช่น โคโรนเหล็ก โลหะ การเผาสายไฟ เพื่อเอาทองแดง การเผาทำลายชิ้นส่วนพลาสติกเพื่อเอาชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ เป็นต้น การเผาชิ้นส่วนดังกล่าวส่งผลให้เกิดควันพิษ กลิ่นเหม็นและซี้เถ้าที่สามารถฟุ้งกระจายไปได้ไกลตามกระแสลมและเกิดสารพิษต่าง ๆ ได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ สารอินทรีย์ระเหยง่าย โลหะหนัก และสารไดออกซินและฟิวรีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งที่ร้ายแรง

2.4 กฎหมายที่เกี่ยวข้องในการจัดการของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

มาตรการการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ และอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยที่ผ่านมายังไม่มีกฎหมายหรือพระราชบัญญัติที่เกี่ยวข้องโดยตรง แต่มีกฎหมายบางฉบับที่สามารถนำมาเป็นแนวทางหรือมาตรการในการจัดการของเสียจากอุปกรณ์ไฟฟ้า ของเสียจากอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ มาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทย คือ

- พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535
- พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535
- พระราชบัญญัติการนิคมอุตสาหกรรมแห่งชาติ พ.ศ. 2522
- พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2551
- พระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ฉบับที่ 6) พ.ศ. 2548
- พระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550
- พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535
- พระราชบัญญัติควบคุมการขายทอดตลาดและค้าของเก่า พุทธศักราช 2474
- พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522
- พระราชบัญญัติรักษาความสะอาดและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของบ้านเมือง พ.ศ. 2535

แม้ประเทศไทยยังไม่มีกฎหมายเฉพาะในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามสามารถนำกฎหมายที่ใช้บังคับอยู่ในปัจจุบันหลายฉบับมาปรับใช้ในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ทั้งนี้ การพิจารณามาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นควรจำแนกออกเป็นมาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ประกอบการกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และสำหรับประชาชนทั่วไป

สำหรับผู้ประกอบการกิจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ กฎหมายที่นำมาปรับใช้กับการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ คือ พระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 และพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 พร้อมกฎหมายลำดับรองต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง บทบัญญัติดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังเป็นหน้าที่ของผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้า ซึ่งก็คือเจ้าของหรือผู้ครอบครองของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ไม่มีกฎหมายใดกำหนดให้เป็นหน้าที่

ของผู้ผลิตในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่อย่างใด นอกจากนั้นแล้ว แม้ว่าจะมีการกำหนดวิธีการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยการนำกลับมาใช้ใหม่ (reuse) และรีไซเคิล (recycle) เป็นลำดับแรกก็ตาม แต่ก็มีได้มีการกำหนดไว้อย่างเป็นทางการอีกทั้งยังมีผู้ประกอบการกิจการผลิตไฟฟ้าที่ไม่เข้าข่ายต้องขอรับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 ซึ่งต้องปฏิบัติตามประมวลหลักการปฏิบัติ (Code of Practice: CoP) นั้น ก็อาจกล่าวได้ว่าเป็นช่องโหว่ทางกฎหมาย เนื่องจากการสภาพบังคับทางอาญาและทางปกครองในกรณีไม่ปฏิบัติตามคำสั่งเจ้าพนักงานเท่านั้น ซึ่งอาจทำให้ผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าไม่เกรงกลัวได้ ส่วนมาตรการการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ก็ไม่มีการกำหนดให้ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เป็นของเสียอันตรายโดยเฉพาะ เช่นเดียวกับไม่มีการกำหนดเป็นวัตถุอันตรายตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 โดยเฉพาะเช่นกัน แต่อาศัยการแปลความกับกฎหมายที่มีอยู่เท่านั้น

สำหรับการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประชาชนนั้น มาตรการทางกฎหมายที่บังคับใช้อยู่ในปัจจุบัน คือ พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 ซึ่งเป็นกฎหมายที่ให้อำนาจองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการจัดการขยะ สิ่งปฏิภูล และมูลฝอยต่างๆ อย่างไรก็ตาม มาตรการดังกล่าวเป็นมาตรการที่กำหนดไว้ในการจัดการมูลฝอยทั่วไปเท่านั้น สำหรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นทั้งของเสียอันตรายและขยะอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบด้วยสารอันตรายและส่วนประกอบที่ซับซ้อน ทำให้ไม่สามารถจัดการของเสียจากเซลล์อาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังอาจสร้างปัญหาสิ่งแวดล้อมและผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้มากกว่า อันเนื่องมาจากองค์ประกอบส่วนท้องถิ่นขาดศักยภาพ เงินทุน และเทคโนโลยีที่ทันสมัยเพียงพอ และแม้ว่าพระราชบัญญัติรักษาความสะอาดและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของบ้านเมือง พ.ศ. 2535 ที่แก้ไขเพิ่มเติมจะกำหนดให้นำกฎหมายว่าด้วยโรงงานมาใช้บังคับในการจัดการของเสียอันตรายก็ตาม แต่หากเป็นกรณีที่ของเสียอันตรายนั้นปะปนกับสิ่งปฏิภูลหรือมูลฝอยที่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นจัดเก็บและพนักงานเจ้าหน้าที่ตามกฎหมายว่าด้วยโรงงานไม่ดำเนินการ ก็ยังคงให้อำนาจองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นจัดการตามสมควร ซึ่งยังสะท้อนความไม่เป็นรูปธรรมเช่นเดิม นอกจากนี้ พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 ยังให้อำนาจองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่จะควบคุมการประกอบการรับซื้อของเก่าในฐานะที่เป็นกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ โดยก่อนการประกอบการรับซื้อของเก่าในลักษณะที่เป็นการค้าจะต้องได้รับใบอนุญาตก่อนจึงจะสามารถประกอบกิจการได้ ทั้งยังสามารถกำหนดเงื่อนไขในการประกอบการ ซึ่งอาจรวมถึงการกำหนดเงื่อนไขให้ผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าต้องควบคุมและป้องกันไม่ให้เกิดมลพิษในรูปแบบต่างๆ ด้วยก็ตาม แต่ก็เป็นการกำหนดไว้เพียงกว้างๆ และไม่เหมาะสม

เมื่อในปัจจุบันมาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทยยังไม่เพียงพอ ทั้งไม่มีกฎหมายที่มีเจตนารมณ์เพื่อจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉพาะ จึงมีแนวความคิดที่จะจัดทำร่างกฎหมายว่าด้วยการจัดการของเสียจากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขึ้น ซึ่งต่อมากรมควบคุมมลพิษได้จัดทำร่างกฎหมายในลักษณะดังกล่าวขึ้นและคณะรัฐมนตรีมีมติเห็นชอบในหลักการและมอบหมายให้สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกาปรับปรุงแก้ไขร่างพระราชบัญญัติดังกล่าว จากนั้นสำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกาได้ตรวจพิจารณาแล้วเสร็จและได้จัดทำร่างพระราชบัญญัติการจัดการซาก

ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ. ... ทั้งนี้ ร่างพระราชบัญญัติฉบับดังกล่าวเป็นการนำหลักการขยายความรับผิดชอบของผู้ผลิตมากำหนดไว้เป็นครั้งแรก ทำให้ผู้ผลิตเข้ามามีบทบาทในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างเป็นระบบ และกำหนดวิธีการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของเจ้าของหรือผู้ครอบครองที่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ตั้งแต่การห้ามมิให้ประชาชนทิ้งของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับมูลฝอยทั่วไป ห้ามถอดแยกชิ้นส่วนของของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งมีการจัดตั้งศูนย์รับคืนของเสียจากผลิตภัณฑ์อันเป็นการจำกัดบทบาทของผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนั้นแล้วยังกำหนดให้ผู้ผลิตมีหน้าที่รับคืน จัดเก็บและรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ และจัดทำแผนความรับผิดชอบในการจัดการของเสียจากผลิตภัณฑ์อีกด้วย อย่างไรก็ตาม ร่างพระราชบัญญัติฉบับนี้ก็ยังมีหลักการแตกต่างจากมาตรการทางกฎหมายของต่างประเทศซึ่งอาจทำให้การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรจึงต้องมีการปรับปรุงร่างพระราชบัญญัติดังกล่าวต่อไป

ในปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน อย่างไรก็ตาม มาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทยยังมีช่องโหว่ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในทางปฏิบัติอยู่มาก การพัฒนามาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจำเป็นต้องศึกษาหลักการในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนมาตรการทางกฎหมายในการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของต่างประเทศ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาของประเทศไทยที่เกิดขึ้นด้วย

บทที่ 3

สถานการณ์ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และการกำจัด

3.1 สถานการณ์ของขยะอิเล็กทรอนิกส์

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีในด้านการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เป็นไปอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ผลผลิตจึงมีความหลากหลาย หาซื้อได้ง่าย เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เช่น โทรทัศน์ คอมพิวเตอร์ แบตเตอรี่ โทรศัพท์มือถือ ที่หาซื้อง่ายขึ้น และแนวโน้มของราคาถูกลง ส่งผลให้เกิดการบริโภคเกินความพอดี มีอายุการใช้งานที่สั้นลง เนื่องจากล้าสมัยอย่างรวดเร็ว ตลอดจนเสื่อมตามสภาพจนกลายเป็นขยะที่เราทิ้งกันทั่วไปโดยไม่ทราบถึงอันตราย ว่าชิ้นส่วนอุปกรณ์หลายชิ้นซึ่งเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชน ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติซึ่งเรียกว่า “ขยะอิเล็กทรอนิกส์” (electronic waste หรือ E-Waste) โดยปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ทุกปีตามแนวโน้มการบริโภคที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาการรั่วไหลของสารพิษที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม วงจรชีวิตของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผู้บริโภคผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนมาก ไม่ทราบถึงมหันตภัยร้ายแรงที่มีต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากวงจรชีวิตของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น การใช้สารพิษที่เป็นอันตรายอย่างสารปรอท ตะกั่วและสารทนไฟในกระบวนการผลิต ที่สามารถก่อให้เกิดการปนเปื้อนสารพิษในสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของคนงาน อีกทั้งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการรีไซเคิลและการกำจัดอีกด้วย

ปัจจุบันประเทศไทยต้องประสบปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมาก สาเหตุมาจากการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อหมดอายุการใช้งาน จะกลายเป็นกองขยะขนาดใหญ่ที่ยากต่อการจัดการ และยิ่งก่อให้เกิดปัญหากลายเป็นขยะที่มีส่วนประกอบของสารพิษมากมาย (ขยะอิเล็กทรอนิกส์ 346, 721 ชิ้นล้านประเทศ, 2558)

สถานการณ์ปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยเป็นเช่นเดียวกับประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลาย ซึ่งขยะอิเล็กทรอนิกส์ หรือ “ของเก่า” ถูกขายให้กับพ่อค้ารับซื้อของเก่าหรือรถซาเล้งที่มาตระเวน รับซื้อจากบ้านเรือนประชาชน เพื่อนำไปถอดแยกชิ้นส่วนและขายเป็นวัสดุรีไซเคิล เช่น ทองแดง อลูมิเนียม พลาสติก เป็นต้น และจากการประเมินของกรมควบคุมโรค คาดการณ์ว่าประเทศไทยมีแหล่งชุมชนคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์กระจายอยู่ทั่วประเทศเกือบ 100 แห่ง เช่น จังหวัดกระบี่ จังหวัดกาฬสินธุ์ จังหวัดชลบุรี จังหวัดเชียงราย จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดลำพูน จังหวัดนครปฐม จังหวัดนนทบุรี จังหวัดปทุมธานี จังหวัดบุรีรัมย์ จังหวัดปราจีนบุรี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จังหวัดราชบุรี จังหวัดสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรสาคร จังหวัดสระแก้ว และจังหวัดอำนาจเจริญ ทั้งนี้ ไม่นับรวมร้านค้าของเก่าบางรายที่มีการถอดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์และเผาทำลายเช่นกัน

นอกจากนี้ พบว่ายังพบปัญหาการลักลอบขนขยะอิเล็กทรอนิกส์จากต่างประเทศเข้ามายังประเทศไทย เป็นจำนวนไม่น้อย เช่นเดียวกับประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลาย ขยะอิเล็กทรอนิกส์หรือ “ของเก่า” ในความเข้าใจของคนไทยมักจะถูกขายให้กับพ่อค้ารับซื้อของเก่าหรือชาเล้งที่มาตระเวนรับซื้อจากบ้านเรือน โดยมีการส่งขยะอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ไปยังชุมชนเพื่อให้ชาวบ้านนำไปคัดแยก ถอดชิ้นส่วนเพื่อขายเป็นวัสดุรีไซเคิล เช่น ทองแดง อลูมิเนียม พลาสติก เป็นต้น เศษที่เหลือของขยะอิเล็กทรอนิกส์จะนำไปทำลายโดยการเผาหรือฝังกลบ ทั้งนี้การเผาและทำลายขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยวิธีการที่ไม่ถูกต้อง ไม่ถูกสุขลักษณะ ย่อมก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ชุมชน และต่อสุขภาพ รวมทั้งความปลอดภัยในการประกอบอาชีพของผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรง

3.2 สถานการณ์ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ และการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมได้ส่งผลให้มีความต้องการด้านพลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ร่วมกับการรณรงค์ส่งเสริมความรู้ทำให้เกิดการตื่นตัวมีความใส่ใจในภาวะโลกร้อนมากขึ้น ก็ส่งผลให้การพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านพลังงานสะอาด พลังงานทดแทนเพิ่มมากขึ้น

การใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่มีอยู่อย่างมากมายหลายรูปแบบ ในปัจจุบันประเทศไทยมีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์สะสมแล้ว 15 ล้านแผง หรือประมาณ 3-4 แสนต้น และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ภาคเอกชน ประชาชนมีความสนใจก่อสร้างและติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น จากราคาแผงที่เริ่มปรับลดลง ประกอบกับทางรัฐบาลยังมีนโยบายส่งเสริมให้ทุกภาคส่วนราชการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดภาระค่าไฟฟ้า จากการเติบโตดังกล่าวคาดการณ์ปริมาณของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ สะสมตั้งแต่ปี 2545 – 2559 อยู่ที่ 388,347 ตัน และปริมาณซากสะสมถึงปี 2563 อยู่ที่ 551,684 ตัน หรือ 18.38 ล้านแผง (“ขยะพิษ” อนาคตโซลาร์เซลล์, 2559)

ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน แบ่งตามแหล่งการผลิตไฟฟ้าและการใช้งานได้ 2 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จาก ผู้บริโภค ชุมชน หรือหน่วยงานทั่วไป วงจรชีวิตของเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้จะคล้ายกับ วงจรของขยะอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป เมื่อผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านั้นเสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งาน ถ้าซากของเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้มีสภาพดีสามารถซ่อมแซมได้ หรือมีองค์ประกอบเป็นวัสดุที่มีค่า เช่น ทองแดง อลูมิเนียม ทอง เงิน และอื่นๆ ที่มีมูลค่า จะเป็นที่ต้องการของพ่อค้าของมือสอง ร้านรับซื้อของเก่า และจะถูกเปลี่ยนมือจากผู้บริโภค บ้านเรือนหรือหน่วยงาน ห้างร้านต่างๆ จะขายให้กับพ่อค้ารับซื้อของเก่าและชาเล้งที่ตระเวนรับซื้อ อีกส่วนหนึ่งจะบริจาคให้องค์กรการกุศล เช่น วัดกับมูลนิธิ ซึ่งจะมีรถของวัด หรือรถของพ่อค้า ชาเล้ง มารับถึงที่ เมื่อซากของเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ถูกเปลี่ยนมือมาเป็นผู้รับซื้อ ผู้รับซื้อจะเปลี่ยนมาเป็นผู้แกะถอดประกอบเพื่อคัดแยกชิ้นส่วน หรือคัดแยกวัสดุแล้วขายต่อร้านค้าของเก่ารายใหญ่บ้าง โรงหลอมบ้าง ชาวบ้านที่คัดแยกซากจะเผาสายไฟเพื่อแยกทองแดง ส่วนแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และโลหะที่มีมูลค่า จะถูกรวบรวมขายต่อให้พ่อค้า แล้วพ่อค้าขายต่อโรงงานเถื่อนในประเทศและต่างประเทศ ในทางตรงกันข้ามหากของเสียจากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่มีมูลค่า รวมถึงชิ้นส่วนที่ไม่มีมูลค่าหลังจากที่ผู้รับซื้อแยกชิ้นส่วนแล้ว จะถูกนำมาลักลอบทิ้ง หรือทิ้งรวมกับขยะมูลฝอยอื่นๆ

ส่วนที่ 2 ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) หรือโรงผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (solar farm) จะเป็นแหล่งที่ใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีปริมาณมากที่สุด จากข้อมูล รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย ปีที่ 15 ฉบับที่ 15 เดือน มกราคม – ธันวาคม พ.ศ. 2559 โดย กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน พบว่า สถานการณ์พลังงานทดแทนของประเทศไทยปี 2563 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลจากนโยบายการพัฒนาพลังงานทดแทน ที่มีเป้าหมายให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นในทุกภาคส่วนของสังคม นอกจากนี้จะเป็นการลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้ว ยังเป็นการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศอีกด้วย เนื่องจากการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศไทยในปัจจุบัน จะใช้พลังงานภายในประเทศเป็นหลัก ซึ่งประกอบด้วย แสงอาทิตย์ ลม พลังน้ำขนาดเล็ก พลังน้ำขนาดใหญ่ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ ขยะมูลฝอย และพลังงานความร้อนใต้พิภพ กำลังผลิตติดตั้งไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน มีปริมาณรวม 25,193.667 เมกะวัตต์ (คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน กฟผ. กฟน. กฟภ. และ พพ., เมษายน 2563 จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีกำลังการผลิตเป็นอันดับที่ 2 รองจากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานชีวมวล โดยการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกๆ ปี

กำลังผลิตติดตั้งไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน มีปริมาณรวม 9,437 เมกะวัตต์ เพิ่มขึ้นจากปีก่อนหน้า ร้อยละ 18.5 โดยพบว่า มีกำลังการผลิตจาก แหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำขนาดใหญ่มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 30.8 รองลงมาได้แก่ พลังงานชีวมวลคิดเป็น 29.8 พลังงานงานแสงอาทิตย์คิดเป็น 25.9 พลังงานลมคิดเป็น 5.4 ก๊าซชีวภาพคิดเป็น 4.6 พลังงานน้ำขนาดเล็กคิดเป็น 1.9 และขยะมูลฝอยคิดเป็น 1.6 ตามลำดับ (ตารางที่ 3.1)

ตารางที่ 3.1 กำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน

ไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน	กำลังการผลิตไฟฟ้าต่อปี (เมกะวัตต์)						อัตราการเปลี่ยนแปลง
	2558	2559	2560	2561	2562	2563	
	(ม.ค. - พ.ค.)						
1. แสงอาทิตย์	1,419.6	2,446.1	2,697.3	2,962.4	2,982.6	2,982.6	-
2. พลังงานลม	233.9	507.0	627.8	1,102.8	1,506.8	1,506.8	-
3. พลังน้ำขนาดเล็ก	172.1	182.1	182.3	187.7	187.9	189.0	0.6
4. ชีวมวล	2,726.6	2,814.7	3,157.3	3,372.9	3,410.1	3,465.4	1.6
5. ก๊าซชีวภาพ	372.5	434.9	475.4	505.2	530.0	542.3	2.3
6. ขยะมูลฝอย	131.7	145.3	191.5	317.8	314.7	324.4	3.1
7. พลังงานน้ำขนาดใหญ่	2,906.4	2,906.4	2,906.4	2,919.7	2,919.7	2,919.7	-
8. พลังงานทดแทนอื่น ๆ	-	-	-	0.3	0.3	0.3	-
รวม	7,962.8	9,436.5	10,237.9	11,368.9	11,852.0	11,930.5	7.7

ที่มา : กฟผ. กฟน. กฟภ. กทพ. พพ. และ ธพ. (31 พฤษภาคม 2563)

นอกจากนี้ ปัจจุบันยังมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปประยุกต์ใช้งานกับสินค้าอิเล็กทรอนิกส์อีกหลายประเภท หลากหลายรูปแบบการใช้งาน เช่น ไฟส่องสว่าง โคมไฟ อุปกรณ์ชาร์จจากเซลล์แสงอาทิตย์ น้ำพุโซลาเซลล์ เป็นต้น จากการส่งเสริมการใช้เซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบต่าง ๆ จึงคาดการณ์ว่าในปี 2563 จะมีปริมาณของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สะสมที่ต้องกำจัด ประมาณ 550,000 ตัน หรือประมาณ 18 ล้านแผง (นายทองชัย ขวลิขิตพิเชฐ อธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม (กรอ.) กระทรวงอุตสาหกรรม, 2562)

3.3 การกำจัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน

ในปัจจุบันของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจยังไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากนัก เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้ยังไม่เสื่อมคุณภาพและยังไม่หมดอายุการใช้งาน แต่จากปริมาณสะสมดังกล่าว อีกประมาณ 10 - 20 ปีข้างหน้า เมื่อแผงโซลาเซลล์เหล่านี้ เสื่อมคุณภาพ หรือหมดอายุการใช้งานจะกลายมาเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์” (electronic waste หรือ E-Waste) อีกประเภทหนึ่ง ซึ่งตอนนี้ยังไม่มีการวางแผนการที่เหมาะสมเพื่อรองรับขยะอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ ขยะจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย สามารถเกิดได้ตั้งแต่ช่วงการติดตั้ง ระหว่างการใช้งานทั้งในครัวเรือน โรงไฟฟ้า เกิดชำรุดได้ อย่างเช่นสาเหตุมาจากฟ้าผ่า รอยขีดข่วนจากกิ่งไม้และนกบนแผง การลอกตัวของฉนวนอีวีเอ EVA ของเสียเหล่านี้ทั้งจากอุตสาหกรรมและครัวเรือน ส่วนใหญ่ยังเป็นการกำจัดแบบง่ายๆ ไม่ซับซ้อน และมีต้นทุนต่ำโดยไม่คำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น การลักลอบทิ้ง หรือการทิ้งร่วมกับของเสียอื่นๆในถังขยะทั่วไป เพื่อให้เทศบาลชุมชนนำไปกำจัดโดยวิธีการเผาโดยเตาเผาชุมชน หรือการฝังกลบโดยหลุมฝังกลบของเทศบาลต่อไป

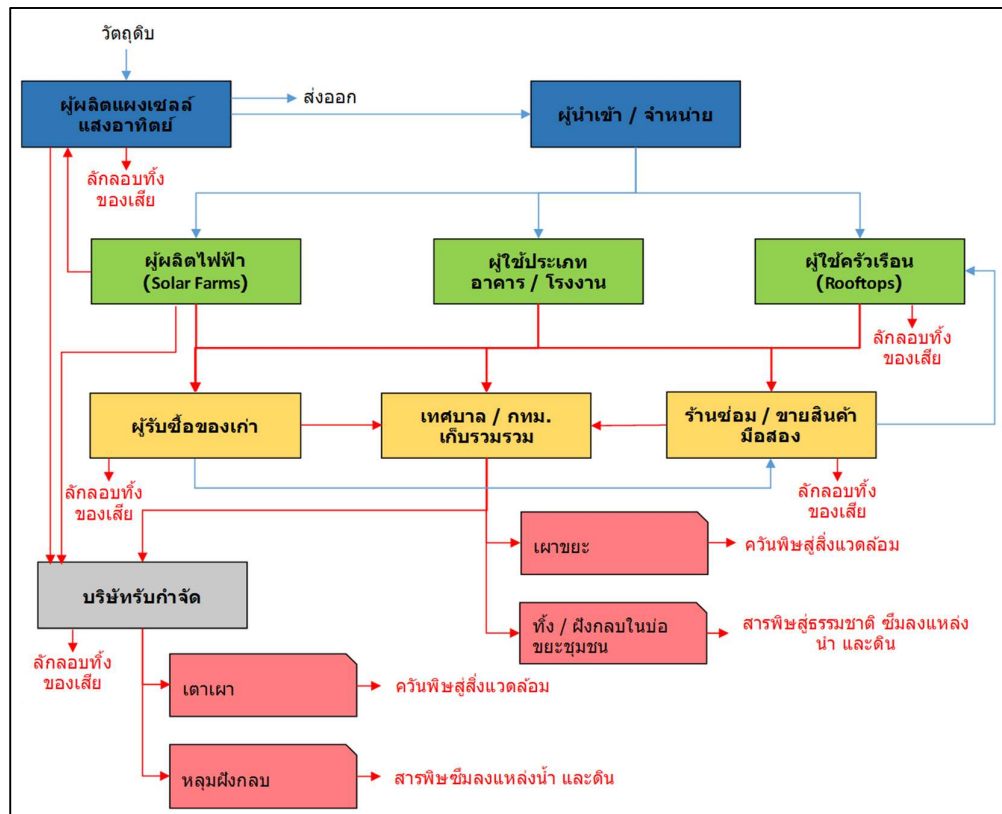
จากการรายงานข้อมูลสถานการณ์มลพิษของกรมควบคุมมลพิษ พบว่าในปัจจุบันมีของเสียอันตรายและกากอุตสาหกรรมอันตรายที่ได้รับถูกจัดการอย่างถูกต้องเพียงประมาณร้อยละ 65 และขณะนี้ประเทศไทยยังไม่มีเทคโนโลยีและการบริหารจัดการของเสียจากเซลล์อย่างเป็นระบบ ซึ่งอายุการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ย 20 ปี คาดว่าปี 2565 จะมีของเสียจากเซลล์เกิดขึ้น 112 ตัน และเพิ่มเป็น 1.55 ล้านตัน ในปี 2600 ซึ่งหากไม่วางแผนจะกระทบสิ่งแวดล้อม สุขภาพและเศรษฐกิจ และเป็นอุปสรรคต่อแผนส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (นายประกอบ วิวิธจินดา อธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม (กรอ.) กระทรวงอุตสาหกรรม, 2563) และเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวเสื่อมสภาพหรือหมดสิ้นอายุการใช้งาน ของเสียเหล่านี้ก็จะกลายมาเป็นของเสียร่วมกับขยะอิเล็กทรอนิกส์และกากอุตสาหกรรมอื่นๆ ของเสียเหล่านี้จะกลายมาเป็นของเสียอันตรายที่ต้องการจัดการที่ถูกต้องเหมาะสมต่อไป แต่ถ้าหากได้รับการจัดการที่ไม่ถูกต้องเหมาะสมแล้วก็อาจจะปล่อยสารพิษปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอย่างแน่นอน

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโรงงานผลิตไฟฟ้ายังไม่สร้างปัญหา และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้ยังไม่หมดอายุการใช้งาน ซากและของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ปัจจุบันส่วนใหญ่ที่เกิดในโรงงานผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดจากการเสื่อมสภาพ รอยขีดข่วน การหลุดลอกของบางชิ้นส่วน แต่ด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในช่วงรับประกันการใช้งานจากผู้ผลิตและจำหน่าย ซากและของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้จะถูกส่งกลับไปยังผู้ผลิตและจำหน่ายเพื่อทำการซ่อมแซมหรือแลกเปลี่ยนเซลล์แสงอาทิตย์ชุดใหม่มาใช้งานต่อไป ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่สามารถให้

งานได้ก็จะถูกเก็บรวบรวมไว้ที่ผู้ผลิต ผู้จำหน่ายแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วถูกส่งต่อไปยังผู้รับกำจัด เหมือนขยะอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ผู้รับกำจัดบำบัดเป็นผู้รวบรวมเพื่อส่งต่อไปยังบริษัทรับกำจัดบำบัดเพื่อทำการกำจัดต่อไป

ทั้งนี้ปัจจุบันประเทศไทยมีบริษัทเอกชนที่รับกำจัดของเสียอันตรายเพียง 4 แห่ง แบ่งเป็นระบบฝังกลบแบบปลอดภัย 3 แห่ง คือ บริษัทเบตเตอร์เวิลด์กรีน จำกัด (มหาชน) ที่สระบุรี, บริษัทเจนโก้ จำกัด (มหาชน) ที่ราชบุรี และบริษัทโพรเฟสชั่นแนลเวสต์ จำกัด ที่สระแก้ว และระบบเตาเผาขยะอันตราย 1 แห่งคือ บริษัทอัคคีปรการ จำกัด ที่สมุทรปราการ

จากที่กล่าวมาข้างต้น สรุปเป็นแผนผังการจัดการซากเซลล์แสงอาทิตย์และขยะอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทยในปัจจุบันได้ดังนี้ (ภาพที่ 3.1)



ภาพที่ 3.1 ผังการจัดการซากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทยในปัจจุบัน

*** ข้อสังเกต จากผังการจัดการซากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับขยะอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน พบว่ามีช่องโหว่และจุดเสี่ยงหลายๆ จุดที่อาจจะมีการลักลอบทิ้งของเสียที่ไม่มีมูลค่า และลักลอบปล่อยสารพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ หากไม่ได้รับการจัดการที่ถูกต้องเหมาะสม

บทที่ 4

การจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

4.1 ทิศทางในการรีไซเคิลของเสียประเภทขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Waste; E-Waste)

ในยุคที่มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างรวดเร็ว ทำให้มีเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใหม่ๆ เกิดขึ้นมากมาย ระยะเวลาของการใช้งานนั้นสั้นลง แล้วเปลี่ยนใหม่บ่อยขึ้น ส่งผลให้ซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ถูกทิ้งเป็นขยะ มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นทุกปี การรีไซเคิลซากอิเล็กทรอนิกส์จึงจำเป็นมากในปัจจุบัน ทุกๆประเทศล้วนแต่ให้ความสำคัญมากขึ้นในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนการวางแผนในการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ

นอกจากวิธีการรีไซเคิลแล้ว วิธีการแก้ปัญหาที่ต้นทางเพื่อลดจำนวนขยะและของเสียประเภทขยะอิเล็กทรอนิกส์นั้นเป็นอีกวิธีการสำคัญ ควรมีการคัดแยกประเภทของขยะอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงเซลล์แสงอาทิตย์ออกจากขยะทั่วไป แล้วรวบรวมไว้ในที่ที่จัดให้โดยเฉพาะเพื่อรอการจัดการที่ถูกต้องเหมาะสมต่อไป นอกจากนี้ผู้บริโภคควรเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์ที่มีคุณภาพเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่เรียกว่า Eco หรือ Green product มากที่สุด ในปัจจุบันมีบางประเทศได้ออกกฎหมายห้ามนำขยะอิเล็กทรอนิกส์ไปฝังกลบ เนื่องจากขยะอิเล็กทรอนิกส์มีส่วนของขยะพิษประเภทโลหะหนักต่างๆ สหภาพยุโรป EU ได้เสนอใช้ระเบียบ WEEE และ RoHS สำหรับการควบคุมขยะประเภทอิเล็กทรอนิกส์ตั้งแต่ พ.ศ. 2548 และ 2549

กฎระเบียบว่าด้วยการจัดการของเสียจาก เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Waste Electrical and Electronic Equipment: WEEE) ที่แก้ไขในปี 2555 (2012/19/EU) กล่าวถึงการจัดการของเสียและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด รวมถึงซากเซลล์แสงอาทิตย์ของกลุ่มประเทศสมาชิกสหภาพยุโรป ข้อกำหนดคือ ร้อยละ 75/ ร้อยละ 65 (อัตราการกู้คืน/รีไซเคิล) ของของเสียโดยมวล เพื่อนำไปรีไซเคิลจนถึงปี 2559 จากนั้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80/ ร้อยละ 75 จนถึงปี 2561 และจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 85/ ร้อยละ 80 หลังจากนั้น นอกจากข้อกำหนดและการกำกับดูแลดังกล่าวแล้ว เห็นได้ชัดว่าจำเป็นต้องมีเทคโนโลยีการรีไซเคิลเพิ่มขึ้นเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของ WEEE โรงงานไซเคิลซากของเสียจาก เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้นสามารถตอบโจทย์ในข้อกำหนด WEEE ได้ แต่จำเป็นต้องมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อการใช้ต้นทุนที่เหมาะสมและให้เป็นไปตามข้อกำหนด WEEE ที่กำลังจะตามมา

นอกจากนี้ แนวทางการแก้ปัญหาที่ยั่งยืนต้องอาศัยความร่วมมือจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะผู้ผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์ซึ่งมีเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าอยู่แล้ว ยอมรับมาตรการและขั้นตอนการกำจัดขยะเหล่านี้เป็นอย่างดี สหภาพยุโรป เกาหลีใต้ ญี่ปุ่นรวมทั้งไต้หวัน ได้ริเริ่มให้มีการกำหนดแนวทางให้ผู้ขายและผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ต้องมีส่วนรับผิดชอบในการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์จากผลิตภัณฑ์ของตนเอง หรือ ที่เรียกว่า Extended producer responsibility ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาอย่างมีประสิทธิภาพอีกแนวทางหนึ่ง

สำหรับเทคโนโลยีการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ โดยภาพรวมแล้วมีขั้นตอนและกระบวนการดังต่อไปนี้ ได้แก่ กระบวนการคัดแยกถอดชิ้นส่วนของซากผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ออกมาเป็น โลหะ พลาสติก แก้วและอุปกรณ์แผ่นวงจรไฟฟ้า ต่อด้วยกระบวนการทุบ บดอัดชิ้นส่วนเพื่อลดขนาดหรือฆ่าและเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ตามด้วยกระบวนการบดให้เป็นผงละเอียดและมีการแยกส่วนโลหะที่มีค่าออกเพื่อนำกลับไปรีไซเคิลมาใช้ประโยชน์ใหม่ กระบวนการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องมี การควบคุมมลพิษอย่างถูกวิธี ได้แก่ การใช้ระบบดักจับฝุ่น ระบบดักจับกรดที่ฟุ้งกระจาย และระบบบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนเพื่อนำน้ำทิ้งที่ปล่อยออกมาเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่กฎหมายกำหนดก่อนปล่อยออกสู่ภายนอกโรงงาน

ปัจจุบันประเทศญี่ปุ่นและบางประเทศในยุโรปมีการส่งเสริมให้การสร้างโรงงานสำหรับการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ ให้แพร่หลายไปตามเมืองต่างๆ ตามแนวทางของเมืองสีเขียว ถึงเวลาแล้วสำหรับเมืองไทยที่ต้องหันมาใส่ใจกับปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์ ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และการปนเปื้อนสิ่งแวดล้อม ตามแนวทางของ Zero waste

4.2 แนวคิดและหลักการในการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และสุขภาพอันเนื่องมาจากการที่ไม่ได้วางแผนรองรับ ไม่มีแนวทางการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างถูกต้องเหมาะสม ไม่ว่าจะใช้วิธีการเผาที่ไม่ถูกวิธีซึ่งก่อให้เกิดสารพิษหรือการฝังกลบที่ไม่ถูกวิธีก็จะเกิดการแพร่กระจายของโลหะหนัก ทั้งตะกั่วและแคดเมียมสู่ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ จนอาจเกิดวิกฤต สูญเสียแหล่งอาหารและน้ำในอนาคต จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ประเทศไทยจะต้องเริ่มศึกษาวิธีบริหารจัดการวางแผนทางเลือกที่เหมาะสม โดยพิจารณาทั้งหลักการบริหาร กฎหมาย เศรษฐศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม

โดยทั่วไป หลักการของการจัดการของเสียอย่างยั่งยืนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายนั้นคือ หลักการที่ถูกเรียกว่า 3Rs เข้ามาประยุกต์ใช้ตั้งแต่จุดเริ่มต้นกระบวนการผลิต การผลิตวัตถุดิบ การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ การผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ การประกอบ การต่อวงจรไฟฟ้า การใช้งาน จนกระทั่งซากและของเสียหลังจากการใช้งาน เมื่อผลิตภัณฑ์ไม่สามารถซ่อมแซมหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การรีไซเคิลนั้นเป็นทางเลือกที่ดีกว่าการนำไปทิ้งเป็นขยะ เนื่องด้วยการคาดการณ์ถึงปริมาณของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก และเพื่อรักษาตำแหน่งของเซลล์อาทิตย์ให้เป็นเทคโนโลยีพลังงานสะอาด การรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์ได้กลายเป็นหัวข้อใหม่ที่สำคัญ ได้มีการอภิปรายและการพัฒนาดำเนินการกิจกรรมต่างๆ โดยรัฐบาล, องค์กร และบริษัทต่างๆ

แนวคิดการจัดการของเสียอันตรายด้วยหลัก 3R

3R เป็นแนวคิดและแนวทางในการปฏิบัติเพื่อการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า สามารถช่วยลดปริมาณขยะให้น้อยลง ด้วยการลดการใช้ การนำกลับมาใช้ซ้ำ และการนำขยะกลับมาใช้ใหม่ (Reduce Reuse and Recycle: 3Rs) โดยเริ่มต้นที่การใช้ให้น้อยลง ลดการใช้วัสดุ ผลิตภัณฑ์ ที่ก่อให้เกิดขยะเพื่อลดปริมาณ

ขยะที่เกิดขึ้น (Reduce) การนำวัสดุ ผลิตภัณฑ์ที่ยังสามารถใช้งานได้ กลับมาใช้ซ้ำ (Reuse) และการนำวัสดุ ผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานแล้วมาแปรรูป เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ หรือ รีไซเคิล (Recycle) (ภาพที่ 4.1)



ภาพที่ 4.1 แนวคิดการจัดการของเสียอันตรายด้วยหลัก 3R

REDUCE คือ การลดการใช้ให้มากที่สุด การบริโภคทรัพยากรที่ไม่จำเป็นลง ลองมาสำรวจกันว่า เราจะลดการบริโภคที่ไม่จำเป็นตรงไหนได้บ้าง โดยเฉพาะการลดการบริโภคทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และแร่ธาตุ ต่าง ๆ การลดการใช้น้ำ ทำได้ง่าย ๆ โดยการเลือกใช้เท่าที่จำเป็น เช่น ปิดไฟ ทุกครั้งที่ไม่ใช้งานหรือเปิดเฉพาะจุดที่ใช้งาน ปิดคอมพิวเตอร์และเครื่องปรับอากาศเมื่อไม่ใช้เป็นเวลานาน ๆ ถอดปลั๊กของเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น กระจกน้ำร้อนออกเมื่อไม่ได้ใช้ เมื่อต้องการเดินทางไกล ๆ ก็ควรใช้วิธีเดิน ขี่จักรยาน หรือนั่งรถโดยสารแทนการขับรถไปเอง เป็นต้น เพียงเท่านี้เราก็สามารถเก็บทรัพยากรด้านพลังงานไว้ใช้ได้นานขึ้น ประหยัดพลังงานและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมอีกด้วย

REUSE คือ การใช้ทรัพยากรให้คุ้มค่าที่สุดเพื่อให้เกิดของเสียน้อยลง หรือซ้ำลง โดยการนำสิ่งของ เครื่องใช้มาใช้ซ้ำ ซึ่งบางอย่างอาจใช้ซ้ำได้หลาย ๆ ครั้ง เช่น การนำชุดทำงานเก่าที่ยังอยู่ในสภาพดีมาใส่เล่น หรือใส่นอนอยู่บ้านหรือนำไปบริจาค แทนที่จะทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ การนำกระดาษรายงานที่เขียนแล้ว 1 หน้า มาใช้ในหน้าที่เหลือหรืออาจนำมาทำเป็นกระดาษโน้ต ช่วยลดปริมาณการตัดต้นไม้ได้เป็นจำนวนมาก การนำขวดแก้วมาใส่น้ำรับประทานหรือนำมาประดิษฐ์เป็นเครื่องใช้ต่างๆ เช่น แจกันดอกไม้หรือที่ใส่ดินสอ เป็นต้น นอกจากจะช่วยลดค่าใช้จ่าย ลดการใช้พลังงานแล้ว ยังช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมและยังได้ของน่ารักๆ จากการประดิษฐ์ไว้ใช้งานอีกด้วย

RECYCLE คือ การนำหรือเลือกใช้ทรัพยากรที่สามารถนำกลับมารีไซเคิล หรือนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นการลดการใช้ทรัพยากรในธรรมชาติจำพวกต้นไม้ แร่ธาตุต่าง ๆ เช่น ทราย เหล็ก อะลูมิเนียม ซึ่งทรัพยากร เหล่านี้ สามารถนำมารีไซเคิลได้ยกตัวอย่างเช่น เศษกระดาษสามารถนำไปรีไซเคิลกลับมาใช้เป็นกล่องหรือถุง กระดาษ การนำแก้วหรือพลาสติกมาหลอมใช้ใหม่เป็นขวด ภาชนะใส่ของ หรือเครื่องใช้อื่นๆ ฝากระป๋อง น้ำอัดลมก็สามารถนำมาหลอมใช้ใหม่หรือนำมาบริจาคเพื่อทำยาเทียมให้ กับคนพิการได้

ในภาพรวมและแนวโน้มของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ เริ่มต้นจากการซ่อมแซมเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานในปัจจุบัน และการสร้างแรงจูงใจเพื่อนำไปสู่การรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์

กระบวนการรีไซเคิลถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ คือ กระบวนการถอดแยกชิ้นส่วนอย่างคร่าวๆ ก่อนการกู้คืน การถอดแยกโครงสร้างโลหะ การกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบลามิเนต และกระบวนการการกู้คืนโลหะ (และสารตั้งต้น ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผสม) ในส่วนนี้จะมุ่งเน้นที่การกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนตเป็นหลัก เนื่องจากเป็นหนึ่งในเป้าหมายสำคัญและยากที่สุดของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีรีไซเคิล

เทคโนโลยีการรีไซเคิลสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si และเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม (CdTe และ CIGS) มีลักษณะที่แตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างและโลหะที่อยู่ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ความแตกต่างที่สำคัญประการหนึ่งคือ วัตถุประสงค์ในการกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม คือการกู้คืนฝาครอบแก้วและพื้นผิวกระจกที่มีชั้นสารกึ่งตัวนำมาใช้ใหม่ ในขณะที่วัตถุประสงค์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si คือการแยกและกู้คืน แก้ว เซลล์ Si และโลหะอื่นๆ กลับคืนมา

กระบวนการสำหรับการรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si สามารถแบ่งคร่าวๆ คือ กระบวนการที่กำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนตและกระบวนการกู้คืนโลหะกลับมาจากเซลล์ Si การกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบลามิเนตเป็นหนึ่งในวิธีที่ยากที่สุด และต้องใช้กระบวนการเพิ่มเติม เช่น วิธีทางความร้อน ทางกล และทางเคมี ส่วนของการกู้คืนโลหะจากเซลล์ Si สามารถทำได้โดยวิธีการทางเคมีเช่นการกัดกร่อน และอีกวิธีหนึ่งที่เป็นไปได้คือการบำบัดในอุตสาหกรรมการกลั่นโลหะ

กระบวนการรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม กระบวนการจะแบ่งออกเป็นกระบวนการขจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบลามิเนต และกระบวนการกู้คืนโลหะและพื้นผิวกระจกกลับมาคืนมา ในการกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบด้วยลามิเนต นั้นได้มีการพัฒนาวิธีการหลักๆอยู่ 3 วิธี คือ วิธีทางความร้อน วิธีทางกล และวิธีการทางแสง การนำโลหะกึ่งตัวนำและพื้นผิวกระจกกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการทางเคมี เช่น การกัดกร่อนจะมีประสิทธิภาพสูง เพราะวาล์ววัสดุพื้นผิวที่ได้ถูกกู้คืนมานั้นไม่มีการแตกหัก ส่วนการขูดด้วยเครื่องมือกลอาจเป็นกระบวนการทางเลือกที่รองลงมา

4.3 การรีไซเคิลของเสียจากระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

อุปกรณ์หลักที่จะเกิดเป็นของเสียจากโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะมีเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าและหม้อแปลงกระแสไฟฟ้านับเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะถูกส่งต่อไปให้ผู้รับกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์เพื่อแยกชิ้นส่วนและส่งต่อไปกำจัดหรือรีไซเคิลต่อไปตามกระบวนการที่มีอยู่แล้วในปัจจุบัน แต่สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน ปัจจุบันยังไม่มีกำหนดกระบวนการบริหารจัดการที่เหมาะสมและตั้งโรงกำจัดภายในประเทศ ดังนั้นในการศึกษาจึงเน้นไปที่การบริหารจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นส่วนใหญ่ จำเป็นที่จะต้องมีการวางแผนจัดการกับซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้น

สำหรับการศึกษาค้นคว้านี้ จะพิจารณาถึงการรีไซเคิลเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ สองประเภทหลัก: ผลึกซิลิคอน (c-Si) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่โดดเด่นและมีการใช้งานมากในปัจจุบัน และเทคโนโลยี

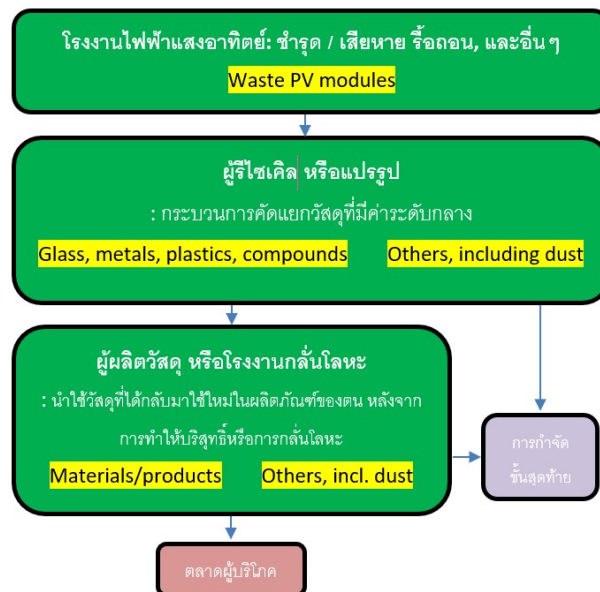
เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม ซึ่งรวมถึงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง เช่น แคดเมียม-เทลลูไรด์ (CdTe) และ CIGS (คอปเปอร์ Cu – อินเดียม In – แกลเลียม Ga – ซีลีเนียม Se)

4.3.1 การรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

ในปัจจุบันประเทศส่วนใหญ่ทั่วโลกจำแนกเซลล์แสงอาทิตย์เป็นของเสียทั่วไปหรือของเสียจากอุตสาหกรรมเท่านั้น ถึงแม้ว่าสหภาพยุโรป (European Union; EU) ได้บังคับใช้กฎระเบียบเฉพาะสำหรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แล้วก็ตาม ทั่วโลก ปัจจุบันพบว่าปริมาณของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์กว่าครึ่งหนึ่ง กลายมาเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ ถึงแม้ว่ามีโรงงานรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉพาะได้เปิดดำเนินการแล้ว แต่ด้วยกระบวนการของการเก็บรวบรวมและการส่งคืนซากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งาน แล้วนั้นยังมีปริมาณที่ต่ำ และกระบวนการรีไซเคิลเศษซากเซลล์แสงอาทิตย์ยังไม่เหมาะสมเท่าที่ควร

แผนผังทั่วไปของกระบวนการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานได้แสดงในภาพที่ 4.2 ซากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกใช้ในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และของเสียที่เกิดจากโรงงานผลิตนั้น ถูกส่งโดยผู้รีไซเคิลไปยังโรงงานที่ดำเนินการรีไซเคิลหรือผู้แปรรูประดับกลาง ใช้กระบวนการการแยกวัสดุที่มีค่าที่มีอยู่ในซากเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น แก้ว โลหะ สารประกอบ ตลอดจนวัสดุที่มีค่า นำกลับมาใช้ใหม่หรือส่งต่อไปหลังจากกระบวนการทำให้บริสุทธิ์โดยโรงงานผลิตวัสดุ เช่น บริษัทโรงกลั่นโลหะ แต่หากจำเป็นอาจมีกระบวนการขั้นกลางเพิ่มเติมเช่น การถอดแยกชิ้นส่วนก่อนการนำไปบำบัดโดยผู้ผลิตวัสดุ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของการแยกในขั้นแรกและขั้นกลาง ในทางกลับกัน วัสดุที่ไม่มีค่าหรือวัสดุที่มีมูลค่าเพียงเล็กน้อยรวมถึงฝุ่นที่เกิดจาก ซึ่งเกิดจากผู้รีไซเคิล ผู้แปรรูประดับกลาง และผู้ผลิตวัสดุนั้นสามารถกำจัดได้ในหลุมฝังกลบ

** ข้อสังเกต ระหว่างการไหล มีวัสดุบางชนิดที่ไม่มีค่า เช่น โพลีเมอร์ พลาสติก ที่เกิดจากผู้รีไซเคิล ผู้แปรรูประดับกลาง ควรถูกกำจัดด้วยความร้อนและนำความร้อนกลับคืนเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการการกลั่นโลหะ



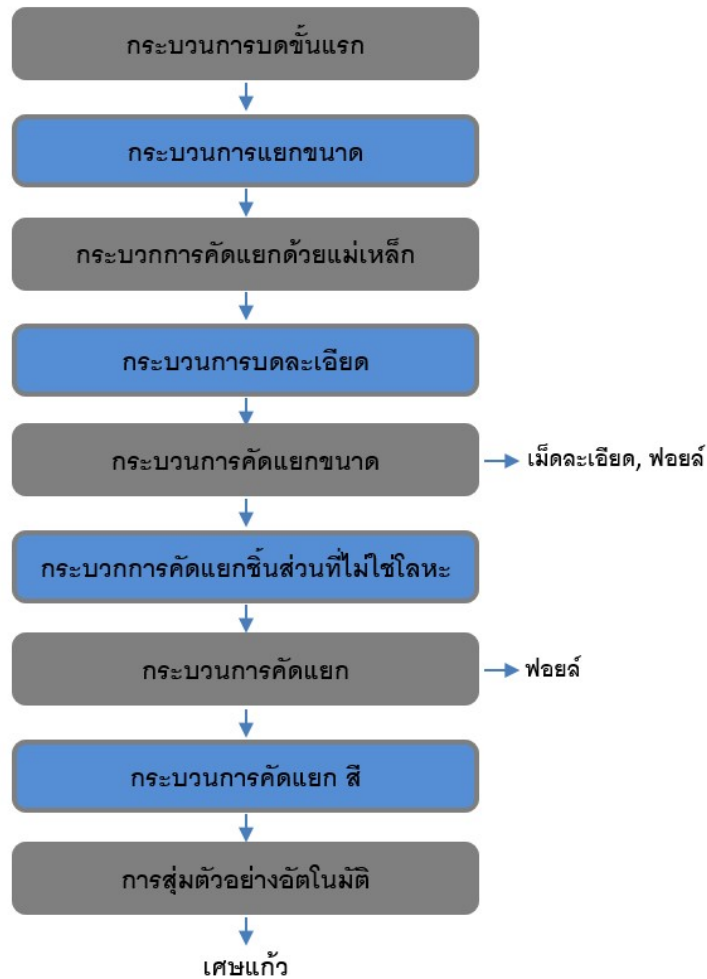
ภาพที่ 4.2 แผนผังทั่วไปของการบำบัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อหมดอายุการใช้งาน

4.3.2 ตัวอย่างการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si

สำหรับการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่และการรีไซเคิลวัสดุที่ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si การแยกส่วนประกอบหลัก เช่น โครงสร้างลามิเนต โครงโลหะ และกล่องเชื่อมต่อ (สายเคเบิลและโพลีเมอร์) เป็นขั้นตอนแรก อะลูมิเนียมหรือเหล็กกล้าได้จากโครงสร้าง และทองแดงจากสายเคเบิลสามารถกลายมาเป็นส่วนหนึ่งของวงจรการรีไซเคิลโลหะเดิมที่มีอยู่แล้ว ดังนั้นจึงมีศักยภาพในการรีไซเคิลได้โดยง่าย หลังจากนั้นคือ กระบวนการทางเทคนิคที่สำคัญและยากที่สุดเกี่ยวข้องกับการแยกโครงสร้างลามิเนตซึ่งประกอบด้วย แก้ว เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Si และชั้นโพลีเมอร์

ในทวีปยุโรป มีซากเซลล์แสงอาทิตย์สะสมมากกว่า 15,000 ตัน ในสิ้นปี 2559 โดยประเมินจากวงจรชีวิตของเซลล์แสงอาทิตย์ (PV CYCLE) และส่วนใหญ่เป็นซากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Si [7] ซากเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าว ส่วนใหญ่จะได้รับการบำบัดโดยผู้รีไซเคิลแก้ว เนื่องจากการรีไซเคิลส่วนประกอบกระจกลามิเนตของเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si เป็นกระบวนการที่ใช้ต้นทุนค่อนข้างต่ำ ซึ่งบริษัทรีไซเคิลแก้ว Si สามารถทำได้ด้วยการลงทุนเพิ่มเติมอีกเล็กน้อย หลังจากกระบวนการนำแก้วกลับมาใช้ใหม่ วัสดุอื่นๆ เช่น โลหะและสารประกอบอื่นๆ จะได้รับการบำบัดโดยกระบวนการอื่นต่อไป แผนผังกระบวนการรีไซเคิลกระจกลามิเนต (ภาพที่ 4.3) มักดำเนินการเป็นรอบๆ เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์และพิจารณาปริมาณที่เพียงพอสำหรับกระบวนการในรอบปัจจุบัน ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ทั่วไปในการกำจัดสิ่งเจือปน เช่น สารตกค้างของโพลีเมอร์ (กาว) หรือสกรูจากเศษแก้ว รวมถึงแม่เหล็ก เครื่องบด ตะแกรง อุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ เครื่องคัดแยกแสง เครื่องคัดแยกแบบเหนียวนำ และระบบการจัดการไอเสีย เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ เศษแก้วบดที่ได้ซึ่งยังคงผสมด้วยซิลิกอน โพลีเมอร์ และโลหะ สามารถนำเศษแก้วบดที่ได้มาผสมกับวัสดุอื่นๆ ทำเป็นวัสดุฉนวนความร้อนในอุตสาหกรรมโฟมแก้วหรือใยแก้วได้ อย่างไรก็ตาม ด้วยกระแสของพลังงานสะอาด และซากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น ความต้องการด้านนี้อาจเกิดการอึดอัด และจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาและการลงทุนในเทคโนโลยีการรีไซเคิลแบบใหม่เพิ่ม

ในประเทศอื่นๆ โลหะมีค่าบางชนิดเช่น เงิน จะถูกกู้คืนโดยผู้รีไซเคิลหรือผู้รวบรวมระดับกลาง นอกเหนือจากแก้ว ด้วยเหตุผลทางเทคนิคหรือเหตุผลทางเศรษฐกิจ



ภาพที่ 4.3 ผังกระบวนการรีไซเคิลกระจกลามิเนต [8]

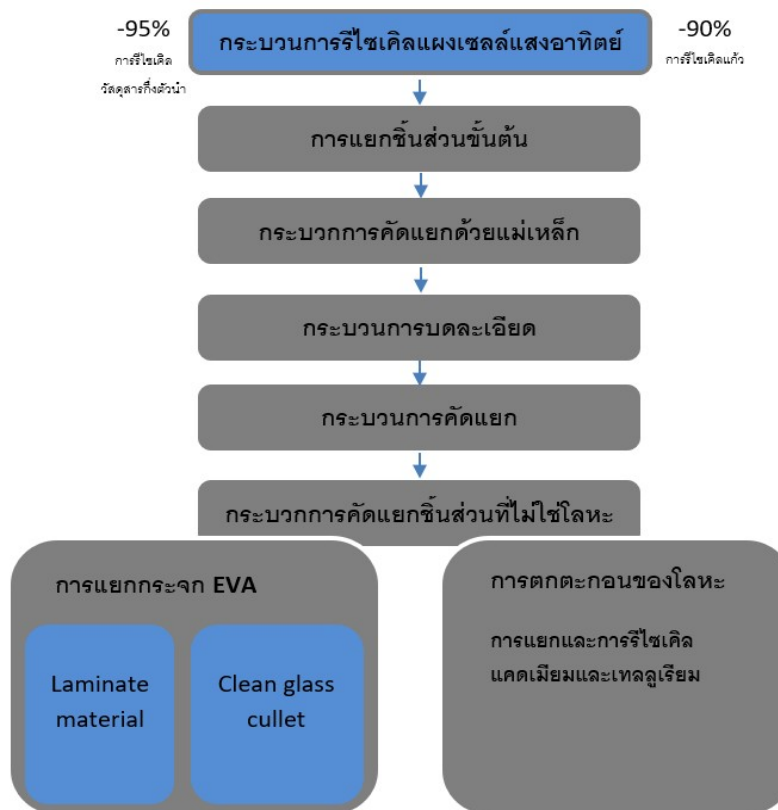
4.3.3 ตัวอย่างกระบวนการรีไซเคิลกระจกลามิเนต

ปัจจุบัน วิธีการทางกลเป็นกระบวนการหลักที่ใช้ในการแยกโครงสร้างลามิเนตของซากเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si ทำให้ได้อัตรากำไรวัสดุกลับมาใช้ใหม่สูงตามมวลของซากเซลล์แสงอาทิตย์ แม้ว่าวัสดุที่มีมูลค่าสูงบางชนิด (ที่มีมวลน้อย) อาจไม่สามารถกู้คืนได้ทั้งหมด กลยุทธ์ปัจจุบันนี้แนะนำการปฏิบัติตามกฎหมายโดยไม่จำเป็นต้องลงทุนเพิ่มในกระบวนการรีไซเคิลใหม่ อย่างไรก็ตาม ในอนาคต ผู้ดำเนินการรีไซเคิลจะต้องเพิ่มขั้นตอนการกำจัดตะกั่วและสารประกอบตะกั่วออกจากเศษแก้วที่ส่งออก ข้อกำหนดนี้ก็นำมาซึ่งกระบวนการเพิ่มเติมนอกเหนือจากการบำบัดด้วยกลไกตามที่กำหนด ตัวอย่างเช่น คำสั่ง WEEE และการดำเนินการตามข้อกำหนดของมาตรฐานและข้อกำหนดทางเทคนิคที่เกี่ยวข้องสำหรับการปล่อยมลพิษขั้นต่ำในการบำบัด การสร้างโรงงานรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉพาะ จะเพิ่มความสามารถในการบำบัด เพิ่มอัตราการกู้คืนของส่วนประกอบที่มีค่า และเพิ่มรายได้ เนื่องจากคุณภาพที่ดีขึ้น

4.3.4 ตัวอย่างการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม

ปัจจุบันของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมได้รับการแยกและรีไซเคิลโดยใช้การผสมผสานระหว่างการบำบัดทางกลและทางเคมี กระบวนการรีไซเคิลสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม CdTe ที่ดำเนินการโดย First solar (ภาพที่ 4.4) สามารถรีไซเคิลของแก้วเกือบร้อยละ 90 และประมาณร้อยละ 95 โดยมวล สำหรับวัสดุสารกึ่งตัวนำ (semiconductor materials) กระบวนการประกอบด้วยขั้นตอนต่อไปนี้ [7]

- 1) การบดย่อยและบดอัดให้เป็นอนุภาคขนาดประมาณ 5 มิลลิเมตร เพื่อทำลายพันธะเคลือบ รวบรวมฝุ่นในระบบดูดซึ่งติดตั้งตัวกรองอากาศแบบอนุภาคประสิทธิภาพสูง
- 2) การแยกชิ้นเซมิคอนดักเตอร์ที่มีส่วนผสมของกรดซิลโฟนิคและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แยกแก้วและชิ้นส่วน EVA ขนาดใหญ่ออกจากตัวแยกประเภทและบนหน้าจอบีบแบน จากนั้นล้างแก้วด้วยน้ำและทำให้แห้งบนหน่วยกรองแบบสายพาน
- 3) การสกัดของเหลวกรองด้วยโลหะผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนไอออนหรือการตกตะกอน เพื่อให้แคดเมียมและเทลลูเรียมบริสุทธิ์ยิ่งขึ้น เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมพลังงานแสงอาทิตย์



ภาพที่ 4.4 ผังกระบวนการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม (CdTe)

นอกจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe แล้ว การรีไซเคิลโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของเสียและปริมาณของเสียที่เกี่ยวข้องเพิ่มขึ้น กระบวนการก็จะถูกปรับปรุงพัฒนาขึ้น

4.3.5 แนวโน้มของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

ตราบใดที่จำนวนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มากเกินไป สถานการณ์ทางเทคโนโลยีในปัจจุบันจะสามารถครอบคลุมความต้องการสำหรับการจัดการเมื่อหมดอายุการใช้งานอย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ควรถูกเตรียมพร้อมไว้สำหรับรองรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำลังจะเพิ่มขึ้นมากในอนาคต

งานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในบางประเทศและบางบริษัทเริ่มพัฒนามาเป็นเวลายี่สิบปีหรือนานกว่านั้น วัตถุประสงค์หรือแรงจูงใจในอดีตสำหรับงานวิจัยกำลังพัฒนาเปลี่ยนแปลงไปพร้อมกันกับเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ และความต้องการของตลาด ตารางที่ 4.1 สรุปการเปลี่ยนแปลงดังที่กล่าวมาข้างต้น

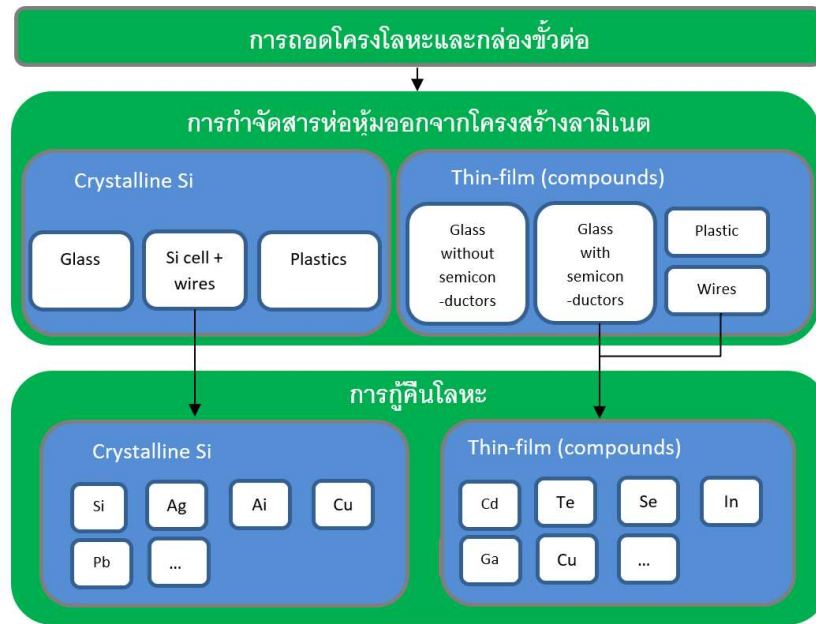
ในขั้นต้น การรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si มุ่งเน้นไปที่การกู้คืนเซลล์ Si/ Wafers เพื่อลดต้นทุนการผลิต ต่อมาเป็นการนำวัสดุที่มีมูลค่าสูงและเป็นอันตรายกลับมาใช้ใหม่ ในกรณีของสารประกอบจุดประสงค์หลักคือการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยการนำวัสดุที่เป็นอันตรายและมีค่ากลับมาใช้

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ทุกประเทศล้วนให้ความสำคัญเกี่ยวกับการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ และการรีไซเคิลเพื่อนำแก้วกลับมาใช้ใหม่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการนำวัสดุที่มีค่าและเป็นอันตรายกลับมาใช้ใหม่เมื่อเร็วๆ นี้ในยุโรปได้ออกข้อกำหนด WEEE และมีแนวโน้มที่จะบังคับใช้ในเร็วๆ นี้ การนำส่วนประกอบที่มีค่ากลับมาใช้ใหม่ด้วยต้นทุนที่ต่ำถือเป็นหลักการของนวัตกรรมทางเทคนิค การเพิ่มขึ้นของอัตราการกู้คืนวัสดุที่มีค่ากลับมาใช้ใหม่และการรีไซเคิลนั้นน่าจะเป็นสิ่งสำคัญในอนาคต นอกจากนี้ การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุที่กู้คืนได้เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานต่อไปนั้นยังเป็นสิ่งที่ต้องพัฒนาต่อไป

ตาราง 4.1 การเปลี่ยนแปลงวัสดุประสงค์และแรงจูงใจในการรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์

		c-Si	(CdTe และ CIGS)
1990s		การกู้คืน Si wafers โดยไม่ให้แตกหักขึ้น ยากและใช้ต้นทุนสูงมาก เพราะถูกรอบ ด้วย Si cell	การกู้คืนวัสดุที่เป็นอันตรายเช่น Cd และ Se เนื่องจากปัญหาสิ่งแวดล้อมและการกู้ คืนโลหะหายากเช่น Te และ In เนื่องจาก ปัญหาเรื่องข้อจำกัดทรัพยากรที่อาจจะ เกิดขึ้น
2000s	ครึ่ง แรก	นอกจาก Si wafers แล้ว มีการกู้คืน Ag เนื่องจากมีมูลค่าสูงและการกู้คืน Pb เนื่องจากปัญหาสิ่งแวดล้อม	การนำโลหะ/สารกึ่งตัวนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นวัสดุประสงค์หลัก โดยที่ประเด็นเรื่อง ข้อจำกัดด้านทรัพยากรยังไม่ค่อยน่าเป็น ห่วง
	ครึ่ง หลัง	การนำแก้วกลับมาใช้ใหม่ แต่ยังมีปัญหาหลักในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร และเพื่อเพิ่มอัตราการ Recovery/ Recycling (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
2010s		การคืนส่วนประกอบหลัก เช่น แก้ว ด้วย ต้นทุนที่ต่ำเป็นเป้าหมายหลัก ในทาง กลับกัน ส่วนที่ไม่ใช่ส่วนประกอบหลัก สามารถกู้คืนได้หากมีความคุ้มค่า การนำ โลหะกลับมาใช้ใหม่ด้วยต้นทุนที่ต่ำน่าจะ เป็นปัญหาสำคัญ	การนำส่วนประกอบหลักทั้งแก้วและโลหะ กึ่งตัวนำกลับมาใช้ใหม่ ด้วยต้นทุนที่ต่ำโดย นวัตกรรม นอกจากการเพิ่มอัตราการ Recovery/ Recycling และคุณภาพของ วัสดุที่กู้คืนก็เป็นปัญหาเช่นกัน.

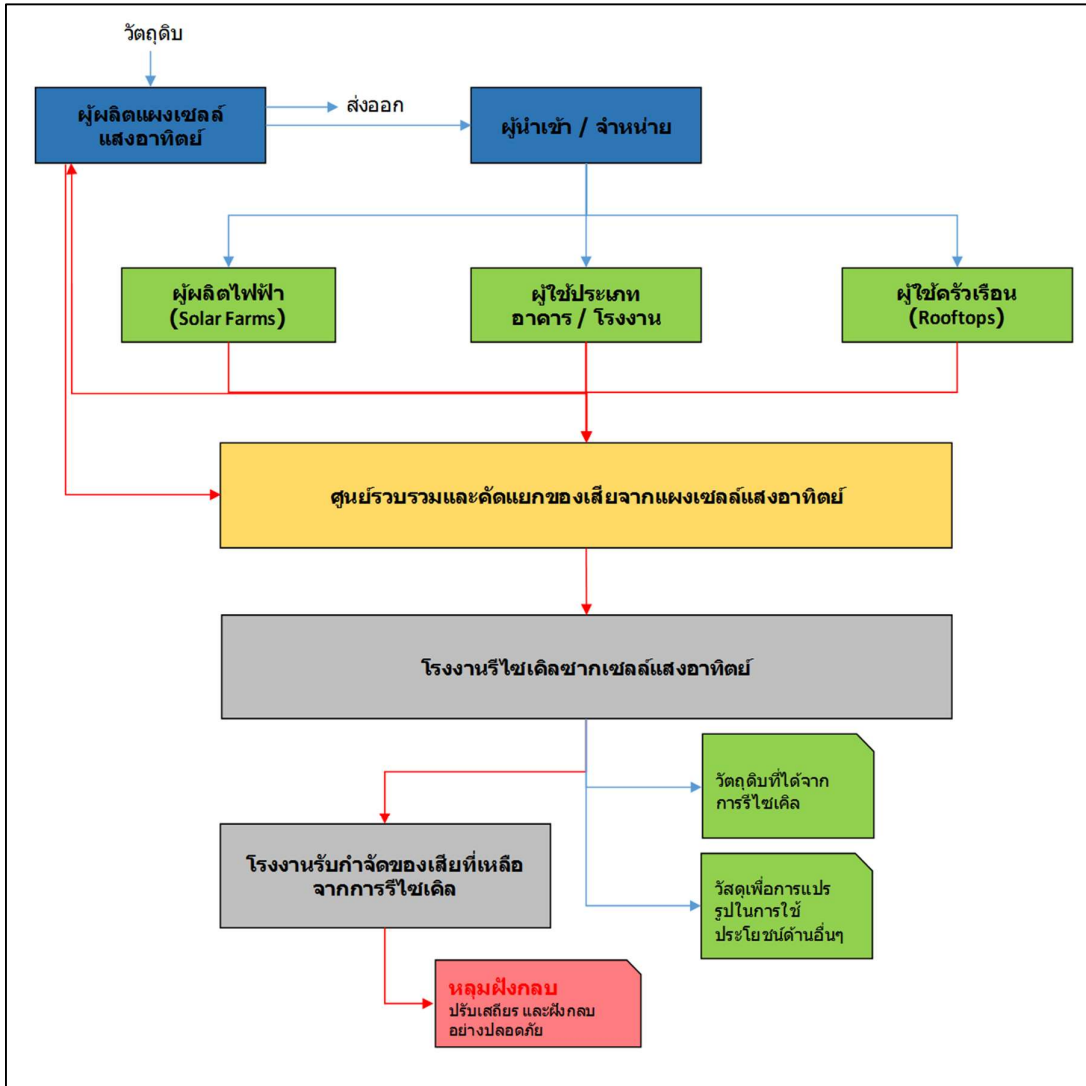
กระบวนการกำจัดสารห่อหุ้มและการบำบัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถทำแผนผังคร่าวๆ ได้ (ภาพที่ 4.5) ในบรรดากระบวนการต่างๆ กระบวนการที่สำคัญและยากที่สุดคือการกำจัดสารห่อหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบลามิเนต ในระหว่างกระบวนการเฉพาะนี้ โครงสร้างจะสลายตัวและส่วนประกอบจะถูกแยกออก โดยที่โลหะจะถูกกู้คืนในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากความแตกต่างในโครงสร้างและส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงแยกกระบวนการสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด c-Si และฟิล์มบาง ออกจากกัน



ภาพที่ 4.5 กระบวนการแยกชิ้นส่วนและการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีการวางแผนในการจัดการ การรวบรวม จัดเก็บ ของเสียอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงซากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกต้องเหมาะสม เพื่อป้องกันความเสี่ยงที่อาจจะถูกลักลอบทิ้งของเสียที่ไม่มีมูลค่า และการปล่อยสารพิษสู่สิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องมีการกำหนด และการวางแผนในการจัดการ การจัดเก็บรวบรวม ของเสียประเภทนี้จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องโดยเฉพาะ ภาครัฐ

จากข้อมูลดังกล่าวมาสามารถสรุปแผนผังแนวทางการจัดการกับซากเซลล์แสงอาทิตย์ (ภาพที่ 4.6)



ภาพที่ 4.6 ผังแนวทางการจัดการกับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

4.4 กระบวนการจัดเก็บรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

กระบวนการจัดเก็บรวบรวมเป็นขั้นตอนแรกที่สำคัญมาก เป็นจุดเริ่มต้นของการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในการที่จะทำให้ขั้นตอนการจัดเก็บรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ และกระบวนการอื่นๆได้ดำเนินไปอย่างถูกต้องทาง มีประสิทธิภาพ ต้องอาศัยความร่วมมือจากทุกส่วนงานที่เกี่ยวข้อง ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 บทบาทหน้าที่ของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในกระบวนการจัดเก็บรวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

หน่วยงาน/ภาคส่วน	หน้าที่ความรับผิดชอบ
หน่วยงานภาครัฐ	ระบบโครงสร้างพื้นฐานในการจัดเก็บรวบรวมและการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์
- กระทรวงอุตสาหกรรม	- การกำหนดนโยบาย แผนการจัดการซากอุตสาหกรรม กฎหมาย ข้อกำหนด ระเบียบปฏิบัติแบบแผนการดำเนินการ สิทธิประโยชน์
- กระทรวงพลังงาน	- การประกาศ การประชาสัมพันธ์ข้อมูลให้กับผู้ที่มีส่วนร่วมต่างๆ
- กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม	- สร้างบันทึกฐานข้อมูลชนิดและปริมาณเซลล์แสงอาทิตย์ ลงทะเบียนผู้มีส่วนร่วมในโครงการ กำหนดบทบาทหน้าที่ รับผิดชอบ ของแต่ละหน่วยงาน แต่ละองค์กร
- สำนักงานจังหวัด	- บริหารจัดการ ให้ข้อมูลด้านการเงิน การลงทุน เทคโนโลยี กฎหมายและสิ่งแวดล้อม การสนับสนุนการทำงานร่วมกัน
- องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น	กำหนดสถานที่ส่วนกลางในการจัดเก็บรวบรวม และวิเคราะห์ความคุ้มค่าของระบบการรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์
	- จัดตั้งสถานที่ส่วนกลางในการจัดเก็บรวบรวม และรีไซเคิลอย่างครอบคลุมมีประสิทธิภาพในแต่ละพื้นที่เป้าหมาย
	- กำหนดเทคโนโลยี เครื่องจักร อุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเก็บรวบรวม การรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์
	- กำหนดการลงทุน
	การบริการด้านการเงิน ความร่วมมือและการตลาด
	- ให้บริการด้านการเงิน ราคา และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีไซเคิล
	- สนับสนุนช่องทาง ตลาดใหม่ๆ เพื่อจำหน่ายหรือแลกเปลี่ยนวัสดุที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิล

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง	หน้าที่ความรับผิดชอบ
โรงงานรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	<ul style="list-style-type: none"> - กำหนดชนิดและปริมาณวัสดุที่เข้าสู่กระบวนการจัดเก็บรวบรวม รีไซเคิล และกำลังการผลิต - การกำหนดเทคโนโลยี เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการให้สอดคล้องกับการวางแผนการลงทุน - กำหนดระยะเวลาดำเนินงานทั้งหมดตั้งแต่นำเข้าของเสียจนกระทั่งได้วัสดุจากกระบวนการรีไซเคิล - แยกวัสดุที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลและการบริหารจัดการของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการ
ศูนย์รวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์	<ul style="list-style-type: none"> - รวบรวมและคัดแยกของเสียจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิต ผู้ขาย ผู้ขายรายใหญ่หรือจากผู้ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ โรงงานผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ภาคครัวเรือน อาคารสำนักงาน โรงงาน - การขนย้ายของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังโรงงานรีไซเคิล
ผู้รวบรวมของเสีย	<p>กรณีผู้ผลิตเป็นผู้รวบรวมของเสีย</p> <ul style="list-style-type: none"> - รวบรวมและคัดแยกของเสียเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ติดตั้ง ผู้ขายรายใหญ่หรือจากผู้ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น โรงงานผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ - ขนย้ายของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังศูนย์รวบรวมของเสียหรือโรงงานรีไซเคิล <p>กรณีผู้ขายรายใหญ่เป็นผู้รวบรวมของเสีย</p> <ul style="list-style-type: none"> - รวบรวมหรือคัดแยกของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ติดตั้ง หรือผู้ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ - ขนย้ายของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังศูนย์รวบรวมของเสียหรือไปยังโรงงานรีไซเคิล <p>กรณีผู้ใช้งานเป็นผู้รวบรวม</p> <ul style="list-style-type: none"> - นำของเสียเซลล์จากแสงอาทิตย์ไปยังศูนย์ของเสียหรือไปยังโรงงานรีไซเคิล

การสร้างความรู้ความเข้าใจในเรื่องผลดี ผลเสียจากการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ให้แก่ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง การสร้างเครือข่ายหน่วยงานที่มีส่วนร่วม การสร้างฐานข้อมูลชนิดและปริมาณ การจัดตั้งศูนย์รวบรวมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ การวางยุทธศาสตร์การบริหารจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างบูรณาการ และส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นการวางแผนรองรับและป้องกันปัญหา ช่วยลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้ดีที่สุด

4.5 กระบวนการคัดแยกทางกล

การคัดแยกทางกายภาพหรือทางกล เป็นกระบวนการคัดแยกที่ไม่ทำลายโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ ดังนั้นองค์ประกอบที่ได้หลังการคัดแยกจะเป็นองค์ประกอบเดิมและมีคุณสมบัติเช่นเดิม แต่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างได้ ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการมีคุณสมบัติไม่ซับซ้อน สามารถจัดการได้ง่าย ถึงแม้จะมีปริมาณมาก สำหรับการคัดแยกวัสดุที่มีองค์ประกอบหลากหลายมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันมาก และมีการกระจายตัวของวัสดุที่ต้องการในขนาดละเอียดมากหรือผสมผสานเป็นเนื้อเดียวกัน อาจจำเป็นต้องใช้กระบวนการทางเคมีร่วมด้วยหลักจากการคัดแยกด้วยกระบวนการทางกายภาพ

กระบวนการจัดการทางกายภาพ มีหลักการทำงานดังนี้

- การถอดแยกชิ้นส่วนหรือ การเตรียมก่อนบำบัด
- การบดหรือการลดขนาด
- การคัดแยก
- การแยกละเอียด และการใช้ซ้ำ

กรรมวิธีในการแยกองค์ประกอบต่างๆ ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการทางกายภาพ ในขั้นแรกจำเป็นต้องทำการแยกประเภทของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละประเภทก่อนทำการถอดประกอบเพื่อแยกย่อยชิ้นส่วนออกจากกัน ชิ้นส่วนที่เป็นโครงสร้าง หรือโลหะต่างๆ สามารถนำไปใช้งานต่อหรือขายได้ ส่วนประกอบที่เป็นตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ขั้นตอนทำการบดย่อยและทำการคัดแยกขนาด โดยใช้ตะแกรงกรอง (screening) เพื่อให้ชิ้นส่วนหรือวัสดุต่างๆ ถูกแยกออกจากกัน แต่ในความเป็นจริงนั้นขั้นตอนการบดย่อยไม่สามารถทำให้ของเสียแต่ละชิ้นที่ทำมาจากวัสดุหลากหลายชนิดแยกออกเป็นวัสดุชนิดเดียวได้อย่างสมบูรณ์เสมอไป ตัวอย่างเช่น กระจกทั่วไปที่ทำจากโลหะ ตัวฝาเป็นอะลูมิเนียมเคลือบด้วยดีบุก เชื่อมด้วยตะกั่วหรือดีบุกตามรอยตะเข็บ มีพลาสติกอยู่ด้านในและเคลือบแลคเกอร์ด้านนอกกระจก เมื่อกระจกถูกย่อยจะไม่สามารถแยกองค์ประกอบต่างๆ ออกเป็นเหล็ก อะลูมิเนียม ดีบุก และอื่นๆ ได้อย่างสมบูรณ์ เช่นเดียวกับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

กระบวนการคัดแยกทางกายภาพ ขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุหรือแร่ธาตุที่เป็นตัวแปรสำคัญโดยบางกระบวนการจะทำงานได้ในช่วงขนาดที่กว้าง ในขณะที่บางกระบวนการจะมีประสิทธิภาพดีในช่วงขนาดที่แคบ และจำกัดเท่านั้น การคัดแยกทางกลมีหลากหลายวิธีการซึ่งใช้ความแตกต่างของคุณสมบัติของวัสดุหรือแร่ธาตุ

เป็นหลัก คุณสมบัติที่สำคัญได้แก่ ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ ขนาด รูปทรง ความเหนียวนำแม่เหล็ก ความเป็นตัวนำไฟฟ้า คุณสมบัติทางแสงและรังสี การดูดซึม และสถานะ (ของแข็งหรือของเหลว)

4.5.1 การถอดแยกชิ้นส่วน (disassembly) หรือการเตรียมก่อนการบำบัด

การถอดแยกชิ้นส่วน (disassembly) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังมี ส่วนประกอบที่มีมูลค่าและคัมค่าที่จะถูกนำไปใช้ซ้ำได้โดยตรง อีกทั้งการถอดแยกชิ้นส่วนที่เป็นพิษออกไปก่อน การนำซากที่เหลือไปรีไซเคิลต่อ สามารถลดค่าใช้จ่ายและลดกระบวนการที่ต้องทำต่อนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น การถอดแยกชิ้นส่วนนั้นมีหลายระดับเช่น โดย OEM (original equipment manufacturers) หรือตัวผู้ผลิตอุปกรณ์เองเพื่อรีไซเคิลส่วนประกอบต่างๆ จากผลิตภัณฑ์ที่มีตำหนิหรือชำรุดที่เกิดจากกระบวนการผลิต หรือโดยผู้รีไซเคิล ผู้ถอดประกอบชิ้นส่วนเพื่อนำไปใช้งานใหม่ หรือขายในตลาดมือสอง อย่างไรก็ตามการถอดแยกชิ้นส่วนระดับต่างๆ อาจทำเพื่อเป็นการเพิ่มเกรดของวัสดุในขั้นต้น ก่อนที่จะนำไปรีไซเคิลในขั้นต่อไป

ปัจจุบันในทางปฏิบัติ การดำเนินการถอดแยกชิ้นส่วนทั้งหมดนั้นมักจะทำด้วยมือโดยใช้เครื่องมือต่างๆ ที่ทำได้ ช่วยในการถอดประกอบ เช่น ไขควง คีมจับ คีบ ถอน สว่า เป็นต้น ซึ่งกรรมวิธีดังกล่าวจะใช้เวลา และ ต้นทุนสูง ดังนั้นการออกแบบผลิตภัณฑ์ จึงต้องพิจารณาถึงเรื่องการถอดประกอบ และการซ่อมแซมผลิตภัณฑ์ ให้สามารถทำได้ง่าย ปลอดภัย ใช้ต้นทุนต่ำด้วย

ในอนาคตอีกราว 20 ข้างหน้า หากซากเซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น การรีไซเคิลซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะต้องประยุกต์ใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยีใหม่ๆ ในการรีไซเคิลถอดประกอบ ซากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้ทันและเพียงพอปริมาณซากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้น

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยีใหม่ๆ ในการรีไซเคิลถอดประกอบเช่น การถอดรีบบแบบอัตโนมัติ หรือใช้หุ่นยนต์ถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมต้นทุนและความปลอดภัย โดยองค์การ SAT (systems engineering and automation) ประเทศออสเตรเลีย ได้พัฒนาวิธีถอดประกอบแบบอัตโนมัติเพื่อถอดรีบบส่วนประกอบ ชิ้นส่วนต่างๆ จากซากแผงวงจรพิมพ์ได้อย่างสมบูรณ์โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

- การสแกน อ่านข้อมูลระบุส่วนประกอบทั้งหมด
- อ่านฐานข้อมูลส่วนประกอบที่จัดเก็บไว้เพื่อตัดสินมูลค่าของชิ้นส่วนประกอบเหล่านั้น
- ตรวจสอบว่าส่วนประกอบที่ระบุนั้นเป็นการประกบเข้าหากัน (mounted) หรือการบัดกรี (soldered)
- หากเป็นการประกบเข้าหากัน ให้ถอดชิ้นส่วนด้วยหุ่นยนต์ในเวลา 3 – 5 นาที (ต้นทุนประมาณ 20 บาท)
- หากเป็นการบัดกรี ให้กำจัดบัดกรีออกโดยใช้เลเซอร์หรืออินฟราเรด ด้วยวิธีการระบุตามชนิดของแพ็คเกจ
- ในประเทศญี่ปุ่น บริษัท NEC Group ได้พัฒนาวิธีการถอดชิ้นส่วนด้วยวิธีเชิงกลเพื่อการบำบัดซากแผงวงจรพิมพ์ โดยขณะที่ลำเลียงซากแผงวงจรพิมพ์จะให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดและทำการตัดชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่อยู่บนแม่พิมพ์ออกไปโดยใช้แรงเฉือน (shearing)

4.5.2 การบดหรือการลดขนาด

การลดขนาด หรือการแปลงสภาพของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้กลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดลดลงด้วยอุปกรณ์ลดขนาดซึ่งมีหลากหลายประเภท แตกต่างกันไปตามคุณลักษณะของวัสดุหรือแร่ธาตุ โดยการบดย่อยวัสดุ ข้อควรพิจารณาคือลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่จะนำไปลดขนาดเช่น ความแข็ง ความเปราะ หรือคุณสมบัติที่ต้องการของผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังทำการลดขนาดแล้วเช่น ขนาดของอนุภาค การกระจายขนาดของอนุภาค เป็นต้น อุปกรณ์ลดขนาดที่ใช้ทั่วไปได้แก่ เครื่องย่อยแบบจอร์ว (jaw crusher) เครื่องบดย่อยแบบกรวยและไจราทอรี (cone and gyratory crusher) เครื่องย่อยแบบค้อนกระแทก (hammer and impact mill) เครื่องตัดฉีก (shredder) และเครื่องบดละเอียดแบบท่อนกลมและลูกกลิ้ง (rod and ball mill) เป็นต้น

ในการลดขนาดเศษเหลือทิ้ง ซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ หรือบรรจุภัณฑ์ที่ทิ้งแล้ว มักจะใช้เครื่องบดย่อยประเภท เครื่องบดย่อยกระแทก มีเครื่องบดย่อยละเอียดหลายรูปแบบ สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับคุณลักษณะของวัสดุได้ อุปกรณ์ประเภทนี้ได้ออกแบบพัฒนาขึ้นให้สามารถใช้ได้กับหลากหลายวัสดุและลักษณะการบดย่อย ลักษณะการบดย่อยและพลังงานที่ใช้ในการบดย่อยเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์และกระบวนการ ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาออกแบบพัฒนาการลดขนาดสำหรับวัสดุแต่ละประเภทโดยเฉพาะ

สำหรับการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีทางกายภาพ โดยการคัดแยกเอาโลหะและอโลหะประเภทต่างๆ ออกจากกันอย่างมีประสิทธิภาพได้ ผลลัพธ์ที่ต้องได้จากการบดย่อยคือ การทำให้องค์ประกอบของซากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีอนุภาคขนาดเดียวกัน โดยทั่วไปซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย ซิลิคอน วัสดุเคลือบให้มีความคงทนและป้องกันความชื้นได้ดีเช่น ซิลิโคนและอีวีเอ (ethylene vinyl acetate) เป็นต้น เพื่อเป็นการป้องกันแผ่นกระจกด้านบนของแผงเซลล์จึงต้องมีการทำกรอบด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรง แต่บางครั้งก็ไม่มีจำเป็น หากมีการเสริมความแข็งแรงของแผ่นกระจกเพื่อทดแทนกรอบได้เช่นกัน ดังนั้นแผงเซลล์จึงมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ (laminated) ดังนั้นความแข็งแรงจึงสูงมากยากต่อการบดย่อย คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางกลของซากเซลล์แสงอาทิตย์แสดงให้เห็นว่าการใช้แรงเฉือนและแรงตัดสามารถช่วยในการบดย่อยได้ดีขึ้น ขั้นตอนการบดย่อยควรแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนย่อยได้แก่ การบดหยาบ และการบดละเอียด (บดให้เป็นผง) จากนั้นก็นำผงที่ได้ไปผ่านกระบวนการคัดแยก วัสดุประสงค์เพื่อแยกอนุภาคที่เป็นโลหะออกจากอนุภาคที่เป็นอโลหะ หลังจากผ่านกระบวนการคัดแยกแล้วอนุภาคที่เป็นโลหะจะถูกส่งไปยังโรงกลั่นโลหะเพื่อทำให้โลหะที่ต้องการนั้นมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ส่วนที่เป็นอนุภาคอโลหะนั้นอาจนำมาใช้ซ้ำเป็นวัสดุเสริมในการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นต่อไป

เครื่องลดขนาดแบบตัดเฉือน

อุปกรณ์ประเภทนี้เหมาะกับการบดย่อยวัสดุประเภทที่มีความเหนียวและรูปทรงไม่สม่ำเสมอ มีมิติทางด้านความยาว จึงเหมาะสำหรับการลดขนาดของซากเซลล์แผงอาทิตย์ และซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เครื่องลดขนาดที่ทำงานในลักษณะนี้ แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

- 1) เครื่องลดขนาดแบบตัดเฉือนความเร็วสูง แรงบิดต่ำ เป็นอุปกรณ์ประเภทที่เหมาะสมกับการลดขนาดวัสดุที่มีความเหนียวมาก และมีขนาดใหญ่ การลดขนาดวิธีนี้จะใช้ใบมีดที่มีความคมเพื่อตัดเฉือนแทนค้อนเหล็ก ติดตั้งบนแกนเดี่ยวหมุนด้วยความเร็วสูง เช่น การลดขนาดเศษซากรถยนต์
- 2) เครื่องลดขนาดแบบตัดเฉือนความเร็วต่ำ แรงบิดสูง เป็นอุปกรณ์ประเภทที่ทำงานคล้ายกับการทำงานของกรรไกรฉีกตัดชิ้นวัสดุ จึงมีความเร็วในการเคลื่อนไหวต่ำกว่าแบบค้อนหรือใบมีดเหวี่ยงประมาณ 60 - 190 รอบต่อนาที และมีแกนขับใบมีดมากกว่าสองแกนทำงานด้วยมอเตอร์ไฮดรอลิกที่สามารถเคลื่อนที่กลับได้เมื่อมีการติดขัด เครื่องลดขนาดประเภทนี้นิยมใช้ในการลดขนาดเศษชิ้นโลหะ กระจกอลูมิเนียม พลาสติก ยางรถยนต์ ชิ้นส่วนซากอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า วัสดุทรงแบน และชิ้นส่วนซากอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเหนียว มีรูปทรงเป็นแผ่น

หลักการการทำงานของเครื่องลดขนาดแบบตัดเฉือนในปัจจุบันมีการศึกษาพัฒนาเพื่อในสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคของผลิตภัณฑ์หลักจากผ่านกระบวนการลดขนาดได้ดีขึ้น มีการเพิ่มกระบวนการอัดบิบ การกระแทก การตัด ลดการใช้ไฟฟ้า และขจัดปัญหาอื่นๆ ซึ่งประกอบด้วยกลไกการทำงาน 5 ส่วนได้แก่

- 1) กลไกการขับและการเคลื่อนที่ เครื่องบดถูกขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดความเร็วรอบที่สูง ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องบดด้วยสายพานลำเลียง
- 2) กรวยป้อนซากเซลล์แสงอาทิตย์ และซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ จะถูกป้อนเข้าเครื่องบดที่กรวยด้านบน เพื่อป้องกันการติดขัดของซากเซลล์แสงอาทิตย์และซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ได้มีการติดตั้งระบบการเขย่าที่ส่วนล่างสุดของกรวยป้อน
- 3) กลไกการบด ประกอบด้วยห้องบด โรเตอร์ และสเตเตอร์ถูกยึดเข้ากับใบมีดตามเส้นรอบวง เมื่อโรเตอร์หมุนใบมีดของโรเตอร์จะส่งแรงกระแทกและแรงเฉือนไปที่ซากเซลล์แสงอาทิตย์ และซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ซึ่งจะทำให้มันแตกออกเป็นชิ้นเล็ก นอกจากนี้ เพื่อเป็นการทำให้ประสิทธิภาพการบดดีขึ้น มีการติดตั้งใบมีดเพิ่มเข้าไปในส่วนห้องบด เพื่อช่วยเพิ่มแรงบด และแรงบดให้ซากเซลล์แสงอาทิตย์ และซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้กลายเป็นอนุภาคที่มีความละเอียดมากขึ้น
- 4) กลไกสเปร์ยหล่อเย็น ในระหว่างการบด จะมีก๊าซพิษ และฝุ่น ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นอันตรายต่อผู้ควบคุมเครื่อง กลไกสเปร์ยหล่อเย็นถูกพัฒนา และยึดติดกับด้านบนของห้องบด ช่วยลดก๊าซ และฝุ่นได้เป็นอย่างดี หลังจากซากเซลล์แสงอาทิตย์ และซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ผ่านกระบวนการลดขนาดแบบตัดเฉือนแล้วจะมีขนาดตั้งแต่ 1 - 3 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าอนุภาคยังมีขนาดใหญ่ ทำให้วัสดุหลายประเภทในซากเซลล์แสงอาทิตย์ และซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยังไม่หลุดออกจากกันดีนัก ทำให้การคัดแยกของโลหะ และอโลหะไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงต้องมีการช่วยบดให้เป็นผงละเอียดมากขึ้นโดยใช้เครื่องมือ
- 5) เครื่องมือที่ใช้กระแสวน (eddy current mill) ที่ถูกติดตั้งเข้าไปเพื่อบดอัดอนุภาคซากเซลล์แสงอาทิตย์ และซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้เล็กลง โดยติดตั้งเครื่องอุลตราโซนิกที่มีความถี่สูงซึ่งจะทำให้เกิดแรงกระแทก แรงเฉือน และแรงสั่นไปยังอนุภาคของซากเซลล์แสงอาทิตย์ และซาก

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้อนุภาคมีขนาดเล็กดลงที่ 50 - 300 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถแยกอนุภาคโลหะและอโลหะแยกออกจากกันได้ ทำให้ขั้นตอนการคัดแยกต่อจากนี้สามารถทำงานได้ง่ายและมีประสิทธิภาพดีขึ้น

ในกระบวนการตัดเฉือนซากเซลล์แสงอาทิตย์ ควรระบบการบดย่อยโดยใช้หัวบดย่อยสองชั้น เพื่อเสริมประสิทธิภาพในการบดย่อย โดยใช้หัวบดในขั้นตอนแรกซึ่งเป็นการบดหยาบจะเป็นลักษณะของเครื่องตัดโดยออกแบบให้แรงตัดเกิดจากใบตัดสองใบซึ่งมีการเคลื่อนที่และอีกใบตัดหนึ่งอยู่นิ่ง เพื่อจะทำให้ซากเซลล์แสงอาทิตย์ถูกตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ก่อนผ่านไปสู่เครื่องบดชั้นที่สองซึ่งมีลักษณะเป็นเครื่องบดแบบหัวค้อนที่ออกแบบเป็นพิเศษสำหรับบดซากเซลล์แสงอาทิตย์ วัสดุจะถูกตีและบดด้วยหัวค้อนความเร็วสูง ซึ่งหน้าที่ของหัวค้อนจะทำให้แต่ละชิ้นของซากเซลล์แสงอาทิตย์หลุดออกจากกัน และมีการศึกษาวิจัยหลายโครงการเกี่ยวกับเพิ่มประสิทธิผลของระบบการบำบัดเชิงกล ตัวอย่างเช่น การพัฒนาเทคโนโลยีการระบบการบดแบบใหม่โดยการประยุกต์โรเตอร์สำหรับบดย่อยหลายตัว และระบบเคลือบเซรามิก ซึ่งทำให้สามารถบดย่อยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ามิลลิเมตร (sub-millimeter) เทคโนโลยีนี้ทำให้เทคโนโลยีการคัดแยกด้วยการหมุนเหวี่ยง (centrifuge) มีประสิทธิภาพในการรีไซเคิลทองแดงได้ถึงร้อยละ 97 ประสิทธิภาพของกระบวนการบดนี้ได้รับการปรับปรุงโดยการใช้อัตราการบด 2 ขั้นตอน ได้แก่ การบดหยาบ และการบดละเอียด ซึ่งกระบวนการบดหยาบจะใช้แรงตัดและแรงเฉือน และกระบวนการบดละเอียดจะใช้แรงเฉือนและแรงอัดกระแทก (impact) จากการบดอนุภาคที่ได้ประสิทธิภาพดังกล่าวนี้ ได้ถูกนำไปคัดแยกด้วยตะแกรงร่อน (screen) และการคัดแยกด้วยแรงโน้มถ่วง (gravity) ซึ่งได้ข้อสรุปว่าวิธีที่ได้ผลที่สุดคือแรงโน้มถ่วงโดยเครื่องจำแนกแบบหมุนเหวี่ยงที่มีระบบอากาศหมุนเร็ว (high air vortex)

4.5.3 กระบวนการคัดแยก

กระบวนการคัดแยกในปัจจุบันที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์หลังจากขั้นตอนการบดซึ่งได้เปลี่ยนแปลงซากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอนุภาคเล็กๆ เรียบร้อยแล้ว ผงซากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการคัดแยกเพื่อทำแยกชนิดและทำให้วัสดุมีความเข้มข้นมากขึ้น คุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันของผงวัสดุหลายชนิดที่ผสมกันอยู่ในผงซากเซลล์แสงอาทิตย์เช่น การนำไฟฟ้า คุณสมบัติทางแม่เหล็กและความหนาแน่นเป็นหลักการพื้นฐานของการคัดแยกทางกายภาพ ในปัจจุบันมีกระบวนการหลากหลายรูปแบบซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการคัดแยกซากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปเช่น การคัดแยกด้วยแม่เหล็ก การคัดแยกด้วยขนาด การคัดแยกด้วยคุณสมบัติการนำไฟฟ้า และการคัดแยกด้วยความหนาแน่น เป็นต้น

กระบวนการคัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรง (screening)

การคัดขนาดเป็นกระบวนการในการคัดแยกก้อน ชิ้น หรืออนุภาควัสดุหรือแร่ธาตุที่มีช่วงของขนาดใกล้เคียงกันออกเป็นกลุ่มๆ ขนาดที่กล่าวถึงมักเป็นขนาดที่กำหนดโดยขนาดพื้นที่ผิวเปิดของรูตะแกรง อนุภาควัสดุจะถูกกำหนดโดยขนาดช่องเปิดของรูตะแกรงในแต่ละขนาด โดยขนาดของรูตะแกรงในชั้นก่อนหน้าจะมี

ขนาดเล็กกว่าชั้นถัดไป ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการคัดขนาดได้แก่ พื้นที่ผิวตะแกรง ลักษณะการเคลื่อนไหวของตะแกรง และคุณสมบัติของวัสดุป้อน เป็นต้น

ในการคัดขนาดของซากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ใช่เพียงเป็นการเตรียมวัสดุให้มีขนาดเท่ากันก่อนเข้าสู่กระบวนการทางกลอื่นๆ ต่อไปเท่านั้น แต่ยังเป็นการเพิ่มความสามารถเข้มข้นของวัสดุโลหะให้มากขึ้น เนื่องจากขนาดและคุณสมบัติด้านรูปร่างของโลหะแตกต่างจากพลาสติก และเซรามิก วิธีการพื้นฐานในการคัดขนาดโลหะเพื่อการนำกลับมาใช้คือการคัดแยกด้วยการหมุน หรือเรียกว่า ตะแกรงร่อนทรงกระบอก (trammel) ตะแกรงแบบนี้จะหมุนในขณะทำงานเพื่อแยกขยะหรือสิ่งที่ไม่ต้องการที่อยู่บนตะแกรงลึกลงไปลงลงมาจนกว่าวัสดุชิ้นเล็กๆ จะสามารถลอดผ่านรูของตะแกรงไปได้ นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งกับงานชิ้นส่วนรถยนต์และงานการจัดการขยะชุมชน อุปกรณ์ดังกล่าวจะไม่ค่อยมีปัญหาการอุดตันของรูตะแกรงซึ่งเหมาะสมต่อการใช้งานกับวัสดุที่มีความแตกต่างมากทั้งรูปร่างและขนาดของอนุภาคที่อยู่ในกากของเสีย เพราะแม้ว่าจะมีวัสดุเข้าไปติดอยู่ในตะแกรง สุดท้ายแล้วมันจะกลิ้งตกลงมาด้านล่างเมื่อตะแกรงหมุนไป เครื่องคัดขนาดแบบนี้ก็เป็นอีกแบบที่นิยมใช้กันมากโดยเฉพาะกับลักษณะงานที่ไม่ใช่วัสดุจำพวกเหล็ก แต่มักพบปัญหาการอุดตันที่ตะแกรง

กระบวนการคัดแยกด้วยรูปร่าง (shape separation)

เทคนิคการคัดแยกด้วยรูปร่างถูกคิดค้นเพื่อควบคุมคุณสมบัติของอนุภาคในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องแนวคิดในการคัดแยกแบ่งออกเป็น 4 ประเภทคือ

- 1) ความเร็วของอนุภาคบนผนังเอียง
- 2) เวลาที่อนุภาคใช้ในการผ่านช่องตะแกรง
- 3) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคกับผนัง
- 4) ความเร็วของการตกตะกอนในช่องหลวของอนุภาค

การคัดแยกด้วยรูปร่างโดยใช้แผ่นเอียงและตะแกรงเป็นวิธีการพื้นฐานที่สุดที่ใช้ในธุรกิจรีไซเคิล ในประเทศญี่ปุ่นมีการใช้สายพานเอียงและแผ่นเอียงที่สั้นเป็นเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคเพื่อนำทองแดงออกมาจากสายไฟฟ้า ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซากโทรทัศน์ และเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

กระบวนการคัดแยกด้วยความหนาแน่น

การคัดแยกด้วยความหนาแน่นใช้คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ได้แก่ ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ และสถานะของวัสดุ ซึ่งคุณสมบัติสำคัญที่นำมาใช้เป็นหลักในการคัดแยก โดยเป็นการคัดแยกระหว่างวัสดุที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน การคัดแยกด้วยวิธีนี้เป็นการทำงานที่มีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายต่ำและไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไม่มากนัก

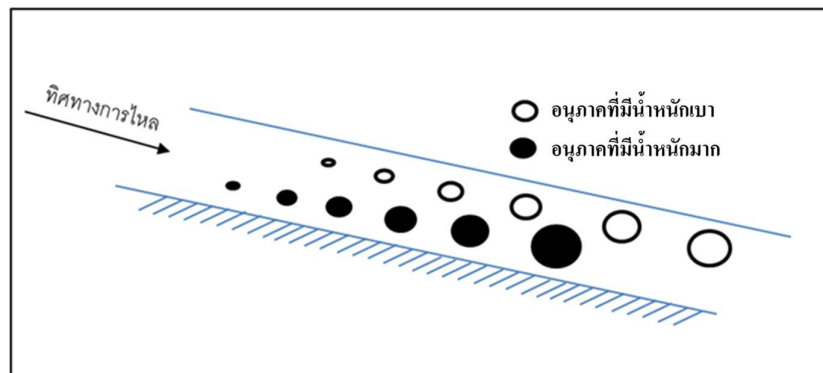
ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นของวัสดุต่างๆ

สาร	ความหนาแน่น (kg/m ³)
ทอง	19.3×10^3
ตะกั่ว	11.3×10^3
เหล็ก	7.8×10^3
อะลูมิเนียม	2.7×10^3
แก้ว	$2.4 - 2.8 \times 10^3$
คอนกรีต	2.3×10^3

การคัดแยกด้วยความหนาแน่นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เนื่องจากความแตกต่างของหนาแน่นระหว่างแผงโลหะและแผงอโลหะมีความแตกต่างกันมากเช่น ความแตกต่างของความหนาแน่นของแผงโลหะคือ 8.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความหนาแน่นของอโลหะผสมคือ 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ตารางที่ 4.3)

โต๊ะสั่น (shaking table)

การคัดแยกโดยการเคลื่อนที่ที่ต่างกันของอนุภาคที่อยู่บนโต๊ะลาดเอียงนั้นสามารถนำมาใช้ในการคัดแยกอนุภาคที่มีความหนาแน่น และขนาดต่างๆ ได้ ตัวอย่างเช่น เราล้างถ่านหินได้โดยการคัดแยกหินขบวนและวัสดุหนักอื่นๆ ออกจากสินแร่ที่เป็นวัตถุดิบโดยการล้างของผสมลงมาตามทางลาดเอียงสามารถเคลื่อนที่ไปด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงจากการไหลของของเหลว



ภาพที่ 4.7 การแบ่งชั้นอนุภาคเป็นชั้นๆ บนโต๊ะลาดเอียงที่อยู่ในน้ำ

จากภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคขนาดใหญ่จะมีความเร็วกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากันสำหรับอนุภาคใดๆ 2 อนุภาคที่มีขนาดเท่ากัน แต่มีความหนาแน่นต่างกัน อนุภาคที่เบากว่าจะมีความเร็วกว่า เนื่องจากอนุภาคหนักสามารถต้านแรงเสียดทานได้มากกว่า เนื่องจากอนุภาคหนักสามารถต้านแรงเสียดทานได้มากกว่า ดังนั้นเราจะคัดแยกอนุภาคขนาดใหญ่ออกจากอนุภาคเล็กเช่นเดียวกับอนุภาคหนักออกจากอนุภาคเบา

การร่อน (jigging)

เครื่องร่อนแร่ เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับคัดแยกวัสดุเบา และวัสดุหนักโดยใช้ความแตกต่างด้านความสามารถในการลอดผ่านแท่น (bed) ที่ถูกเขย่า เครื่องร่อนแร่ชนิดที่ธรรมดาที่สุดอันหนึ่งคือ เลียง (pan) ของคนงานเหมืองที่ใช้สำหรับร่อนทองคำ โดยจะใช้เหลียงตักเอาดินและกรวดขึ้นมาจากก้นลำธารแล้วทำการร่อนเลียงไปจนกระทั่งได้เม็ดทองโผล่ขึ้นมาและนอนกันอยู่ในเลียง กรวดทรายที่เหลือจะเททิ้งไป ทั้งนี้เครื่องร่อนแร่สมัยใหม่ก็ทำงานในลักษณะเดียวกัน

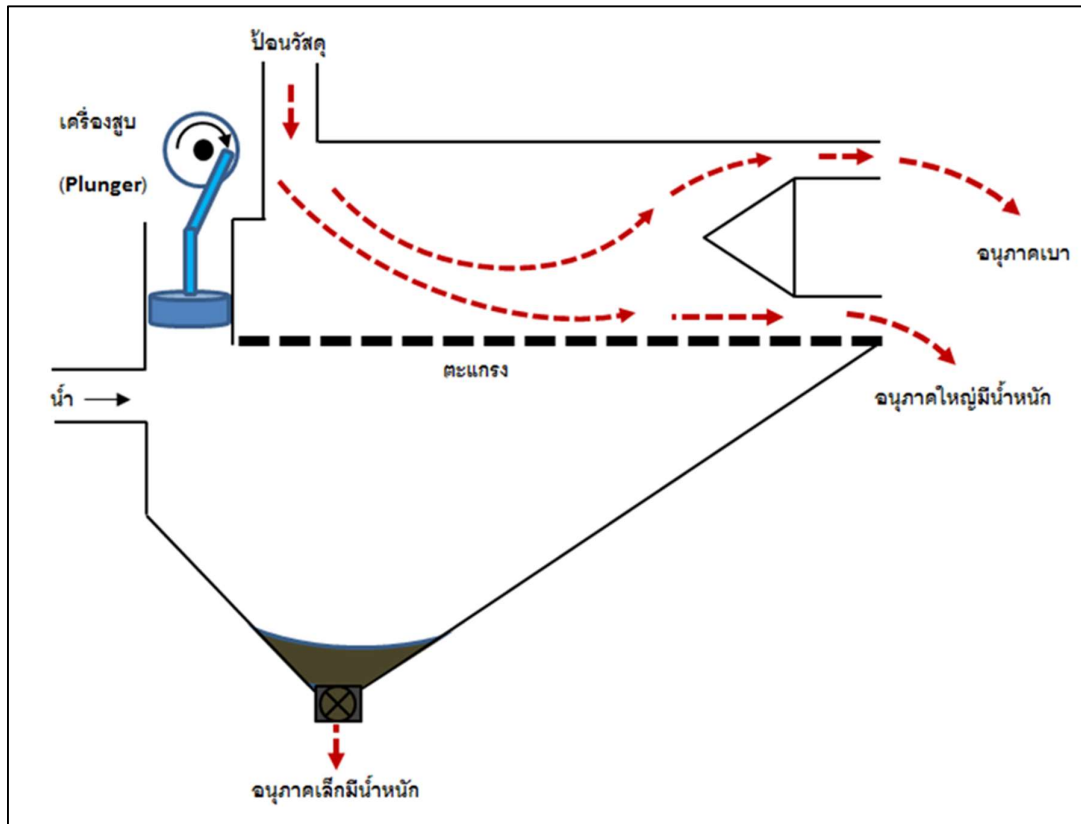
เครื่องร่อนแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. เครื่องร่อน แบบตะแกรงเคลื่อนที่ อุปกรณ์แบบตะแกรงเคลื่อนที่ไม่ค่อยมีที่ใช้แพร่หลายนอกจากการใช้งานอย่างง่ายที่สามารถสร้างอุปกรณ์ขึ้นเองโดยติดตั้งตะแกรงเข้ากับคันโยกในน้ำ
2. เครื่องร่อน แบบตะแกรงอยู่กับที่ จะใช้แรงดันของน้ำจากการเคลื่อนขึ้นลงของผ่านไดอะแฟรมหรือลูกสูบ ซึ่งจะดันน้ำให้ไหลผ่านตะแกรงขึ้นไปเป็นจังหวะที่เป็นการกระแทกน้ำ (ภาพที่ 4.8)

กลไกที่เกิดขึ้นในการทำงานของเครื่องร่อนแร่ประกอบด้วยกลไกเคลื่อนที่ในหลายทิศทาง ได้แก่

- การเคลื่อนที่ของน้ำขึ้นน้ำลงที่เกิดการกระแทกของน้ำ
- การตกด้วยแรงโน้มถ่วง
- การเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างหรือ แนวระนาบ

วัสดุป้อนประกอบด้วยส่วนที่เบา ส่วนที่หนัก และส่วนที่หนักปานกลาง (ส่วนผสมชั้นกลางประกอบด้วยสารปนเปื้อนและวัสดุที่เบาและหนักปนกัน ทั้งนี้ขึ้นกับประสิทธิภาพของการทำงาน) ส่วนผสมเหล่านี้จะถูกนำไปร่อนด้วยแรงสั่นจากเครื่องสูบ (plunger หรือไดอะแฟรม อากาศ หรือกลไกอื่น) ในน้ำที่เป็นตัวกลางซึ่งจะทำให้แท่นยกขึ้นลง เมื่อแท่นขยายออกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่พอและมีรูปร่างเหมาะสมจะกระแทกเข้ากับแท่น เนื่องจากแท่นกำลังอยู่ในสภาวะ “เคลื่อนที่เร็ว” จะต้านการอยู่ในสภาพคงตัว (settlement) ดังกล่าวไปเพียงเล็กน้อย เมื่อให้แรงสั่นต่อไปอนุภาคขนาดใหญ่และหนักจะตกลงสู่ด้านล่าง ส่วนที่เบาจะขึ้นมาอยู่ด้านบนของแท่น ตะแกรงจะยอมให้อนุภาคเหล่านี้ตกลงสู่กรวยด้านล่าง แต่อนุภาคเบา (ที่มีหรือไม่มีอนุภาคปานกลาง) จะถูกดึงออกด้านบน



ภาพที่ 4.8 เครื่องร่อนที่ใช้แรงจากเครื่องสูบลูกสูบ

ทฤษฎีการทำงานของเครื่องร่อน

การแบ่งเครื่องร่อนออกเป็นชั้นๆ ทำได้โดยใช้ความถ่วงจำเพาะสัมพัทธ์ (relative specific gravity) ของวัสดุ จึงสามารถแยกวัสดุต่างๆ ในส่วนผสมออกจากกันได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงขนาดอนุภาค ซึ่งจะเป็นการยากถ้าเราใช้การเซตตัว (settle) ของอนุภาคอย่างง่าย

กระบวนการร่อนเป็นทางเลือกที่ดีในการคัดแยกโลหะที่มีขนาดเล็กโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง เพราะมีต้นทุนดำเนินการที่ต่ำและเหมาะในการใช้งานกับการแยกวัสดุขนาดเล็กปริมาณมากๆ ในกระบวนการจัดการซากรถยนต์ เศษที่ไม่ใช่เหล็กที่มีขนาด 4 - 16 มิลลิเมตร สามารถคัดแยกได้ด้วยเครื่องร่อนเปียกวัสดุที่มีน้ำหนักเบาส่วนใหญ่คือ อะลูมิเนียม แก้ว และหิน วัสดุที่มีน้ำหนักส่วนใหญ่คือ ทองแดง ตะกั่ว ทองเหลือง และสแตนเลส เป็นต้น

4.5.4 การแยกละเอียด และการใช้ซ้ำ

การคัดแยกด้วยแม่เหล็ก

การคัดแยกด้วยแม่เหล็กแบ่งตามลักษณะการใช้งานแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การทำให้วัสดุที่ต้องการรีไซเคิลมีความบริสุทธิ์โดยปราศจากสิ่งเจือปนที่เป็นเหล็กกับโลหะที่แม่เหล็กดูดติดได้ และอีกประเภทหนึ่งคือ การรวบรวมวัสดุที่เป็นแม่เหล็ก ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแยกในประเภทแรกคือ วัสดุที่ไม่ใช่

เหล็ก แต่ในประเภทที่ 2 คือ ต้องการแยกวัสดุที่เป็นแม่เหล็ก เครื่องมือคัดแยกด้วยแม่เหล็กที่ใช้กันมาแต่เดิมนั้นโดยทั่วไปจะถูกจำกัดให้ใช้สำหรับคัดแยกวัสดุที่เป็นเฟอร์โรแมกเนติกเช่น เหล็ก และแมกนีไทต์ (magnetic) อย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนาเครื่องมือชนิดต่างๆ ขึ้นมาจำนวนมาก อันจะทำให้การออกแบบทางกลนั้นมีความละเอียดมากยิ่งขึ้นและพัฒนาเพื่ออัตราการรีไซเคิลสูงขึ้น

การออกแบบเครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็กนั้น จะเกี่ยวข้องกับตัวเลือกจำนวนมาก ซึ่งแม่เหล็กที่ใช้สามารถใช้แม่เหล็กชนิดแม่เหล็กไฟฟ้าหรือชนิดแม่เหล็กถาวร แม่เหล็กไฟฟ้ามีข้อดีตรงที่สามารถปิดสวิตช์ได้ แต่ข้อเสียคือมีอัตราการใช้ไฟฟ้าสูง สำหรับแม่เหล็กไฟฟ้านั้นไม่ใช่ไฟฟ้าและสามารถเป็นเฟอร์ไรต์ (ferrite) ที่เป็นโลหะ (โดยทั่วไปมักจะเป็นอัลลอยชนิดแอลนิโค (alnico) ซึ่งนอกเหนือจากแม่เหล็กแล้วก็มีอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์) หรือไม่ใช่โลหะก็ได้ โดยปกติแล้วเฟอร์ไรต์จะไม่แสดงความเข้มข้นสูงเหมือนกับอัลลอยชนิดแอลนิโค และมีน้ำหนักจะเบาว่า ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้โครงสร้างรองรับน้ำหนักมาก แม่เหล็กเฟอร์ไรต์ที่ได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมจะมีราคาถูกกว่าแม่เหล็กชนิดแอลนิโค แต่สมบัติความเป็นแม่เหล็กประเภทนี้อาจจะเสื่อมลงได้ หากปล่อยให้อยู่ในอุณหภูมิสูงหรือต่ำมาก โดยสรุปแล้วการออกแบบเครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็กชนิดใดๆ จะขึ้นกับปัจจัยดังนี้

- วิธีการควบคุมวัสดุที่ไหลผ่านสนามแม่เหล็กเพื่อยอมให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ
- สนามแม่เหล็กที่แรงเพียงพอและมีแรงดึงดูดที่สูงพอเพื่อนำวัสดุที่มีขนาด และชนิดต่างๆ ออกมาจากอนุภาคผสม
- วิธีการที่เหมาะสม เพียงพอต่อการคัดแยกวัสดุที่เป็นแม่เหล็กและที่ไม่ใช่แม่เหล็กออกจากสนามแม่เหล็ก

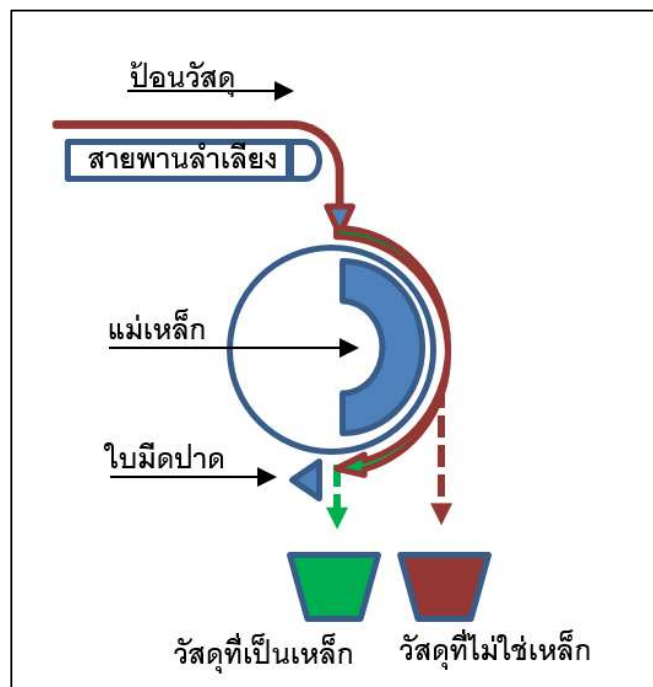
เครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็กถูกนำมาใช้ครั้งแรกสำหรับวัสดุที่เป็นเหล็กออกจากกองขยะมูลฝอยของเทศบาล ตัวอย่างเช่น ในระบบการกำจัดของเสียโดยการเปลี่ยนเป็นพลังงาน (waste-to-energy) การคัดแยกวัสดุด้วยแม่เหล็กมีวัตถุประสงค์ 2 ประการคือ เพื่อเพิ่มปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้จากขยะ และเพื่อเก็บกลับคืนวัสดุที่มีมูลค่า นอกจากนี้การนำโลหะออกมายังช่วยลดการขำรุดสึกหรอที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์การบดย่อย แปรรูป และการขนถ่าย แล้วยังช่วยลดปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้ได้

เครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็ก แบ่งตามลักษณะการใช้งานเป็น 2 ประเภทที่มักใช้ในการนำวัสดุที่เป็นเหล็กออกจากขยะที่ถูกย่อยแล้วคือ เครื่องคัดแยกชนิดพัก (holding) และเครื่องคัดแยกชนิดแขวน (suspend) (ภาพที่ 4.9)

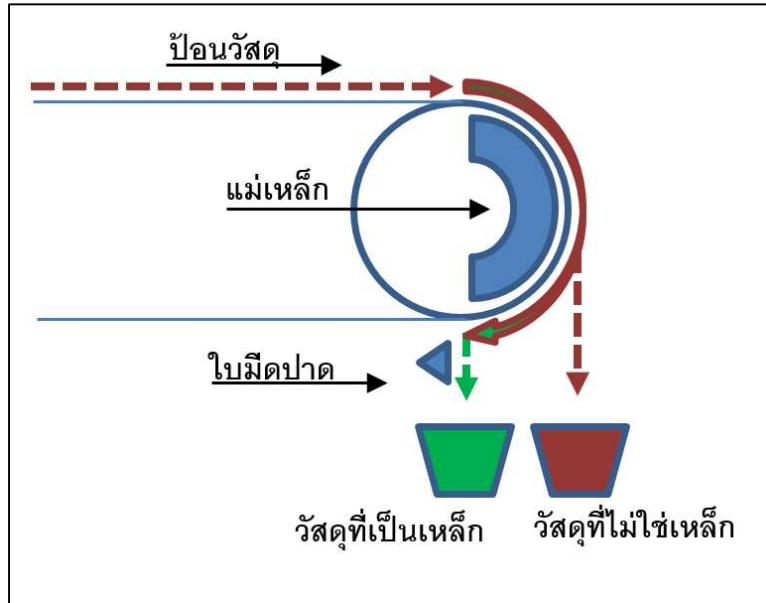
เครื่องคัดแยกชนิดพัก (holding) แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เครื่องคัดแยกชนิดถังกลม (drum) และชนิดสายพาน (belt) (ภาพที่ 4.10) สำหรับเครื่องคัดแยกชนิดพักที่เป็นถังกลมนั้น เมื่อวัสดุไปบนผิวของถัง วัสดุที่เป็นเหล็กจะถูกดูดและพาไปยังจุดที่อยู่ใต้ใบมีดซึ่งไม่อยู่นอกสนามแม่เหล็ก สำหรับวัสดุอื่นๆ ที่ไม่ใช่เหล็กจะตกไปจากถังโดยตรง เครื่องคัดแยกชนิดถังมีหลายขนาดตั้งแต่ความกว้าง 30 เซนติเมตร ไปจนถึง 150 เซนติเมตร กำลังไฟฟ้าที่ต้องการนั้นมักจะไม่เกิน 3.7 – 7.5 กิโลวัตต์ (5 - 10 แรงม้า) สำหรับการทำงานเชิงกลของหน่วยการทำงาน และจะต้องใช้ปริมาณกำลังไฟฟ้าเดียวกันนั้นสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก โดยทั่วไปเกณฑ์

มาตรฐานในการออกแบบสำหรับแม่เหล็กนั้นจะต้องถูกตั้งขึ้นหลังจากที่ได้กำหนดขนาด ช่วง ปริมาณ และ องค์ประกอบของขยะที่ถูกย่อยแล้ว

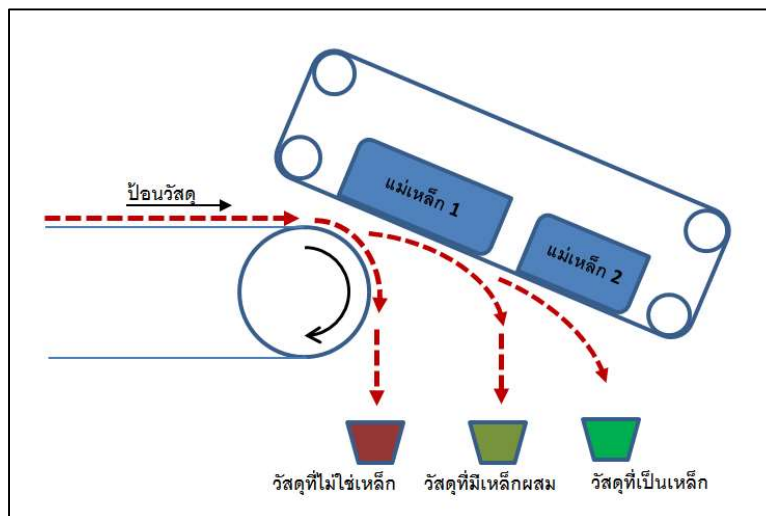
เครื่องคัดแยกชนิดแขวน (suspend) การทำงานของเครื่องจะไม่มีการป้อนวัสดุให้เข้ามาผสมโดยตรงกับผิววัด เหมือนกับเครื่องแยกชนิดพัก แต่วัสดุจะถูกลำเลียงผ่านสนามแม่เหล็กแรงสูงซึ่งจะดึงดูดยกวัสดุที่มีองค์ประกอบเป็นเหล็กออกมาจากตัวกลางที่อยู่รอบและวัสดุจะถูกดูดติดเข้ากับสายพานแม่เหล็ก ซึ่งแรงโน้มถ่วงจะสวนทางกับแรงดึงดูด แต่เนื่องจากอนุภาคที่ถูกดูดด้วยแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ผ่านระยะสั้นๆ ไปยังผิววัด ดังนั้นการรบกวนจากแรงโน้มถ่วงจึงไม่ทำให้เกิดปัญหามากนัก นอกจากนี้แล้ว แรงโน้มถ่วงจะนำมาใช้เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของวัสดุที่สกัดได้เป็นเหล็กโดยจะยอมให้อนุภาคตกออกจากสายพานชั่วคราว ทั้งนี้เพื่อให้แรงดึงดูดกับแม่เหล็กอันที่สองซึ่งวางอยู่ปลายทางบนสายพานลำเลียง (ภาพที่ 4.11)



ภาพที่ 4.9 เครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็กชนิดพักแบบถ่วง



ภาพที่ 4.10 เครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็กชนิดพับแบบสายพาน



ภาพที่ 4.11 เครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็กชนิดแขวน

การคัดแยกด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเฉพาะเครื่องคัดแยกทรงกระบอกความแรงต่ำ (low-intensity drum separator) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการคัดแยกสารจำพวกโลหะ กลุ่มเหล็ก โลหะจากโลหะนอกกลุ่มเหล็ก และกากที่ไม่ดูดติดแม่เหล็กชนิดอื่น ตลอดทศวรรษที่ผ่านมา มีการออกแบบและการจัดการที่ล้ำสมัยเกี่ยวกับการคัดแยกด้วยแม่เหล็กความแรงสูง (high-intensity magnetic separator) ซึ่งเป็นผลมาจากการคิดค้นแม่เหล็กถาวรที่ทำจากโลหะที่หายากผสม ซึ่งให้สนามไฟฟ้าและระดับพลังงานแม่เหล็กแรงสูง พบว่าการใช้เครื่องคัดแยกแรงดันสูงสามารถแยกทองแดงผสมออกจากซากอิเล็กทรอนิกส์ที่ผสมกันได้ การแยกด้วยสนามแม่เหล็กที่เข้มข้นนั้นสามารถนำมาใช้ได้กับกลุ่มโลหะผสมดังนี้

- โลหะผสมทองแดงที่มีความไวต่อแม่เหล็กสูง (relatively high mass susceptibility) สารประกอบทองแดงกับอะลูมิเนียม
- โลหะผสมทองแดงที่มีความไวต่อแม่เหล็กปานกลาง (medium mass susceptibility) สารประกอบทองแดงกับแมงกานีส ทองเหลืองชนิดพิเศษ
- ผสมทองแดงที่มีความไวต่อแม่เหล็กต่ำ ไม่มีพฤติกรรมเป็นสารแม่เหล็ก (low mass susceptibility) สารประกอบทองแดงกับพลวง สารประกอบทองแดงกับตะกั่ว และทองเหลืองที่มีปริมาณเหล็กต่ำ

การคัดแยกโดยใช้คุณสมบัติการนำไฟฟ้า การคัดแยกโดยใช้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าคือ การคัดแยกที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าหรือต้านทานไฟฟ้าที่แตกต่างกันและเหมาะสมกับการคัดแยกอนุภาคที่ละเอียด ซึ่งมีการคาดการณ์ว่าจะมีกากของเสียที่มีอนุภาคโลหะละเอียดเป็นจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมากในอนาคตอันใกล้ เนื่องจากหลายปัจจัยดังนี้

- กฎหมายที่เข้มงวดขึ้น
- ต้นทุนการฝังกลบที่แพงขึ้น
- ปริมาณของเสียที่เพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งซากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
- การตระหนัก และการใส่ใจในสภาพแวดล้อมที่มากขึ้น และปัจจัยอื่นๆ

ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นตัวผลักดันให้เทคโนโลยีการคัดแยกไปในทางที่เหมาะสมอย่างยิ่ง มีการคัดแยกอนุภาคละเอียดออกจากกาก และมีคัมค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ มีการพัฒนาเครื่องมือและเทคนิคในการคัดแยกด้วยการนำไฟฟ้าหลายประเภท เช่น การคัดแยกด้วยกระแสไหลวน (eddy current) การคัดแยกด้วยไฟฟ้าโคโรนา (corona electrostatic) การคัดแยกด้วยระบบไตรโบอิเล็กทริก (triboelectric) เป็นต้น

กระบวนการคัดแยกด้วยกระแสไหลวน (eddy current) เทคโนโลยีนี้เป็นการเหนี่ยวนำกระแสไหลวนในวัตถุที่เป็นโลหะให้ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอาศัยแม่เหล็กถาวรจากโลหะผสมหายาก เครื่องคัดแยกถูกพัฒนาเพื่อนำโลหะที่ไม่ใช่เหล็กออกจากเศษซากรถยนต์ได้ หรือเพื่อบำบัดขยะมูลฝอยจากชุมชน แต่ต่อมาถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในกิจกรรมอื่นๆ รวมถึงการรีไซเคิลซากอิเล็กทรอนิกส์ หรือเศษแก้วที่ใช้แล้ว เนื่องจากการคัดแยกด้วยกระแสไหลวนขึ้นอยู่กับความสามารถของแม่เหล็กในการยกตัวเหนี่ยวนำให้ลอย (โดยใช้แรงผลักของแม่เหล็ก) ดังนั้นอัตราส่วนของการเหนี่ยวนำต่อความหนาแน่น จะสามารถจำแนกความต่างของวัสดุต่างๆ ได้ (ตาราง 4.4)

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนของการนำไฟฟ้าต่อ ความหนาแน่นของมวลโลหะชนิดต่างๆ ที่ไม่ใช่เหล็ก

โลหะ	การนำไฟฟ้า, σ (108 mho/m)	ความหนาแน่นของมวล, ρ (103 kg/m ³)	σ / ρ (103 mho-m/kg)
อะลูมิเนียม	0.35	2.7	13.0
ทองแดง	0.59	8.9	6.7
เงิน	0.63	10.5	6.0
สังกะสี	0.17	7.1	2.4
ทองเหลือง	0.14	8.5	1.7
ดีบุก	0.09	7.3	1.2
ตะกั่ว	0.05	11.3	0.4

ที่มา Aarne P. Vesilind, Unit Operation in Resource Recovery Engineering, 1981

เครื่องคัดแยกกระแสไหลวนแบบหมุน (rotating eddy current separators) เหมาะกับการรีไซเคิลโลหะนอกกลุ่มเหล็กหลายประเภท ที่ใช้กันมากคือการคัดแยกโลหะนอกกลุ่มเหล็กจากชิ้นส่วนรถยนต์บดอัดและกากขยะชุมชนอย่างไรก็ตาม ในการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ การใช้เครื่องคัดแยกกระแสแบบทั่วไปมีข้อจำกัดในด้านของสิ่งที่ป้อน โดยเฉพาะเมื่อขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร มีการศึกษาเกี่ยวกับการคัดแยกอนุภาคขนาดเล็กด้วยวิธีการกระแสวน โดย Rem และทีมงาน ได้คิดแบบจำลองสำหรับอนุภาคขนาดเล็กถึงขนาดกลางที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กสมมาตรและไม่สมมาตร โดยถือว่าอนุภาคมีสมบัติแม่เหล็กทั้งสองขั้ว

จากนั้น Zhang et al. ได้นำทฤษฎีในงานเขียน Rem ไปทดลองใช้กับเครื่องคัดแยกด้วยกระแสหลายประเภท และได้นำเสนอผลการศึกษาความสามารถในการคัดแยกวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องกระแสวนแบบหมุน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าในการใช้แม่เหล็กทรงกระบอกคัดแยกโลหะที่มีขนาดเล็กควรหมุนถอยหลัง (backward phenomenon) เพื่อให้เกิดการแข่งขันระหว่างแรงขนานจากกระแสไหลวน (tan-gential eddy current force) และแรงเสียดทานพลวัต (dynamic frictional force) ที่เกิดขึ้นจากแรงบิดไฟฟ้าแม่เหล็ก (electromagnetic torque) นอกจากนี้ Norrgran ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เครื่องกระแสวนแบบหมุนสายพาน (rotating belted-drum eddy current separators) ในการใช้งานกับฝุ่นโลหะที่ละเอียด เช่น แร่อลูมิเนียม ทราaylor แบบทองเหลือง และกากเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งผลของการศึกษาพบว่าความสามารถในการคัดแยก (ตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.5 ผลการประยุกต์ใช้เครื่องคัดแยกด้วยกระแสวนกับของเสียอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ

รายละเอียดตัวอย่าง	อัตราการป้อน (tpn) ^a	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุที่ป้อน (%)		
		ดูดติดแม่เหล็ก	การนำไฟฟ้า	ไม่นำไฟฟ้า
กระป๋องอลูมิเนียมและขวด PET	1	-	49	51
ขวด PET และขวดฝาและอลูมิเนียม	1	-	2	98
ของผสมอะลูมิเนียมและ PVC	1	-	33	67
ชิ้นส่วนรถยนต์ (ยังไม่คัดแยก)	3	60	33	7
ชิ้นส่วนรถยนต์ (7x1/2 นิ้ว)	3	30	35	35
ชิ้นส่วนรถยนต์ (ประมาณ 1/2 นิ้ว)	3	27	24	49
ของผสมกากเศษเหล็กและนอกกลุ่มเหล็ก	3	53	43	4
ถ้ำจมน RDF (3x5/8 นิ้ว)	6	3	3	94
ถ้ำจมน RDF (-5/8 นิ้ว)	3	10	3	87
เศษแก้วและฝาอลูมิเนียม	3	1	9	90
เศษแก้วจากหลอดไฟบดละเอียด	1	4	14	82
กากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หยาบ	2	5	48	47
กากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ละเอียด	1	67	14	19
ของผสม เหล็ก อลูมิเนียม สังกะสี	4	10	55	35
ของผสม เหล็ก อลูมิเนียม ทองแดง ตะกั่ว	6	28	30	42
ทรายหล่อแบบทองเหลือง	3	-	12	88
ทรายหล่อแบบอลูมิเนียม	6	-	5	95
เศษแร่อลูมิเนียมเกรดดี	3	7	81	12
เศษแร่อลูมิเนียมเกรดต่ำ	1	2	5	93
กากอลูมิเนียม Al Dross, ครีโอลิท์ Cryolite	4	-	26	74

หน่วยความจุเป็น Ton per hour/ft ของความกว้างตัวหมุน

ที่มา Aarne P. Vesilind, Unit Operation in Resource Recovery Engineering, 1981

กระบวนการคัดแยกด้วยไฟฟ้าสถิตโคโรนา (Corona Electrostatic Separation : CES)

กระบวนการคัดแยกด้วยไฟฟ้าสถิตโคโรนา (Corona Electrostatic Separation : CES) เป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะว่าไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียและก๊าซที่เกิดจากกระบวนการคัดแยก เป็นเทคนิคสำคัญที่เหมาะสมกับอนุภาคละเอียดที่มีขนาดตั้งแต่ 0.1–5 มิลลิเมตร เครื่องคัดแยกกระแสไฟฟ้าแบบหมุนใช้โคโรนาในการชาร์จประจุ เพื่อคัดแยกอนุภาคออกเป็นส่วนที่นำไฟฟ้าได้ และส่วนที่นำไฟฟ้าไม่ได้ ความแตกต่างในด้านการนำไฟฟ้าหรือความต้านทานไฟฟ้าระหว่างโลหะและอโลหะซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการคัดแยกด้วยไฟฟ้าสถิตโคโรนา การควบคุมประสิทธิภาพของการคัดแยกด้วยไฟฟ้าสถิตโคโรนาควบคุมที่ตัวแปรซึ่งมีผลต่อความบริสุทธิ์ของวัสดุ ได้แก่ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ ความเร็วของการหมุน ปริมาณความชื้น และขนาดของอนุภาค ปัจจุบันนี้การคัดแยกด้วยไฟฟ้าสถิตโคโรนาถูกใช้สำหรับการแยกทองแดงหรืออลูมิเนียมออกจาก

สายไฟและสายเคเบิลที่สับเป็นชิ้นๆและยังใช้กันมากสำหรับการแยกทองแดงและโลหะที่มีค่าออกจากซากอิเล็กทรอนิกส์

มีการศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคโลหะในกระบวนการคัดแยกด้วยไฟฟ้าสถิตโคโรนา (Corona Electrostatic Separation : CES) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ พบว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคขึ้นกับวัสดุ ความหนาแน่นของอนุภาค และยิ่งขึ้นกับค่าแอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ จากทั้งผลของการทดลองและผลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า รูปร่างของอนุภาคแบบต่างๆ นั้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการคัดแยกด้วยไฟฟ้าสถิตโคโรนา (Corona Electrostatic Separation : CES) โดยพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมจะถูกส่งออกไปได้ไกลสุด ตามมาด้วยอนุภาคทรงกระบอก และอนุภาคแบบเกล็ดจะถูกส่งออกไปได้ใกล้ที่สุด

สำหรับกระบวนการคัดแยกประเภทพลาสติกสามารถใช้การคัดแยกด้วยโทรโบอิเล็กทริก โดยใช้หลักความแตกต่างด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสติกแต่ละประเภท และสามารถทำได้สะดวกโดยไม่ต้องคำนึงถึงรูปร่างอนุภาคใช้พลังงานน้อย และมีประสิทธิภาพสูง (ตารางที่ 4.6)

ตารางที่ 4.6 ผลการประยุกต์ใช้เครื่องคัดแยกด้วยไฟฟ้าสถิตโคโรนากับของเสียอื่นๆ

วัสดุ	แหล่งกำเนิดของเสีย	วิธีการลดขนาด	ขนาดของอนุภาค	เกรดของวัสดุ	หมายเหตุ
ทองแดง (Cu)	ซากสายไฟฟ้า	Cutting	0.5 – 5 mm.	Cu: 90 – 99%	
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)		Mill		พลาสติก: 99%	
พอลิเอทิลีน (PE)					
อลูมิเนียม (Al)	วัสดุก่อสร้าง	Cutting	6 – 12 mm.	Al: – 100%	
พอลิสไตรีน (Ps)		Mill		PS: 99%	
อลูมิเนียม (Al)	สารประกอบจากบรรจุ	Crygenic	50 – 500 μ m.	Al: – 95%	
พลาสติก	ก้อนขี้ฉวม	Grinding		พลาสติก: 95%	
ทองแดง (Cu)	แผงวงจรเปล่า	Hammer	0.2 – 2 mm.	Cu: – 99%	
เรซินอีพอกซี		Mill		: 99.5%	
พอลิเอทิลีน (PE)	ชิ้นส่วนรถยนต์	Cutting	3 – 5 mm.	PE: – 95%	การคัดแยก
เอทิลีนไวไนลอัลกอฮอล์ (EVOH)		Mill		EVOH: 99%	สารไม่นำไฟฟ้า

ที่มา Jirang Cui, Eric Forsberg, *Journal of Hazardous Material*, 2003

ตัวอย่างการใช้กระบวนการคัดแยกทางกายภาพในระดับอุตสาหกรรม

การใช้กระบวนการคัดแยกทางกายภาพในระดับอุตสาหกรรมที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์เพื่อใช้ในการบำบัดซากอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ รวมถึงซากอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งหนึ่งในนั้นถูกพัฒนาขึ้นโดย Hamos GmbH ในเยอรมนีซึ่งเป็นเครื่องจักรระบบเชิงกลบูรณาการ ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้

- หลังจากการถอดประกอบเพื่อแยกประเภทแล้ว เริ่มต้นกระบวนการด้วย การลดขนาดวัสดุอย่างหยาบๆ โดยใช้เครื่องย่อยที่มีใบมีดหมุนแบบอเนกประสงค์
- คัดแยกโลหะเหล็กอย่างหยาบๆโดยใช้แม่เหล็กที่มีส่วนประกอบของธาตุหายาก (rare earth magnet) ที่ติดตั้งอยู่เหนือสายพานลำเลียงป้อนแบบสั้น เพื่อให้เกิดการคัดแยกเหล็กออกเป็นอนุภาคขนาดต่างๆ อย่างมีประสิทธิภาพ
- ทำการบดให้ละเอียด โดยนำชิ้นส่วนต่างๆ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาทำการบดละเอียดภายใต้เครื่องบดที่ใช้ค้อนหนักการชีดช่วนสูงและบดด้วยเครื่องบด ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนที่ผ่านเครื่องบดมีลักษณะกลมมน
- จำแนกประเภท โดยใช้ตะแกรงที่ทำความสะอาดด้วยตัวเอง
- คัดแยกด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะช่วยให้สามารถคัดแยกส่วนที่เป็นโลหะได้อย่างสมบูรณ์โดยการวนซ้ำอนุภาคที่มีขนาดกลาง
- ทำการลดขนาดต่อไปอีกที ด้วยการบดให้ละเอียดครั้งที่สองเพื่อลดขนาดที่มีขนาดใหญ่เกินไป ระบบ Hamos ยังสามารถเพิ่มกระบวนการคัดแยกตามความหนาแน่นเข้าไปด้วย เพื่อสกัดอะลูมิเนียมและฝุ่นผงที่หลุดออกมาจากเครื่องบดโดยใช้เครื่องคัดแยกระบบไฟฟ้าสถิตขั้นที่สองระบบสายพานแบบสมบูรณ์จำทำงานที่ความดันเป็นลบ (negative pressure) เพื่อกำจัดมลพิษในอากาศ ปัจจุบันสามารถบำบัดได้ปริมาณถึง 4 ตันต่อชั่วโมงของวัสดุป้อน ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ได้จากระบบ เช่น พลาสติกผสม โลหะเหล็ก และอะลูมิเนียม จะบรรจุใส่ถุงโดยอัตโนมัติ พร้อมสำหรับขนส่งต่อไป

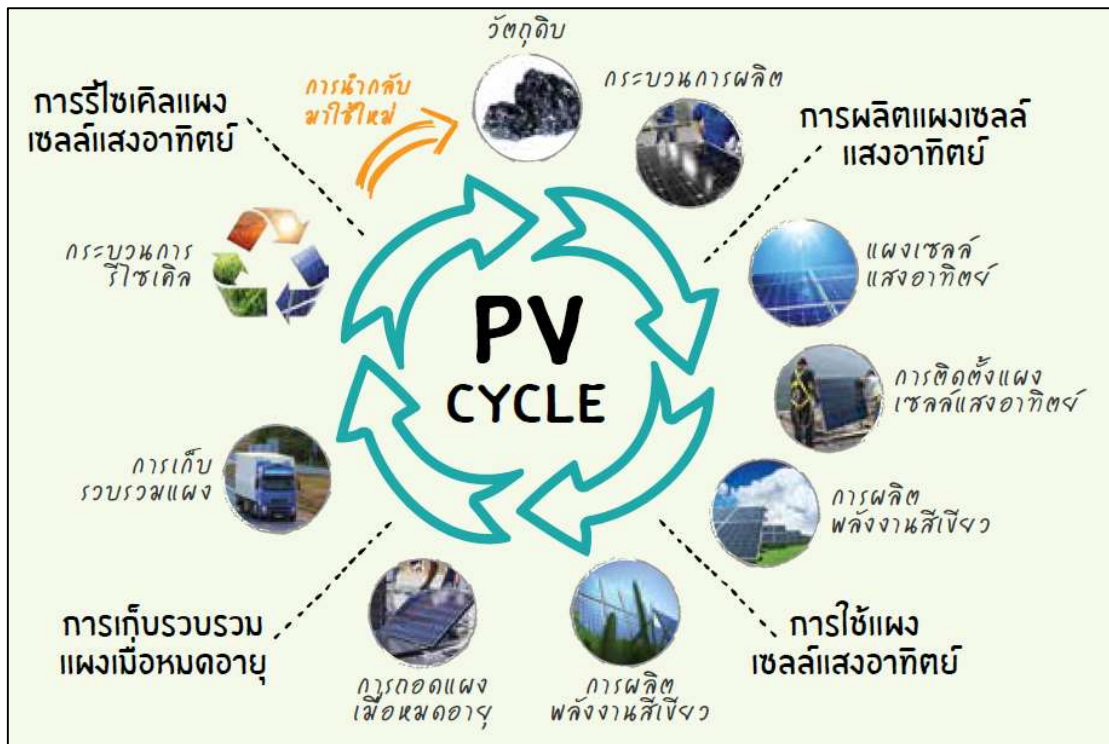
ในปัจจุบัน ภาครัฐและเอกชนต่างเริ่มให้ความสนใจเกี่ยวกับการจัดการขยะประเภท ซากเครื่องใช้ไฟฟ้า ซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งขยะเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างมาก ขยะประเภทนี้มีส่วนประกอบของโลหะ และสารอันตรายจำนวนมาก จึงต้องมีการพัฒนาเทคนิคต่างๆ ในการคัดแยกเพื่อรีไซเคิลวัสดุกลับมาใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการคัดแยกทางกายภาพเป็นทางเลือกในการจัดการที่เหมาะสม ทั้งประเภท ขนาด และรูปร่างขององค์ประกอบ จำเป็นจะต้องใช้เครื่องมือคัดแยกทางกายภาพที่ผสมผสานกัน เพื่อให้การรีไซเคิลวัสดุมีค่าเป็นไปอย่างคุ้มค่าที่สุด

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานผลิตภัณฑ์ที่ได้จากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

การนำของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการบดละเอียด และคัดแยกในส่วนที่เป็นโลหะไปใช้ใน งานคอนกรีต ซึ่งส่วนที่เป็นโลหะที่ได้จากกระบวนการคัดแยกทางกายภาพ ทางกลของของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำไปใช้ทดแทนส่วนผสมบางส่วนสำหรับงานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ทำมาจากซิลิคอน (silicon) ซึ่งซิลิคอนอยู่ในรูปของผลึกซิลิคอน (crystalline silicon) และซิลิคอนเป็นส่วนประกอบหลักของแก้ว ซีเมนต์ เซรามิก มีคุณสมบัติทนความร้อน การทนต่อการกัดกร่อน การทนต่อรอยขีดขูด ความต้านทานแรงกด แรงกระแทกได้ดี

4.6 วิธีการจัดการและการรีไซเคิลของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ปัญหาของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นคล้ายกับขยะอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ที่ทำให้เกิดปัญหาทั้งสิ่งแวดล้อม หากกำจัดโดยการเผาทำลายเสียทั้งพลังงานและงบประมาณ ทั้งยังสร้างสารคาร์บอนไดออกไซด์และไดออกซิน หรือหากจะนำไปฝังกลบอย่างไม่ถูกวิธีจะส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายของโลหะหนัก ทั้งตะกั่วและแคดเมียมตามดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ จนอาจเกิดวิกฤตต่อแหล่งอาหารและน้ำในอนาคตได้ การนำหลัก 3R มาประยุกต์ร่วมกับแนวคิดการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจึงเป็นที่มาของแนวคิดเรื่องการรีไซเคิลของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แนวคิดเรื่องการรีไซเคิลของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถือว่ามีสำคัญอย่างยิ่งกับความยั่งยืนของอุตสาหกรรมผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เพราะจะช่วยจัดการกับของเสียอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากและยังช่วยนำส่วนประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นวัสดุมีค่า อย่างเช่น กระจก อะลูมิเนียม ทองแดง วัสดุกึ่งตัวนำ และตัวนำไฟฟ้า เป็นต้น นำกลับมาใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้ แนวคิดการรีไซเคิลของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงเป็นวัฏจักรหมุนเวียนของการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ (ภาพที่ 4.12)

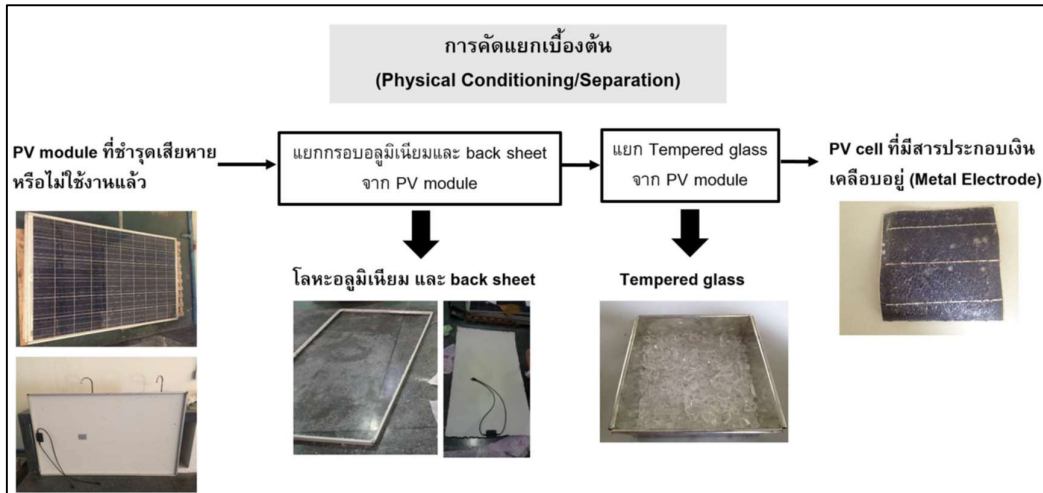


ภาพที่ 4.12 แนวคิดของวัฏจักรหมุนเวียนของการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน

ที่มา : PV Cycle study, 2007

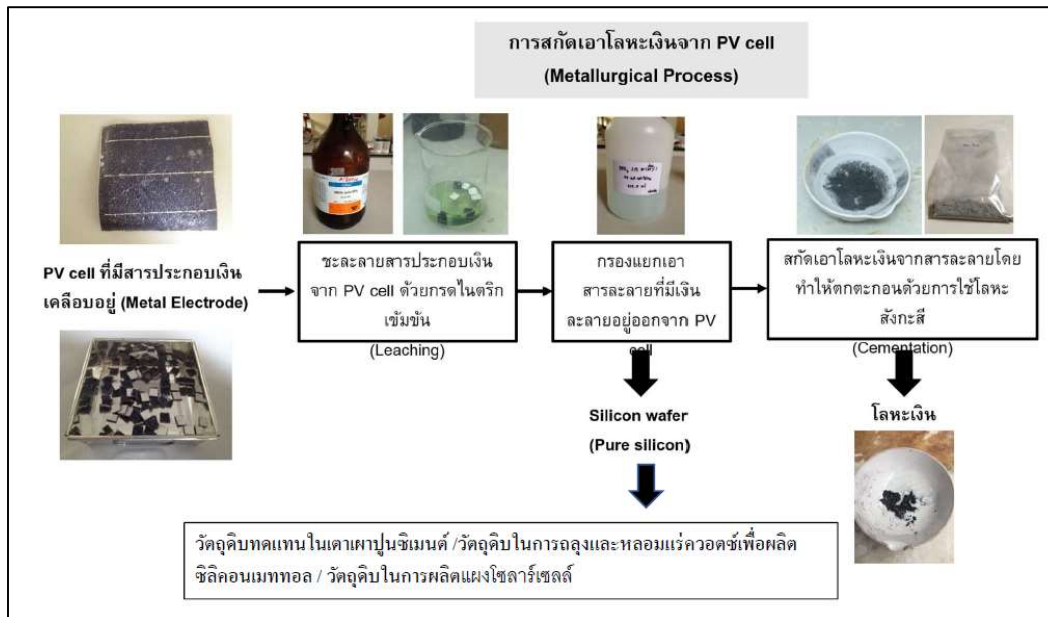
วัฏจักรหมุนเวียนของการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานกระทั่งนำเข้าสู่กระบวนการนำมาผลิตเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งข้อดีประการหนึ่งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนนั้นคือ สามารถนำวัตถุดิบหลักกลับมาเข้าสู่กระบวนการคัดแยกทำให้ได้ชิ้นส่วนต่างๆ ที่สามารถนำกลับมาผลิตเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีก

ภาพตัวอย่างการรีไซเคิลของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการตัดแยกเบื้องต้น (ภาพที่ 4.13) โดยการถอดประกอบ การบดแยกชิ้นส่วน และการสกัดเอาโลหะที่มีค่าออกจาก PV Cell ที่มีสารประกอบเงินเคลือบอยู่ (ภาพที่ 4.14)



ภาพที่ 4.13 การรีไซเคิลของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการตัดแยกเบื้องต้น

ที่มา : แผนแม่บทการจัดการซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์: เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) และการจัดการซากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเอกบุตร อุดมพงศ์กองบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม



ภาพที่ 4.14 การรีไซเคิลของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการสกัดเอาโลหะที่มีค่าออกจากเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา : แผนแม่บทการจัดการซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์: เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) และการจัดการซากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเอกบุตร อุดมพงศ์กองบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม

4.6.1 วิธีการจัดการและการรีไซเคิลของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิคอน c-Si

4.6.1.1 ลักษณะการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 - 25 ปีภายหลังจากติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอัตราการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าการยอมรับได้ (อย่างไรก็ตามบางผู้ผลิตสามารถใช้งานได้ถึง 30 ปี) โดยลักษณะทางกายภาพของแผงเซลล์จะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาที่ยังใหม่ติดตั้ง เช่น สีของกระจกด้านหน้าจากการหลุดร่อนของแผ่น Tedlar การเกิดฟองอากาศและความชื้นภายในจำนวนมาก Junction box เกิดความเสียหาย ขั้วต่อไฟฟ้าภายในเกิดความเสียหาย เป็นต้น ดังจะเห็นได้จากตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมสภาพแล้ว (ภาพที่ 4.15)

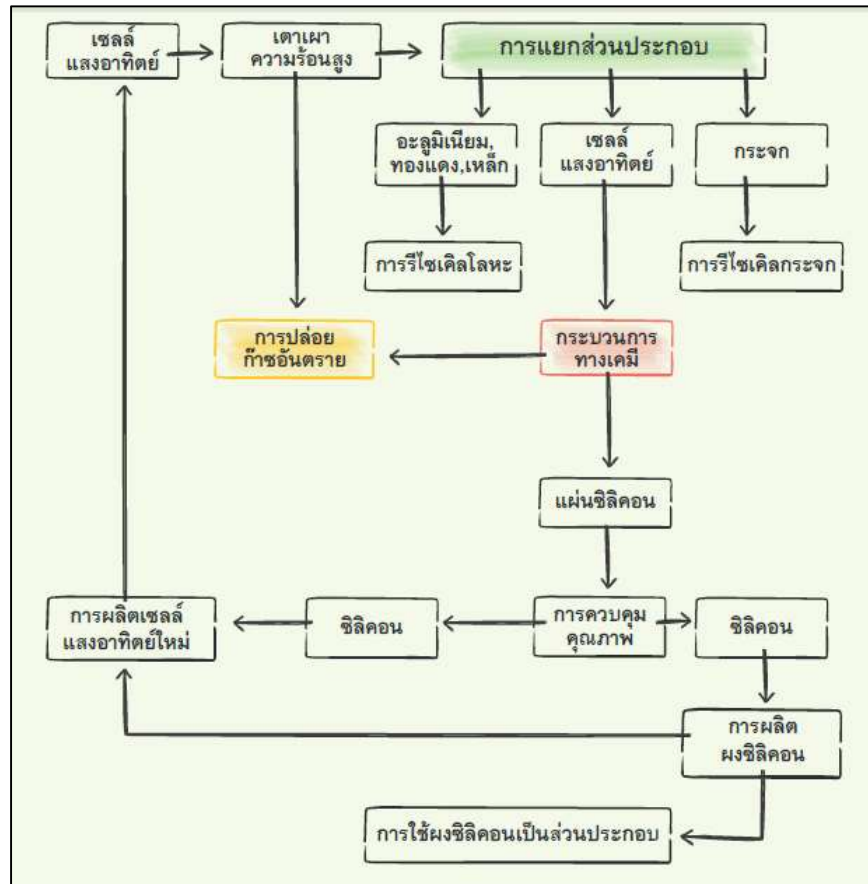


ภาพที่ 4.15 ตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนที่เสื่อมสภาพแล้ว

ที่มา : <http://www.renewableenergyfocus.com>

4.6.1.2 ขั้นตอนการจัดการกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

กระบวนการจัดการกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนเพื่อการรีไซเคิลและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการจัดการกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (ภาพ 4.16)



ภาพที่ 4.16 ขั้นตอนการจัดการกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน

ที่มา : E. Klugmann-Radziemska, P. Ostrowski / Renewable Energy 35 (2010) 1751–1759

ขั้นตอนการจัดการกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ มีดังนี้

1) การถอดประกอบเพื่อแยกวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น วัสดุที่เป็นโลหะซึ่งประกอบไปด้วย อลูมิเนียม (aluminum frame ribbon) และกระจก เป็นต้น การถอดประกอบสามารถนำเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลของวัสดุเหล่านั้นได้เลย (ภาพที่ 4.17)



ภาพที่ 4.17 การแยกส่วนประกอบต่างๆของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่

ที่มา : <http://www.renewableenergyfocus.com>

2) การแยกวัสดุอื่นๆด้วยความร้อน

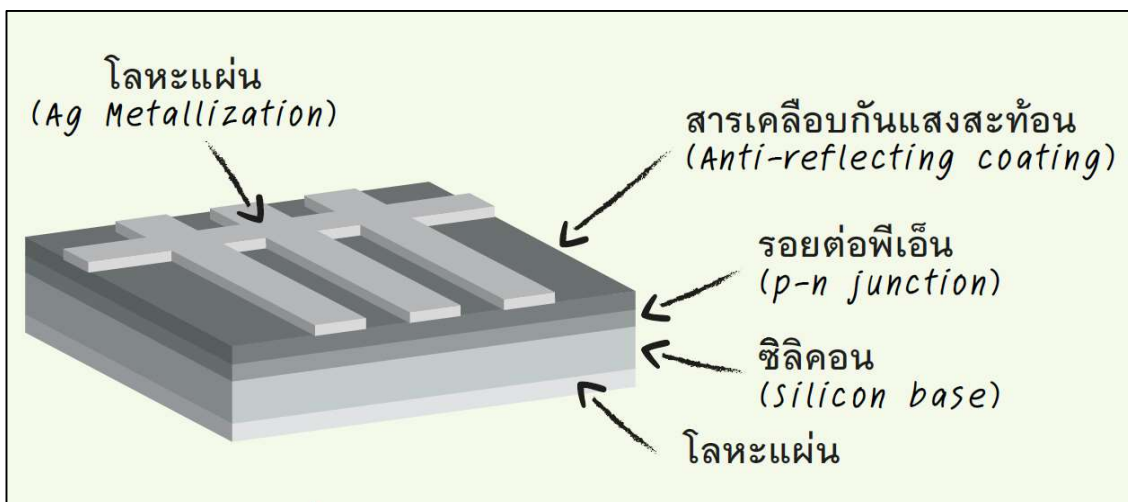
เป็นการให้ความร้อนหรือเผาของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เพื่อแยกวัสดุต่างๆ ออกจากกัน วิธีนี้ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากรวดเร็วและประหยัด โดยเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการนี้ EVA และ Tedlar จะถูกเผาไหม้เหลือกระจกและอุปกรณ์ (ภาพที่ 4.18)



ภาพที่ 4.18 ตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกนำไปเผาด้วยความร้อน 600 องศาเซลเซียส

ที่มา : <https://www.bnl.gov>

3) การแยกสารด้วยกระบวนการทางเคมี สำหรับตัวเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเนื่องจากถูกเคลือบด้วยวัสดุบางชนิดเพื่อลดการสะท้อน จึงจำเป็นต้องทำการกัดเอาสารเคมีที่เคลือบด้วยกระบวนการทางเคมี ซึ่งโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนทั่วไป (ภาพที่ 4.19)



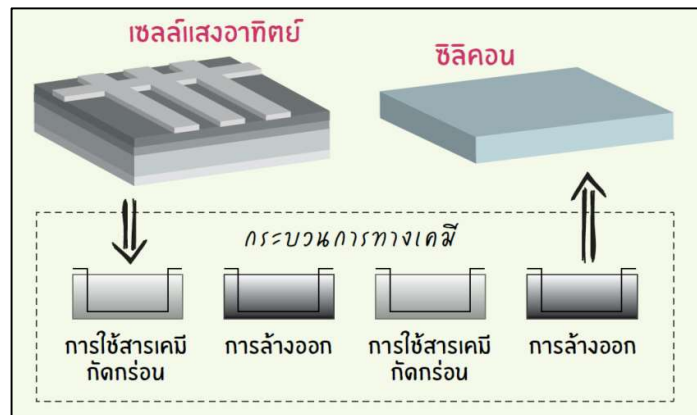
ภาพที่ 4.19 ส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์และสารเคลือบ

ที่มา : E. Klugmann-Radziemska, P. Ostrowski / Renewable Energy 35 (2010) 1751–1759

โดยจะมีปัญหาที่สำคัญคือ การเลือกใช้สารเคมีให้ตรงกับประเภทของสารเคมีที่ใช้โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สารป้องกันการสะท้อนจากซิลโหลหะด้านหน้าซึ่งตัวอย่างวัสดุที่มีการนำมาใช้งาน ได้แก่

- แทนทาลัม เพนทอกไซด์ (Ta_2O_5)
- ไททาเนียม ไดออกไซด์ (TiO_2)
- ซิลิคอน โมโนออกไซด์ (SiO)
- ซิลิคอน ไดออกไซด์ (SiO_2)
- ซิลิคอน ไนไตรท์ (Si_3N_4)
- อะลูมิเนียม ออกไซด์ (Al_2O_3)
- อินเดียม ไทรออกไซด์ (In_2O_3)

ตัวอย่างขั้นตอนการกัดและล้างชั้นป้องกันการสะท้อนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน เมื่อผ่านกระบวนการกัดและล้างแล้วจะได้ผงซิลิคอน เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการหลอมต่อไป (ภาพที่ 4.20 - 4.21)



ภาพที่ 4.20 กระบวนการกัดและล้างชั้นป้องกันการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน

ที่มา : E. Klugmann-Radziemska, P. Ostrowski / Renewable Energy 35 (2010) 1751–1759



ภาพที่ 4.21 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์หลังผ่านการกัดชั้นป้องกันการสะท้อนแสงออก

ที่มา : <https://www.bnl.gov>

4) การหลอมซิลิคอน หลังจากผ่านการกักชั้นป้องกันการสะท้อนแสงแล้วกระบวนการต่อไปคือ การหลอมชิ้นส่วนของผลึกซิลิคอนให้เป็นแท่งผลึกเพื่อใช้เป็นวัสดุตั้งต้นก่อนนำกลับมาสร้างแผ่นเวเฟอร์อีกครั้ง (ภาพ 4.22)



ภาพที่ 4.22 ตัวอย่างผลึกเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการหลอมใหม่อีกครั้ง

ที่มา : <https://www.bnl.gov>

เมื่อผ่านกระบวนการตัดแยกต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว จะได้วัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ตั้งตัวอย่างวัสดุต่างๆ ที่ได้จากการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน (ตารางที่ 4.7)

ตารางที่ 4.7 วัสดุต่างๆ ที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน

วัสดุ	น้ำหนักขาเข้า (กิโลกรัม)	ปริมาณสัมพัทธ์ (ร้อยละ)	น้ำหนักขาออก (กิโลกรัม)	ผลผลิต (ร้อยละ)
กระจก	5.93	65.82	5.75	96.96
พลาสติก	0.94	10.43	-	-
เซลล์ที่แตกหัก	0.26	2.89	0.22	84.62
เส้นลวดทองแดง	0.09	1.00	0.07	77.78
อลูมิเนียม	1.58	17.54	1.58	100.00
กล่องแยกสาย	0.21	2.33	-	-
รวม	9.01	100.00	7.62	84.57

ที่มา : <https://www.bnl.gov>

4.6.1.3 การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีของต่างประเทศเกี่ยวกับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก Si

การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si PV เริ่มขึ้นในปี 1990 [2-6] ในระยะแรก ปัจจัยที่สำคัญที่สุดในสายงานวิจัยและพัฒนา คือ การกู้คืนเซลล์ Si โดยไม่เกิดการแตกหักและใช้เป็นเซลล์หรือ Wafers หลังกู้คืน

กระบวนการที่ยากที่สุดคือ การกำจัดสารหล่อหลอมออกจากโครงสร้างที่เคลือบ เช่น การแยกแก้ว พอลิเมอร์ เซลล์ Si และโลหะอื่นๆ เพื่อนำเซลล์ PV กลับคืนมาโดยไม่แตกหัก แนวทางในการกำจัดสารหล่อหลอมออกจากโครงสร้างที่เคลือบด้วยลามิเนตโดยวิธีการทางความร้อนและทางเคมี (ภาพที่ 4.23)



ภาพที่ 4.23 แนวทางการกำจัดสารหล่อหลอมออกจากโครงสร้างลามิเนตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก ในระยะแรก [38]

1) การรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก Si ด้วยวิธีการทางความร้อน

วิธีการทางความร้อนโดยทั่วไป กล่าวถึงการเผาไหม้ Combustion/Burning/Cracking เซลล์แสงอาทิตย์ถูกทำให้ร้อนในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส โดยให้ความร้อนในสองขั้นตอน แนวทางดังกล่าวได้เกิดขึ้นโดย [9], Solar Cells [2], Sharp [3] และ AGC [3] เป็นต้น ในเตาเผา ส่วนประกอบพอลิเมอร์จะถูกเผา/แตก และวัสดุที่เหลือ เช่น เซลล์ Si แก้ว และโลหะ จะถูกแยกออกด้วยตนเอง เพื่อให้อัตราการฟื้นตัวของเซลล์ Si สูงขึ้น Softech ใช้เตาเผาฟลูอิดไดส์เบด (fluidized bed) และพยายามจัดวางรูปแบบต่างๆ เช่น วิธีต่างๆ ในการวางของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในเตาหลอม [4] แก้วและโลหะที่ถอดออกจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกส่งไปรีไซเคิล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้พอลิเมอร์สามารถป้องกันได้โดยการควบคุมสถานะของเตาหลอม อย่างไรก็ตามมีการตั้งข้อสังเกตว่าก๊าซฟลูออไรด์อาจทำให้เตาเผาเสียหายได้เมื่อพอลิเมอร์ถูกเผาพร้อมกับสารประกอบฟลูออไรด์ เซลล์ Si ที่แยกจากกันจะถูกนำกลับมาใช้ซ้ำเพื่อสร้างแผ่นเวเฟอร์ (wafers) ใหม่ โดยนำไปแปรรูปอีกครั้งในสายการผลิตเซลล์มาตรฐานและรวมเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ PV

การออกแบบเหล่านี้ไม่ได้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ด้วยเหตุผลทางเศรษฐกิจและความจำเป็นที่จำกัดสำหรับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจริงในขณะนี้ อย่างไรก็ตาม ประสบการณ์ดังกล่าวได้รับบทเรียนจากการวิจัยและพัฒนาล่าสุดโดยใช้วิธีการทางความร้อน

ศักยภาพทางเทคนิคของวิธีการทางความร้อนได้รับการพิสูจน์เป็นเทคโนโลยีแรก ข้อดีประการหนึ่งคือ วิธีการทางความร้อนจะสามารถกู้คืนแก้วและเซลล์ Si ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย หลังจากแยกส่วนประกอบของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว เช่น แก้ว เซลล์ Si และโลหะอื่นๆ กระบวนการนี้จะถูกนำไปใช้ก่อนกระบวนการแยกและกู้คืนโลหะจากวัสดุ

มูลนิธิ Kitakyushu เพื่อความก้าวหน้าของอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประเทศญี่ปุ่น (Kitakyushu Foundation for the Advancement of Industry, Science and Technology, Japan; FAIS) ร่วมกับอื่นๆ ได้พัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการถอดโครงอลูมิเนียม และการรีไซเคิลด้วยความร้อนโดยการเผาไหม้ EVA เรซิน [10] เครื่องมือทำการรีไซเคิลโดยใช้ อุปกรณ์ถ่ายโอนซิงโครไนซ์ (synchronized) โดยตัวควบคุมระบบอัตโนมัติเพื่อรักษาความสม่ำเสมอจากขั้นตอนแรกไปจนถึงการกู้คืนวัสดุที่มีค่า โดยขั้นตอนแรกโครงอลูมิเนียมจะถูกแยกออก ขั้นตอนถัดไป แผ่นรองด้านหลังจะถูกแยกออกโดยเครื่องกัด (milling machine) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยร้าวจากความร้อน ขั้นตอนหลังจากการถอดแยก โครงอลูมิเนียมถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในขณะที่แผ่นรองด้านหลังที่ถอดออกจะถูกกำจัดเป็นขยะอุตสาหกรรม ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีกรอบอลูมิเนียมและแผ่นรองหลังถูกทำให้ร้อน เรซิน EVA ถูกย่อยสลายด้วยความร้อนในเตาหลอม และก๊าซที่สลายตัวจะถูกดูดแล้วบำบัดต่อ เตาหลอมกำหนดและควบคุมอุณหภูมิที่ (pre-heated) 350 - 500 องศาเซลเซียส (สำหรับ c-Si) แล้วจึงทำให้เย็นลงที่ (cooled down) 250 องศาเซลเซียส ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของ EVA เรซิน จะถูกนำความร้อนกลับไปใช้ยังเตาเผา ส่วนประกอบทั้งหมด รวมทั้งแผ่นแก้ว เซลล์ Si และอิเล็กโทรด (electrodes) จะได้รับการกู้คืนหลังจากผ่านกระบวนการหลักทั้งสามขั้นก่อน เทคโนโลยีนี้สามารถแยกโครงสร้างโมดูล PV ของ c-Si, พิล์มบาง Si และ CIS; สำหรับโมดูล CIS นั้น จะเพิ่มขั้นตอนการขูดเพื่อแยกชั้นของอุปกรณ์ CIS หลังจากกระบวนการเหล่านี้ มีเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลเชิงพาณิชย์ และปริมาณการรีไซเคิลอยู่ที่ประมาณ 12 MW/ปี สำหรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si ขึ้นอยู่กับประเภทและขนาด อัตราการรีไซเคิลเกือบร้อยละ 95 รวมถึงการรีไซเคิลด้วยความร้อนของ EVA ซึ่งสามารถลดเชื้อเพลิงที่ใช้ได้ประมาณร้อยละ 90 สำหรับการทำความร้อนของเตาหลอม แก้วที่นำกลับมาใช้ใหม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่เป็นกระจกโฟลต (float glass) ได้โดยไม่เสียหายมากเกินไป แม้ว่ากระบวนการกู้คืนโลหะจากเซลล์ Si และอิเล็กโทรด (electrodes) จะไม่รวมอยู่ในเทคโนโลยีประเภทนี้ แต่การกู้คืน เงิน (Silver; Ag) อย่างมีประสิทธิภาพจากเซลล์ Si เป็นไปได้เนื่องจากการแยกที่สมบูรณ์แบบระหว่างแก้วและเซลล์ Si และในทางกลับกัน เซลล์ Si จะได้รับการกู้คืนเป็นวัสดุ Si เทคโนโลยีนี้ถูกใช้ในบริษัทชินริเยว (Shinryo) ตั้งแต่ปี 2015 และชินริเยวกำลังดำเนินโครงการพัฒนาเพื่อปรับปรุงให้เป็นเทคโนโลยีเชิงพาณิชย์ [11]

สถาบันวิจัยพลังงานแห่งเกาหลี (Korea Institute of Energy Research; KIER) กำลังศึกษากระบวนการกู้คืนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยต้นทุนต่ำ [12] โครงการมุ่งเน้นไปที่การกู้คืน Si cells/Wafers และโลหะมากกว่าแก้ว โดยกระบวนการประกอบด้วยกำจัดการหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบลามิเนตเพื่อกู้คืน Si cells โดยไม่ให้เกิดความเสียหาย การรีไซเคิล Si cells ให้เป็นแผ่น Wafers Si และการกู้คืนโลหะบริสุทธิ์ เช่น เงิน (Silver; Ag) และทองแดง (Copper; Cu) จาก Si cells กระบวนการจะเผาไหม้ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิ 500 - 550 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศเพื่อแยกแก้ว เซลล์ Si และ Electrode metals พบว่าขั้นตอนการแยก EVA เรซิน และการทำให้กระจกแตกก่อนกระบวนการเผาไหม้ ทำให้การกู้คืนเซลล์ Si ไม่เสียหาย นอกจากนี้ ยังได้พบว่าเซลล์ Si ที่กู้คืนมานั้น สามารถนำกลับมาใช้ใหม่เป็น Si wafers ได้โดยการกัดด้วยสารเคมี (เช่น กรดไนตริก [13] และ แผ่นเวเฟอร์ (wafers)

นั้นสามารถนำมาสร้างเซลล์ Si ใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง จึงถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน เซลล์ Si ไม่เพียงแต่สามารถกู้คืนได้หลังจากกระบวนการเผาไหม้ แต่ยังรวมไปถึง Electrode metals และเศษแก้ว และเทคโนโลยีนี้ได้ขยายเป็นโรงงานต้นแบบในปี 2560

สถาบันเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์แห่งเกาหลี (Korea Electronics Technology Institute; KETI) ดำเนินการวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si [14] เทคโนโลยีนี้ รวมถึงกระบวนการระบายความร้อนสำหรับการแยกโครงสร้างลามีเนต กระบวนการกัดกร่อนด้วยสารเคมีและกระบวนการเชิงกล เมื่อของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV เซลล์เดี่ยวถูกหลอมด้วยความร้อนอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มที่ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที เซลล์ Si จะถูกกู้คืนโดยไม่มี ความเสียหายใดๆ ดังนั้นเซลล์ Si ที่กู้คืนได้จะถูกกัดกร่อนด้วยกรดไนตริก เพื่อแยกเงินออก สารเคลือบป้องกันแสงสะท้อน emitter และจุดเชื่อมต่อ p-n ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำกู้คืนจะถูกแยกออกโดยการเจียร (mechanical grinding) ต่อจากนั้นอิเล็กโทรด (electrode) ที่อยู่ด้านหลังจะถูกแยกออกโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide) Si wafers ที่กู้คืนมาจะถูกนำไปรีไซเคิลเป็น Si cell ก่อนนำมาใช้ใหม่ จากการทดลองประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้นั้นเกือบจะเหมือนกับเซลล์ Si ใหม่ พบว่าเทคโนโลยีนี้เหมาะสมสำหรับเซลล์ Si ที่มีความหนา 0.2 มิลลิเมตร และความหนาของเวเฟอร์ (wafers) ที่กู้คืนมาใช้ได้คือ 0.18 มิลลิเมตร

มหาวิทยาลัย Chonnam National University ได้พัฒนาเทคโนโลยีที่ประกอบด้วยกระบวนการทางความร้อนสำหรับการแยกโครงสร้างลามีเนตและการกัดกร่อนด้วยสารเคมีเพื่อนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ [15] ด้วยการกัดกร่อนด้วยสารเคมี กรดไนตริก (nitric acid) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) ภายใต้การบำบัดด้วยคลื่นความถี่สูง หลังจากผ่านกระบวนการกัดกร่อน Si cell ที่กู้คืนได้นั้นบริสุทธิ์ถึง >ร้อยละ 99.998 ที่ 520 องศาเซลเซียส ด้วย CaO-CaF-SiO₂

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมแห่งชาติของจีน (The Chinese Research Academy of Environmental Sciences; CRAES) และสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์แห่งประเทศจีน (Electrical Engineering Institute, Chinese Academy of Sciences; IEE CAS) ได้ใช้วิธีการโดยใช้เตาหลอมหลอม [16] อุณหภูมิการเผาไหม้มีสองขั้นตอน โดยที่อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายอยู่ที่ 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส กระบวนการทางความร้อนด้วยออกซิเจนและไนโตรเจนในเตาหลอม หลังจากผ่านกระบวนการเผาไหม้ แก้วและเซลล์ Si เมื่อได้ถูกกู้คืนมาแล้ว เซลล์ Si ถูกบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) กรดไนตริก (nitric acid) กรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) และสิ่งที่ได้หลังจากการกู้คืนคือ Si เงิน (Silver; Ag) และอลูมิเนียม (Aluminum; Al) แม้ว่า จะไม่มีรายละเอียดมาก แต่พบว่ากระบวนการมีการใช้พลังงานสูงและจำเป็นต้องมีมาตรการรับมือในการปล่อยก๊าซพิษและของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาได้ จากการทดลองของเตาหลอมหลอม CRAES ได้พัฒนาเตาเผาขยะสำหรับวิธีระบายความร้อนด้วยอุณหภูมิสูง เตาเผาขยะสามารถกำจัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV เชิงพาณิชย์ และยังได้รับการออกแบบเพื่อกำจัดก๊าซพิษในท้ายกระบวนการด้วยความร้อน ขณะนี้เตาเผาขยะอยู่ในระหว่างการทดลองใช้งาน และพบว่ากระบวนการรวบรวมและรีไซเคิลก๊าซพิษจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุง นอกจากนี้ เทคโนโลยี

การรีไซเคิล เซลล์ Si ที่มีความบริสุทธิ์สูงโดยการบำบัดด้วยสารเคมียังอยู่ระหว่างการพัฒนาอีกด้วย เซลล์ Si ที่ได้คาดว่าจะถูกนำมาใช้ซ้ำสำหรับผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

สถาบันวิจัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมไต้หวัน (Industrial Technology Research Institute, Taiwan; ITRI) และสถาบันอื่นๆ ได้ทำการวิจัยวิธีการให้ความร้อนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์เดี่ยว (ขนาดหกนิ้ว) ที่มีโพลีไวนิลฟลูออไรด์ (Poly-Vinyl-Fluoride; PVF) เป็นแผ่นรองหลัง [17] ซากเซลล์แสงอาทิตย์หลังจากได้รับความร้อนที่ 330 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีในขั้นตอนแรก จากนั้น PVF จะถูกแยกออกจากพื้นผิวด้านหลัง ขั้นตอนที่สองจะให้ความร้อนที่เผาไหม้เพื่อแยก เรซิน EVA และ PVF ออก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาสองชั่วโมง หลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนทั้งสองขั้นตอนนี้แล้ว แก้ว ชิ้นส่วนเซลล์ Si และ copper ribbons จะถูกกู้คืนมา ขั้นตอนต่อไปคือ

ขั้นตอนที่ 1 : Si chips ถูกกัดกร่อนด้วยกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) เพื่อขจัดขี้ไฟฟ้า Al,

ขั้นตอนที่ 2 : ใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) เพื่อขจัดชั้น SiNx (สารเคลือบป้องกันแสงสะท้อน (Anti-Reflecting Coating; ARC) และ Ag,

ขั้นตอนที่ 3 : ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) เพื่อขจัดจุดเชื่อมต่อ p-n (p-n junction) และชั้นพื้นผิวด้านหลัง (Back-Surface-Field; BSF)

***ข้อสังเกต ก๊าซพิษที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ PVF และเรซิน EVA ไม่ได้รับการบำบัด ซึ่งอาจจะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาได้

ตารางที่ 4.8 ตารางสรุปเทคโนโลยีการรีไซเคิลที่เกี่ยวข้อง และกระบวนการทางความร้อน ตามที่อธิบายไว้ข้างต้น

นอกเหนือจากกระบวนการที่กล่าวมาแล้ว มหาวิทยาลัย Padua (Padua University) ในอิตาลี ได้รายงานกระบวนการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก (dielectric heating process) เพื่อทดแทนการให้ความร้อนและการเผาไหม้โดยตรง [18] โดยใช้ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเซลล์เดี่ยว โดยของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ถูกแยกส่วนด้วยกระบวนการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (radio-frequency heating process) นอกจากนี้ Accurec recycling ในเยอรมนี ได้ใช้เทคโนโลยีใหม่กลั่นด้วยสุญญากาศ เทคโนโลยีไพโรไลซิส Vacuum-distillation pyrolysis technology [19]

ตารางที่ 4.8 ตัวอย่างงานวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน โดยกระบวนการทางความร้อน [38]

		FAIS และอื่นๆ (Japan)	KIER (Korea)	KETI (Korea)	Chonnam Nation. Univ. และอื่นๆ(Korea)	CRAES และ IEE- CAS (China)	ITRI (Taiwan)
การกำจัด สารห่อหุ้ม จาก โครงสร้าง ลามิเนต	กระบวนการ และเงื่อนไข	การเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 350°และ 500°C	การเผาไหม้ที่ 500°- 550°C ปรับสภาพกระจก และพื้นผิว EVA	การเผาไหม้ที่ 480°C.	-	การเผาไหม้ที่ 250°- 300° และ 500°-550°C	การเผาไหม้ที่ 330° และ 400°C
	วัสดุหลังกู้คืน	แก้ว (ไม่แตก), เซลล์ Si, electrode metals	แก้ว, เซลล์ Si (ไม่แตก), electrode metals	แก้ว, เซลล์ Si (ไม่แตก), electrode metals	-	แก้ว, เซลล์ Si, Electrode metals	Si chip, electrode metal
	หมายเหตุ	ระบบการควบคุมอัตโนมัติ การ นำความร้อนกลับมาใช้ใหม่จาก การเผาไหม้ของ EVA สำหรับ การกู้คืนซากเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si, ฟิล์มบาง เซิงพามิซ และ โครงการสาธิต CIS	โรงงานนำร่อง การกู้ คืนเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดเซลล์เดี่ยว	แสงอาทิตย์ชนิดเซลล์เดี่ยว	-	การใช้เตาหลอม หลอด	แสงอาทิตย์ชนิดเซลล์ เดี่ยว
การกู้คืน โลหะจาก เซลล์ Si	กระบวนการ และเงื่อนไข	-	การกัดกร่อนด้วย สารเคมี	การกัดกร่อนด้วยสารเคมี (กรดไนตริก, โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์) และการเจียรด้วยเครื่องมือ กล	การกัดกร่อนด้วยสารเคมี (กรดไนตริก โซเดียมไฮดรอกไซด์) ภายใต้การกู้คืนด้วย อัลตราโซนิก กระบวนการทางความร้อน	การกัดกร่อนด้วย สารเคมี (กรดไนตริก, โซเดียมไฮดรอกไซด์, กรดไฮโดรฟลูออริก)	การกัดกร่อนด้วยสารเคมี (กรดไฮโดรคลอริก, โซเดียมไฮดรอกไซด์, กรดไฮโดรฟลูออริก)
	วัสดุหลังกู้คืน	-	Si wafers, Ag, Al	Si wafers, Ag, Al	Si, Ag, Al	Si, Ag, Al	Si, Ag, Al
	หมายเหตุ	ขอบเขตขั้นตอนการกู้คืนโลหะ ออก	Si wafer สามารถรี ไซเคิลเป็น Si Cell ใหม่	กระบวนการ Non-HF สามารถรีไซเคิล Si wafers เป็นเซลล์ Si ใหม่	-	-	-

2) การรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก Si ด้วยวิธีการทางกล

ปัจจุบัน วิธีการทางกลสำหรับการกู้คืนแก้วกลับมาใช้ใหม่จากซากเซลล์แสงอาทิตย์ในยุโรปโดยผู้รีไซเคิลแก้ว แม้ว่าวิธีการนี้จะไม่ได้ใช้เจาะจงสำหรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ แต่การออกแบบทางเทคโนโลยีและวิธีทางกลบางวิธีสามารถใช้ได้กับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

วิธีการทางกลสำหรับการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ คือ การบด การขูดชั้นกระจกแก้ว และการตัดชั้นห่อหุ้ม วิธีการเหล่านี้จะแยกโครงสร้างที่เคลือบด้วยลามิเนต โดยมีขั้นตอนเพิ่มเติมสำหรับการแยกแก้ว โลหะ รวมทั้งเซลล์ Si และพอลิเมอร์รวมกัน

Mitsubishi Materials Corporation กำลังพัฒนาวิธีการขูด (scraping) เพื่อกู้คืนนำกระจกกลับมาใช้ใหม่ [20] กระบวนการขูด (scraping) ด้วยเครื่องจักรที่กระจกฝาดรอบเพื่อไม่ให้กระจกเปื้อนด้วยชั้นการห่อหุ้ม (EVA) ด้วยเครื่องมือสามารถกู้คืนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้หนึ่งโมดูลต่อนาที แก้วที่กู้คืนได้จะถูกกรองเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และสันนิษฐานว่าเม็ดแก้วใสที่ได้ถูกนำไปใช้ในงานอื่นต่อไป ส่วนที่เหลือมีแก้วจำนวนเล็กน้อยสามารถบำบัดได้ด้วยเทคโนโลยีการกลั่นโลหะ (metal refinery technology)

แนวทางของ Toho Kasei คือการขูดชั้นที่ไม่ใช่กระจกด้วยเครื่องจักร [21] สองขั้นตอนแรกคือการขูดแผ่นรองหลัง ชั้นของการห่อหุ้ม ซึ่งรวมถึงเซลล์ Si และชั้นอิเล็กโทรด (encapsulation) ขั้นตอนต่อไป ชั้นการห่อหุ้มที่ขูดออกจะได้รับการบำบัดโดยตัวทำละลายที่พัฒนาขึ้น จากนั้นจึงกู้คืนนำ Si, โลหะและพอลิเมอร์อื่นๆ กลับคืนมา ในการนำ Si ที่มีความบริสุทธิ์สูงกลับมาใช้ใหม่เป็นหนึ่งในเป้าหมายของโครงการ และพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มที่นำกลับมาใช้ใหม่นั้นจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบของเชื้อเพลิงหรือวัสดุทดแทน ในทางกลับกันแผ่นรองหลังที่ขูดออกจะถูกกำจัดเป็นขยะอุตสาหกรรม ฝาดรอบกระจกด้านหลังจะไม่ได้รับความเสียหายจากกระบวนการขูด แม้ว่าจะมีชั้นการห่อหุ้มติดมาเล็กน้อย ชั้นการห่อหุ้มที่ติดดังกล่าวสามารถกำจัดออกได้โดยตัวทำละลายที่ถูกพัฒนาขึ้น นอกจากนี้ตัวทำละลายสามารถใช้ได้กับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และโครงสร้างก่อนการขูด อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ใช้เวลามากเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนที่ไม่มีการขูด

Hamada Corporation และ NPC Inc. กำลังร่วมกันพัฒนาวิธีการแยกชั้นการห่อหุ้มควบคู่ไปกับฝาดรอบกระจกโดยใช้เครื่องตัดความร้อน [22] หลังจากถอดโครงสร้างอลูมิเนียมด้วยเครื่องมือและขูดแผ่นรองหลัง โครงสร้างลามิเนตถูกฝาดด้วยเครื่องตัดความร้อน ใบมีดถูกติดตั้งในแนวระนาบของรอยประสานระหว่างกระจกกับชั้นการห่อหุ้ม เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายต่อพื้นผิวแก้ว หลังจากนั้นนำวัสดุที่ห่อหุ้มและติดอยู่กับพื้นผิวกระจกออกแล้ว แก้วจะถูกกู้คืนกลับมาใช้ใหม่เป็นหลอดแก้ว ชั้นอื่นที่เหลือสามารถบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการกลั่นโลหะเพื่อนำโลหะกลับมาใช้ใหม่

Sasil, SpA และองค์กรอื่นๆ ได้พัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV ภายใต้โครงการ Full Recovery End of Life Photovoltaic (FRELP) ในยุโรป ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการในการถอดโครงอลูมิเนียมและกล่องขั้วต่อ สำหรับการกู้คืนแก้ว พอลิเมอร์ที่เผาไหม้ และการนำโลหะออกจากเซลล์ Si และอิเล็กโทรด (electrodes) [23] ชั้นแรก เครื่องจักรจะถอดโครงอลูมิเนียม และกล่องขั้วต่อออกจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV ต่อจากนั้น โครงสร้างที่เคลือบจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 ถึง

120 องศาเซลเซียส โดยฮีตเตอร์อินฟราเรด (IR heater) และโครงสร้างนั้นจะถูกใส่เข้าไปในเครื่องลูกกลิ้ง (roller mill) และอุปกรณ์มีดสั่น (vibrating knife) ด้วยเครื่องมือนี้ กระจกจะถูกแยกและกู้คืน ในขั้นตอนถัดไป โครงสร้างที่เหลือที่มีการห่อหุ้ม เซลล์ Si อิเล็กโทรด (electrodes) และแผ่นรองหลังจะถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส เผาไหม้ที่ 850 องศาเซลเซียส เพื่อแยกโลหะในเซลล์ Si และอิเล็กโทรด ก๊าซเสียจากพอลิเมอร์ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ (burning) จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ (combustion) โลหะถูกแยกออกจากกันเมื่อผ่านกรรมวิธีทางเคมี เซลล์ Si ถูกกัดกร่อนด้วยกรดไนตริก (nitric acid) และเซลล์ Si ถูกกู้คืน หลังจากการกัดกร่อนด้วยอิเล็กโทรไลซิส (electrolysis) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) จะสามารถกู้คืนโลหะอื่นๆ (Ag และ Cu) กลับมาเป็นโลหะในรูปแบบไฮดรอกไซด์

มหาวิทยาลัย Sapienza แห่งกรุงโรม (Sapienza University of Rome) และองค์กรอื่นๆ ได้ศึกษาการใช้กระบวนการหั่นย่อยอัตโนมัติภายใต้โครงการ Photolife ในยุโรป [24] กระบวนการนี้ประกอบด้วยการใช้โครงสร้างอลูมิเนียมด้วยตนเอง การย่อยโครงสร้างลามิเนตและกระจกแยกแบบอัตโนมัติ กระบวนการกู้คืนโลหะกลับมาใช้ใหม่ โครงการนี้ครอบคลุมไปถึงของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก Si, Amorphous Si และ CdTe PV มีการทดสอบด้วยการกระบวนการหั่นย่อยอัตโนมัติสองแบบ แบบแรกคือวิธีการบดอย่างง่ายโดยใช้โรเตอร์สองใบมีด (two-bladed rotor) แบบที่สองคือกระบวนการกัดด้วยค้อน (hammer milling) จากการวิเคราะห์ด้วยตัวอย่างขนาดของชิ้นส่วนซากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านบดแล้ว สรุปได้คร่าวๆ ว่าแบบที่สองดีกว่า ชิ้นส่วนที่ผ่านการบดแล้วจะต้องนำมาผ่านกระบวนการต่อไป แบ่งแยกตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ส่วนที่ 1 ส่วนที่มีขนาด d (เส้นผ่าศูนย์กลาง) > 1 มิลลิเมตร จะถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เพื่อแยกพอลิเมอร์ (polymers) ส่วนที่ 2 ส่วนที่มีขนาด 1 มิลลิเมตร $> d > 0.08$ มิลลิเมตร จะถูกกู้คืนสภาพโดยตรงเป็นแก้ว และส่วนที่ 3 ส่วนที่มีขนาด $d < 0.08$ มิลลิเมตร จะถูกกู้คืนโดยกระบวนการไฮโดรเมทัลลurgical เพื่อกู้คืนโลหะ

PV-MOREDE เป็นหนึ่งในกลุ่มบริษัทที่กำลังพัฒนาระบบเซลล์แสงอาทิตย์ PV สำหรับมือถือภายใต้โครงการไฟฟ้าโซลาเซลล์ Photo Voltaic panels Mobile Recycling Device (PV-MOREDE) ในยุโรป [25] วัตถุประสงค์คือเพื่อพัฒนาระบบรีไซเคิลในสถานที่ โดยการลดปริมาตร การแยกเศษแก้ว การแยกเซลล์ Si และการแยกพอลิเมอร์ออกจากทองแดง อุปกรณ์ทั้งหมดสามารถเก็บไว้ในภาชนะเพื่อสะดวกต่อการขนส่ง ก่อนขั้นตอนการบำบัด โครงสร้างอลูมิเนียม และกล่องขั้วต่อจะถูกแยกออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการแยกชิ้นส่วนมาแล้วจะถูกตัดเป็นชิ้นขนาด 100×100 มิลลิเมตรโดยเครื่องจักร แล้วชิ้นส่วนจะถูกส่งไปยังเครื่องบดทุบขั้นที่ 1 (hammer mill 1) เพื่อบดเป็นเม็ดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 6 มิลลิเมตร และกรองด้วยตาข่ายที่มีรูขนาด 6 มิลลิเมตร เม็ดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จะถูกส่งไปยังเครื่องบดทุบขั้นที่ 2 (hammer mill 2) เพื่อให้เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร แล้วถูกกรองเป็นสามขนาด 2 มิลลิเมตร 0.315 มิลลิเมตร และเล็กกว่า 0.315 มิลลิเมตร ตามลำดับ พร้อมกันในเพลทของโต๊ะสั่น (shaking table) เนื่องจากเศษส่วนหยาบส่วนแรกประกอบด้วยพอลิเมอร์และทองแดงเป็นส่วนใหญ่ ส่วนนี้จะถูกกู้คืนทองแดงออก โลหะและพอลิเมอร์อื่นๆ จะถูกแยกออกโดยใช้เครื่องคัดแยกด้วย

แม่เหล็ก เศษส่วนที่สองและสามจะถูกแยกออกเป็นแก้วที่มีระดับซิลิคอนต่ำและแก้วที่มีปริมาณซิลิคอนสูงตามลำดับ

Yingli Solar, สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Institute) และสถาบันวิทยาศาสตร์จีน (Chinese Academy of Sciences) นำเทคโนโลยีการบดมาใช้ในสถานะที่เย็นจัด [26] ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV ถูกแยกโครงสร้างอลูมิเนียมและกล่องขั้วต่อออก แล้วบด จากนั้นชิ้นส่วนจะถูกแช่เย็นที่อุณหภูมิ -197 องศาเซลเซียส โดยใช้ไนโตรเจนเหลว ชิ้นส่วนของชั้นห่อหุ้ม (EVA) แก้ว ผงผสมที่มี Si Ag Cu และวัสดุอื่นๆ จะถูกแยกออกด้วยลักษณะทางกายภาพ อัตราการรีไซเคิลที่คาดการณ์ไว้อยู่ที่ประมาณร้อยละ 90 แต่ Si ไม่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ได้เนื่องจากมีความบริสุทธิ์ต่ำ

การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน c-Si โดยวิธีการทางกล ที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สรุปเทคโนโลยีการรีไซเคิลด้วยวิธีการทางกล

ตัวอย่างการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน c-Si โดยวิธีการทางกล [38]

		Mitsubishi Materials (Japan)	Toho Kasei (Japan)	Hamada and NPC (Japan)	Sasil and others (Italy)	Sapienza Univ. and others (Italy)	La Mia Energy Scarl and others (Italy)	Yingli Solar (China)
กระบวนการ การกู้คืน และแยก กระจก	กระบวนการ การและ เงื่อนไข	ชุดกระจกครอบ	การชุบแผ่นด้านหลัง การชุบวัสดุหุ้มและชั้น Si เซลล์ การเคลือบแก้วโดยใช้ตัวทำ ละลาย	การชุบแผ่นหลัง การตัดชิ้นการหุ้มโดย ใช้เครื่องตัดความร้อน	อุณหภูมิ 90° - 120°C ทับด้วยลูกกลิ้ง และมัตถัน	บดด้วยโรเตอร์ สองใบ บดด้วยเครื่อง บดเป็นทางเลือกต่อไป	ตัดเป็น 100x100mm ชั้นสอง ตอนบดโดยสองโรงสีค้อนจน อนุภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย กว่า 2 มม.	บดในสภาพ เย็น (-197°C)
	กู้คืนวัสดุ	เม็ดแก้ว ชั้นที่เหลือน (EVA/Si cells/EVA/ Back sheet)	แก้ว (ไม่แตก) ส่วนผสมของ การหุ้มและชั้นเซลล์ Si	แก้ว (ไม่แตก) ชั้นที่เหลือน ของวัสดุหุ้มและเซลล์ Si	เม็ดแก้ว ส่วนผสมของสาร หุ้มและชั้นเซลล์ Si	จำแนกอนุภาคตามขนาด d>1 มม., 1 มม.>d>0.08 มม., 0.08 มม.>d	จำแนกอนุภาคตามขนาด 2 มม.>d>0.5 มม., 0.5 มม. >d>0.315 มม., 0.315 มม.>d	อนุภาคผสม, ผงที่มีโลหะ และพอลิเมอร์
	หมายเหตุ	สามารถกู้คืนเม็ดแก้วใส กลับมาใช้ใหม่ได้	กระจกสามารถนำกลับมาใช้ ใหม่ได้โดยไม่มีความเสี่ยง และนำกลับมาใช้ใหม่	แก้วสามารถนำกลับมาใช้ ใหม่ได้โดยไม่มีความเสี่ยง และนำกลับมาใช้ใหม่แผ่นรองหลังถูกทิ้ง	แก้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แผ่นรองหลังถูกทิ้ง	แก้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แผ่นรองหลังถูกทิ้ง	อนุภาคที่สามารถกู้คืนและรีไซเคิลเป็น แก้วได้ 1 มม.>d>0.08 มม. สำหรับโมดูล c-Si, ฟิล์มบาง Si และ CdTe	อนุภาคที่ 0.5 มม.>d>0.315 มม. ถูกแยกออกเป็นแก้วที่มีปริมาณ Si. ต่ำ อนุภาคที่ 0.315 มม.>d ถูกแยก ออกเป็นแก้วที่มีปริมาณ Si. สูง
กระบวนการ การผสม ผสานหลัง การแยก กระจก	กระบวนการ การและ เงื่อนไข	กระบวนการกลั่นโลหะ สำหรับชั้นที่เหลือน	การบำบัดทางเคมีของ ส่วนผสมที่เหลือน	กระบวนการทางเคมีหรือ กระบวนการกลั่นโลหะ สำหรับชั้นที่เหลือน	เผาที่อุณหภูมิ 850 องศา เซลเซียสและการกักความร้อน ของสารเคมี (กรดไนตริก) อิเล็กโทรไลซิสสำหรับของ ผสมที่เหลือน	การเผาไหม้ที่ 650°C สำหรับอนุภาค ขนาด d > 1 มม. กระบวนการ Hydrometallurgical สำหรับอนุภาคที่มีขนาด 0.08 มม. >d	อนุภาคหมุนที่ 2 มม.>d>0.5 มม. ภายใต้สนามแม่เหล็ก	การแยกทาง กายภาพ
	กู้คืนวัสดุ	Ag	Si, โลหะ, พอลิเมอร์ (EVA)	-	Si, Ag, Cu	-	Cu และโลหะอื่นๆ พอลิเมอร์	Si, โลหะ, พอลิเมอร์
	หมายเหตุ	โครงการนี้ดำเนินการ โดยโรงกลั่นโลหะ	พอลิเมอร์สามารถนำกลับมา ใช้ใหม่เป็นเชื้อเพลิงหรือวัสดุ ได้	ก๊าซเผาไหม้เมื่อเผาไหม้ สามารถให้ความร้อนได้	-	พอลิเมอร์ถูกเผา	กระบวนการทั้งหมดสามารถ ดำเนินการได้ในสถานที่ เช่นเดียวกับเทคโนโลยีมือถือ	Si ไม่เหมาะสมกับ การใช้งานใน อุตสาหกรรม PV เนื่องจากมีความ บริสุทธิ์ต่ำ

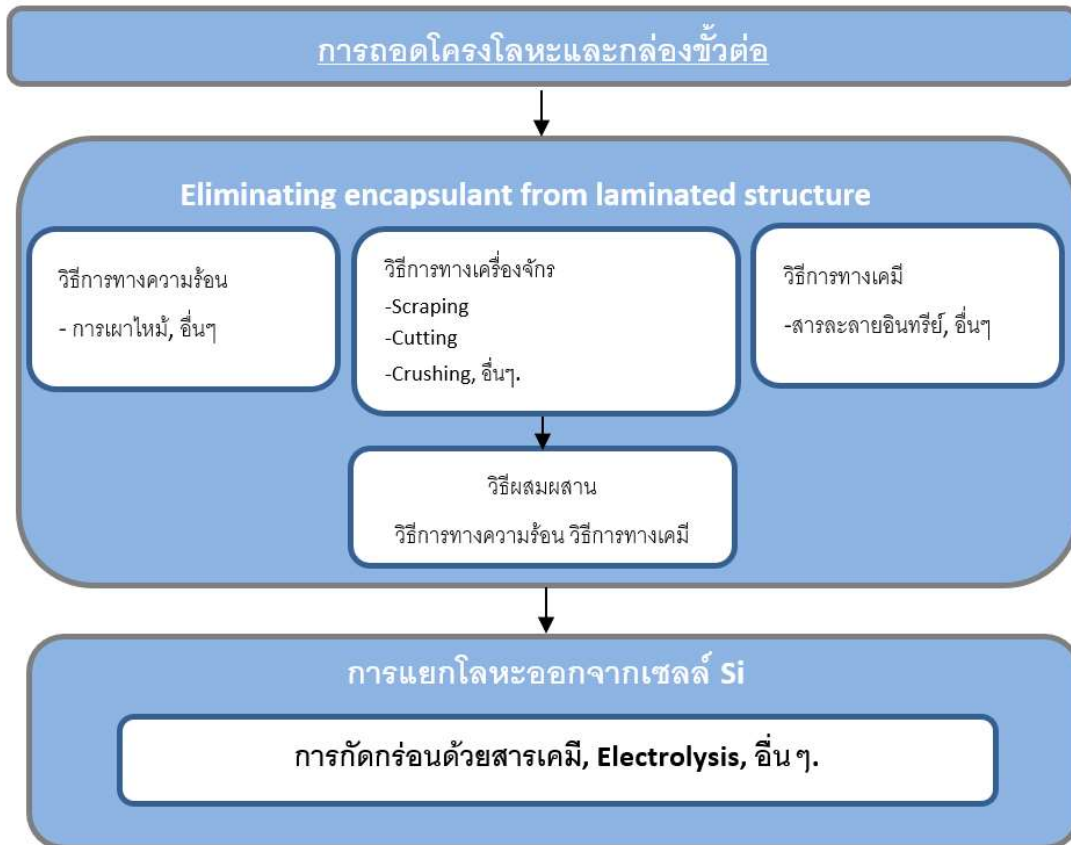
3) การรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si ด้วยวิธีการทางเคมี

วิธีการทางเคมีหมายถึงวิธีการหนึ่งที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกแช่อยู่ในตัวทำละลายและส่วนประกอบจะถูกแยกจากกันโดยปฏิกิริยาเคมี โดยทั่วไป วิธีการทางเคมีจะต้องใช้เวลามากกว่าวิธีการทางความร้อน แต่ผลผลิตของเซลล์ Si ที่กู้คืนได้มีความเสียหายน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทางความร้อน

แนวทางหนึ่งโดย BP Solar ในปี 1990 เกี่ยวข้องกับการใช้กรดไนตริก [5] โดยนำของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จุ่มลงในกรดไนตริก และหลังจากผ่านไปหนึ่งวัน การห่อหุ้ม (EVA) ถูกละลาย แก้ว เซลล์ Si และโลหะถูกแยก จากนั้นเซลล์ Si ที่กู้คืนถูกกัดกร่อนโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแปรรูปจากเวเฟอร์เข้าสู่เซลล์ Si อีกครั้ง มาตรการสำหรับการรองรับสำหรับ ก๊าซไนตริกออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีและการกำจัดของเสียประเภทสารละลายกรดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการยังเป็นปัญหาสำคัญ

ในอีกแนวทางหนึ่ง AIST และ TUAT ได้ประเมินความพร้อมใช้งานของตัวทำละลายอินทรีย์สำหรับการแยกโครงสร้างลามิเนต [6] สังเกตพบว่าตัวทำละลายอินทรีย์จำนวนมากสามารถละลาย EVA ก่อนการบำบัดด้วยความร้อน (เช่น สารสำหรับการเคลือบ) แม้ว่าตัวทำละลายส่วนใหญ่จะไม่มีผลต่อ EVA หลังการบำบัดด้วยความร้อน แต่พบว่าตัวทำละลายไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene) สามารถทำให้ส่วนหน้าของ EVA เคลือบพองได้ แต่ก็สรุปได้ว่าควรใช้ตัวทำละลายเป็นทางเลือก โดยพิจารณาจากปัจจัยทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

สอดคล้องกับข้อกำหนดในปัจจุบันและแผนการในอนาคต เช่น กฎระเบียบสำหรับอัตราการกู้คืน/การรีไซเคิลที่สูงขึ้น และการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV เทคโนโลยีประเภทต่างๆ สำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน c-Si ที่ได้นำเสนอและดำเนินการ



ภาพที่ 4.24 เทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน c-Si [38]

ปัจจุบันเทคโนโลยีกำลังพยายามที่จะกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนตออกเพื่อแยกแก้วและวัสดุอื่นๆ นำโลหะออกจากเซลล์ Si และ Electrodes วิธีที่มีประสิทธิภาพในการถอดเฟรมและกล่องขั้วต่อจะรวมอยู่ในกระบวนการก่อนที่จะกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างแบบเคลือบ (ภาพที่ 4.24)

การกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนตยังคงเป็นกระบวนการที่ยากที่สุดในการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากวิธีการทางความร้อนที่ต้องได้รับการปรับปรุงแล้ว กระบวนการทางกลเพิ่งได้รับการพัฒนา ในอนาคตข้างหน้าแนวทางทางเคมีน่าจะถูกรวมเข้าด้วย

ในที่นี้ โครงร่างของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีล่าสุดสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si PV ได้อธิบายและจัดกลุ่มตามวิธีการทางความร้อน ทางกล และทางเคมีสำหรับการกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบด้วยลามิเนต

4) การรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si ด้วยวิธีผสมผสาน

วิธีการทางเคมีถูกนำมาใช้ในระยะเวลาแรก แม้ว่าความเป็นไปได้ทางเทคนิคในการกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนตจะได้รับการยืนยันแล้ว พบว่าต้องวางแผนและมีมาตรการเพื่อรับมือการปล่อยก๊าซและของเหลวที่อาจส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมได้ เวลาที่ใช้เวลานานเกินไปในการทำปฏิกิริยา เพื่อปรับปรุงในประเด็นดังกล่าว โดยการพัฒนาเทคโนโลยีหลายอย่าง

Yokohama Oils & Fats Industry ได้พัฒนาตัวทำละลายและกระบวนการสำหรับการกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต [27] ขั้นแรก โครงสร้างอลูมิเนียมและกล่องขั้วต่อถูกแยกออกจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV ด้วยมือ และแผ่นรองหลังจะถูกแยกออกเครื่องจักร ถัดไปโครงสร้างลามิเนตที่เหลือถูกแช่ในตัวทำละลายที่เป็นกลาง แก้วและชั้นต่างๆของสารหล่อหุ้ม (EVA) เซลล์ Si และอิเล็กโทรด (electrodes) ถูกแยกออกจากกัน โดยปกติแล้วกระจกที่ถูกแยกจากกันจะไม่เกิดความเสียหายและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยง่าย ขั้นต่อไป ขั้นที่เหลือถูกบดและแช่ในตัวทำละลายอัลคาไล (alkali) หลังจากขั้นตอนการแช่สารหล่อหุ้ม EVA แล้ว ซิลิคอนและริบบอนอิเล็กโทรดก็ถูกกู้คืน ในการกู้คืน Ag ที่ติดอยู่กับซิลิคอน (silicon) นั้นจำเป็นต้องมีกระบวนการเพิ่มเติม เวลาดำเนินการประมาณหนึ่งวันสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เชิงพาณิชย์ แม้ว่ากระบวนการกู้คืนจะต้องใช้เวลานาน แต่ตัวทำละลายที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับกรดและสารอินทรีย์ ดังนั้นตัวทำละลายจะมีประสิทธิภาพหากใช้ร่วมกับกระบวนการแยกแก้วและการแยกโลหะ (กล่าวคือ หลังจากการบด การเจียร และการตัด)

สถาบันวิจัยเทคโนโลยีเคมีแห่งเกาหลี (Korea Research Institute of Chemical Technology; KRCT) ร่วมกับมหาวิทยาลัยแห่งชาติ Kangwon (Kangwon National University) ได้พัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการละลายสารหล่อหุ้ม EVA โดยการแช่ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ลงในตัวทำละลายอินทรีย์และใช้ร่วมกับการฉายรังสีอัลตราซาวนด์ (ultrasound irradiation) [28] วัตถุประสงค์ของการใช้การฉายรังสีอัลตราซาวนด์ (ultrasound irradiation) เพื่อลดเขยื้อนข้อบกพร่องของการแยกสารเคมีซึ่งโดยทั่วไปต้องใช้เวลาในการกู้คืนนาน สารหล่อหุ้ม EVA ถูกแช่สารละลายที่ 70 องศาเซลเซียส และที่กำลังการฉายรังสีที่ 900 วัตต์ แล้วเซลล์ Si ถูกนำกลับคืนมาโดยไม่มี ความเสียหาย

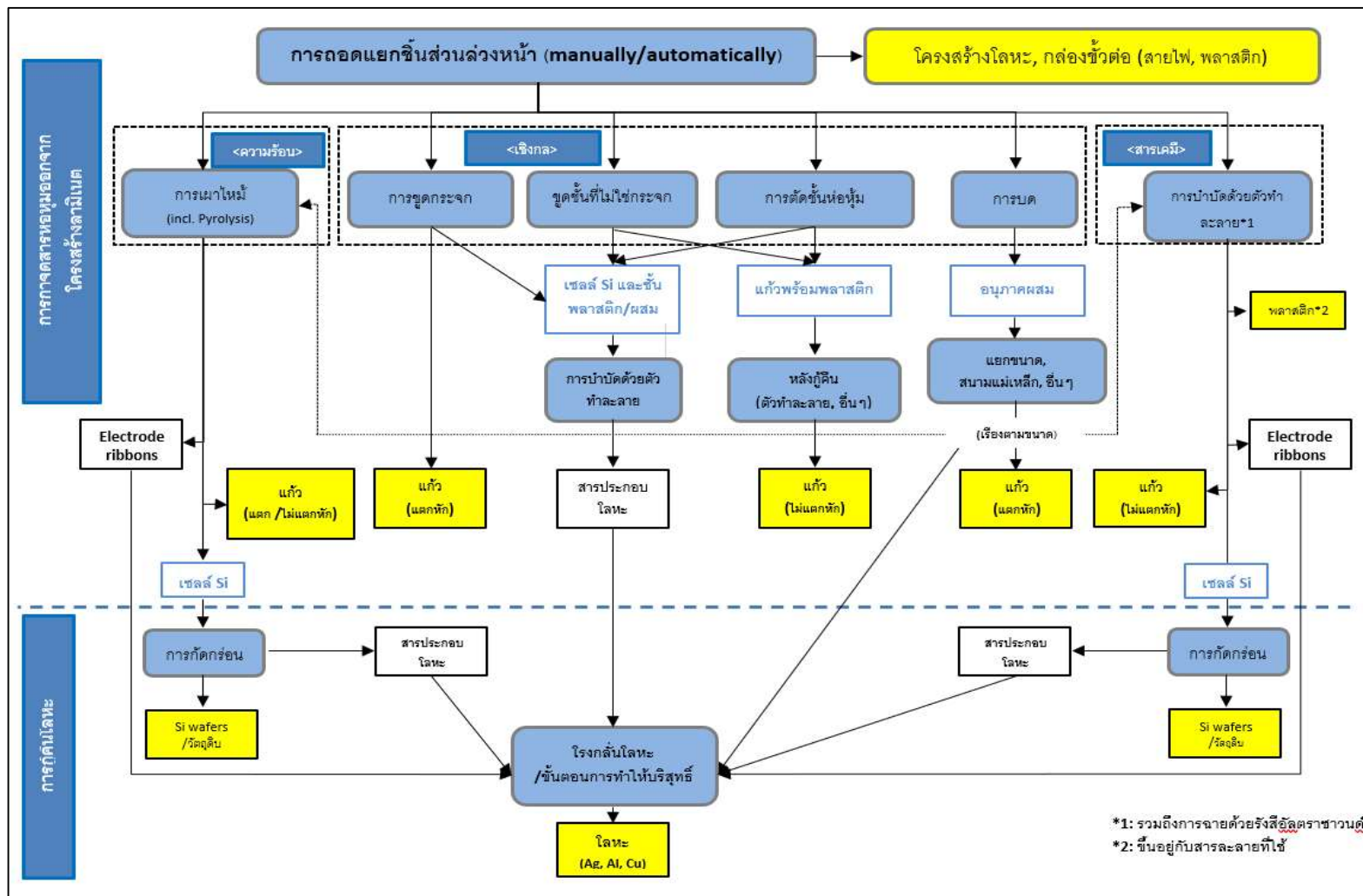
ในเทคโนโลยีทั้งสอง จำเป็นต้องมีกระบวนการเพิ่มเติมสำหรับการกู้คืนโลหะจากซากเซลล์ Si หลังจากกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างเคลือบลามิเนต (laminated) อย่างไรก็ตาม บางเทคโนโลยีต้องอาศัยวิธีการทางความร้อนและทางกลร่วมกัน ตัวอย่างเช่น การใช้กรด (acid) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxide) สำหรับการกัดกร่อนด้วยสารเคมีก็เป็นไปได้

นอกจากนี้ Loser Chemie ยังได้พัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้อลูมิเนียมคลอไรด์ (aluminum chloride) และน้ำ [29] อลูมิเนียมอิเล็กโทรด (aluminum electrodes) ที่อยู่ด้านหลังเซลล์ Si สามารถกู้คืนได้ด้วยพอลิ-อลูมิเนียม-คลอไรด์ (poly-aluminum-chloride) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการบำบัดน้ำเสีย เงินที่เหลือที่หน้าสัมผัสสามารถละลายได้ด้วยกรดไนตริก (nitric acid)

ในขณะที่การวิจัยพัฒนาสำหรับวิธีการทางกลเพิ่มมากขึ้น ปรากฏว่าวิธีการทางเคมีสำหรับการกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบลามิเนตนั้นลดน้อยลง เนื่องจากวิธีการทางเคมีโดยทั่วไปนั้นต้องใช้เวลาในการกู้คืนนาน และอาจไม่เหมาะสมเป็นวิธีการกู้คืนแบบมวลรวม (mass-treatment) แม้ว่าปัญหาสิ่งแวดล้อมจะได้รับการจัดการแล้ว อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้อาจเหมาะสมสำหรับการบำบัดในสถานที่ และมีขนาดเล็ก เช่น แนวทางที่สามารถทำงานได้ในโรงงานผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน c-Si

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ละโครงการวิจัยและพัฒนาสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ทำการทดสอบกระบวนการที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์และประสบการณ์ กระบวนการเหล่านี้ถูกสังเคราะห์และสร้างเป็นแผนผังไว้ (ภาพที่ 4.25)

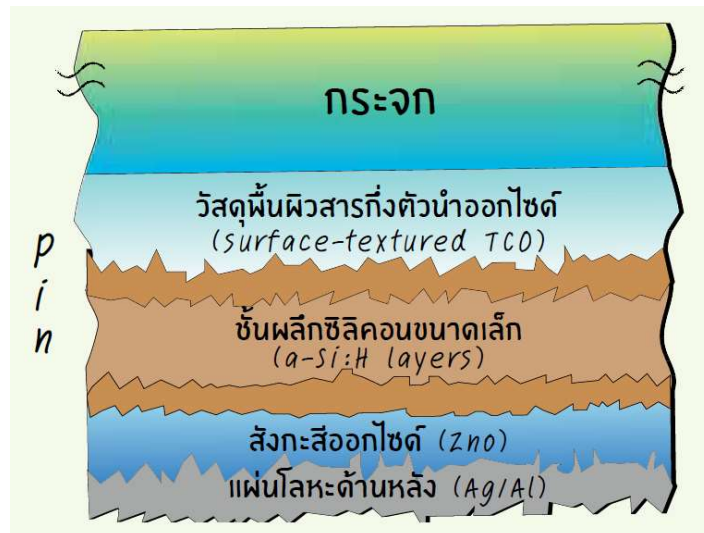
คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์



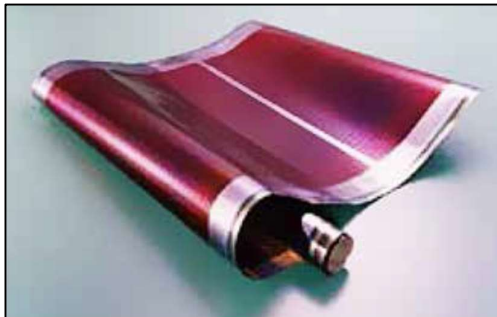
ภาพที่ 4.25 กระบวนการและแผนผังสรุปสำหรับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน [38]

4.6.2 วิธีการจัดการและการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน เกิดขึ้นในช่วงที่มีการขาดแคลนวัสดุซิลิคอน ผู้ผลิตจึงได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ปริมาณซิลิคอนน้อยลง การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นการเคลือบสารหรือเคลือบฟิล์มซิลิคอนลงบนวัสดุตั้งต้นเท่านั้น โครงสร้างและส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จึงประกอบด้วยวัสดุตั้งต้นซึ่งอาจจะเป็นกระจก หรือ พลาสติกฟิล์ม เป็นต้น การจัดการกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ภายหลังจากครบอายุการใช้งานแล้ว จะต้องนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อแยกวัสดุและสารเคลือบผิวออกจากกันเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน (ภาพที่ 4.26 - 4.27)



ภาพที่ 4.26 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน



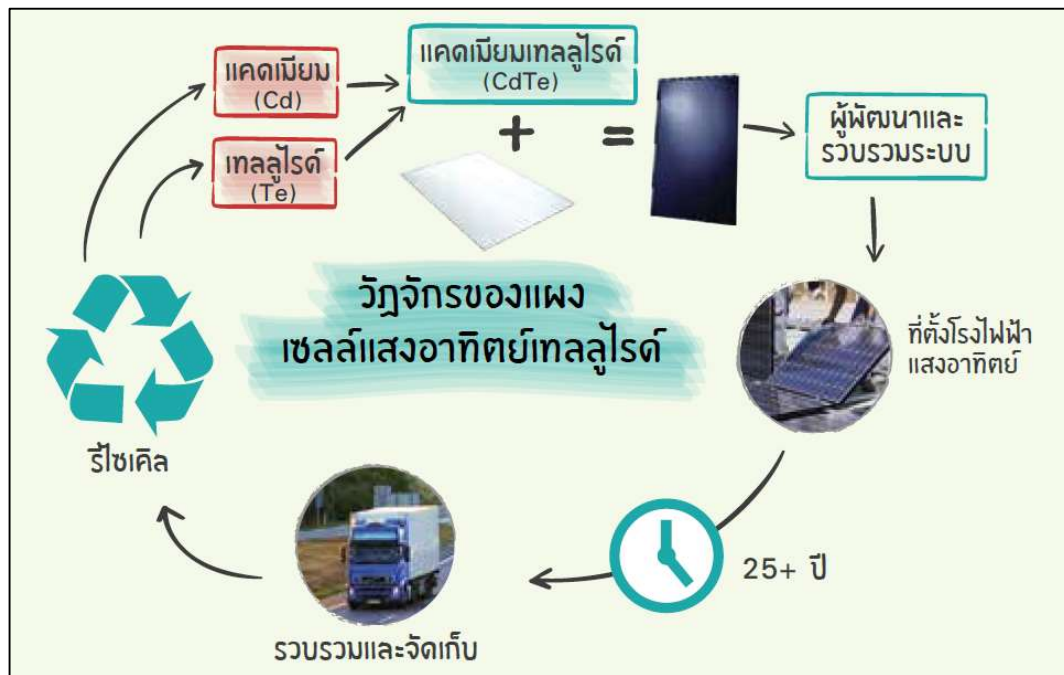
ภาพที่ 4.27 ลักษณะตัวอย่างรูปแบบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

ที่มา : Miro Zeman, 2012

ปัจจุบันยังไม่มี การนำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนกลับมาใช้ใหม่ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เพิ่งเริ่มใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้ไม่นานมานี้ ส่วนใหญ่จึงอยู่ในขั้นตอนการศึกษาและวิจัย

4.6.3 วิธีการจัดการและการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม

สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์นั้น บริษัทซึ่งถือว่ามีบทบาทสำคัญและเป็นผู้นำเทคโนโลยีนี้ คือ บริษัท First Solar แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์จะมีช่วงเวลาในการใช้งานเช่นเดียวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่นกล่าวคือ จะมีระยะเวลาใช้งานประมาณ 2 - 25 ปี ซึ่งหลังจากผ่านการใช้งานตามระยะเวลาแล้ว บริษัทผู้ผลิตจะทำการเรียกเก็บแผงกลับโรงงานเพื่อเข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการจัดการกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ซึ่งมีวัฏจักรของแผงเซลล์ (ภาพที่ 4.28)

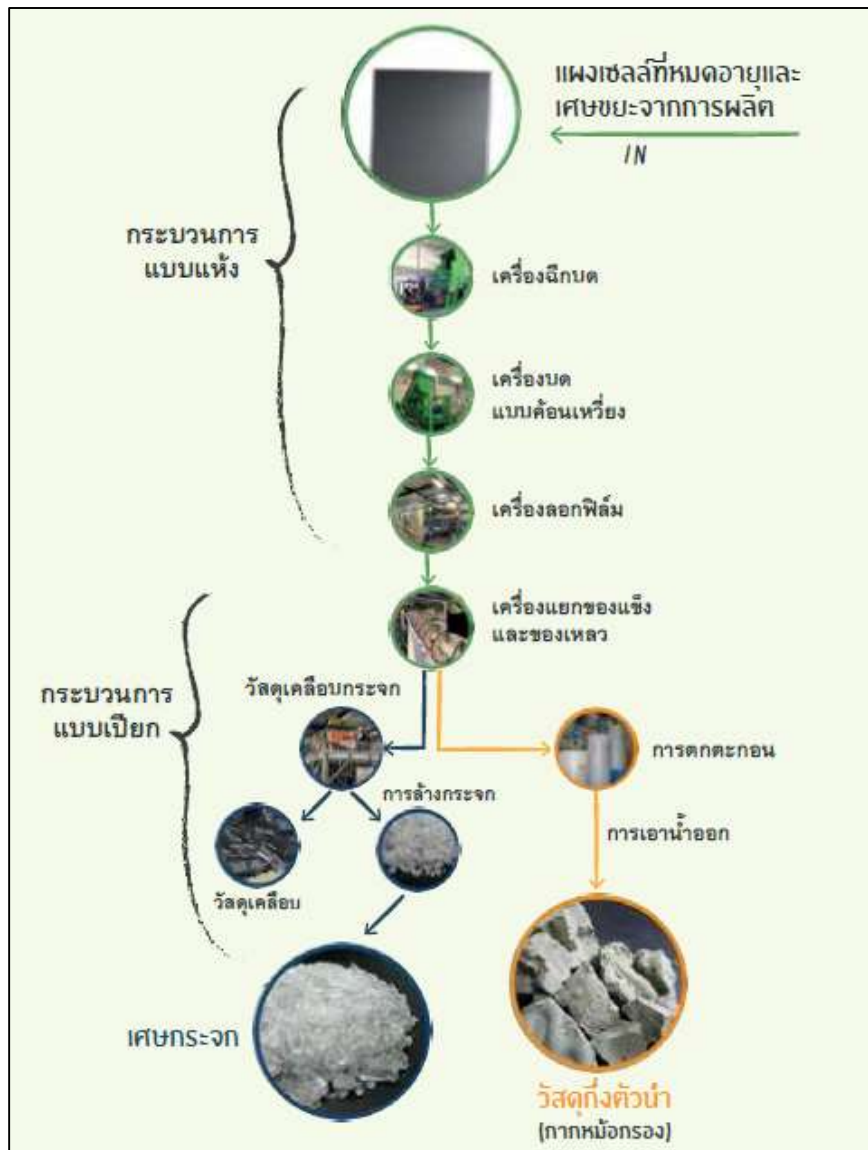


ภาพที่ 4.28 วัฏจักรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมเทลลูไรด์ CdTe

ที่มา : <http://www.firstsolar.com>

ขั้นตอนการจัดการกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เพื่อกลับมาใช้ใหม่ในขั้นตอนการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมเทลลูไรด์กลับมาใช้ใหม่ จะขออ้างอิงกระบวนการของบริษัท First Solar เป็นหลัก โดยได้สรุปแนวทางของกระบวนการจัดการกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ตามแผนผัง (ภาพที่ 4.29)

ขั้นตอนการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมเทลลูไรด์



ภาพที่ 4.29 ขั้นตอนการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมเทลลูไรด์

ที่มา : <http://www.firstsolar.com>

ขั้นตอนในการจัดการกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ มา กระบวนการดังต่อไปนี้

1) การบดหยาบ (shredder) โดยจะนำแผงเซลล์ที่เรียกเก็บมาจากพื้นที่ติดตั้งทำการแยกกรอบอลูมิเนียม และกล่องพักไฟฟ้า (junction box) ออกแล้วนำเข้าสู่กระบวนการบดหยาบ

2) การบดละเอียด (hammer mill) ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการบดหยาบแล้วกระบวนการต่อไปจะเป็นขั้นตอนการบดละเอียด โดยเมื่อเสร็จสิ้นการบดละเอียดแล้วจะทำให้ได้ชิ้นส่วนแผงเซลล์ขนาดเล็กประมาณ 4-5 มิลลิเมตร ก่อนจะเข้านำเข้าสู่กระบวนการต่อไป

3) การลอกฟิล์ม (film removal) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบดละเอียดจะถูกลำเลียงเข้าสู่กระบวนการลอกฟิล์ม โดยเศษชิ้นส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกกัดด้วยกรดภายในถังปฏิกิริยาที่จะมีการหมุนอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดการกัดอย่างทั่วถึง

4) การคัดแยกระหว่างของแข็งและของเหลว (solid-liquid separation) หลังจากที่ผ่านมาการกัดด้วยกรดแล้ว ส่วนผสมระหว่างกระจกและของเหลวที่ผ่านกระบวนการกัดจะถูกกรองและคัดแยกให้เป็นส่วนของเหลว ซึ่งจะมีส่วนประกอบของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) จะละลายอยู่ในส่วนนี้ และในส่วนของกระจกและฟิล์มห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ (EVA) นั้นจะถูกคัดแยกรวมกันเป็นส่วนหนึ่งของแข็งเพื่อเข้าสู่กระบวนการถัดไป

5) การกรองวัสดุสารกึ่งตัวนำ (material-rich filter cake) หลังจากสารละลายที่มีส่วนผสมของสารกึ่งตัวนำและตัวทำละลายถูกแยกจากกระจกและฟิล์มห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ (EVA) แล้ว สารกึ่งตัวนำที่ปนอยู่กับของผสมระหว่างตัวทำละลายจะถูกกรองให้เหลือเฉพาะสารกึ่งตัวนำอีกครั้ง ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการนี้แล้วพบว่าสามารถได้สารกึ่งตัวนำที่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีกถึงร้อยละ 95

6) การแยกของแข็ง (glass-laminate screen) สำหรับส่วนของๆ แข็งที่ประกอบไปด้วยกระจกและฟิล์มห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ (EVA) นั้นก็จะถูกคัดแยกอีกด้วยวิธีการคัดกรองด้วยการสั่นสะเทือน (vibration screen) อีกครั้ง จนในที่สุดเมื่อสิ้นสุดกระบวนการจะทำให้ได้กระจกประมาณร้อยละ 90 ของปริมาณตั้งต้น

ในส่วนของเซลล์คอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดเซเลไนต์ จะมีขั้นตอนการนำกลับมาใช้ใหม่เช่นเดียวกับชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) เนื่องจากเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่มีกระบวนการผลิตคล้ายคลึงกัน แตกต่างกันเฉพาะสารเคมีที่ใช้เท่านั้น

4.6.3.1 การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีต่างประเทศที่เกี่ยวกับการรีไซเคิลโมดูล PV แบบผสม

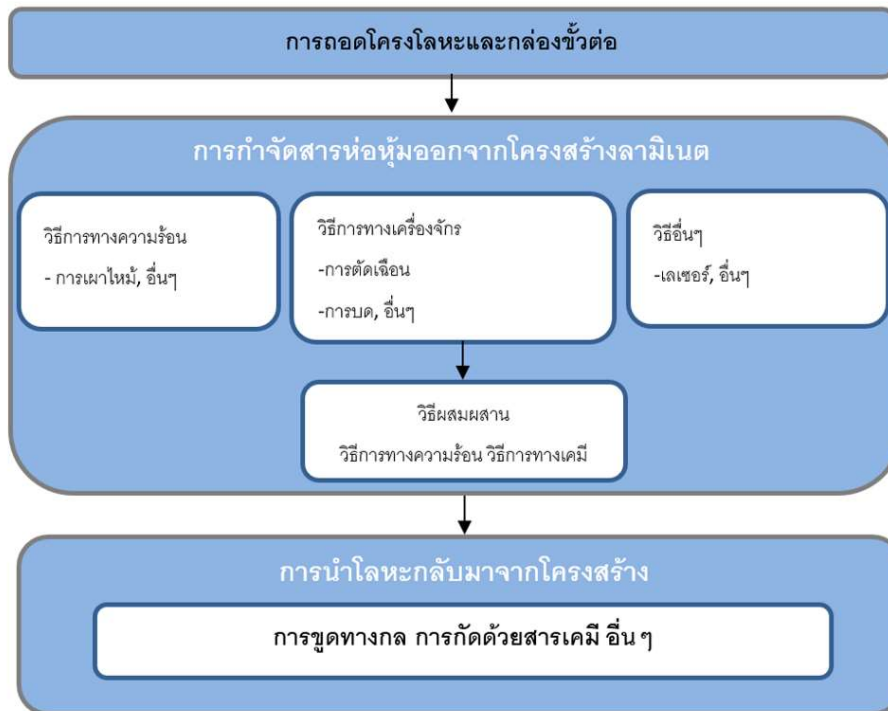
สารประกอบ CdTe และชั้น CIGS ชั้นของสารประกอบถูกติดอยู่บนพื้นผิว เช่น แก้ว ดังนั้น เทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้จำเป็นต้องมีการกำจัดสารห่อหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบลามิเนต เช่น การแยกสารตั้งต้นที่มีสารประกอบและวัสดุห่อหุ้ม และการนำโลหะออกจากพื้นผิว

ในระยะแรก ส่วนใหญ่ต้องใช้กระบวนการทางเคมี เซลล์แสงอาทิตย์ [30] ได้พัฒนาวิธีการกัดกร่อนสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) หลังจากบดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV ด้วยเครื่องบดอัด (hammer mill) ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บดแล้วจะได้รับกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) เยื่อหุ้ม EVA จะถูกแยกออกจากแก้ว และ Cd, Te จะถูกกู้คืนเป็นสารประกอบ สารประกอบ Cd และ Te ถูกบำบัดด้วยโซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) และแคดเมียมคาร์บอเนต (cadmium carbonate) และเทลลูเรียมออกไซด์ (tellurium oxide) ถูกนำกลับคืนมา Cd และ Te ถูกกู้คืนได้โดยกระบวนการทางความร้อนหรือทางเคมี และทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการกลั่นโลหะ ปัจจุบันเทคโนโลยีของ First solar เป็นไปตามวิธีการดังที่กล่าวข้างต้น เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการกู้คืนโลหะจากสารตั้งต้นที่แยกออกจากกัน Drinkard Metalox [31] และ

Inter Phase Research [32] พยายามที่จะพัฒนาวิธีการไฟฟ้าเคมีสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม แคดเมียมเทลลูไรด์ CdTe และ CIS

ปัจจุบัน วิธีการทั่วไปคือกระบวนการทางกลและทางเคมีร่วมกัน ได้รับการพัฒนาและจำหน่ายโดย First solar การกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบลามิเนตและโลหะที่นำกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ หลายองค์กรกำลังพัฒนาเทคโนโลยีหลายอย่าง สำหรับการกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบด้วยลามิเนต ได้มีการศึกษาวิธีการทางความร้อน ทางกล และมีการศึกษาวิธีการทางเลเซอร์

แผนผังแสดงถึงการมุ่งเน้นการวิจัยและพัฒนาล่าสุดในการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV แบบผสม (ภาพที่ 4.30)



ภาพที่ 4.30 การวิจัยและพัฒนาล่าสุดสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม [38]

1) การรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมด้วยวิธีการทางความร้อน

ตามที่กล่าวไว้ในการอภิปรายเกี่ยวกับเทคโนโลยีสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม

PV FAIS และบริษัทอื่นๆ ได้พัฒนาเทคโนโลยีที่จะใช้ได้กับ ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม CdTe, ฟิล์มบาง และ CIGS [10] เทคโนโลยีการรีไซเคิลประกอบด้วยสี่ขั้นตอนหลักในการถอดโครงสร้าง อลูมิเนียม การถอดแผ่นรองด้านหลัง การเผาไหม้เรซิน EVA สำหรับการรีไซเคิลด้วยความร้อน ในขั้นตอนแรก โครงสร้างอลูมิเนียมจะถูกแยกออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกระบอกลม (actuator) ขั้นตอนต่อไป เครื่องกัด (milling) จะแยกแผ่นรองด้านหลังออกเพื่อป้องกันไม่ให้กระจกของของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แตกร้าวด้วยความร้อน จากนั้นของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีโครงอลูมิเนียมและแผ่นรองด้านหลังจะถูกให้ความร้อน เรซิน EVA จะถูกย่อยสลายด้วยความร้อนในเตาหลอม หลังจากนั้นก๊าซเสียจากการสลายตัวจะถูกดูดออกและ

เผาทิ้งต่อไป ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของเรซิน EVA จะถูกนำไปใช้ในเตาเผาอีก หลังจากผ่านทั้งสามกระบวนการ พื้นผิวกระจกที่มีชั้น CIGS และฝาครอบกระจกถูกนำกลับมาใช้ใหม่จากเซลล์แสงอาทิตย์ CIGS โครงการ Solar Frontier ได้พัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการชุบชั้น CIGS บนกระจกพื้นผิวด้วยแปรงลวด โลหะ CIGS จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านตัวดักเก็บไซโคลน (cyclone collector) แล้วนำไปรีไซเคิลโดยโรงกลั่นโลหะ

Accurec recycling นำวิธีการที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีการกลั่นด้วยสุญญากาศไพโรไลซิ (vacuum-distillation pyrolysis) ภายใต้โครงการ Photorec [21] แม้ว่ารายละเอียดจะไม่ชัดเจน แต่หลังจากการถอดโครงสร้างและกล่องชั่วคราวแล้ว ชิ้นส่วนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV ได้ถูกเตรียมโดยการปรับสภาพล่วงหน้า แล้วกลั่นด้วยเครื่องไมโครเวฟแบบสุญญากาศ (microwave vacuum distillation) และกระบวนการแยกทางกล (mechanical separation) โลหะ อย่างเช่น อินเดียม (indium; In), แกลเลียม (gallium; Ga) และ เทลลูเรียม (tellurium; Te) รวมถึง แก้ว จะถูกกู้คืนจากชิ้นส่วนซากเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อได้เปรียบของกระบวนการทางความร้อนคือ การนำกระจกกลับมาใช้ใหม่โดยไม่มีความเสียหายหรือการปนเปื้อน เนื่องจากไม่ได้ใช้กระบวนการปรับสภาพเชิงกลล่วงหน้า และในทางกลับกัน หากต้องการกู้คืนโลหะกลับมาใช้ใหม่จากแก้วจะต้องมีกระบวนการทางเคมี เพิ่มเติม การใช้แก้วที่ผ่านการบดแล้วจะเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วของปฏิกิริยาเคมีได้ดีขึ้น

2) การรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมด้วยวิธีการทางกล

วิธีการทางกลสำหรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV แบบผสม สามารถทำได้โดยการบดและการตัดชิ้นของการห่อหุ้มได้ เช่นเดียวกับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si วิธีการดังกล่าวเป็นกระบวนการสลายโครงสร้างลามิเนต โดยมีกระบวนการเพิ่มเติมสำหรับการนำโลหะกลับคืนจากพื้นผิวกระจก ความแตกต่างที่มีนัยสำคัญระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si และแบบผสมคือ ชั้นเซมิคอนดักเตอร์แบบผสม (compound semiconductor layer) เคลือบบนพื้นผิวกระจก ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si จะแยกออกจากฝาครอบกระจกและแผ่นรองหลัง/กระจกด้านหลัง

First solar (2558) ได้จำหน่ายเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe PV ซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่างกระบวนการบำบัดทางกลและกระบวนการทางเคมี เทคโนโลยีนี้เกี่ยวข้องกับ การหั่นย่อย (shredding) และบดละเอียด (crushing in a hammer mill) ให้เป็นอนุภาคขนาดเล็กประมาณ 5 มิลลิเมตร เพื่อทำลายพันธะเคลือบ ส่วนฝุ่นละอองที่เกิดระหว่างกระบวนการจะถูกรวบรวมในระบบดูดซึ่งติดตั้งแผ่นกรองอากาศแบบอนุภาคประสิทธิภาพสูง ลำดับต่อไปเป็นการกักกรองของชิ้นสารกึ่งตัวนำที่มีส่วนผสมของกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) แก้วและชิ้นส่วนขนาดใหญ่ของ EVA (ethylene-vinyl acetate) ถูกแยกจากกัน เครื่องแยก (classifier) และเครื่องร่อนแบบสั่น (vibrating screen) จากนั้นทำความสะอาดแก้วด้วยน้ำและทำให้แห้งบนเครื่องกรองแบบสายพาน (belt filter unit) ท้ายสุดของเหลวที่มีโลหะผสมจะถูกแยกโดยเครื่องแลกเปลี่ยนไอออน (extracted via ion exchangers) หรือเครื่องตกตะกอน (precipitated) แคดเมียม (Cd) และเทลลูเรียม (Te) สามารถกู้

คืนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในอุตสาหกรรมพลังงานแสงอาทิตย์ First solar ในเยอรมนี เริ่มใช้งานเทคโนโลยีครั้งแรก รุ่นแรกในปี 2549 (10 ตัน/วัน) รุ่นที่สองเป็นการพัฒนาของเทคโนโลยีและได้ดำเนินการในสหรัฐอเมริกาและมาเลเซียในปี 2554 (30 ตัน/วัน) และรุ่นที่สามเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีในประเทศสหรัฐอเมริกา ปี 2558 (50 ตัน/วัน) [33] เทคโนโลยีรุ่นที่สามเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง (continuous process) ในขณะที่รุ่นก่อนหน้าเป็นกระบวนการแบบชุด (batch processes) และรุ่นที่ 4 คาดว่าจะพัฒนาให้มีกำลังการผลิต 350 ตัน/วัน นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีขนาดเล็กในสถานที่เพื่อลดต้นทุนการขนส่ง

มหาวิทยาลัย Sapienza แห่งกรุงโรม (Sapienza University of Rome) ได้ใช้เครื่องบดย่อยอัตโนมัติภายใต้โครงการ Photolife ในยุโรป [24] ซึ่งได้อธิบายว่าเป็นเทคโนโลยีประเภทหนึ่งสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si PV กระบวนการกู้คืนของโครงการนี้คือ การรื้อโครงสร้างอลูมิเนียมด้วยมือ การย่อยโครงสร้างลามิเนตและกระจกแยกโดยอัตโนมัติ และการกู้คืนโลหะเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โครงการนี้ครอบคลุมของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe PV นอกเหนือจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก c-Si และชนิดฟิล์มบาง a-Si มีการทดสอบกระบวนการหั่นย่อย สองวิธีดังนี้

วิธีที่หนึ่ง การบดอย่างง่ายด้วยใบพัดสองใบมีด (two-bladed rotor)

วิธีที่สอง การบดด้วยใบพัดสองใบมีด (two-bladed rotor) แล้วตามด้วยการบดทุบ (crushing with a hammer) ชิ้นงานที่ผ่านการบดแล้วจะแยกบับัดตามขนาด คือ

ส่วนที่ 1 ชิ้นงานที่มี $d > 1$ มิลลิเมตร จะถูกเผาไหม้ที่ 650 องศาเซลเซียส เพื่อแยกพอลิเมอร์

ส่วนที่ 2 ชิ้นงานที่มีขนาด $1 \text{ มิลลิเมตร} > d > 0.08$ มิลลิเมตร จะถูกกู้คืนมาโดยตรงเป็นแก้ว

ส่วนที่ 3 ชิ้นงานที่มีขนาด $d < 0.08$ มิลลิเมตร จะได้รับการบับัดและกู้คืนโดย กระบวนการ Hydrometallurgical เพื่อนำโลหะกลับมาใช้ใหม่

โครงการ Reclaim (Reclamation of Gallium, Indium, and Rare-earth Elements from Photovoltaics, Solid-State Lighting, and Electronics Waste) ที่นำโดย Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (ประเทศเนเธอร์แลนด์) มีเป้าหมายเพื่อมุ่งแก้ปัญหาและพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลแกลเลียม (gallium) อินเดียม (indium) และ ธาตุหายากจากเซลล์แสงอาทิตย์ (CIGS) ไฟส่องสว่างโซลิดสเตต (solid-state lighting) และขยะอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น จอแบนและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ [34] ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ CIGS ถูกบดและแยกขนาดกระจกฝาครอบและพื้นผิวกระจกที่มีชั้น CIGS จะถูกแยกและนำกู้คืน [35] พื้นผิวกระจกที่กู้คืนจะได้รับการบับัดทางเคมีด้วยกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) และโลหะหายาก เช่น อินเดียม (indium; In) และ แกลเลียม (gallium; Ga) จะถูกกู้คืน โลหะที่นำกลับมาใช้ใหม่จะถูกทำให้บริสุทธิ์โดยกระบวนการทางเคมีเพิ่มเติม

เป็นแนวทางทางกลอีกวิธีหนึ่ง Solar frontier กำลังพัฒนาวิธีการแยกสารทอหุ้มทอหุ้มโดยใช้หัวกัดแบบทำความร้อน [36] หลังจากการถอดโครงอลูมิเนียม และกล่องขั้วต่อแล้ว ใบมีดจะถูกแทรกกระหว่างฝาครอบกระจกกับพื้นผิวกระจก ปัจจุบันความเร็วในการกู้คืนคือ 400 วินาทีต่อชิ้น (เชิงพาณิชย์) นำฝาครอบกระจกซึ่งยังมีสารทอหุ้ม EVA ติดอยู่บางส่วน กระจกพื้นผิวที่มีชั้น คอปเปอร์ อินเดียม แกลเลียม เซเลไนต์

(copper indium gallium selenide; CIGS) โมลิบดีนัม (molybdenum; Mo) และพอลิเมอร์บางตัวก็ถูกนำกลับมาใช้เช่นกัน แม้ว่าตามปกติแล้วพื้นผิวจะแตกหักก็ตาม แก้วทั้งสองประเภทผ่านการบำบัดทางเคมี แก้วและโลหะก็ถูกกู้คืนกลับมาใช้ใหม่ ในปัจจุบันจะใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) เพื่อแยกสารห่อหุ้ม EVA แม้ว่าตัวทำละลายสำหรับการแยกโลหะจะอยู่ระหว่างการทดสอบ ตัวทำละลายที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก

ปรากฏว่าการผสมผสานระหว่างกระบวนการทางกลและทางเคมีเป็นวิธีการที่มีแนวโน้มดี นอกจากการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการแล้ว ตัวทำละลายที่ใช้จะต้องเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและต้องลดปริมาณการใช้ลง และการเพิ่มกระบวนการจัดการน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีนั้นเป็นสิ่งจำเป็น

3) การรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมด้วยวิธีการทางแสง

วิธีการทางแสง เป็นอีกทางเลือกที่ไม่ซ้ำกันกับวิธีการที่มีอยู่ Loser chemise ได้พัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทางแสงสำหรับการแยกโครงสร้างแก้วและโครงสร้างแก้ว [37] หลังจากการถอดโครงสร้างและกล่องชั่วคราวแล้ว ของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV จะถูกใส่ลงในอุปกรณ์บำบัดด้วยแสงโดยอัตโนมัติ สำหรับวิธีการกู้คืนด้วยแสงนั้นมีสองวิธีการ วิธีการแรกคือการใช้เลเซอร์ วิธีการที่สองคือการอบอ่อนด้วยแสงแฟลช เวลาในการกู้คืนคือหนึ่งนาที่ต่อชิ้น (เชิงพาณิชย์) หลังจากผ่านกระบวนการ ผ่าครอบกระจกครอบและชั้นของพื้นผิวที่มีกระจกผสมจะถูกแยกออกจากกัน แล้วสารประกอบ เช่น CIGS และ CdTe ได้รับการบำบัดด้วยวิธีการทางเคมีโดยใช้กรดมีเทนซัลโฟนิก (methane sulfonic acid) ชั้นโลหะสามารถแยกออกและนำกลับมาใช้ใหม่เป็นสารประกอบโลหะของโลหะแต่ละชนิด จากนั้นนำไปรีไซเคิลและทำให้บริสุทธิ์โดยโรงกลั่นโลหะ

เทคโนโลยีนี้สามารถกู้คืนกระจกได้โดยไม่มีความเสียหายหรือการปนเปื้อน และสามารถนำกระจกไปใช้ในกระบวนการผลิตได้

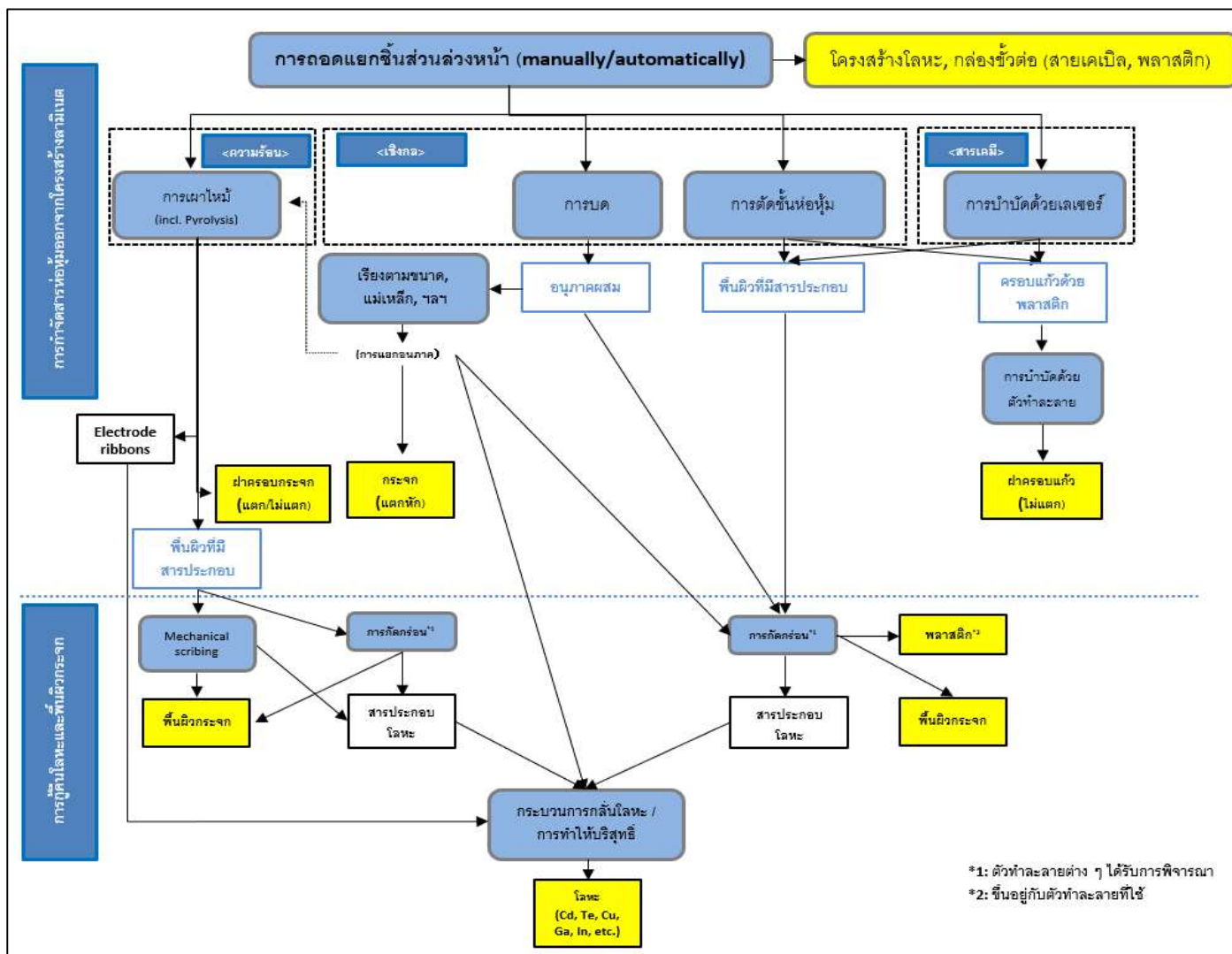
สรุปเทคโนโลยีการรีไซเคิลสำหรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น (ตารางที่ 4.10) นอกจากนี้ ภาพที่ 4.31 ยังแสดงแผนผังของกระบวนการรีไซเคิลสำหรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม

คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

ตาราง 4.10 การออกแบบพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม [38]

	วิธีการทางความร้อน		วิธีการทางกล				วิธีการทางแสง	
	FAIS and others (Japan)	Accuracy recycling (Germany)	First Solar (USA)	Sapienza Univ. and others (Italy)	TNO (Netherlands) and others	Solar Frontier (Japan)	Losser Chemise (Germany)	
ขั้นตอนการกำจัดสารถือออกจาก	กระบวนการและเงื่อนไข	การเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 350° และ 500°C	การกลั่นสุญญากาศ Pyrolysis, หลังขั้นตอนการถอดประกอบ	การบดย่อยและการบดละเอียด	การบดด้วยใบพัดสองใบมีด และการบดอัดเป็นทางเลือกเพิ่มเติม	หั่น ร่อน และแยกด้วยโต๊ะลม	การตัดชิ้นการทอหุ้มด้วยใบมีดความร้อน	การกู้คืนด้วยแสงโดยใช้เลเซอร์หรือหลอดแสง
โครงสร้างลามิเนต	วัสดุหลังกู้คืน	พื้นผิวกระจก ฝาครอบแก้ว โลหะอิเล็กทรอนิกส์	โลหะเช่น In, Ga และ Te และ ส่วนผสมของแก้ว และโพลีเมอร์	ซากเซลล์แสงอาทิตย์ (ส่วนผสมของแก้ว โพลีเมอร์ และอื่นๆ) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 มม.	แยกชิ้นส่วนตามขนาดอนุภาค : $d > 1$ มม., 1 มม. $> d > 0.08$ มม., และ 0.08 มม. $> d$	เศษฝาครอบแก้ว ชิ้นส่วนของ EVA และ พื้นผิวกระจกที่มีชั้น CIGS	ฝาครอบกระจกที่ติด EVA, พื้นผิวกระจกที่มีชั้น CIGS	ฝาครอบกระจกที่ติด EVA, พื้นผิวกระจก มีชั้นสารกึ่งตัวนำ
	หมายเหตุ	ระบบควบคุมอัตโนมัติ การนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่จากการเผาไหม้ของ EVA สามารถใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si, พิล์มบาง Si และ CIS เซิงพาณิชย์ ขั้นตอนการสาธิตที่โรงงานต้นแบบ	เกล็ดเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกเตรียมในขั้นตอนการปรับสภาพเบื้องต้น การกลั่นโลหะ	เทคโนโลยีเชิงพาณิชย์ รวมทั้งกระบวนการทางเคมีแบบผสมผสาน (50 ตัน/วัน) มีการวางแผนปรับขนาดและพัฒนาเทคโนโลยีขนาดเล็กในพื้นที่	อนุภาคขนาด 1 มม. $> d > 0.08$ มม.. สามารถกู้คืนและรีไซเคิลเป็นแก้วได้ ใช้ได้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si, แบบฟิล์มบาง Si และ CdTe	-	-	เลเซอร์จะใช้ได้เฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ที่ยังไม่แตกหักเท่านั้น หลอดแสงจะเหมาะสมสำหรับทั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกและไม่ร้าว
กระบวนการแบบผสมสำหรับการกู้คืนแก้วและโลหะจากพื้นผิว	กระบวนการและเงื่อนไข	การชุบพื้นผิวกระจกทางกล	การแยกส่วนผสมทางกลของส่วนผสมที่เหลืออยู่	การกัดกร่อนสารกึ่งตัวนำของชั้นพื้นผิวกระจกด้วยกรดซัลฟิวริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การแยกของเหลวและสารประกอบโลหะ	การเผาไหม้ที่ 650 °C สำหรับอนุภาคที่มีขนาด $d > 1$ มม. กระบวนการ Hydrometallurgical สำหรับอนุภาคที่ 0.08 มม. $> d$	กัดกร่อนด้วยกรดซัลฟิวริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 80°C การกัดกร่อนและการทำให้บริสุทธิ์ด้วยกรด	การบำบัดด้วยสารเคมี	การบำบัดด้วยเคมี การใช้กรรมวิธีโซลโฟนิค
	วัสดุหลังกู้คืน	โลหะ CIGS, เศษแก้ว	เศษแก้ว	เศษแก้ว สารประกอบโลหะ	ไม่มี	อินเดียม แกลเลียมและเศษแก้ว	แก้ว และ สารประกอบโลหะ	แก้ว และ สารประกอบโลหะ
	หมายเหตุ	โลหะ CIGS ถูกรีไซเคิลโดยโรงกลั่นโลหะ	พอลิเมอร์ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิง	สารประกอบโลหะได้รับการกลั่นโดยโรงกลั่นโลหะ และโลหะถูกรีไซเคิลเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ PV	โพลีเมอร์ถูกเผาไหม้	-	ในปัจจุบัน มีการใช้ตัวทำละลายและตัวทำละลายที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นหลัก	สารประกอบโลหะได้รับการกลั่นโดยโรงกลั่นโลหะ

คู่มือการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 4.31 กระบวนการและแผนผังสรุปสำหรับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม [38]

4.7 กระบวนการปรับเสถียร และการฝังกลบของเสียที่เกิดจากกระบวนการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

หลังจากผ่านกระบวนการคัดแยก และกระบวนการรีไซเคิลเก็บกลับคืนโลหะ หรือสิ่งที่มีมูลค่าจากของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ สิ่งที่ได้นอกจากจะได้โลหะ หรือผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าตามต้องการแล้ว บางกระบวนการยังก่อให้เกิดของเสียใหม่ขึ้นมา ซึ่งทางการศึกษาเรียกว่า “Nonvaluable Residue (NVR)” และของเสียที่เกิดขึ้นนี้มีการปนเปื้อนของโลหะหนักอยู่และไม่สามารถนำมารีไซเคิลเป็นผลิตภัณฑ์ได้อีก จึงต้องมีกระบวนการจัดการต่อ โดยการปรับเสถียรของเสียที่เกิดก่อนที่จะนำไปฝังกลบในหลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย (secure landfill) เพื่อเป็นการป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนัก ทั้งตะกั่วและแคดเมียมในดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ ที่อาจจะก่อให้เกิดวิกฤติสูญเสียแหล่งอาหารและน้ำในอนาคต

กระบวนการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง เป็นเทคนิคการทำกากอุตสาหกรรมซึ่งส่วนมากจะเป็นพวกสารอนินทรีย์โดยการห่อหุ้มยึดตรึงหรือทำลายพิษแล้วห่อหุ้ม กากอุตสาหกรรมไว้ในตัวของก้อนแข็ง เพื่อเปลี่ยนของเสียที่มีพิษปนอยู่ ให้กลายเป็นสารที่เสถียร มีลักษณะทางกายภาพที่คงรูปไม่ละลายน้ำ และจับตัวเป็นก้อนแข็งจนมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการนำไปฝังกลบ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการปรับเสถียรเช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซิลไฟด์ แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ปูนปอร์ตแลนด์ ถ่านกัมมันต์ เพอร์ร็อกไซด์เฟต กรดซัลฟูริก เพอร์ริกคลอไรด์ โซเดียมโบคาร์บอเนต ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและสารประกอบของเสียนั้น (ภาพที่ 4.32)



ภาพที่ 4.32 ตัวอย่างของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการปรับเสถียร

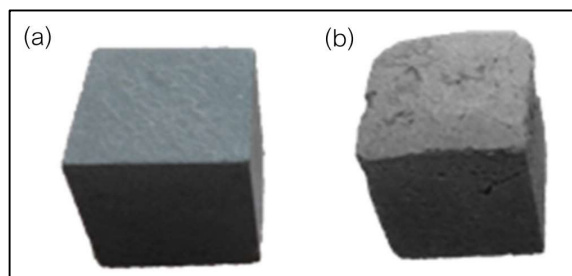
ตัวอย่างการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งของส่วนที่เหลือ Nonvaluable residue (NVR) จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือวงจรพิมพ์ กระบวนการนำกลับคืนโลหะมีค่า เช่น ทองแดง ออกจากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ชนิดที่มีองค์ประกอบที่เรียกว่า “Printed Circuit Board Assembly (PCBA)” โดย

ใช้ซีเมนต์ ปูนปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานในการตรึงโลหะหนักที่อยู่ในส่วนที่เหลือในสารตกค้างที่ไม่ระเหย Nonvaluable Residue (NVR) จากซากเซลล์อิเล็กทรอนิกส์ (ภาพที่ 4.33)



ภาพที่ 4.33 การปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (แผงวงจรพิมพ์)

จากค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย (TCLP) และค่าความต้านทานแรงอัด ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่ากระบวนการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งโดยใช้ซีเมนต์มีประสิทธิภาพในการจำกัดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักที่อยู่ในผงสารตกค้าง NVR แพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ (ภาพที่ 4.34)



ภาพที่ 4.34 ก้อนตัวอย่างแข็ง (a) ตัวอย่างที่ไม่มีผง NVR และ (b) ตัวอย่างที่ผสมผงสารตกค้าง

ที่มา : http://www.eht.sc.mahidol.ac.th/wp-content/uploads/res_highlights/solidification_th.pdf

4.8 กระบวนการฝังกลบกากอุตสาหกรรมอันตราย

การกำจัดกากอุตสาหกรรมโดยวิธีการฝังกลบเป็นวิธีการที่สำคัญและมีความจำเป็นในการกำจัดกากอุตสาหกรรมอย่างยิ่งเพราะการกำจัดกากอุตสาหกรรมด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การเผาไหม้หรือการปรับเสถียร จะมีกากของเสียเกิดขึ้นจากการบำบัด ซึ่งจำเป็นจะต้องนำไปกำจัดขั้นสุดท้ายด้วยการฝังกลบอย่างไรก็ตาม กากอุตสาหกรรมที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นแล้วนั้น เมื่อนำไปฝังกลบอาจเกิดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมหากมีการฝังกลบที่ไม่ถูกวิธีและส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นเพื่อให้การฝังกลบกากอุตสาหกรรมเป็นวิธีการที่สามารถกำจัดกากอุตสาหกรรมได้อย่างปลอดภัย จำเป็นต้องทราบถึงองค์ประกอบโดยรวมทั้งหมดที่เกี่ยวข้องตั้งแต่การคัดเลือกพื้นที่ฝังกลบ โครงสร้างของระบบฝังกลบกากอุตสาหกรรมสำหรับกากอุตสาหกรรมอันตรายและไม่อันตรายซึ่งมีความแตกต่างกันในเรื่องของวิธีการฝังกลบและระบบป้องกันผลกระทบสิ่งแวดล้อมและการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพสิ่งแวดล้อมของระบบฝังกลบการใช้ประโยชน์พื้นที่ฝังกลบ รวมทั้งการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษ

4.8.1 การคัดเลือกสถานที่ฝังกลบเป้าหมายของการคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการฝังกลบกากของเสียจากอุตสาหกรรม

การคัดเลือกสถานที่ฝังกลบ โดยทั่วไปสามารถแบ่งเป็นประเด็นหลักได้ดังนี้

- 1) เพื่อลดความเสี่ยงต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ โดยลดโอกาสของการแพร่กระจายของสารมลพิษจากของเสียสู่มนุษย์ทั้งโดยตรงและทางอ้อม
- 2) เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งสิ่งแวดล้อมทางกายภาพและชีวภาพ เช่น น้ำ ดิน อากาศและระบบนิเวศบริเวณโดยรอบพื้นที่ฝังกลบ
- 3) เพื่ออำนวยความสะดวกต่อผู้ปฏิบัติงาน โดยสถานที่ฝังกลบควรอยู่ในบริเวณที่สามารถดำเนินงานได้สะดวก เช่น การคมนาคมเข้าออกพื้นที่
- 4) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน เช่น สถานที่ฝังกลบไม่ควรอยู่ไกลจากแหล่งกำเนิดของเสียมากเกินไป เนื่องจากเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่งของเสียเป็นต้น

ขั้นตอนการจัดการพื้นที่ที่เหมาะสมในการฝังกลบกากของเสียอุตสาหกรรม

การจัดการพื้นที่ที่เหมาะสมในการฝังกลบ โดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

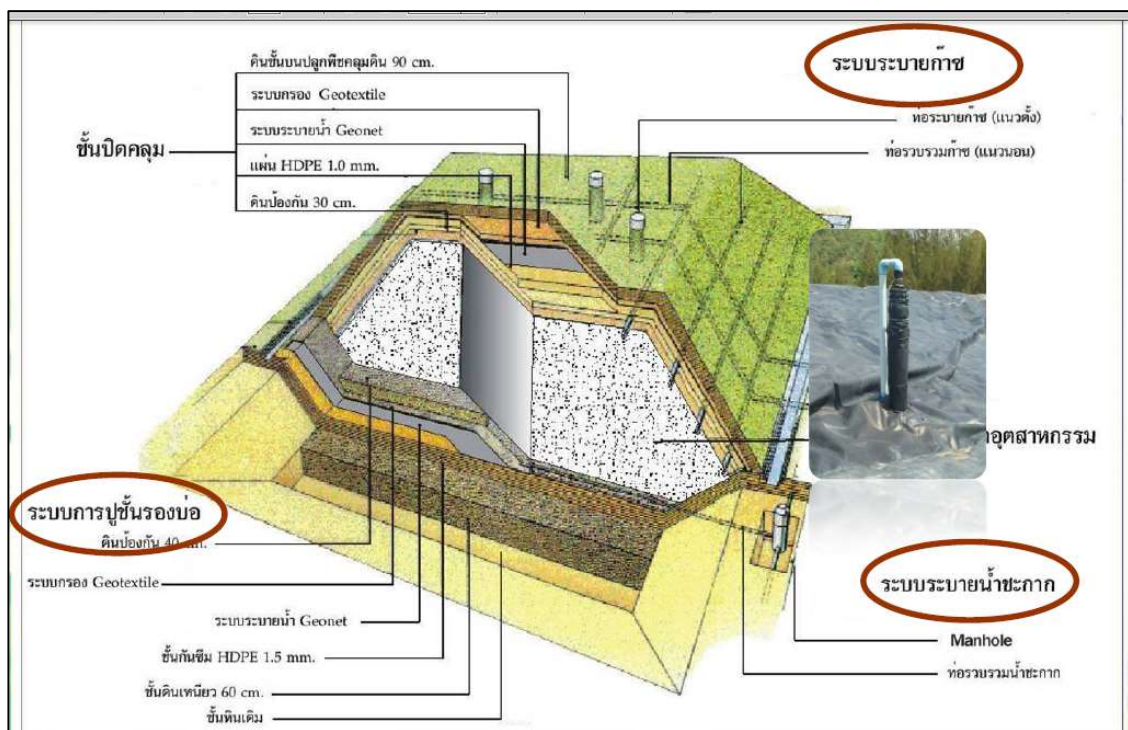
ขั้นตอนที่ 1 การคัดเลือกบริเวณพื้นที่เบื้องต้น มักใช้วิธีทางแผนที่ เพื่อตัดบริเวณที่มีข้อจำกัดในการใช้พื้นที่ตามเกณฑ์พิจารณาออก โดยนำแผนที่แสดงบริเวณพื้นที่ที่ไม่เหมาะสมในการใช้ตามเกณฑ์ที่กำหนดแต่ละข้อมาวางทับซ้อนกัน เพื่อหาบริเวณที่ไม่อยู่ภายใต้ข้อจำกัด หรือมีข้อจำกัดน้อยที่สุดเป็นบริเวณที่จะนำไปหาตำแหน่งพื้นที่ที่เหมาะสมต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 การหาตำแหน่งพื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ในการจัดทำระบบฝังกลบหลังจากที่ได้บริเวณพื้นที่เหมาะสมตามเกณฑ์พิจารณาเบื้องต้นแล้วต้องทำการสำรวจเพื่อกำหนดตำแหน่งพื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ในการจัดทำระบบฝังกลบในบริเวณที่คัดเลือกจาก ขั้นตอนแรก โดยทำการรวบรวมข้อมูลในระดับแปลงพื้นที่และทำการสำรวจเพิ่มเติมในภาคสนาม และกำหนดพื้นที่ทางเลือกเพื่อนำไปสู่การคัดเลือกในขั้นสุดท้ายต่อไป

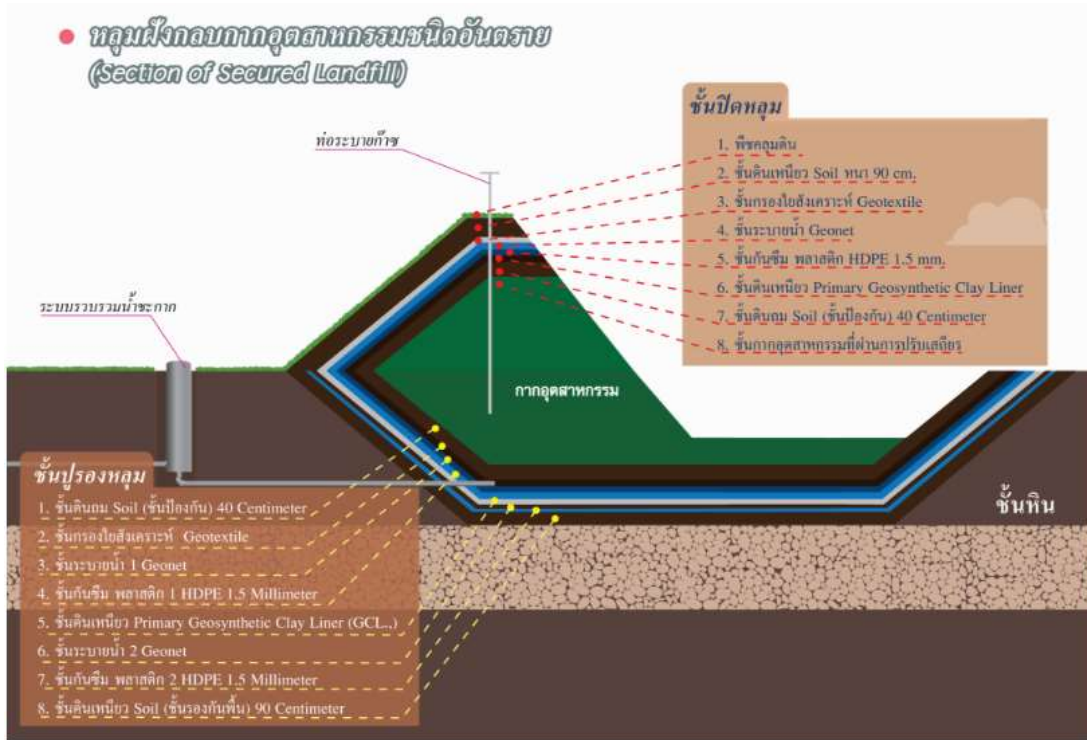
ขั้นตอนที่ 3 การคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสม เป็นการประเมินพื้นที่โดยการเปรียบเทียบให้คะแนนพื้นที่ทางเลือกตามเกณฑ์ที่กำหนด โดยอาศัยข้อมูลการสำรวจอย่างละเอียด เพื่อหาพื้นที่ที่เหมาะสมที่สุดในการจัดทำระบบฝังกลบกากอุตสาหกรรม

4.8.2 ระบบฝังกลบกากอุตสาหกรรม

การฝังกลบเป็นวิธีทางกายภาพที่ใช้สำหรับการกำจัดของเสียขั้นสุดท้ายกากอุตสาหกรรมไม่อันตรายและกากอุตสาหกรรมอันตรายมีวิธีการและรูปแบบการฝังกลบที่ต่างกันอย่างมาก เพราะกากอุตสาหกรรมทั้งสองประเภทมีลักษณะสมบัติที่ต่างกันในการฝังกลบกากอุตสาหกรรมที่ไม่อันตรายควรเลือกใช้วิธีการกำจัดแบบ “การฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาล (sanitary landfill)” ส่วนการฝังกลบกากอุตสาหกรรมอันตรายที่ผ่านการทำลายฤทธิ์แล้วเลือกใช้วิธีการกำจัดแบบ “การฝังกลบอย่างปลอดภัย (secure landfill)” (ภาพที่ 4.35 - 4.36)



ภาพที่ 4.35 หลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย (secure landfill)



ภาพที่ 4.36 ชั้นปิดและชั้นรองหลุมฝังกลบกากอุตสาหกรรมอันตราย (secure landfill)

4.8.3 การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพสิ่งแวดล้อมของระบบฝังกลบกากอุตสาหกรรม

ผู้ประกอบการจะต้องทำการสุ่มตัวอย่างน้ำผิวดิน น้ำชะของเสีย และน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียปีละ 2 ครั้งเป็นอย่างน้อย โดยอยู่ในช่วงต้นฤดูฝน และฤดูแล้ง พร้อมทั้งชุดตรวจสอบน้ำใต้ดิน (monitoring well) ในบริเวณหลุมฝังกลบก่อนที่จะขุด รวมถึงคาดคะเนทิศทางไหลของน้ำใต้ดินด้วย ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจสอบคุณภาพน้ำก่อนเริ่มดำเนินการฝังกลบ เพื่อตรวจสอบโอกาสปนเปื้อนของน้ำชะล้างมูลฝอยต่อแหล่งน้ำใต้ดิน และจัดทำเป็นรายงานที่พร้อมจะให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องตรวจสอบได้ตลอดเวลา

บทที่ 5

บทสรุปของการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์และความคุ้มค่าเชิง

เศรษฐศาสตร์ของการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

5.1 ภาพรวมของการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทย

การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ในประเทศไทย ในปัจจุบันส่วนใหญ่ยังเป็นการกำจัดแบบง่าย ๆ ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนต่ำ โดยใช้การคัดแยกขยะแล้วนำไปย่อยเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยก่อนเข้าตามกระบวนการปรับเสถียรก่อนทิ้งในหลุมฝังกลบตามกฎหมาย มุมมองทางความคุ้มค่า เชิงเศรษฐศาสตร์ของแต่ละวิธีการกำจัด และการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทย ดังนี้

5.1.1 การกำจัดซากเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของแผงจำพวกโลหะหนัก เช่น ทำมาจาก แคดเมียม ตะกั่ว เทลลูเรียม อินเดียม แกลเลียม และซิลิคอน (silicon) ซึ่งซิลิคอนอยู่ในรูปของผลึกซิลิคอน (crystalline silicon) ซึ่งมีคุณสมบัติทนความร้อน การที่จะกำจัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมคุณภาพ หรือหมดอายุการใช้งานแล้วไปกำจัดโดยการใช้ความร้อน การเผาต้องใช้ความร้อนสูง ส่งผลให้สูญเสียทั้งพลังงานและงบประมาณ แล้วการเผายังสร้างก๊าซเรือนกระจกจากสารคาร์บอนไดออกไซด์และสารพิษจากไดออกซิน หากไม่มีระบบบำบัดอากาศที่ติดตั้งรับ มลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ชั้นบรรยากาศ มุมมองทางความคุ้มค่า เชิงเศรษฐศาสตร์ของวิธีการกำจัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยการใช้ความร้อนนั้นไม่เหมาะสม

การกำจัดของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยการฝังกลบ หากนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมคุณภาพ หรือหมดอายุการใช้งานแล้วไปกำจัดโดยการฝังกลบอย่างไม่ถูกต้องเหมาะสม จะก่อให้เกิดการแพร่กระจายของโลหะหนัก ทั้งตะกั่วและแคดเมียมตามดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ จนอาจเกิดวิกฤตสูญเสียแหล่งอาหารและน้ำในอนาคต และเพื่อเป็นการป้องกันปัญหา โดยใช้การคัดแยกขยะแล้วนำไปย่อยเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยก่อนเข้าตามกระบวนการปรับเสถียร ก่อนที่จะนำไปฝังกลบในหลุมฝังกลบที่ถูกต้องเหมาะสมตามกฎหมาย

5.1.2 การรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแร่ต่างๆ ที่สามารถสกัดนำมารีไซเคิลสร้างมูลค่าได้ แร่ธาตุโลหะบางชนิดที่เป็นส่วนผสมในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จัดอยู่ในกลุ่มของโลหะมีค่า (precious metals) เช่น เงิน (Ag) แพลตตินัม (Pt) หรือจัดอยู่ในกลุ่มโลหะหายาก (rare metals) เช่น เทลลูเรียม (Te) เจอร์เมเนียม (Ge) และอินเดียม (In) ซึ่งโลหะเหล่านี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มหลังนับเป็นสิ่งที่มีมูลค่าสูงและกำลังเป็นที่ต้องการมากขึ้น เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่จำเป็นในอุตสาหกรรมโซลาร์เซลล์ อิเล็กทรอนิกส์ อวกาศและการบิน ตลอดจนอุตสาหกรรมทางทหาร

ในบรรดาโครงการวิจัยพัฒนาที่ได้ศึกษารวบรวมในรายงานนี้ มีบางโครงการที่เกือบจะอยู่ในเชิงพาณิชย์หรือขั้นตอนการสาธิต ในขณะที่โครงการอื่นๆ ยังอยู่ในห้องปฏิบัติการหรือขั้นตอนทดลองต้นแบบ ในการเตรียมพร้อมเพื่อรองรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต เป็นที่คาดว่าโครงการวิจัยพัฒนาจะต้องรีบดำเนินการมากขึ้น และช่วยให้นักวิจัยสามารถแก้ไขปัญหาที่เหลื่ออยู่และนำไปสู่การพัฒนาในรูปแบบ วิธีการที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เชิงพาณิชย์ ตลอดจนสำหรับการจัดการเซลล์แสงอาทิตย์หลังสิ้นอายุการใช้งาน

5.2 บทสรุปของการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

ในที่สุดแล้วทุกๆ เทคโนโลยีล้วนมีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน และต้องมีการเปลี่ยนหรือทิ้งไปในที่สุด สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ก็เช่นกัน แม้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์บางรุ่นจะมีอายุการใช้งานค่อนข้างยาวนานถึง 20 ปีหรืออาจจะมากกว่านั้น

เพื่อที่จะสามารถใช้เทคโนโลยีพลังงานสะอาดเพื่อรองรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปริมาณมากที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคตนั้น จึงได้มีการพัฒนากระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสม ในกระบวนการจัดการของเสียอย่างยั่งยืนจะใช้หลักการที่เรียกว่า Rs สามประการ (3Rs) ได้แก่ Reduce (ลดการใช้) Reuse (การรีใช้ซ้ำ) และ Recycle (การรีไซเคิล) ในบรรดา 3Rs ระบบการรีไซเคิลและแผนการกำกับดูแลที่เกี่ยวข้องกันเพื่อจัดการกับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่งมีขึ้นเมื่อเร็ว ๆ นี้ แต่เทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการศึกษาและพัฒนาขึ้นมาในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพในการรีไซเคิล เพิ่มอัตราการกู้คืนและความคุ้มค่าแล้ว แล้วยังได้มีการพัฒนาวิธีการต่างๆ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

เทคโนโลยีการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม และแบบผลึก c-Si มีความแตกต่างกันอันเนื่องมาจากความแตกต่างในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์และโลหะที่มี ความแตกต่างที่สำคัญประการหนึ่งคือ วัตถุประสงค์ในการกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม คือการนำกระจกฝาครอบและพื้นผิวกระจกกลับคืนมาด้วยชั้นสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่วัตถุประสงค์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ผลึก c-Si คือการแยกและกู้คืน กระจก เซลล์ Si และโลหะอื่นๆ

กระบวนการสำหรับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si PV สามารถแบ่งคร่าวๆ ได้ดังนี้ กระบวนการกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต (เช่น การแยกชั้น) และกระบวนการที่นำโลหะออกจากเซลล์ Si หลังจากการถอดแยกชิ้นส่วน เช่น การแยกโครงสร้างโลหะและกล่องขั้วต่อออก การกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนตเป็นเรื่องยากและสำคัญที่สุดของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีรีไซเคิล แก้วและสารหล่อหุ้มนี้ ตัวอย่างเช่น สามารถใช้วิธีการทางความร้อน ทางกล และทางเคมีในการแยกชั้น การกู้คืนโลหะจากเซลล์ Si สามารถทำได้โดยใช้วิธีการทางเคมี เช่น การกัดกร่อน และวิธีการบำบัดโดยตรงโดยโรงกลั่นโลหะ

กระบวนการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ PV แบบผสม จะแบ่งออกเป็นกระบวนการกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต ต่อด้วยกระบวนการกู้คืนโลหะและพื้นผิวกระจกกลับมาใช้ใหม่หลังจากขั้นตอนการถอด

ประกอบก่อนหน้า ในกระบวนการกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต เครื่องบดเชิงกล (mechanical crushing) และได้มีการพัฒนาวิธีการทางความร้อน วิธีการทางกลวิธีการทางแสง และวิธีการทางเคมี เช่น การกักความร้อนมีประสิทธิภาพในการกู้นำโลหะกึ่งตัวนำกลับมาใช้ใหม่จากพื้นผิว และพื้นผิวกระจกสามารถนำกลับมาใช้ใหม่และรีไซเคิลได้ เช่นกัน หากจะกู้คืนพื้นผิวกระจกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่โดยไม่ให้เกิดการแตกหัก การชดด้วยเครื่องจักรอาจเป็นกระบวนการทางเลือก

5.2.1 การวิเคราะห์แนวโน้มของเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์จากสิทธิบัตร

ในรายงานฉบับนี้ ได้มีการสำรวจแนวโน้มที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเทคโนโลยีรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ ในการวิเคราะห์สิทธิบัตรนั้น ได้มีการวิเคราะห์สิทธิบัตรที่เอกชนส่วนใหญ่ยื่นขอมาวิเคราะห์ นอกจากนี้ จากการสำรวจเอกสารทางเทคนิค โครงการการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะได้รับการสนับสนุนและการสนับสนุนจากทางภาครัฐ ภาพรวมของโครงการวิจัยและพัฒนามุ่งเน้นไปที่การกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต เนื่องจากเป็นหนึ่งในเป้าหมายที่ยากและสำคัญที่สุดของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีรีไซเคิล [38]

เพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มทางเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ ฐานข้อมูลสิทธิบัตรทั่วโลกได้รวบรวมข้อมูลจากสิทธิบัตรของการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si และเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม ตั้งแต่วันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2519 ถึง 9 ธันวาคม พ.ศ. 2559 (บริการทรัพย์สินทางปัญญาทั่วโลก (WIPS)) ผลการค้นหามีเบื้องต้น จำนวนสิทธิบัตรที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับเทคโนโลยีรีไซเคิลจากเซลล์แสงอาทิตย์ PV คือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si จำนวน 128 สิทธิบัตร และเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม 44 สิทธิบัตร ข้อมูลในสิทธิบัตรส่วนใหญ่เกี่ยวข้องโดยตรงกับแนวโน้มของการตลาดและการติดตั้ง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความต้องการเทคโนโลยีรีไซเคิล ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si ครองตลาดส่วนใหญ่ของการติดตั้ง (จำนวนสิทธิบัตรของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทอื่นๆ มีเพียง 6 รายการเท่านั้น ซึ่งเป็นจำนวนที่ต่ำเกินไปสำหรับการวิเคราะห์) ระบุข้อมูลโดยละเอียดเช่น ชื่อสิทธิบัตร ปีที่ยื่นคำขอ ประเทศ หมายเลข วันที่ยื่นคำขอ หมายเลข วันที่สิทธิบัตร ผู้รับโอนสิทธิ์ และ สถานะทางกฎหมายของสิทธิบัตรที่มีผลบังคับใช้ 178 รายการ (ฐานข้อมูลของ IRENA-INSPIRE7) ในการวิเคราะห์สิทธิบัตร เทคโนโลยีการรีไซเคิลถูกจำแนกตามการจำแนกประเภทหลักของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si และเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละประเภทจะได้รับการวิเคราะห์ในเชิงลึกในส่วนของ ส่วนประกอบ วิธีการประมวลผล และวัสดุที่ได้หลักจากผ่านการกระบวนการรีไซเคิล

ในแนวโน้มที่เกี่ยวข้องกับสิทธิบัตรของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si หลังจากที่มีการจดสิทธิบัตรครั้งแรกของเทคโนโลยีรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si ของเยอรมนีในปี พ.ศ. 2538 และในทุกประเทศไปจนถึงปี พ.ศ. 2553 การยื่นคำขอมีย่นช้าเล็กน้อย แต่หลังจากปี พ.ศ. 2554 มีจำนวนการยื่นคำขอเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีมากที่สุดในประเทศจีน รองลงมาคือประเทศเกาหลี และประเทศญี่ปุ่น จากข้อมูลดังกล่าวสรุปได้ว่า การออกแบบการวิจัยพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si มีการจดสิทธิบัตรในเอเชียมากกว่าในยุโรปและสหรัฐอเมริกา จากการวิเคราะห์ เทคโนโลยีที่มุ่งเป้าไปที่การกำจัดสาร

ท่อหุ้ม (ส่วนใหญ่เป็น EVA) คิดเป็นร้อยละ 45 ของสิทธิบัตรทั้งหมด ซึ่งบ่งชี้ว่าสิทธิบัตรส่วนมากมุ่งเน้นไปที่ การกำจัดสารท่อหุ้มออกจากส่วนประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ ร้อยละ 30 สำหรับสิทธิบัตรการถอดประกอบ เซลล์แสงอาทิตย์ และสิทธิบัตรสำหรับการถอดประกอบโครงสร้างร้อยละ 24 และทองแดง Cu ร้อยละ 1 การ วิเคราะห์ตามวิธีการรีไซเคิลแสดงให้เห็นว่าวิธีการทางกลเป็นวิธีการหลักใช้ในประเทศจีนมีสัดส่วนร้อยละ 40 ของทั้งหมด ตามด้วยวิธีการผสมที่ร้อยละ 25 วิธีทางเคมีร้อยละ 19 และวิธีทางความร้อนผสมร้อยละ 15 ตามลำดับ สำหรับวิธีการทางแสงด้วยการตัดด้วยเลเซอร์นั้นเพิ่งได้รับการจดสิทธิบัตรในประเทศจีนเมื่อเร็วๆ นี้ คิดเป็นเพียงร้อยละ 1 สำหรับแนวโน้มของสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการกู้คืนวัสดุกลับมาใช้ใหม่ สิทธิบัตรส่วน ใหญ่คือเทคโนโลยีในการกู้คืนโครงสร้างอลูมิเนียม (ร้อยละ 25) เซลล์แสงอาทิตย์ (ร้อยละ 24) และแก้ว (ร้อย ละ 23) แสดงให้เห็นว่า การจดสิทธิบัตรส่วนใหญ่เพื่อการกู้คืนส่วนประกอบไม่ใช่เพื่อกู้คืนวัสดุแต่ละชนิด เช่น Si Ag และ Cu จากเซลล์แสงอาทิตย์ มีเพียงไม่กี่สิทธิบัตรสำหรับเทคโนโลยีในการกู้คืน Si (ร้อยละ 12) Ag (ร้อยละ 10) และ Cu (ร้อยละ 6) [38]

แนวโน้มของสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมนั้น สิทธิบัตรแรกสำหรับเทคโนโลยีการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมได้ถูกยื่นจดทะเบียนในสหรัฐอเมริกาในปี พ.ศ. 2540 ตั้งแต่นั้นมาก็ไม่มีการแจ้งจดทะเบียนขึ้นอย่างมีนัยสำคัญอีก ในสหรัฐอเมริกาการยื่นจดทะเบียน คิด เป็นร้อยละ 27 ของทั้งหมด รองจากสหรัฐอเมริกาตามมาคือ ญี่ปุ่น (ร้อยละ 21) จีน (ร้อยละ 16) และหลาย ประเทศในยุโรป (ร้อยละ 11) ต่างจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si ตรงที่บริษัททั้งหมดเป็นผู้รับโอนสิทธิ์ ใน หลายประเทศยกเว้นในเยอรมนีและสหรัฐอเมริกา ซึ่งแสดงถึงความน่าสนใจในเทคโนโลยีเชิงพาณิชย์ที่สูงขึ้น และมีแนวโน้มที่จะมีการขายเทคโนโลยีเหล่านี้ในเชิงพาณิชย์ ในส่วนประกอบที่เป็นเป้าหมายของการรีไซเคิล คือ EVA (ก้ำจัดหรือแยก) และวัสดุสารกึ่งตัวนำ (สารหายากหรือเป็นพิษ) ถูกกำหนดเป็นเป้าหมายและมีความ สำคัญเท่ากัน ความน่าสนใจที่คล้ายคลึงกันระหว่างวัสดุ EVA และสารกึ่งตัวนำ ชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มที่ นำไปสู่การรีไซเคิลเซลล์มากกว่าแค่การแยกสาร โดยมีขั้นตอนการรีไซเคิลทั้งหมดตั้งแต่การแยกชิ้นส่วนไป จนถึงการกู้คืน ซึ่งตรงกันข้ามกับสิทธิบัตรสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si โดยมุ่งเน้นที่ขั้นตอนการรี ไซเคิลโดยเฉพาะ สิทธิบัตรสำหรับส่วนประกอบอื่นๆ ไม่ได้ถูกยื่นจดทะเบียนเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม ในการวิเคราะห์แนวโน้มของวิธีการที่ใช้ เทคโนโลยีที่รวมสองวิธีขึ้นไป คิดเป็นร้อยละ 64 ของทั้งหมด ตรงกัน ข้ามกับเทคโนโลยีการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si ซึ่งมีเพียงร้อยละ 25 เท่านั้น ที่เกี่ยวข้องกับการผสมผสาน วิธีการเนื่องจากโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน วิธีการเดียวที่เน้นในการถอดแยกชิ้นส่วนสามารถ ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการแยกวัสดุสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si ซึ่งผลิตขึ้นจากการประกอบชิ้นส่วน โดยผู้ผลิตรายอื่น แต่วิธีการนี้ไม่มีประโยชน์สำหรับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม ซึ่งผลิตจากการทับ ซ้อนของชิ้นการทำงาน ตัวอย่างเช่น ไม่สามารถกู้คืนแก้วจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมได้ด้วยวิธีการเดียว เนื่องจากวัสดุกึ่งตัวนำยังคงอยู่บนพื้นผิวของแก้วหลังจากถอดแยกเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมี ขั้นตอนเพิ่มเติมในการแยกวัสดุกึ่งตัวนำออกจากแก้ว นี่คือเหตุผลที่ต้องพิจารณาถึงวิธีการผสมสำหรับการรี ไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม วิธีการผสมส่วนใหญ่รวมถึงวิธีการทางกลสำหรับการบดเซลล์แสงอาทิตย์และ วิธีการทางเคมีสำหรับการกู้คืนส่วนประกอบโลหะกลับมาใช้ใหม่ การวิเคราะห์แนวโน้มของวัสดุที่กู้คืนกลับมา

ใช้ใหม่แสดงให้เห็นว่าสิทธิบัตรการกู้คืนวัสดุกิ่งตัวนำมีจำนวนมากถึง ร้อยละ 78 ของทั้งหมด ส่วนที่เหลือเป็นสิทธิบัตรที่มีแก้วเป็นส่วนประกอบ โดยทั่วไป ตามสิทธิบัตรที่วิเคราะห์ การกู้คืนวัสดุกิ่งตัวนำกลับมาใช้ใหม่เป็นวัสดุประสงค์หลักของเทคโนโลยีรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม

การวิเคราะห์สิทธิบัตรนี้จะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์แก่ผู้อ่านที่มีความสนใจในการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเรียนรู้วิธีพัฒนาเทคโนโลยีรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการทำความเข้าใจแนวโน้มสิทธิบัตรในอดีตและปัจจุบัน สำหรับผู้ที่สนใจในการกู้คืนวัสดุโครงสร้างและวัสดุไฟฟ้ากลับมาใช้ การวิเคราะห์นี้จะช่วยให้เลือกวิธีการผสมผสานซึ่งประกอบด้วยวิธีทางกลและวิธีการทางเคมี ง่ายต่อการค้นหาสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องในรายการสิทธิบัตรมีแนวโน้มว่าเทคโนโลยีจากวิธีการประมวลผลที่หลากหลาย เพื่อที่จะสามารถตอบสนองความต้องการในการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีมูลค่าสูง [38]

5.2.2 บทสรุปของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการ เพิ่มอัตราการกู้คืน เพิ่มศักยภาพของการรีไซเคิล ลดต้นทุน และเพิ่มประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อม จำเป็นที่จะต้องมีการดำเนินโครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์หลายโครงการ เทคโนโลยีการรีไซเคิลสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองประเภทนั้น มีแง่มุมที่แตกต่างกันออกไป อันเนื่องมาจากความแตกต่างในโครงสร้างและโลหะที่มีอยู่

วิธีการทางกลสำหรับการรีไซเคิลเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si เช่น การบดและการคัดแยกในยุโรปได้ดำเนินการโดยผู้รีไซเคิลแก้วซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของธุรกิจเดิมอยู่แล้ว สิ่งนี้แสดงถึงเทคโนโลยีที่มีแนวโน้มสำหรับการแยกและกู้คืนแก้วออกจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si โลหะจะถูกกู้คืนกลับมาใช้ใหม่จากวัสดุที่เหลือและวัสดุที่แยกออกโดยกระบวนการเพิ่มเติม ภายใต้เทคโนโลยีปัจจุบัน แก้วและโลหะที่มีค่า เช่น Ag จะถูกกู้คืนกลับมาใช้ใหม่ แต่เซลล์ Si ที่กู้คืนได้นั้นไม่สามารถนำกลับมาผลิตเป็น Si wafers ใหม่ได้ ขนาดของการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นไม่ใหญ่นัก และแก้วที่กู้คืนกลับมาจะถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำกว่า สำหรับการเตรียมพร้อมสำหรับการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต เทคโนโลยีหลายอย่างอยู่ระหว่างการวิจัยพัฒนาเพื่อให้เกิดกระบวนการที่ประหยัด อัตราการกู้คืน สามารถรองรับปริมาณการรีไซเคิลได้สูงขึ้น และการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุที่กู้คืนกลับมาใช้ใหม่

เริ่มต้นจากกระบวนการถอดประกอบเช่น การถอดโครงสร้างโลหะและกล่องขั้วต่อออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กระบวนการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งคร่าวๆ คือ การกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนตและการกู้คืนโลหะ การกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบลามิเนต (เช่น การแยกชั้น) นั้นเป็นกระบวนการที่ยากและสำคัญที่สุดของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิล ในกระบวนการกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบด้วยลามิเนต สามารถใช้วิธีการทางความร้อน วิธีการทางกล วิธีการทางเคมี และวิธีการผสมผสาน

การกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างที่เคลือบลามิเนตด้วยวิธีการทางความร้อนโดยกระบวนการเผาไหม้ วัสดุที่ได้จากการกู้คืนคือ แก้ว เซลล์ Si และแผ่นฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ ในขณะที่บางวิธีการและภายใต้เงื่อนไขบางอย่าง กระจกและเซลล์ Si สามารถกู้คืนได้โดยไม่เกิดการแตกหัก ข้อดีของวิธีการนี้คือ วัสดุที่ได้

หลังจากการรีไซเคิลมีมูลค่าสูง การกู้คืนเซลล์ Si โดยไม่มีการแตกหักขึ้นอยู่กับความหนาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และสภาวะการเผาไหม้ โดยทั่วไปแล้วยังเซลล์บางลงเท่าใด อัตราการกู้คืนจะยิ่งต่ำลงเท่านั้น นอกจากนี้หากซากแผงเซลล์มีข้อบกพร่องเช่น ขอบบิ่นหรือมีรอยแตกจะไม่สามารถรีไซเคิลโดยวิธีนี้ได้ ส่วนวิธีการทางความร้อนนั้นจะต้องมีกระบวนการต่อเนื่องอีกหลายขั้นตอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ประเด็นสำคัญของเรื่องประสิทธิภาพคือการใช้พลังงานสูงในการเผาไหม้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการเพิ่มเติมเพื่อลดการใช้พลังงานเช่น การเพิ่มกระบวนการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ อีกประเด็นที่สำคัญคือเรื่องผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคือ เมื่อเผาแผ่นรองหลังกับโครงสร้างอื่นๆ ที่มีส่วนผสมของฟลูออไรด์ จำเป็นต้องมีระบบบำบัดเพิ่มเติมเพื่อรองรับก๊าซฟลูออรีนด้วย และการตัดชิ้นการห่อหุ้ม การชุบชั้นที่ไม่ใช่แก้ว การชุบกระจก และเทคโนโลยีการบด/การบด ถือเป็นกระบวนการทางกล เทคโนโลยีสองอย่างแรกนั้นสามารถกู้คืนแก้วได้โดยเกิดการแตกหัก และเทคโนโลยีอื่นๆ ก็สามารถกู้คืนกระจกที่แตกได้ แม้ว่าเซลล์ Si จะไม่สามารถนำไปผลิตเป็น Si wafers ได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะต่อด้วยการบำบัดทางเคมี เพื่อแยกเซลล์ Si และโลหะอื่นๆ ออกจากส่วนผสมที่เหลือ กระบวนการทางกลจะใช้พลังงานน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทางความร้อน แต่การกู้คืนสามารถทำได้ตามลำดับเท่านั้น วิธีการแยกด้วยความร้อนจะใช้พลังงานมากกว่า และการผสมผสานกับกระบวนการทางเคมีอาจจำเป็นต้องปรับปรุงพัฒนาเรื่องความเร็วในกระบวนการและต้องมีการบำบัดสารละลายผสมด้วยกระบวนการทางเคมีเช่น การใช้ตัวทำละลายเพื่อแยกสารห่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต จะมีความเป็นไปได้ทางเทคโนโลยีและจะช่วยให้สามารถกู้คืนเซลล์ Si ได้ อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวต้องใช้เวลานาน และต้องมีขั้นตอนการบำบัดของเสียที่เป็นของเหลวเช่นกัน แม้ว่าอาจไม่เหมาะสำหรับการบำบัดโดยรวม แม้ว่าปัญหาสิ่งแวดล้อมจะได้รับการแก้ไขแล้วก็ตาม สิ่งเหล่านี้จึงเหมาะสมสำหรับการบำบัดในสถานที่จริง ขนาดเล็ก คล้ายกับกระบวนการผสมของวิธีการทางความร้อนและทางกลสำหรับการกู้คืนเซลล์ Si และโลหะ

การกู้คืนโลหะกลับมาใช้ใหม่จากเซลล์ Si สามารถทำได้โดยใช้วิธีการทางเคมี เช่น การกัดกร่อนด้วยกรดหรือกรดไฮดรอกไซด์เป็นต้น และการบำบัดที่เหมาะสมสำหรับของเสียจากสารเคมี (เช่น กรดไฮโดรฟลูออริก) เป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ อีกวิธีหนึ่งคือการส่งบำบัดโดยตรงจากโรงกลั่นโลหะ

ในส่วนที่เกี่ยวกับการรีไซเคิลซากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมนั้น กระบวนการผสมผสานที่เกี่ยวข้องกับการบดย่อยทางกล (การบดอัด) และการกัดด้วยสารเคมีนั้นกำลังดำเนินการในเชิงพาณิชย์ โลหะแก้วและสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) จะได้รับการกู้คืนและรีไซเคิล โดยมีอัตราการรีไซเคิลสูงถึงร้อยละ 90 สำหรับแก้ว และสูงถึงร้อยละ 95 สำหรับโลหะ [33] อย่างไรก็ตาม การเตรียมพร้อมเพื่อการรองรับของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคตนั้นยังจำเป็นต้องมีการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่องอีกหลายๆ ด้าน

กระบวนการถูกแบ่งคร่าวๆ ออกเป็นกระบวนการกำจัดสารห่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต และกระบวนการกู้คืนโลหะจากพื้นผิวกระจก หลังจากกระบวนการการแยกส่วนก่อนหน้า ความแตกต่างสำคัญที่กล่าวถึงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน c-Si ก็คือ วัตถุประสงค์ของการกำจัดสารห่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต เพื่อการนำทั้งกระจกครอบและกระจกพื้นผิวที่มีชั้นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor)

กลับมาใช้ ขณะแยกและกู้คืนน้ำแก้ว เซลล์ Si และโลหะอื่นๆ คืบมาตามวัตถุประสงค์ของการกู้คืนเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก c-Si หลังจากกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนตแล้ว สามารถแยกโลหะและพื้นผิวกระจกออกจากกันและนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพในขั้นตอนต่อไปของกระบวนการ

นอกเหนือจากเทคโนโลยีการบดย่อยที่ได้รับการพิสูจน์แล้ว การเผาไหม้ทางความร้อน การตัดชิ้น การหล่อหุ้มเป็นวิธีการทางกล และวิธีการทางแสงคือการบำบัดด้วยเลเซอร์ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อกำจัดสารหล่อหุ้มออกจากโครงสร้างลามิเนต กระบวนการเหล่านี้จะช่วยแยกโครงสร้างกระจกสองชั้นและนำส่วนประกอบกระจกครอบกลับคืนมาได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือการปนเปื้อนใดๆ ภายใต้เงื่อนไขบางประการ กระจกพื้นผิวที่มีชั้นสารกึ่งตัวนำ จะถูกนำกลับคืนมาโดยที่ยังคงรูป เมื่อพิจารณาความเร็วและผลตอบแทนของการบำบัดในขั้นตอนต่อไปสำหรับการนำโลหะออกจากพื้นผิว การบดย่อยจะเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพเช่นกัน อย่างไรก็ตาม เพื่อเพิ่มคุณภาพและมูลค่าของแก้วที่นำกลับมาใช้ใหม่ ชิ้นส่วนแก้วและเศษแก้วที่ไม่เสียหายซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการปรับปรุงพัฒนา เนื่องจากมีศักยภาพในการปรับปรุงอัตราการกู้คืนกลับมาใช้ใหม่ อัตราการรีไซเคิล นอกจากนี้ แนวทางใหม่จะมีแนวคิดทางเทคนิคที่คล้ายคลึงกับเทคโนโลยีที่ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน c-Si เนื่องจากการถอดแยกโครงสร้างลามิเนต กระจก และชั้นอื่นๆ เป็นส่วนประกอบ จะช่วยให้สามารถกู้คืนเซลล์ Si ได้ อันที่จริง เทคโนโลยีการเผาไหม้เพียงอย่างเดียวใช้ได้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน c-Si, ฟิล์มบาง และ CIGS ในทางกลับกัน กระบวนการบดย่อย บดอัดยังเหมาะสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอน c-Si อย่างไรก็ตาม เซลล์ Si ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่เป็น Si wafers ได้ เนื่องจากเซลล์ Si มักจะถูกบดเป็นชิ้นเล็กๆ [38]

สำหรับกระบวนการนำโลหะกึ่งตัวนำกลับมาใช้ใหม่จากพื้นผิวกระจกนั้น วิธีการทางเคมีเช่น การกัดกร่อนนั้นน่าจะเป็นไปได้ และพื้นผิวกระจกสามารถกู้คืนและรีไซเคิลได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม กระบวนการกู้คืนจะสร้างของเหลวและก๊าซเสียถือเป็นประเด็นสำคัญ หากต้องการกู้คืนพื้นผิวกระจกโดยไม่ให้เกิดการแตกหัก กระบวนการการชุบด้วยวิธีการเชิงกลจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกหนึ่ง

5.3 ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

การเลือกกระบวนการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างถูกต้องเหมาะสมนั้น เป็นวิธีการที่ดีที่สุดต่อการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพได้ดีที่สุด แต่ในปัจจุบันนี้ประเทศไทยยังไม่มีความพร้อมในหลายๆ ด้านและยังไม่สามารถดำเนินการรีไซเคิลในเชิงพาณิชย์ได้ เมื่อพิจารณาถึงด้านความพร้อมของบุคลากร ด้านเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ อัตราการกู้คืน ความคุ้มค่า และการลงทุนที่ต้องใช้เงินทุนสูงมาก

ดังนั้นมุมมองในด้านความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในด้านการลงทุนรีไซเคิลของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันยังไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน การเลือกวิธีการที่รองลงมาคือ การกำจัดโดยการปรับเสถียร และฝังกลบกากอุตสาหกรรมนั้นจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประเทศไทยในปัจจุบัน และจนกว่าจะมีจำนวนของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มากพอหรือมีความคุ้มค่าต่อการลงทุน

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

อ้างอิง

- [1] IEA PVPS (International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programmer: Trends in Photovoltaic Applications 2016: Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015, Report IEA PVPS T1-30:2016, 2016.
- [2] Bohland, J. R., et al, Photovoltaics as Hazardous Materials; the Recycling, 2nd WCPEC, Vienna, Austria, 1998.
- [3] PVTEC (Photovoltaic Power Generation Technology Research Association, Research and Development on Recycling and Reuse Technology of Photovoltaic Power Generation System, Fiscal year 1994-1995 NEDO contract report, 1996.
- [4] Frisson, L., et al., Cost Effective Recycling of PV Modules and the Impact on Environment, Lifecycle, Energy Payback Time, 2nd WCPEC, Vienna, Austria, 1998.
- [5] Bruton, T. M., et al., Re-cycling of High Value, High Energy Content Components of Silicon PV Modules, 12th EU-PVSEC, Nice, France, 1994.
- [6] Doi, T., et al., Experimental Study on PV Module Recycling with Organic Solvent Method, 11th PVSEC, Sapporo, Japan, September 1999.
- [7] PV CYCLE: Annual Report 2016, 2017.
- [8] IRENA/IEA PVPS Task12, End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels, 2016.
- [9] Wambach, K., Recycling of Solar Cells and Photovoltaic Modules, 19th EU-PVSEC, Paris, France, 2004.
- [10] Noda, M., Kushiya, K., Saito, H., Komoto, K., and Matsumoto, T., Development of the PV Recycling System for Various Kinds of PV Modules, 6th WCPEC, Kyoto, Japan, November 2014.
- [11] Shinryo Corporation: Development of low-cost recycling technology for various kinds of PV modules, FY2015 NEDO debriefing session, Oct. 2016

- [12] Lee, J. -S., Recovery Technology of Intact Wafer from End-of-life c-Si PV Module, 26th PVSEC, Singapore, October 2016.
- [13] Lee, J. -K., Lee, J. -S., et al., Low-cost Recovery Process of Unbroken Solar Cell from PV Module, 25th PVSEC, Busan, Korea, November 2015.
- [14] Park, J., et al., An Eco-Friendly Method for Reclaimed Silicon Wafers from a Photovoltaic Module: from Separation to Cell Fabrication, Green Chem. 18 (1706-1714), 2016.
- [15] Yi, Y. -K., et al., Recovering Valuable Metals from Recycled Photovoltaic Modules, J. of Air & Waste, Management Association 64 (797-807), 2014.
- [16] Liu, J., Experimental Study on Recycling of Waste Crystal Silicon PV Modules Technology, PV Environmental Health and Safety Workshop, Beijing, China, March 2014.
- [17] Wang, T. -Y., et al., Recycling of Materials from Silicon Base Solar Cell Module, 38th IEEE-PVSC, Austin, TX, USA, June 2012.
- [18] Doni, A., et al., Electrothermal Heating Process Applied to c-Si PV Recycling, 38th IEEE-PVSC, Austin, TX, USA, June 2012.
- [19] Weyhe, R., State-of-Research: Enhanced Recovery Technologies for Critical Raw Materials, Workshop on PV Life Cycle Management and Recycling at the 29th EU-PVSEC, Amsterdam, the Netherlands, September 2014.
- [20] Mitsubishi Materials Corporation, Development of recycling technology for crystalline Si PV modules, FY2015 NEDO debriefing session, Oct. 2016.
- [21] Toho Kasei Co., Ltd., Development of high-performance recycling technology using wet-method for crystalline Si PV modules, FY2015 NEDO debriefing session, Oct. 2016.
- [22] Hamada Corporation and NPC Incorporated, Development of recycling technology using by heated knife for separation, FY2015 NEDO debriefing session, Oct. 2016.
- [23] Ercole, P., FRELP 2 Project - Full Recovery End of Life Photovoltaic, 32nd EU-PVSEC, Munich, Germany, June 2016.

- [24] Granata, G., et al., Recycling of Photovoltaic Panels by Physical Operations, Solar Energy Materials & Solar Cells 123 (239–248), 2014.
- [25] PV-MOREDE Deliverable D3.3, Second PV-Morede device manufactured, Agreement Number: ECO/12/333078/SI2.658616.
- [26] Wang, Z., China PV Recycling technology -Physical Method, PV Environmental Health and Safety Workshop, Beijing, China, March 2014.
- [27] Yokohama Oils & Fats Industry, Development of an Advanced Recycling Treatment System for Photovoltaic Modules with Novel EVA Stripper, Fiscal year 2011-2012 NEDO contract report, 2012.
- [28] Kang, S., et al., Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules, Renewable Energy 47 (152-159) 2012.
- [29] Palitzsch, W., and Loser, U., Economic PV Waste Recycling Solutions – Results from R&D and Practice, 38th IEEE-PVSC, Austin, TX, USA June 2012.
- [30] Bohland, J. R., et al., Economic Recycling of CdTe Photovoltaic Modules, 26th IEEE-PVSC, 1997.
- [31] Goozner, R. E., et al., A Process to Recycle Thin Film PV Materials, 26th IEEE-PVSC, 1997.
- [32] Menezes, S., Non-Destructive Approach for Recycling of CuInSe₂ and Related PV Modules, 2nd WCPEC, Vienna, Austria 1998.
- [33] Wade, A., Evolution of First Solar's Module Recycling Technology, Workshop on PV Life Cycle Management and Recycling at the 29th EU-PVSEC, Amsterdam, the Netherlands, September 2014.
- [34] Wiegiersma, S., Introduction to the FP7 RECLAIM project, RECLAIM Workshop on Reclamation of key metals from Energy Efficient Lighting, Flat Panel Displays and Photovoltaic modules, June 2016.

[35] Steeghs, W., Suez Water: Recovery of Indium and Gal from Flat Panel Displays and Photovoltaic (CIGS) modules, RECLAIM Workshop on Reclamation of Key Metals from Energy Efficient Lighting, Flat Panel Displays and Photovoltaic modules, June 2016.

[36] Solar Frontier K.K., Development of low-cost cover-glass separation techniques for laminated glass PV modules, FY2015 NEDO debriefing session, Oct. 2016.

[37] Palitzsch, W., Recycling Technology for Thin Film Photovoltaic Scrap, Workshop on 'PV End-of-Life Management: Challenges and Opportunities' at the 32nd EU-PVSEC, June 2016.

[38] Keiichi Komoto (USA), Jin-Seok Lee (Belgium), IEA INTERATION ENERGY AGENCY End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies IEA PVPS Task12, Subtask 1, Recycling Report IEA-PVPS T12-10: 2018, New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Japan and Korea Energy Agency (KEA), Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), Republic of Korea, January 2018.

[39] Garvin Heath, Andreas Wade (2018). *End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies*, PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAM. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; IEA

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน (2560). *คู่มือแนวทางป้องกันผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและวิธีการกำจัดกากขยะที่เกิดจากโครงการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน. กระทรวงพลังงาน*

เอกบุตร อุตมพงศ์. (2561). *เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) และการจัดการซากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพต่อสิ่งแวดล้อม. (แผนแม่บทการจัดการซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์). กองบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม: กรมโรงงานอุตสาหกรรม*

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน (2559). *พลังงานแสงอาทิตย์. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน. กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.*

มนัสนันท์ พิบาลวงศ์, วิสาขา ภูจินดา (2559). *การจัดการแผงโซลาร์เซลล์ที่หมดอายุการใช้งาน: กรณีศึกษาจังหวัดอุบลราชธานี. (การศึกษาค้นคว้าอิสระปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). คณะบริหารการพัฒนาสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี*

ปัญญา จันทร์ล่อ (2560). *มาตรการทางกฎหมายในการจัดการซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์. (วิทยานิพนธ์นิติศาสตรมหาบัณฑิต). คณะนิติศาสตร์. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.*

- พิชญ รัชฎาวงศ์, สมชัย รัตนธรรมพันธ์, เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย, ฐิติศักดิ์ บุญปราโมทย์, สันต์ สัมปตตะวานิ (2559). *โครงการ การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า* (รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์). สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). มหาวิทยาลัยพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ณิชา บุรณสิงห์ (2559). *แผงโซลาร์เซลล์ : ชยะพิษที่ไม่ควรมองข้าม* (เอกสารวิชาการ), ชยะอิเล็กทรอนิกส์. สำนักวิชาการ. สำนักงานเลขาธิการผู้แทนราษฎร ISBN 228 – 0520. ดาวน์โหลดเอกสารจาก <http://www.parliament.go.th/library>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน (2560). *ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน (2561). *การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน (2563). *รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2560 - 2563*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
- คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.) (2563). *แผนพัฒนากำลังไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 – 2580 ฉบับปรับปรุง ครั้งที่ 1 (PDP2018 Rev.1)*. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน: กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
- กรมควบคุมมลพิษ. *แผนแม่บท การบริหารจัดการขยะมูลฝอยของประเทศ (พ.ศ. 2559 – 2564)*. กรมควบคุมมลพิษ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. *แนวทางการขับเคลื่อนการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพ-เศรษฐกิจหมุนเวียน-เศรษฐกิจสีเขียว (Bio-Circular-Green Economy : BCG Model) พ.ศ. 2564 – 2570*: กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

ภาคผนวก ข

แบบประเมินการใช้งาน คู่มือเรื่องการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

แบบประเมินการใช้งาน คู่มือเรื่องการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

ชื่อ..... ตำแหน่ง.....

หน่วยงาน.....

กรุณากากบาท (X) ระดับความพึงพอใจต่อคู่มือเรื่องการจัดการของเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์

หัวข้อการประเมิน	ระดับคะแนนการประเมิน					ข้อเสนอแนะ
	5 (มากที่สุด)	4 (มาก)	3 (ปานกลาง)	2 (น้อย)	1 (น้อยที่สุด)	
1. เนื้อหา						
1. เนื้อหาถูกต้อง ชัดเจน เข้าใจง่าย						
2. เนื้อหาเป็นปัจจุบัน						
3. การเรียงลำดับของเนื้อหา						
4. ภาษาที่ใช้ถูกต้อง เหมาะสม						
2. รูปแบบของคู่มือ						
1. คู่มือมีรูปแบบน่าสนใจน่าอ่าน						
2. ขนาดและรูปแบบตัวอักษรอ่านง่าย สบายงาม						
3. ขนาดรูปเล่มมีความเหมาะสม						
3. การนำไปใช้ประโยชน์						
1. ความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน						
2. สามารถใช้เป็นแหล่งอ้างอิงได้						
4. ภาพรวม						
1. ความพึงพอใจโดยภาพรวม						

ข้อเสนอแนะ

.....



ภาคผนวก ค

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาคู่มือ

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาคู่มือ (1)

1. ชื่อ – สกุลผู้ทรงคุณวุฒิ รศ. ดร.สุเทพ ศิลปานันทกุล
2. ตำแหน่งทางวิชาการ รองศาสตราจารย์
3. ตำแหน่งทางบริหาร
4. สถานที่ติดต่อ

ที่ทำงาน :

ที่บ้าน : 271/27 ร้านเฟซแอนด์บอดี ถ.เค็มบาง ต.มหาชัย อ.เมือง จ.สมุทรสาคร 74000

โทร. 0815840130

5. วุฒิการศึกษา

ระดับการศึกษา	วุฒิ	วิชาเอก	สถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ปริญญาตรี	วท.บ.	Sanitary Science	มหาวิทยาลัยมหิดล	2522
ปริญญาโท	วท.ม.	Environmental. Biology	มหาวิทยาลัยมหิดล	2524
ปริญญาเอก	Ph.D.	Medical and Veterinary Entomology	University of Kentucky	2534
อื่นๆ	วศ.บ.	Civil Engineering	มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีมหานคร	2543

6. ประสบการณ์การทำงานที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อเรื่องวิทยานิพนธ์

สอนวิชา Hazardous Waste Management สำหรับนักศึกษาปริญญาโทหลักสูตรสาขาภิบาลสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ตั้งแต่ พ.ศ. 2537 – 2559

7. ประสบการณ์การทำวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อเรื่องวิทยานิพนธ์

ควบคุมวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทเกี่ยวกับการจัดการ และการใช้ประโยชน์ Hazardous Waste จากงานอุตสาหกรรม และซากอิเล็กทรอนิกส์และตีพิมพ์งานวิจัยด้าน hazardous waste management

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาคู่มือ (2)

1. ชื่อ – สกุลผู้ทรงคุณวุฒิ ดร. ไชยยศ บุญญากิจ
2. ตำแหน่งทางวิชาการ
3. ตำแหน่งทางบริหาร รองประธาน Thai SCP Network
4. สถานที่ติดต่อ

ที่ทำงาน :

ที่บ้าน : 11/7 ซิลค์สนามเป้าคอนโดมิเนียม พหลโยธิน ซอย 3

แขวงพญาไท เขตพญาไท จังหวัดกรุงเทพฯ 10400 โทร. 0818320796

8. วุฒิการศึกษา

ระดับการศึกษา	วุฒิ	วิชาเอก	สถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ปริญญาตรี	วท.บ.	สาธารณสุขศาสตร์ (เกียรตินิยมอันดับสอง)	ม.มหิดล	2522
ปริญญาโท				
ปริญญาเอก	Ph.D.	Chemistry	The American University	2527
Post Doctoral Fellow			Nation Institute of Env. Health Science NIEHS, Research Triangle Parlc, NC USA	2527 - 2530

9. ประสบการณ์การทำงานที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิทยานิพนธ์

กรรมการบริหารคลัสเตอร์พลังงานทดแทน - สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

กรรมการและ ผู้ช่วยเลขานุการคณะกรรมการโครงการฉลากเขียว - สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย
 อนุกรรมการพัฒนาและส่งเสริมฉลากคาร์บอน - องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก อกบค (TGO)

กรรมการการพัฒนาที่ยั่งยืน - สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

ที่ปรึกษาคณะกรรมการกับโครงการขับเคลื่อนนโยบายการวิจัยและนวัตกรรมเพื่อสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียนของประเทศ - สถาบันนโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.)

10. ประสบการณ์การทำวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อเรื่องวิทยานิพนธ์

2563 Thai Journal of Public Health Vol.50 No.1 (Jan - Apr 2020): Env. Health Solution – Sustainable Consumption and Production: Challenges or Opportunities.

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาคู่มือ (3)

1. ชื่อ – สกุลผู้ทรงคุณวุฒิ คุณ ชัยพฤกษ์ ทองเปี่ยม
2. ตำแหน่งทางวิชาการ
3. ตำแหน่งทางบริหาร ผู้อำนวยการศูนย์บริหารและจัดการกากอุตสาหกรรม
บริษัท เบตเตอร์ เวิลด์ กรีน จำกัด (มหาชน)

4. สถานที่ติดต่อ

ที่ทำงาน : บริษัท เบตเตอร์ เวิลด์ กรีน จำกัด(มหาชน) 140 หมู่ 8 ถนนมิตรภาพ อำเภอแก่งคอย
จังหวัดสระบุรี 18110

ที่บ้าน : 54/195 คอนโดแชมเบอร์ เฌอ ถนนรัชดาภิเษกอินทรา เขตคันนายาว
จังหวัดกรุงเทพฯ 10230 โทร. 0817453232

5. วุฒิการศึกษา

ระดับการศึกษา	วุฒิ	วิชาเอก	สถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ปริญญาตรี	วท.บ.	เคมี	สถาบันเทคโนโลยี ราชมงคล	2546
ปริญญาโท	วิทยาศาสตร มหาบัณฑิต	การจัดการสิ่งแวดล้อม อุตสาหกรรม	มหาวิทยาลัยสุโขทัย ธรรมมาธิราช	2558
ปริญญาเอก				
อื่นๆ				

6. ประสบการณ์การทำงานที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิทยานิพนธ์

มีประสบการณ์การทำงานที่เกี่ยวข้องกับการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม และกำจัดกากอุตสาหกรรมทั้งในรูปแบบของการนำมาใช้ประโยชน์ และบำบัดกำจัดมากกว่า 15 ปี และปัจจุบันเป็นผู้อำนวยการศูนย์บริหารและจัดการกากอุตสาหกรรม จังหวัดสระบุรี ภายใต้บริษัท เบตเตอร์ เวิลด์ กรีน จำกัด มหาชน

7. ประสบการณ์การทำวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิทยานิพนธ์

เป็นผู้ทำวิทยานิพนธ์เรื่อง บั๊จจัยที่เกี่ยวข้องต่อการตัดสินใจเลือกผู้รับบำบัด และกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรมของโรงงานในเขตนิคมอุตสาหกรรม จังหวัดระยอง

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายธนาวุฒิ ไชยลังกา
วัน เดือน ปีเกิด	19 สิงหาคม 2530
สถานที่เกิด	จังหวัดพะเยา
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ(วศ.บ.) มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาปี 2553
สถานที่ทำงาน	บริษัท ไทยซัมมิต พลาสติก จำกัด (TSPT-4) นิคมอุตสาหกรรมอีสเทิร์นซีบอร์ด เลขที่ 64/46 หมู่ที่ 4 ตำบลปลวกแดง อำเภอปลวกแดง จังหวัดระยอง 21140
ตำแหน่ง	วิศวกร (Engineer, Process Engineering Department)

