# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

## โครงการ "การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า (Management of expired solar PV panels) "

**โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ และคณะ**

**สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)**

**(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)**

**สัญญาเลขที่ RDG58D0006**

# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

## โครงการ "การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า (Management of expired solar PV panels) "


| คณะผู้วิจัย | สังกัด |
|---|---|
| 1. ผศ. ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. รศ. ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 3. ศ. ดร. เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 4. อ. ดร. ฐิติศักดิ์ บุญปราโมทย์ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 5. อ. ดร. สันต์ สัมปัตตะวนิช | คณะเศรษฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |



**สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)**

**(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)**

# บทคัดย่อ

**รหัสโครงการ:** RDG58D0006

**ชื่อโครงการ:** การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า

**ชื่อนักวิจัย:** พิชญ รัชฎาวงศ์[1], สมชัย รัตนธรรมพันธ์[1], เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย[1], ฐิติศักดิ์ บุญปราโมทย์[1], สันต์ สัมปัตตะวนิช[2]

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

[2]คณะเศรษฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**E-mail address:** Pichaya.R@chula.ac.th

**ระยะเวลาโครงการ:** กันยายน 2558 – กันยายน 2559

ภายในปลายปี 2559 ในโลกจะมีของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในราว 43,500 – 250,000 ตันโดยประเทศจีน เยอรมันและญี่ปุ่น มีปริมาณของเสียสูงเป็นสามอันดับแรก หากมีการรีไซเคิลแผงในปริมาณที่จะเกิดสะสมถึงปี 2593 จะได้วัตถุดิบที่มีมูลค่าถึง 15 พันล้านเหรียญสหรัฐ อย่างไรก็ดีหากไม่มีการจัดการที่ดี สารเคมีอันตรายในแผงเช่น แคดเมียม ตะกั่ว ฯลฯ จะสามารถละลายและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ สำหรับประเทศไทย การติดตั้งแผงในช่วงปี 2545 - 2558 จะทำให้เกิดของเสียแผงในปริมาณที่สูง ทั้งนี้ในส่วนของ 3,000 MW ที่หนึ่งที่เกิดจากโรงไฟฟ้าเป็นหลักจะมีของเสียรวมถึง 354,924 - 519,217 ตัน เมื่อเทียบกับ 3,000 MW ที่สอง ที่ 271,377 - 275,623 ตัน ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการติดตั้งแผงทดแทนแผงที่เสียหรือชำรุดระหว่างการใช้งานของโรงไฟฟ้าและมีการทิ้งแผงชำรุดออกไป ทั้งนี้แผงประเภทหลักๆในไทยคือแบบผลึกซิลิกอน โดยภาคกลางจะมีปริมาณขยะแผงสูงที่สุด ตามด้วยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยจังหวัดที่มีการติดตั้งแผงสะสมมากที่สุดสามอันดับแรกเมื่อสิ้นปี 2558 คือสระแก้ว ลพบุรี และเพชรบุรี ตามลำดับ หน่วยงานหลักที่ควรเข้าไปดูแลเรื่องภาพรวมการจัดการของเสียคือคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานกิจการพลังงานและกรมโรงงานอุตสาหกรรมโดยควรให้ความรู้ความเข้าใจแก่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นเนื่องจากมีโอกาสสูงที่ของเสียแผงอาจจะปะปนมากับขยะชุมชน ในกรณีของแผงจากโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ เจ้าของจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบและจัดส่งไปจุดรวบรวม ในกรณีของแผงจากหลังคา ยังเป็นปัญหาที่ต้องการการชี้ชัดจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นร่วมกับคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานและกรมโรงงานอุตสาหกรรม การซ่อมแผงชำรุดแล้วนำไปจำหน่ายสามารถทำได้แต่ต้องมีการตรวจสอบ

อย่างจริงจังเพื่อป้องกันอุบัติเหตุ เมื่อแผงมาถึงจุดรวบรวมแล้ว จะเกิดกิจกรรมการจัดการขึ้น โดยสามารถเกิดขึ้นได้ใน 4 ระดับรูปแบบ ทั้งนี้ในระดับที่ 4 ที่ทำการแยกเพื่อนำแผงเซลล์กลับสู่กระบวนการผลิตใหม่อย่างสมบูรณ์จะมีต้นทุนสูงที่สุด ภาครัฐควรสนับสนุนให้เอกชนเช่นโรงคัดแยกขยะปัจจุบันหรือกลุ่มของผู้ผลิตแผงรวมตัวกันหรือกลุ่มที่มีหน้าที่ต้องจัดการกับขยะซากอิเลคทรอนิคส์อยู่แล้ว เป็นผู้ตั้งและดำเนินการรวบรวม ถอดแยก และทำการรีไซเคิลหรือส่งต่อไปยังกระบวนการผลิตต่อไป แผงเหล่านี้มีวัตถุดิบที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยปริมาณที่สูงจะได้แก่ กระจก อลูมิเนียม และทองแดง และเมื่อพิจารณาถึงมูลค่าวัสดุ จะมีทั้งโลหะเงินถึง 8 - 13 ตันจากของเสียที่สะสมถึงปี 2558 และโลหะหายาก ทั้งนี้การรีไซเคิลและการจัดการตามหลักวิชาจะช่วยป้องกันการละลายออกมาสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่วและแคดเมียม ภารกิจเร่งด่วนของหน่วยงานภาครัฐ ได้แก่ การจัดระบบการขึ้นทะเบียนของเสียที่สามารถครอบคลุมแผงตามบ้านได้ การจัดทำแนวทางปฏิบัติที่ละเอียดเพียงพอ วิเคราะห์ต้นทุนการขนส่ง การจัดตั้งและบริหารจัดการจุดรวบรวม การสนับสนุนการใช้ของเสียในภาคอุตสาหกรรมและการจัดทำมาตรฐานวัตถุดิบและแผงมือสอง การบังคับใช้กฎหมายตลอดจนการวิจัยและการบริหารจัดการเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

**คำสำคัญ:** ของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์, หมดอายุ, รีไซเคิล

# Abstract

**Project Code:** RDG58D0006

**Project Title:** Management of expired solar PV panels

**Investigators:** Rachdawong P.[1], Ratanathammaphan S.[1], Banjerdpongchai D.[1], Boonpramote T.[1], Sampattavanija S.[2]

[1] Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,

[2] Faculty of Economics, Chulalongkorn University

**E-mail address:** Pichaya.R@chula.ac.th

**Project duration:** September 2015 – September 2016

By the end of 2016, approximately 43,500 – 250,000 tons of photovoltaic waste will be generated in the world. China, Germany, and Japan will be the three leading generators. Recycling of such huge amount by 2050 will result in 15 billion US dollars worth of raw materials. Without proper management, cadmium or lead in the panels can leach and contaminate the environment. For Thailand, installation during 2002-2015 has resulted in high amount of waste production. The first 3,000 MW, which was mostly solar farm-related, would generate 354,924 - 519,217 tons of waste as compared to the second 3,000 MW which would produce 271,377 - 275,623 tons of waste. This is because solar farms must replace damaged panels with new ones and thus the damaged ones would become waste. Majority of the waste panel in Thailand is silicon-based. The highest generation will be from the Central Plain region, followed by the Northeastern. The three highest cumulative solar PV installation by the end of 2015, are Sakiew, Lopburi, and Petchburi provinces. Major government agencies in charge are the Energy Regulatory Commission (ERC) and the Department of Industrial Works (DIW). Both organizations should train local government agencies on how to handle the waste since there is high probability that the panel waste will be mixed and thrown away together with municipal solid waste. For the waste from utilities, plant owners must be responsible for transportation to

collection points. The issues of solar rooftop waste collection should be resolved by ERC, DIW, and local government agencies. Defect panel can be repaired and resold but careful inspection must be exercised to prevent possible accident. Once the waste panels arrive at collection, management activities will start. This can be done in four options. The most capital intensive way is the Option 4: recycling wafers for remanufacturing. Government should encourage current waste sorters, cooperation among panel producers, or electronic waste handlers to collect, disassemble, recycle, or deliver the materials for further manufacturing processes. The panel waste contains high quantities of glass, aluminium, and copper. With respect to values, the cumulative waste up to year 2015 contains about 8 - 13 tons of silver as well as some rare earth elements. In addition, recycling and proper management would prevent problems of lead and cadmium leaching. Immediate request to government agencies are waste registration that would cover rooftop panels, checklist for end of life panel decommission, analysis of transportation cost, establishment and management of collection and disassembly centers, enhancement waste material reuse in industrial sector as well as raw material and second hand panel standards, enforcement of the laws and regulations as well as technological and management research.

**Keywords:** photovoltaic waste, end of life, recycling

# สารบัญ


หน้า

**บทคัดย่อ**......**ก**

**สารบัญ**......**จ**

**สารบัญตาราง** ...... ฌ

**สารบัญรูปภาพ**......ฎ

**บทสรุปผู้บริหาร** ...... 1

**บทที่ 1 บทนำ** ...... 8

1.1 หลักการและเหตุผล......8

1.2 วัตถุประสงค์......9

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ ......9

ก. ช่วง 6 เดือนที่ 1 ......9

ข. ช่วง 6 เดือนที่ 2 ......10

**บทที่ 2 ของเสียและผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบ** Photovoltaic ...... 11

2.1 อุปกรณ์การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ......11

2.1.1 ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar panel)......11

2.1.2 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)......12

2.1.3 หม้อแปลง (Transformer)......13

2.1.4 สายไฟ ......13

2.1.5 อุปกรณ์อื่นๆ......14

2.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีใช้งานในประเทศไทย ......14

2.2.1 กลุ่มผลึกซิลิกอน (c-Si)......14

2.2.2 กลุ่มฟิล์มบาง (Thin film)......14

2.2.3 กลุ่มที่เป็นเทคโนโลยีใหม่......14

2.3 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากวัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ......15

2.3.1 พลังงาน ....................................................................................................................17
2.3.2 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และมลพิษอากาศอื่นๆ ......................................................19
2.3.3 การใช้สารเคมีและโลหะหนักในการผลิต ........................................................................21
2.3.4 การใช้น้ำและคุณภาพน้ำ ...........................................................................................23
2.3.5 ความเป็นพิษของแผงกับการจัดการหลังหมดอายุ ..........................................................24
**บทที่ 3 การบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน** ....................................... 26
3.1 การบริหารจัดการการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศเยอรมัน ...........................................27
3.1.1 ความนำ.............................................................................................................27
3.1.2 ภาคส่วนที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่การจัดการเซลล์แสงอาทิตย์ ..................................................28
3.2 การบริหารจัดการการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศญี่ปุ่น.................................................30
3.2.1 ความนำ.............................................................................................................30
3.2.2 ภาคส่วนที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่การจัดการเซลล์แสงอาทิตย์ ..................................................31
3.3 การบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย.................33
3.3.1 ความนำ.............................................................................................................33
3.3.2 ภาคส่วนที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่การจัดการเซลล์แสงอาทิตย์ ..................................................34
3.4 การคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์.............................................................38
3.4.1 การรวบรวมกำลังการผลิตจนถึงปี 2558 ......................................................................38
3.4.2 การคาดการณ์กำลังการผลิตที่หมดความคุ้มค่า..............................................................40
3.4.3 การประเมินน้ำหนักแผงที่หมดความคุ้มค่า ....................................................................42
3.4.4 การคาดการณ์น้ำหนักแผงที่ติดตั้งหลังปี 2558...............................................................44
3.4.5 การคาดการณ์ปริมาณของเสียจากกำลังการติดตั้งของ 3,000 MW ที่สอง ...............................45
**บทที่ 4 การประเมินสถานการณ์ในอนาคตตามห่วงโซ่การจัดการเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าตั้งแต่การเกิดจนถึงการจัดการขั้นสุดท้าย** ........................................................................................ 48
4.1 ตำแหน่งของการเกิดของเสียและการวางจุดรวบรวม ...........................................................48
4.2 การจัดการแผงหมดความคุ้มค่าหลังการรวบรวม.................................................................50
4.3 ปริมาณวัสดุตามประเภทแผง ........................................................................................52

**บทที่ 5 เทคโนโลยีการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์** ........ 55

5.1 ประเภทและส่วนประกอบของแผง ........ 55

5.2 ภาพรวมขั้นตอนการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ........ 57

5.3 ตัวอย่างการรีไซเคิลแผงแบบ Si Based ........ 60

5.4 ตัวอย่างการรีไซเคิลแผงแบบฟิล์มบาง ........ 62

5.5 แนวทางการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย ........ 63

**บทที่ 6 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายเพื่อการบริหารจัดการที่ดีในอนาคต** ........ 64

6.1 การบริหารจัดการในภาพรวม ........ 64

6.2 การเก็บรวบรวม ........ 65

6.3 ภาระหน้าที่ในการรวบรวม ........ 66

6.4 การจัดการตัวแผงภายหลังถูกรวบรวม ........ 70

6.5 แนวทางการประเมินความคุ้มทุนเบื้องต้น ........ 75

6.6 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย ........ 79

6.7 แนวทางปฏิบัติที่ควรเสนอต่อภาครัฐ ........ 81

**บทที่ 7 สรุป** ........ 83

**ภาคผนวก ก ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้เกี่ยวข้องหลัก** ........ 87

**ก.1 คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.)** ........ 87

**ก.2 สำนักงานโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.)** ........ 88

**ก.3 กรมโรงงานอุตสาหกรรม (กรอ.)** ........ 88

**ก.4 บริษัท โซล่าร์ตรอน จำกัด (มหาชน)** ........ 90

**ก.5 บริษัท ลีโอ อิเลคทรอนิคส์ จำกัด** ........ 91

**ก.6 ผู้รับเหมาโครงการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Rooftop** ........ 92

**ก.7 ผู้รับเหมาโครงการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟาร์ม** ........ 92

**ก.8 ผู้บริหารโรงพยาบาลเจ้าของ Solar rooftop ขนาด 100 kW** ........ 93

**ก.9 ผู้บริหารโซล่าร์ฟาร์ม** ........ 93

ก.10 วิศวกรบริษัทหลุมฝังกลบขยะอุตสาหกรรม ....................................................................................93

ก.11 โรงคัดแยกขยะ คุณธนวรรณ ....................................................................................94

**ภาคผนวก ข ข้อมูลจากงานสัมมนาที่เกี่ยวกับการเกิด การถอดแยก รวบรวม การขนส่ง จุดรวบรวม**.............................. 96

**ภาคผนวก ค ข้อมูลจากงานสัมมนาที่เกี่ยวกับการรีไซเคิล และการกำจัดตามความพร้อมในปัจจุบัน** ................................. 99

**แหล่งอ้างอิง**.......................................................................................................................... 102

# สารบัญตาราง

| ตาราง | | หน้า |
|---|---|---|
| 2 – 1 | ปริมาณการปลดปล่อยมลพิษอากาศของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ | 21 |
| 2 – 2 | สารเคมีและโลหะหนักสำคัญในการผลิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ | 22 |
| 2 – 3 | ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิตแผง (Upstream) และการเดินระบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (On-site) | 23 |
| 2 – 4 | ศักยภาพในการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่นต่อกิโลวัตต์พีคสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ | 23 |
| 3 – 1 | ขนาดกำลังการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จนถึง ปี 2545 – 2558 | 38 |
| 3 – 2 | กำลังการผลิตติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผู้รับใบอนุญาตผลิตไฟฟ้าระหว่างปี 2552 – 2558 | 39 |
| 3 – 3 | กำลังการผลิตตามปริมาณแผงเซลล์แสงอาทิตย์รายปีและสะสมในประเทศไทยจนถึง ปี พ.ศ. 2558 ที่ได้ทำการปรับแล้ว | 40 |
| 3 – 4 | ข้อมูลการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จนถึงปลายปี พ.ศ. 2558 (ค.ศ. 2015) และปีที่เกิดซากในมุมมองที่หนึ่ง | 41 |
| 3 – 5 | ข้อมูลการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จนถึงปลายปี พ.ศ. 2558 และปีที่เกิดของเสียในมุมมองที่ 2 | 42 |
| 3 – 6 | ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่างๆ | 43 |
| 3 – 7 | การประมาณค่าน้ำหนักของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามมุมมองที่ 1 | 44 |
| 3 – 8 | การประมาณค่าน้ำหนักของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามมุมมองที่ 2 | 44 |
| 3 – 9 | ปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะเกิดขึ้นสำหรับโครงการ 3,000 MW แรก ในส่วนที่เหลือ 985 MW และปริมาณของเสียที่จะเกิดขึ้นในส่วนที่ใช้ในการเปลี่ยนทดแทน | 45 |
| 3 – 10 | การประเมินความเป็นไปได้ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงการ 3,000 MW ที่สอง โดยในปีแรกติดตั้ง 40% หรือ 320 MW | 46 |
| 3 – 11 | การประเมินความเป็นไปได้ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงการ 3,000 MW ที่สอง โดยในปีแรกติดตั้ง 25% หรือ 200 MW | 47 |
| 3 – 12 | สรุปการประมาณการปริมาณของเสียแผงของประเทศไทย | 48 |

**ตาราง** **หน้า**


4 – 1 ปริมาณกำลังติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์แยกตามภาค 50

4 – 2 สิบอันดับจังหวัดที่มีการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์สะสมสูงสุดในปี 2559 50

4 – 3 ข้อมูลกำลังการผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และจำนวนโรงงานคัดแยก 52

4 – 4 ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบต่างๆของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 53

4 – 5 วัตถุดิบที่น่าสนใจจากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะเกิดขึ้นภายในปี 2588 54

5 – 1 องค์ประกอบหลักของวัสดุแผงและสัดส่วนการนำกลับไปใช้ได้ใหม่ 62

6 – 1 รายได้ ผลิตภัณฑ์และต้นทุนของการคัดแยกและรีไซเคิลจากสี่ระดับทางเลือก 75

6 – 2 ผลประเมินทางการเงินของการจัดการของเสียแผงหมดความคุ้มค่าที่ระดับการจัดการแบบต่างๆ 80

# สารบัญรูปภาพ

| รูป | | หน้า |
|---|---|---|
| 2 – 1 | ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ | 12 |
| 2 – 2 | อินเวอร์เตอร์ รุ่น Apollo G-4000-176 ของ บ. ลีโอ อิเล็กทรอนิคส์ จำกัด | 12 |
| 2 – 3 | หม้อแปลงไฟฟ้า | 13 |
| 2 – 4 | สายไฟ | 13 |
| 2 – 5 | วัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งแต่วัตถุดิบจนถึงขั้นตอนการกำจัดและรีไซเคิล | 15 |
| 2 – 6 | ขั้นตอนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบ | 16 |
| 2 – 7 | ขั้นตอนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ CdTe | 17 |
| 2 – 8 | ค่า EPBT ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานในสหรัฐอเมริกา สเปน เยอรมัน และสวิสเซอร์แลนด์ | 18 |
| 2 – 9 | Energy Payback Time และสัดส่วนตามองค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ | 19 |
| 2 – 10 | ปริมาณการปลดปล่อย $CO_2$ เทียบเท่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละประเภท | 20 |
| 3 – 1 | การจัดการขยะอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ตามข้อกำหนดในกฎหมาย LRHA | 32 |
| 5 – 1 | องค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีซิลิกอนเป็นส่วนประกอบ | 57 |
| 5 – 2 | องค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง | 58 |
| 5 – 3 | ขั้นตอนในการรีไซเคิลเพื่อนำวัสดุของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลับมาใช้ใหม่ | 59 |
| 5 – 4 | กระบวนการทางเคมีเพื่อกำจัดสารเคลือบบนแผ่นเซลล์ | 60 |
| 5 – 5 | ขั้นตอนการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Si Based | 61 |
| 5 – 6 | การให้ความร้อนที่ 600$^{\circ}$C เพื่อแยกซิลิกอนเวเฟอร์ | 62 |
| 5 – 7 | การผลิตแท่งผลึกซิลิกอนจากผงโลหะซิลิกอนที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว | 62 |
| 5 – 8 | แผนผังการรีไซเคิลแผลเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Thin Film ชนิด CdTe | 63 |
| 6 – 1 | องค์ประกอบหลักๆของการจัดการแผงหมดความคุ้มค่า | 66 |
| 6 – 2 | การจัดการตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายหลังถูกรวบรวม | 71 |

## Executive Summary

## บทสรุปผู้บริหาร

## การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า

ในขณะนี้ ประเทศไทยมีการส่งเสริมการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีเป้าหมายการผลิตไฟฟ้ารวมถึง 6,000 MW ภายในปี 2579 ดังนั้นอีก 5 - 30 ปีต่อจากนี้ไป ประเทศไทยจะเริ่มเผชิญกับปัญหาของเสียที่เกิดมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมดอายุหรือแผงที่ไม่สามารถทำงานได้ดีพร้อมทั้งอุปกรณ์ประกอบต่างๆ ของเสียเหล่านี้ควรจะต้องมีการจัดการต่อไปอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ เพื่อเป็นการรักษาไว้ซึ่งคุณภาพสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีองค์ประกอบต่างๆที่หลากหลายโดยมีทั้งสารอันตราย เช่น ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) และสารไม่อันตรายที่มีมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์อีกหลายชนิด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาเรื่องการจัดการของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าเพื่อจะได้เกิดแนวทางที่สอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์ของประเทศในเรื่องวัตถุดิบอุตสาหกรรมเหล่านี้ด้วย โดยจะต้องเป็นแนวทางในการทำงานร่วมกันของหน่วยงานภาครัฐและเอกชนในการจัดการของเสียและการผลิตวัตถุดิบให้กับประเทศต่อไป โดยวัตถุประสงค์โครงการจะมีดังต่อไปนี้

1) เพื่อศึกษาวิธีการบริหารจัดการแผงเซลแสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าเพื่อเป็นข้อมูลในการวางแผนสำหรับประเทศไทย

2) เพื่อศึกษาและเสนอแนะทางเลือกที่เหมาะสมในการจัดการสำหรับประเทศไทยโดยพิจารณาประเด็นด้านการบริหารจัดการ กฎหมาย เศรษฐศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม

ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้มากในประเทศไทยนั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ตามลักษณะผลิตภัณฑ์และวัตถุดิบ ได้แก่กลุ่มผลึกซิลิกอน (Crystalline Silicon-C-Si) กลุ่มฟิล์มบาง (Thin film) โดยในกลุ่มนี้จะมีประเภทสำคัญๆอยู่สี่ประเภทคือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน (Amorphous Silicon-a-Si) แบบแคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride-CdTe) แบบแคดเมียมอินเดียมแกลเลียมเซเลไนด์ (Cadmium Indium Gallium Selenide-CIGS) และแบบแคดเมียมอินเดียมไดซีลีไนด์ (Cadmium Indium Diselenide-CIS) และกลุ่มที่เป็นเทคโนโลยีใหม่ ได้แก่ เซลล์แบบสารอินทรีย์ (Organic Photovoltaic-OPV) เซลล์แบบสีย้อม (Dye Sensitive Materials) แบบ Quantum Dots (QDS) และแบบคาร์บอน นาโนทิวบ์ เป็นต้น

ในเรื่องผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากวงจรชีวิตแผง พบว่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในการผลิตจะมาจากการปลดปล่อยในการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตเป็นส่วนใหญ่ โดยสำหรับแบบผลึกซิลิกอน พบว่า

พลังงานส่วนใหญ่ถูกใช้ในกระบวนการถลุงและทำให้ซิลิกอนบริสุทธิ์ ซึ่งหากมีการรีไซเคิลแผงหมดอายุจะลดพลังงานส่วนนี้ได้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ดีผลกระทบสิ่งแวดล้อมสำคัญยังมาจากองค์ประกอบกลุ่มโลหะหนัก เช่น ตะกั่วและแคดเมียม ในแผงแบบต่างๆที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าที่จำเป็นต้องมีการดูแลอย่างถูกหลักการเพื่อป้องกันการปนเปื้อนสิ่งแวดล้อม โดยตะกั่วเป็นโลหะที่มีความสามารถในการสะสมได้ทั้งในคนและในสิ่งแวดล้อมและตะกั่วจะเป็นอันตรายต่อระบบประสาท ไต ระบบภูมิคุ้มกันและระบบสืบพันธ์ ส่วนแคดเมียมมีความเชื่อมโยงกับโรคระบบทางเดินหายใจและกระดูกพรุนในผู้สูงอายุและเป็นสาเหตุของโรค มะเร็งต่อมลูกหมากและไต หากมีการสะสมมากจะทำให้เกิดอาการเจ็บปวดตามตัวเรียกว่าโรคอิไตอิไต (Itai-Itai) ทั้งนี้หากคิดที่ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วที่ 12.67 กรัมต่อแผงและน้ำหนักแผงที่ 22.4 กิโลกรัม ที่ค่าพีเอช 6 - 7 และ 3-4 ตะกั่วสามารถละลายออกมาได้ราว 75 กรัมและ 518 กรัมต่อตันของแผงเสียตามลำดับ และหากคิดที่ค่าเฉลี่ยปริมาณแคดเมียมที่ 4.6 กรัมต่อแผงและน้ำหนักแผงที่ 12 กิโลกรัม ที่ค่าพีเอชปกติ และที่ค่าพีเอช 3-4 แคดเมียมสามารถละลายออกมาได้ราว 27 กรัมและ 153 กรัมต่อตันของเสียตามลำดับ ทั้งนี้ในสหภาพยุโรปมองว่าความรุนแรงจากตะกั่วมีค่ามากกว่าแคดเมียมเพราะว่าตะกั่วมีโอกาสสูงมากที่จะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้โดยง่ายและการควบคุมผลกระทบของตะกั่วก็ทำได้ยากกว่า

ภายในปลายปี 2559 ในโลกจะมีของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในราว 43,500 – 250,000 ตันโดยประเทศจีน เยอรมันและญี่ปุ่น มีปริมาณของเสียสูงเป็นสามอันดับแรก ทั้งนี้อัตราการเกิดของเสียแผงจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมากระหว่างปี 2573 - 2593 โดยปี 2593 จะมีปริมาณของเสียรวมในโลกถึง 60 - 78 ล้านตัน เนื่องจากของเสียแผงมีจำนวนมากและมีมูลค่าจากวัตถุดิบ จึงมีการคาดการณ์ว่าหากมีการรีไซเคิลแผงจำนวน 60 - 78 ล้านตัน ในปี 2593 จะได้วัตถุดิบมีค่าถึง 15 พันล้านเหรียญสหรัฐซึ่งสามารถนำไปผลิตแผงใหม่ได้ถึง 2 พันล้านแผง ซึ่งหากไม่มีการจัดการที่ดีตามหลักวิชา สารเคมีในแผงเช่น แคดเมียม ตะกั่ว ฯลฯ จะสามารถละลายและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้คุณภาพของแหล่งทรัพยากรน้ำและดินเสื่อมโทรมลงได้

โดยประเทศที่มีความก้าวหน้าในการพัฒนาและที่มีความตื่นตัวด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและการจัดการแหล่งทรัพยากรจากแผงหมดอายุในยุโรปที่เด่นชัดที่สุดก็คือประเทศเยอรมัน ส่วนภายนอกทวีปยุโรป ประเทศที่มีการพัฒนาระบบการบริหารจัดการทั้งในส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นที่ยอมรับอีกแห่งหนึ่งก็คือประเทศญี่ปุ่น ลักษณะเด่นของการจัดการแผงหมดอายุในเยอรมันคือ ผู้ผลิตจะมีหน้าที่ในการเรียกคืน รวบรวม และนำอุปกรณ์ที่หมดอายุจากครัวเรือน ไปดำเนินการถอดแยก รีไซเคิล หรือส่งต่อไปยังโรงงานที่ทำหน้าที่ดังกล่าว โดยผู้ผลิตจะเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่างๆทั้งหมด ทั้งนี้ผู้ผลิตจะรวมถึงโรงงานที่ทำการผลิต ผู้นำเข้า ผู้จัดจำหน่ายอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ด้วย กลุ่มผู้ผลิตแผงในสหภาพยุโรปได้รวมกันก่อตั้งองค์กรชื่อ PV Cycle เพื่อจัดทำการบริหารจัดการแผงหมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า โดยทำ

หน้าที่ประสานการจัดเก็บรวบรวม การขนส่งและการทำรีไซเคิลในพื้นที่ต่างๆทั่วทวีปยุโรป รวมถึงในประเทศเยอรมันด้วย โดยตั้งแต่ปี 2553-2558 PV Cycle ได้เก็บและรีไซเคิลรวมกันถึง 13,000 ตันของแผงหมดความคุ้มค่า โดยเป็นแผงจากประเทศเยอรมันถึง 7,637 ตัน

ส่วนในประเทศญี่ปุ่นยังไม่มีกฎหมายที่มีผลบังคับในเรื่องการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าโดยเฉพาะ แต่ภาคอุตสาหกรรมของญี่ปุ่นโดยเฉพาะกลุ่มผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เริ่มมีความตื่นตัวและเริ่มกระบวนการเก็บรวบรวมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่า โดยคิดค่าบริการ 8 ยูโรต่อเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงมา ตั้งแต่เดือนมกราคม 2557 และเริ่มมีมาตรการเพื่อการสนับสนุนนโยบายการรีไซเคิลของรัฐบาล ทั้งนี้เพื่อป้องกันปัญหาที่จะมีขยะแผงเซลล์ในหลุมฝังกลบ ในประเทศญี่ปุ่น เจ้าของขยะจ่ายค่าจัดการของเสียให้กับตัวแทนจำหน่าย ณ จุดจำหน่ายหรือจุดเก็บทั่วประเทศ ในกรณีที่ตัวแทนจำหน่ายไม่สามารถจัดการได้ AEHA-Association of Electric Home Appliance จะเข้าไปดูแลการเก็บรวบรวมแทน ระบบของการเก็บเงินค่าจัดการนี้ถึงแม้จะเป็นการส่งเสริมให้เกิดการยืดระยะการใช้ให้ยาวที่สุด แต่ก็จะทำให้เกิดการลักลอบทิ้งเช่นกัน

โดยทั่วไปแผงเซลล์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าอาจจะจำแนกได้เป็นสองลักษณะคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุ (End-of-life) ซึ่งหมายถึงแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าจนหมดความคุ้มค่าในการใช้งานต่อไป และแผงที่เสียหายจากการใช้งาน (Damage) ซึ่งได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ชำรุดเสียหายหรือหมดสภาพจากอุบัติเหตุในการขนส่ง การติดตั้ง รวมถึงแผงที่มีความเสียหายที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน ได้แก่ การถูกกระแทกจากของแข็งต่าง ๆ ในขณะทำการบำรุงรักษา ทำความสะอาด แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีตำหนิบกพร่องหรือผิดพลาดจากโรงงานผู้ผลิต เป็นต้น โดยปกติแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอายุใช้ระหว่าง 20 – 30 ปี ขึ้นอยู่กับความสามารถในการบำรุงรักษา คุณภาพผลิตภัณฑ์และสภาพสิ่งแวดล้อมโดยรอบ ในการศึกษานี้การประมาณปริมาณของเสียแผงในประเทศไทยสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 5 ขั้นตอนคือ 1) การรวบรวมกำลังการผลิตจนถึงปี 2558 2) การคาดการณ์กำลังการผลิตที่หมดความคุ้มค่า 3) การประเมินน้ำหนักแผงที่หมดความคุ้มค่า 4) การคาดการณ์น้ำหนักแผงที่ติดตั้งหลังปี 2558 และ 5) การคาดการณ์ปริมาณของเสียจากกำลังการติดตั้งของ 3,000 MW ที่สอง โดยประมาณการแผงเสียหายอยู่ที่ 0.5% 1% และ 2% ตามลำดับ และเป็นข้อมูลที่ได้มาจากการสัมภาษณ์และมีความแปรปรวนตามปัจจัยต่างๆ จากผลการประมาณการ พบว่าการติดตั้งแผงในช่วงปี 2545-2558 จะทำให้เกิดของเสียแผงในปริมาณที่สูง โดยค่าจากในมุมมองที่ 2 ที่ไม่คิดการติดตั้งแผงทดแทนในช่วงปี 2545-2551 น่าจะมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าค่าจากมุมมองที่ 1 ทั้งนี้ในส่วนของ 3,000 MWp ที่หนึ่งที่ของเสียเกิดจากโรงไฟฟ้าเป็นหลักจะมีของเสียรวมถึง 354,924-519,217 ตัน เมื่อเทียบกับปริมาณของเสียที่ 3,000 MWp ที่สอง ที่ 271,377-275,623 ตัน ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการติดตั้งแผงทดแทนแผง

ที่เสียหรือชำรุดระหว่างการใช้งานของโรงไฟฟ้าและมีการทิ้งแผงชำรุดออกไป ปริมาณของเสียสะสมรวมที่อาจเกิดได้ในประเทศไทยระหว่างปี 2565-2601 จากการติดตั้งรวมที่ 6,000 MW อาจมีปริมาณที่สูงถึง 626,301-794,840 ตัน โดยแผงประเภทหลักๆในไทยคือแผงแบบผลึกซิลิกอนเช่นเดียวกันกับทั่วโลก ภาคกลางจะมีการเกิดขึ้นของขยะแผงสูงที่สุด ตามด้วยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยจังหวัดที่มีการติดตั้งแผงสะสมมากที่สุดสามอันดับแรกเมื่อสิ้นปี 2558 คือสระแก้ว (253.13 MW) ลพบุรี (221.10 MW) และเพชรบุรี (197.14 MW) ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณของเสียแผงจะเริ่มเกิดมากและควรมีการวางแผนรับมือตั้งแต่ปี 2565 เป็นต้นไป

หน่วยงานหลักที่ควรเข้าไปดูแลเรื่องภาพรวมการจัดการของเสียคือคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานที่ดูแลตามพระราชบัญญัติควบคุมส่งเสริมกิจการพลังงานและกรมโรงงานอุตสาหกรรมตามพระราชบัญญัติโรงงาน โดยควรให้ความรู้ความเข้าใจแก่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในเรื่องการดูแลด้วยเนื่องจากมีโอกาสสูงที่ของเสียแผงตามบ้านจะปะปนมากับขยะชุมชน ในกรณีของแผงที่เกิดจากโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ เจ้าของจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบและจัดส่งไปจุดรวบรวม ในกรณีของแผงจากหลังคา ยังเป็นปัญหาที่ต้องการการชี้ชัดร่วมกันจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานและกรมโรงงานอุตสาหกรรม การซ่อมแผงชำรุดแล้วนำไปจำหน่ายสามารถทำได้แต่ต้องมีการตรวจสอบอย่างจริงจังเพื่อป้องกันอุบัติเหตุ

เมื่อแผงมาถึงจุดรวบรวมแล้ว จะเกิดการจัดการขึ้น โดยการจัดการสามารถเกิดขึ้นได้ใน 4 ระดับรูปแบบ คือ 1) การจัดการคัดแยกอย่างง่ายและฝังกลบส่วนที่เหลือ 2) การคัดแยก บด และทำการคัดแยกวัสดุหลังการบด 3) การคัดแยกเบื้องต้นและการใช้เครื่องมือในการแยกส่วนกระจก และ 4) การคัดแยกเบื้องต้นและการแยกส่วนวัสดุให้สามารถนำกลับไปทำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีก จะเห็นได้ว่าระดับที่ 1 เป็นรูปแบบที่ทำง่าย ต้นทุนต่ำแต่ได้วัสดุกลับมาใช้ใหม่น้อยและต้องมีค่ากำจัดเศษเหลือทิ้ง ขณะที่ระดับที่ 4 เป็นรูปแบบที่มีการลงทุนสูง ใช้กระบวนการที่ซับซ้อน แต่ได้วัสดุกลับมาใช้ใหม่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้จากระดับที่ 1 ถึงระดับที่ 4 จะเป็นการลงทุนที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้เกิดการนำกลับวัสดุที่มากขึ้นทีละขั้น โดยระดับที่ 4 อาจจะถือได้ว่าเป็นวิธีที่ค่อนข้างครบถ้วน ซึ่งจะมีต้นทุนสูงที่สุด และจากการประมาณการรายรับรายจ่ายของการจัดการแต่ละระดับพบว่าระดับที่ 3 และ 4 ยังไม่สามารถคุ้มทุนด้วยตัวเองได้ในปีปัจจุบัน ดังแสดงในตาราง ส่วนการจัดการในระดับที่ 1 คือสิ่งที่เกิดขึ้นจริงสำหรับโรงงานไฟฟ้าปฏิบัติตามระเบียบในประเทศไทยในปีปัจจุบัน

| **การจัดการ** | **รายรับ (บาท/แผง)** | **รายจ่าย (บาท/แผง)** | **กำไร (บาท/แผง)** | **กำไรทางสิ่งแวดล้อม (บาท/แผง)** | **ความเป็นไปได้ในประเทศไทยในปีปัจจุบัน** |
|---|---|---|---|---|---|
| ระดับที่ 1 | 101.64 | 83.60 | 18.04 | 6.93 | มีใช้ในปัจจุบัน |
| ระดับที่ 2 | 109.64 | 65.3 | 44.34 | 36.93 | เป็นไปได้ |
| ระดับที่ 3 | 114.95 | 472.05 | -357.1 | 56.85 | ต้องสนับสนุน |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ระดับที่ 4 | 378.85 | 1,135.55 | -756.7 | 67.2 | ต้องสนับสนุน |

ทั้งนี้ในระยะแรกที่มีของเสียปริมาณน้อย อาจใช้วิธีระดับที่ 1 ซึ่งสามารถทำได้อยู่แล้วในทางธุรกิจ โดยในระยะแรกนี้ สิ่งที่ควรทำเพิ่มเติมคือแนวทางการรวบรวมแผงที่หมดความคุ้มค่าที่จะเกิดขึ้นจะมีวิธีการอย่างไร ในเบื้องต้นเจ้าของแผงควรเป็นผู้รับค่าใช้จ่ายในการจัดการถอดและขนส่งไปยังจุดรวบรวม ซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่ยากสำหรับกลุ่มโรงไฟฟ้า แต่จะยากสำหรับกลุ่มติดตั้งบนอาคาร โดยเฉพาะประเด็นที่จะไม่ให้เจ้าของแผงบนอาคารเหล่านี้ปล่อยแผงเสียทิ้งไว้หรือขายแผงต่อเข้าตลาดมือสอง หรือที่น่าเป็นห่วงที่สุดคือการนำไปทิ้งรวมกับขยะชุมชน ส่วนค่าฝังกลบนั้นหากมีการนำวัสดุจากแผงไปขายได้จริง ธุรกิจรีไซเคิลควรเป็นผู้รับผิดชอบค่าฝังกลบซากแผงที่เหลือ ในระหว่างที่จำนวนแผงที่เข้าสู่ระบบยังมีไม่มากพอ รัฐอาจทำการสนับสนุนงานวิจัยเพื่อการจัดการแผง ในระดับต่างๆ เพื่อให้เกิดเทคโนโลยีภายในประเทศที่มีต้นทุนที่ถูกลงทั้งในด้านการลงทุนและในด้านการดำเนินงานซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนค่าดำเนินการที่เป็นต้นทุนหลักในระดับที่ 3 และ 4 มีค่าลดลงด้วย นอกจากนี้รัฐอาจส่งเสริมการวิจัยเพื่อหาวิธีในการเก็บรักษาของเสียแผงไว้แบบไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการรีไซเคิลในอนาคต เนื่องจากการปรับเสถียรและฝังที่ทำอยู่ในปัจจุบัน จะทำให้ไม่คุ้มค่าที่จะขุดกลับขึ้นมาเข้ากระบวนการจัดการใหม่ ปริมาณที่มากขึ้นของแผงที่เข้าสู่ระบบและราคาเทคโนโลยีที่ลดลงจะส่งเสริมให้การจัดการตามระดับที่ 3 และที่ 4 เกิดขึ้นได้ เนื่องจากแผงเหล่านี้มีวัตถุดิบที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยหากพิจารณาถึงปริมาณที่สูงจะได้แก่ กระจก อลูมิเนียม และทองแดง หากพิจารณาถึงมูลค่าของเสียแผง จะมีโลหะเงินถึง 8 - 13 ตันจากของเสียที่สะสมถึงปี 2558 และยังมีโลหะหายากเช่นอินเดียม แกลเลียม และเทลลูเรียมอีก

ภารกิจเร่งด่วนของหน่วยงานภาครัฐ ได้แก่ การจัดระบบการขึ้นทะเบียนของเสียที่สามารถครอบคลุมแผงตามบ้านได้ การจัดทำแนวทางปฏิบัติที่ละเอียดเพียงพอ วิเคราะห์ต้นทุนการขนส่ง การจัดตั้งและบริหารจัดการจุดรวบรวม การสนับสนุนการใช้ของเสียในภาคอุตสาหกรรมและการจัดทำมาตรฐานวัตถุดิบและแผงมือสอง การบังคับใช้กฎหมาย ตลอดจนการวิจัยและการบริหารจัดการเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

1. การขึ้นทะเบียนของเสียในอนาคต

ในขณะนี้ ไม่ว่าจะเป็นคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ) กระทรวงพลังงาน หรือกรมโรงงานอุตสาหกรรม ไม่มีหน่วยงานใดมีข้อมูลจำนวน ประเภทและที่ตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์อย่างครบถ้วน โดยเฉพาะแผงที่เป็นประเภทที่ติดตามอาคาร ซึ่งแผงประเภทนี้จะมีปริมาณการติดตั้งที่สูงขึ้นในอนาคตอย่างแน่นอน ภาครัฐควรมีหน่วยงานทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลเหล่านี้ ทั้งที่เป็นประเภทโรงไฟฟ้าและแบบที่ติดอาคาร (Rooftop) ในกรณีของแผงแบบติดอาคาร หน่วยงานนี้อาจจะทำการวัดประสิทธิภาพและให้คำแนะนำในการดูแลแผงไปด้วยก็ได้ก็ได้ โดยหน่วยงานนี้ไม่จำเป็นต้องเป็นหน่วยราชการ

2. แนวทางปฏิบัติภายหลังหมดอายุ

ประมวลหลักการปฏิบัติ (Code of Practice-CoP) ของคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานควรมีรายละเอียดที่ชัดเจนในรูปแบบของบัญชีสิ่งที่ต้องทำ (Checklist) เมื่อมีแผงที่หมดความคุ้มค่าที่หน้างาน (Decommission) ภาครัฐอาจจำต้องจัดให้มีจุดรวบรวม โดยอาจจะรวมไปถึงการรวบรวมขยะอิเลคทรอนิคส์อย่างอื่นๆด้วยก็ได้เพราะว่ามีผลกระทบสำคัญหลายด้าน ทั้งด้านมลพิษ การจัดการทรัพยากร และการจ้างงาน เป็นต้น

3. ต้นทุนการขนส่ง

หน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรมีการระบุและบังคับให้ชัดเจนถึงผู้มีหน้าที่ออกเงินและทำการจัดส่งแผงไปยังจุดรวบรวม โดยเฉพาะในกรณีของแผงที่ติดบนหลังคา เช่นกลุ่มเจ้าของแผง ทั้งนี้การวางจุดรวบรวมที่เหมาะสมจะทำให้ลดต้นทุนได้มาก นอกจากนี้ปริมาณที่ขนส่งต่อครั้งที่มากขึ้นจะทำให้ในต้นทุนต่อหน่วยลดลง

4. การบริหารจัดการและหน้าที่จุดรวบรวม

ภาครัฐควรมีมาตรการในการจัดตั้งจุดรวบรวมย่อยโดยอาจจะใช้พื้นที่จัดการขยะขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นสำหรับของเสียแผงจากหลังคาบ้านที่มีปริมาณต่ำ ในส่วนของของเสียจากโรงงานที่มีปริมาณมาก ภาครัฐควรจัดให้มีจุดรวบรวมที่สามารถทำการคัดแยกในเบื้องต้นได้โดยควรสนับสนุนและเพิ่มศักยภาพให้กับโรงคัดแยกขยะเอกชนในปัจจุบันหรือกลุ่มของผู้ผลิตแผงที่มีศักยภาพหรือหน่วยงานที่ต้องจัดการของเสียขยะเลคทรอนิคส์อยู่แล้ว ทั้งด้านการเงินและความรู้ ตลอดจนต้องระบุถึงปลายทางให้ชัดเจนสำหรับส่วนที่คัดแยกได้ยากหรือแยกไม่ได้ว่าควรจะไปรีไซเคิลหรือกำจัดโดยหลุมฝังกลบ

5. การสนับสนุนการใช้ของเสียในภาคอุตสาหกรรมและการจัดทำมาตรฐานวัตถุดิบและแผงมือสอง

ปัญหาหนึ่งของโรงคัดแยกเอกชนที่ไม่รับกระจกจากของเสียแผงคือมีสารปนเปื้อนเช่น EVA หรือ เคมีอื่นๆ ทำให้ขายวัสดุต่อไม่ได้ ภาครัฐจึงควรให้ความรู้และแรงจูงใจแก่อุตสาหกรรมท้ายน้ำต่างๆ เช่นโรงงานกระจก โรงถลุงซิลิกอน โรงหลอมทองแดง ถึงกรรมวิธีและผลประโยชน์ของการใช้ของเสียเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมวัสดุต้นทางเหล่านี้ เหตุผลอีกประการที่อุตสาหกรรมท้ายน้ำมีความลังเลที่จะใช้วัตถุดิบที่มาจากของเสียคือความคงที่และการปนเปื้อนของมลสาร สารเคมีต่างๆ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ภาครัฐควรจะกำหนดมาตรฐานของวัตถุดิบที่มาจากของเสียเหล่านี้ โดยคำนึงถึงความบริสุทธิ์ การปนเปื้อน และขนาดเป็นต้น นอกจากนี้มีการซ่อมแผงชำรุดเพื่อนำไปจำหน่ายใหม่ จึงควรจัดให้มีมาตรฐานความปลอดภัยและการรับประกันสำหรับแผงมือสองเหล่านี้ด้วย

6. การบังคับใช้กฎหมาย

ของเสียที่มีโลหะหนักและสารอินทรีย์ปนเปื้อน เช่นของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องมีการจัดการอย่างถูกหลักการ ควรมีการดำเนินการเอาผิดกับผู้ลักลอบทิ้ง ตามกฎหมายที่เกี่ยวข้องของหน่วยงานที่รับผิดชอบต่างๆ

7. การวิจัยและการบริหารจัดการเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

ภาครัฐควรจัดให้มีการวิจัยเชิงประยุกต์ที่เกี่ยวกับการเลือกที่ตั้งจุดรวบรวม เทคโนโลยีในการแยกแผ่นกระจกกับแผ่นเซลล์ออกจากกัน การใช้ซ้ำของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์และกระจก การสกัดโลหะมีค่าออกจากของเสียแผง การกำจัดที่เหมาะสมกับส่วนที่ใช้ไม่ได้ การวิจัยความเป็นไปได้ในการตั้งศูนย์กำจัดหรือรีไซเคิลของเสียแผงร่วมกับซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าอิเลคทรอนิคส์ และการสนับสนุนการออกแบบและผลิตแผงจากซากที่หมดอายุแล้ว นอกจากนี้ควรมีการศึกษาเรื่องการกระจายความรู้และอบรมบุคคลากรให้สามารถใช้เทคโนโลยีในข้างต้นได้จริงในระดับปฏิบัติการด้วย ควรมีการศึกษาวิจัยผลกระทบเรื่องการส่งเสริมการรีไซเคิลของเสียเหล่านี้กับการจ้างงานและต่อเศรษฐกิจในภาพรวม ตลอดจนเพิ่มศักยภาพในเรื่องความมั่นคงทางวัสดุและพลังงานให้กับประเทศได้อย่างไร

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 หลักการและเหตุผล

ในขณะนี้ ภาครัฐได้มีการส่งเสริมการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีเป้าหมายการผลิตไฟฟ้ารวมถึง 6,000 MW ภายในปี พ.ศ.2579 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) ซึ่งหากใช้แผงขนาดประมาณ 1.6 $m^2$ ซึ่งมีกำลังการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ยประมาณ 250 W ต่อแผง จะมีจำนวนประมาณ 24 ล้านแผง โดยแผงเหล่านี้มีอายุการใช้งานประมาณ 15 - 25 ปี ขึ้นอยู่กับประเภท ยี่ห้อ การดูแลบำรุงรักษา และสภาพแวดล้อมของสถานที่ติดตั้งไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบของโรงงานผลิตไฟฟ้า ตามบ้านเรือน หรือตามสถานประกอบการ หากคิดที่น้ำหนัก 25 กิโลกรัมต่อแผง อาจจะเกิดของเสียที่สุดท้ายมีปริมาณสูงถึง 600,000 ตัน ดังนั้นภายในอีก 5 - 30 ปีข้างหน้า ประเทศไทยจะเริ่มเผชิญกับปัญหาของของเสียที่เกิดมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมดอายุหรือแผงที่ไม่สามารถทำงานได้ดีพร้อมทั้งอุปกรณ์ประกอบต่างๆ ของเสียเหล่านี้ควรจะต้องมีการจัดการต่อไปอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ เพื่อเป็นการรักษาไว้ซึ่งคุณภาพสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติและเนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีองค์ประกอบต่างๆที่หลากหลายโดยมีทั้งสารอันตราย เช่น สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) และสารไม่อันตรายอีกหลายชนิด โดยมีข้อที่น่าสังเกตที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งในกรณีของการติดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามบ้านเรือน (Solar rooftop) ว่าจะมีการกำจัดโดยการทิ้งรวมไปกับขยะชุมชนด้วยหรือไม่หากไม่มีมาตรการหรือข้อกำหนดที่ชัดเจนมารองรับ ทั้งนี้ในกลุ่มประเทศที่พัฒนาแล้วเช่นในกลุ่มประเทศอียูได้มีการออกมาตรการ (EU Directive) มาตั้งแต่ปี พ.ศ.2555 เพื่อการจัดการขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมดอายุ โดยมาตรการนี้จะครอบคลุมถึงการเก็บรวบรวมและการบำบัดแผง เพื่อป้องกันปัญหามลพิษและเพื่อเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรแร่และโลหะหายากไปพร้อมๆกัน (Paiano, 2014) โดยความท้าทายในเรื่องการจัดการนี้อาจมาจากการเก็บรวมรวมเนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในต่างประเทศมีการกระจัดกระจายตามจุดติดตั้งใช้งาน ทำให้จัดเก็บได้ยากและมีต้นทุนที่สูง (Choi และ Fthenakis, 2014)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทยในขณะนี้มีอยู่หลายประเภท แต่ส่วนใหญ่ยังเป็นผลึกที่ทำมาจากซิลิกอนทั้งในรูปแบบของ Mono- กับ Poly-Crystalline ส่วนที่เป็นฟิลม์บางนั้น มีทั้งแบบที่เป็น Amorphous-Silicon (a-Si) และแบบของสารอื่นๆ เช่น Cadmium-Telluride (CdTe), Copper-Indium-Gallium-Selenide (CIGS), Copper-Indium-Diselenide (CIS) ซึ่งกำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเนื่องจากต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าแบบซิลิกอน นอกจากตัวเซลล์แล้ว แผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีส่วนประกอบอื่นๆที่ผนึกยึดติดกับตัวเซลล์และตัวฐานกระจก เช่น กระจก ฟิลม์เคลือบชนิด EVA ลวดทองแดง เป็นต้น (Paiano, 2014) ดังนั้นการกำจัดหรือการรีไซเคิลหากทำโดยไม่ถูกต้องก็จะเกิดปัญหามลพิษจากสารต่างๆติดตามมาอย่างแน่นอน หากจะมีการจัดการอย่างถูกต้องก็จะต้องมีต้นทุนที่สูง ซึ่งจะคุ้มค่าหรือไม่ ก็ขึ้นอยู่กับราคาวัสดุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบที่

สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการรีไซเคิลได้ และแนวนโยบายของภาครัฐที่จะให้การสนับสนุนต้นทุนการเก็บรวบรวมและการบำบัดกำจัดแบบที่เป็นไปตามหลักวิชาการ

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าแร่ธาตุโลหะบางชนิดที่ใช้ในแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในกลุ่มของโลหะมีค่า (Precious metals) เช่น เงิน (Ag) แพลตตินั่ม (Pt) หรือโลหะหายาก (Rare metals) เช่น เทลลูเรียม (Te) เจอร์มาเนียม (Ge) และ อินเดียม (In) โลหะเหล่านี้โดยเฉพาะกลุ่มโลหะหายากเป็นสิ่งที่มีมูลค่าสูง ถือว่าเป็นเป็นปัจจัยที่กำหนดยุทธศาสตร์ของประเทศมหาอำนาจและกำลังเป็นที่ต้องการมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่จำเป็นในอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ อิเลคทรอนิคส์ อวกาศและการบิน ตลอดจนอุตสาหกรรมทางทหาร (Goe และ Gaustad, 2014) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาเรื่องการจัดการของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าเพื่อจะได้เกิดแนวทางที่สอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์ของประเทศในเรื่องวัตถุดิบอุตสาหกรรมเหล่านี้และเกิดเป็นแนวทางในการทำงานร่วมกันของหน่วยงานภาครัฐและเอกชนในการจัดการของเสียและการผลิตวัตถุดิบให้กับประเทศต่อไป

**1.2 วัตถุประสงค์**

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าเพื่อเป็นข้อมูลในการวางแผนสำหรับประเทศไทย

1.2.2 เพื่อศึกษาและเสนอแนะทางเลือกที่เหมาะสมในการจัดการสำหรับประเทศไทยโดยพิจารณาประเด็นด้านการบริหารจัดการ กฏหมาย เศรษฐศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม

**1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ**

**ก. ช่วง 6 เดือนที่ 1**

1.3.1 ข้อมูลการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในต่างประเทศที่สำคัญ ทั้งในด้านนโยบาย กฎระเบียบ ผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามวัฏจักรวงจรชีวิต การบริหารจัดการ และทางเทคนิค

1.3.2 ข้อมูลนโยบาย ระเบียบ ข้อบังคับของประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันโดยพิจารณาตั้งแต่มาตรการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจนถึงการกำจัดขั้นสุดท้ายของแผงหมดอายุตลอดจนภาคส่วนที่เกี่ยวข้องพร้อมบทบาท

1.3.3 ข้อมูลประเภทแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลักๆที่ใช้ในประเทศไทย ปริมาณ องค์ประกอบทางเคมี และอัตราการเกิดเป็นของเสียในอนาคตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งแบบ Silicon-based และ Non-silicon-based

1.3.4 ข้อมูลเทคโนโลยีการรีไซเคิลแบบต่างๆสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลักๆทั้งด้านเทคนิค ผลผลิตที่จะได้และต้นทุน

**ข. ช่วง 6 เดือนที่ 2**

1.3.5 สถานการณ์ในอนาคตของเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งแต่การเกิดของแผงหมดอายุจนถึงการจัดการขั้นสุดท้าย

1.3.6 กรรมวิธีและข้อเสนอเชิงนโยบายเพื่อการจัดการเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องตั้งแต่จุดเกิดของเสีย การรวบรวม การถอดแยกชิ้นส่วน การเก็บกักที่เหมาะสม และการขนส่ง

1.3.7 ความเห็นและข้อเสนอแนะของภาครัฐและเอกชนในการจัดการเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งแต่ การเกิด การรวบรวมจนถึงการขนส่ง

1.3.8 กรรมวิธีการรีไซเคิลที่เหมาะสม และข้อเสนอเชิงนโยบายเพื่อการจัดการสำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องตั้งแต่การรีไซเคิลจนถึงการนำวัสดุไปใช้ประโยชน์

1.3.9 ความเห็นและข้อเสนอแนะของภาครัฐและเอกชนสำหรับการรีไซเคิลและการใช้ประโยชน์วัสดุจากแผงหมดอายุ

# บทที่ 2
# ของเสียและผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบ Photovoltaic

ในปัจจุบัน พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กำลังเป็นที่ได้รับความนิยมอย่างสูง ณ ปลายปี 2015 ประเทศต่างๆทั่วโลกมีกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์รวมกันถึง 223,948 MW โดยเป็นของเยอรมัน 39,636 MW จีน 43,194 MW ญี่ปุ่น 33,300 MW และ สหรัฐอเมริกา 23,955 MW (IRENA, 2016:) ทั้งนี้กำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นในปี 2015 ปีเดียวมีค่าถึง 47 GW อย่างไรก็ดีเป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานที่คุ้มค่าอยู่ระหว่าง 20 - 25 ปี เมื่อหมดอายุที่ให้ความคุ้มค่า (End-of-life) หรือชำรุดจากสาเหตุต่างๆตามระยะเวลาการใช้งานไม่ว่าจะเป็นในช่วงต้น (Infant failures) หรือช่วงกลาง (Midlife failures) แผงเซลล์เหล่านี้ก็จะกลายเป็นของเสียที่ต้องมีการจัดการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งไปยังการบริหารจัดการของระบบแผงเซลล์ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะกลายเป็นของเสีย ซึ่งทั้งนี้ประเด็นที่จะต้องพิจารณาคือองค์ประกอบของระบบ ปริมาณ และมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมหากมีการจัดการที่ไม่ถูกต้องตามหลักการ

## 2.1 อุปกรณ์การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทที่เชื่อมต่อกับระบบสายส่ง (On-grid System) ที่เป็นระบบผลิตขนาดใหญ่ (Farm-scale) จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์สำคัญต่างๆดังต่อไปนี้ (Mohanty และคณะ, 2016)

### 2.1.1 ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar panel)

จะประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กล่องอุปกรณ์ไฟฟ้า (Junction Box) ไดโอด สายไฟ อุปกรณ์อื่นๆรวมไปถึงกรอบและขาตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2 - 1 ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้มีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

รูปที่ 2 - 1 ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

(MonoSun Technology Co., Ltd, 2016)

2.1.2 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

เป็นเครื่องแปลงไฟฟ้าที่ผลิตโดยชุดเซลล์จากกระแสตรงมาเป็นกระแสสลับที่สามารถปรับขนาดแรงดันและความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2 - 2

รูปที่ 2 - 2 อินเวอร์เตอร์ รุ่น Apollo G-4000-176 ของ บ. ลีโอ อิเล็กทรอนิคส์ จำกัด

(Leo Electronics Co., Ltd., 2016)

2.1.3 หม้อแปลง (Transformer)

ใช้แปลงศักย์ไฟฟ้าของไฟที่ผลิตได้ ให้สามารถเชื่อมต่อกับระบบสายส่งได้ โดยเฉพาะกับการผลิตไฟฟ้าในระดับโรงไฟฟ้า (Farm-scale) ดังแสดงในรูปที่ 2 - 3

รูปที่ 2 - 3 หม้อแปลงไฟฟ้า

(SEL Groupe, 2016)

2.1.4 สายไฟ

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อองค์ประกอบต่างๆของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 - 4

รูปที่ 2 – 4 สายไฟ

(Polar Wire Products Inc., 2016)

2.1.5 อุปกรณ์อื่นๆ

เช่น ตู้รวมสายไฟ ระบบป้องกันฟ้าผ่า สวิทช์เกียร์ ตู้ระบบควบคุม โครงสร้างคอนกรีตและอุปกรณ์จำเป็นต่างๆ เป็นต้น

โดยองค์ประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ตามข้อ 2.1.2 – 2.1.5 นี้จะถูกรวมเรียกว่า Balance of System (BOS)

**2.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีใช้งานในประเทศไทย**

สำหรับประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้มากในประเทศไทยนั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ตามลักษณะผลิตภัณฑ์และวัตถุดิบ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556; Poliskie, 2013) ได้แก่

2.2.1 กลุ่มผลึกซิลิกอน (c-Si)

ในกลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยแผ่นเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นมาจากผลึกของซิลิกอนโดยจะมีสองประเภทย่อยๆ คือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวซิลิกอน (Mono or Single Crystalline Silicon: m-Si) และ เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกหลายรูป (Polycrystalline Silicon: p-Si)

2.2.2 กลุ่มฟิล์มบาง (Thin film)

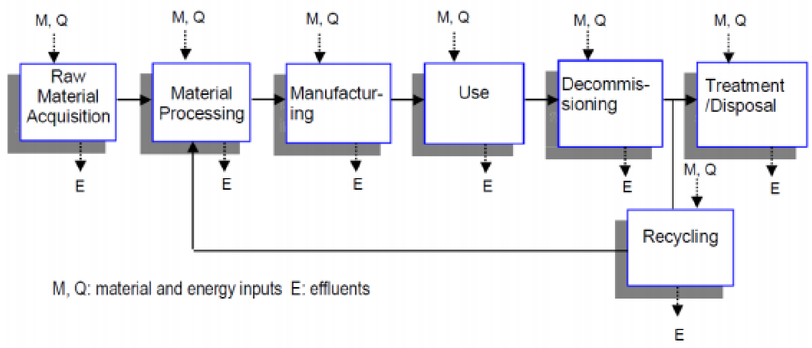
ในกลุ่มนี้จะเน้นความบางเป็นหลัก โดยมีผลให้ปริมาณการใช้วัตถุดิบและพลังงานในการผลิตที่น้อยกว่าการผลิตของกลุ่มผลึกซิลิกอน โดยในกลุ่มนี้จะมีประเภทสำคัญๆอยู่สี่ประเภทคือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน (Amorphous Silicon: a-Si) แบบแคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride; CdTe) แบบแคดเมียมอินเดียมแกลเลียมเซเลไนด์ (Cadmium Indium Gallium Selenide; CIGS) แคดเมียมอินเดียมไดซีลีไนด์ (Cadmium Indium Diselenide; CIS)

2.2.3 กลุ่มที่เป็นเทคโนโลยีใหม่

ในระยะช่วงห้าปีหลังมานี้ มีการพัฒนาและผลิตแผงเซลล์ที่ใช้วัสดุใหม่ๆเช่น สารอินทรีย์ โพลีเมอร์ หรือสีย้อม ออกมาสู่การใช้งานจริงๆ ข้อดีของเซลล์กลุ่มนี้คือความอ่อนตัวและน้ำหนักที่เบา อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างของกลุ่มนี้ได้แก่ เซลล์แบบสารอินทรีย์ (Organic Photovoltaic-OPV) เซลล์แบบสีย้อม (Dye Sensitive Materials) แบบ Quantum Dots (QDS) และแบบคาร์บอน นาโนทิวบ์ เป็นต้นกลุ่มนี้อย่างไรก็ดียังอยู่ในขั้นตอนของการพัฒนาจึงยังอาจจะมีใช้อยู่ในปริมาณที่ต่ำในประเทศไทย และส่วนใหญ่จะเป็นการใช้ในห้องปฏิบัติการหรือเพื่อการทดลอง

### 2.3 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากวัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ

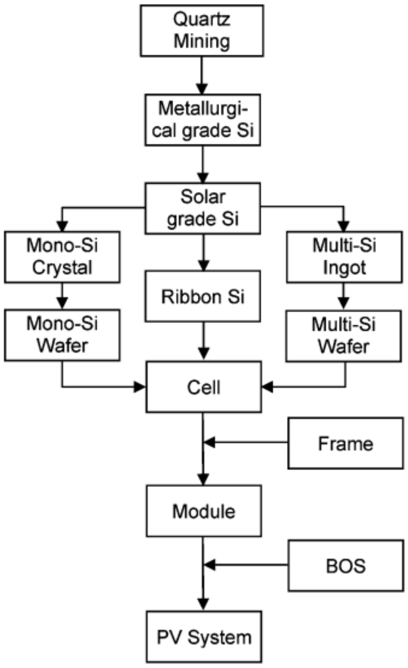
พลังงานแสงอาทิตย์มักถูกมองเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดเนื่องจากในช่วงของการผลิตไฟฟ้าไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ก่อให้เกิดมลพิษอากาศและผลกระทบสิ่งแวดล้อมแบบอื่นๆ อย่างไรก็ดีในการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่ถูกต้องตามหลักการ จำเป็นต้องมีการประเมินผลกระทบตลอดช่วงวัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อันเริ่มได้จาก ช่วงของการได้มาซึ่งวัตถุดิบ (Raw Material Acquisition) กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ (Material Processing) การประกอบเป็นแผง (Manufacturing) การติดตั้งใช้งาน (Use) การถอดแยกชิ้นส่วน (Decomissioning) การรีไซเคิล (Recycling) และการกำจัดของเสียเมื่อแผงหมดความคุ้มค่าในการผลิต (Treatment/Disposal) ทั้งนี้ในแต่ละขั้นตอนจะมีความต้องการวัตถุดิบ (Mass-M) และพลังงาน (Energy-Q) เข้าไป และมีการปลดปล่อยของเสีย (Effluent-E) ออกมาดังแสดงในรูปที่ 2 - 5




รูปที่ 2 – 5 วัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งแต่วัตถุดิบจนถึงขั้นตอนการกำจัดและรีไซเคิล (Environment Canada, 2012)

โดยขั้นตอนการผลิตแผงเซลล์แบบผลึกซิลิกอนตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ (Raw Material Acquisition) กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ (Material Processing) การประกอบเป็นแผง (Manufacturing) สามารถพิจารณาได้ตามรูปที่ 2 - 6 กล่าวคือมีการนำแร่ควอทซ์จากเหมืองไปสกัดให้ได้ซิลิกอน ซึ่งจะต้องผ่านเข้ากระบวนการเพิ่มความบริสุทธิ์จากซิลิกอนเกรดโลหะกรรม (Metallurgical Grade Si-98.5-99.9% Si) เป็นซิลิกอนที่ใช้กับงานผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Grade Si-99.999-99.9999% Si) จากนั้นสามารถนำก้อนซิลิกอนเข้าสู่เส้นทางการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแบบผลึกเดี่ยว (Mono-Si Wafer) ที่แผ่นเวเฟอร์ถูกตัดฝานออกมาจากผลึกเดี่ยวของซิลิกอน (Mono-Si Crystal) ผลึกหลายรูป (Poly-Si Wafer) ที่แผ่นเวเฟอร์ถูกตัดฝานออกมาจากก้อนผลึกแบบหลายรูป (Multi-Si Ingot) หรือแบบริบบิ้น (Ribbon) ที่จะมีการดึงเป็นแผ่นฟิล์มออกมาจากผลึกซิลิกอนที่หลอมเหลวได้โดยตรง ซึ่งแตกต่างไปจากแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน (Amorphous Silicon: a-Si) ที่มีการผลิตฟิล์มซิลิกอน

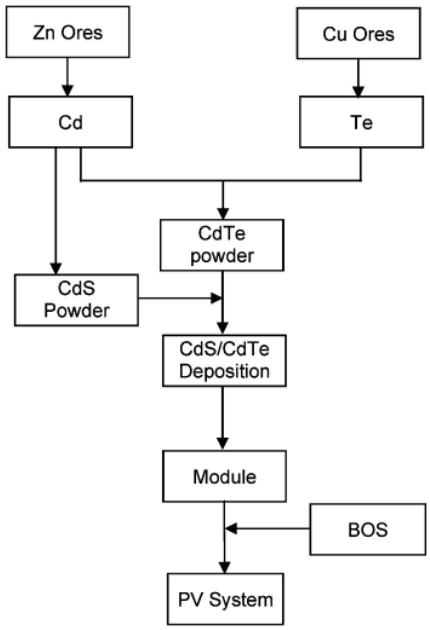
จากซิลิกอนหลอมเหลวที่ไม่อยู่ในรูปผลึก แผ่นเวเฟอร์หรือฟิล์มเหล่านี้จะถูกจัดเรียงกันเป็นแผง (Module) ที่มีกรอบอลูมิเนียม (Frame) ห่อหุ้มอยู่ และเมื่อประกอบเข้ากับอุปกรณ์อื่นๆ (Balance of System-BOS) เราก็จะได้ระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ (PV System) เพื่อการใช้งานต่อไป




รูปที่ 2 - 6 ขั้นตอนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบ

(Fthenakis และคณะ, 2008)

และขั้นตอนการผลิตแผงเซลล์แบบ CdTe ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ (Raw Material Acquisition) กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ (Material Processing) การประกอบเป็นแผง (Manufacturing) สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2 - 7




รูปที่ 2 – 7 ขั้นตอนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ CdTe (Fthenakis และคณะ, 2008)

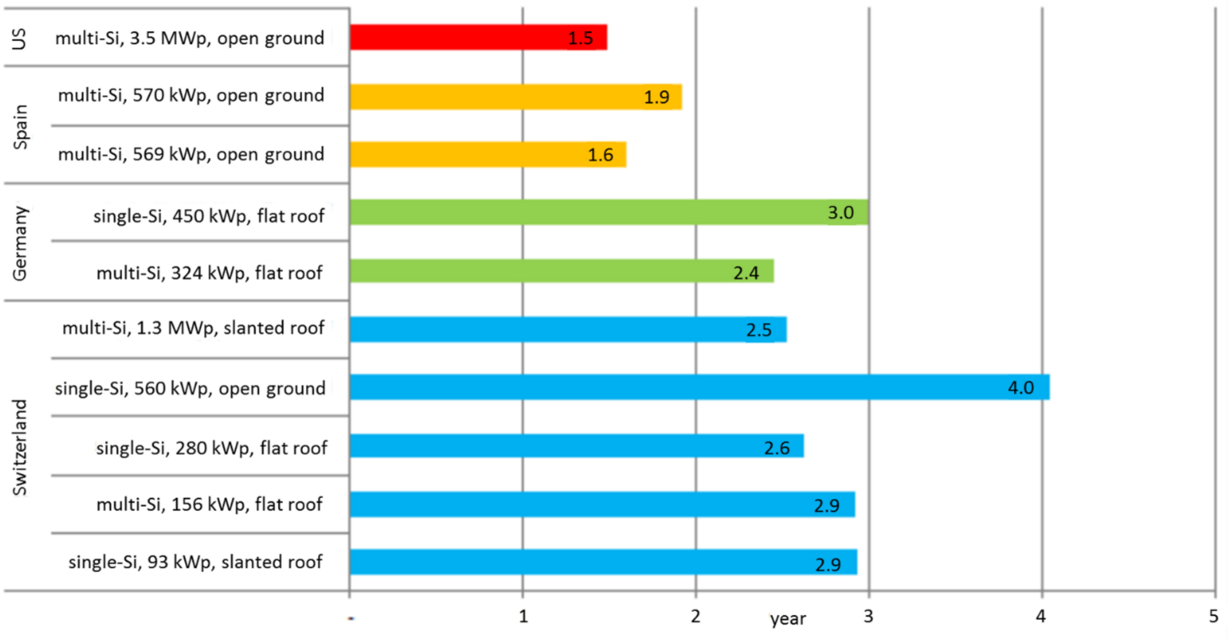
กล่าวคือแคดเมียม (Cd) และเทลลูเรียม (Te) ที่เกิดจากกากของการถลุงแร่สังกะสีและทองแดงจะถูกทำให้มีความบริสุทธิ์ที่สูงขึ้นก่อนจะนำไปผลิตเป็นผงของ CdTe ตามกรรมวิธีเฉพาะ โดย CdTe จะถูกนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงแบบ P-Type (Absorption Layer) และเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า ขณะที่สาร CdS จะถูกนำมาใช้เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ N-Type ที่วางอยู่บนชั้นดูดกลืนแสง ชั้นต่างๆเหล่านี้จะถูกนำมาประกอบเป็นแผง (Module) ซึ่งเมื่อรวมกับอุปกรณ์อื่นๆ (Balance of System-BOS) เราก็จะได้ระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ (PV System) แบบ CdTe เพื่อการใช้งานต่อไป

ในลำดับต่อไปจะเป็นขั้นตอนของการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมประเภทต่างๆตามวัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ตามสิ่งที่ใส่เข้าสู่ระบบ (Inputs) และสิ่งที่ออกสู่สิ่งแวดล้อมที่ไม่เป็นที่ต้องการ (Outputs) ได้ดังต่อไปนี้

2.3.1 พลังงาน

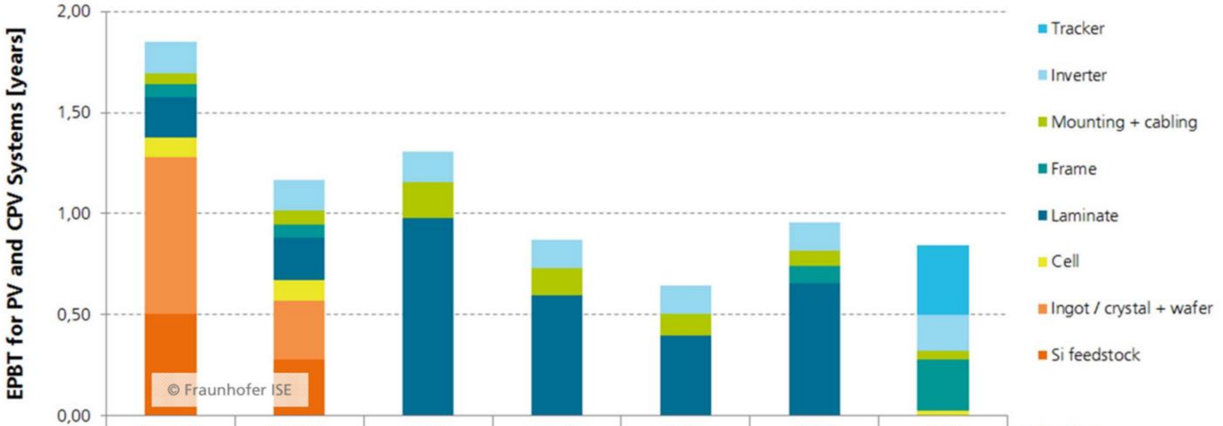
กระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีการใช้พลังงานเป็นอย่างมากไม่ว่าจะเป็นแบบผลึกเดี่ยว ผลึกหลายรูป หรือแบบแคดเมียมเทลลูไรด์ โดยเฉพาะในช่วงของการทำให้วัตถุดิบมีความบริสุทธิ์ที่สูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นซิลิกอน แคดเมียม หรือเทลลูเรียม เช่น ในกระบวนการผลิตซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวจากซิลิกอนรวม มีการใช้พลังงานถึง 250 kWh ต่อกิโลกรัมผลิตภัณฑ์ (Poliskie, 2013) อย่างไรก็ตามพลังงานที่ใช้ในการผลิตเองยังไม่ใช่ตัวชี้วัดที่ดีที่สุดในการประเมินความสามารถด้านพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ เนื่องจากเป็นการ

พิจารณาเพียงด้านของพลังงานที่ถูกใช้เพื่อผลิตแผงขึ้นมาแต่เพียงอย่างเดียว จึงมีการพัฒนาตัวชี้วัดที่เรียกว่าระยะเวลาคืนทุนพลังงาน (Energy Payback Time; EPBT) ขึ้นมา ค่า EPBT นี้คือระยะเวลาที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ในการผลิตพลังงานขึ้นมาจนมีค่าเท่ากับพลังงานรวมที่ใช้ในการผลิตตัวของมันเอง ค่า EPBT นี้จะมีค่าความแตกต่างกันไปขึ้นกับปริมาณไฟฟ้าและพลังงานอื่นๆที่ถูกใช้ในกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อายุของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดและอัตราส่วนของประสิทธิภาพ (Performance Ratio) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะการใช้งาน ปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์ในพื้นที่ที่ติดตั้งจริง และการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีต่างๆ ซึ่งพบว่าค่า EPBT ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละประเภท ที่ติดตั้งในพื้นที่ของประเทศสวิสเซอร์แลนด์ เยอรมัน สเปน และสหรัฐอเมริกา มีค่าความแตกต่างกันอย่างมาก โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบทั้งแบบผลึกหลายรูปและแบบผลึกเดี่ยวมีค่า EPBT เท่ากับ 1.5 – 2.9 ปีและ 2.6 – 4.0 ปี ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 - 8 และแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางนั้นจะมีค่า EPBT ที่ใกล้เคียงหรือต่ำกว่าแบบผลึกซิลิกอน โดยสำหรับแบบ CdTe เท่ากับ 0.8 – 2.7 ปี แบบ CIS 2.8 ปี แบบ CIGS 1.2 – 2.1 ปี และ แบบ Amorphous Silicon เท่ากับ 1.5 – 3.2 ปี ดังแสดงในรูปที่ 2 - 9 ทั้งนี้หมายความว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางมีการใช้พลังงานในการผลิตที่ต่ำกว่าพลังงานที่ตัวเองผลิตได้ค่อนข้างมาก




รูปที่ 2 – 8 ค่า EPBT ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานในสหรัฐอเมริกา สเปน เยอรมัน และสวิสเซอร์แลนด์ (Environment Canada, 2012)

จากข้อมูลของ Fraunhofer Institute for Solar Energy System (2015) พบว่าพลังงานที่ใช้มากส่วนใหญ่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งแบบผลึกเดี่ยวและแบบผลึกหลายรูปมาจากช่วงการผลิต Ingot สร้างผลึกและการทำแผ่นเวเฟอร์ ส่วนการใช้พลังงานในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Thin Film ส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการผลิตและใช้วัสดุเพื่อหุ้ม (Laminate) แผง ดังแสดงในรูปที่ 2 - 9




| Mono-Si | Multi-Si | a-Si | µm-Si | CdTe | CIGS | CPV | Technology |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Glass-EVA-backsheet | Glass-EVA-backsheet | Glass-PVB-glass | Glass-EVA-glass | Glass-EVA-glass | Glass-EVA or PVB-glass | Flatcon CX-75 CPV-System | Module composition |
| 2011 | 2011 | 2008-2011 | 2013 estimate | 2010-2111 | 2011 | 2011 | Status |
| 14,8% | 14,1% | 7,0% | 10,0% | 11,9% | 11,7% | 24,1% | Efficiency |
| ~300 MWp | ~300 MWp | 33-45MWp | 120MWp | 963MWp | 20-66MWp | - | Scale of production |

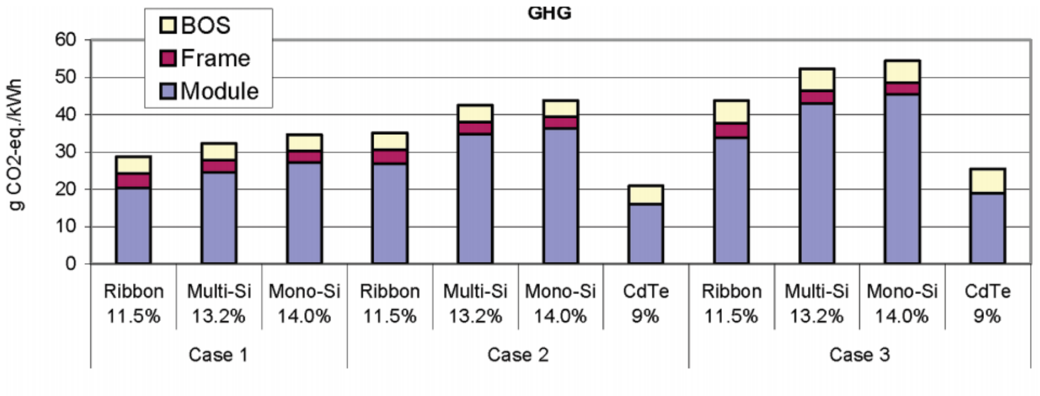
รูปที่ 2 – 9 Energy Payback Time และสัดส่วนตามองค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ

(Fraunhofer Institute for Solar Energy System, 2015)

2.3.2 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และมลพิษอากาศอื่นๆ

ในวัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases) จากกระบวนการในลำดับต่างๆ ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบจนถึงการกำจัดของเสียเมื่อแผงได้หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าแล้ว โดยพบว่าการผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตเป็นต้นเหตุหลักของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก Fthenakis และคณะ (2008) ได้ศึกษาการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเทียบเท่าในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าตลอดวัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ อันได้แก่ แบบริบบิ้น (Ribbon-Si) แบบผลึกเดี่ยว (Mono-Si) แบบผลึกรวม (Multi-Si) และ แบบ CdTe ใน 3 สถานการณ์จำลอง โดยสถานการณ์จำลองที่ 1 มีการใช้ค่าการปลดปล่อย $CO_2$ เทียบเท่าจากการผลิตไฟฟ้าตามจริงจากแต่ละแหล่งผลิตชิ้นส่วนต่างๆในยุโรป สถานการณ์ที่สองใช้ค่าการปลดปล่อย $CO_2$ เฉลี่ยของการผลิตไฟฟ้าเทียบเท่าของยุโรป และสถานการณ์ที่สองใช้ค่าการปลดปล่อย

$CO_2$ เฉลี่ยของการผลิตไฟฟ้าเทียบเท่าของอเมริกา ตามรูปที่ 2 - โดยพบว่าแผงเซลล์แบบผลึกเดี่ยว (Mono-Si) มีค่าการปลดปล่อย $CO_2$ เทียบเท่าสูงสุดในทุกสถานการณ์และแผงเซลล์แบบ CdTe มีค่าการปลดปล่อย $CO_2$ เทียบเท่าต่ำสุด โดยตัวองค์ประกอบหลักของแผง (Module) มีการปลดปล่อยสูงสุดเมื่อเทียบกับกรอบ (Frame) หรือองค์ประกอบระบบอื่นๆ (Balance of System-BOS)




รูปที่ 2 – 10 ปริมาณการปลดปล่อย $CO_2$ เทียบเท่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละประเภท (Fthenakis และคณะ, 2008)

ในปี 2012 หน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมของแคนาดา (Environment Canada) ได้นำเสนอผลการศึกษาเกี่ยวกับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ พบว่า ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิกอนนั้นมีค่าตั้งแต่ 28 – 72.4 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อกิโลวัตต์ ชั่วโมง (g $Co_2$/kWh) ในส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) มีค่า 18 – 20 g $Co_2$/kWh

นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการใช้ก๊าซที่มีฟลูออรีนเป็นส่วนประกอบ (Fluorinated gases) ในการทำความสะอาดอุปกรณ์ โดยผลการศึกษาของ Fthenakis และคณะ (2008) พบว่าก๊าซไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางของอะมอร์ฟัสซิลิกอนและแบบผลึกซิลิกอนนั้นก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก 2 และ 7 g $CO_2$/kWh ตามลำดับ

มลพิษอากาศประเภทอื่นๆ เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ ($NO_x$) และซัลเฟอร์ออกไซด์ ($SO_x$) ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆนั้น ได้มีการแสดงไว้ในตารางที่ 2 – 1 โดยทั้งนี้พบว่ามลพิษอากาศจะเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตแผ่นเซลล์แบบผลึกซิลิกอนมากกว่าแบบอื่นๆ

ตาราง 2 – 1 ปริมาณการปลดปล่อยมลพิษอากาศของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ (Environment Canada, 2012)

| Tecnology | $NO_x$ (mg/kWh) | $SO_x$ (mg/kWh) | Electricity Mix | [3]Insolation (kWh/$m^2$ per year) | [4]Performance Ratio | Application Type |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Multicrystalline | 75 – 85 | 125 – 150 | [1]UCTE | 1700 | 0.8 | Ground-mounted |
| Monocrystalline | 80 – 85 | 140 – 160 | UCTE | 1700 | 0.8 | Ground-mounted |
| CdTe | 35 – 45 | 50 – 90 | UCTE | 1700 | 0.8 | Ground-mounted |
| Multicrystalline | 175 – 185 | 350 – 375 | [2]US | 1700 | 0.8 | Ground-mounted |
| Monocrystalline | 180 – 200 | 360 – 390 | US | 1700 | 0.8 | Ground-mounted |
| CdTe | 75 – 85 | 150 – 175 | US | 1700 | 0.8 | Ground-mounted |

หมายเหตุ [1]UTCE คือ Union for the Coordiation of the Transmission of Electricity เป็นองค์กรที่รับผิดชอบด้านการเดินระบบและพัฒนาระบบกริดจ่ายไฟฟ้าในทวีปยุโรป

[2]US คือ สหรัฐอเมริกา

[3]Insolation คือ ปริมาณการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวโลก ณ ช่วงเวลาหนึ่ง

[4]Performance Ratio คืออัตราส่วนของพลังงานที่ผลิตได้ต่อผลคูณของปริมาณการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนแผงฯที่มีการผลิตพลังงานกับประสิทธิภาพของแผงฯ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง

### 2.3.3 การใช้สารเคมีและโลหะหนักในการผลิต

การผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆนั้นมีการใช้สารเคมีที่มีความหลากหลายมาก โดยสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2 - 2 ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิกอนทั้งแบบผลึกเดี่ยวและหลายรูป จะมีการใช้โซดาไฟเป็นจำนวนมาก เช่นเดียวกับสารเคมีที่มีฤทธิ์กัดกร่อน เช่น กรดต่างๆ นอกจากนั้นยังมีการใช้สารอื่นๆ เช่น อาร์ซีน ($AsH_3$) และฟอสฟีน ($PH_3$) ที่เป็นสารไวไฟด้วย โดยในการผลิต จะเกิดของเสียที่มีความอันตรายสูง เช่น ไซเลน ($SiCl_4$) ออกมา สำหรับแบบผลึกเดี่ยว การใช้สารพวกแอมโมเนียฟลูออไรด์ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ฟอสฟอรัส และฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ ต้องใช้อย่างระวังเนื่องจากเป็นสารอันตราย สำหรับแบบผลึกรวม มีการใช้สารอันตรายอีกเป็นจำนวนมากเช่นกัน ได้แก่ แอมโมเนีย ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบต่างๆ ไดบอเรน ไฮโดรเจน เอธิลอะซีเตต เอธิลไวนิลอะซีเดต ไฮโดรเจนเพอรอกไซด์ ไนโตรเจนสแตนนิกคลอไรด์ เป็นต้น (Silicon Valley Toxic Coalition, 2009)

ตารางที่ 2 – 2 สารเคมีและโลหะหนักสำคัญที่ใช้ในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ

(Environment Canada, 2012; Silicon Valley Toxic Coalition, 2009)

| **แบบผลึกเดี่ยว** | **แบบผลึกหลายรูป** | **แบบ CdTe** | **แบบ CIS/CIGS** |
|---|---|---|---|
| อลูมิเนียม | อลูมิเนียม | แคดเมียม | แคดเมียม |
| แอมโมเนีย | แอมโมเนีย | แคดเมียมคลอไรด์ | ทองแดง |
| แอมโมเนียฟลูออไรด์ | อาร์ซีน | นิกเกิล | ก๊าซไฮไดร์ |
| กรดเกลือ | โบรอนไตรคลอไรด์ | ซัลเฟอร์ | ก๊าซไฮโดรเจน |
| กรดไฮโดรฟลูออริก | ตัวเร่งทองแดง | เทลลูเลียม | ก๊าซไข่เน่า |
| ไฮโดรฟลูออไรด์ | ไดบอเรน | เทลลูเลียมไดออกไซด์ | ไฮโดรเจนเซเลไนด์ |
| ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ | เอธิลอะซีเตต | ดีบุก | อินเดียม |
| กรดไนตริก | เอธิลไวนิลอะซีเตต | แคดเมียมซัลเฟต | โมลิบดีนั่ม |
| ไนโตรเจน | กรดเกลือ | แคดเมียมซัลไฟด์ | ซีเลเนียม |
| ออกซิเจน | ไฮโดรเจน | | สังกะสี |
| ฟอสฟอรัส | ไฮโดรฟลูออไรด์ | | ซีเลเนียมไฮดรอกไซด์ |
| ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ | ไฮโดรเจนเพอรอกไซด์ | | แกลเลี่ยม |
| ซิลิกอน | ซิลิกอน | | แคดเมียมซัลไฟด์ |
| ดีบุก | ซิลิกอนไดออกไซด์ | | |
| เงิน | เงิน | | |
| โซดาไฟ | ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ | | |
| ฟอสฟีน | ไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ | | |
| อาร์ซีน | ไทเทเนียมไดออกไซด์ | | |
| ตะกั่ว | กรดซัลฟูริก | | |
| | สแตนนิกคลอไรด์ | | |
| | โซดาไฟ | | |
| | ฟอสฟีน | | |
| | ตัวเร่งไอออนเอมีน | | |

มีการศึกษาเรื่องความเป็นพิษของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยสถาบันสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของสหรัฐอเมริกาพบว่า สารเคมีที่ใช้ในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยเฉพาะธาตุแคดเมียมนั้นมีความเป็นพิษสูงที่สุด ขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง CIS และ CIGS มีความเป็นพิษรองลงมา (Fthenakis และคณะ, 2008) ส่วนความเป็นพิษของตะกั่วสามารถเกิดได้การใช้ภายในของแผงประเภทผลึกซิลิกอน

2.3.4 การใช้น้ำและคุณภาพน้ำ

การศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมในส่วนของปริมาณการใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆนั้นมีการพิจารณาในช่วงของกระบวนการผลิตแผง (Upstream Processes) และการเดินระบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (On-site) ดังแสดงในตารางที่ 2 – 3 พบว่าแบบผลึกซิลิกอนเดี่ยวมีปริมาณการใช้น้ำสูงสุด โดยมีค่าปริมาณการใช้น้ำในส่วนการเดินระบบและการผลิตแผงอยู่ที่ 190 และ 1,530 ลิตร/MWh ตามลำดับ

ตารางที่ 2 – 3 ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิตแผง (Upstream) และการเดินระบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (On-site) (Environment Canada, 2012)

| Type of PV | Module Efficiency (%) | On-site (L/MW h) | Upstream (L/MW h) |
|---|---|---|---|
| Multicrystalline silicon | 13.2 | 200 | 1470 |
| Monocrystalline silicon | 14.0 | 190 | 1530 |
| CdTe | 10.9 | 0.8 | 575 |
| Frame (based on multicrystalline silicon PV) | NA | NA | 64 |
| BOS (ground-mounted PV) | NA | 1.5 | 210 |

การศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านคุณภาพน้ำจากวัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆนั้น ได้มีการพิจารณาในเรื่องของการเกิดสาหร่าย (Eutrophication) อันเนื่องมาจากสารเคมีที่มีการใช้ในกระบวนการต่างๆ ทั้งนี้มีการใช้ศักยภาพการเกิดสาหร่าย (Eutrophication Potential) เป็นตัวชี้วัด โดยมีหน่วยเป็นฟอสเฟตเทียบเท่า ($PO_4$ eq) ตามตารางที่ 2 – 4 ทั้งนี้พบว่าแผงแบบ CdTe มีค่าศักยภาพสูงสุดที่เท่ากับ 0.55 กิโลกรัม $PO_4$ เทียบเท่า โดยมีค่ามากกว่าแผงแบบ a-Si และ CIGS เล็กน้อย

ตารางที่ 2 – 4 ศักยภาพในการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่นต่อกิโลวัตต์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ (Environment Canada, 2012)

| PV Technology[a] | Eutrophication Potential (kg $PO_4$ eq) per kWp[b] |
|---|---|
| CIGS | 0.475 |
| a-Si | 0.45 |
| CdTe | 0.55 |

2.3.5 ความเป็นพิษของแผงกับการจัดการหลังหมดอายุ

ปัญหาของแผงที่หมดความคุ้มค่าไม่ว่าจากการเสื่อมสภาพหรือชำรุดเสียหายก็คือการจัดการของเสียแผงหลังจากที่ไม่สามารถใช้งานต่อได้ ทั้งนี้ความเป็นพิษของแผงที่มีต่อสภาพแวดล้อมก็มาจากชนิดและปริมาณของสารเคมีที่มีอยู่ในแผงนั่นเอง และเมื่อพิจารณาถึงความเป็นพิษกับประเภทของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่เป็นที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันอาจจะจำแนกได้ดังนี้ (Bio Intelligence Service, 2011)

1) กลุ่มผลึกซิลิกอน

ในกลุ่มนี้ความเป็นพิษสูงสุดมาจากตะกั่ว (Pb) ที่มีการใช้ในการบัดกรี ตะกั่วเป็นโลหะที่มีความสามารถในการสะสมได้ทั้งในคนและในสิ่งแวดล้อม เมื่อเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ตะกั่วจะเข้าไปในระบบหมุนเวียนเลือดและสะสมตัวในกระดูกได้ เมื่อสะสมในปริมาณที่มากขึ้น ตะกั่วจะเป็นอันตรายต่อระบบประสาท ไต ระบบภูมิคุ้มกันและระบบสืบพันธ์ได้ เรียกว่าโรคพิษจากตะกั่ว

ความเป็นอันตรายของตะกั่วจะมาจากความสามารถในการละลายออกมาของตะกั่วจากแผงหมดอายุ ซึ่งที่ค่าพีเอชในช่วง 6 - 7 ตะกั่วจะสามารถละลายออกมาได้ประมาณ 13% ของปริมาณทั้งหมด และที่ค่าพีเอชในช่วง 3 - 4 ตะกั่วจะสามารถละลายออกมาได้ประมาณ 90% ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งหากคิดที่ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วที่ 12.67 กรัมต่อแผงและน้ำหนักแผงที่ 22.4 กิโลกรัม ที่ค่าพีเอช 6 - 7 และ 3 - 4 ตะกั่วสามารถละลายออกมาได้ราว 75 กรัมและ 518 กรัมต่อตันของเสียตามลำดับ

2) กลุ่มฟิล์มบาง

ในกลุ่มนี้ความเป็นพิษสูงสุดมาจากแคดเมียม (Cd) ที่ใช้อยู่ในแผงประเภท CdTe และ CIGS แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่สามารถสะสมในมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ โดยมีระยะเวลาครึ่งชีวิตในร่างกายคนอยู่ที่ 30 ปี แคดเมียมมีความเชื่อมโยงกับโรคระบบทางเดินหายใจและกระดูกพรุนในผู้สูงอายุ เป็นสาเหตุของโรคมะเร็งต่อมลูกหมากและไต หากมีการสะสมมากจะทำให้เกิดอาการเจ็บปวดตามตัวเรียกว่าโรคอิไตอิไต (Itai-Itai) ซึ่งเป็นภาวะพิษของแคดเมียมที่เคยมีการพบมากในประเทศญี่ปุ่น

ที่ค่าพีเอชในช่วงปกติของแผง แคดเมียมจะสามารถละลายออกมาได้ประมาณ 7% ของปริมาณทั้งหมด และที่ค่าพีเอชในช่วง 3 - 4 แคดเมียมจะสามารถละลายออกมาได้ประมาณ 40% ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งหากคิดที่

ค่าเฉลี่ยปริมาณแคดเมียมที่ 4.6 กรัมต่อแผงและน้ำหนักแผงที่ 12 กิโลกรัม ที่ค่าพีเอชปกติ และที่ค่าพีเอช 3 - 4 แคดเมียมสามารถละลายออกมาได้ราว 27 กรัมและ 153 กรัมต่อตันของเสียตามลำดับ

ผลการศึกษาของสหภาพยุโรป (Bio Intelligence Service, 2011) พบว่าหากมีการจัดการที่ไม่ถูกต้อง และปล่อยให้เกิดการละลายของโลหะหนักดังกล่าวออกมาได้ ความเสียหายของสุขภาพมนุษย์จากตะกั่วจะอยู่ที่ 12.5 ล้านบาทต่อตันของเสีย และจากแคดเมียมจะอยู่ที่ 433 บาทต่อตันของเสีย (ใช้อัตราแลกเปลี่ยนที่ 36 บาทต่อ 1 ยูโร) เหตุผลที่ความรุนแรงจากตะกั่วมีค่ามากกว่าแคดเมียมมากก็เพราะว่าตะกั่วมีโอกาสสูงมากที่จะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้โดยง่ายและการควบคุมผลกระทบของตะกั่วก็ทำได้ยากกว่า ดังนั้นการจัดการแผงที่หมดความคุ้มค่าตามหลักวิชาจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อป้องกันปัญหาโดยใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่า

# บทที่ 3
# การบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน

## การบริหารจัดการในต่างประเทศ

ในปี 2558 มีการติดตั้งกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในโลกรวมถึงราว 222 GW โดยพบว่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสะสมรวมส่วนใหญ่อยู่ในทวีปยุโรปถึง 98 GW (IRENA, 2016) โดยมีกำลังผลิตในทวีปเอเชียตามติดมาที่ 88 GW ทั้งนี้อัตราการเติบโตที่สูงที่สุดมาจากกลุ่มประเทศในทวีปลาตินอเมริกาที่ 14.5% รองลงมาคือประเทศในทวีปเอเชียที่ 12.4% โดยอัตราการเติบโตของกำลังการผลิตติดตั้งในทวีปยุโรปและอเมริกาเหนือในปี 2558 อยู่ที่ 5.2% และ 6.3% ตามลำดับ International Renewable Energy Agency (IRENA) ในปี 2559 ได้ประมาณการไว้ว่าที่ปลายปี 2559 ในโลกจะมีของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในราว 43,500 – 250,000 ตัน (จากประเทศจีน 5,000 - 15,000 ตัน เยอรมัน 3,500 - 70,000 ตัน ญี่ปุ่น 7,000 - 35,000 ตันอเมริกา 6,500 - 24,000 ตัน) และจะเพิ่มเป็น 1.7 – 8.0 ล้านตันในปี 2573 (จากประเทศจีน 200,000 - 1,500,000 ตัน เยอรมัน 400,000 - 1,000,000 ตัน ญี่ปุ่น 200,000 - 1,000,000 ตัน อเมริกา 170,000 - 1,000,000 ตัน) ทั้งนี้อัตราการเกิดซากแผงจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมากระหว่างปี 2573 - 2593 โดยปี 2593 จะมีปริมาณซากรวมในโลกถึง 60 - 78 ล้านตัน โดยประเทศที่จะมีซากแผงเป็นจำนวนมากคือ ประเทศจีน ญี่ปุ่น อเมริกา อินเดียและเยอรมันตามลำดับ

ทั้งนี้ประเภทของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในตลาดต่างๆทั่วโลกตามลำดับของส่วนแบ่งตลาด ณ ปี 2557 คือแบบซิลิกอนที่ 92% แบบฟิล์มบาง (CIGS และ CIS) ที่ 7% และแบบอื่นๆ ที่1% แต่สัดส่วนนี้จะเปลี่ยนไปในการพยากรณ์ของปี 2563 คือ แบบซิลิกอนจะลดลงเหลือเพียง 73% ขณะที่แบบฟิล์มบางจะเพิ่มเป็น 10% และแบบอื่นๆที่มีการพัฒนาขึ้นใหม่จะมีความนิยมมากขึ้นและเพิ่มเป็น 14 - 15% นอกจากนี้ภายในปี 2573 การติดตั้งในลักษณะที่เป็นการติดตามบ้านหรือตามหลังคาโรงเรือนต่างๆจะมีปริมาณที่สูงขึ้นมาก จนในบางประเทศ เช่น เยอรมัน อาจจะมีการผลิตไฟฟ้าจากแผงตามหลังคาบ้านมากกว่าจากโรงไฟฟ้าด้วยซ้ำ (IRENA 2016) ทั้งนี้จะมีผลทำให้เกิดแผงชำรุดโดยง่ายและมีความกระจัดกระจายสูง

มีการประมาณการว่าหากมีการรีไซเคิลแผงในโลกจำนวน 1.7 – 8.0 ล้านตัน ในปี 2573 จะได้วัตถุดิบมีค่าถึง 450 ล้านเหรียญสหรัฐซึ่งสามารถนำไปผลิตแผงใหม่ได้ถึง 60 ล้านแผงและจะเกิดการจ้างงานอีกเป็นจำนวนมาก และหากมีการรีไซเคิลแผงจำนวน 60 - 78 ล้านตัน ในปี 2593 จะได้วัตถุดิบมีค่าถึง 15 พันล้านเหรียญสหรัฐ

ซึ่งสามารถนำไปผลิตแผงใหม่ได้ถึง 2 พันล้านแผง ซึงสามารถผลิตไฟได้ถึง 630 GW ข้อมูลเหล่านี้ทำให้นานาประเทศเล็งเหตุแนวทางการเปลี่ยนวิกฤตให้เป็นโอกาส อย่างไรก็ดีจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการรวบรวม แผงที่เสื่อมสภาพหรือชำรุดก่อนทำการรีไซเคิลได้

โดยประเทศที่มีความก้าวหน้าในการพัฒนาและที่มีความตื่นตัวด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและการจัดการแหล่งทรัพยากรในยุโรปที่เด่นชัดที่สุดก็คือประเทศเยอรมัน ส่วนภายนอกทวีปยุโรป ประเทศที่มีการพัฒนาระบบการบริหารจัดการทั้งในส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นที่ยอมรับอีกแห่งหนึ่งก็คือประเทศญี่ปุ่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงขอนำเสนอระบบการบริหารจัดการของสองประเทศนี้เพื่อเป็นต้นแบบแนวคิดต่อไป

## 3.1 การบริหารจัดการการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศเยอรมัน

### 3.1.1 ความนำ

เริ่มมีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ครั้งแรกในประเทศเยอรมันนีในช่วงปี 2525 โดยติดตั้งใช้งานในรถยนต์ ต่อมาในปี 2533 ได้ตั้งโครงการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาซึ่งมีเป้าหมายคือเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้ 300 MW ภายในระยะเวลา 6 ปี ทั้งนี้ในปี 2557 ประเทศเยอรมันมีกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์รวมที่สูงถึง 38.2 GW (IEA, 2015) โดยอัตราเพิ่มของกำลังการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นอยู่ที่ 5.2% ต่อปีหรือ 1,900 เมกกะวัตต์ต่อปี แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งและใช้งานภายในประเทศเยอรมันนั้น มีทั้งที่เป็น แบบผลึก (c-Si) และแบบฟิล์มบาง (a-Si, CdTe, CIGS) โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกจะมีอายุการใช้งานเฉลี่ยอยู่ที่ 20 ปี ในขณะที่แบบฟิล์มบางจะมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่า เมื่อหมดอายุการใช้งานแล้วจะเกิดของเสียซึ่งจะมีองค์ประกอบมาจากวัสดุที่ประกอบขึ้นเป็น แผงเซลล์แสงอาทิตย์นั่นเอง เช่น แก้ว อะลูมิเนียม ซิลิกอน ทองแดง สังกะสี ฯลฯ รวมไปถึง แร่หายาก เช่น อินเดียม ฯลฯ

แนวทางการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นของเสียในประเทศเยอรมันได้รับอิทธิพลมาจาก WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) directive (Directive 2002/96/EC) ซึ่งเป็นกฎหมายที่ตราขึ้นโดยสหภาพยุโรปเพื่อใช้ในการบริหารจัดการของเสียอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ในกลุ่มประเทศสมาชิกโดยเริ่มมีผลบังคับใช้เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ 2545 ต่อมาได้มีการปรับปรุงกรอบของกฎหมายฉบับนี้ ให้ครอบคลุมไปถึงของเสียจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ เรียกว่า The recast WEEE directive (Directive 2012/19/EU) โดยมีผลบังคับใช้ตั้งแต่ 14 กุมภาพันธ์ 2557 กรอบของ WEEE ฉบับปรับปรุงนี้ ระบุให้ผู้ผลิตมีหน้าที่ความรับผิดชอบโดยตรงในการจัดการของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยต้องจัดให้มีระบบการเรียกคืนและรีไซเคิล ซึ่ง

ครอบคลุมถึงการบริหารจัดการ การรายงาน และการเงินที่เกี่ยวข้องในแต่ละประเทศสมาชิก ทั้งนี้นิยามของผู้ผลิตในกฎหมายนี้หมายรวมถึงโรงงาน ผู้จัดจำหน่าย ผู้นำเข้า และผู้ขายในระบบออนไลน์ ผลทางรูปธรรมของกฎหมายนี้ที่เห็นได้อย่างชัดเจนก็คือการก่อตั้งองค์กรที่ทำหน้าที่เรียกคืน โครงสร้างพื้นฐานที่ใช้ในดำเนินการกิจกรรมรีไซเคิล รวมไปถึงกระบวนการรายงานผล การให้หลักประกันทางการเงิน และกลไกการบริหารจัดการ การเชื่อมโยงกับโครงการการรวบรวมและจัดการขยะอุตสาหกรรมที่มีการดำเนินการอยู่แล้ว และให้มีการบูรณาการกับระบบโครงสร้างพื้นฐานเพื่อการเก็บรวบรวมและจัดการของชุมชนที่มีไว้เพื่อการจัดการของเสียจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ที่มีอยู่แล้ว (Solar waste, 2013)

กฏหมายอีกฉบับหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการของเสียจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ตราขึ้นโดยสหภาพยุโรปก็คือ RoHS (Restriction of Hazardous Substances) Directive (2002/95/EC) ที่มีจุดประสงค์เพื่อควบคุมการใช้งานสารอันตรายภายในอุปกรณ์ไฟฟ้า ได้แก่ ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ พอลิโบรมิเนต ไบฟีนิล (PBB-Polybrominated Biphenyl) หรือ พอลิโบรมิเนต ไดฟีนิลอีเธอร์ (PBDE-Polybrominated diphenyl ethers) เป็นต้น โดยให้ใช้สารอื่นที่มีความปลอดภัยเข้ามาทดแทน ต่อมาได้มีการปรับปรุงกฎหมายฉบับนี้ขึ้น เรียกว่า RoHS recast directive 2011/65/EC และมีผลบังคับใช้เมื่อ 3 มกราคม 2556 โดยกฎหมายที่ปรับปรุงใหม่นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดและเลิกการใช้สารอันตรายในระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

3.1.2 ภาคส่วนที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่การจัดการเซลล์แสงอาทิตย์

<u>ภาครัฐ</u>

ในประเทศเยอรมัน มีหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลักๆ 3 หน่วยงาน ดังนี้

1. กระทรวงสิ่งแวดล้อม (Federal Ministry of Environment; UBA)
2. สำนักทะเบียนผู้ก่อขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Stiftung Elektro-Altgeraete Register; Stiftung EAR)
3. หน่วยงานจัดการขยะอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์
   (Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger; örE)

ในการบริหารจัดการขยะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศเยอรมันนี้นั้นไม่ได้มีกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉพาะ แต่จะประยุกต์ใช้กฏหมายการจัดการอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Electrical and Electronic Equipment Act; Elektrogesetz, ElektroG) ที่มีอยู่เดิมเพื่อการจัดการทั้งนี้กฎหมายของเยอรมันฉบับนี้ แต่เดิมจะมีเนื้อหาที่อ้างอิงและเป็นไปตามบทบัญญัติหลักๆของ Waste

Electrical and Electronic Equipment-WEEE (Directive 2002/96/EC) และ Directive 2002/95/EC ที่ควบคุมสารอันตรายภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของสหภาพยุโรป (European Commission-EC)

ในกฎหมาย ElektroG มีการระบุว่า กระทรวงสิ่งแวดล้อม (Federal Ministry of Environment หรือ UBA) ได้มอบหมายและให้อำนาจในการบริหารจัดการขยะอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์แก่ สำนักทะเบียนผู้ก่อขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Stiftung Elektro-Altgeraete Register; Stiftung EAR) ซึ่ง Stiftung EAR นี้เป็นหน่วยงานที่ทำหน้าที่รับขึ้นทะเบียนและออกเลขทะเบียนให้กับผู้ผลิตซึ่งจะเป็นผู้รับผิดชอบอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์หลังหมดอายุใช้งาน โดยผู้ผลิตในที่นี้จะรวมถึง โรงงานที่ทำการผลิต ผู้นำเข้า ผู้จัดจำหน่ายอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ด้วย ทั้งนี้ผู้ผลิตจะมีหน้าที่ในการเรียกคืน รวบรวม และนำอุปกรณ์ที่หมดอายุจากครัวเรือน ไปดำเนินการถอดแยก รีไซเคิล หรือส่งต่อไปยังโรงงานที่ทำหน้าที่ดังกล่าว โดยผู้ผลิตจะเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่างๆทั้งหมด โดยการดำเนินการนี้จะหมายรวมไปถึงการจัดตั้งจุดรวบรวม WEEE การจัดหาภาชนะรวบรวม WEEE และต้องทำบัญชีแสดงปริมาณของ WEEE ที่เกิดขึ้นเพื่อส่งให้กับ Stiftung EAR ทุกปี จากข้อมูลในช่วงปี 2549 พบว่าชาวเยอรมันทิ้งขยะอิเล็คทรอนิคส์อย่างน้อย 4 กิโลกรัมต่อคนต่อปี

ในการรวบรวม WEEE นั้น หน่วยงาน Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger (örE) จะแจ้งประชาชนผู้เป็นเจ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics and Electrical Equipment หรือ EEE) ในเรื่องกรรมวิธีการจัดการกับ WEEE โดยหน่วยงานนี้จะเป็นผู้กำหนดวิธีในการเรียกคืนและการรวบรวม WEEE ในแต่ละพื้นที่ ทำการชี้แจงกฎระเบียบในการรีไซเคิลหรือการนำกลับมาใช้ใหม่ของ WEEE ระบุข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ WEEE เช่น ลักษณะสัญลักษณ์บนฉลากสินค้า รวมไปถึงหน้าที่การเตรียมให้ WEEE ให้อยู่ในสภาพที่พร้อมก่อนผู้ผลิตจะนำ WEEE ไปดำเนินการในขั้นต่อไป

<u>ภาคเอกชน</u>

ในประเทศเยอรมัน องค์กรที่เกี่ยวข้องกับวงจรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายกลุ่มได้แก่

1. ผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Manufacturer)
2. ตัวแทนจำหน่าย (Retailer)
3. ผู้รับเหมาติดตั้ง
4. ผู้ผลิตไฟฟ้า
5. องค์กรผู้เก็บรวมรวมและรีไซเคิล เช่น PV cycle

บทบาทของภาคเอกชนในการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า จะเริ่มจาก ผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ยื่นขอจดทะเบียนกับ Stiftung EAR ทำการจัดตั้งจุดรวบรวมของเสียอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำไปถอดแยกชิ้นส่วน รีไซเคิลส่วนประกอบที่สามารถรีไซเคิลได้ นำส่วนที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้ไปกำจัด รวมไปถึงจัดทำรายงานประจำปีเกี่ยวกับปริมาณอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิต-จำหน่าย และปริมาณของเสียอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้น รีไซเคิล และกำจัดส่งให้กับ Stiftung EAR โดยในส่วนของการรีไซเคิลและการกำจัดขยะอุปกรณ์นั้น กฎหมาย ElectroG ได้มีการระบุหลักเกณฑ์ในเรื่องความสามารถในการถอดแยกส่วนประกอบ และการรีไซเคิล ซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะต้องมีอัตราการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Rate of recovery) อย่างน้อย 80% (โดยน้ำหนักรวม)

ในปี 2550 กลุ่มผู้ผลิตแผงในสหภาพยุโรปได้รวมกันก่อตั้งองค์กรชื่อ PV Cycle เพื่อจัดทำการบริหารจัดการแผงหมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า โดยทำหน้าที่ประสานการจัดเก็บรวบรวม การขนส่งและการทำรีไซเคิลในพื้นที่ต่างๆทั่วทวีปยุโรป รวมถึงในประเทศเยอรมันด้วย โดยตั้งแต่ปี 2553-2558 PV Cycle ได้เก็บและรีไซเคิลรวมกันถึง 13,000 ตันของแผงหมดความคุ้มค่า โดยเป็นแผงจากประเทศเยอรมันถึง 7,637 ตัน (PV Cycle, 2015) ทั้งนี้ในเดือนกุมภาพันธ์ของปี 2559 PV cycle ได้ประกาศว่าสามารถรีไซเคิลได้ถึง 90% ของแผงกลุ่มที่เป็นวัสดุพวก Silicon-based และถึง 97% ของแผงที่เป็นวัสดุ Non silicon

## 3.2 การบริหารจัดการการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศญี่ปุ่น

### 3.2.1 ความนำ

ประเทศญี่ปุ่นถูกจัดอยู่ในกลุ่มประเทศที่มีการใช้งานเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มากเป็นอันดับต้นๆของโลก ด้วยกำลังการผลิตรวมอยู่ที่ 33.3 GW ในปี 2558 (IEA, 2016) ทั้งนี้การใช้เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการผลิตไฟฟ้าในญี่ปุ่นนั้นมีอัตราที่เพิ่มสูงมากในราวปี 2533 และมีการติดตั้งเพิ่มขึ้นอีกในช่วงปี 2538 เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานชั่วคราวจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่ในเมืองโกเบ และอุบัติเหตุในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์มอนจู อย่างไรก็ตาม จากสภาพทางภูมิศาสตร์ที่เป็นเกาะและการที่ต้องนำเข้าทรัพยากรอย่างต่อเนื่อง ทำให้ญี่ปุ่นต้องคำนึงถึงเรื่องมลพิษและการนำกลับของวัตถุดิบจากของเสียแผงไปพร้อมๆกัน สำหรับการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในประเทศญี่ปุ่นยังไม่มีกฎหมายที่มีผลบังคับในเรื่องการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าโดยเฉพาะ มีเพียงกฎหมายที่ใช้ในการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ 2 ฉบับที่ส่งเสริมให้ภาคอุตสาหกรรมลดการเกิดขยะอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยกระบวนการรีไซเคิล และการนำกลับมาใช้

ใหม่กล่าวคือ the Law for Promotion of Effective Utilization of Resources (LPUR) และ the Law for Recycling of Specified Home Appliance (LRHA)

ภาคอุตสาหกรรมของญี่ปุ่นโดยเฉพาะกลุ่มผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เริ่มมีความตื่นตัวและเริ่มกระบวนการเก็บรวบรวมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่า โดยคิดค่าบริการ 8 ยูโรต่อเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงมา ตั้งแต่เดือนมกราคม 2557 และเริ่มมีมาตรการเพื่อการสนับสนุนนโยบายการรีไซเคิลของรัฐบาล ที่มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการถอดแยก ขนส่งและแปรรูปของเสียอุปกรณ์การผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการปฏิบัติอย่างเป็นรูปธรรมตามนโยบายได้เริ่มภายในปลายเดือนมีนาคม 2559 ทั้งนี้เพื่อป้องกันปัญหาที่จะมีขยะแผงเซลล์ในหลุมฝังกลบเป็นจำนวนถึง 800,000 ตันภายในปี 2583 (Auer, 2015) โดยมาตรการนี้จะส่งเสริมให้เกิดการแยกวัตถุมีค่าเช่น เงิน ทองแดง และแร่ธาตุหายากชนิดต่างๆ ออกจากแผงเซลล์หมดอายุ เพื่อเป็นการสงวนแหล่งทรัพยากร เนื่องจากประเทศญี่ปุ่นต้องนำเข้าแร่ธาตุจากต่างประเทศอยู่แล้วจึงไม่ควรทิ้งของมีค่าไปโดยเปล่าประโยชน์ รัฐบาลญี่ปุ่นได้มีการเตรียมความพร้อมในการเก็บรวบรวมแผงและการรีไซเคิล โดยการสนับสนุนการวิจัยร่วม เช่น กับ NEDO Asahi Glass PVTECH บริษัทชาร์ป และ Showa Shell ได้ร่วมกันศึกษาเทคโนโลยีการรีไซเคิลกระจกแผงมาตั้งแต่ปี 2544

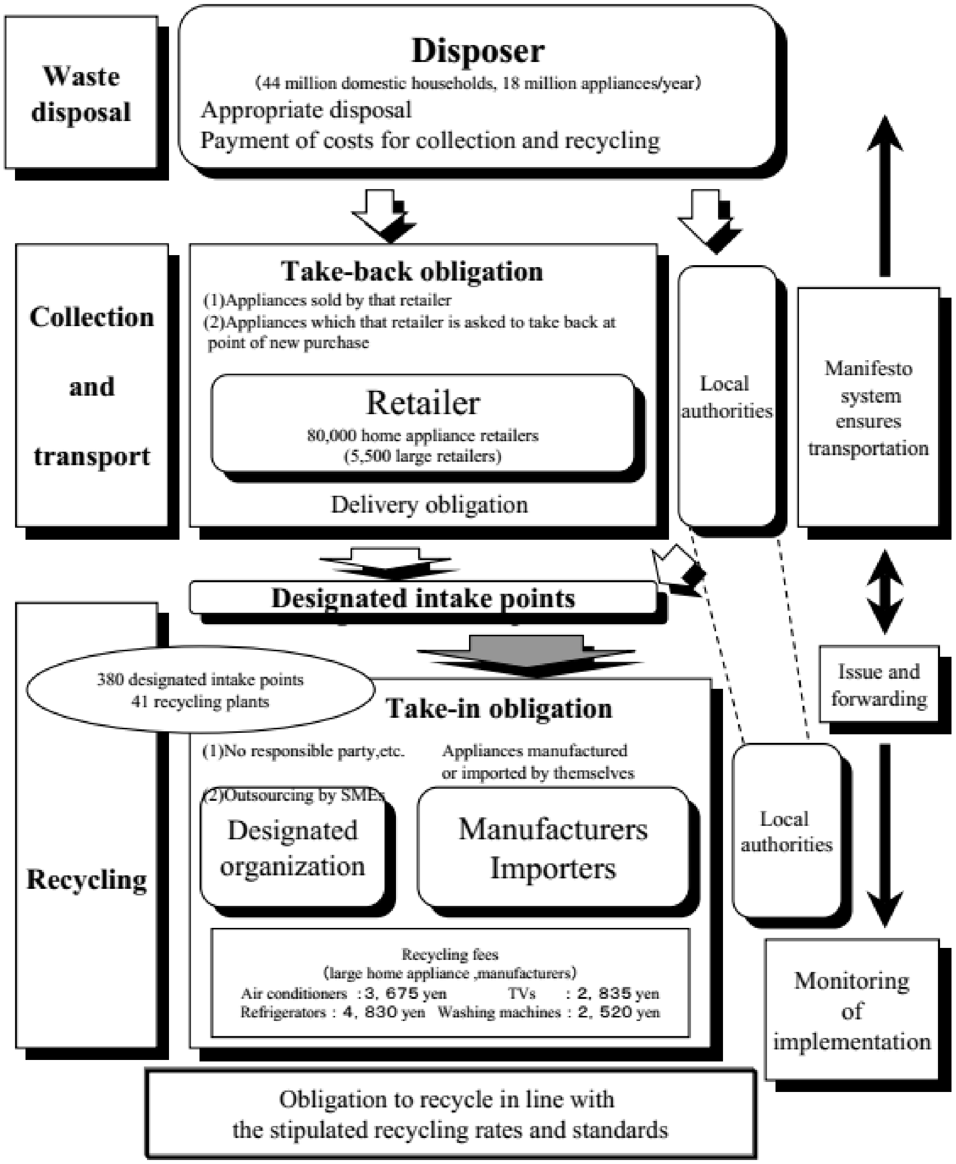
3.2.2 ภาคส่วนที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่การจัดการเซลล์แสงอาทิตย์

<u>ภาครัฐ</u>

กระทรวงเศรษฐกิจ การค้า และอุตสาหกรรม (Ministry of Economy, Trade, และ Industry; METI) เป็นหน่วยงานที่ทำหน้าที่ตรากฎหมาย และวางนโยบายด้านอุตสาหกรรม การค้า ความมั่นคงด้านพลังงาน การควบคุมการส่งออก รวมไปถึงการบริหารจัดการทรัพยากรต่างๆที่เกี่ยวข้อง ในบทบาทที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่การจัดการเซลล์แสงอาทิตย์นั้น กระทรวงเศรษฐกิจฯ เป็นผู้ตรากฎหมาย 2 ฉบับขึ้นเพื่อใช้ในการบริหารจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ ที่มุ่งส่งเสริมให้ภาคอุตสาหกรรมช่วยลดการเกิดขยะอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยกระบวนการรีไซเคิล และการนำกลับมาใช้ใหม่ คือ The Law for Promotion of Effective Utilization of Resources (LPUR) และ The Law for Recycling of Specified Home Appliance (LRHA) ซึ่งได้มีการกำหนดรูปแบบการจัดการเป็นขั้นๆดังแสดงในรูปที่ 3–1

ในประทศญี่ปุ่น ผู้ทิ้งของเสียอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์จำนวน 44 ล้านครัวเรือนจะก่อเกิดขยะประเภทนี้ประมาณ 18 ล้านชิ้นต่อปีโดยมีหน้าที่ต้องรับผิดชอบค่าใช้ในการจัดการขยะ โดยของเสียเหล่านี้จะถูกทิ้งได้ตามจุดที่มีการจำหน่ายหรือจุดเก็บที่ได้ตกลงกันไว้ประมาณ 80,000 จุดทั่วประเทศ (Consumer-Retailer

Model) จุดจำหน่ายเหล่านี้จะมีการจัดส่งของเสียไปศูนย์รวบรวมจำนวน 380 แห่งทั่วประเทศ ซึ่งศูนย์เหล่านี้จะถูกบริหารจัดการโดย 2 กลุ่มผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้ารายใหญ่ โดยกลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยบริษัท อีเลคโทรลักซ์ จีอี มัตสึชิตะ และโตชิบ้า กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยบริษัทเดวู โซนี่ ฮิตาชิ และชาร์ป (Auer, 2015) เพื่อนำไปรีไซเคิลหรือนำกลับมาใช้ใหม่ โดยศูนย์รวบรวมเหล่านี้จะมีความรับผิดชอบในการรวบรวมและขนส่งไปยังไปยังสถานที่ที่สามารถทำการรีไซเคิลได้ตามกฎหมายประมาณ 41 แห่งต่อไป




รูป 3 – 1 การจัดการขยะอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ตามข้อกำหนดในกฎหมาย LRHA

(Ministry of International Trade and Industry, 1998)

<u>ภาคเอกชน</u>

ในประเทศญี่ปุ่น จะแบ่งองค์กรที่เกี่ยวข้องกับวงจรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. ผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Manufacturer)
2. ตัวแทนจำหน่าย (Retailer)
3. ผู้รับเหมาติดตั้ง
4. ผู้ผลิตไฟฟ้า
5. ผู้ประกอบการรีไซเคิล

ในประเทศญี่ปุ่น เจ้าของขยะจ่ายค่าจัดการของเสียให้กับตัวแทนจำหน่าย ณ จุดจำหน่ายหรือจุดเก็บทั่วประเทศ ในกรณีที่ตัวแทนจำหน่ายไม่สามารถจัดการได้ AEHA-Association of Electric Home Appliance จะเข้าไปดูแลการเก็บรวบรวมแทน ระบบของการเก็บเงินค่าจัดการนี้ถึงแม้จะเป็นการส่งเสริมให้เกิดการยืดระยะการใช้ให้ยาวที่สุด แต่ก็จะทำให้เกิดการลักลอบทิ้งเช่นกัน ในปี 2559 นี้ PV Cycle จะเข้าไปทำงานในญี่ปุ่น โดยจะเปิดศูนย์รวบรวมอีก 14 แห่งทั่วประเทศ และจะมีการทำงานร่วมกับโครงการนำร่องรีไซเคิลแผงพลังงานแสงอาทิตย์ของรัฐบาลญี่ปุ่น (Akita Photovoltaics Recycling Model Project) อีกด้วย

## 3.3 การบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย

### 3.3.1 ความนำ

ประเทศไทยมีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้ามาไม่น้อยกว่า 20 ปี โดยในระยะเริ่มต้นจะเป็นการผลิตแบบไม่เชื่อมกับระบบส่งไฟฟ้าโดยปกติ (Off-grid) เพื่อใช้ในครัวเรือน โรงเรียน กิจการป่าไม้ อุทยาน หรือพื้นที่ห่างไกลที่ไม่สามารถรับการจ่ายไฟฟ้าจากระบบส่งโดยปกติ ในปี 2551 มีการประกาศใช้แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2550 – 2565) และ ต่อมาปี 2554 มีการประกาศใช้แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 10 ปี (พ.ศ. 2554 – 2564) ซึ่งได้ปรับปรุงเป้าหมายของการใช้พลังงานทดแทนจากเดิม 20% เป็น 25% ผลที่ได้จากการประกาศใช้แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี และมาตรการรับซื้อไฟฟ้าส่วนเพิ่ม ทำให้รูปแบบการใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยเปลี่ยนแปลงไป โดยเกิดการเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็วของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบสายส่ง (On-grid) ทั้งนี้ปริมาณการติดตั้งสะสมการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในปี 2554 และ ปี 2555 เป็น 242 MW และ 387 MW ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดเดือนธันวาคม 2556 กำลังการผลิตติดตั้งสะสมรวมจะเท่ากับ 1,600 MW (IRENA,

2016) เทียบกับกำลังการติดตั้งสะสมที่ 49 MW เมื่อปลายปี 2553 ซึ่งในปีนั้นแทบทั้งหมดเป็นการติดตั้งแบบอิสระไม่เชื่อมโยงกับระบบส่งโดยปกติ (กรมอนุรักษ์พลังงานและพัฒนาพลังงานทดแทน, 2556)

นอกจากนี้ได้มีมติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ(กพช) ในวันที่ 22 ตุลาคม 2557 ได้กำหนดปริมาณรับซื้อเพิ่มของโครงการโซลาร์ฟาร์มอีก 800 MW สำหรับโครงการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร (Solar PV Rooftop) ได้กำหนดปริมาณรับซื้อไว้ที่ 200 MW ในปี 2556 โดยให้อัตราค่า Feed-in Tariff หรือ Fit ครอบคลุมห้วงเวลา 25 ปี การส่งเสริมเหล่านี้จะทำให้เกิดของเสียจากการผลิตไฟฟ้าทั้งระหว่างการใช้งานและอีก 20 - 25 ปีต่อไปในอนาคต ของเสียเหล่านี้สามารถที่จะเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษหรือแหล่งทรัพยากรได้ขึ้นกับการจัดการที่ควรจะต้องมีไว้รอรับ โดยภาคส่วนที่เกี่ยวข้องอาจแบ่งเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ ภาครัฐและภาคเอกชน

3.3.2 ภาคส่วนที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่การจัดการเซลล์แสงอาทิตย์

ภาครัฐ

สามารถจำแนกได้เป็นสามกลุ่มใหญ่ๆ

1. กลุ่มที่เกี่ยวกับการออกใบอนุญาต

<u>สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน</u>

ตามพระราชบัญญัติการประกอบกิจการพลังงาน พ.ศ. 2550 สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ) เป็นผู้ออกใบอนุญาตประกอบกิจการพลังงาน สำหรับกิจการที่มีกำลังการผลิตมากกว่า 1 MW ทั้งนี้ผู้รับใบอนุญาตต้องปฏิบัติตามมาตรการป้องกัน แก้ไข และติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามประมวลหลักการปฏิบัติ (Code of Practice: CoP) โดยเฉพาะหัวข้อด้านมาตรการ P1.4 ด้านการออกแบบติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน 2556) ซึ่งระบุถึงการควบคุมมาตรฐานผลิตภัณฑ์เพื่อไม่ให้ตัวแผงและอุปกรณ์ประกอบต่างๆกลายเป็นของเสียได้โดยง่าย ในหัวข้อ P1.4.4 ยังระบุถึงการเสนอมาตรการในการกำจัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ชำรุดหรือหมดสภาพการใช้งาน ทั้งระหว่างช่วงดำเนินการและช่วงรื้อถอน รวมไปถึงการส่งเสริมให้เลือกวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่เป็นลำดับแรกในการจัดการอีกด้วย ในกรณีที่ผู้ประกอบการได้รับการยกเว้นการขอรับใบอนุญาตประกอบกิจการผลิตไฟฟ้าเนื่องจากกำลังการผลิตต่ำกว่า 1 MW ก็ยังจะต้องปฏิบัติตามประมวลหลักการปฏิบัติ (Code of Practice: CoP) ในหัวข้อ P1 ที่ครอบคลุมถึง P1.4 ด้วยเช่นกัน

<u>กรมโรงงานอุตสาหกรรม</u>

ตามกฎกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 24 พ.ศ. 2558 โรงงานลำดับที่ 88 คือโรงงานผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 MW จัดว่าเป็นโรงงานประเภทที่ 3 ที่ต้องขอใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานเพื่อผลิตไฟฟ้าด้วย โดยแนวทางการปฏิบัติให้เป็นไปตาม CoP สำหรับทุกกำลังการผลิต

2. กลุ่มที่เกี่ยวกับการจัดการแผงหมดสภาพใช้งาน

<u>สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน</u>

ในประมวลหลักการปฏิบัติ (CoP) ได้มีการระบุกรรมวิธีดำเนินการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์อื่นๆที่ชำรุดหรือหมดอายุการใช้งาน โดยมีการจำแนกสถานการณ์ออกเป็นสองลักษณะคือ

- กรณีส่งออกไปจัดการนอกประเทศ ต้องปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎหมายว่าด้วยวัตถุอันตรายและข้อกำหนดระหว่างประเทศ โดยให้แจ้ง กกพ. ทราบผลภายใน 30 วันหลังมีการจัดส่งออกไปนอกประเทศ
- กรณีการจัดการภายในประเทศต้องดำเนินการฝังกลบในหลุมฝังกลบของเสียอันตรายหรือเผาทำลายด้วยเตาเผาเฉพาะของเสียอันตรายหรือจัดการโดยวิธีอื่นๆ โดยให้เป็นไปตามกฎหมายว่าด้วยโรงงาน

นอกจากนั้นตาม D8.2 ให้คัดแยกของเสียที่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกเช่นเศษเหล็กลวด เศษโลหะต่างๆ ให้นำกลับมาใช้ใหม่หรือจำหน่ายให้แก่ผู้รับซื้อ ส่วนของเสียที่เหลือจากการคัดแยกให้ทำการเก็บรวมและประสานให้หน่วยงานท้องถิ่นทำการกำจัดต่อไป

<u>กรมโรงงานอุตสาหกรรม</u>

ในส่วนของการจัดการของเสียนี้ กรมโรงงานอุตสาหกรรมจะมีความเกี่ยวข้องในสองลักษณะคือกำกับผู้ก่อกำเนิดของเสียและกำกับการดำเนินการของผู้รับจัดการของเสีย โดยในส่วนงานกำกับผู้ก่อกำเนิดของเสีย กรมโรงงานฯ กำลังจัดทำประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเพื่อเสนอให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Module) เป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 2 ในบัญชี 5.4 กลุ่มสารอื่นๆ ทั้งนี้สำหรับการผลิตและการนำเข้าจะได้รับการยกเว้นไม่ต้องขอขึ้นทะเบียน แต่กำหนดให้ผู้ผลิต ผู้นำเข้า หรือผู้มีไว้ใน ครอบครอง แจ้งรายละเอียดเกี่ยวกับการติดตั้งและแผนการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งาน ตามแบบ วอ/อก 5.3 ทั้งนี้เพื่อให้กรมโรงงานฯ ทราบข้อมูลตั้งแต่ต้นทางจนถึงปลายทางเพื่อใช้ประโยชน์ในการกำกับดูแลให้เกิดความปลอดภัย และสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปเป็นฐานข้อมูลเพื่อนำไปพัฒนาและเพิ่มศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศต่อไป โดยวัตถุประสงค์หลักในการจัดทำประกาศนี้ ก็เนื่องจากอุปกรณ์การผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งทั้งใน

ลักษณะฟาร์มและแบบบนหลังคา (Solar Rooftop) เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งไปแล้ว อาจมีการเสื่อมสภาพ หรือหมดอายุการใช้งาน ซึ่งจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษา ตลอดจนการกำจัดทำลายอย่างถูกต้องเหมาะสม เพราะในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีสารเคมีอันตรายที่เคลือบบนแผง รวมทั้งมีการใช้โลหะที่อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมได้จึงสมควรมีการกำกับดูแลให้มีการจัดการที่ถูกต้อง รวมทั้งเพื่อให้มีการกำหนดมาตรการความปลอดภัยในเรื่องดังกล่าว

ในส่วนการกำกับการดำเนินการของผู้รับจัดการของเสีย กรมโรงงานฯ ได้จำแนกประเภทผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องออกเป็นสามประเภทคือประเภทที่ 101 105 และ 106 โดยประเภทที่ 101 จะครอบคลุมถึงเตาเผา ประเภทที่ 105 จะครอบคลุมถึงโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการคัดแยกหรือฝังกลบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วทั้งที่เป็นอันตรายและไม่เป็นอันตราย ประเภทที่ 106 จะครอบคลุมถึงโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับนำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ใชแลวหรือของเสียจากโรงงานมาผลิตเปนวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ใหมโดยผานกรรมวิธีการผลิตทางอุตสาหกรรม โรงงานเหล่านี้ต่างมีศักยภาพในการดำเนินการกำจัดหรือนำของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาเป็นวัตถุดิบใหม่ได้ ตามข้อกำหนด O8.2 และ O8.2.2 ของประมวลหลักการปฏิบัติ (คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2556)

3. กลุ่มที่เกี่ยวกับการใช้ประโยชน์วัสดุ

<u>กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่</u>

หน้าที่ของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ประการหนึ่งก็คือดูแล ควบคุมและส่งเสริมอุตสาหกรรมขั้นพื้นฐานของประเทศคู่ขนานไปกับกรมโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อประเทศ โดยเฉพาะการกำกับโรงงานประเภทที่ 59 คือโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการถลุง หลอม หล่อ รีด ดึง หรือผลิตเหล็ก หรือเหล็กกล้าในขั้นต้น และประเภทที่ 60 คือโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับถลุง ผสม ทำให้บริสุทธิ์ หลอม หล่อ รีด ดึง หรือผลิตโลหะในขั้นต้น ซึ่งมิใช่เหล็กหรือเหล็กกล้า (พระราชบัญญัติโรงงาน 2535; คำสั่งกระทรวงอุตสาหกรรมที่ 341/2554) ดังนั้นกิจกรรมที่เกี่ยวข้องและต่อเนื่องมาจากโรงงานประเภทที่ 105 และ 106 ย่อมถูกดูแลโดยกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ ทั้งนี้โรงงานต่างๆในกำกับของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานฯ จะทำหน้าที่ผลิตวัตถุดิบที่จำเป็นให้กับโรงงานประเภทอื่นๆต่อไป ตัวอย่างเช่น โรงงานทำซิลิกอนให้มีความบริสุทธิ์ที่มากขึ้นเพื่อไปทำเซมิคอนดักเตอร์หรือเวเฟอร์ต่อไป

ภาคเอกชน

สามารถจำแนกได้เป็น 5 กลุ่มใหญ่ๆ

1. ผู้จำหน่ายอุปกรณ์

หมายรวมถึง ผู้ผลิต ผู้นำเข้า ผู้แทนจำหน่าย ผู้ประกอบ ที่ทำหน้าที่จำหน่ายอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ให้กับผู้รับเหมาหรือเจ้าของ ทั้งนี้อุปกรณ์ดังกล่าวได้แก่ ตัวแผง และระบบประกอบต่างๆทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง (Balance of System)

2. ผู้รับเหมา

คือผู้รับจ้างติดตั้งโดยมีหน้าที่นำองค์ประกอบของระบบต่างๆเข้ามารวมกันเพื่อให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้

3. เจ้าของ

คือผู้ที่มีสิทธิครอบครองระบบผลิตไฟฟ้าและเป็นผู้ทำสัญญาซื้อขายไฟกับการไฟฟ้านครหลวง ภูมิภาคหรือฝ่ายผลิต

4. ธุรกิจจัดการของเสีย

คือโรงงานที่จดทะเบียนเป็นโรงงานประเภทที่ 101 105 และ 106 มีหน้าที่รับจัดการของเสียที่เกิดจากกิจกรรมการผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ โดยประเภทที่ 101 จะรวมถึงเตาเผา ประเภทที่ 105 จะหมายถึงโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการคัดแยก หรือฝังกลบสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วทั้งที่เป็นอันตรายและไม่เป็นอันตราย ประเภทที่ 106 จะครอบคลุมถึงโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับนำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ใชแลวหรือของเสียจากโรงงานมาผลิตเปนวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑใหมโดยผานกรรมวิธีการผลิตทางอุตสาหกรรม

5. ธุรกิจโลหะและวัสดุ

คือโรงงานที่จะนำวัตถุดิบที่ถูกคัดแยกหรือผ่านกระบวนการขั้นต้นจากธุรกิจจัดการของเสียเข้ามาทำให้ดีขึ้น บริสุทธิ์ขึ้นโดยกระบวนการถลุง ผสม ทำให้บริสุทธิ์ หลอม หล่อ รีด ดึง หรือผลิตโลหะเพื่อเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยปกติได้

### 3.4 การคาดการณ์ปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การคาดการณ์ปริมาณแผงเซลล์ที่หมดความคุ้มค่าและจะกลายเป็นของเสียในประเทศไทยจะดำเนินตามหัวข้อดังต่อไปนี้

1) การรวบรวมกำลังการผลิตจนถึงปี 2558
2) การคาดการณ์กำลังการผลิตที่หมดความคุ้มค่า
3) การประเมินน้ำหนักแผงที่หมดความคุ้มค่า
4) การคาดการณ์น้ำหนักแผงที่ติดตั้งหลังปี 2558
5) การคาดการณ์ปริมาณของเสียจากกำลังการติดตั้งของ 3,000 MW ที่สอง

3.4.1 การรวบรวมกำลังการผลิตจนถึงปี 2558

ในปีที่ทำการศึกษานี้คือปี 2559 - 2560 ทางผู้วิจัยจะมีการรวบรวมกำลังการผลิตติดตั้งจนถึงปี 2558 ในหน่วย เมกกะวัตต์สูงสุด (MW) โดยข้อมูลปริมาณกำลังการผลิตติดตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทยจะมาจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน และ คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานแห่งชาติ (กกพ.) ซึ่งสามารถแสดงได้ตามตารางที่ 3 – 1 และ 3 – 2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 – 1 ขนาดกำลังการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จนถึง ปี 2545 – 2558
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)

| ปี | กำลังการติดตั้ง (MWp) | กำลังการติดตั้งสะสม (MWp) |
|---|---|---|
| 2545 | 1.12 | 2.89 |
| 2546 | 1.33 | 4.22 |
| 2547 | 6.61 | 10.83 |
| 2548 | 13.05 | 23.88 |
| 2549 | 6.64 | 30.52 |
| 2550 | 1.98 | 32.51 |
| 2551 | 0.89 | 33.39 |
| 2552 | 9.77 | 43.17 |
| 2553 | 6.05 | 49.22 |
| 2554 | 193.46 | 242.68 |
| 2555 | 145.04 | 387.57 |
| 2556 | 436.24 | 823.8 |
| 2557 | 474.71 | 1,298.51 |
| 2558 | 121.07 | 1,419.58 |

จากตารางที่ 3 - 1 พบว่ากำลังการผลิตติดตั้งตั้งแต่ช่วงปี 2545 ถึง 2553 ค่อนข้างคงที่แต่จะมีอัตราการเพิ่มอย่างมากในช่วงปี 2554 เป็นต้นมา ตามนโยบายการสนับสนุนของภาครัฐ โดยที่ภายหลังปี 2556 มีการติดตั้งถึงปีละประมาณ 400 MW โดยมีการชะลอตัวอีกครั้งในปี 2558

ตารางที่ 3 – 2 กำลังการผลิตติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผู้รับใบอนุญาตผลิตไฟฟ้าระหว่างปี 2552 – 2558 (ฝ่ายใบอนุญาต กกพ., เมษายน 2559)

| ปี | ชนิดของเซลล์ | | | | รวมรายปี (MWp) | รวมสะสม (MWp) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | c-Si | a-Si | CIS/CIGS | CdTe | | |
| 2552 | 5.44 | 2.82 | | | 8.26 | 8.26 |
| 2553 | 10.58 | 9.25 | | | 19.83 | 28.09 |
| 2554 | 114.26 | 70.14 | 11.00 | | 195.40 | 223.49 |
| 2555 | 149.19 | 31.45 | 6.00 | 2.00 | 188.63 | 412.12 |
| 2556 | 413.21 | 74.38 | 12.39 | | 499.98 | 912.10 |
| 2557 | 338.51 | 52.00 | | | 390.51 | 1,302.61 |
| 2558 | 685.40 | 17.00 | 4.99 | 5.00 | 712.40 | 2,015.01 |
| รวม | 1,716.59 | 257.04 | 34.39 | 7.00 | 2,015.01 | |
| สัดส่วน | 85.19% | 12.76% | 1.71 | 0.35% | 100% | |

จากตารางที่ 3 - 2 พบว่ากำลังการผลิตติดตั้งส่วนใหญ่ถึงร้อยละ 85 เป็นแผงประเภทผลึกซิลิกอน (C-Si) โดยมีสัดส่วนรวมตั้งแต่ปี 2552 - 2558 รวมถึงร้อยละ 85 ของกำลังการผลิตติดตั้งทั้งหมด รองลงมาจะเป็นแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน (a-Si), CIS/CIGS และ CdTe ตามลำดับ พบว่าข้อมูลขนาดกำลังการติดตั้ง ที่ได้จาก 2 แหล่งนั้นมีความใกล้เคียงกันแต่ยังมีความแตกต่างกันในบางปี อย่างไรก็ดีนอกเหนือไปจากปริมาณแผงที่ใช้ผลิตกำลังการผลิตติดตั้งที่ทางผู้ประกอบการได้แจ้งกับหน่วยราชการแล้ว ผู้ประกอบการจำเป็นต้องสำรองแผงจำนวนหนึ่งไว้เพื่อทำการทดแทนแผงที่อาจจะเสียหายหรือชำรุดได้ในระหว่างการทำงาน เพื่อให้เกิดความครบถ้วนคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการสืบค้นเพิ่มเติมจากแหล่งอื่น ๆ เช่น วารสาร PV Magazine, IEA (International Energy Agency) และ IRENA (International Renewable Energy Agency) เป็นต้น โดยบางแหล่งมีการรวบรวมจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผู้ผลิตส่งมายังประเทศไทย ทำให้เราจะได้ข้อมูลกำลังการผลิตตามปริมาณแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยตามในตารางที่ 3 - 3 ซึ่งน่าจะเป็นข้อมูลใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ทั้งนี้ตัวเลขในปี 2558 ที่มีค่าสูงกว่าค่าของคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานแห่งชาติเป็นจำนวนที่ผู้ผลิตส่งมาจำหน่ายในประเทศไทย โดยเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งทั้งในระบบ On-Grid ที่ขอใบอนุญาต ในระบบ Off-Grid และเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำรองสำหรับการเปลี่ยนทดแทนแผงชำรุดเสียหาย โดยมีค่าโดยรวมอยู่ที่

ประมาณ 1,500 MW โดยในการนี้ขอประมาณว่า 20% เป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำรอง ดังนั้นกำลังการผลิตตามปริมาณแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใหม่ในปี 2558 จะมีขนาดโดยประมาณที่ 1,200 MW

ตารางที่ 3 – 3 กำลังการผลิตตามปริมาณแผงเซลล์แสงอาทิตย์รายปีและสะสมในประเทศไทยจนถึง ปี พ.ศ. 2558 ที่ได้ทำการปรับแล้ว

| ปี | กำลังการติดตั้ง (MWp) | กำลังการติดตั้งสะสม (MWp) |
|---|---|---|
| 2545 | 1.12 | 2.89 |
| 2546 | 1.33 | 4.22 |
| 2547 | 6.61 | 10.83 |
| 2548 | 13.05 | 23.88 |
| 2549 | 6.64 | 30.52 |
| 2550 | 1.98 | 32.50 |
| 2551 | 0.89 | 33.39 |
| 2552 | 9.77 | 43.16 |
| 2553 | 19.83 | 62.99 |
| 2554 | 195.39 | 258.39 |
| 2555 | 188.63 | 447.02 |
| 2556 | 499.98 | 947.00 |
| 2557 | 474.71 | 1,421.71 |
| 2558 | 1,200* | 2,621.71 |

ที่มาจาก* www.iea-pvps.org

3.4.2 การคาดการณ์กำลังการผลิตที่หมดความคุ้มค่า

แผงเซลล์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าอาจจะจำแนกได้เป็นสองลักษณะคือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุ (End-of-life) ซึ่งหมายถึงแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสื่อมประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าจนหมดความคุ้มค่าในการใช้งานต่อไป และแผงที่เสียหายจากการใช้งาน (Damage) ซึ่งได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ชำรุดเสียหายหรือหมดสภาพจากอุบัติเหตุในการขนส่ง การติดตั้ง รวมถึงแผงที่มีความเสียหายที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน ได้แก่ การถูกกระแทกจากของแข็งต่าง ๆ ในขณะทำการบำรุงรักษา ทำความสะอาด แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีตำหนิบกพร่องหรือผิดพลาดจากโรงงานผู้ผลิต เป็นต้น โดยปกติแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอายุใช้ระหว่าง 20 – 30 ปี ขึ้นอยู่กับความสามารถในการบำรุงรักษา คุณภาพผลิตภัณฑ์และสภาพสิ่งแวดล้อมโดยรอบ

จากข้อมูลที่ปรับใหม่ได้ตามตารางที่ 3 - 3 เราสามารถคาดการณ์กำลังการผลิตที่หมดความคุ้มค่าได้เป็น 2 มุมมอง (Scenario) คือมุมมองที่ 1 แผงเซลล์เกิดความเสียหายจากการขนส่ง ใช้งาน ตำหนิและมีการติดตั้ง

ทดแทนตลอดอายุการใช้งานตั้งแต่ปี 2545-2558 โดยกำหนดให้ปริมาณความเสียหายมี 3 ระดับคือ 0.5% 1% และ 2% จะได้ค่าการประมาณการปริมาณของเสียแผงในหน่วย MW ตามตารางที่ 3 - 4

ตารางที่ 3 - 4 ข้อมูลการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จนถึงปลายปี พ.ศ. 2558 (ค.ศ. 2015) และปีที่เกิดซากในมุมมองที่หนึ่ง

| ปี | ติดตั้ง (MWp) | สะสม (MWp) | ประมาณการปริมาณแผงชำรุด (MWp) | | | ปีที่คาดว่าหมดอายุ | | | ปริมาณขนาดแผงที่หมดอายุ (MWp) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0.5% | 1 % | 2% | 20 ปี | 25 ปี | 30 ปี | |
| 2545 | 1.12 | 2.89 | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 2565 | 2570 | 2575 | 2.89 |
| 2546 | 1.33 | 4.22 | 0.02 | 0.04 | 0.08 | 2566 | 2571 | 2576 | 1.33 |
| 2547 | 6.61 | 10.83 | 0.05 | 0.11 | 0.22 | 2567 | 2572 | 2577 | 6.61 |
| 2548 | 13.05 | 23.88 | 0.12 | 0.24 | 0.48 | 2568 | 2573 | 2578 | 13.05 |
| 2549 | 6.64 | 30.52 | 0.15 | 0.31 | 0.61 | 2569 | 2574 | 2579 | 6.64 |
| 2550 | 1.98 | 32.50 | 0.16 | 0.33 | 0.65 | 2570 | 2575 | 2580 | 1.98 |
| 2551 | 0.89 | 33.39 | 0.17 | 0.3339 | 0.67 | 2571 | 2576 | 2581 | 0.89 |
| 2552 | 9.77 | 43.16 | 0.22 | 0.43 | 0.86 | 2572 | 2577 | 2582 | 9.77 |
| 2553 | 19.83 | 62.99 | 0.31 | 0.63 | 1.26 | 2573 | 2578 | 2583 | 6.05 |
| 2554 | 195.397 | 258.39 | 1.29 | 2.58 | 5.17 | 2574 | 2579 | 2584 | 195.39 |
| 2555 | 188.631 | 447.02 | 2.24 | 4.47 | 8.94 | 2575 | 2580 | 2585 | 188.63 |
| 2556 | 499.98 | 947.00 | 4.74 | 9.47 | 18.94 | 2576 | 2581 | 2586 | 499.98 |
| 2557 | 474.71 | 1,421.71 | 7.11 | 14.22 | 28.43 | 2577 | 2582 | 2587 | 195.39 |
| 2558 | 1,200 | 2,621.71 | 13.11 | 26.22 | 52.43 | 2578 | 2583 | 2588 | 1,200 |
| รวมปริมาณแผงที่เสียระหว่างการใช้ | | | 29.70 | 59.40 | 118.80 | รวมปริมาณแผงที่หมดอายุ | | | 2,621.71 |

จากตารางที่ 3 - 4 ภายในสิ้นปี 2558 จะเกิดปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์สะสมรวมตามมุมมองนี้อยู่ในระหว่าง 29.7 – 118.80 MW และจากนั้นจะมีการติดตั้งทดแทนแผงที่เสียหายตลอดอายุการใช้งานจนหมดรุ่นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในปี 2558 ในกรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุใช้งาน 30, 25, และ 20 ปี ของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่สะสมรวมที่จะเกิดขึ้นภายในปี 2588 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 891–3,564, 742.5-2,970 และ 594-2,376 MW ตามลำดับ โดยปริมาณของเสียสะสมที่ไม่คิดการติดตั้งทดแทนมีค่าประมาณ 2,621.71 MW ทั้งนี้ไม่รวมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งหลังปี พ.ศ. 2558

ในมุมมองที่ 2 แผงเซลล์เกิดความเสียหายจากการขนส่ง ใช้งาน ตำหนิและมีการติดตั้งทดแทนตลอดอายุการใช้งานตั้งแต่ปี 2552 - 2558 โดยกำหนดให้ปริมาณความเสียหายมี 3 ระดับคือ 0.5% 1% และ 2% จะได้ค่าประมาณการปริมาณของเสียแผงในหน่วย MW

สมมติฐานของมุมมองนี้ก็คือการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนปี 2552 นั้นเป็นการติดตั้งเพื่อผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ชนบทห่างไกลเป็นส่วนใหญ่และเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เสียหายจะไม่มีการทดแทนหรือนำเข้าสู่ระบบ

จัดการ ทั้งนี้เนื่องจากผู้ใช้ไม่มีงบประมาณหรือไม่ทราบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอยู่นั้นมีการเสียหายเกิดขึ้นจึงมักทิ้งไว้ ซึ่งแตกต่างไปจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งตั้งแต่ปี 2552 ซึ่งส่วนใหญ่นั้นใช้ในธุรกิจการผลิตไฟฟ้าเพื่อการจำหน่ายที่มีสัญญาซื้อขายไฟที่มีการระบุตัวเลขปริมาณซื้อขายที่ชัดเจน จึงจำเป็นต้องมีการติดตั้งทดแทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสียหายชำรุดเพื่อให้ได้ผลตอบแทนสูงสุดและมีการจัดการทิ้ง ดังนั้นปริมาณแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุและเสียหายตามมุมมองนี้สามารถประเมินได้ดังแสดงในตารางที่ 3 - 5

ตารางที่ 3 - 5 ข้อมูลการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จนถึงปลายปี พ.ศ. 2558 และปีที่เกิดของเสียในมุมมองที่ 2

| ปี | ติดตั้ง (MWp) | สะสม (MWp) | ประมาณการปริมาณแผงชำรุด (MWp) | | | ปีที่คาดว่าหมดอายุ | | | ปริมาณขนาดแผงที่หมดอายุ (MWp) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0.5% | 1 % | 2% | 20 ปี | 25 ปี | 30 ปี | |
| 2545 | 1.12 | 2.89 | -- | -- | -- | 2565 | 2570 | 2575 | -- |
| 2546 | 1.33 | 4.22 | -- | -- | -- | 2566 | 2571 | 2576 | -- |
| 2547 | 6.61 | 10.83 | -- | -- | -- | 2567 | 2572 | 2577 | -- |
| 2548 | 13.05 | 23.88 | -- | -- | -- | 2568 | 2573 | 2578 | -- |
| 2549 | 6.64 | 30.52 | -- | -- | -- | 2569 | 2574 | 2579 | -- |
| 2550 | 1.98 | 32.51 | -- | -- | -- | 2570 | 2575 | 2580 | -- |
| 2551 | 0.89 | 33.39 | -- | -- | -- | 2571 | 2576 | 2581 | -- |
| 2552 | 9.77 | 43.17 | 0.05 | 0.10 | 0.20 | 2572 | 2577 | 2582 | 9.77 |
| 2553 | 6.05 | 49.22 | 0.15 | 0.30 | 0.60 | 2573 | 2578 | 2583 | 6.05 |
| 2554 | 195.397 | 242.68 | 1.13 | 2.25 | 4.50 | 2574 | 2579 | 2584 | 195.40 |
| 2555 | 188.631 | 387.57 | 2.07 | 4.14 | 8.27 | 2575 | 2580 | 2585 | 188.63 |
| 2556 | 436.24 | 823.8 | 4.57 | 9.14 | 18.27 | 2576 | 2581 | 2586 | 436.24 |
| 2557 | 499.98 | 1,298.51 | 6.94 | 13.88 | 27.77 | 2577 | 2582 | 2587 | 499.98 |
| 2558 | 1,200 | 2,498.51 | 12.94 | 25.88 | 51.77 | 2578 | 2583 | 2588 | 1,200 |
| รวมปริมาณแผงที่เสียระหว่างการใช้ | | | 27.84 | 55.69 | 111.37 | รวมปริมาณแผงที่หมดอายุ | | | 2,588.32 |

จากตารางที่ 3 - 5 ปริมาณของเสียสะสมที่จะเกิดขึ้นภายในสิ้นปี 2558 จากการเปลี่ยนทดแทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าอยู่ในช่วง 27.84 - 111.36 MW ในกรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุใช้งานที่ 30, 25, และ 20 ปี ปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีสะสมรวมที่จะเกิดขึ้นภายในปี 2588 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 835.24-3,340.96, 696.03 - 2,784.13 และ 556.83 - 2,227.3 MW ตามลำดับ โดยปริมาณของเสียสะสมที่ไม่คิดการติดตั้งทดแทนมีค่าประมาณ 2,588.32 MW ทั้งนี้ไม่รวมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งหลังปี พ.ศ. 2558

### 3.4.3 การประเมินน้ำหนักแผงที่หมดความคุ้มค่า

หลังจากที่ได้ประเมินค่าปริมาณซากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เราจะทำการแปลงปริมาณของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากหน่วยกำลังไฟฟ้าออกมาเป็นน้ำหนัก จากข้อมูลทางกายภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ดังในตารางที่ 3 – 6

ตารางที่ 3 - 6 ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่างๆ

| | c-Si | Thin Film | | |
|---|---|---|---|---|
| | | a-Si | CIS/CIGS | CdTe |
| น้ำหนัก | 10 - 28kg | 12 - 20kg | 9 - 16 kg | 10 - 20 kg |
| ค่ากำลังสูงสุด | 60 - 330 Wp | 60 - 160 Wp | | |
| ขนาดพื้นที่ | 1.4 - 2.5 $m^2$ | 1.4 - 6.0 $m^2$ | 0.6 - 1.2 $m^2$ | |
| ค่าอัตราส่วนกำลังสูงสุดต่อน้ำหนัก | 10 - 18 Wp/kg | 2 - 6 Wp/kg | 6 - 8 Wp/kg | |
| ค่าอัตราส่วนกำลังสูงสุดต่อพื้นที่ | 70 - 200 Wp/$m^2$ | 20 - 50 Wp/$m^2$ | 60 - 120 Wp/$m^2$ | |

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณเราจะให้ฐานค่าอัตราส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด c-Si ซึ่งมีค่าเฉลี่ยที่ประมาณ 80 - 90 เมตริกตัน/MWp จากประชากรส่วนใหญ่ของแผงชนิดนี้ และปรับค่าสัดส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น ๆ จะได้ค่าเฉลี่ยที่ประมาณ 90 - 100 เมตริกตัน/MWp โดยค่าน้ำหนักเฉลี่ยในการคำนวณน้ำหนักในที่นี้ขอใช้ค่า 90 เมตริกตัน/MWp ที่ได้การคำนวณและถ่วงน้ำหนักของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละประเภท ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 3 - 7 ตามข้อมูลในมุมมองที่ 1

ตารางที่ 3 - 7 การประมาณค่าน้ำหนักของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามมุมมองที่ 1

| สมมติฐานต่างๆ | ปริมาณ (MW) | น้ำหนักของเสีย (ตัน) | ปริมาณของเสียรวมในแต่ละกรณี (ตัน) |
|---|---|---|---|
| ปริมาณแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามอายุใช้งาน | 2,621.71 | 235,954 | 235,954 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 0.5% ในระยะเวลา 20 ปี | 275.28 | 24,775 | 260,729 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 0.5% ในระยะเวลา 25 ปี | 340.82 | 30,674 | 266,628 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 0.5% ในระยะเวลา 30 ปี | 407.16 | 36,645 | 272,599 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 1% ในระยะเวลา 20 ปี | 550.56 | 49,550 | 285,504 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 1% ในระยะเวลา 25 ปี | 681.65 | 61,348 | 297,302 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 1% ในระยะเวลา 30 ปี | 814.32 | 73,289 | 309,243 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 2% ในระยะเวลา 20 ปี | 1,104.58 | 99,413 | 335,366 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 2% ในระยะเวลา 25 ปี | 1,363.29 | 122,697 | 358,650 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 2% ในระยะเวลา 30 ปีz | 1,628.65 | 146,578 | 382,532 |

ปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์รวมในมุมมองที่ 1 มีค่า 260,729 - 382,532 ตัน โดยมีปริมาณของเสียฐานที่ไม่คิดการติดตั้งทดแทนอยู่ที่ 235,954 ตัน ทั้งนี้ในช่วงปี 2565 - 2588 อาจจะมีของเสียเกิดขึ้นจากการใช้งานออกมาสู่ระบบโดยที่ยังไม่หมดอายุโดยมีปริมาณในช่วง 275 - 1,629 ตัน ส่วนการคำนวณปริมาณของเสียตามมุมมองที่ 2 ได้แสดงในตารางที่ 3 – 8

ตารางที่ 3 - 8 การประมาณค่าน้ำหนักของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามมุมมองที่ 2

| สมมติฐานต่างๆ | ปริมาณ (MW) | น้ำหนักของเสีย (ตัน) | ปริมาณของเสียรวมในแต่ละกรณี (ตัน) |
|---|---|---|---|
| ปริมาณแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามอายุใช้งาน | 2,588.32 | 232,948.99 | 232,948.99 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 0.5% ในระยะเวลา 20 ปี | 271.77 | 24,459.64 | 257,408.63 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 0.5% ในระยะเวลา 25 ปี | 336.48 | 30,283.37 | 263,232.36 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 0.5% ในระยะเวลา 30 ปี | 401.19 | 36,107.09 | 269,056.08 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 1% ในระยะเวลา 20 ปี | 543.55 | 48,919.29 | 281,868.28 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 1% ในระยะเวลา 25 ปี | 672.96 | 60,566.74 | 293,515.73 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 1% ในระยะเวลา 30 ปี | 802.38 | 72,214.19 | 305,163.18 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 2% ในระยะเวลา 20 ปี | 1,087.10 | 97,838.58 | 330,787.56 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 2% ในระยะเวลา 25 ปี | 1,345.93 | 121,133.47 | 354,082.46 |
| ปริมาณแผงแสงอาทิตย์ที่ทดแทนปี 2% ในระยะเวลา 30 ปี | 1,604.76 | 144,428.37 | 377,377.36 |

ปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์รวมในมุมมองที่ 2 มีค่า 257,408 - 377,377 ตัน โดยมีปริมาณของเสียฐานที่ไม่รวมการติดตั้งทดแทนอยู่ที่ 232,948 ตัน โดยพบว่าปริมาณของเสียจากมุมมองที่ 2 มีค่าน้อยกว่าเนื่องจากคิดการทดแทนแค่ปี 2552 - 2558 เท่านั้น ในช่วงปี 2565 - 2588 อาจจะมีของเสียเกิดขึ้นจากการใช้งานออกมาสู่ระบบโดยที่ยังไม่หมดอายุโดยมีปริมาณในช่วง 272 - 1,605 ตัน อย่างไรก็ดีมุมมองที่ 2 นี้แสดงปริมาณของเสียแผงที่มีความเป็นไปได้ในการเกิดที่สูงกว่าเนื่องจากแผงที่ติดตั้งก่อนหน้าปี 2552 มักไม่ได้รับการติดตั้งทดแทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสียหายก่อนหมดอายุและการจัดการแผงหลังหมดความคุ้มค่า ดังนั้นการประมาณการในช่วงต่อไปจะใช้ผลที่ได้จากมุมมองที่ 2

### 3.4.4 การคาดการณ์น้ำหนักแผงที่ติดตั้งหลังปี 2558

ข้อมูลปริมาณน้ำหนักที่ได้จากมุมมองทั้งสองข้างต้นนั้นก็คือของเสียที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งแผง พลังงานแสงอาทิตย์ภายในปี 2558 เท่านั้น เพื่อให้เกิดความครบถ้วน เราจะทำการพยากรณ์ปริมาณของเสียแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ที่จะติดตั้งหลังปี พ.ศ. 2558 สำหรับในโครงการแรกที่มีเป้าหมาย 3,000 MW แต่จากข้อมูลของสำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานในตารางที่ 3 - 2 ได้มีการติดตั้งไปแล้วถึงปลายปี 2558 เป็นจำนวน 2,015.01 MW ซึ่งยังขาดอยู่ 985 MW ที่คาดว่าจะมีการดำเนินการหลังจากปี 2558 เป็นต้นไป ตามประมาณการคาดว่าจะสามารถติดตั้งจนครบในส่วนนี้ ใน ปี 2560 ส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในชุดนี้จะหมดอายุในช่วง ปี 2580 - 2590 อย่างไรก็ดีเนื่องจากยังไม่มีการติดตั้งจริงๆเกิดขึ้น ปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ การส่งเสริมจากภาครัฐในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การใช้เงินอุดหนุนในการติดตั้ง การทดแทนในรูปการลดหย่อนภาษี การสนับสนุนด้านเทคนิคแก่ประชาชน เทคโนโลยีใหม่ ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้ราคาถูกลงมีอายุการใช้งานที่นาน สามารถที่จะทำให้ผลการพยากรณ์นี้คลาดเคลื่อนได้ ปริมาณน้ำหนักของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในส่วนนี้สามารถประมาณได้ในตารางที่ 3 – 9

ตารางที่ 3 – 9 ปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะเกิดขึ้นสำหรับโครงการ 3,000 MW แรกในส่วนที่เหลือ 985 MW และปริมาณของเสียที่จะเกิดขึ้นในส่วนที่ใช้ในการเปลี่ยนทดแทน (ตัน)

| แผงหลัก | น้ำหนักของของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนทดแทนตามอายุการใช้งาน (ตัน) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อายุ 20 ปี | | | อายุ 25 ปี | | | อายุ 30 ปี | | |
| | 0.5% | 1% | 2% | 0.5% | 1% | 2% | 0.5% | 1% | 2% |
| 88,650 | 8,865 | 17,730 | 35,460 | 11,081.25 | 22,162.5 | 44,325 | 13,297.5 | 26,595 | 53,190 |

จากผลการประเมินในตารางที่ 3 - 9 พบว่าปริมาณของเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนที่เหลือ 985 MW ในโครงการส่วนแรก จะอยู่ที่ 97,515 - 141,840 ตัน ดังนั้นสำหรับโครงการ 3,000 MW แรกนี้เราสามารถประมาณการปริมาณน้ำหนักของเสียแผงได้ที่ 354,923.63 - 519,217.36 ตัน จากข้อมูลของมุมมองที่ 2 โดยของเสียปริมาณนี้จะเกิดขึ้นภายในปี 2590

3.4.5 การคาดการณ์ปริมาณของเสียจากกำลังการติดตั้งของ 3,000 MW ที่สอง

คาดว่าในส่วนของ 3,000 MW ที่สองจะมาจากการติดตั้งบนอาคาร (Solar rooftop) เป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้ภาครัฐได้ตั้งเป้าหมายในการติดตั้งไว้ที่ 800 MW ในปี 2559 แต่ได้มีการคาดว่าจะไม่สามารถติดตั้งได้ครบเนื่องจากผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตได้ครบตามจำนวนต้องการ และจากสภาวะเศรษฐกิจโลกที่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทย ซึ่งคาดว่าจะสามารถติดตั้งได้เพียง 25 - 40% ของ 800 MW หรือ 200 - 320 MW เท่านั้น และอาจจะสามารถมีอัตราการติดตั้งเพิ่มได้ปีละ 3 - 4%

ดังนั้นในการคาดการณ์จะขอแยกออกเป็น 2 เหตุการณ์ โดยเหตุการณ์ที่ 1 เริ่มติดที่ 40% ของ 800 MW หรือเท่ากับ 320 MW ในปี 2559 และมีอัตราการติดตั้งเพิ่มที่ 3% และ 4% ต่อปี โดยจะติดตั้งเสร็จภายในปี

2567 และเกิดปริมาณของเสียภายในปี 2597 ทั้งนี้ปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ การส่งเสริมจากภาครัฐในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การใช้เงินอุดหนุนในการติดตั้ง การทดแทนในรูปการลดหย่อนภาษี การสนับสนุนด้านเทคนิคแก่ประชาชน เทคโนโลยีใหม่ ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้ราคาถูกลง มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น ฯลฯ สามารถที่จะทำให้ผลการพยากรณ์นี้คลาดเคลื่อนได้ ผลของการคาดการณ์ตามเหตุการณ์ที่ 1 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3 - 10

ตารางที่ 3 – 10 การประเมินความเป็นไปได้ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงการ 3,000 MW ที่สอง โดยในปีแรกติดตั้ง 40% หรือ 320 MW

| ปี | ปริมาณการติดตั้ง (MW) | | ปีที่คาดว่าหมดอายุ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | อัตราการเพิ่ม 3% ต่อปี | อัตราการเพิ่ม 4% ต่อปี | 20 ปี | 25 ปี | 30 ปี |
| 2559 | 320 | 320 | 2579 | 2584 | 2589 |
| 2560 | 329.60 | 332.80 | 2580 | 2585 | 2590 |
| 2561 | 339.49 | 346.11 | 2581 | 2586 | 2591 |
| 2562 | 349.67 | 359.96 | 2582 | 2587 | 2592 |
| 2563 | 360.16 | 374.35 | 2583 | 2588 | 2593 |
| 2564 | 370.97 | 389.33 | 2584 | 2589 | 2594 |
| 2565 | 382.10 | 404.90 | 2585 | 2590 | 2595 |
| 2566 | 393.56 | 421.10 | 2586 | 2591 | 2596 |
| 2567 | 154.45 | 51.45 | 2587 | 2592 | 2597 |
| รวม | 3,000 | 3,000 | | | |

จากตารางที่ 3 - 10 พบว่าทั้งอัตราการเพิ่มที่ 3% หรือ 4% จะทำให้การติดตั้งที่ 3,000 MW เสร็จสิ้นได้ภายในปี 2567 สำหรับเหตุการณ์ที่ 2 จะเริ่มติดที่ 25% ของ 800 MW หรือเท่ากับ 200 MW ในปี 2559 และมีอัตราการติดตั้งเพิ่มที่ 3% และ 4% ต่อปี โดยจะติดตั้งเสร็จภายในปี 2571 และเกิดปริมาณของเสียภายในปี 2601

ตารางที่ 3 – 11 การประเมินความเป็นไปได้ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงการ 3,000 MW ที่สอง โดยในปีแรกติดตั้ง 25% หรือ 200 MW

| ปี | ปริมาณการติดตั้ง | | ปีที่คาดว่าหมดอายุ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | อัตราการเพิ่ม 3% ต่อปี | อัตราการเพิ่ม 4% ต่อปี | 20 ปี | 25 ปี | 30 ปี |
| 2559 | 200 | 200 | 2579 | 2584 | 2589 |
| 2560 | 206 | 208 | 2580 | 2585 | 2590 |
| 2561 | 212.18 | 216.32 | 2581 | 2586 | 2591 |
| 2562 | 218.55 | 224.97 | 2582 | 2587 | 2592 |
| 2563 | 225.10 | 233.97 | 2583 | 2588 | 2593 |
| 2564 | 231.81 | 243.33 | 2584 | 2589 | 2594 |
| 2565 | 238.81 | 253.06 | 2585 | 2590 | 2595 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2566 | 245.97 | 263.19 | 2586 | 2591 | 2596 |
| 2567 | 253.35 | 273.71 | 2587 | 2592 | 2597 |
| 2568 | 260.95 | 284.66 | 2588 | 2593 | 2598 |
| 2569 | 268.78 | 296.05 | 2589 | 2594 | 2599 |
| 2570 | 276.85 | 302.73 | 2590 | 2595 | 2600 |
| 2571 | 161.59 | - | 2591 | 2596 | 2601 |
| รวม | 3,000 | 3,000 | | | |

จากตารางที่ 3 - 11 พบว่าอัตราการเพิ่มที่ 3% จะทำให้การติดตั้งที่ 3,000 MW เสร็จสิ้นได้ภายในปี 2571 ส่วนอัตราการเพิ่มที่ 4% เสร็จสิ้นได้ภายในปี 2570 ทั้งนี้ส่วนหนึ่งที่มิได้ประเมินในก็นี้คือการติดตั้งของภาคเอกชนเพื่อลดค่าไฟฟ้าในช่วง Peak โดยเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าบางประเภทที่ต้องเสียค่าไฟฟ้าในส่วน Peak ที่ใช้

สำหรับประมาณการปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงการ 3,000 MW ที่สองนี้ หากมาจาก Solar rooftop คาดว่าจะมีน้ำหนักของแผงเซลล์อาทิตย์ที่เป็นของเสียสะสมรวมอยู่ในช่วง 271,377.00 - 275,623.00 ตัน (คิดที่การติดทดแทนที่ 1%) โดยมีปริมาณของเสียแผงแบบฐานอยู่ที่ 270,000 ตัน จะเห็นได้ว่ามีปริมาณของเสียรวมสะสมน้อยกว่าของ 3,000 MW จากช่วงโครงการแรก เนื่องจากในการติดบนอาคารนั้นเจ้าของหรือผู้ดูแลรักษามักจะไม่สนใจเรื่องการเปลี่ยนทดแทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เสียหาย นอกจากนั้นบ่อยครั้งที่การดูแลรักษาไม่สามารถทำได้หรือทำได้ยากสำหรับหลังคาที่มิใช่ดาดฟ้า ซึ่งทำให้ปริมาณของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดแทนมีน้อย สรุปการประมาณการปริมาณของเสียแผงสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3 - 12

ตารางที่ 3 - 12 สรุปการประมาณการปริมาณของเสียแผงของประเทศไทย

| การติดตั้ง | น้ำหนักแผงสะสมรวมทดแทน (ตัน) | ปีที่จะหมดความคุ้มค่า |
|---|---|---|
| ระหว่างปี 2545-2558 มุมมองที่ 1 | 260,729 - 382,532 | 2565 - 2588 |
| ระหว่างปี 2545-2558 มุมมองที่ 2 | 257,408 - 377,377 | 2565 - 2588 |
| ปี 2558 เป็นต้นไปของ 3,000 MW แรก (985 MW) | 97,515 - 141,840 | 2580 - 2590 |
| 3,000 MW ที่สอง | 271,377 - 275,623 | 2579 - 2601 |
| รวม | 626,301 - 794,840 | |

จากตารางที่ 3 - 12 พบว่าการติดตั้งแผงในช่วงปี 2545 - 2558 จะทำให้เกิดของเสียแผงในปริมาณที่สูง ทั้งนี้ในส่วนของ 3,000 MW ที่หนึ่งที่เกิดจากโรงไฟฟ้าเป็นหลักจะมีของเสียรวมถึง 354,924 - 519,217 ตัน (เมื่อเทียบกับ MW ที่สอง ที่ 271,377 - 275,623 ตัน) ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการติดตั้งแผงทดแทนแผงที่เสียหรือชำรุด

ระหว่างการใช้งานของโรงไฟฟ้าและมีการทิ้งแผงชำรุดออกไป ปริมาณของเสียสะสมรวมที่อาจเกิดได้ในประเทศไทยระหว่างปี 2565 - 2601 สำหรับการติดตั้งรวมที่ 6,000 MW มีปริมาณถึง 626,300-794,840 ตัน ซึ่งสูงกว่าค่าปริมาณแผงพื้นฐานที่ 540,000 ตัน (6,000 MW x 90 ตัน/MW) ปริมาณของเสียแผงจะเริ่มเกิดมากและควรมีการวางแผนรับมือตั้งแต่ปี 2565 เป็นต้นไป

# บทที่ 4
# การประเมินสถานการณ์ในอนาคตตามห่วงโซ่การจัดการเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าตั้งแต่การเกิดจนถึงการจัดการขั้นสุดท้าย

ในห่วงโซ่การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า จะเริ่มจากวิเคราะห์ตำแหน่งของการเกิดของเสียเพื่อทำการพิจารณาวางจุดรวบรวมต่อไป

## 4.1 ตำแหน่งของการเกิดของเสียและการวางจุดรวบรวม

จากข้อมูลกำลังการผลิตติดตั้งภายในประเทศ พบว่าภายในปี 2588 ประเทศไทยจะมีปริมาณซากแผงสะสมรวมถึง 382,532 ตัน โดยจากข้อมูลของสำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานในตารางที่ 4 - 1 พบว่าจนถึงปี 2559 การติดตั้งสะสมรวมสูงสุดจะอยู่ในพื้นที่ภาคกลางโดยมีค่าอยู่ที่ 1,143.19 MW ทั้งนี้ส่วนใหญ่อยู่ในจังหวัดลพบุรี นครปฐม และพระนครศรีอยุธยา ซึ่งได้เริ่มดำเนินการในช่วงปี 2554 - 2558 อย่างไรก็ดีในภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้มีโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่เกิดขึ้นมาก่อนตั้งแต่ปี 2553 โดยเฉพาะที่จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดซากของเสียได้ก่อน ในส่วนของภาคอื่นๆ พบการติดตั้งมากในจังหวัดสระแก้ว (253.13 MW) เพชรบุรี (197.14 MW) นครสวรรค์ (155.33 MW) ลำปาง (136.52 MW) พิษณุโลก (133.92 MW) เป็นต้น นอกจากนี้โรงไฟฟ้าขนาดตั้งแต่ 7 MW ขึ้นไป ยังสามารถพบได้อีกในจังหวัดอยุธยา ขอนแก่น กาญจนบุรี สุรินทร์ ประจวบคีรีขันธ์ นครปฐม ปราจีนบุรี โรงไฟฟ้าเหล่านี้สามารถมีของเสียออกมาได้ตลอดเวลาเริ่มตั้งแต่ในช่วงของการติดตั้งและการดำเนินงาน

ทั้งนี้จังหวัดที่มีกำลังการติดตั้งเกิน 80 - 100 MW ขึ้นไปควรจัดให้มีจุดรวบรวมซากของเสียแผงก่อนที่จะถึงช่วงหมดอายุจากการใช้งานจริงในอีก 20 - 30 ปีข้างหน้า ทั้งนี้จังหวัดที่มีการติดตั้งสะสมมากสิบจังหวัดแรกในปี 2559 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 - 2 ในปัจจุบัน หน่วยงานภาครัฐส่วนกลาง มีความจำเป็นต้องให้ความรู้แก่เจ้าหน้าที่ของจังหวัดและองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น เพื่อหาแนวทางรับมือกับของเสียแผงที่ชำรุดประมาณ 0.5 - 2% ของกำลังติดตั้งที่อาจจะหลุดออกมาปะปนกับขยะชุมชนในจังหวัดต่างๆที่กล่าวมาแล้วได้ในระหว่างช่วงของการติดตั้งและดำเนินการผลิต อย่างไรก็ดี พบว่ามีความพยายามที่จะซ่อมแซมแผงที่ชำรุดเหล่านี้แล้วนำไปขายใหม่เป็นแผงมือสอง ซึ่งสามารถทำได้แต่ต้องมีการตรวจสอบมาตรฐานประสิทธิภาพเพื่อคุ้มครองผู้บริโภคและเรื่องความปลอดภัยอย่างเข้มข้นด้วย เนื่องจากแผงเหล่านี้จัดว่าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง ที่ต้องระวังเรื่องของไฟไหม้และไฟฟ้าลัดวงจร โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อประชาชนนำไปติดใช้เองตามบ้านเรือนหรือที่อยู่อาศัย

ตารางที่ 4 - 1 ปริมาณกำลังติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์แยกตามภาค

| **ภาค** | **กำลังติดตั้ง (MW)** |
|---|---|
| เหนือ | 170.41 |
| กลาง | 1,143.19 |
| ตะวันออกเฉียงเหนือ | 423.53 |
| ตะวันออก | 386.36 |
| ตะวันตก | 389.94 |
| รวม | 2,513.43 |

ตารางที่ 4 - 2 สิบอันดับจังหวัดที่มีการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์สะสมสูงสุดในปี 2559

| **จังหวัด** | **จำนวนโรงไฟฟ้าแสงอาทิตย์** | **กำลังติดตั้ง (MW)** |
|---|---|---|
| สระแก้ว | 42 | 253.13 |
| ลพบุรี | 23 | 221.10 |
| เพชรบุรี | - | 197.14 |
| นครปฐม | 20 | 171.41 |
| นครสวรรค์ | 6 | 155.33 |
| ลำปาง | 3 | 136.52 |
| พิษณุโลก | 1 | 133.92 |
| พระนครศรีอยุธยา | 11 | 108.87 |

| | | |
|---|---|---|
| ปราจีนบุรี | 13 | 92.25 |
| นครราชสีมา | 16 | 85.85 |

พบว่าที่มาของเซลล์แสงอาทิตย์ในต่างประเทศ จะมาจากสองแหล่งหลัก ๆ กล่าวคือ ส่วนที่หนึ่งมาจากผู้ค้าส่ง (wholesaler) ซึ่งทำการรวบรวมเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานจากผู้รับจ้างติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ (PV installer) และผู้ใช้เซลล์แสงอาทิตย์รายย่อย (module owner) โดยทำการเก็บมาทั้งจากจุดที่มีการติดตั้งและจุดรวบรวมย่อยที่ร้านจำหน่าย นอกจากนี้ยังมีส่วนที่สองที่มาจากโรงงานผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ (PV manufacturer) เอง ซึ่งได้รวบรวมของเสียจากการบรรจุ ขนส่งและเศษชิ้นส่วนจากกระบวนการผลิต

**4.2 การจัดการแผงหมดความคุ้มค่าหลังการรวบรวม**

ในต่างประเทศ จุดรวบรวมอาจจะสามารถทำหน้าที่ทั้งรวบรวมเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานและ/หรือทำการถอดแยกชิ้นส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยหลังการรวบรวมแล้ว จะมีกรรมวิธีการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าที่สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ โดยจำแนกตามความยากง่ายและความสมบูรณ์ของวัสดุสุดท้ายเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิล ดังนี้

1. การจัดการถอดแยกเบื้องต้นและฝังกลบส่วนที่เหลือ
2. การถอดแยกเบื้องต้น บด และทำการคัดแยกวัสดุหลังการบด
3. การถอดแยกเบื้องต้นและการใช้เครื่องมือในการแยกส่วนกระจกออกไป
4. การถอดแยกเบื้องต้นและการแยกส่วนวัสดุให้สามารถนำกลับไปทำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีก

ทั้งนี้การถอดแยกชิ้นส่วนเบื้องต้นจะได้แก่ การแยกขาตั้ง กรอบอลูมิเนียม กล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) และสายไฟออกจากแผง และการถอดแยกชิ้นส่วนที่ซับซ้อนจะได้แก่ การแยกตัวกระจก แผ่นเซลล์ Backsheet ออกจากกัน รายละเอียดของการรีไซเคิลเพื่อนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่และต้นทุนของทั้งสี่ทางเลือกจะมีการพิจารณาในบทที่ 5 และ 6 ต่อไป

ในประเทศไทย ในปี 2559 พบว่าส่วนใหญ่ยังมีการจัดการตามข้อ 1 คือการจัดการถอดแยกเบื้องต้นและฝังกลบส่วนที่เหลือ ทั้งนี้การถอดแยกขั้นต้นอาจจะทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการใช้โรงงานคัดแยกขยะที่มีอยู่และจดทะเบียนตามพระราชบัญญัติโรงงานอยู่ในประเภทที่ 105 ทั้งนี้ปัญหาสำคัญที่ควรพิจารณาในเบื้องต้นก็คือปริมาณจำนวนโรงงาน 105 และกำลังการผลิตติดตั้งที่มีอยู่ในจังหวัดที่ไม่สอดคล้องกันและไม่น่าเพียงพอ เช่นในจังหวัดสระแก้วที่มีกำลังการผลิตติดตั้ง 253.13 MW แต่มีโรงงานคัดแยกประเภท 105 จำนวนเพียง 2 โรงงาน ดังแสดงในตารางที่ 4 - 3 ทั้งนี้โรงงานคัดแยกมักแสดงความสนใจในการแยกของที่แยกได้ง่ายและขายได้ง่าย เช่น อลูมิเนียม เหล็ก สายไฟ เท่านั้น

ตารางที่ 4 - 3 ข้อมูลกำลังการผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และจำนวนโรงงานคัดแยก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 27 มิถุนายน 2559)

| จังหวัด | กำลังการผลิตติดตั้ง (MW) | จำนวนโรงงานคัดแยก ประเภท 105 |
|---|---|---|
| ลำปาง | 136.52 | 5 |
| สระแก้ว | 253.13 | 2 |
| ลพบุรี | 221.10 | 5 |
| นครปฐม | 171.41 | 10 |
| นครสวรรค์ | 155.33 | 7 |
| พิษณุโลก | 133.92 | 2 |
| ระนครศรีอยุธยา | 108.87 | 84 |
| เพชรบุรี | 197.14 | 3 |
| นครราชสีมา | 85.85 | 19 |

นอกจากนี้ข้อจำกัดสำคัญของโรงงานคัดแยกคือไม่ต้องการรับขยะที่มีสารปนเปื้อน ไม่มีมูลค่า หรือขายได้ยาก เช่น แผ่นเวเฟอร์ แผ่นกระจกนิรภัยแตก หรือกระจกที่ปนเปื้อนฟิล์ม EVA หรือ สาร Anti – Reflectant เนื่องจากวัสดุเหล่านี้จะกลายเป็นภาระที่โรงงานคัดแยกจะต้องจ่ายค่ากำจัดเพื่อให้ไปกำจัดอย่างถูกต้องที่หลุมฝังกลบ ดังนั้นภาคส่วนของผู้ผลิตแผงพลังงานแสงอาทิตย์จึงอาจจะจำเป็นต้องรวมกลุ่มกันเพื่อทำการรวบรวมและรีไซเคิล หรือภาครัฐอาจจะจัดให้มีการรวบรวมและคัดแยกร่วมกับขยะซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเลคทรอนิคส์ก็ได้ ทั้งนี้หากจะจัดทำจริง จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยระดับมหภาคที่ใช้วิเคราะห์เลือกตำแหน่งที่จะสร้างรวบรวมของเสียเซลล์แสงอาทิตย์ โดยให้มีระยะทางการขนส่งน้อยสุด เพื่อลดต้นทุนค่าขนส่งและต้นทุนโลจิสติกส์อื่นๆให้มีค่าต่ำสุด และระดับจุลภาคที่ใช้วางแผนกระบวนคัดแยกชิ้นส่วนและนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้ได้ผลกำไรสูงสุด

การส่งเสริมกระบวนการคัดแยกเซลแสงอาทิตย์ประเภทซิลิกอนเพื่อนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้กระบวนการทางกายภาพเป็นหลัก จะช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี และเป็นการเสริมสร้างความ

มั่นคงของวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตที่เกี่ยวข้องของไทยได้อีกทางหนึ่ง ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ประเภท Thin-film มักจะได้รับการรีไซเคิลจากผู้ผลิตเป็นส่วนใหญ่เพื่อนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ให้ได้ เนื่องจากวัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่มีมูลค่าที่สูง

## 4.3 ปริมาณวัสดุตามประเภทแผง

เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าหรือเกิดการชำรุดเสียหายจากการขนส่ง หรือระหว่างการใช้งาน แผงเซลล์จะถูกนำมาถอดแยกชิ้นส่วนเพื่อเข้าสู่กระบวนการจัดการ ซึ่งมีทั้งสามารถนำไปรีไซเคิล และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และส่วนที่ไม่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ หรือไม่คุ้มทุนต่อการรีไซเคิล ซึ่งจะต้องเข้าสู่กระบวนการกำจัดที่เหมาะสม ทั้งนี้ได้มีการรวบรวมข้อมูลส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปของร้อยละโดยน้ำหนักแยกตามประเภทของแผงได้ ดังตารางที่ 4 – 4

ตารางที่ 4 - 4 ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบต่างๆของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Paiano, 2014)

| **องค์ประกอบ** | **c-Si** | **a-Si** | **CdTe** | **CIGS** |
|---|---|---|---|---|
| กระจก (Glass) | 74.16 | 86 | 95 | 84 |
| อลูมิเนียม (Aluminium) | 10.3 | 0.035 | 0.35 | 12 |
| โพลีเมอร์ | 6.55 | | 3.5 | 3 |
| Backsheet | 6.6 | | | |
| สารยึดเกาะ | 1.16 | 0.02 | | |
| โพลีออล (Polyol) | | 12 | | |
| ทองแดง (Copper : Cu) | 0.57 | 0.9 | 1 | 0.8 |
| เงิน (Silver : Ag) | 0.004 - 0.06 | | | |
| ดีบุก (Tin : Sn) | 0.12 | 0.043 | | |
| สังกะสี (Zinc : Zn) | 0.12 | | 0.01 | 0.12 |
| ซิลิกอน (Silicon : Si) | 3.35 | 0.0064 | | |
| ตะกั่ว (Lead : Pb) | 0.06 | | | 0.05 |
| แคดเมียม (Cadmium : Cd) | | | 0.07 | 0.0005 |
| เทลลูเรียม (Tellurium : Te) | | | 0.07 | |
| อินเดียม (Indium : In) | | 0.5 | | 0.02 |
| เซเลเนียม (Selenium : Se) | | | | 0.03 |
| แกลเลียม (Gallium : Ga) | | | | 0.01 |
| Germanium (Ge) | | 0.5 | | |

ทั้งนี้เมื่อนำข้อมูลการคาดการณ์ปริมาณของเสียจากมุมมองที่ 2 พบว่าภายในปี 2588 เราจะมีปริมาณของเสียจากการติดตั้งจริงของแผงพลังงานแสงอาทิตย์สะสมถึงสิ้นปี 2558 ในราว 257,408.63 - 377,532.36 ตัน ซึ่งจากตาราง 4-4 เราจะสามารถประมาณการปริมาณวัตถุดิบจากแผงเสียที่เกิดจากการติดตั้งจริงสะสมจนถึงปี 2558 โดยใช้สัดส่วนของกำลังการผลิตไฟฟ้าสะสมจากปี 2552 - 2558 เท่ากับ c-Si : a-Si : CIGS : CdTe = 85.19 : 12.76 : 1.71 : 0.35 (ฝ่ายใบอนุญาต กกพ เมษายน 2559) โดยจะได้น้ำหนักประมาณการของวัตถุดิบที่น่าสนใจตามตารางที่ 4 - 5 ดังนี้

ตารางที่ 4 - 5 วัตถุดิบที่น่าสนใจจากของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะเกิดขึ้นภายในปี 2588 (ตัน)

| องค์ประกอบ | c-Si | a-Si | CdTe | CIGS |
|---|---|---|---|---|
| กระจก (Glass) | 162,603 - 238,387 | 28,247 - 41,412 | 856 - 1,255 | 3,697 - 5,421 |
| อลูมิเนียม (Aluminium) | 22,584 - 33,109 | 11 - 17 | 3.15 - 4.62 | 528 - 774 |
| EVA | 14,362 - 21,055 | | | |
| ทองแดง (Copper : Cu) | 1,250 - 1,832 | 296 - 433 | 9 - 13 | 35 - 52 |
| เงิน (Silver : Ag) | 8.78 - 13 | | | |
| ดีบุก (Tin : Sn) | 263 - 386 | 14 - 21 | | |
| สังกะสี (Zinc : Zn) | 263 - 386 | | 0.09 - 0.13 | 5.28 - 7.74 |
| ซิลิกอน (Silicon : Si) | 7,345 - 10,769 | 2.1 - 3 | | |
| ตะกั่ว (Lead : Pb) | 132 - 195 | | | 2.2 - 3 |
| แคดเมียม (Cadmium : Cd) | | | 0.63 - 0.92 | 0.02 - 0.03 |
| เทลลูเรียม (Tellurium : Te) | | | 0.63 - 0.92 | |
| อินเดียม (Indium : In) | | 164 - 241 | | 0.88 - 1.3 |
| เซเลเนียม (Selenium : Se) | | | | 1.32 - 1.94 |
| แกลเลียม (Gallium : Ga) | | | | 0.44 - 0.64 |
| เจอมาเนียม (Germanium : Ge) | | 164 - 241 | | |

จะเห็นได้ว่าวัสดุปริมาณสูงที่จะได้จากทุกประเภทของแผงคือกระจก อลูมิเนียมและทองแดง โดยกระจกมีปริมาณรวมถึง 195,403 - 286,475 ตันจากแผงทุกประเภท อลูมิเนียมมีปริมาณอยู่ในช่วง 20,000 - 30,000 ตัน และทองแดงมีปริมาณอยู่ในช่วง 1,000 - 2,000 ตัน โลหะมีค่าที่น่าสนใจคือโลหะเงิน จำนวน 8 - 13 ตันจากแผงกลุ่มผลึกซิลิคอน ทั้งนี้ IRENA (2016) ได้ระบุว่าการใช้โลหะเงินในแผงพลังงานแสงอาทิตย์มีปริมาณถึง 3.5 - 15% ของปริมาณการผลิตทั้งหมดในโลก โดยในปี 2016 มีสัดส่วนของการใช้โลหะเงินอยู่ที่ 0.2 กรัมต่อวัตต์ของแผงแบบ

ผลึกซิลิคอน ทั้งนี้มีแนวโน้มจะใช้ในปริมาณที่น้อยลงไปเรื่อยๆ นอกจากนี้กลุ่มของโลหะหายาก (Rare metals) ได้แก่เทลลูเรียม อินเดียม แกลเลียม และเจอมาเนียมยังสามารถพบได้ในขยะแผงเหล่านี้ โดยมีปริมาณอย่างน้อยอยู่ที่ 0.63, 164, 0.44, และ 164 ตัน ตามลำดับ ฟิล์ม EVA หากรวบรวมได้เป็นจำนวนมาก เช่นในที่นี้มีถึง 14,362 - 21,055 ตัน ก็สามารถนำไปเป็นแหล่งพลังงานได้อีกด้วย ทั้งนี้หากมีการติดตั้งจนครบ 6,000 MW ตามนโยบายส่งเสริมของภาครัฐจะทำให้ปริมาณวัสดุที่สามารถนำกลับมาได้เพิ่มขึ้นจากค่าในตารางที่ 4 - 5 อีกประมาณสองเท่าตัว ปริมาณของโลหะมีค่าและโลหะหายากในโลกที่กล่าวถึงเหล่านี้จะกลายเป็นตัวแปรสำคัญอย่างยิ่งในด้านศักยภาพความสามารถที่จะผลิตแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในโลกหากไม่มีการรีไซเคิลหรือการนำวัตถุดิบจากของเสียกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต

อย่างไรก็ดี จะพบว่าโลหะที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ที่จะเกิดขึ้นภายในปี 2588 ก็คือตะกั่ว (Pb) 134.2 - 198 ตันจากแผงกลุ่มผลึกซิลิกอนและ CIGS และแคดเมียมจำนวน 0.65 - 0.95 ตันจากแผงกลุ่ม CdTe และ CIGS ซึ่งหากไม่มีการจัดการในระบบที่ถูกต้องแล้ว ก็สามารถจะก่อให้เกิดความเสียหายทั้งต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์เป็นมูลค่ามหาศาลได้

# บทที่ 5
# เทคโนโลยีการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์จะมีปริมาณที่มากแต่จะกลายเป็นของเสียที่ไร้ค่าหรือเป็นแหล่งทรัพยากรใหม่ ก็ขึ้นกับมุมมองและวิสัยทัศน์ของภาครัฐและเอกชน โดยองค์ประกอบสำคัญประการหนึ่งในการตัดสินใจก็คือเทคโนโลยีในการรีไซเคิลแผงเสียเพื่อการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ โดยกระบวนการขั้นตอนของการรีไซเคิลจะขึ้นกับประเภทของแผงที่หมดความคุ้มค่าและองค์ประกอบภายใน

## 5.1 ประเภทและส่วนประกอบของแผง

แผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆตามประเภทวัสดุหลัก คือ กลุ่มที่มีซิลิกอนเป็นส่วนประกอบ (Silicon Based) ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนผลึกเดี่ยว (Mono Crystalline Silicon) และ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนผลึกหลายรูป (Poly Crystalline Silicon) และกลุ่มที่ไม่มีซิลิกอนเป็นส่วนประกอบ (Non-Si Based) เช่น แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) คอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดซีลีไนด์ (CIGS) เป็นต้น

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีซิลิกอนเป็นส่วนประกอบ (Silicon Based) จะมีองค์ประกอบต่างๆ ของแผงดังแสดงในรูปที่ 5 - 1 (จากด้านหน้าไปด้านหลัง) ได้แก่

1. กรอบอลูมิเนียม (Aluminium Frame)
2. กระจกนิรภัยปิดหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Front Glass)

3. ตัวยึดขอบตัวเซลล์กับกรอบอะลูมิเนียม (Edge Seal)

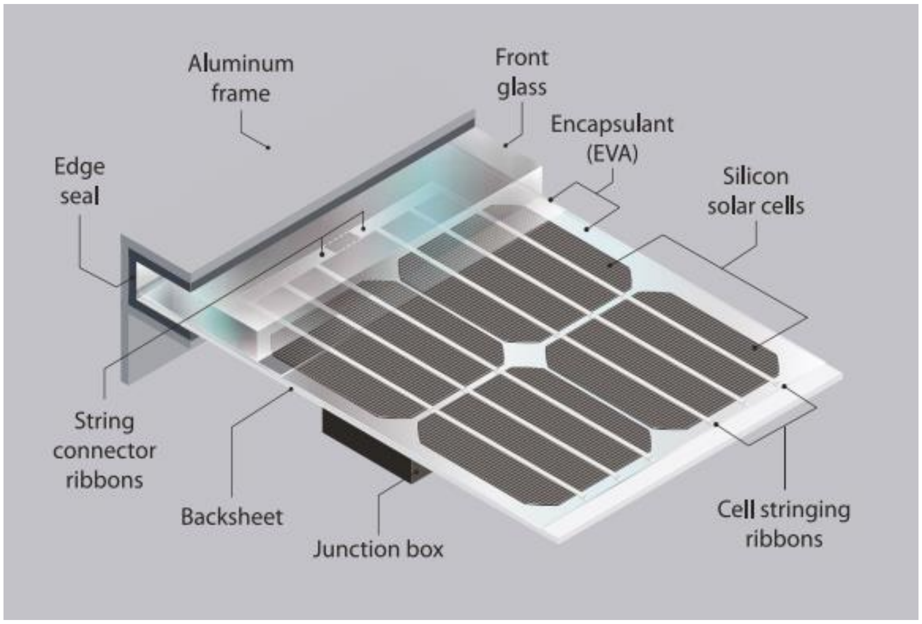
4. แผ่นฟิล์มเอทธิลไวนิลอะซีเตต (Ethyl Vinyl Acetate-EVA) เป็นแผ่นโพลิเมอร์ที่หุ้มห่อเซลล์ไว้

5. แผงเซลล์ซิลิกอน (Silicon Solar Cell)

5. แถบโลหะเชื่อมระหว่างเซลล์ (String Connector Ribbons และ Cell Stringing Ribbons) หรืออาจจะเรียกว่า Bus Bar

6. แผ่น Back Sheet ที่ใช้รองรับตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์

7. กล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction Box)




รูปที่ 5 – 1 องค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีซิลิกอนเป็นส่วนประกอบ (IRENA, 2016)

ทั้งนี้สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin Film) ส่วนประกอบต่างๆสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 – 2 คือ

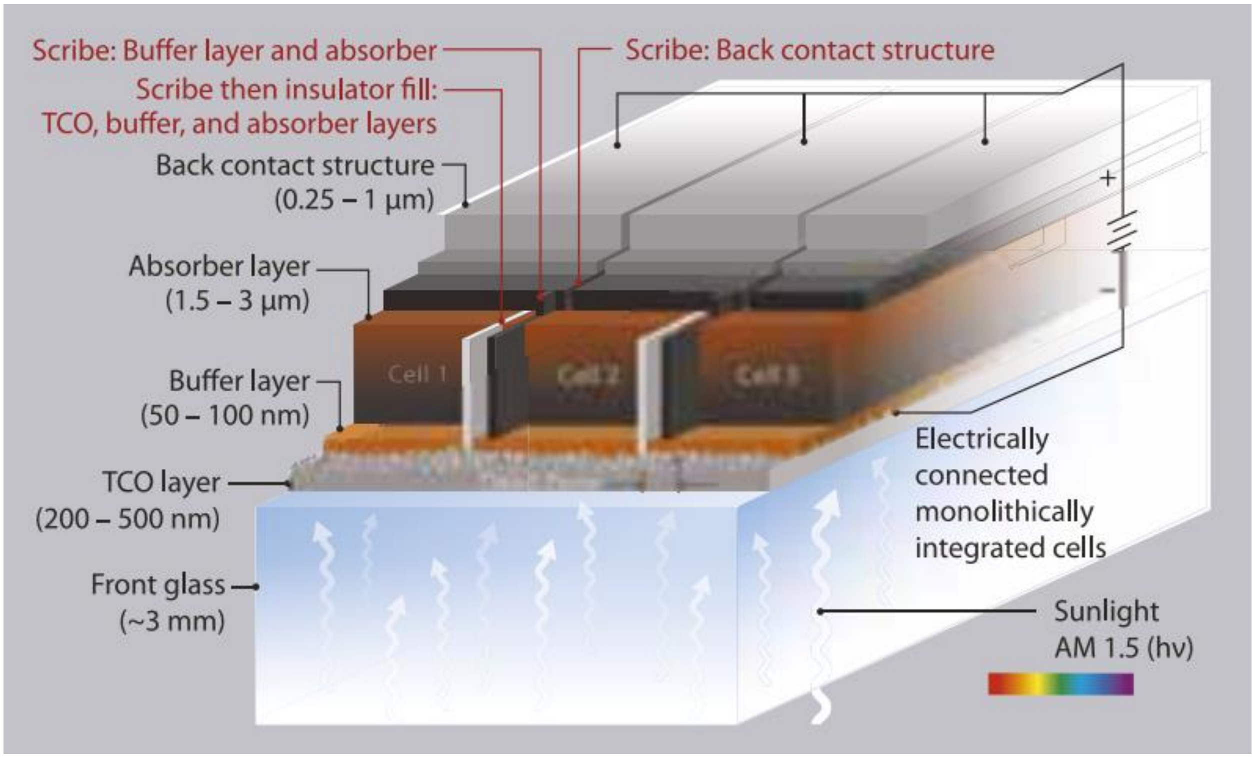
1. กระจกนิรภัยปิดหน้า (Front Glass)

2. ชั้นตัวนำแสง (Transparent Conducting Oxide-TCO Layer)

3. ชั้น Buffer Layer

4. ชั้น Absorber Layer

5. ชั้น Back Contact Structure

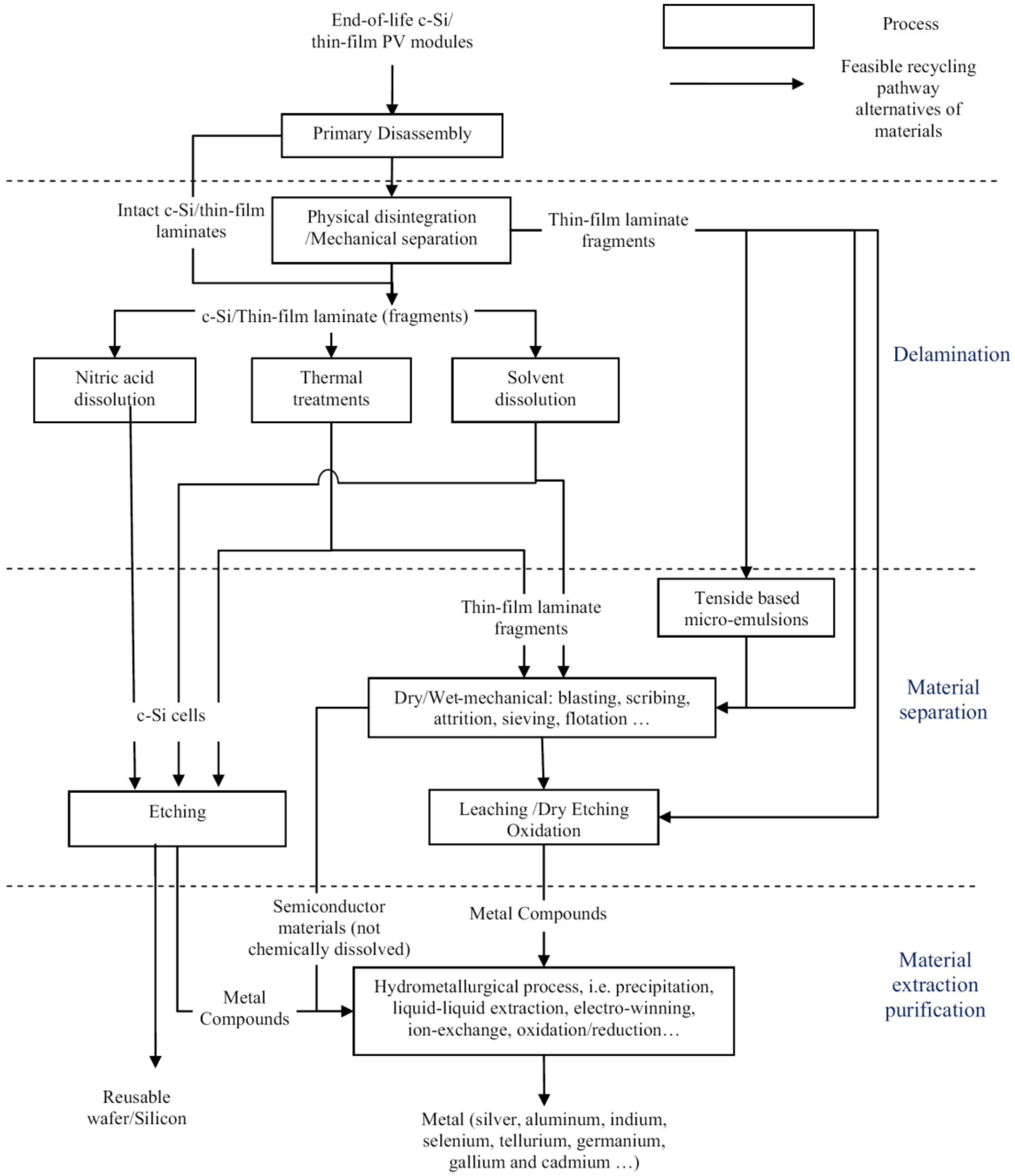



รูปที่ 5 – 2 องค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (IRENA, 2016)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางนั้นมีหลายประเภทตามชนิดของสารที่เจือในเซลล์ ได้แก่ คอปเปอร์อินเดียมซีลีไนด์ (Copper Indium Selenide; CIS) คอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดซีลีไนด์ (Copper Indium Gallium Diselenide; CIGS) และ แคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride; CdTe) เป็นต้น

## 5.2 ภาพรวมขั้นตอนการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ขั้นตอนในการรีไซเคิลเพื่อนำวัสดุของเสียแผงกลับมาใช้ใหม่ไม่ว่าจะเป็นแบบ Silicon Based หรือแบบฟิล์มบาง สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังแสดงในผังตามรูปที่ 5 – 3




รูปที่ 5 - 3 ขั้นตอนในการรีไซเคิลเพื่อนำวัสดุของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลับมาใช้ใหม่ (Tao and Yu, 2015)

โดยขั้นตอนที่หนึ่งเป็นการทำการถอดแยกเบื้องต้น (Primary Disassembly) เพื่อแยกชิ้นส่วนที่แยกได้ง่ายออกจากกันได้แก่ การแยกขาตั้ง กรอบอลูมิเนียม กล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction box) และสายไฟ ออกจากแผง

ขั้นตอนที่สองเป็นการลอกชั้นวัสดุ (Delamination) ที่มีการผนึกแน่นไว้ออกจากกันซึ่งถือได้ว่าเป็นการถอดแยกชิ้นส่วนที่ซับซ้อน โดยจะทำการแยกตัวกระจก แผ่นเซลล์ Backsheet ออกจากกันเนื่องจากมีตัวโพลิเมอร์ เช่น EVA เป็นตัวเชื่อมอยู่ การแยกในขั้นตอนนี้สามารถใช้ได้กับแผงที่เป็นแบบ C-Si และแบบฟิล์มบางที่เป็นชิ้นส่วนแตกหัก โดยการแยกนั้นสามารถใช้เทคโนโลยีได้ถึง 3 รูปแบบ คือ

- การละลายด้วยกรดไนตริก (Nitric Acid Dissolution)

- การใช้ความร้อน (Thermal Treatment)

- การละลายด้วยตัวทำละลาย (Solvent Dissolution)

ขั้นตอนที่สาม เป็นการแยกวัสดุแต่ละประเภทออกจากกัน (Material Separation) โดยเป็นการคัดแยกวัสดุโดยใช้กระบวนการต่างๆ เช่นการชะละลาย (leaching) การขัดสี (Attrition) การกัดผิว (Etching) และปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี ในขั้นตอนนี้จะได้ทั้งแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์และสารประกอบโลหะแบบต่างๆ ออกมาโดยยังมีการปนเปื้อนอยู่

ส่วนขั้นตอนสุดท้ายเป็นการสกัดและเพิ่มความบริสุทธิ์ (Material Extraction and Purification) โดยใช้เทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุแต่ละชนิดที่มีอยู่แล้ว เช่น การใช้กระบวนการทางเคมี (Chemical Treatment) ดังรูปที่ 5 - 4 เพื่อเอาสารเคลือบ (Coating) ออก

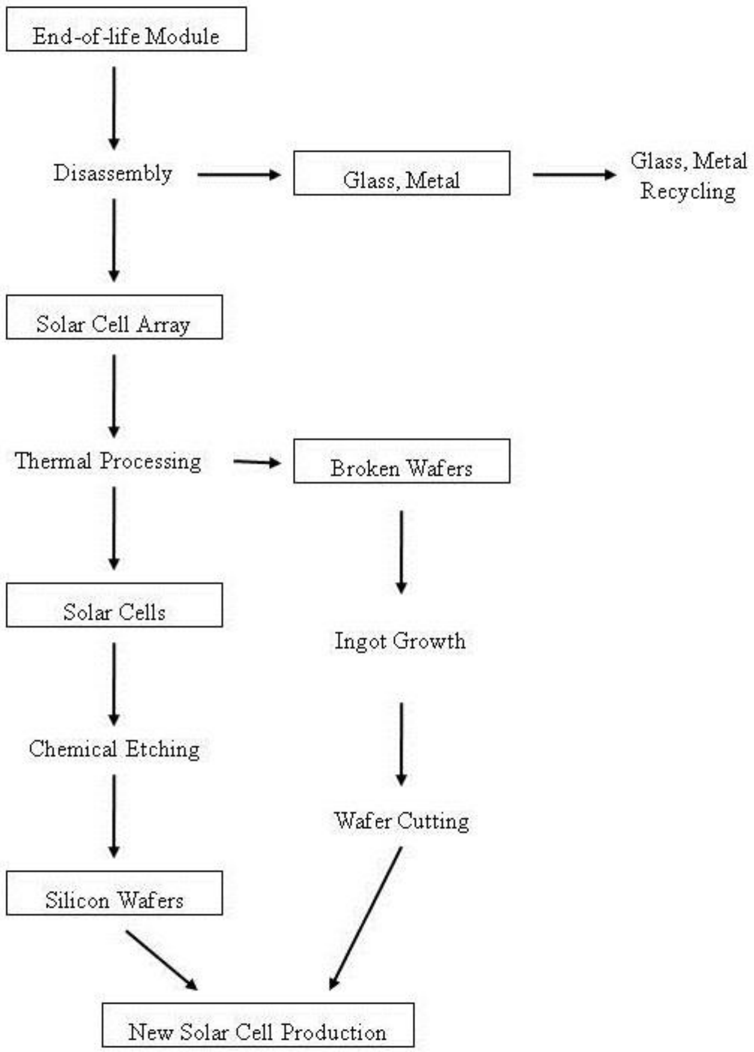
Chemical treatment of cell fractions to remove coatings

รูปที่ 5 - 4 กระบวนการทางเคมีเพื่อกำจัดสารเคลือบบนแผ่นเซลล์

เพื่อให้ตัวแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์และสารประกอบโลหะแบบต่างๆที่มีมลทินสิ่งเจือปนในระดับที่เกินค่ามาตรฐาน สามารถเป็นวัตถุดิบที่นำกลับไปใช้ได้ใหม่อีกครั้ง รวมไปถึงการนำแผ่นเวเฟอร์กลับมาใช้ใหม่ในการผลิตแผงเซลล์ต่อไป

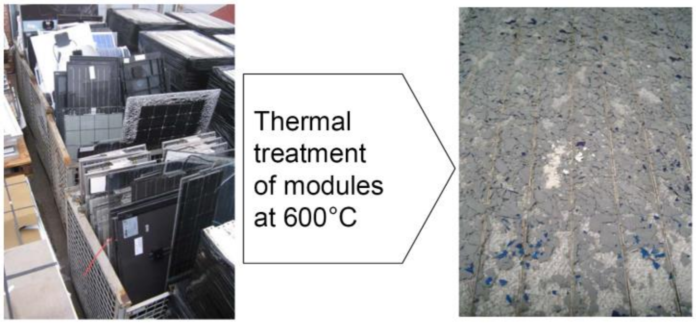
### 5.3 ตัวอย่างการรีไซเคิลแผงแบบ Si Based

สำหรับในกรณีตัวอย่างของการรีไซเคิลของเสียแผงแบบ Si Based โดยเฉพาะ จะสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 5 - 5




รูปที่ 5 - 5 ขั้นตอนการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Si Based

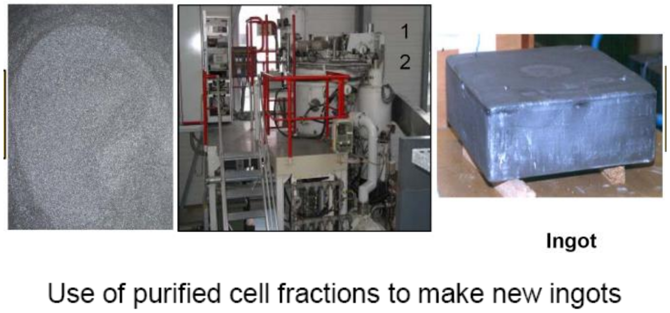
โดยการคัดแยกของเสียแผงหมดอายุ (End-of-Life Module) ในขั้นต้นเพื่อนำกระจกและโลหะออกมา จากนั้นแผงเซลล์หมดอายุ (Solar Cell Array) จะถูกนำไปให้ความร้อนที่ 600°C เพื่อแยกซิลิกอนเวเฟอร์ออกจากแผ่นฟิล์มและ Backsheet ดังรูปที่ 5 - 6




รูปที่ 5 - 6 การให้ความร้อนที่ 600°C เพื่อแยกซิลิกอนเวเฟอร์

ผลิตภัณฑ์ที่ออกมานี้จะมีทั้งแผ่นที่ยังคงรูป (Solar Cell) และแผ่นที่แตกหัก (Broken Wafer) โดยแผ่นที่คงรูปจะถูกกัดผิวโดยสารเคมี (Chemical Etching) เพื่อนำสารปนเปื้อนออกไป

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการนำผงโลหะซิลิกอนที่ปรับปรุงคุณภาพได้ตามมาตรฐานของ Solar Grade Si (SoG si) แล้วมาหลอมให้เป็นก้อนโลหะซิลิกอนเพื่อไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแท่งผลึกซิลิกอน (Ingot) ต่อไปตามรูปที่ 5 - 7




รูปที่ 5 - 7 การผลิตแท่งผลึกซิลิกอนจากผงโลหะซิลิกอนที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว

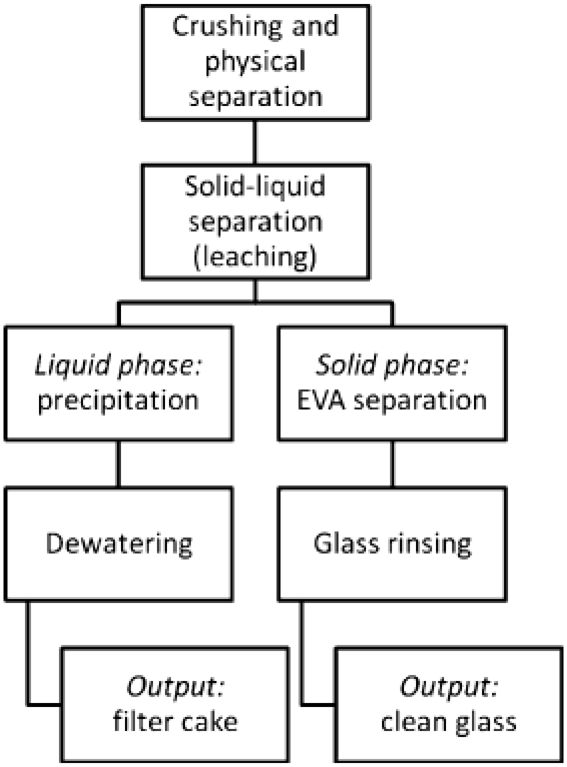
ตารางที่ 5 - 1 องค์ประกอบหลักของวัสดุแผงและสัดส่วนการนำกลับไปใช้ได้ใหม่

| | $Kg/m^2$ | Weight% | Recycling ratio (%) |
|---|---|---|---|
| Glass | 10.0 | 74.16 | 90 |
| Aluminium frame | 1.39 | 10.3 | 100 |
| Photovoltaic cell | 0.47 | 3.48 | 90 |
| VA (vinyl acetate)<br>Tedlar (PolyVinylFluoride) | 1.37 | 10.15 | - |
| Ribbons | 0.10 | 0.75 | 95 |
| Glue and polymers | 0.165 | 1.16 | - |

### 5.4 ตัวอย่างการรีไซเคิลแผงแบบฟิล์มบาง

ทั้งนี้พบว่าวัสดุแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน ส่วนใหญ่จะเป็นกระจก อลูมิเนียมและสารเคลือบอื่นๆ โดยมีน้ำหนักของแผ่นซิลิกอนในสัดส่วนที่ไม่มากนักคือประมาณ 3.48% โดยมีสัดส่วนของการนำกลับไปใช้ใหม่ได้หรือรีไซเคิลอยู่ที่ 90% ขณะที่กรอบอลูมิเนียมและกระจกมีสัดส่วนการนำกลับไปใช้ได้ใหม่อยู่ที่ 100% และ 90% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5 – 1

สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Thin Film เช่นแบบ CdTe บริษัทผู้ผลิตเซลล์ดังกล่าวจะนำกลับมารีไซเคิลเอง เพื่อนำโลหะต่างๆที่ใช้ในการผลิตกลับมาใช้ใหม่ โดยมีผังการรีไซเคิลดังแสดงในรูปที่ 5 – 8




รูปที่ 5 - 8 แผนผังการรีไซเคิลแผลเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Thin Film ชนิด CdTe

(Marco Raugei, Pere Fullana-i-Palmer and Vasilis Fthenakis, 2012)

โดยของเสียแผงฟิล์มบางแบบ CdTe จะถูกทำการคัดแยกส่วนประกอบเบื้องต้นออกไปก่อนส่วนที่เหลือจะถูกบดให้ละเอียด (Crushing) แผงที่เป็นเศษละเอียดจะถูกชะละลายด้วยกรดซัลฟูริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารละลายจะถูกทำให้ตกตะกอนเพื่อแยกตะกอนของ Cd และ Te ออกมา ส่วนของแข็งในขั้นตอนของการชะละลายส่วนใหญ่ก็คือกระจกที่จะกลับเข้าสู่วงจรของการผลิตใหม่

### 5.5 แนวทางการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่ากรรมวิธีการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ ทั้งนี้ไม่ว่าจะเป็นแนวทางใด ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่จะได้ออกมาเป็นปริมาณมากก็คือแผงกระจก กรอบอลูมิเนียม และแผ่นเวเฟอร์ซิลิกอน ซึ่งจะสามารถถูกนำไปใช้ได้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆได้ดังนี้คือ

- **แผงกระจก** สามารถส่งไปเป็นวัตถุดิบในโรงงานหลอมแก้วและกระจกที่มีอยู่แล้วหลายแห่งในประเทศ ได้แก่ กระจกไทยอาซาฮี กระจกสยาม บางกอกกล๊าส ไมโครไฟเบอร์ บางกอกคริสตัล แก้วปราการ สยามกลาส เป็นต้น
- **กรอบอลูมิเนียม** สามารถส่งเป็นวัตถุดิบในโรงงานหลอมเศษอลูมิเนียมเพื่อผลิตเป็นก้อนอลูมิเนียมอัลลอย โดยโรงงานเหล่านี้ได้แก่ เจแอนด์บีเมททอลจำกัด สยามแองโกลอัลลอยด์ ยูไนเต็ดอลูมิเนียมอินดัสทรี มังกรอลูทิเนียม ซันคาโอ มิยูกิอินดัสทรี เป็นต้น ซึ่งมีกำลังการผลิตรวม 4.5 แสนตันต่อปี เพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์อลูมิเนียมใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า และอุตสาหกรรมยานยนต์ภายในประเทศต่อไป
- **แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์** ที่เป็นโลหะซิลิกอน สามารถส่งไปยังโรงงานถลุงซิลิกอน ที่มีอยู่แล้ว 2 แห่งในประเทศ ที่จังหวัดราชบุรีและกาญจนบุรี เพื่อนำไปหลอมรวมกับโลหะซิลิกอนที่ถลุงได้จากแร่ควอทซ์ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเฟอโรซิลิกอนในประเทศ และอาจใช้เป็นวัตถุดิบในการหลอมร่วมกับซิลิกอนเกรดที่สามารถนำไปผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยจะมีการผลิตภายในประเทศในอนาคต

การส่งเสริมกระบวนการคัดแยกเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทซิลิกอนเพื่อนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้กระบวนการทางกายภาพเป็นหลัก ช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี และเป็นการเสริมสร้างความมั่นคงของวัตถุดิบในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของไทยได้

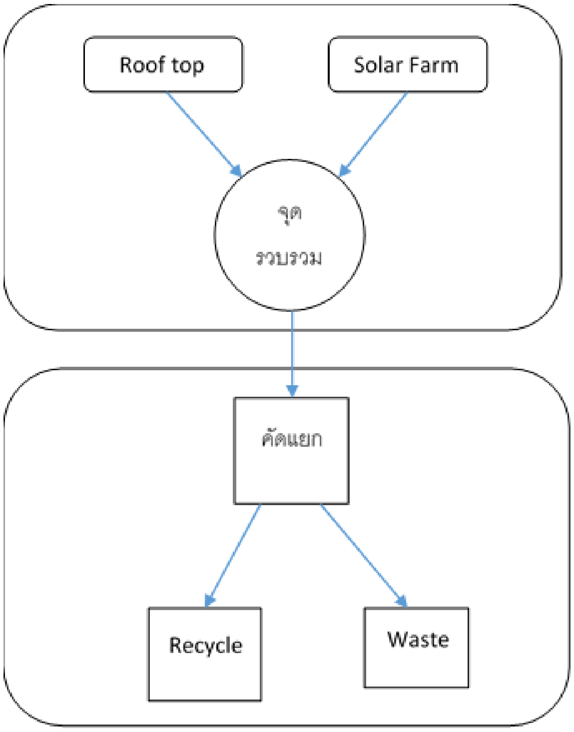
ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ประเภท Thin-film มักจะได้รับการรีไซเคิลจากผู้ผลิตเป็นส่วนใหญ่ เพื่อนำวัสดุที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์กลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากวัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่มีมูลค่าที่สูง จึงควรมีการกำหนดมาตรการให้ผู้ผลิตต้องนำของเสียเหล่านี้กลับไปจัดการเอง

# บทที่ 6
# ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายเพื่อการบริหารจัดการที่ดีในอนาคต

## 6.1 การบริหารจัดการในภาพรวม

เมื่อเกิดซากเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นไม่ว่าจะเกิดจากการหมดสภาพระหว่างการใช้งาน การติดตั้ง เนื่องด้วยอุบัติเหตุ หรือความผิดพลาดระหว่างการผลิต และการหมดความคุ้มค่าตามอายุของเซลล์แสงอาทิตย์ก็ตาม หากภาครัฐปล่อยให้เจ้าของแผงจัดการกับแผงเหล่านั้นด้วยตนเอง อาจเกิดปัญหาในภาพรวมที่หลากหลายเช่น แผงบางประเภทมีโลหะหนักและโลหะมีค่าปะปนกัน ซึ่งนอกจากเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังอาจสูญเสียวัตถุดิบแร่ธาตุที่มีมูลค่าที่สูง

การปล่อยให้แผงเหล่านั้นถูกจัดการโดยขาดการดูแลด้วยวิธีการที่เหมาะสม อาจทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต สิ่งแวดล้อม และเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างขาดความรับผิดชอบอีกด้วย ทั้งนี้แนวทางในการจัดการของเสียแบบองค์รวม (Tchobanoglous และคณะ, 1993) ได้ระบุองค์ประกอบในการจัดการที่สอดคล้องกับวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Functional elements) ไว้ 6 ขั้นตอน ประกอบด้วย การเกิด (Generation) การจัดการที่แหล่งกำเนิด (Onsite handling) การเก็บรวบรวม (Collection) การขนถ่าย (Transfer) การคัดแยก รีไซเคิล และการนำกลับมาใช้ใหม่ (Resource recovery) และการกำจัด (Disposal) ทั้งนี้แนวทางการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในภาพรวม สามารถแบ่งได้เป็นสององค์ประกอบหลัก คือ 1. การรวบรวม 2. การจัดการตัวแผง ดังแสดงในรูปที่ 6 - 1




รูปที่ 6 – 1 องค์ประกอบหลักๆของการจัดการแผงหมดความคุ้มค่า

**6.2 การเก็บรวบรวม**

การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าอย่างเป็นระบบ ไม่ว่าจะด้วยกระบวนการลักษณะไหนก็ตาม ต้องเริ่มจากการมีแนวปฏิบัติเพื่อการรวบรวมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าเหล่านั้นที่ชัดเจนและปฏิบัติได้ รวมถึงต้องมีต้นทุนที่เหมาะสมอีกด้วยโดยแนวปฏิบัตินี้ต้องครอบคลุมทั้งแหล่งกำเนิดที่เป็นโรงไฟฟ้า (Utilities) และที่เกิดจากบ้านเรือนและอาคารต่าง ๆ (Rooftop) ด้วย ในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีแนวปฏิบัติหรือกฎหมายเฉพาะสำหรับการควบคุมและจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าโดยตรง ทำให้การจัดการจะเกิดขึ้นกับเฉพาะกลุ่มโรงไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากมีกฎหมายต่างๆของกรมโรงงานควบคุมอยู่ แต่กฎหมายของกรมโรงงานนี้ไม่สามารถใช้บังคับกับกลุ่มอาคารพาณิชย์และบ้านเรือนได้

ทั้งนี้กฎหมายของกรมโรงงานเป็นกฎหมายที่มุ่งบังคับในภาพกว้างว่าผู้ก่อเกิดของเสียที่เป็นโรงงานจะต้องมีการจัดการสิ่งที่เป็นของเสียอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเกิดจากสาเหตุใดก็ตาม โดยแนวคิดนี้มุ่งจะป้องกันมลพิษเป็นหลัก โดยไม่ได้คำนึงมากนักในเรื่องของการรีไซเคิลหรือการนำทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่ ทำให้โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าส่วนใหญ่ในปัจจุบัน มักถูกส่งต่อไปยังหน่วยงานที่รับจ้างกำจัดขยะอุตสาหกรรมที่มีการดำเนินการอยู่แล้ว และถูกนำไปทำการปรับเสถียรและฝังกลบ หลังจากมีการคัดแยกวัสดุที่สามารถถอดออกง่ายและซื้อขายได้สะดวกออกไปแล้ว ทั้งนี้ส่งผลให้วัตถุมีค่าและแร่ธาตุหายากจำนวนมากจมอยู่อย่างไร้ค่าในหลุม

ฝังกลบขยะอุตสาหกรรม ในส่วนนี้หน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้องจำต้องมีการดูแลให้เกิดการแก้ไขในสองประเด็น กล่าวคือ ประเด็นที่หนึ่งต้องสร้างแนวทางการปฏิบัติที่ชัดเจนและบังคับใช้อย่างครอบคลุมทุกกลุ่มสำหรับผู้ก่อเกิดของเสียทั้งจากกลุ่มโรงไฟฟ้าและกลุ่มอาคารบ้านเรือน เพื่อให้เกิดการรวบรวมที่ครบถ้วน และประเด็นที่สอง ต้องสร้างกระบวนการจัดการที่มุ่งเน้นเรื่องการนำกลับมาใช้ใหม่ต่อไป ทั้งนี้ประเด็นที่น่าสนใจก็คือเรื่องภาระของการรวบรวม

**6.3 ภาระหน้าที่ในการรวบรวม**

ในทางเศรษฐศาสตร์และธุรกิจนั้น ต้นทุนที่สำคัญในขั้นตอนการรวบรวมก็คือค่าขนส่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าเหล่านั้นจากจุดกำเนิดขยะ ไปยังจุดรวบรวม ซึ่งต้นทุนส่วนนี้ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องรายใดรายหนึ่งหรือร่วมกันต้องเป็นผู้รับผิดชอบ โดยผู้มีส่วนเกี่ยวข้องอาจจะหมายรวมถึง รัฐ เจ้าของแผง หรือผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การพิจารณาว่าผู้ใดสมควรเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ จะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ปริมาณแผงที่หมดความคุ้มค่าที่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาต่าง ๆ รวมถึงความผันผวนของราคาวัสดุ ทั้งนี้ข้อพิจารณาและข้อเสนอแนะสำหรับในแต่ละกลุ่มหลักดังต่อไปนี้

**เจ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์**

ในประเทศญี่ปุ่น เจ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าจะเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการขนส่ง วิธีนี้มาจากหลักคิดในเชิงเศรษฐศาสตร์ว่าผู้ได้รับประโยชน์และก่อให้เกิดปัญหาควรเป็นผู้รับผิดชอบ หรืออาจหมายความว่าเจ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับประโยชน์ไปแล้วจากการผลิตไฟฟ้าของแผง ไม่ว่าจะเพื่อการใช้เองหรือเพื่อจำหน่าย ดังนั้นจึงควรเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในส่วนนี้

สำหรับในประเทศไทย แนวทางนี้มีความสอดคล้องกับกฎหมายกรมโรงงานอุตสาหกรรมและสำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานที่ได้ระบุไว้ชัดเจนแล้วว่าเจ้าของแผงที่เป็นโรงงานผลิตไฟฟ้าต้องรับผิดชอบของเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงาน ดังนั้นเจ้าของโครงการจึงควรที่จะเตรียมต้นทุนส่วนนี้ไว้แล้ว โดยภาครัฐจึงควรจะเตรียมการในด้านของรายละเอียดของแนวทางการปฏิบัติและพยายามทำให้เกิดต้นทุนที่เหมาะสมและโปร่งใสในการจัดการ

อย่างไรก็ดี ในกรณีของเจ้าของแผงที่เป็นกลุ่มอาคารพาณิชย์หรือบ้านเรือน น่าจะเกิดมีปัญหาในการรวบรวมของเสียแผง เนื่องจากไม่มีกฎหมายเฉพาะที่ต้องบังคับให้มีการปฏิบัติ นอกจากนั้นยังมีความหลากหลายในเรื่องจูงใจของการเริ่มติดตั้ง เช่นจากความต้องการพึ่งพาตนเอง รักษาสิ่งแวดล้อม การสร้างภาพลักษณ์ขององค์กร หรือการหากำไรจากการขายไฟฟ้าให้กับระบบสายส่ง เป็นต้น สาเหตุต่างๆเหล่านี้จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่

หมดความคุ้มค่าที่เกิดขึ้นจากกลุ่มอาคารบ้านเรือนอาจจะไม่ถูกรวบรวมเข้าสู่กระบวนการจัดการโดยง่าย ทั้งนี้เมื่อพิจารณาในรายละเอียดเพื่อการจัดทำข้อเสนอแนะ อาจจะแบ่งกลุ่มการติดตั้งแผงอาคารบ้านเรือนนี้ได้เป็นสองกลุ่มย่อย

กลุ่มแรกได้แก่กลุ่มที่ติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ เพราะต้องการหากำไรจากการขายไฟฟ้า ในกลุ่มนี้จะมีการเชื่อมต่อระบบกับการไฟฟ้าส่วนจำหน่าย (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวง) ทำให้หน่วยงานรัฐสามารถรับทราบข้อมูลการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และภาครัฐควรจัดระบบการติดตามและดูแลแผงได้ โดยต้องมีการรับทราบโดยเจ้าของแผง ในด้านการดูแลของเสียแผงนั้น ให้ผู้ครอบครองทำการหารือกับหน่วยงานที่ได้รับมอบหมาย โดยหน่วยงานนี้ไม่จำเป็นต้องเป็นเจ้าหน้าที่รัฐ แต่ต้องปฏิบัติหน้าที่ตามแนวทางที่รัฐกำหนด ละสามารถแนะนำให้เจ้าของแผงทำการปรับปรุงหรือรื้อถอนระบบที่ไม่เหมาะสมหรือมีปัญหาด้านประสิทธิภาพเพื่อการนำไปจัดการต่อไป ค่าใช้จ่ายส่วนนี้ควรเป็นค่าใช้จ่ายที่เจ้าของแผงต้องรับผิดชอบ ดังตัวอย่างของประเทศสหรัฐอเมริกาที่ผู้เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กเข้าสู่ระบบจ่ายไฟฟ้า เช่น การเชื่อมต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อขายไฟฟ้าให้กับบริษัท PG&E ซึ่งรับผิดชอบการจำหน่ายไฟฟ้าในรัฐแคลิฟอร์เนียตอนบน ผู้เชื่อมต่อต้องเสียค่าใช้จ่ายให้ผู้ดูแลระบบไฟฟ้า เนื่องจากนับเป็นภาระที่เพิ่มขึ้นในการบริหารระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นต้น

กลุ่มที่สองคือ อาคารบ้านเรือนที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าใช้เองเป็นการภายในและไม่ได้ขายไฟฟ้าให้กับระบบ ทำให้ไม่มีการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า แผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้น่าจะมีปัญหาในด้านการรวบรวมมากที่สุด เนื่องจากหน่วยงานรัฐที่เกี่ยวข้องอาจไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้ นอกจากนี้เจ้าของแผงในกลุ่มนี้มีแนวโน้มจะทอดทิ้งแผงหากหมดสภาพ โดยอาจมีการขายอุปกรณ์อื่น ๆ ออกไปแต่มักทิ้งตัวแผงเซลล์ไว้บนหลังคาอาคาร

การจัดการและรวบรวมในแต่ละรูปแบบจะเกิดต้นทุน เช่น ต้นทุนการขนส่งแผงหมดอายุ ต้นทุนการวัดประสิทธิภาพซึ่งควรนำมาเปรียบเทียบกับต้นทุนของทางเลือกอื่นๆ เช่น ปล่อยทิ้ง แอบทิ้ง การขายต่อในตลาดมือสอง เป็นต้นปัจจัยเหล่านี้ล้วนต้องนำมาประกอบการตัดสินใจเพื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียก่อนการวางแนวทางการควบคุมและรวบรวมแผงเซลล์อย่างเหมาะสมต่อไป

**ผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์**

ผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ (รวมถึงผู้จำหน่ายและติดตั้ง) สามารถเป็นผู้รับผิดชอบในการรวบรวมและนำส่งแผงเซลลาแสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าให้กับจุดรวบรวมได้ ทั้งนี้วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ใช้อยู่ในสหภาพยุโรป

(European Union-EU) ทั้งนี้ผู้จำหน่ายย่อมมีฐานข้อมูลลูกค้าของตนทำให้สามารถติดตามเก็บของเสียแผงได้ง่ายและอย่างครบถ้วน โดยในยุโรปเอง ผู้ผลิตถึงขั้นรวมตัวกันตั้งบริษัท PV Cycle เพื่อดำเนินการจัดการด้วย

สำหรับประเทศไทย วิธีการนี้มีประเด็นที่ต้องคำนึงถึงหลายประการ ทั้งในด้านสภาวะธุรกิจอุตสาหกรรมและด้านเศรษฐศาสตร์ ในด้านธุรกิจเองนั้น ประเทศไทยได้นำเข้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นส่วนใหญ่ ผู้จำหน่ายที่มีการติดต่อกับลูกค้าโดยตรงโดยเฉพาะลูกค้ากลุ่มอาคารบ้านเรือนมักเป็นตัวแทนจำหน่ายหรือผู้รับจ้างติดตั้ง ซึ่งมักมีพลวัตรหรือมีความไม่แน่นอนทางธุรกิจที่สูง จึงมีโอกาสค่อนข้างมากที่ธุรกิจเหล่านี้อาจจะปิดตัวไปก่อนที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะกลายเป็นของเสีย ซึ่งผู้ผลิตมักรับรองอายุที่มากกว่า 25 ปี ทำให้เมื่อถึงเวลาเจ้าของแผงอาจต้องดำเนินการด้วยตนเอง และกลายเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายโดยปริยาย

ในทางเศรษฐศาสตร์ การให้ผู้ผลิตเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการจัดการแผงที่หมดความคุ้มค่า เป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตอย่างหนึ่ง ซึ่งท้ายที่สุดผู้ผลิต ผู้จำหน่าย หรือผู้ติดตั้งจะต้องทำการผลักภาระนี้ให้กับผู้ซื้อในรูปของต้นทุนที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดผลเสียได้อย่างน้อยสองประการ ประการแรก ในภาพรวมของอุตสาหกรรม การที่ต้นทุนการติดตั้งสูงขึ้น จะทำให้ความสามารถในการแข่งขันเพื่อเป็นทางเลือกในการผลิตไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกับทางเลือกอื่น ๆ เช่น พลังงานลม ขยะ ฯลฯ ลดลง หากการใช้พลังงานประเภทอื่นๆไม่ถูกควบคุมในลักษณะหรือความเข้มข้นที่พอๆกัน ประเด็นนี้จะเป็นประเด็นเชิงนโยบายที่ต้องพิจารณาทั้งข้อดีและข้อเสียอื่น ๆ ร่วมกันต่อไป ประการที่สอง สืบเนื่องจากประเด็นทางสภาพธุรกิจอุตสาหกรรม หากมีการผลักภาระค่าใช้จ่ายให้กับผู้ซื้อแล้ว ปรากฏว่าเมื่อถึงเวลา ตัวผู้จำหน่ายปิดกิจการไปแล้ว ผู้ซื้อ (เจ้าของแผง) จะตกเป็นฝ่ายเสียเปรียบอย่างมาก ทั้งนี้ประเด็นนี้อาจแก้ไขได้โดยการกำหนดระเบียบการจัดเก็บเงินเพื่อการนี้ให้ชัดเจนอยู่ในใบเสร็จ และเงินที่เก็บได้ต้องนำส่งเข้ากองทุนส่วนกลางที่มีผู้บริหาร โดยกองทุนนี้จะมีไว้เพื่อการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าโดยเฉพาะ ทั้งนี้ผู้บริหารอาจจะเป็นรัฐหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องมีความโปร่งใสในการจัดการเงิน

**รัฐ**

หากให้รัฐเป็นผู้ดำเนินการในการรวบรวม รัฐต้องมีการจัดสรรงบประมาณและกำลังคนเพื่อการจัดการ ซึ่งหมายความว่าต้องมีการจัดสรรภาษีมาเพื่อดูแลกิจกรรมนี้ วิธีการนี้ไม่น่าที่จะเหมาะสมกับประเทศไทยและผิดแนวคิดทางเศรษฐศาสตร์ ทั้งนี้อาจจะพิจารณาได้ดังนี้

ประการแรก ประเทศไทยยังต้องการการพัฒนาในอีกหลายด้าน การเพิ่มภาระให้กับรัฐบาล ทำให้ส่วนราชการใหญ่ขึ้น เป็นการไม่สมควร และทำให้งบประมาณของรัฐในส่วนของเงินเดือนบุคลากรสูงขึ้น ส่งผลให้รัฐมีงบประมาณในการดำเนินโครงการอื่น ๆ ที่น้อยลง

ประการที่สอง กลุ่มที่ขายไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้กับระบบซึ่งเป็นกลุ่มใหญ่ที่เป็นต้นทางของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่า ในทางเศรษฐศาสตร์ กลุ่มนี้ได้รับการสนับสนุนจากอัตรารับซื้อไฟฟ้าที่สูงขึ้น ทำให้ในระยะยาวมีผลกำไรสูงและเป็นผลประโยชน์ส่วนบุคคล หากยังต้องให้รัฐจัดสรรงบประมาณมาช่วยในการจัดการแผงที่หมดความคุ้มค่าอีกด้วย จะเป็นการไม่สมควรเพราะเป็นการนำเงินจากคนทั้งประเทศมาจ่ายเพื่อช่วยคนกลุ่มนี้ ซึ่งในทางเศรษฐศาสตร์แล้วคนกลุ่มนี้ควรเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียของตนเอง

โดยสรุป บทบาทของภาครัฐในด้านการรวบรวม ควรเป็นผู้สร้างกลไก ระเบียบ แนวปฏิบัติที่เหมาะสมและที่มีการปฏิบัติได้ และต้องคอยดูแลให้ภาคเอกชนที่เกี่ยวข้องจัดดำเนินการไปตามแนวที่วางไว้ ทั้งนี้สิ่งที่ภาครัฐอาจเข้าไปช่วยได้คือ การเป็นคนกลางในการดูแลระบบใหม่ให้สามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่องและยั่งยืน เช่น การบริหารกองทุนที่เกิดจากการรวบรวมเงินที่เก็บล่วงหน้าเพื่อการจัดการแผงที่หมดความคุ้มค่า โดยกองทุนนี้มีลักษณะที่บริหารตนเอง ไม่ต้องใช้งบประมาณของรัฐ แต่ต้องมีความโปร่งใสในการใช้เงินอย่างเหมาะสม และสามารถถูกตรวจสอบได้

ที่กล่าวมาในข้างต้นนั้น มองว่าของเสียแผงเป็นภาระที่ต้องเสียเงินจัดการแต่เพียงอย่างเดียว แต่แผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นประกอบด้วยวัสดุที่หลากหลายที่หลายส่วนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ หมายความว่าของเสียแผงเหล่านี้ก็ยังมีมูลค่าในตัวเองอยู่ในเชิงวัสดุ ผู้ประกอบการธุรกิจรีไซเคิลอาจมองว่าแผงเหล่านี้มีมูลค่าและการจัดหาแผงเป็นต้นทุนที่ยอมรับได้ในทำนองเดียวกับการรับซื้อวัสดุตามร้านขายของเก่า นั่นหมายความว่าอาจจะมีการรับซื้อแผงเกิดขึ้นเพื่อนำมาทำกำไรต่อไป ซึ่งอาจทำให้เจ้าของแผงอาจจะไม่ต้องจ่ายค่านำส่งยังจุดรวบรวมก็เป็นไปได้ได้ โดยมีองค์กรทำหน้าที่รวบรวมแผงและขายต่อให้กับธุรกิจรีไซเคิลต่อไป

ประเด็นที่น่าสนใจต่อไปที่จะเกิดขึ้นหลังการรวบรวมได้แล้วก็คือเรื่องของการคัดแยก การรีไซเคิลและการกำจัด ทั้งนี้ประเด็นที่ทำให้การพิจารณาเรื่องนี้ซับซ้อนมากขึ้น ได้แก่ปัจจัยด้านความหลากหลายทางเทคโนโลยีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด ปริมาณแผงที่หมดอายุในช่วงเวลาต่าง ๆ ในอนาคต การรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการแยกส่วนและขายวัสดุต่าง ๆ นั้นมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจหรือไม่ หากไม่คุ้มค่า หรือไม่คุ้มค่าเฉพาะในช่วงที่ปริมาณแผงเกิดขึ้นน้อย รัฐอาจต้องเป็นผู้เข้ามาดูแล (หากรัฐมองว่าการรีไซเคิลวัสดุเป็นทางเลือกที่ควรสนับสนุน) โดยอาจจะด้วยการจัดสรรงบประมาณเพื่อการสนับสนุนให้กิจกรรมนั้นอยู่ได้ หรือการจัดตั้งกองทุน

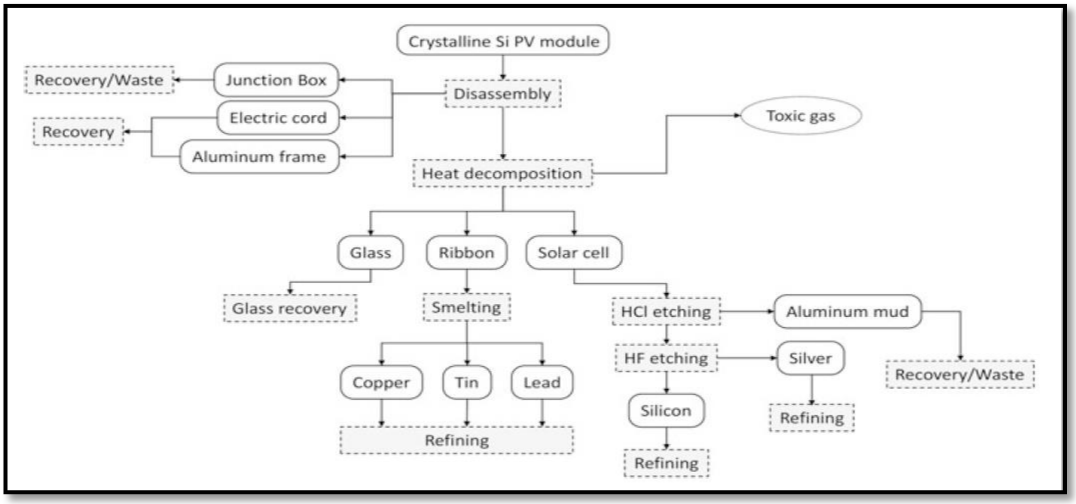
โดยเก็บเงินจากเจ้าของแผงเพื่อการดำเนินการจัดการแผงที่หมดความคุ้มค่าก็ได้ โดยประเด็นนี้เป็นประเด็นจะกล่าวถึงต่อไป

### 6.4 การจัดการตัวแผงภายหลังถูกรวบรวม

แนวทางในการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่า สามารถแบ่งได้เป็น 4 รูปแบบใหญ่ๆ โดยจำแนกตามความยากง่ายและความสมบูรณ์ของการคัดแยกวัสดุเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ดังนี้

1. การจัดการคัดแยกอย่างง่ายและฝังกลบส่วนที่เหลือ
2. การคัดแยก บด และทำการคัดแยกวัสดุหลังการบด
3. การคัดแยกเบื้องต้นและการใช้เครื่องมือในการแยกส่วนกระจก
4. การคัดแยกเบื้องต้นและการแยกส่วนวัสดุให้สามารถนำกลับไปทำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีก

จะเห็นได้ว่าระดับที่ 1 เป็นรูปแบบที่ทำง่าย ต้นทุนต่ำแต่ได้วัสดุกลับมาใช้ใหม่น้อยและต้องมีค่ากำจัดเศษเหลือทิ้ง ขณะที่ระดับที่ 4 เป็นรูปแบบที่มีการลงทุนสูง ใช้กระบวนการที่ซับซ้อน แต่ได้วัสดุกลับมาใช้ใหม่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้จากระดับที่ 1 ถึงระดับที่ 4 จะเป็นการลงทุนที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้เกิดการนำกลับวัสดุที่มากขึ้นทีละขั้น โดยระดับที่ 4 อาจจะถือได้ว่าเป็นวิธีที่ค่อนข้างครบถ้วน และสามารถแสดงได้ในรูปที่ 6 – 2 สำหรับแผงประเภทผลึกซิลิกอน ซึ่งได้รับการติดตั้งมากที่สุดในประเทศไทย




รูปที่ 6 – 2 การจัดการตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายหลังถูกรวบรวม

(Teng-Yu Wang, 2016)

ทั้งนี้รายละเอียดของแต่ละระดับตั้งแต่ระดับที่ 1 ถึงระดับที่ 4 สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ระดับที่ 1 การจัดการคัดแยกอย่างง่ายและฝังกลบส่วนที่เหลือ

กระบวนการนี้เป็นวิธีการที่สามารถทำได้และมีการทำอยู่แล้วในปัจจุบัน โดยใช้โครงสร้างธุรกิจที่มีอยู่ในประเทศไทย โดยมีขั้นตอนหลังจากการรวบรวมดังนี้

1. ใช้แรงงานในการคัดแยก (Disassembly) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้วัสดุที่คัดแยกได้ง่ายหลักๆมี 3 ส่วนคือ กรอบอลูมิเนียม สายไฟ และกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction Box) โดยส่วนที่เหลือคือตัววงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะกลายเป็นขยะอุตสาหกรรม
2. ตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นขยะอุตสาหกรรม จะถูกส่งต่อเพื่อทำการกำจัดตามแนวทางที่ถูกต้องของกรมโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป เช่น การบด หล่อซีเมนต์ และฝังกลบเป็นต้น
3. กรอบอลูมิเนียม สายไฟ (ทองแดง) และกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction Box) จะถูกขายหรือส่งต่อเพื่อนำวัสดุมีค่ามาใช้ใหม่เช่นอลูมิเนียม ทองแดง เป็นต้น

การนำส่งแผงให้กับบริษัทที่รับกำจัดขยะอุตสาหกรรมไปจัดการต่อ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายขึ้นในส่วนของโรงงาน โดยบริษัทที่รับกำจัดอาจจะทำการคัดแยกเพื่อการรีไซเคิลหรือไม่ก็ได้ ทั้งนี้นอกเหนือจากต้นทุนในการรวบรวมแผงซึ่งประกอบไปด้วยค่าขนส่ง และค่าถอดแผงแล้ว ระดับที่หนึ่งจะมีต้นทุนอื่นๆอีก ได้แก่ ค่าแรงในการคัดแยก ค่ากำจัดส่วนที่เหลือหลังการคัดแยก เท่านั้น โดยจะมีรายได้จากการขายวัสดุที่แยกออกมาได้ อันได้แก่ โครงอลูมิเนียม สายไฟ และกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อให้กับอุตสาหกรรมรีไซเคิลต่อไป

ระดับที่ 2 การคัดแยก บด และทำการคัดแยกวัสดุหลังการบด

ในระดับที่ 2 นี้คล้ายกับระดับที่ 1 สิ่งที่แตกต่างกันคือการคัดแยกส่วนประกอบหลังการบดอีกรอบหนึ่ง โดยการใช้แรงงาน ซึ่งในกรรมวิธีนี้จะได้ชิ้นส่วนของกระจกที่หลุดออกมาจากตัวแผงเซลล์ (แต่ไม่ใช่กระจกบริสุทธิ์) เป็นส่วนประกอบหลักที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นในระดับนี้จึงมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ใช้แรงงานในการคัดแยก (Disassembly) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้วัสดุที่คัดแยกได้ง่ายหลักๆมี 3 ส่วนคือ กรอบอลูมิเนียม สายไฟ และกล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Junction Box)
2. กรอบอลูมิเนียม สายไฟ (ทองแดง) และอุปกรณ์เชื่อมต่อแผง (Junction Box) จะถูกขายหรือส่งต่อเพื่อนำวัสดุมีค่ามาใช้ใหม่เช่น อลูมิเนียม ทองแดง เป็นต้น
3. ส่วนที่เหลือคือตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำไปบดอย่างหยาบ (ต้องทำอยู่แล้วในการกำจัดของเสียขยะอุตสาหกรรม ก่อนการฝังกลบ) ในขั้นตอนนี้จะทำให้กระจกบางส่วนจะแยกตัวจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และสามารถใช้แรงงานในการคัดแยกกระจกได้ โดยตัวกระจกสามารถส่งต่อเพื่อการนำไปรีไซเคิลได้

4. ตัววงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหลือที่จะกลายเป็นขยะอุตสาหกรรม จะถูกส่งต่อเพื่อทำการกำจัดตามแนวทางที่ถูกต้องต่อไป เช่นการหล่อซีเมนต์ และฝังกลบเป็นต้น

เช่นเดียวกับระดับที่ 1 วิธีการนี้เป็นวิธีการที่สามารถบังคับใช้ได้ในทันที โดยการออกแนวทางการปฏิบัติให้กับบริษัทที่รับกำจัดต้องทำการคัดแยกวัสดุตามกระบวนการ โดยที่ค่าแรงที่เพิ่มขึ้นมา อาจจะชดเชยได้จากค่าวัสดุที่สามารถขายต่อให้กับอุตสาหกรรมต่อเนื่องได้ต่อไป

นอกเหนือจากต้นทุนในการรวบรวมแผงซึ่งประกอบไปด้วย ขนส่ง และค่าถอดแผง (Disassembly) แล้ว ในระดับนี้ จะมีต้นทุนอื่น ๆ ได้แก่ ค่าแรงในการคัดแยก ค่ากำจัดส่วนที่เหลือหลังการคัดแยก เช่นเดียวกับวิธีแรก โดยควรจะส่งแผงจากการคัดแบบหยาบให้กับธุรกิจจัดการขยะอุตสาหกรรมเพื่อดำเนินการบด (ซึ่งต้องทำอยู่แล้ว) และการคัดแยกกระจก (โดยจะมีต้นทุนเพิ่มคือค่าแรง) ในขณะที่จะมีรายได้จากการขายวัสดุที่แยกออกมาได้ให้กับอุตสาหกรรมต่อเนื่องจะได้แก่ กรอบอลูมิเนียม สายไฟ และ กล่องอุปกรณ์เชื่อมต่อ(โดยจะเป็นรายได้ที่เกิดจากหน่วยคัดแยก) ส่วนกระจก จะเป็นรายได้ของหน่วยงานที่รับจัดการขยะอุตสาหกรรม (โดยสมมติให้กระจกที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีหน่วยงานรับซื้อต่อเพื่อทำการรีไซเคิลในสภาพของกระจกที่ไม่สมบูรณ์)

ระดับที่ 3 การคัดแยกเบื้องต้นและการใช้เครื่องมือในการแยกส่วนกระจก

ในระดับที่ 3 นี้จะเริ่มมีความซับซ้อนและต้องการอุปกรณ์มากขึ้น โดยวัตถุประสงค์หลักของวิธีที่สามนี้คือการนำกระจกที่ติดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ต่อไปในลักษณะที่ค่อนข้างสมบูรณ์ (ไม่แตกหักหรือแตกหักน้อย) ซึ่งอาจจะนำกลับไปใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ใหม่ หรือนำไปใช้ในการอื่นโดยไม่ต้องไปผ่านการหลอมผลิตใหม่ ดังนั้นระดับนี้มีขั้นตอนดังนี้

1. ใช้แรงงานในการคัดแยก (Disassembly) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้วัสดุที่คัดแยกได้ง่ายมีสามส่วนคือกรอบอลูมิเนียม สายไฟ (ทองแดง) และอุปกรณ์เชื่อมต่อแผง (Junction Box)
2. กรอบอลูมิเนียม สายไฟ (ทองแดง) และอุปกรณ์เชื่อมต่อแผง (Junction Box) จะถูกขายหรือส่งต่อเพื่อนำวัสดุมีค่ามาใช้ใหม่เช่น อลูมิเนียม ทองแดง เป็นต้น
3. ส่วนที่เหลือคือตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อให้ฟิล์ม EVA ที่ประสานกระจกและตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ด้วยกันให้สลายตัวและสามารถแยกกระจกออกจากแผงได้อย่างสมบูรณ์ โดยตัวกระจกสามารถส่งต่อเพื่อผลิตและนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือนำไปใช้ในสภาพเดิมต่อไป
4. ตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหลือที่ถือเป็นขยะอุตสาหกรรม จะถูกส่งต่อเพื่อทำการกำจัดตามแนวทางที่ถูกต้องต่อไป เช่นการบด การหล่อซีเมนต์ และฝังกลบเป็นต้น

นอกเหนือจากต้นทุนที่ได้กล่าวไปแล้วในระดับที่ 1 ในระดับที่ 3 นี้จะมีต้นทุนเพิ่มเติมในกระบวนการอีก ได้แก่ ค่าการลงทุนในการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการแยกกระจกออกจากตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง (ทั้งนี้ค่าไฟฟ้าจะเป็นค่าใช้จ่ายหลัก) ซึ่งแนวคิดนี้เชื่อว่ากระจกที่แยกออกมาได้จะมีสภาพที่สมบูรณ์ และมีมูลค่าสูงกว่ากระจกที่แยกได้ในระดับที่ 2 (จะคุ้มค่ากับการลงทุนเพิ่มเติมหรือไม่ขึ้นกับราคารับซื้อ) ในระดับที่ 3 นี้ หน่วยงานที่ทำการแยกกระจกอาจเป็นหน่วยเดียวกับหน่วยงานรวบรวม/คัดแยกเบื้องต้น หรือเป็นหน่วยงานที่มีความชำนาญในการทำหน้าที่นี้โดยตรงก็ได้ (ซึ่งอาจทำให้มีประสิทธิภาพและต้นทุนโดยรวมที่ต่ำ) ทั้งนี้การกำหนดประเภทของศูนย์รวบรวมที่สามารถทำการแยกกระจกได้ จำต้องพิจารณาถึงปริมาณขนาดการรวบรวมของเสียที่เหมาะสมกับการลงทุน โดยศูนย์ที่ทำหน้าที่นี้ได้ควรเป็นเอกชน เช่น วงษ์พาณิชย์ โรงรับซื้อขยะรายใหญ่ หรือกลุ่มผู้ผลิตที่รวมตัวกันในลักษณะองค์กรแบบ PV Cycle เป็นต้น

ระดับที่ 4 การคัดแยกเบื้องต้นและการแยกส่วนวัสดุให้สามารถนำกลับไปทำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีก

แนวทางคือการพยายามนำวัสดุภายในเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่ามาใช้ใหม่ให้ได้มากที่สุด ดังนั้น สำหรับแผงแบบผลึกซิลิกอน วัสดุสุดท้ายที่แยกได้ที่มีค่า ได้แก่ ตัวเวเฟอร์ซิลิกอนเอง โดยในแนวคิดคือการนำซิลิกอนเวเฟอร์ที่แยกออกมาได้และไม่เสียหายกลับไปผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ใหม่ โดยในระหว่างกระบวนการ ยังสามารถได้โลหะมีค่าอื่น ๆ ได้แก่ เงิน ตะกั่ว ทองแดง และดีบุก ออกมาอีกด้วย ทั้งนี้ ขั้นตอนโดยละเอียดเป็นไปตามรูปที่ 6- 2สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ใช้แรงงานในการคัดแยก (Disassembly) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้วัสดุที่คัดแยกได้ง่ายมีสามส่วนคือ กรอบอลูมิเนียม สายไฟ (ทองแดง) และอุปกรณ์เชื่อมต่อแผง (Junction Box)
2. กรอบอลูมิเนียม สายไฟ (ทองแดง) และอุปกรณ์เชื่อมต่อแผง (Junction Box) จะถูกขายหรือส่งต่อเพื่อนำวัสดุมีค่ามาใช้ใหม่เช่น อลูมิเนียม ทองแดง เป็นต้น
5. ส่วนที่เหลือคือตัววงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อให้ฟิล์ม EVA ที่ประสานกระจกและตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ด้วยกันให้สลายตัวและแยกกระจกออกจากแผงได้อย่างสมบูรณ์ โดยตัวกระจกสามารถส่งต่อเพื่อผลิตและนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือนำไปใช้ในสภาพเดิมต่อไป
3. ตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหลือจะถูกนำไปผ่านกระบวนการกัดผิว (Etching) โดยจะได้ผลิตภัณฑ์หลักออกมาคือแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีความบริสุทธิ์และสามารถนำไปผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใหม่ได้ ส่วนโลหะมีค่าอื่นๆ ที่ออกมาจากกระบวนการได้แก่ ทองแดง ดีบุก ตะกั่ว และ เงิน จะสามารถขายหรือส่งต่อเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้

4. ในระดับนี้ ส่วนที่เหลือจากกระบวนการต่าง ๆ จะเป็นส่วนประกอบพลาสติกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสามารถนำไปเผาทำลายตามกระบวนการที่ถูกต้องต่อไป

ระดับนี้เป็นระดับที่มีวิธีจัดการที่ครบวงจรที่สุด และมีต้นทุนสูงที่สุดเช่นกัน ซึ่งต้นทุนที่เพิ่มขึ้นมาจากวิธีที่ 3 คือต้นทุนในการแยกส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ออกเป็น แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ เงิน ตะกั่ว ทองแดงและดีบุก ซึ่งสามารถขายต่อเป็นรายได้ของกระบวนการจัดการได้ ทั้งนี้ ในแผงหนึ่งแผงจะมีปริมาณวัสดุมีค่าเหล่านี้ไม่มากนัก หากการรวบรวมไม่ดีหรือปริมาณแผงที่เข้าสู่กระบวนการมีน้อย จะไม่คุ้มค่าดำเนินการ

ทั้งสี่ระดับการจัดการที่ได้กล่าวมาแล้วเบื้องต้น มีต้นทุนร่วมคือต้นทุนในการรวบรวมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าเพื่อส่งต่อไปยังกระบวนการจัดการทั้งสี่แบบ โดยตารางที่ 6 - 1 จะแสดงรายการสรุปรายได้และต้นทุนจากกระบวนการทั้งสี่ระดับตามที่ได้บรรยายมาแล้วในข้างต้น

ตารางที่ 6 - 1 รายได้ ผลิตภัณฑ์และต้นทุนของการคัดแยกและรีไซเคิลจากสี่ระดับทางเลือก

| | | วิธีที่ 1 | วิธีที่ 2 | วิธีที่ 3 | วิธีที่ 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| รายได้ | โครงอลูมิเนียม | x | x | x | x |
| | สายไฟ | x | x | x | x |
| | Junction box | x | x | x | x |
| | กระจก (ไม่สมบูรณ์) | | x | | |
| | กระจก (เต็มแผ่น) | | | x | x |
| | ซิลิกอนเวเฟอร์ | | | | x |
| | โลหะมีค่าอื่น ๆ | | | | x |
| ต้นทุน | ค่ารวบรวมแผง | x | x | x | x |
| | ค่าจัดการขยะอุตสาหกรรม | x | x | x | x |
| | ค่าแรงคัดแยกเบื้องต้น | | x | x | x |
| | ค่าแรงคัดแยกกระจก | | x | | |
| | การลงทุนอุปกรณ์แยกกระจก | | | x | x |
| | ค่าไฟฟ้า (แยกกระจก) | | | x | x |
| | การลงทุนกระบวนการแยกแผงซิลิกอน | | | | x |
| | ค่าดำเนินการแยกแผงซิลิกอน | | | | x |

### 6.5 แนวทางการประเมินความคุ้มทุนเบื้องต้น

การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าอย่างถูกวิธีมีผลประโยชน์ที่ได้คือ เกิดการคัดแยกอย่างเหมาะสมได้รับผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ ปริมาณของเศษเหลือที่ต้องไปสู่หลุมฝังกลบลดลง ทำให้สามารถลดต้นทุนการฝังกลบลงได้ ดังนั้นแนวทางการประเมินวิธีการในการจัดการสามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P_T = P_t + D - C$$

$P_T$ คือ ผลประโยชน์สุทธิ (ทั้งบวกและลบ)

$P_t$ คือ รายได้จากการขายวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น แผงซิลิกอน โลหะมีค่า สายไฟ โครงอลูมิเนียมและกระจก

D คือ ต้นทุนที่ลดลงจากการที่ไม่ต้องนำไปฝังกลบ

C คือ ต้นทุนในการจัดการรีไซเคิล รวมค่าแรงค่าใช้จ่ายต่าง ๆ

หลักการนี้ได้ถูกใช้โดยทั่วไปเช่นใน McDonald and Pearce (2010) และ Cucchiella และคณะ (2015) ในงานวิจัยทั้งสองพบว่า การนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่ามาจัดการอย่างดีที่สุด เช่นด้วยระดับการจัดการที่ 4 โดยยังไม่นับรวมต้นทุนในการรวบรวมและรายได้จากโครงอลูมิเนียม จะมีความคุ้มค่าเฉพาะกับแผงประเภท CIGS เท่านั้น เนื่องจากมีโลหะที่มีค่าอยู่มากในส่วนประกอบ ในขณะที่สำหรับแผงชนิดอื่นๆ ที่มีใช้กันในปัจจุบันที่รวมถึงแผงประเภทซิลิกอนนั้นยังไม่เหมาะที่จะใช้ระดับที่ 4 ยกเว้นแต่ว่าจะสามารถลดต้นทุนในการจัดการลงได้ เช่น มีปริมาณแผงที่มากเพียงพอ หรือ มีการใช้กระบวนการที่มีต้นทุนที่ต่ำกว่า หรือการคาดการณ์ในอนาคตที่วัสดุในแผงจะมีราคาที่สูงขึ้นจากความต้องการที่มากขึ้นและแหล่งทรัพยากรที่ลดลง เป็นต้น

หากนำข้อมูลจาก McDonald and Pearce (2010) มาทำประมาณการโดยใช้ข้อมูลของประเทศไทยในส่วนของแผง c-Si จะได้ผลการคำนวณต้นทุนพื้นฐานดังนี้ (คิดอัตราแลกเปลี่ยนที่ 1 $ (US Dollar) = 35 บาท)

ค่าขนส่ง สมมติเช่ารถสิบล้อหนึ่งคัน บรรทุกแผงปริมาณ 15 ตัน (15,000 กิโลกรัม) หรือประมาณ 600 แผง ใช้ค่าสมมติน้ำหนักแผงละ 22.4 กิโลกรัม (Bio Intelligence Service, 2011) ซึ่งจะได้ 670 แผง จึงปรับลงเพื่อความเหมาะสมที่ 600 แผง ต่อคัน

จากข้อมูลของ McDonald and Pearce (2010) แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน (ยกเว้น a-Si) ที่ขนาด 1 ตารางเมตร มีปริมาณวัสดุอิเลคทรอนิคส์ (Si, Ag, Pb, etc.) เท่ากับ 279.60 กรัม โดยโลหะรวมเหล่านี้จะ

มีราคาขายรวมที่ 0.027 $/g (เนื่องจากในเอกสารไม่ได้แยกรายละเอียดตามชนิดวัสดุ) หรือมีรายได้จากวัสดุเท่ากับ 7.54 $ ต่อแผง (หรือ 7.54 x 35 บาท/$ = 263.9 บาทต่อแผง) ไม่รวมรายได้จากกรอบอลูมิเนียม

ในส่วนของกระจก แผงหนึ่งแผงจะมีกระจกในปริมาณ 16.64 กิโลกรัม ใช้ราคาประเมินเศษกระจกรวมจากวงษ์พาณิชย์ ณ วันที่ 4 เมษายน 2560 พบว่าราคารับซื้ออยู่ที่กิโลกรัมละ 0.80 บาท

กรอบอลูมิเนียม จากข้อมูลตามตารางที่ 4 - 4 แผงหนึ่งแผงจะมีอลูมิเนียม 10.3 % ดังนั้นจึงประมาณได้ว่าหนึ่งแผงจะมีอลูมิเนียมเท่ากับ 0.103 x 22.4 = 2.31 กิโลกรัม จากการสืบค้นข้อมูล (วงษ์พาณิชย์ ณ วันที่ 4 เมษายน 2560) พบว่าราคารับซื้ออลูมิเนียมอยู่ที่กิโลกรัมละ 42 บาท ดังนั้นหนึ่งแผงจะมีรายได้จากอลูมิเนียมเท่ากับ 101.64 บาท

ในกรณีของค่าใช้จ่ายในการฝังกลบ จะใช้อัตราค่าฝังกลบที่ 3,000 บาทต่อตัน (http://www.green.chula.ac.th/news016_eng.html) ต้นทุนในการดำเนินการ ในส่วนนี้หากใช้วิธีที่ 4 ตัวเลขประเมินจาก McDonald and Pearce (2010) เท่ากับ 32.11 $ ต่อแผง หรือเท่ากับ 1,123.85 บาทต่อแผง

**การประเมินความคุ้มทุนของการจัดการระดับที่ 1**

จากการระดับการจัดการที่ 1 จะเกิดรายรับจากการขายอลูมิเนียมเป็นหลักและมีต้นทุนการฝังกลบตามน้ำหนักที่เหลือ (22.4 - 2.31) = 20.09 กิโลกรัมต่อแผง

โดยสรุปในการจัดการระดับที่หนึ่ง

รายรับ จากกรอบอลูมิเนียมเท่ากับ 101.64 บาท ต่อแผง หากใช้รถบรรทุก 10 ล้อหนึ่งคัน จะมีรายได้เท่ากับ 60,984 บาท

รายจ่าย มีดังนี้ ค่าเช่ารถสิบล้อหนึ่งคัน 7,000 บาท/วัน + ค่าฝังกลบส่วนที่เหลือ 36,162 บาท (20.09 x 600 x 3) + ค่าคัดแยก 7,000 บาท/วัน (สมมติให้ มีการใช้แรงงานคน 20 คนทำงานทั้งวันเพื่อคัดแยกแผงจำนวน 600 แผง โดยมีค่าแรงคนละ 350 บาทต่อวันตามอัตราค่าจ้างตามมาตรฐานฝีมือ กุมภาพันธ์ 2557) = 50,162 บาทต่อวัน

วิธีนี้จะมีความคุ้มค่าเนื่องจากรายรับสูงกว่ารายจ่ายที่ราว 10,822 บาทหรือประมาณ 18 บาทต่อแผง หากนับรวมถึงประโยชน์จากการลดการฝังกลบอลูมิเนียม (สิ่งแวดล้อม) จะได้ส่วนเพิ่มอีกเท่ากับ 2.31 x 600 x 3 = 4,158 บาท จะทำให้เกิดกำไรต่อแผงเท่ากับ 24.97 บาท ซึ่งรวมมูลค่าต่อสังคมสิ่งแวดล้อมไว้ด้วย

จากข้อมูลตัวเลขกำไรในเชิงธุรกิจที่ 18 บาทต่อแผงนี้ จะเห็นได้ว่ากลุ่มที่รับจัดการแผงที่หมดความคุ้มค่า หรือกลุ่มที่รับซื้อขยะเพื่อการรีไซเคิลย่อมสามารถดำเนินธุรกิจในบริบทปัจจุบันนี้ได้ด้วยตนเอง ดังนั้นสิ่งที่รัฐควรคำนึงถึงคือการถอดแผงและการรวบรวม (โดยเฉพาะสำหรับแผงแบบติดตามอาคาร ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม และต่างไปจากกรณีของโรงไฟฟ้า)

**การประเมินความคุ้มทุนของการจัดการระดับที่ 2**

ในระดับที่ 2 นี้จะมีความต่างไปจากระดับที่ 1 ที่การจัดการกับกระจกซึ่งจะไม่ได้กระจกทั้ง 100 % จากแผง สมมติให้สามารถคัดแยกกระจกได้ 60 % ของกระจกทั้งหมดพบว่าจะได้กระจกประมาณ 10 กิโลกรัมต่อแผง หรือ 8 บาทต่อแผง (0.8 บาทต่อกิโลกรัม) รวมกับค่าโครงอลูมิเนียมอีก 101.64 บาทต่อแผง จะเกิดรายรับที่เท่ากับ 109.64 บาทต่อแผง

ในส่วนของรายจ่าย ค่าฝังกลบเท่ากับ 30.27 บาทต่อแผง (จากการฝังกลบ 10.09 กิโลกรัมต่อแผง) ค่าเช่ารถเฉลี่ย 11.7 บาทต่อแผง (7,000 บาท ต่อ 600 แผง) ดังนั้นรวมต้นทุนที่ไม่รวมค่าแรงอื่นๆจะเท่ากับ 41.97 บาทต่อแผง ค่าแรงงานในการถอดเพิ่มอีกประมาณ 23.33 บาทต่อแผง (ใช้คนงานเพิ่มอีก 20 คนในกระบวนการแยกหลังบด) รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ 65.3 บาทต่อแผง

ระดับนี้จะมีรายได้สุทธิที่หักรายจ่ายแล้วเท่ากับ 44.34 บาทต่อแผง ทั้งนี้จะขึ้นกับมูลค่าของกระจก เนื่องจาก กระจกแผงมีการเจือสาร ซึ่งสถานรับซื้ออาจมีการตั้งราคารับที่ต่างกันออกไป

หากรวมผลประโยชน์เชิงสิ่งแวดล้อมจะลดการฝังกลบได้ 12.31 กิโลกรัม หรือเท่ากับ 36.93 บาทต่อแผง รวมเป็นผลประโยชน์ทางสังคมเท่ากับ 81.27 บาทต่อแผง ตามแต่ราคากระจก

เช่นเดียวกับวิธีที่ 1 การจัดการในระดับนี้มีกำไรและกลุ่มธุรกิจสามารถดำเนินการได้ด้วยตนเอง รัฐแค่จัดการระบบให้เหมาะสมเท่านั้น

**การประเมินความคุ้มทุนของการจัดการระดับที่ 3**

ในระดับที่สาม เป็นการนำแผงผ่านกระบวนการเพื่อแยกกระจกออกอย่างสมบูรณ์ วิธีการนี้จะทำให้มีต้นทุนเพิ่มเติมทั้งในด้านการลงทุนและการดำเนินการซึ่งต้องใช้ความร้อนจากไฟฟ้าในการแยกกระจกออก จากการสำรวจ พบว่าข้อมูลค่าดำเนินการและการลงทุนในส่วนนี้ไม่มีงานวิจัยใดระบุไว้โดยตรง เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่ในต่างประเทศจะมุ่งเน้นการจัดการระดับที่สี่ ผู้วิจัยจึงจำต้องตั้งสมมติฐานบางประการจากต้นทุนของระดับที่สี่

ทั้งนี้จาก McDonald and Pearce (2010) วิธีในระดับที่ 4 มีต้นทุนการจัดการเท่ากับ 1,123.85 บาทต่อแผง หากสมมติให้ค่าดำเนินการในส่วนของการแยกกระจกมีค่าเท่ากับ 40% ของค่าดำเนินการทั้งหมดไม่รวมค่าฝังกลบและค่าขนส่งเพื่อการรวบรวม จะมีค่าใช้จ่ายเท่ากับประมาณ 450 บาทต่อแผง

ปริมาณกระจกทั้งหมด 16.64 กิโลกรัมต่อแผงมีมูลค่าเท่ากับ 13.31 บาทต่อแผง

รายรับรวมต่อแผงเท่ากับ 101.64 บาท (อลูมิเนียม) + 13.31 บาท (กระจก) = 114.95 บาทต่อแผง

รายจ่ายรวมต่อแผงเท่ากับ 11.7 บาท (ค่าขนส่ง) + ค่าดำเนินการรวม 450 บาท + ค่าฝังกลบ 10.35 บาท (3.45 กิโลกรัม) = 472.05 บาท ต่อแผง

ดังนั้น ในเบื้องต้นวิธีการนี้ไม่คุ้มค่าเพราะต้นทุนสูงกว่ารายได้อย่างน้อย 357 บาทต่อแผง ซึ่งหากคิดว่าค่าจัดการในประเทศไทยจะต่ำกว่าในยุโรปแล้ว อย่างไรก็ตามค่าจัดการก็ไม่น่าจะลดต่ำไปจนทำให้รายรับสูงกว่ารายจ่ายได้

หากรวมผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมอีก 56.85 บาทต่อแผงที่ไม่ต้องฝังกระจกและอลูมิเนียม (18.95 x 3) จะมีผลดำเนินการติดลบลดลงเหลือเท่ากับประมาณ 300 บาทต่อแผง ซึ่งยังแปลว่าโอกาสที่จะเกิดความคุ้มค่าในการลงทุนต่ำมาก

หากรัฐต้องการวิธีการนี้ อาจทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การสนับสนุนการลงทุนในการติดตั้งเครื่องจักรและอุดหนุนค่ารับซื้อกระจก (ซึ่งในปัจจุบันวงษ์พาณิชย์ไม่นิยมรับซื้อกระจกประเภทนี้) เป็นต้น

**การประเมินความคุ้มทุนของการจัดการระดับที่ 4**

สำหรับการจัดการในระดับที่ 4 มีการคำนวณความคุ้มทุนได้ดังนี้

รายได้ มาจากอลูมิเนียม 101.64 บาทต่อแผง กระจก 13.31 บาทต่อแผง วัสดุมีค่าอื่นๆ 263.9 บาทต่อแผง รวมทั้งหมดเท่ากับ 378.85 บาทต่อแผง

ต้นทุนมาจากค่าขนส่ง 11.7 บาทต่อแผง + ค่าจัดการทั้งหมดตาม McDonald and Pearce (2010) 1,123.85 บาทต่อแผง = 1,135.55 บาทต่อแผง

สรุป วิธีการจัดการในระดับที่สี่ยังไม่รวมค่าลงทุนอุปกรณ์จะขาดทุนประมาณ 757 บาทหรือมากกว่า หากบวกผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 67.2 บาทต่อแผงจะยังขาดทุนทางสังคมอยู่ประมาณ 690 บาทต่อแผง

ดังนั้นในปัจจุบันการจัดการด้วยวิธีการในระดับที่สี่ยังขาดความคุ้มค่าในทางการเงินในสัดส่วนที่สูงสำหรับแผงประเภทผลึกซิลิกอน ข้อมูลสรุปผลประเมินทางการเงินของการจัดการในแต่ละระดับสามารถแสดงในตารางที่ 6 - 2

ตารางที่ 6 - 2 ผลประเมินทางการเงินของการจัดการของเสียแผงหมดความคุ้มค่าที่ระดับการจัดการแบบต่างๆ

| **การจัดการ** | **รายรับ (บาท/แผง)** | **รายจ่าย (บาท/แผง)** | **กำไร (บาท/แผง)** | **กำไรทางสิ่งแวดล้อม (บาท/แผง)** | **ความเป็นไปได้ในประเทศไทยในปีปัจจุบัน** |
|---|---|---|---|---|---|
| ระดับที่ 1 | 101.64 | 83.60 | 18.04 | 6.93 | มีใช้ในปัจจุบัน |
| ระดับที่ 2 | 109.64 | 65.3 | 44.34 | 36.93 | เป็นไปได้ |
| ระดับที่ 3 | 114.95 | 472.05 | -357.1 | 56.85 | ต้องสนับสนุน |
| ระดับที่ 4 | 378.85 | 1,135.55 | -756.7 | 67.2 | ต้องสนับสนุน |

**6.6 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย**

จากผลประเมินการเงินในตารางที่ 6 - 2 พบว่าหากต้องการจัดการของเสียในระดับที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการนำวัสดุมาใช้ใหม่ ยังไม่สามารถปล่อยให้กลไกตลาดจัดการตนเองได้ เนื่องจากไม่มีความคุ้มทุนเชิงธุรกิจ รัฐจึงต้องมีการสนับสนุนในหลายเรื่อง ทั้งในเรื่องการลงทุนติดตั้งและการอุดหนุนการดำเนินการ ซึ่งทำได้หลายรูปแบบ เช่น 1. รัฐลงทุนจัดการเองโดยทำการจัดการครบวงจร และ 2. รัฐให้การชดเชยส่วนต่างกับเอกชนเพื่อให้ระบบการจัดการแบบสมบูรณ์ในระดับที่ 4 สามารถดำเนินไปได้

งานวิจัยของ Cucchiella และคณะ (2015) ทำการประเมินความเป็นไปได้ของโครงการรีไซเคิลของเสียแผงในอิตาลี พบว่าการจัดตั้งโรงงานขนาดใหญ่จะมีโอกาสอยู่รอดมากกว่าโรงงานขนาดเล็กเพราะการจัดการแบบสมบูรณ์ต้องการการลงทุนสูง และโรงงานขนาดใหญ่จะคุ้มค่าก็ต่อเมื่อมีปริมาณของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่กระบวนการจัดการที่มากเพียงพอเท่านั้น ดังนั้นในประเทศไทยหากต้องการวิธีการการคัดแยกและรีไซเคิลที่สมบูรณ์แบบและครบวงจร รัฐอาจจะต้องจำกัดจำนวนของศูนย์คัดแยกและรีไซเคิลขั้นต้นที่มีขนาดใหญ่สามารถรองรับของเสียได้มาก โดยที่ยังไม่จำเป็นต้องรีบสร้างโรงงานในส่วนปลายน้ำที่มีการลงทุนสูง โดยแนวคิดนี้ตรงกับข้อเสนอของ Choi and Fthenakis (2014)

ทั้งนี้ในระยะแรกที่มีของเสียปริมาณต่ำ อาจใช้วิธีดั้งเดิมในปัจจุบัน ได้แก่การคัดแยกและฝังกลบ (วิธีระดับที่ 1) ซึ่งสามารถทำได้อยู่แล้วในทางธุรกิจ หากต้องการผลิตภัณฑ์วัสดุที่เกิดขึ้นให้มีมูลค่ามากขึ้น อาจมีการสนับสนุนการวิจัยหรือเทคนิคที่จะลดการเจือปนในกระจก จะทำให้สามารถนำกระจกบางส่วนกลับมาใช้ใหม่ได้และลดการฝังกลบไปได้ในตัว  โดยในระยะแรกนี้ สิ่งที่ควรจัดการคือแนวทางการรวบรวมแผงที่หมดความคุ้มค่าที่จะเกิดขึ้นจะมีวิธีการอย่างไร ในเบื้องต้นเจ้าของแผงควรเป็นผู้รับค่าใช้จ่ายในการจัดการถอดและขนส่งไปยังจุดรวบรวม ส่วนค่าฝังกลบนั้นหากมีการนำวัสดุจากแผงไปขายได้จริง ธุรกิจรีไซเคิลควรเป็นผู้รับผิดชอบค่าฝังกลบซากแผงที่เหลือ

ในระหว่างที่จำนวนแผงที่เข้าสู่ระบบยังมีไม่มากพอ รัฐอาจทำการสนับสนุนงานวิจัยเพื่อการจัดการแผง ในระดับต่างๆ เพื่อให้เกิดเทคโนโลยีภายในประเทศที่มีต้นทุนที่ถูกลงทั้งในด้านการลงทุนและในด้านการดำเนินงานซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนค่าดำเนินการที่เป็นต้นทุนหลักในระดับที่ 3 และ 4 มีค่าลดลงด้วย นอกจากนี้รัฐอาจส่งเสริมการวิจัยเพื่อหาวิธีในการเก็บรักษาของเสียแผงไว้แบบไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการรีไซเคิลในอนาคต เนื่องจากการปรับเสถียรและฝังที่ทำอยู่ในปัจจุบัน จะทำให้ไม่คุ้มค่าที่จะขุดกลับขึ้นมาเข้ากระบวนการจัดการใหม่

ในระยะยาวรัฐสามารถหาแนวทางที่เหมาะสมตามราคาเทคโนโลยีและราคาวัสดุที่เปลี่ยนไป ซึ่งเป็นไปได้ว่าในอนาคตราคาวัสดุต่าง ๆ จะมีราคาสูงขึ้นและค่าลงทุนจะลงต่ำลง ทำให้เราสามารถเลือกวิธีการที่คุ้มค่าในการจัดการแผงเซลล์เหล่านี้ได้

โดยสรุป สิ่งที่รัฐต้องทำให้ชัดเจนและเร่งด่วนก็คือการรวบรวม ซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่ยากสำหรับกลุ่มโรงไฟฟ้า แต่จะยากสำหรับกลุ่มติดตั้งบนอาคาร โดยเฉพาะประเด็นที่จะไม่ให้เจ้าของแผงบนอาคารเหล่านี้ปล่อยแผงเสียทิ้งไว้หรือขายแผงต่อเข้าตลาดมือสอง หรือที่น่าเป็นห่วงที่สุดคือการนำไปทิ้งรวมกับขยะชุมชนทั่วไป ในด้านการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ ควรมีการพิจารณาอย่างรอบคอบเนื่องจากรัฐบาลไทยมีงบประมาณจำกัด การลงทุนเองเพื่อดำเนินการไม่น่าจะเป็นแนวทางที่เหมาะสม แต่กระบวนการสนับสนุนอย่างไรจึงจะจูงใจให้เอกชนยินดีเข้าสู่ธุรกิจประเภทนี้ ควรต้องได้รับการศึกษาโดยละเอียดต่อไป

## 6.7 แนวทางปฏิบัติที่ควรเสนอต่อภาครัฐ

1.การขึ้นทะเบียนของเสียในอนาคต

ในขณะนี้ ไม่ว่าจะเป็นคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ) กระทรวงพลังงาน หรือกรมโรงงานอุตสาหกรรม ไม่มีหน่วยงานใดมีข้อมูลจำนวน ประเภทและที่ตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์อย่างครบถ้วน โดยเฉพาะแผงที่เป็นประเภทที่ติดตามอาคาร ซึ่งแผงประเภทนี้จะมีปริมาณการติดตั้งที่สูงขึ้นในอนาคตอย่างแน่นอน ภาครัฐควรมีหน่วยงานทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลเหล่านี้ ทั้งที่เป็นประเภทโรงไฟฟ้าและแบบที่ติดอาคาร (Rooftop) ในกรณีของแผงแบบติดอาคาร หน่วยงานนี้อาจจะทำการวัดประสิทธิภาพและให้คำแนะนำในการดูแลแผงไปด้วยก็ได้ก็ได้ โดยหน่วยงานนี้ไม่จำเป็นต้องเป็นหน่วยราชการ

2.แนวทางปฏิบัติภายหลังหมดอายุ

ประมวลหลักการปฏิบัติ (Code of Practice-CoP) ของคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานควรมีรายละเอียดที่ชัดเจนในรูปแบบของบัญชีสิ่งที่ต้องทำ (Checklist) เมื่อมีแผงที่หมดความคุ้มค่าที่หน้างาน ทั้งนี้ทางหน่วยราชการส่วนกลางเช่น กกพ. กรมโรงงานอุตสาหกรรม และกรมควบคุมมลพิษ ควรหารือและเตรียมความพร้อมให้กับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) ด้วย ทั้งด้านกฎหมายและเทคนิค ทั้งการขนส่ง ความปลอดภัย การรีไซเคิลและการกำจัด เพราะมีความเป็นไปได้สูงที่แผงที่ติดในพื้นที่ของ อปท. ต่างๆ ที่จะปะปนมากับขยะชุมชน ภาครัฐจำต้องจัดให้มีจุดรวบรวม โดยอาจจะรวมไปถึงการรวบรวมขยะอิเลคทรอนิคส์อย่างอื่นๆด้วยก็ได้ เพราะว่ามีผลกระทบสำคัญหลายด้าน ทั้งด้านมลพิษ การจัดการทรัพยากร และการจ้างงาน เป็นต้น

3.ต้นทุนการขนส่ง

หน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรมีการระบุและบังคับให้ชัดเจนถึงผู้มีหน้าที่ออกเงินและทำการจัดส่งแผงไปยังจุดรวบรวม โดยเฉพาะในกรณีของแผงที่ติดบนหลังคา เช่นกลุ่มเจ้าของแผง ทั้งนี้การวางจุดรวบรวมที่เหมาะสมจะทำให้ลดต้นทุนได้มาก นอกจากนี้ปริมาณที่ขนส่งต่อครั้งที่มากขึ้นจะทำให้ในต้นทุนต่อหน่วยลดลง

4.การบริหารจัดการและหน้าที่จุดรวบรวม

ภาครัฐควรมีมาตรการในการจัดตั้งจุดรวบรวมย่อยโดยอาจจะใช้พื้นที่จัดการขยะขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นสำหรับของเสียแผงจากหลังคาบ้านที่มีปริมาณต่ำ ในส่วนของของเสียจากโรงงานที่มีปริมาณมาก ภาครัฐควรจัดให้มีจุดรวบรวมที่สามารถทำการคัดแยกในเบื้องต้นได้โดยควรสนับสนุนและเพิ่มศักยภาพให้กับโรงคัดแยกขยะเอกชนในปัจจุบันหรือกลุ่มของผู้ผลิตแผงที่มีศักยภาพหรือหน่วยงานที่ต้องจัดการของเสียขยะเลคทรอนิคส์อยู่

แล้ว ทั้งด้านการเงินและความรู้ ตลอดจนต้องระบุถึงปลายทางให้ชัดเจนสำหรับส่วนที่คัดแยกได้ยากหรือแยกไม่ได้ว่าควรจะไปรีไซเคิลหรือกำจัดโดยหลุมฝังกลบ

5.การสนับสนุนการใช้ของเสียในภาคอุตสาหกรรมและการจัดทำมาตรฐานวัตถุดิบและแผงมือสอง

ปัญหาหนึ่งของโรงคัดแยกเอกชนที่ไม่รับกระจกจากของเสียแผงคือมีสารปนเปื้อนเช่น EVA หรือ เคมีอื่นๆ ทำให้ขายวัสดุต่อไม่ได้ ภาครัฐจึงควรให้ความรู้และแรงจูงใจแก่อุตสาหกรรมท้ายน้ำต่างๆ เช่นโรงงานกระจก โรงถลุงซิลิกอน โรงหลอมทองแดง ถึงกรรมวิธีและผลประโยชน์ของการใช้ของเสียเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมวัสดุต้นทางเหล่านี้ เหตุผลอีกประการที่อุตสาหกรรมท้ายน้ำมีความลังเลที่จะใช้วัตถุดิบที่มาจากของเสียคือความคงที่และการปนเปื้อนของมลสาร สารเคมีต่างๆ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ภาครัฐควรจะกำหนดมาตรฐานของวัตถุดิบที่มาจากของเสียเหล่านี้ โดยคำนึงถึงความบริสุทธิ์ การปนเปื้อน และขนาดเป็นต้น นอกจากนี้มีการซ่อมแผงชำรุดเพื่อนำไปจำหน่ายใหม่ จึงควรจัดให้มีมาตรฐานความปลอดภัยและการรับประกันสำหรับแผงมือสองเหล่านี้ด้วย

6.การบังคับใช้กฎหมาย

ของเสียที่มีโลหะหนักและสารอินทรีย์ปนเปื้อน เช่นของเสียแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องมีการจัดการอย่างถูกหลักการ ควรมีการดำเนินการเอาผิดกับผู้ลักลอบทิ้ง ตามกฎหมายที่เกี่ยวข้องของหน่วยงานที่รับผิดชอบต่างๆ

7.การวิจัยและการบริหารจัดการเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

ภาครัฐควรจัดให้มีการวิจัยเชิงประยุกต์ที่เกี่ยวกับการเลือกที่ตั้งจุดรวบรวม เทคโนโลยีในการแยกแผ่นกระจกกับแผ่นเซลล์ออกจากกัน การใช้ซ้ำของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์และกระจก การสกัดโลหะมีค่าออกจากของเสียแผง การกำจัดที่เหมาะสมกับส่วนที่ใช้ไม่ได้ การวิจัยความเป็นไปได้ในการตั้งศูนย์กำจัดหรือรีไซเคิลของเสียแผงร่วมกับซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าอิเลคทรอนิคส์ และการสนับสนุนการออกแบบและผลิตแผงจากซากที่หมดอายุแล้ว

นอกจากนี้ควรมีการศึกษาเรื่องการกระจายความรู้และอบรมบุคคลากรให้สามารถใช้เทคโนโลยีในข้างต้นได้จริงในระดับปฏิบัติการด้วย ควรมีการศึกษาวิจัยผลกระทบเรื่องการส่งเสริมการรีไซเคิลของเสียเหล่านี้กับการจ้างงานและต่อเศรษฐกิจในภาพรวม ตลอดจนเพิ่มศักยภาพในเรื่องความมั่นคงทางวัสดุและพลังงานให้กับประเทศได้อย่างไร

# บทที่ 7
# สรุป

จากการศึกษา เก็บข้อมูล วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตลอดระยะเวลาโครงการ ทำให้สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. ของเสียแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในโลกในปี 2016 จะมีอยู่ในราว 43,500 – 250,000 ตัน ทั้งนี้อัตราการเกิดของเสียแผงจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ระหว่างปี 2030 - 2050 โดยปี 2050 จะมีปริมาณของเสียรวมในโลกถึง 60 - 78 ล้านตัน โดยเกิดมากที่สุดที่จีน 13.5 - 20 ล้านตัน อเมริกา 7.5 - 10 ล้านตันและญี่ปุ่นที่ 6.5 - 7.5 ล้านตัน แผงส่วนใหญ่ในโลกจนถึงปี 2030 จะยังเป็นแผงที่ใช้ซิลิกอนเป็นหลัก ได้มีการคาดการณ์ว่าหากมีการรีไซเคิลแผงจำนวน 60 - 78 ล้านตัน ในปี 2050 จะได้วัตถุดิบมีมูลค่าถึง 15 พันล้านเหรียญสหรัฐซึ่งสามารถนำไปผลิตแผงใหม่ได้อีกถึง 2 พันล้านแผง สามารถผลิตไฟได้ถึง 630 GW และเกิดการจ้างงานอีกเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการรวบรวมก่อนจึงจะรีไซเคิลได้ ประเทศที่เล็งเห็นโอกาสและลงมือทำแล้วได้แก่ เยอรมัน และญี่ปุ่น โดยที่ประเทศเยอรมัน ผู้ผลิตจะเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการรวบรวมและกำจัด ส่วนญี่ปุ่น เจ้าของแผงจะเป็นผู้ออกค่าใช้จ่าย โดยกลุ่มผู้ผลิตในสหภาพยุโรปได้รวมตัวกันตั้ง PV Cycle เป็นองค์กรกลางเพื่อทำการรวบรวมของเสียแผง
2. ในเรื่องผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากวงจรชีวิตแผง พบว่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในการผลิตจะมาจากการปลดปล่อยในการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตเป็นส่วนใหญ่ โดยสำหรับแบบผลึกซิลิกอนพบว่าพลังงานส่วนใหญ่ถูกใช้ในกระบวนการถลุงและทำให้ซิลิกอนบริสุทธิ์ ซึ่งหากมีการรีไซเคิลแผงหมดอายุจะลดพลังงานส่วนนี้ได้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ดีผลกระทบสิ่งแวดล้อมสำคัญยังมาจากองค์ประกอบกลุ่มโลหะหนักในแผงแบบต่างๆที่จำเป็นต้องมีการดูแลอย่างถูกหลักการ
3. ในประเทศไทย พบว่าการติดตั้งแผงในช่วงปี 2545 - 2558 จะทำให้เกิดของเสียแผงในปริมาณที่สูง ทั้งนี้ในส่วนของ 3,000 MW ที่หนึ่งที่เกิดจากโรงไฟฟ้าเป็นหลักจะมีของเสียรวมถึง 354,924 - 519,217 ตัน เมื่อเทียบกับ 3,000 MW ที่สอง ที่ 271,377 - 275,623 ตัน ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการติดตั้งแผงทดแทนแผงที่เสียหรือชำรุดระหว่างการใช้งานของโรงไฟฟ้าและมีการทิ้งแผงชำรุดออกไป ปริมาณของเสียสะสมรวมที่อาจเกิดได้ในประเทศไทยระหว่างปี 2565 - 2601 จากการติดตั้งรวมที่ 6,000 MW อาจมีปริมาณถึง 626,301 - 794,840 ตัน ปริมาณของเสียแผงจะเริ่มเกิดมากและควรมีการวางแผนรับมือตั้งแต่ปี

2565 เป็นต้นไป ทั้งนี้การพยากรณ์ไปข้างหน้าสำหรับ 3,000 MW ที่สองมีความเสี่ยงจากการติดตั้งจริงตามสภาพเศรษฐกิจและเทคโนโลยีที่เปลี่ยนไปซึ่งสามารถทำให้การพยากรณ์คาดเคลื่อนได้

4. หากไม่มีการวางแผนจัดการแผงหมดอายุตามหลักวิชาการ แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่หมดอายุแบบผลึกซิลิกอน สามารถชะลายตะกั่วออกมาได้ราว 75 - 518 กรัมต่อตันของเสีย และแผงแบบ CdTe สามารถชะละลายแคดเมียมออกมาได้ราว 27 - 153 กรัมต่อตันของเสีย ทั้งนี้ปริมาณที่ออกมาได้จะขึ้นกับค่าพีเอชของสิ่งแวดล้อมโดยรอบ โดยประเด็นในเรื่องตะกั่วจำเป็นต้องมีการระวังป้องกันอย่างมากเนื่องจากปริมาณที่มากของแผงแบบผลึกซิลิกอน ความสามารถในการเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ และความเป็นอันตรายของตะกั่ว

5. แผงประเภทหลักๆในไทยคือแผงแบบผลึกซิลิกอนเช่นเดียวกันกับทั่วโลก ทั้งนี้ภาคกลางจะมีปริมาณการเกิดขึ้นของขยะแผงสูงที่สุด ตามด้วยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยจังหวัดที่มีการติดตั้งแผงสะสมมากที่สุดสามอันดับแรกเมื่อสิ้นปี 2558 คือสระแก้ว ลพบุรี และเพชรบุรี ตามลำดับ

6. ในประเทศไทย หน่วยงานหลักที่ควรเข้าไปดูแลเรื่องภาพรวมการจัดการของเสียคือคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานที่ดูแลตามพระราชบัญญัติควบคุมส่งเสริมกิจการพลังงานและกรมโรงงานอุตสาหกรรมตามพระราชบัญญัติโรงงาน ทั้งนี้ควรให้ความรู้ความเข้าใจองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในเรื่องการดูแลนี้ด้วยเนื่องจากมีโอกาสสูงที่แผงตามบ้านจะถูกทิ้งปะปนมากับขยะชุมชน

7. ในกรณีของแผงที่เกิดจากโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ เจ้าของจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบและจัดส่งไปจุดรวบรวม ในกรณีของแผงจากหลังคา ยังเป็นปัญหาที่ต้องการการชี้ชัดจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน และกรมโรงงานอุตสาหกรรม

8. ในขณะนี้ มีการประกอบการธุรกิจที่จะซ่อมแซมแผงที่ชำรุดหรือหมดอายุเหล่านี้แล้วนำไปขายใหม่เป็นแผงมือสอง ซึ่งสามารถทำได้แต่ควรมีการตรวจสอบมาตรฐานประสิทธิภาพและเรื่องความปลอดภัยอย่างเข้มข้นด้วย เนื่องจากแผงเหล่านี้จัดว่าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังที่ต้องระวังเรื่องของไฟไหม้และไฟลัดวงจรโดยเฉพาะเมื่อประชาชนนำไปติดใช้เองตามบ้าน

9. เมื่อแผงมาถึงจุดรวบรวมแล้ว กิจกรรมการจัดการสามารถมีได้ถึง 4 ระดับ คือ 1) การจัดการคัดแยกอย่างง่ายและฝังกลบส่วนที่เหลือ 2) การคัดแยก บด และทำการคัดแยกวัสดุหลังการบด 3)การคัดแยกเบื้องต้นและการใช้เครื่องมือในการแยกส่วนกระจก และ 4) การคัดแยกเบื้องต้นและการแยกส่วนวัสดุให้สามารถ

นำกลับไปทำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีก ทั้งนี้มีเพียงระดับทางเลือกที่ 1 และที่ 2 ที่สามารถคุ้มทุนได้โดยตัวเอง อย่างไรก็ดีปริมาณของเสียที่เกิดมากขึ้นจะทำให้ต้นทุนต่อหน่วยลดลง

10. ภาครัฐควรสนับสนุนให้เอกชนเช่นโรงคัดแยกขยะปัจจุบันหรือกลุ่มของผู้ผลิตรวมตัวกันหรือกลุ่มที่มีหน้าที่ต้องจัดการกับขยะของเสียอิเลคทรอนิคส์อยู่แล้ว เป็นผู้ตั้งและดำเนินการรวบรวม ถอดแยก และทำการรีไซเคิลหรือส่งต่อไปยังกระบวนการผลิตต่อไป ทั้งนี้จุดคัดแยกและรีไซเคิลขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิดความคุ้มทุนได้ง่ายกว่า ปริมาณของเสียจากมุมมองที่ 2 พบว่าภายในปี 2588 เราจะมีปริมาณของเสียจากการติดตั้งจริงของแผงพลังงานแสงอาทิตย์สะสมถึงสิ้นปี 2558 ในราว 257,409 - 377,532 ตัน

11. จากจำนวนน้ำหนักของเสียแผงที่มีเป็นจำนวนถึง 257,408 - 377,377 ตันภายในปี 2588 ตามการพยากรณ์ในมุมมองที่ 2 แผงเหล่านี้มีวัตถุดิบที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยหากพิจารณาถึงปริมาณที่มากจะได้แก่ กระจก อลูมิเนียม และทองแดง หากพิจารณาถึงมูลค่าจะพบโลหะเงินถึง 8 - 13 ตันและยังมีโลหะหายากเช่นอินเดียม แกลเลียม และเทลลูเรียมอีกด้วย การนำกลับมาใช้ใหม่นอกจากจะเป็นการประหยัดแหล่งทรัพยากรแล้วยังเป็นการป้องกันปัญหาด้านมลพิษโดยเฉพาะจากการชะละลายของตะกั่วและแคดเมียมอีกด้วย

12. ภาระกิจเร่งด่วนของหน่วยงานภาครัฐ ได้แก่ การจัดระบบการขึ้นทะเบียนของเสียที่สามารถครอบคลุมแผงตามบ้านได้ การจัดทำแนวทางปฏิบัติที่ละเอียดเพียงพอ การบังคับใช้กฎหมาย การจัดตั้งและดำเนินการศูนย์รวบรวมและคัดแยก การสนับสนุนการใช้ของเสียในภาคอุตสาหกรรมและการจัดทำมาตรฐานวัตถุดิบ การวิจัยและการบริหารจัดการเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนการวิเคราะห์ผลกระทบด้านบวกของการนำของเสียเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่

# *ภาคผนวก ก*

# *ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้เกี่ยวข้องหลัก*

# ภาคผนวก ก
# ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้เกี่ยวข้องหลัก

ในงานวิจัยนี้ คณะนักวิจัยได้ออกสัมภาษณ์และสอบถามผู้เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมากทั้งภาครัฐและภาคเอกชนที่เกี่ยวข้อง ส่วนหนึ่งของการสัมภาษณ์ที่มีความน่าสนใจสูงได้มีการนำเสนอตามลำดับดังนี้

**ภาครัฐ**

**ก.1 คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.)**

**ผู้ให้สัมภาษณ์:** คุณพรชัย ปฏิภาณปรีชาวุฒิ

รองเลขาธิการ สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.)

- **อำนาจ และหน้าที่ของ กกพ.ที่เกี่ยวข้องกับการออกใบอนุญาตโรงไฟฟ้าพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์**

กกพ. มีอำนาจหน้าที่ในการออกใบอนุญาตโรงไฟฟ้าประเภทต่างๆ รวมไปถึงการจัดการอุปกรณ์และแผงเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ที่เสื่อมสภาพด้วย ไม่ว่าแผงนั้นจะเสื่อมระหว่างการดำเนินการผลิตไฟฟ้าของโรงงานหรือเมื่อหมดอายุแล้ว

- **ใครควรมีส่วนเกี่ยวข้อง และเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายดำเนินการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า**

  ควรจะอยู่ในกลุ่มผู้เกี่ยวข้องเช่น ผู้ผลิตหรือผู้ใช้

- **ปัญหาและอุปสรรคการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า มีอะไรบ้าง**

  การสำแดงปริมาณการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์และข้อมูลกำลังการผลิตที่แจ้งต่อ กกพ.

- **ข้อเสนอแนะแนวทางเพื่อนำไปสู่ นโยบายการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า**

  อยากให้นักวิจัยไปหาข้อมูลแล้วจัดเวทีระดมสมองโดยเฉพาะเรื่องขยะจาก Solar rooftop

**ก.2 สำนักงานโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.)**

**ผู้ให้สัมภาษณ์:** ดร.ทวารัฐ สูตะบุตร

ผู้อำนวยการสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน

- **อำนาจ และหน้าที่ของ สนพ.ที่เกี่ยวข้องกับการออกใบอนุญาตโรงไฟฟ้าพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์**

  สนพ. เป็นหน่วยงานวางนโยบายพลังงานของประเทศ ไม่มีหน้าที่ออกใบอนุญาตโดยตรง

- **ใครควรมีส่วนเกี่ยวข้อง และเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายดำเนินการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า**

  ควรพิจารณาจากข้อมูลต่างประเทศแล้วปรับใช้ให้เหมาะกับประเทศไทย

- **ปัญหาและอุปสรรคการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า มีอะไรบ้าง**

  ควรทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

- **ข้อเสนอแนะแนวทางเพื่อนำไปสู่นโยบายการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า**

  ควรหารือเพื่อขอความเห็นจากทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง

**ก.3 กรมโรงงานอุตสาหกรรม (กรอ.)**

**ผู้ให้สัมภาษณ์:** ดร.จุลพงษ์ ทวีศรี รองอธิบดีกรอ.

คุณอภิวัตน์ เธียรพิรากุล ผู้อำนวยการส่วนอนุญาตการประกอบการ

คุณนุชนาถ สุพรรณศรี ผู้อำนวยการส่วนวิชาการสำนักกากอุตสาหกรรม

- **อำนาจ และหน้าที่ของ กรอ.ที่เกี่ยวข้องกับการออกใบอนุญาตโรงไฟฟ้าพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์และการจัดการของเสีย**

กรมโรงงานอุตสาหกรรมมีหน้าที่ในการตรวจสอบเอกสาร และให้ความเห็นชอบกับ กกพ. ในการออกใบอนุญาตในการจัดตั้งโรงงาน (รง.4) และโรงไฟฟ้า (โรงงานประเภทที่ 88) ควบคุมและกำกับการดำเนินการโรงไฟฟ้า รวมไปถึงกำหนดบทลงโทษต่างๆ ในส่วนของของเสีย กรอ.มีอำนาจในการกำกับดูแลของเสีย ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และพรบ.วัตถุอันตราย

- **ใครควรมีส่วนเกี่ยวข้อง และเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายดำเนินการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า**

  ถ้าเป็นโรงไฟฟ้า เจ้าของโรงไฟฟ้าต้องดูแลของเสียตัวเอง ถ้าเป็น rooftop ยังไม่ชัดเจน

- **การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า ระหว่างการดำเนินการ และหลังจากโรงไฟฟ้าหมดอายุ มีส่วนใดเกี่ยวข้องกับ กรอ. และ กรอ. มีมาตรการกำกับดูแล อย่างไร**

กรอ. ทำหน้าที่ออกใบอนุญาตให้กับโรงงานประเภท 101 105 106 ที่เป็นโรงงานที่เกี่ยวของกับการจัดการขยะมูลฝอย และการรีไซเคิล รวมไปถึงประกาศของกรมเกี่ยวกับวิธีการกำจัดของเสียอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ

- **การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า ในส่วนของ Solar Rooftop นั้นอยู่ในความรับผิดชอบของ กรอ. หรือไม่**

การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบบ rooftop ในปัจจุบันยังไม่อยู่ในขอบเขตอำนาจของ กรอ. เนื่องจากไม่เข้าข่าย พรบ.โรงงาน เนื่องจากนิยามของการเป็นโรงงาน ซึ่งทางกรอ. ให้ความเห็นว่า กระทรวงพลังงานหรือ กกพ. น่าจะสามารถเป็นผู้มีอำนาจควบคุมจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้ได้เนื่องจากเป็นผู้ขายไฟฟ้า โดยอาจจะมีการระบุในเงื่อนไขสัญญาว่าจะต้องมีการจัดการแผงอย่างถูกหลักวิชา

- **ใครมีหน้าที่ในการดูแลการจัดการสถานที่สำหรับกระบวนการถอดแยก (decommission) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า และใครมีหน้าที่ในการจัดการขยะจากกระบวนการดังกล่าว**

ปัจจุบันยังไม่มีหน่วยงานที่มีหน้าที่ในส่วนนี้ แต่ กรอ. น่าจะมีความพร้อมในการกำกับดุแลมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยงานอื่นๆ

- **ความพร้อมของ กรอ. และโรงงานประเภท 101 105 และ 106 ภายในประเทศ ในการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าในอนาคตนั้นมีมากน้อยเพียงใด**

ปัจจุบันมีการนำขยะอิเล็กทรอนิคส์ไปกำจัดด้วยการฝังกลบใน secured แและfill และเผา ในส่วนของโรงงานประเภท 106 มีการกล่าวถึงบริษัทที่สามารถรับขยะอิเล็กทรอนิคส์ไปรีไซเคิล

ในกรณีของโรงงานที่สามารถนำของเสียไปใช้ประโยชน์ (สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์) คือ โรงงานผลิตควอตซ์ นั้นจะต้องจดทะเบียนโรงงานประเภท 106 หรือไม่นั้น ทาง กรอ. ระบุว่า ต้องมีการจดทะเบียนโรงงาน

ลำดับที่ 106 เพิ่มเติมขึ้น เนื่องจากเป็นการนำกากมารีไซเคิลเป็นกระบวนการเพิ่มเติมใหม่ ซึ่งต่างกับกรณีของโรงงานผลิตพลาสติกที่มีการระบุในนิยามว่าสามารถนำเศษพลาสติก หรือเม็ดพลาสติกเก่ามาเป็นวัตถุดิบได้

- **ภาคส่วนของเอกชนควรเข้ามามีส่วนร่วมอย่างไรในการเก็บ การกำจัด หรือ รีไซเคิล แผง ในมุมมองและจากประสบการณ์ กรมโรงงาน**

**ผู้ผลิต** ควรมีหน้าที่เป็นผู้เรียกคืนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า หรือจัดตั้งศูนย์เรียกคืนเพื่อนำไปดำเนินการถอดแยก รีไซเคิล และกำจัด โดย**ผู้ใช้แผง**จะเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายในการดำเนินการฯ

- **ปัญหาและอุปสรรคการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า มีอะไรบ้าง**

การประชาสัมพันธ์ ความคาบเกี่ยวกับร่าง พรบ. ซากอิเลคทรอนิคส์ ความพร้อมของผู้ประกอบการรีไซเคิลในประเทศ เจ้าของแผง และผู้ผลิต

- **ข้อเสนอแนะแนวทางเพื่อนำไปสู่ นโยบายการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า**

ควรจะจัดสัมมนาเพื่อหารือแนวทางอย่างครบวงจร ทั้งด้านกฎหมาย เทคนิค ทรัพยากรสิ่งแวดล้อมและการเงิน

<u>ภาคเอกชน</u>

**ก.4 บริษัท โซล่าร์ตรอน จำกัด (มหาชน)**

**ผู้ให้สัมภาษณ์**: ดร.ภาวัน สยามชัย

กรรมการ และประธานเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ บริษัท โซล่าร์ตรอน จำกัด (มหาชน)

- **อายุการใช้งานแผงโดยเฉลี่ยขอแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุเท่าไร ในสภาพการทำงานปกติ แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีโอกาสเสียหายได้จากสาเหตุใดบ้าง**

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานในปัจจุบันอย่างแพร่หลายคือ Si-Base โดยมีปริมาณมากกว่า 90% ของจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งทั้งหมดในประเทศไทย โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระเภทนี้จะมีอายุโดยเฉลี่ย 25 ปี ในสภาพการทำงานปกติแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีโอกาสเสียหายได้ในกรณีต่างๆ ดังนี้

1) Manufacturing Defect เช่น มีฝุ่นโลหะ หรือฟองอากาศติดอยู่ภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กระจกนิรภัยปิดหน้าแผงเซลล์แตกร้าวเนื่องจากการประกอบแผง

2) Junction Box ชำรุด

3) ไฟฟ้าลัดวงจร

4) Potential Induced Degradation (PID)”

- **บริษัท โซล่าร์ตรอน จำกัด (มหาชน) มีโซล่าร์ฟาร์มกี่แห่ง**

บ.โซล่าร์ตรอน ไม่มีโซล่าร์ฟาร์มของตัวเอง ทำหน้าที่เป็น Supplier และ OEM ให้ Solar Farm 144 MW และ Rooftop 5 MW

- **การกำจัด และรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานของบริษัทเป็นอย่างไร**

ส่งให้บริษัทเอกชนอื่นๆเป็นผู้นำไปกำจัด

- **ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอะไรบ้าง**

1. Quartz
2. EVA
3. Cell: Si
4. EVA
5. Backsheet: PET, PTFE
6. Junction Box
7. Frame: Aluminium

**ก.5 บริษัท ลีโอ อิเลคทรอนิคส์ จำกัด**

**ผู้ให้สัมภาษณ์:** คุณธงชัย วัฒนวรเวทย์ กรรมการผู้จัดการ

ดร.วุฒิพงศ์ สุพนธนา กรรมการผู้จัดการบริษัท ลีโอ อิเลคทรอนิคส์ จำกัด

- **อายุการใช้งานโดยเฉลี่ยของอินเวอร์เตอร์มีอายุเท่าไร ในสภาพการทำงานปกติอินเวอร์เตอร์มีโอกาสเสียหายได้เมื่อใด**

อินเวอร์เตอร์มีอายุการใช้งานเฉลี่ยอยู่ที่ 10 ปี โดยในสภาพการทำงานปกตินั้นอินเวอร์เตอร์จะมีโอกาสเสียหายได้จากการชำรุดของตัวเก็บประจุ

- **การกำจัด และรีไซเคิลอินเวอร์เตอร์ที่หมดอายุการใช้งานของบริษัทเป็นอย่างไร**

การกำจัดอินเวอร์เตอร์ สามารถถอดแยกส่วนประกอบแล้วนำส่วนที่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ เช่น อลูมิเนียม เหล็ก ทองแดงไปใช้ใหม่ได้ ส่วนที่ไม่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ให้นำไปกำจัด คือ แผงวงจร

- **องค์ประกอบของสารแต่ละชนิดในอินเวอร์เตอร์นั้นมีอะไรบ้าง**

  อลูมิเนียม เหล็ก ทองแดง แผงวงจร

- **การรีไซเคิลอินเวอร์เตอร์ที่หมดอายุการใช้งานนั้นมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนหรือไม่**

  ต้องดูว่าชิ้นส่วนที่ยังพอใช้งานได้นั้นมีมูลค่าเท่าใด

**ก.6 ผู้รับเหมาโครงการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Rooftop**

- **ปกติในการติดตั้งแผงมีความเสียหายสักกี่เปอร์เซนต์**

  แล้วแต่ความชำนาญของผู้ติดตั้ง แต่ส่วนใหญ่ไม่ค่อยเสียระหว่างติดตั้งเพราะติดทีละไม่กี่แผ่น

- **เมื่อติดตั้งไปแล้วมีความเสียหายสักกี่เปอร์เซนต์**

  ตอบไม่ได้เพราะเพิ่งติดตั้งจริงจังไม่เกินหนึ่งปี

- **ถ้าเสียหายแล้วจะไปทิ้งที่ไหน**

  ฝากทิ้งกับรถขยะที่รู้จักกัน ถ้าปริมาณไม่มาก

- **ถ้ามีค่าการจัดการแผงเสียหายใครควรเป็นคนจ่าย**

  ขึ้นกับว่าเสียจากเหตุใด แต่ถ้าเจ้าของบ้านได้ประโยชน์จากการขายไฟไปแล้วก็ควรเป็นผู้จ่ายค่ากำจัด

**ก.7 ผู้รับเหมาโครงการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟาร์ม**

- **ปกติในการติดตั้งแผงมีความเสียหายสักกี่เปอร์เซนต์**

  ไม่มากเพราะเป็นต้นทุนที่ต้องระวังอยู่แล้ว

- **เมื่อติดตั้งไปแล้วมีความเสียหายสักกี่เปอร์เซนต์**

  ปีละไม่เกิน 0.5%

- **ถ้าเสียหายแล้วจะไปทิ้งที่ไหน**

  ส่วนใหญ่เจ้าของฟาร์มมักมีประกันแผงจากผู้ผลิต

- **ถ้ามีค่าการจัดการแผงเสียใครควรเป็นคนจ่าย**

  ถ้าหมดอายุการใช้งานหรือเสื่อมประสิทธิภาพ เจ้าของฟาร์มน่าจะเป็นคนรับผิดขอบ

**ก.8 ผู้บริหารโรงพยาบาลเจ้าของ Solar rooftop ขนาด 100 kW**

- **ปกติในการติดตั้งแผงมีความเสียหายสักกี่เปอร์เซนต์**

  จำไม่ได้เพราะเป็นสิบปีมาแล้ว

- **เมื่อติดตั้งไปแล้วมีความเสียหายสักกี่เปอร์เซนต์**

  ไม่มียังอยู่ครบ

- **ถ้าเสียหายแล้วจะไปทิ้งที่ไหน**

  ไม่ต้องทิ้ง

- **ถ้ามีค่าการจัดการแผงเสียใครควรเป็นคนจ่าย**

  เจ้าของแผงยินดีจ่าย เพราะได้รับผลประโยชน์คุ้มราคา แต่ไม่รู้จะให้หน่วยไหนรับกำจัดตามกฎหมายดี

**ก.9 ผู้บริหารโซล่าร์ฟาร์ม**

- **ปกติในการติดตั้งแผงมีความเสียหายสักกี่เปอร์เซนต์**

  ไม่ทราบเพราะมีประกัน

- **เมื่อติดตั้งไปแล้วมีความเสียหายสักกี่เปอร์เซนต์**

  ช่วงน้ำท่วมเสียหายมาก แต่มีประกัน ได้ของใหม่มาทดแทน 100%

- **ถ้าเสียหายแล้วจะไปทิ้งที่ไหน**

  ไม่ทราบ บริษัทประกันเอาไปจัดการ

- **ถ้ามีค่าการจัดการแผงเสียใครควรเป็นคนจ่าย**

  ถ้าหมดอายุ เจ้าของฟาร์มพร้อมทำตามกฎหมาย

**ก.10 วิศวกรบริษัทหลุมฝังกลบขยะอุตสาหกรรม**

- **ถ้าแผงเสียหายแล้วจะไปทิ้งที่ไหน อย่างไร**

  มีคำถามเหมือนกันว่าถ้าถอดชิ้นส่วนเช่นอลูมิเนียม กระจกไปขายแล้ว ชิ้นส่วนอื่นๆจะนำไปผสมปูนซีเมนต์ อัดก้อนแล้วฝังได้หรือไม่ มีที่ใดรับรีไซเคิลครบวงจรหรือไม่

- **ถ้ามีค่าการจัดการแผงเสียใครควรเป็นคนจ่าย**

  ที่ทิ้งมาเจ้าของแผงเองเป็นผู้จ่าย แผงเป็นแผงที่แตกเองระหว่างใช้งาน ยังไม่หมดอายุ

**ก.11 โรงคัดแยกขยะ คุณธนวรรณ**

- **โรงคัดแยกขยะสนใจแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าไหม**

  สนใจเฉพาะส่วนประกอบที่สามารถนำไปขายได้เลย ไม่ยุ่งยาก เช่น อลูมิเนียม สายไฟ เหล็ก

- **ในส่วนของกระจกล่ะ ?**

  ไม่รับ เพราะมีการปนเปื้อนสารเคมี

- **ในแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีส่วนประกอบที่เป็นกระจกในปริมาณมากนะ**

  ไม่รับเพราะที่แยกไม่ได้ต้องเสียเงินกำจัดไม่งั้นโดนจับ

- **ส่วนประกอบใดที่โรงคัดแยกไม่สามารถแยกได้**

  พวกแผงเซลล์ กระจก

- **ในแผงเซลล์มีของมีค่า โรงคัดแยกฯไม่สนใจรับคัดแยก**

  ไม่เอาเพราะไม่มีทุนทำ แค่นี้ก็ยุ่งแล้ว

- **มีข้อแนะนำอย่างไรสำหรับการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า**

  รัฐบาลควรหาผู้เชี่ยวชาญทำ

# *ภาคผนวก ข*

# *ข้อมูลจากงานสัมมนาที่เกี่ยวกับการเกิด การถอดแยก รวบรวม การขนส่ง จุดรวบรวม*

# ภาคผนวก ข

## ข้อมูลจากงานสัมมนาที่เกี่ยวกับการเกิด การถอดแยก รวบรวม การขนส่ง จุดรวบรวม

วันที่ 28 กรกฎาคม 2559 ณ ห้องกมลทิพย์ โรงแรมเดอะสุโกศล

ในการสัมมนาฯ สามารถสรุปประเด็นคำถาม-คำตอบได้เป็น 3 ประเด็นหลัก ดังนี้

**1. รูปแบบในการจัดการฯ**

ในการสัมมนาฯ ได้มีการเสนอแนวคิดของรูปแบบในการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้านั้นคือ จะต้องมีการจัดตั้งศูนย์ถอดแยกชิ้นส่วนแผงฯ ขึ้นเพื่อแยกนำส่วนประกอบต่างๆของแผงไปเข้าสู่กระบวนการกำจัด และรีไซเคิลต่อไป แต่สิ่งที่ควรเกิดขึ้นก่อนเพื่อให้การจัดการดังกล่าวนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นคือการจัดตั้งศูนย์วิจัยเพื่อหาเทคโนโลยีในการจัดการฯที่มีความคุ้มทุน มีความเหมาะสมกับการจัดการแผงฯ ในประเทศไทยจากนั้นจึงพัฒนาให้อยู่ในระดับ Commercial Scale ทั้งนี้อาจให้รัฐ หรือหน่วยงานด้านการศึกษาเป็นผู้จัดตั้งศูนย์วิจัยฯ ขึ้นเพื่อสนับสนุนองค์ความรู้ให้กับภาคเอกชน และให้เอกชนเข้ามาลงทุนในภายหลัง

**2. หน่วยงานที่ทำหน้าที่บริหารจัดการฯ**

ในการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดความคุ้มค่านการผลิตไฟฟ้านั้นจะต้องมีผู้ที่รับผิดชอบในการเก็บรวบรวมแผงฯจากผู้ใช้ ซึ่งในความเป็นจริงนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างนาน (ประมาณ 25 ปี) ถ้าจะให้บริษัทผู้ผลิต-ผู้นำเข้าเป็นผู้รับผิดชอบก็อาจมีบริษัทที่เลิกกิจการในระหว่างนั้น จำเป็นจะต้องมีหน่วยงานที่ทำหน้าที่กำกับดูแลกระบวนการจัดการฯขึ้น โดยขั้นแรกให้ผู้ใช้ติดต่อกับบริษัทผู้ผลิต – นำเข้า ถ้าหากบริษัทนั้นเลิกกิจการถึงจะติดต่อกับหน่วยงานเพื่อให้ประสานงานกับบริษัทรายอื่นในพื้นที่เพื่อดำเนินการเก็บรวบรวมแผงฯ ซึ่งค่าใช้จ่ายของบริษัทในการดำเนินการดังกล่าวนั้นจะได้รับการอุดหนุนจากหน่วยงานที่ทำหน้าที่กำกับดูแล และผู้รับผิดชอบในการถอดการติดตั้งแผงนั้นควรเป็นบริษัทที่ประกอบกิจการด้านการติดตั้งแผงฯ หรือ EPC เนื่องจากมีความชำนาญในด้านนี้ ซึ่งในการสัมมนาได้มีข้อคิดเห็นคือ ในกรณีที่ให้ราชการรับหน้าที่ในการบริหารจัดการฯนั้น คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงเป็นผู้รับหน้าที่ในการกำกับดูแลการจัดการแผงฯ และในกรณีที่จะให้เอกชนรับหน้าที่ในการบริหารจัดการฯนั้นจะเป็นลักษณะของการรวมกลุ่มของบริษัทที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่ของการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คล้ายกับกลุ่ม PV Cycle ในทวีปยุโรป ทำหน้าที่ในการบริหารจัดการตั้งแต่การเก็บรวบรวม ถอดแยกส่วนประกอบแผงฯ รีไซเคิล และกำจัด

3. **ค่าใช้จ่ายในการจัดการฯ**

**กองทุน**

ในการสัมมนามีการแสดงความคิดเห็นว่าควรจัดตั้งกองทุนเพื่อรวบรวมเงินภาษีที่เก็บจากการซื้อ-ขายแผงฯ เพื่อใช้เป็นเงินทุนในการบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า แต่ก็มีข้อขัดแย้งในเรื่องของ พรบ.ที่ผ่านคณะรัฐมนตรี รวมถึงความเห็นของนายกฯที่มีต่อการจัดตั้งกอทุนขึ้นมาใหม่ว่าเป็นการสร้างภาระขึ้น ในขณะเดียวกันถ้าใช้กองทุนอื่น เช่น กองทุนสิ่งแวดล้อม เป็นกองทุนที่รับเงินในส่วนนี้ก็จะไม่มีความเหมาะสม เนื่องจากผิดวัตถุประสงค์ของกองทุนฯ

**การเก็บภาษี**

การเก็บภาษีเพื่อเป็นทุนสำหรับการดำเนินการจัดการแผงฯนั้นในการสัมมนาได้มรการเสนอแนวคิดให้เก็บเป็นภาษีคล้ายๆ ภาษีน้ำมัน หรือภาษีสรรพสามิตเมื่อมีการซื้อ-ขายแผงฯ โดยจะต้องมีการแสดงเงินในส่วนนี้และกันออกมาให้ชัดเจน แต่วิธีดังกล่าวนั้นมีข้อจำกัดคือ ประเทศไทยมีการเปิดเสรีการค้า หรือ AEC ทำให้อาจมีแผงฯบางส่วนที่เข้าประเทศมาโดยไม่ได้ผ่านด่านศุลกากร ก็จะทำให้มีผู้นำเข้าไม่เสียภาษีในส่วนนี้ หรือถ้าหากเป็นการเก็บภาษีจากผู้ใช้ จะทำให้เป็นการรับภาระให้กับแผงที่ด้อยคุณภาพได้

# *ภาคผนวก ค*

# *ข้อมูลจากงานสัมมนาที่เกี่ยวกับการรีไซเคิล และการกำจัดตามความพร้อมในปัจจุบัน*

# ภาคผนวก ค

## ข้อมูลจากงานสัมมนาที่เกี่ยวกับการรีไซเคิล และการกำจัดตามความพร้อมในปัจจุบัน

วันที่ 28 กรกฎาคม 2559 ณ ห้องกมลทิพย์ โรงแรมเดอะสุโกศล

**<u>ครึ่งบ่าย</u>**

1. **หน้าที่ของภาครัฐในการกำกับดูแลการผลิตพลังงานฯ**

ในการสัมมนาได้มีการเสนอแนวคิดเรื่องหน้าที่ของภาครัฐในการกำกับดูแลการผลิตพลังงานโดยให้มีการกำหนดสัดส่วนการผลิตพลังงานประเภทต่างๆในแต่ละพื้นที่ และอำนาจหน้าที่ของภาครัฐในการกำกับดูแล เช่น กระทรวงกลาโหมเข้ามาดูแลเรื่องความปลอดภัย กระทรวงมหาดไทยดูแลเรื่องความสงบเรียบร้อย กระทรวงทรัพย์ดูแลเรื่องดูแลเรื่องสิ่งแวดล้อม กระทรวงพลังงานวางแผนเรื่องการใช้พลังงานอะไร เชื้อเพลิงอะไร กระทรวงอุตฯ วางแผนเอาไฟส่งไปที่ไหน อย่างไร ให้กับใคร กระทรวงศึกษาธิการดูประโยชน์ที่จะได้รับจากการมีโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น และกระทรวงอื่นที่เกี่ยวข้องมาบูรณาการในภาพรวมเพื่อการจัดการทั้งประเทศ

2. **กระบวนการรวบรวม คัดแยก ถอดแยก และรีไซเคิล**

   ก. **ศูนย์วิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิล**

   มีการเสนอข้อคิดเห็นให้มีการจัดตั้งศูนย์วิจัยโดยภาครัฐ หรือหน่วยงานด้านการศึกษาเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีในการรีไซเคิลให้สามารถใช้ได้จริงในเชิงธุรกิจ (Commercial Scale) และให้มีผู้ประกอบการภาคเอกชนเข้ามาดูงาน และซื้อลิขสิทธิ์หรือใบอนุญาตเพื่อจัดตั้งโรงงานรีไซเคิล โดยจะต้องอยู่ภายใต้การกำกับ ควบคุมดูแลจากหน่วยงานฯ เพื่อป้องกันปัญหาเรื่องมลพิษ

   ข. **ตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์รวบรวม คัดแยก และรีไซเคิล**

   ในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์รวบรวม คัดแยก และรีไซเคิลนั้นขึ้นอยู่กับว่าสิ่งที่เราคาดหวังว่าจะได้นั้นคือ แผงเวเฟอร์ใหม่ หรือความสะดวกในการรวบรวมแผงฯที่หมดความคุ้มค่า ถ้าเป็นกรณีแรกจะต้องเอาตัวโรงงานที่จะผลิตเวเฟอร์เนี่ยเป็นตัวตั้งนะครับ แต่ว่าถ้าเกิดไปอยู่ใกล้โรงงาน Solar Farm มันง่ายต่อการบริหารจัดการกว่า ในกรณีที่แผงมีการแตกหัก ในว่นของคุณภาพของแผงที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลนั้นจะมีการจัดทำนโยบายเสนอนายกฯให้พิจารณาจัดตั้งโรงงานผลิตซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์ในระดับ electronics grade ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูง แต่โรงงานในปัจจุบันที่ประเทศไทยนั้นสามารถผลิตซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์ในระดับ metallurgy grade มี 3 โรงงานในจังหวัดราชบุรี และกาญจนบุรี

   ค. **การเก็บแผงฯก่อนส่งเข้ากระบวนการคัดแยก และรีไซเคิล**

ในการจัดเก็บแผงเพื่อรอส่งเข้ากระบวนการคัดแยก และรีไซเคิลนั้น สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการกำหนดหลักเกณฑ์นี้ขึ้น แต่โดยหลักการแล้ว มีความจำเป็นที่จะต้องจัดเก็บในที่แห้ง ลดโอกาสที่ตัวแผงฯ จะสัมผัสกับน้ำ เพื่อป้องกันการชะเอาสารพิษด้วยน้ำออกมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแผงฯที่มีสารจำพวกโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ เช่น กลุ่ม thin film ได้แก่ CdTe และ CIGS เป็นต้น

**ง. กรรมวิธีในการรีไซเคิล**

กรรมวิธีในการรีไซเคิลแผงซิลิกอนมี 2 ส่วนคือ แผงที่หมดความคุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้า และแผงที่เกิดการแตกหัก โดยในส่วนของแผงที่เกิดการแตกหักนั้นจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการถลุงซิลิกอนใหม่ ซึ่งมีอุตสาหกรรมนี้ในไทยแล้วดังกล่าวในข้างต้น แต่สำหรับในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางนั้น จะใช้วิธีการถอดแยกส่วนประกอบต่างๆออก แล้วน้ำตัวเซลล์มาบด และนำไปละลายในสารเคมี สารเคมีก็จะกัดตัวที่เป็นโซลาร์เซลล์ semi-conductor ออกมาจากแก้วที่ติดกับตัวฟิล์ม จากนั้นจึงกรองเอาแก้วออก และสารละลายเคมีก็จะประกอบไปด้วยแคดเมียม ซัลเฟอร์ และอื่นๆที่ประกอบเป็นตัวโซลาร์เซลล์ จากนั้นจึงใช้กระบวนการทางเคมี ตกผลึกธาตุที่ 1 ธาตุที่ 2 ธาตุที่ 3 และแยกออกมาตามลำดับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายสูงมาก รวมไปถึงต้องใช้น้ำปริมาณมากในกระบวนการดังกล่าว

**จ. รูปแบบของกระบวนการรวบรวม และคัดแยกในอนาคตของประเทศ**

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานในประเทศส่วนใหญ่เป็นกลุ่มซิลิกอน ซึ่งประเทศไทยอาจจะใช้เทคโนโลยีการรีไซเคิลที่เหมือนกับหลายๆประเทศได้ แต่สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางนั้นอาจจะใช้วิธีส่งไปกำจัดในต่างประเทศเนื่องจากมีต้นทุนที่สูง ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน

ในส่วนของกระบวนการคัดแยกคาดว่าจะมีลักษณะคล้ายร้านรับซื้อของเก่าที่จะมีการถอดแยกชิ้นส่วนออกมา และดูว่าในแผงฯมีอะไรที่สามารถนำไปใช้ต่อได้ เอาไปทำอะไรต่อได้ เอาไปขายต่อมีมูลค่า แล้วนำมาตีราคา ซึ่งตัวกลไกตลาดจะทำให้กะบวนการนี้สามารถดำเนินไปได้

**3. ผู้มีส่วนได้เสียในกระบวนการจัดการแผงฯ**

**ก. หน้าที่**

ผู้ที่ได้ประโยชน์จากแผงฯจำเป็นจะต้องมีส่วนร่วมในการรับผิดชอบในกระบวนการจัดการแผงฯที่หมดความคุ้มค่า ไม่ควรให้รัฐบาลเป็นผู้รับภาระในการจัดการฯ โดยจะต้องรับภาระทุกภาคส่วน คิดเป็นสัดส่วนโดยใช้หลักทางเศรษฐศาสตร์ รวมไปถึงการชี้แจงต่อประชาชนในเรื่องของผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นในการจัดตั้งสถานประกอบการรวบรวม คัดแยก และรีไซเคิลแผงฯที่เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการจัดการแผงฯ

**4. บุคลากรที่ใช้ในกระบวนการคัดแยก รีไซเคิล**

บุคลากรในกระบวนการคัดแยก และรีไซเคิลแผงฯนั้นไม่จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการคัดแยกแผงฯ ประเภทต่างๆออกจากกัน เนื่องจากแผงแต่ละประเภทนั้นมีความแตกต่างกันอยู่ค่อนข้างชัดเจนทั้งในเรื่องลักษณะ รูปร่างของเซลล์ สี แต่สิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาอย่างมากคือเรื่องความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน เนื่องจากในกระบวนการดังกล่าวนั้นจะมีฝุ่นผงที่เกิดจากการแตกหักของตัวแผง การทำเวเฟอร์ที่มีการขัดผิว ซึ่งกรณีดังกล่าวในต่างประเทศนั้นมีการรายงานว่าคนงานกลุ่มนี้เป็นมะเร็งสูงมาก ซึ่งสามารถลดความเสี่ยงพวกนี้ได้ด้วยการส่งบุคลากรที่เกี่ยวข้องไปดูงาน อบรม ในส่วนของมาตรฐาน การปฏิบัติงานในต่างประเทศ

# แหล่งอ้างอิง

Auer, A. (2015). Photovoltaic module decommissioning and recycling in Europe and Japan : current methodologies, norms and future trends. (European Master in Environmental Science), Swedish University ofAgricultural Sciences, Uppsala. Retrieved from http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:slu:epsilon-s-4105

AVANCIS. (2013). PowerMax® 3.5: Technical specifications. Retrieved from http://www.avancis.de/en/cis-solar-modules/powermax-smart/ [Accessed 1 Feb. 2016]

Billlimoria, S. and Defrenne, N. (2013). The Evolution of photovoltaic wastes in Europe. Retrieved from http://www.sandtconsulting.eu/app/download/6093396/The+evolution+of+photovoltaic+waste+in+Europe.pdf. [Accessed 7 Mar. 2016]

Bine Informationsdienst. (2010). Recycling of photovoltaic modules Projekt info. (pp.4) Retrieved from http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Englische_Infos/projekt_0210_engl_internetx.pdf [Accessed 1 Feb. 2016]

Bio Intelligence Service. (2011). STUDY ON PHOTOVOLTAIC PANELS SUPPLEMENTING THE IMPACT ASSESSMENT FOR A RECAST OF THE WEEE DIRECTIVE. Retrieved from http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/Study%20on%20PVs%20Bio%20final.pdf. [Accessed 9 Mar. 2017]

Choi, J.-K., and Fthenakis, V. (2014). Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives. Journal of Cleaner Production, 66, 443-449. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.022

Environment Canada. (2012). Assessment of the environmental performance of solar photovoltaic technologies (Environment Canada, Trans.) (pp. 80).

European Commission DG ENV. (2011). STUDY ON PHOTOVOLTAIC PANEL SUPPLEMENTING THE IMPACT ASSESSMENT FOR A RECAST OF THE WEEE DIRECTIVE. (pp.86) Retrieved from http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/Study%20on%20PVs%20Bio%20final.pdf [Accessed 15 Feb. 2016]

European Union. (2012). Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE).

Federica Cucchiella, Idiano D'Adamo, Paolo Rosa. (2015). End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 47, July 2015, Pages 552-561, ISSN 1364-0321, http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.076.

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2015). Recent Facts about Photovoltaics in Germany (F. I. f. S. E. S. ISE, Trans.) (pp. 89): Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE.

Fthenakis V.M., Kim H.C. and Alsema E. (2008). Emissions from photovoltaic life cycles, *Environ. Sci. Technol., 42* (6), 2168-2174,

Goe, M., and Gaustad, G. (2014). Strengthening the case for recycling photovoltaics: An energy payback analysis. *Applied Energy*, 120, 41-48. doi: http://dx.doi.org/10.1016/ j.apenergy.2014.01.036

International Energy Agency. (2015). SNAPSHOT of PV Market 2014. (pp.16).: International Energy Agency.

International Renewable Energy Association. (2016). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Association

International Renewable Energy Association. (2016). RENEWABLE ENERGY CAPACITY STATISTICS 2016: International Renewable Energy Association.

Kiatpinyo, C. Local Made-up and Mid Stream Contents for Crystalline Silicon PV Industry, Solar Synergy Presentation 2012

Kittner, N., Gheewala, S. H., and Kamens, R. M. (2013). An environmental life cycle comparison of single-crystalline and amorphous-silicon thin-film photovoltaic systems in Thailand . Energy for Sustainable Development, 17(6), 605-614.

Leo Electronics Co., Ltd. (2016). G-4000-176. [image] Retrived from http://www.leonics.com/ product/renewable/inverter/dl/G-4000-176.pdf [Accessed 9 Feb. 2016]

Marco Raugei, Pere Fullana-i-Palmer, Vasilis Fthenakis. (2012). The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles, *Energy Policy*. Volume 45. Pages 576-582. ISSN 0301-4215,

Ministry of Economy, Trade and Industry. (2000). Law of Promotion of Effective Utilization of Resources.

Ministry of International Trade and Industry. (1998). Law for Recycling of Specified Kinds of Home Appliances.

Mohanty, P., Muneer, T., Gago, E. J., and Kotak, Y. (2016). Solar Radiation Fundamentals and PV System Components. In P. Mohanty, T. Muneer and M. Kolhe (Eds.), Solar Photovoltaic System Applications: A Guidebook for Off-Grid Electrification (pp. 7-47).

MonoSun Technology Co., Ltd. (2016). Solar Arrey. [image] Retrieved from http://www.taspower.com/gallery_monosun_installations. [Accessed 9 Feb. 2016]

N.C. McDonald and J.M. Pearce. (2010). Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules. *Energy Policy.* Volume 38 (11). Pages 7041-7047, ISSN 0301-4215,

Olson C., Geerligs B., Goris M., Bennett I., and Clyncke J. Current and Future Priorities for Mass and Material in Silicon PV Module Recycling, EUPVSEC, Paris 2013

Paiano, A. (2014). Photovoltaic waste assessment in Italy. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 41, p. 99-112.

Polar Wire Products Inc. (2016). Solar Cable [image]. Retrieved from http://www.polarwire.com/ images/solar-cable-web-collage.jpg [Accessed 9 Feb. 2016]

Poliskie, M. (2013). Solar Manufacturing: Environmental Design Concepts for Solar Modules: Environmental Design Concepts for Solar Modules: McGraw-Hill Education.

PV CYCLE. (2004). Recycling of solar modules – potential and requirement of a future materials flow /PV Cycle study 2004.SEL Groupe. (2016). Transformer. [image] Retrieved from http://en.sel-solutions.fr/images_ produit/zoom/418__9__img_1758jpg.jpg [Accessed 9 Feb. 2016]

Sharp Corporation. (2014, January 27). Sharp to Construct 52 MW Large-Scale Solar Power Generation Plant in Thailland. Retrieved from http://www.sharp-world.com/corporate/news/140127.html [Assessed 1 Feb. 2016]

Silicon Valley Toxic Coalition. (2009). Toward a Just and Sustainable Solar Energy Industry (pp. 48): S ilicon Valley Toxic Coalition,.

Solar Media. (2013). SOLAR BUSINESS FOCUS VOLUME 8: SOUTHEAST ASIA & OCEANIA PROJECT ROUNDUP. Retrieve from http://www.solarbusinessfocus.com/volumes/project-roundup/volume-8/southeast-asia-and-oceania. [Accessed 1 Feb. 2016]

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

Teng-Yu Wang. (2016). Recycling of Solar Cell Materials at the End of Life. Advances in Solar Photovoltaic Power Plants. Springer.

The Green Mechanics. (2012, April 13). 7.5MW Solar Farm in Thailand. Retrieved from http://www.thegreenmechanics.com/2012/04/75mw-solar-farm-in-thailand.html. [Accessed 1 Feb. 2016]

Wambach, K., Schlenker, S., Müller, A., and Konrad, B. A Voluntary Take Back Scheme and Industrial Recycling of Photovoltaic Modules, Solar World Presentation Retrieved from www.solarworld.de [Accessed 25 Feb. 2016].

Xakalashe, B.S. and Tangstad, M. (2011). Silicon processing: from quartz to crystalline silicon solar cells, Southern African Pyrometallurgy 2011, Edited by R.T. Jones & P. den Hoed, Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2556). รายงานสถานภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย ๒๕๕๕ – ๒๕๕๖ (pp. 40): กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ 2558 – 2579 (pp. 22): กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.