

การทบทวนวรรณกรรมทางวิชาการ ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม อาชีวอนามัย และความปลอดภัย ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ตลอดช่วงอายุการติดตั้งและใช้งาน

สุรวุฒิ ช่างโชติ^{1,2}, มนัสกร ราชอาณาจักร^{3,4}, ธารทิพย์ พันธุ์เมธาฤทธิ์³, ชนาธิป ผาจิโน^{3,4},
จุพาลักษณ์ ชาญกุล⁵, ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล⁶

¹ บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

⁵ ภาควิชาเทคโนโลยีอาคาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันราชภัฏพระนคร

⁶ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

สารแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) ที่ใช้ในเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ประสบความสำเร็จในด้านการแปลงพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ ต้นทุนการผลิตถูกผนวกกับความทนทานและประสิทธิภาพการใช้งานในที่สุดคุณสมบัติสูงปัจจุบันอัตราการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe PV) เติบโตอย่างรวดเร็วสารแคดเมียมเทลลูไรด์ในเซลล์แสงอาทิตย์มีศักยภาพที่ส่งเสริมให้สามารถเพิ่มขนาดการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้ใหญ่ขึ้น บทความวิชาการนี้ได้ประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม อาชีวอนามัยและความปลอดภัยของสารแคดเมียมเทลลูไรด์ในเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงการติดตั้งและตลอดช่วงอายุการใช้งาน ตั้งแต่การเลือกใช้วัตถุดิบ กระบวนการผลิต ขั้นตอนการใช้งาน และการจัดการหลังสิ้นสุดการใช้งานแล้ว โดยการทบทวนอาศัยข้อมูลจากรายงานผลทางวิทยาศาสตร์ บทความวิชาการ ที่เกี่ยวข้องกับประเด็นสิ่งแวดล้อม อาชีวอนามัยและความปลอดภัยของสารแคดเมียมเทลลูไรด์ในอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งครอบคลุมถึงเรื่องการประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และระยะเวลาคืนทุนของพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานทดแทนประเภทอื่นๆ

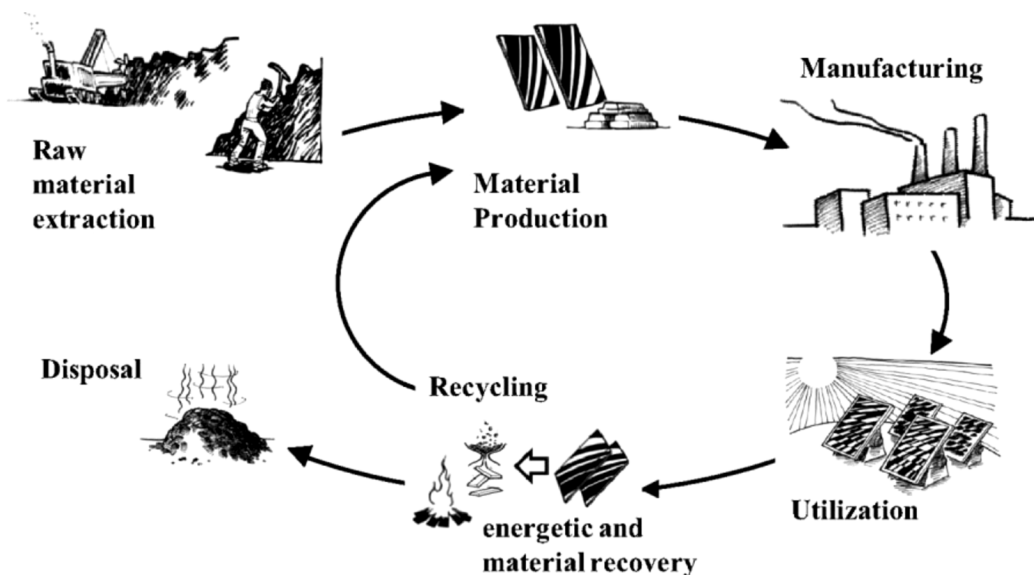
1. บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe PV) ผลิตจากเทคโนโลยีที่ใช้สารแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) ผสมกับแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เพื่อผลิตชั้นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าแบบฟิล์มบาง (Thin Film Semiconductor Layer) ที่ใช้สำหรับการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์และแปรผันเป็นพลังงานไฟฟ้า ในช่วงสองสามปีมานี้อัตราการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทซิลิกอน (Mehta, 2010) เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์มีการใช้งานประสิทธิภาพสูง ต้นทุนการผลิตต่ำ มีความทนทานในการใช้งาน และมีประสิทธิภาพดีในพื้นที่การใช้งานที่มีอุณหภูมิสูง (Zweibel et al., 2008)

การค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์เริ่มต้นในช่วงปี 1950 เมื่อมีการระบุว่า CdTe มีคุณสมบัติช่องว่างระหว่างพลังงาน (Energy Band Gap) ในช่วงเหมาะสมที่ประมาณ 1.5 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งช่วงดังกล่าวนั้นสอดคล้องสมบูรณ์กับการกระจายของโฟตรอนจากสเปกตรัมแสงอาทิตย์ ส่งผลให้เกิดการแปรผันพลังงานแสงสู่พลังงานไฟฟ้าได้อย่างสมดุล (Jenny and Bube, 1954; Goldstein, 1958) การออกแบบรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ (Heterojunction) ประเภท p-type ของ CdTe จับคู่ลงตัวกับประเภท n-type ของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยการเติมชั้นฟิล์มที่รอยต่อด้านบนและด้านล่างบริษัทชั้นนำในการผลิตในช่วงแรกช่วงปี 1960 ได้แก่ GE, Kodak, Monosolar, Matsushita, and AMETEK ในปี 1999 บริษัท Solar Cells Incorporated (SCI) ได้เปลี่ยนชื่อเป็น First Solar ซึ่งปัจจุบันเป็นบริษัทผู้นำด้านเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์

รายงานการศึกษาวงจรชีวิต (LCA) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับบัญชีรายการวัตถุดิบและพลังงานที่มีการไหลเข้าและออกจากผลิตภัณฑ์รวมถึงการประเมินผลกระทบก่อนหน้านี้มีการประยุกต์หลักการ LCA สู่การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการประเมินระยะเวลาคืนทุนของพลังงานและเพื่อลดการระบายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการศึกษาหลายบทความวิชาการต้องการให้มีการศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมของสารแคดเมียมเทลลูไรด์ในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยครอบคลุมประเด็นการรีไซเคิลแผ่นเซลล์สุริยะและการรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ใช้ช่วงเล็กใช้งานหรือหมดอายุ รูปภาพที่ 1 แสดงให้เห็นถึงช่วงวัฏจักรชีวิตของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์บทความนี้เน้นวิเคราะห์ในประเด็นสิ่งแวดล้อมอาชีวอนามัยและความปลอดภัย ของสารแคดเมียมเทลลูไรด์ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดช่วงวัฏจักรชีวิต เช่น ขั้นตอนการสกัด การตกตะกอน การทำวัตถุดิบให้บริสุทธิ์ กระบวนการผลิต การนำไปใช้งาน และการจัดการขั้นสุดท้าย หรือการฝังกลบ เป็นต้น การประเมินการระบายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และระยะเวลาคืนทุนของพลังงานได้ทบทวนเปรียบเทียบกับพลังงานทดแทนชนิดอื่น ๆ

ในด้านการปฏิบัติตามหลักการจัดการสิ่งแวดล้อมอาชีวอนามัยและความปลอดภัยของโรงงานผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์ศึกษาโดยการเยี่ยมชมการดำเนินงานของบริษัท First Solar จำกัดที่เมืองคูลิม ประเทศมาเลเซีย ในช่วงวันที่ 24-25 พฤษภาคม 2555



รูปที่ 1. ช่วงวัฏจักรชีวิตของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ (Held and Ilg, 2011)

2. ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม อาชีวอนามัย และความปลอดภัย ตลอดวัฏจักรชีวิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe

2.1 การผลิตแคดเมียม (Cd) และเทลลูเรียม (Te)

แคดเมียม นั้น มักนำไปใช้ในแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม รวมทั้งใช้ในแท่งควบคุมของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ก่อนหน้านั้นแคดเมียมยังถูกใช้ในงานชุบป้องกันการกัดกร่อน ใช้ในงานย้อมสี และใช้ในสารเพิ่มความเสถียร แต่ปัจจุบันการใช้งานแคดเมียมในงานเหล่านี้มีอยู่น้อยลงแล้ว แคดเมียมได้มาจากผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการถลุงแร่โลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแร่สังกะสี และบางส่วนของแร่ตะกั่ว และทองแดง ในกระบวนการดังกล่าวหากไม่มีการควบคุมที่ดีแคดเมียมก็อาจเล็ดลอดสู่สิ่งแวดล้อมได้

อย่างไรก็ดีในไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการนำกระบวนการสกัดโลหะด้วยสารละลายตามด้วยการตกตะกอนโลหะ (hydrometallurgy) เข้ามาใช้ในการสกัดสังกะสีจากแร่สังกะสีจึงทำให้การปลดปล่อยแคดเมียมมีค่าลดลงอย่างมาก (ดังตารางที่

1) ใน ปัจจุบัน มี การ ผลิต สังกะสี ใน ปริมาณ มาก
ดังนั้นผลิตภัณฑ์พลอยได้อย่างแคดเมียมจึงถูกผลิตออกมาในปริมาณมากกว่าการใช้ในงานโดยทั่วไปในแต่ละ
ปี แคดเมียมส่วนเกินนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ หรือไม่ก็ฝังและฝังเก็บไว้เพื่อใช้ในอนาคต
หรือไม่ก็นำไปฝังกลบเป็นขยะอันตราย การศึกษาล่าสุดโดย Matsuno และคณะ (Matsuno *et al*, 2012)
รายงานว่าในอนาคตอันใกล้จะมีปัญหาเนื่องจากการมีปริมาณแคดเมียมมากจนเกินไป
ทั้งนี้มีการเสนอว่าทางเลือกหนึ่งในการใช้แคดเมียมที่เหลืออยู่ปริมาณมากนั้นคือการนำมาเก็บเป็นรูปสารปร
ะกอบ ใน เซลล์ แสง อา ทิ ต ย ช นิต CdTe (แค ด เม ย ม เท ล ลู ไ ร ดี)
ซึ่งถือเป็นทางเลือกในการใช้แคดเมียมที่สำคัญในปัจจุบัน (Fthenakis, 2004; Raugei and Fthenakis,
2010)

ตารางที่ 1. ปริมาณการปลดปล่อยแคดเมียมในการผลิตสังกะสีด้วยวิธีเก่าและใหม่ (ที่มา: Fthenakis, 2004)

กระบวนการ	การปลดปล่อยแคดเมียม	
	g Cd/ton Zn	% Cd loss
Roast/leach/electrowinning process (hydrometallurgy)	0.2	0.008
Roast/blast furnace smelting	50	2
Former roast/blast furnace smelting (ไม่ใช้แล้ว)	100	4

หนึ่งในเรื่องที่ยังเข้าใจไม่กระจ่างและมียังความกังวลเกี่ยวกับการนำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe
มาใช้ คือ ปริมาณ ของ เทลลูเรียม ที่มี อยู่ (Zweibel, 2010)
เพราะเทลลูเรียมเป็นธาตุที่มีการใช้ในงานเฉพาะด้านอย่างจำกัด นอกจากการใช้งานในเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว
เทลลูเรียมส่วนใหญ่จะถูกใช้สำหรับการผลิตวัสดุเชิงความร้อนกับไฟฟ้า (thermoelectric)
ใช้เป็นโลหะที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรได้ง่าย และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไฮโดรเจนสังเคราะห์
ดังนั้นจึงมีการผลิตเทลลูเรียมในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ประมาณ 640 ตันต่อปี) (Zweibel, 2010)
ซึ่ง ส่วน ใหญ่ จะ ได้ มา ใน รูป ผลิต ภัณฑ์ พลอย ได้ จาก การ ถ ลู ง ท อ ง แ ต ง
รวมทั้งบางส่วนในรูปผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการถลุงตะกั่วและทอง การผลิตโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด
CdTe ขนาด 1 กิกะวัตต์ต้องใช้เทลลูเรียมประมาณ 91 เมตริกตัน (Zweibel, 2010)
ดังนั้นดูเหมือนว่าปริมาณที่มีอยู่ของเทลลูเรียมจะเป็นปัจจัยที่จำกัดการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe
รายงานจากสำนักงานพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency)
ระบุว่า การทราบถึงปริมาณเทลลูเรียมและอินเดียมในอนาคตจะช่วยให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอย่าง
ง CdTe และ CIGS มีส่วนแบ่งในการตลาดมากขึ้น (Candelise *et al*. 2011)

นักวิจัยบางคนแสดงให้เห็นว่าสังเขปได้ทะเลอูตมไปด้วยเทลลูเรียมและเทลลูเรียมเหล่านี้เองมีปริมาณมากเพียงพอกับการนำไปใช้งานเพื่อผลิตพลังงานให้กับโลกใบนี้ (Cohen, 1984) อย่างไรก็ตามยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าเราจะสกัดเอาเทลลูเรียมได้ทะเลนี้ขึ้นมาด้วยวิธีการสกัดดังกล่าวจะคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์หรือไม่ หรือเราสามารถผลิตเทลลูเรียมโดยการนำเทลลูเรียมจากแหล่งอื่นๆ ที่ใช้แล้วมาใช้ใหม่ได้อีกหรือไม่ ถือเป็นเรื่องดีที่มีรายงานเมื่อเร็วๆ นี้ว่ามีเหมืองบางแห่งที่มีเทลลูเรียมเป็นส่วนประกอบของแร่หลักอย่างเช่นเหมืองแร่ในเม็กซิโก จีน และสวีเดนที่อุดมด้วยแร่บิสมัทซึ่งมีเทลลูเรียมผสมอยู่ในเนื้อแร่ถึง 20% (Zweibel, 2010) การมีอยู่ดังกล่าวจะช่วยให้การใช้งานเทลลูเรียมในระยะยาวมีความเป็นไปได้มากขึ้น ทั้งยังเป็นอิสระจากการผลิตทองแดงตามปกติ และช่วยเพิ่มความต้องการพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ CdTe ได้จำนวนหนึ่ง (ประมาณ 1%) (Fthenakis and Anctil, 2012) นอกจากนี้ความกังวลเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบ CdTe จะลดลงหากเราสามารถหาวิธีการนำวัสดุจากแหล่งต่างๆ มาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพลดขนาดของเซลล์ให้บางลงเพื่อลดการใช้วัสดุ เพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์รวมทั้งการนำวัสดุจากอุปกรณ์ที่ใช้แล้วมาใช้ใหม่ (Fthenakis, 2012)

นอกจากการปลดปล่อยสารที่เกิดขึ้นในการผลิตแคดเมียมและเทลลูเรียมแล้ว การปลดปล่อยบางอย่างอาจเกิดขึ้นในการทำแคดเมียมและเทลลูเรียมให้บริสุทธิ์จนสามารถใช้เป็นสารกึ่งตัวนำได้ อย่างไรก็ตามก็ดีด้วยเทคนิคการดักจับสารที่มีประสิทธิภาพในปัจจุบัน เช่น การกรองอนุภาคออกจากอากาศ และการรีไซเคิลของเสีย ทำให้การปลดปล่อยสารต่างๆ อยู่ในระดับที่ไม่เกินค่าที่ยอมรับได้

2.2 คุณสมบัติ การผลิต และความเป็นพิษของ CdTe

CdTe เป็นสารประกอบในรูปผลึกที่มีค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) เท่ากับ 0.648 nm (ที่อุณหภูมิ 300 K) มีค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) เท่ากับ 52 GPa และมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (poisson ratio) เท่ากับ 0.41 สารประกอบ CdTe นี้มีค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) เท่ากับ 6.2 W·m/m²·K มีค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity) เท่ากับ 210 J/kg·K และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion coefficient) เท่ากับ 5.9×10⁻⁶/K ที่อุณหภูมิ 293K (Palmer, 2008) CdTe มีค่าการละลายน้ำที่ต่ำมาก (Brookhaven National Laboratory and the U.S. Department of Energy, 2003) ทั้งนี้ CdTe สามารถถูกกัดกร่อนทางเคมีได้ด้วยกรดหลายชนิดรวมทั้งกรดไฮโดรคลอริกและกรดไฮโดรโบรมิก ทำให้เกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนเทลลูเรียมที่เป็นพิษ

(Hosokawa *et al.*, 2012) และเกลือของแคดเมียมที่เป็นพิษ CdTe ไม่เสถียรในอากาศที่อุณหภูมิสูงมากๆ (จุดเดือดของ CdTe อยู่ที่ประมาณ 1,050°C) (Fthenakis *et al.*, 2005)

CdTe

โดยทั่วไปผลิตขึ้นจากแคดเมียมและเทลลูเรียมที่มีความบริสุทธิ์สูงด้วยกระบวนการที่ยังเป็นความลับ การผลิตมีอยู่จำกัดในปริมาณที่ไม่ถูกเปิดเผย อย่างไรก็ตามมีการรายงานว่าวัตถุดิบที่นำไปผลิตถูกใช้ไปทั้งหมด ไม่มีวัตถุดิบหลงเหลือ รวมทั้งไม่มีสารพิษถูกปล่อยออกมาระหว่างการผลิตสารกึ่งตัวนำ CdTe ในปริมาณที่วัดได้ (Fthenakis, 2004)

ด้วยความที่เป็นสารประกอบของแคดเมียม CdTe จึงมักถูกจัดให้เป็นพิษหากนำเข้าสู่ร่างกายผ่านทางเดินอาหาร หรือฝุ่นของ CdTe เข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ หรือแม้กระทั่งการสัมผัสอย่างไม่ถูกต้อง (เช่น สัมผัสโดยไม่มียูปรอนป้องกัน หรือสัมผัสโดยขาดความระมัดระวังเรื่องความปลอดภัย) อย่างไรก็ตามการวิจัยทางพิษวิทยาที่ผ่านมาโดย Zayed และ Philippe (2009) รวมทั้ง Kaczmar (2011) พบว่า CdTe มีความแตกต่างจากสารประกอบแคดเมียมชนิดอื่นๆ รวมทั้ง Held และคณะ (2012) ก็รายงานไว้ว่าองค์การจัดการสารเคมีแห่งสหภาพยุโรป (European Chemical Agency, ECHA) ได้ยกเลิกการจัดให้ CdTe เป็นอันตรายหากนำเข้าสู่ระบบทางเดินอาหารหรือสัมผัสกับผิวหนังแล้ว นอกจากนั้นเมื่อมีการเก็บและห่อหุ้มอย่างถูกต้องในระหว่างการผลิตก็ยิ่งทำให้ไม่เป็นอันตราย CdTe จึงเป็นพิษน้อยกว่าธาตุแคดเมียมบริสุทธิ์อย่างน้อยก็ในรูปของความเป็นพิษจากการสัมผัสอย่างฉับพลัน (Zayed and Philippe, 2009)

ในการประเมินความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยสารอันตราย ข้อมูลทางพิษวิทยาของสารประกอบ (อย่างเช่น CdTe) มักจะอ่านได้จากค่าที่รายงานไว้แล้วของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก (อย่างแคดเมียม) เนื่องจากโดยปกติข้อมูลทางพิษวิทยาของสารประกอบอย่าง CdTe จะมีอยู่จำกัด อย่างไรก็ตามการศึกษาความเป็นพิษในช่วงไม่นานมานี้ระบุว่าวิธีการนี้อาจจะไม่เหมาะสม CdTe มีสมบัติการละลายน้ำ และสมบัติชีวปริมาณออกฤทธิ์ (bioavailability) (สัดส่วนของสารที่สามารถเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิตได้ต่อปริมาณสารทั้งหมดที่นำเข้าสู่ร่างกาย) ที่มีค่าน้อยกว่าสารประกอบ CdCl₂ บริสุทธิ์ถึง 2 อันดับความสำคัญ (order of magnitude) (ซึ่งแสดงว่าสมบัติการละลายน้ำและสมบัติชีวปริมาณออกฤทธิ์ของ CdTe มีค่าต่ำมาก) นั่นหมายถึง CdTe ไม่ได้พร้อมที่จะปลดปล่อยไอออนของแคดเมียม (Cd²⁺) เมื่อสัมผัสกับน้ำหรือสารนำในร่างกาย (biological fluid) จากผลการศึกษาดังกล่าวทำให้คาดการณ์ได้ว่าความเป็นพิษรวมทั้งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของ CdTe นั้นมีค่าต่ำกว่าสารประกอบแคดเมียมในรูปแบบอื่น (Kaczmar, 2011)

ก่อนหน้านี้ Zayed และ Philippe (2009) ได้ประเมินการดูดดม CdTe เข้าสู่ทางเดินหายใจอย่างเฉียบพลันและการนำ CdTe เข้าสู่ทางเดินอาหารในหนูทดลอง พบว่าความเข้มข้นและปริมาณจนทำให้เสียชีวิตของ CdTe นั้นมีค่าสูงกว่าแคดเมียมบริสุทธิ์เป็นอย่างมาก (หลายอันดับความสำคัญ) แสดงถึงความเป็นพิษที่น้อยกว่าของ CdTe นอกจากนี้ Harris และคณะ (1994) ยังรายงานว่าไม่พบผลกระทบของ CdTe ในการสืบพันธุ์ของหนู (ทั้งเพศผู้และเพศเมีย) ที่ได้รับ CdTe เข้าไป

นักวิจัยในสหรัฐอเมริกาได้รายงานว่าการใช้แคดเมียมในรูปแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe นั้นเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าการใช้แคดเมียมในรูปแบบอื่นทั้งหมดที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน (Fthenakis, 2004) แต่กระนั้นความปลอดภัยในการใช้ CdTe ในสหภาพยุโรปและจีนก็ได้รับการระมัดระวังเป็นพิเศษ แคดเมียมรวมทั้งสารประกอบของมันถูกจัดให้เป็นสารพิษก่อมะเร็งในสหภาพยุโรป ส่วนจีนก่อนหน้านี้เคยอนุญาตให้ผลิตภัณฑ์ที่มีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบนั้นมีไว้ส่งออกเท่านั้น (Sinha *et al.*, 2008)

สำหรับสหภาพยุโรป ข้อกำหนดสำหรับการควบคุมสารอันตราย (RoHS Directive) เป็นกฎหมายด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ. 2006 ที่ผ่านมา และได้รับการปรับปรุงต่อมาในปี ค.ศ. 2011 กฎหมายฉบับดังกล่าวเกี่ยวข้องกับวัสดุอันตรายในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์จำนวน 6 ประเภท (แคดเมียมถูกกำหนดเป็น 1 ในวัสดุ 6 ประเภทนั้นด้วย) โดยใช้หลักแยกผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ออกเป็นส่วนประกอบย่อยๆ ที่ทำด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน และมีเนื้อเดียวกัน แต่ละส่วนย่อยต้องประกอบด้วยสารต้องห้ามไม่เกินปริมาณสูงสุดที่กำหนดไว้ โดยกำหนดปริมาณสูงสุดของวัสดุอันตราย 5 ชนิดอื่นๆ อยู่ที่ 1,000 ppm (ส่วนต่อล้านส่วน) แต่สำหรับแคดเมียมกำหนดไว้เพียง 100 ppm เท่านั้น ในเดือนพฤศจิกายน ค.ศ. 2010 สภายุโรป (European Parliament) คณะกรรมาธิการยุโรป (European Commission) และคณะมนตรียุโรป (European Council) เห็นด้วยกับการแก้ไขข้อกำหนด RoHS (Directive 2011/65/EU) โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดถูกรวมอยู่ในขอบเขตของข้อกำหนดดังกล่าวเว้นแต่มีการยกเว้นกรณีพิเศษหรือได้รับการยกเว้นเพราะได้รับการคุ้มครองซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการยกเว้นอย่างชัดเจนจากขอบเขตของข้อกำหนดดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบทที่ 2 (article 2) อธิบายเกี่ยวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นระบบที่ได้รับการออกแบบ ประกอบ และติดตั้งโดยผู้เชี่ยวชาญเพื่อการใช้งานถาวรในที่ที่กำหนด เพื่อผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในการใช้งานทางสาธารณะ

เชิงพาณิชย์ รวมทั้งในอุตสาหกรรมและที่พักอาศัย จึงได้รับการยกเว้นจากข้อกำหนด RoHS (European Commission, 2011)

ส่วนในประเทศจีนก็มีการกำหนด RoHS เช่นกัน (Design Chain Associates, 2012) ขอบเขตของ RoHS

ในประเทศจีนประกอบด้วยการติดฉลากบนผลิตภัณฑ์และข้อบังคับให้เปิดเผยข้อมูลพื้นฐานของวัสดุในผลิตภัณฑ์ (ข้อกำหนด RoHS ของประเทศจีน ฉบับที่ 1) และข้อจำกัดสำหรับรายการวัสดุบางประเภทในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องแยกเฉพาะ (ข้อกำหนด RoHS ของประเทศจีน ฉบับที่ 2) ซึ่งข้อกำหนด RoHS ของประเทศจีน ฉบับที่ 2 นี้ยังไม่ได้มีการบังคับใช้ (อยู่ระหว่างการจัดทำรายการเพื่อประกาศใช้ต่อไป) ถึงแม้ข้อกำหนดจะยังไม่เป็นที่แน่ชัดแต่ก็มีการขายโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe แล้วในประเทศจีน

2.3 แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และคุณสมบัติของ CdS

CdS เป็นสารประกอบอนินทรีย์ในรูปของแข็งสีเหลืองที่เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการใช้งานหลักของแคดเมียมในเชิงพาณิชย์เพราะเป็นสารประกอบที่แยกออกจากสารอื่นได้ง่ายและทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย (Wiberg and Holleman, 2001) ซึ่งมักนิยมใช้ CdS ในการทำสีย้อม

CdS และ แคดเมียมซีลีไนด์ (CdSe) มักถูกใช้ในการผลิตตัวต้านทานแสง (photoresistor) ที่ไวต่อแสงที่ตามองเห็นได้และรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (near infrared) สามารถใช้ CdS ร่วมกับวัสดุชั้นอื่นๆ ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง โดยใช้เป็นวัสดุนำอิเล็กตรอน หรือเรียกว่าวัสดุ *n-type* ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อแบบ *p-n* (Zhao *et al.*, 2009) นอกจากนั้นยังสามารถใช้ CdS เป็นวัสดุกึ่งตัวนำในอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง (thin-film transistors, TFTs) ได้อีกด้วย (Weimar, 1962)

CdS ซึ่งเป็นวัสดุนำอิเล็กตรอนนั้นอยู่ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe ในปริมาณที่น้อยกว่า CdTe (Beckmann and Mennenga, 2011) โดย CdS อยู่ในเซลล์แสงอาทิตย์ในปริมาณเทียบเท่าแคดเมียมที่น้อยกว่า 3% ของแคดเมียมทั้งหมดเท่านั้น CdS นี้มีค่าการละลายน้อยกว่า CdTe (ค่าการละลายน้อยกว่า 1%) ความเป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหารและการสัมผัสผ่านผิวหนังในระยะสั้นมีค่าต่ำ (ถูกจำแนกเป็นวัสดุไม่มีพิษในระหว่างการขนส่ง หากสัมผัสในระยะเวลาด้านสั้น) และมีส่วนที่นำไปกับการหายใจได้ต่ำ (respirable fraction น้อยกว่า 10 μm) เมื่อใช้การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ จึงไร้ปัญหาความเป็นพิษจากการสูดดม

2.4 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางของ CdTe ที่ทันสมัยมีอยู่ 2 วิธี วิธีการแรกคือการสร้างชั้น CdTe ด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) ตามด้วยการสร้างชั้น CdS บนพื้นผิวด้วยวิธีทางเคมี (chemical surface deposition) (ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวไม่เป็นที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ตั้งแต่ปี 2004 ที่ผ่านมา) วิธีที่สองคือการนำไอของ CdTe และ CdS มาสร้างชั้นฟิล์มด้วยความเร็วสูง (high-rate vapor transport) ซึ่งวิธีทั้งสองนั้นใช้สารประกอบของแคดเมียมได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีการสูญเสียสารประกอบของแคดเมียม (วัสดุไม่ได้กลายเป็นผลิตภัณฑ์) เพียงประมาณ 1% เท่านั้น สำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการสร้างชั้นวัสดุด้วยไฟฟ้า ส่วนการนำไอของสารมาสร้างชั้นฟิล์มด้วยความเร็วสูงมีการสูญเสียสารประกอบของแคดเมียมประมาณ 10-30% อย่างไรก็ตามในกระบวนการทั้งสองข้างต้น เราสามารถเก็บสารประกอบของแคดเมียมที่สูญเสียระหว่างการผลิตแล้วนำกลับมาใช้ในการผลิตใหม่หรือนำไปทิ้งในแหล่งฝังกลบที่ปลอดภัยได้ (Fthenakis, 2004; Smigielski, 2011)

คนงานที่เป็นผู้ประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe ไม่มีการสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำในชั้นของโมดูลโดยตรงเพราะสารดังกล่าวจะถูกห่อหุ้มอยู่ระหว่างกระจก 2 แผ่น การตรวจสอบทางชีวภาพในโรงงานประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe จึงไม่พบการปล่อยแคดเมียมสู่คนงาน นอกจากนี้จากการรวบรวมข้อมูลการตรวจสอบทางการแพทย์ในโรงงานผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe ของบริษัทเฟิร์ตโซลาร์ (First Solar) รวมทั้งโรงงานรีไซเคิลแผงเซลล์ได้ข้อสรุปว่าไม่พบข้อบ่งชี้ในเลือดและปัสสาวะที่แสดงถึงการสัมผัสกับแคดเมียมจากสถานที่ทำงาน (Akbar, 2009)

2.5 การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe

2.5.1 การใช้งานตามปกติ

ทั่วไป. ภายใต้การใช้งานตามปกติ โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe ไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์หรือสิ่งแวดล้อม เพราะชั้นสารกึ่งตัวนำ CdTe ถูกยึดไว้บนแผ่นกระจกแผ่นหนึ่งภายใต้อุณหภูมิสูง จากนั้นเคลือบด้วยวัสดุรองรับ แล้วห่อหุ้มด้วยกระจกแผ่นที่สอง ดังนั้นหากโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้ถูกบดจนเป็นผงฝุ่นของสารประกอบแคดเมียมที่เป็นอันตรายก็ไม่อาจเกิดขึ้นได้ สำหรับสมบัติทางความร้อน อุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวของ CdTe อยู่สูงถึง 1,041 °C ส่วนการระเหยเป็นไอเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 1,050 °C

การระเหิดเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า แต่ความดันไอของ CdTe ที่ 800 °C มีค่าเพียง 2.5 torr (0.003 atm) เท่านั้น (แสดงว่าความดันไอต่ำมาก) ส่วนอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวของ CdS อยู่ที่ 1,750 °C และมีค่าความดันไอนี้เนื่องมาจากการระเหิดที่ค่าเพียง 0.1 torr ที่ 800 °C ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่ไอหรือฝุ่นจากวัสดุของเซลล์จะเล็ดลอดออกไปเมื่อมีการใช้งานตามปกติ (Fthenakis, 2004)

การปนเปื้อนสู่ดิน. เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe ที่ติดตั้งเหนือพื้นดินที่ใช้ทำการเกษตรโดยสำนักงานการเกษตรของรัฐบาวาเรีย (Bavarian Agricultural Agency) ประเทศเยอรมนี (Ebert and Muller, 2011) ความเสี่ยงจากความเป็นไปได้ที่เซลล์จะถูกชะด้วยน้ำแล้วนำสารพิษลงสู่ดินนั้นต่ำมาก เพราะ CdTe มีค่าการละลายน้ำที่ต่ำ ส่วนการละลายในตัวทำละลายอื่นๆ นั้น CdTe สามารถถูกกัดกร่อนได้ด้วยกรดบางชนิดแล้วเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนเทลลูไรด์และเกลือของแคดเมียมที่เป็นพิษตั้งที่กล่าวไปแล้วในส่วนก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ในขั้นตอนการรีไซเคิลนั้นจำเป็นต้องใช้กรดซัลฟิวริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงในการสกัดแคดเมียมและเทลลูไรด์ (Fthenakis, 2004) ทั้งนี้ต้องเข้าใจว่าการใช้กรดเหล่านั้นไม่สามารถกัดกร่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ หากต้องการทำให้เกิดการกัดกร่อนหรือทำละลายเซลล์ จำเป็นต้องทำให้แผงเซลล์แตกเป็นชิ้นเล็กๆ (ในระดับมิลลิเมตร) และนำไปหมักคนในกรด (เช่นเดียวกับในกระบวนการรีไซเคิล) อย่างไรก็ตามหากมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์แตกก็ควรนำออกไปจากสถานที่ติดตั้งเพื่อป้องกันความเสี่ยงใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากการปนเปื้อนสู่ดิน (Ebert and Muller, 2011) ซึ่งแนวทางนี้ก็สอดคล้องกับการติดตามกำลังการผลิตที่ใช้ในการตรวจสอบโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ว่ามีสารแตกหรือไม่อยู่แล้ว เพื่อรวบรวมแผงเซลล์ที่แตกและนำไปรีไซเคิลต่อไป (Sinha et al., 2012)

การสะท้อนแสงอาทิตย์. แสงพร่าหรือการสะท้อนแสงที่พื้นผิวจะแสดงด้วยค่าอัลเบโด (albedo) ค่านี้บอกถึงคุณสมบัติของวัสดุหรือพื้นผิว โดยคำนวณจากสัดส่วนพลังงานแสงที่สะท้อนจากวัสดุต่อพลังงานแสงที่ตกกระทบวัสดุหรือพื้นผิวทั้งหมด ค่าอัลเบโดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe มีค่าเท่ากับ 0.26 (Markvart and Castalzer, 2003; Donovan, 2010) ซึ่งค่านี้ใกล้เคียงมากกับค่าอัลเบโดของหญ้าสด หญ้าแห้ง หรือพื้นที่เพราะปลูกพืชที่ยังไม่มีการปลูก แสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe ไม่ก่อให้เกิดปัญหาของการสะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์ออกไปยังสิ่งรอบข้างอย่างรุนแรงแต่อย่างใด

ตารางที่ 2. ค่าอัลเบโด (albedo) ของสสารหรือวัสดุชนิดต่าง ๆ (Donovan, 2010)

ชนิดของพื้นผิว	ค่าอัลเบโด
หญ้า	0.25
หญ้าแห้ง	0.28 - 0.32
พื้นที่เพาะปลูกพืช (ที่ยังไม่มีการปลูก)	0.26
ดินในพื้นที่โล่ง	0.17
พื้นลาดยางมะตอย	0.15
คอนกรีต (ในที่โล่งสัมผัสแดดและฝน)	0.20
หิมะ (ตกใหม่)	0.80 - 0.90
ผิวน้ำ (แสงทำมุมระหว่าง 45° ถึง 10° กับพื้นผิว)	0.05 - 0.22

2.5.2 กรณีเกิดอุบัติเหตุกับเซลล์แสงอาทิตย์

ผู้ลงทุนหรือมีส่วนได้ส่วนเสียกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe บางคนกังวลเกี่ยวกับความเป็นไปได้ที่ CdTe จะเล็ดลอดออกมาจากแผงเซลล์ในสถานการณ์ที่ไม่ปกติ หรือเกิดอุบัติเหตุ เช่น ระหว่างการเกิดอัคคีภัย และการชะละลายสารเป็นพิษออกจากแผงเซลล์ที่แตก เพื่อวิเคราะห์ความกังวลดังกล่าวจะขอกล่าวถึงรายละเอียดในแต่ละประเด็น ดังต่อไปนี้

เซลล์ที่แตก
มีทางเดียวที่คนจะสัมผัสสารที่อยู่ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วและเป็นอันตราย คือการกลืนเศษหรืออนุภาคของเซลล์ หรือสูดดมควันหรือฝุ่นที่เกิดจากเซลล์ชำรุดเข้าไปด้วยความบังเอิญ แต่เป็นเรื่องที่ดีที่ในปัจจุบันไม่มีการบดเซลล์จนกลายเป็นผงละเอียดมากมาย แล้วอนุภาคหรือฝุ่นจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe จึงไม่ถูกสร้างขึ้น นักวิจัยชื่อ Steinberger (1997) ได้คำนึงถึงความเป็นไปได้ที่แคดเมียมอาจถูกชะออกมาด้วยน้ำฝนจากเซลล์ที่แตกหรือเซลล์ที่เสื่อมสภาพ หลังจากการทดลองเขาพบว่า การชะหรือรั่วไหลของสารภายในเซลล์จากเซลล์ที่แตกนั้นเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นยาก

มีสถานการณ์เดียวที่อาจเกิดการรั่วไหลของสารภายในได้คือการที่เซลล์ที่แตกหรือชำรุดถูกไฟไหม้แล้วแคดเมียมเล็ดลอดพร้อมควันไปสู่อากาศ (ในกรณีไฟไหม้เซลล์ที่ไม่แตกหรือไม่ชำรุดจะพุดถึงในหัวข้อถัดไป) แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยการตรวจสอบผลการผลิตไฟฟ้าเป็นประจำจะทำให้ทราบว่า มีเซลล์ที่ชำรุดอยู่หรือไม่ เพราะเซลล์ที่แตกหรือชำรุดจะทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้า มีประสิทธิภาพลดลง หากพบแผงเซลล์ที่ชำรุดก็จะมี การนำแผงเหล่านั้นออกไปเก็บและนำไปรีไซเคิลต่อไป เป็นการป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นทั้งหมด (Sinha et al., 2012)

อัคคีภัย. จากการทดลองโดยจำลองการไหม้ไฟ (แบบไฟไหม้อาคาร) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe ที่ ถูก ป ร ะ ก บ ร ะ ห ว่าง ชั้น ก ร ะ จ ก 2 แ ผ น

พบว่าส่วนประกอบของแคดเมียมจะถูกฉีกเข้าไปในส่วนกระจกที่หลอมเข้าหากันระหว่างไฟไหม้ ส่วนเดียวที่แคดเมียมจะเล็ดลอดออกไปจากแผงเซลล์ที่ถูกไฟไหม้ก็คือบริเวณขอบของเซลล์ก่อนที่กระจกจะร้อนจะหลอมติดกัน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เล็กมาก คิดเป็นปริมาณแคดเมียมเพียงแค่ 0.04% เท่านั้นที่สามารถเล็ดลอดออกไปจากแผงระหว่างการเผาไหม้ในช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างกว้างถึง 760-1,000 °C เมื่อนำค่าปริมาณแคดเมียมดังกล่าวมาคูณด้วยความน่าจะเป็นที่จะเกิดไฟไหม้อาคารหรือความน่าจะเป็นที่ไฟจะไหม้เป็นระยะเวลาติดต่อกันนานๆ ในระบบสาธารณูปโภค การหลุดออกไปของแคดเมียมก็เกือบจะมีค่าเท่ากับศูนย์ (Fthenakis *et al.*, 2005)

ในการประเมินโดยอิงจากกรณีที่ร้ายแรงที่สุดคือแคดเมียมที่อยู่ในอุปกรณ์ถูกเผาแล้วหลุดลอดออกไปสู่ภายนอกแผงเซลล์จริง ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่หลุดออกไปได้ก็ไม่อาจทำให้เกิดอันตรายกับพื้นที่ใกล้เคียงหรือประชาชนทั่วไปได้ในทันทีทันใด (Beckmann and Mennenga, 2011) นอกจากนี้งานวิจัยเมื่อไม่นานมานี้ที่ศึกษาเกี่ยวกับการชะล้างแคดเมียมออกจากแผงเซลล์ที่แตกด้วยน้ำฝน หรือการปลดปล่อยแคดเมียมเนื่องมาจากไฟพบว่าปริมาณแคดเมียมที่หลุดลอดออกมานั้นอยู่ต่ำกว่าระดับคัดกรองทางสุขภาพ (ต่ำกว่าค่าน้อยสุดที่จะทำให้เกิดอันตราย)

อย่างไรก็ดี ถึงแม้ความเป็นไปได้ของการเกิดอัคคีภัยในระบบสาธารณูปโภคเป็นระยะเวลานาน รวมทั้งการเล็ดลอดของแคดเมียมระหว่างที่เซลล์แสงอาทิตย์ติดไฟจะมีค่าน้อย แต่การตรวจสอบแผงเซลล์เป็นประจำเพื่อป้องกันไฟไหม้หรืออุบัติเหตุอื่นใดก็เป็นเรื่องสำคัญ นอกจากนี้ไม่ใช่แคแคดเมียมเท่านั้นที่เล็ดลอดออกมาขณะไฟไหม้เทลลูเรียมก็สามารถหลุดลอดออกมาปริมาณเล็กน้อยเช่นกันจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิในช่วง 760-900°C และจะมีปริมาณเทลลูเรียมที่เล็ดลอดออกมาได้มากขึ้นหากอุณหภูมิในการเผาไหม้สูงมากขึ้นถึง 1,000-1,100°C (Fthenakis *et al.*, 2005)

พายุลูกเห็บ (Hailstorm). พายุลูกเห็บอาจทำลายโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งนั่นก็จะทำให้เกิดสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์เกิดรอยแตกดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ไม่ว่าแคดเมียมจะมีโอกาสหลุดลอดออกไปหรือไม่ก็ตาม แต่ก็มีคามจำเป็นที่จะต้องรู้ว่าสารกึ่งตัวนำ ทำหน้าที่นำไฟฟ้า และส่วนบัดกรีเชื่อมติดในแผงเซลล์นั้นจะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกได้หรือไม่หลังลูกเห็บตก เพราะในทางปฏิบัติน้ำสามารถไหลซึมผ่านเข้ารอยร้าวที่เล็กเพียงขนาดเส้นผมได้ คณะกรรมาธิการระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐานสาขาอิเล็กทรอนิกส์ (International Electrotechnical Commission, IEC) ได้ตีพิมพ์มาตรฐานการทดสอบการชนด้วยลูกเห็บ (hail impact test, IEC61646, section 10.17) ไว้

ซึ่งโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการทดสอบนี้ก่อนที่จะวางขายในตลาดก็จะสามารถทนทานต่อพายุลูกเห็บ

สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนพื้นที่โล่งที่ใช้แผงเซลล์ขนาดใหญ่ นั้นไม่สามารถประเมินความเสี่ยงจากการทดสอบกับเซลล์ขนาดเล็กๆ ที่ทำการทดสอบเป็นครั้งๆ ได้ ในกรณีนี้จะทำการทดสอบการทนต่อการกระแทกของลูกเห็บบนกระจกที่ใช้ประกบด้านหน้าเซลล์แทน ซึ่งในการใช้งานจริงถึงแม้กระจกด้านหน้าจะแตกก็ยังมีแผ่นรองชั้นหนึ่งซึ่งช่วยป้องกันสารที่เป็นกัมมันตรังสีในเซลล์หลุดลอดออกไปได้ด้วย อย่างไรก็ตามการตรวจสอบและติดตามการผลิตไฟฟ้าเพื่อหาเซลล์ที่แตก การเก็บเซลล์ที่แตกไปในที่ปลอดภัย และการนำเซลล์ที่ชำรุดไปรีไซเคิลก็มีความจำเป็นดังที่กล่าวไปแล้วในส่วนก่อนหน้านี้ (Sinha et al., 2012)

น้ำท่วมหรือการแช่น้ำ. ถึงแม้ CdTe จะมีค่าการละลายน้ำต่ำ แต่การวิเคราะห์เพื่อหาข้อมูลพิษวิทยาในน้ำและนิเวศพิษวิทยา (ecotoxicological) รวมทั้งข้อมูลเนื่องจากผลของน้ำท่วมหรือการแช่น้ำของเซลล์แสงอาทิตย์ก็มีความจำเป็นเป็นอย่างมาก ข้อมูลในปัจจุบันที่เกี่ยวกับพิษวิทยาในน้ำตามข้อกำหนดขององค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (OECD) และ สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (USEPA) ในปลาหมากลาย (zebrafish) พบว่าการแช่ CdTe ในน้ำนานกว่า 96 ชั่วโมงไม่มีผลกระทบใดๆ กับปลาหมากลาย (ไม่ทำให้ตายหรือมีอาการอื่นใด) (Kaczmar, 2011) นอกจากนี้จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงสภาพและการสลายตัวระยะยาวของ CdTe ในน้ำ พบว่า CdTe 1 mg ที่แช่ในน้ำ 1 L เป็นเวลา 28 วันนั้นทำให้มีแคดเมียมละลายในน้ำด้วยความเข้มข้นเพียง 15 µg/L เท่านั้น แสดงถึงการละลายในระยะยาวที่มีค่าต่ำมาก (ประมาณได้เพียงแค่ 1.5%) (Kaczmar, 2011) อย่างไรก็ตามในการเลือกสถานที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์นั้นการสำรวจพื้นที่ทางอุทกวิทยานั้นเป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นจึงจำกัดความเป็นไปได้ที่จะเกิดน้ำท่วมในพื้นที่ที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์

2.6 เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe สิ้นอายุการใช้งาน

ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe ถูกผนึกไว้ระหว่างกระจกสองแผ่น ถึงแม้แผงเซลล์ที่ใช้แล้วจะถูกทิ้งลงไปกับขยะตามบ้านเรือนจนไปอยู่ในเตาเผาขยะก็ไม่ทำให้แคดเมียมหลุดลอดออกมามากเกินไป เพราะแคดเมียมจะละลายเข้าไปในส่วนของกระจกหลอมเหลวแล้วก็จะกลายเป็นส่วนหนึ่งของขยะมูลฝอย (solid waste) ปกติไป (Fthenakis, 2004) การทดสอบการชะละลาย (leachability) ตามเกณฑ์ที่ใช้ในการรับของเสีย (Waste Acceptance Criteria, WAC) ในสหภาพยุโรป แสดงให้เห็นว่าความเป็นไปได้ในการชะละลายของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีค่าน้อย ไม่เหมาะสมกับสมบัติที่จะทิ้งในหลุมฝังกลบขยะแบบย่อยสลายไม่ได้ (inert landfill) แต่เหมาะสมกับหลุมฝังกลบขยะไม่อันตราย (non-hazardous waste landfill) มากกว่า (Golder Associates,

2010) ผลการศึกษาอื่นๆ ที่เน้นสมบัติการชะละลายของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe ในสหภาพยุโรปก็สรุปว่าเซลล์ CdTe ถูกจัดให้เป็นขยะไม่อันตรายเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์สิ้นอายุเช่นกัน (Wehrens, 2011; Steinberger, 1998)

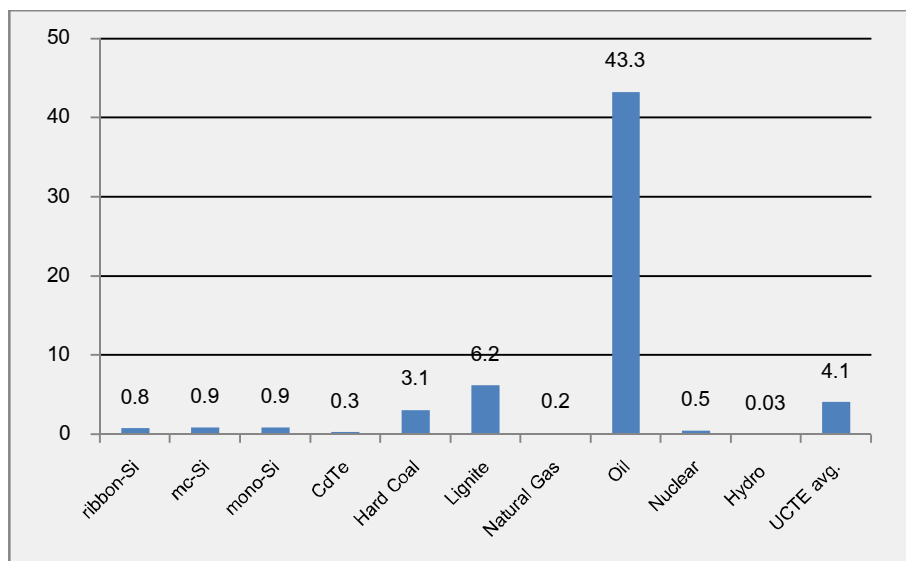
ส่วนกฎหมายของประเทศไทย ตามข้อกำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ภาคผนวกที่ 1 (B.E. 2548; Department of Industrial Work, 2005) ได้กำหนดให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นของเสียอิเล็กทรอนิกส์ หรือของเสียกลุ่ม E (E-waste) ซึ่งของเสียกลุ่ม E นี้อยู่ในกลุ่มของเสียอันตรายแบบ HA (Hazardous Waste - Absolutely Entry) หรือของเสียอันตรายแบบ HM (Hazardous Waste - Mirror Entry) ด้วยเหตุนี้หลังสิ้นอายุใช้งานของของเสียในกลุ่มนี้อาจจำเป็นต้องดำเนินการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเพื่อ จำแนก ลักษณะ ความเป็นอันตรายตามวิธีการที่ระบุไว้ในกฎหมายก่อน โดยต้องคำนึงถึงแนวทางในการจัดการของเสียอุตสาหกรรมตามที่กฎหมายกำหนดไว้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการจัดประเภทของเสียที่จะต้องควบคุมตามข้อกำหนดในภาคผนวกที่ 1 และ 8 ของ อนุสัญญาบาเซล (อนุสัญญาบาเซลว่าด้วยการควบคุมการเคลื่อนย้ายและการกำจัดของเสียอันตรายข้ามแดน ค.ศ. 1989) แล้วนั้น พบว่าของเสียที่มีสารประกอบแคดเมียมเป็นองค์ประกอบจัดเป็นของเสียควบคุม ซึ่งข้อบังคับเกี่ยวกับของเสียควบคุมในประเทศไทยนั้นอยู่ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องบัญชีรายชื่อ วัตถุอันตราย พ.ศ. 2546 ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 นอกจากนี้กรณีที่จะมีการจัดการของเสียของอุปกรณ์ที่มีองค์ประกอบของ CdTe เพื่อจะนำไปรีไซเคิลหรือนำไปต่างประเทศนั้น ต้องดำเนินการขออนุญาตในการเคลื่อนย้ายของเสียตามข้อตกลงระหว่างประเทศ (ที่ระบุวิธีการไว้ในอนุสัญญาบาเซลเพิ่มเติมด้วย) (Pollution Control Department, 2009)

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe ทั่วไปทำการรีไซเคิลแผงเซลล์เมื่อเซลล์สิ้นอายุการใช้งาน (First Solar, 2010) การรีไซเคิลนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งกับความยั่งยืนของอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะจะช่วยจัดการกับของเสียอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากและยังช่วยนำส่วนประกอบเซลล์ที่เป็นวัสดุมีค่า อย่างเช่น กระจก อลูมิเนียม ทองแดง วัสดุกึ่งตัวนำ และตัวนำไฟฟ้า เป็นต้น กลับมาใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้ นักวิจัยชื่อ Held (2009) รวบรวมรายละเอียดของการรีไซเคิลโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe ที่ใช้แล้วในด้านสิ่งแวดล้อม พบว่าความต้องการพลังงานในการผลิตและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon footprint) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดวัฏจักรชีวิตนั้นมีค่าลดลงเมื่อมีการรีไซเคิลตัวโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้แล้ว และนอกจากการรีไซเคิลแคดเมียมและเทลลูเรียมจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องแหล่งที่มาของเทลลูเรียมที่มีอยู่ปริมา

ณ จั ก กั ด แ ล ลั ว
ยังจะส่งผลทำให้เกิดการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในวัฏจักรชีวิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe อีกด้วย

3. การปลดปล่อยมลพิษตลอดช่วงวัฏจักรชีวิตของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์

ปริมาณของแคดเมียมในแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์ได้มีการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบเบื้องต้นพบว่าการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตอื่นๆ หรือกิจกรรมการเผาไหม้ เช่น ระบบการผลิตไฟฟ้าแบบใช้ CdTe PV จะระบายแคดเมียมสู่ชั้นบรรยากาศที่ปริมาณ 0.02-0.3 g Cd/GWh เท่านั้น ในขณะที่กระบวนการอื่นๆจะมีปริมาณที่มากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2



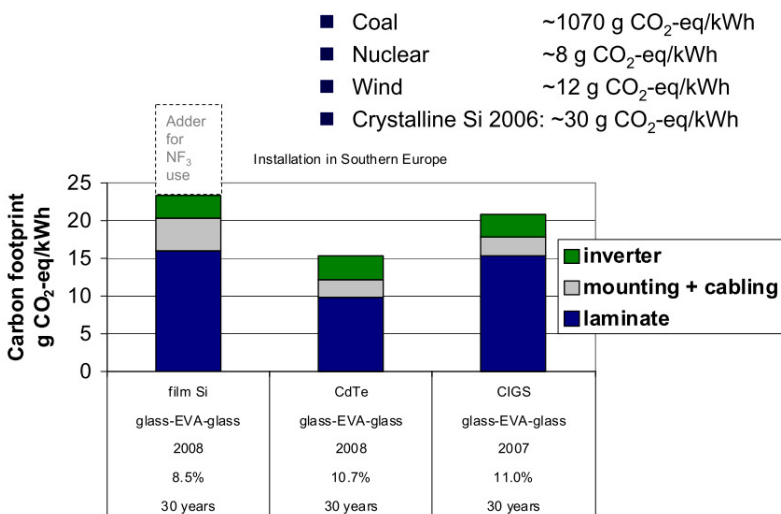
รูปที่ 2. การเปรียบเทียบวัฏจักรชีวิตการระบายแคดเมียมสู่อากาศในระบบการผลิตไฟฟ้าแบบ PV Systems กับระบบการผลิตไฟฟ้าประเภทอื่นๆ (Fthenakiset *al.*, 2008)

การปล่อยมลพิษจากวัฏจักรชีวิตของเทคโนโลยีหลักในการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์เชิงการค้า 4 เทคโนโลยี ได้แก่ Ribbon-Si, Multicrystalline Si (multi- or mc-Si), Monocrystalline Si, and Thin-Film CdTe Systems ถูกประเมิน(Fthenakiset *al.*, 2008)การเปลี่ยนสายส่งไฟฟ้าเป็นระบบ PV Systemsทำ า ให้ เกิด ผล ดี ต่ อ สื่ ง แวด ล้ อ ม อ ย่ า ง มี น้ ย ส่ าคั ณุ แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกถึง 89-98% ช่วยลดมลพิษอากาศที่สำคัญ ปริมาณโลหะหนัก และสารกัมมันตภาพรังสี

ในความเป็นจริงแล้ววัฏจักรชีวิตการระบายมลพิษของแคดเมียมในแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์จะต่ำกว่าในแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบคริสเตอร์ไลน์ซิลิกา เพราะว่าประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตหรือวัฏจักรชีวิตน้อยกว่าแบบคริสเตอร์ไลน์ซิลิกา และในกระบวนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์ยังมีการปล่อยมลพิษอากาศกลุ่มโลหะหนัก ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และออกไซด์ของไนโตรเจน ฝุ่นละออง และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาน้อยกว่าอีกด้วย

4. คาร์บอนฟุตพริ้นต์

เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นเทคโนโลยีที่มีปริมาณรวมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซเรือนกระจกอื่นๆที่ปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบปัจจุบัน และเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบใช้พลังงานทางเลือกอื่นๆ เช่น คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของการผลิตไฟฟ้านิวเคลียร์เทียบเท่ากับ 8g CO₂-eq/kWh คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของการผลิตไฟฟ้าจากลมเทียบเท่ากับ 12g CO₂-eq/kWh คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของการผลิตไฟฟ้าด้วยแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์เทียบเท่ากับ 15g CO₂-eq/kWh คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของการผลิตไฟฟ้าด้วยแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบคริสเตอร์ไลน์ซิลิกาเทียบเท่ากับ 30g CO₂-eq/kWh คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของการผลิตไฟฟ้าด้วยแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบ poly-Si (hydropower and wafer/cell/module) เทียบเท่ากับ 19 ถึง 34 g CO₂-eq/kWh คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหินเทียบเท่ากับ 1070 g CO₂-eq/kWh (de Wild-Scholten and Schottler, 2009; de Wild-Scholten, 2011)รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3

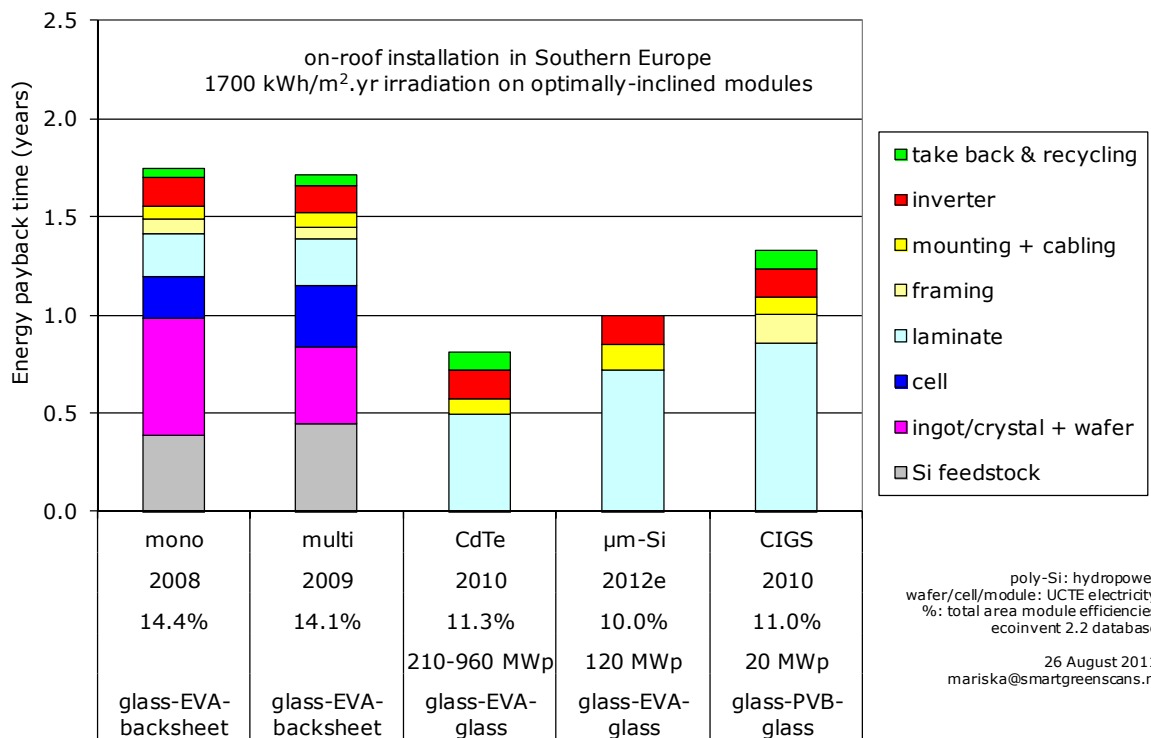


รูปที่ 3. คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตไฟฟ้าแบบต่างๆเปรียบเทียบกับการผลิตไฟฟ้าแบบเซลล์แสงอาทิตย์ (de Wild-Scholten and Schottler, 2009)

5. ระยะเวลาคืนทุนของพลังงาน

ระยะเวลาคืนทุนของพลังงาน (Energy payback time: EPBT) หมายถึง ระยะเวลาที่ระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนจะสามารถผลิตปริมาณพลังงานได้เท่ากับปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิต การดำเนินการ และการปลดระวางระบบ (Fthenakis et al., 2011) ระยะเวลาคืนทุนของพลังงานของระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนต้องมีระยะเวลาที่สั้นเพื่อให้ระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพกว่าการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เมื่อระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเลยระยะเวลาคืนทุนแล้วระบบการผลิตไฟฟ้าชนิดนี้จะเป็นแหล่งผลิตพลังงานสีเขียวที่มาแทนที่ระบบการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล

การผลิตไฟฟ้าด้วยแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์มีระยะคืนทุนที่เร็วที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตไฟฟ้าด้วยแผ่นเซลล์สุริยะแบบอื่นๆ ระยะเวลาคืนทุนของระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์ ~0.7 years แบบµm-Si (2012) ~1ปี CIGS PV (2010) ~1.3ปี multicrystalline Si (2009) ~1.6 ปี and monocrystalline Si (2008) ~ 1.7ปี (de Wild-Scholten, 2011) รายละเอียดดังแสดงในรูปที่4



รูปที่ 4.

ระยะเวลาคืนทุนพลังงานของระบบเซลล์สุริยะเชิงพาณิชย์แบบติดตั้งบนหลังคาที่มีปริมาณรังสีที่กระทบต่อหน่วยพื้นที่ที่ 1700 kWh/m²/year ข้อมูลประเมินจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ micromorphous silicon (de Wild-Scholten, 2011)

6. กระบวนการผลิต แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์การนำกลับมาใช้ใหม่ นโยบายและวิธีปฏิบัติด้าน สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และอาชีวอนามัย ของบริษัท First Solar จำกัด

บริษัท Frist Solar จำกัด เป็นบริษัทผู้ผลิต ติดตั้ง และรีไซเคิล แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการระบายนพิษอากาศแคดเมียมที่ต่ำ ปริมาณรวมของ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ก๊าซเรือนกระจก อื่น ๆ ที่ปล่อยออกมา จาก ผลิตภัณฑ์ ตลอด วัฏจักร ที่น้อย และระยะเวลาคืนทุนพลังงานสั้นเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัย และความมุ่งมั่นอย่างต่อเนื่องที่จะพัฒนาเทคโนโลยีสู่ความเป็นเลิศในการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ในขั้นตอนการเก็บรวบรวมซากแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์ และโครงการรีไซเคิลซากแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์ของ บริษัท Frist Solar จำกัด

ได้เตรียมเทคโนโลยีในการจัดการที่ดีที่สุด ทำให้ได้อัตราการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่สูงสำหรับกระบวนการผลิตตัวกึ่งนำไฟฟ้า (95%) และแก้ว (90%) (Held, 2009)

ข้อกังวลใจในประเด็นผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และอาชีวอนามัย ไม่พบปัญหาในกระบวนการผลิตและกิจกรรมการรีไซเคิลของ บริษัท Frist Solar จำกัด เนื่องจากบริษัทได้มีการพัฒนาระบบการบริหารจัดการและกำหนดนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และอาชีวอนามัยที่ต่อเนื่องมาหลายปี เพื่อให้เกิดการปรับปรุงพื้นที่การผลิตให้ได้มาตรฐานในระดับโลก บริษัท Frist Solar จำกัดยินยอมที่จะดำเนินการตามนโยบายและข้อบังคับด้านสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และอาชีวอนามัยที่ผ่านการประเมินจากหน่วยงานภายในบริษัทและจากหน่วยงานภายนอกที่เป็น third parties บริษัท Frist Solar จำกัด จัดทำรายงานประเมินความเสี่ยงเชิงรุกในประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และอาชีวอนามัย และส่งเสริมให้ดำเนินการปรับปรุงระบบเพื่อลดความเสี่ยงอย่างต่อเนื่อง

7. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์ คือ เทคโนโลยีการผลิตแบบฟิล์มบางที่เติบโตอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่ปีมานี้แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์มีการปล่อยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำที่สุด และมีระยะเวลาคืนทุนเร็วที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีอื่น ๆ หรือพลังงานทางเลือกชนิดอื่น ๆ ภาพรวมวัฏจักรชีวิตของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์พบว่า แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้มีการระบายมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทอื่น ๆ และการผลิตไฟฟ้าแบบอื่น ๆ เช่น การระบายมลพิษอากาศมีปริมาณแคดเมียมที่ 0.02-0.3 g Cd/GWh เมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าถ่านหินที่มีการระบายอยู่ที่ 2-3.1 g Cd/GWh การเปลี่ยนสายส่งไฟฟ้าเป็นระบบ PV Systemsทำให้เกิดผลดีต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกถึง 89-98% ช่วยลดมลพิษอากาศที่สำคัญ ปริมาณโลหะหนัก และสารกัมมันตภาพรังสี

ประเด็นหลักด้านสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และอาชีวอนามัยของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เป็นข้อกังวลจะเกี่ยวข้องกับสารแคดเมียม หรือ สารประกอบอันตรายประเภทอื่น ๆ ที่อาจจะระบายสู่สิ่งแวดล้อมได้ การประเมินความเสี่ยงของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์ถูกประเมินตลอดวัฏจักรชีวิต ตั้งแต่ วัสดุดิบ กระบวนการผลิต การติดตั้งและใช้งาน การรีไซเคิล และการรีไซเคิล

วัตถุดิบ

แคดเมียมและเทลลูเรียมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการถลุงโลหะพื้นฐาน การผืนนี้ กสารแคดเมียมเข้าไปในแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในอนาคตมีโอกาที่จะเผชิญกับปัญหาปริมาณแคดเมียมที่มีมากเกินไป ระบบแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์ที่ใช้แคดเมียมเป็นวัตถุดิบจัดเป็นทางเลือกของการจัดการอย่างยั่งยืน ข้อกังวลใจอื่น ๆ เกี่ยวกับแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์คือ ปริมาณของเทลลูเรียม เพราะสารเทลลูเรียมไม่ใช่ธาตุที่มีการประยุกต์ใช้อย่างทั่วไปปกติจะใช้เทลลูเรียมใช้เป็นสารเทอร์โมอิเล็กทริกในกระบวนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ อุตสาหกรรมเหล็กและใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ ส่วนใหญ่ปริมาณการใช้เทลลูเรียมจะใช้ปริมาณที่น้อย ในการผลิตไฟฟ้าที่ 1 จิกะวัตต์ในระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์จะต้องการใช้ธาตุเทลลูเรียมประมาณ 91 ตันต่อปี ในขณะที่ระบบการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันต้องใช้ธาตุเทลลูเรียมประมาณ 640 ตันต่อปี นี้ อาจจะเป็นปัจจัยจำกัด โชคดีที่เมื่อไม่นานมานี้มาการพบแหล่งแร่เทลลูเรียมเพิ่มเติมจากการคาดการณ์ขององค์กรระหว่างประเทศด้านพลังงานเกี่ยวกับสัดส่วนการตลาดของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางเมื่อผ่านกลางศตวรรษจะพบแหล่งแร่เทลลูเรียมและอินเดียม นอกจากนี้ความกังวลเกี่ยวกับการจัดหาวัตถุดิบจะบรรเทาลงในอนาคตเมื่อมีนสารกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตขั้นต้น การลดความหนาของชั้นตัวกึ่งนำไฟฟ้า การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานและอายุของชั้นผลิตภัณฑ์ และการรีไซเคิลของผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน

กระบวนการผลิต

สารประกอบแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นสารที่ระบุว่าเป็นอันตรายเมื่อกินเมื่อหายใจสารประกอบในรูปฝุ่น หรือการจัดเก็บไม่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม European Chemicals Agency (ECHA) ไม่จัดให้สารประกอบแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นอันตรายถ้าถูกกินหรือสัมผัสที่ผิวหนังจากการปฏิบัติอย่างถูกต้องตามหลักการด้านสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และอาชีวอนามัยในกระบวนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ยังไม่พบว่าสัญญาณเสี่ยงที่เกิดขึ้นในคนงาน

การใช้งาน

สำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์ภายใต้สภาวะปกติ อุปกรณ์และชิ้นส่วนทั้งหมดไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพของคนและสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากชั้นสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ถูกประกอบบนแผ่นกระจกภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูงและมีการเคลือบด้วยแผ่นวัสดุลามิเนต ก่อนที่จะทำการผนึกด้วยแผ่นกระจกอีกหนึ่งชั้น น้ำที่มีความเป็นกรดอาจจะชะสารประกอบแคดเมียมเทลลูไรด์ออกจากชั้นส่วนนี้ได้ แต่แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์จะถูกบดให้ขนาดเล็กในระดับมิลลิเมตรได้ และเขย่ากับกรดเพื่อการรีไซเคิลวัตถุดิบการเคลื่อนย้ายชิ้นส่วนที่แตกหักจากพื้นที่โครงการหรือพื้นที่ติดตั้งจะต้องระมัดระวังการปนเปื้อนของสารแคดเมียมเทลลูไรด์ในดิน ควรมีการสำรวจและเฝ้าระวังชิ้นส่วนที่แตกหักในพื้นที่เพื่อจะได้มีการดำเนินการจัดเก็บรวบรวมอย่างสม่ำเสมอ

ในการกรณีเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉิน เช่นไฟไหม้ ชิ้นส่วนและอุปกรณ์แตกหัก ในกรณีไฟไหม้สารแคดเมียม และสารประกอบแคดเมียมมีการระบายออกมาปริมาณน้อยมาก เนื่องจากองค์ประกอบของแคดเมียมได้ถูกหลอมรวมเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อกระจก ในกรณีแตกหักแคดเมียมและสารประกอบแคดเมียมมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เส้นทางที่แคดเมียมจะสามารถหลุดออกมาจากผลิตภัณฑ์นั้นมีเพียงช่องว่างขนาดเล็กระหว่างแผ่นกระจกสองแผ่นที่แคดเมียมหลอมรวมอยู่เท่านั้น ปริมาณแคดเมียมที่คาดการณ์ว่าจะระบายออกมาในช่วงไฟไหม้น้อยกว่า 0.04%

การรีไซเคิล

แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์ที่ผ่านการใช้งานแล้วไม่จัดเป็นของเสียอันตรายตามกฎหมายในสหภาพยุโรปแต่จัดเป็นของเสียอันตรายสำหรับกฎหมายของประเทศไทย การนำแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์กลับมารีไซเคิลหลังจากหมดอายุการใช้งานแล้วสามารถให้อัตราการกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ของวัตถุดิบในการผลิตสารกึ่งตัวนำที่สูงถึงร้อยละ 95 และเศษแก้วถึงร้อยละ 90

ข้อเสนอแนะ

ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยแบบแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการผลิตขนาดใหญ่ เช่น การผลิตไฟฟ้าแบบโซลาร์ฟาร์มที่มีระบบการบริหารจัดการและเฝ้าระวังสิ่งแวดล้อมที่เพียงพอ ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยแบบแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแคดเมียมเทลลูไรด์จัดว่าเป็นระบบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ลดการระบายมลพิษอากาศ โลหะหนัก และสารกัมมัตภาพรังสี โดยปกติระบบการผลิตไฟฟ้าแบบทั่วไปไม่สามารถที่จะติดตั้งในพื้นที่เสี่ยงสูงได้

เช่นเดียวกับในระบบการผลิตไฟฟ้าระบบ PV CdTeไม่ควรติดตั้งใกล้กับพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงที่รุนแรงหรือภัยพิบัติ

8. เอกสารอ้างอิง

- Akbar, F., Letter to C. Chapman, Corporate Manager of Industrial Hygiene, First Solar Inc., regarding Medical Surveillance Program Review (June 30, 2009).
- Beckmann, J., and Mennenga, A., 2011. Calculation of emissions when there is a fire in a photovoltaic system made of cadmium telluride modules. Bavarian Environmental Agency: Augsburg, Germany.
- Brookhaven National Laboratory (BNL) and the U.S. Department of Energy (DOE), *Nomination of Cadmium Telluride to the National Toxicology Program*. United States Department of Health and Human Services, April 11, 2003.
- Candelise, C., M. Winskel, and R. Gross. 2011. Is Indium and Tellurium Availability a real concern for CdTe and CIGS Technologies?, in Proceedings 26th EU PV SEC, Hamburg, Germany, Fig. 1.
- Cohen, B. L. Anomalous behavior of tellurium abundances, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 38, 279-300.
- De Wild-Scholten, M. *Energy payback and carbon footprint of PV technologies*, presented at the 20th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, Breckenridge, August 2010.
- De Wild-Scholten, M. *Environmental profile of PV mass production globalization*, presented at the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg Germany, September 2011.
- De Wild-Scholten, M., and Schottler, M., Solar as an environmental product: thin-film modules – production processes and their environmental assessment, Energy Research Center at the Netherlands and M+W Zander, April 2009.
- Department of Industrial Work (DIW), *The Notification of the Ministry of Industry B.E. 2548*, 2005, Annex 1-2 (in Thai).
- Donovan, M., 2010, *Impact of PV Systems on Local Temperature*, SunPower Corporation: California, 4.

- Ebert, T. and Muller, C., Pollutants in photovoltaic free field plants - A danger for the soil, *Bodenschutz*, 2011, 16, 69-72.
- European Commission. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (recast)). Article 2(4). Official Journal of the European Union.
- First Solar, First solar module collection and recycling program, June 4, 2010, 1-2.
- Fthenakis, V. M. 2012. Sustainability metrics for extending thin-film photovoltaics to terawatt levels. *MRS Bulletin*, 37, 425-430.
- Fthenakis V. M., Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2004, 8, 303-334.
- Fthenakis, V. and Anttil, A. 2012. Direct Te mining: Resource availability and impact on CdTe PV life-cycles. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, TX.
- Fthenakis, V., Frischknecht, R., Raugei, M., Kim, H. C., Alsema, E., Held, M., and de Wild-Scholten, M. 2011, Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity, 2nd edition, IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Photovoltaic Power systems Programme.
- Fthenakis, V.M., Fuhrmann, M., Heiser, J., Lanzirotti, A., Fitts, J., and Wang, W. Emissions and encapsulation of cadmium in CdTe PV modules during fires, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2005, 13, 713-723.
- Fthenakis, V. M. and Kim, H. C. Land use and electricity generation: a life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13, 1465-1474.
- Fthenakis, V.M., Kim H.C., and Alsema, E., Emissions from photovoltaic life cycles, *Environmental Science and Technology*, 2008, 42, 6.
- Golder Associates, Review and comments on reports by NGL: environmental risks regarding the use and final disposal of CdTe PV modules and leaching from CdTe PV module material – results from batch, column and availability tests, May 2010.
- Goldstein B., Properties of PV films of CdTe, *Physical Review*, 1958, 109, 601-603.
- Harris, et al., The general and reproductive toxicity of the photovoltaic material cadmium telluride (CdTe), *toxicologist*, 1994, 14, 267, March 1994 (abstract).
- Held, M., *Life cycle assessment of CdTe module recycling*, 24th EU PVSEC Conference, Hamburg, Germany, 2009.

- Held, M. and Ilg, R., Update of environmental indicators and energy payback time of CdTe photovoltaic systems in Europe, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011, Vol. 19, 614-626.
- Held, M., C. Hagendorf, J. Bagdahn, and R. Wehrspohn. 2012. Scientific Comment of Fraunhofer to Life Cycle Assessment of CdTe Photovoltaics. (Available at: <http://www.csp.fraunhofer.de/presse-und-veranstaltungen/details/id/47>)
- Hosokawa, M., Nogi, K., Naito, M., Yokohama, T., 2012, Nanoparticle Technology Handbook, 2nd ed. Elsevier: Amsterdam, 703.
- Jenny, D. A. and Bube R. H. Semiconducting Cadmium Telluride, *Physical Review*, 1954, 96, 1190-1191.
- Kaczmar, S., *Evaluating the read-across approach on CdTe toxicity for CdTe photovoltaics*, SETAC North America 32nd Annual Meeting, Boston, November 2011.
- Kato, K., Hibino, T., Komoto, K., Ihara, S., Yamamoto, S., and Fujihara, H. A., life-cycle analysis on thin-film CdS/CdTe PV modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, 67, 279-287.
- Matsuno, Y., T. Hur, and V. Fthenakis. Dynamic modeling of cadmium substance flow with zinc and steel demand in Japan. *Resources, Conservation and Recycling* 61 (2012) 83– 90.
- Markvart, T. and Castalzer, L., 2003, *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Application*, Elsevier: Oxford, 984.
- Mehta, S., PV technology, *Production and Cost Outlook*, 2010-2015, GTM Research, San Francisco, CA.
- Palmer, D. W. *Properties of II-VI Compound Semiconductors*. *Semiconductors-Information*, March, 2008.
- Pollution Control Department (PCD), *Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal*, 2009, Thailand (in Thai).
- Raugei, M., and Fthenakis, V., Cadmium flows and emissions from CdTePV: Future expectations, *Energy Policy*, 2010, 38, 5223-5228.
- Sinha, P., Balas, R., Krueger, L., and A. Wade. Fate and transport evaluation of potential leaching risks from CdTe PV, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, 31, 1670-1675.
- Sinha, P., Balas, R., and Krueger, L., *Fate and transport evaluation of potential leaching and fire risks from CdTe PV*, 2011, 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, WA.

- Sinha, P., Kriegner, C. J., Schew, W. A.; Kaczmar, S. W., Traister, M., Wilson, D. J., Regulatory policy governing cadmium-telluride photovoltaics: A case study contrasting life cycle management with the precautionary principle, *Energy Policy*, 2008, 36, 381.
- Smigielski, K. 2011. *Fundamentals & EHS challenges of PV manufacturing*. SESA/SIA Joint Symposium, Scottsdale, AZ, May 16-20.
- Steinberger, H., HS & E for CdTe and CIS thin film module operation. IEA expert workshop, Environmental aspects of PV power systems. May 23, Report no. 97072. In: Niewlaar E, Alsema E, editors. Utrecht University: The Netherlands, 1997.
- Steinberger, H., Health, safety and environmental risks from the operation of CdTe and CIS thin-film modules, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 1998, 6, 99-103.
- Wehrens., S. 2011. *Certificate of end-of-life waste characterization*. GFBU Consult, Hoppegarten, Germany.
- Weimar, P. K., The TFT a new thin-film transistor, *Proceedings of the IRE*, 1962, 50, 1462-1469.
- Wiberg, E., Holleman, A. F., *Inorganic Chemistry*, Academic Press: California, 2001.
- Zayed, J., and Philippe, S., Acute oral and inhalation toxicities in rats with cadmium telluride, *International Journal of Toxicology*, 2009, 28, 259-265.
- Zhao, H., Farah, A., Morel, D., Ferekides, C. S., The effect of impurities on the doping and VOC of CdTe/CdS thin film solar cells, *Thin Solid Films*, 2009, 517, 2365-2369.
- Zweibel, K., The impact of tellurium supply on cadmium telluride photovoltaics, *Science*, 2010, 328, 699-701.
- Zweibel, K., Mason, J., Fthenakis, V. A Solar Grand Plan, *Scientific American*, Jan 2008.