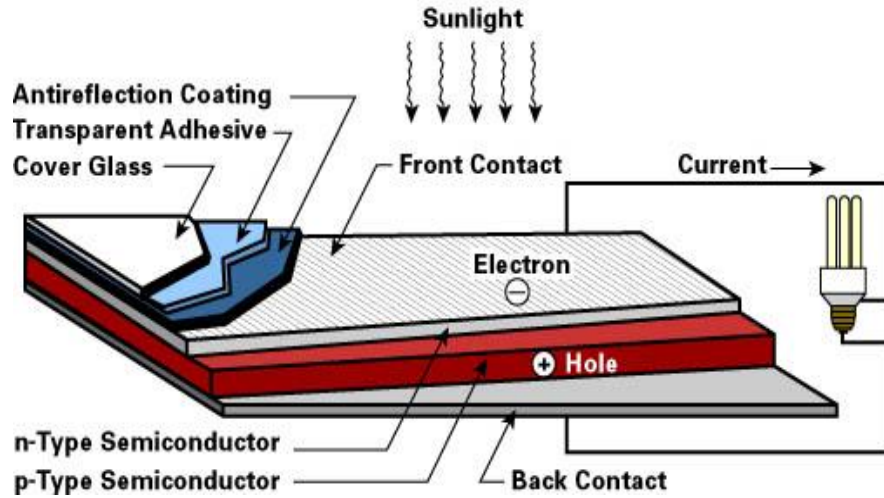


การพัฒนาวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์

วัสดุห่อหุ้มเซลล์ (encapsulating material) หรือกาวโปร่งแสง (transparent adhesive) เป็นส่วนประกอบสำคัญในการประกอบชิ้นรูปอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (photovoltaic device) โดยชั้นฟิล์มของวัสดุห่อหุ้มเซลล์ดังกล่าวจะประกบอยู่กับ ชั้นของเซลล์แสงอาทิตย์และชั้นของกระจกที่อยู่ด้านบน (glass super state) (รูปที่ 1.1 และ 1.2)



รูปที่ 1.1 โครงสร้างส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ [1]



รูปที่ 1.2 การประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ฟิล์ม EVA เป็น encapsulating material
[ภาพจาก บริษัท Bangkok Solar จำกัด]

โดยวัสดุพอลิเมอร์ดังกล่าวจะมีหน้าที่ที่สำคัญ 5 ประการ คือ

1. เป็นตัวรองรับโครงสร้างของแผงวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะขึ้นรูป ติดตั้ง ขนส่ง และระหว่างเก็บรักษา
2. ช่วยรักษา optical coupling ระหว่างแสงแดดกับเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงอยู่เสมอโดยมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90 และมีการสูญเสียไม่เกินร้อยละ 5 ภายในเวลา 20 ปี
3. ทำให้เกิดการแยกชั้นหรือช่วยป้องกันการสัมผัสระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์กับปัจจัยทางสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น ความชื้น ลูกเห็บ (hail) เศษดิน และสัตว์สิ่งมีชีวิต อื่นๆ เป็นต้น
4. ทำให้เกิดการแยกทางไฟฟ้า (electrical isolation) ขององค์ประกอบในแผงวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อความปลอดภัย
5. เพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อ (interconnect) ระหว่างเซลล์ในโมดูล (module)

ซึ่งวัสดุที่จะทำหน้าที่ดังกล่าวได้ดี จะต้องมึลักษณะสมบัติที่สำคัญดังนี้ [2]

1. ต้องโปร่งแสงหรือมีค่าการส่องผ่านแสงสูงไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90 ของแสงที่ตกกระทบ
2. ต้องสามารถทนต่อการเสื่อมสภาพโดยแสงแดดหรือแสง UV (photo-degradation) และการเสื่อมสภาพโดยความร้อน (thermal-degradation) ที่อุณหภูมิสูง 85 องศาเซลเซียส โดยที่โครงสร้างโมเลกุล สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงพอลิเมอร์ดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลง
3. ต้องสามารถขึ้นรูปได้ง่ายหรือสามารถนำไปประกอบเข้ากับกับเซลล์แสงอาทิตย์ได้ง่าย เช่นสามารถอัดขึ้นรูป (compression moulding) โดยใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก (เช่น ไม่เกิน 170 องศาเซลเซียส) และใช้ความดันไม่สูงมากนัก (เช่น ไม่เกิน 1 atm)
4. ต้องทนต่อน้ำและความชื้นทั้งในด้านของการทนต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีการแตกตัวด้วยน้ำ (hydrolysis) และการมีค่าร้อยละของการดูดความชื้นไม่เกิน 0.5 (ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 100 %)
5. ต้องมีการยึดเกาะกับชั้นของเซลล์แสงอาทิตย์และชั้นกระจกที่อยู่ด้านบน (glass superstate) ที่ดีโดยไม่เกิดการหลุดลอกแยกออกจากกัน (delamination) ได้ง่ายในระหว่างการใช้งาน
6. ต้องทนต่อสารเคมีและทนต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างเก็บรักษาขนส่งติดตั้งและระหว่างใช้งาน ได้ดี ไม่มีกลิ่นเหม็นหรือเป็นพิษต่อมนุษย์
7. ต้องมีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยในด้านของค่าโมดูลัสแรงดึง (tensile modulus) จะต้องมีค่าไม่สูงเกิน 20 MPa หรืออาจจะกล่าวได้ว่าวัสดุดังกล่าวต้องไม่แข็งจนเกินไปแต่ควรมีลักษณะเป็นยางหรืออีลาสโตเมอร์ เพื่อที่จะสามารถรองรับการหดตัวและการขยายตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุพอลิเมอร์กับวัสดุที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์และกระจก (glass superstate) โดยหากวัสดุพอลิเมอร์มีความแข็งมากเกินไปจะทำให้เกิดการแตก (crack) ของชั้นฟิล์มและเกิดการลอกออกจากชั้นของเซลล์แสงอาทิตย์ได้นอกจากนั้น วัสดุห่อหุ้มเซลล์ดังกล่าวควรมีลักษณะที่ทนต่อการเกิดการคืบตัว (creep resistance) โดยไม่เกิดการคืบ (creep) หรือการยึดตัวในระหว่างที่ใช้งาน โดยทั่วไปการป้องกันการเกิด creep จะทำในวัสดุประเภทยางจะทำได้โดยการทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล
8. ต้องมีราคาถูก เพื่อให้ต้นทุนในการผลิตต่ำและมีแนวโน้มที่จะผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์ได้

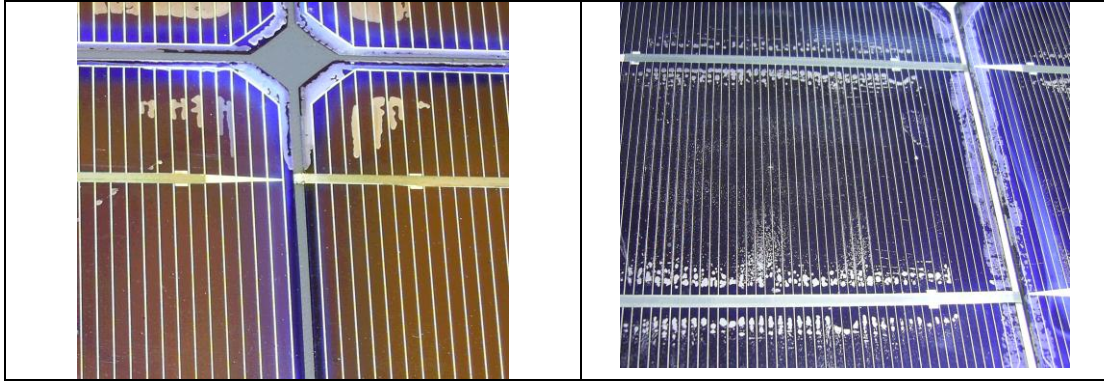
จากผลการศึกษา ของ JPL และ Springborn Laboratories เมื่อปี 1986 [2-6] พบว่าวัสดุพอลิเมอร์ที่น่าสนใจและมีศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์ได้คือ ซิลิโคน [silicone] เอธิลีนเมทิลอะคริเลต โคลพอลิเมอร์ [ethylene methyl acrylate, EMA] พอลิบิวทิลอะคริเลตไซรัป [poly(butyl acrylate) syrup] พอลิยูรีเทน (apiphatic polyether polyurethane) และอีวีเอ โดยในด้านของสมบัติการใช้งานโดยรวมแล้ว ซิลิโคนจะมีความเหมาะสมมากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาในด้านของราคาต้นทุน (cost) ร่วมด้วยแล้ว ซิลิโคนจะมีราคาแพงทำให้ไม่เป็นที่นิยมใช้ ในขณะที่พอลิบิวทิลอะคริเลต นั้นมีสมบัติด้านการทนต่อการเสื่อมสภาพในการใช้งานกลางแจ้งได้ดีแต่มีจุดอ่อนในเรื่องของการขึ้นรูป โดยต้องใช้สารตั้งกล่าวในรูปของไซรัปหรือสารละลายพอลิเมอร์ในโมโนเมอร์ (liquid pottant system) ซึ่งไม่สะดวกและมีกลิ่นเหม็น

โดยรวมแล้ว พบว่าพอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์ในปัจจุบันคืออีวีเอ เนื่องจากพอลิเมอร์ที่มีราคาถูกกว่าซิลิโคน และสามารถเตรียมเป็นฟิล์มสำหรับขึ้นรูป โดยวิธีการทำลามิเนต (lamination) ได้ โดยสมบัติด้านอื่นๆ เช่น ความโปร่งใสหรือค่าการส่งผ่านแสง ค่าโมดูลัส ค่าการทนความชื้น และการทน creep อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาต่อมาภายหลัง [7] พบว่า จุดอ่อนของวัสดุห่อหุ้มเซลล์ที่ทำจากอีวีเอคือ การเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างการใช้งาน โดยจะมีลักษณะการเกิดสีเข้มขึ้นเป็นสีเหลืองไปจนถึงสีน้ำตาล ซึ่งเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า **yellowing หรือ EVA browning** เมื่อผ่านการใช้งานไประยะหนึ่ง (ดังแสดงในรูปที่ 1.3) โดยในกรณีที่เป็นอีวีเอที่ไม่เติมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความเสถียร (unstabilized EVA) พบว่าฟิล์มจะเริ่มเกิดสีภายในระยะเวลาประมาณ 1 เดือน [8] ในขณะที่อีวีเอที่เติมสารเติมแต่ง (stabilized EVA) จะเกิดสีในช่วงเวลานานขึ้นตั้งแต่ 3 - 12 ปี [9] ทั้งนี้ทั้งนั้น ระดับความเข้มของสี และระยะเวลาที่เริ่มเกิดการเสื่อมสภาพจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งที่ใช้ รวมทั้งสภาพแวดล้อมในพื้นที่ที่ใช้งาน นอกจากนี้ยังพบว่าการเกิดสีในลักษณะดังกล่าวมีผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (power output) ลดลงถึงร้อยละ 30 หลังจากการใช้งานโดยสัมผัสกับสภาพแวดล้อมภายนอกต่างๆ เป็นเวลาเพียง 4 ปี [10]

นอกจากนั้น ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์คือ การเกิดฟองอากาศ ซึ่งเชื่อว่าเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น

1. เกิดจากการเสื่อมสภาพของอีวีเอและสลายตัวให้สารโมเลกุลเล็กหรือสารระเหยได้
2. การสูญเสียความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับกระจกหรือซิลิโคนเนื่องจากพอลิเมอร์และสารอินทรีย์มีการขยายตัวและการหดตัวที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพอากาศในระดับที่ไม่เท่ากัน
3. เกิดจากสารระเหยได้ (volatile compound) ที่เกิดจากการแตกตัวของสาร curing agent บางชนิด ในระหว่างการขึ้นรูปและเก็บรักษาหรือการใช้งาน
4. เกิดจากสภาวะในกระบวนการลามิเนตที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ



รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการเสื่อมสภาพ (EVA browning) จากการใช้งาน ในลักษณะของการเกิดสีน้ำตาล (EVA browning) [รูปซ้าย] และการเกิดฟองอากาศ (bubble formation) [รูปขวามือ]

ดังนั้นงานวิจัยทางด้านการพัฒนาวัสดุห่อหุ้มเซลล์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันจึงมุ่งไปที่ 2 ประเด็นหลัก คือการพัฒนาวัสดุห่อหุ้มเซลล์จากพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ [10,11] และ/หรือการศึกษาการใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มความเสถียรของฟิล์มอีวีเอ [12,13] และเพื่อช่วยให้เซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น (ซึ่งโดยทั่วไปตั้งเป้าหมายไว้ประมาณ 20 ถึง 30 ปี)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมา

Pern และคณะ [14] ศึกษาผลกระทบของกระบวนการขึ้นรูปโดยความร้อน และการเสื่อมสภาพของอีวีเอ เนื่องจากสภาพภูมิอากาศ ที่มีต่อการเกิดสีของอีวีเอพบว่าฟิล์มอีวีเอที่เก็บไว้ในที่มืด ที่อุณหภูมิปกติ (ambient temperature) นาน 6 เดือนจะไม่เกิดการเสื่อมสภาพ ในขณะที่ฟิล์มอีวีเอที่ใช้งานกลางแจ้งจะเริ่มกลายเป็นสีเหลือง พร้อมทั้งมีผลิตภัณฑ์ประเภทกรดอะซิติกและสารอัลดีไฮด์เกิดขึ้นถ้าหากปริมาณของ UV absorber ชนิด Cyasorb UV 531 มีปริมาณลดลงต่ำกว่าร้อยละ 70 ของปริมาณที่ผสมลงไปตอนเริ่มต้น นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพจะมีลักษณะเป็นเจล (gel) หรือเกิดการ crosslink ขึ้น แสดงให้เห็นว่ากลไกของการเสื่อมสภาพของ EVA โดยแสงแดดและความร้อน จะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีหลายแบบ นอกจากนี้ยังพบว่า การเสื่อมสภาพของฟิล์ม EVA จะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (nonuniform) โดยบริเวณตรงกลางจะมีสีเหลืองเข้มกว่าและมีปริมาณกรดอะซิติกเกิดขึ้นสูงกว่า ที่บริเวณขอบรอบๆ แผ่นฟิล์ม ทั้งนี้ Pern เชื่อว่าสาเหตุส่วนหนึ่งน่าจะเกิดจากการ crosslink ใน EVA ทำให้ปริมาณอิสระของ EVA ลดลง และ UV absorber จึงถูกขับออกมาโดยการแพร่จากตรงกลางมายังบริเวณรอบๆ ทำให้ตรงกลางมีปริมาณ UV absorber ลดลง ในขณะที่ตรงบริเวณรอบๆ ของแผ่นฟิล์มมีปริมาณ UV absorber มากขึ้น

เมื่อนำสารตั้งต้นอีวีเอ (Elvax 150) มาสกัดด้วยเมธานอลและอะซิโตนแล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติทางด้านการดูดกลืนแสงพบว่าสารตัวอย่างดังกล่าวจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 280 นาโนเมตร ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของสารประกอบประเภท acetophenone ซึ่ง Pern อธิบายว่าหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวอาจจะเกิดจากส่วนของตัวเริ่มปฏิกิริยา ที่ติดอยู่ในสายโซ่ของ EVA ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว (alpha,

beta-, unsaturated carbonyl groups) จะมีลักษณะว่องไวต่อการถูกกระตุ้นด้วยแสง (photosensitizer) และสามารถชักนำให้พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมสภาพ โดยกลไกทางเคมีแบบ Norrish type I และ Norrish type II [15]

นอกจากนั้นกระบวนการขึ้นรูปทางความร้อน เช่น การอัดรีด (extrusion) และการ curing ก็มีผลทำให้ลักษณะของสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ EVA เปลี่ยนไปด้วย โดยจะมีการขยับของพีคของการดูดกลืนแสงจากที่ 355 นาโนเมตร ไปเป็นที่ 383 นาโนเมตร และมีพีคใหม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 322 นาโนเมตร ซึ่งเชื่อว่าน่าจะเกิดจากการที่หมู่คาร์บอนิลที่ติดมากับสารตั้งต้น EVA เปลี่ยนแปลงไปเป็น chromophore ชนิดใหม่ เมื่อผ่านกระบวนการ curing โดย curing agent ที่เกิดปฏิกิริยาช้า เช่น 2,5-dimethyl-2,5-di-*t*-butylperoxyhexane [Lupersol 101] จะทำให้เกิด chromophore มากขึ้นกว่าสาร curing agent ที่เกิดปฏิกิริยาเร็ว เช่น O,O-*t*-butyl-O-(2-ethylhexyl)monoperoxy carbonate [Lupersol TBEC] เนื่องจากสาร curing agent ที่เกิดปฏิกิริยาช้าจะมีสารตกค้าง (residual) ประเภทอนุมูลอิสระเปอร์ออกไซด์เหลืออยู่มาก ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้จะมีส่วนร่วมในการเร่งให้เกิด chromophore [16] และการเชื่อมสภาพของ EVA โดยเกิดปฏิกิริยาการขจัดกรดอะซิติก (deacetylation) ได้มากขึ้น [17]

นอกจากนั้น ยังพบว่า การเติม UV absorber เช่น 2-hydroxy-4-*n*-octylbenzophenone [Cyasorb UV 531] ลงไป จะไม่สามารถป้องกันการเกิดสีหรือการเสื่อมสภาพของ EVA ได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากว่า Cyasorb UV 531 จะไม่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นสูงกว่า 360 นาโนเมตร ได้ ซึ่งช่วงดังกล่าว เป็นช่วงที่หมู่ unsaturated carbonyl ที่แฝงอยู่ในโมเลกุลอีวีเอจะเกิดการดูดกลืนแสง ยิ่งไปกว่านั้นจากการศึกษาภายหลังต่อมา [18] พบว่า สาร UV absorber เองจะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วและมีส่วนเร่งให้เกิดสีขึ้นในชิ้นงาน

จากการสืบค้นข้อมูลใน US Patent ของ Pern [19] ซึ่งบรรยายเกี่ยวกับองค์ประกอบที่เหมาะสมของ encapsulating material ที่ทำจาก EVA (Elvax 150) โดยเน้นที่การเลือกใช้สาร curing agent ที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็ว ซึ่งจะมีผลคือช่วยลดปริมาณอนุมูลอิสระตกค้างและสารระเหยหรือแก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยา ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลให้สารแอนติออกซิแดนต์ไม่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมสภาพจากความชื้นและอุณหภูมิ

โดยสรุปแล้วอีวีเอคอมปาวด์ควรจะประกอบด้วยสารเติมแต่งต่าง ๆ ดังนี้

1. Peroxide curing agent เช่น 1,1-di-*t*-butylperoxy)-3,3,5-trimethylcyclohexane [ชื่อการค้า Lupersol 231] ซึ่ง cure เร็วกว่า Lupersol 101 และไม่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เป็นแก๊สเหมือนกรณี Lupersol TBEC
2. สาร UV stabilizer ประเภท hindered amine stabilizer เช่น Bis-(*N*-octyloxy-tetramethyl) piperidine sebacate [Tinuvin 123]
3. สารแอนติออกซิแดนต์ประเภท peroxide decomposer เช่น Tris(2,4-di-*tert*-butylphenyl)phosphite [Irganox B] หรือ 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)phosphite [Irgafos 168] หรือ tetrakis methylene (3,5-di-*tert*-butyl-4-hydroxyhydrocinnamate) methane [Naugard 10] เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้จะให้ผลที่ดีกว่า peroxide decomposer อื่นๆ ที่ผ่านมา เช่น Naugard P [Tris(mono-nonylphenyl)phosphate] ในด้านการทนความชื้นและการเกิดออกซิเดชัน

อนึ่ง มีข้อสังเกตว่า สูตรของอีวีเอคอมปาวด์ที่ใช้ทำ encapsulating material ที่ระบุไว้ใน US Patent ฉบับดังกล่าวจะไม่มีสารเติม UV absorber ประเภท benzophenone (เช่น Cyasorb UV 531) ลงไป ซึ่งเชื่อว่าจะเป็นการช่วยให้ผลิตภัณฑ์มี photo-sensitizer หรือ chromophore ที่จะเกิดขึ้นจากการ curing น้อยลง และผลิตภัณฑ์จะทนต่อการเสื่อมสภาพโดยแสง UV ได้ดีขึ้น

นอกจากนั้นในสูตรการเตรียมอีวีเอคอมปาวด์ดังกล่าว ยังอาจจะมีการเติม primer หรือสารประเภท silane coupling agent เช่น gamma-methacryloxypropyl trimethoxysilane (ชื่อการค้า Z-6030 จาก Dow Corning หรือ A-174 จาก Union Carbide) ลงไป เพื่อช่วยในการยึดเกาะระหว่างผิวของ encapsulating material กับชั้นของเซลล์แสงอาทิตย์และกระจก

กระบวนการผสมอีวีเอคอมปาวด์และการผลิตขึ้นรูปฟิล์ม

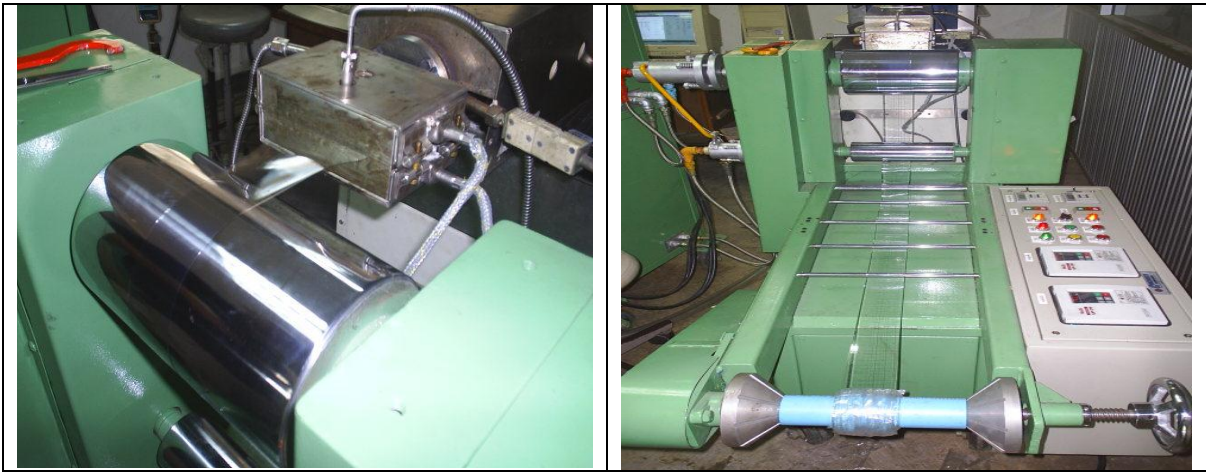
ตารางที่ 1 แสดงสูตรผสมที่ใช้ในการคอมปาวด์อีวีเอ สำหรับผลิตขึ้นรูปเป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีการระบุไว้ในลิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมา [1] ซึ่งจะเห็นได้ว่าประกอบด้วยส่วนผสมสารเคมี ที่สำคัญคือ อีวีเอพอลิเมอร์ สารดูดกลืนและป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ต สารต้านทานการเสื่อมสภาพ (แอนติออกซิแดนซ์) และสารคงรูป (curing agent)

ตารางที่ 1 สูตรผสมที่ใช้ในการคอมปาวด์อีวีเอ สำหรับผลิตขึ้นรูปเป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์

ชื่อการค้า	ผู้ผลิต	ชื่อเคมี	ปริมาณที่เติม		หน้าที่การทำงาน
			wt%	pph	
Elvax150	DuPont	Ethylene vinyl acetate random copolymer [EVA], 33 wt% vinyl acetate	97.94	100	Polymer
Cyasorb UV531	American Cyanamid	2-hydroxy-4-n-octyloxybenzophenone	0.294	0.3	UV absorber
Tinuvin 770	Ciba-Geigy	Bis(tetramethyl piperidinyl)sebacate	0.098	0.1	UV stabilizer
Naugard P	Uniroyal	Tris(mono nonylphenyl)phosphite	0.196	0.2	Antioxidant
Lupersol101	Lucidol/Pennwalt	Bis(tert-butylidioxy)-2,5-dimehtylhexane	0.469	1.5	Curing agent (standard cure)
or Lupersol TBEC	Lucidol/Pennwalt	OO-t-butyl-O-(2-ethylhexyl)-monoperoxy carbonate	0.469	1.5	Curing agent (fast cure)

ซึ่งมีกระบวนการผลิต แบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมอีวีเอคอมปาวด์โดยการผสมพอลิเมอร์กับสารเคมีต่างๆ ตามตารางข้างต้น โดยใช้เครื่องผสมแบบอัดรีด (extrusion) [รูปที่ 1.4] ที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียสขึ้นไป (ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิหลอมของอีวีเอ) ซึ่งจะทำให้ได้ฟิล์มพอลิเมอร์ถูกอัดรีดออกมาทางตาย (sheet die) หรือรูทางออกที่เป็นทรงแผ่นซีท (รูปที่ 1.4) ซึ่งในขั้นตอนนี้ มีข้อควรระวังว่าความเร็วของการ

หมุนของสกรูในเครื่องอัดรีดและของ chill roll และของลูกกลิ้งม้วนเก็บต้องสัมพันธ์กัน เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาสม่ำเสมอ (ในที่นี้ความหนารูทางออกหรือตาย (die) และความหนาของฟิล์มมีค่าเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร) นอกจากนี้การปรับอุณหภูมิของบารเรลและอุณหภูมิของลูกกลิ้งหล่อเย็น (chill roll) ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญ เนื่องจากฟิล์มอีวีแต่ละสูตรอาจจะใช้อุณหภูมิที่ต่างกัน (เช่น standard cure type จะใช้อุณหภูมิในแต่ละโซนต่ำกว่า fast cure type) และอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมอาจจะทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของพอลิเมอร์ที่ตักค้างอยู่ในบารเรลและฟิล์มที่ได้ จะเกิดการหดตัวสูง ฟิล์มที่ได้จากกระบวนการผลิตจะทำการม้วนเก็บ เพื่อเตรียมนำไปทำปฏิกิริยา curing และทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ต่อไป



รูปที่ 1.4 แสดงลักษณะของฟิล์มที่ถูกอัดรีดออกมาจาก sheet die ของเครื่อง twin screw extruder ที่ใช้ในการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการที่ มจร. [ภาพซ้าย] และชุดม้วนเก็บฟิล์ม (ซึ่งต่ออยู่กับเครื่องอัดรีดพอลิเมอร์) [ภาพขวา]

ขั้นตอนต่อมาคือการนำฟิล์มอีวีที่ได้ในขั้นแรกไปผ่านกระบวนการลามิเนชันเข้ากับชิ้นส่วนอื่นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ชั้นวัสดุกึ่งตัวนำและแผ่นกระจกด้านนอก โดยในการผลิตจริงในระดับอุตสาหกรรม จะใช้กระบวนการ vacuum thermoforming (รูปที่ 1.5) โดยมีสภาวะในการผลิตดังตารางที่ 2 โดยในขั้นตอนนี้จะใช้อุณหภูมิประมาณ 110 – 120 องศาเซลเซียส เพื่อให้ฟิล์มพอลิเมอร์เกิดการอ่อนตัวและติดทับลงบน substrate อื่น ๆ จากนั้น จะทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปอีกประมาณ 140-150 องศาเซลเซียส เพื่อเร่งให้สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่ผสมอยู่ในอีวีคอมพาวด์เกิดการแตกตัวและชักนำให้โมเลกุลอีวีเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล

อนึ่ง มีข้อสังเกตว่า ในกรณีที่ใช้สารเปอร์ออกไซด์ curing agent ชนิดที่แตกตัวเร็ว (half life สั้น) กระบวนการผลิตในขั้นตอน lamination และ ขั้นตอน curing จะยุบรวมเป็นขั้นตอนเดียว เนื่องจากปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้รวดเร็ว ดังนั้นจึงเป็นการลดขั้นตอนและระยะเวลาการผลิตลง

สำหรับเวลาที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอน curing นี้ จะขึ้นอยู่กับ half life ของสารประกอบเปอร์ออกไซด์ curing agent ที่ใช้และสามารถทำนายได้จากการนำพอลิเมอร์คอมพาวด์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค oscillating disk rheometry (ODR) โดยประเมินจากค่า optimum cure time ที่อุณหภูมิที่จะผลิต



รูปที่ 1.5 แสดงแผ่นลามิเนตที่ประกอบด้วยแผ่นกระจก ชั้นวัสดุกึ่งตัวนำและแผ่นฟิล์มอีวีเอที่กำลังจะเข้าเครื่อง vacuum thermoforming เพื่อขึ้นรูป

ตารางที่ 2 สภาวะในการผลิตขึ้นรูปอีวีเอ

Lamination conditions		Standard cure type	Fast cure type
	Preheating temp. (°C)		40
Hot plate temp. (°C)		128	160
Vacuum time (min)		3	3
Press time (min)		2	4
Curing conditions	Oven temp (°C)	150	-
	Time (min)	40	-

การทดสอบสมบัติของวัสดุหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์

การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล

แบ่งชิ้นงานจากฟิล์มอีวีเอที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว มาประมาณ 1 กรัม ทำการชั่งน้ำหนักโดยละเอียด จากนั้นทำการแช่ในตัวทำละลายไซลีนที่อยู่ในภาชนะทำปฏิกิริยา จากนั้นให้ความร้อนแก่สารละลายโดยการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานที่เหลือ มาทำการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ก่อนทำการชั่งน้ำหนักโดยละเอียด เพื่อคำนวณหาปริมาณเจล (gel content) โดยใช้สมการที่ 1.1

$$\text{Gel content} = (W_1 / W_2) \times 100 \quad (1.1)$$

W_1 = น้ำหนักของชิ้นงานที่เหลือจากการแช่ในไซลีน (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของชิ้นงานตอนเริ่มต้น (กรัม)

การทดสอบค่าการส่องผ่านแสง

นำฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา curing ไปทำการทดสอบหาค่าการส่องผ่านแสง (light transmittance) โดยใช้เครื่อง UV-Visible spectrophotometer [Shimadzu-3100] โดยใช้ความยาวคลื่นในช่วง 190 – 2100 นาโนเมตร

การทดสอบปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (ตามมาตรฐาน JIS 7209)

ตัดตัวอย่างขนาด 5 cm × 5 cm นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนัก (W_d) แล้วนำไปใส่ในภาชนะบรรจุน้ำที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อถึงกำหนด นำชิ้นงานที่ได้จากภาชนะแล้วทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (W_{wet}) ทำการคำนวณหาปริมาณความชื้นที่ดูดซับที่ชิ้นงานจากสมการที่ 2.2

$$\text{Water absorption (\%)} = [W_{wet} - W_d] / W_d \quad (2.2)$$

การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงดึง

ตัดชิ้นงานจากแผ่นฟิล์มที่ผ่านการ curing แล้วเป็นรูป dumbbell ตามมาตรฐาน JIS K7113 (type 2) จำนวน 5 ชิ้น จากนั้นนำไปทำการทดสอบสมบัติเชิงกลโดยการดึงชิ้นงานด้วยเครื่อง universal testing machine (INSTRON 4301) ที่ความเร็ว 500 มิลลิเมตรต่อนาที จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า tensile strength at break, elongation และค่า 100 % modulus

การทดสอบสมบัติด้านการทนความร้อน

นำแผ่นฟิล์มอีวีเอที่ผ่านกระบวนการ curing แล้วไปทำการอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง (ตั้งตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1.6) เมื่อครบกำหนดจึงนำชิ้นงานที่ได้ออกจากเตาจากนั้นจึงตัดชิ้นงานเป็นรูป dumbbell ตามมาตรฐาน JIS K7113 (type 2) จำนวน 5 ชิ้น ก่อนนำไปทดสอบสมบัติด้านการทนแรงดึง

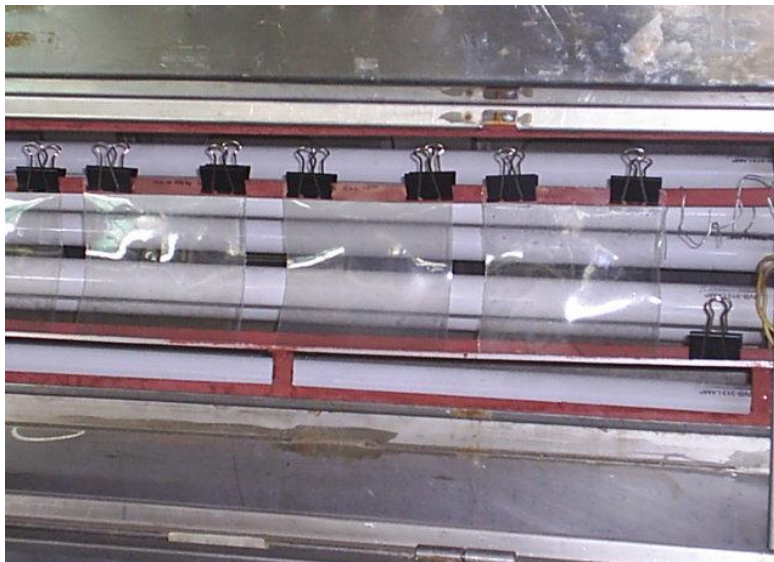
จากค่า tensile strength ค่า elongation และค่า 100 % modulus ที่ได้ จะนำไปคำนวณหาค่าสมบัติด้านแรงดึง ที่เหลืออยู่หลังจากการอบ (percentage retention of tensile properties after aging) โดยเทียบกับค่า tensile properties ต่างๆ ของชิ้นงานก่อนอบ



รูปที่ 1.6 แสดงลักษณะการวางชิ้นงานในเตาอบเพื่อทดสอบสมบัติด้านการทนความร้อนของฟิล์มอีวีเอ

การทดสอบสมบัติด้านการทนต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต

นำแผ่นฟิล์มอีวีเอที่ผ่านกระบวนการ curing แล้วไปวางในเครื่องเร่งสภาวะ (รูปที่ 1.7) ที่มีหลอดอัลตราไวโอเล็ต UV-B lamp (280-315 nm) medium-wave เป็นเวลา 800 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงนำชิ้นงานที่ได้ออกจากเครื่อง จากนั้นจึงตัดชิ้นงานเป็นรูป dumbbell ตามมาตรฐาน JIS K7113 (type 2) จำนวน 5 ชิ้น ก่อนนำไปทดสอบสมบัติด้านการทนแรงดึง จากค่า tensile strength ค่า elongation และค่า 100 % modulus ที่ได้ จะนำไปคำนวณหาค่าสมบัติด้านแรงดึงที่เหลืออยู่หลังจากการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (percentage retention of tensile properties after UV radiation) โดยเทียบกับค่า tensile properties ต่างๆ ของชิ้นงานก่อนการฉายแสง



รูปที่ 1.7 แสดงลักษณะการวางชิ้นงานในเครื่องเร่งสภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเลต

การประเมินผล

ผลการทดสอบในแต่ละด้านที่ได้ จะนำมาพิจารณาเทียบกับค่ามาตรฐาน (Specification) ของวัสดุ encapsulant (ตารางที่ 3) และนอกจากนั้น ในกรณีที่มีการวิจัยและพัฒนาวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ อาจจะนำผลทดสอบที่ได้ไปพิจารณาร่วมกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบของของฟิล์มอีวีเอทางการค้าที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน (ตารางที่ 4) เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินผล

ตารางที่ 3 แสดงเกณฑ์ข้อกำหนดของสมบัติในด้านต่าง ๆ ของวัสดุทั่วไปที่จะนำไปใช้เป็นฟิล์มโปร่งแสงสำหรับห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ [2]

สมบัติและลักษณะเฉพาะ	ค่าที่ต้องการ
ค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มหนา 20 มิลลิเมตร ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 1100 นาโนเมตร	> 90% ของแสงที่ตกกระทบ
การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	ไม่เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 100 %
การดูดซับความชื้น	< 0.5 % โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%
การทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากความร้อน	มีความเสถียร จนถึงอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส
การเกิดการคืบเชิงกล (mechanical creep)	ไม่เกิดการคืบ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
ค่าโมดูลัส จากการทดสอบการทนแรงดึง	< 20.7 MPa ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่ใช้ในการประกอบขึ้นรูป	ไม่เกิน 170 องศาเซลเซียส
ความดันที่ใช้ในการประกอบขึ้นรูป	ไม่เกิน 1 บรรยากาศ (atm)
การเสื่อมสภาพเนื่องจากได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ต	ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ เมื่อได้รับรังสี อัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร ขึ้นไป
ความขุ่นของฟิล์มพอลิเมอร์	ไม่มีความขุ่นเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 80 °C และ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %
กลิ่นเหม็นและความเป็นพิษต่อมนุษย์	ไม่มี

ตารางที่ 4 สมบัติโดยทั่วไปของวัสดุ Solar EVA Encapsulant ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน [22]

			Measured Values **	
			Standard cure types	Fast cure type
VA content	MDP Method	%	28 or 33	33
Melt flow rate	JIS-K6730	g/10 min	15 or 30	30
Melting point (before cross-linking)	DSC	°C	61	61
Glass transition temperature	HIS Method	°C	-30	- 30
Light transmittance	UV method	%	91	91
Tensile strength at break (after cross-linking)		MPa	25 or 22	18
Elongation at break (after cross-linking)		%	500 or 600	500
Tensile modulus (after cross-linking)		MPa	6	6
Water absorption	JIS K-7209	%	0.1	0.1
Cross-linking rate (150 °C, 20 min)	HIS Method	Gel %	85 or 80	90
Light resistance (800 hr UV irradiation)	JIS K-7113	% retention*	80 or above	80 or above
Heat resistance (90 °C 2000 hr)	JIS K-7113	% retention*	85 or above	85 or above
Low temperature resistance (-40°C, 2000 hr)	JIS K-7113	% retention*	90 or above	90 or above

* % retention of mechanical strength ** ค่าในตารางนี้ไม่ใช่ specification value แต่เป็นการรายงานค่าที่วัดได้จากวัสดุอีวีเอที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Solar EVA, Hi-Sheet Industries, Ltd)

เนื่องการทดสอบตามตารางที่ 4 บางรายการอาจจะไม่จำเป็นต้องทำทุกตัวอย่างที่มีการปรับสูตรผสม เช่น glass transition temperature (Tg), melt temperature (Tm), vinyl acetate content, melt flow rate, density เนื่องจากรายการต่างๆ ดังกล่าว เป็นสมบัติโดยทั่วไปที่ติดตัวมากับสารตั้งต้น เอธิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (อีวีเอ) ซึ่งอยู่ที่การเลือกใช้ชนิดของวัสดุพอลิเมอร์ และไม่ขึ้นอยู่กับชนิดหรือปริมาณสารเคมี เช่น สารแอนติออกซิแดนซ์หรือสาร curing agent โดยตรง นอกจากนี้ สมบัติด้านการทนต่ออุณหภูมิต่ำ (-40 °C, 2000 hr) อาจจะไม่จำเป็นสำหรับการใช้งานในภูมิภาคเขตร้อน (แต่อาจจะจำเป็นในการใช้งานในสภาพภูมิอากาศเย็นจัด เช่นประเทศแถบขั้วโลก หรือบนยานอวกาศ)

แนวโน้มในอนาคต

แม้ว่าในปัจจุบัน อีวีเอจะเป็นวัสดุที่สำคัญที่นิยมใช้ในการผลิตขึ้นรูปเพื่อใช้งานเป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากมีราคาถูกและมีสมบัติหลายประการที่ใช้ได้ แต่อย่างไรก็ตามปัญหาเรื่องการเสื่อมสภาพและอายุการใช้งานก็ยังคงเป็นโจทย์สำคัญที่นักวิจัยกำลังเร่งทำการพัฒนา ทั้งจากการปรับสูตรผสมของอีวีเอคอมพาวด์และหรือโดยการพัฒนาวัสดุห่อหุ้มเซลล์จากพอลิเมอร์ชนิดใหม่ เช่นจากการสืบค้นสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง [23] พบว่ามีความสนใจที่จะใช้เอธิลีนโคพอลิเมอร์ มาเป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์แทนอีวีเอ เนื่องจากพอลิเมอร์ดังกล่าวมีลักษณะคล้ายยาง มีความใสและปราศจากปฏิกิริยาการขจัด (thermal elimination) อย่างไรก็ตาม การยึดเกาะระหว่างผิวของพอลิเมอร์ตระกูลดังกล่าวกับ substrate ต่างๆ ในแผง เช่น กระจก หรือชั้นวัสดุกึ่งตัวนำ เป็นโจทย์สำคัญที่ต้องทำการควบคุม

เอกสารอ้างอิง

- [1] www.njsolarpower.com/solar_faq.htm
- [2] A.W. Czanderna and F.J. Pern, *Solar Energy Materials and Solar cell*, 43 (1996) 101.
- [3] E. Cuddihy, C. Coulbert, A. Gupta, and R. Liang, Electricity from photovoltaic solar cells, Flat-Plate Solar Array Project, Final Report, Volume VIII: Module Encapsulation, JPL Publication 86-31
- [4] P.B. Willis, Investigation of materials and processes for solar cell encapsulation, Final Report for JPL, DOE/JPL-954527-86/29 August, 1986.
- [5] E.F. Cuddihy et al., Polymeric Encapsulation Materials for Low Cost, Terrestrial, Photovoltaic Modules, Ch.22.
- [6] K.J. Lewis, Encapsulation Materials Requirement for Photovoltaic Modules, Ch. 23.
- [7] K.J. Lewis and C.A. Megerle, Encapsulant Degradation in Photovoltaic Modules, Ch. 24, pp. 353-406.
- [8] F.J. Pern and A. W. Czanderna, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 25 (1992) 3-23]
- [9] K.J. Lewis and C.A. Megerle, Encapsulant Degradation in Photovoltaic Modules, ACS Symposium Series 220 (American Chemical Society, Washington, 1983, Ch. 24, pp. 387-406.
- [10] A. L. Rosenthal and C. G. Lane, in Proc. PV Module Reliability Workshop, Oct. 25-16, 1990, Lakewood, Colorado, SERI/CP-4079, pp.217-229]
- [11] US Patent No. 5,478,402 to ASE Americas, Inc. December 26, 1995
- [12] US Patent No., 5,476,553 ASE Americas, Inc, February 18, 1994
- [13] US Patent No., 6,093,757, Midwest Research Institute, 25 July 2000.
- [14] F.J. Pern, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 41 (1996) 587-615]
- [15] F.J. Pern and A.W. Czanderna, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 25 (1993) 3-23.
- [16] N.A. Allen, Ed., Developments in Polymer Photochemistry, Vol.3 (Applied Science Publishers, Barking, 1982.
- [17] A.W. Czanderna, and F.J. Pern Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant; A critical review, , *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 43 (1996) 101-181.
- [18] Pern, F.J., and S.H. Glick, A Study of Various Encapsulation Schemes for c-Si Solar Cells with EVA Encapsulants, NREL/SNL Photovoltaics Program Review, AIP Conf. Proc. 394 (1996), pp.811-824.
- [19] US Patent application ser No. 08/574,813, filed Dec. 19,1995.
- [20] J.F. Rabek in "Photostabilization of Polymers", Elsevier, New York, 1990.
- [21] R. Gachter and H. Muller in "Plastic Additives Handbook", Hanser, 1993.

- [22] Technical data sheet from Hi-Sheet Industries, Ltd.
[23] US patent 6,114,046 [2000]

เอกสารแนะนำอ่านเพิ่มเติม

- [1] วิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา เรื่อง “การพัฒนาวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์” คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ปี 2550 ของนางสาว สิริอร อิศรางกูร ณ อยุธยา (หัวข้อ *peroxide curing agent (half-life, purity, activity)* และเรื่องการศึกษาของฟิล์มอีวีเอ และการพัฒนาฟิล์มอีวีเอชนิดขึ้นรูปเร็ว)
- [2] S. Isarankura na Ayutthaya and J. Wootthikanokkhan, Investigation of the Photodegradation Behaviors of an Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer Solar Cell Encapsulant and Effects of Antioxidants on the Photostability of the Material, *Journal of Applied Polymer Science*, 107 (2008) 3853-3863.