



การศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์
ด้วยเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์

นายรัฐเขต อุ่่นภัทรวาณิช

โครงการการศึกษาวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวัสดุ
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2549

การศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์

นายรัฐเขต อุ่ณภัทรวานิช วท.บ. (ฟิสิกส์)

โครงการการศึกษาวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบโครงการการศึกษาวิจัย

.....

(รศ. ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์)

ประธานกรรมการ โครงการการศึกษา

.....

(ดร.พัฒนา รักความสุข)

กรรมการ

.....

(ผศ.ดร.สมบัติ ธาระวันต์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

การศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์

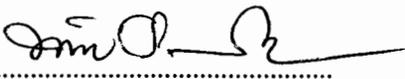
นายรัฐเขต อุ่นภัทรวานิช วท.บ. (ฟิสิกส์)

โครงการการศึกษาวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบโครงการการศึกษาวิจัย


.....
(รศ. ดร. จิตพร วุฒิกนกกาญจน์)

ประธานกรรมการโครงการการศึกษา


.....
(ดร.พัฒนาะ รักความสุข)

กรรมการ


.....
(ผศ.ดร.สมบัติ รัตนวันต์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ฉบับที่ ๑๖๓๖๓

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อโครงการการศึกษาวิจัย	การศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์
จำนวนหน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นายรัฐเขต อุ่นภัทรวาณิช
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
สายวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์จากเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ เพื่อใช้แทนวัสดุชนิดเดิมที่ทำจากเอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โคพอลิเมอร์ ซึ่งมีข้อเสียในด้านการเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อได้รับความร้อนและแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลานาน โดยงานวิจัยนี้ จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 จะเป็นการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์มเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และกระบวนการหล่อฟิล์มลงบนลูกกลิ้ง สำหรับส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาสมบัติของฟิล์มเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำไปใช้งานเป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น สมบัติด้านการส่องผ่านแสง ปริมาณเจลาสมบัติเชิงกล สมบัติด้านการทนความชื้น และสมบัติด้านการทนความร้อนและแสงอัลตราไวโอเล็ต จากการศึกษาพบว่าเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ชนิดที่เหมาะสมในการนำมาใช้ผลิต คือ Engage 8407 ซึ่งมีค่าดัชนีการไหลประมาณ 30 เดซิกรัมต่ออนาที และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูป จากบริเวณป้อนไปยังบริเวณรูทางออก คือ 85 องศาเซลเซียส, 95 องศาเซลเซียส, 105 องศาเซลเซียส, และ 115 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และจากการทดสอบสมบัติด้านต่างๆ พบว่าฟิล์มที่ได้มีค่าการดูดน้ำเท่ากับร้อยละ 0.085 ค่าโมดูลัสเท่ากับ 7.38 เมกกะปาสคาล และมีค่าการทนแรงดึงที่เหลื่ออยู่หลังผ่านการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของวัสดุห่อหุ้มเซลล์ อย่างไรก็ตามยังคงพบว่าฟิล์มที่ได้มีค่าการส่องผ่านแสง เท่ากับร้อยละ 89.39 ± 0.25 และมีค่าปริมาณเจลาร้อยละ 77 ซึ่งยังคงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานอยู่เล็กน้อย นอกจากนั้นสมบัติด้านการยึดเกาะกับกระจกของฟิล์มดังกล่าวยังมีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับการยึดเกาะระหว่างฟิล์มเอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โคพอลิเมอร์กับกระจก ซึ่งสมบัติต่างๆ ดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องทำการปรับปรุงก่อนนำไปใช้งาน

คำสำคัญ : เอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์, วัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์, เซลล์แสงอาทิตย์

Research Study	A Feasibility Study on a Development of an Encapsulating Material by Using Ethylene-Octene Copolymer
Research Study Credits	6
Candidate	Mr. Rattahked Unpattarawanich
Research Study Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jatuphorn Wootthikanokkhan
Program	Master of Engineering
Field of Study	Materials Technology
Department	Materials Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2549

Abstract

This work has concerned a feasibility study on a development of an encapsulating material for solar cell by using ethylene-octene copolymer (EOC) as a replacement of ethylene vinylacetate copolymer (EVA) which has been widely used nowadays. This is because the EVA has some disadvantages including a poor resistance to heat and ultraviolet radiation. This research work can be divided into 2 parts. The first part aims to investigate an optimum condition for producing ethylene-octene copolymer film from a twin screw extruder connected to the film casting process. The second part is a study on various properties of the ethylene-octene copolymer film in relation to solar cell applications, including light transmittance, gel content, mechanical property, and water absorption and heat resistance.

From the result, it was found that ethylene-octene copolymer (Engage 8407) with the melt index value of 30 dg/min (Engage 8407) is a suitable material for producing the film. The optimum temperature from the feed zone to the melt zone, the metering zone and the die zone of the extruder range from 85 to 95, 105 °C and 115 °C, respectively. Water absorption value of the film was 0.085% whereas the tensile modulus value was 7.38 MPa. Retention of the tensile strength after the UV radiation was above the minimum requirement of the specification. However, the light transmittance value and the gel content of the material were $89.39 \pm 0.25\%$ and 77%, respectively. These values are slightly lower than those of the specification and have yet to be improved. Finally,

an interfacial adhesion between the EOC film and the glass substrate measured by the peel test was very poor as compared to the adhesion between the EVA and the glass substrate. Again, this property is needed to be improved before usage.

Keywords: Ethylene-Octene Copolymer (EOC) / Encapsulating Material / Solar Cell

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับความรู้ คำแนะนำต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงาน จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในสายวิชา เทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้การปรึกษา และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างยิ่งสำหรับ ดร. พัฒนะ รักความสุข อาจารย์คณะพลังงานสิ่งแวดล้อม และ วัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ ดร. สมบัติ ชนะวันต์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่กรุณาสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบริษัท Chemical Innovation จำกัด สำหรับวัสดุดิบในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณพระคุณบิดา มารดา พี่ น้อง และญาติๆ ของผู้วิจัยที่เป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ เพื่อนๆ ในสายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ และผู้ที่ไม่สามารถเอ่ยนามทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือไม่มากนัก้อย ในงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฅ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เอธิลีนออกไซด์ในโพลีเอทิลีน	4
2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	5
2.3 วัสดุห่อหุ้มเซลล์	6
2.4 กลไกการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงของโพลีเอทิลีน	7
2.4.1 สารต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบปฐมภูมิ	9
2.4.1.1 สารอินทรีย์ฟีนอล	9
2.4.1.2 สารอินทรีย์เอมีน	10
2.4.2 สารต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบทุติยภูมิ	11
2.4.2.1 สารประกอบฟอสไฟต์	11
2.4.2.2 สารประกอบอะลิฟาติกซัลไฟด์	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
3 การดำเนินงานโครงการการศึกษาวิจัย	14
3.1 สารเคมี	14
3.2 เครื่องมือ	16

	หน้า
3.3 การผสมและการผลิตขึ้นรูปฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์	17
3.4 การทำปฏิกิริยา curing	18
3.5 การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงดึง	18
3.6 การทดสอบหาค่าปริมาณเจล	19
3.7 การทดสอบค่าการดูดน้ำ	20
3.8 การทดสอบค่าการส่องผ่านแสง	20
3.9 ทดสอบสมบัติด้านการทนต่อแสงอัลตราไวโอเลต	21
3.10 ทดสอบสมบัติด้านการทนความร้อน	21
3.11 ทดสอบการยึดเกาะกับกระจก	21
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	23
4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และกระบวนการหล่อฟิล์มลงบนลูกกลิ้ง	23
4.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ในด้านต่างๆ	29
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	36
5.1 สรุปผลการทดลอง	36
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก	
ก แสดงข้อมูลของเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ	40
ข แสดงผลการทดสอบสมบัติด้านการยึดเกาะ	47
ประวัติผู้วิจัย	50

รายการตาราง

ตาราง	หน้า	
3.1	รายการของสารเคมีและชนิดสารที่ใช้ในงานโครงการการศึกษาวิจัย	14
3.2	เครื่องมือและลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานโครงการการศึกษาวิจัย	16
3.3	รายการของสารเคมีและปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในโครงการการศึกษาวิจัย	17
4.1	ค่าปริมาณเจล และการดูดน้ำของเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ เทียบกับฟิล์มอีวีเอที่ใช้ในทางการค้า และเทียบกับค่าตามเกณฑ์มาตรฐาน	29
4.2	เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลในด้านต่างๆ ที่เหลืออยู่หลังผ่านการฉาย รังสีอัลตราไวโอเลตของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์และของฟิล์มอีวีเอ ที่ใช้ในทางการค้า	32
4.3	เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลในด้านต่างๆ ที่คงเหลืออยู่ของ ฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ และของฟิล์มอีวีเอที่ใช้ในทางการค้า หลังผ่านการอบร้อน	33
5.1	ค่าของสมบัติด้านต่างๆ ของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ เทียบกับค่ามาตรฐาน	36

รายการรูปประกอบ

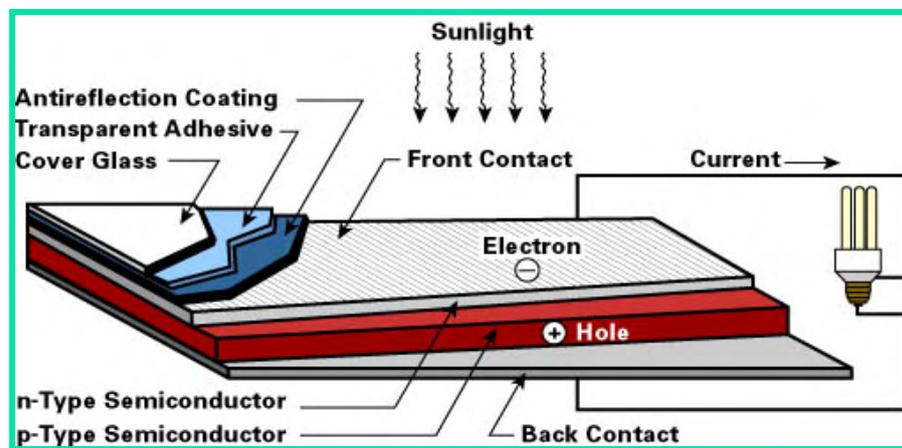
รูป		หน้า
1.1	ส่วนประกอบโครงสร้างภายในเซลล์แสงอาทิตย์	1
1.2	โครงสร้างเคมีของอีวีเอ (บน) และเอชดีเอ็นออกทีน โคลพอลิเมอร์ (ล่าง)	3
2.1	หลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	5
2.2	ลักษณะของการเปลี่ยนสี (EVA yellowing หรือ browning) ของอีวีเอ ในระหว่างการใช้งานของโมดูลในสภาวะแวดล้อมภายนอก	7
2.3	กลไกการเกิดการขาดของโมเลกุลพอลิเมอร์ (chain scission) และ การเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ (cross-linking)	8
2.4	โครงสร้างของสารประกอบประเภทฟีนอล (DTBP หรือ BHT)	10
2.5	โครงสร้างเคมีของสาร HALS	10
2.6	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของสารคงสภาพทางแสง	11
2.7	โครงสร้างของสารประกอบประเภทอะลิฟาติกซัลไฟด์	12
3.1	โครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ สารต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และ curing agent ที่ใช้ในการดำเนินโครงการการศึกษาวิจัยนี้	15
3.2	อุณหภูมิตามบริเวณต่างๆ ภายในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่	17
3.3	แผนภาพการจัดวางชิ้นงานสำหรับการทำลามิเนตด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก	22
3.4	แผนภาพการทดสอบแบบดึงลอก	22
3.5	ภาพขณะทดสอบดึงลอก	22
4.1	ภาพเนื้อฟิล์มที่ออกมาจากเครื่องอัดรีดที่ระยะเวลาเริ่มต้น (บน) และเมื่อเวลาผ่านไป (ล่าง)	24
4.2	ภาพพอลิเมอร์ที่ค้างอยู่ในบารเรลของเครื่องอัดรีดเนื่องจาก พอลิเมอร์ไม่สามารถไหลผ่านบริเวณรูทางออก	24
4.3	ลักษณะของฟิล์มที่ไหลออกจากรูทางออก ณ อุณหภูมิ TS - D ₁ = 145 องศาเซลเซียส	26
4.4	ลักษณะของฟิล์มที่ไหลออกจากรูทางออก ณ อุณหภูมิ TS - D ₁ = 135 องศาเซลเซียส	26
4.5	ลักษณะของฟิล์มที่ไหลออกจากรูทางออก (ซ้าย) ณ อุณหภูมิ TS - D ₁ = 115 องศาเซลเซียส และฟิล์มที่ไหลเข้าสู่ลูกกลิ้งหล่อเย็น (ขวา)	27

รูป (ต่อ)	หน้า
4.6 กราฟการหาค่าเวลาปฏิกิริยา curing ของฟิล์มเอชอีทีนออกทีน โคพอลิเมอร์	28
4.7 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มเอชอีทีนออกทีน โคพอลิเมอร์	30
4.8 แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณการส่องผ่านแสงของฟิล์มอีวีเอ กับค่าตามเกณฑ์มาตรฐานฟิล์มอีวีเอ และค่าของฟิล์มเอชอีทีนออกทีน โคพอลิเมอร์	30
4.9 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของฟิล์มอีวีเอกับค่าตาม เกณฑ์มาตรฐาน และค่าของฟิล์มเอชอีทีนออกทีน โคพอลิเมอร์	31
4.10 แผนภูมิปริมาณการส่องผ่านแสงหลังจากนำชิ้นงาน ไปผ่านแสง อัลตราไวโอเล็ตของฟิล์มเอชอีทีนออกทีน โคพอลิเมอร์ เปรียบเทียบกับ ค่าตามเกณฑ์มาตรฐาน และค่าของฟิล์มอีวีเอ	32
4.11 แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณการส่องผ่านแสงหลังผ่านการอบร้อนของ ฟิล์มเอชอีทีนออกทีน โคพอลิเมอร์กับค่าตามเกณฑ์มาตรฐาน และค่าของฟิล์มอีวีเอ	33
4.12 กราฟที่ได้จากการทดสอบการดึงลอกของชิ้นงานลามิเนตระหว่างกระจกกับ ฟิล์มอีวีเอ และลามิเนตระหว่างกระจกกับฟิล์มเอชอีทีนออกทีน โคพอลิเมอร์	34
4.13 แรงดึงลอกเฉลี่ยของฟิล์มอีวีเอ เทียบกับฟิล์มเอชอีทีนออกทีน โคพอลิเมอร์ ในสภาวะบรรยากาศปกติ	35

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นพื้นฐานในการดำรงชีวิตของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยปัจจุบันมนุษย์ต้องพึ่งพาการใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น ความร้อนและไฟฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่จะได้อาจมาจากแหล่งกำเนิดพลังงานที่สำคัญ คือ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม พลังงานจากเชื้อเพลิงต่างๆ เหล่านี้ นอกจากจะมีอยู่อย่างจำกัดแล้ว ยังสร้างปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ดังนั้นจึงได้มีความพยายามในการแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่มาทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานคลื่น พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น ในบรรดาแหล่งพลังงานใหม่เหล่านี้ พลังงานจากแสงอาทิตย์ถือได้ว่ามีลักษณะเด่นกว่าพลังงานในรูปแบบอื่น เนื่องจากแสงอาทิตย์มีอยู่ทั่วไป ไม่จำกัด และเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่ก่อมลพิษแก่สิ่งแวดล้อม ดังนั้น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการสร้างพลังงานไฟฟ้าโดยตรง จึงเป็นสิ่งที่ทั่วโลกกำลังพยายามพัฒนาให้สำเร็จ [1] ทั้งในด้านเทคโนโลยีและในการลดต้นทุน สำหรับประเทศไทยแล้วการเลือกใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ในสัดส่วนมากขึ้นเป็นการช่วยยกระดับการพึ่งตนเองในด้านพลังงานซึ่งจะโยงไปถึงความมั่นคงในด้านพลังงานของชาติอีกด้วย



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบโครงสร้างภายในเซลล์แสงอาทิตย์ [2]

โดยทั่วไปแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนจะประกอบไปด้วยโครงสร้างหลายส่วนด้วยกัน (ดังแสดงในรูปที่ 1.1) เช่น สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้งาน, front contact ทำจากโลหะทองแดง (Copper) เป็นแผ่นวงจรด้านหน้าที่เชื่อมจากด้านของสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น ไปยังวงจรไฟฟ้า เช่นเดียวกับ back contact เป็นแผ่นวงจรด้านหลังที่เชื่อมจากด้านของสารกึ่งตัวนำชนิด พี ไปยังวงจรไฟฟ้าอีกด้านหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีสารเคลือบกันการสะท้อน (Anti – reflection coating) ที่ทำจากวัสดุ Indium-Tin

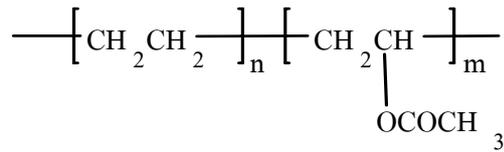
Oxide,ITO) [3] ซึ่งมีหน้าที่ป้องกันการสะท้อนกลับของแสงที่ส่องผ่านไปช่วงวงจรของสารกึ่งตัวนำ นอกจากนั้นยังมีแผ่นกระจก (cover glass) ทำหน้าที่ ป้องกันตัวเซลล์ภายในจากสภาวะแวดล้อมภายนอกซึ่งมีฝุ่นละออง และสิ่งสกปรก เป็นต้น โดยในระหว่างชั้นของกระจกกับชั้นของวัสดุกึ่งตัวนำ ยังมี ส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง คือ กาวโปร่งแสง (transparent adhesive) หรือ วัสดุห่อหุ้มเซลล์ (encapsulating material) หน้าที่หลักของวัสดุดังกล่าว คือ กันความชื้น นอกจากนั้นวัสดุดังกล่าว ยังมีหน้าที่อื่นๆ ที่สำคัญ คือ

1. เป็นตัวรองรับ และช่วยยึด โครงสร้างของแผ่นวงจรเซลล์แสงอาทิตย์กับแผ่นกระจกให้ ในขณะขนส่ง ติดตั้ง และใช้งาน
2. ป้องกันการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น ฝุ่น ความชื้น ในขณะใช้งาน
3. เพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ในโมดูล

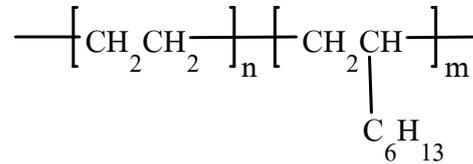
ในปัจจุบันวัสดุพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์ คือ เอธิลีน ไวนิลอะซิเตท โคพอลิเมอร์ หรืออีวีเอ (ethylene vinylacetate , EVA) เนื่องจากพอลิเมอร์ดังกล่าวมีราคาถูกกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ และมีสมบัติด้านอื่นๆ เช่น ความโปร่งใส ค่าโมดูลัส ค่าการทนความชื้น อยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้งานได้ อย่างไรก็ตามข้อเสียของการใช้อีวีเอในงานด้านเซลล์แสงอาทิตย์ คือ การที่พอลิเมอร์ดังกล่าว สามารถเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากได้รับความร้อนและแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลานาน โดยชิ้นงานจะมีสี เข้มขึ้นเป็นสีเหลืองหรือน้ำตาล เรียกว่าปรากฏการณ์ yellowing หรือ EVA browning เมื่อใช้งานไป ระยะเวลาประมาณ 3 –12 ปี [4] ซึ่งจะต่ำกว่าเป้าหมายที่วางไว้ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วเซลล์ แสงอาทิตย์ควรมีอายุการใช้งานประมาณ 20 –30 ปี [5,6]

ดังนั้น โครงการการศึกษาวิจัยนี้จึงได้สนใจที่จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการหาพอลิเมอร์ชนิด ใหม่ที่จะสามารถใช้งานเป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น โดยในที่นี้ ได้พิจารณาใช้เอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (ethylene octene copolymer) มาทำการศึกษาเนื่องจาก พิจารณาเห็นว่า โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ดังกล่าวปราศจากหมู่ไวนิลอะซิเตท (ซึ่งผู้วิจัยฯ เชื่อว่าการแตกตัวของหมู่อะซิเตทน่าจะเป็นสาเหตุที่สำคัญประการหนึ่งที่ทำให้ฟิล์มอีวีเอ เกิดการ เสื่อมสภาพเมื่อได้รับความร้อนและแสงแดด) สำหรับสูตรโครงสร้างทางเคมีของอีวีเอ และ เอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์แสดงได้ดังรูปที่ 1.2

อนึ่ง เนื่องจากในการผลิตฟิล์มพอลิเมอร์จำเป็นที่จะต้องใช้สภาวะในกระบวนการผลิตที่เหมาะสม และเนื่องจากสมบัติของฟิล์มที่ได้ ควรจะเป็นไปตามเกณฑ์ของข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุห่อหุ้มเซลล์ แสงอาทิตย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาวิจัย ในประเด็นดังกล่าวข้างต้น



Ethylene Vinylacetate Copolymer (EVA)



Ethylene Octene Copolymer

รูปที่ 1.2 โครงสร้างเคมีของอีวีเอ (บน) และ
เอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ (ล่าง)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และกระบวนการหล่อฟิล์มลงบนลูกกลิ้ง
- 1.2.2 ศึกษาสมบัติของฟิล์มเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำไปใช้งาน เป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มที่ได้กับค่ามาตรฐานของวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ให้ได้มาตรฐาน

1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการขึ้นรูปฟิล์มเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ 2 ชนิด ได้แก่ Engage 8100 และ Engage 8407
- 1.3.2 ศึกษาการขึ้นรูปฟิล์มเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และกระบวนการหล่อฟิล์มลงบนลูกกลิ้ง (casting)
- 1.3.3 ทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ของฟิล์มที่อัดรีดได้ ดังนี้ สมบัติด้านการทนแรงดึง (tensile properties) ปริมาณเจล (gel content) ค่าการดูดน้ำ (water absorption) ค่าการส่องผ่านแสง (light transmittance) ทดสอบการยึดเกาะกับกระจก (peel test) ทดสอบการทนแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV resistance) และการทนความร้อน (heat resistance)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาฟิล์มเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์สำหรับใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอายุการใช้งานนานขึ้น

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์

เอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (Ethylene – Octene Copolymer , EOC) ผลิตได้จากกระบวนการโคพอลิเมอร์ไรเซชันของเอธิลีนและออกทีนโมโนเมอร์ ซึ่งในกระบวนการสังเคราะห์ EOC จะมีการใช้ metallocene เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านสม่ำเสมอ มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถควบคุมการกระจายน้ำหนักโมเลกุลได้ดี (MWD) ในด้านของสมบัติทางไฟฟ้า เนื่องจาก EOC เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น จึงเหมาะกับการใช้เป็นฉนวน

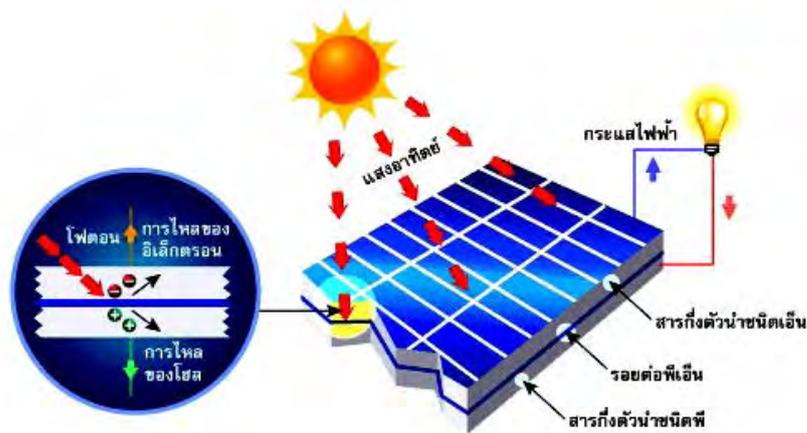
EOC เป็นพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า 0.89 g/cm^3 มีลักษณะเป็นอิลาสโตเมอร์เนื่องจากมีค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ต่ำ และมีความเป็นผลึกน้อยกว่าพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง (linear low density polyethylene , LLDPE) ในด้านสมบัติด้านการละลายนั้น เนื่องจากเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์จะเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วจึงไม่ละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วใดๆ ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนั้นเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ยังสามารถทนต่อสารเคมีได้ดี และสามารถทนต่อความร้อนในระดับที่ไม่ค่อยไปกว่าพอลิเมอร์ที่มีขั้วประเภทอื่นๆ รวมทั้งสามารถทนต่อการเกิด stress cracking ได้ดี

โดยปกติแล้วเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นเม็ดใสเหมาะสำหรับงานฉีดขึ้นรูปเป็นสินค้าอุปโภคบริโภค หรือประเก็น หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ต้องการความใสของชิ้นงาน นอกจากนั้นเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ยังสามารถผสมเข้ากับพอลิเมอร์ประเภทพอลิโอเลฟินได้ดี ทำให้สามารถขยายขอบเขตการใช้งานได้กว้างขึ้น

2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้ซิลิคอนซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีราคาถูกที่สุดและปริมาณมากที่สุดบนโลก มาเป็นวัตถุดิบในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยขั้นตอนเริ่มจากการนำซิลิคอนมาถลุง และนำไปผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัสโลหะผสมของซิลิคอนที่ได้จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอน โลหะผสมของซิลิคอนที่ได้จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮลซึ่งมีประจุบวก) ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกันจะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน อาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีความหนาประมาณ 200-400 ไมโครเมตร

เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการสร้างพาหะ (carrier) เกิดขึ้น โดยพาหะจะนำไฟฟ้าประจุลบ (อิเล็กตรอน) และประจุบวก (โฮล) ซึ่งอยู่ในภายในโครงสร้างรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งโครงสร้างรอยต่อพีเอ็นนี้จะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกอิเล็กตรอนให้ไหลไปที่ขั้วลบ และทำให้โฮลไหลไปที่ขั้วบวก (ปกติที่บริเวณฐานของเซลล์จะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้น ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ) ผลจากการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลไปที่ขั้วต่างๆ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง และเมื่อต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [1]

2.3 วัสดุห่อหุ้มเซลล์ (Encapsulating Material)

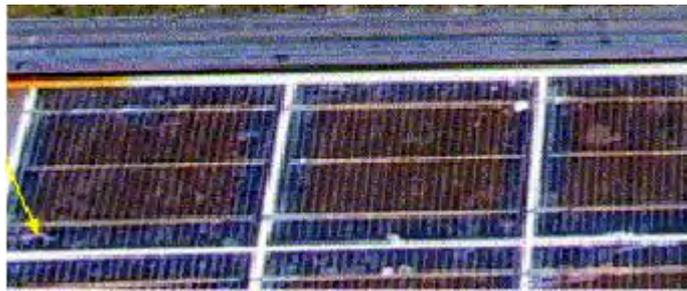
วัสดุห่อหุ้มเซลล์ หรือกาวโปร่งแสง เป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยชั้นฟิล์มของวัสดุห่อหุ้มเซลล์จะประกบอยู่กับชั้นของโมดูลและชั้นของแผ่นกระจก (cover glass) โดยหน้าที่หลักของวัสดุดังกล่าว คือ กันความชื้นนอกจากนั้นวัสดุดังกล่าวยังมีหน้าที่อื่นๆ ที่สำคัญ คือ

1. เป็นกาวช่วยยึด โครงสร้างของแผ่นวงจรเซลล์แสงอาทิตย์กับแผ่นกระจกให้ติดกันแน่นทั้งในขณะขนส่ง ติดตั้ง และในขณะใช้งาน
2. เป็นชั้นฟิล์มป้องกันการสัมผัสระหว่างแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์กับสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น ฝุ่น ความชื้น ในขณะใช้งาน
3. เพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ในโมดูล

ในการนำวัสดุที่มาใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องมีลักษณะที่สำคัญ ดังนี้

1. ต้องโปร่งแสงหรือมีค่าการส่องผ่านแสงไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90 ของแสงที่ตกกระทบ
2. ต้องสามารถทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสงแดดและความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 85 องศาเซลเซียส โดยโครงสร้างทางเคมี สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงไม่เปลี่ยนแปลง
3. ต้องสามารถขึ้นรูปได้ง่าย เช่น สามารถขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัด (compression Moulding) โดยใช้อุณหภูมิและความดันไม่สูงมากนัก (อุณหภูมิไม่เกิน 170 องศาเซลเซียสและความดันไม่เกิน 1 บรรยากาศ) รวมทั้งสามารถนำไปประกอบเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ได้ง่าย
4. ต้องทนต่อความชื้นสูง เพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยมีค่าร้อยละของการดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 100%) ไม่เกิน 0.5
5. ต้องมีความสามารถในการที่จะทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างชั้นของเซลล์แสงอาทิตย์และกระจกโดยไม่เกิดการหลุดลอกแยกออกจากกันได้ง่ายในระหว่างการใช้งาน
6. ต้องทนต่อสารเคมีในระหว่างการรักษา ขนส่ง ติดตั้งและระหว่างการใช้งาน อีกทั้งต้องไม่มีกลิ่นเหม็นหรือเป็นพิษต่อมนุษย์
7. ต้องมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ค่าโมดูลัสแรงดึงจะต้องไม่สูงเกิน 20 เมกกะปาสคาล และมีลักษณะเป็นยางหรืออีลาสโตเมอร์ กล่าวคือ ไม่แข็งจนเกินไป นอกจากนี้ควรมีลักษณะที่ทนต่อการเกิดการคืบตัว (creep resistance) ในระหว่างการใช้งาน
8. ต้องมีราคาถูก เพื่อให้ต้นทุนในการผลิตต่ำและมีแนวโน้มที่จะผลิได้ใช้ในเชิงพาณิชย์ได้

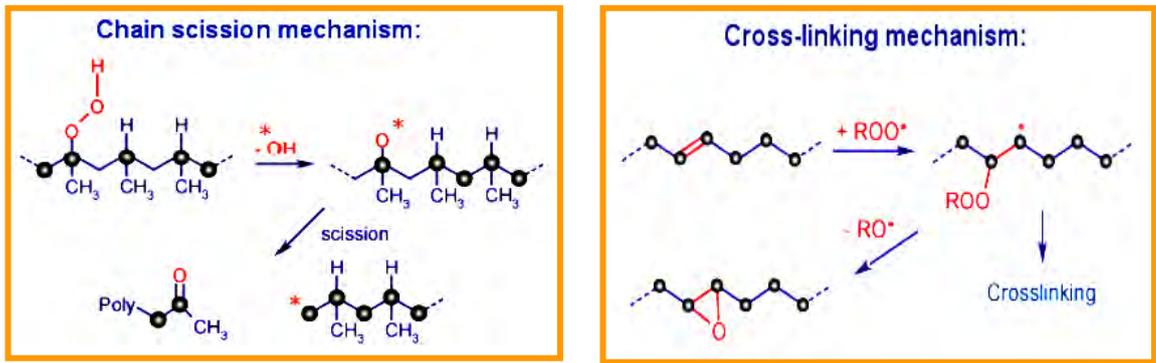
โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์ที่อยู่ในข่ายที่น่าจะนำมาทำเป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์[4,5] มีหลายชนิด ได้แก่ ยาง ซิลิโคน, พอลิบิวทิลอะคริเลต ไซรับ และเอทิลีน ไวนิลอะซิเตต (หรือ อีวีเอ) โดยเมื่อพิจารณาจากสมบัติของวัสดุห่อหุ้มเซลล์โดยรวมประกอบกับข้อมูลด้านราคาแล้วพบว่าวัสดุที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์คือ อีวีเอ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาต่อมาภายหลัง พบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้อีวีเอเป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์ คือ การเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพภูมิอากาศในระหว่างการใช้งาน (เช่น ความร้อนและแสงแดด) โดยจะเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำตาลขึ้น (เมื่อใช้งานไประยะเวลา 3 – 12 ปี [4]) ซึ่งในบางครั้งจะเรียกปรากฏการณ์นั้นว่า EVA yellowing หรือ EVA browning (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) ซึ่งการเกิดสีในลักษณะดังกล่าวมีผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (power output) ลดลงถึงร้อยละ 30 หลังจากการใช้งานโดยสัมผัสกับสภาพแวดล้อมภายนอกต่างๆ [7] ดังนั้นอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์จึงต่ำกว่าเป้าหมายที่วางไว้ เนื่องจากโดยทั่วไปตั้งเป้าไว้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ควรมีอายุการใช้งานประมาณ 20 – 30 ปี [5,6]



รูปที่ 2.2 ลักษณะของการเปลี่ยนสี (EVA yellowing หรือ browning) ของอีวีเอ
ในระหว่างการใช้งานของโมดูลในสภาวะแวดล้อมภายนอก [2]

2.4 กลไกการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงของพอลิเมอร์

โดยทั่วไปแล้วกลไกการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ประเภทพอลิโอะเลฟินส์มี 2 แบบที่สำคัญ คือ กลไกที่มีการขาดของสายโซ่โมเลกุล (chain scission) และกลไกการเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (cross – linking) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

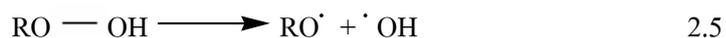
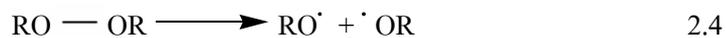


รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ (chain scission) และการเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ (cross-linking) [8]

การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ มักจะเกิดจากการถูกกระตุ้นด้วยพลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานกล (ในส่วนของที่เกี่ยวกับความเค้นและการเคลื่อนที่) พลังงานความร้อน (ในส่วนของที่เกี่ยวกับอุณหภูมิสูง) พลังงานแสง (ในส่วนของที่เกี่ยวกับแสงอัลตราไวโอเล็ต) ทำให้เกิดการแตกออกของพันธะเคมีในโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้เป็นอนุมูลอิสระนอกจากนั้นในสถานะที่มีออกซิเจนพอลิเมอร์อาจจับกับโมเลกุลออกซิเจนได้เป็นอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 – 2.3 ตามลำดับ



การที่พอลิเมอร์เสื่อมสภาพโดยผ่านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดสารประกอบเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเปอร์ออกไซด์ขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งสารประกอบเปอร์ออกไซด์เหล่านี้จะสลายตัวได้เป็นอนุมูลอิสระดังสมการ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ



อนุมูลอิสระที่ได้จากการสลายตัวนี้จะไปทำปฏิกิริยาต่อกับโมเลกุลพอลิเมอร์ที่เหลืออยู่ ซึ่งจะส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดเป็นอนุมูลอิสระที่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปในรูปแบบต่างๆ เช่น การเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล การแตกสายโซ่สั้นลง การเกิดปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชัน หรือปฏิกิริยาดิพอลิเมอร์ไรเซชัน เป็นต้น ผลของการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ดังกล่าวทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความเหนียว เปลี่ยนแปลงไปในทางที่แย่ง ดังนั้น ในทางปฏิบัติแล้วการนำ

พอลิเมอร์ ไปใช้งานจึงนิยมเติมสารต้านทานการเสื่อมสภาพหรือสารต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidant) ซึ่งมีอยู่ 2 ประเภท หลัก คือ

1. สารต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบปฐมภูมิ
2. สารต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบทุติยภูมิ

2.4.1 สารต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบปฐมภูมิ (primary antioxidants)

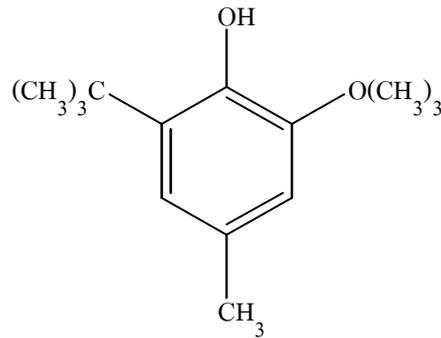
สารต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบปฐมภูมิ โดยทั่วไปมี 2 ชนิดคือ สารประกอบฟีนอลที่มีหมู่แทนที่ (substituted phenol) และสารประกอบไดเอริลเอมีน (diaryl amines) สารประเภทนี้จะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เสถียร ดังสมการที่ 2.6



อนุมูลอิสระของสารต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ($A\cdot$) ที่ได้เป็นสารที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเนื่องจากใน โครงสร้างโมเลกุลของสารฟีนอลจะมีหมู่วงแหวนอะโรมาติกส์ทำให้สามารถเกิดโครงสร้างแบบเรโซแนนซ์ได้ หรือในกรณีของสารเอมีน โครงสร้างโมเลกุลจะความเกะกะ (steric effect) ทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นมีความเสถียร และปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาได้โดยไม่เกิดอันตราย

2.4.1.1 อินเดอร์ฟีนอล

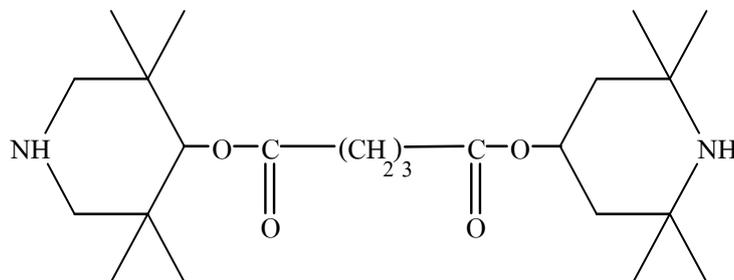
สารประกอบฟีนอลที่มีหมู่แทนที่จะสามารถยับยั้งปฏิกิริยาการแตกตัวของสายโซ่อนุมูลอิสระได้เมื่อเปรียบเทียบกับฟีนอลโดยทั่วไป ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ ได้แก่ ได-เทอร์เชียรี-บิวทิล-พารา-ครีซอล (di-tert-butyl-p-cresol) หรือ บิวทิลเลต ไฮดรอกซี โทลูอิน (butylated hydroxy toluene, (BHT)) รูปที่ 2.4 สารเคมีชนิดนี้สามารถนำมาใช้กับพอลิเมอร์ได้อย่างดี เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ แต่ถ้านำไปใช้ที่อุณหภูมิสูงอาจเกิดการระเหยออกไปก่อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ ในกรณีนี้จึงควรใช้พอลิฟีนอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นไปเพื่อที่จะลดความสามารถในการระเหยลง ตัวอย่าง เช่น สารประกอบได-ไตร และ เตตระฟีนอล สารเหล่านี้นำมาใช้ที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ และให้สมบัติที่ดีกว่าการใช้บิวทิลเลต ไฮดรอกซี โทลูอิน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสารประกอบประเภทฟีนอล (DTBP หรือ BHT) [9]

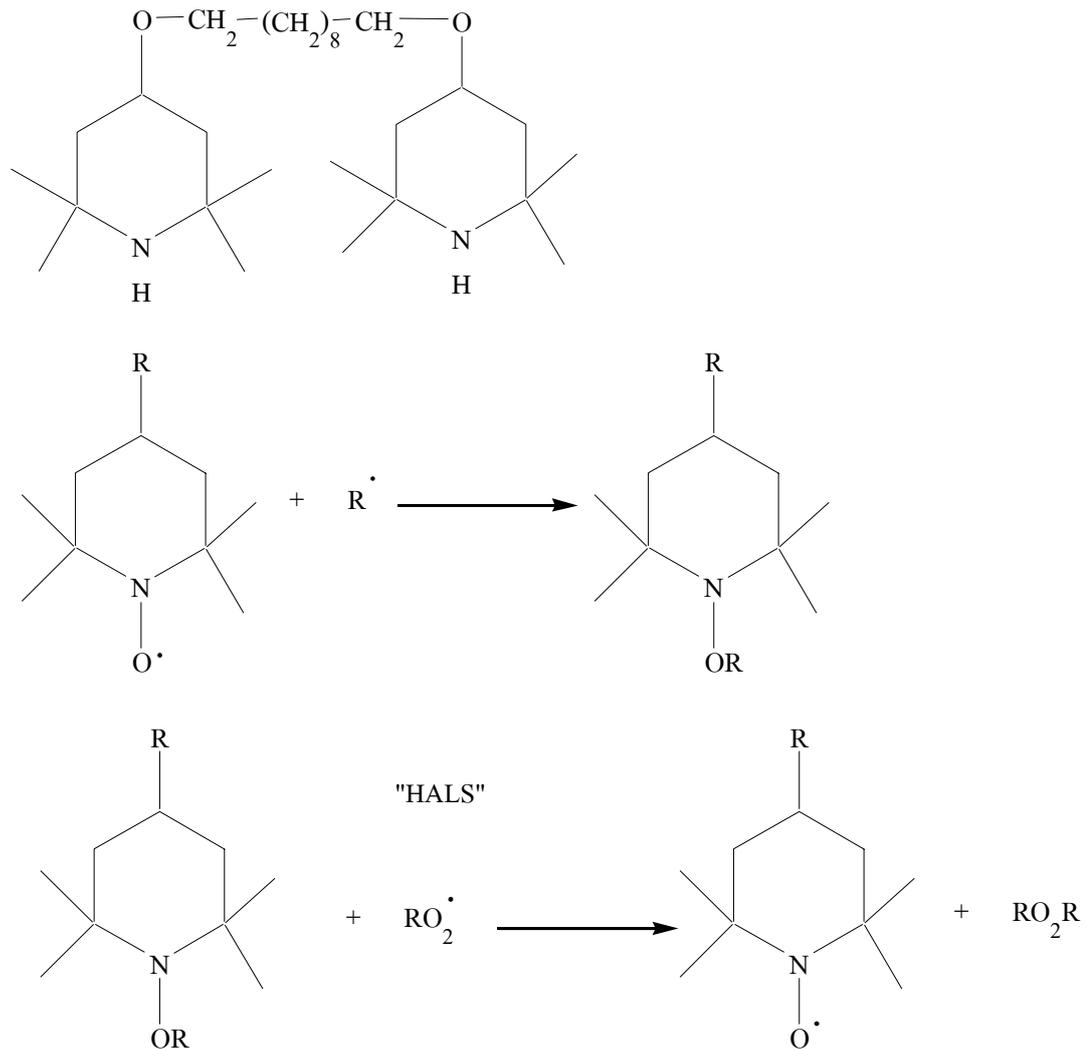
2.4.1.2 อินเดอร์เอมีน (hindered amine light stabilizers, HALS)

สารคงสภาพทางแสงประเภทอินเดอร์เอมีน (hindered amine light stabilizers, HALS) แสดงโครงสร้างเคมีดังรูปที่ 2.5 เป็นสารประกอบประเภทใหม่ที่ใช้เป็นสารเพิ่มความเสถียรภาพทางแสง อัลตราไวโอเลตให้กับพอลิเมอร์ สารพวกนี้จัดเป็นอะลิฟาติกเอมีน (aliphatic amines) โดยเอมีนถูกออกซิไดซ์ด้วยแสงก่อนเกิดเป็นอนุมูลอิสระไนโตรออกไซด์ (nitroxide radical) ที่เสถียรซึ่งอนุมูลอิสระดังกล่าวจะไม่ใช่ไปทำลายโมเลกุลพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ แต่จะสามารถทำปฏิกิริยารวมตัวกับสารอนุมูลอิสระชนิดอื่น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างเคมีของสาร HALS [10]

ตัวอย่างเช่น อนุมูลอิสระไนโตรออกไซด์ (nitroxide radical) จะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ที่เกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกซิลลามีน อีเทอร์ (hydroxylamine ether) จากนั้นเมื่ออนุมูลอิสระของพอลิเมอร์โมเลกุลอื่นแพร่เข้ามาทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลลามีน อีเทอร์ (รูปที่ 2.6) จะทำให้ได้โมเลกุลพอลิเมอร์ที่เสถียรและอนุมูลอิสระไนโตรออกไซด์ (nitro oxide radical) ใหม่ ด้วยเหตุนี้การใช้สารอินเดอร์เอมีนในปริมาณเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาจำนวนมากส่งผลให้ปฏิกิริยามีเสถียรภาพ



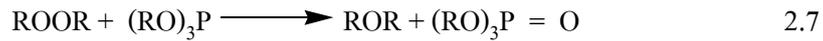
รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของสารคงสภาพทางแสง [9]

2.4.2 สารต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบทุติยภูมิ (secondary antioxidants)

เนื่องจากการใช้สารช่วยต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันประเภทฟินอลหรือเอมีนที่กล่าวถึงข้างต้น ไม่สามารถป้องกันการเกิดการเสื่อมสภาพได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น จึงต้องเติมสารเติมแต่งชนิดอื่นลงไปเสริมเพื่อเสริมประสิทธิภาพ สารเติมแต่งชนิดนี้จะมีหน้าที่ทำลายสารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ ตัวอย่างของสารทำลายเปอร์ออกไซด์ที่กล่าวถึงในที่นี้ ได้แก่ สารอินทรีย์ฟอสไฟต์ (organic phosphites) และสารประกอบซัลไฟด์ (aliphatic sulfides)

2.4.2.1 สารประกอบฟอสไฟต์

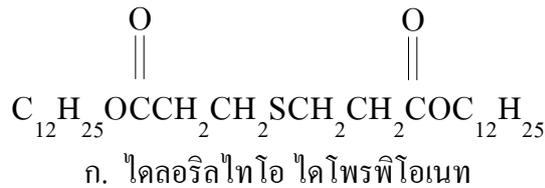
สารประกอบฟอสไฟต์ $[(RO)_3P]$ นิยมนำมาใช้เป็นสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันสำหรับพลาสติก โดยอาจใช้เพียงอย่างเดียวหรือใช้ร่วมกับสารอินเตอร์ฟินอลเพื่อให้เกิดการเสริมฤทธิ์กัน (synergistic effect) สำหรับการทำงานของสารทำลายเปอร์ออกไซด์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.7



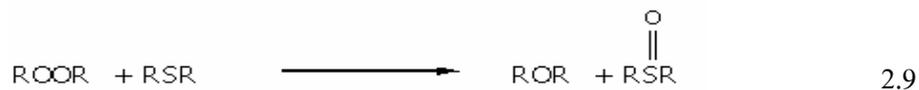
จากปฏิกิริยาจะได้อสารประกอบฟอสเฟตเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีอนุมูลอิสระ และสารที่ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาช่วยทำให้พอลิเมอร์มีความเสถียรและทนต่อความร้อนได้ดี

2.4.2.2 สารประกอบอะลิฟาติกซัลไฟด์

สารอะลิฟาติกซัลไฟด์นิยมใช้ในที่นี้ได้แก่ ไดลอริลไทโอ ไดโพรพิโอเนต (dilauryl thio dipropionate, DLTDP แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 ก.) สารชนิดนี้นิยมใช้ร่วมกับสารอินเตอร์ฟินอลเพื่อทำให้เกิดความต้านทานต่อการออกซิเดชันดีขึ้น สำหรับพอลิเมอร์บางชนิดที่ระเหยได้ง่ายหรือมีขี้วมักเกินไป ควรใช้สารชนิดไดสเตียริลไทโอ ไดโพรพิโอเนต (distearyl thio dipropionate, DSTDP, แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 ข.) โดยกลไกการทำงานของสารประเภทอะลิฟาติกซัลไฟด์นี้แสดงได้ดังสมการที่ 2.8 และ 2.9



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสารประกอบประเภทอะลิฟาติกซัลไฟด์



จากสมการที่ 2.8 และ 2.9 จะเห็นได้ว่า ROOH จะเข้าทำปฏิกิริยากับ RSR ทำให้ได้อสารประกอบซัลฟอกไซด์ (sulfoxide) และสารประกอบแอลกอฮอล์ หรืออีเทอร์ในที่สุด ดังนั้น จึงไม่มีสารประกอบเปอร์ออกไซด์หลงเหลืออยู่ให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

H.Schmidhuber, K.Krannich [15] พัฒนากระบวนการขึ้นรูปพอลิไวนิลบิวทิลอล (PVB) โดยกระบวนการทำลามิเนต โดยความร้อนสูงเพื่อใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์แทนอีวีเอได้ โดยกระบวนการขึ้นรูปแบบใหม่นี้จะใช้เวลาในการผลิต PVB ลดลงจากเดิม 150 นาที เหลือเพียง 54 นาที นอกจากนั้น PVB ที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบใหม่นี้ จะมีสมบัติในด้านการส่องผ่านแสงที่ใกล้เคียงกับอีวีเอ และมีข้อดีในด้านการทนต่อรังสีอัลตราไวโอเลต และการยึดเกาะกับกระจกที่แข็งแรง อย่างไรก็ตาม การใช้งาน PVB เป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์ยังคงมีข้อเสียในด้านการทนความชื้นที่ต่ำทำให้น้ำหรือความชื้นสามารถซึมผ่านเข้าไปยังด้านในของแผงเซลล์อาทิตย์ และทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงได้

P.Klemchuk [16] และคณะ ทำการศึกษาการเสื่อมสภาพและสารเติมแต่งของอีวีเอที่ใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์ในโมดูลของพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการเกิดพอลิอินจากการเสื่อมสภาพของอีวีเอทำให้เกิดการเปลี่ยนสี ดังเช่นที่เกิดในพีวีซี โดยในที่นี้ไม่พบการเสื่อมสภาพของโลหะในวัสดุห่อหุ้มเซลล์ ปัจจัยที่จะลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ คือ การใช้วัสดุส่วนพื้นหลังของวัสดุห่อหุ้มเซลล์ไม่ให้ออกซิเจนซึมผ่าน และใช้สารเติมแต่งในปริมาณที่เหมาะสม

K.Agroui [17] และคณะ ได้ศึกษาถึงเสถียรภาพทางความร้อนของอีวีเอ แบบ fast cure และ slow cure ที่ใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์ ด้วยเครื่องมือ Thermogravimetric Analysis (TGA) พบว่าอุณหภูมิที่ทำให้เริ่มเกิดการสูญเสียน้ำหนักของอีวีเอ แบบ slow cure คือ 85 องศาเซลเซียส โดยจะมีการสูญเสียน้ำหนัก 0.1255% ในขณะที่อีวีเอ แบบ fast cure จะเริ่มสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส น้ำหนักคิดเป็น 0.04045% ซึ่งจะชี้ให้เห็นว่าอีวีเอ แบบ fast cure จะมีความเสถียรมากกว่าในช่วงของอุณหภูมิการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3 การดำเนินงานโครงการการศึกษาวิจัย

3.1 สารเคมี

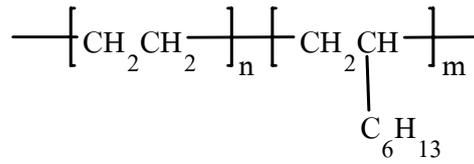
สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินงานนี้แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยมีสูตร โครงสร้างทางเคมีแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายการของสารเคมีและชนิดสารที่ใช้ในงาน โครงการการศึกษาวิจัย

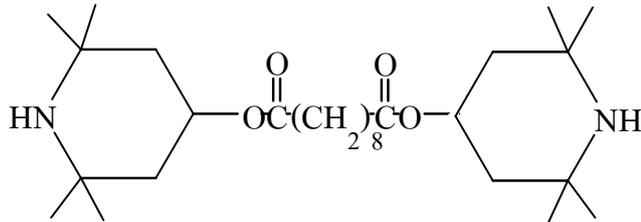
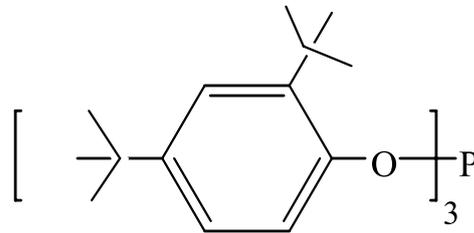
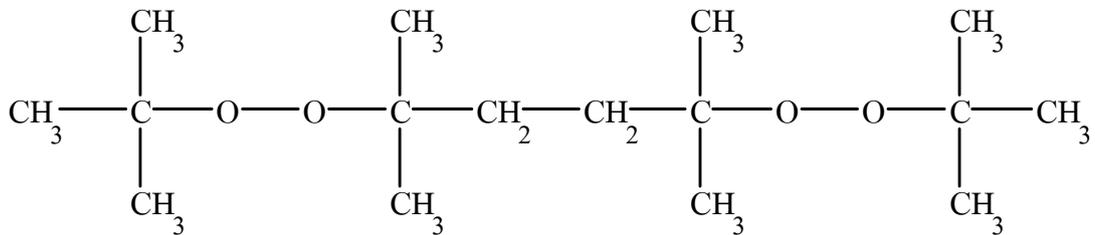
ชื่อการค้า	ชื่อทางเคมี	ลักษณะการใช้งาน
Engage 8100 , 8407	Ethylene – octene copolymer (44% by weight of octene content)	พอลิเมอร์สำหรับเตรียมเป็น วัสดุห่อหุ้มเซลล์
Tinuvin 770	Bis (2,2,6,6-tetramethyl-4-piperidiny) sebacate	สารต้านทานการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันแบบปฏุมภูมิ
Irgafos168	2,4-bis(1,1-dimethylethyl)phosphite	สารต้านทานการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันแบบทุติยภูมิ
Luperox 101	2,5-Bis(tert-butylldioxy)-2,5-dimethylhexane (liquid form, 100% pure)	Curing agent

ตารางที่ 3.1 แสดงรายการสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมปาวด์เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์ ซึ่งสารเคมีดังกล่าวเป็นสูตรเดียวกับของอีวีเอคอมปาวด์ที่ใช้ผลิตวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางการค้า [11]

ในส่วนของสาร curing agent ที่ใช้ในที่นี้นั้นจะเป็น 2,5-Bis(tert-butylldioxy)-2,5-dimethylhexane (ชื่อทางการค้า Luperox101) เนื่องจากสารดังกล่าวมีความใส และจะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความใส และมีค่าการส่องผ่านแสงสูงเหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน ในขณะที่สาร curing agent ชนิดอื่น เช่น DCP แม้ว่าจะมีค่าเวลาครึ่งชีวิตใกล้เคียงกัน (8 นาที และ 6 นาทีตามลำดับ) แต่ละสารดังกล่าวจะส่งผลให้ฟิล์มมีความขุ่นมากกว่า ดังนั้นจึงไม่นำมาพิจารณาใช้ในที่นี้



Ethylene Octene Copolymer

Bis(2,2,6,6-tetramethyl-4-piperidinyl)sebacate (**Tinuvin770**)Tris(mono-nonylphenyl)phosphate (**Irgafos 168**)2,5-Bis(tert-butylldioxy)-2,5-dimethylhexane (liquid form, 100% pure) (**Luperox 101**)

รูปที่ 3.1 โครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ สารต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และ curing agent ที่ใช้ในการดำเนินโครงการการศึกษาวิจัยนี้

3.2 เครื่องมือ

สำหรับเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในงาน โครงการการศึกษาวิจัย

เครื่องทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย	บริษัทและรุ่น	ลักษณะของเครื่อง
เครื่องปั่นผสมแบบแห้ง (Dry spinner)	Lab Tech Engineering	ความเร็วในการปั่น 2 ระดับ
เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder)	Haake PolyLab Rheomex (CTW 100P)	แรงบิดสูงสุด 200 นิวตัน Multi standard die เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. Standard Screws, Counter rotating L/Lo = 31.3 มม./ 20 มม.
เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression moulding)	Lab Tech Engineering	ความดันสูงสุด 25 ตัน อุณหภูมิ สูงสุด 350 องศาเซลเซียส
เตาอบ (Oven)	Hanser	อุณหภูมิในการทำงาน 30 องศา เซลเซียส – 300 เซลเซียส
เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)	Monsanto Tensometer 2000	ระยะดึงสูงสุด 1,100 มม. ความเร็วในการดึงอยู่ในช่วง ระหว่าง 0.5 – 1000 มม./นาที
เครื่อง UV-Visible spectrophotometer	Shimadzu-3100	190 – 2100 นาโนเมตร
เครื่อง Oscillating Disk (Rheometer (ODR))	GOTECH	ระยะการหมุนแกว่งไปมา 0.5 – 1 องศา มาตรฐาน ASTM D2084 - 01

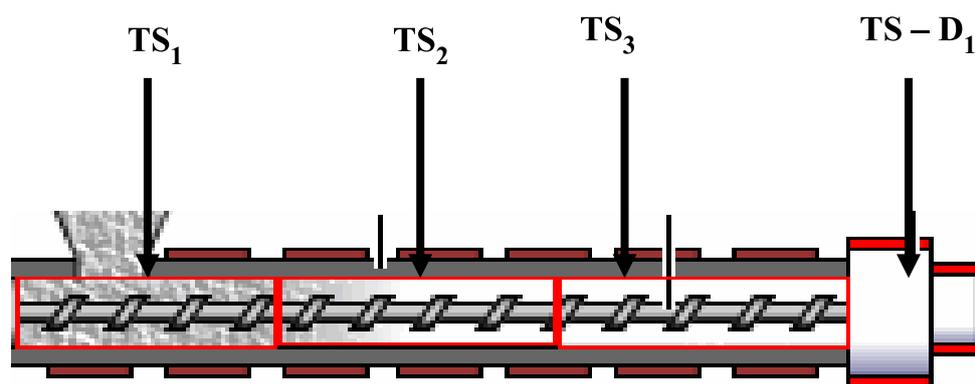
3.3 การผสมและการผลิตขึ้นรูปฟิล์มเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์

- นำเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์มาผสมกับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ตามสัดส่วนดังตารางที่ 3.3 โดยเริ่มทำการผสมสารเคมีต่างๆ ในเครื่องปั่นผสมแบบแห้ง (dry spinner)

ตารางที่ 3.3 รายการของสารเคมีและปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในโครงการการศึกษาวิจัย

สารเคมี	ปริมาณ (phr)
Ethylene octene copolymer (Enagae 8100 หรือ 8407)	100
Tinuvin 770	0.1
Irgafos168	0.2
Luperox 101	1.5

- นำของผสมไปเข้าเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) ที่ความเร็วรอบ 60 rpm โดยในเบื้องต้นได้กำหนดอุณหภูมิของบริเวณต่างๆ (Zones) ในเครื่องอัดรีด จากบริเวณป้อน (feed) บริเวณหลอม (Melt zone) บริเวณโกลล์รูทางออก (Metering zone) และบริเวณรูทางออก (Die zone) เท่ากับ 115 องศาเซลเซียส, 125 องศาเซลเซียส, 135 องศาเซลเซียส และ 145 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 3.2) ทั้งนี้การเลือกอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวพิจารณาจากการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในการหลอม (T_m) ของเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส [12]



รูปที่ 3.2 อุณหภูมิตามบริเวณต่างๆ ภายในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

- พอลิเมอร์หลอมที่ไหลออกมาจากหัวขึ้นรูป (die) จะผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็น
- จากนั้นฟิล์มพอลิเมอร์จะผ่านไปยังลูกกลิ้งเพื่อม้วนเก็บ โดยความหนาของฟิล์มที่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาของรูทางออกเป็นสำคัญ นอกจากนี้ความหนาของฟิล์มยังอาจจะขึ้นอยู่กับ

ความเร็วลูกกลิ้งของเครื่องม้วนเก็บฟิล์มด้วย ในที่นี้ความหนาของฟิล์มเอชอีทีนออกทีนที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้ความเร็วในการหมุนของลูกกลิ้งของเครื่องม้วนเก็บฟิล์มลูกที่หนึ่งและสองเท่ากับ 14 rpm และ 20 rpm ตามลำดับมีค่าเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ม้วนฟิล์มเอชอีทีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่ได้จะนำไปทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (curing) และนำไปทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ต่อไป

3.4 การทำปฏิกิริยา curing

นำฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการอัดรีดมาหาค่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยา curing (optimum cure time, t_{90}) โดยใช้เครื่อง oscillating disk rheometer (ODR) รุ่น GOTECH ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป (compression moulding [Lab Tech Engineering]) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา curing ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา curing นานเท่ากับค่า t_{90} ที่วัดได้ จากนั้นนำฟิล์มที่ได้จากเครื่องอัดขึ้นรูปไปทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ต่อไป

3.5 การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงดึง

นำฟิล์มเอชอีทีนออกทีนโคพอลิเมอร์มาทำการตัดเป็นรูปดัมเบลขนาดตามมาตรฐาน JIS K7113(type2) เพื่อนำไปทำการทดสอบสมบัติด้านการทนแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine [Monsanto Tensometer 2000] โดยใช้ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ load cell ขนาด 50 กิโลกรัม จากนั้นจึงทำการคำนวณสมบัติด้านการทนแรงดึงโดยใช้สมการต่างๆ ดังนี้

3.5.1 ค่าการทนแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดึง ที่ชิ้นงานรับได้สูงสุดกับพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น คำนวณได้โดยสมการที่ 3.1

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A} \quad (3.1)$$

เมื่อ σ = ค่าการทนต่อแรงดึง (นิวตันต่อตารางเมตร)
 F_{\max} = แรงดึงสูงสุดที่ให้กับชิ้นงาน (นิวตัน)
 A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานในช่วงความยาวเกจ (ตารางเมตร)

3.5.2 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) เป็นค่าร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$E = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (3.2)$$

E = ค่าการยืดตัว (%)

ΔL = ความยาวที่ขึ้นงานยืดตัว (มิลลิเมตร)

L_0 = ความยาวของชิ้นงานเมื่อเริ่มต้นในช่วงความยาวเกจ (มิลลิเมตร)

3.5.3 ยังส์โมดูลัส (Young's modulus) เป็นค่าความแกร่งของวัสดุ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียดในช่วงเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก (Elastic deformation) ดังสมการที่ 3.3

$$M_{100} = \frac{\sigma_{100}}{\epsilon_{100}} \quad (3.3)$$

M_{100} = ค่าโมดูลัสของชิ้นงานที่ระยะการยืดตัว 100 % (นิวตันต่อตารางเมตร)

σ_{100} = ความเค้นของชิ้นงานที่ระยะการยืดตัว 100 % (นิวตันต่อตารางเมตร)

ϵ_{100} = ความเครียดของชิ้นงานที่ระยะการยืดตัว 100 % ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1

3.6 การทดสอบหาค่าปริมาณเจล (Gel content)

การทดลองนี้เป็นการทดสอบหาค่าปริมาณร้อยละพอลิเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเทียบกับส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาและสามารถละลายได้ในตัวทำละลาย โดยในการทดลองจะทำการรีฟลักซ์ฟิล์มเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในปริมาณ 1 กรัม ในตัวทำละลายไซลีน (Xylene) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นจึงแยกชิ้นงานส่วนที่เหลือจากการรีฟลักซ์ออกจากสารละลาย นำไปทำการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแห้งหรือชิ้นงานมีน้ำหนักคงที่ (ใช้เวลาอบประมาณ 10 ชั่วโมง) จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักเพื่อกำหนดหาค่าปริมาณการเกิดเจลตามสมการที่ 3.4

$$\text{ปริมาณการเกิดเจล (\%)} = \frac{W_1}{W_2} \times 100 \quad (3.4)$$

W_1 = น้ำหนักชิ้นงานหลังผ่านการรีฟลักซ์และอบแห้งแล้ว (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของชิ้นงานตอนเริ่มต้น (ในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 กรัม)

3.7 การทดสอบค่าการดูดน้ำ (Water absorption)

นำแผ่นฟิล์มเอธิลีนออกทินโคพอลิเมอร์มาตัดให้มีขนาด 50 ตารางเซนติเมตร และนำไปอบไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักแห้งของชิ้นงาน โดยใช้เครื่องชั่งที่มีทศนิยม 3 ตำแหน่ง จากนั้นนำไปแช่น้ำ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที หลังจากแช่เสร็จแล้วไปชั่งน้ำหนัก โดยใช้เครื่องชั่งที่มีทศนิยม 3 ตำแหน่ง โดยก่อนชั่ง จะทำการซับน้ำที่อยู่บนผิวชิ้นงานออกโดยใช้กระดาษกรอง จากนั้นทำการคำนวณหาปริมาณร้อยละของการดูดซับน้ำตามสมการที่ 3.5

$$\text{ค่าการดูดน้ำ (\%)} = \left(\frac{W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{dry}}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

W_{wet} = น้ำหนักหลังแช่น้ำ (กรัม)

W_{dry} = น้ำหนักแห้ง หรือหลังอบชิ้นงาน (กรัม)

3.8 การทดสอบค่าการส่องผ่านแสง (Light transmittance)

นำฟิล์มเอธิลีนออกทินโคพอลิเมอร์ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วไปทำการทดสอบหาค่าการส่องผ่านแสง (light transmittance) โดยใช้เครื่อง UV-Visible spectrophotometer [Shimadzu-3100] โดยทำการวัดในช่วงความยาวคลื่นของแสงในช่วงที่ตามองเห็น (visible) คือ ช่วง 381 – 780 นาโนเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E891-87 [13]

อนึ่ง เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรมการทดสอบของเครื่องวัดที่ใช้ซึ่งสามารถวัดและคำนวณค่าได้ในแต่ละช่วงแสงนั้นๆ เท่านั้น ในที่นี้จึงแบ่งการทดสอบเป็น 3 ช่วงแสงด้วยกัน คือ UV ในช่วง 190 – 380 นาโนเมตร visible ในช่วง 381 – 780 นาโนเมตร และช่วงใกล้อินฟราเรด (NIR) ในช่วง 781 – 2100 นาโนเมตร ในขณะที่ค่าตามเกณฑ์มาตรฐานจะทำการทดสอบในช่วงความยาวคลื่นของแสงเท่ากับ 400 – 1,100 นาโนเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงแสงของ visible และ NIR จะอยู่ในช่วงการทดสอบของค่ามาตรฐาน แต่ช่วงของ NIR จะมีช่วงตั้งแต่ 1,100 - 2,100 นาโนเมตร ที่ไม่อยู่ในการทดสอบค่า

มาตรฐาน ดังนั้น ในการคำนวณจึงเลือกใช้ช่วงแสงในช่วงที่สายตามองเห็น (visible) ที่ใกล้เคียงสุดมาใช้

3.9 ทดสอบสมบัติด้านการทนต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต

นำแผ่นฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคลพอลิเมอร์ที่ผ่านการขึ้นรูปไปวางในเครื่อง Test Fluorescent UV Lamp ที่มีการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วง UV-B (ความยาวคลื่น 280 – 315 นาโนเมตร) เป็นเวลา 800 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงนำฟิล์มที่ได้ออกจากเครื่องและตัดเป็นรูปดัมเบล จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติด้านการทนแรงดึง จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าสมบัติด้านการทนแรงดึงที่เหลืออยู่หลังจากการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (retention of tensile properties after UV radiation) โดยเทียบกับค่าการทนแรงดึงของชิ้นงานก่อนการฉายแสง

3.10 การทดสอบสมบัติด้านการทนความร้อน

นำแผ่นฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคลพอลิเมอร์ที่ผ่านการขึ้นรูปไปทำการอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงนำฟิล์มที่ได้ออกจากเครื่องและตัดเป็นรูปดัมเบลไปทดสอบสมบัติด้านการทนแรงดึงที่เหลืออยู่หลังจากการการอบ (percentage retention of tensile properties after aging) โดยเทียบกับค่าการทนแรงดึงของชิ้นงานก่อนการอบ

3.11 ทดสอบการยึดเกาะกับกระจก

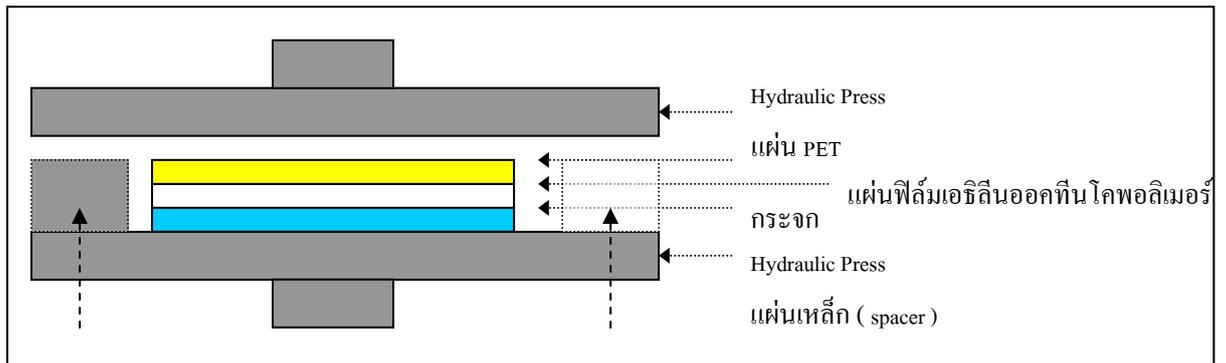
นำม้วนฟิล์มที่ได้จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 14 เซนติเมตร จากนั้นจึงนำไปวางลงบนแผ่นกระจกโดยมีแผ่นฟิล์มพอลิเอธิลีนเทรฟธาเลต (PET) เคลือบอยู่บนผิวด้านบนของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคลพอลิเมอร์อีกชั้นเพื่อทำหน้าที่หนุนหลัง (backing) ป้องกันการยึดตัวของฟิล์มในขณะทดสอบการดึงลอก (peel test) จากนั้นจึงนำชั้นฟิล์มและกระจกไปวางไว้ระหว่างแผ่นเหล็ก (spacer) ที่มีความหนาตามต้องการ ดังรูปที่ 3.3 เพื่อทำการลามิเนตพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic compression mould) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตามค่า t_{90} ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่างฟิล์ม โคลพอลิเมอร์กับกระจกพร้อมทั้งเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา curing ของเอธิลีนออกทีน โคลพอลิเมอร์ควบคู่กันไป จากนั้นจึงนำชั้นลามิเนตที่ได้ไปทำการทดสอบความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคลพอลิเมอร์กับกระจกโดยใช้การทดสอบแบบดึงลอก (peel test) ตามมาตรฐาน ASTM D3167 [14] โดยมีลักษณะชุดทดสอบที่ต่อเข้ากับเครื่องทดสอบแบบ Universal testing machine แสดงได้ดังรูป 3.4 และ 3.5 โดยใช้ความเร็วของการดึงลอกเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อนาที อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส ระยะที่ใช้ในการคำนวณการดึงลอกตั้งแต่ระยะเริ่มต้นถึง 100 มิลลิเมตร และทำการคำนวณค่าความแข็งแรงของการดึงลอก (peel strength) ดังสมการที่ 3.6

$$P = \frac{F}{d} \quad (3.6)$$

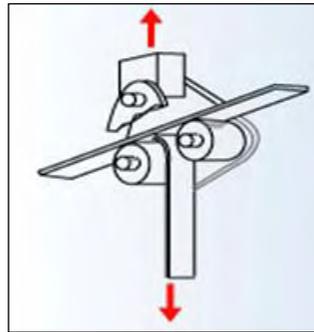
P = ค่าความแข็งแรงของการดึงลอก (นิวตันต่อมิลลิเมตร)

F = แรงดึงลอก (นิวตัน)

d = ความกว้างของแนวยึดเกาะ (มิลลิเมตร) ซึ่งในที่นี้มีค่า 30 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 แผนภาพการจัดวางชิ้นงานสำหรับการทำลามิเนตด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก



รูปที่ 3.4 แผนภาพการทดสอบแบบดึงลอก [12]



รูปที่ 3.5 ภาพขณะทดสอบดึงลอก

บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

การทดลองในโครงการการศึกษาวิจัยนี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 จะเป็นการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มเอชอีทีนออกทีน โคลพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และกระบวนการหล่อฟิล์มลงบนลูกกลิ้ง สำหรับส่วนที่ 2 จะเป็นการศึกษาสมบัติของฟิล์มเอชอีทีนออกทีน โคลพอลิเมอร์ในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำไปใช้งานเป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองในส่วนต่างๆ ดังนี้

4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มเอชอีทีนออกทีนโคลพอลิเมอร์

การทดลองเริ่มจากการหาสภาวะที่เหมาะสมใช้ในการขึ้นรูปเอชอีทีนออกทีน โคลพอลิเมอร์ชนิด Engage 8100 โดยนำพอลิเมอร์ดังกล่าวไปทำการผสมกับสาร curing agent และสารต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันตามสัดส่วนที่กำหนด (ตารางที่ 3.3) และขึ้นรูปผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ซึ่งในการทดลองขึ้นรูปฟิล์มจะมีการปรับค่าของอุณหภูมิขึ้นและลงเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งกรณีนี้อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจะมีค่าเท่ากันในทุกๆ บริเวณของเครื่องอัดรีด ดังนั้น เพื่อให้เข้าใจง่ายในที่นี้จะทำการระบุอุณหภูมิในกระบวนการผลิต โดยใช้ค่าอุณหภูมิบริเวณรูทางออก (TS-D₁)

จากผลการทดลองพบว่าในช่วงแรกของกระบวนการอัดรีดจะได้เนื้อฟิล์มไหลออกมาจากหัวขึ้นรูป (die) เป็นระยะความยาวประมาณ 1 เมตร และหลังจากนั้นการไหลของพอลิเมอร์ออกจากรูทางออกจะค่อยๆ ช้าลงจนกระทั่งเนื้อฟิล์มค่อยๆ ฉีกขาดออก (รูปที่ 4.1) และเริ่มหยุดไหลทำให้พอลิเมอร์ส่วนที่เหลืออยู่ภายในเครื่องไม่สามารถไหลออกมาจากรูทางออก นอกจากนั้นจากการสังเกตพอลิเมอร์ที่ตกค้างอยู่ภายในเครื่องอัดรีดพบว่า มีลักษณะแตกออกเป็นเม็ดเล็กๆ เนื่องจากระยะเวลาที่ค้างอยู่ภายในนานเกินไป และได้รับแรงเฉือนจากการหมุนของสกรู ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ภาพเนื้อฟิล์มที่ออกมาจากเครื่องอัดรีดที่ระยะเวลาเริ่มต้น (บน)
และเมื่อเวลาผ่านไป (ล่าง)



รูปที่ 4.2 ภาพพอลิเมอร์ที่ค้างอยู่ในบารเรลของเครื่องอัดรีดเนื่องจาก
พอลิเมอร์ไม่สามารถไหลผ่านบริเวณรูทางออก

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัยฯ สันนิษฐานว่าอาจจะเกิดจากสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ การเติมสาร curing agent ลงไปในพอลิเมอร์มีผลทำให้พอลิเมอร์ไม่สามารถไหลออกจากรูทางออกได้ เนื่องจากพอลิเมอร์อาจจะเกิดปฏิกิริยา curing ก่อนกำหนดที่บริเวณรูทางออก หรือประการที่ 2 อาจจะเกิดจากอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปที่ยังไม่เหมาะสม จึงทำให้พอลิเมอร์มีความหนืดเกินกว่าจะไหลออกจากรูทางออกได้ ดังนั้น เพื่อที่จะเป็นการทดสอบสมมุติฐานประการแรก ผู้วิจัยฯ จึงได้ทดลองทำการอัดรีดพอลิเมอร์โดยไม่เติมสารเติมแต่งใดๆ ลงไป (โดยเฉพาะอย่างยิ่งสาร curing agent) เพื่อดูว่าพอลิเมอร์จะสามารถไหลผ่านรูทางออกได้ดีขึ้นหรือไม่

ซึ่งจากการทดสอบโดยใช้อุณหภูมิเครื่องอัดรีดคงที่เท่าเดิม (TS-D₁ = 145 องศาเซลเซียส) พบว่ายังคงได้ผลตามเดิมข้างต้น กล่าวคือ พอลิเมอร์จะไหลออกมาเฉพาะในช่วงแรกและจะค่อยๆไหลช้าลงจนกระทั่งติดค้างอยู่ที่รูทางออกทำให้พอลิเมอร์ที่ติดค้างอยู่ภายในบารเรลไม่สามารถไหลออกมาได้และมีลักษณะเป็นผงสีขาว ผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปัญหาที่เกิดขึ้นไม่ได้มีสาเหตุมาจากสาร curing agent ที่ผสมลงไป

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองขั้นต่อไปโดยนำพอลิเมอร์ดังกล่าวที่ไม่ผสมกับสารเติมแต่งใดๆ ไปใส่ลงในเครื่องอัดรีด เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในกระบวนการอัดรีด ที่มีต่อลักษณะของพอลิเมอร์ที่ออกจากรูทางออก (โดยกำหนดค่า TS-D₁ ในช่วงระหว่าง 120 องศาเซลเซียส, 140 องศาเซลเซียส, 150 องศาเซลเซียส, 160 องศาเซลเซียส) จากการทดลองพบว่าไม่ว่าจะใช้อุณหภูมิเท่าไรก็ตาม พอลิเมอร์จะไหลออกมาเฉพาะในช่วงแรกและจะค่อยๆไหลช้าลงจนกระทั่งติดค้างอยู่ที่รูทางออกทำให้พอลิเมอร์ที่ติดค้างอยู่ภายในบารเรลไม่สามารถไหลออกมาได้ และมีลักษณะเป็นผงสีขาวเช่นเดิม ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสันนิษฐานว่าการที่พอลิเมอร์ไม่สามารถไหลผ่านรูทางออกได้ อาจจะมีสาเหตุมาจากน้ำหนักโมเลกุลของตัวพอลิเมอร์มีค่าสูงเกินไปทำให้พอลิเมอร์มีความหนืดสูงขึ้น และแม้ว่าจะทำการปรับเพิ่มอุณหภูมิก็ไม่สามารถทำให้ความหนืดลดลงได้มากพอสำหรับการไหลผ่านรูทางออก เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงควรจะปรับชนิดของเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่ใช้ให้มีค่าดัชนีการไหล (MFI) สูงขึ้น เพื่อที่จะทำให้พอลิเมอร์สามารถไหลผ่านรูทางออกได้ง่ายขึ้น ซึ่งจากการพิจารณาชนิดของพอลิเมอร์ดังกล่าว (ดูข้อมูลจากตารางในภาคผนวก ก) พบว่าพอลิเมอร์ชนิดที่น่าจะเหมาะสมในการนำไปทดลองใช้ขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ได้แก่ Engage 8407 ซึ่งมีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 30 เดซิกรัมต่อนาที นอกจากนั้น พอลิเมอร์ชนิดดังกล่าวยังมีปริมาณความเป็นผลึก 21 % ซึ่งน้อยกว่าปริมาณความเป็นผลึกของสาร Engage ชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงคาดว่าฟิล์มชนิด Engage 8407 ที่ได้น่าจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าฟิล์ม Engage ชนิดอื่นๆ ที่มีค่าดัชนีการไหลใกล้เคียงกัน แต่มีปริมาณความเป็นผลึกสูงกว่า (เนื่องจากปริมาณความเป็นผลึกที่มากขึ้นจะส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเรียงตัวที่เป็นระเบียบและหนาแน่น ทำให้ดัชนีหักเหของแสงเปลี่ยนและฟิล์มที่ได้สูญเสียความใส หรือความโปร่งใสไป)

(หมายเหตุ ผลของการศึกษาการขึ้นรูปของ Engage 8100 ที่ได้ในโครงการการศึกษาวิจัยนี้อาจจะเป็นผลที่ใช้กับเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ในโครงการการศึกษาวิจัยนี้เท่านั้น ซึ่งผลอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ถ้าใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่ลักษณะแตกต่างกันออกไป)

การศึกษาการขึ้นรูปเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ ชนิด Engage 8407

เมื่อนำ Engage 8407 ไปทำการผสมกับสาร curing agent และสารต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันตามสัดส่วนที่กำหนด (ตารางที่ 3.3) และขึ้นรูปผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้อุณหภูมิที่บริเวณรูทางออกเท่ากับ 145 องศาเซลเซียส พบว่า พอลิเมอร์ที่ไหลออกมาจะมีลักษณะค่อนข้างเหลว ไม่มีความหนืดมากพอที่จะคงรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ (รูปที่ 4.3) ซึ่งคาดว่าอุณหภูมิที่ใช้ในที่นี้อาจจะสูงเกินไปสำหรับการขึ้นรูปพอลิเมอร์เป็นแผ่นฟิล์ม



รูปที่ 4.3 ลักษณะของฟิล์มที่ไหลออกจากรูทางออก
ณ อุณหภูมิ TS-D₁ = 145 องศาเซลเซียส

จากนั้นเมื่อลดอุณหภูมิในการผลิตลงโดยใช้อุณหภูมิที่บริเวณรูทางออก เท่ากับ 135 องศาเซลเซียส พบว่าพอลิเมอร์ที่อัดรีดออกมาจะมีลักษณะหนืดมากขึ้น แต่ยังไม่สามารถที่จะขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ (รูปที่ 4.4) ในทำนองเดียวกัน เมื่อลดอุณหภูมิลงอีก 10 องศาเซลเซียส (หรืออุณหภูมิรูทางออกเท่ากับ 125 องศาเซลเซียส) พบว่าพอลิเมอร์ที่ได้ยังคงไม่มีลักษณะเป็นฟิล์ม



รูปที่ 4.4 ลักษณะของฟิล์มที่ไหลออกจากรูทางออก
ณ อุณหภูมิ TS-D₁ = 135 องศาเซลเซียส

จนกระทั่งเมื่อลดอุณหภูมิลงอีก 10 องศาเซลเซียส (หรืออุณหภูมิรูทางออกเท่ากับ 115 องศาเซลเซียส) พบว่าพอลิเมอร์ที่ผ่านออกมาจากกระบวนการอัดรีดมีลักษณะเป็นฟิล์มที่มีความยืดหยุ่น และสามารถผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็นและม้วนเก็บได้ (ดังรูปที่ 4.5) และนอกจากนั้น เมื่อทำการลดอุณหภูมิลงต่อไปอีก เช่น 105 องศาเซลเซียส ก็พบว่ายังคงสามารถทำการผลิตขึ้นรูปฟิล์มจากเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ ชนิด Engage 8407 ได้เช่นกัน แต่อย่างไรก็ตาม การใช้อุณหภูมิในช่วงดังกล่าวจะทำให้ต้องปรับความเร็วลูกกลิ้งให้มีค่าลดลง เนื่องจากอัตราการผลิตฟิล์มที่ได้มีค่าลดลง ตามอุณหภูมิที่ปรับลดลง

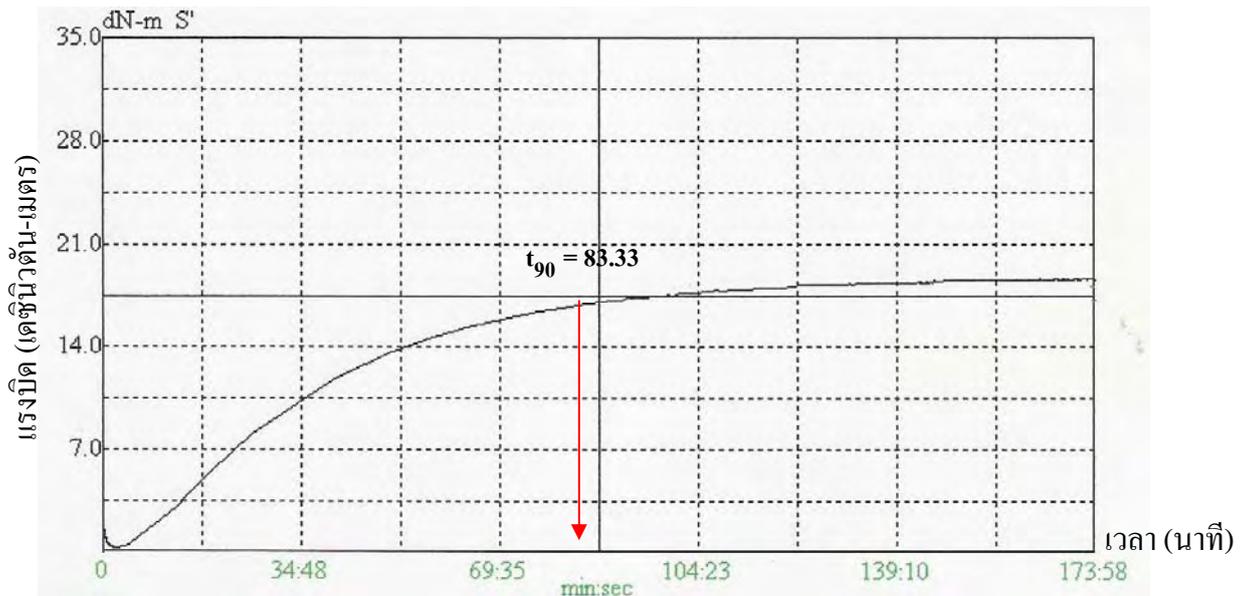


รูปที่ 4.5 ลักษณะของฟิล์มที่ไหลออกจากรูทางออก (ซ้าย) ณ อุณหภูมิ

TS - D₁ = 115 องศาเซลเซียส และฟิล์มที่ไหลเข้าสู่ลูกกลิ้งหล่อเย็น (ขวา)

จากการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมดจะสามารถสรุปในเบื้องต้นได้ว่า เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ชนิดที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการผลิตฟิล์ม คือ Engage 8407 เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดดังกล่าวมีค่าดัชนีการไหลที่สูง ทำให้มีความสามารถในการไหลผ่านรูทางออกได้ดีกว่ามากและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูป คือการใช้อุณหภูมิที่บริเวณป้อน (feed) บริเวณหลอม (Melt zone) บริเวณใกล้รูทางออก (Metering zone) และบริเวณรูทางออก (Die zone) เท่ากับ 85 องศาเซลเซียส, 95 องศาเซลเซียส, 105 องศาเซลเซียส และ 115 องศาเซลเซียสตามลำดับ

เมื่อนำฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคลพอลิเมอร์ที่ได้จากการอัดรีดไปหาค่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยา curing ด้วยเทคนิค Oscillating disk rheometer (ODR) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส พบว่าพอลิเมอร์คอมปาวด์ที่ได้มีค่าเวลา t_{90} เท่ากับ 83.33 นาที (รูปที่ 4.6) จากนั้นจึงนำมวลฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้จากกาอัดรีดไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มในเครื่องอัดไฮโดรลิกที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และนำไปทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ต่อไปตามลำดับ



รูปที่ 4.6 กราฟ ODR ของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคลพอลิเมอร์

4.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในด้านต่างๆ

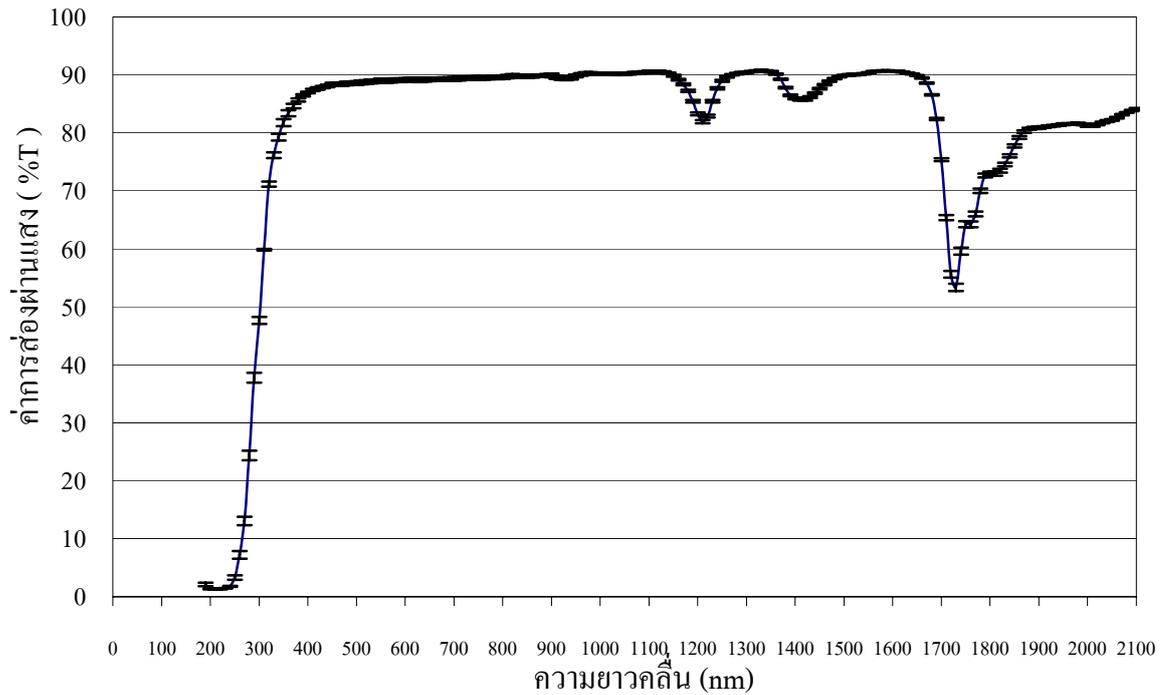
จากการหาปริมาณเจลของเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (Engage 8407) ที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปและปฏิกิริยา curing ในเครื่องอัดไฮโดรลิกพบว่ามีความโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 77 (ตารางที่ 4.1) ซึ่งต่ำกว่าค่าของฟิล์มอีวีเอวัสดุห่อหุ้มเซลล์ที่ใช้ในทางการค้า (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 85%) โดยคาดว่าอาจจะมีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากพอลิเมอร์ที่ใช้ต่างชนิดกัน จึงทำให้มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน ดังนั้น ปริมาณสาร curing agent ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำปฏิกิริยา curing สำหรับฟิล์มอีวีเอ อาจไม่ใช่ปริมาณสารที่เหมาะสมสำหรับการ cure ฟิล์มเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ก็ได้ แนวทางในการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวให้ดีขึ้นอาจทำได้โดยเพิ่มปริมาณสารเปอร์ออกไซด์ curing agent หรืออาจใช้สาร co-agent ช่วยในการ cure ฟิล์มเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ [9]

เมื่อพิจารณาสมบัติด้านการดูดน้ำของฟิล์มเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์พบว่ามีความต่ำกว่าประมาณร้อยละ 0.085 (ตารางที่ 4.1) ซึ่งต่ำกว่าค่าของวัสดุห่อหุ้มเซลล์ชนิดอีวีเอที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ และต่ำกว่าค่าในเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้น ฟิล์มเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในที่นี้จึงมีความสามารถในการทนความชื้นได้ดีกว่าอีวีเอ และเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานดังกล่าว

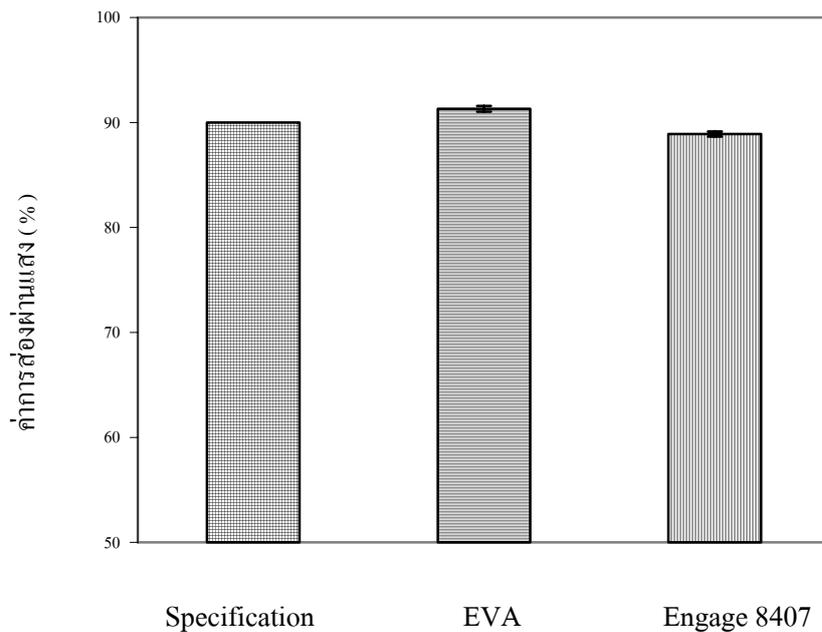
ตารางที่ 4.1 ค่าปริมาณเจล และการดูดน้ำของเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เทียบกับฟิล์มอีวีเอที่ใช้ในทางการค้า และเทียบกับค่าตามเกณฑ์มาตรฐาน

ชนิดของฟิล์ม	ปริมาณเจล (%)	ค่าการดูดน้ำ (%)
Engage 8407	77 ± 1.67	0.085 ± 0.67
EVA	85	0.195
ค่าเกณฑ์มาตรฐาน	(ไม่ได้ระบุ)	น้อยกว่า 0.5

รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มเอชิตินออกทีน โคพอลิเมอร์ซึ่งจากการคำนวณพบว่าฟิล์มเอชิตินออกทีน โคพอลิเมอร์มีค่าการส่องผ่านแสงเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 89.39 ± 0.25 ซึ่งค่าดังกล่าวใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ในเกณฑ์มาตรฐานและใกล้เคียงกับค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มอีวีเอที่ใช้ในทางการค้า (รูปที่ 4.8) และเชื่อว่าน่าจะสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการควบคุมอัตราการเย็นตัวของฟิล์มที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเพื่อให้มีความเป็นผลึกลดลง และมีความใสมากขึ้น

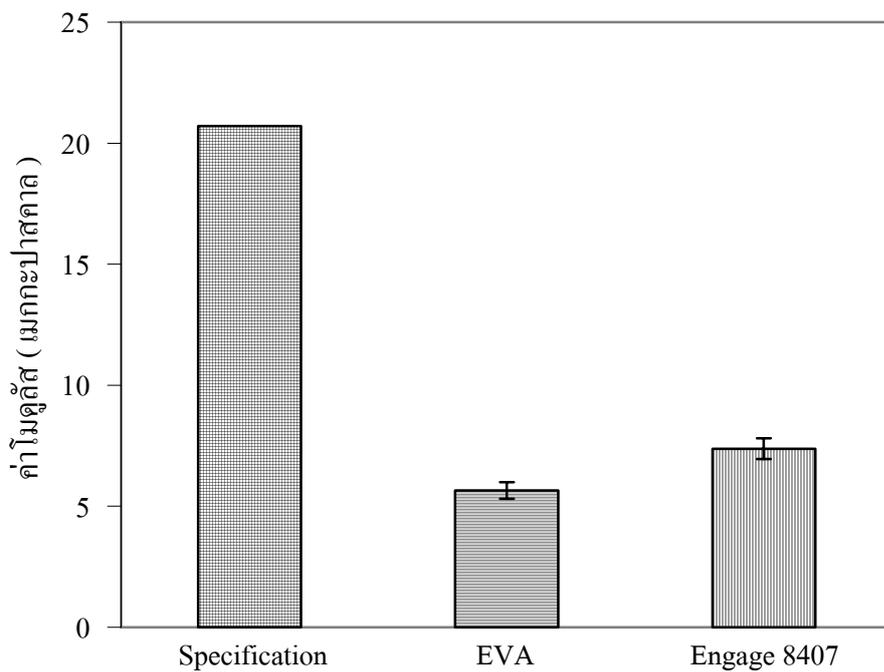


รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มเอชิตินออกทีน โคพอลิเมอร์



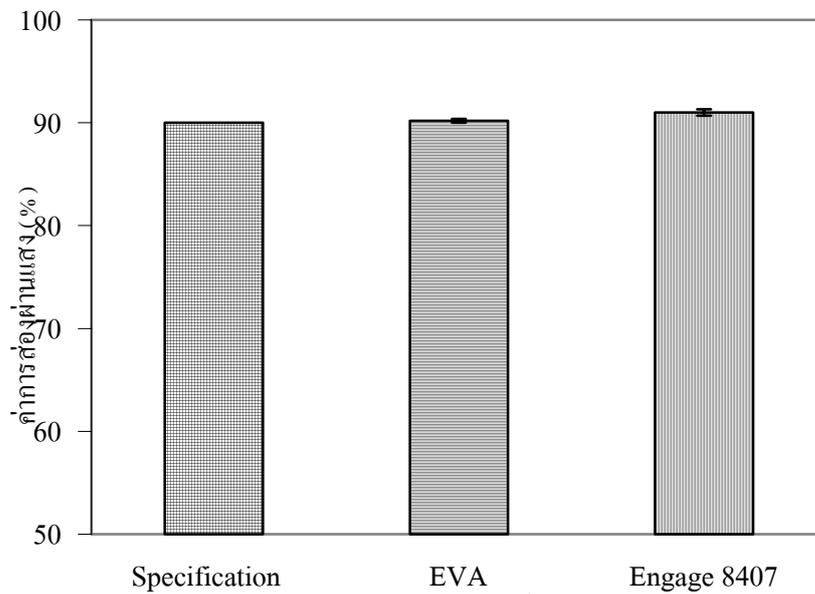
รูปที่ 4.8 แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณการส่องผ่านแสงของฟิล์มอีวีเอกับค่าตามเกณฑ์มาตรฐานฟิล์มอีวีเอ และค่าของฟิล์มเอชิตินออกทีน โคพอลิเมอร์

จากการทดสอบสมบัติทางกลของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์พบว่ามีการทนแรงดึงประมาณ 19.2 เมกกะปาสคาล ซึ่งจะต่ำกว่าค่าของฟิล์มอีวีเอที่ใช้ในทางการค้า (ซึ่งมีค่า 22 เมกกะปาสคาล) อยู่เล็กน้อย ในขณะที่ค่าการยืดตัวของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ที่มีค่า 858 ± 14 เมกกะปาสคาล ซึ่งมากกว่าค่าการยืดตัวของฟิล์มอีวีเอในทางการค้า (ที่มีค่าเท่ากับ 600 เมกกะปาสคาล) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในด้านของค่าโมดูลัสซึ่งเกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 20.7 เมกกะปาสคาล ก็จะเห็นได้ว่าฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์มีค่าโมดูลัสเท่ากับ 7.38 เมกกะปาสคาล (รูปที่ 4.9) ซึ่งถือว่าผ่านเกณฑ์ และสามารถนำไปใช้ในงานดังกล่าวได้



รูปที่ 4.9 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของฟิล์มอีวีเอกับค่าตามเกณฑ์มาตรฐานและค่าของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์

ในด้านของสมบัติด้านการแสงอัลตราไวโอเลต เมื่อพิจารณาสเปกตรัม UV-Visible ของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ที่ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นเวลา 800 ชั่วโมง (รูปที่ 4.10) พบว่ามีการส่องผ่านแสงประมาณ 91.21 ± 0.31 % ซึ่งยังคงมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำของวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดไว้ให้มีค่าไม่ต่ำกว่า 90% ดังนั้น จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้งานในสภาวะที่ต้องสัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเลตเป็นเวลานานสมบัติด้านการส่องผ่านแสงของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก



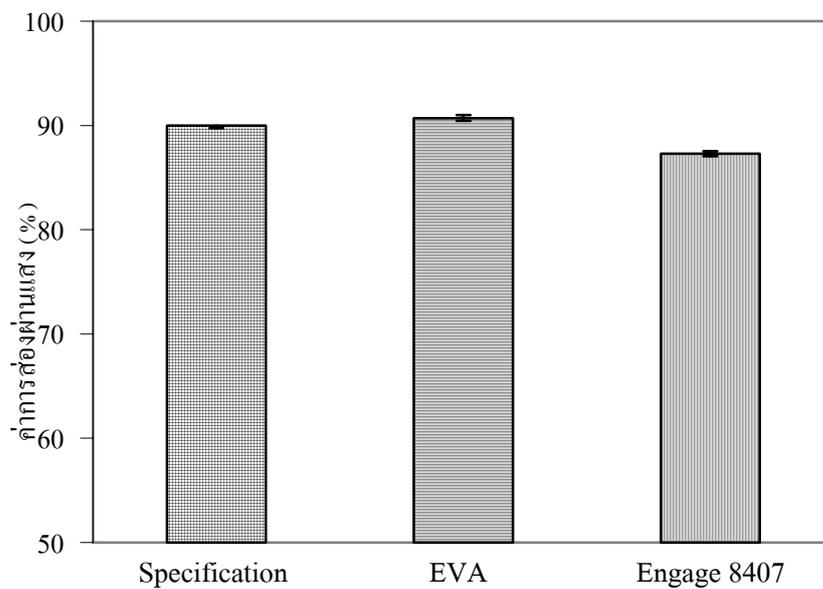
รูปที่ 4.10 แผนภูมิปริมาณการส่องผ่านแสงหลังจากนำชิ้นงานไปผ่านแสงอัลตราไวโอเล็ตของฟิล์มเอชทีอีทีน โคลพอลิเมอร์ เปรียบเทียบกับค่าตามเกณฑ์มาตรฐาน และค่าของฟิล์มอีวีเอ

เมื่อนำฟิล์มเอชทีอีทีน โคลพอลิเมอร์ที่ผ่านการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตมาทำการทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อคำนวณหาค่าร้อยละของค่าการทนแรงดึง ค่าการยืดตัว และค่าโมดูลัสที่เหลืออยู่หลังการฉายแสงพบว่ามีค่าลดลงในปริมาณเล็กน้อย (ตารางที่ 4.2) ประมาณ 5 - 10% ซึ่งถือว่าลดลงในระดับที่ยอมรับได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเทียบกับการทนแรงดึงของฟิล์มอีวีเอที่ใช้ในทางการค้าซึ่งมีค่าความแข็งแรงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 80 จากค่าเริ่มต้น (หรือลดลงไม่เกิน 20%)

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลในด้านต่างๆ ที่เหลืออยู่หลังผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตของฟิล์มเอชทีอีทีน โคลพอลิเมอร์ และของฟิล์มอีวีเอที่ใช้ในทางการค้า

ตัวอย่าง	Retention of Tensile Strength(%)	Retention of Elongation at Break(%)	Retention of Intitial Young's Modulus(%)
ฟิล์มเอชทีอีทีน โคลพอลิเมอร์	91.41	95.45	93.5
ฟิล์มอีวีเอที่ใช้ในทางการค้า	80	ไม่ได้กำหนด	ไม่ได้กำหนด

รูปที่ 4.11 แสดงสเปคตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ที่ผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ซึ่งจากการคำนวณพบว่าค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มดังกล่าวมีค่าเท่ากับ $87.78 \pm 0.25\%$ ซึ่งลดลงเมื่อเทียบกับค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มก่อนการอบร้อน และต่ำกว่าค่าที่ระบุไว้ในเกณฑ์มาตรฐาน (90%) เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลที่คงเหลืออยู่ภายหลังจากการนำฟิล์มพอลิเมอร์ไปผ่านการอบร้อน (ตารางที่ 4.3) พบว่าสมบัติด้านการทนแรงดึงจะมีค่าลดลงต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ยังมีค่าการทนความร้อนที่ไม่สูงพอและยังต้องทำการปรับปรุงต่อไป

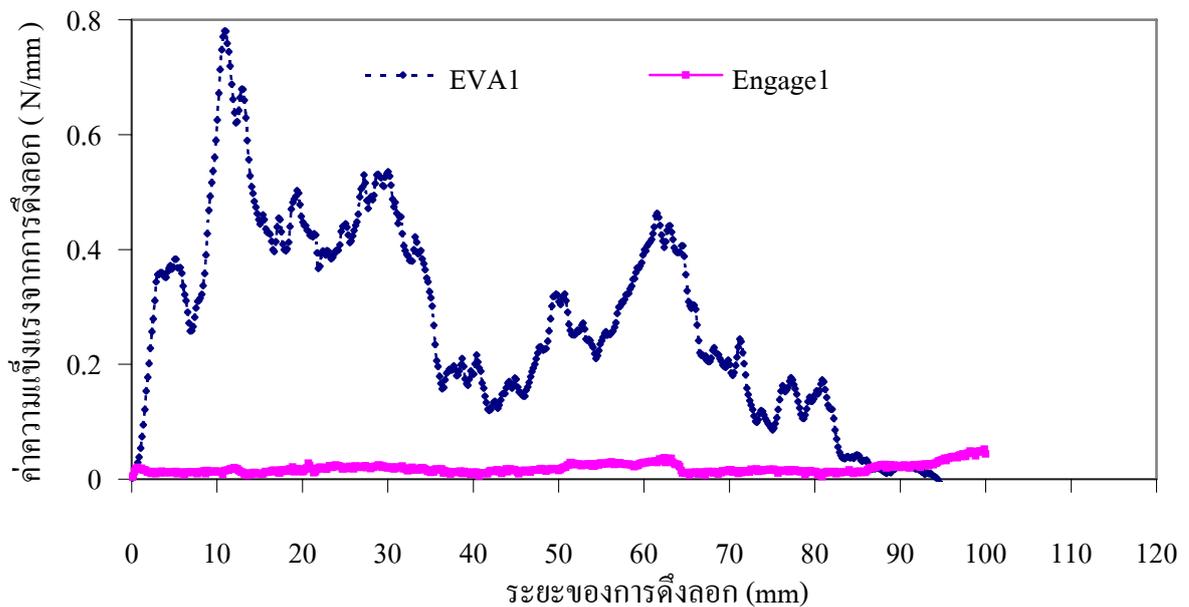


รูปที่ 4.11 แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณการส่องผ่านแสงหลังผ่านการอบร้อนของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์กับค่าตามเกณฑ์มาตรฐาน และค่าของฟิล์มอีวีเอ

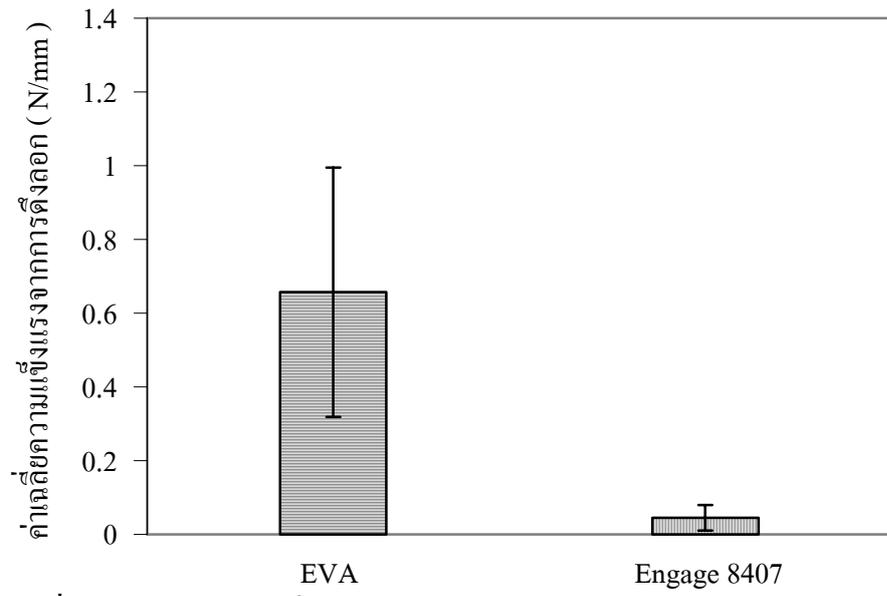
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลในด้านต่างๆ ที่คงเหลืออยู่ของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ และของฟิล์มอีวีเอที่ใช้ในทางการค้าหลังผ่านการอบร้อน

ตัวอย่าง	Retention of Tensile Strength(%)	Retention of Elongation at Break(%)	Retention of Intitial Young's Modulus(%)
ฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์	81.77	93.16	111.11
ฟิล์มอีวีเอที่ใช้ในทางการค้า	85	ไม่ได้กำหนด	ไม่ได้กำหนด

รูปที่ 4.12 แสดงกราฟที่ได้จากการทดสอบการดึงลอกของชิ้นงานลามิเนตระหว่างกระจกกับฟิล์มอีวีเอ และลามิเนตระหว่างกระจกกับฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ในช่วงระยะเริ่มต้นถึงระยะดึงลอก 100 มิลลิเมตร โดยการหาค่าความแข็งแรงจากการดึงลอก (peel strength) จำนวน หาค่าเฉลี่ยของแรงดึงลอกระหว่างฟิล์มอีวีเอ เทียบกับฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์โดยใช้ข้อมูลในช่วงระยะเริ่มต้นถึง 100 มิลลิเมตร ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.13 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างฟิล์มอีวีเอกับกระจกมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.657 ± 0.338 นิวตันต่อมิลลิเมตร ซึ่งสูงกว่าค่าความแข็งแรงจากการทดสอบการดึงลอกระหว่างฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์กับกระจก ซึ่งกรณีหลังมีค่าประมาณ 0.045 ± 0.035 นิวตันต่อมิลลิเมตรเท่านั้น การที่ค่าความสามารถในการยึดติดกับกระจกของฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ต่ำมาก อาจจะทำให้เกิดปัญหาในการประกอบขึ้นรูปแผงโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากชั้นระหว่างกระจกกับเซลล์แสงอาทิตย์ในแผงโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เชื่อมต่อกัน และไม่เป็นชั้นเดียวกัน นอกจากนี้การยึดเกาะที่ไม่ดีจะทำให้เกิดรอยแยก และมีการซึมผ่านของอากาศ ไอน้ำ และความชื้นเข้าไปยังเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนั้น สมบัติดังกล่าวจึงเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องทำการปรับปรุงต่อไป



รูปที่ 4.12 กราฟที่ได้จากการทดสอบการดึงลอกของชิ้นงานลามิเนตระหว่างกระจกกับฟิล์มอีวีเอ และลามิเนตระหว่างกระจกกับฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์



รูปที่ 4.13 แรงดึงลอกเฉลี่ยของฟิล์มอีวีเอ เทียบกับฟิล์มเอธิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ ในสภาวะบรรยากาศปกติ

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มเอทิลีนออกทีน โคลพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และกระบวนการหล่อฟิล์มลงบนลูกกลิ้ง สามารถสรุปสาระสำคัญได้ ดังนี้

5.1.1 เอทิลีนออกทีน โคลพอลิเมอร์ ชนิด Engage 8100 ไม่สามารถผ่านการขึ้นรูปเป็นฟิล์มโดยกระบวนการอัดรีดได้เนื่องจากค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ดังกล่าว มีค่าต่ำเกินไป (1 เดซิกรัม/นาที) ทำให้ไม่สามารถไหลผ่านรูทางออกได้ พอลิเมอร์จึงติดค้างอยู่ภายในบารเรล และการปรับอุณหภูมิในกระบวนการผลิตให้สูงขึ้น ก็ไม่สามารถช่วยทำให้พอลิเมอร์ไหลผ่าน รูทางออกได้

การใช้เอทิลีนออกทีน โคลพอลิเมอร์ชนิด Engage 8407 ที่มีค่าดัชนีการไหล เท่ากับ 30 เดซิกรัม/นาที จะสามารถไหลผ่านรูทางออกและขึ้นรูปออกมาเป็นฟิล์มได้ โดยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ดังกล่าวจากบริเวณป้อนไปยังบริเวณรูทางออก คือ 85 องศาเซลเซียส, 95 องศาเซลเซียส, 105 องศาเซลเซียส, และ 115 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้หากใช้อุณหภูมิสูงเกินไปพอลิเมอร์ที่ไหลออกมาจะไม่มี ความหนืดพอที่จะคงรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ แต่ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำเกินไปพอลิเมอร์ที่ไหลผ่านออกจากรูทางออกจะมีอัตราการผลิตฟิล์มที่ได้มีค่าลดลง

5.1.2 จากการศึกษาลักษณะสมบัติของฟิล์มเอทิลีนออกทีน โคลพอลิเมอร์ในด้านต่างๆ สามารถสรุปดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าของสมบัติด้านต่างๆ ของฟิล์มเอทิลีนออกทีน โคลพอลิเมอร์เทียบกับค่ามาตรฐาน

สมบัติด้านต่างๆ	ค่ามาตรฐาน	ฟิล์มเอทิลีนออกทีนโคลพอลิเมอร์
ปริมาณเจล (%)	85	77 ± 1.67
ค่าดูดน้ำ (%)	0.5	0.085 ± 0.67
ค่าการส่องผ่านแสง (%)	91.3	89.39 ± 0.25
สมบัติด้านการทนแรงดึง (MPa)	20.7	7.38 ± 0.43
สมบัติการทนแรงดึงที่เหลืออยู่หลังจากผ่านแสงอัลตราไวโอเลต (%)	80	91.41
สมบัติการทนแรงดึงที่เหลืออยู่หลังจากผ่านความร้อน (%)	85	81.77
ความแข็งแรงจากการดึงลอก	0.657 ± 0.338 (ของอีวีเอ)	0.045 ± 0.035

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า สมบัติของฟิล์มเอธิลีนออกทินโคพอลิเมอร์ที่ผ่านเกณฑ์ ได้แก่ ค่าการดูดน้ำ, การทนแรงดึง, การทนแรงดึงหลังผ่านแสงอัลตราไวโอเลต

ส่วนสมบัติที่ควรปรับปรุง ได้แก่ ปริมาณเจล ค่าการส่องผ่านแสง การทนความร้อน และโดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติด้านการยึดเกาะกระจกซึ่งพบว่าเอธิลีนออกทินโคพอลิเมอร์ชนิด Engage 8407 จะมีความสามารถในการยึดเกาะกับกระจกต่ำกว่าอีวีเอ มากประมาณ 10 เท่า ซึ่งสมบัติด้านนี้ควรปรับปรุงอย่างมากเพราะเป็นสมบัติที่สำคัญการใช้งานเป็นวัสดุห่อหุ้มเซลล์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาปรับปรุงปริมาณเจลของฟิล์มเอธิลีนออกทินโคพอลิเมอร์ให้มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ ซึ่งอาจจะสามารถทำได้โดย

1. การทำปฏิกิริยา curing อีวีเอ โดยใช้เวลา optimum cure time เท่ากับ t_{100} แทนค่า t_{90} เนื่องจากกระบวนการ crosslinking ในที่นี้เป็นการเกิดพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนซึ่งไม่จำเป็น ต้องเพื่อเวลาไว้เนื่องจากพันธะดังกล่าวจะเสถียรกว่าและไม่เกิด reversion เหมือนในกรณี sulfur vulcanization
2. เพิ่มปริมาณสาร curing agent
3. การใช้สาร co-agent ลงไปช่วยในการให้เกิดปฏิกิริยา [9]

5.2.2 ควรทำการปรับปรุงสมบัติด้านการยึดเกาะกับกระจกโดยศึกษาถึงผลกระทบของชนิดและปริมาณของสารที่จะช่วยปรับปรุงต่อความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเอธิลีนออกทินโคพอลิเมอร์กับกระจก เช่น การเติมสารคู่ควบประเภทไซเลน [9] เป็นต้น

5.2.3 ในการคำนวณค่าการส่องผ่านในโครงการการศึกษาวิจัยนี้ใช้มาตรฐาน ASTM E891-87 แต่มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบโดยทั่วไปจะใช้มาตรฐาน ASTM E903-82 เนื่องจากข้อจำกัดทางโปรแกรมการคำนวณจึงทำให้ต้องใช้ระยะในการคำนวณสั้นกว่าเดิม คือ จากช่วง 400 – 1,100 นาโนเมตร เป็น ช่วง 381 -780 นาโนเมตร ซึ่งค่าที่คำนวณได้จะน้อยกว่าของการคำนวณตามมาตรฐาน ซึ่งมีผลถึงค่าที่ได้จะต่ำกว่าควรเป็นอยู่เล็กน้อยเนื่องจากแนวโน้มของกราฟในส่วนที่เหลือมีลักษณะเพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar_knowledge.php [2007, January,10]
2. <http://www.njsolarpower.com/faq.html> [2007, January,10]
3. <http://www.google.co.th/search?hl=th&q=Anti+%E2%80%93+reflection+coating++%2B+solar+cell&meta=> [2007, January,10]
4. K.J. Lewis and C.A. Megerle, 1983, “Encapsulant Degradation in Photovoltaic Modules”, **ACS Symposium Series 220**, American Chemical Society, Washington, Ch. 24, pp. 353 – 406.
5. F.J. Pern, 2000, “ **Composition and Method for Encapsulating Photovoltaic Devices**”, US Patent, No.6,093,757.
6. I.Kanoka and P.Klemch, 1994, “ **Solar cell modues and method of making same**”, US Patent, No.5,476,553.
7. A. L. Rosenthal and C.G. Lane, 1990,“in Proc. PV Module Reliability Workshop”, **Solar Energy Research Institute**, Oct. 25-16, SERI/CP-4079, pp.217-229.
8. <http://www.specialchem4polymers.com/tc/Antioxidants/index.aspx?id=> [2007,January,10]
9. สมศักดิ์ วรมงคลชัย, 2547, **สารปรับแต่งพอลิเมอร์**, บั๊กเน็ต, กรุงเทพฯ, หน้า16-49.
10. S. Jipa ,T. Zaharescu and R. Setnescu, 2000 “ Kinetic effects of photoexposed isotactic polypropylene in the presence of some hindered-amine light stabilisers”, **Polymer**, Vol. 41, pp.6949 – 6953.
11. Paul B., 1985, “**Composition and Method for Encapsulating Photovoltaic Devices**”, US Patent, No.5,447,576.
12. [http://www.infochems.co.kr/pds/Engage% 20Product% 20Chart.pdf](http://www.infochems.co.kr/pds/Engage%20Product%20Chart.pdf) [2007, January,10]
13. ASTM E891-87,1988 “ Standard Tables for Terrestrial Direct Normal Solar Spectral Irradiance for Air Mass 1.5”, **Annual Book of ASTM Standards**, 12.02 , pp.470-475.
14. ASTM D3167,1997 “ Floating roller peel resistance of adhesives”, **Annual Book of ASTM Standards**, 15 (6), pp.206-209.
15. H. Schminhuber and K. Krannich, 2001 “ Why using EVA modul encapsulation if there is a much better choice”, **Presented at the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition in munich**, Germany, pp.1-2

16. P. Klemchuk and M. Ezrin, 1997 “ Investigation of the degradation and stabilization of EVA-based encapsulant in field-aged solar energy modules”, **Polymer Degradation and Stability**, Vol.55, pp.347 – 365.
17. K. Agroui and A. Maallemi, 2006 “ Thermal stability of slow and fast cure EVA encapsulant material for photovoltaic module manufacturing process”, **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Vol.90, pp. 2509 - 2514.

ภาคผนวก ก

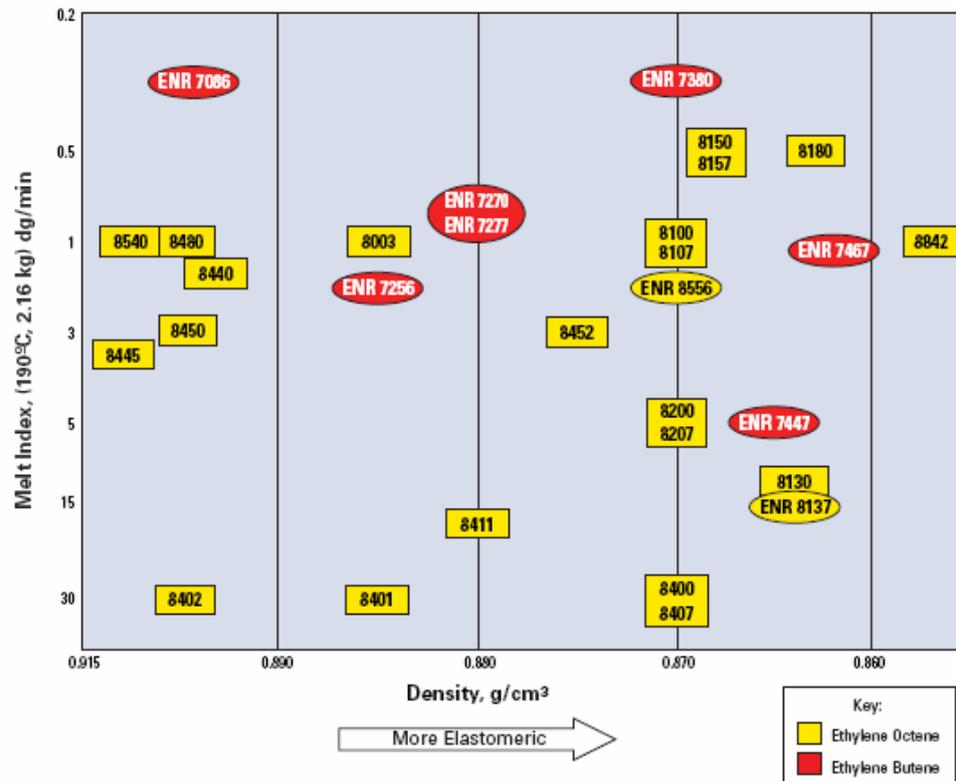
แสดงข้อมูลของเอธิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

Product Information

February 2004



Product Grade Chart



Engage[®] polyolefin elastomers and ENR* developmental products offer customers new options for replacing or modifying materials across a broad spectrum of processes. The next generation ethylene butene copolymers are an excellent complement to the existing ethylene octene grades and together offer exceptional performance and a unique balance of properties when used "neat" or in blends and compounds.

Designed to improve impact performance, melt strength, or overall processability, these innovative elastomers are available in a wide range of grades to

meet the most demanding processing and performance needs. They are compatible with most olefinic materials and offer unique capabilities that can enhance your product and your bottom line. Applications include: automotive TPO; plastics modification; TPEs; wire and cable; consumer goods; foams; footwear; NVH; and extrusion or injection molded goods.

* Note: ENR designates a developmental grade. When using developmental products, customers are reminded that: quality specifications may not be fully determined; hazards may not be fully known; and DuPont Dow reserves the right to change specifications and/or discontinue production of the product at any time.

Typical Properties *part 1*

Product Grade ¹	Ethylene Butene Grades					
	ENR 7467 ²	ENR 7447 ²	ENR 7380	ENR 7270 ENR 7277 ²	ENR 7256	ENR 7086
Density, g/cm ³ ASTM D-792	0.862	0.865	0.87	0.88	0.885	0.901
Melt Index, dg/min ASTM D-1238 190°C, 2.16 kg	1.2	5	< 0.5	0.8	2	< 0.5
Mooney Viscosity ASTM D-1646 ML 1 + 4 at 121°C	20	8	48	28	16	26
Total Crystallinity % ⁵	12	13	16	19	23	29
Molecular Weight Distribution, Rheology Ratio ⁴	L	L	L	L	M	M
Durometer Hardness, Shore A ASTM D-2240	56	57	68	78	79	88
DSC Melting Peak, °C Rate 10°C/min	36	42	48	62	73	93
Glass Transition Temperature, °C DSC Inflection Point	-56	-57	-52	-45	-45	-35
Flexural Modulus, MPa ASTM D-790 2% Secant	7.9	7.2	13.5	24.1	27.2	67.9
Ultimate Tensile Strength, MPa ASTM D-638 508 mm/min	2.6	2.3	10.6	15	11.7	20

¹ Ultimate elongation for all grades exceeds 600%.

² This grade is talc dusted; properties are measured before the addition of talc.

³ Engage® 8400 is available in the European region. Engage® 8407 is available in the Americas and Asia Pacific.

⁴ L-Low, M-Medium and H-High are DuPont Dow Elastomers measures.

⁵ DuPont Dow Method

Typical Properties *part 2*

Product Grade ¹	Ethylene Octene Grades								
	8842 ²	8180	8130 8137 ²	8150/ 8157 ²	8100/ 8107 ²	ENR 8556	8200/ 8207 ²	8400/ 8407 ^{2,3}	8452
Density, g/cm ³ ASTM D-792	0.857	0.863	0.864	0.868	0.87	0.87	0.87	0.87	0.875
Melt Index, dg/min ASTM D-1238 190°C, 2.16 kg	1	0.5	13	0.5	1	2	5	30	3
Mooney Viscosity ASTM D-1646 ML 1 + 4 at 121°C	26	35	< 5	35	23	16	8	< 5	11
Total Crystallinity % ⁵	13	16	13	16	18	19	19	21	20
Molecular Weight Distribution, Rheology Ratio ⁴	L	L	L	L	L	M	L	L	L
Durometer Hardness, Shore A ASTM D-2240	50	66	60	75	75	68	72	75	77
DSC Melting Peak, °C Rate 10°C/min	33	49	50	55	60	55	60	60	67
Glass Transition Temperature, °C DSC Inflection Point	-61	-58	-59	-56	-55	-55	-56	-57	-53
Flexural Modulus, MPa ASTM D-790 2% Secant	3.5	8.3	6.9	11.8	13.6	11	12.1	12.1	16.6
Ultimate Tensile Strength, MPa ASTM D-638 508 mm/min	2.1	8.8	2	10.9	10.3	7.2	6.9	3.3	9.8

¹ Ultimate elongation for all grades exceeds 600%.

² This grade is talc dusted; properties are measured before the addition of talc.

³ Engage® 8400 is available in the European region. Engage® 8407 is available in the Americas and Asia Pacific.

⁴ L-Low, M-Medium and H-High are DuPont Dow Elastomers measures.

⁵ DuPont Dow Method

Typical Properties *part 3*

Product Grade ¹	Ethylene Octene Grades								
	8411	8003	8401	8440	8480	8450	8402	8540	8445
Density, g/cm ³ ASTM D-792	0.88	0.885	0.885	0.897	0.902	0.902	0.902	0.908	0.91
Melt Index, dg/min ASTM D-1238 190°C, 2.16 kg	18	1	30	1.6	1	3	30	1	3.5
Mooney Viscosity ASTM D-1646 ML 1 + 4 at 121°C	< 5	22	< 5	16	18	10	< 5	18	8
Total Crystallinity % ⁵	24	25	25	27	33	29	34	34	37
Molecular Weight Distribution, Rheology Ratio ⁴	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Durometer Hardness, Shore A ASTM D-2240	81	86	85	92	94	94	94	96	96
DSC Melting Peak, °C Rate 10°C/min	72	78	78	94	100	98	98	103	103
Glass Transition Temperature, °C DSC Inflection Point	-52	-49	-51	-44	-41	-42	-44	-39	-38
Flexural Modulus, MPa ASTM D-790 2% Secant	21.9	35.1	25.8	59.2	78.1	72.6	69.9	104	110.1
Ultimate Tensile Strength, MPa ASTM D-638 508 mm/min	6.5	21.8	6.4	24.5	25.8	24.8	12.9	28.9	21

¹ Ultimate elongation for all grades exceeds 600%.

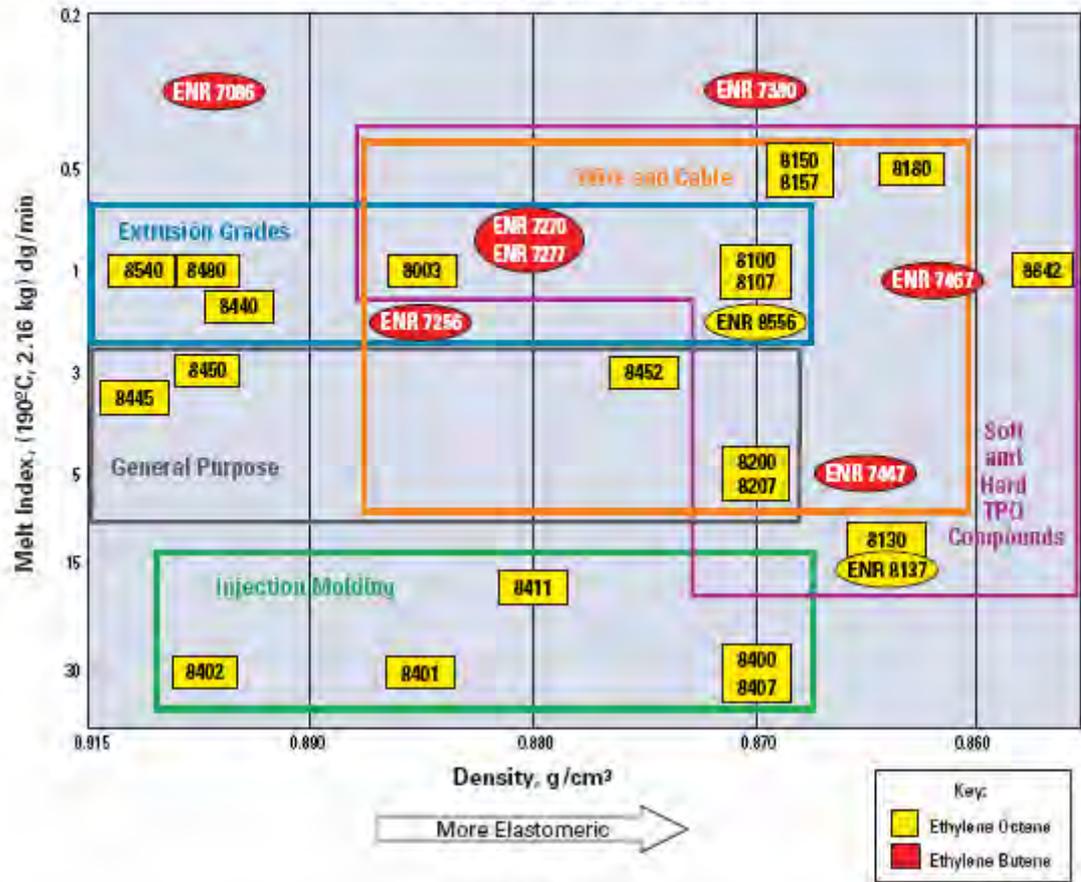
² This grade is talc dusted; properties are measured before the addition of talc.

³ Engage® 8400 is available in the European region. Engage® 8407 is available in the Americas and Asia Pacific.

⁴ L-Low, M-Medium and H-High are DuPont Dow Elastomers measures.

⁵ DuPont Dow Method

Market Application Matrix



Property Trends

Property Value	As Density Increases	As Melt Index Increases
Tensile Strength	Increases	Decreases
Stiffness	Increases	Decreases
Abrasion Resistance	Increases	Decreases
Hardness	Increases	Decreases
Softening Point	Increases	Decreases
Chemical Resistance	Increases	Decreases
Melt Strength	Increases	Decreases
Gloss	Increases	Increases
Shrinkage	Increases	Decreases
Impact Strength	Decreases	Decreases
Low Temperature Ductility	Decreases	Decreases
Stress Crack Resistance	Decreases	Decreases
Permeability	Decreases	Increases
Haze	Decreases	Decreases
Processability	No change	Increases
Tear Strength	Increases	Decreases

Innovative Solutions for Your Processes and Applications

Enhances Performance in Applications

Soft and Hard TPO Compounds

- Excellent physical properties including elasticity, toughness and low temperature ductility
- Excellent impact resistance, balance of properties and long term performance

Wire and Cable

- Enhances physical properties when combined with fillers or crosslinked

General Purpose

- Improves look and feel of soft and hard goods
- Lighter weight, more flexible parts
- Improves resiliency for foam applications
- Excellent filler acceptance for masterbatch applications
- Improved processing grades

Extrusion Grades

- Tough yet flexible
- Faster extrusion rates for more parts production per cycle
- Improved melt strength grades available

Injection Molding

- Better impact resistance properties and performance
- Excellent thermal stability, UV resistance and heat resistance

Excellent Processability

- Versatility for use in thermoplastic and thermoset applications
- Can be used as a “neat” polymer or as a value-enhancing ingredient in compound formulations
- New broad molecular weight materials for improved processing
- Compatible with most olefins
- Pellet form for easy handling, mixing, forming and processing on plastic or rubber equipment
- Recyclable for in-process scrap re-use advantages and for environmental responsibility

Standard Packaging Availability

Ethylene Butene Grades	ENR 7006	ENR 7256	ENR 7270	ENR 7277*	ENR 7300	ENR 7447*	ENR 7467*
20 kg Bags	x	x	x		x	x	x
1300 lb Octagonal Boxes	x	x	x		x	x	x
US Railcars (100,000 lb)	x	x		x			

Ethylene Octene Grades	ENR														ENR									
	8003	8100	8107*	8130	8137*	8150	8157*	8180	8200	8207*	8400	8401	8402	8407*	8411	8440	8445	8450	8452	8480	8540	8556	8842*	
US 20 kg Bags	x	x		x	x	x		x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
US 1300 lb Octagonal Boxes	x	x			x	x		x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
US Railcars (100,000 lb)	x		x				x			x														
Europe 20 kg Bags	x	x				x		x	x		x					x				x		x		
Europe 500 kg Boxes	x	x				x		x	x		x					x				x		x		

*Talc dusted

ภาคผนวก ข

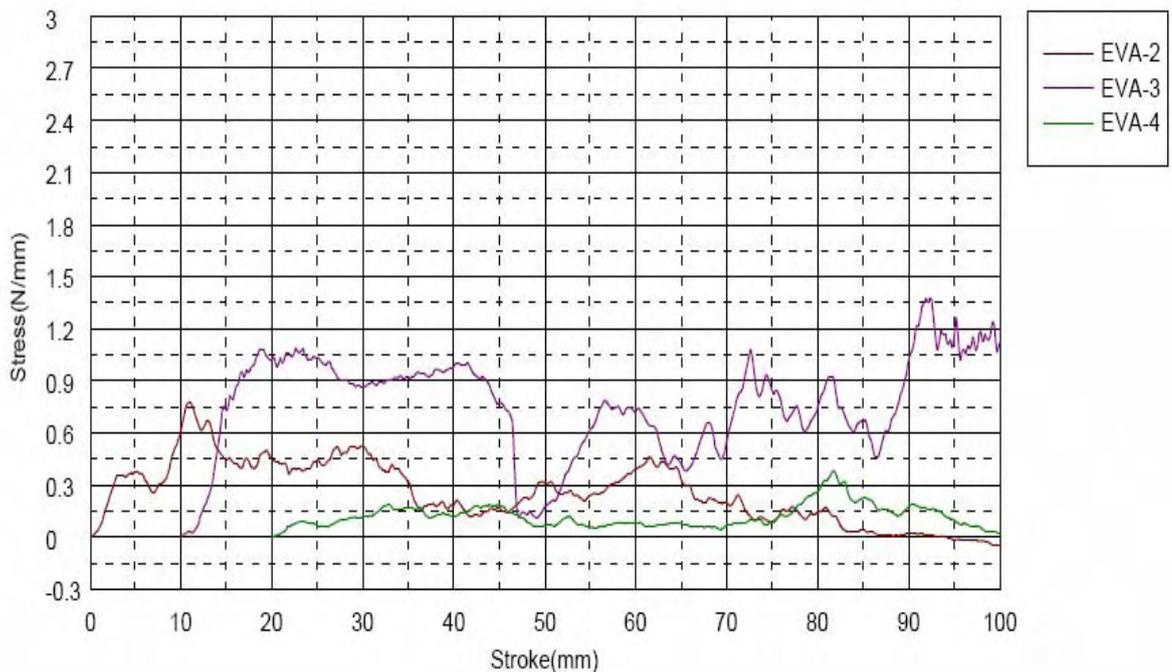
แสดงผลการทดสอบสมบัติด้านการยึดเกาะ

Shape: Plate2

	Width
Units	mm
EVA-2	30.0000
EVA-3	30.0000
EVA-4	30.0000

Name	First Peak_Stress	Max1_Stress	Min Mean_Stress	Peak Mean Stress	All Mean_Force
Units	N/mm	N/mm	N/mm	N/mm	N
EVA-2	0.78073	0.78073	0.59306	0.59306	12.5443
EVA-3	1.09115	1.38229	0.91146	1.09818	26.8694
EVA-4	0.38438	0.38438	0.38438	0.38438	--
Mean	0.75209	0.84913	0.62963	0.69187	19.7069
Standard Deviation	0.35425	0.50246	0.26544	0.36702	10.1294
Maximum	1.09115	1.38229	0.91146	1.09818	26.8694
Minimum	0.38438	0.38438	0.38438	0.38438	12.5443

Name	All Mean_Stress	Valley Mean Stress	Force Mean Stress
Units	N/mm	N/mm	N/mm
EVA-2	0.41814	0.24323	0.20769
EVA-3	0.89565	0.69311	0.78319
EVA-4	--	--	0.09854
Mean	0.65690	0.46817	0.36314
Standard Deviation	0.33765	0.31811	0.36784
Maximum	0.89565	0.69311	0.78319
Minimum	0.41814	0.24323	0.09854



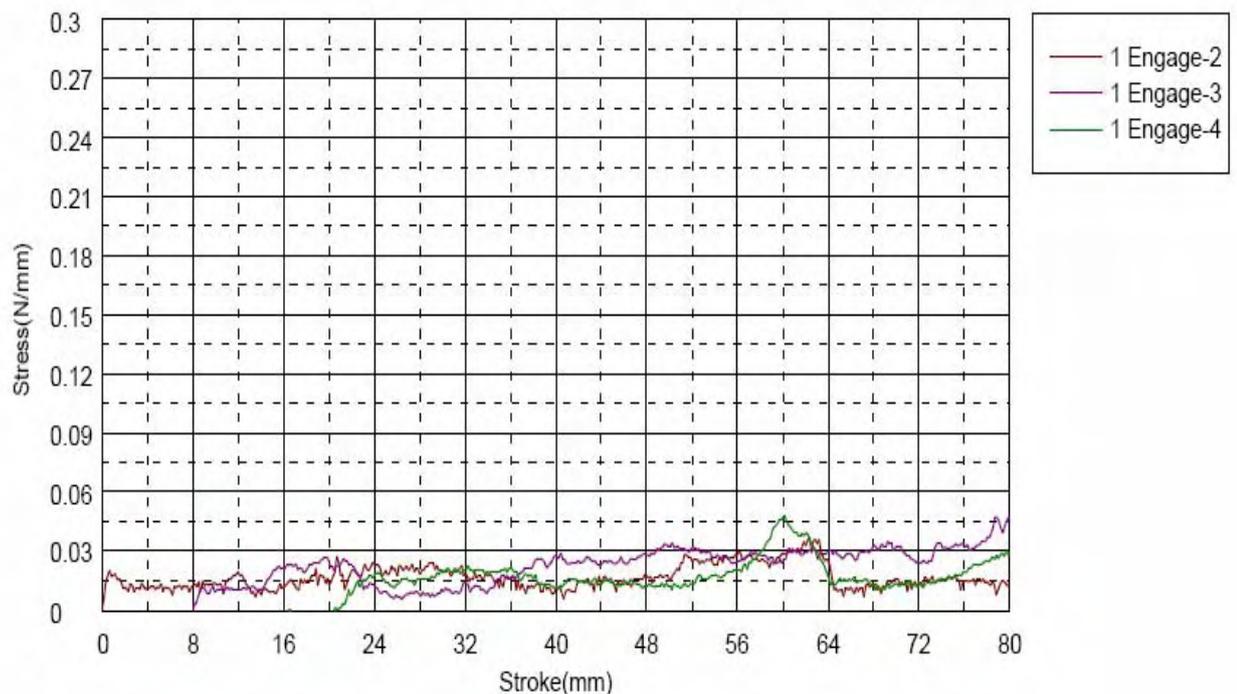
รูปที่ ข-1 แสดงกราฟข้อมูลการดึงลอกของชิ้นงานฟิล์มอีวีเอ 3 ชิ้นงาน

Shape: Plate2

	Width
Units	mm
1 Engage-2	30.0000
1 Engage-3	30.0000
1 Engage-4	30.0000

Name	First Peak_Stress	Max1_Stress	Min Mean_Stress	Peak Mean_Stress	All Mean_Force
Units	N/mm	N/mm	N/mm	N/mm	N
1 Engage-2	0.02760	0.05365	0.03941	0.03941	0.66927
1 Engage-3	0.02708	0.16823	0.09229	0.10871	2.54985
1 Engage-4	0.04740	0.04740	0.04245	0.04245	0.79297
Mean	0.03403	0.08976	0.05805	0.06352	1.33736
Standard Deviation	0.01158	0.06803	0.02969	0.03916	1.05186
Maximum	0.04740	0.16823	0.09229	0.10871	2.54985
Minimum	0.02708	0.04740	0.03941	0.03941	0.66927

Name	All Mean_Stress	Valley Mean Stress	Force Mean Stress
Units	N/mm	N/mm	N/mm
1 Engage-2	0.02231	0.00521	0.02000
1 Engage-3	0.08500	0.06128	0.04502
1 Engage-4	0.02643	0.01042	0.00764
Mean	0.04458	0.02564	0.02422
Standard Deviation	0.03507	0.03098	0.01904
Maximum	0.08500	0.06128	0.04502
Minimum	0.02231	0.00521	0.00764



รูปที่ ข-2 แสดงกราฟข้อมูลการดึงลอกของชิ้นงานฟิล์มเอชทีอินออกทิน โคพอลิเมอร์ 3 ชั้นงาน

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – นามสกุล	นายรัฐเขต อุ่นภัทรวาณิช
วัน เดือน ปีเกิด	13 ธันวาคม พ.ศ. 2521
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนยานนาวาศิวิทยาคม พ.ศ. 2539
ระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2542
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2549
ทุนการศึกษา	ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ปีงบประมาณ 2549
ประวัติการทำงาน	บริษัท ชนกรเมทัลเวิร์คโปรดิวเซอร์ จำกัด พ.ศ. 2542 บริษัท สหกิจวิศาล จำกัด พ.ศ. 2543 บริษัท โอเฟ้ จำกัด พ.ศ. 2546
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	--

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์

วันที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2550

ข้าพเจ้า นายรัฐเขต อุนภัทรวาณิช รหัสประจำตัว 46401007

เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา โท เอก ปร.ค

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

อยู่บ้านเลขที่ 194 / 1 ตรอก/ซอย ถนน พระราม 3

ตำบล/แขวง อำเภอ/เขต จังหวัด กทม.....

รหัสไปรษณีย์ 10120..... ขอโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี ดร.พัฒนา รักความสุข ตำแหน่ง คณบดีคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลง ดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “การศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์เอริลีนออกทีน โคพอลิเมอร์”

ซึ่งอยู่ในความควบคุม รศ.ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์

ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต่อวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก ๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28 และมาตรา 29 และมาตรา 30 แห่งพระราชบัญญัติ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ.....ผู้โอนลิขสิทธิ์

(นายรัฐเขต อุนภัทรวาณิช)

ลงชื่อ.....ผู้รับโอนลิขสิทธิ์

(ดร.พัฒนา รักความสุข)

ลงชื่อ.....พยาน

(รศ.ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์)

ลงชื่อ.....พยาน

(.....)