



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญญา

วิศวกรรมวัสดุ	วิศวกรรมวัสดุ
สาขา	ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงสมบัติการยึดติดของกลุ่มพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต

Bond Strength Modification of Polymer Pairs via UV Irradiation

นามผู้วิจัย นายกิตติพงศ์ วงศ์วารี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์สมเจตน์ พันธ์พันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิรัตน์ ไพศาลกิตติโชติ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์ปฎิภาณ จุ้ยเจิม, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงสมบัติการยึดติดของคู่พอลิเมอร์โดยใช้เทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต

Bond Strength Modification of Polymer Pairs via UV Irradiation

โดย

นายกิตติพงษ์ วงศ์วารี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติพงษ์ วงศ์วารี 2554: การปรับปรุงสมบัติการยึดติดของกลุ่มพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์สมเจตน์ พชรพันธ์, Ph.D. 170 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติการยึดติดระหว่างกลุ่มพอลิเมอร์ โดยใช้เทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet irradiation technique) พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิสไตรีน (PS) พอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (HIPS) และอะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีนสไตรีน (ABS) ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) พบว่าที่บริเวณผิวสัมผัสของ PS, HIPS และ ABS เกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลเพิ่มมากขึ้น เมื่อเวลาในการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตยาวนานขึ้น ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสง (Photo-oxidation) ของบิวทาไดอีนและพันธะคู่ในวงเบนซีนของโครงสร้างโมเลกุล PS, HIPS และ ABS เป็นผลทำให้เกิดการเสื่อมสภาพบนพื้นผิว นอกจากนี้การวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angle) แสดงให้เห็นว่าค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตยาวนานขึ้น ซึ่งเป็นผลจากความมีขั้วบนพื้นผิวที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามความแข็งแรงในการยึดติด พบว่าความต้านทานต่อแรงเฉือนสำหรับคู่ ABS และพลาสติกไวนิลคลอไรด์ (PVC) มีแนวโน้มลดลง ตามระยะเวลาของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ PP ก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต แสดงให้เห็นถึงการยึดติดที่ดีบนซานโดพรีน (SAN™) เนื่องจาก PP มีสมบัติที่ต้านทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสง ทั้งนี้ในการใช้กาวเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (Ethylene vinyl acetate) และกาวเอทิลไซยาโนอะครีเลต (Ethyl cyanoacrylate) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน พบว่าความแข็งแรงในการยึดติดของกลุ่ม ABS มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาในการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตยาวนานขึ้น เนื่องจากการความเข้ากันได้ขององค์ประกอบทางเคมีและพันธะทุติยภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกาว ECA และ ABS

Kittipong Wongwaree 2011: Bond Strength Modification of Polymer Pairs via UV Irradiation. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Mr. Somjate Patcharaphun, Ph.D. 170 pages.

The aim of this research was to improve the adhesion strength between the polymer pairs by using of UV irradiation technique. The polymers used in this work were Polypropylene (PP), Polystyrene (PS), High impact polystyrene (HIPS), and Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS). The analytical results obtained by Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) indicated that the hydroxyl and carbonyl groups (polar) occurred at the UV-activated surface of PS, HIPS and ABS, in that the longer the length of treatment the higher the hydroxyl and carbonyl groups. This was mainly attributed to the photo-oxidation of butadiene segments and unsaturated polymer in aromatic ring of PS, HIPS and ABS molecular chains, resulting in the surface degradation. In addition, the measured results of contact angle also showed that the contact angle tended to decrease with increasing period of treatment, indicating that the increase of polarity at the surface. From the adhesion strength obtained in this work, however, it was found that the shear strength especially for the pairs of ABS and pPVC tended to decrease increasing length of treatment, while in the case of PP no significant changes in photo-oxidation degradation was found. Furthermore, by using Ethylene Vinyl Acetate (EVA) and Ethyl Cyanoacrylate (ECA) as an adhesive, it can be seen that the adhesion strength of ABS/ABS significantly increased with increasing length of treatment as a result of the chemical compatibility and the occurrence of secondary bond between ECA and ABS.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร. สมเจตน์ พัทธพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาและข้อคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งข้อตักเตือนและคำสั่งสอนที่ทำให้ผู้วิจัยมีความรับผิดชอบและสามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างทำงานวิจัยได้ด้วยตัวเองและกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. อภิรัตน์ ไพศาลกิตติโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัย และแนะนำการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณนายวิวัฒน์ รักสัจ ที่ช่วยเหลือซ่อมแซมเครื่องฉายรังสีในระหว่างการทำวิจัย จนงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อในการขอใช้เครื่องวัดมุมสัมผัส และให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับการทำวิจัยในครั้งนี้ด้วย

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ในกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตพลาสติกและยาง (Plastic and Rubber Processing research group) ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิจัยในครั้งนี้

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

กิตติพงศ์ วงศ์วารี

ตุลาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(13)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	44
ผลและวิจารณ์	56
สรุปและข้อเสนอแนะ	110
สรุป	110
ข้อเสนอแนะ	112
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	113
ภาคผนวก	118
ภาคผนวก ก การออกแบบเครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต	119
ภาคผนวก ข มาตรฐาน ASTM G53	122
ภาคผนวก ค มาตรฐาน ASTM D3163 และ ASTM D3164	127
ภาคผนวก ง แนวโน้มของปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงของพอลิโพรพิลีนที่เกิดขึ้นภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต	135
ภาคผนวก จ แนวโน้มของปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงของพอลิสไตรีนที่เกิดขึ้นภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต	139
ภาคผนวก ฉ แนวโน้มของปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงของพอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูงที่เกิดขึ้นภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต	142
ภาคผนวก ช ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ -OH/-CH และ -C=O/-CH ของวัสดุพื้น (Substrate materials)	148
ภาคผนวก ซ ผลการทดลองการวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ -OH/-CH และ -C=O/-CH ของวัสดุพื้น (Substrate materials) บริเวณเนื้อผิวพอลิเมอร์	157

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของวัสดุพื้น (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) และวัสดุซ้อนทับ	159
ภาคผนวก ช ผลการทดลองการวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนของ ABS (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยโอเวอร์โมลบน pPVC	164
ภาคผนวก ช ผลการทดลองการวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนของ ABS (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยมีกาว ECA เป็นวัสดุในการเชื่อมประสาน	166
ภาคผนวก ช งานประชุมวิชาการ	168
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	170

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	รายละเอียดของแต่ละช่วงของรังสีอัลตราไวโอเล็ต	14
2	พลังงานในการสลายพันธะในพอลิเมอร์	19
3	พลังงานการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ	20
4	พลังงานในการสลายพันธะ (Dissociation energy) ของไฮโดรเปอร์ออกไซด์	26
5	วัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่ใช้ในงานวิจัย	46
6	ตำแหน่งเลขคลื่นและองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของวัสดุพื้นทั้ง 4 ชนิดที่ปรากฏใน FT-IR สเปกตรัม	57
7	ตำแหน่งเลขคลื่นและองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของวัสดุซ้อนทับที่ปรากฏใน FT-IR สเปกตรัม	59
8	หมู่ฟังก์ชันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตบนวัสดุพื้น 4 ชนิด	97
9	ผลการทดลองทั้งหมดของวัสดุพื้นทั้ง 4 ชนิดที่ได้รับผลกระทบจากการฉายรังสี UV	98
10	ผลการยึดติดระหว่าง PP, PS, HIPS และ ABS ที่เป็นวัสดุพื้น (ก่อนและหลังการฉายรังสี) โดยมี pPVC และ SAN™ เป็นวัสดุซ้อนทับ	99
11	ผลการทดสอบความแข็งแรงในการยึดติดของคู่วัสดุพอลิเมอร์ โดยมีกาว EVA และ ECA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน	103
12	ตำแหน่งเลขคลื่นและองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของกาว EVA และ ECA ที่ปรากฏใน FT-IR สเปกตรัม	106

ตารางผนวกที่

ก1	ข้อมูลหลอดเมอร์คิวรี่ที่ใช้ในงานวิจัย	121
ข1	การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ PP ในสภาวะบรรยากาศ	149
ข2	การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ PP ในสภาวะบรรยากาศ	149

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข3 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ PP ในสภาวะ สูญญากาศ	150
ข4 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ PP ในสภาวะ สูญญากาศ	150
ข5 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ PS ในสภาวะ บรรยากาศ	151
ข6 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ PS ในสภาวะ บรรยากาศ	151
ข7 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ PS ในสภาวะ สูญญากาศ	151
ข8 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ PS ในสภาวะ สูญญากาศ	152
ข9 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ HIPS ในสภาวะ บรรยากาศ	153
ข10 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ HIPS ในสภาวะ บรรยากาศ	153
ข11 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ HIPS ในสภาวะ สูญญากาศ	153
ข12 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ HIPS ในสภาวะ สูญญากาศ	154
ข13 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ ABS ในสภาวะ บรรยากาศ	155
ข14 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ ABS ในสภาวะ บรรยากาศ	155
ข15 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ ABS ในสภาวะ สูญญากาศ	155
ข16 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ ABS ในสภาวะ สูญญากาศ	156

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ซ1 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ ABS, HIPS, PS และ PP ภายหลังการชุบเนื้อผิว	158
ซ2 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ ABS, HIPS, PS และ PP ภายหลังการชุบเนื้อผิว	158
ฌ1 การวิเคราะห์หัวดุมสัมผัสดของ PP	160
ฌ2 การวิเคราะห์หัวดุมสัมผัสดของ PS	160
ฌ3 การวิเคราะห์หัวดุมสัมผัสดของ HIPS	161
ฌ4 การวิเคราะห์หัวดุมสัมผัสดของ ABS	161
ฌ5 การวิเคราะห์หัวดุมสัมผัสดของ Santoprene™	162
ฌ6 การวิเคราะห์หัวดุมสัมผัสดของ pPVC	162
ญ1 ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนของ ABS ก่อนและหลังการฉายรังสี UV และ ไอเวอร์โมลบน pPVC	165
ฎ1 ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนระหว่างคู่ ABS (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยมีกาว ECA เป็นวัสดุในการเชื่อมประสาน	167
ฎ2 ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนระหว่าง ABS (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) และ pPVC โดยมีกาว ECA เป็นวัสดุในการเชื่อมประสาน	167

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine)	4
2	ลักษณะของสกรูที่ใช้ในเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก	5
3	ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฉีด	6
4	ลักษณะของระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบข้อต่อ	7
5	ลักษณะของระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิก	8
6	(ก) ขั้นตอนและ (ข) รอบเวลาของกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก	9
7	เครื่องฉีดพลาสติก (ก) แบบ 2 หัวฉีดและ (ข) แบบ 3 หัวฉีด	10
8	ลักษณะการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้งโดย (ก) ใช้ระบบการหมุนของแม่พิมพ์และ (ข) ใช้หลักการเคลื่อนที่ของอินเลอร์ภายในแม่พิมพ์ฉีด	11
9	ตัวอย่างชิ้นงานของการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้งโดยใช้หลักการเคลื่อนที่ของอินเลอร์ภายในแม่พิมพ์ฉีด	12
10	แถบรังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) และความยาวคลื่น (Wavelength) ต่าง ๆ กันตามแหล่งกำเนิด	12
11	ช่วงของอัลตราไวโอเลต-เอ (UV-A), อัลตราไวโอเลต-บี (UV-B) อัลตราไวโอเลต-ซี (UV-C) และอัลตราไวโอเลต-วี (UV-V) ที่ปรากฏในสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า	14
12	การกระตุ้นแสงอัลตราไวโอเลตในกระบวนการกายภาพทางแสง	15
13	รายละเอียดของช่วงความยาวคลื่นที่ 300 นาโนเมตรในสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า	19
14	เครื่องเลเซอร์เย็น (Excimer laser)	21
15	โครงสร้างของเบนโซฟีโนน (Benzophenone)	23
16	โครงสร้างเคมีของพอลิโพรพิลีน (Polypropylene)	31
17	โครงสร้างเคมีของพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS)	32
18	โครงสร้างเคมีของพอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS)	33
19	โครงสร้างทางเคมีของอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS)	34
20	โครงสร้างทางเคมีของซานโตพรีน (Santoprene™, SAN™)	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลคลอไรด์และพลาสติกไซเซออร์ Di-2-ethylhexyl phthalate (DOP)	36
22	พันธะระหว่างโมเลกุล (Intermolecular bonds) ระหว่าง DOP และ PVC	37
23	โครงสร้างทางเคมี (ก) กาวเอทิล ไซยาโนอะคริเลต (Ethyl cyanoacrylate) และ (ข) กาวเอทิลลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene vinyl acetate)	38
24	การบ่ม (Curing) ของกาว ECA	39
25	ปฏิกิริยาแอนไอออนิกพอลิเมอไรเซชัน (Anionic polymerization) ของ ECA	39
26	เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Machine) ที่ใช้เตรียมชิ้นงาน	45
27	แม่พิมพ์ (molding)	45
28	ขนาดของชิ้นงานที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูป (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)	46
29	วัสดุพื้นผิวที่เตรียมได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูป	46
30	(ก) เครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต (ข) ด้านหน้าของเครื่อง (ค) ด้านข้างของเครื่อง และ (ง) หลอดเมอคิวรี่ (Mercury lamp)	47
31	ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลกระทบของการฉายรังสี UV บนวัสดุพื้นผิว	48
32	ขั้นตอนการวิเคราะห์เนื้อผิวของวัสดุพื้นผิวหลังการฉายรังสี UV	49
33	ตัวอย่างภาพตัดขวาง (Cross-section) ของชั้นผิวและใต้ชั้นผิว	49
34	ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างวัสดุพื้นผิว (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) และวัสดุซ้อนทับในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมดิง	50
35	ขั้นตอนการวิเคราะห์ความแข็งแรงของการยึดติดของคู่ ABS/ABS และ ABS/pPVC (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยมีกาว EVA และ ECA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน	51
36	เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR)	52
37	เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle meter)	53
38	ลักษณะการหยดน้ำลงบนพื้นผิวตามมาตรฐาน ASTM D5946-04	53
39	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	เครื่อง Universal testing machine (UTM)	55
41	ขนาดตัวอย่างชิ้นงานและพื้นที่สำหรับการยึดติด (ก) สำหรับการโอเวอร์โมลวัสดุพื้นด้วยวัสดุซ้อนทับและ (ข) สำหรับการยึดติดของกาว ECA และ EVA	55
42	FTIR สเปกตรัมของวัสดุพื้น (ก่อนการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต); (ก) PP (ข) PS (ค) HIPS และ (ง) ABS	56
43	FTIR สเปกตรัมของวัสดุซ้อนทับ (ก่อนการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต); (ก) SAN TM และ (ข) pPVC	58
44	FTIR สเปกตรัมของ PP (การเก็บตัวอย่าง 5 วัน, สภาวะบรรยากาศ) (ก) ไม่ผ่านการฉายรังสี UV, (ข) ผ่านการฉายรังสี UV 30 นาที (ค) 1 ชม. (ง) 2 ชม. (จ) 3 ชม. และ (ฉ) 4 ชม.	60
45	พื้นผิว PP ก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตตามระยะเวลาที่กำหนด	61
46	การดูดน้ำบนพื้นผิว PP ภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตตามระยะเวลาที่กำหนด	62
47	FTIR สเปกตรัมพื้นผิว PP โดยในสเปกตรัม (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (ข),(ค) คือส่วนเนื้อผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ (ง) และ (จ) คือส่วนของใต้ชั้นผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ	62
48	พื้นผิวของ PP ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (ข) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 2 ชั่วโมงและ (ค) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 4 ชั่วโมง	63
49	ค่ามุมสัมผัสเฉื่อย (Advancing contact angle) บนพื้นผิวของ PP	64
50	ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิว PP เมื่อใช้เวลาในการฉายรังสี UV ต่างๆ กัน	65
51	FTIR สเปกตรัมของ PS และ (การเก็บตัวอย่าง 5 วัน, สภาวะบรรยากาศ) (ก) ไม่ผ่านการฉายรังสี UV (ข) ผ่านการฉายรังสี UV 30 นาที (ค) 1 ชม. (ง) 2 ชม. (จ) 3 ชม. และ (ฉ) 4 ชม.	66
52	อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (ก) -OH/-CH และ (ข) -C=O/-CH ของ PS ในการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศ	68
53	การเปรียบเทียบอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ (ก) -OH/-CH และ (ข) -C=O/-CH ของ PS ที่ระยะการเก็บตัวอย่าง 5 วัน ทั้งการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศและสภาวะสุญญากาศ	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
54	โครงสร้างทางเคมีของ PS ที่เกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและเก็บตัวอย่างที่สภาวะสุญญากาศ	70
55	พื้นผิว PS ก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตตามระยะเวลาที่กำหนด	71
56	การขูดเนื้อผิวบนพื้นผิว PS ภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตตามระยะเวลาที่กำหนด	71
57	FTIR สเปกตรัมของ PS โดยในสเปกตรัม (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี; (ข)-(ค) คือส่วนเนื้อผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ (ง) และ (จ) คือส่วนของใต้ชั้นผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ	72
58	ค่ามุมสัมผัสเคลื่อน (Advancing contact angle) บนพื้นผิวของ PS	73
59	ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิว PS เมื่อใช้เวลาในการฉายรังสี UV ต่างๆ กัน	73
60	FTIR สเปกตรัมของ HIPS (การเก็บตัวอย่าง 5 วัน, สภาวะบรรยากาศ) (ก) ไม่ผ่านการฉายรังสี UV, (ข) ผ่านการฉายรังสี UV 30 นาที (ค) 1 ชม. (ง) 2 ชม. (จ) 3 ชม. และ (ฉ) 4 ชม.	74
61	อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (ก) $-OH/-CH$ และ (ข) $-C=O/-CH$ ของ HIPS ในการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศ	76
62	การเปรียบเทียบอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (ก) $-OH/-CH$ และ (ข) $-C=O/-CH$ ของ HIPS ที่ระยะการเก็บตัวอย่าง 5 วัน ทั้งการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศและสภาวะสุญญากาศ	77
63	โครงสร้างทางเคมีของ HIPS ที่เกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและเก็บตัวอย่างที่สภาวะสุญญากาศ	78
64	พื้นผิว HIPS ก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตตามระยะเวลาที่กำหนด	79
65	การขูดเนื้อผิวบนพื้นผิว HIPS ภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตตามระยะเวลาที่กำหนด	79
66	FTIR สเปกตรัมของ HIPS โดยในสเปกตรัม (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี; (ข)-(ค) คือส่วนเนื้อผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ (ง) และ (จ) คือส่วนของใต้ชั้นผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ	80
67	ค่ามุมสัมผัสเคลื่อน (Advancing contact angle) บนพื้นผิวของ HIPS	81

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
68	ลักษณะของหยดน้ำมันพื้นผิว HIPS เมื่อใช้เวลาในการฉายรังสี UV ต่างๆ กัน	81
69	พื้นผิวของ HIPS ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (ข) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 2 ชั่วโมงและ (ค) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 4 ชั่วโมง	82
70	พื้นผิวของ PS ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (ข) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 2 ชั่วโมงและ (ค) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 4 ชั่วโมง	83
71	FTIR สเปกตรัมของ ABS (การเก็บตัวอย่าง 5 วัน, สภาวะบรรยากาศ) (ก) ไม่ผ่านการฉายรังสี UV (ข) ผ่านการฉายรังสี UV 30 นาที (ค) 1 ชม. (ง) 2 ชม. (จ) 3 ชม. และ (ฉ) 4 ชม.	84
72	อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (ก) $-OH/-CH$ และ (ข) $-C=O/-CH$ ของ ABS ในการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศ	86
73	การเปรียบเทียบอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (ก) $-OH/-CH$ และ (ข) $-C=O/-CH$ ของ ABS ในระยะการเก็บตัวอย่าง 5 วัน ที่สภาวะบรรยากาศและสภาวะสุญญากาศ	88
74	เปรียบเทียบอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (ก) $-OH/-CH$ และ (ข) $-C=O/-CH$ ระหว่าง HIPS, PS และ ABS ในระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 5 วัน ที่สภาวะบรรยากาศ	89
75	พื้นผิว ABS ก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตตามระยะเวลาที่กำหนด	91
76	การขูดเนื้อผิวบนพื้นผิว ABS ภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตตามระยะเวลาที่กำหนด	91
77	FTIR สเปกตรัมของ ABS โดยในสเปกตรัม (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี; (ข)-(ค) คือส่วนเนื้อผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ (ง) และ (จ) คือส่วนของใต้ชั้นผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ	92
78	พื้นผิวของ ABS ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (ข) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 2 ชั่วโมงและ (ค) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 4 ชั่วโมง	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
79	การเกิดคลื่นเล็ก ๆ (Ripple) บนพื้นผิวของ ABS ภายหลังจากฉายรังสีที่ 2 ชั่วโมง	95
80	ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย (Advancing contact angle) บนพื้นผิวของ ABS	95
81	ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิว ABS เมื่อใช้เวลาในการฉายรังสี UV ต่างๆ กัน	96
82	(ก) วัสดุพื้นผิวใส่ในแม่พิมพ์พร้อมสำหรับการโอเวอร์โมล (ข) ภายหลังจากโอเวอร์โมลด้วยวัสดุซ้อนทับ (ค) Top view ของ PP และ SAN TM (ง) ด้านบนของ ABS กับ pPVC (จ) ด้านข้างของ PP และ SAN TM และ (ฉ) ด้านข้างของ ABS กับ pPVC	100
83	ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนของ ABS (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยโอเวอร์โมลบน pPVC	101
84	การทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนระหว่าง PP และ SAN TM ที่เกิดการขาดที่บริเวณชั้นงานของ SAN TM	102
85	การประกบของวัสดุชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 โดยมีกาว EVA และ ECA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน	104
86	พื้นผิวที่เกิดการหลุดลอกของคู่ (ก) ABS/ABS และ (ข) ABS/pPVC โดยมีกาว EVA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน	105
87	FTIR สเปกตรัมของ (ก) กาวเอทิลลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene vinyl acetate, EVA) และ (ข) กาวเอทิลไซยาโนอะคริเลต (Ethyl cyanoacrylate, ECA)	106
88	ชั้นงาน (ก) ABS/ABS และ (ข) ABS/pPVC ขณะทำการทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือน โดยมีกาว ECA เป็นตัวเชื่อมประสาน	107
89	ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนของ ABS/ABS และ ABS/pPVC ก่อนและหลังการฉายรังสี UV ที่แตกต่างกัน โดยมีกาว ECA เป็นตัวเชื่อมประสาน	108
90	แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole forces) ที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว ABS และกาว ECA	108
91	พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) และแรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole forces) ที่เกิดขึ้นบนระหว่างพื้นผิว ABS ที่ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต และกาว ECA	109

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ก1	การออกแบบเครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต (ก) ด้านหน้าเครื่อง (Front view), (ข) ด้านข้างเครื่อง (Side view), (ค) ด้านบนเครื่อง (Top view) (หน่วยเป็น มิลลิเมตร, mm) และ (ง) รูปเครื่องฉายรังสีอัลตราไวโอเลต	120
ก2	อุณหภูมิภายในของหลอดเมอร์คิวรี	121
ฉ1	ลักษณะของหยดน้ำที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุซ้อนทับ (Over-molded materials) (ก) SAN TM และ (ข) pPVC	163

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ABS	=	อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene)
Air	=	การเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศ
C=O	=	หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group)
°C	=	องศาเซลเซียส
Des	=	การเก็บตัวอย่างที่สภาวะสูญญากาศ
ECA	=	กาวเอทิลไซยาโนอะคริเลต (Ethyl cyanoacrylate)
EVA	=	กาวเอทิลลีนไวน์อะซิเตท (Ethylene vinyl acetate)
FTIR	=	Fourier transform infrared spectrometer (FTIR)
HIPS	=	พอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (High impact polystyrene)
Hr.	=	Hours
kPa	=	Kilo pascal
min.	=	Minute
N	=	Newton
N/m ²	=	Newton per Square meter
nm	=	นาโนเมตร (Nanometer)
-OH	=	หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group)
P•	=	อนุมูลอิสระแอลคิล (Alkyl radicals)
PO•	=	อนุมูลออกซี (Polymer oxy radicals)
POO•	=	อนุมูลอิสระเปอร์ออกซี (Peroxy radical)
POOH	=	ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide)
PP	=	พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)
PS	=	พอลิสไตรีน (Polystyrene)
pPVC	=	พอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดเติมพลาสติกไซเซออร์ (Plasticized polyvinyl chloride)
SAN TM	=	ซานโตพรีน (Santoprene TM)
SEM	=	Scanning electron microscope (SEM)
TPE	=	Thermoplastic elastomer
UTM	=	Universal Testing Machine (UTM)
UV	=	รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet)

การปรับปรุงสมบัติการยึดติดของคู่พอลิเมอร์ โดยใช้เทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต

Bond Strength Modification of Polymer Pairs via UV Irradiation

คำนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนพลาสติกภายในประเทศมีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุปกรณ์ทางไฟฟ้า อุปกรณ์ทางการแพทย์ อุปกรณ์กีฬา และบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เนื่องจากให้อัตราการผลิตที่สูง และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ (Ajbani *et al.*, 2006; Barinaga and Dowell, 2004) เนื่องจากความต้องการความสวยงามของชิ้นงานและความสะดวกในการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นต้องออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมดิง (Injection overmolding process) (Bill, 2006) ซึ่งเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบดั้งเดิม (Conventional injection molding process) เพื่อผลิตชิ้นงานที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์หลายชนิดในชิ้นงานเดียวโดยไม่ต้องประกอบชิ้นงานในแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน เพื่อให้การประกอบของชิ้นงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น บางครั้งอาจใช้กาว (Adhesive) ช่วยในการประสาน แต่เทคนิคการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมดิงและการใช้กาวยังพบปัญหาในเรื่องของความแข็งแรงการยึดติดที่ต่ำ ทำให้พอลิเมอร์ที่ประกอบกันเกิดการหลุดลอก (Delamination) ออกจากกันได้ง่าย ดังนั้นเทคนิคการปรับปรุงสภาพพื้นผิว (Surface modification) จึงเข้ามามีบทบาทเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์ ซึ่งมีอยู่หลายเทคนิค เช่น การใช้สารเคมี (Chemical treatment) เทคนิคพลาสมา (Plasma treatment) (Mathieson and Bradley, 1995; Romero-Sanchez *et al.*, 2005) เทคนิคโคโรนา (Corona treatment) (Oosterom *et al.*, 2006) การใช้เปลวไฟ (Flame treatment) (Mathieson and Bradley, 1995) เป็นต้น อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวยังคงไม่ได้รับความนิยมในการใช้งานมากนัก เนื่องจากความสิ้นเปลืองพลังงานและราคาที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตบนพื้นผิวของพอลิเมอร์มาประยุกต์ใช้ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่าย สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว เครื่องมือราคาถูก ไม่ต้องใช้สารเคมี เป็นกระบวนการแห้ง (Dry process) ควบคุมการปรับปรุงแค่เฉพาะพื้นผิวได้อย่างแม่นยำ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถกำจัดสิ่งเจือปน (Organic contaminants) จากพื้นผิวพอลิเมอร์ได้ (Chan, 1994) ซึ่งเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตอาจ

มีอิทธิพลต่อสมบัติการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์ต่างชนิดในงานฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมดิง รวมถึงการใช้กากเป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยเลือกใช้กาก 2 ชนิด ได้แก่ กากเอทิลลีนไวนิลอะซิเตท และ กากเอทิลไซยาโนอะคริเลต



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการปรับปรุงพื้นผิววัสดุพื้น (Substrate materials) ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมดิ่งด้วยเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต
2. เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างวัสดุพอลิเมอร์ 2 ชนิด โดยใช้กาวเอทิลลีนไวนิลอะซิเตท และกาวเอทิลไซยาโนอะคริเลตเป็นวัสดุเชื่อมประสาน

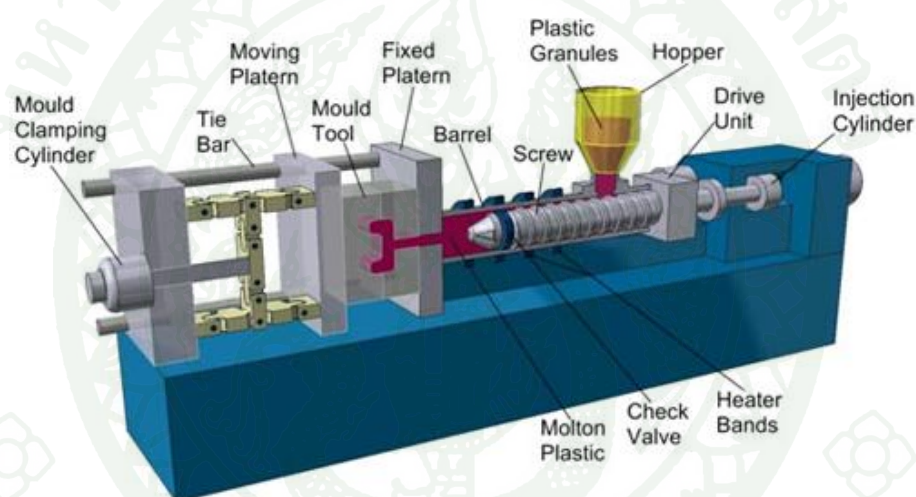


การตรวจเอกสาร

1. กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก

1.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบดั้งเดิม (Conventional injection molding process)

กระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการผลิตที่นิยมใช้กันอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เนื่องจากให้กำลังการผลิตสูง และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะซับซ้อนได้ดี โดยส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูปสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลักดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine)

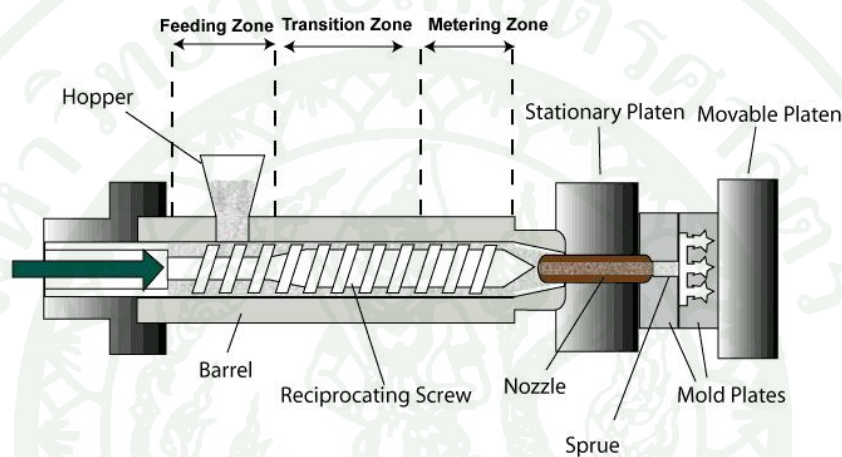
ที่มา: Rutland Plastics Limited, 2011

1.1.1 ชุดฉีด (Injection unit) เป็นส่วนประกอบของเครื่องฉีดที่ทำหน้าที่หลอมละลายเม็ดพลาสติก และให้แรงดันในการฉีดเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ขึ้นรูป โดยชุดฉีดประกอบด้วยส่วนสำคัญ ดังนี้

ก. ห้องหลอม (Barrel) ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์และควบคุมอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยใช้เข็มขัดให้ความร้อน (Heater band) ซึ่งหุ้มอยู่ภายนอก

ข. หัวฉีด (Nozzle) มีลักษณะเป็นรูขนาดเล็ก อยู่ที่ยกบริเวณด้านหน้าห้องหลอม โดยทำหน้าที่เพิ่มความเร็วของพอลิเมอร์หลอมเหลวในการไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ฉีด

ค. สกรู (Screw) เป็นส่วนที่สำคัญในกระบวนการหลอมละลายเม็ดพอลิเมอร์ และให้แรงดันในการฉีดขึ้นรูปรวมถึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการผสมและความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอมเหลว (ดังแสดงในภาพที่ 2) โดยสามารถแบ่งสกรูออกเป็น 3 ส่วนดังนี้



ภาพที่ 2 ลักษณะของสกรูที่ใช้ในเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก

ที่มา: Santa Clara University – Engineering Design Center, 2006

1) ช่วงการลำเลียง (Feed zone) เป็นช่วงที่ร่องเกลียวของสกรูมีความลึกมากที่สุด และมีความยาวประมาณครึ่งหนึ่งของสกรู ทำหน้าที่ลำเลียงพอลิเมอร์ลงมาจากกรวยเติม (Hopper) ไปยังช่วงต่อไป

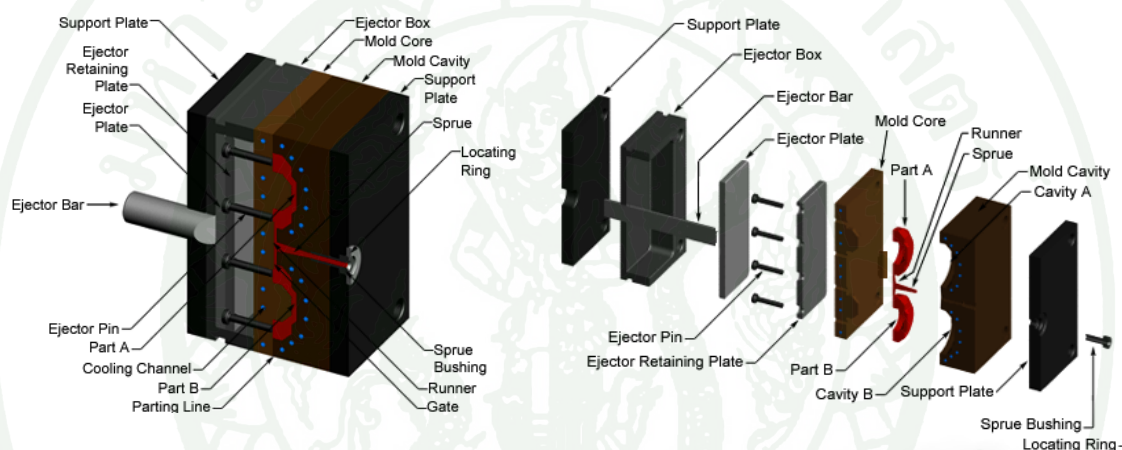
2) ช่วงการอัด (Compression zone) เป็นช่วงที่สกรูมีความลึกของร่องเกลียวลดลง โดยที่ช่วงนี้เริ่มเกิดการหลอมละลายของเม็ดพลาสติกหลอมเหลว เนื่องจากความร้อนจากผนังห้องหลอม และความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน (Shear heating) ระหว่างเม็ดพลาสติกและผนังของสกรูตลอดจนเม็ดพลาสติกด้วยกันเอง ส่งผลให้เม็ดพลาสติกเกิดการหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวกัน

3) ช่วงเพิ่มความดัน (Pumping zone) เป็นช่วงที่สกรูมีความลึกของร่องเกลียวของช่วงนี้น้อยที่สุด เพื่อให้เม็ดพลาสติกที่ยังไม่เกิดการหลอมเหลวเกิดการหลอมเหลวที่

บริเวณนี้ และยังทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวกลายเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เพื่อพร้อมสำหรับการฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ต่อไป

4) ชุดขับเคลื่อน (Drive unit) ประกอบด้วยมอเตอร์ซึ่งทำหน้าที่หมุนสกรูเพื่อให้เกิดการหลอมละลายของพอลิเมอร์โดยใช้ และชุดขับเคลื่อนไฮดรอลิกซึ่งทำหน้าที่ดันสกรูไปด้านหน้าในจังหวะฉีด

1.1.2 แม่พิมพ์ (Mold unit) คือส่วนที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ โดยทั่วไปแม่พิมพ์ฉีดประกอบด้วยส่วนสำคัญ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฉีด

ที่มา: CustomPartNet, 2009

ก. รูฉีดยิ่ง (Sprue) เป็นช่องทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ต่อจากหัวฉีดเพื่อเข้าสู่แม่พิมพ์ และทำหน้าที่ส่งผ่านพอลิเมอร์หลอมเหลวไปยังทางวิ่ง

ข. ทางวิ่ง (Runner) ทำหน้าที่นำพาพอลิเมอร์หลอมเหลวจากรูฉีดยิ่งเข้าสู่แม่พิมพ์ (Cavity)

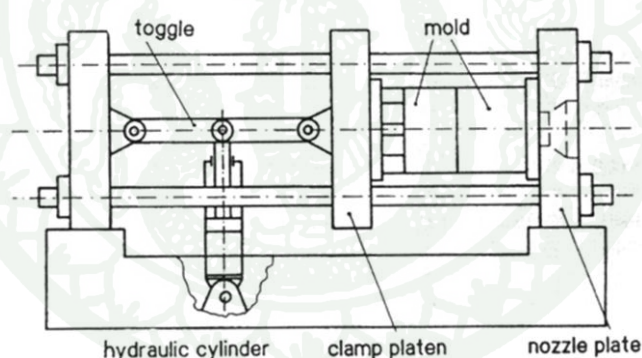
ค. ทางเข้า (Gate) เป็นส่วนที่เล็กและบางที่สุดอยู่ระหว่างทางวิ่งและแม่พิมพ์ ทำหน้าที่เพิ่มความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวให้สามารถไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้เต็มเบ้า และป้องกันการไหลออกของพอลิเมอร์หลอมเหลวเนื่องจากเป็นส่วนที่แข็งตัวเร็วที่สุด

ง. เบ้าแม่พิมพ์ (Cavity) เป็นส่วนของแม่พิมพ์ที่พอลิเมอร์หลอมเหลวถูกฉีดเข้าไป เพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ตามรูปร่างที่ต้องการ

จ. ระบบนำปลดชิ้นงาน (Ejector system) ทำหน้าที่นำปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ หลังจากการเย็นตัวแล้ว โดยมีก้านกระทุ้ง (Ejector pin) อยู่ภายในเพื่อนำปลดชิ้นงานออกมา

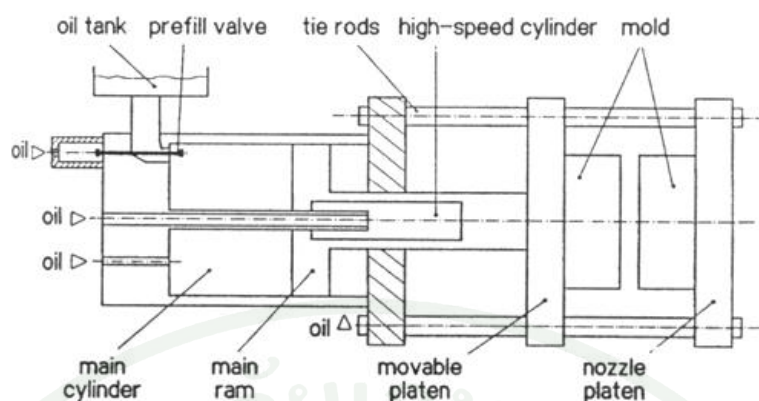
1.1.3 ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping unit) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนเพื่อปิดและเปิดแม่พิมพ์ ในระหว่างการทำงานของเครื่องฉีด โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

ก. ระบบปิด-เปิดแบบข้อต่อ (Toggle clamping system) ใช้ระบบไฮดรอลิกหรือมอเตอร์ดันข้อต่อรูปตัววีเพื่อดันปิดแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 4 มีระบบการทำงานแบบล็อกอัตโนมัติ (Self-locking) ทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ในการปิดแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามระบบปิด-เปิดแบบข้อต่ออาจมีข้อด้อยในเรื่องของขั้นตอนการบำรุงรักษา และความแม่นยำของการใช้งานที่ลดลงเนื่องจากการสึกหรอของข้อต่อ เมื่อใช้งานไปในระยะเวลานาน



ภาพที่ 4 ลักษณะของระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบข้อต่อ

ข. ระบบปิด-เปิดแบบข้อไฮดรอลิก (Hydraulic clamping system) การปิด-เปิดแม่พิมพ์ควบคุมด้วยระบบไฮดรอลิก ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งมีข้อเด่นคือสามารถควบคุมระยะและแรงในการปิด-เปิดได้แม่นยำ ให้แรงดันปิดที่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามระบบปิด-เปิดแบบข้อไฮดรอลิก มีราคาค่อนข้างสูง สิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากระบบไฮดรอลิกต้องให้แรงดันคงค้างไว้ในขณะที่ปิดแม่พิมพ์ฉีด



ภาพที่ 5 ลักษณะของระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิก

1.2 รอบเวลาในการฉีดขึ้นรูป

1.2.1 การหลอมเหลวพอลิเมอร์ (Melting process) คือขั้นตอนในการหลอมเหลวเม็ดพลาสติกจนกลายเป็นเนื้อเดียวกันด้วยความร้อนจากอุปกรณ์ให้ความร้อนและแรงเฉือนจากการหมุนของสกรู

1.2.2 การฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ (Mold filling process) คือขั้นตอนของการฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านหัวฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยแรงดันจากการขับเคลื่อนในแนวอนของสกรู

1.2.3 การให้แรงดันคงค้าง (Holding pressure) เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกฉีดเข้าจนเต็มเบ้าแม่พิมพ์ และเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มแข็งตัวทำให้เกิดการหดตัวของพอลิเมอร์ ในขั้นตอนนี้ต้องมีการให้แรงดันคงค้างต่อเนื่องทำให้เกิดการเติมเนื้อพอลิเมอร์ภายในเบ้าแม่พิมพ์เพื่อชดเชยการหดตัวของชิ้นงานพอลิเมอร์ในระหว่างการเย็นตัว

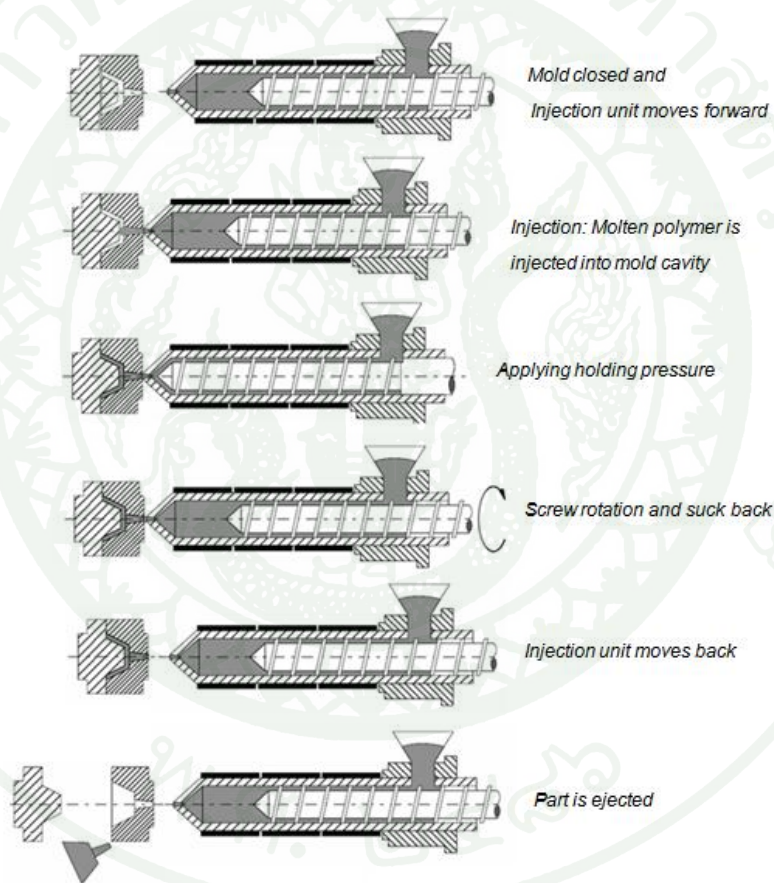
1.2.4 สกรูหมุนเพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลไปที่บริเวณด้านหน้าของสกรูเพื่อรอการฉีดในรอบต่อไป

1.2.5 การเย็นตัวของพอลิเมอร์ในแม่พิมพ์ (Cooling phase) ในขั้นตอนนี้ ทั้งอุณหภูมิและความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลงอย่างต่อเนื่อง การเย็นตัวเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานที่สุดต่อหนึ่งรอบการผลิตในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

1.2.6 การเปิดแม่พิมพ์ (Mold open) แม่พิมพ์ถูกเปิดเพื่อรอการนำปลดชิ้นงานโดยระบบปลดชิ้นงาน

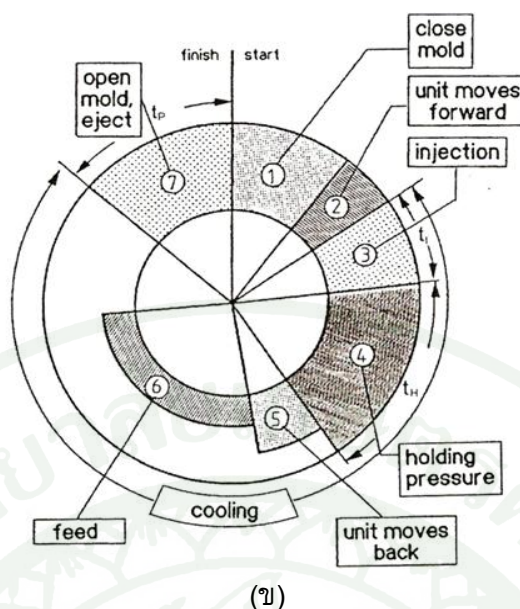
1.2.7 การนำปลดชิ้นงาน (Ejection) หลังจากแม่พิมพ์เปิดออกชิ้นงานถูกปลดด้วยกลไกทำให้ชิ้นงานหลุดออกจากเบ้าแม่พิมพ์

1.2.8 แม่พิมพ์ปิด (Mold close) เมื่อนำปลดชิ้นงานแล้วแม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าประกบกัน เพื่อรอการฉีดในรอบต่อไป โดยรอบเวลาการทำงานของกระบวนการฉีดขึ้นรูปแสดงดังภาพที่ 6



(ก)

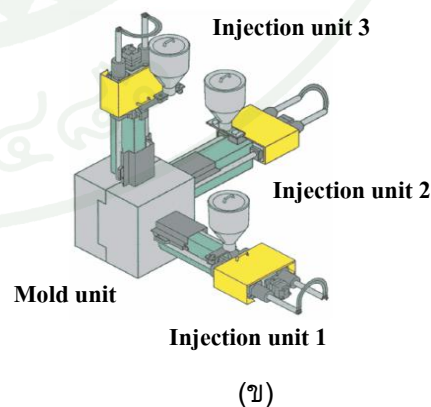
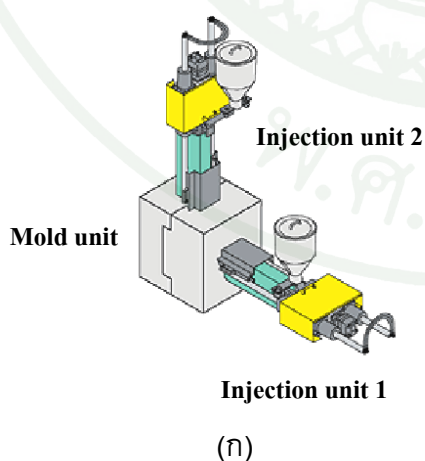
ภาพที่ 6 (ก) ขั้นตอนและ (ข) รอบเวลาของกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก



ภาพที่ 6 (ต่อ)

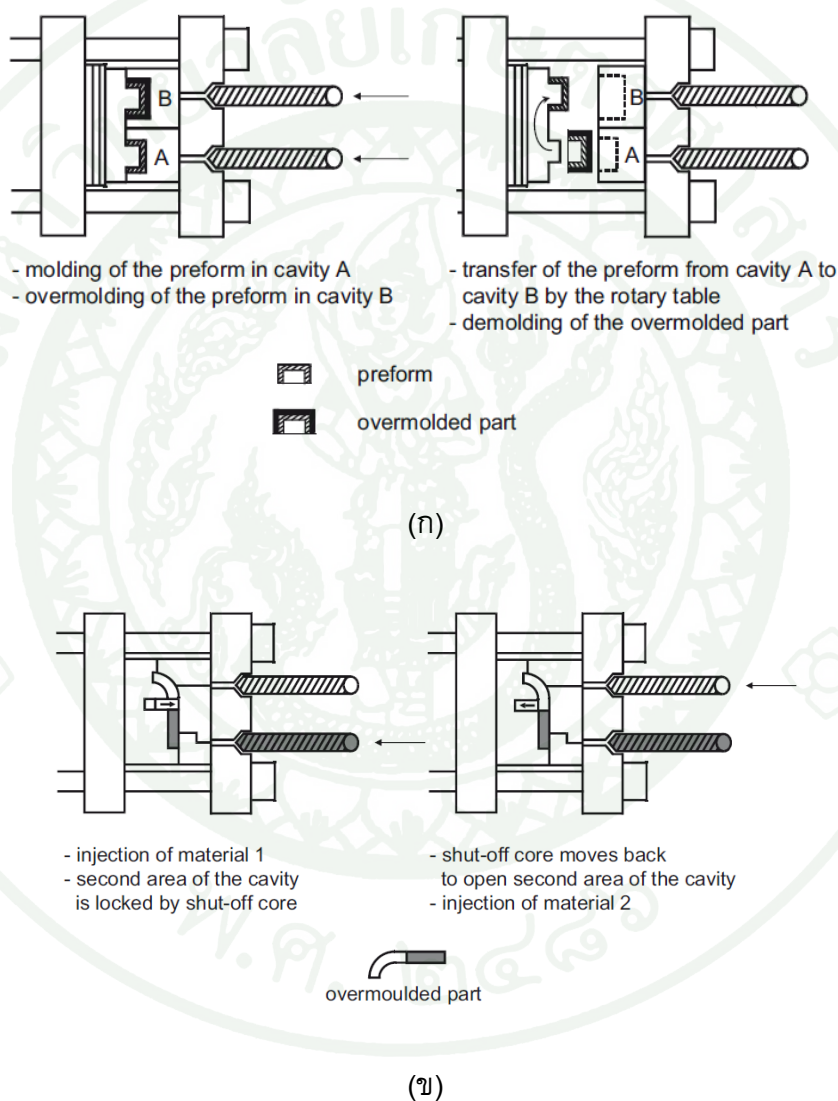
1.3 กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้ง (Injection over-molding process)

กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้ง เป็นกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกที่ถูกพัฒนาต่อเนื่องมาจากกระบวนการฉีดแบบดั้งเดิม (Conventional injection molding) ซึ่งมีชุดเครื่องฉีด (Injection unit) เพียง 1 ชุด ในขณะที่กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้งประกอบไปด้วยชุดเครื่องฉีดอย่างน้อย 2 ชุด ดังแสดงในภาพที่ 7(ก) และ (ข)



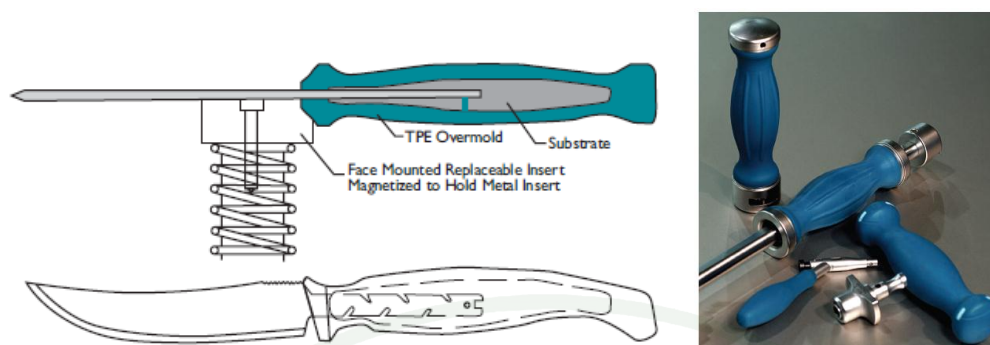
ภาพที่ 7 เครื่องฉีดพลาสติก (ก) แบบ 2 หัวฉีดและ (ข) แบบ 3 หัวฉีด

หลักการของกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้ง ในขั้นตอนแรกวัสดุพอลิเมอร์ชนิดที่หนึ่ง จะถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ฉีด (Mold) เพื่อให้เป็นวัสดุพื้น (Substrate material) จากนั้นภายหลังจากที่วัสดุพื้นเย็นตัวแล้ว วัสดุพอลิเมอร์ชนิดที่สองจะถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์เพื่อเป็นวัสดุซ้อนทับ (Over-molded material) ต่อเนื่องจากการฉีดในครั้งแรก โดยอาศัยหลักการหมุนของแม่พิมพ์ (Rotary mold system) หรือโดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของ อินลิทร์ภายในแม่พิมพ์ฉีด ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ลักษณะการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้งโดย (ก) ใช้ระบบการหมุนของแม่พิมพ์ และ (ข) ใช้หลักการเคลื่อนที่ของอินลิทร์ภายในแม่พิมพ์ฉีด

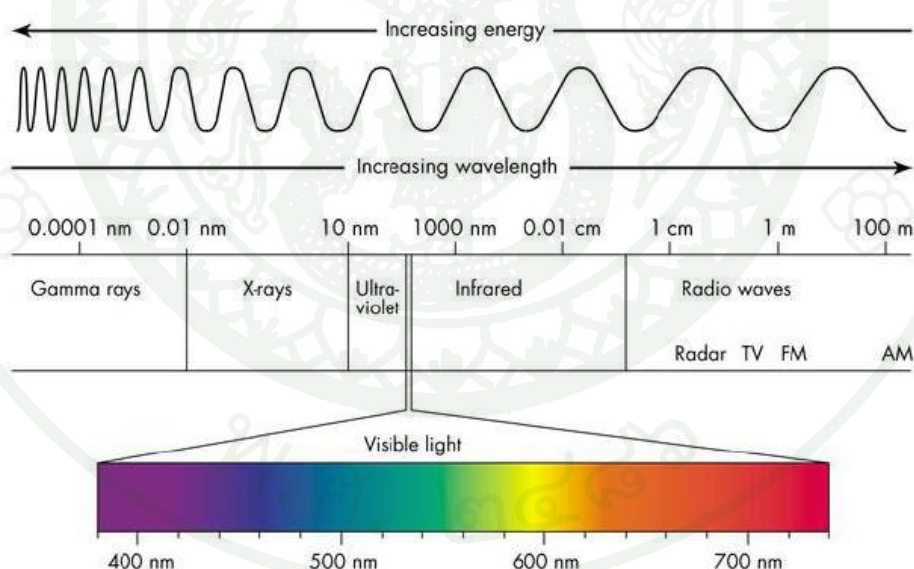
ที่มา: Potsch and Michaeli (2007)



ภาพที่ 9 ตัวอย่างชิ้นงานของการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์โดยใช้หลักการเคลื่อนที่ของอินเสิร์ตภายในแม่พิมพ์ฉีด

ที่มา: Overmoulding Guide, Total TPE Solutions (2004)

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) และรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation)



ภาพที่ 10 แถบรังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) และความยาวคลื่น (Wavelength) ต่างๆ กันตามแหล่งกำเนิด

ที่มา: Zeus Industrial Products, Inc (2005)

สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) เป็นแถบรังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่างๆ กัน ตามแหล่งกำเนิดและวิธีการตรวจวัดคลื่น จากภาพที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานและความยาวคลื่น โดยความยาวคลื่นต่ำๆ เช่น รังสี แกมมา หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถให้พลังงานสูงกว่าความยาวคลื่นสูงๆ เช่น คลื่นวิทยุ เป็นต้น ซึ่งอธิบายได้จากสมการ 1 (Chi-Ming, 1994; Fabio *et al.*, 1994)

$$E = hv = hc / \lambda \quad (1)$$

โดย E คือค่าพลังงานโฟตอน (Photon energy) (หน่วยคือ Electroratiogram; ergs), h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.6239×10^{-27} erg-s, v คือความถี่ (Frequency), λ คือความยาวคลื่น (Wavelength) และ c คือความเร็วแสง (Velocity of light) มีค่าเท่ากับ 2.9979×10^{10} cm/s

สมการที่ (1) สามารถอธิบายถึงพลังงานของแต่ละความยาวคลื่นได้ ซึ่งประโยชน์ของการนำพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้มาใช้มีมากมาย เช่น การนำรังสีเอกซ์มาใช้ทางการแพทย์ เพื่อตรวจดูความผิดปกติของอวัยวะภายในร่างกาย หรือนำไปตรวจหาอาวุธ อุปกรณ์ที่ห้ามนำขึ้นเครื่องบิน ศึกษาการจัดเรียงตัวของอะตอมโดยใช้รังสีเอ็กซ์ การนำรังสีอินฟราเรดไปใช้ในงานโทรคมนาคม หรือนำไปทำรีโมทคอนโทรลที่คอยควบคุมการสั่งงานต่างๆ ซึ่งการนำรังสีอัลตราไวโอเล็ตมาใช้เพื่อปรับปรุงพื้นผิวพลาสติกและการทดสอบการเสื่อมสภาพทางแสงของพอลิเมอร์ (Photo-degradation) ก็นับว่าเป็นหนึ่งในการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Chi-Ming, 1994)

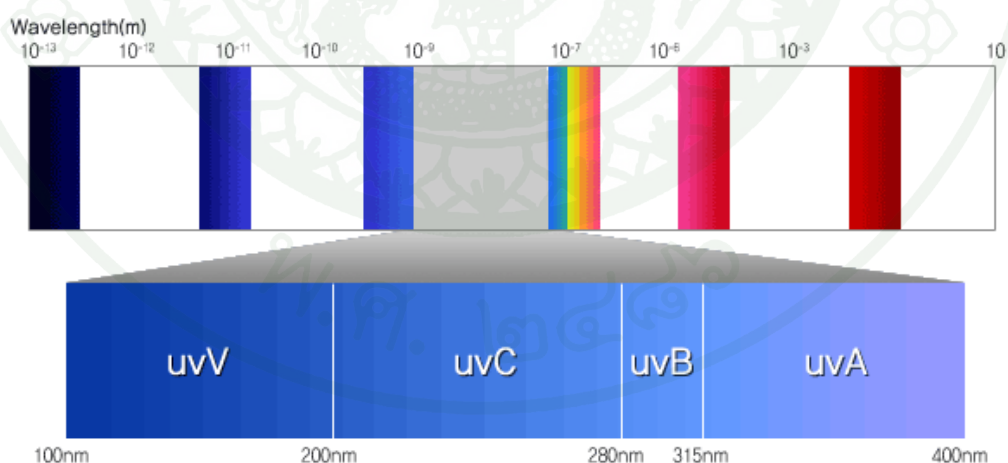
2.1 การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในงานสำหรับการปรับปรุงพื้นผิวพอลิเมอร์

แสงอาทิตย์ที่เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่ให้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ตามมาตรฐานไอเอสโอ (ISO standard; ISO-DIS-21348) สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงของการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ตถูกแบ่งออกได้ดังตารางที่ 1 (Fabio *et al.*, 1994)

ตารางที่ 1 รายละเอียดของแต่ละช่วงของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ชื่อ	อักษรย่อ	ความยาวคลื่น	พลังงานต่อโฟตอน
Ultraviolet A, long wave (black light)	UVA	400 nm–315 nm	3.10–3.94 eV
Near	NUV	400 nm–300 nm	3.10–4.13 eV
Ultraviolet B (medium wave)	UVB	315 nm–280 nm	3.94–4.43 eV
Middle	MUV	300 nm–200 nm	4.13–6.20 eV
Ultraviolet C, short wave (germicidal)	UVC	280 nm–100 nm	4.43–12.4 eV
Far	FUV	200 nm–122 nm	6.20–10.2 eV
Vacuum	VUV	200 nm–100 nm	6.20–12.4 eV
Low	LUV	100 nm–88 nm	12.4–14.1 eV
Super	SUV	150 nm–10 nm	8.28–124 eV
Extreme	EUV	121 nm–10 nm	10.2–124 eV

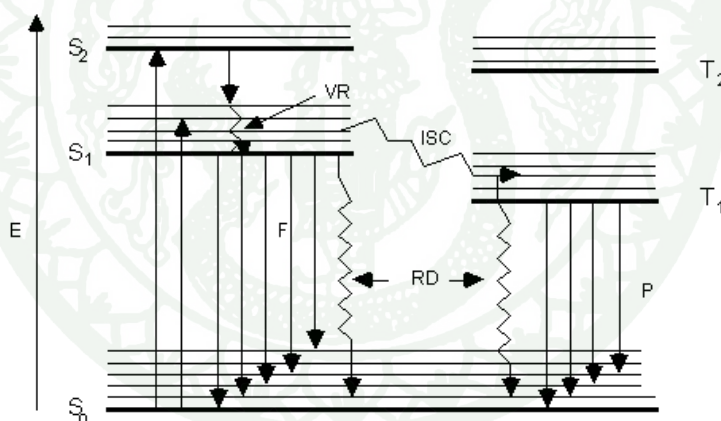
ที่มา: Zeus Industrial Products, Inc (2005)



ภาพที่ 11 ช่วงของอัลตราไวโอเล็ต-เอ (UV-A), อัลตราไวโอเล็ต-บี (UV-B) อัลตราไวโอเล็ต-ซี (UV-C) และอัลตราไวโอเล็ต-วี (UV-V) ที่ปรากฏในสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: บริษัทสาริต เอ.วี.แอล.ซัพพลายส์ จำกัด (2003)

รังสีอัลตราไวโอเล็ตจัดเป็นรีเอเจนต์ (Reagent) ในกลุ่มของตัวริเริ่ม (Initiator) ซึ่งเมื่อพอลิเมอร์ดูดกลืนพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตแล้วจะทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานและออร์บิทัลที่สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 12 ทำให้ระบบนี้ขาดเสถียรภาพ หรืออยู่ในสถานะที่ไม่เสถียร (Unstable state) เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการกระตุ้น (Excitation) ด้วยเหตุนี้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานของสถานะพื้นลำดับที่ต่ำสุด (Ground state, S_0) อาจถูกกระตุ้นไปอยู่ในออร์บิทัลที่มีพลังงานสูงหรือสถานะกระตุ้นลำดับที่หนึ่ง (S_1) ซึ่งเป็นไปได้ที่ทำให้ระดับพลังงานสั้นสะท้อนสูงขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่อิเล็กตรอนหมุน (Spin electron) จะมีลักษณะเป็นคู่ในสถานะเชิงเดี่ยว (Singlet state, S) อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นสามารถเปลี่ยนการหมุนได้ทำให้เกิดระบบการแลกเปลี่ยนข้าม (Inter-system crossing, ISC) ไปอยู่ในสถานะสาม (Triplet state, T) สถานะที่มีพลังงานสูงเหล่านี้ไม่เสถียรและสามารถถูกกระตุ้นได้แต่มีแนวโน้มกลับมายังสถานะพื้นด้วยเส้นทางการเดินต่างๆ กันซึ่งเรียกว่ากระบวนการกายภาพทางแสง (Photophysical processes) เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างถาวรและอาจเรียกว่า กระบวนการเคมีทางแสง (Photo-chemical processes) (Fabio *et al.*, 1994; Grassie and Gerald, 1985)



เมื่อ F คือฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence), P คือฟอสฟอรัสเซนซ์ (Phosphorescence), S คือสถานะเชิงเดี่ยว (Singlet), T (Triplet) คือสถานะสาม, RD (Radiationless deactivation) คือกระบวนการที่ไม่เกิดแสง, VR (Vibrational relaxation) คือกระบวนการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นของการสั่นในลำดับที่สูงกว่าพยายามกลับสู่สถานะพื้นของการสั่น, ISC (Intersystem crossing) คือระบบการแลกเปลี่ยนข้าม และ E (Energy) คือพลังงาน

ภาพที่ 12 การกระตุ้นแสงอัลตราไวโอเล็ตในกระบวนการกายภาพทางแสง

ที่มา: The University of Houston, 2011

2.2 กระบวนการกายภาพทางแสง

อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นสามารถกลับมายังสถานะพื้นได้ 3 แบบคือ การถ่ายโอนพลังงาน (Energy transfer) การแผ่รังสี (Radiation) และความร้อน (Heat)

2.2.1 กระบวนการถ่ายโอนพลังงาน (Energy transfer)

พลังงานของการกระตุ้นสามารถถ่ายโอนไปยังอีกที่หนึ่งได้โดย ก. โมเลกุลภายใน (Intra-molecular) ตามโมเลกุลของพอลิเมอร์เองหรือ ข. ระหว่างโมเลกุล (Inter-molecular) ไปยังโมเลกุลที่อยู่ในพื้นที่เดียวกัน

ก. โมเลกุลภายใน (Intra-molecular)

พลังงานอัลตราไวโอเลตอาจถูกดูดกลืนโดยหมู่โครโมฟอร์ (Chromophoric group) ที่อยู่ในโมเลกุลพอลิเมอร์และเคลื่อนย้ายไปตามโมเลกุลไปยังจุดอื่นที่ไม่สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตได้โดยตรง จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาที่จุดที่สอง

ข. ระหว่างโมเลกุล (Intermolecular)

โดยปกติแล้วโมเลกุลโครโมฟอร์ที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตในระยะเริ่มต้นและถูกกระตุ้นโดยทันทีที่จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานอย่างรวดเร็วไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งเมื่อได้รับปฏิกิริยาสูงสุด (Ultimate reaction) ในบางกรณีสิ่งเจือปนหรือสารปรับแต่งที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตเริ่มแรกจะเกิดการถ่ายโอนไปยังพอลิเมอร์ซึ่งไม่สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตได้เองแต่สามารถกระตุ้นได้ทางอ้อม ดังสมการ (2) และ (3)



2.2.2 การแผ่รังสี (Radiation)

กระบวนการทางกายภาพของแสงจะสิ้นสุดลงด้วยการปล่อยพลังงานในสถานะที่ถูกกระตุ้นที่มีความยาวคลื่นมากกลับไปยังระดับพลังงานที่มีความยาวคลื่นต่ำและเกิด

อันตรายน้อยลง สถานะเชิงเดี่ยวที่ถูกกระตุ้น (S_1) อาจปล่อยพลังงานกลับมามากมายเร็วในเวลา 10^{-9} ถึง 10^{-6} วินาที ซึ่งเรียกว่า ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) ส่วนในสถานะสามที่ถูกกระตุ้น (T_1) อาจปล่อยพลังงานกลับมามาก่อนข้างช้ากว่าคือในเวลา 10^{-3} ถึง 20 วินาที ซึ่งเรียกว่าการสั่นสะเทือนแบบรามาน (Raman vibrations) ของอิเล็กตรอน อะตอม หรือโมเลกุล

2.2.3 ความร้อน (Heat)

พลังงานส่วนมากจะกระจายพลังงานผ่านชั้นของระดับพลังงาน การสั่นสะเทือนเพียงเล็กน้อยและกลายเป็นความร้อน ในบางกรณีพลังงานที่ถูกกระตุ้นอาจทำให้เกิดการจัดเรียงตัวทางโครงสร้างของโมเลกุลแบบทาวโทเมอร์ (Tautomeric) ที่ผันกลับได้ชั่วคราว และในที่สุดจะกลายเป็นความร้อนในขณะที่มีการปล่อยพลังงานที่ถูกกระตุ้นในรูปของพลังงานสั่นสะเทือนและความร้อนที่ไม่ก่อให้เกิดอันตราย วิธีนี้ในบางครั้งอาจมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาสถานะพื้นร้อน (Hot ground-state reaction) ซึ่งจัดเป็นการเสียคุณภาพทางความร้อนแบบธรรมดาจากการเหนี่ยวนำเริ่มต้นด้วยการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต ปฏิกิริยาแบบนี้ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระบวนการทางกายภาพของแสงและกระบวนการทางเคมีของแสงได้ชัดเจน (สมศักดิ์ วรมงคลชัย, 2547)

2.3 ผลกระทบจากการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตบนพื้นผิวพอลิเมอร์

อนุมูลอิสระที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Chemically reactive species) เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการกระตุ้น (Excitation) (Singh and Sharma, 2008) ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้จะเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ของสายโซ่พอลิเมอร์ หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ทำให้มีการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี (Chemical change) อีกปฏิกิริยาหนึ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กันนั้น คือการตัดสายโซ่โมเลกุล (Chain scission) เกิดขึ้นเมื่อสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้รับพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตมากเกินไปพอที่จะทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดออกจากกันได้ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติการกายภาพ (Physical change) กล่าวคือ พื้นผิวที่ได้รับรังสีอาจเกิดผิวที่มีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น หรือในบางกรณีอาจทำให้พื้นผิวเกิดเป็นหลุมหรือเป็นคลื่น ซึ่งนำหน้าโมเลกุลบริเวณที่ได้รับรังสีมีค่าลดต่ำลง ส่งผลต่อความแข็งแรงที่บริเวณพื้นผิว เป็นต้น (Chi-Ming, 1994; Fabio *et al.*, 1994; Singh and Sharma, 2008)

2.4 การสลายพันธะและแหล่งพลังงานของการสลายพันธะ

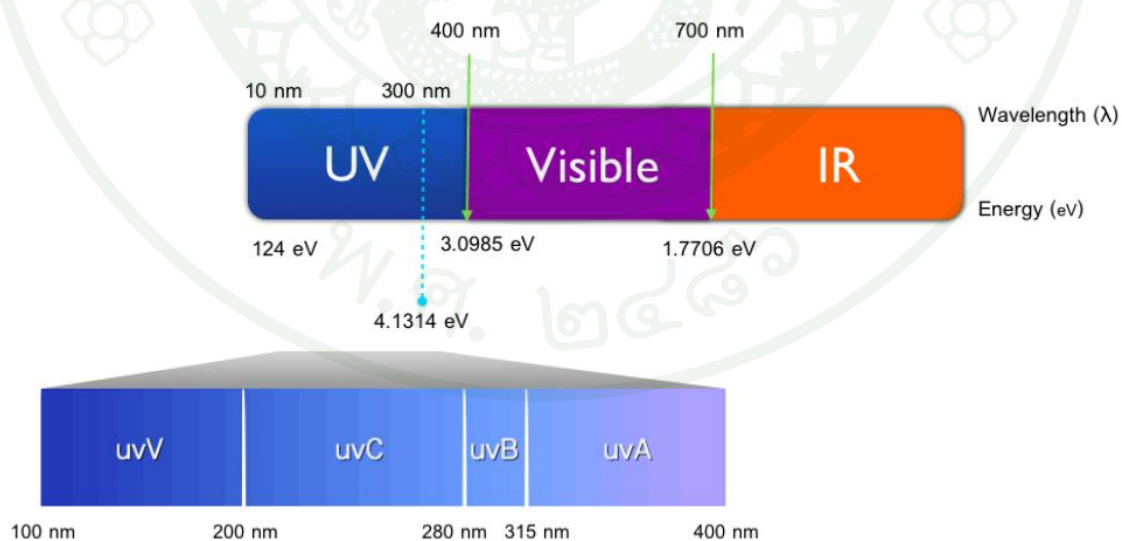
การเชื่อมโยงและการตัดสายโซ่โมเลกุลขึ้นกับตัวแปรต่างๆ เช่น ชนิดของพอลิเมอร์ และเวลาของการฉายรังสี เป็นต้น โดยการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีของการสลายพันธะด้วย จากกฎของโกรทส-ดราเปอร์ (Grothaus-Draper) ได้กล่าวไว้ว่า “โมเลกุลจะดูดกลืนพลังงานโดยแสง พร้อมกับการสร้างกระบวนการฟิสิกส์ทางแสง (Photo-physical process) เกิดการสลายพันธะ (Bond dissociation) หรือการเปลี่ยนแปลงทางกระบวนการเคมีทางแสง (Photo-chemical process) เช่น การเคลื่อนที่โมเลกุลทางแสง (Photo-rearrangement) ซึ่งทั้งหมดจะเกิดขึ้นภายในโมเลกุล” (สมศักดิ์ วรมงคลชัย, 2547; Rabek, 1995) การแตกออกของพันธะ (Break bonding) ระหว่างคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) และคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H) ที่พบในสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ (Landete-Ruiz *et al.*, 2004; Eve and Mohr, 2009) จำเป็นต้องใช้แหล่งพลังงานภายนอก โดยค่าการสลายพันธะทั้งสองแสดงไว้ในตารางที่ 2

อย่างไรก็ตามในแสงอาทิตย์ที่เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่ให้รังสีอัลตราไวโอเลตมีความยาวคลื่นจำกัดอยู่ที่ 300 nm (มีพลังงานเท่ากับ 4.1314 eV) เนื่องจากถูกโอโซน (Ozone) ในชั้นบรรยากาศกรองไว้ดังภาพที่ 13 ดังนั้นแสงอัลตราไวโอเลตตามธรรมชาติจะทำให้พันธะ C-C แตกออกได้เท่านั้น พลังงานในการยึดเกาะของพันธะ C-H ในพอลิเมอร์มีค่าสูงกว่าพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเลตตามธรรมชาติจึงเข้าทำลายพันธะ C-H ได้ช้าหรือทำลายได้น้อย ดังนั้นในงานด้านการปรับปรุงพื้นผิวที่ใช้แสงอัลตราไวโอเลต และการทดสอบการเสื่อมสภาพทางแสงของพอลิเมอร์ จึงจำเป็นต้องใช้แหล่งพลังงานที่ได้จากหลอด (Lamp) หรือเลเซอร์ (Laser) (ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 300 nm) ที่มีพลังงานเพียงพอที่ทำให้เกิดการแตกออกของพันธะ C-C และ C-H ได้พร้อมๆ กัน (Chi-Ming, 1994; Eve and Mohr, 2009; Fabio *et al.*, 1994; Singh and Sharma, 2008)

ตารางที่ 2 พลังงานในการสลายพันธะในพอลิเมอร์

ชนิดของพันธะ (Kind of bond)	พลังงานสลายพันธะโดยเฉลี่ย (Average bond dissociation energy)	
	หน่วย kJ/mol	หน่วย eV
O-O	204	2.11
C-N	305	3.16
C-C	347	3.60
C-O	358	3.71
C-Cl	397	4.11
C-H	413	4.28
O-H	467	4.83
O=O	498	5.16
C=C	607	6.30
C=O	799	8.28
C≡N	937	9.71

ที่มา: สมศักดิ์ วรมงคลชัย (2548)



ภาพที่ 13 รายละเอียดของความยาวคลื่นที่ 300 นาโนเมตรในสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

หลอดอัลตราไวโอเลตที่เคลือบสารปรอท (Mercury ultraviolet lamp) เป็นหลอดประเภทหนึ่งที่ยิยมใช้ในงานปรับปรุงพื้นผิว การทดสอบความเสื่อมสภาพและการทำความสะอาดพื้นผิวพอลิเมอร์ หลอดประเภทนี้สามารถปลดปล่อยพลังงานแสงรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 253.7 nm ซึ่งจัดอยู่ในช่วงของ UV-C ตามตารางที่ 3 พบว่าความยาวคลื่นที่ 253.7 nm ให้พลังงานเท่ากับ 470 kJ/mol (4.87 eV) โดยพลังงานพันธะของ C-H และ C-C มีค่าเท่ากับ 413 kJ/mol (4.28 eV) และ 347 kJ/mol (3.60 eV) ตามลำดับ ซึ่งนับว่ามีพลังงานเพียงพอต่อการแตกขาดของพันธะ C-C และ C-H ได้ (Grassie and Gerald, 1985)

ตารางที่ 3 พลังงานการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ความยาวคลื่น (Wavelength, nm)	พลังงานของความยาวคลื่น (Energy)	
	หน่วย kJ/mol	หน่วย eV
253.7	470	4.87
290	412	4.27
300	398	4.12
320	374	3.87
350	341	3.53
400	299	3.09

ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้เลเซอร์เย็น (Excimer laser) มาปรับปรุงพื้นผิวพอลิเมอร์ โดยเลเซอร์เย็นมีความสามารถในการปลดปล่อยรังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งเดิมใช้ในทางการแพทย์เพื่อรักษาโรคผิวหนังและรักษากระจกตา เลเซอร์เย็นเป็นเลเซอร์ชนิดแสงเลเซอร์เย็น (ไม่ทำให้พื้นผิวที่ถูกเลเซอร์เกิดความร้อนขึ้น) “Excimer” มาจากคำว่า *Excited dimer* หมายถึงการรวมตัวของอะตอมแก๊สเฉื่อย (Inert Gas) เช่น คริปทอน (Kr) อาร์กอน (Ar) หรือซีนอน (Xe) กับธาตุอโลหะ เช่น ฟลูออรีน คลอรีน หรือโบรมีน ในสถานะที่ถูกกระตุ้น (Excited state) เคลื่อนที่ไปในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น เมื่ออะตอมเหล่านี้กลับคืนสู่สถานะปกติ (Ground state) จะปลดปล่อยพลังงานของโฟตอน (Photon) ออกมาในช่วงอัลตราไวโอเลตที่มีพลังงานโฟตอนเพียงพอต่อการตัดขาดสายโซ่พอลิเมอร์และการเชื่อมโยงเพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นบนพื้นผิว ยกตัวอย่างเลเซอร์เย็น เช่น คริปทอนฟลูออไรด์เลเซอร์เย็น (Krypton fluoride, KrF Excimer laser) ให้ความยาวคลื่นที่ 248 nm อาร์กอนฟลูออไรด์เลเซอร์เย็น (Argon-fluoride, ArF Excimer laser) ให้ความยาวคลื่นที่ 193 nm และซีนอนฟลูออไรด์เลเซอร์เย็น (Xenon-fluoride, XeF Excimer laser) ให้ความยาวคลื่นที่ 172 nm โดยข้อดีของการใช้เลเซอร์เย็นคือมีความเสถียรที่ดี (Good stability) และอายุการใช้งานที่นานกว่า (เมื่อเปรียบเทียบกับหลอดอัลตราไวโอเลตที่

เคลือบสารปรอท) แต่เนื่องจากเลเซอร์เย็นสามารถปลดปล่อยออกมาเป็นลักษณะของลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) ดังนั้นในงานด้านการปรับปรุงพื้นผิว ถ้าชิ้นงานมีขนาดใหญ่เกินไป ทำให้การปรับปรุงทำได้ยากและช้า ปัจจุบันด้านการใช้งานจึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก (Rytlewski and Zenkiewicz, 2009)



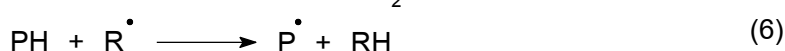
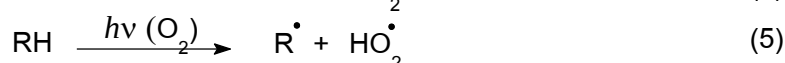
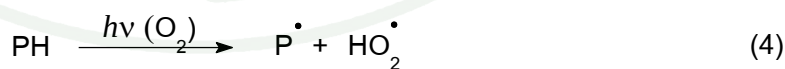
ภาพที่ 14 เครื่องเลเซอร์เย็น (Excimer laser)

ที่มา: ศูนย์รักษาสายตา โรงพยาบาลศิริราช, 2010

2.5 ปฏิกริยาการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยออกซิเจน (Mechanism of photo-oxidative degradation)

2.5.1 ขั้นริเริ่มปฏิกิริยา (Initiation)

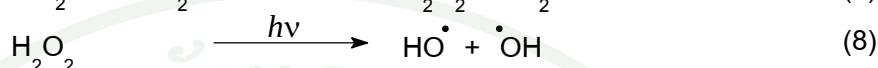
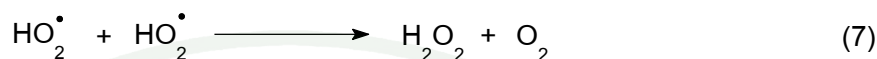
พอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยหมู่โครโมฟอร์ภายในโมเลกุล หรือในระหว่างโมเลกุลมีสารเจือปนที่สามารถดูดกลืนแสงได้ สามารถสร้างอนุมูลอิสระในสภาวะอากาศปกติ (มีออกซิเจนในระบบ) ดังสมการที่ (4), (5) และ (6) ตามลำดับ



เมื่อ $\text{P}^\cdot$ คืออนุมูลอิสระแอลคิล (Alkyl radical)

$\text{HO}_2^\cdot$ คืออนุมูลอิสระไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxy radical)

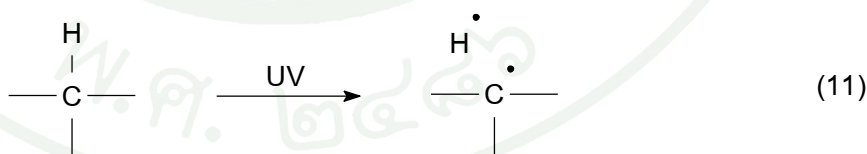
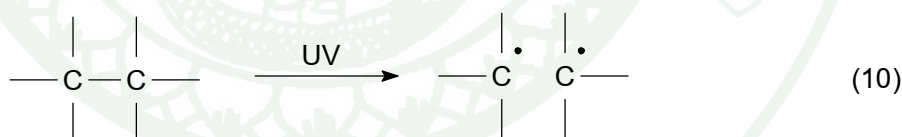
อนุมูลอิสระไฮโดรเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาด้วยตัวเองได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide, H_2O_2) โดย H_2O_2 สามารถเกิดปฏิกิริยาทางแสง (Photolysis) ต่อได้เป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, $\text{HO}^\bullet$) ซึ่ง $\text{HO}^\bullet$ ทำปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ต่อไปเป็นอนุมูลอิสระแอลคิล ดังสมการที่ (7), (8) และ (9) ตามลำดับ



ขั้นนี้เริ่มปฏิกิริยา ยังพบปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการสร้างอนุมูลอิสระดังนี้

ก. ปฏิกิริยาทางแสงของพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) และคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H) ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

พลังงานในการแยกหรือสลายตัวของพันธะ C-C มีค่าเท่ากับ 347 kJ/mol และพันธะ C-H เท่ากับ 413 kJ/mol ซึ่งตรงกับความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลตที่เท่ากับ 344 nm และ 289 nm ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาทางแสงของพันธะ C-C และ C-H สามารถเกิดขึ้นได้และสร้างอนุมูลอิสระจากปฏิกิริยาที่กล่าวไปข้างต้น ซึ่งถือว่าเป็นอนุมูลอิสระเริ่มต้นของการเริ่มเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (10) และ (11)



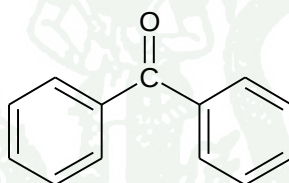
ข. การแตกออกของพันธะของสารว่องไวต่อแสง (Photosensitized cleavage)

สารว่องไวต่อแสง (Photosensitizer) จัดเป็นโมเลกุลที่มีความว่องไวต่อแสงสูงมาก โมเลกุลอยู่ในสภาวะกระตุ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีการฉายแสง ซึ่งสารว่องไวต่อแสงนี้

สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ที่ขาดความสามารถในการกระตุ้นด้วยแสง (Photo-excitation) ดังสมการที่ (12) และ (13)



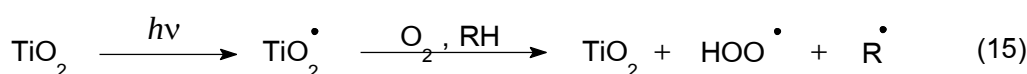
ในเบนโซฟีโนล (Benzophenone) จากภาพที่ 15 พบว่าโครงสร้างมีหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl) ที่ว่องไวและดูดกลืนแสงได้ดี ดังนั้นหากมีการเติมเบนโซฟีโนลลงไปในพอลิเมอร์ ความสามารถในการเกิดออกซิเดชันทางแสงจึงดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเติมสารประเภทนี้ยังขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ด้วย เนื่องจากเบนโซฟีโนลเป็นสารว่องไวต่อแสงที่ดีสำหรับพอลิเอทิลีน (PE) แต่ไม่เหมาะสำหรับพอลิโพรพิลีน (PP)



ภาพที่ 15 โครงสร้างของเบนโซฟีโนล (Benzophenone)

ค. ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

การเติมเกลือโลหะ (Metal salts) บางชนิดลงในพอลิเมอร์ ทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวเร่งในการสร้างอนุมูลอิสระริเริ่มขึ้น ดังสมการที่ (14) และ (15)

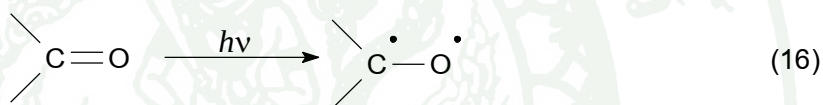


ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จัดว่าเป็นสารว่องไวต่อแสงที่ใช้สำหรับการเสื่อมสภาพของพอลิเอไมด์ (Polyamide) และพอลิโอเลฟิน (Polyolefin) ซึ่งมีความสามารถในการ

การดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 480 nm กระบวนการที่ว่องไวต่อแสง (Photosensitization) สามารถสร้างอนุมูลอิสระที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาได้มากมายหลายแบบ เช่น อะตอมของออกซิเจน $\text{OH}^\cdot$ $\text{OOH}^\cdot$ และ $\text{O}_2^\cdot$

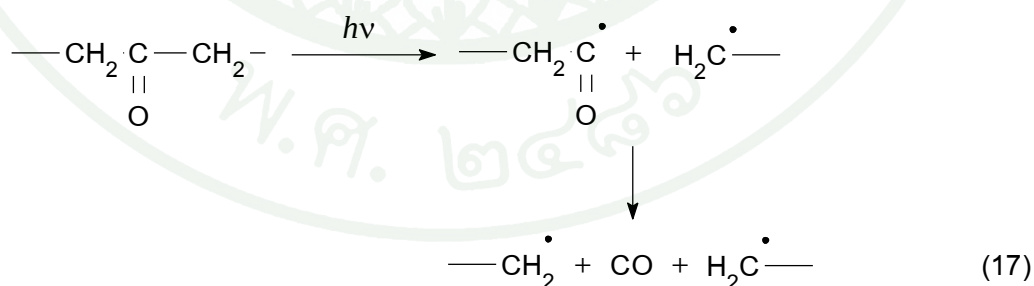
ง. หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl groups)

หมู่คาร์บอนิลที่สร้างขึ้นโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเมอร์ระหว่างการสังเคราะห์หรือระหว่างการผลิตจัดว่าเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อแสง และเป็นแหล่งในการเกิดอนุมูลอิสระริเริ่ม การดูดกลืนแสงโดยหมู่คาร์บอนิลทำให้โมเลกุลเกิดสภาวะที่ไม่เสถียรหรือถูกกระตุ้น ซึ่งพบได้ 2 แบบ คือสถานะเดี่ยว (S^*) และสถานะสาม (T^*) ส่วนใหญ่คาร์บอนิลมีว่องไวต่อปฏิกิริยาในสภาวะ T^* มากกว่าและสร้างตัวเป็นอนุมูลอิสระ 1 คู่ หรือเรียกว่า “Biradical” ดังสมการที่ (16)



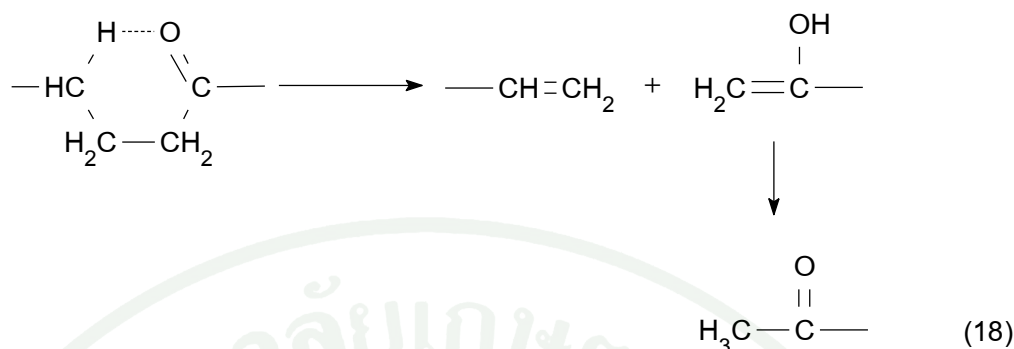
หมู่คาร์บอนิลที่พบในโครงสร้างหลักของพอลิเมอร์หรือเกิดขึ้นภายหลังการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Photo-oxidation degradation) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 1 และแบบที่ 2

ปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 1 (Norrisch Type 1)



ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 1 ได้คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) และ 2 อนุมูลอิสระ ดังสมการที่ (17)

ปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 2 (Norrish Type 2)



ปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 2 เกิดขึ้นภายในสายโซ่ที่เป็นสายโซ่ยาวเท่านั้น การสร้างโครงสร้างวงหกเหลี่ยม (Six-membered cyclic) ทำให้เกิดการแยกกะตอมไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction) จากแกมมา (γ)-คาร์บอน เกิดการสลายพันธะได้เป็นสายโซ่พอลิเมอร์ หมู่ปลายที่ไม่อิ่มตัว และคาร์บอนิล ดังสมการที่ (18)

ในปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 1 และ 2 เกิดขึ้นจาก Excited singlet (S*) หรือ Triplet states (T*) ซึ่งอย่างไรก็ตาม Triplet states มีโอกาสเกิดขึ้นมากกว่า เพราะมี “Lifetime” หรือช่วงที่โมเลกุลอยู่ในสถานะนั้นที่นานกว่าและมีความเสถียรมากกว่า ปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 1 และ 2 เป็นปฏิกิริยาที่เกิดการเสื่อมสภาพทางแสงของอนุพันธ์คีโตน (Ketones) และพอลิเมอร์ที่มีคาร์บอนิลในสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ (Grassie and Gerald, 1985)

จ. หมู่เปอร์ออกไซด์ (Peroxides) หรือหมู่มิอิ่มตัว (Unsaturation)

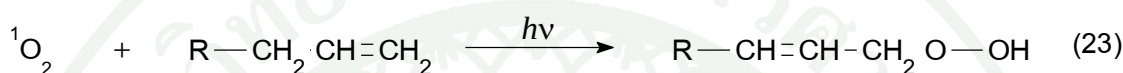
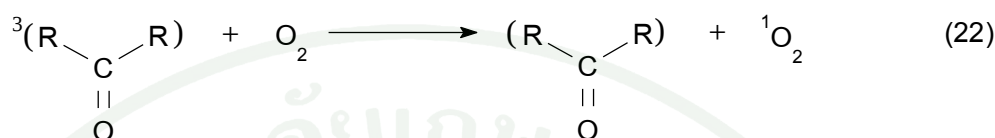
พลังงานจากแสงอาทิตย์มีพลังงานเพียงพอที่ตัดขาดพันธะ PO-OH และ P-OOH ได้ แต่ตัดพันธะ POO-H ได้ยากเนื่องจากต้องใช้พลังงานในการตัดพันธะที่สูงกว่า ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 พลังงานในการสลายพันธะ (Dissociation energy) ของไฮโดรเปอร์ออกไซด์

ชนิดของพันธะไฮโดรเปอร์ออกไซด์	พลังงานในการสลายพันธะ
PO-OH	42 kcal/mol
P-OOH	70 kcal/mol
POO-H	90 kcal/mol

ที่มา: สมศักดิ์ วรมงคลชัย (2548)

แสงสามารถดูดกลืนพลังงานจากแสงอัลตราไวโอเล็ตเข้าไป และเกิดการโอนถ่ายพลังงานจากหมู่ฟังก์ชันที่ถูกกระตุ้นเหล่านี้ ไปยังอะตอมออกซิเจน ทำให้อะตอมต่างๆ ของออกซิเจนที่ถูกกระตุ้นเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไวนิล (Vinyl) หรือหมู่ไม่อิ่มตัวอื่นๆ เกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นหมู่ที่เริ่มเกิดกลไกของการสร้างอนุมูลอิสระเริ่มขึ้น



2.5.2 ขั้นตอนการแพร่ (Propagation step)

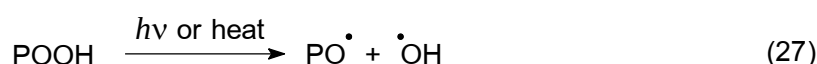
ปฏิกิริยาหลักในขั้นตอนการเตรียม คือการสร้างพอลิเมอร์อนุมูลอิสระเปอร์ออกไซด์ ($\text{POO}^\bullet$) จากอนุมูลอิสระแอลคิล (Alkyl radicals, $\text{P}^\bullet$) ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ดังสมการที่ (25)



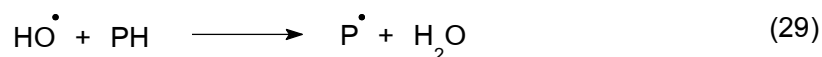
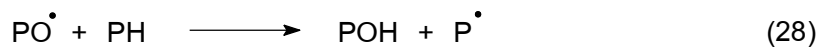
ปฏิกิริยาการแยกอะตอมไฮโดรเจนออกสามารถเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระเปอร์ออกไซด์ ($\text{POO}^\bullet$) ได้อย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งเกิดอนุมูลอิสระแอลคิล ($\text{P}^\bullet$) และไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (POOH) ขึ้นดังสมการที่ (26)



ขั้นตอนการแพร่ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการสลายพันธะหรือปฏิกิริยาทางแสง (Photolysis) ของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (POOH) เพื่อเกิดอนุมูลอิสระขึ้นใหม่ ซึ่งได้แก่ พอลิเมอร์อนุมูลอิสระออกไซด์ ($\text{PO}^\bullet$) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\text{HO}^\bullet$) ดังสมการที่ (27)

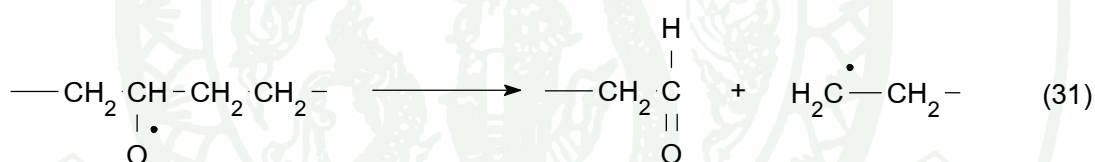
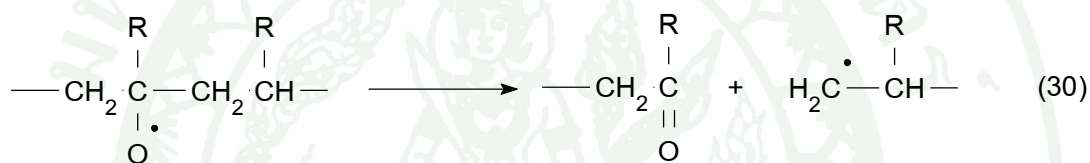


พอลิเมอร์อนุมูลอิสระออกซี ($\text{PO}^\bullet$) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\text{HO}^\bullet$) จะเกิดการแยกเอาอะตอมไฮโดรเจนออกได้ดังสมการที่ (28) และ (29)

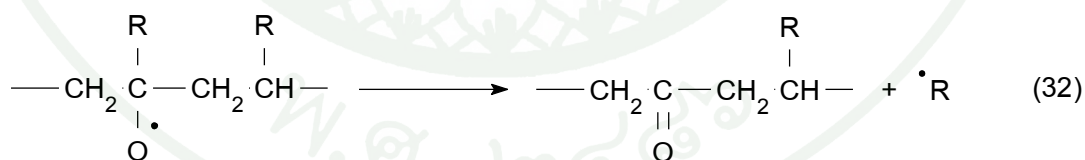


$\text{PO}^\bullet$ ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาอื่นๆ ได้อีก ได้แก่

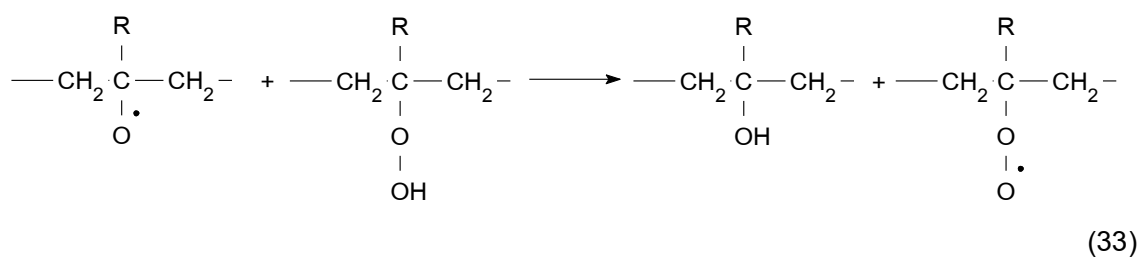
ก. ปฏิกิริยาการตัดสายโซ่แบบเบต้า (β -scission reactions) เป็นการตัดขาดของสายโซ่พร้อมกับการสร้างหมู่คาร์บอนิล ดังสมการที่ (30) หรืออัลดีไฮด์ที่หมู่ปลายและอิสระแอลคิลที่หมู่ปลายเช่นเดียวกัน ดังสมการที่ (31)



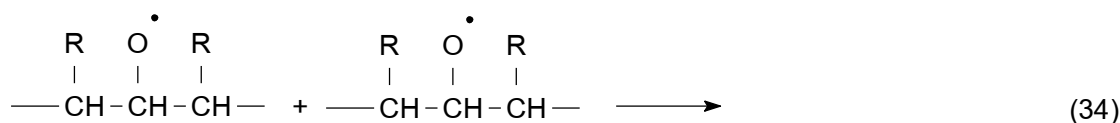
ข. การสร้างหมู่คีโตน (Ketone group) ในสายโซ่



ค. การสลายพันธะไฮโดรเปอร์ออกไซด์



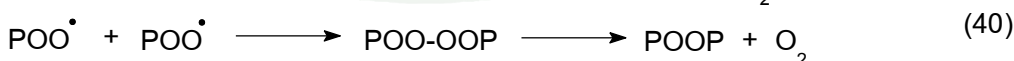
ง. ปฏิกริยาระหว่างอนุมูลอิสระแอลคิล 2 โมเลกุลทำให้ได้หมู่คาร์บอนิลและหมู่ไฮดรอกซิลเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ดังสมการที่ (34)



หมู่คีโตนิก (Ketonic, CO) เป็นหมู่ที่มีความสำคัญในกลไกการเสื่อมสภาพด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเมอร์

2.5.3 ขั้นตอนสิ้นสุด (Termination step)

การสิ้นสุดของปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ ทำโดย “Mopping up” หรือเป็นการทำให้อนุมูลอิสระที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา สร้างผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เสถียร โดยอนุมูลอิสระแอลคิล (Alkyl radicals) อาจรวมตัวกันเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงหรือเป็นกิ่งก้าน (Branch) สายโซ่โมเลกุล ส่วนอนุมูลอิสระเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระอื่นๆ ได้เป็นไดเอลคิลเปอร์ออกไซด์ (Dialkyl peroxides) คาร์บอนิล (Carbonyl) หรือแอลกอฮอล์ (Alcohol) ดังสมการ (35) ถึง (40) ตามลำดับ



กล่าวคือ ในการเกิดปฏิกิริยา Recombination ยังขึ้นกับปัจจัยหลายๆ ด้าน เช่น

ก. ปริมาณของ Radicals ที่เกิดขึ้น (Concentration of radicals)

ข. ผลกระทบของการควบคุมหมู่เกาะ (Effect of steric control) และการเคลื่อนที่ของอนุมูลอิสระในพอลิเมอร์

ค. “Cage effect” เป็นผลกระทบที่ทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของอนุมูลอิสระที่เกิดจากการตัดขาดของสายโซ่ จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) ของพอลิเมอร์ที่ปลายสายโซ่

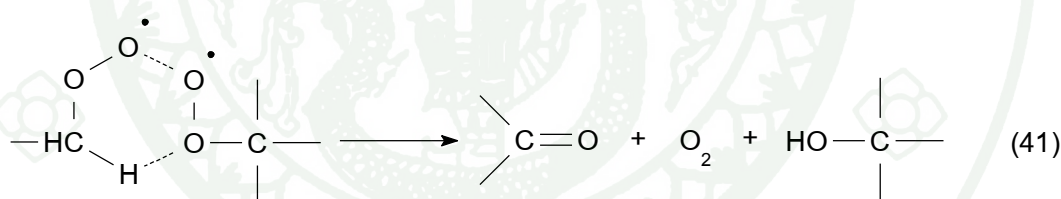
ง. การแพร่ (Diffusion) ของอนุมูลอิสระที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยา

จ. ปริมาตรอิสระ (Free volumes) ของพอลิเมอร์

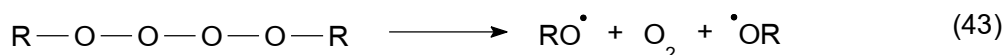
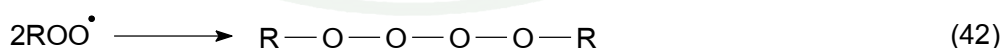
ฉ. การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์

ช. รังสีจากแสง (Light irradiation) ที่เป็นแหล่งพลังงาน

อนุมูลอิสระแอลคิลเปอร์ออกไซด์ (POO[•]) 1 คู่มอเลกุลในขั้นสิ้นสุดของปฏิกิริยามีความเป็นไปได้ในการเกิดวงหกเหลี่ยม (Six-membered) ดังสมการที่ (41)



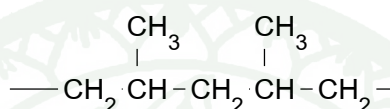
อนุมูลอิสระเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดการรวมตัวกันได้เป็น Tetraoxides ที่ไม่เสถียร ดังสมการที่ (42) และ (43) เกิดการสลายพันธะได้เป็น 2 อนุมูลอิสระแอลค็อกไซด์ (Alkoxy radicals) และโมเลกุลของออกซิเจน



3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นวัสดุพื้น (Substate materials) และวัสดุซ้อนทับ (Overmold materials) รวมถึงกาว (Adhesives) ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)

พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก และมีความสำคัญเป็นอันดับที่สาม เนื่องจากราคาถูก ซึ่งสังเคราะห์ได้จากปิโตรเลียมราคาถูก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ziegler-type



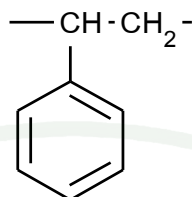
ภาพที่ 16 โครงสร้างเคมีของพอลิโพรพิลีน (Polypropylene)

โครงสร้างเคมีของพอลิโพรพิลีนจากภาพที่ 16 มีความแตกต่างกับพอลิเอทิลีนด้วยการแทนที่ไฮโดรเจนด้วยหมู่เมทิล ($-\text{CH}_3$) ทุกๆ 2 อะตอมของคาร์บอนในโครงสร้างทำให้พอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่อ่อนตัวน้อยลง หมู่เมทิลในโครงสร้างช่วยทำให้เพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ดังนั้นพอลิโพรพิลีนจึงมีจุดหลอมเหลวและจุดทำให้อ่อนตัวสูงกว่าพอลิเอทิลีน จากการใช้ Stereospecific catalysts ทำให้สามารถสังเคราะห์ไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน (Isotactic polypropylene) ซึ่งมีจุดหลอมเหลว $165\text{--}177\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้ ยกตัวอย่างเช่น พอลิโพรพิลีนใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในอุตสาหกรรมมากมาย เนื่องจากมีสมบัติที่เด่นหลายประการ เช่น ทนต่อสารเคมี ไม่ดูดความชื้น ทนความร้อนได้ดี มีความหนาแน่นต่ำ ($0.900\text{--}0.910\text{ g/cm}^3$) ผิวหน้าแข็งและมีรูปร่างเสถียร แต่มีความอ่อนตัวที่โค้งงอได้ โดยทั่วไปแล้ว พอลิโพรพิลีนนิยมนำไปใช้ในการผลิตของใช้ในบ้านและเครื่องใช้ไฟฟ้า ภาชนะบรรจุ อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ ใช้ทำที่บรรจุแบตเตอรี่ ใช้หุ้มกันชน ใบพัด เป็นต้น

3.2 พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) และพอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS)

พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกตัวที่สี่ที่นิยมใช้กันมาก โดยวงอะโรมาติก (Aromatic ring) ในพอลิสไตรีนจัดว่าเป็นหมู่ที่มีความเสถียรและเป็นหมู่แทนที่ที่เกะกะ (Steric hindrance) ส่งผลให้พอลิเมอร์ชนิดนี้ ไม่อ่อนตัวที่อุณหภูมิห้อง มีลักษณะแข็ง (Rigidity) ใสเป็นประกาย แต่มีความเปราะ ดังนั้นถ้าต้องการให้มีความทนทานต่อแรงกระแทกสามารถทำได้โดยผสมกับยางเทียม ซึ่ง

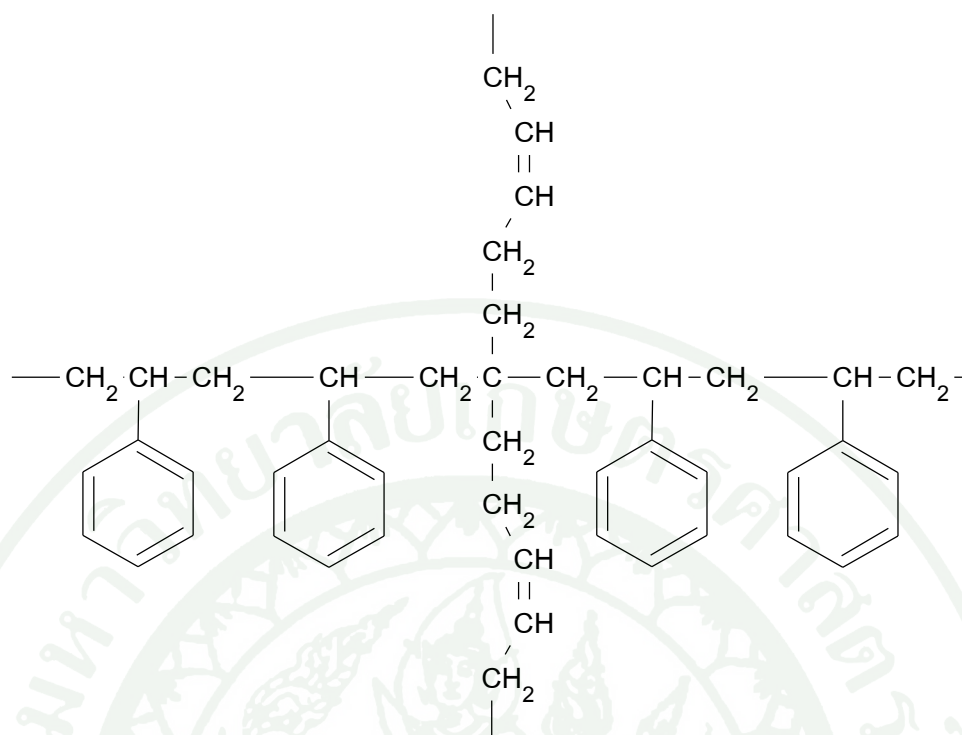
เรียกว่าพอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS) ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของ PS และ HIPS แสดงดังภาพที่ 17 และ 18 ตามลำดับ



ภาพที่ 17 โครงสร้างเคมีของพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS)

นอกจากนี้พอลิสไตรีนยังมีสมบัติเด่นคือ น้ำหนักเบา ทนทานต่อสารเคมีทั่วไป แต่ไม่ทนต่อสารไฮโดรคาร์บอนและตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นฉนวนไฟฟ้า ไม่ดูดความชื้น เกิดไฟฟ้าสถิตได้ง่าย ทำให้ดูดฝุ่นละอองได้ดี ไม่ทนต่อสภาพสิ่งแวดล้อมภายนอก และไม่ทนต่อการถูกขีดข่วน การประยุกต์ของพอลิสไตรีนใช้ทำผลิตภัณฑ์ทั่วไป ได้แก่ ถ้วยจาน แก้วน้ำ ช้อนส้อมที่ใช้แล้วทิ้ง กล่องบรรจุอาหารและผลไม้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ของเล่น ขวดหรือกระป๋องใส่ยา ชิ้นส่วนในตู้เย็น โฟมกันแตกสำหรับบรรจุภัณฑ์และฉนวนความร้อน เป็นต้น

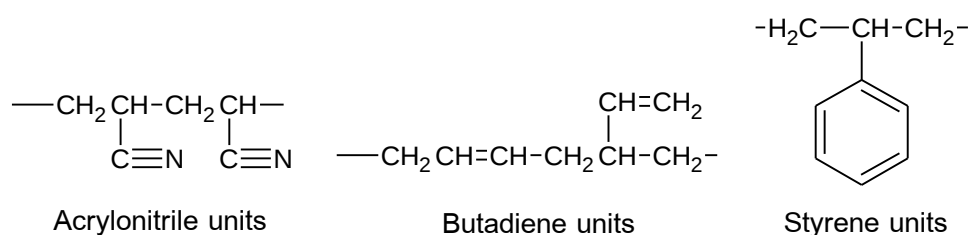
HIPS และ ABS จัดว่าเป็น “Styrenic polymers” หรือพอลิเมอร์ที่มีสไตรีนเป็นองค์ประกอบหลักผสมอยู่ในพอลิเมอร์ชนิดอื่น จากโครงสร้างทางเคมีของ HIPS สายโซ่ของสไตรีนถูกกราฟโคพอลิเมอร์ (Graft-copolymer) ด้วยพอลิบิวทาไดอินที่มีประมาณ 2-8 เปอร์เซ็นต์โมล ส่งผลทำให้มีสมบัติด้านการรับแรงกระแทก (Impact properties) ที่สูงขึ้น วัสดุมีความเหนียวมากขึ้น ไม่แข็งเปราะเมื่อเทียบกับ PS เพียงชนิดเดียว (Francisco *et al.*, 2006)



ภาพที่ 18 โครงสร้างเคมีของพอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS)

3.3 อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS)

อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกวิศวกรรม (Engineering thermoplastic) ได้จากการทำปฏิกิริยาของมอนอเมอร์ 3 ชนิด คือ สไตรีน (Styrene) อะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) และบิวทาไดอีน (Butadiene) ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จากมอนอเมอร์ 3 ชนิดเรียกว่า เทอร์พอลิเมอร์ (Terpolymer) มอนอเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบสังเคราะห์ ABS นั้น มีผลต่อสมบัติของพลาสติก โดยอะคริโลไนไตรล์มีผลต่อสมบัติการทนความร้อนและสารเคมี บิวทาไดอีนมีผลต่อสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) และสไตรีนมีผลทำให้พลาสติกมีพื้นผิวเป็นมันเงา ตัดแต่งวัสดุได้ง่าย และช่วยลดต้นทุน เนื่องจาก ABS เป็นพลาสติกที่ได้จากการนำมอนอเมอร์ 3 ชนิดมาผลิต ดังนั้นผู้ผลิตจึงสามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนของมอนอเมอร์ทั้งสามชนิดเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ ซึ่ง ABS โดยทั่วไปประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ประมาณ 15-30% บิวทาไดอีนประมาณ 5-30% และ สไตรีนประมาณ 45-75% ซึ่งโครงสร้างทางเคมีแสดงได้ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 โครงสร้างทางเคมีของอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS)

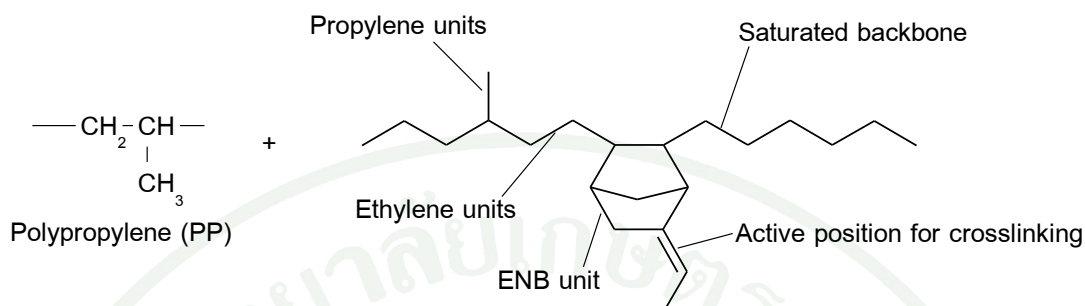
ABS แตกต่างจากพลาสติกทั่วไป เพราะเป็นพลาสติกที่มีความสมดุลทั้งในเรื่องความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Toughness) ซึ่งทำให้พลาสติกมีสมบัติทนแรงกระแทกดี นอกจากนี้ ABS ยังมีสมบัติเด่นเช่น ทนต่อแรงเสียดสี (Abrasion) คงสภาพรูปร่างได้ดี (Dimension stability) ทนความร้อน ทนสารเคมี มีช่วงอุณหภูมิใช้งานกว้าง (ตั้งแต่ -20°C ถึง 80°C) และสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายวิธี การประยุกต์ใช้งาน ABS มีการนำไปใช้มากในอุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมผลิต เครื่องใช้ ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงเครื่องใช้สำนักงาน เป็นต้น

3.4 ซานโตพรีน (Santoprene™, SAN™)

SAN™ เป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer, TPE) ที่ได้จากการผสมกันระหว่างยางเอทิลีน-โพรพิลีน-ไดอีนมอนอเมอร์ (Ethylene propylene diene monomer rubber, EPDM) กับพอลิโพรพิลีน (Polypropylene) ในระยะแรกเริ่มที่ได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ของเอทิลีนและโพรพิลีน ได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐานและมีสมบัติเป็นยาง เรียกว่า EPM แต่เนื่องจากในโมเลกุลของยางชนิดนี้ไม่มีส่วนที่มีพันธะอิมมัตว (ไม่มีพันธะคู่) จึงทำให้ยางมีสมบัติเด่นคือทนทานต่อการเสื่อมสภาพทางแสง ออกซิเจน ความร้อน และโอโซน แต่ข้อเสียหลักของยาง EPM คือไม่สามารถใช้กำมะถันในการคงรูปได้ เพราะไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุลเพื่อเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในเซชัน ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาด้วยการเติมมอนอเมอร์ตัวที่ 3 คือ ไดอีนลงไปเล็กน้อย (3-11% โมล) ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ยางที่ได้มีส่วนที่ไม่อิมมัตวอยู่ในสายโซ่โมเลกุล เรียกว่า EPDM

โครงสร้าง EPDM ประกอบด้วยหน่วยมอนอเมอร์เอทิลีน 45-85% โมล และโพรพิลีนและมีพวกไดอีน (Diene) 3-11% โมล เกาะอยู่ระหว่างสายโซ่หลักเป็นลักษณะสายโซ่

กิ่งก้านสาขา โดยไดอินที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ Ethylidene norbornene (ENB) ซึ่งโครงสร้างทางเคมีแสดงดังภาพที่ 20

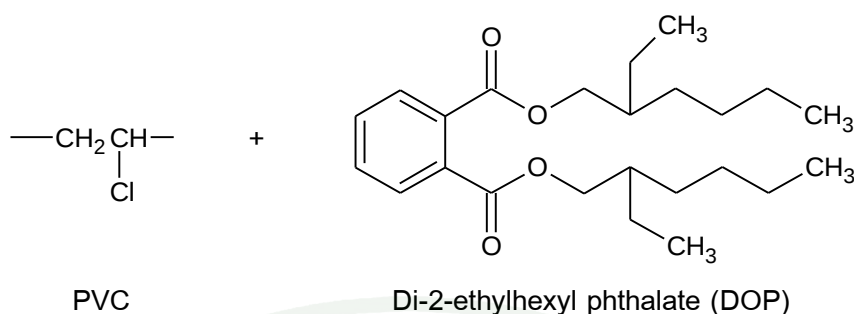


ภาพที่ 20 โครงสร้างทางเคมีของซานโตพรีน (Santoprene™, SAN™)

3.5 พอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดเติมพลาสติกไซเซออร์ (Plasticized polyvinyl chloride, pPVC)

พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ และสามารถนำมารีไซเคิลได้ มีคุณสมบัติเด่นหลายๆ ด้าน เช่น มีความแข็งแรงดี ทนสารเคมีประเภทกรด-ด่างได้ดี ทนต่อไขมันและแอลกอฮอล์ อุณหภูมิในการใช้งานไม่เกิน 80°C มีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี สามารถเติมสารเติมแต่งต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่แข็งและคงตัว จนถึงอ่อนนุ่มและมีความยืดหยุ่นมากๆ ได้เป็นต้น

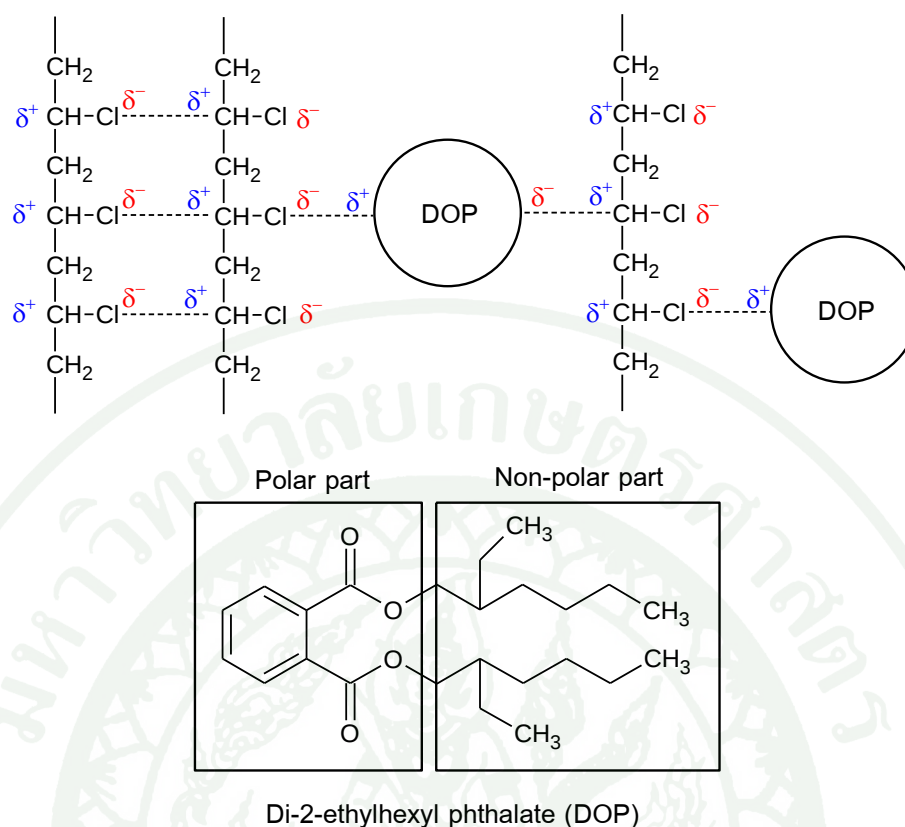
ใน pPVC หน้าทีหลักของพลาสติกไซเซออร์ (Plasticizer) คือเพื่อให้ PVC มีสมบัติที่อ่อนนุ่ม ยืดหยุ่นคล้ายยาง โดยพลาสติกไซเซออร์สามารถเข้าไปแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ใช้พลังงานในการหมุนรอบพันธะของโมเลกุลน้อยลง พลาสติกไซเซออร์ที่เติมใน PVC มีหลายชนิด เช่น DBP (Di-isobutyl phthalate) DOP (Di-2-ethylhexyl phthalate) และ DIDP (Di-isodecyl phthalate) โดย DOP นิยมใช้มากที่สุด



ภาพที่ 21 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลคลอไรด์และพลาสติกไซเซอร Di-2-ethylhexyl phthalate (DOP)

ในโครงสร้างระหว่างสายโซ่ PVC และ PVC ด้วยกันเอง อะตอมของคลอรีนสามารถเหนี่ยวนำและดึงอิเล็กตรอนเข้าหาตัวเอง จึงแสดงความเป็นประจุลบ (Negative charge) ส่งผลให้อะตอมของคาร์บอนที่ตำแหน่งสายโซ่หลัก เกิดเป็นประจุบวก (Positive charge) แรงแยียดเหนี่ยวนำจากโมเลกุลที่มีขั้ว-ไม่มีขั้วระหว่างอะตอมคลอรีนและคาร์บอนจึงเกิดขึ้น หรือเรียกว่าแรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole forces) ในขณะที่ DOP เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ของ PVC ด้านหมู่ปลายที่เป็นสายโซ่คาร์บอนแสดงถึงความไม่มีขั้ว (Non-polar part) จึงเข้าไปเกิดเป็นแรงไดโพล-ไดโพลกับอะตอมของคลอรีน ส่วนด้านที่มีขั้ว (Polar part) ที่เป็นอนุพันธ์ของพาทาเลต (Phthalate) เกิดเป็นแรงไดโพล-ไดโพลเช่นเดียวกันกับอะตอมของคาร์บอน ดังภาพที่ 22

พอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผสมพลาสติกไซเซอรสามารถนำไปประยุกต์ใช้ เช่น เฟอร์นิเจอร์ เบาะรถยนต์ เครื่องหนังเทียม เสื้อฝน รองเท้า กระเป๋า ใช้ทำที่บุหลังการรถยนต์ ทำท่อน้ำ ของใช้ต่างๆ ในบ้าน เป็นต้น (แม่น อมรสิทธิ์และคณะ, 2551; สมศักดิ์ วรมงคลชัย, 2547)

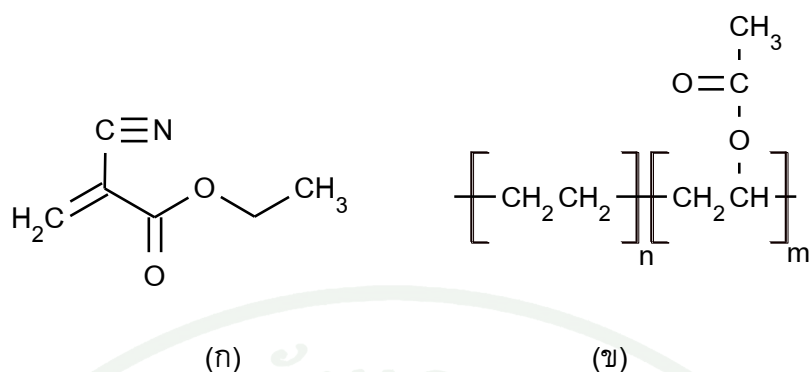


ภาพที่ 22 พันธะระหว่างโมเลกุล (Intermolecular bonds) ระหว่าง DOP และ PVC

ที่มา: PVC Europe (2010)

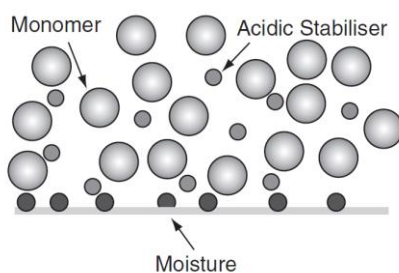
3.6 การเอทิลลีนไวนิลอะซิเตท (Ethylene vinyl acetate, EVA) และการเอทิลไซยาโนอะคริเลต (Ethyl cyanoacrylate, ECA)

กาว EVA จัดเป็นเทอร์โมพลาสติก ที่หาได้ง่าย ราคาถูก และใช้งานทั่วไป เช่น ในอุตสาหกรรมรองเท้า อุตสาหกรรมรถยนต์ รวมถึงในงานก่อสร้าง เป็นต้น การคงรูปของกาวเป็นแบบ “*Physically setting adhesives*” ซึ่งอยู่ในรูปของเหลวหนืดในขณะที่ยึดติดและอยู่ในสถานะของแข็ง (Solid-state) ด้วยกระบวนการทางกายภาพ (Physical processes) เช่น การระเหย (Evaporation) การแข็งตัวจากของเหลว (Solidification of melt) หรือกระบวนการแพร่ผ่าน (Diffusion processes) ซึ่งปราศจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างภายในของกาว (Landete-Ruiz and Martin-Martinez, 2004)



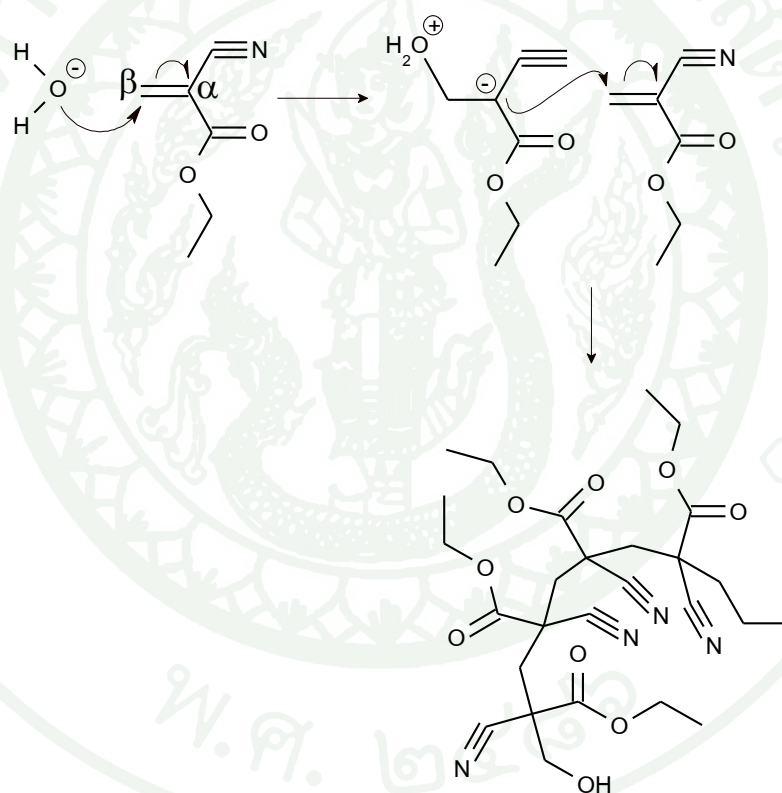
ภาพที่ 23 โครงสร้างทางเคมี (ก) กาวเอทิลไซยาโนอะคริเลต (Ethyl cyanoacrylate) และ (ข) กาวเอทิลลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene vinyl acetate)

ECA เป็นกาวที่รู้จักโดยทั่วไปในชื่อทางการค้า คือ ซูเปอร์กลู หรือ กาวตราช้าง ซึ่งจัดว่าเป็นกาวเทอร์โมพลาสติกที่ไม่มีสี (Colorless) ปราศจากตัวทำละลาย (Solvent-free) และการระเหยของตัวทำละลาย ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ในงานโลหะ (Metals) เซรามิก (Ceramics) งานไม้ (Woods) และเส้นใย (Fabrics) ซึ่งตัวกาวเป็นสารยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย หรือเรียกว่า “*Bacteriostatic*” ดังนั้นในความสามารถดังกล่าว ปัจจุบันจึงได้มีการนำมาใช้งานในทางการแพทย์ (Medicine) ศัลยกรรมพลาสติก (Plastic surgery) และทางทันตกรรม (Dentistry) การบ่ม (Curing) ของกาวเกิดจากปฏิกิริยาแอนไอออนิกพอลิเมอไรเซชัน (Anionic polymerization) ของมอนอเมอร์ ECA ดังภาพที่ 24 โดยหมู่ -CN และ -COO- ที่เกาะตำแหน่งแอลฟาคาร์บอน (Alpha-carbon) เป็นหมู่อิเล็กตรอนหรือที่เรียกว่า “*Electron withdrawing groups*” ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งเบต้าคาร์บอน (Beta-carbon) ลดลง ส่งผลให้ที่ตำแหน่งเบต้าคาร์บอนนี้มีความว่องไวต่อการถูกโจมตี (Attack) ด้วยนิวคลีโอไฟล์ (Nucleophiles) เช่น โมเลกุลของน้ำหรือโมเลกุลของแอลกอฮอล์ (Alcohol) ความชื้นหรือปริมาณนิวคลีโอไฟล์บนพื้นผิวที่ยึดเกาะกับกาว ถือว่าเป็นตัวริเริ่ม (Initiators) เพื่อเร่งให้เกิดปฏิกิริยาแอนไอออนิกพอลิเมอไรเซชันเพราะฉะนั้นจึงต้องมีปริมาณที่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยการคงรูปของกาว ECA จึงจัดว่าเป็น “*Chemically setting adhesives*” หรือโครงสร้างเคมีของกาวเกิดปฏิกิริยา โดยใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมงสำหรับการคงรูปของกาว



ภาพที่ 24 การบ่ม (Curing) ของกาว ECA

ที่มา: Practical Guide to Adhesive Bonding of Small Engineering Plastic and Rubber Parts (2010)



ภาพที่ 25 ปฏิกิริยาแอนไอออนิกพอลิเมอไรเซชัน (Anionic polymerization) ของ ECA

ที่มา: Adams (2005)

ในปัจจุบันกาว ECA ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากความเปราะ (Brittle) ของกาวเมื่อคงรูป จึงมีการเติมยาง 10-15% ลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติทนทานต่อแรงกระแทกได้ดีขึ้น ส่วน

ผสมของกาว ECA ประกอบไปด้วยไซยาโนอะครีเลตมอนอเมอร์ (Cyanoacrylate monomer) 88% สารเพิ่มความเข้มข้น (Thickener) 9% สารเพิ่มการไหลตัว (Rheological additive) 3% และ สารเพิ่มความเสถียรชนิดกรด (Acid stabilizer) 0.02-0.03% การเติมสารเพิ่มความเข้มข้น บางครั้งอาจมากถึง 25% เนื่องจากมอนอเมอร์มีความหนืดต่ำ ทำให้พบปัญหาเรื่องการยิดเกาะ และการย้อยตัวเมื่อหยดกาวในแนวตั้ง (Vertical applications) การแก้ไขปัญหาจึงจำเป็นต้องเติมสารเพิ่มความเข้มข้น เช่น PMMA หรือ PVA สารเพิ่มความเสถียรชนิดกรด เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide) หรือกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) ทำให้ช่วยยับยั้งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยการทำให้เกิดสภาวะเป็นกลาง (Neutralised) ในระบบ แต่การเติมสารเพิ่มความเสถียรชนิดกรดนี้อาจมีข้อเสียคือ อายุการใช้งานของกาวอาจสั้นลง (Adams, 2005; Sina Ebnesajjad, 2008)

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต และใช้หลอด Mercury Ultra-violet Lamp

Mathieson *et al.* (1995) ได้ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวพอลิเอทิลีน (Polyethylene) และ พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyetheretherketone) ด้วยการฉายแสงอัลตราไวโอเลตและใช้แก๊ส โอโซนในกระบวนการออกซิเดชัน (UV/Ozone surface oxidation) พบว่า การสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งได้แก่หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl, C=O), หมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic, COOH), เอสเทอร์ (Ester, COOR) และหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, C-OH) หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำให้ความมีขั้วบนพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความสามารถด้านการยึดติดระหว่างวัสดุพอลิเมอร์และกาวอีพ็อกซี (Epoxy) เพิ่มขึ้นด้วย

Nie *et al.* (1999) ได้ศึกษากระบวนการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตบนพื้นผิวฟิล์มพอลิโพรพิลีน (Polypropylene film) เพื่อเพิ่มสมบัติความเปียก (Wettability) และสมบัติด้านการยึดติด โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้แก๊สโอโซนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย หนึ่งในผลกระทบของปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงที่ตรวจพบ คือพื้นผิวเกิดการสร้างก้อนพอลิเมอร์ขนาดเล็ก หรือ Mounds ซึ่งเป็นส่วนของพอลิเมอร์ที่ถูกออกซิไดซ์และมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Low Molecular Weight Oxidized Material, LMWOM) การเพิ่มขึ้นของเวลาในการฉายรังสีพร้อมทั้งใช้แก๊สโอโซนส่งผลให้พื้นผิวมีพลังงานพื้นผิว (Surface energy) และสมบัติความเปียก (Wettability) เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพด้านการยึดติดของพอลิเมอร์จึงเพิ่มสูงขึ้นด้วย

Kaczmarek H. *et al.* (2002) ได้ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride) ด้วยเทคนิค Low temperature air plasma และเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 253.7 nm ผลการทดลองของการวัดมุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วยเทคนิคทั้ง 2 พบว่า เมื่อจำนวนชั่วโมงของการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น (สูงสุดที่ 6 ชั่วโมง) ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) มีค่าลดต่ำลง สมบัติความเปียกเพิ่มสูงขึ้น และผลการเก็บชิ้นงานภายหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิคพลาสมา พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในสายโซ่ ซึ่งส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แต่สำหรับชิ้นงานที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิคการฉายรังสี UV พบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นได้ในสภาวะบรรยากาศ ซึ่งค่ามุมสัมผัสลดต่ำลงภายหลังการเก็บตัวอย่างที่ 24 ชั่วโมง

Murakami *et al.* (2002) ได้ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) และพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate, PMMA) 3 กระบวนการ คือการใช้แก๊สโอโซน (Ozone) การฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) และการใช้แก๊สโอโซนพร้อมทั้งใช้การฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (Ozone/UV) ผลการทดสอบพบว่าเวลาการใช้แก๊สโอโซนพร้อมทั้งใช้การฉายรังสีอัลตราไวโอเลตเพิ่มขึ้น ค่าการวัดมุมสัมผัสของพอลิสไตรีนมีแนวโน้มลดลง การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องอินฟราเรด (Attenuated Total Reflection Infrared Spectroscopy, ATR-IR) ทำให้ทราบว่าพอลิสไตรีน สามารถเกิดปฏิกิริยาการเปิดวง (Ring Opening) ของวงเบนซีนภายในโครงสร้างบนบริเวณพื้นผิวที่ได้รับรังสีและเกิดการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (OH) และหมู่คาร์บอนิล (C=O) ขึ้นบนพื้นผิวในทางตรงกันข้ามค่ามุมสัมผัสของพอลิเมทิลเมทาคริเลตกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากความขรุขระที่เกิดขึ้นของพื้นผิวเท่านั้น โดยไม่มีอิทธิพลจากการสร้างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

Landete-Ruiz *et al.* (2004) ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตบนโคพอลิเมอร์เอทิลีนไวนิลอะซิเตด (Ethylene vinyl acetate copolymer) เนื่องจากโคพอลิเมอร์เอทิลีนไวนิลอะซิเตดถูกนำไปยึดติดกับวัสดุพื้นอีกชนิดโดยมีตัวประสานเป็นกาว พอลิคลอโรพรีน (Polychloroprene adhesive) ที่ประกอบด้วยพอลิไอโซไซยาเนต 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Polyisocyanate 5 wt%) แต่เนื่องจากสองวัสดุไม่มีความเข้ากันทางกายภาพและทางเคมี ดังนั้นสมบัติด้านการยึดติดจึงต่ำ ทำให้โคพอลิเมอร์เอทิลีนไวนิลอะซิเตดและวัสดุพื้นเกิดการหลุดออก ผลการทดลองพบว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการฉายแสงอัลตราไวโอเลตเป็นเวลา 5 นาที ส่งผลให้สมบัติการยึดติดระหว่างโคพอลิเมอร์เอทิลีนไวนิลอะซิเตดและกาวสูงที่สุด โดยเพิ่มสมบัติความเปียกและพื้นผิวขรุขระมากขึ้น รวมถึงมีการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น หมู่คาร์บอนิลขึ้นบนพื้นผิว แต่การใช้เวลาในการปรับปรุงพื้นผิวที่นานขึ้นทำให้พื้นผิวบางส่วนถูก

ทำลาย (Degradation) และสร้างพื้นผิวที่อ่อนแอ (Weak thin layer) ขึ้นบนพื้นผิว ส่งผลให้ค่าทดสอบความแข็งแรงการยึดติดลดลง

Romero-Sanchez *et al.* (2005) ได้ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวเทอร์โมพลาสติกสไตรีน-บิวทาไดอีนสไตรีน (Styrene Butadiene Styrene, SBS) เพื่อเพิ่มสมบัติด้านการยึดติดกับพอลิยูรีเทน (Polyurethane) ที่เป็นกาว ซึ่งนำไปใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมรองเท้า โดยใช้เทคนิค 3 วิธีคือ ใช้แก๊สโอโซนเพียงอย่างเดียว ใช้รังสี UV เพียงอย่างเดียว และการใช้ทั้งแก๊สโอโซนและรังสีอัลตราไวโอเลต การทดลองพบว่าการใช้แก๊สโอโซนเพียงอย่างเดียวเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับการใช้รังสีอัลตราไวโอเลตเพียงอย่างเดียว หรือการใช้ทั้งแก๊สโอโซนและรังสีอัลตราไวโอเลต ทั้ง 2 ต่างทำให้สมบัติความเปื่อยและความมีขรุขระเพิ่มขึ้น พื้นผิวเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติทางเคมี ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการตัดสายโซ่พอลิเมอร์ และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิว โดยพบว่าพื้นผิวเกิดการสร้างหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, C-OH) และอนุพันธ์ของคาร์บอนิล ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงด้านการยึดติดของสไตรีนบิวทาไดอีนสไตรีนกับกาวเพิ่มขึ้น

Oosterom *et al.* (2006) ได้ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวหลายๆ เทคนิคของพอลิเอทิลีนที่น้ำหนักโมเลกุลสูงมาก (Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) เพื่อนำไปยึดติดกับซีเมนต์กระดูก (Bone cement) ที่ทำจาก PMMA โดยมีตัวประสานคือ เมทิลเมทาคริเลต (Methylmethacrylate) ผลการทดลองพบว่าเทคนิคโคโรนา (Corona treatment) และเทคนิคโกลด์ดิสชาร์จ (Glow discharge) ต่างก็ทำให้ค่ามุมสัมผัสลดลงอย่างรวดเร็วเพียงแค่วันเดียว แต่ UV/Ozone ต้องใช้เวลานานเป็น 10 นาที ผลจากความแข็งแรงการยึดติดพบว่าการขัดเพื่อทำให้พื้นผิวเกิดความขรุขระเป็นเวลา 10 วินาทีและตามด้วยเทคนิคโกลด์ดิสชาร์จอีก 90 วินาทีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านการยึดติดของ UHMWPE/PMMA มากที่สุด

Eve and Mohr (2009) ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิว PMMA ด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต เพื่อนำไปใช้งานทางด้านเลนส์สายตา (Optical lenses) และพอลิเมอร์เส้นใยแก้วนำแสง (Polymer optical fibers, POF) ผลการทดลองพบว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีความเหนียว (Ductility) ลดลง ความเปราะ (Brittle) มากขึ้น ภายหลังการรับรังสี 2 จูลต่อตารางเซนติเมตร (J/cm^2) การปรับปรุงพื้นผิวทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลตทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่ เกิดเป็นพื้นผิวที่ถูกทำลาย (Surface damage) พื้นผิวเกิดความขรุขระ เป็นหลุม และรอยแตก ซึ่งส่งผลให้ค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตลดลง เมื่อเพิ่มการรับรังสีที่มากขึ้น

Daniloska *et al.* (2010) ได้นำข้อดีของการปรับปรุงเฉพาะพื้นผิวของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตมาทำวัสดุที่มีความว่องไวทางชีวภาพ (Bio-activation) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในทางการแพทย์ โดยเลือกใช้ฟิล์มพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ซึ่งมีอะซิโตนฟีโนล (Acetophenone, AcP) เป็นตัวริเริ่มทางแสง (Photo-initiator) และมี 2-aminopyridine (AP) และ Benzocaine (BC) เป็นตัวว่องไวทางชีวภาพ จากผลการทดลองพบว่าภายหลังการฉายรังสี สาร AcP ช่วยทำให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระ พร้อมทั้งให้สาร AP และ BC สามารถเข้าทำการกราฟพอลิเมอร์ (Graft-copolymer) บนพื้นผิว HDPE ได้ พื้นผิวที่ถูกปรับปรุงแล้วทำการตรวจวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง FTIR กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) และเครื่องวัดมุมสัมผัส

Kowalonek J. *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) แพคติน (Pectin) และการผสม (Blends) ของผสมทั้งสองมาทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิค Low temperature air plasma และเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 254 nm พบว่าการใช้เทคนิคพลาสมามีประสิทธิภาพที่ดีกว่าและใช้เวลาน้อยกว่า สมบัติความมีขั้วเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงในการยึดติดกับพื้นผิวที่มีขั้ว เช่น กลีเซอรอล (Glycerol) เพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้การฉายรังสีที่เวลา 5-6 ชั่วโมง แต่ภายหลังการเก็บตัวอย่างที่ 44 วันสำหรับการใช้เทคนิคพลาสมา พบว่าชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงกลับคืนของสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic properties recovery) แต่การฉายรังสี UV มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงมากกว่า ซึ่งในการผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และแพคติน ยังพบว่าสายโซ่พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดสามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจนได้ ซึ่งส่งผลให้เกิดการปกป้องพื้นผิวจากพลาสมาและรังสี UV

การสำรวจงานวิจัยตั้งแต่ปี ค.ศ. 1995 จนถึงปี ค.ศ. 2010 พบว่า พบว่าได้มีการนำหลอดเมอคิวรีไปใช้ประโยชน์ในหลายๆ ด้าน ซึ่งงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการนำเทคนิคการฉายแสงอัลตราไวโอเลต โดยมีหลอดเมอคิวรีเป็นแหล่งพลังงานมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์ต่างชนิดในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมดิง รวมถึงงานด้านการยึดติดด้วยกาว ซึ่งผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงแนวโน้มและความเป็นไปได้ที่น่าไปใช้จริงในภาคอุตสาหกรรม จึงเป็นที่มาของการศึกษาในครั้งนี้

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เครื่องมือ, วัสดุ และอุปกรณ์

1.1 เม็ดพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เกรดการค้าจากบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) (IRPC Public Company Limited)

1.2 เม็ดพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) เกรดการค้าจากบริษัท ทีพีโอ โพลีน จำกัด (มหาชน) (TPI Polene Public Company Limited.)

1.3 เม็ดอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) เกรดการค้าจากบริษัท ทีพีโอ โพลีน จำกัด (มหาชน) (TPI Polene Public Company Limited.)

1.4 เม็ดพอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS) เกรดการค้าจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศ

1.5 เม็ดซานโตพรีน (SantopreneTM, SAN) เกรดการค้าจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศ

1.6 เม็ดพลาสติกไพลด์พีวีซี (Plasticized Polyvinyl Chloride, pPVC) เกรดการค้าจากบริษัท Thai Plastic and Chemicals (TPC)

1.7 กาวเอทิลลีนไวน์อะซิเตท (Ethylene vinyl acetate, EVA)

1.8 กาวเอทิล ไซยาโนอะคริเลต (Ethyl cyanoacrylate, ECA)

1.9 เครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต (UV source reactor) โดยใช้หลอด Mercury Ultraviolet Lamp ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร

1.10 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Machine) (ของบริษัท ARBURG 500-320°C)

1.11 เครื่องตัดชิ้นงาน

1.12 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยอินฟราเรด (Attenuated Total Reflection Infrared Spectroscopy, ATR-IR) ของบริษัท: Bruker Optics รุ่น ALPHA

1.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) รุ่น JSM-6380LV, England

1.14 เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Meter) ของยี่ห้อ Dataphysics OCA 15EC (DataPhysics Instruments GmbH, Germany)

1.15 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine, UTM) รุ่น H50K5 0809, Hounsfield

2. การเตรียมชิ้นงาน (Sample preparation)

วัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับดังแสดงในตารางที่ 5 ถูกเตรียมด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) ดังภาพที่ 26 โดยใช้แม่พิมพ์ในเครื่องฉีดขึ้นรูปดังภาพที่ 27 ซึ่งชิ้นงานมีขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 28



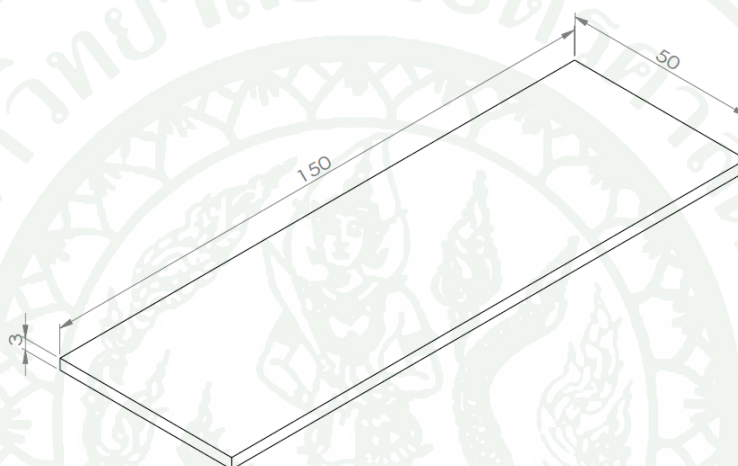
ภาพที่ 26 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) ที่ใช้เตรียมชิ้นงาน



ภาพที่ 27 แม่พิมพ์ (molding)

ตารางที่ 5 วัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุพื้น	วัสดุซ้อนทับ
อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS)	ซานโดพรีน (SAN™)
พอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (HIPS)	
พอลิสไตรีน (PS)	พลาสติกไชด์พีวีซี (pPVC)
พอลิโพรพิลีน (PP)	



ภาพที่ 28 ขนาดของชิ้นงานที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูป (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



ภาพที่ 29 วัสดุพื้นที่ได้เตรียมได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูป

3. การออกแบบระบบการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (UV irradiation system)



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

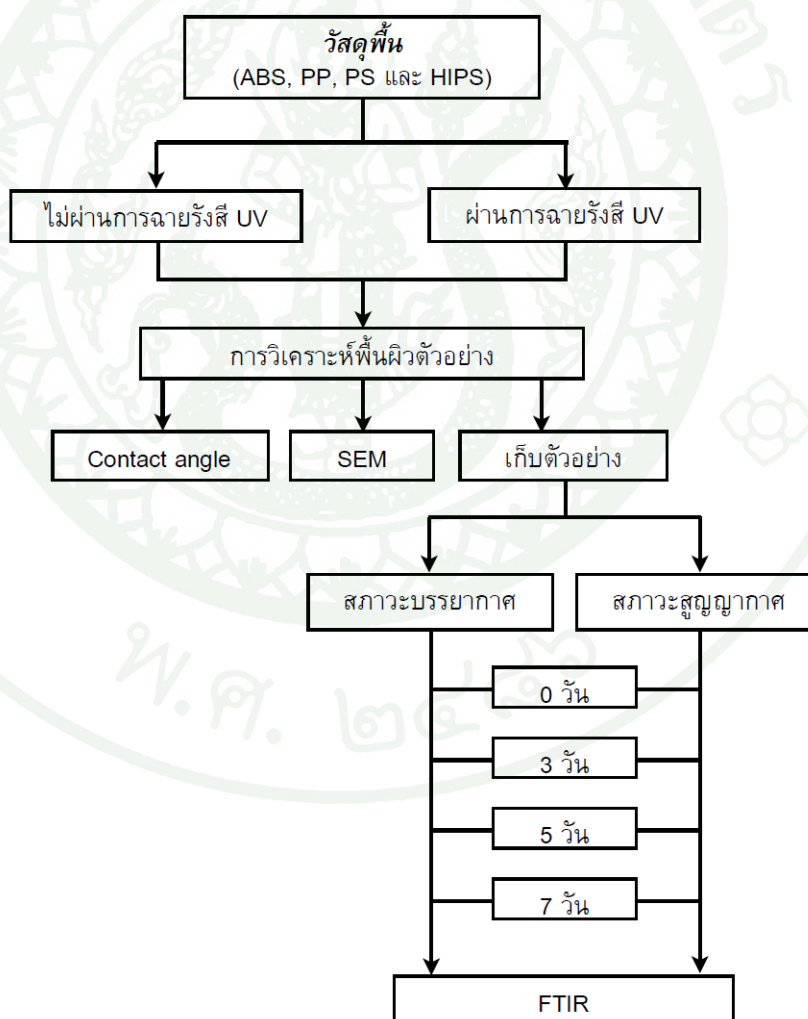
ภาพที่ 30 (ก) เครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต (ข) ด้านหน้าของเครื่อง (ค) ด้านข้างของเครื่อง และ (ง) หลอดเมอคิวรี (Mercury lamp)

เครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต (UV radiation reactor): ตัวอย่างชิ้นงานถูกวางไว้ในเครื่องกำเนิดรังสี UV โดยภายในเครื่องประกอบด้วยหลอดเมอคิวรี (Mercury lamp) จำนวน 6 หลอดที่มีความสามารถในการปลดปล่อยพลังงานที่ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร โดยแต่ละหลอดให้พลังงานเท่ากับ 7.2 วัตต์และระยะห่างระหว่างหลอดเมอคิวรีกับชิ้นงานตัวอย่างเท่ากับ 30 มิลลิเมตร ความร้อนโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นระหว่างการฉายรังสีประมาณ 70°C โดยเครื่องกำเนิดรังสี UV ถูกจัดวางไว้ภายในตู้ที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันอันตรายจากรังสีและสามารถควบคุมให้รังสี UV ปลดปล่อยพลังงานได้อย่างสม่ำเสมอ เท่ากันทุกสภาวะที่ทำการทดสอบ การออกแบบเครื่องกำเนิดรังสี UV ได้มีการอ้างอิงข้อมูลตามมาตรฐาน ASTM G53 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระยะเวลาในการฉายรังสี UV ตั้งแต่ 15 นาที ถึง 4 ชั่วโมง

4. การออกแบบการทดลอง

4.1 ศึกษาผลกระทบของการฉายรังสี UV บนวัสดุพื้น

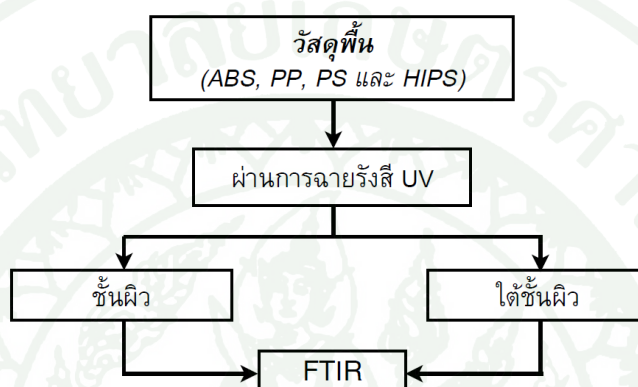
วัสดุพื้นทั้ง 4 ชนิด ก่อนการฉายรังสี และผ่านการฉายรังสี UV ที่จำนวนชั่วโมง (30 นาที, 1 ชั่วโมง, 1 ชั่วโมง 30 นาที, 2 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง 30 นาที, 3 ชั่วโมง, 3 ชั่วโมง 30 นาที และ 4 ชั่วโมง) ชิ้นงานทั้งหมดนำไปตรวจวิเคราะห์พื้นผิวทางกายภาพด้วยเครื่อง SEM และตรวจวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส และมีการเก็บตัวอย่างแยกออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่ สภาวะสุญญากาศ และสภาวะบรรยากาศ โดยการตรวจวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวด้วยเครื่อง FTIR วิเคราะห์ตามระยะเวลาที่ 0 วัน, 3 วัน, 5 วัน และ 7 วันในทั้ง 2 สภาวะ ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ผลกระทบของการฉายรังสี UV บนวัสดุพื้นแสดงดังภาพที่ 31



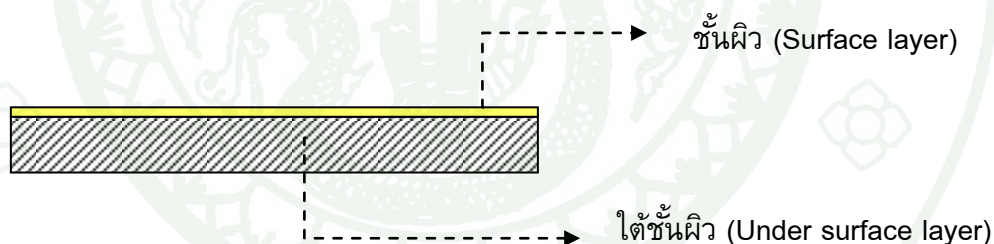
ภาพที่ 31 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลกระทบของการฉายรังสี UV บนวัสดุพื้น

4.2 การวิเคราะห์เนื้อผิวของวัสดุพื้นภายหลังการฉายรังสี UV

การวิเคราะห์เนื้อผิวของวัสดุพื้น ภายหลังการฉายรังสี UV สามารถทำได้โดยใช้ คัตเตอร์ขูดบริเวณชั้นผิว (Surface layer) ออก และใช้เครื่อง FTIR ในการตรวจวิเคราะห์ โครงสร้างทางเคมีของชั้นผิวและใต้ชั้นผิว (Under surface layer) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เนื้อ ผิวแสดงดังภาพที่ 32



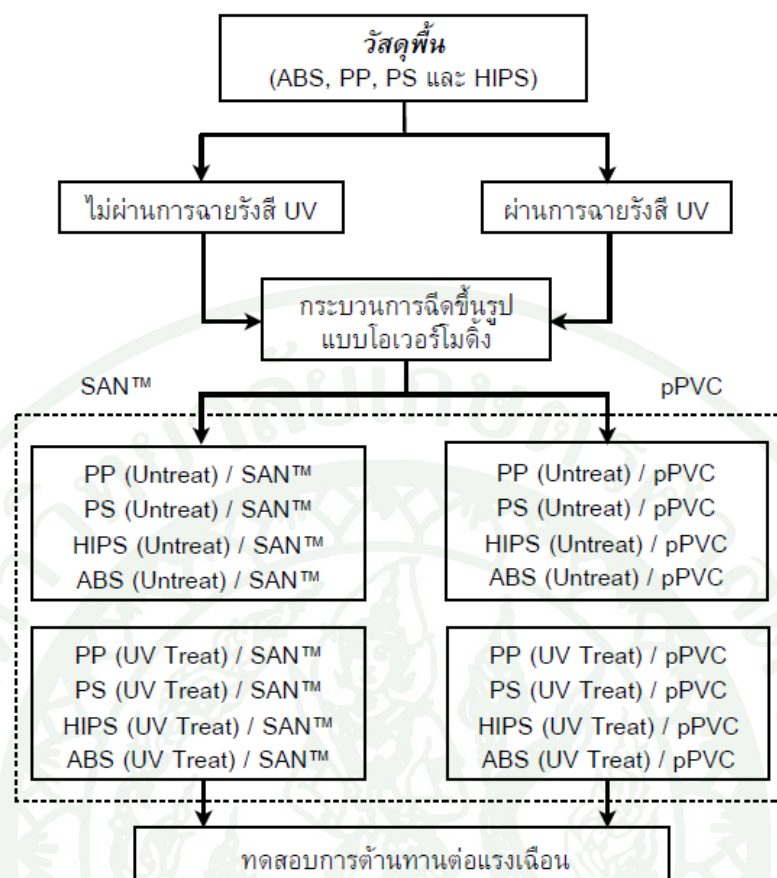
ภาพที่ 32 ขั้นตอนการวิเคราะห์เนื้อผิวของวัสดุพื้นภายหลังการฉายรังสี UV



ภาพที่ 33 ตัวอย่างภาพตัดขวาง (Cross-section) ของชั้นผิวและใต้ชั้นผิว

4.3 ศึกษาความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างระหว่างวัสดุพื้น (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) และวัสดุซ้อนทับในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมดิง

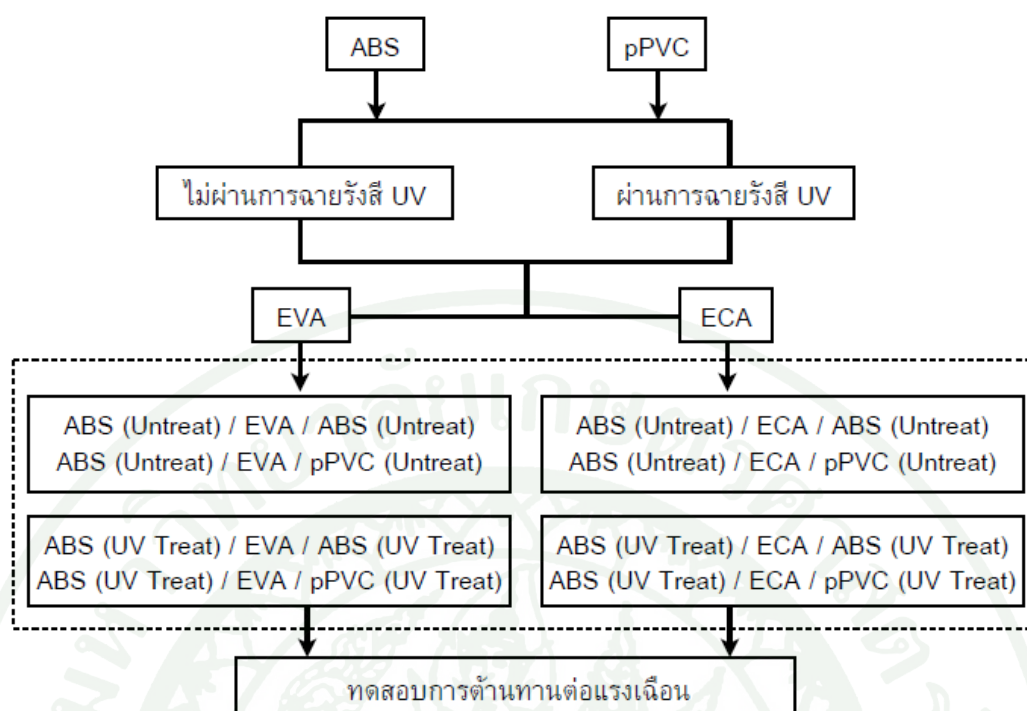
วัสดุพื้น (PP, PS, HIPS และ ABS) ทั้ง 4 ชนิด (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) ถูก นำไปโอเวอร์โมลกับวัสดุซ้อนทับด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมดิงและทดสอบความ แข็งแรงในการยึดติดระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ซึ่งขั้นตอน การวิเคราะห์ แสดงดังภาพ 34



ภาพที่ 34 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างวัสดุพื้น (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) และวัสดุซ้อนทับในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมดิง

4.4 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างคู่ ABS/ABS และ ABS/ pPVC (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยใช้กาว EVA และ ECA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

การศึกษาความเป็นไปได้ในการฉายรังสี UV ในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของ ABS โดยใช้กาว 2 ชนิดเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ได้แก่ กาวเอทิลลีนไวนิลอะซิเตท (Ethylene vinyl acetate, EVA) และกาวเอทิล ไซยาโนอะคริเลต (Ethyl cyanoacrylate, ECA) สามารถทำได้ตามขั้นตอนการวิเคราะห์ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความแข็งแรงของการยึดติดของกลุ่ม ABS/ABS และ ABS/pPVC (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยมีกาว EVA และ ECA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

5. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Instrument analysis)

5.1 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

พื้นผิววัสดุพื้น ก่อนและหลังการฉายรังสี UV และวัสดุซ้อนทับสามารถตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) ดังภาพที่ 36 ชิ้นงานทดสอบถูกวางไว้บนแท่นวางชิ้นงาน โดยพื้นผิวด้านที่ต้องการวิเคราะห์ถูกวางในลักษณะที่คว่ำลง ซึ่งมีแท่นเหล็กกดตัวอย่างไว้ให้แนบกับหัวตรวจวัด (Sensor) ตลอดการตรวจวิเคราะห์ เครื่อง FTIR อยู่ในตู้ที่เป็นระบบปิดและมีซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้นอยู่ด้านในตู้เก็บ เพื่อป้องกันความชื้นที่เข้าไปเกาะบริเวณหัวตรวจวัดและเกิดเป็นคลื่นรบกวนในสเปกตรัม โดยเครื่อง FTIR ทำการยิงรังสีอินฟราเรด (IR) ลงบนชิ้นงานตัวอย่าง แล้ววัดปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorbance) หรือทะลุผ่านออกมา (Transmission) สัมพันธ์กับช่วงความยาวคลื่นของรังสีในช่วงความยาวคลื่น $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ หลักการของการตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้างเคมีของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง FTIR อาศัยการสั่น (ยืดหรือ งอ) ของพันธะที่เชื่อมระหว่างอะตอมต่างๆ ภายในโมเลกุลของสาร เมื่อได้รับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กแอมป์รังสีอินฟราเรด ซึ่งธรรมชาติทางเคมีในโมเลกุลของสารตัวอย่าง สามารถ

ดูดกลืนพลังงานดังกล่าวได้ที่เลขคลื่นต่างๆ กันไป เพราะฉะนั้นในการระบุว่าเป็นสารชนิดใดนั้นสามารถทำได้โดยนำสเปกตรัมของสารที่ทำการวิเคราะห์หรือตัว “Unknown” ไปเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบหรือตัว “Reference” โดยถ้าตำแหน่งเลขคลื่นและจำนวนของสเปกตรัมตรงกัน ทำให้ทราบได้ว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน



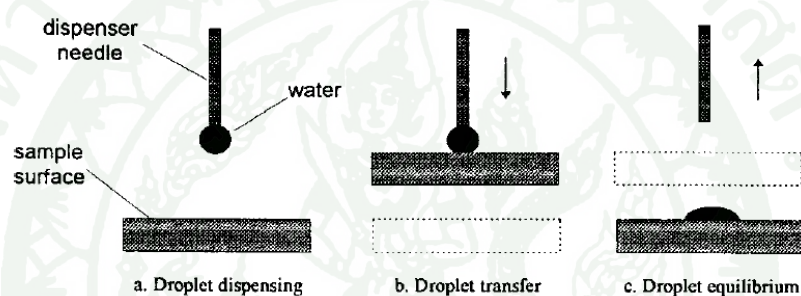
ภาพที่ 36 เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR)

5.2 เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle meter)

ชิ้นงานทดสอบถูกวางไว้บนแท่นวางชิ้นงาน (Stage) โดยพื้นผิวที่ต้องการวิเคราะห์วางในลักษณะหงายขึ้น การทดสอบวัดมุมสัมผัสทำตามมาตรฐาน ASTM D5946-04 ซึ่งได้กำหนดของเหลวที่ใช้หยดควรเป็นน้ำกลั่นบริสุทธิ์ (Deionized water) และเทคนิคการหยดน้ำกลั่นลงบนชิ้นงานทดสอบต้องทำดังภาพที่ 38 โดยเริ่มต้นที่เข็มปลายด้านบนทำการปล่อยหยดน้ำ (Dispenser needle) ด้วยอัตราความเร็ว 1 ไมโครลิตรต่อวินาที ซึ่งระบบการปล่อยหยดน้ำถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้หยดน้ำแต่ละหยดของการทดสอบมีปริมาตรเท่ากัน โดยปริมาตรของหยดน้ำในการทดสอบเท่ากับ 3 ไมโครลิตร ภายหลังการปล่อยหยดน้ำมาที่ปลายเข็ม แท่นวางชิ้นงานจะถูกเลื่อนขึ้นเพื่อนำชิ้นงานไปรับหยดน้ำด้านบน หลังจากนั้นแท่นวางชิ้นงานจึงเคลื่อนที่ลง ณ ตำแหน่งเดิม โปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงทำการคำนวณวัดมุมสัมผัสทั้งสองด้านของหยดน้ำ และนำมาเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งจำนวนครั้งของการทดสอบวัดมุมสัมผัสกำหนดไว้ที่ 10 หยด การรายงานผลการทดลองจึงนำค่ามุมสัมผัสทั้ง 10 ค่ามาเฉลี่ย ได้เป็นค่าค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย (Average contact angle)



ภาพที่ 37 เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle meter)



ภาพที่ 38 ลักษณะการหยดน้ำลงบนพื้นผิวตามมาตรฐาน ASTM D5946-04

5.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคบนพื้นผิวก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตรา-ไวโอเลตสามารถทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ดังภาพที่ 39 ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดถูกนำไปเคลือบทอง (Gold sputter) ก่อนทำการวิเคราะห์ ทั้งนี้เครื่อง SEM ทำการตรวจวิเคราะห์พื้นผิวภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) และกำลังขยาย (Magnification) ในงานวิจัยนี้กำหนดไว้ที่เท่ากับ 15 kV และ 3000x ตามลำดับ



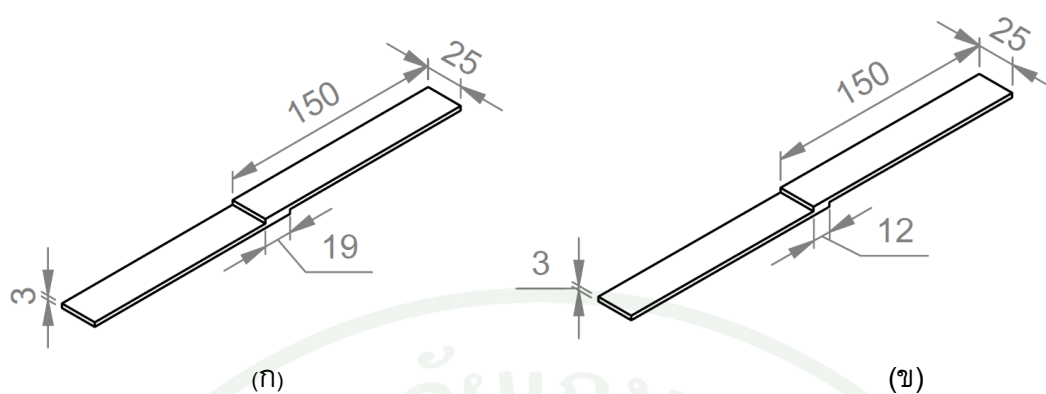
ภาพที่ 39 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

5.4 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (UTM)

การทดสอบความแข็งแรงในการยึดติด (Lap shear tests) ในลักษณะความต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength) ระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับจะใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ของ Hounsfield รุ่น H50K5 0809 ดังภาพที่ 40 โดยภาพที่ 41(ก) แสดงพื้นที่ในการยึดติด (Bond area) ของการโอเวอร์โมลวัสดุพื้นด้วยวัสดุซ้อนทับ (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3163) และภาพที่ 41(ข) แสดงพื้นที่ในการยึดติดของกาว ECA และ EVA (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3164) มีค่าเท่ากับ 19x25 และ 12x25 ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ โดยใช้ความเร็วในการดึงเท่ากันคือ 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที



ภาพที่ 40 เครื่อง Universal testing machine (UTM)

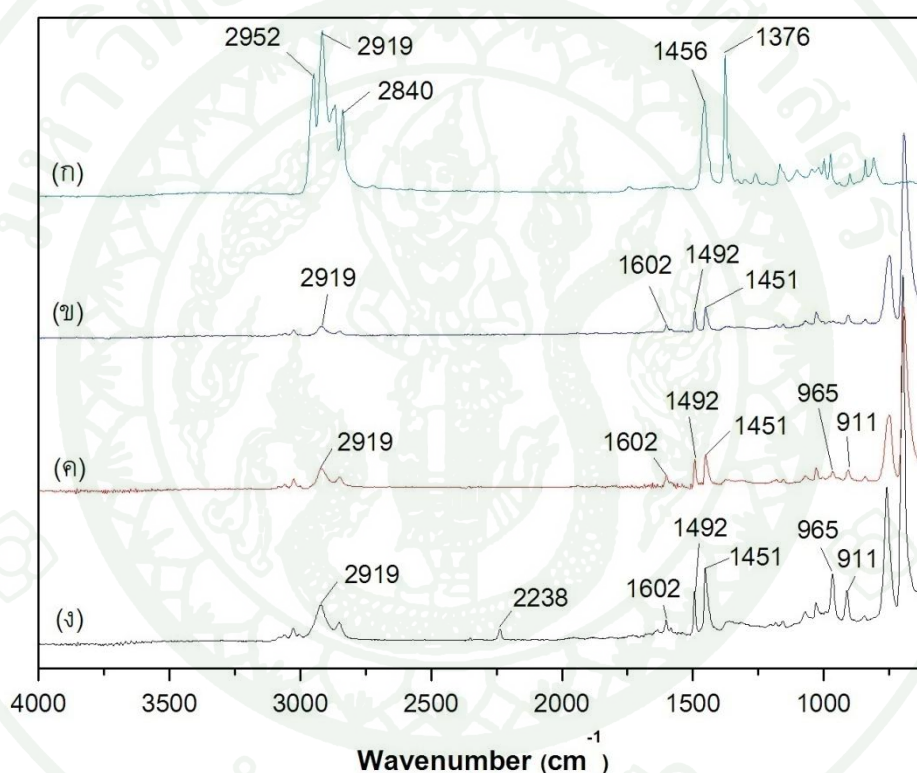


ภาพที่ 41 ขนาดตัวอย่างชิ้นงานและพื้นที่สำหรับการยึดติด (ก) สำหรับการโอเวอร์โมลวัสดุพื้นด้วยวัสดุซ้อนทับและ (ข) สำหรับการยึดติดของกาว ECA และ EVA

ผลและวิจารณ์

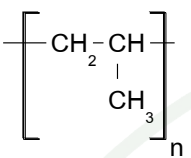
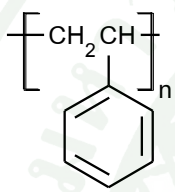
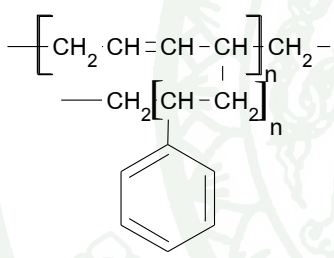
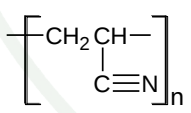
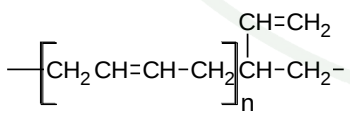
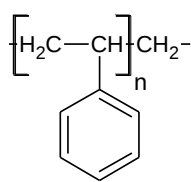
1. การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของวัสดุพื้นด้วย FTIR

การวิเคราะห์พื้นผิวของวัสดุพื้น (ก่อนการฉายรังสี) 4 ชนิด ได้แก่ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP), พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS), พอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS) และอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadienestyrene, ABS) ได้สเปกตรัมดังภาพที่ 42 ซึ่งบ่งชี้ถึงองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญดังตารางที่ 6



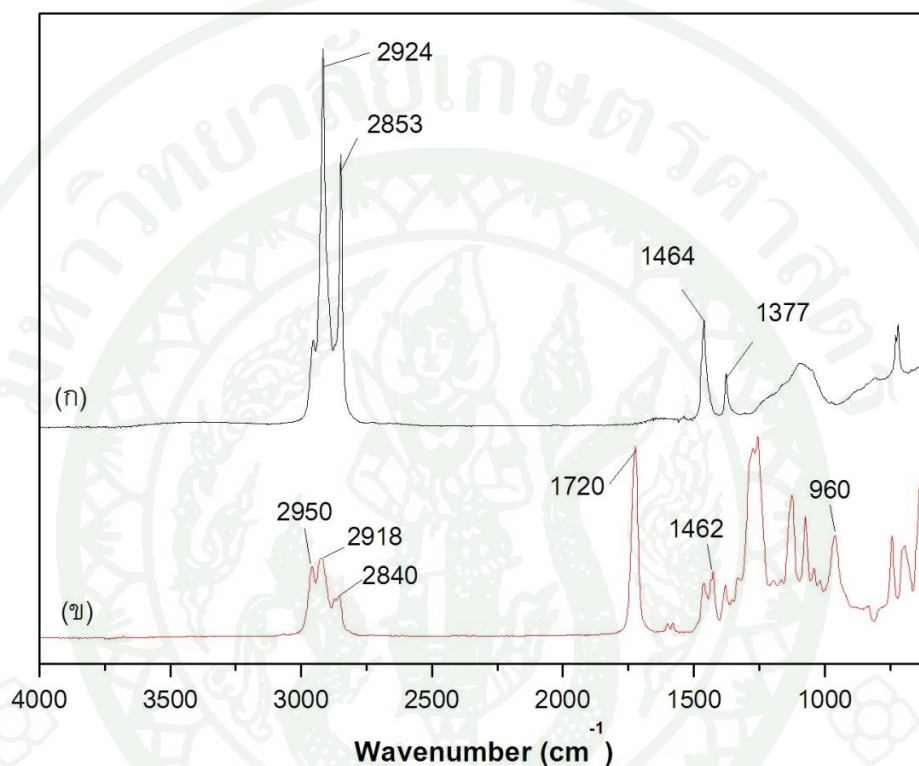
ภาพที่ 42 FTIR สเปกตรัมของวัสดุพื้น (ก่อนการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต); (ก) PP (ข) PS (ค) HIPS และ (ง) ABS

ตารางที่ 6 ตำแหน่งเลขคลื่นและองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของวัสดุพื้นทั้ง 4 ชนิดที่ปรากฏใน FT-IR สเปกตรัม

หน่วยซ้ำ (Repeating unit)	วัสดุพื้น	เลขคลื่น (Wavenumber)	หมู่ฟังก์ชันทางเคมี
	PP	2952, 2919 และ 2840 cm ⁻¹ 1456 cm ⁻¹ 1376 cm ⁻¹	Asymmetric และ Symmetric ของ C-H Stretching vibrations -CH ₃ Asymmetric deformation -CH ₃ Symmetric deformation
	PS	3000-2800 cm ⁻¹ 1602 cm ⁻¹ 1492, 1451 cm ⁻¹	CH ₂ Stretching vibrations C=C ในวงอะโรมาติก C-C ในวงเบนซีน
	HIPS	3000-2800 cm ⁻¹ 1602 cm ⁻¹ 1492, 1451 cm ⁻¹ 965 cm ⁻¹ 911 cm ⁻¹	CH ₂ Stretching vibrations C=C ในวงอะโรเมติก C-C ในวงอะโรเมติก พันธะคู่ในทราน (Trans)-1,4 บิวทาไดอีน พันธะคู่ในไวนิล 1,2 บิวทาไดอีน
 Acrylonitrile units	ABS	3000-2800 cm ⁻¹ 2238 cm ⁻¹	CH ₂ Stretching vibrations หมู่ไนไตรล์ (-C≡N)
 Butadiene units		1602 cm ⁻¹ 1492, 1451 cm ⁻¹	C=C ในวงอะโรเมติก C-C ในวงอะโรเมติก
 Styrene units		965 cm ⁻¹ 911 cm ⁻¹	พันธะคู่ในทราน (Trans)-1,4 บิวทาไดอีน พันธะคู่ในไวนิล 1,2 บิวทาไดอีน

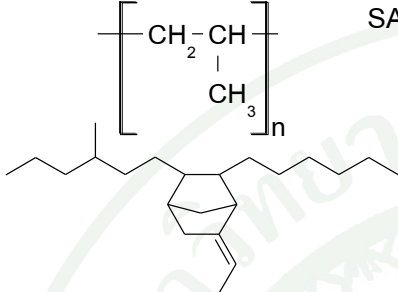
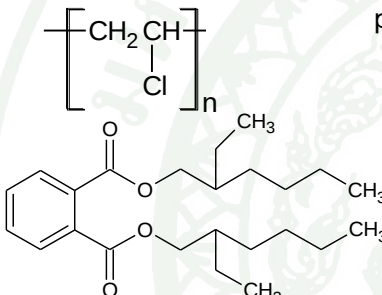
2. การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของวัสดุชั้นหุ้มด้วย FTIR

การวิเคราะห์พื้นผิวของวัสดุชั้นหุ้ม (ก่อนการฉายรังสี) 2 ชนิด ได้แก่ ซานโตพรีน (SantopreneTM, SAN) และพลาสติกไคลด์พีวีซี (Plasticized polyvinyl chloride, pPVC) ได้ สเปกตรัมดังภาพที่ 43 ซึ่งบ่งชี้ถึงองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญดังตารางที่ 7



ภาพที่ 43 FTIR สเปกตรัมของวัสดุชั้นหุ้ม (ก่อนการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต); (ก) SANTM และ (ข) pPVC

ตารางที่ 7 ตำแหน่งเลขคลื่นและองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของวัสดุชั้นที่ปรากฏใน FT-IR สเปกตรัม

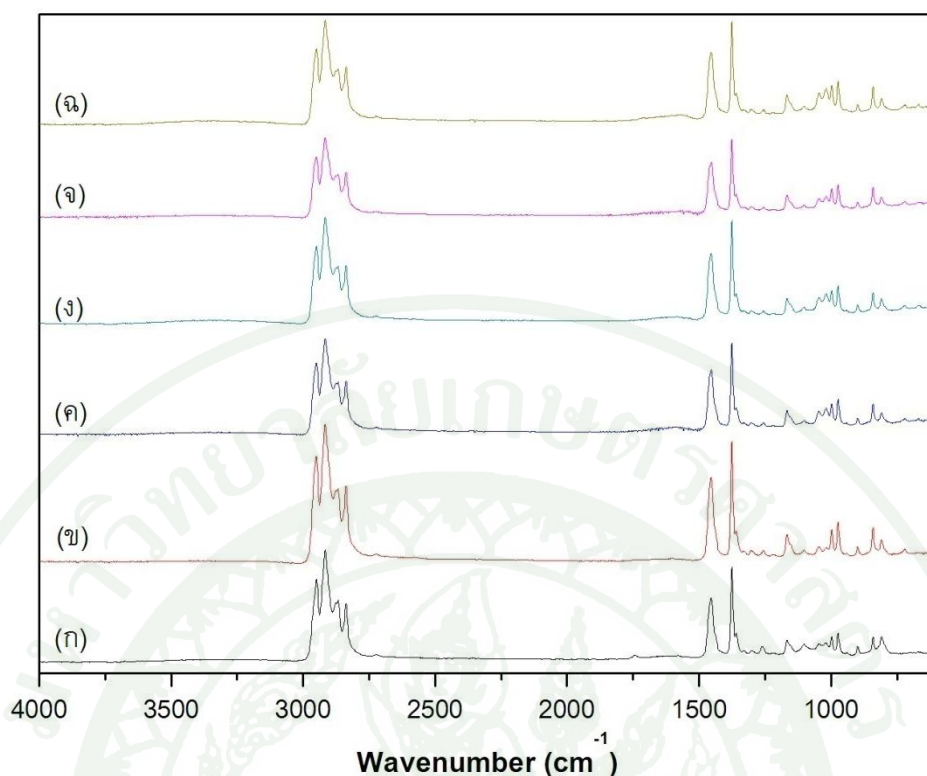
หน่วยซ้ำ (Repeating unit)	วัสดุ ชั้นที่	เลขคลื่น	หมู่ฟังก์ชัน
	SAN™	2924 และ 2853 cm^{-1} 1464 cm^{-1} 1377 cm^{-1}	Asymmetric และ Symmetric ของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H) Stretching vibrations -CH ₂ - scissoring vibration -CH ₃ Symmetric deformation
	pPVC	2930, 2918 และ 2840 cm^{-1} 1720 cm^{-1} 1460, 957 cm^{-1} 700-800 cm^{-1}	CH ₂ Stretching ของสายโซ่หลักพอลิเมอร์ DOP (di-2-ethylhexyl phthalate) C-Cl Stretching vibration

3. ผลกระทบของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตบนวัสดุพื้น

3.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

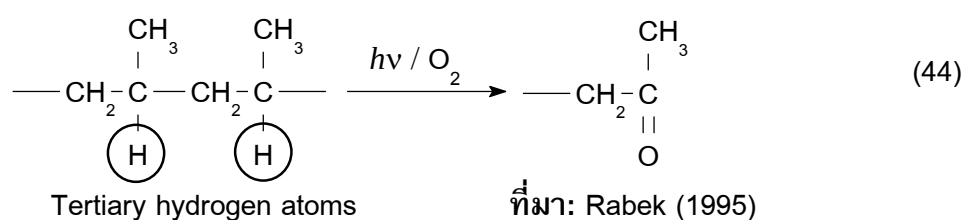
3.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ PP ด้วยเทคนิค FTIR

การวิเคราะห์ผลโครงสร้างทางเคมีก่อนและหลังการฉายรังสี UV บนพื้นผิว PP จากภาพที่ 44 พบว่าเมื่อเวลาในการฉายรังสีเพิ่มสูงขึ้น ฟังก์ชันก่อนและหลังการฉายรังสี ไม่พบการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของ PP ไม่มีหมู่ที่ไวต่อแสง หรือหมู่ที่มีความสามารถในการดูดแสงได้ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงบนพื้นผิว PP จึงเกิดขึ้นได้ยาก



ภาพที่ 44 FTIR สเปกตรัมของ PP (การเก็บตัวอย่าง 5 วัน, สภาวะบรรยากาศ) (ก) ไม่ผ่านการฉายรังสี UV, (ข) ผ่านการฉายรังสี UV 30 นาที (ค) 1 ชม. (ง) 2 ชม. (จ) 3 ชม. และ (ฉ) 4 ชม.

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงพลังงานในการฉายรังสี พบว่าที่ความยาวคลื่น 253.7 nm มีพลังงานเพียงพอในการสลายพันธะ C-H ได้ โดยแนวโน้มในการเสื่อมสภาพทางแสงบนพื้นผิว PP สามารถเริ่มต้นขึ้นจากตำแหน่งอะตอมไฮโดรเจนของคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary C-H atoms) ภายในสายโซ่หลัก ซึ่งเป็นอะตอมที่มีโอกาสเกิดการเสื่อมสภาพทางแสงได้มากที่สุดเนื่องจากมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (High reactive) และใช้พลังงานในการสลายพันธะต่ำ (Rabek, 1995; Grassie and Gerald, 1985) การสร้างเป็นสายโซ่ที่มีอนุมูลอิสระภายหลังการรับพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเลตน่าจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพทางแสงโครงสร้างของหมู่คาร์บอนิลมีแนวโน้มเกิดขึ้นดังสมการ (44)



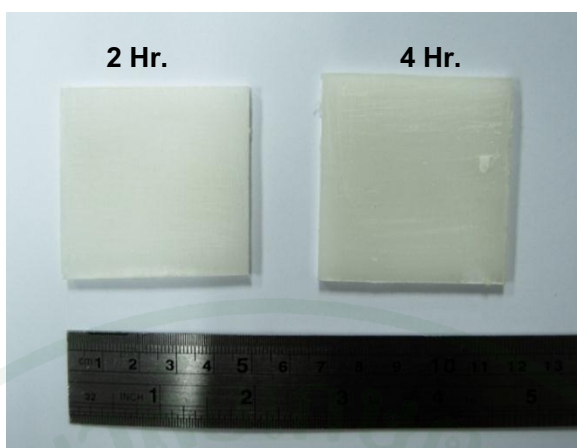
3.1.2 การวิเคราะห์เนื้อผิวของวัสดุพื้นภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต

พื้นผิว PP จากภาพที่ 45 พบว่าเมื่อเวลาการฉายรังสีเพิ่มสูงขึ้น พื้นผิวไม่พบชั้นผิวสีเหลืองที่ชัดเจน เนื่องจากพื้นผิว PP ได้รับผลกระทบจากการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลของ FTIR ดังที่กล่าวไปข้างต้น



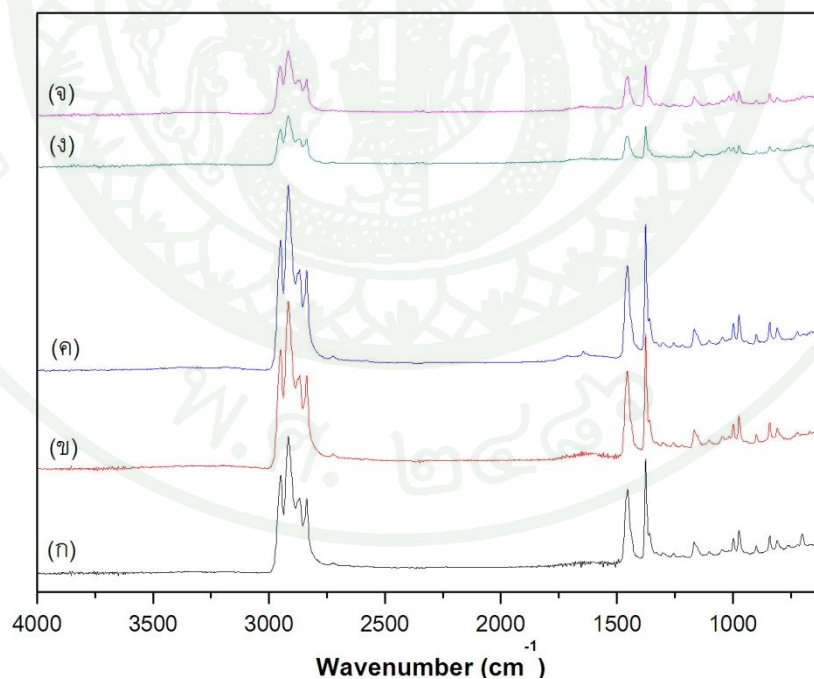
ภาพที่ 45 พื้นผิว PP ก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตตามระยะเวลาที่กำหนด

เมื่อนำกล้องจุลทรรศน์ทางแสง (Optical microscope) มาใช้เพื่อวิเคราะห์หาความลึกที่พื้นผิวพอลิเมอร์ได้รับผลกระทบจากการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้น เนื่องด้วยชั้นผิวสีเหลืองที่ปรากฏภายหลังการฉายรังสี UV มีขนาดบางเกินกว่าที่ความสามารถของกล้องจุลทรรศน์ทางแสงสามารถวิเคราะห์ได้ และข้อจำกัดของกล้องที่มีกำลังขยายต่ำจากภาพที่ 46 จึงได้ทำการขูดเนื้อผิวออกและทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีทั้งหมดของเนื้อผิว รวมถึงได้ชั้นผิวโดยใช้เทคนิค FTIR



ภาพที่ 46 การขูดเนื้อผิวบนพื้นผิว PP ภายหลังจากฉายรังสีอัลตราไวโอเลตตามระยะเวลาที่กำหนด

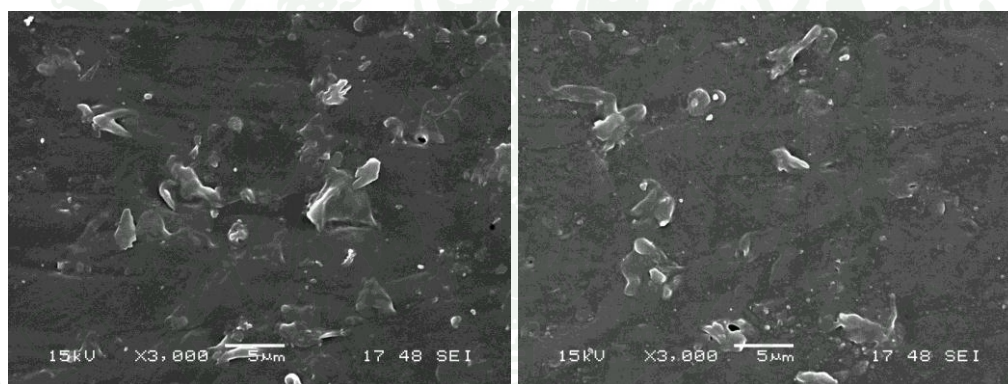
จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงบนพื้นผิว PP ที่เกิดขึ้นได้ยาก ดังที่กล่าวไปข้างต้น จากภาพที่ 47 พบว่าเมื่อการฉายรังสีเพิ่มสูงขึ้น ทั้งเนื้อผิวและส่วนของใต้พื้นผิว PP จึงไม่พบการเปลี่ยนแปลงของ FTIR สเปกตรัม



ภาพที่ 47 FTIR สเปกตรัมบนพื้นผิว PP โดยในสเปกตรัม (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (ข), (ค) คือส่วนเนื้อผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ (ง) และ (จ) คือส่วนของใต้ชั้นผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ

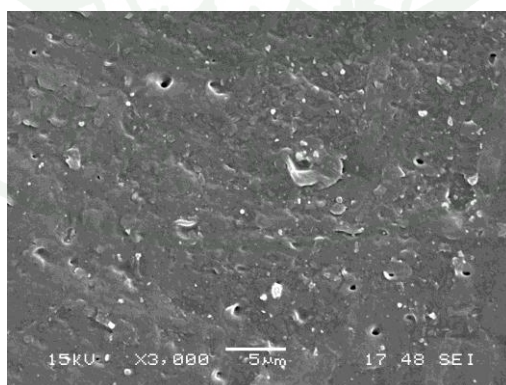
3.1.3 การวิเคราะห์พื้นผิวของ PP ก่อนและหลังการฉายรังสี UV ด้วย SEM

การวิเคราะห์พื้นผิวทางกายภาพด้วยกล้อง SEM พบว่า เมื่อเวลาการฉายรังสีเพิ่มขึ้น จากภาพที่ 48(ค) ที่ 4 ชั่วโมง พื้นผิวมีความขรุขระและดูหยาบขึ้น พร้อมทั้งพบรูพรุน (Micro-pores) ขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วบนพื้นผิว PP ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Martin O. *et al.* (2005) ที่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงพื้นผิวของไอโซเทคติกพอลิโพรพิลีน (Isotactic polypropylene) ด้วยการฉายรังสี UV โดยใช้เครื่อง SEPAP 12.24 irradiation device ที่ประกอบด้วยหลอดเมอร์คิวรีจำนวนทั้งหมด 4 หลอด ที่ชั่วโมงการฉายรังสีแตกต่างกัน พบว่าที่ชั่วโมงการฉายรังสี 240 ชั่วโมงของการทดสอบ นอกเหนือจากการสร้างหมู่ของคาร์บอนิลบนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นตามชั่วโมงของการฉายรังสีแล้ว นอกจากนี้ยังพบว่า ปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพทางแสงสามารถทำให้พื้นผิวเกิดรอยแตก (Surface cracking) ที่ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน



(ก)

(ข)

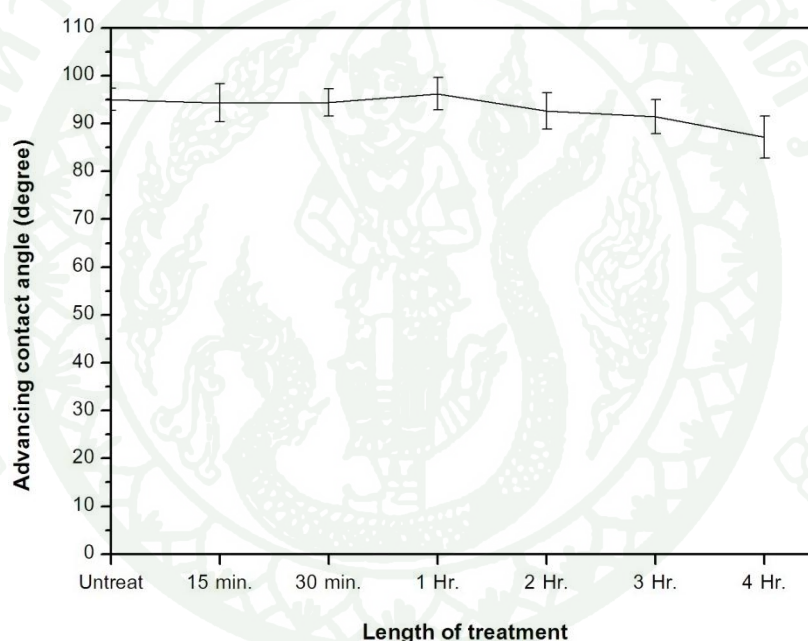


(ค)

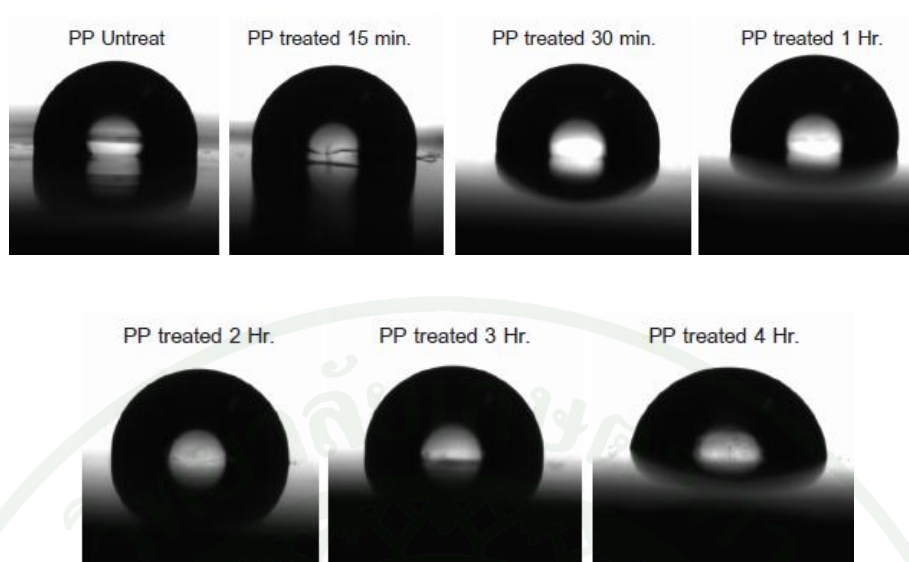
ภาพที่ 48 พื้นผิวของ PP ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (ข) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 2 ชั่วโมงและ (ค) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 4 ชั่วโมง

3.1.4 การวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของ PP ด้วยเครื่อง Contact angle

จากผลการวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของ PP ดังแสดงในภาพที่ 49 พบว่าพื้นผิว PP ก่อนการฉายรังสี UV มีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 95.03 องศา ซึ่งแสดงถึงความไม่มีขั้วของพื้นผิว PP โดยภายหลังการฉายรังสี UV จาก 15 นาทีถึง 1 ชั่วโมง พบว่าไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวที่ชัดเจน ในขณะที่การฉายรังสีที่ 2 ชั่วโมงถึง 4 ชั่วโมง กลับพบว่าค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มลดต่ำลงเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากหมู่คาร์บอนิลที่แสดงถึงความมีขั้วเกิดขึ้นเล็กน้อยบนพื้นผิว PP ผลการทดลองค่ามุมสัมผัสและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิว PP จากภาพที่ 50 แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR



ภาพที่ 49 ค่ามุมสัมผัสเฉื่อย (Advancing contact angle) บนพื้นผิวของ PP

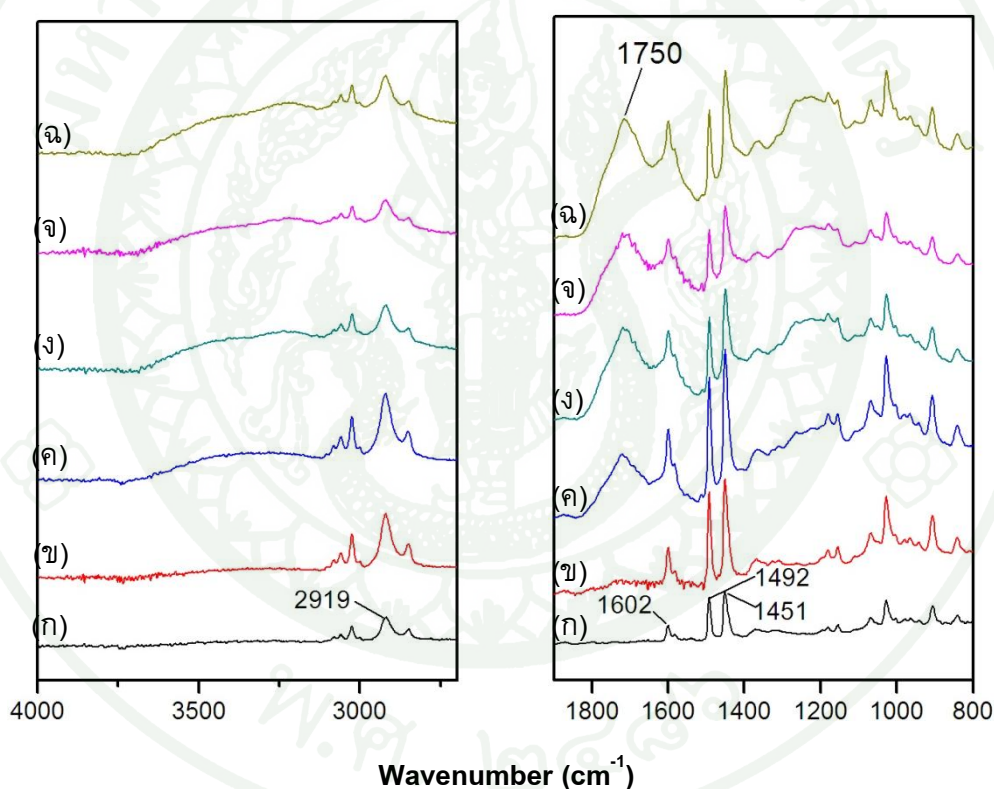


ภาพที่ 50 ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิว PP เมื่อใช้เวลาในการฉายรังสี UV ต่างๆ กัน

3.2 พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS)

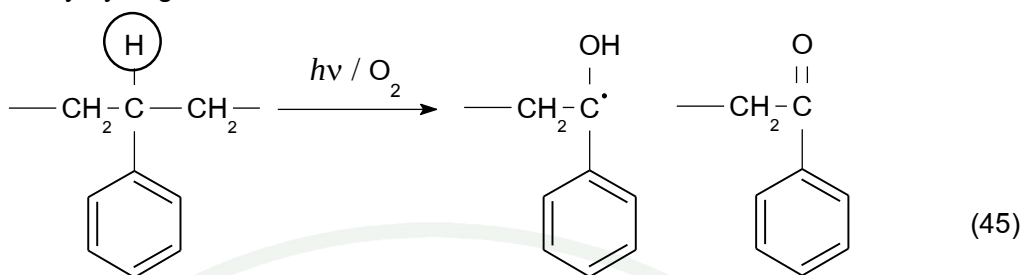
3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ PS ด้วยเทคนิค FTIR

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีก่อนและหลังการฉายรังสี UV บนพื้นผิว PS ดังแสดงในภาพที่ 51 พบว่าเมื่อเวลาการฉายรังสีเพิ่มสูงขึ้น ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 2919 cm^{-1} ของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจนมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง เนื่องจากตำแหน่งอะตอมไฮโดรเจนของคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary C-H atoms) มีความแข็งแรงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเมทิลีน (Methylene, $-\text{CH}_2$) และพันธะของวงอะโรมาติก (Rabek, 1995) เพราะฉะนั้นอะตอมไฮโดรเจนของคาร์บอนตติยภูมิจึงเป็นจุดเริ่มต้นของปฏิกิริยาทางแสง (Photolysis) ใน PS ดังสมการที่ (45)



ภาพที่ 51 FTIR สเปกตรัมของ PS และ (การเก็บตัวอย่าง 5 วัน, สภาวะบรรยากาศ) (ก) ไม่ผ่านการฉายรังสี UV (ข) ผ่านการฉายรังสี UV 30 นาที (ค) 1 ชม. (ง) 2 ชม. (จ) 3 ชม. และ (ฉ) 4 ชม.

Tertiary hydrogen atoms

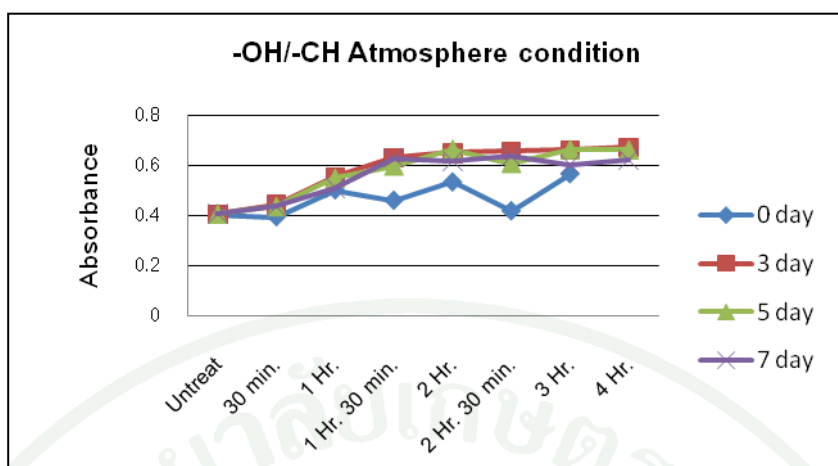


ที่มา: Rabek (1995)

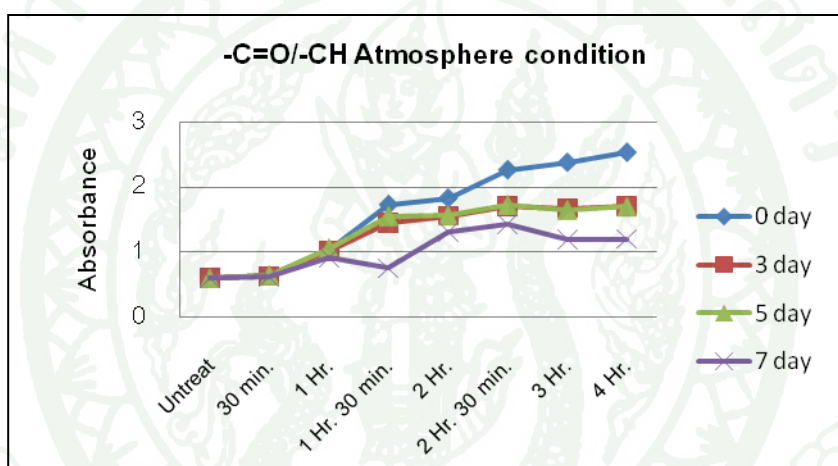
นอกจากนี้จากภาพที่ 51 ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อชั่วโมงการฉายรังสีเพิ่มขึ้น ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมในตำแหน่งเลขคลื่นที่แสดงถึงวงอะโรมาติก ซึ่งเป็นผลมาจากความเสถียร (Stable) ของวงอะโรมาติก แต่เนื่องจากพันธะคู่ในสไตรีนที่เป็นหมู่โครโมฟอร์ ช่วยทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงเพิ่มสูงขึ้น ปฏิริยาออกซิเดชันที่ตำแหน่งอะตอมไฮโดรเจนของคาร์บอนตติยภูมิจึงเกิดขึ้นได้ง่าย (Grassie and Gerald, 1985) ส่งผลให้จากสมการที่ (45) การเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิริยาออกซิเดชัน จึงเกิดการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล โดยปรากฏเป็นแถบกว้าง (Broad band) ในช่วง $3500\text{--}3100\text{ cm}^{-1}$ และหมู่คาร์บอนิลที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1750 cm^{-1} ซึ่งหมู่ทั้ง 2 มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตามชั่วโมงการฉายรังสี

3.2.2 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ -OH/-CH และ -C=O/-CH ของ PS

จากภาพที่ 52(ก) พบว่าเมื่อเวลาการฉายรังสีเพิ่มมากขึ้น การเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศ อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH บนพื้นผิว PS มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นถึงเวลาการฉายรังสีที่ 2 ชั่วโมง จากนั้นค่าจึงเริ่มคงที่ ซึ่งถือว่าเป็นระยะเวลาของการฉายรังสีที่ระบบสร้างอนุมูลอิสระที่เพียงพอต่อการเกิดหมู่ไฮดรอกซิลบนสายโซ่พอลิเมอร์ โดยพบว่าระยะเวลาในการเก็บที่ 0 วัน ที่สภาวะบรรยากาศ อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ -OH ต่อ -CH บนพื้นผิว PS มีค่าต่ำกว่าการเก็บที่ 3, 5 และ 7 วัน เนื่องจากความไม่เสถียรของการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิริยาออกซิเดชัน ซึ่งภายหลังการฉายรังสีที่ระยะเวลาในการเก็บที่ 0 วัน อนุมูลอิสระยังคงหลงเหลืออยู่ในสายโซ่เพื่อรอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์



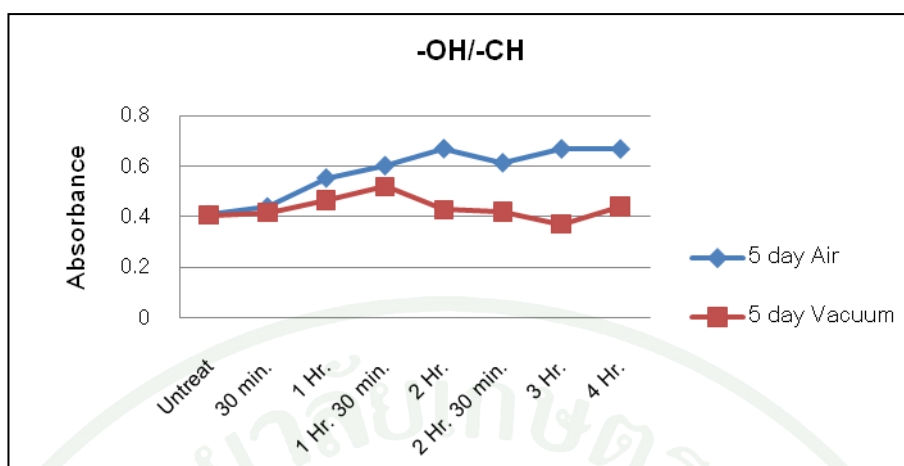
(ก)



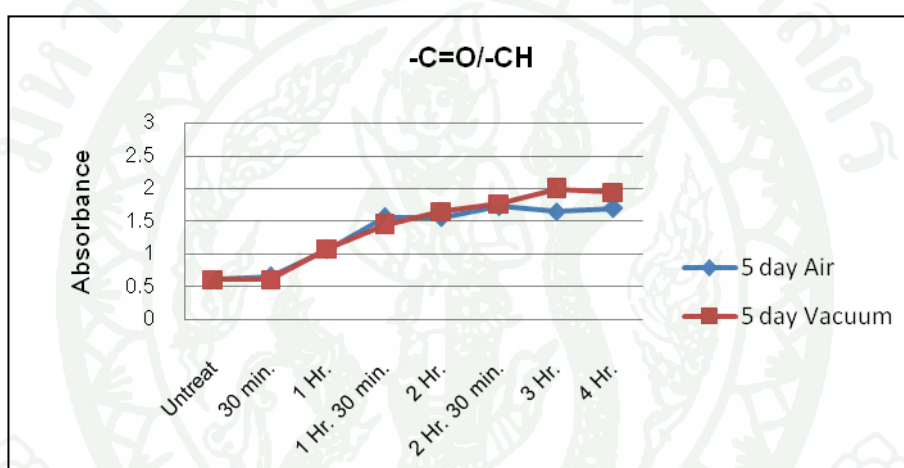
(ข)

ภาพที่ 52 อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (ก) $-\text{OH}/-\text{CH}$ และ (ข) $-\text{C}=\text{O}/-\text{CH}$ ของ PS ในการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศ

ในขณะที่อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง $-\text{C}=\text{O}/-\text{CH}$ จากภาพที่ 52(ข) ที่สภาวะบรรยากาศ การเก็บตัวอย่างที่ 3 และ 5 วัน พบว่าค่าเริ่มคงที่ที่ 2 ชั่วโมงเช่นเดียวกัน อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง $-\text{OH}/-\text{CH}$ ซึ่งอย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิล แสดงถึงการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงเลขคลื่นของตำแหน่งพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน ($-\text{CH}$) เนื่องจากเกิดการตัดขาดของสายโซ่ที่ตำแหน่งอะตอมไฮโดรเจนของคาร์บอนตติยภูมิและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้เป็นหมู่ที่มีขั้วเกิดขึ้นบนพื้นผิว



(ก)

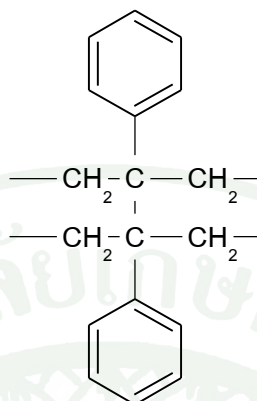


(ข)

ภาพที่ 53 การเปรียบเทียบอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ (ก) $-OH/-CH$ และ (ข) $-C=O/-CH$ ของ PS ที่ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง 5 วัน ทั้งการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศและสภาวะสุญญากาศ

จากภาพที่ 53(ก) เมื่อนำข้อมูลระยะการเก็บตัวอย่างที่ 5 วันนำมาพิจารณา พบว่าเมื่อจำนวนชั่วโมงของการฉายรังสีเพิ่มขึ้นที่สภาวะบรรยากาศ อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง $-OH/-CH$ บนพื้นผิว PS มีแนวโน้มที่สูงกว่าสภาวะสุญญากาศ เนื่องจากอนุมูลอิสระที่หลงเหลืออยู่ในสายโซ่พอลิเมอร์ภายหลังจากการฉายรังสี UV ยังคงมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้ การเก็บตัวอย่างในสภาวะบรรยากาศ จึงช่วยให้อนุมูลอิสระเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและสร้างหมู่ไฮดรอกซิลได้จนถึงจุดอิ่มตัวหรือไม่เหลืออนุมูลอิสระในสายโซ่พอลิเมอร์อีก ในทางตรงกันข้ามการเก็บตัวอย่างที่สภาวะสุญญากาศ พื้นผิวมีการสัมผัสกับอากาศได้น้อย ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระที่หลงเหลือในสายโซ่พอลิเมอร์จึงลดต่ำลง ดังนั้น

อิทธิพลของการเชื่อมโยง (Crosslink) ของ 2 อนุภาคนี้อะไรจึงสามารถเกิดขึ้นได้ ดังโครงสร้างภาพที่ 54

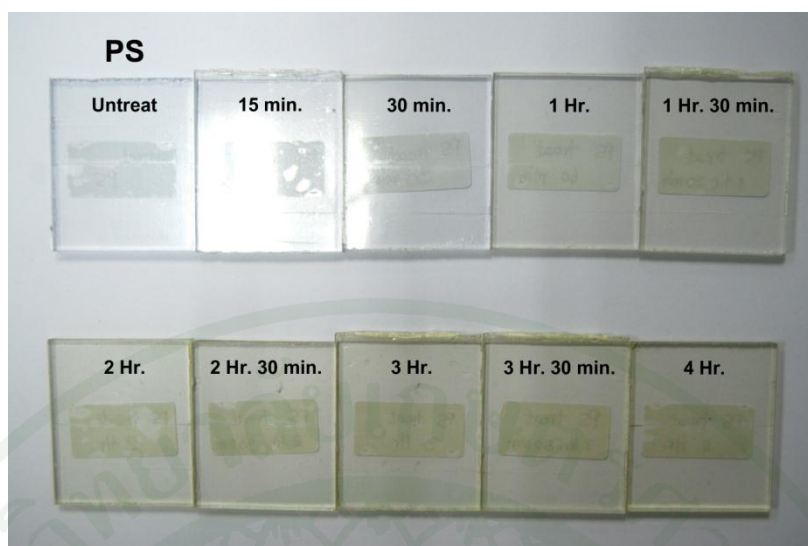


ภาพที่ 54 โครงสร้างทางเคมีของ PS ที่เกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ภายหลังจากฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตและเก็บตัวอย่างที่สภาวะสุญญากาศ

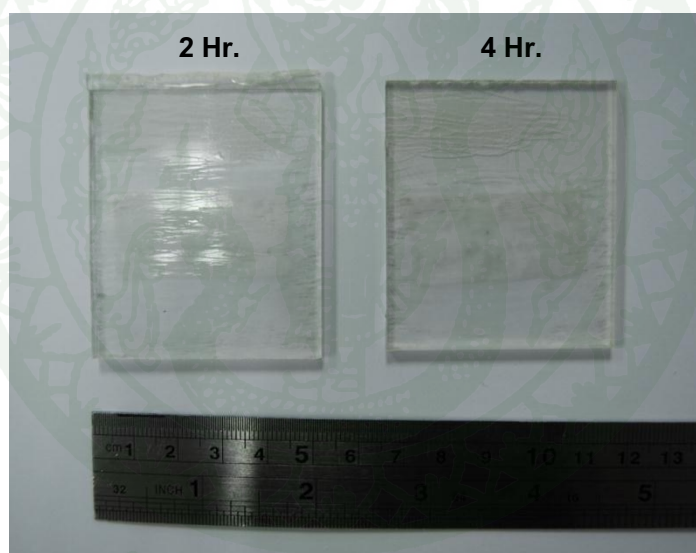
จากภาพที่ 53(ข) พบว่าเมื่อจำนวนชั่วโมงของการฉายรังสีเพิ่มขึ้น ทั้งการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศและสภาวะสุญญากาศ อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ ---C=O/---CH บนพื้นผิว PS มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเท่าๆ กัน ดังนั้นมีความเป็นไปได้ว่าการเกิดหมู่คาร์บอนิลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงพบได้มากขณะที่ทำการฉายรังสี UV ซึ่งอิทธิพลการเก็บตัวอย่างที่สภาวะแตกต่างกันไม่ส่งผลต่อการสร้างหมู่คาร์บอนิล

3.2.3 การวิเคราะห์เนื้อผิวของวัสดุพื้นภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต

จากภาพที่ 55 พบว่าพื้นผิวเกิดการสร้างชั้นผิวสีเหลืองบนพื้นผิว PS โดยสีเริ่มเข้มขึ้นเรื่อยๆ ตามชั่วโมงการฉายรังสีที่เพิ่มสูงขึ้น

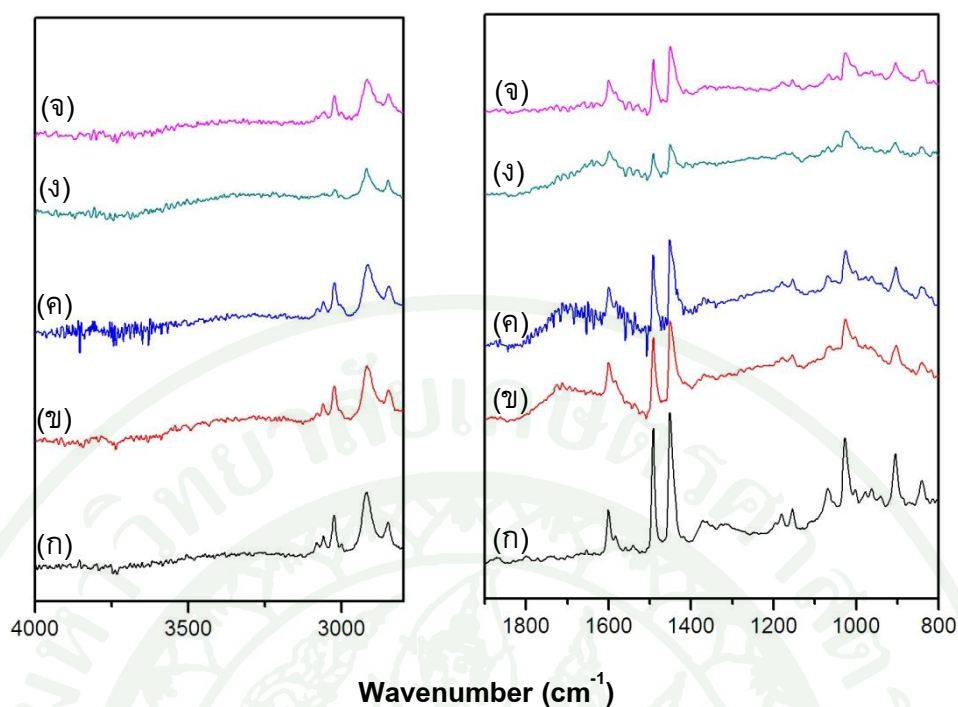


ภาพที่ 55 พื้นผิว PS ก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตตามระยะเวลาที่กำหนด



ภาพที่ 56 การขูดเนื้อผิวบนพื้นผิว PS ภายหลังจากฉายรังสีอัลตราไวโอเลตตามระยะเวลาที่กำหนด

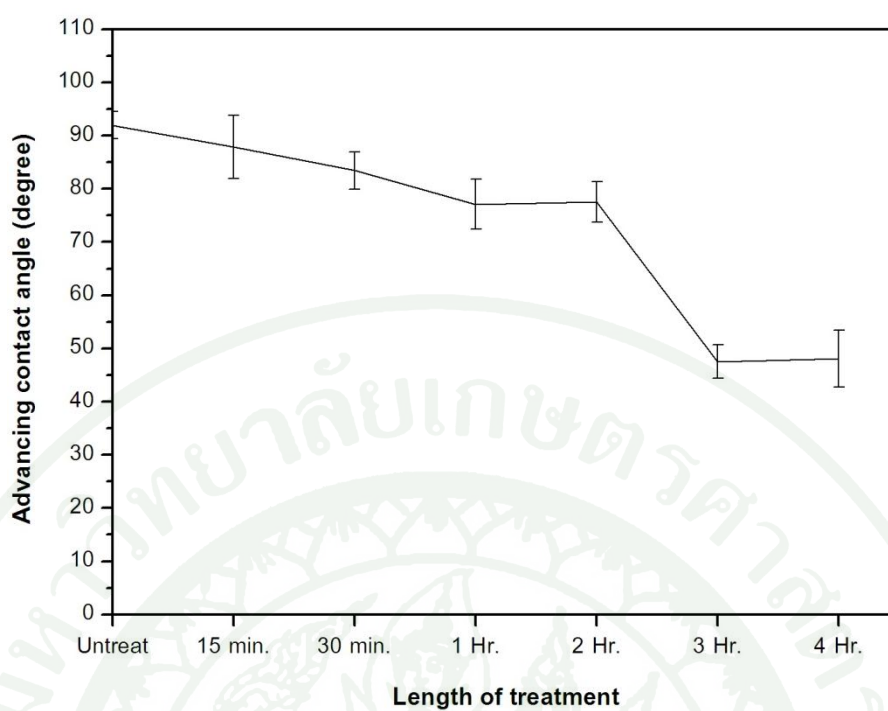
จากภาพที่ 56 ที่ได้ทำการขูดเนื้อผิวของ PS และนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR จากภาพที่ 57(ข)-(ค) พบว่าเมื่อช่วงของการฉายรังสีเพิ่มมากขึ้น บริเวณชั้นผิวสีเหลืองของ PS พบการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $3500-3100\text{ cm}^{-1}$ และ 1750 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลตามลำดับ โดยในทางตรงกันข้าม จากภาพที่ 57(ง)-(จ) พบว่าพื้นผิวส่วนในหรือแกน (Core) ของชั้นงานพอลิเมอร์มีการสัมผัสกับรังสี UV ได้น้อยลง การวิเคราะห์ส่วนของไตชั้นผิวสีเหลืองจึงพบการสร้างหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลที่ลดต่ำลง



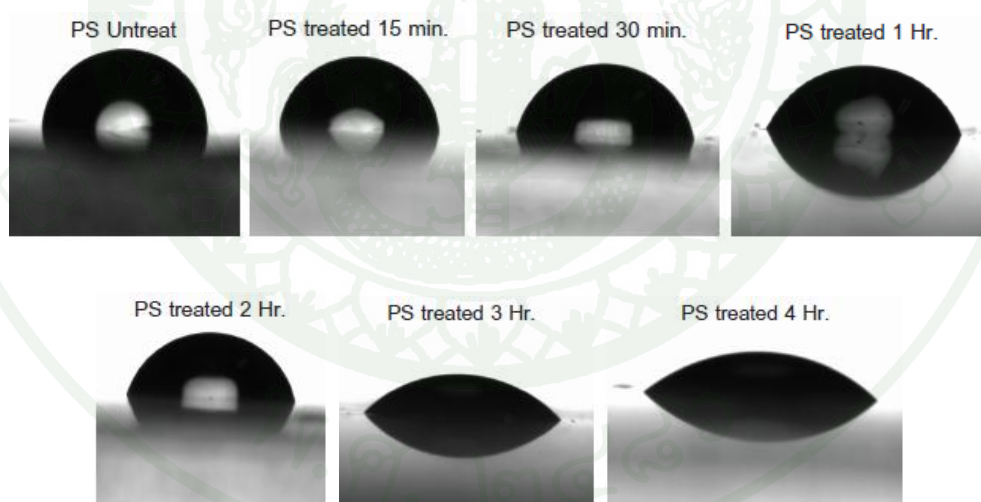
ภาพที่ 57 FTIR สเปกตรัมของ PS โดยในสเปกตรัม (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี; (ข)-(ค) คือส่วนเนื้อผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ (ง) และ (จ) คือส่วนของใต้ชั้นผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ

3.2.4 การวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของ PS ด้วยเครื่อง Contact angle

จากภาพที่ 58 พบว่าก่อนการฉายรังสี UV ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยของ PS มีค่าสูงถึง 91.97 องศา เหตุผลสำคัญมาจากโครงสร้างทางเคมีของ PS ที่แสดงถึงความมีไม่มีขั้ว แต่เมื่อพื้นผิว PS ผ่านการฉายรังสี UV ตามระยะเวลาที่เพิ่มสูงขึ้น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงของ PS ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง เนื่องจากการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว (Polar) เกิดขึ้นบนพื้นผิว ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิล ซึ่งผลการทดลองค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิว จากภาพที่ 59 เห็นว่ามีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีเทคนิค FTIR



ภาพที่ 58 ค่ามุมสัมผัสผิวน้ำ (Advancing contact angle) บนพื้นผิวของ PS

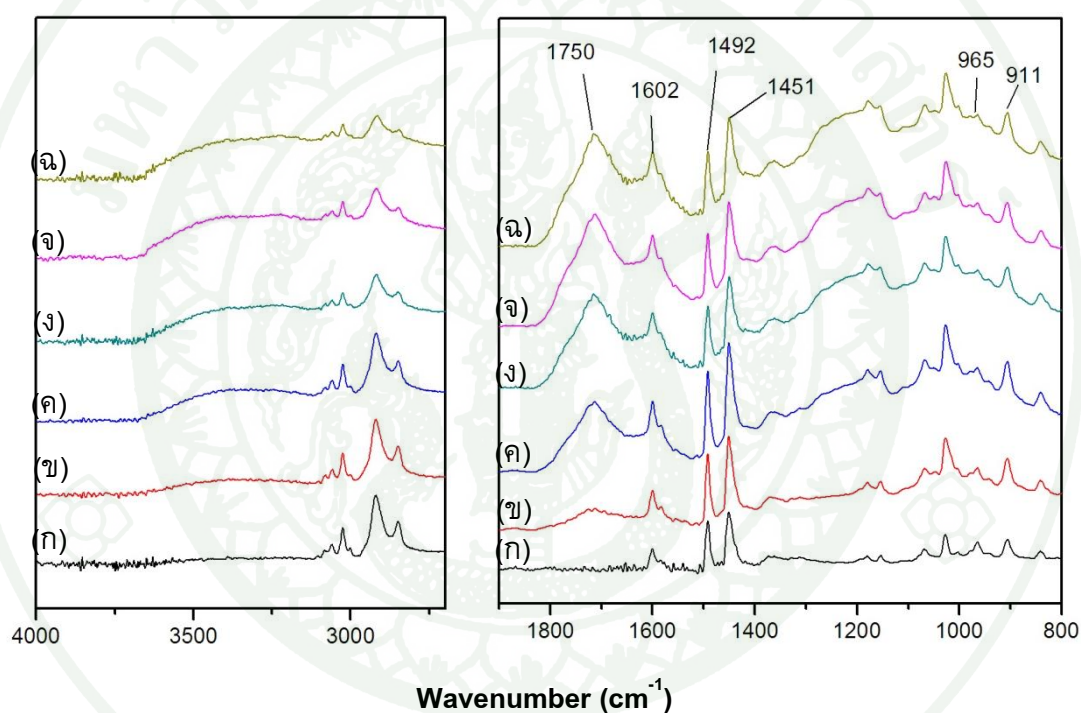


ภาพที่ 59 ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิว PS เมื่อใช้เวลาในการฉายรังสี UV ต่างๆ กัน

3.3 พอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS)

3.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ PS ด้วยเทคนิค FTIR

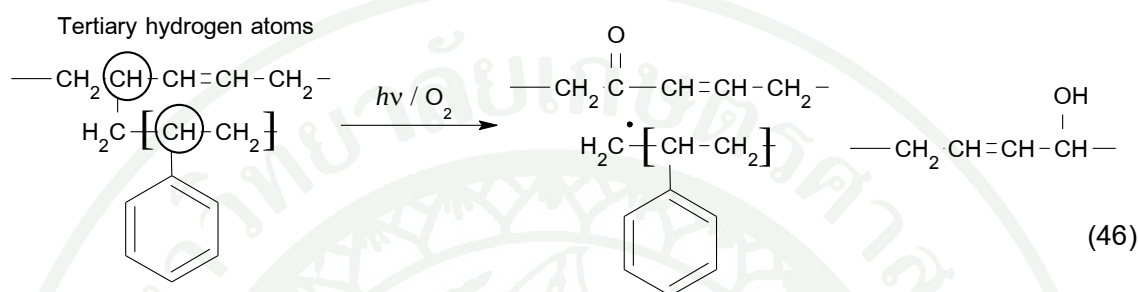
การวิเคราะห์ผลโครงสร้างทางเคมีก่อนและหลังการฉายรังสี UV บนพื้นผิว HIPS จากภาพที่ 60 พบว่าเมื่อเวลาการฉายรังสีเพิ่มสูงขึ้น ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 2919 cm^{-1} ของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจนมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง เนื่องจากตำแหน่งอะตอมไฮโดรเจนของคาร์บอนตติยภูมิ เป็นจุดเริ่มต้นของปฏิกิริยาทางแสง (Photolysis) ซึ่งเกิดขึ้นเช่นเดียวกับ PS ดังแสดงในสมการที่ (46)



ภาพที่ 60 FTIR สเปกตรัมของ HIPS (การเก็บตัวอย่าง 5 วัน, สภาวะบรรยากาศ) (ก) ไม่ผ่านการฉายรังสี UV, (ข) ผ่านการฉายรังสี UV 30 นาที (ค) 1 ชม. (ง) 2 ชม. (จ) 3 ชม. และ (ฉ) 4 ชม.

จากภาพที่ 60 ยังพบว่าพบว่าการฉายรังสีเพิ่มขึ้น ตำแหน่งเลขคลื่นที่แสดงถึงโครงสร้างวงอะโรมาติกใน HIPS ยังคงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลมาจากความเสถียรของวงอะโรมาติก แต่เนื่องจากพันธะคู่ในวงอะโรมาติก รวมถึงบิวทาไดอีนในโครงสร้างของ HIPS จัดว่าเป็นหมู่โครโมฟอร์ (Chromophor group) ซึ่งมีความสามารถในการดูดกลืนแสงได้ดี จึงทำให้เกิดการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายที่ตำแหน่ง

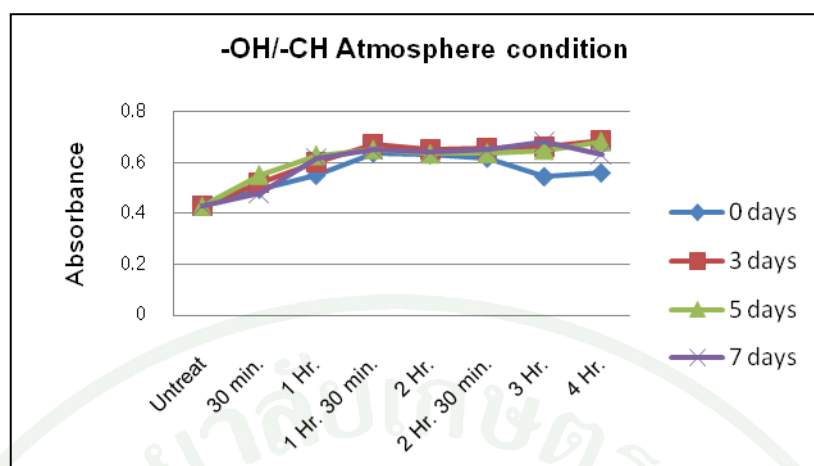
อะตอมไฮโดรเจนของคาร์บอนตติยภูมิ ดังสมการที่ (46) (Grassie and Gerald, 1985) และเกิดการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วบนพื้นผิวได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิล โดยใน FTIR สเปกตรัมหมู่ไฮดรอกซิลจะปรากฏเป็นแถบกว้าง (Broad band) ในช่วง $3600-3100\text{ cm}^{-1}$ รวมถึงหมู่คาร์บอนิลจะขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1750 cm^{-1} ซึ่งหมู่ทั้ง 2 มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตามชั่วโมงการฉายรังสี



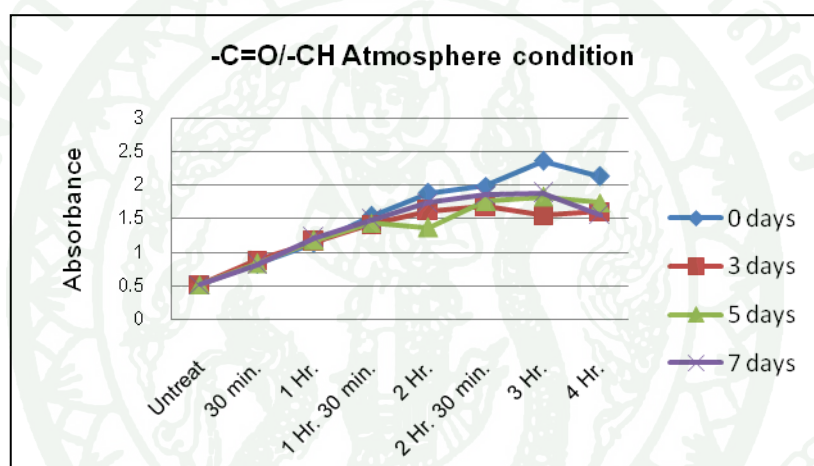
ที่มา: Rabek (1995), Grassie
and Gerald (1985)

3.3.2 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ -OH/-CH และ -C=O/-CH ของ HIPS

ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงได้ผลในทำนองเดียวกันกับ PS โดยจากภาพที่ 61(ก) พบว่าเมื่อเวลาการฉายรังสีเพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาของการฉายรังสีที่ระบบสร้างอนุมูลอิสระที่เพียงพอต่อการเกิดหมู่ไฮดรอกซิลบนสายโซ่พอลิเมอร์ คือประมาณ 2 ชั่วโมง โดยการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศ ค่าการดูดกลืนแสงในตำแหน่งเลขคลื่นของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนพื้นผิว HIPS มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นถึงเวลาการฉายรังสีที่ 2 ชั่วโมง จากนั้นค่าจึงเริ่มคงที่ ในขณะที่ระยะเวลาในการเก็บที่ 0 วัน ที่สภาวะบรรยากาศ ความไม่เสถียรของการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน อนุมูลอิสระยังคงหลงเหลืออยู่ในสายโซ่เพื่อรอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ -OH ต่อ -CH บนพื้นผิว HIPS จึงมีค่าต่ำกว่าการเก็บที่ 3, 5 และ 7 วัน



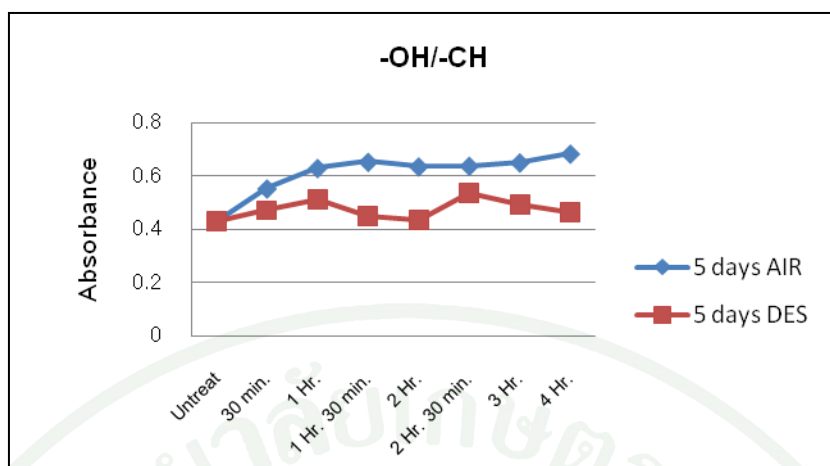
(ก)



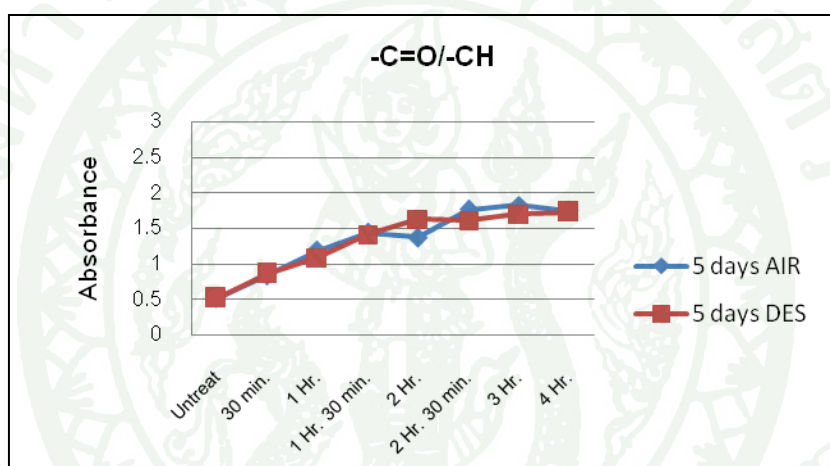
(ข)

ภาพที่ 61 อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (ก) $-OH/-CH$ และ (ข) $-C=O/-CH$ ของ HIPS ในการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศ

อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 61(ข) อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง $-C=O/-CH$ บนพื้นผิว HIPS การเก็บตัวอย่างที่ 3, 5 และ 7 วัน ในสภาวะบรรยากาศ พบว่าค่าเริ่มคงที่ที่ 2 ชั่วโมงเช่นเดียวกับอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง $-OH/-CH$ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงเลขคลื่นที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลนั้น ส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของค่าการดูดกลืนในตำแหน่งเลขคลื่นของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน ($-CH$) เนื่องจากเกิดการตัดขาดของสายโซ่ที่ตำแหน่งพันธะ $-CH$ และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้เป็นหมู่ที่มีขั้วเกิดขึ้นบนพื้นผิว



(ก)

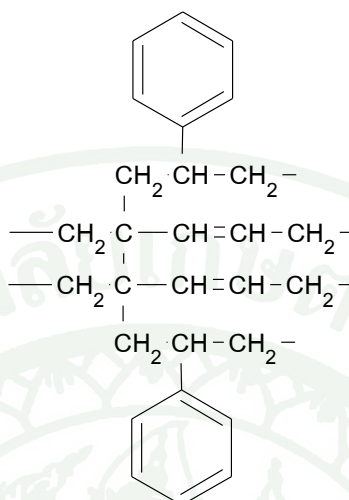


(ข)

ภาพที่ 62 การเปรียบเทียบอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (ก) $-\text{OH}/-\text{CH}$ และ (ข) $-\text{C}=\text{O}/-\text{CH}$ ของ HIPS ที่ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง 5 วัน ทั้งการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศและสภาวะสุญญากาศ

จากภาพที่ 62(ก) เมื่อนำข้อมูลระยะการเก็บตัวอย่างที่ 5 วันนำมาพิจารณา เช่นเดียวกันกับ PS ซึ่งผลการทดลองพบว่ามีความคล้ายคลึงกัน คือภายหลังจากการฉายรังสี UV อนุมูลอิสระที่หลงเหลืออยู่ในสายโซ่พอลิเมอร์ ยังคงมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งส่งผลให้อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง $-\text{OH}/-\text{CH}$ บนพื้นผิว HIPS ที่สภาวะบรรยากาศมีแนวโน้มที่สูงกว่าสภาวะสุญญากาศ โดยการเก็บตัวอย่างในสภาวะบรรยากาศสามารถช่วยเติมเต็มให้อนุมูลอิสระเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและสร้างหมู่ไฮดรอกซิลได้จนถึงจุดอิ่มตัว ในขณะที่เดียวกันการเก็บตัวอย่างที่สภาวะสุญญากาศ การเชื่อมโยง (Crosslink) ระหว่าง 2 อนุมูลอิสระจึงสามารถเกิดขึ้นได้ ดังโครงสร้างทางเคมีภาพที่ 63 เนื่องจากพื้นผิวมีการสัมผัสกับอากาศ

ได้น้อย จึงส่งผลให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระที่หลงเหลือในสายโซ่พอลิเมอร์ ลดต่ำลง

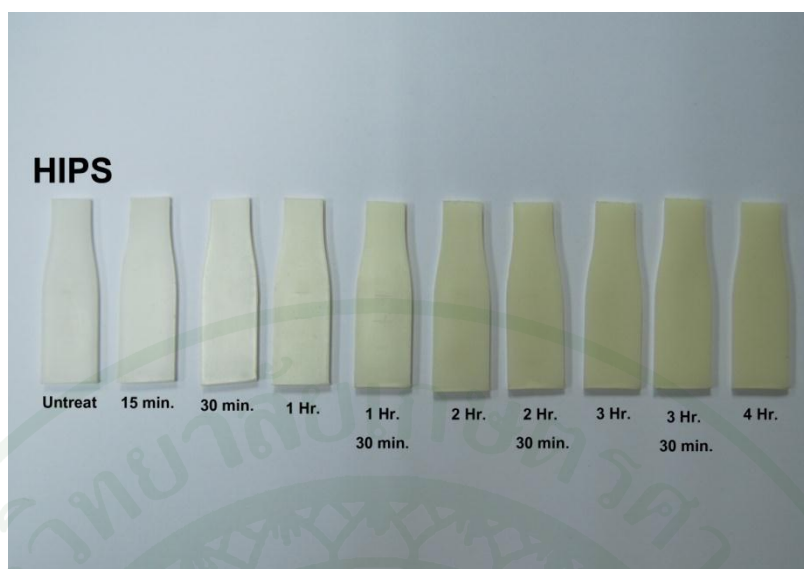


ภาพที่ 63 โครงสร้างทางเคมีของ HIPS ที่เกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ภายหลังการฉายรังสี อัลตราไวโอเล็ตและเก็บตัวอย่างที่สภาวะสุญญากาศ

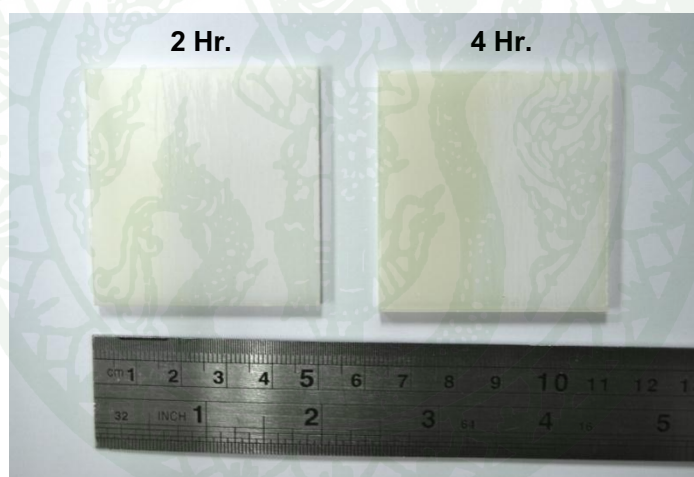
จากภาพที่ 62(ข) ผลการทดลองยังพบความคล้ายคลึงกันเช่นเดียวกับ PS คือเมื่อจำนวนชั่วโมงของการฉายรังสีเพิ่มขึ้น ทั้งสภาวะบรรยากาศและสภาวะสุญญากาศ อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ $-C=O/-CH$ บนพื้นผิว HIPS มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเท่าๆ กัน ดังนั้นมีความเป็นไปได้ว่าการสร้างหมู่คาร์บอนิลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงพบได้มากขณะที่ทำการฉายรังสี UV ซึ่งอิทธิพลการเก็บตัวอย่างที่สภาวะแตกต่างกันไม่ส่งผลต่อการสร้างหมู่คาร์บอนิล

3.3.3 การวิเคราะห์เนื้อผิวของ HIPS ภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต

จากภาพที่ 64 ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว HIPS ที่มีสีขาวและทึบแสง การเปลี่ยนแปลงของชั้นผิวสีเหลืองที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว HIPS จึงสังเกตได้อย่างชัดเจน โดยสีปรากฏชัดและเข้มขึ้น ตามชั่วโมงการฉายรังสีที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการสร้างชั้นผิวสีเหลืองปรากฏเฉพาะบริเวณที่ได้รับการฉายรังสีเท่านั้น

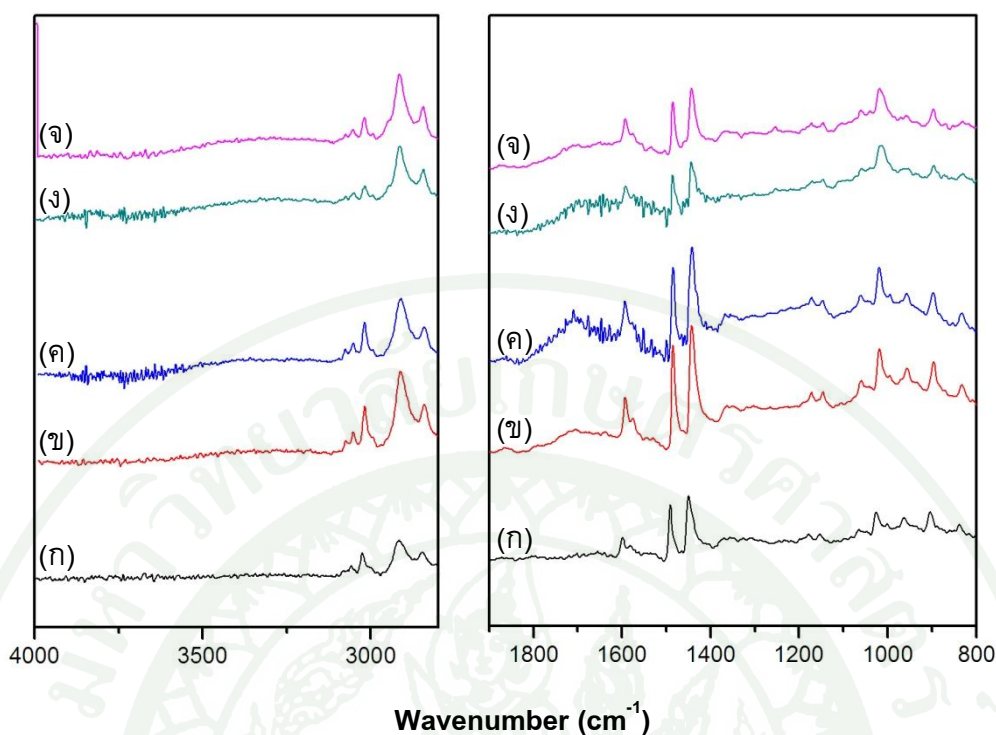


ภาพที่ 64 พื้นผิว HIPS ก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตตามระยะเวลาที่กำหนด



ภาพที่ 65 การขูดเนื้อผิวบนพื้นผิว HIPS ภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตตามระยะเวลาที่กำหนด

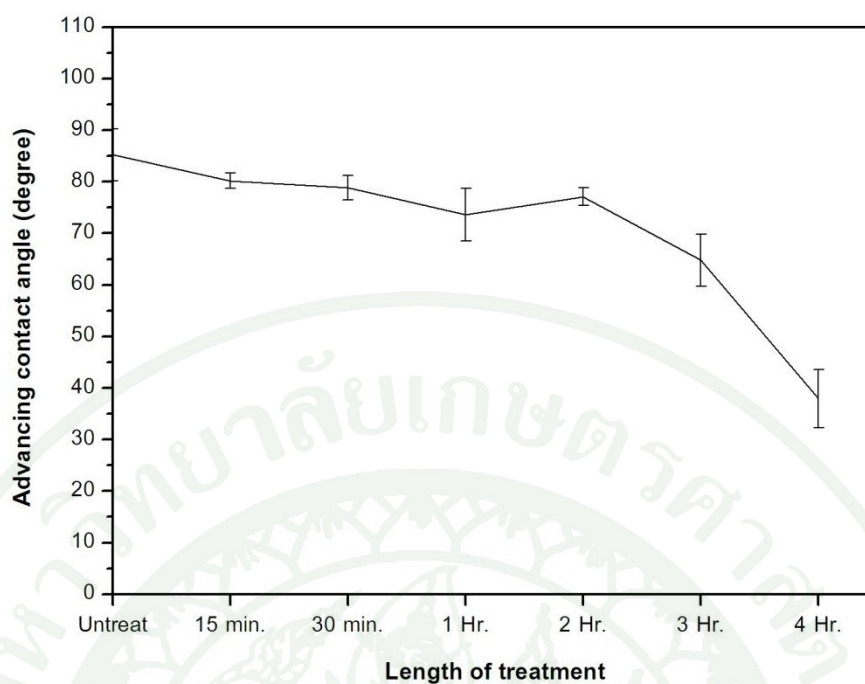
จากภาพที่ 65 ที่ได้ทำการขูดเนื้อผิวของ HIPS และนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งจากภาพที่ 66(ข)-(ค) พบว่าผลการทดลองคล้ายคลึงกับ PS คือเมื่อช่วงของการฉายรังสีเพิ่มมากขึ้น บริเวณชั้นผิวสีเหลืองของ HIPS พบการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งเลขคลื่นที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิล โดยพื้นผิวส่วนในของชิ้นงานพอลิเมอร์มีการสัมผัสกับรังสี UV ได้น้อยลง การวิเคราะห์ส่วนของใต้ชั้นผิวสีเหลืองจึงพบการสร้างหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลที่ลดต่ำลง ดังภาพที่ 66(ง)-(จ)



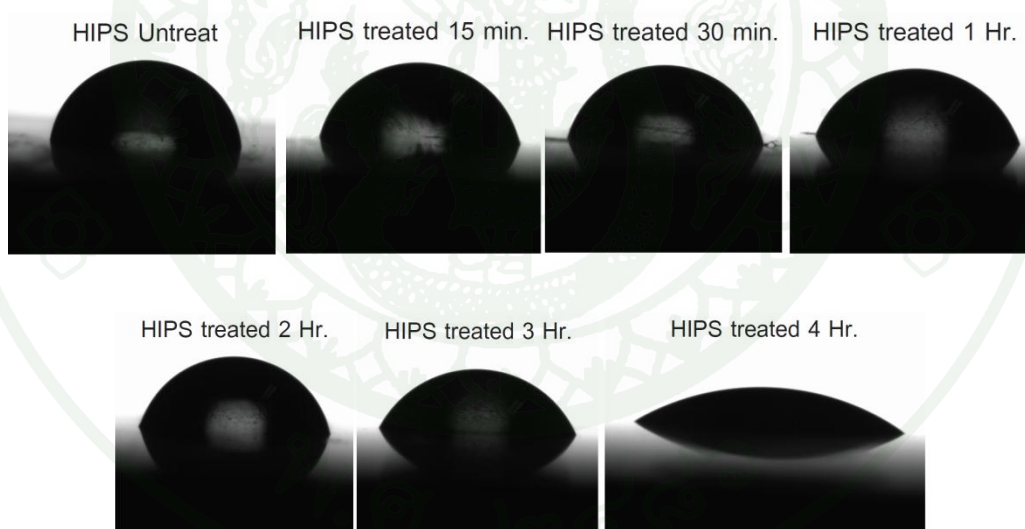
ภาพที่ 66 FTIR สเปกตรัมของ HIPS โดยในสเปกตรัม (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี; (ข)-(ด) คือส่วนเนื้อผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ (ง) และ (จ) คือส่วนของใต้ชั้นผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ

3.3.4 การวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของ HIPS ด้วยเครื่อง Contact angle

โครงสร้างทางเคมีของ HIPS ที่แสดงถึงความมีไม่ขั้วเช่นเดียวกับ PS และ PP จากภาพที่ 67 จึงพบว่าคุณสมบัติสัมผัสเฉื่อยของ HIPS ก่อนการฉายรังสี UV มีค่าสูงถึง 85.21 องศา แต่เมื่อพื้นผิว HIPS ผ่านการฉายรังสี UV ตามระยะเวลาที่เพิ่มสูงขึ้น การสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วบนพื้นผิว HIPS ซึ่งได้แก่หมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิล ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสง ส่งผลให้คุณสมบัติสัมผัสมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง ซึ่งผลการทดลองค่ามุมสัมผัสเฉื่อยและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิว จากภาพที่ 68 เห็นว่ามีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีเทคนิค FTIR



ภาพที่ 67 ค่ามุมสัมผัสผิวน้ำ (Advancing contact angle) บนพื้นผิวของ HIPS

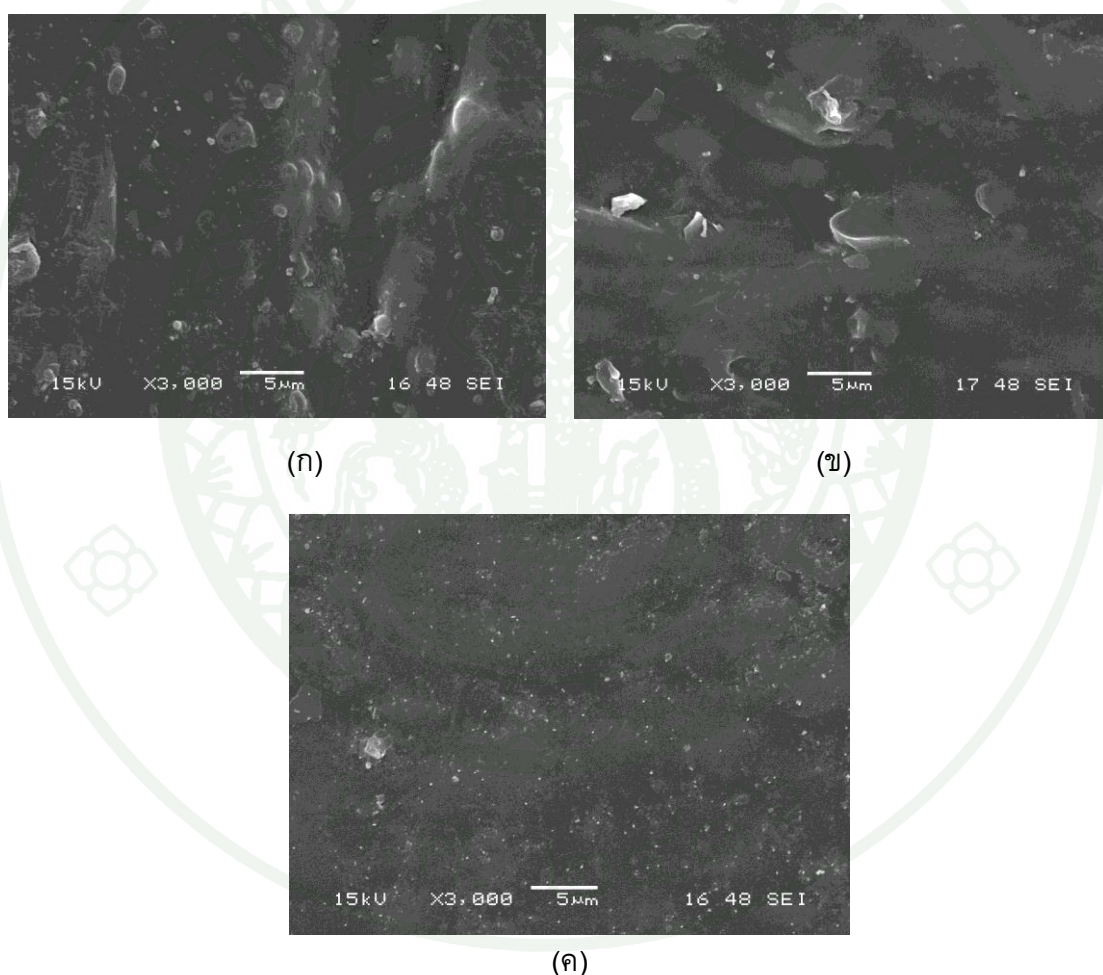


ภาพที่ 68 ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิว HIPS เมื่อใช้เวลาในการฉายรังสี UV ต่างๆ กัน

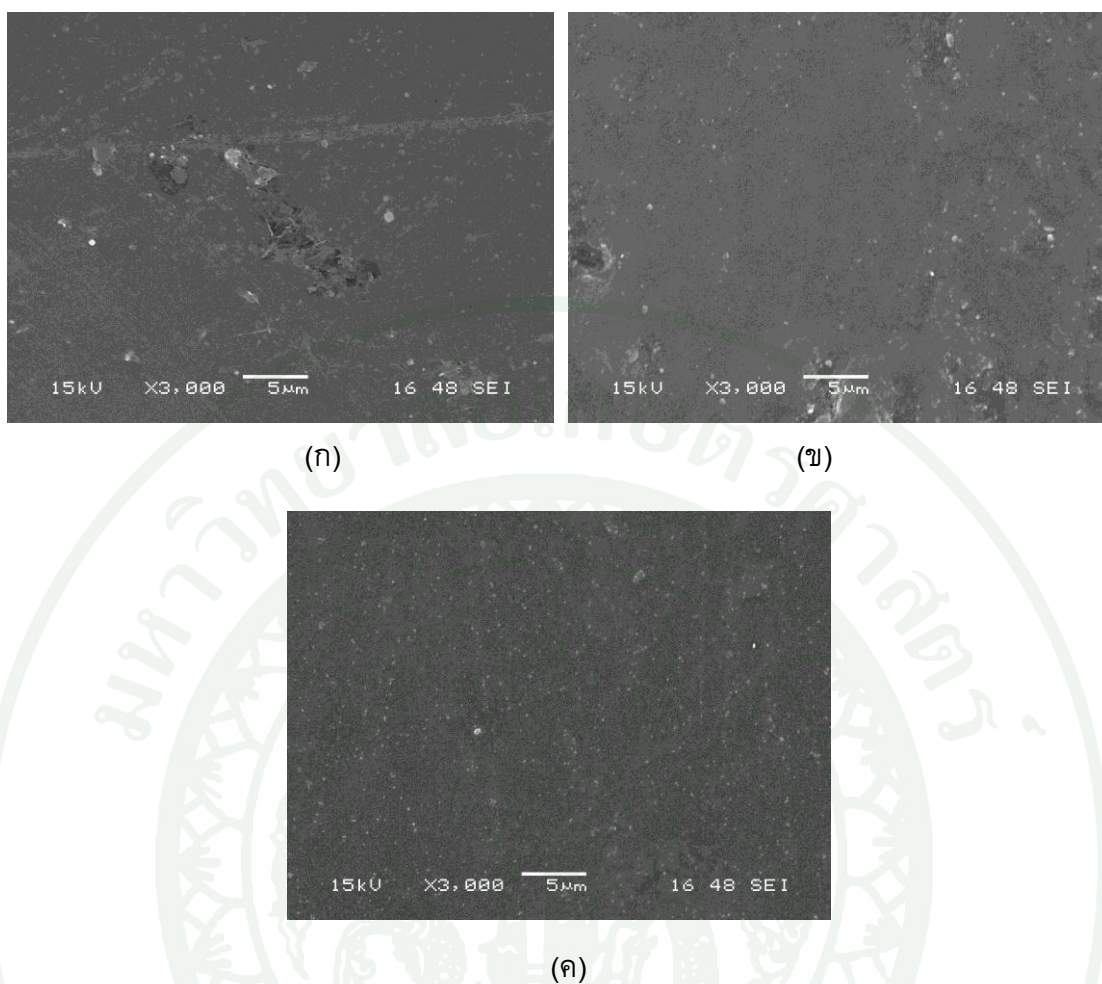
3.4.5 การวิเคราะห์พื้นผิวของ PS และ HIPS ก่อนและหลังการฉายรังสี UV

จากภาพที่ 69 และ 70 พบว่าเมื่อเวลาการฉายรังสีเพิ่มมากขึ้น พื้นผิวทั้ง PS และ HIPS มีการปรากฏจุดสีขาวขนาดเล็กจำนวนมากกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน ซึ่งพบได้ คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Mailhot B. *et al.* (2000) ที่ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันทาง

แสงของพอลิเมอร์ผสม (Polymer blends) ระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และพอลิไวนิลเมทิลอีเทอร์ (Polyvinyl methyl ether) โดยใช้หลอดเมอร์คิวรีที่ปลดปล่อยความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 300 นาโนเมตร และใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscopy, AFM) สำหรับการวิเคราะห์ภาพในระดับนาโนสเกล (Nano-scale) บนพื้นผิวพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVME/PS พบว่าพื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี UV 6 ชั่วโมง เริ่มมีการปรากฏเนินขนาดเล็ก (Small-hill) เกิดขึ้นบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นหนึ่งในผลกระทบที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสง โดยความสัมพันธ์ของเส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter) และความสูง (Height) ของเนินขนาดเล็ก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามชั่วโมงของการฉายรังสี



ภาพที่ 69 พื้นผิวของ HIPS ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (ข) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 2 ชั่วโมงและ (ค) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 4 ชั่วโมง



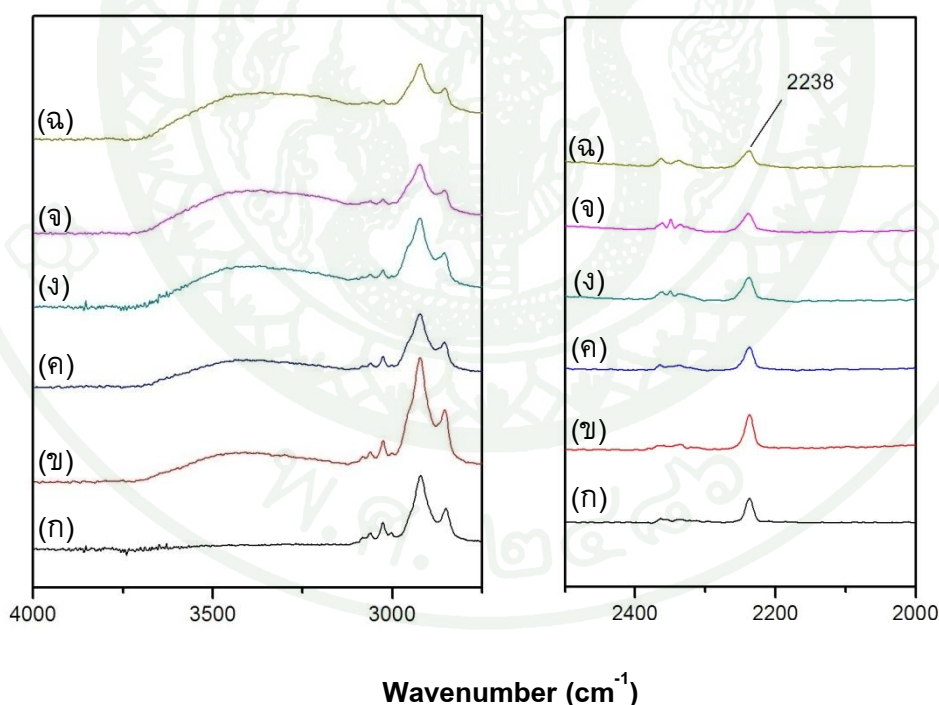
ภาพที่ 70 พื้นผิวของ PS ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (ข) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 2 ชั่วโมงและ (ค) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 4 ชั่วโมง

จากโครงสร้างทางเคมีของ PS และ HIPS ที่มีความคล้ายคลึงกัน จึงเป็นไปได้ว่าจุดสีขาวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของ PS และ HIPS ที่ชั่วโมงการฉายรังสี 4 ชั่วโมง เกิดขึ้นคล้ายกับงานวิจัยดังที่กล่าวไปข้างต้น ซึ่งเครื่อง SEM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดการวิเคราะห์พื้นผิวในระดับไมโครสเกล จึงสังเกตเห็นจุดสีขาวที่ปรากฏบนพื้นผิวได้ไม่ชัดเจน

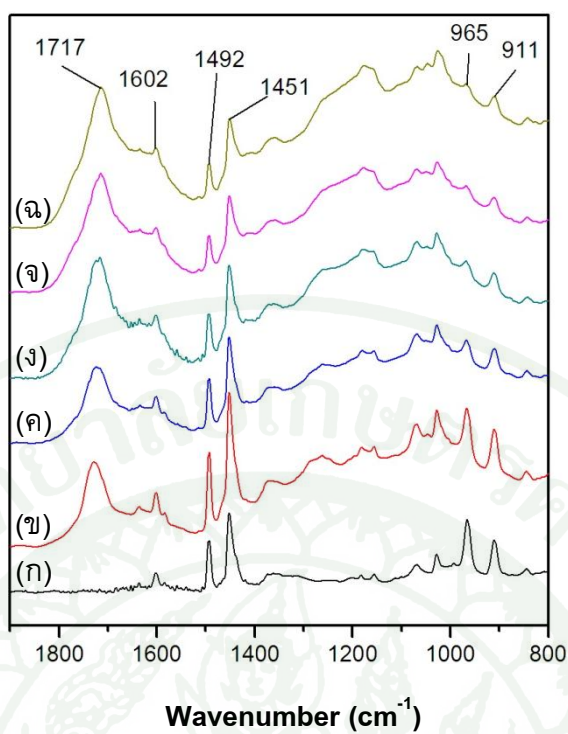
3.4 อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS)

3.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ ABS ด้วยเทคนิค FTIR

การวิเคราะห์ผลโครงสร้างทางเคมีก่อนและหลังการฉายรังสี UV บนพื้นผิว ABS จากภาพที่ 71 พบว่าส่วนของสไตรีนและบิวทาไดอีนที่พบใน ABS การเสื่อมสภาพทางแสง ด้วยด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันมีความคล้ายคลึงกันกับสไตรีนและบิวทาไดอีนที่พบใน HIPS และ PS ซึ่งเมื่อเวลาของการฉายรังสีเพิ่มสูงขึ้น นอกเหนือจากเลขคลื่นที่แสดงถึงบิวทาไดอีนมี แนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากพันธะคู่ที่มีความว่องไวต่อรังสี UV รวมถึงวงอะโรมาติกที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของเลขคลื่นแล้ว เมื่อพิจารณาถึงเลขคลื่นที่ 2238 cm^{-1} ของหมู่ไนไตรล์ ยังพบว่าเมื่อ จำนวนชั่วโมงการฉายรังสีที่เพิ่มขึ้น เลขคลื่นดังกล่าวไม่พบการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากพลังงาน การสลายพันธะของหมู่ไนไตรล์มีค่าสูงถึง 937 kJ/mol (เทคโนโลยีพอลิเมอร์, 2548) ในขณะที่ พลังงานจากรังสี UV (ความยาวคลื่น 253.7 nm) มีเพียง 470 kJ/mol ดังนั้นความสามารถในการ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงของหมู่ไนไตรล์จึงเกิดขึ้นได้ยาก

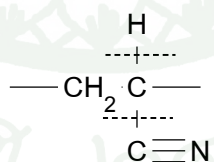


ภาพที่ 71 FTIR สเปกตรัมของ ABS (การเก็บตัวอย่าง 5 วัน, สภาวะบรรยากาศ) (ก) ไม่ผ่านการฉายรังสี UV (ข) ผ่านการฉายรังสี UV 30 นาที (ค) 1 ชม. (ง) 2 ชม. (จ) 3 ชม. และ (ฉ) 4 ชม.



ภาพที่ 71 (ต่อ)

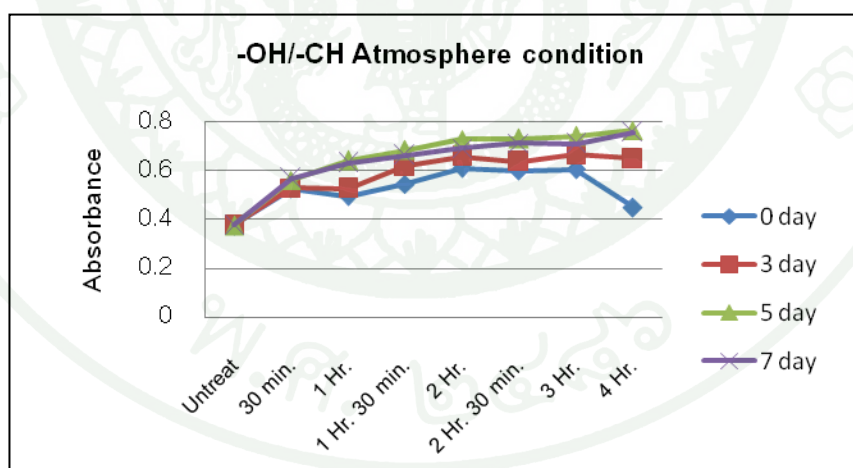
อย่างไรก็ตาม ภายใต้การเสื่อมสภาพทางแสง ปฏิกริยาการตัดขาดสายโซ่ของอะคริโลไนไตรล์สามารถเกิดได้ และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไอ (Volatile products) ได้แก่ ไฮโดรเจน (Hydrogen) และไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen cyanide) (Grassie and Gerald, 1985) ดังสมการที่ (47)



(47)

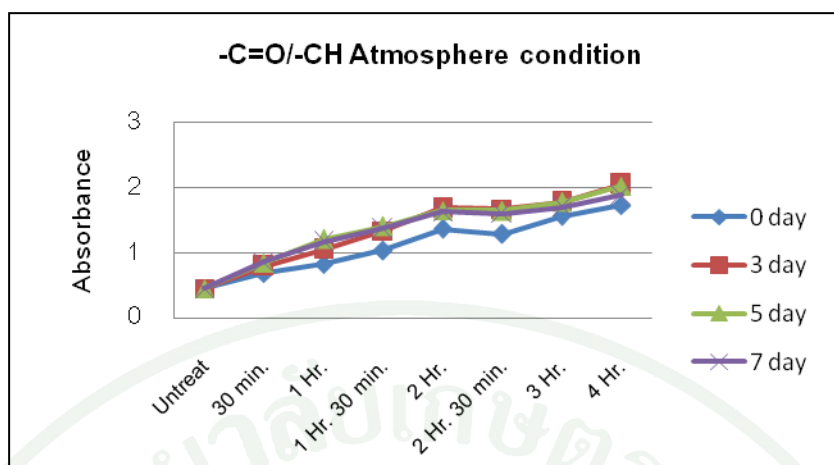
3.4.2 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ -OH/-CH และ -C=O/-CH ของ ABS

ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ ABS พบว่าผลการทดลอง คล้ายคลึงกับ PS และ HIPS เนื่องจากส่วนของสไตรีนและบิวทาไดอีนที่พบใน PS และ HIPS สามารถพบได้ในโครงสร้างของ ABS เช่นเดียวกัน ซึ่งจากภาพที่ 72(ก) พบว่าเมื่อเวลาการฉายรังสีเพิ่มมากขึ้น ในการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศ อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ -OH/-CH บนพื้นผิว ABS มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 2 ชั่วโมงจากนั้นค่าจึงเริ่มคงที่ เช่นเดียวกับ PS และ HIPS แต่ในทางตรงกันข้ามจากภาพที่ 72(ข) กลับพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของ -C=O/-CH มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการฉายรังสีเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองของ PS และ HIPS ที่เพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ที่ชั่วโมงการฉายรังสีที่ 2 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตาม ปัจจัยของระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างที่แตกต่างกัน ยังพบผลที่ คล้ายคลึงกับ PS และ HIPS กล่าวคือการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศ อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ -OH/-CH และ -C=O/-CH บนพื้นผิว ABS ที่ 0 วัน พบว่ามีค่าต่ำกว่าการเก็บที่ 3, 5 และ 7 วัน เนื่องจากที่ระยะการเก็บ 0 วันยังพบความไม่เสถียรของการเสื่อมสภาพทางแสง ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันภายหลังการฉายรังสี ซึ่งอนุมูลอิสระยังคงหลงเหลืออยู่ในสายโซ่เพื่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์



(ก)

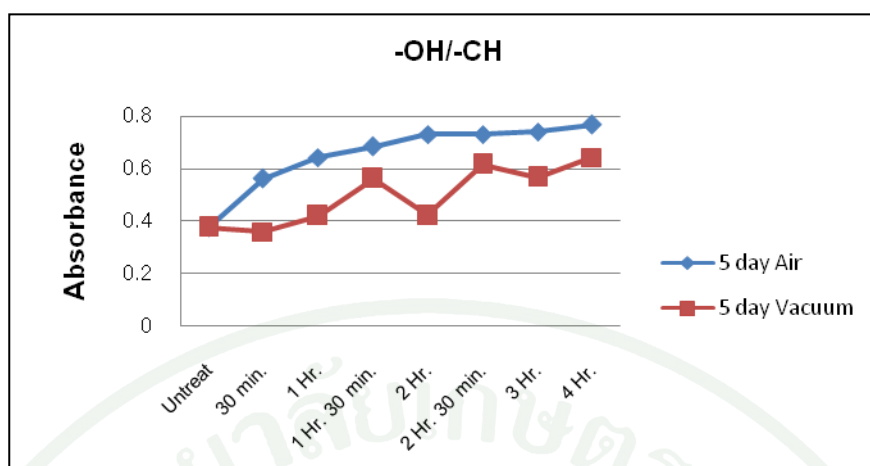
ภาพที่ 72 อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (ก) -OH/-CH และ (ข) -C=O/-CH ของ ABS ในการเก็บตัวอย่างที่สภาวะบรรยากาศ



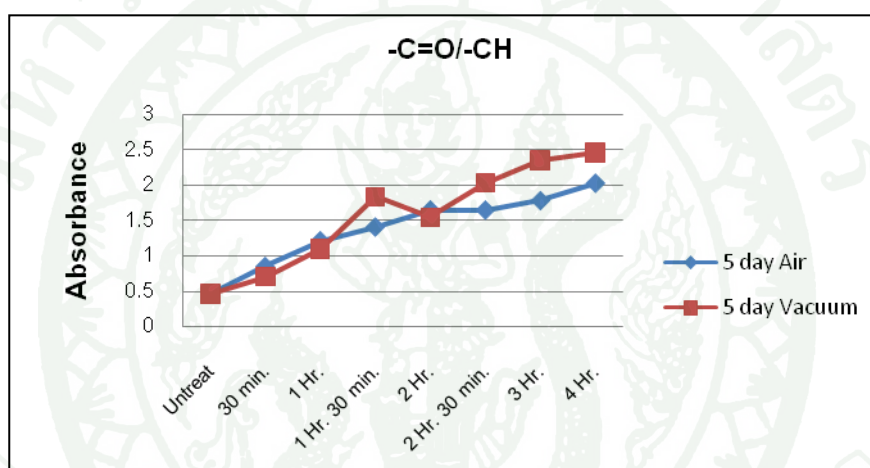
(ข)

ภาพที่ 72 (ต่อ)

จากภาพที่ 73(ก) ทางผู้วิจัยได้เลือกนำข้อมูลระยะการเก็บตัวอย่างที่ 5 วัน นำมาพิจารณาเช่นเดียวกันกับ PS และ HIPS ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มที่เกิดขึ้นคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ เมื่อเวลาการฉายรังสีเพิ่มมากขึ้น การเก็บตัวอย่างในสภาวะสุญญากาศ อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ $-OH/-CH$ บนพื้นผิว ABS มีค่าต่ำกว่าในสภาวะบรรยากาศ เนื่องจากอนุมูลอิสระที่หลงเหลือภายหลังการฉายรังสี มีการสัมผัสกับอากาศได้น้อยลง การเสื่อมสภาพทางแสงจึงเกิดขึ้นโดยปราศจากออกซิเจนในการเข้าทำปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่น้อยลง ดังนั้นการสร้างหมู่ไฮดรอกซิลหรือคาร์บอนิลในระบบจึงน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งสไตรีนและบีวทาไดอินใน ABS ปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Crosslink) ของ 2 อนุมูลอิสระสามารถเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกับที่พบในโครงสร้างของ PS และ HIPS



(ก)



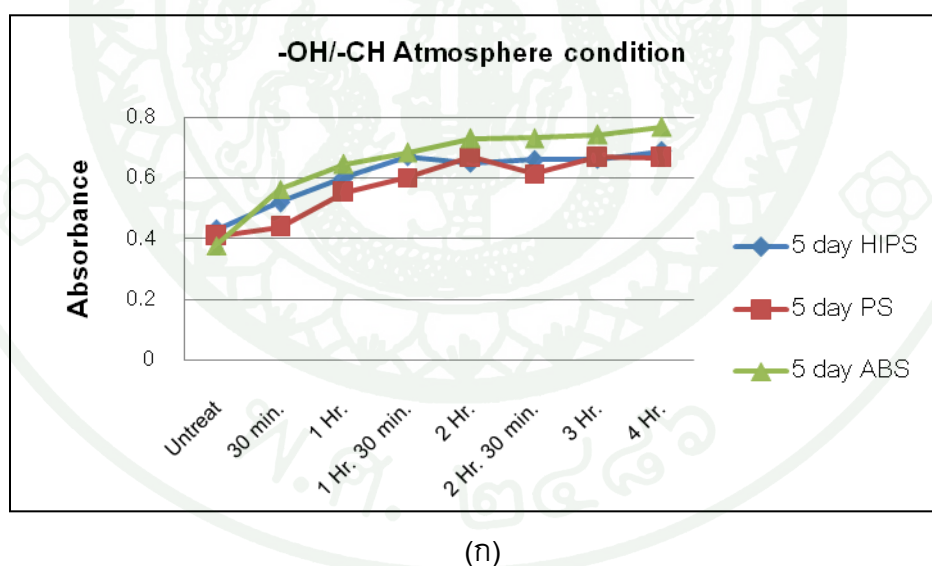
(ข)

ภาพที่ 73 การเปรียบเทียบอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (ก) $-\text{OH}/-\text{CH}$ และ (ข) $-\text{C}=\text{O}/-\text{CH}$ ของ ABS ในระยะการเก็บตัวอย่าง 5 วัน ที่สภาวะบรรยากาศและสภาวะสุญญากาศ

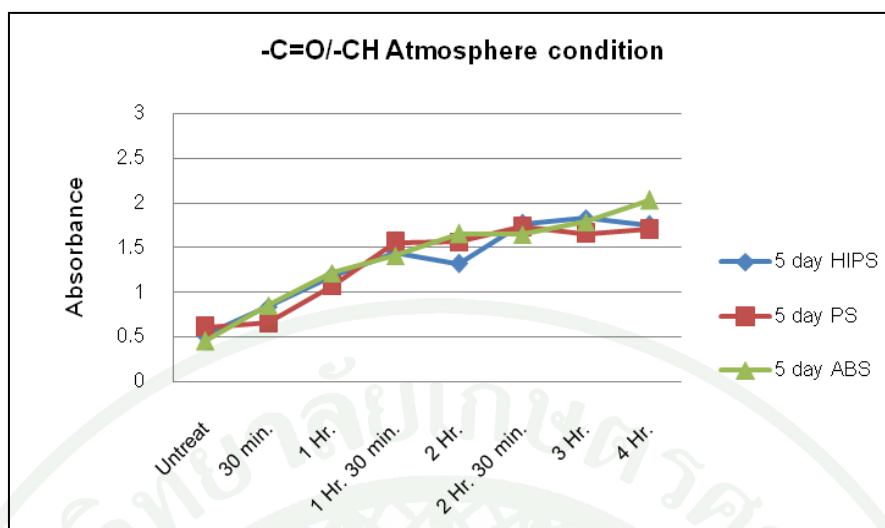
อย่างไรก็ตาม จากภาพที่ 73(ข) พบว่าเมื่อจำนวนชั่วโมงของการฉายรังสีเพิ่มขึ้น อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ $-\text{C}=\text{O}/-\text{CH}$ บนพื้นผิว ABS มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทั้งสภาวะบรรยากาศและสภาวะสุญญากาศ โดยมีความเป็นไปได้ว่า ถ้าหากมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนชั่วโมงในการฉายรังสี ค่าการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิลยังคงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นได้ ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองของ PS และ HIPS ที่อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ $-\text{C}=\text{O}/-\text{CH}$ เพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ที่ชั่วโมงการฉายรังสีที่ 2 ชั่วโมง

3.4.3 พิจารณาการเปรียบเทียบอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ -OH/-CH และ -C=O/-CH ระหว่าง HIPS, PS และ ABS

จากภาพที่ 74 เลือกพิจารณาข้อมูลของระยะการเก็บตัวอย่างที่ 5 วัน ของทั้ง HIPS, PS และ ABS พบว่าในสภาวะบรรยากาศ เมื่อจำนวนชั่วโมงของการฉายรังสีเพิ่มขึ้น ปริมาณของบิวทาไดอีนในโครงสร้างของ ABS และ HIPS มีผลอย่างมากต่อปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH บนพื้นผิว ABS มีค่าสูงกว่า HIPS เล็กน้อย เนื่องจากปริมาณของบิวทาไดอีนใน ABS (5-30%) มากกว่า HIPS (2-8%) โอกาสการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงของ ABS จึงสูงกว่า HIPS ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาระหว่าง HIPS และ PS พบว่าในชั่วโมงการฉายรังสีที่ประมาณ 30 นาที ถึงประมาณ 2 ชั่วโมง บิวทาไดอีนใน HIPS มีผลทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของ -OH/-CH เพิ่มขึ้นสูงกว่า PS โดยค่าเริ่มมีแนวโน้มที่คงที่เมื่อผ่านการฉายรังสีที่ 2 ชั่วโมงจนถึง 4 ชั่วโมง แต่สำหรับอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ HIPS มีค่าสูงกว่า PS ในช่วงชั่วโมงการฉายรังสี 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นค่าจึงเริ่มคงที่จนถึงชั่วโมงการฉายรังสีมากที่สุดที่ 4 ชั่วโมง ในขณะที่อัตราค่าการดูดกลืนแสงของ -C=O/-CH ของ ABS มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 74 เปรียบเทียบอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (ก) -OH/-CH และ (ข) -C=O/-CH ระหว่าง HIPS, PS และ ABS ในระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 5 วัน ที่สภาวะบรรยากาศ



(ข)

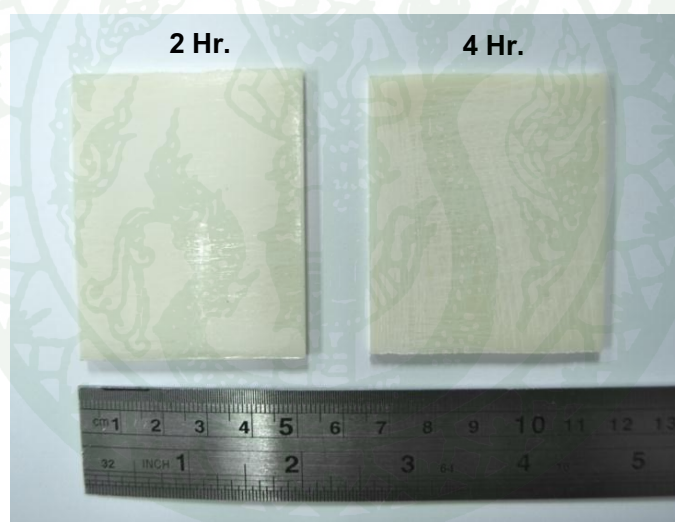
ภาพที่ 74 (ต่อ)

3.4.4 การวิเคราะห์เนื้อผิวของ ABS ภายหลังจากฉายรังสีอัลตราไวโอเลต

จากภาพที่ 75 ก่อนการฉายรังสี UV พื้นผิวของ ABS มีลักษณะสีขาวอมเหลืองและทึบแสง ภายหลังจากฉายรังสี การเปลี่ยนแปลงของชั้นผิวสีเหลืองที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว ABS สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน โดยสีปรากฏชัดและเข้มข้น ตามชั่วโมงการฉายรังสีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการสร้างชั้นผิวสีเหลืองปรากฏเฉพาะบริเวณที่ได้รับการฉายรังสีเท่านั้น



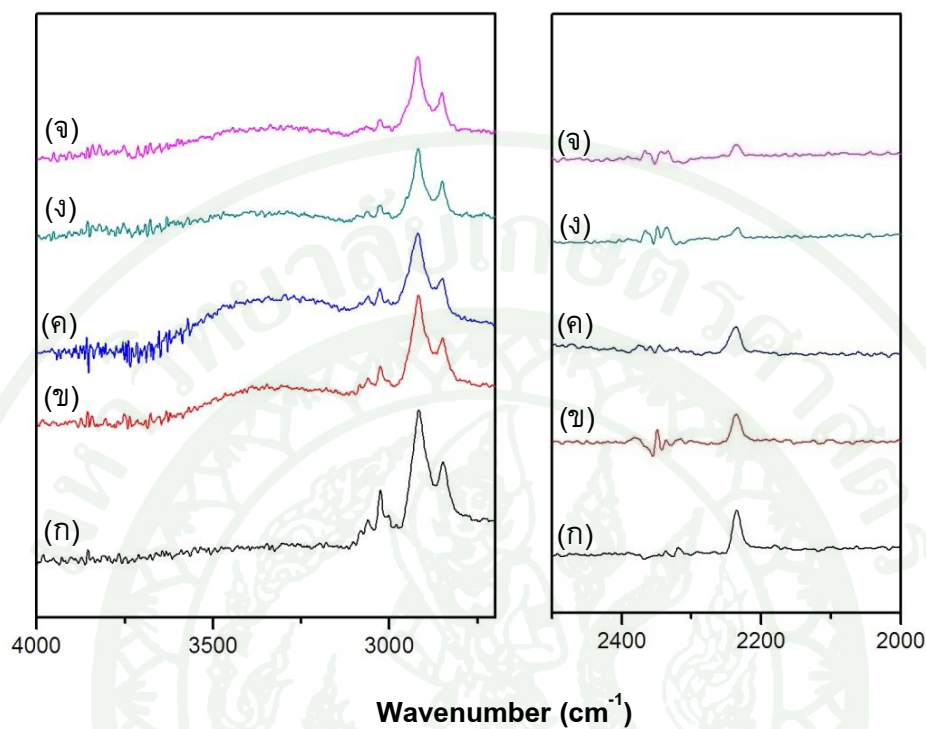
ภาพที่ 75 พื้นผิว ABS ก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตตามระยะเวลาที่กำหนด



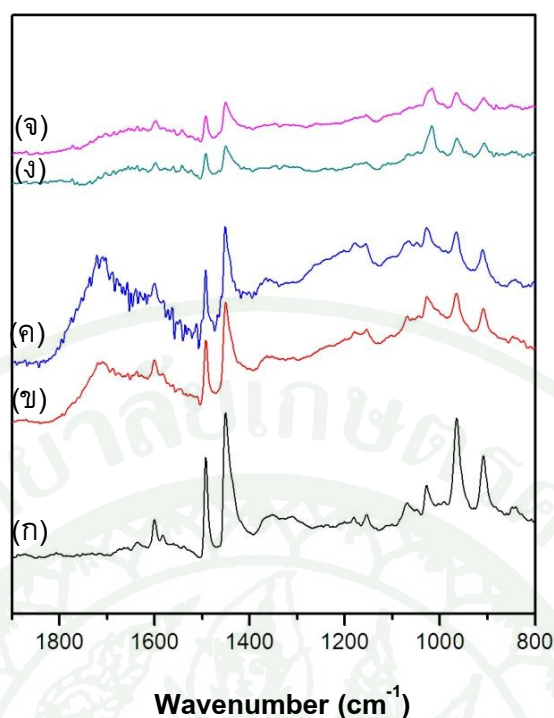
ภาพที่ 76 การขูดเนื้อผิวบนพื้นผิว ABS ภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตตามระยะเวลาที่กำหนด

จากภาพที่ 76 ที่ได้ทำการขูดเนื้อผิวของ ABS เฉพาะชั้นผิวสีเหลืองออก และนำมาตรวจวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR จากภาพที่ 77(ข)-(ค) พบว่าผลการทดลองคล้ายคลึงกับ PS และ HIPS กล่าวคือเมื่อช่วงระยะเวลาการฉายรังสีเพิ่มมากขึ้น บริเวณชั้นผิวสีเหลืองของ ABS พบการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งเลขคลื่นที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิล ในทางตรงกันข้ามได้ชั้นผิว การสร้างหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลมีแนวโน้มที่ลดลง

อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากพื้นผิวส่วนในได้รับปริมาณรังสีที่ต่ำลง การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงจึงลดลงต่ำลง ดังแสดงภาพที่ 77(ง)-(จ)



ภาพที่ 77 FTIR สเปกตรัมของ ABS โดยในสเปกตรัม (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี; (ข)-(ค) คือส่วนเนื้อผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ (ง) และ (จ) คือส่วนของใต้ชั้นผิวที่ฉายรังสี 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ

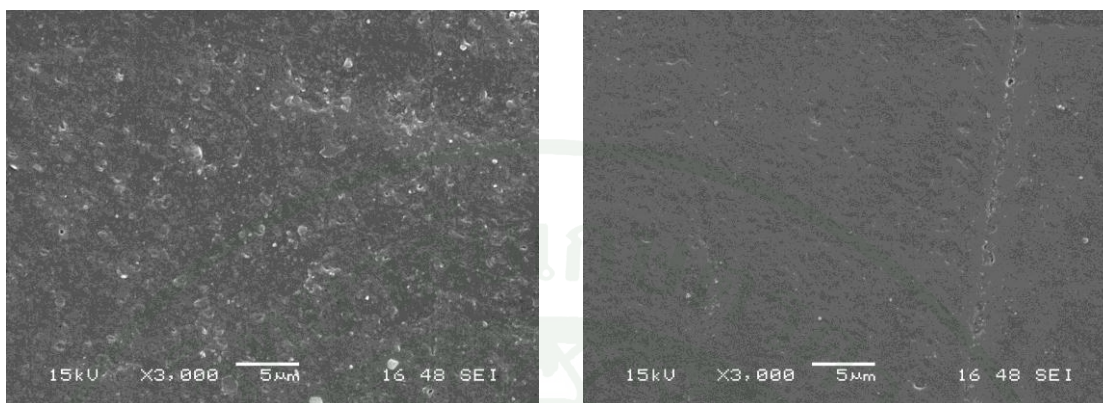


ภาพที่ 77 (ต่อ)

3.4.5 การวิเคราะห์พื้นผิวของ ABS ก่อนและหลังการฉายรังสี UV

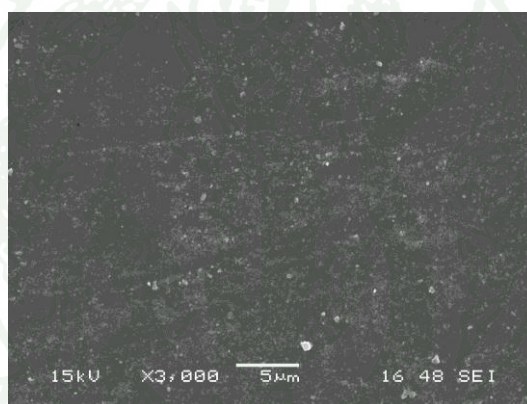
จากภาพที่ 78(ก) ก่อนการฉายรังสีพบว่าพื้นผิว ABS มีความขรุขระจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งภายหลังการฉายรังสี UV ที่ 2 ชั่วโมง จากภาพที่ 78(ข) พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเป็นคลื่น (Ripple) ขนาดเล็กๆ กระจายทั่วชิ้นงาน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นในภาพที่ 79 อ้างอิงจากงานวิจัยของ Murakami *et al.* (2002), Oosterom *et al.* (2006) และ Rytlewski and Zenkiewicz (2009) ที่ได้กล่าวว่า นอกเหนือการสร้างหมู่ฟังก์ชันหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวแล้ว (Chemical composition change) ผลกระทบของพื้นผิวพอลิเมอร์ที่ได้ทำการปรับปรุงด้วยการฉายรังสีสามารถเกิดผิวที่ขรุขระได้ ซึ่งเรียกว่าการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (Physical change) บนพื้นผิว และจากภาพที่ 78(ค) พบว่าพื้นผิวที่มีคลื่นขนาดเล็กไม่ปรากฏในการปรับปรุงพื้นผิวภายหลังการฉายรังสีที่ 4 ชั่วโมง เนื่องจากเมื่อผ่านการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันนานขึ้นถึง 4 ชั่วโมง พื้นผิวเกิดการกัดเซาะ (Erosion) และถูกทำลาย (Damage) ลักษณะคลื่นขนาดเล็กบนพื้นผิว ABS จึงหายไป เหลือแต่พื้นผิวที่เรียบเท่านั้น ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Mailhot B. *et al.* (2000) ได้พบปรากฏการณ์ในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือเมื่อมีการฉายรังสี UV เพิ่มมากขึ้นถึง 7 ชั่วโมง ความขรุขระบนพื้นผิวพอลิเมอร์ผสม PVME/PS (64/36 mol%) มีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ขณะเดียวกันการฉายรังสีที่ 8 ชั่วโมงกลับพบว่า

ความขรุขระบนพื้นผิวลดลงอย่างรวดเร็ว โดยพื้นผิวกลับมามีผิวที่ขรุขระอีกครั้งที่ 9 ชั่วโมงของการฉายรังสี



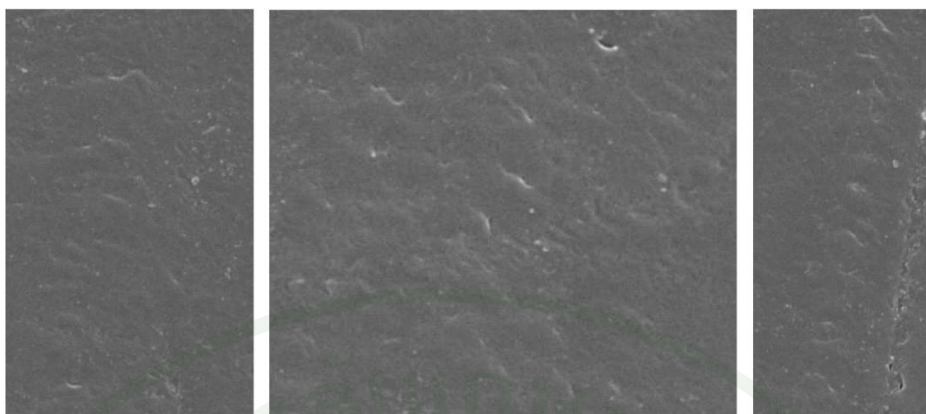
(ก)

(ข)



(ค)

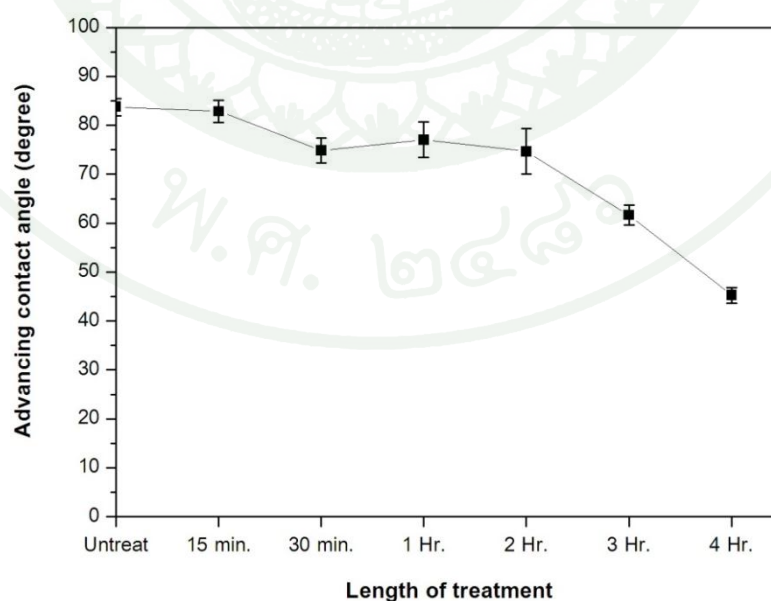
ภาพที่ 78 พื้นผิวของ ABS ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM (ก) พื้นผิวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (ข) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 2 ชั่วโมงและ (ค) พื้นผิวที่ผ่านการฉายรังสี 4 ชั่วโมง



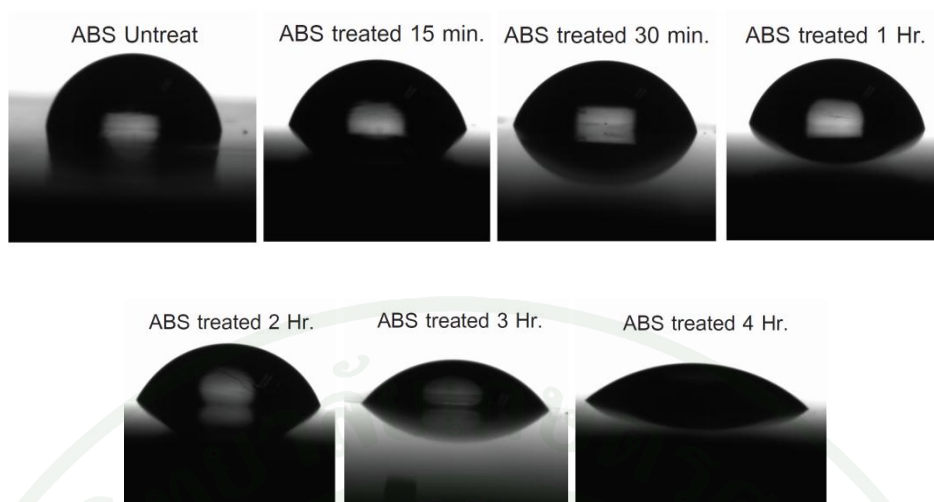
ภาพที่ 79 การเกิดคลื่นเล็กๆ (Ripple) บนพื้นผิวของ ABS ภายหลังจากฉายรังสีที่ 2 ชั่วโมง

3.4.6 การวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของ ABS ด้วยเครื่อง Contact angle

จากภาพที่ 80 พบว่าก่อนการฉายรังสี UV ค่ามุมสัมผัสเฉื่อยของ ABS เท่ากับ 83.75 องศา ซึ่งมีค่าต่ำกว่า HIPS (85.21 องศา) และ PS (91.97 องศา) เนื่องจากความมีขี้ของหมู่ไนไตรล์ในสายโซ่โมเลกุลของ ABS โดยภายหลังจากฉายรังสี UV การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงทั้ง ABS, HIPS และ PS ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง เนื่องจากการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้ (Polar) เกิดขึ้นบนพื้นผิว ผลการทดลองค่ามุมสัมผัสและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิว ดังภาพที่ 81 แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR



ภาพที่ 80 ค่ามุมสัมผัสเฉื่อย (Advancing contact angle) บนพื้นผิวของ ABS



ภาพที่ 81 ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิว ABS เมื่อใช้เวลาในการฉายรังสี UV ต่างๆ กัน

ตารางที่ 8 หมู่ฟังก์ชันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตบนวัสดุพื้น 4 ชนิด

หมู่ฟังก์ชัน (Functional groups)	Polypropylene (PP)	Polystyrene (PS)	High impact polystyrene (HIPS)	Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)
หมู่ไฮดรอกซิล	×	↑	↑	↑
หมู่คาร์บอนิล	พบการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย		↑	↑
พันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H)	×	↓	↓	↓
หมู่เมทิล ($-CH_3$)	×			
วงเบนซีนในโครงสร้างสไตรีน		×	×	×
พันธะคู่ในบิวทาไดอีน			↓	↓
ทราน-1,4 และไวนิล-1,2				
หมู่ไนไตรล์ ($-C\equiv N$)				×

เมื่อ × หมายถึง ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน

↑ หมายถึง เพิ่มขึ้น

↓ หมายถึง ลดลง

ตารางที่ 9 ผลการทดลองทั้งหมดของวัสดุพื้นทั้ง 4 ชนิดที่ได้รับผลกระทบจากการฉายรังสี UV

การวิเคราะห์		Polypropylene (PP)	Polystyrene (PS)	High impact polystyrene (HIPS)	Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)
อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (ที่สภาวะบรรยากาศ)	-OH/-CH	มีค่าต่ำ, ✕	เพิ่มสูงขึ้นถึงเวลาการฉายรังสีที่ 2 ชั่วโมง จากนั้นค่าจึงเริ่มคงที่		
	-C=O/-CH		เพิ่มสูงขึ้นถึงเวลาการฉายรังสีที่ 2 ชั่วโมง จากนั้นค่าจึงเริ่มคงที่		ยังมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาการฉายรังสีเพิ่มสูงขึ้น
อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง (สภาวะสุญญากาศ) ที่ 5 วันของการเก็บตัวอย่าง	-OH/-CH		มีค่าต่ำกว่าสภาวะบรรยากาศ		
	-C=O/-CH		เพิ่มสูงขึ้นถึงเวลาการฉายรังสีที่ 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงเริ่มคงที่ โดยค่าที่ได้ใกล้เคียงกับสภาวะบรรยากาศ		ยังมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาการฉายรังสีเพิ่มสูงขึ้น
การเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิว		✕	พื้นผิวเปลี่ยนแปลงเป็นสีเหลืองที่เข้มขึ้น ตามชั่วโมงของการฉายรังสี		
การวิเคราะห์เนื้อผิว	ชั้นผิว	✕	หมู่ -OH และ -C=O ↑, C-H ↓		
	ใต้ชั้นผิว	✕	หมู่ -OH และ -C=O ↓, C-H ↑		
ลักษณะทางกายภาพโดยรวม		พบรูพรุนขนาดเล็กที่การฉายรังสี UV 4 ชั่วโมง	พบจุดสีขาวที่การฉายรังสี UV 4 ชั่วโมง		พื้นผิวเกิดความขรุขระที่ 2 ชั่วโมง และกลับมาเรียบที่ 4 ชั่วโมง
ค่ามุมสัมผัส (Contact angle)		ลดต่ำลงเพียงเล็กน้อย	↓	↓	↓

เมื่อ ✕ หมายถึง ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน

↑ หมายถึง เพิ่มขึ้น และ ↓ หมายถึง ลดลง

4. ผลการวิเคราะห์การยึดติดของวัสดุพื้น (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยโอเวอร์โมลด้วยวัสดุซ้อนทับ (Over-molded materials)

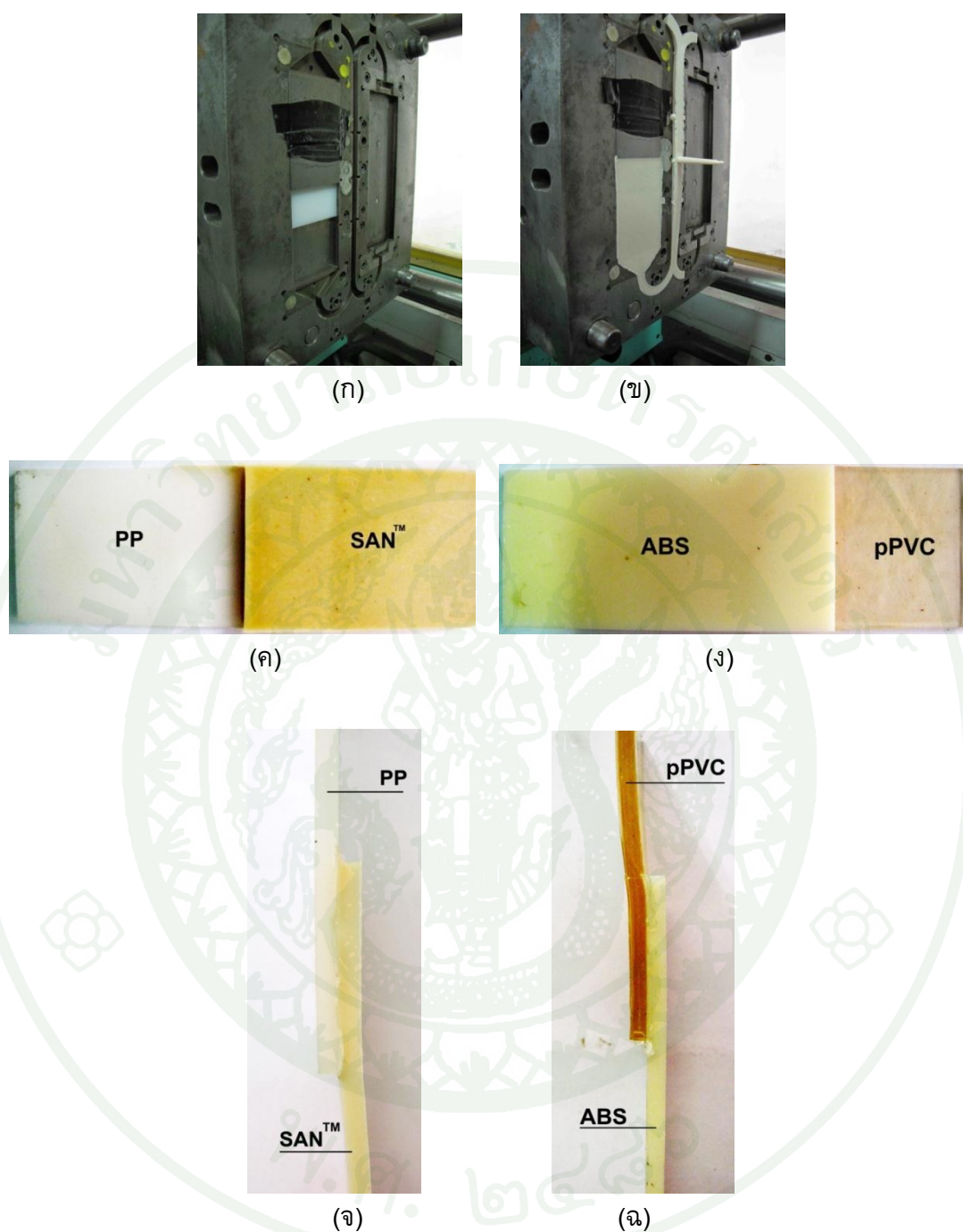
ผลการทดสอบการยึดติดของวัสดุพื้นทีโอเวอร์โมลลงบนวัสดุซ้อนทับ จากตารางที่ 10 พบว่าก่อนการฉายรังสี UV บนวัสดุพื้น การโอเวอร์โมลทั้งหมด 8 คู่ มีเพียง 2 คู่ทดสอบที่สามารถยึดติดกันได้คือ คู่ของ ABS/pPVC และคู่ของ PP/SAN™

ตารางที่ 10 ผลการยึดติดระหว่าง PP, PS, HIPS และ ABS ที่เป็นวัสดุพื้น (ก่อนและหลังการฉายรังสี) โดยมี pPVC และ SAN™ เป็นวัสดุซ้อนทับ

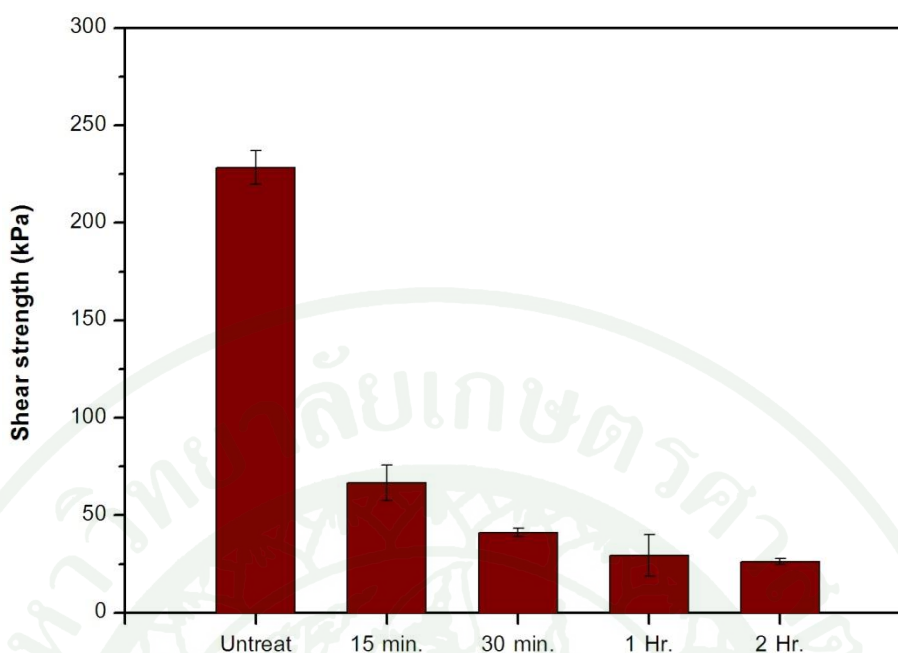
		วัสดุพื้น					วัสดุ ซ้อนทับ	
		ไม่ผ่านการ ฉายรังสี	ผ่านการฉายรังสี UV					
			15 นาที	30 นาที	45 นาที	90 นาที		120 นาที
PP	X	X	X	X	X	X	pPVC	
PS	X	X	X	X	X	X		
HIPS	X	X	X	X	X	X		
ABS	/	/	/	/	X	X		
PP	/	/	/	/	/	/	SAN™	
PS	X	X	X	X	X	X		
HIPS	X	X	X	X	X	X		
ABS	X	X	X	X	X	X		

หมายเหตุ เมื่อ / หมายถึงวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับติดกัน

x หมายถึงวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับไม่ติดกัน



ภาพที่ 82 (ก) วัสดุพื้นถูกใส่ในแม่พิมพ์พร้อมสำหรับการโอเวอร์โมล (ข) ภายหลังจากการโอเวอร์โมลด้วยวัสดุชั้นทับ (ค) Top view ของ PP และ SAN™ (ง) ด้านบนของ ABS กับ pPVC (จ) ด้านข้างของ PP และ SAN™ และ (ฉ) ด้านข้างของ ABS กับ pPVC



ภาพที่ 83 ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนของ ABS (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยโอเวอร์โมลบน pPVC

จากภาพที่ 83 ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนระหว่างพื้นผิว ABS กับ pPVC พบว่า ก่อนการฉายรังสี วัสดุทั้ง 2 มีความสามารถในการยึดติดที่ดี เนื่องจากความเข้ากันได้ขององค์ประกอบทางเคมีและความมีขั้วที่เกิดจากหมู่ไนโตรเจนใน ABS และอะตอมคลอรีนใน pPVC ทำให้ค่ามุมสัมผัสของ ABS (83.75 องศา) และ pPVC (81.40 องศา) ใกล้เคียงกัน ในทางตรงกันข้าม ภายหลังการฉายรังสี UV พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง เมื่อเวลาการฉายรังสีเพิ่มมากขึ้น เหตุผลสำคัญมาจาก 2 ปัจจัย ปัจจัยแรกคือความแตกต่างของความมีขั้วของ ABS และ pPVC โดยพบว่าเมื่อเวลาการฉายรังสีเพิ่มสูงขึ้น ค่ามุมสัมผัสของ ABS มีแนวโน้มที่ลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ค่ามุมสัมผัสของ pPVC ที่โอเวอร์โมลบนพื้นผิว ABS ยังคงมีค่าเท่าเดิมคือ 81.40 องศา ทำให้พื้นผิว ABS ที่ผ่านการฉายรังสี 4 ชั่วโมงโอเวอร์โมลบน pPVC ค่ามุมสัมผัสระหว่าง ABS และ pPVC มีความแตกต่างกันมากที่สุด จึงส่งผลให้ความแข็งแรงในการยึดติดต่ำที่สุด ส่วนในปัจจัยที่ 2 เกิดจากปฏิกิริยาการตัดขาดสายโซ่ (Chain scission) พอลิเมอร์ ภายหลังการฉายรังสี โดยสายโซ่พอลิเมอร์สั้นๆ ที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงและน้ำหนักโมเลกุลบนพื้นผิวมีแนวโน้มลดต่ำลง เกิดเป็นชั้นผิวที่อ่อนแอ (Weak thin layer) ขึ้นบนพื้นผิว โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Eve and Mohr (2009) ที่ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ของการตัดขาดของสายโซ่และความแข็งแรงบนพื้นผิวของ PMMA พบว่าภายหลังการฉายรังสี UV พื้นผิว PMMA มีความเปราะมากขึ้นพื้นผิวเกิดความขรุขระ เป็นหลุมและเกิดรอยแตกขนาดเล็ก น้ำหนักโมเลกุลบนพื้นผิวของพอลิเมอร์และสมบัติเชิงกลลดต่ำลง ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งหมด

เป็นผลจากการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุลของ พอลิเมอร์ภายหลังการฉายรังสี UV และงานวิจัยของ Eve and Mohr (2009), Nie *et al.* (1999), Murakami *et al.* (2002) และ Romero-Sanchez *et al.* (2005) ยังได้กล่าวถึง พื้นผิวพอลิเมอร์ที่ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำคือ “Low Molecular Weight Oxidized Material (LMWOM)”



ภาพที่ 84 การทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนระหว่าง PP และ SAN™ ที่เกิดการขาดที่บริเวณชิ้นงานของ SAN™

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของ SAN™ ด้วย FTIR พบว่าสายโซ่พอลิเมอร์ของ SAN™ มีโมเลกุลของโพรพิลีนอยู่ในสายโซ่โมเลกุลหลัก และโมเลกุลเป็นพวกที่ไม่มีขั้ว (Non-polar) ดังนั้นเมื่อ SAN™ ทำการโอเวอร์โมลงบน PP จากโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกันและความไม่มีขั้วของทั้ง 2 วัสดุ จึงส่งผลให้ PP และ SAN™ มีความสามารถในการยึดติดกันได้ดีและไม่ทำให้เกิดการหลุดลอกในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมดิง ซึ่งภายหลังการฉายรังสีบนพื้นผิว PP พบว่าเมื่อเวลาการฉายรังสีที่เพิ่มขึ้น วัสดุทั้งสองยังคงยึดติดกันได้ดี ไม่เกิดการหลุดลอก เหตุผลสำคัญเนื่องจากพื้นผิว PP เกิดการเปลี่ยนแปลงการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันที่น้อย ซึ่งอย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนระหว่าง PP (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) และ SAN™ ทางผู้วิจัยไม่สามารถนำค่ามาแสดงผลได้ เนื่องจากในขณะทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือน PP และ SAN™ ไม่เกิดการหลุดลอกที่ตำแหน่งรอยประสานของการโอเวอร์โมล แต่พบการขาดออกที่บริเวณชิ้นงานของ SAN™ ดังภาพที่ 84 ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงในการยึดติดระหว่าง PP กับ SAN™ มีค่าสูงกว่า SAN™ ณ ตำแหน่ง Grip

5. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างสองวัสดุพอลิเมอร์ โดยทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการฉายรังสี UV ซึ่งมีกาว EVA และ ECA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

งานวิจัยนี้ออกเหนือจากการทดสอบความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับแล้ว ยังได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคการฉายรังสี UV ในการปรับปรุงพื้นผิววัสดุพอลิเมอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกันโดยใช้กาว 2 ชนิด เป็นตัวเชื่อมประสาน ซึ่งได้แก่ เอทิลีนไวนิลอะซิเตท (Ethylene vinyl acetate, EVA) และเอทิลไซยาโนอะคริเลต (Ethyl cyanoacrylate, ECA) ซึ่งจากภาพที่ 85 เป็นตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการประกบวัสดุที่ 1 ด้วยวัสดุที่ 2 โดยมีกาวเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างสองวัสดุพอลิเมอร์ แสดงไว้ดังตารางที่ 11

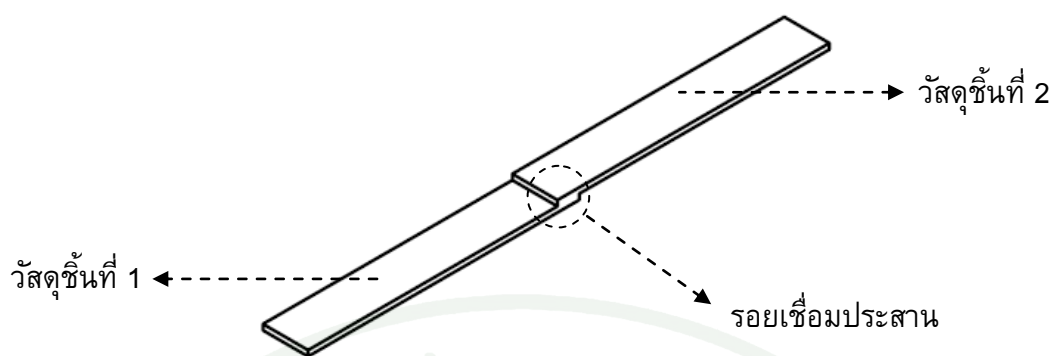
ตารางที่ 11 ผลการทดสอบความแข็งแรงในการยึดติดของคู่วัสดุพอลิเมอร์ โดยมีกาว EVA และ ECA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

No.	วัสดุที่ทำการทดสอบความแข็งแรงในการยึดติด			ผลการทดสอบ
	วัสดุชิ้นที่ 1	กาวที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน	วัสดุชิ้นที่ 2	
1	ABS Untreat	EVA	ABS Untreat	--
	ABS UV Treat	EVA	ABS UV Treat	--
2	ABS Untreat	ECA	ABS Untreat	↑
	ABS UV Treat	ECA	ABS UV Treat	↑
3	ABS Untreat	EVA	pPVC Untreat	--
	ABS UV Treat	EVA	pPVC UV Treat	--
4	ABS Untreat	ECA	pPVC Untreat	↓
	ABS UV Treat	ECA	pPVC UV Treat	↓

หมายเหตุ เมื่อ -- หมายถึง เกิดการหลุดลอกก่อนไปทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือน

↑ หมายถึง ความแข็งแรงการยึดติดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

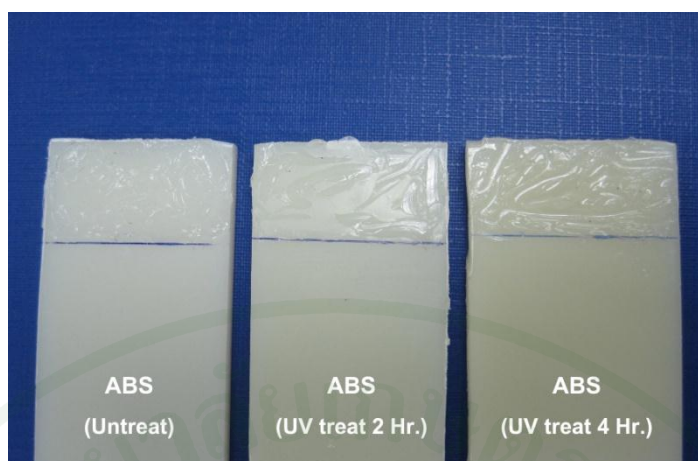
↓ หมายถึง ความแข็งแรงการยึดติดมีแนวโน้มลดต่ำลง



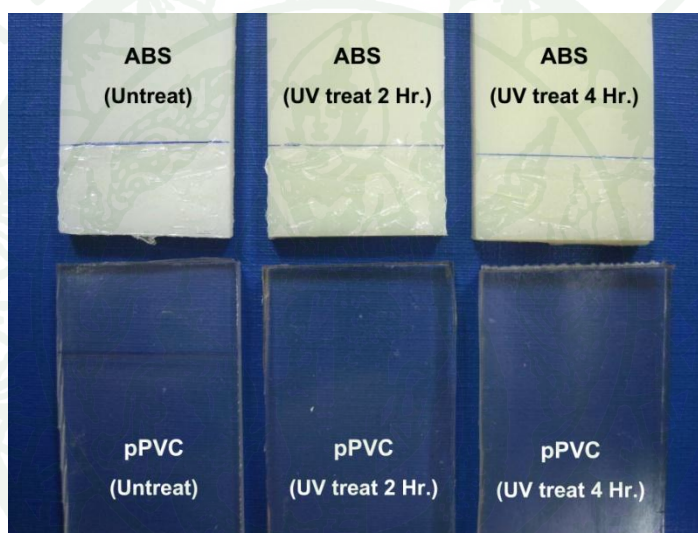
ภาพที่ 85 การประกบของวัสดุชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 โดยมีกาว EVA และ ECA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

5.1 การทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดระหว่าง ABS/ABS และ ABS/pPVC (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยใช้กาว EVA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

จากตารางที่ 11 แสดงผลการทดสอบการยึดติดระหว่าง ABS/ABS และ ABS/pPVC เมื่อใช้กาว EVA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน พบว่าที่ระยะเวลาการแข็งตัวของกาว 24 ชั่วโมง ก่อนการฉายรังสี UV ทั้ง ABS/ABS และ ABS/pPVC ไม่สามารถยึดติดกันและเกิดการหลุดลอกออกจากกันก่อนนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือน โดยปัจจัยที่ทำให้ความแข็งแรงในการยึดติดระหว่าง EVA กับ ABS หรือ pPVC ไม่ดีนั้น เนื่องจากกาว EVA ไม่สามารถเกิดพันธะในการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับ ABS และ pPVC ได้ (Landete and Martin, 2004; Adams, 2005) อีกทั้งจากการพิจารณาผลการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของ EVA ดังภาพที่ 87(ก) ยังพบความเข้ากันได้ทางเคมี (Chemical compatibility) ระหว่าง พอลิเมอร์กับกาวที่ต่ำ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุของการหลุดลอกระหว่างกาว EVA ในคู่ของ ABS/ABS และ ABS/pPVC ซึ่งอย่างไรก็ตามภายหลังจากการฉายรังสี UV บนพื้นผิว ABS/ABS และ ABS/pPVC ความมีขี้ตัวของ ABS เพิ่มขึ้น โดยกาว EVA มีแนวโน้มที่สามารถยึดติดกับพอลิเมอร์ทั้งสองได้ เนื่องจากความมีขี้ว่อนๆ ที่โมเลกุลของไวนิลอะซิเตท แต่ในความเป็นจริงแล้วยังพบการหลุดลอกออกระหว่างพอลิเมอร์กับกาวเช่นเดิม ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการหลุดลอกมากกว่าความมีขี้ที่เกิดขึ้น คือกาว EVA ไม่สามารถสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลกับพอลิ-เมอร์ทั้ง 2 ชนิดทั้งก่อนและหลังการฉายรังสี

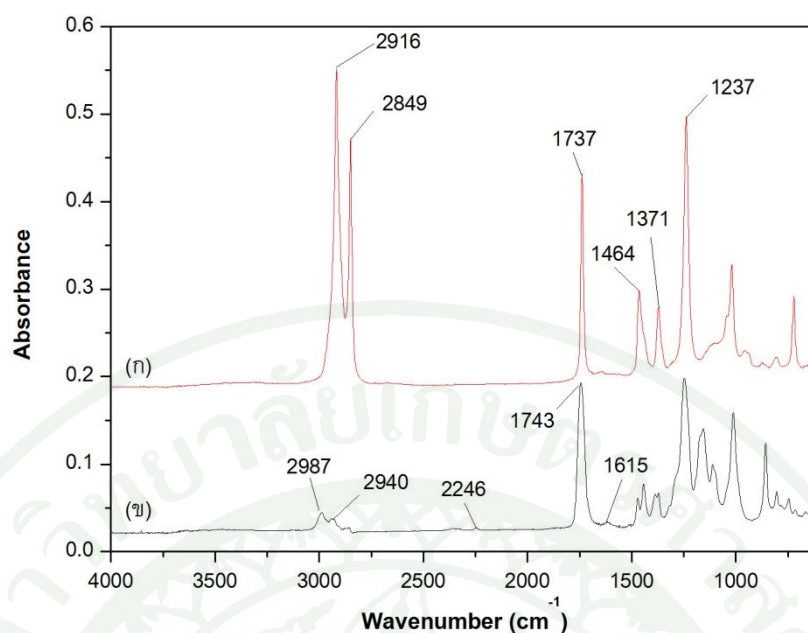


(ก)



(ข)

ภาพที่ 86 พื้นผิวที่เกิดการหลุดลอกของคู่ (ก) ABS/ABS และ (ข) ABS/pPVC โดยมีกาว EVA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน



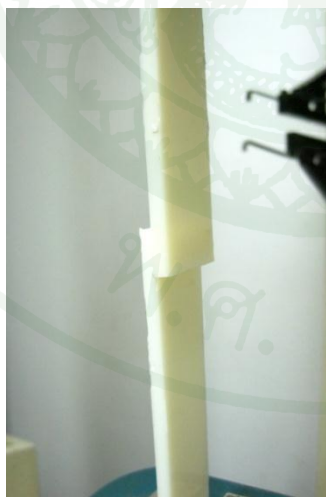
ภาพที่ 87 FTIR สเปกตรัมของ (ก) กาวเอทิลลีนไวนิลอะซิเตท (Ethylene vinyl acetate, EVA) และ (ข) กาวเอทิลไซยาโนอะครีเลต (Ethyl cyanoacrylate, ECA)

ตารางที่ 12 ตำแหน่งเลขคลื่นและองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของกาว EVA และ ECA ที่ปรากฏใน FT-IR สเปกตรัม

โครงสร้างทางเคมี	กาว	เลขคลื่น	หมู่ฟังก์ชัน
$\left[\text{CH}_2\text{CH}_2 \right]_n \left[\text{CH}_2\text{CH} \left(\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{O}=\text{C} \\ \\ \text{O} \end{array} \right) \right]_m$	Ethylene vinyl acetate (EVA)	2916 และ 2849 cm^{-1}	-CH ₂ -, -CH ₃ Stretching vibrations
		1737 cm^{-1}	-C=O Stretching vibrations
		1464 และ 1371 cm^{-1}	-CH ₃ Stretching vibrations
		1237 cm^{-1}	-C-O Stretching vibrations
$\text{H}_2\text{C}=\text{C}(\text{C}\equiv\text{N})\text{C}(=\text{O})\text{OCH}_2\text{CH}_3$	Ethyl cyanoacrylate (ECA)	2987 และ 2940 cm^{-1}	C-H Stretching vibrations (Symmetric และ Asymmetric) ของหมู่ -CH ₂ - และ -CH ₃
		2246 cm^{-1}	หมู่ไนไตรล์ (-C≡N) vibrations
		1747 cm^{-1}	-C=O Stretching vibrations
		1615 cm^{-1}	C=C Stretching vibrations

5.2 การทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดระหว่าง ABS/ABS และ ABS/pPVC (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยใช้กาว ECA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

ผลทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ได้จาก ABS/ABS เมื่อใช้กาว ECA เป็นวัสดุเชื่อมประสานดังแสดงในภาพที่ 89 พบว่า ABS ที่ไม่ผ่านการฉายรังสี UV มีความสามารถในการยึดติดที่ดี เนื่องจากความมีขี้ของกาว ECA โดยภายในโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยหมู่ไนไตรล์ซึ่งพบได้เช่นเดียวกับในโครงสร้างของ ABS จึงสามารถสร้างพันธะทุติยภูมิ (Secondary bond) ในลักษณะของแรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole forces) ร่วมกันระหว่างพื้นผิว ABS กับกาว ECA ดังภาพที่ 90 (Adams, 2005; Packham, 2005) นอกจากนี้จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าสมบัติการยึดติดระหว่าง ABS มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก เมื่อเวลาในการฉายรังสีเพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนมีค่าสูงถึง 3915.50 kPa ในขณะที่ ABS ที่ไม่ผ่านการฉายรังสี มีค่าเท่ากับ 2242.5 kPa เหตุผลสำคัญในการเพิ่มขึ้นของสมบัติการยึดติดระหว่าง ABS และกาว ECA นอกเหนือจากความเข้ากันได้ทางเคมี (Chemical compatibility) และการเกิดแรงไดโพล-ไดโพลระหว่างพื้นผิว ABS และกาว ECA ยังมีสาเหตุมาจากหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้บนพื้นผิว ABS ภายหลังการฉายรังสี UV สามารถทำให้มุมสัมผัสระหว่างกาว ECA บนพื้นผิว ABS มีแนวโน้มที่ลดต่ำลง ส่งผลให้ความสามารถในการยึดติดดีขึ้น รวมทั้งหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้ ประเภทไฮดรอกซิล มีความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนได้กับโมเลกุลของกาว ECA แสดงดังภาพที่ 91 ดังนั้นค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนจึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ภายหลังการฉายรังสี UV

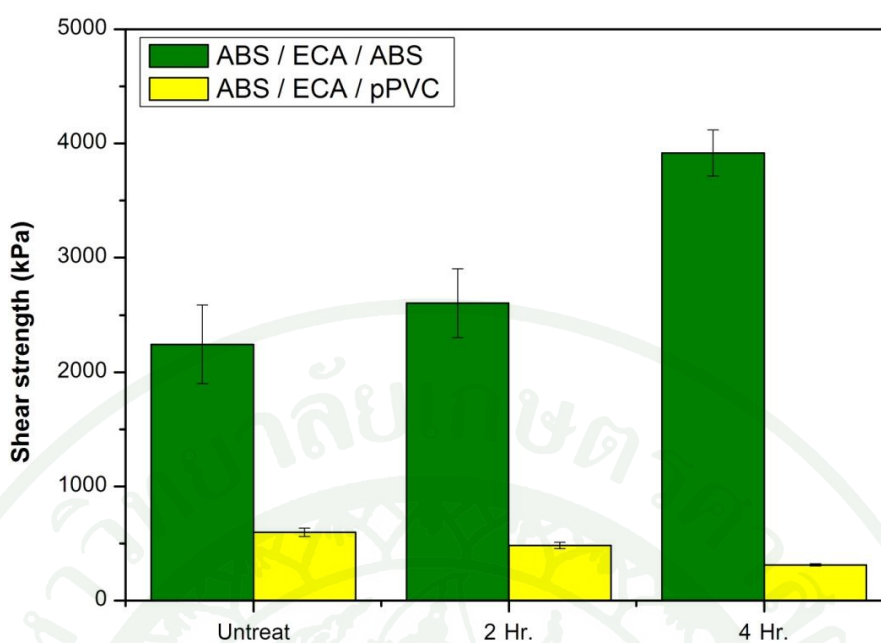


(ก)

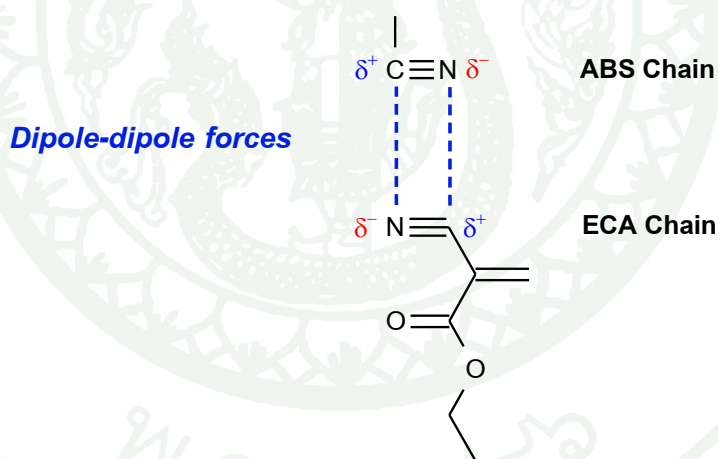


(ข)

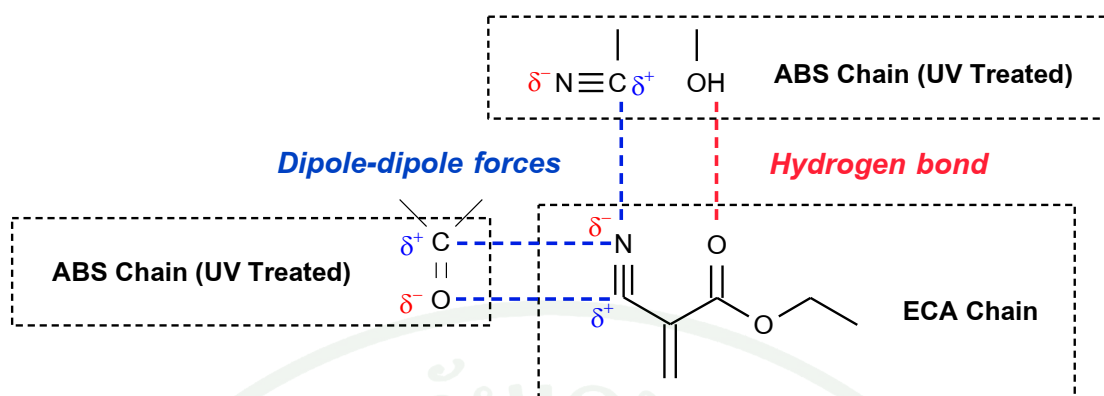
ภาพที่ 88 ชิ้นงาน (ก) ABS/ABS และ (ข) ABS/pPVC ขณะทำการทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือน โดยมีกาว ECA เป็นตัวเชื่อมประสาน



ภาพที่ 89 ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนของ ABS/ABS และ ABS/pPVC ก่อนและหลังการฉายรังสี UV ที่แตกต่างกัน โดยมีกาว ECA เป็นตัวเชื่อมประสาน



ภาพที่ 90 แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole forces) ที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว ABS และกาว ECA



ภาพที่ 91 พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) และแรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole forces) ที่เกิดขึ้นบนระหว่างพื้นผิว ABS ที่ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตและกาว ECA

ในทางตรงกันข้ามค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ได้จาก ABS/pPVC เมื่อใช้การเป็นวัสดุเชื่อมประสาน แสดงในภาพที่ 89 พบว่า ABS/pPVC ที่ไม่ผ่านการฉายรังสี UV มีความสามารถในการยึดติดกันได้ดี แต่มีค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ABS/ABS เนื่องจากกาว ECA ขณะที่ทำการยึดติดกับโมเลกุลของ ABS ความแข็งแรงในการยึดติดทำได้ดี แต่เมื่อยึดติดกับ pPVC ที่นำมาประกบด้วยนั้น ECA มีความสามารถในการเกิดแรงไดโพล-ไดโพลบนพื้นผิว pPVC ได้น้อยกว่าพื้นผิว ABS รวมทั้ง pPVC ความเข้ากันทางเคมีกับกาว ECA ที่ต่ำ ความแข็งแรงการยึดติดด้านกาว ECA และ pPVC จึงทำได้ไม่ดี ความแข็งแรงโดยรวมของ ABS/ECA/pPVC จึงต่ำ ซึ่งภายหลังจากการฉายรังสี UV บนพื้นผิว ABS และ pPVC ยังพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง เหตุผลสำคัญมาจากภายหลังจากการฉายรังสี UV บนพื้นผิว ABS ความมีขั้วเพิ่มสูงขึ้น ค่ามุมสัมผัสลดต่ำลง ความแข็งแรงในการยึดติดกับกาว ECA สามารถทำได้ดีขึ้น แต่ขณะเดียวกันค่ามุมสัมผัสของ pPVC เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความมีขั้วของคลอรีนอะตอมภายในโครงสร้างของ pPVC สามารถเกิดแรงไดโพล-ไดโพลระหว่างโมเลกุลได้เช่นเดียวกับหมู่ไนไตรล์ใน ABS อิทธิพลของการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเกิดขึ้นได้น้อยใน pPVC ดังนั้นความแตกต่างจากค่ามุมสัมผัสของ ABS และ pPVC รวมทั้งความเข้ากันได้ทางเคมีที่ไม่ดีระหว่าง ABS/pPVC และกาว ECA จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนลดต่ำลง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ผลกระทบของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตบนวัสดุพื้นทั้ง 4 ชนิด

1.1 พันธะคูในวงเบนซีนของ PS และ HIPS รวมถึงบิวทาไดอีนที่พบใน HIPS และ ABS เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการดูดแสง UV ได้ดี ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงได้ง่ายและสีของพื้นผิวมีแนวโน้มที่เข้มขึ้นตามระยะเวลาการฉายรังสีที่เพิ่มสูงขึ้น โดยค่าการดูดกลืนแสงของ $-OH$ และ $-C=O$ สำหรับ PS, HIPS และ ABS มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีหมู่ข้างบนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น ได้แก่หมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิล ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสลดลง สมบัติด้านความเปียก (Wettability) ของพื้นผิวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ เพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีข้างบนพื้นผิวนั้น ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงของพันธะ $-CH$ ลดต่ำลง ในขณะที่อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงทั้ง $-OH/-CH$ และ $-C=O/-CH$ ของ PP ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน เนื่องจากโครงสร้าง PP ไม่มีหมู่ที่วงไวต่อรังสี UV การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงจึงเกิดขึ้นได้น้อย

1.2 ใน PS, HIPS และ ABS การเก็บตัวอย่างที่สภาวะสุญญากาศ พื้นผิวมีโอกาสสัมผัสกับอากาศได้น้อย ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของอนุมูลอิสระที่หลงเหลือในสายโซ่พอลิเมอร์จึงลดต่ำลง ดังนั้นอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของการเก็บตัวอย่างที่สภาวะสุญญากาศจึงต่ำกว่าสภาวะบรรยากาศปกติ

1.3 ใน ABS มีปริมาณบิวทาไดอีนมากกว่า HIPS ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงของ ABS จึงสูงกว่า HIPS

1.4 พลังงานในการสลายพันธะที่สูงของหมู่ไนไตรล์ใน ABS และอะตอมคลอรีนใน pPVC ที่มีความสามารถในการเกิดแรงไดโพล-ไดโพลระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้การเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นได้ยาก

2. การวิเคราะห์การยึดติดของวัสดุพื้น (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดย โอเวอร์โมล ด้วยวัสดุซ้อนทับ (Over-molded materials)

ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนระหว่าง ABS และ pPVC มีแนวโน้มต่ำลง ตามระยะเวลาของการฉายรังสีบนพื้นผิว ABS ที่เพิ่มขึ้น โดยนอกเหนือจากเหตุผลสำคัญของสภาพผิวที่แตกต่างกันมากขึ้นแล้ว ยังเกิดจากการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ เพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันใหม่ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลบนพื้นผิวมีแนวโน้มลดต่ำลง ความแข็งแรงในการยึดติดระหว่าง ABS กับ pPVC จึงต่ำลงด้วย สำหรับค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนระหว่าง PP และ SAN™ ปัจจัยของโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกันและความไม่มีขั้วที่ใกล้เคียงกันของทั้งสองวัสดุ ทำให้พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีความเข้ากันทางเคมี อย่างไรก็ตาม การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงที่ต่ำบนพื้นผิว PP ทำให้ก่อนและหลังการฉายรังสี PP จึงยังคงสามารถยึดติดกันกับ SAN™ ได้ดี

3. การวิเคราะห์ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างสองวัสดุพอลิเมอร์ โดยทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการฉายรังสี UV ซึ่งมีกาว EVA และ ECA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

กาว EVA ไม่สามารถยึดติดกับคู่ของ ABS/ABS และ ABS/pPVC ได้ทั้งในกรณีก่อนและหลังการฉายรังสี UV เนื่องจากกาว EVA ไม่สามารถเกิดพันธะในการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้ง ABS และ pPVC ได้ รวมทั้งพอลิเมอร์ทั้งสองและกาว EVA ยังมีความเข้ากันได้ทางเคมีที่ต่ำ แต่เมื่อใช้กาว ECA ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง พบว่าความแข็งแรงในการยึดติดของคู่ ABS/ABS มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการฉายรังสี UV ยาวนานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิว ABS มีความขั้วเพิ่มสูงขึ้น ความสามารถในการเกิดพันธะทุติยภูมิระหว่าง ABS และกาว ECA เพิ่มขึ้น รวมทั้งมุมสัมผัสระหว่างกาว ECA บนพื้นผิว ABS ลดต่ำลง ส่งผลให้ความสามารถในการยึดติดดีขึ้น ในขณะที่คู่ ABS/pPVC กาว ECA มีความสามารถในการยึดติดที่ต่ำกว่าคู่ของ ABS/ABS เนื่องจากพันธะในการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของกาว ECA กับ pPVC ต่ำกว่า ABS และความเข้ากันได้ทางเคมีที่ไม่ดีระหว่างกาว ECA และ pPVC ซึ่งภายหลังจากการฉายรังสี UV บนคู่ ABS/pPVC ทำให้เกิดความแตกต่างของความขั้ว โดยค่ามุมสัมผัสของ ABS ลดต่ำลงเรื่อยๆ ตามชั่วโมงของการฉายรังสี ขณะที่ pPVC ค่ามุมสัมผัสลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากโครงสร้าง pPVC ได้รับอิทธิพลจากการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันน้อย ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนของคู่ ABS/pPVC กับกาว ECA จึงมีแนวโน้มที่ลดลง

ข้อเสนอแนะ

1. การเติมตัวริเริ่มที่ว่องไวต่อแสง ช่วยทำให้เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสง ซึ่งอาจช่วยลดจำนวนชั่วโมงในการฉายรังสีลงได้ หรือมีปริมาณหมู่ความมีขั้วที่เพิ่มขึ้น
2. การพัฒนาระบบการฉายรังสีให้ดีขึ้น โดยอาจทำในระบบที่สูญญากาศ มีแผงป้องกันหลอด และสามารถฉีดแก๊สต่างๆ เข้าไป เช่นเดียวกับระบบของพลาสมาได้ เนื่องจากการเปลี่ยนชนิดของแก๊สในระบบ การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวและการสร้างหมู่ฟังก์ชันอาจเกิดขึ้นตามชนิดของแก๊ส ซึ่งสมบัติทางเคมีและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิว มีแนวโน้มที่เกิดขึ้นตามชนิดของแก๊สด้วย
3. การตรวจวิเคราะห์พื้นผิว อาจจำเป็นที่ต้องใช้ AFM ซึ่งระดับสเกลของการตรวจวิเคราะห์สามารถทำได้ถึงระดับของนาโนเมตร ซึ่งทำให้มีความแม่นยำในการตรวจสอบพื้นผิวภายหลังการฉายรังสีมากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

แม่น อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา และธรรมนุญ อุดมมัน. 2551. วัสดุวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1
สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล, กรุงเทพมหานคร.

ศูนย์รักษาสายตา โรงพยาบาลศิริราช. 2553. เครื่องเลเซอร์เย็น (Excimer Laser). แหล่งที่มา:
http://silasikbkk.com/technology_star_s4.php, 2553.

สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์บูตเน็ต,
กรุงเทพมหานคร.

สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2548. เทคโนโลยีพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์บูตเน็ต,
กรุงเทพมหานคร.

สถานวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
2552. เอ็กซ์ซิเมอร์และการประยุกต์การใช้งาน. แหล่งที่มา:
<http://www.sc.psu.ac.th/Units/PR/Event/244.html>, 12 ตุลาคม 2552.

Adams, R.D. 2005. **Adhesive Bonding**. Woodhead Publishing Limited, England.

Ajbani, M., C. Kiehl and T.F.E. Materne. 2006. **Overmolded Grip**. U.S. Patents 7150919.

ASTM D 3163. 2008. Standard Test Method for Determining Strength of Adhesively
Bonded Rigid Plastic Lap-Shear Joints in Shear by Tension Loading. **Annual
Book of ASTM Standards**. 15.06.

ASTM D3164. 2011. Standard Test Method for Strength Properties of Adhesively Bonded
Plastic Lap-Shear Sandwich Joints in Shear by Tension Loading. **Annual Book of
ASTM Standards**. 15.06.

ASTM G53. 2000. Standard Practice for Operating Light- and Water-Exposure Apparatus
(Fluorescent UV-Condensation Type) for Exposure of Nonmetallic Materials.
Annual Book of ASTM Standards. 14.04.

Chi-Ming, C. 1994. **Polymer Surface Modification and Characterization**. Hanser Publishers, New York.

CustomPartNet. 2009. **Injection Molding Machine**. Available Source:
<http://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>, October 2011.

Daniloska V., J. Blazevska-Gilev, V. Dimova, R. Fajgar and R. Tomovska. 2010. UV light induced surface modification of HDPE films with bioactive compounds. **Applied Surface Science** 256: 2276-2283.

Davidson, M.R., S.A. Mitchell and R.H. Bradley. 2005. Surface studies of low molecular weight photolysis products from UV-ozone oxidized polystyrene. **Surface Science** 581: 169-177.

Eve, S. and J. Mohr. 2009. Study of the surface modification of the PMMA by UV-radiation. **Procedia Engineering** 1: 237-240.

Fabio, G., M. Marco and O. Ernesto. 1994. **Polymer Surfaces from Physics to Technology**. John Wiley & Sons Ltd., England.

Francisco V., A. Ribes-Greus and S. Karlsson. 2006. Degradation of recycled high-impact polystyrene. Simulation by reprocessing and thermo-oxidation. **Polymer Degradation and Stability** 91: 2163-2170.

Girardeaux, C., Y. Idrissi, J.J. Pireaux and R. Caudano. 1996. Etching and functionalization of a Fluorocarbon Polymer by UV Laser treatment. **Applied Surface Science** 96-98: 586-590.

Grassie, N. and S. Gerald. 1985. **Polymer Degradation and Stabilisation**. Cambridge University Press, New York.

- Jayesh, G. Bokria and S. Shulamith. 2002. Spatial effects in the photodegradation of poly(acrylonitrile-butadiene-styrene): a study by ATR-FTIR. **Polymer** 43, 3239-3246.
- Kaczmarek H., J. Kowalonek, A. Szalla and A. Sionkowska. 2002. Surface modification of thin polymeric films by air-plasma or UV-irradiation. **Surface Science** 507-510: 883-888.
- Kinloch, A.J. 1990. **Adhesion and Adhesives: Science and Technology**. Chapman and Hall, London.
- Kowalonek J., H. Kaczmarek and A. Dabrowska. 2010. Air plasma or UV-irradiation applied to surface modification of pectin/poly(vinyl alcohol) blends. **Applied Surface Science** 257: 325-331.
- Landete-Ruiz, M. and J. Martin-Martinez. 2004. Surface modification of EVA copolymer by UV treatment. **International Journal of Adhesion & Adhesives** 25, 139-145.
- Lee L. H. 1991. **Adhesive Bonding**. Plenum Press, New York.
- Magali Piton and Agnes Rivaton. 1997. Photo-oxidation of ABS at long wavelengths. **Polymer Degradation and Stability** 55, 147-157.
- Mailhot, B., S. Morlat and J.-L. Gardette. 2000. Photo-oxidation of blends of polystyrene and poly(vinyl methyl ether): FTIR and AFM studies. **Polymer** 41, 1981-1988.
- Martin, O., C. Roman, R. Miroslav, V. Vincent, C. Sophie and F. Frederic. 2005. Structure evolution of α - and β -polypropylenes upon UV irradiation: A multiscale comparison. **Polymer Degradation and Stability** 88, 532-539.
- Mathieson, I. and R.H. Bradley. 1995. Improved adhesion to polymer by UV/ozone surface oxidation. **Adhesion and Adhesives** 16, 29-31.

- Murakami, T., Y. Fukushima, Y. Hirano, Y. Tokuoka, M. Takahashi and N. Kawashima. 2002. Surface modification of polystyrene and poly(methyl methacrylate) by active oxygen treatment. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces** 29: 171-179.
- Nie, H.-Y., M.J. Walzak, B. Berno and N.S. McIntyre. 1999. Atomic force microscopy study of polypropylene surfaces treated by UV and ozone exposure: modification of morphology and adhesion force. **Applied Surface Science** 144-145, 627-632.
- Oosterom, R., T.J. Ahmed, J.A. Poullis and H.E.N. Bersee. 2006. Adhesion performance of UHMWPE after different surface modification techniques. **Medical Engineering and Physics** 28 323-330.
- Packham, D.E. 2005. **Handbook of Adhesion**. John Wiley & Sons, Bath.
- Potsch, G. and M. Walter. 2007. **Injection Molding**. Hanser Gardner Publications, England.
- PVC Europe. 2010. **Intermolecular Bonds between DOP and PVC**. Available Source: www.pvc.org. October 2010.
- Romero-Sanchez, M.D., M. Mercedes Pastor-Blas, J.M. Martin-Martinez and M.J. Walzak. 2005. Addition of ozone in the UV radiation treatment of a synthetic styrene-butadiene-styrene (SBS) rubber. **International Journal of Adhesion & Adhesives** 25, 358-370.
- Rabek, Jan. F. 1995. **Polymer Photodegradation Mechanisms and Experimental Methods**. Chapman and Hall, London.
- Rutland Plastics Limited. 2011. **Injection Molding Machine**. Available Source: http://www.rutlandplastics.co.uk/moulding_machine.shtml, October 2011.
- Rytlewski, P. and M. Zenkiewicz. 2009. Laser-induced surface modification of polystyrene. **Applied Surface Science** 256: 857-861.

Santa Clara University – Engineering Design Center. 2006. **Injection Molding**. Available Source: http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/process, October 2011.

Sina Ebnesajjad. 2008. **Adhesives Technology Handbook (2nd Edition)**. William Andrew Inc., New York.

Singh B. and N. Sharma. 2008. Mechanistic implications of plastic degradation. **Polymer Degradation and Stability** 93, 561-584.

Sionkowska, A., H. Kaczmarek, M. Wisniewski, J. Skopinska, S. Lazare and V. Tokarev. 2006. The influence of UV irradiation on the surface of chitosan films. **Surface Science** 600: 3775-3779.

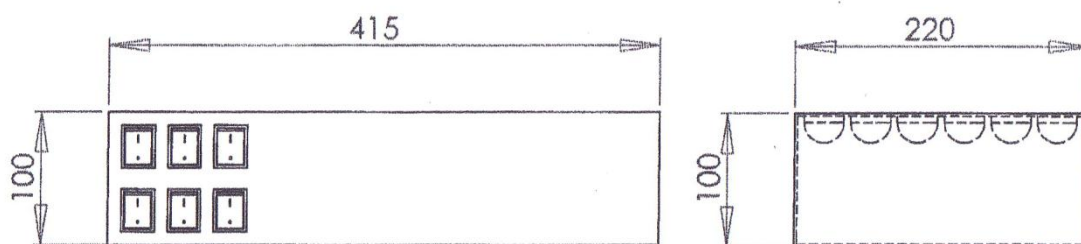
The University of Houston. 2011. **Spectroscopy**. Available Source: <http://www.ine.uh.edu/research/spectroscopy/index.php>, October 2011.

Todd Grimm. 2009. **The Overmolding Process**, Objet Geometries Ltd. London.



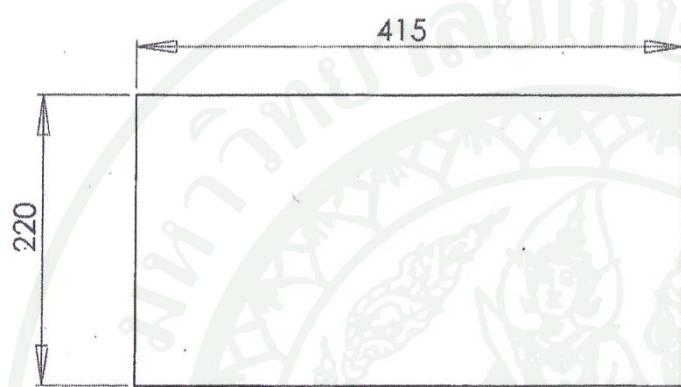
ภาคผนวก



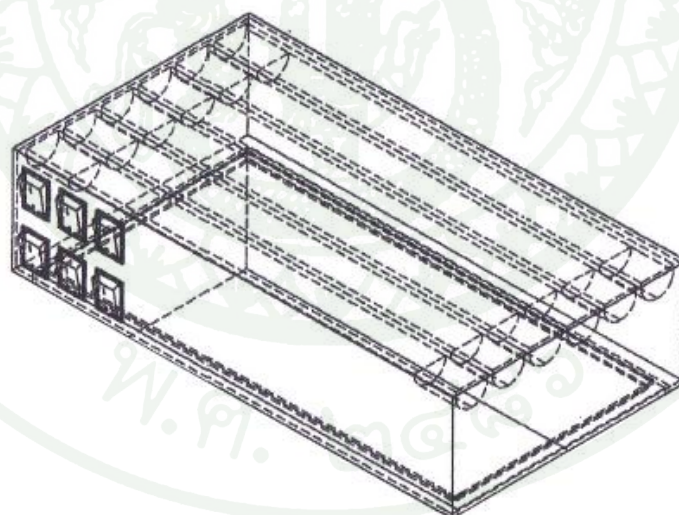


(ก)

(ข)

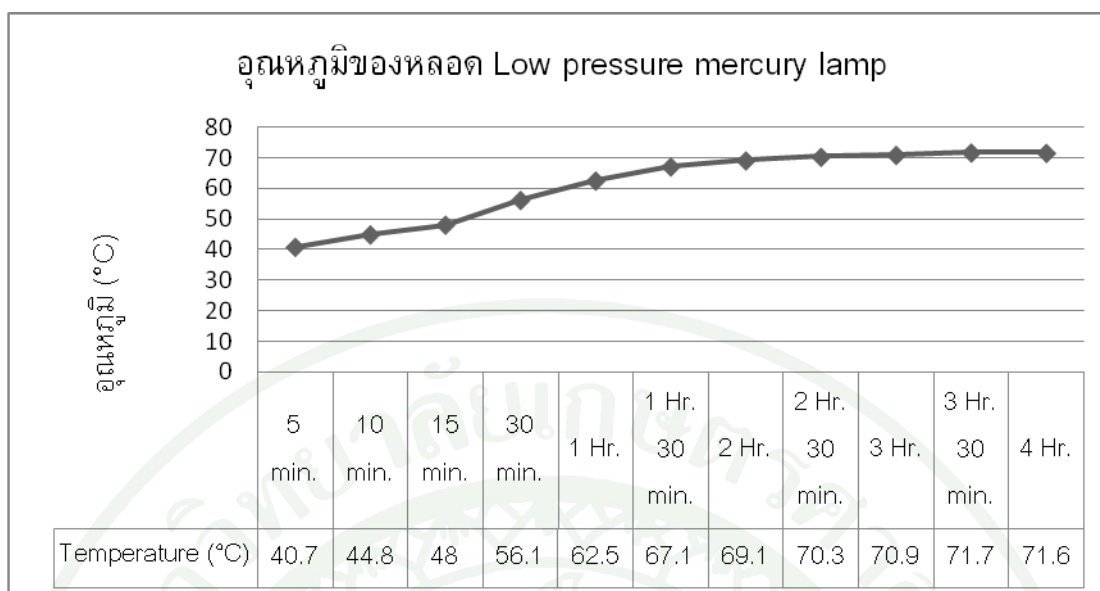


(ค)



(ง)

ภาพผนวกที่ ก1 การออกแบบเครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต (ก) ด้านหน้าเครื่อง (Front view), (ข) ด้านข้างเครื่อง (Side view), (ค) ด้านบนเครื่อง (Top view) (หน่วยเป็น มิลลิเมตร, mm) และ (ง) รูปเครื่องฉายรังสีอัลตราไวโอเลต



ภาพผนวกที่ ก2 อุณหภูมิภายในของหลอดเมอร์คิวรี

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลหลอดเมอร์คิวรีที่ใช้ในงานวิจัย

กำลังไฟฟ้า	7.2 วัตต์
กระแสไฟฟ้า	0.145 แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	57 โวลต์
ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยออกมา	253.7 นาโนเมตร
ปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่ออกมา (UV output)	2.2 วัตต์
อายุการใช้งานเฉลี่ย	8000 ชั่วโมง



ภาคผนวก ข
มาตรฐาน ASTM G53

Standard Practice for Operating Light- and Water-Exposure Apparatus (Fluorescent UV-Condensation Type) for Exposure of Nonmetallic Materials¹

This standard is issued under the fixed designation G 53; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This practice covers the basic principles and operating procedures for using fluorescent ultraviolet (UV) and condensation apparatus to simulate the deterioration caused by sunlight and water as rain or dew.

1.2 This practice is limited to the method of obtaining, measuring, and controlling the conditions and procedures of exposure. It does not specify the exposure conditions best suited for the material to be tested. Specimen preparation and evaluation of the results are covered in ASTM test methods or specifications for specific materials.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.4 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

E 220 Method for Calibration of Thermocouples by Comparison, Techniques²

G 7 Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials³

2.2 CIE Standard:

No. 20 Recommendations for the Integrated Irradiance and the Spectral Distribution of Simulated Solar Radiation for Testing Purposes⁴

3. Description of Terms Specific to This Standard

3.1 **irradiance**—the radiation incident on a surface expressed in W/m^2 . Irradiance is the total of the incident radiation at all wavelengths. Forty watt fluorescent lamps of the UV-B and UV-A types generate similar amounts of

irradiance. However, since this irradiance is distributed at different wavelengths, the photochemical effects caused by these different lamps vary greatly. Therefore, irradiance should not be used to compare UV light sources.

3.2 **spectral irradiance**—distribution of irradiance as a function of wavelength. It is expressed in W/m^2 per wavelength band. The spectral irradiance of sunlight is often shown as W/m^2 per 10 nm band. The spectral irradiance of fluorescent UV lamps should be shown in bands 1 or 2 nm wide. Spectral irradiance is the proper method for comparing sources with different energy distributions.

3.3 **spectral energy distribution (SED)**—general term for the characterization of the amount of radiation present at each wavelength. SEDs can be expressed by power in watts, irradiance in W/m^2 , or energy in joules. The shape of the SED would be identical in all of these units. Fluorescent lamps are frequently described by relative SEDs which show the amount of radiation at each wavelength as a percentage of the amount of radiation at the peak wavelength. Fig. 1 is a relative SED.

3.4 **ultraviolet regions**—CIE Publication No. 20 (1972) divides the ultraviolet spectrum into three regions: UV-A, radiation in wavelengths between 315 nm and 400 nm; UV-B, radiation in wavelengths between 280 nm and 315 nm; and UV-C, radiation in wavelengths shorter than 280 nm.

3.5 **fluorescent UV lamp**—lamp in which radiation at 254 nm from a low-pressure mercury arc is transformed to longer wavelength UV by a phosphor. The spectral energy distribution of a fluorescent UV lamp is determined by the emission

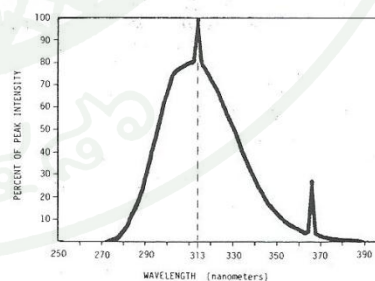


FIG. 1 Typical Relative SED of UV-B Lamp

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G-3 on Durability of Nonmetallic Materials, and is the direct responsibility of Subcommittee G03.03 on Simulated and Controlled Environmental Tests.

Current edition approved July 29, 1988. Published September 1988. Originally published as G 53 – 77. Last previous edition G 53 – 84.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.03.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

⁴ Available from Secretary, U.S. National Committee, CIE, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD 20899.



spectrum of the phosphor and the UV transmission of the glass tube.

4. Summary of Practice

4.1 Specimens are alternately exposed to ultraviolet light alone and to condensation alone in a repetitive cycle.

4.2 The UV source is an array of fluorescent lamps, with lamp emission concentrated in the UV range.

4.3 Condensation is produced by exposing the test surface to a heated, saturated mixture of air and water vapor, while the reverse side of the test specimen is exposed to the cooling influence of ambient room air.

4.4 The exposure condition may be varied by selection of: the fluorescent UV lamp; the timing of the UV and condensation exposure; the temperature of UV exposure; and the temperature of condensation exposure.

5. Significance and Use

5.1 The use of the apparatus under this practice is intended to simulate the deterioration caused by water as rain or dew and the ultraviolet energy in sunlight. It is not intended to simulate the deterioration caused by localized weather phenomena, such as atmospheric pollution, biological attack, and salt water exposure.

5.2 Variation in results may be expected when operating conditions are varied within the accepted limits of this practice. Therefore, no reference shall be made to results from use of this practice unless accompanied by a report detailing the specific operating conditions in conformance with Section 11.

5.3 Any report correlating results from use of this practice to results from a period of natural weathering shall specify in detail the conditions of natural exposure, since sunlight and water effects upon materials exposed to the weather will vary from year to year and also vary with location, latitude, time of year, temperature, proximity to water sources, etc.

NOTE 1—Practice G 7 lists the information required to describe a particular condition of outdoor exposure.

5.4 Correlations established and reported in conformance with 5.2 and 5.3 shall not be extrapolated to other test conditions permitted by this practice, to other conditions of natural exposure, or to materials other than those tested.

6. Apparatus⁵

6.1 *Test Chamber*, (see Fig. 2) constructed of corrosion-resistant materials enclosing eight fluorescent UV lamps, a heated water pan, test specimen racks, and provisions for controlling and indicating operating times and temperatures.

6.2 *Lamps*, rapid start, medium bipin fluorescent UV lamps with a length of 1220 mm, and a nominal rating of 40 W when operated from a ballast providing a controlled current of 430 mA at 102V.

6.2.1 Unless otherwise specified, the lamps shall be UV-B lamps with a peak emission at 313 nm and a spectral energy distribution as shown in Fig. 1.

⁵ Apparatus and lamps from Q-Panel Co., 26200 First St., Cleveland, OH 44145, and from Atlas Electric Devices Co., 4114 N. Ravenswood Ave., Chicago, IL 60613, have been found satisfactory.

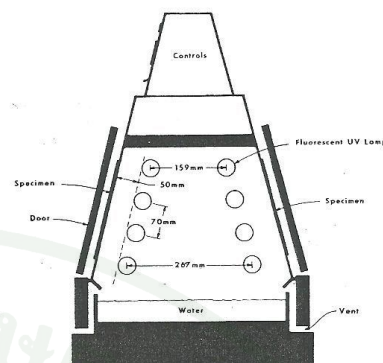


FIG. 2 Apparatus Schematic Cross Section

6.2.2 Other fluorescent UV lamps meeting the size and electrical characteristics in 6.2 may be used, provided that the lamp and spectral energy distribution are reported in conformance with Section 11.

6.3 *Lamp Spacing and Arrangement*—The lamps shall be mounted in two banks of four lamps each as shown in Fig. 2. The lamps in each bank shall be mounted parallel in a flat plane on 70-mm centers.

6.4 *Specimen Mounting and Arrangement*—The test specimens shall be mounted in stationary racks with the plane of the test surface parallel to the plane of the lamps at a distance of 50 mm from the nearest surface of the lamps, as shown in Fig. 2.

6.4.1 The test specimens shall be exposed within an area 210 mm in height by 900 mm wide on each side of the apparatus located as shown in Fig. 4.

NOTE 2—It is possible to mount specimens above, below, and beside the 210 by 900 mm area, but specimens so mounted will be exposed to lower UV intensities.

6.5 *Condensation Mechanism*—Water vapor shall be generated by heating a water pan extending under the entire sample area and containing a minimum water depth of 25 mm. Specimen racks and the test specimens themselves shall constitute the side walls of the chamber. The back side of the

LAMP ROTATION

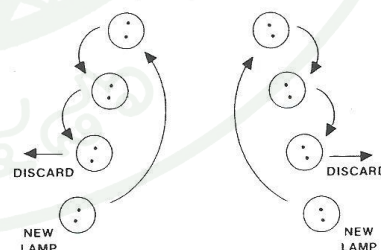


FIG. 3 Lamp Rotation



G 53

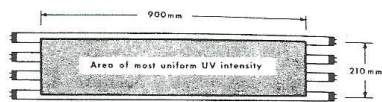


FIG. 4 Limits of Area of Uniform Intensity

specimens shall be exposed to cooling effects of ambient room air. The resulting heat transfer causes water to condense on the test surface.

6.5.1 The specimens shall be arranged so that condensate runs off the test surface by gravity and is replaced by fresh condensate in a continuous process. Vents along the bottom of the test chamber shall be provided to permit an exchange of ambient air and water vapor to prevent oxygen depletion of the condensate.

6.6 *Water Supply*, with an automatic control to regulate the level in the water pan shall be provided. Distilled, deionized, or potable tap water are equally acceptable for purposes of the test, since the condensation process itself distills water onto the test surface.

6.7 *Cycle Timer*, a continuously operating cycle time, for programming the selected cycle of UV periods and condensation periods.

6.7.1 Hour meters shall be provided to record total time of operation and total time of UV exposure.

6.8 *Specimen Temperature Measurement:*

6.8.1 Specimen temperature shall be measured by a thermometer with a remote sensor attached to a black aluminum panel 75 by 100 by 2.5 mm thick. The thermometer shall be precise to $\pm 1^\circ\text{C}$ through a range from 30° to 80°C . The indicator dial shall be located outside the test chamber.

6.8.2 The black aluminum panel with the thermometer sensor shall be positioned in the center of the exposure area so that the sensor is subject to the same conditions as the specimens.

6.9 *Specimen Temperature Control:*

6.9.1 During UV exposure, the selected equilibrium temperature shall be maintained within $\pm 3^\circ\text{C}$ by supplying heated air to the test chamber.

6.9.2 During condensation exposure, the selected equilibrium temperature shall be maintained within $\pm 3^\circ\text{C}$ by heating the water in the water pan.

6.9.3 The UV and condensation temperature controls shall be independent of each other.

6.9.4 Doors shall be located on the room air side of the specimen racks to act as insulation during the UV exposure and to minimize drafts. Such doors shall not interfere with the room air cooling of the specimen during the condensation exposure.

6.10 *Test Chamber Location:*

6.10.1 The apparatus shall be located in an area maintained at a temperature between 20°C and 30°C . The room temperature shall be measured by thermometers mounted on interior walls or column approximately 1500 mm above the floor level and at least 300 mm from any heated apparatus. Three or more thermometers located at various points will show any temperature variation in the area.

6.10.2 It is recommended that the apparatus be located at least 300 mm from walls or other apparatus. Nearby heat

sources, such as ovens or heated test apparatus, should be avoided or shielded, because such heat sources can reduce the cooling required for condensation.

6.10.3 The room where the apparatus is located shall be ventilated to remove the heat and moisture produced and to maintain the temperatures specified in 6.10.1. Two to four air changes per hour will normally provide sufficient ventilation.

7. Test Specimens

7.1 Replicate specimens are desirable to provide a record of degradation at different time intervals. Retention of an unexposed specimen is recommended as it is difficult to mask a specimen to prevent exposure to condensation.

7.2 For specimens of insulating materials, such as wood, plastic, or porous laminates, maximum specimen thickness should be 20 mm to allow adequate heat transfer for condensation.

7.3 To provide rigidity, flexible specimens may be attached to a backing panel made of aluminum or other noncorrosive heat conductive material.

7.4 Cut edges of coated steel specimens shall be protected so that rust does not contaminate the test surface.

7.5 Holes in specimens and any openings larger than 1 mm around irregularly shaped specimens shall be sealed to prevent loss of water vapor. Porous specimens, such as textiles or wood shall be backed with a vapor barrier such as metal or plastic.

8. Calibration and Standardization

8.1 The thermometer or thermocouple which indicates test temperature shall be calibrated by immersing the sensing element and a liquid-in-glass thermometer in water heated to approximately 70°C and comparing the two temperatures as in Method E 220.

8.2 The formation of condensation may be observed by using clear glass or plastic blanks in the specimen holders or rack. One large sheet of plastic may also be used for this purpose. The condensate that forms on a given area during a period of condensation may be collected and then measured.

8.3 The fading and other changes caused by the fluorescent UV lamps may be observed by exposing lightfastness standards in the apparatus using UV alone without condensation.

8.3.1 The AATCC Blue Wool Lightfastness reference materials⁶ may be used to measure the changes caused by UV. The L2 Blue Wool has been found satisfactory for evaluating fluorescent UV lamps.

8.3.2 Other lightfastness reference materials may be used by agreement.

8.4 Reference standards for calibrating the operation of the apparatus in alternate exposure to UV light and condensation may be prepared from painted metal, plastics, or other materials. Painted metal specimens produced by the coil-coating process have been found suitable for such reference standards.

9. Procedure

9.1 Mount the test specimens in the specimen racks with

⁶ Available from American Association of Textile Chemists and Colorists, P.O. Box 12215, Research Triangle Park, NC 27709.

G 53

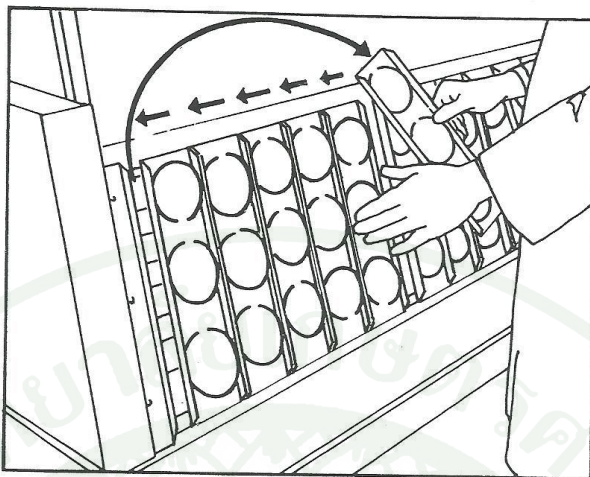


FIG. 6 Daily Horizontal Sample Rotation

removing the replicates sequentially at intervals equal to one third of the test length.

9.7 Conclude the test when either a mutually agreed-upon number of total test hours or a mutually agreed-upon change has occurred in the test specimen or a standard test specimen. For convenience in inspecting and concluding tests during normal working hours, the following test durations are recommended:

96 h = 4 days	672 h = 4 weeks
168 h = 1 week	1008 h = 6 weeks
336 h = 2 weeks	1512 h = 9 weeks
504 h = 3 weeks	2016 h = 12 weeks

10. Interpretation of Results

10.1 This practice is intended to simulate the deterioration caused by natural weathering. However, the rate of degradation in natural weathering varies from year to year. Laboratory accelerated weathering is more consistent in rate. Therefore, in comparing natural and laboratory weathering one should not attempt to predict the number of hours of laboratory exposure that might equal a year of natural weathering. Even if the details of the natural exposure are fully reported as required by 5.3, any time to time comparison would apply only to a given year at a particular site.

10.2 It is possible to correlate the deterioration resulting from a period of natural weathering, such as 1 year, to the deterioration resulting from a period of laboratory accelerated weathering. Spearman rank correlation, which is dis-

cussed in most basic statistical texts, has proved to be a useful method for this. A minimum of seven variables must be ranked by both test methods to obtain statistical validity from Spearman rank correlation. Ranking 10 to 15 variables by both methods will improve the reliability of such correlations.

10.3 It is frequently not possible to predict how many hours or weeks of accelerated testing will yield the best correlation to some period of outdoor testing. Therefore, laboratory tests should be measured periodically, such as weekly or biweekly, so that the correlation coefficient may be calculated at several points during the accelerated test.

11. Report

11.1 The report shall include the following:

11.1.1 Manufacturer and model of fluorescent UV/condensation apparatus,

11.1.2 Manufacturer's designation for the fluorescent UV lamp, the wavelength (nm) at which peak emission occurs, and the short wavelength at which 1 % of peak emission occurs (for example, FS-40 313/280 nm),

11.1.3 Cycle of UV exposure time and temperature, condensation time and temperature (for example 4 h UV/60°C, 4 h CON/50°C),

11.1.4 Total exposure time,

11.1.5 Special conditions of test, such as rotation of test specimens, and

11.2 A sample report form is shown in Fig. 5.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.



ภาคผนวก ค

มาตรฐาน ASTM D3163 และ ASTM D3164



Designation: D 3163 – 01

Standard Test Method for Determining Strength of Adhesively Bonded Rigid Plastic Lap-Shear Joints in Shear by Tension Loading¹

This standard is issued under the fixed designation D 3163; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method is intended to complement Test Method D 1002 and extend its application to single-lap shear adhesive joints of rigid plastic adherends. The test method is useful for generating comparative shear strength data for joints made from a number of plastics. It can also provide a means by which several plastic surface treatments can be compared.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values in parentheses are for information only.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 907 Terminology of Adhesives²

D 1002 Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)²

D 2093 Practice for Preparation of Surfaces of Plastics Prior to Adhesive Bonding²

D 4896 Guide for Use of Adhesive-Bonded Single Lap-Joint Specimen Test Results²

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Many of the terms used in this test method are defined in Terminology D 907.

4. Significance and Use

4.1 Due to the increased use of adhesive-bonded plastics as a result of the inherent advantages afforded by bonded rather than mechanically fastened joints, particularly the alleviation of stress raisers and stress cracking, there is a need for standard tests by which joints of various plastic substrates and adhesives

can be compared. This test method is intended to meet such a need.

4.2 This test method is limited to test temperatures below the softening point of the subject adherends, and is not intended for use on anisotropic adherends such as reinforced plastic laminates.

4.3 The misuse of strength values obtained from this test method as allowable design-stress values for structural joints could lead to product failure, property damage, and human injury. The apparent shear strength of an adhesive obtained from a given small single-lap specimen may differ from that obtained from a joint made with different adherends or by a different bonding process. The normal variation of temperature and moisture in the service environment causes the adherends and the adhesive to swell and shrink. The adherends and adhesive are likely to have different thermal and moisture coefficients of expansion. Even in small specimens, short-term environmental changes can induce internal stresses or chemical changes in the adhesive that permanently affect the apparent strength and other mechanical properties of the adhesive. The problem of predicting joint behavior in a changing environment is even more difficult if a different type of adherend is used in a larger structural joint than was used in the small specimen.

4.3.1 The apparent shear strength measured with a single-lap specimen is not suitable for determining allowable design stresses for designing structural joints that differ in any manner from the joints tested without thorough analysis and understanding of the joint and adhesive behaviors.

4.3.2 Single-lap tests may be used for comparing and selecting adhesives or bonding processes for susceptibility to fatigue and environmental changes, but such comparisons must be made with great caution since different adhesives may respond differently in different joints. See Guide D 4896 for further discussion of the concepts relative to interpretation of adhesive bonded single-lap joints.

5. Apparatus

5.1 *Testing Machine*, conforming to the requirements of and having the capabilities of the machine prescribed in Test Method D 1002. The grips are self-aligning and capable of securely grasping the specimen throughout the test, without allowing the specimen to slip.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D14 on Adhesives and is the direct responsibility of Subcommittee D14.40 on Adhesives for Plastics.

Current edition approved March 10, 2001. Published May 2001. Originally published as D 3163 – 73. Last previous edition D 3163 – 96.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.06.

D 3163

5.2 *Temperature-Controlling Equipment*, capable of maintaining the test temperature to $\pm 3^\circ\text{C}$ ($\pm 5^\circ\text{F}$). If ambient laboratory conditions are employed the same degree of control is required.

6. Test Specimen

6.1 Make specimens that conform to the form and dimensions set forth in Test Method D 1002 where possible. However, due to the low yield points in plastics compared with those of metals, it may not always be feasible to limit test specimen geometry to that called for in Test Method D 1002. Therefore adherend thicknesses and joint overlaps must be chosen so that failure occurs preferentially in the joint and not in the substrate. Thicker adherends allow the stress on the bonded area to be increased, before either tensile failure or yield occurs in the adherend. Recognize, however, that depending on the surface treatment and adhesive used, the bond strength may often be greater than the tensile yield strength of the adherend. Use data collected by this test method only for comparative purposes when the investigator is certain that the specimen configurations and joint geometries of the specimens being compared are identical.

6.2 The surface preparation used on the adherend depends on the subject plastic adherend. Procedures such as those recommended in Practice D 2093 serve as a useful guide.

6.3 Apply the adhesives in accordance with the manufacturer's recommendations. Choose adhesives such that the cure

temperature does not adversely affect the mechanical properties of the adherends.

6.4 Cut test specimens from the bonded panels pictured in Fig. 1. Cut the specimens without overheating or otherwise physically damaging the adherend or bonded interface. Individual specimens may also be prepared if desired.

7. Procedure

7.1 Place the specimens in the grips of the testing machine so that the applied load coincides with the long axis of the test specimen. Load the specimen to failure at a rate of 8.3 to 9.7 MPa (1200 to 1400 psi) of shear area per minute (approximately 0.05 in./min cross head speed).

7.2 Condition specimens for definite periods of time under specified conditions before testing if desired. After conditioning, it is recommended that all specimens be stabilized in the test environment for 1 h before testing.

8. Calculation

8.1 Calculate the bond area to the nearest $0.06/\text{cm}^2$ (0.01 in.^2). Record both load at failure and type of failure (percent cohesive and apparent adhesive). Calculate failing stress as megapascals (pounds force per square inch) of shear area.

9. Report

9.1 Report the following information:

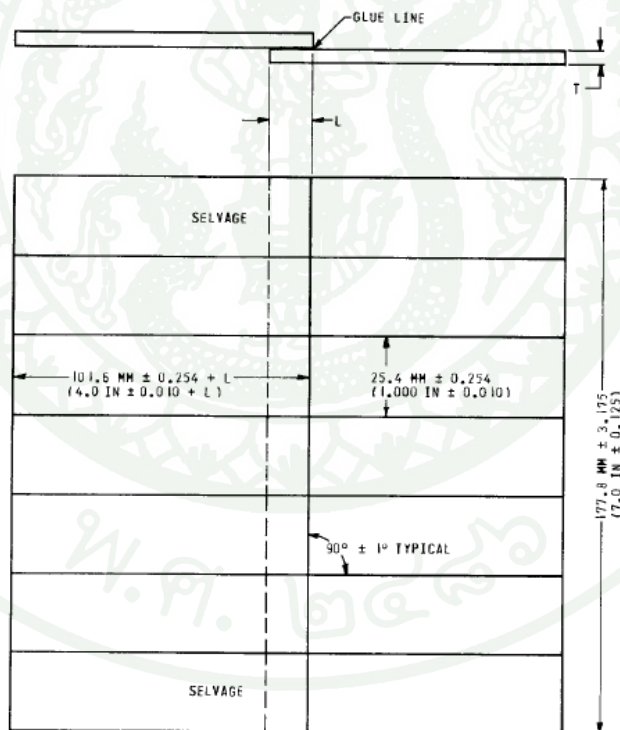


FIG. 1 Standard Test Panel and Specimen Configuration

 D 3163

9.1.1 Complete identification of the adhesive tested, including type, source, date manufactured, manufacturer's code number, form, etc.

9.1.2 Complete identification of the plastic used, its thickness, and the method of cleaning and preparing its surface prior to bonding.

9.1.3 Method of adhesive application (brush, spray, roller coat, tape, etc.).

9.1.4 Conditions present at time of bonding (temperature, etc.).

9.1.5 Length of overlap used.

9.1.6 Conditioning of joint prior to testing.

9.1.7 Maximum, minimum, and average values of the failing load.

9.1.8 Number of test specimens tested.

9.1.9 Type of failure. Include estimated percent cohesion failure, unbonded area, apparent failure in adhesion, and failure in the adherend.

9.1.10 Test temperature employed.

9.1.11 Average thickness of adhesive layer after formation of the joint, within 0.0127 mm (0.0005 in.). Describe the

method of obtaining the thickness of the adhesive layer including procedure, location of measurements, and range of measurements.

NOTE 1—The length of overlap, L , may be varied where necessary. The length of the test specimen in the jaws, however, must not be varied. The distance from the end of the overlap to the end of the jaws should be 63 mm (2½ in.) in all tests.

NOTE 2—The thickness of the adherend, t , may be varied to strengthen the adherend relative to the strength of the bonded area. A maximum thickness of 4.76 mm (¾ in.) is recommended, however, to minimize the effects of offset.

10. Precision and Bias

10.1 The precision and bias statement for this test method has not yet been determined. Archival and round-robin information is being reviewed, and the results are expected by September 2004.

11. Keywords

11.1 adhesive bonds; plastic; shear strength; tension

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Designation: D 3164M – 03

Standard Test Method for Strength Properties of Adhesively Bonded Plastic Lap-Shear Sandwich Joints in Shear by Tension Loading¹

This standard is issued under the fixed designation D 3164M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope*

1.1 This test method is intended to complement Test Method D 1002 and D 3163 and extend its application to single-lap-shear adhesive joints employing plastic adherends. The test method is useful for generating comparative shear strength data for joints made from a number of plastics. It can also provide a means by which several plastics surface treatments can be compared.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

NOTE 1—A soft metric (conversion from English) companion to Test Method D 3164M has been developed - D 3164.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 907 Terminology of Adhesives²

D 1002 Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)²

D 2093 Practice for Preparation of Surfaces of Plastics Prior to Adhesive Bonding²

D 2651 Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding²

D 3163 Test Method for Determining Strength of Adhesively Bonded Rigid Plastic Lap-Shear Joints in Shear by Tension Loading²

D 3164 Test Method for Strength Properties of Adhesively Bonded Plastic Lap-Shear Sandwich Joints in Shear by Tension Loading²

D 4896 Guide for Use of Adhesive-Bonded Single Lap-Joint Specimen Test Results²

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D14 on Adhesives and is the direct responsibility of Subcommittee D14.40 on Adhesives for Plastics.

Current edition approved Aug. 10, 2003. Published September 2003. Originally approved in 1998. Last previous edition approved in 1998 as D 3164M - 98.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.06.

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines³

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Many terms in this test method are defined in Terminology D 907.

4. Significance and Use

4.1 Due to the increased use of adhesively bonded plastics as a result of the inherent advantages afforded by bonded rather than mechanically fastened joints, particularly the alleviation of stress risers and stress cracking, there is a need for standard tests by which joints of various substrates and adhesives can be compared. This test method is intended to meet such a need.

4.2 This test method is limited to test temperatures below the softening point of the subject adherends, and is not intended for use on anisotropic adherends such as reinforced plastic laminates.

4.3 The misuse of strength values obtained from this test method as design stress allowable values for structural joints could lead to product failure, property damage, and human injury.

4.4 The apparent shear strength of an adhesive obtained from a given small single-lap specimen may differ from that obtained from a joint made with different adherends or by a different bonding process. The normal variation of temperature and moisture in the service environment causes the adherends and the adhesive to swell and shrink. The adherends and adhesive are likely to have different thermal and moisture coefficients of expansion.

4.5 Even in small specimens, short-term environmental changes can induce internal stresses or chemical changes in the adhesive that permanently affect the apparent strength and other mechanical properties of the adhesive. The problem of predicting joint behavior in a changing environment is even more difficult if a different type of adherend is used in a larger structural joint than was used in the small specimen.

4.6 The apparent shear strength measured with a single-lap specimen is not suitable for determining allowable design stresses for designing structural joints that differ in any manner from the joints tested without thorough analysis and understanding of the joint and adhesive behaviors.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

ASTM D 3164M - 03

4.7 Single-lap tests may be used for comparing and selecting adhesives or bonding processes for susceptibility to fatigue and environmental changes, but such comparisons must be made with great caution since different adhesives may respond differently in different joints. See Guide D 4896 for further discussion of the concepts relative to interpretation of adhesive bonded single lap joints.

5. Apparatus

5.1 *Testing Machine*, conforming to the requirements of and having the capabilities of the machine prescribed in Test Method D 1002 and has an accuracy of $\pm 1\%$ when calibrated in accordance with Practices E 4 requirements. Likewise the grips are capable of securely grasping the specimen throughout the test without allowing the specimen to slip. The grips are also self-aligning.

5.2 *Temperature and Relative Humidity Controlling Equipment*, capable of maintaining the test temperature to $\pm 3^\circ\text{C}$ and the relative humidity to $\pm 3\%$. If ambient laboratory conditions are employed the same degree of control is required.

6. Test Specimen

6.1 Make specimens that conform to the form and dimensions shown in Fig. 1. It is recommended that the test

specimens be cut from the test panel depicted in Fig. 2, but individual specimens may be prepared if preferred. The recommended metal substrate is Alloy 2024-T3 aluminum, 1.5 ± 0.1 mm. A surface treatment such as Method A of Guide D 2651 is recommended for the aluminum. If a metal substrate other than aluminum is employed, then one of the other surface preparations in Guide D 2651 is suggested. The recommended length of overlap is 12.5 ± 0.2 mm. The thickness of the plastic in the metal/adhesive/plastic/adhesive/metal sandwich configuration may vary depending on the type and manufacturer but thin films of 0.35 mm or less are recommended. An upper limit of 1.5 ± 0.1 mm plastic thickness is suggested.

6.2 The surface preparation used on the adherend depends on the subject plastic adherend. Methods such as those recommended in Practice D 2093 serve as a useful guide.

6.3 Apply the adhesive in accordance with the manufacturer's recommendations. Choose the adhesive such that the cure temperature does not adversely affect the mechanical properties of the adherend.

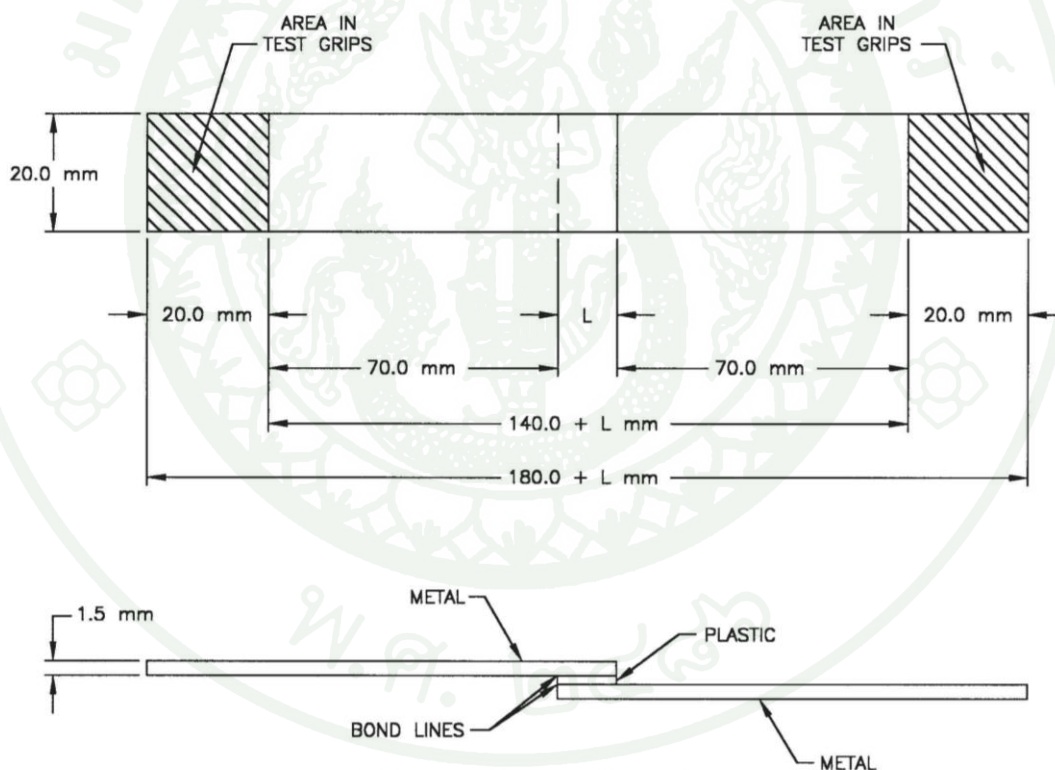


FIG. 1 Form A—Dimensions of Test Specimen

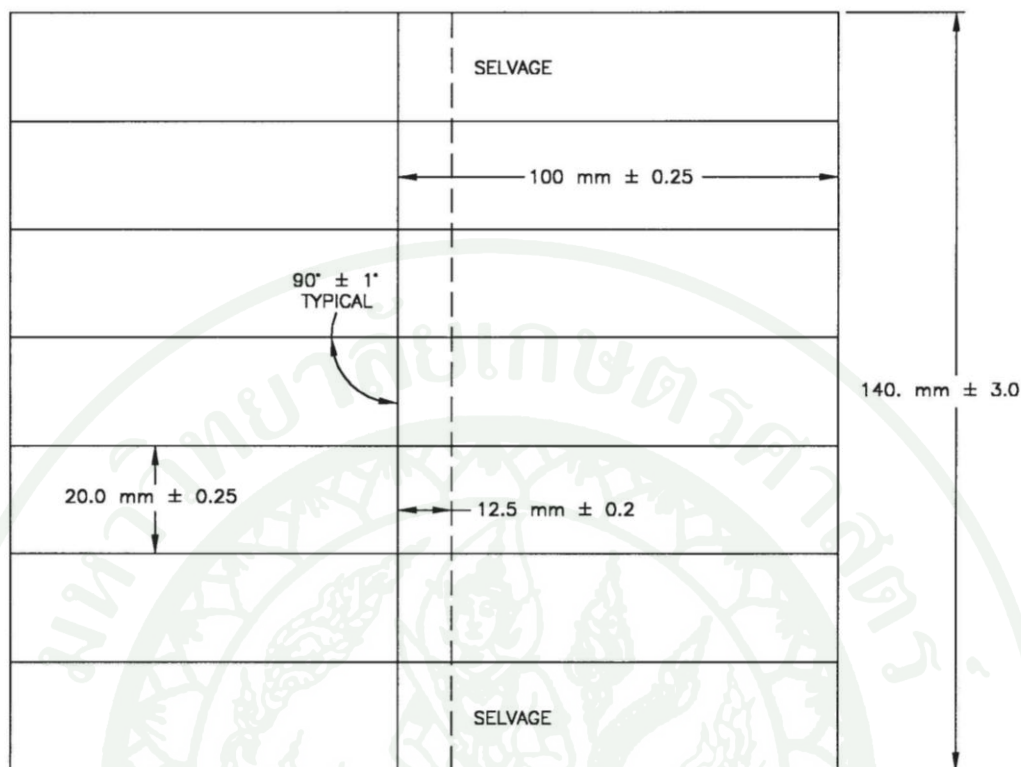
 D 3164M – 03


FIG. 2 Standard Test Panel

6.4 Cut test specimens from the bonded panels pictured in Fig. 2. Cutting the specimens must be accomplished without overheating or otherwise physically damaging the adherend or bonded interface. Individual test specimens may also be prepared if desired.

7. Procedure

7.1 Condition the test specimens for definite periods of time under specified conditions before testing if desired. After conditioning, it is recommended that all specimens be stabilized in the test environment for 1 h before testing.

7.2 Place the test specimens in the grips of the testing machine so that the applied load coincides with the long axis of the specimen. Load the specimen to failure at a rate of 80 to 100 kg/cm² of shear area per minute.

NOTE 2—The thickness of the plastic insert used will influence the joint strengths obtained in this test due to the added offset. Thermal stresses introduced in the joint by elevated temperatures bonding dissimilar materials will also offset ultimate joint strength. Direct comparison of results is possible only for the same thickness and composition of insert so as to minimize differences resulting from offset or thermal stress.

8. Calculations

8.1 Calculate the bond area to the nearest 0.05 cm². Record both load at failure and type of failure (percentage cohesive

and apparent failure in adhesion). Calculate failing stress as megapascals of shear area. It should be noted that while the results are given in terms of the average shear stress, the maximum shear stress may be far from this average and the cleavage stresses in the joint may be even larger. See Guide D 4896 for more detailed information.

9. Report

9.1 Report the following:

9.1.1 Complete identification of the adhesive tested, including type, source, date manufactured, manufacturer's code number, form, etc.

9.1.2 Complete identification of the metal used, its thickness, and method of cleaning and preparing its surface prior to bonding.

9.1.3 Complete identification of the plastic used, its thickness, and the method of cleaning and preparing its surface prior to bonding.

9.1.4 Method of adhesive application (brush, spray, roller coat, tape, etc.), amount of applied adhesive, open-time, close-time, press pressure, and press-time.

9.1.5 Ambient conditions at time of bonding (temperature, humidity, etc.).

9.1.6 Length of overlap used.



D 3164M – 03

- 9.1.7 Conditioning of joint prior to testing.
- 9.1.8 Maximum, minimum, and average values of the failing load.
- 9.1.9 Number of specimens tested.
- 9.1.10 Type of failure. This should include estimated percentages of cohesive failure in the adhesive unbonded area, apparent failure in adhesion, and failure in the adherend.
- 9.1.11 Test temperature employed.
- 9.1.12 The average thickness of adhesive layer after formation of the joint shall be reported within 0.01 mm. The method of obtaining the thickness of the adhesive layer shall be

described including procedure, location of measurements and range of measurements.

10. Precision and Bias

10.1 A precision and bias statement does not exist for this test method because resources necessary for round robin testing have not been forthcoming.

11. Keywords

11.1 adhesive bond; lap-shear; sandwich joint; shear; tension

SUMMARY OF CHANGES

Committee D14.40 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (D 3164M - 98) that may impact the use of this standard.

- (1) Added Practices E 4 to Section 2 Referenced Documents
- (2) Added to 5.1— a statement that refers to Practices E 4.
- (3) Added to 5.2 – a relative humidity tolerance.
- (4) Added to 8.1— a statement of information and reference to Guide D 4896.
- (5) Added to 9.1.4 – more application method data for the test report.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

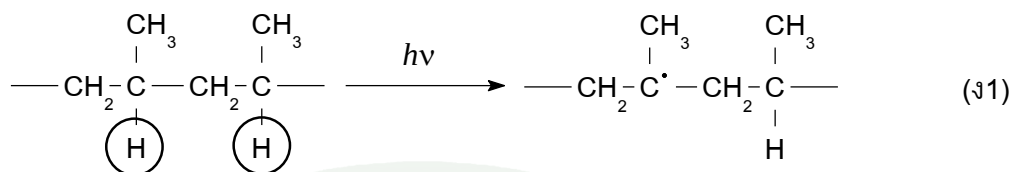
This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



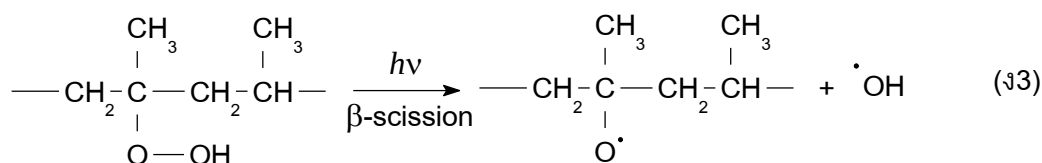
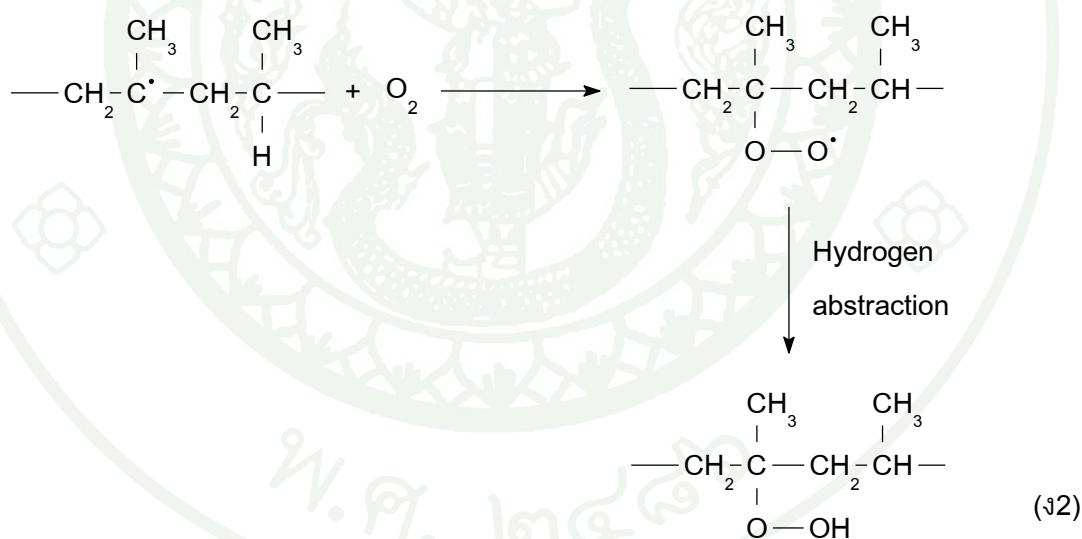
ภาคผนวก
แนวโน้มของปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงของพอลิโพรพิลีน
ที่เกิดขึ้นภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต

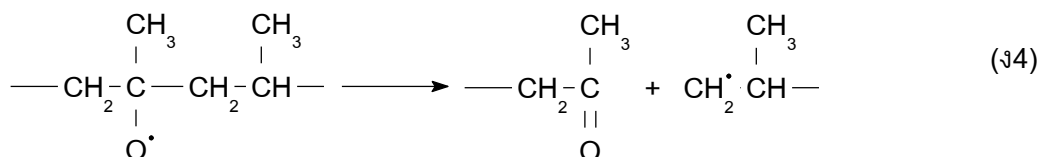
แนวโน้มของการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของ PP สามารถเกิดขึ้นได้ดังสมการที่ (ง1)



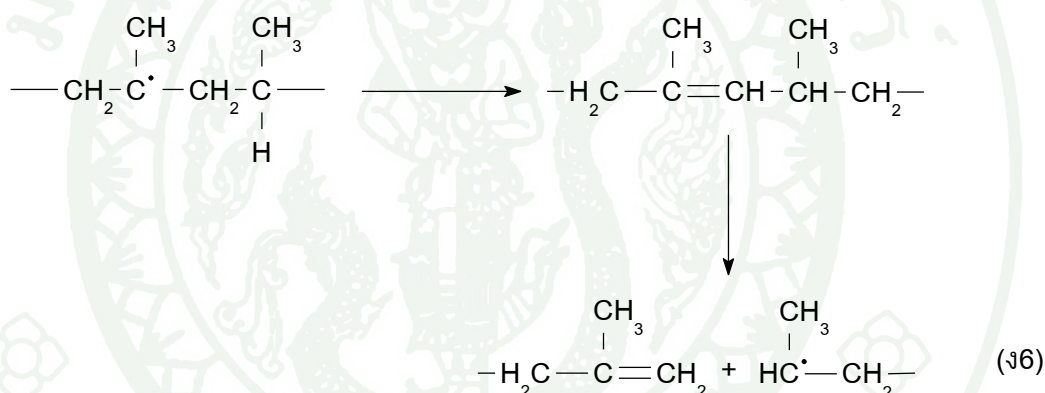
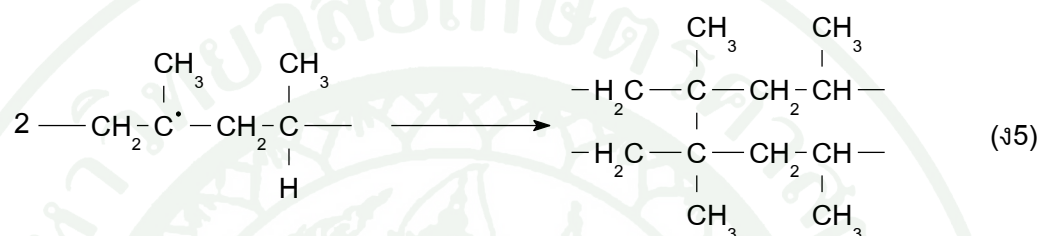
Tertiary hydrogen atoms

การสร้างหมู่คาร์บอนิลที่พบพอลิโพรพิลีน เริ่มต้นขึ้นจากอนุมูลอิสระทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน สร้างเป็นอนุมูลอิสระแอลคิลเปอร์ออกไซด์ (Radicals alkyl peroxy, $\text{PO}_2^{\bullet}$) จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาต่อไปเป็นอนุมูลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (POOH) เกิดขึ้น ดังสมการที่ (ง2) หลังจากนั้นการตัดขาดสายโซ่ที่ตำแหน่งเบต้า (β -scission) จะเข้าทำปฏิกิริยาต่อทันที ซึ่งเกิดการตัดขาดที่ตำแหน่งพันธะ PO-OH ได้เป็นอนุมูลอิสระออกซี (Oxy radicals) ($\text{PO}^{\bullet}$) โดยสิ้นสุดปฏิกิริยาด้วยการสร้างหมู่คาร์บอนิลเกิดขึ้น

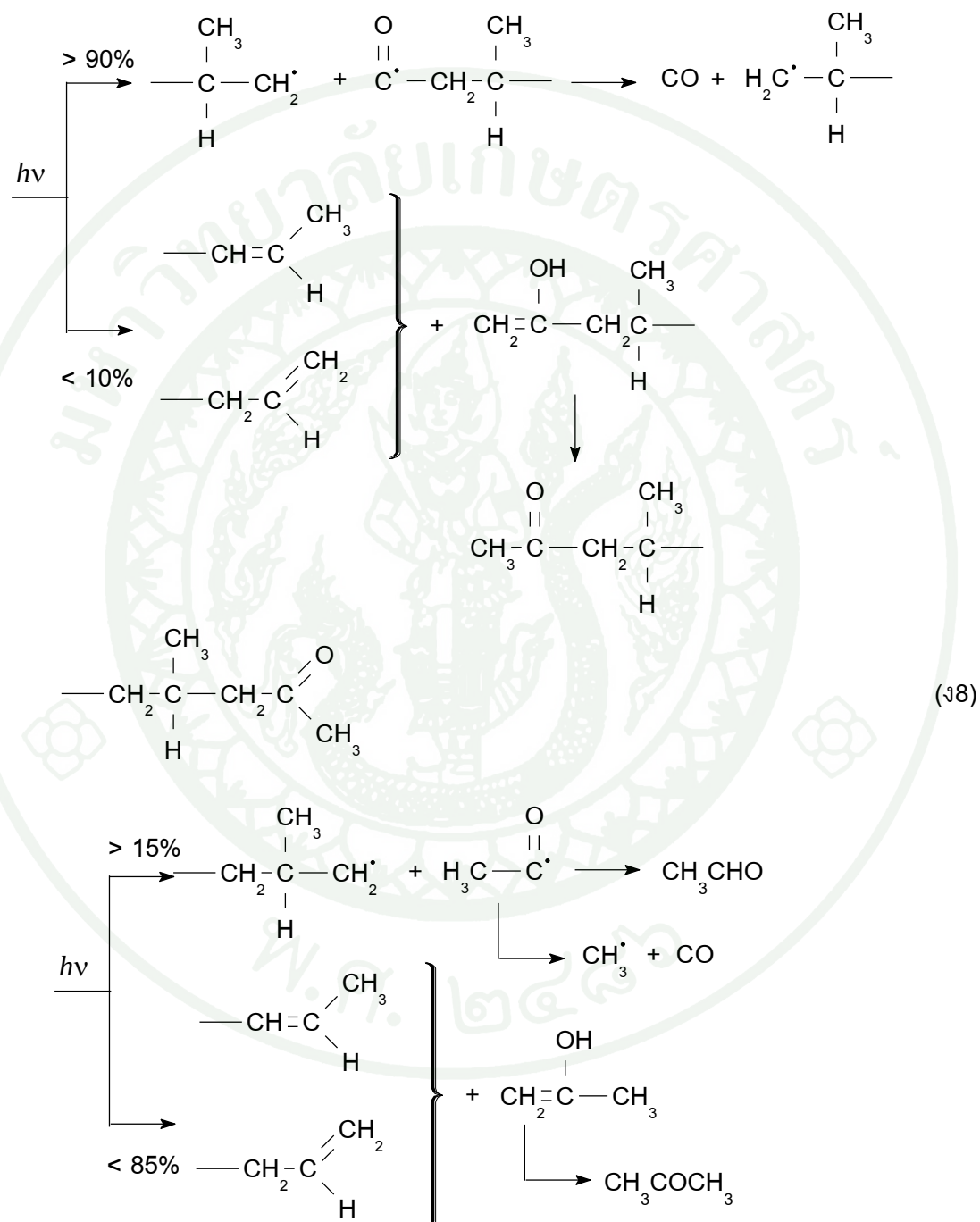




อย่างไรก็ตามนอกเหนือการสร้างหมู่คาร์บอนิลที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว PP แล้ว การเกิดอนุมูลอิสระที่วงไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ยังสามารถเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่ (ดังสมการที่ ง5) หรือมีการสร้างสายโซ่โมเลกุลที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated chain) (ดังสมการที่ ง6)

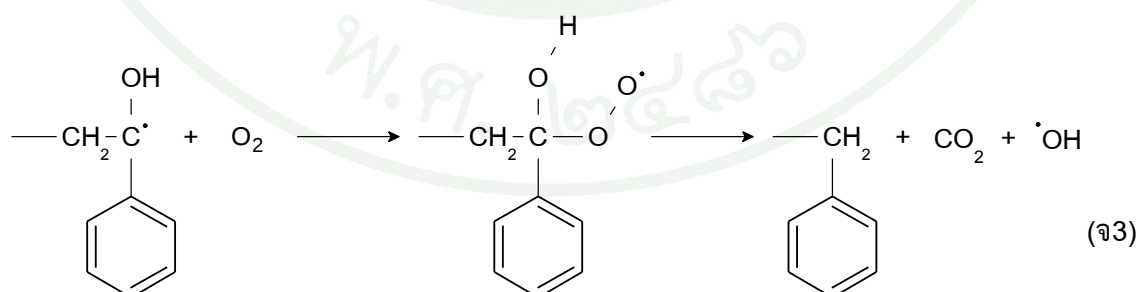
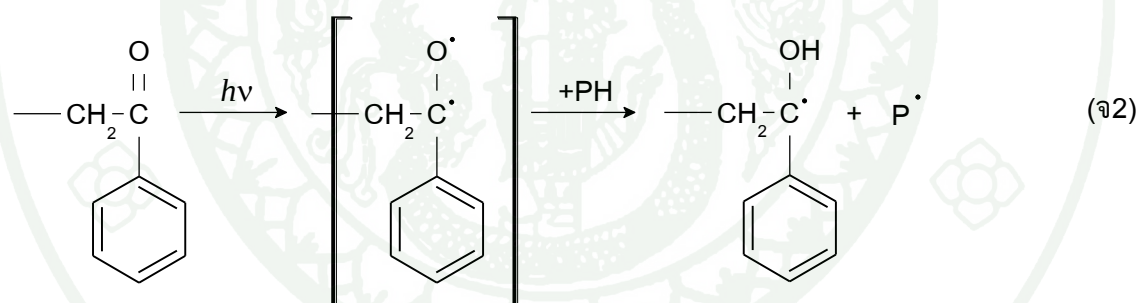
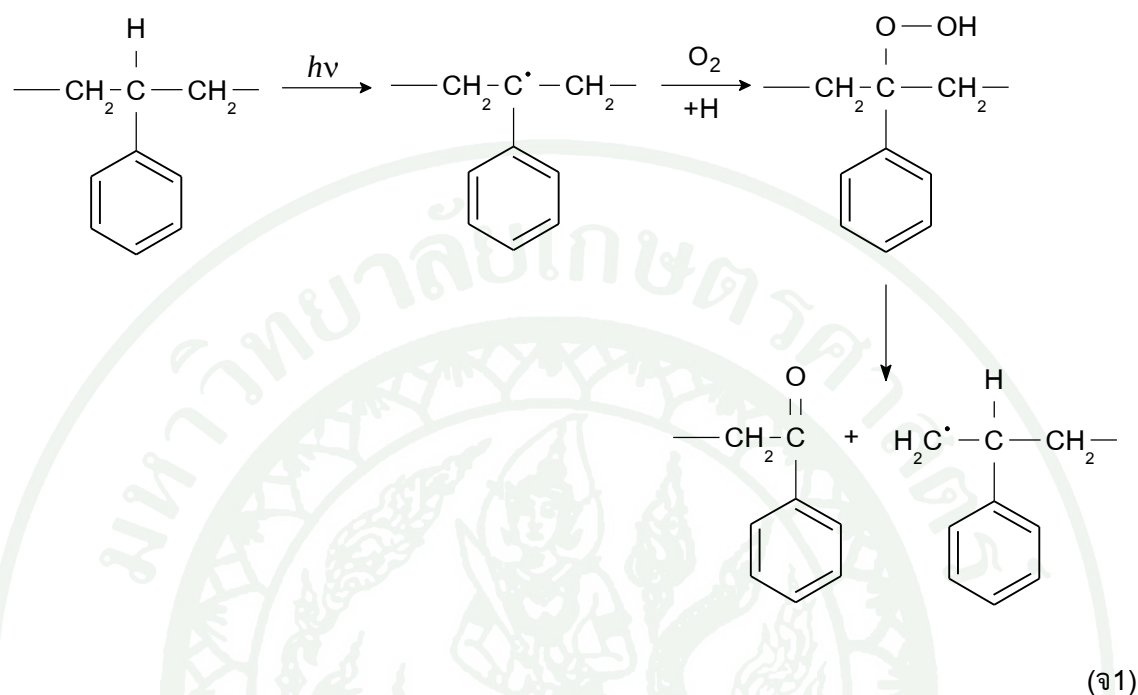


สเปกตรัมของ PP ที่พบการเปลี่ยนแปลงที่น้อย เหตุผลสำคัญเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของ PP มีเพียงพันธะอิ่มตัวเกือบทั้งหมด (Fully saturated polymers) ดังนั้นความสามารถในการดูดกลืนแสงจึงต่ำมาก แต่สารเจือปน (Impurities) ประเภทหมู่คีโตน (Ketone) ที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในระหว่างกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization process) ในการอัดรีด (Extrusion) หรือการฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding) สารเจือปนเหล่านี้จัดว่าเป็นหมู่ “Chromophoric” หรือเป็นหมู่ที่มีความสามารถทางด้านการดูดกลืนแสงได้ดี หมู่คีโตนในสายโซ่ PP เกิดขึ้นได้ 2 ตำแหน่ง คือหมู่คีโตนที่อยู่ภายในโมเลกุล (สมการที่ ง7) และหมู่คีโตนที่อยู่ปลายสายโซ่ (สมการที่ ง8) ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดริเริ่มของการเสื่อมสภาพทางแสงให้กับ PP



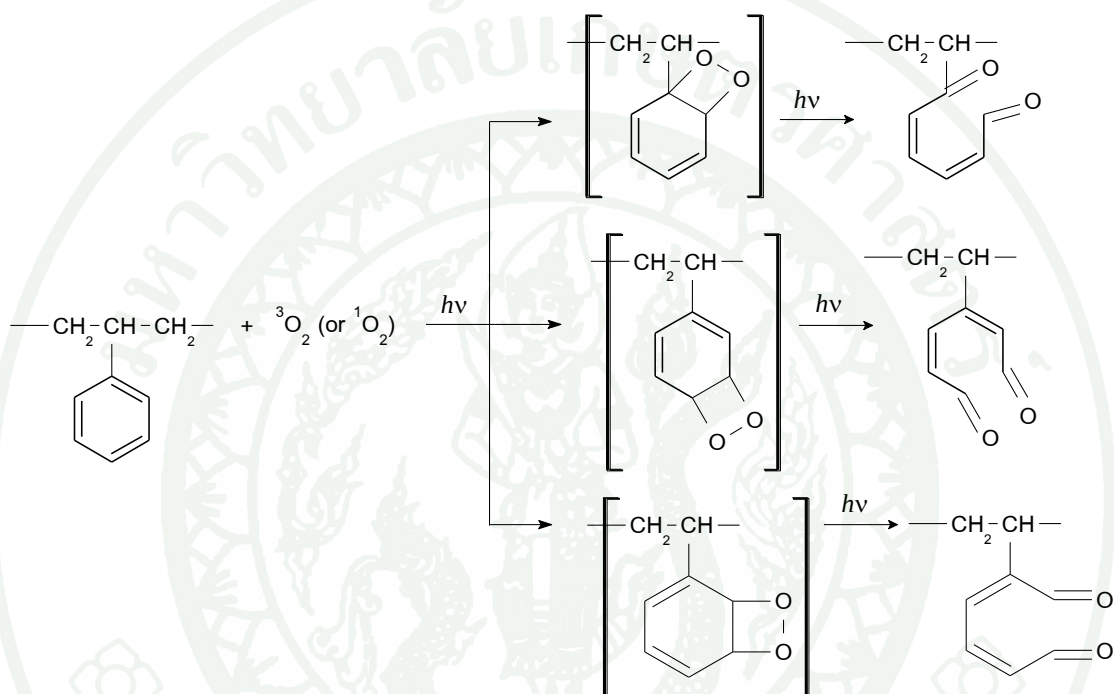


การเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของ PS สามารถเกิดขึ้นได้ดังสมการที่ (จ1), (จ2) และ (จ3)



ผลการทดลองจาก FT-IR สเปกตรัมของพอลิสไตรีนที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของ ปฏิกิริยาการเปิดวงของวงเบนซีน หรือ Ring opening reactions เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ได้ยาก และความเสถียรของวงเบนซีนที่สูง แต่เมื่อพิจารณาจากแหล่งพลังงานของหลอดเมอร์คิวรี

(ความยาวคลื่น 253.7 nm) ที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวในงานวิจัยนี้พบว่ามีพลังงานเท่ากับ 112 kcal/mol โดยพลังงานในการสลายพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H bond) ของวงเบนซีนที่มีค่าเท่ากับ 104 kcal/mol เปรียบเทียบกับ $-\text{CH}_2-$ (Secondary C-H chain bonds) และ $-\text{CH}-$ (Tertiary C-H chain bonds) มีค่าเท่ากับ 76 kcal/mol และ 71 kcal/mol ตามลำดับ ดังนั้นที่ความยาวคลื่น 253.7 nm จึงพบว่ามีพลังงานเพียงพอในการสลายพันธะของวงเบนซีนได้เช่นเดียวกัน โดยแสดงไว้ดังสมการที่ (จ4)

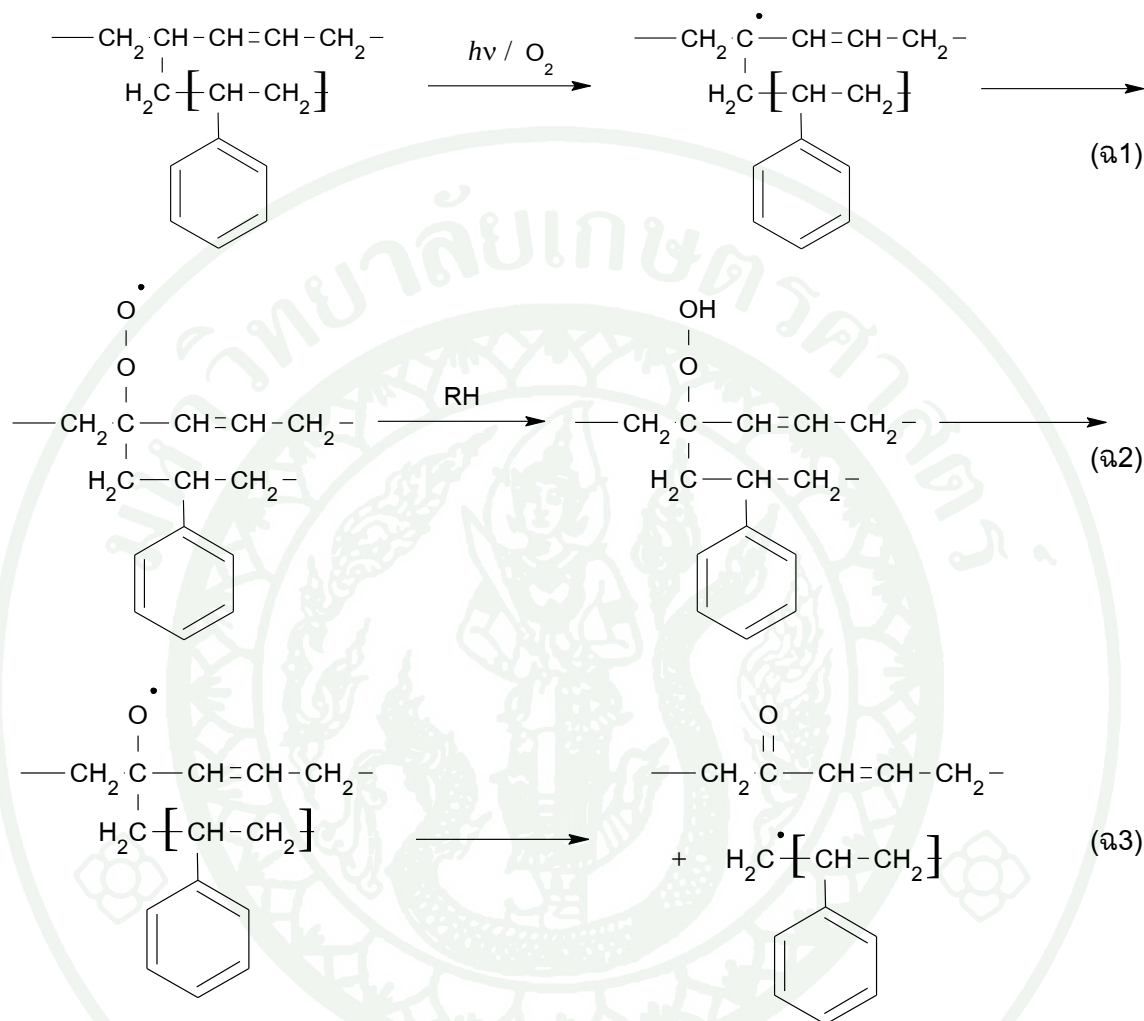


(จ4)

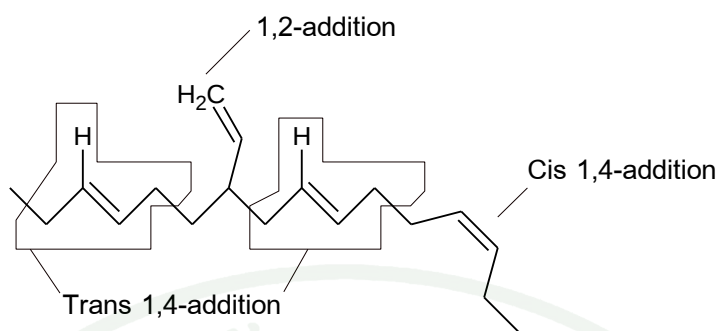


ภาคผนวก จ
แนวโน้มของปฏิริยาออกซิเดชันทางแสงของพอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง
ที่เกิดขึ้นภายหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต

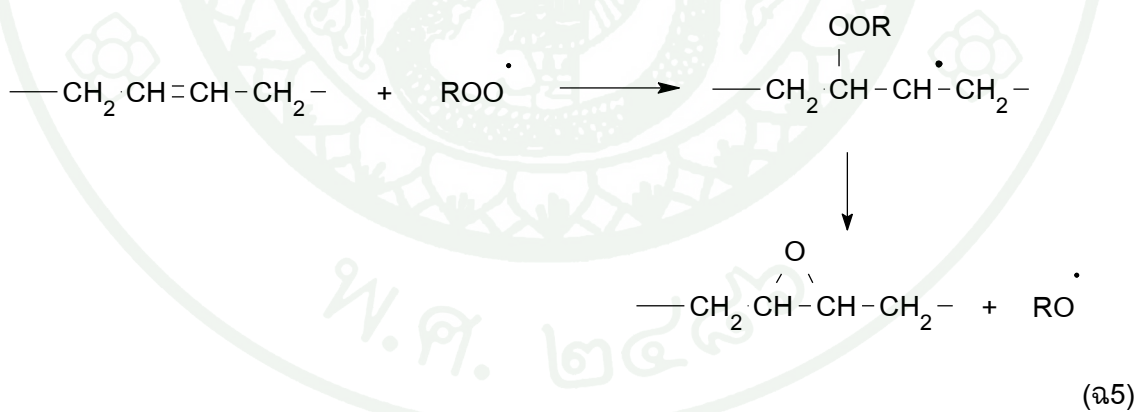
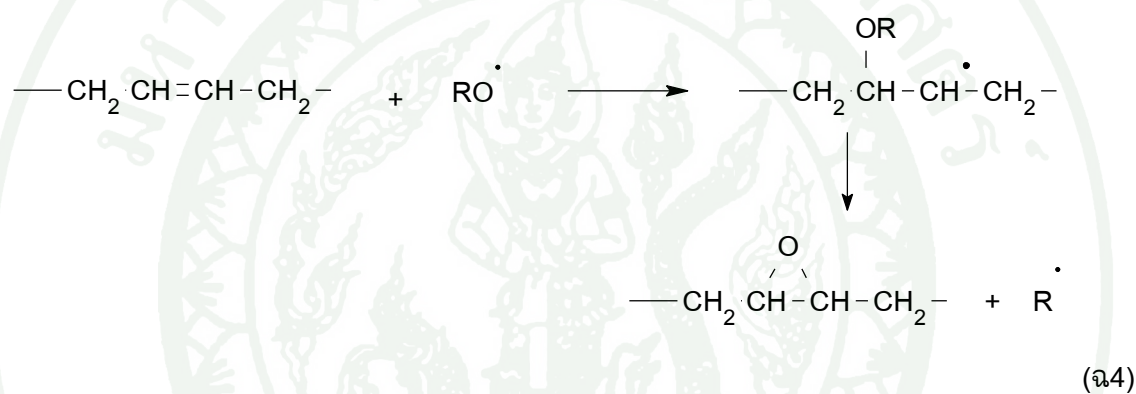
การเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของ HIPS สามารถเกิดขึ้นได้ดังสมการที่ (ฉ1), (ฉ2) และ (ฉ3)

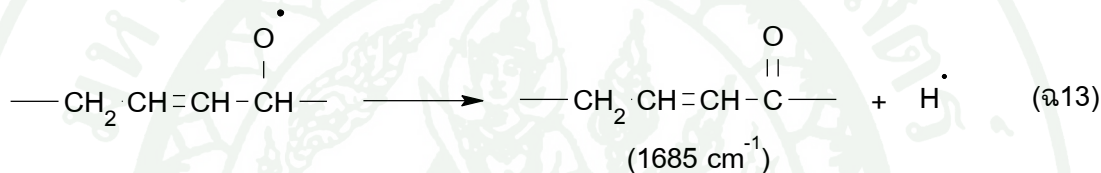
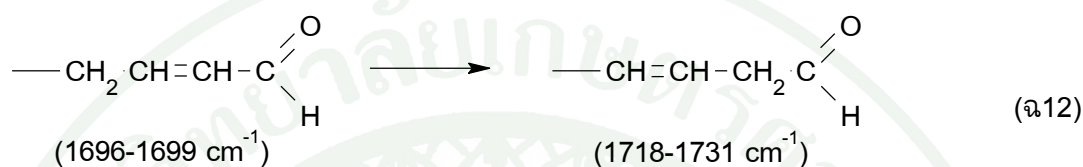
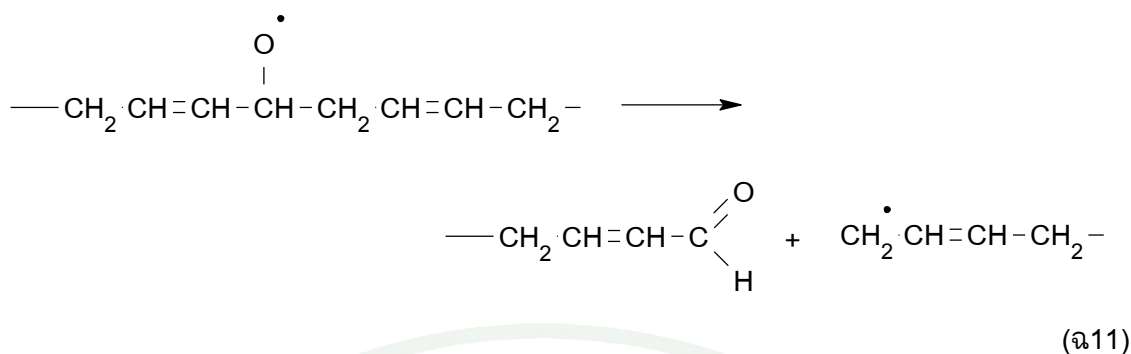


เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมจากภาพผนวกที่ ฉ1 ในรายละเอียดของบิวทาไดอีน พบว่าสายโซ่บิวทาไดอีนใน HIPS ประกอบด้วย 1,2 บิวทาไดอีน, ทราน (Trans) 1,4 บิวทาไดอีน และซิส 1,4 บิวทาไดอีน ซึ่งตำแหน่งเลขคลื่นที่ 966 cm^{-1} ของทราน 1,4 บิวทาไดอีนและซิส 1,4 บิวทาไดอีน มีแนวโน้มที่ลดลงเร็วกว่าเมื่อเทียบกับตำแหน่งเลขคลื่นที่ 911 cm^{-1} ของ 1,2 บิวทาไดอีน เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของทราน 1,4 บิวทาไดอีนและซิส 1,4 บิวทาไดอีน มีความง่ายและว่องไวต่อการเข้าทำปฏิกิริยามากกว่า โดยการลดลงอย่างต่อเนื่องของ 1,4 บิวทาไดอีนสามารถเกิดขึ้นได้จากการเข้าทำปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระแอลค็อกซี่ (Alkoxy radical, $\text{RO}^\bullet$, $\text{PO}^\bullet$) หรืออนุมูลอิสระเปอร์ออกไซด์ (Peroxy radical, $\text{ROO}^\bullet$, $\text{PO}_2^\bullet$) ดังสมการที่ (ฉ4) และ (ฉ5)



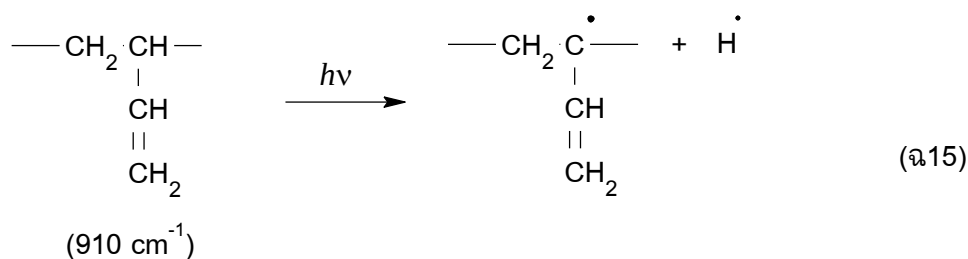
ภาพผนวกที่ ฉ1 โครงสร้างของ 1,2 บิวทาไดอิน, ทราน (Trans) 1,4 บิวทาไดอิน และซิส (Cis) 1,4 บิวทาไดอิน

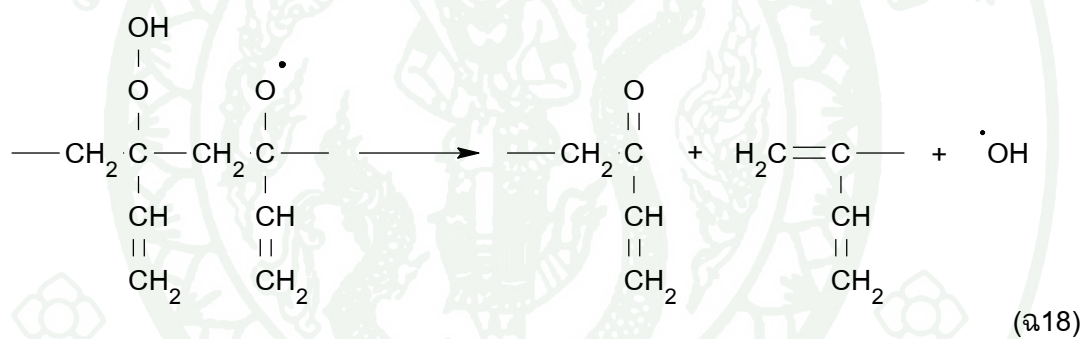
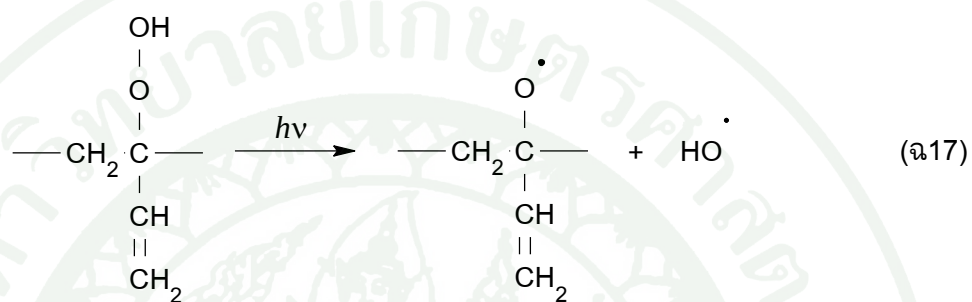
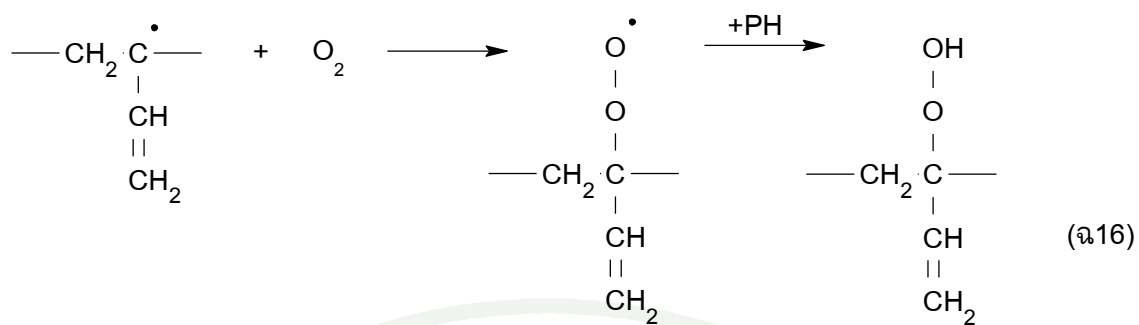




2. การเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของ 1,2 บิวทาไดอิน

โครงสร้างทางเคมีของ 1,2-บิวทาไดอิน การเสื่อมสภาพทางแสงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเริ่มต้นจากพันธะคู่ในบิวทาไดอินได้รับการโอนถ่ายพลังงานจากรังสี UV และทำการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ที่พันธะ C-H ดังสมการที่ (จ15) จากนั้นออกซิเจนจึงเข้าทำปฏิกิริยาต่อทันที เกิดหมู่ออกซิเจนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Oxygen hydroperoxide, -COOH) ดังสมการที่ (จ16) ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความแข็งแรงต่ำและไม่เสถียร จึงเกิดการตัดขาดของสายโซ่แบบ β -scission ได้เป็น Oxy radicals ($\text{CO}^\bullet$) ดังสมการที่ (จ17) ภายหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา พบว่าได้มีการสร้างหมู่คาร์บอนิลเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ฉายรังสี ดังสมการที่ (จ18)





มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง
ของ -OH/-CH และ -C=O/-CH ของวัสดุพื้น (Substrate materials)

พ.ศ. ๒๕๕๖

วิธีการวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH และ -C=O/-CH ของวัสดุพื้น

การหาอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ -OH/-CH และ -C=O/-CH จะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) จุดประสงค์คือเพื่อต้องการหาปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอนิลที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเทียบกับปริมาณของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (-CH) โดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่เลขคลื่นของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ 3450 cm^{-1} , หมู่คาร์บอนิลที่ 1750 cm^{-1} และพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (-CH) ที่ 2919 cm^{-1} มาใช้คำนวณเทียบเป็นอัตราส่วน

พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)

ตารางผนวกที่ ข1 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ PP ในสภาวะบรรยากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.1113	0.1972	0.2168	0.2012	0.2142	0.2144	0.2281	0.2324
3 วัน	0.1113	0.1332	0.1528	0.1273	0.1276	0.1387	0.1464	0.1711
5 วัน	0.1113	0.1597	0.1788	0.1834	0.1933	0.1828	0.1877	0.1881
7 วัน	0.1113	0.1500	0.2008	0.1924	0.2143	0.1933	0.1878	0.2033

ตารางผนวกที่ ข2 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ PP ในสภาวะบรรยากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.1565	0.1778	0.2112	0.1883	0.1987	0.2047	0.2327	0.2340
3 วัน	0.1565	0.1368	0.1657	0.1376	0.1475	0.1525	0.1756	0.1848
5 วัน	0.1565	0.1672	0.1896	0.1938	0.2125	0.1960	0.2019	0.2100
7 วัน	0.1565	0.1517	0.2220	0.2010	0.2384	0.1937	0.2003	0.2232

ตารางผนวกที่ ๓3 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ PP ในสภาวะ
สูญญากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.1113	0.1613	0.1517	0.1725	0.1372	0.1454	0.1624	0.1495
3 วัน	0.1113	0.1617	0.1489	0.1801	0.1489	0.1526	0.1532	0.1515
5 วัน	0.1113	0.1746	0.1665	0.1867	0.1708	0.1886	0.2161	0.2011
7 วัน	0.1113	0.1529	0.1459	0.1483	0.1453	0.1655	0.1540	0.1629

ตารางผนวกที่ ๓4 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ PP ในสภาวะ
สูญญากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.1565	0.1846	0.1657	0.1762	0.1514	0.1475	0.1853	0.1688
3 วัน	0.1565	0.1831	0.1540	0.1912	0.1541	0.1637	0.1696	0.1862
5 วัน	0.1565	0.1862	0.1788	0.1860	0.1630	0.1790	0.2140	0.2030
7 วัน	0.1565	0.1611	0.1530	0.1433	0.1476	0.1716	0.1610	0.1787

พอลิสไตรีน (Polystyrene)

ตารางผนวกที่ ๕ การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ PS ในสภาวะบรรยากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.4088	0.3963	0.5039	0.4621	0.5354	0.4199	0.5682	-
3 วัน	0.4088	0.4455	0.5587	0.6342	0.6521	0.6581	0.6650	0.6750
5 วัน	0.4088	0.4393	0.5531	0.6020	0.6688	0.6132	0.6680	0.6676
7 วัน	0.4088	0.4377	0.5117	0.6322	0.6188	0.6419	0.6077	0.6256

ตารางผนวกที่ ๖ การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ PS ในสภาวะบรรยากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.6122	0.6479	1.0479	1.7401	1.8389	2.2726	2.3861	2.5405
3 วัน	0.6122	0.6443	1.0285	1.4537	1.5657	1.7153	1.6839	1.7076
5 วัน	0.6122	0.6588	1.0672	1.5574	1.5655	1.7288	1.6538	1.7007
7 วัน	0.6122	0.6402	0.9298	0.7640	1.3127	1.4386	1.1990	1.2120

ตารางผนวกที่ ๗ การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ PS ในสภาวะสุญญากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.4088	0.4404	0.5532	0.5982	0.5525	0.5536	0.5736	0.5678
3 วัน	0.4088	0.3507	0.4267	0.4493	0.4153	0.3691	0.4714	0.5777
5 วัน	0.4088	0.4176	0.4674	0.5202	0.4296	0.4207	0.3724	0.4415
7 วัน	0.4088	0.4602	0.5411	0.6024	0.5133	0.5037	0.4114	0.5475

ตารางผนวกที่ ข8 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ $-C=O/-CH$ ของ PS ใน สภาวะสุญญากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.6122	0.6478	1.1093	1.4897	1.4365	1.5369	1.7303	1.8767
3 วัน	0.6122	0.5503	0.8426	1.3012	1.4543	1.6534	1.7090	1.9758
5 วัน	0.6122	0.6101	1.0819	1.4396	1.5395	1.7544	1.8455	1.8804
7 วัน	0.6122	0.9162	0.6641	1.2371	0.9127	0.6760	1.3986	1.1522

พอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene)

ตารางผนวกที่ ๙ การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ HIPS ในสภาวะบรรยากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.4289	0.4960	0.5511	0.6385	0.6322	0.6187	0.5454	0.5602
3 วัน	0.4289	0.5200	0.6015	0.6714	0.6508	0.6595	0.6621	0.6883
5 วัน	0.4289	0.5525	0.6296	0.6528	0.6355	0.6381	0.6505	0.6838
7 วัน	0.4289	0.4789	0.6202	0.6536	0.6433	0.6529	0.6843	0.6312

ตารางผนวกที่ ๑๐ การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ HIPS ในสภาวะบรรยากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.5217	0.8312	1.1435	1.5514	1.8947	1.9949	2.3759	2.1447
3 วัน	0.5217	0.8850	1.1608	1.4212	1.6288	1.6890	1.5592	1.6123
5 วัน	0.5217	0.8388	1.1830	1.4433	1.3722	1.7659	1.8318	1.7500
7 วัน	0.5217	0.8198	1.2225	1.4919	1.7509	1.8617	1.8950	1.5634

ตารางผนวกที่ ๑๑ การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ HIPS ในสภาวะสุญญากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.4289	0.5362	0.4137	0.6432	0.6923	0.7225	0.6732	0.7158
3 วัน	0.4289	0.6022	0.6260	0.6884	0.7260	0.7245	0.6877	0.7146
5 วัน	0.4289	0.4710	0.5133	0.4506	0.4353	0.5374	0.4920	0.4634
7 วัน	0.4289	0.5665	0.6222	0.6586	0.6998	0.7768	0.7011	0.7185

ตารางผนวกที่ ข12 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงของ $-C=O/-CH$ ของ HIPS ใน สภาวะสุญญากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.5217	0.8729	1.1762	1.8479	2.2624	3.3163	2.4049	2.6273
3 วัน	0.5217	0.8774	1.1513	1.7126	2.3056	1.9962	2.2658	2.4610
5 วัน	0.5217	0.8577	1.0854	1.4154	1.6274	1.6115	1.7042	1.7289
7 วัน	0.5217	0.8494	1.1474	1.4319	1.6510	1.7361	1.7120	1.7151

อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดเอิน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene)

ตารางผนวกที่ ข13 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ ABS ในสภาวะบรรยากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.3778	0.5272	0.4963	0.5472	0.6120	0.6007	0.6056	0.4508
3 วัน	0.3778	0.5319	0.5292	0.6195	0.6593	0.6378	0.6682	0.6503
5 วัน	0.3778	0.5625	0.6447	0.6848	0.7309	0.7313	0.7424	0.7674
7 วัน	0.3778	0.5690	0.6324	0.6639	0.6932	0.7142	0.7127	0.7584

ตารางผนวกที่ ข14 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ ABS ในสภาวะบรรยากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.4576	0.6944	0.8338	1.0424	1.3665	1.2953	1.5665	1.7363
3 วัน	0.4576	0.7992	1.0533	1.3395	1.6909	1.6778	1.7863	2.0543
5 วัน	0.4576	0.8519	1.2165	1.4112	1.6543	1.6515	1.7853	2.0324
7 วัน	0.4576	0.8709	1.1748	1.3764	1.6376	1.6119	1.7050	1.8885

ตารางผนวกที่ ข15 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ ABS ในสภาวะสุญญากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.3778	0.4595	0.5110	0.6189	0.5266	0.6150	0.6040	0.5942
3 วัน	0.3778	0.5389	0.5106	0.6225	0.4688	0.6076	0.5744	0.6021
5 วัน	0.3778	0.3590	0.4209	0.5639	0.4224	0.6160	0.5670	0.6433
7 วัน	0.3778	0.3553	0.4957	0.4589	0.5151	0.6453	0.5342	0.6104

ตารางผนวกที่ ข16 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง $-C=O/-CH$ ของ ABS ในสภาวะ
สูญญากาศ

เวลา วัน	ก่อน การฉาย รังสี	ฉายรังสี UV						
		30 นาที	60 นาที	1 ชม. 30 นาที	2 ชม.	2 ชม. 30 นาที	3 ชม.	4 ชม.
0 วัน	0.4576	0.7314	1.0300	1.6318	1.4438	1.9084	1.9952	2.0622
3 วัน	0.4576	0.8048	1.0557	1.7057	1.4713	1.9413	1.8924	2.0311
5 วัน	0.4576	0.7026	1.0921	1.7284	1.4047	1.9813	2.3203	2.4267
7 วัน	0.4576	0.8044	1.0301	1.6593	1.3589	1.8796	2.1011	2.2326



ตารางผนวกที่ ซ1 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -OH/-CH ของ ABS, HIPS, PS และ PP ภายหลังการชุบเนื้อผิว

วัน \ เวลา	ก่อนการฉายรังสี UV	ฉายรังสี UV	
		2 ชม.	4 ชม.
ABS	0.3778	0.6232	0.6249
HIPS	0.4289	0.5478	0.5320
PS	0.4088	0.5606	0.5365
PP	0.1225	0.1520	0.1327

ตารางผนวกที่ ซ2 การวิเคราะห์อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง -C=O/-CH ของ ABS, HIPS, PS และ PP ภายหลังการชุบเนื้อผิว

วัน \ เวลา	ก่อนการฉายรังสี UV	ฉายรังสี UV	
		2 ชม.	4 ชม.
ABS	0.4576	1.0064	1.3081
HIPS	0.5217	0.7598	0.8942
PS	0.6122	0.8816	0.8672
PP	0.1690	0.2135	0.1960



ภาคผนวก ฅ
ผลการวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของวัสดุพื้น
(ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) และวัสดุซ้อนทับ

ตารางผนวกที่ ฅ1 การวิเคราะห์หัตถมูมสัฒ์ของ PP

No.	ก่อนการ ฉายรังสี	ฉายรังสี UV					
		15 นาที	30 นาที	1 ชม.	2 ชม.	3 ชม.	4 ชม.
1	96.73	87.17	99.52	99.30	99.74	94.29	83.16
2	97.85	87.49	96.30	98.69	91.17	96.79	89.57
3	94.05	98.55	96.10	90.89	95.98	92.63	86.37
4	93.50	99.76	96.70	93.22	93.95	92.16	79.96
5	98.47	95.58	93.27	97.53	92.13	93.82	81.30
6	92.40	93.82	93.06	96.78	92.11	91.29	87.26
7	93.43	92.22	91.32	93.88	92.00	90.49	90.68
8	93.81	93.57	91.30	94.27	90.8	91.15	91.62
9	-	94.24	91.18	-	-	87.46	92.16
10	-	95.50	95.62	-	-	84.06	89.45
11	-	98.88	-	-	-	-	-
x-bar	95.0300	94.2527	94.4370	95.5700	93.4850	91.4140	87.1530
SD	2.2973	4.1739	2.8287	2.9502	3.0253	3.5847	4.3608

ตารางผนวกที่ ฅ2 การวิเคราะห์หัตถมูมสัฒ์ของ PS

No.	ก่อนการ ฉายรังสี	ฉายรังสี UV					
		15 นาที	30 นาที	1 ชม.	2 ชม.	3 ชม.	4 ชม.
1	96.22	95.31	76.91	81.98	82.60	51.27	55.69
2	92.39	85.17	80.49	75.18	83.66	43.38	48.73
3	94.11	87.30	83.97	82.26	78.67	44.16	47.06
4	91.80	88.68	88.90	82.10	76.81	44.03	43.37
5	94.36	90.22	87.31	78.95	71.45	44.79	42.71
6	89.42	89.04	80.49	75.09	72.82	47.13	44.00
7	89.02	83.18	87.06	74.54	75.10	50.29	56.54
8	91.57	81.67	80.69	75.60	76.58	52.58	46.30
9	88.85	79.32	85.60	68.10	81.47	47.21	-
10	-	98.75	85.04	-	77.05	48.93	-
11	-	-	83.26	-	76.65	48.74	-
12	-	-	82.00	-	-	-	-
x-bar	91.9711	87.8640	83.4767	77.0889	77.5327	47.5009	48.0500
SD	2.5899	5.9854	3.5045	4.6956	3.8417	3.1484	5.3689

ตารางผนวกที่ ฅ3 การวิเคราะห์หัตถมมสัฒ์ของ HIPS

No.	ก่อนการ ฉายรังสี	ฉายรังสี UV					
		15 นาที	30 นาที	1 ชม.	2 ชม.	3 ชม.	4 ชม.
1	92.39	77.59	79.84	72.65	74.21	68.07	37.73
2	88.2	80.98	81.09	61.36	78.69	65.89	31.09
3	77.86	81.56	79.82	73.7	76.88	67.02	36.48
4	76.29	81.39	79.99	78.96	78.48	58.13	31.97
5	82.07	80.5	78.55	76.79	77.52	61.89	45.68
6	84.42	76.99	81.07	70.9	78.84	57.95	44.79
7	91.45	80.54	73.77	71.47	76.65	67.08	37.95
8	87.41	80.84	80.24	75.87	74.03	72.24	-
9	84.59	80.47	79.6	76.65	78.09	-	-
10	86.11	81.51	74.85	77.85	77.57	-	-
11	86.61	79.93	78.54	-	-	-	-
x-bar	85.2182	80.2091	78.8509	73.6200	77.0960	64.7838	37.9557
SD	5.0149	1.5319	2.4011	5.0988	1.7277	5.0319	5.6505

ตารางผนวกที่ ฅ4 การวิเคราะห์หัตถมมสัฒ์ของ ABS

No.	ก่อนการ ฉายรังสี	ฉายรังสี UV					
		15 นาที	30 นาที	1 ชม.	2 ชม.	3 ชม.	4 ชม.
1	81.4	79.83	73.22	79.22	66.62	58.02	47.48
2	87.17	83.6	71.94	82.13	69.79	62.1	43.96
3	82.91	83.54	73.64	74.7	76.48	64.45	44.34
4	82.94	81.83	71.05	73.1	76.35	63.23	-
5	85.78	84.63	77.01	78.03	70.23	60.32	-
6	84.64	85.3	79.92	76.77	71.06	61.74	-
7	83.73	85.59	75.42	70.28	76	-	-
8	81.6	83.05	73.14	74.73	-	-	-
9	83.64	78.47	76.93	80.73	-	-	-
10	-	-	76.49	80.62	-	-	-
x-bar	83.7567	82.8711	74.8760	77.0310	72.3614	61.6433	45.2600
SD	1.7679	2.2876	2.6011	3.6080	3.6238	2.0613	1.5774

ตารางผนวกที่ ฅ5 การวิเคราะห์หัตถ์ดมุ่มสัฒ์สของ Santoprene™

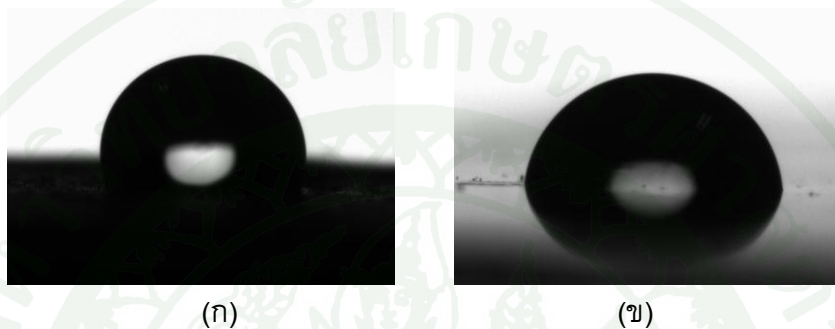
No.	Santoprene™
1	109.68
2	105.77
3	107.08
4	102.41
5	107.09
6	103.35
7	102.45
8	101.36
9	98.92
10	98.00
x-bar	103.6110
SD	3.7571

ตารางผนวกที่ ฅ6 การวิเคราะห์หัตถ์ดมุ่มสัฒ์สของ pPVC

No.	pPVC
1	84.41
2	79.36
3	84.24
4	81.54
5	81.43
6	78.88
7	81.06
8	80.39
9	78.99
10	77.65
11	83.90
12	83.91
13	82.52
x-bar	81.4061
SD	2.2816

ค่ามัมสัมพัทธ์ของ SANTM และ pPVC

โครงสร้างของ SANTM ที่ไม่พบความมีขั้วในสายโซ่พอลิเมอร์ จากภาพผนวกที่ ฅ1(ก) ค่ามัมสัมพัทธ์เฉลี่ยจึงมีค่าสูงถึง 103.611 องศา ในขณะที่ความมีขั้วจากคลอรีนอะตอม (Chlorine atom) ภายในโครงสร้างของ pPVC ทำให้หยดน้ำบนพื้นผิวของ pPVC มีค่ามัมสัมพัทธ์เท่ากับ 82.009 ดังภาพผนวกที่ ฅ1(ข)



ภาพผนวกที่ ฅ1 ลักษณะของหยดน้ำที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุซ้อนทับ (Over-molded materials) (ก) SANTM และ (ข) pPVC



ภาคผนวก ญ

ผลการทดลองการวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือน
ของ ABS (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยโอเวอร์โมลบน pPVC

ตารางผนวกที่ ๑๑ ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนของ ABS ก่อนและหลังการฉายรังสี UV และ โอลิเมอร์โพลีเมอร์ pPVC

No.	ก่อนการฉายรังสี	ฉายรังสี UV			
		15 นาที	30 นาที	1 ชม.	2 ชม.
1	113.50	26.50	15.00	18.50	13.50
2	113.50	18.50	11.50	1.67	11.50
3	98.50	36.50	11.50	21.50	-
4	-	45.00	51.50	-	-
5	-	-	8.33	-	-
Max force (x-bar), N	108.50	31.62	19.56	13.89	12.50
Force/Area (N/m ² , Pa)	228421.05	66568.42	41178.94	29242.10	26315.78
Shear strength (kPa)	228.4210	66.5684	41.1789	29.2421	26.3157

หมายเหตุ เมื่อพื้นที่สัมผัส (Bond area) มีค่าเท่ากับ 19X25 ตารางมิลลิเมตรหรือเท่ากับ 475 ตารางมิลลิเมตร (เท่ากับ 4.75×10^{-4} ตารางเมตร)

- หมายถึง ชิ้นงานเกิดการหลุดออกที่ตำแหน่งที่จับชิ้นงาน



ภาคผนวก ก

ผลการทดลองการวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนของ ABS
(ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยมีกาว ECA เป็นวัสดุในการเชื่อมประสาน

ตารางผนวกที่ ฎ1 ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนระหว่างคู่ ABS (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) โดยมีกาว ECA เป็นวัสดุในการเชื่อมประสาน

No.	ก่อนการฉายรังสี	ฉายรังสี UV	
		2 ซม.	4 ซม.
1	375.00	528.33	842.00
2	1046.25	699.75	1294.50
3	597.00	1113.75	1198.75
4	-	-	1368.00
5	-	-	1170.00
Max force (x-bar), N		672.75	780.61
Force/Area (N/m ² , Pa)		224250	2602036.66
Shear strength (kPa)		2242.50	2602.03

ตารางผนวกที่ ฎ2 ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนระหว่าง ABS (ก่อนและหลังการฉายรังสี UV) และ pPVC โดยมีกาว ECA เป็นวัสดุในการเชื่อมประสาน

No.	ก่อนการฉายรังสี	ฉายรังสี UV	
		2 ซม.	4 ซม.
1	223.50	165.00	101.50
2	108.50	173.50	-
3	135.00	118.50	96.50
4	-	121.50	82.50
5	178.50	-	-
Max force (x-bar), N		179.62	144.62
Force/Area (N/m ² , Pa)		598750.00	482083.33
Shear strength (kPa)		598.75	482.08

หมายเหตุ เมื่อพื้นที่สัมผัส (Area) มีค่าเท่ากับ 12X25 ตารางมิลลิเมตรหรือเท่ากับ 300 ตารางมิลลิเมตร (3×10^{-4} ตารางเมตร)

- หมายถึง ชิ้นงานเกิดการหลุดออกที่ตำแหน่งที่จับชิ้นงาน



ที่ ศธ ๐๕๑๓.๑๑๕๐๑/๒๗๑๓



บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตู้ ปณ.๑๑๐๔ ปทผ. เกษตรศาสตร์
จตุจักร กรุงเทพฯ ๑๐๙๐๓

๗๘

กันยายน ๒๕๕๔

เรื่อง ขอเชิญเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ ๒๒

เรียน นายกิตติพงษ์ วงศ์วารี

สิ่งที่ส่งมาด้วย ข้อปฏิบัติสำหรับผู้ผ่านการพิจารณาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ
ครั้งที่ ๒๒

ตามที่ท่านได้ให้ความสนใจเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ ๒๒ ใน
ระหว่างวันที่ ๖-๗ ตุลาคม ๒๕๕๔ ณ อาคารวชิราวุธธรรม คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นั้น

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มีความยินดีที่จะแจ้งให้ท่านทราบว่า ผลงาน
ของท่านผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว จึงขอเชิญท่านเข้าร่วมเสนอ
ผลงานภาคปากเปล่าในเรื่อง “การปรับปรุงสมบัติการยึดติดตัวของ ABS โดยใช้เทคนิคการฉายรังสี
อัลตราไวโอเลต” ตามวัน เวลา และสถานที่ดังกล่าว และขอให้ท่านดำเนินการตามข้อปฏิบัติที่แนบมา
พร้อมนี้

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กัญญา ชีระกุล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร. ๐-๒๙๔๒-๘๔๔๕ ต่อ ๒๐๗-๒๐๘

โทรสาร ๐-๒๙๔๒-๘๔๔๕ ต่อ ๒๓๖

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายกิตติพงศ์ วงศ์วารี
เกิดวันที่	16 พฤศจิกายน 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เคมีอุตสาหกรรม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถานที่ทำงานและตำแหน่งปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-