

การศึกษาคุณสมบัติการใช้งานของพลาสติกชีวภาพสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์



นางสาวกรวิกา ช่ายทอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF FUNCTIONAL PROPERTIES OF BIOPLASTIC FOR AUTOMOTIVE PARTS



Miss Kornwika Khaythong

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาคุณสมบัติการใช้งานของพลาสติกชีวภาพสำหรับ  
ชิ้นส่วนยานยนต์

โดย

นางสาวกรวิกา ข่ายทอง

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศทวีวิวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เภาประเสริฐวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร)

กรวิกา ช่ายทอง : การศึกษาคุณสมบัติการใช้งานของพลาสติกชีวภาพสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์. (A STUDY OF FUNCTIONAL PROPERTIES OF BIOPLASTIC FOR AUTOMOTIVE PARTS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร สมชาย พัวจินดา เนตร, 265 หน้า.

จากผลวิกฤติการณ์ภาวะโลกร้อน อุตสาหกรรมรถยนต์มีความจำเป็นต้องพิจารณาเลือกใช้พลาสติกชีวภาพซึ่งถูกย่อยสลายง่าย เพื่อทดแทนพลาสติกที่ใช้ทำชิ้นส่วนตกแต่งภายในรถยนต์ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติการใช้งานของพลาสติกชีวภาพ (เม็ดพลาสติกพอลิไตรเมทิลีน เทเรพทาเลตเสริมแรงด้วยกลาสไฟเบอร์ 15 % (P15) และ 30% (P30) ตามลำดับ) และพลาสติก ABS ซึ่งใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยในการทดสอบได้แบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ 1) วัสดุก่อนผ่านการเคลือบฟิล์ม และ 2) วัสดุหลังการเคลือบฟิล์มจากนั้นนำวัสดุทั้งสองกลุ่มมาทดสอบการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA) และแบ่งชิ้นงานบางส่วนผ่านแสงยูวี ที่ความเข้มแสง 2.36, 3.54, และ 4.72 mW/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ และบางส่วนนำไปอบที่อุณหภูมิและความชื้นต่างๆ หลังจากนั้นนำชิ้นงานทดสอบคุณสมบัติการหลุดลอกฟิล์มและคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้แก่ การทนแรงดึง โมดูลัสการยืดหยุ่น แรงดึงที่จุดคลาก อัตราการยืดตัว และความทนทานต่อแรงกระแทก

ผลการศึกษาพบว่า (1) วัสดุทั้ง 3 ชนิด เริ่มสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันที่ 340°C (2) ความเข้มของแสงยูวีและเวลาที่ใช้มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญโดยการเพิ่มขึ้นของเวลาและความเข้มแสงยูวีมีผลทำให้ค่าโมดูลัสของชิ้นงานเพิ่มขึ้นขณะที่อัตรายืดและความทนทานต่อแรงกระแทกลดลงรวมถึงการเปลี่ยนแปลงสีและความมันวาวโดยที่การเคลือบฟิล์มไม่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของวัสดุ (3) อุณหภูมิและความชื้นไม่มีผลต่อการหลุดลอกของฟิล์ม และ (4) ชิ้นงาน P30 ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มให้ผลสมรรถนะระหว่างคุณสมบัติเชิงกลและราคามีความเหมาะสมในการทดแทนวัสดุ ABS มากที่สุด

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2553.....

## 5171402821 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : BIOPLASTIC / POLYTRIMETHYLENE TEREPHTHALATE

KORNWIKHA KHAYTHONG : A STUDY OF FUNCTIONAL PROPERTIES OF  
BIOPLASTIC FOR AUTOMOTIVE PARTS. THESIS ADVISOR :  
ASST.PROF.SOMCHAI PUJINDANETR, Ph.D., 265 pp.

Due to the global warming problem, automotive industry then has emphasized on the use of bioplastics to instead of plastics produced for auto parts, especially interior parts. The objective of this research was to study the functional properties of bioplastics which were PTT (Polytrimethylene Terephthalate) reinforced with glass fibers of 15wt% (P15) and 30wt% (P30), and to compare with the existing ABS plastic. The decomposition temperature of the polymers was analyzed by thermogravimetric (TGA). Testing specimen was prepared by injection molding machine. Dividing some specimens for UV testing with the intensity of 2.36, 3.54 and 4.72 mW/cm<sup>2</sup> and some specimens for temperature and humidity test. The physical and mechanical properties such as tensile strength, stiffness, yield strength, elongation and impact strength were investigate

The study found that (1) the initial decomposition temperature of all the materials was similar at 340°C (2) the intensity of UV-ray and duration time were significant effect on mechanical and physical properties, especially the specimens without film coated, increasing of UV-intensity could remarkably increase, stiffness while elongation, colorant and gloss of the specimens were poor, (3) Temperature and humidity were not effect on coated film peeling, and finally (4) material of P30 with film coated could give the best weighted property index, and also be instead of ABS.

Department : .....Industrial Engineering.

Field of Study : .....Industrial Engineering.

Academic Year : .....2010.....

Student's Signature

Advisor's Signature

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและเสนอแนวทางในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และ ผศ.ดร. กาญจนา กาญจนสุนทร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อคิดเห็นในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบ

ขอกราบขอบพระคุณ นาวาอากาศตรีวีระเดช-นางชลิษา ช่ายทอง บิดา-มารดา ตลอดจน ครอบครัวและเพื่อนๆ ที่สนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ลักษณะของชิ้นส่วนภายในรถยนต์ที่ทำการศึกษ.....	4
1.3 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนพิน แอสซี คอนโซล พาเนล.....	6
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	7
1.5 ขอบเขตและสมมุติฐานของงานวิจัย.....	7
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	9
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับพอลิเมอร์.....	11
2.2 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับพลาสติกชีวภาพ.....	15
2.3 การเสื่อมของพอลิเมอร์.....	24
2.4 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ทำการศึกษ.....	28
2.5 กรรมกรวิธีชุบผิวด้วยฟิล์ม.....	29
2.6 การทดสอบแรงดึง.....	33
2.7 การทดสอบความทนต่อแรงกระแทก.....	34
2.8 การวิเคราะห์การถดถอย.....	35
2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	42
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	43

3.3 การทดสอบคุณสมบัติชิ้นงาน.....	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	53
4.1 ผลการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน.....	54
4.2 ผลการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยแสงยูวี.....	57
4.3 ผลการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกล.....	60
4.3.1 การทดสอบแรงดึง.....	60
4.3.1.1 ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด.....	60
4.3.1.2 ค่าความเค้นจุดคราก.....	79
4.3.1.3 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น.....	98
4.3.1.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณจุดขาด.....	117
4.3.2 การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก.....	136
4.4 ผลการทดสอบการหลุดลอกฟิล์ม.....	155
4.5 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ.....	167
4.5.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล.....	167
4.5.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล.....	175
4.6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของวัสดุ.....	185
4.7 การตัดสินใจเลือกวัสดุ.....	251
บทที่ 5 วิจัยกรณีผลการทดลอง.....	255
5.1 คุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน.....	255
5.2 คุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยแสงยูวี.....	255
5.3 คุณสมบัติเชิงกล.....	255
5.4 คุณสมบัติการหลุดลอกฟิล์ม.....	255
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ.....	256
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	257
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	257
6.2 อุปสรรคและปัญหาในการวิจัย.....	257
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	258
รายการอ้างอิง.....	259
ภาคผนวก.....	261





ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	การผลิตพลาสติกชีวภาพในระดับอุตสาหกรรมและระดับนำร่อง..... 20
ตารางที่ 2.2	การดัดกลืนรังสียูวีสำหรับพอลิเมอร์สังเคราะห์และพอลิเมอร์ธรรมชาติ..... 27
ตารางที่ 4.1	การเสื่อมสภาพของชิ้นงานหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสงและเวลาต่างๆ..... 58
ตารางที่ 4.2	การเปลี่ยนแปลงความมันวาวของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสงและเวลา ต่างๆ..... 59
ตารางที่ 4.3	ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์ม. 61
ตารางที่ 4.4	ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 $\text{mW/cm}^2$ ..... 62
ตารางที่ 4.5	ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 $\text{mW/cm}^2$ ..... 67
ตารางที่ 4.6	ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 $\text{mW/cm}^2$ ..... 72
ตารางที่ 4.7	ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์ม..... 80
ตารางที่ 4.8	ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง $2.36 \text{ mW/cm}^2$ ..... 81
ตารางที่ 4.9	ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง $3.54 \text{ mW/cm}^2$ ..... 86
ตารางที่ 4.10	ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง $4.72 \text{ mW/cm}^2$ ..... 91
ตารางที่ 4.11	ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์ม.. 99
ตารางที่ 4.12	ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 $\text{mW/cm}^2$ ..... 100
ตารางที่ 4.13	ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 $\text{mW/cm}^2$ ..... 105
ตารางที่ 4.14	ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 $\text{mW/cm}^2$ ..... 110
ตารางที่ 4.15	ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการ เคลือบฟิล์ม..... 118
ตารางที่ 4.16	ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง $2.36 \text{ mW/cm}^2$ ..... 119

	หน้า
ตารางที่ 4.17 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW/cm <sup>2</sup> .....	124
ตารางที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW/cm <sup>2</sup> .....	129
ตารางที่ 4.19 ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์ม.....	137
ตารางที่ 4.20 ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW/cm <sup>2</sup> .....	138
ตารางที่ 4.21 ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW/cm <sup>2</sup> .....	143
ตารางที่ 4.22 ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW/cm <sup>2</sup> .....	148
ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 30°C.....	156
ตารางที่ 4.24 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 50°C.....	156
ตารางที่ 4.25 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 85°C.....	157
ตารางที่ 4.26 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 95°C.....	157
ตารางที่ 4.27 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 30°C และ 70%Rh.....	158
ตารางที่ 4.28 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 30°C และ 80%Rh.....	158
ตารางที่ 4.29 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 30°C และ 90%Rh.....	159
ตารางที่ 4.30 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 50°C และ 70%Rh.....	159
ตารางที่ 4.31 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 50°C และ 80%Rh.....	160
ตารางที่ 4.32 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 50°C และ 90%Rh.....	160
ตารางที่ 4.33 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 85°C และ 70%Rh.....	161
ตารางที่ 4.34 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 85°C และ 80%Rh.....	161
ตารางที่ 4.35 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 85°C และ 90%Rh.....	162
ตารางที่ 4.36 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 95°C และ 70%Rh.....	162
ตารางที่ 4.37 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 95°C และ 80%Rh.....	163
ตารางที่ 4.38 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 95°C และ 90%Rh.....	163
ตารางที่ 4.39 ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW/cm <sup>2</sup> .....	164

ตารางที่ 4.40	ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW/cm <sup>2</sup> .....	165
ตารางที่ 4.41	ผลการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW/cm <sup>2</sup> .....	166
ตารางที่ 4.42	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152.....	168
ตารางที่ 4.43	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302.....	168
ตารางที่ 4.44	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2.....	168
ตารางที่ 4.45	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152.....	169
ตารางที่ 4.46	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302.....	170
ตารางที่ 4.47	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2.....	170
ตารางที่ 4.48	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152.....	171
ตารางที่ 4.49	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302.....	171
ตารางที่ 4.50	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2.....	172
ตารางที่ 4.51	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152.....	173
ตารางที่ 4.52	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302.....	173
ตารางที่ 4.53	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2.....	173

ตารางที่ 4.54	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152.....	174
ตารางที่ 4.55	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302.....	175
ตารางที่ 4.56	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2.....	175
ตารางที่ 4.57	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152.....	176
ตารางที่ 4.58	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302.....	177
ตารางที่ 4.59	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2.....	177
ตารางที่ 4.60	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152.....	178
ตารางที่ 4.61	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302.....	178
ตารางที่ 4.62	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2.....	179
ตารางที่ 4.63	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152.....	180
ตารางที่ 4.64	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302.....	180
ตารางที่ 4.65	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2.....	180
ตารางที่ 4.66	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152.....	182
ตารางที่ 4.67	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302.....	182

	หน้า	
ตารางที่ 4.68	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับเวลา และความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2.....	182
ตารางที่ 4.69	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและ ความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152.....	184
ตารางที่ 4.70	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและ ความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302.....	184
ตารางที่ 4.71	ผลวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและ ความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2.....	184
ตารางที่ 4.72	สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาในการผ่านแสง ยูวี.....	199
ตารางที่ 4.73	สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับเวลาในการผ่านแสงยูวี.....	199
ตารางที่ 4.74	สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาในการผ่านแสง ยูวี.....	200
ตารางที่ 4.75	สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับเวลาใน การผ่านแสงยูวี.....	200
ตารางที่ 4.76	สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับความเข้มแสงยูวี.....	211
ตารางที่ 4.77	สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับความเข้มแสงยูวี.....	211
ตารางที่ 4.78	สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับความเข้มแสงยูวี.....	212
ตารางที่ 4.79	สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับความเข้ม แสงยูวี.....	212
ตารางที่ 4.80	สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับเวลา.....	245
ตารางที่ 4.81	สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับความเข้มแสงยูวี.....	247
ตารางที่ 4.82	สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล.....	248
ตารางที่ 4.83	ค่าความสำคัญของปัจจัยในการพิจารณา.....	252
ตารางที่ 4.84	ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละคุณสมบัติ (Weight properties indexes chart; j).....	252
ตารางที่ 4.85	ค่าขนาดคุณสมบัติของวัสดุ (Scale properties; $\beta$ ).....	253
ตารางที่ 4.86	ค่า Material Performance Index ( $\gamma$ ).....	254

## สารบัญญภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	แนวโน้มการผลิตพลาสติกชีวภาพ.....	2
รูปที่ 1.2	ส่วนประกอบของค็อกพิท โมดูล.....	5
รูปที่ 1.3	กระบวนการผลิตพิน แอสซี คอนโซล พาเนล.....	6
รูปที่ 2.1	ประเภทของพลาสติกชีวภาพ.....	17
รูปที่ 2.2	กระบวนการย่อยสลายแบบ Biodegradable.....	19
รูปที่ 2.3	บริษัทผู้ผลิตพลาสติกชีวภาพจำแนกตามประเทศ.....	21
รูปที่ 2.4	บริษัทผู้ผลิตพลาสติกชีวภาพจำแนกตามประเภท.....	21
รูปที่ 2.5	กระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	23
รูปที่ 2.6	กระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี.....	24
รูปที่ 2.7	โครงสร้างทางเคมีของพอลิไตรเมทิลีน เทเรฟทาเรต.....	29
รูปที่ 2.8	ตัวอย่างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Dipping.....	30
รูปที่ 2.9	ตัวอย่างของฟิล์มที่ใช้ในกระบวนการ Dipping.....	31
รูปที่ 2.10	ตัวอย่างของบ่อชุบ.....	31
รูปที่ 2.11	กระบวนการ Dipping.....	32
รูปที่ 2.12	ตัวอย่างกราฟความเค้น-ความเครียด.....	34
รูปที่ 3.1	ลักษณะของขึ้นทดสอบรูปดัมเบล.....	43
รูปที่ 3.2	ลักษณะของขึ้นทดสอบรูปแผ่น.....	44
รูปที่ 3.3	ลักษณะของขึ้นทดสอบรูปแท่งทดสอบแรงกระแทก.....	44
รูปที่ 3.4	ลักษณะของเครื่อง TGA.....	47
รูปที่ 3.5	ลักษณะของเครื่องทดสอบแรงดึง.....	50
รูปที่ 4.1	อุณหภูมิและน้ำหนักสูญเสียนองวัสดุก่อนการเคลือบด้วยฟิล์มวิเคราะห์โดย TGA.....	55
รูปที่ 4.2	อุณหภูมิและน้ำหนักสูญเสียนองวัสดุหลังการเคลือบด้วยฟิล์มวิเคราะห์โดย TGA.....	55
รูปที่ 4.3	เวลาและน้ำหนักสูญเสียนองวัสดุก่อนการเคลือบด้วยฟิล์มวิเคราะห์โดย TGA..	56

รูปที่ 4.4	เวลาและน้ำหนักสูญเสียน้ำของวัสดุหลังการเคลือบด้วยฟิล์มวิเคราะห์โดย TGA..	56
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 2.36 mW/cm <sup>2</sup> .....	77
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 3.54 mW/cm <sup>2</sup> .....	77
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 4.72 mW/cm <sup>2</sup> .....	78
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยกับความเข้มแสงต่างๆเมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที.....	78
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 2.36 mW/cm <sup>2</sup> .....	96
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 3.54 mW/cm <sup>2</sup> .....	96
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 4.72 mW/cm <sup>2</sup> .....	97
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ยกับความเข้มแสงต่างๆเมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที.....	97
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 2.36 mW/cm <sup>2</sup> .....	115
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 3.54 mW/cm <sup>2</sup> .....	115
รูปที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 4.72 mW/cm <sup>2</sup> .....	116
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยกับความเข้มแสงต่างๆเมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที.....	116
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 2.36 mW/cm <sup>2</sup> .....	134



รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 3.54 mW/cm <sup>2</sup> .....	134
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 4.72 mW/cm <sup>2</sup> .....	135
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดเฉลี่ยกับความเข้มแสงต่างๆเมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที.....	135
รูปที่ 4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 2.36 mW/cm <sup>2</sup> .....	153
รูปที่ 4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 3.54 mW/cm <sup>2</sup> .....	153
รูปที่ 4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 4.72 mW/cm <sup>2</sup> .....	154
รูปที่ 4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ยกับความเข้มแสงต่างๆเมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที.....	154
รูปที่ 4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm <sup>2</sup> ที่เวลาต่างๆ.....	187
รูปที่ 4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm <sup>2</sup> ที่เวลาต่างๆ.....	187
รูปที่ 4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm <sup>2</sup> ที่เวลาต่างๆ.....	188
รูปที่ 4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm <sup>2</sup> ที่เวลาต่างๆ.....	188
รูปที่ 4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm <sup>2</sup> ที่เวลาต่างๆ.....	189
รูปที่ 4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm <sup>2</sup> ที่เวลาต่างๆ.....	189

















รูปที่ 4.122	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม $2.36 \text{ mW/cm}^2$ .....	243
รูปที่ 4.123	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม $2.36 \text{ mW/cm}^2$ .....	244
รูปที่ 4.124	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม $2.36 \text{ mW/cm}^2$ .....	244



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

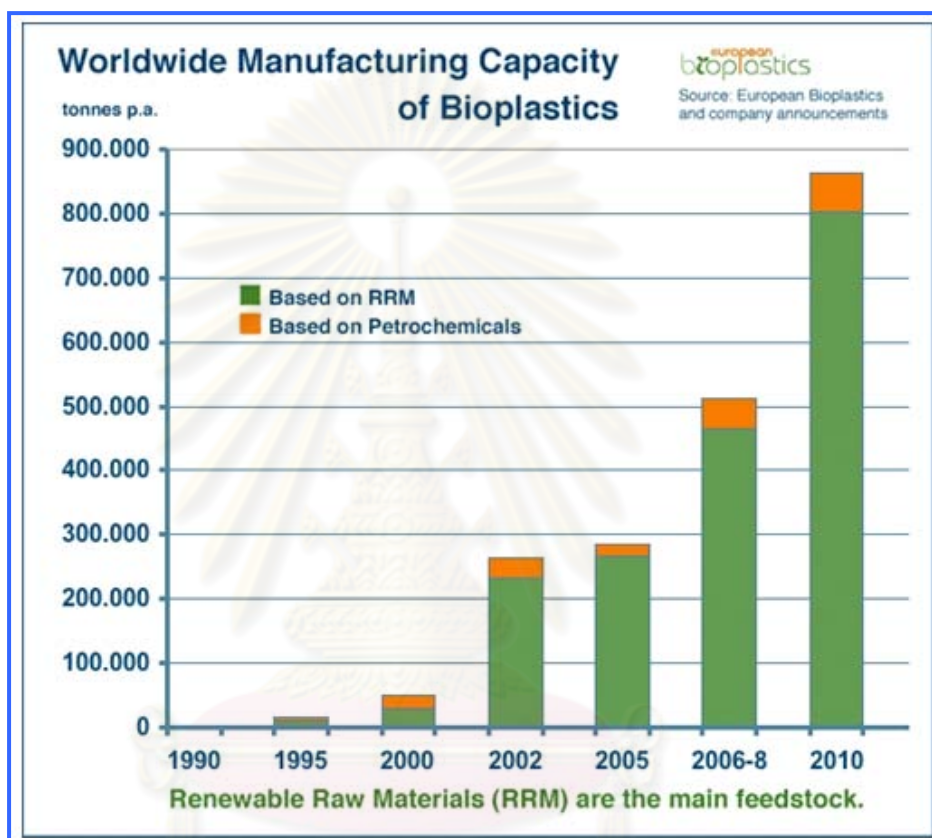
### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากผลกระทบที่เกิดจากวิกฤตการณ์ภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาที่ผู้คนส่วนใหญ่ให้ความสำคัญ กอปรกับภาวะเศรษฐกิจโลกที่ชะลอตัวลง (Global Financial Crisis) ทำให้เกิดการแข่งขันเพื่อชิงส่วนแบ่งทางการตลาดเป็นอย่างมาก สำหรับอุตสาหกรรมรถยนต์ได้นำเอาปัญหานี้มาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อใช้เป็นจุดเด่นในการแข่งขัน โดยเน้นไปที่การนำวัสดุรีไซเคิลมาใช้ซ้ำ (รีไซเคิล) หรือใช้เส้นใยธรรมชาติมาเป็นส่วนผสมเพื่อเสริมแรงและทดแทนเส้นใยสังเคราะห์ นอกจากนี้เส้นใยเสริมแรงแล้ววัสดุคอมโพสิตยังประกอบด้วยเรซินที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ โดรนเรซินที่ใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันสำหรับงานวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ พอลิโพรพิลีน ฟีนอลิกเรซิน พอลิเอสเตอร์ และพอลิยูรีเทน เป็นต้น ซึ่งเรซินเหล่านี้ล้วนมีต้นกำเนิดมาจากน้ำมันปิโตรเลียม โดยขณะนี้ราคาน้ำมันในตลาดโลกมีความผันผวนและมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้กระทบถึงราคาต้นทุนในการผลิตเม็ดพลาสติก

และเป็นที่ยอมรับกันว่าพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียมซึ่งเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน นับตั้งแต่กระบวนการผลิตจนถึงขั้นตอนสุดท้ายในการกำจัดเมื่อกลายเป็นขยะ และวัสดุที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนภายในรถยนต์ส่วนใหญ่ก็คือพลาสติก โดยในทศวรรษที่ผ่านมาพลาสติกที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเป็นชิ้นส่วนภายในรถยนต์ได้แก่ อะคริโลไนไตรด์ บิวทาไดอีน สไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene: ABS) และ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ มีความทนทานต่อแรงกระแทกที่สูงและที่ความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ โดยงานที่นำมาใช้ เช่น แผงหน้าปัดอุปกรณ์ (Instrument Panel) และ แผงประตู (Door Trim) เป็นต้น ดังนั้นกลุ่มอุตสาหกรรมรถยนต์ได้เล็งเห็นว่าพลาสติกชีวภาพหรือพลาสติกที่มาจากพืช เช่น แป้งมันสำปะหลัง ข้าวโพด และอ้อย เป็นต้น จะสามารถนำมาทดแทนพลาสติกทั่วไปที่ผลิตจากปิโตรเลียมเพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้

ในหลายประเทศได้เริ่มจำกัดการใช้พลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียมลงและส่งเสริมการผลิตพลาสติกชีวภาพ พร้อมทั้งสนับสนุนให้มีการวิจัยเพื่อใช้พืชหรือชีววัตถุที่เหมาะสมนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพเพื่อทดแทนพลาสติกที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ดังจะเห็นได้จาก

แนวโน้มการใช้และการผลิตพลาสติกชีวภาพที่แสดงถึงการเติบโตในตลาดโลกที่เพิ่มขึ้นมาก โดยมีปริมาณความต้องการใช้ทั่วโลกในปี 2549 – 2551 สูงถึง 500,000 ตันต่อปี และมีอัตราการเจริญเติบโตถึงร้อยละ 70 เมื่อเทียบกับปี 2548 ทั้งนี้ยังมีการคาดการณ์ว่าในปี 2553 ปริมาณความต้องการจะสูงถึง 800,000 ตันต่อปี



รูปที่ 1.1 แนวโน้มการผลิตพลาสติกชีวภาพของโลก

แต่ในปัจจุบันไบโอพลาสติกหรือพลาสติกชีวภาพยังไม่มีกรนำมาใช้กับกลุ่มอุตสาหกรรมรถยนต์และอิเล็กทรอนิกส์มากนัก เนื่องจากการพัฒนาพลาสติกชีวภาพนั้นยังมุ่งประเด็นที่การย่อยสลายได้ของวัสดุเป็นหลักทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวโพดส่วนใหญ่จึงเป็นพวก บรรจุภัณฑ์ ภาชนะบรรจุอาหาร แผ่นฟิล์ม ซ้อนส้อม และถุงเพาะชำ เป็นต้น ซึ่งเม็ดพลาสติกชนิดนี้จะมีอัตราการสลายตัวที่ค่อนข้างเร็ว (ตามข้อกำหนดระบุให้พลาสติกย่อยสลายได้จะต้องมีการย่อยสลาย

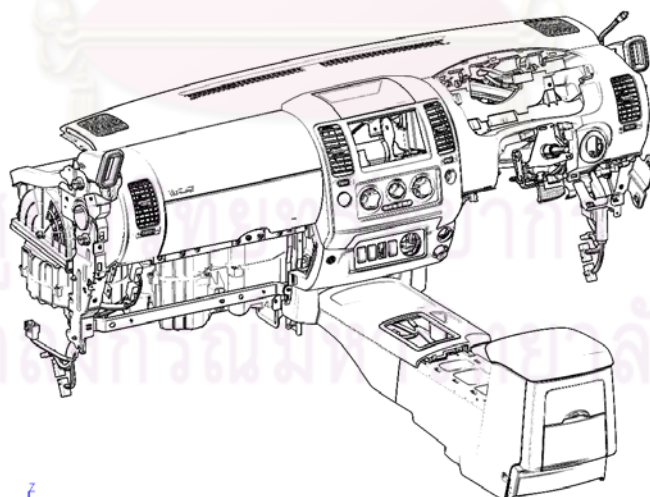
90% ภายในระยะเวลาไม่เกิน 6 เดือน) และคุณสมบัติบางประการยังไม่ใกล้เคียงกับพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียม กอปรกับราคาเม็ดพลาสติกชีวภาพที่ยังมีราคาค่อนข้างสูงกว่าเม็ดพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียมถึง 2 – 3 เท่า ดังนั้นจึงทำให้ผู้ผลิตยังไม่พัฒนาขึ้นส่วนโดยใช้พลาสติกชีวภาพเป็นวัสดุหลักในการผลิตเท่าใดนัก

แม้ว่าประเด็นหลักในการนำเอาพลาสติกชีวภาพมาประยุกต์ใช้คือความสามารถในการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ แต่ในการผลิตและออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์นั้นจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการย่อยสลายที่จะต้องครอบคลุมถึงช่วงอายุของผลิตภัณฑ์ (Model Life) และลักษณะการใช้งานของชิ้นส่วนนั้นๆ สำหรับชิ้นส่วนภายในรถยนต์นั้นปัจจัยหลักที่ทำให้พลาสติกเกิดการเสื่อมคุณภาพ (Degradation) คือ ความร้อน รังสี และแรงกลในกระบวนการผลิตหรือในระหว่างการใช้งาน การเสื่อมคุณภาพอาจสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงรูปลักษณ์ทางกายภาพ สีหรือการเสื่อมคุณสมบัติทางกล เป็นต้น โดยการเสื่อมคุณภาพเนื่องจากความร้อนอาจเกิดขึ้นโดยกลไกแบบคลายสภาพพอลิเมอร์แบบลูกโซ่ (Chain depolymerization) หรือกลไกแบบตัดขาดลูกโซ่ (Chain scission) หรือกลไกแบบการเปลี่ยนแปลงพันธะ (Bond changes) และสำหรับการเสื่อมคุณภาพเนื่องจากแสงอุลตราไวโอเล็ตจะทำให้พอลิเมอร์โดยเฉพาะในสภาวะบรรยากาศที่มีออกซิเจนเกิดการเสื่อมสภาพซึ่งอาจจะเห็นได้จากการเปลี่ยนสี การแตกผิว การคลายสภาพเป็นการแข็งเปราะ เป็นต้น ดังนั้นสิ่งที่ผู้ผลิตควรคำนึงถึงในการเลือกวัสดุที่จะนำมาทดแทนคือพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่มีคุณสมบัติและความทนทานดีกว่าหรือใกล้เคียงกับพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียม แต่เนื่องจากการพัฒนาโครงสร้างทางเคมีของวัสดุนั้นมักจะให้เวลานานและมีค่าใช้จ่ายสูง จนอาจจะทำให้เกิดการสูญเสียโอกาสในการช่วงชิงส่วนแบ่งทางการตลาด ดังนั้นเพื่อเป็นการลดทอนขั้นตอนเหล่านี้การคัดเลือกวัสดุที่มีอยู่ในท้องตลาดโดยพิจารณาจากคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยให้บริษัทผู้ผลิตสามารถลดขั้นตอนในการพัฒนาได้ ซึ่งในปัจจุบันเม็ดพลาสติกชีวภาพที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเม็ดพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียมและมีอยู่ในท้องตลาดนั้นคือ เม็ดพลาสติกที่ผลิตจากข้าวโพด และเสริมแรงพอลิไตรเมทิลีน เทเรฟทาเลตด้วยใยแก้ว (Glass fiber reinforced Polytrimethylene Terephthalate) แต่ในการออกแบบนั้นการพิจารณาเพียงแค่คุณสมบัติทางกลเพียงอย่างเดียวยังไม่สามารถบอกได้ว่าวัสดุชนิดนั้นๆ มีความเหมาะสมต่อการนำไปผลิตมากน้อยเพียงใด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาลักษณะการใช้งานประกอบในการพิจารณาด้วย

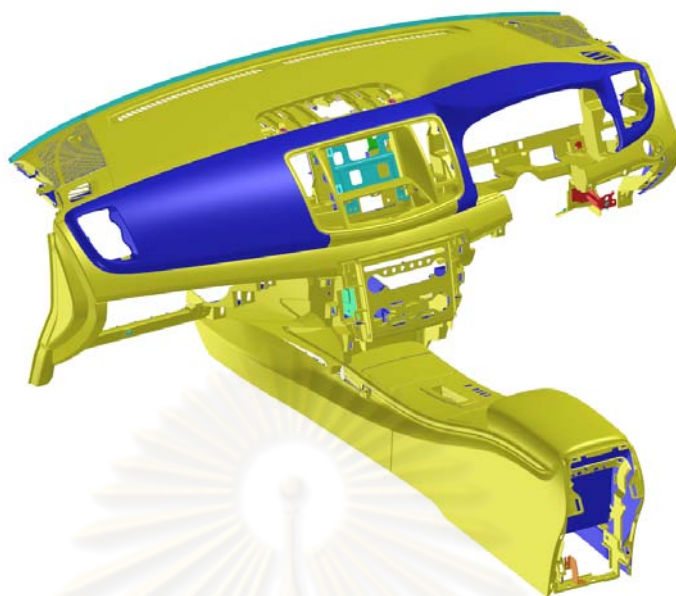
ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการใช้งานของยานยนต์ในอนาคต ผนวกกับการแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำมันปิโตรเลียมและปัญหาสิ่งแวดล้อม การนำพลาสติกชีวภาพมาประยุกต์ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนจึงมีส่วนช่วยในการลดปัญหาดังกล่าวได้งานวิจัยฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อหาพลาสติกชีวภาพที่เหมาะสมในการที่จะนำมาทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียมที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนภายในรถยนต์ในปัจจุบันโดยได้ทำการศึกษาเม็ดพลาสติกที่ผลิตจากข้าวโพดและเสริมแรงพอลิไตรเมทิลีน เทเรพทาเลตด้วยกัลาสไฟเบอร์ (Glass fiber reinforced Polytrimethylene Terephthalate) เปรียบเทียบกับวัสดุเดิมที่ใช้ผลิตอยู่ในปัจจุบัน

## 1.2 ลักษณะของชิ้นส่วนภายในรถยนต์ที่ทำการศึกษา

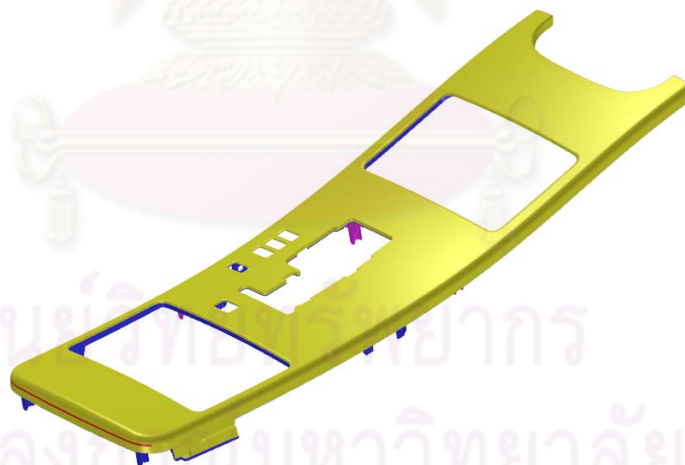
ชิ้นส่วนภายในรถยนต์ที่ทำการศึกษานั้นคือชิ้นส่วนฟิน แอสซี คอนโซล พาเนล (FIN ASSY CONSOLE PANEL) ซึ่งชิ้นส่วนดังกล่าวเป็นชิ้นส่วนย่อยที่ประกอบอยู่ในพาเนล ค็อกพิต โมดูล (PANEL COCKPIT MODULE) โดยชิ้นส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการควบคุมปิดระบบภายในอื่นๆ เช่นระบบไฟ ระบบเบรก และระบบขับเคลื่อน เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดของชิ้นส่วนแสดงดังรูปที่ 1.2 ชิ้นส่วนนี้ในปัจจุบันได้ผลิตจากเม็ดพลาสติกอะคริโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene: ABS) และทำการเคลือบผิวเพื่อเพิ่มความสวยงามด้วยกรรมวิธีชุบฟิล์ม (Dipping Process)



(a) ค็อกพิต โมดูล (COCKPIT MODULE; CPM)



(b) พาเนล ค็อกพิท โมดูล (PANEL COCKPIT MODULE)

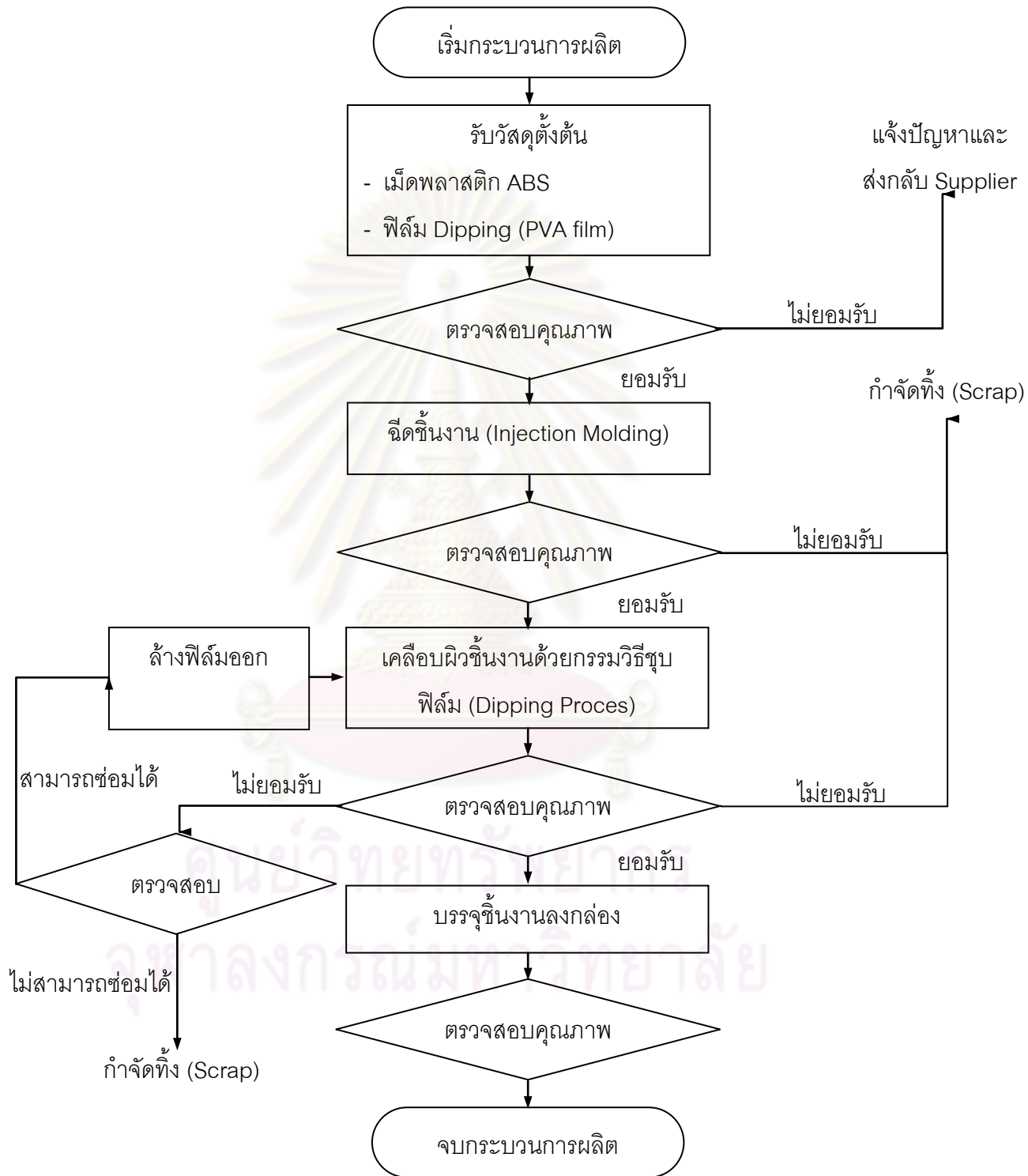


(c) ฟิน แอสซี คอนโซล พาเนล (FIN ASSY CONSOLE PANEL)

รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบของค็อกพิท โมดูล

### 1.3 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนฟิน แอสซี คอนโซล พาเนล (FIN ASSY CONSOLE PANEL)

กระบวนการในการผลิตชิ้นส่วนที่ทำการศึกษานี้สามารถเขียนโดยสังเขปได้ดังนี้



รูปที่ 1.3 กระบวนการผลิตฟิน แอสซี คอนโซล พาเนล

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

- 1) เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำพลาสติกชีวภาพมาทำการผลิตชิ้นส่วน ฟิน แอสซี คอนโซล พาเนล (FIN ASSY CONSOLE PANEL)
- 2) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาชิ้นส่วนยานยนต์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (ECO PRODUCT)
- 3) เพื่อเพิ่มคุณค่าให้กับผลิตภัณฑ์

#### 1.5 ขอบเขตและสมมุติฐานของงานวิจัย

ได้กำหนดขอบเขตของการทำวิจัย ไว้ดังนี้

- 1) ศึกษาเฉพาะการพัฒนาชิ้นส่วนภายในรถยนต์ (INTERIOR PART) ในส่วนของ ฟิน แอสซี คอนโซล พาเนล (FIN ASSY CONSOLE PANEL) ซึ่งเป็น ชิ้นส่วนประกอบย่อยที่อยู่ในชิ้นส่วนคืออกพิท โมดูล (COCKPIT MODULE)
- 2) การประเมินความเหมาะสมของชนิดวัสดุที่ทำการศึกษา นั้นจะพิจารณาโดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างชิ้นงานทดสอบ (TEST PIECE) ที่ผลิตจากพลาสติกชีวภาพและพลาสติกที่ผลิตในปัจจุบัน
- 3) วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย
  - ก) เม็ดพลาสติกอะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene : ABS)
  - ข) เม็ดพลาสติกพอลิไตรเมทิลีน เทเรฟทาเลตเสริมแรงกล้าสไฟเบอร์ 15 เปอร์เซนต์ (15% Glass fiber reinforced Polytrimethylene Terephthalate; P15)



ค) เม็ดพลาสติกพอลิไตรเมทิลีน เทเรฟทาเลตเสริมแรงกล้าสไฟเบอร์ 30 เปอร์เซ็นต์ (30% Glass fiber reinforced Polytrimethylene Terephthalate; P30)

4) การศึกษาคุณสมบัติการใช้งานจะทำการศึกษาดังนี้

ก) การศึกษาคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties)

1) ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)

1.1 ความทนต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength;  $\sigma_T$ )

1.2 ค่าความเค้นจุดคราก (Yield Strength;  $\sigma_y$ )

1.3 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

1.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด (Elongation at Break; %EL)

2) ความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength)

ข) การศึกษาคุณสมบัติการหลุดลอกฟิล์ม

1) คุณลักษณะภายนอกเบื้องต้น (Appearance Check)

2) คุณสมบัติการยึดติด (Adhesive Characteristics)

ค) การศึกษาคุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน

ง) การศึกษาคุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยแสงยูวี

5) การทดสอบปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM (The American Society for Testing and Materials) ดังนี้

ก) ความทนต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ของความยืดหยุ่น และโมดูลัสของความยืดหยุ่น ทดสอบตามมาตรฐาน D-638

- ข) ความทนต่อแรงกระแทก ทดสอบตามมาตรฐาน D-256
  - ค) ความเร็วของเครื่องทดสอบแรงดึง (Cross head speed) ที่ใช้ในการทดสอบค่าความทนต่อแรงดึง โมดูลัสของความยืดหยุ่น และเปอร์เซ็นต์ของความยืดหยุ่น กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อวินาทีทุกชิ้นงาน
  - ง) การเตรียมชิ้นทดสอบทุกชิ้นต้องเตรียมภายใต้เงื่อนไขที่เหมือนกันทุกประการเพื่อเป็นการลดผลกระทบอันเนื่องมาจากเงื่อนไขในการเตรียมชิ้นทดสอบที่แตกต่างกัน
- 6) เกณฑ์การยอมรับที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะอ้างอิงจากเกณฑ์มาตรฐานที่ทางบริษัทผู้ผลิตใช้เป็นเกณฑ์ปฏิบัติในปัจจุบัน

## 1.6 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัย สามารถสรุปขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยได้ ดังนี้

- 1) รวบรวมข้อมูล
  - ก) สํารวจงานวิจัย บทความ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกชีวภาพ หัวข้อและวิธีการทดสอบวัสดุ
  - ข) ศึกษาข้อมูลและหน้าที่การทำงาน (FUNCTION) ของชิ้นส่วนฟิน แอสซี คอนโซล พาเนล (FIN ASSY CONSOLE PANEL)
- 2) การศึกษาคุณสมบัติการใช้งาน
 

ขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติของชิ้นส่วนสำหรับวัสดุแต่ละชนิด เปรียบเทียบกับวัสดุที่ใช้อยู่ในปัจจุบันโดยในการทดสอบนั้นจะทดสอบโดยใช้ชิ้นทดสอบ (TEST PIECE) ทำการเปรียบเทียบก่อนและหลังการเคลือบผิว และสำหรับหัวข้อในการศึกษาได้แก่

  - ก) การศึกษาคุณสมบัติทางกล (MECHANICAL PROPERTIES)

- ข) การศึกษาคุณสมบัติการหลุดลอกฟิล์ม
  - ค) การศึกษาคุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน
  - ง) การศึกษาคุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยแสงยูวี
- 3) อภิปรายและสรุปผล
  - 4) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย มีดังนี้

- 1) ปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อให้สามารถแข่งขันและอยู่รอดในตลาดได้
- 2) พัฒนาขีดความสามารถของผู้ผลิตขึ้นส่วน
- 3) ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการใช้พลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียม
- 4) เป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจและเป็นแนวทางในการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้กับชิ้นส่วนประเภทอื่นที่ต้องการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานเกี่ยวกับพอลิเมอร์ พลาสติกชีวภาพ การเสื่อมสลายของพอลิเมอร์ คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ทำการศึกษา และกระบวนการเคลือบผิวชิ้นงาน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาชิ้นส่วนต่อไป

#### 2.1. หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับพอลิเมอร์

เมื่อกล่าวถึงคำว่า พอลิเมอร์ หลายคนอาจจะนึกถึง เส้นใย เส้นไหม หรือยาง ขึ้นอยู่กับประสบการณ์และความคุ้นเคยเพราะพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มนุษย์ได้นำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันมากมาย

##### 2.1.1 ความเป็นมาของวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

มีหลักฐานทางประวัติศาสตร์ว่ามนุษย์ได้มีการใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติมาเป็นเวลาหลายพันปีแล้ว ทั้งที่ยังไม่มีการบัญญัติคำว่า พอลิเมอร์ พอลิเมอร์จากธรรมชาติที่มนุษย์ใช้ได้แก่ ขนสัตว์ ใยฝ้ายและใยไหม โดยนำมาทำเป็นเครื่องนุ่งห่มและน้ำยางธรรมชาติที่นำมาทำเป็นรองเท้ายางกันน้ำและภาชนะใส่ของเป็นต้น แม้ว่าพอลิเมอร์จะถูกนำมาใช้เป็นประโยชน์เป็นเวลานานแล้ว แต่ก็ยังไม่มีการทำความเข้าใจในโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ ดังนั้นการศึกษาเพื่อนำพอลิเมอร์มาใช้ประโยชน์ขณะนั้นจึงเป็นการศึกษาแบบลองผิดลองถูก เพราะความรู้ที่มีเกี่ยวกับสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่นความรู้เกี่ยวกับการตกผลึก จุดเดือดและจุดหลอมเหลว เป็นต้น ไม่สามารถนำมาอธิบายพฤติกรรมและสมบัติของพอลิเมอร์ได้ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1920 นักเคมีชาวเยอรมันชื่อ สตอยดิงเจอร์ (Staudinger) ได้เสนอสมมติฐานเกี่ยวกับพอลิเมอร์ว่า พอลิเมอร์เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนมากที่ยึดกันอยู่ด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) และมีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) สูงกว่าสารประกอบอินทรีย์ทั่วไปแต่ความคิดของเขายังไม่ได้รับการยอมรับในขณะนั้น ต่อมาในปี ค.ศ. 1929 แครโรเธอร์ส (Carothers) ได้ทำการทดลองหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray) ได้สำเร็จจนสามารถยืนยันสมมติฐานของสตอยดิงเจอร์ได้ ต่อจากนั้นมาวิทยาการด้านพอลิเมอร์ก็เจริญขึ้นอย่างมากจนสามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติตามต้องการได้ในปัจจุบัน

### 2.1.2 นิยามเบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ เป็นคำทับศัพท์คำภาษาอังกฤษ คือ Polymer มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก 2 คำ คือคำว่า poly ที่แปลว่าจำนวนมาก กับคำว่า meros ที่แปลว่าส่วนหรือหน่วย ดังนั้นคำว่าพอลิเมอร์จึงหมายถึงสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยหน่วยของโมเลกุลซ้ำๆกัน (repeating unit) ที่เรียกว่า mer มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ได้เป็นโมเลกุลขึ้น

พอลิเมอร์สามารถเตรียมได้โดยการทำปฏิกิริยาเคมีของมอนอเมอร์ (monomer) ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์หรือพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ที่มีการควบคุมปัจจัยต่างๆ เพื่อให้มอนอเมอร์เกิดการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์เกิดเป็นโมเลกุลของพอลิเมอร์

### 2.1.3 ประเภทของพอลิเมอร์

วิธีที่ใช้ในการจำแนกพอลิเมอร์มีหลายวิธี โดยมีวิธีที่สำคัญ 4 วิธี คือ การจำแนกตามแหล่งที่มา ตามลักษณะโครงสร้างของโมเลกุล ตามจำนวนชนิดของหน่วยที่ซ้ำๆกันในโมเลกุล และตามลักษณะการใช้งานที่มีรายละเอียดของแต่ละวิธีดังนี้

#### 1. การจำแนกตามแหล่งที่มา

1.1.1 พอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural polymer) พอลิเมอร์ประเภทนี้มีอยู่แล้วในสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติและมนุษย์ได้นำเอามาดัดแปลงหรือปรับปรุงเพื่อใช้ประโยชน์ได้แก่ ไหม ฝ้าย และน้ำยางธรรมชาติ เป็นต้น

1.1.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์ (synthetic polymer) พอลิเมอร์ประเภทนี้ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นโดยมนุษย์ เนื่องจากพอลิเมอร์ธรรมชาติมีปริมาณ สัมบัติ และขอบเขตการใช้งานที่จำกัด ดังนั้นพอลิเมอร์สังเคราะห์จึงมีบทบาทมากขึ้น ตัวอย่างพอลิเมอร์สังเคราะห์ ได้แก่ พอลิเอทิลีน (polyethylene : PE) พอลิพรอพิลีน (polypropylene : PP) เป็นต้น

#### 2. การจำแนกตามลักษณะโครงสร้างของโมเลกุล

2.1.1 พอลิเมอร์แบบเชิงเส้น (linear polymer) โมเลกุลของพอลิเมอร์ประเภทนี้เป็นเส้นหรือสายโซ่ (chain) ยาวไม่มีกิ่งก้านหรือสาขาแยกออกมาจากสายโซ่หลัก (main chain) ของโมเลกุล เช่น พอลิเอทิลีน เป็นต้น

2.1.2 พอลิเมอร์แบบมีกิ่งก้านหรือสาขา (branched polymer) โมเลกุลของพอลิเมอร์ประเภทนี้มีกิ่งก้านหรือสาขาแยกออกมาจากสายโซ่หลักของโมเลกุล ที่จุดแยกกิ่งก้าน (branch point) โดยมีข้อควรสังเกตรว่าหากเป็นพอลิเมอร์แบบมีกิ่งก้าน กิ่งที่แยกออกมาจากสายโซ่หลักจะต้องมีหน่วยซ้ำหรือมอนอเมอร์เช่นเดียวกับหน่วยซ้ำในสายโซ่หลัก เช่น พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน เป็นต้น

2.1.3 พอลิเมอร์แบบร่างแห หรือ เชื่อมโยงข้าม (network or crosslinked polymers) โมเลกุลของพอลิเมอร์ประเภทนี้จะมีเชื่อมโยงกัน ทำให้เกิดลักษณะโครงสร้างแบบร่างแห เช่น ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ (vulcanization) โดยใช้กำมะถันเป็นตัวเชื่อมโยง (crosslinked agent) ระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติ

2.1.4 แลตเตอร์พอลิเมอร์ (ladder polymer) พอลิเมอร์แบบนี้เกิดจากการที่ทำให้หน่วยซ้ำในสายพอลิเมอร์หลักมีการหลอมปิดเป็นวงจนมีลักษณะคล้ายบันไดป็น (ladder) จึงเรียกพอลิเมอร์แบบนี้ว่าแลตเตอร์พอลิเมอร์หรือจะเรียกว่าพอลิเมอร์แบบขั้นบันไดก็ได้ ลักษณะในการปิดเป็นวงจะเป็นไปได้ 2 แบบคือ มีการหลอมปิดอย่างสม่ำเสมอทุกหน่วยซ้ำในสายพอลิเมอร์หลัก และมีการหลอมปิดเป็นช่วง แลตเตอร์พอลิเมอร์จะมีความแข็งแรงในโครงสร้างมาก ใช้เป็นวัสดุทนไฟได้เป็นอย่างดี ส่วนใหญ่จะใช้ในด้านอากาศยาน เช่น black orlon ที่เตรียมได้จากพอลิอะคริโลไนไตรล์ (polyacrylonitrile) เป็นต้น

### 3. การจำแนกตามจำนวนชนิดของหน่วยที่ซ้ำกันในโมเลกุล

3.1.1 โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymers) มีลักษณะคือในโมเลกุลของพอลิเมอร์ชนิดนี้ประกอบไปด้วยหน่วยที่ซ้ำกัน (repeating unit) เพียงชนิดเดียวเท่านั้น เช่น พอลิเอทิลีน เป็นต้น

3.1.2 โคพอลิเมอร์ (copolymers) ลักษณะในโมเลกุลของพอลิเมอร์ชนิดนี้จะประกอบไปด้วยหน่วยที่ซ้ำกันมากกว่าหนึ่งชนิด เช่นโคพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์ บิวตะไดอีน สไตรีน (acrylonitrile butadiene styrene copolymer) ก็จะประกอบด้วยมอนอเมอร์ อะคริโลไนไตรล์ บิวตะไดอีนและสไตรีนที่ซ้ำกัน

#### 4. การจำแนกตามลักษณะการใช้งาน

4.1.1 พลาสติก (plastic) เป็นพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็งที่สามารถคงรูปได้ภายใต้สภาวะการใช้งานแต่จะเป็นของไหลหนืด (viscous flow) ในสภาวะที่ทำการขึ้นรูปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ เทอร์โมพลาสติก (thermo plastic) ซึ่งเป็นพลาสติกที่สามารถนำกลับไปหลอมใหม่หลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว และ เทอร์โมเซตติง (thermosetting) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วจะแข็งตัวอย่างถาวรเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงข้าม (crosslinking reaction) เมื่อได้รับความร้อนและจะเกิดการเสื่อมสภาพและสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนที่สูงมาก

4.1.2 เส้นใย (fiber) เป็นพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็งมีทั้งเส้นใยจากธรรมชาติ เช่น ไหม ฝ้าย และขนสัตว์ เป็นต้น เส้นใยดัดแปลงจากธรรมชาติ เช่น เรยอน (ผลิตมาจากเซลลูโลส) และเส้นใยสังเคราะห์

4.1.3 อีลาสโตเมอร์ (elastomer) หรือรับเบอร์ (rubber) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เมื่อได้รับแรงกระทำและสามารถคืนตัวกลับสู่ร่างเดิมได้เมื่อหยุดให้แรงกระทำ

4.1.4 ฟองน้ำ (foams) เป็นพอลิเมอร์ที่ทำให้เกิดรูพรุนเมื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์

4.1.5 กาว (adhesives) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวทำให้วัสดุติดแน่น เช่น อีพอกซี (epoxies) และไซยาโนอะคริเลต (cyanoacrylates) เป็นต้น

4.1.6 น้ำยาเคลือบผิวและป้องกันผิว (surface finishes and protective coatings) รวมทั้งพาส (paint)

#### 2.1.4 แหล่งวัตถุดิบสำหรับการผลิตพอลิเมอร์

แหล่งวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับการผลิตพอลิเมอร์มี 3 แหล่งด้วยกัน คือ ผลผลิตทางการเกษตร (agricultural product) ถ่านหิน (coals) และน้ำมัน (petroleum) โดยน้ำมันจะรวมถึงแก๊สธรรมชาติ (natural gas) ด้วย

ตัวอย่างวัตถุดิบที่ได้จากแหล่งผลิตผลทางการเกษตรสำหรับการผลิตพอลิเมอร์ ได้แก่ เยื่อไม้ ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตพอลิเมอร์บางชนิด เช่น เซลลูโลสไนเตรต เซลลูโลสแอ

ซีเตต และเซลลูโลสแอซีเตตบิวทีเรต เป็นต้น มันสำปะหลัง ข้าวโพด อ้อย ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตพอลิเมอร์ที่เป็นพลาสติกชีวภาพ เช่น พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid : PLA) พอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์ (polyhydroxyalkanoates : PHAs) และ พอลิไตรเมทิลีน เทเรฟทาเลต (Polytrimethylene Terephthalate : PTT) เป็นต้น สำหรับถ่านหินก็เป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญในการเตรียมฟีนอลและน้ำมันแนฟทาไลน์ ซึ่งสามารถนำไปผลิตพอลิเมอร์ได้มากมาย เช่น ไนลอน อีพอกซีพอลิคาร์บอเนต และพอลิเอสเตอ์ เป็นต้น แหล่งวัตถุดิบที่สำคัญและใหญ่ที่สุดสำหรับการผลิตพอลิเมอร์ คือ น้ำมัน ซึ่งรวมถึงแก๊สธรรมชาติด้วย โดยในกระบวนการกลั่นแยกน้ำมันดิบ (crude oil) จะได้สารประกอบคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลตั้งแต่ 1 จนถึงมากกว่า 35 อะตอม โดยมีอยู่ทั้งสามสถานะ ของแข็ง ของเหลว หรือ แก๊ส ขึ้นกับจำนวนอะตอมในโมเลกุล โดยถ้าจำนวนคาร์บอนอะตอมอยู่ในโมเลกุลในช่วง 1 – 4 อะตอม สารประกอบคาร์บอนที่กลั่นแยกได้จะอยู่ในสถานะแก๊ส เช่น มีเทน( $\text{CH}_4$ ) อีเทน ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) โพรเพน ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) บิวเทน ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) และสารกลุ่มอะโรมาติกส์ (เบนซีน โทลูอีน และไซลีน) ที่ได้จากการกลั่นแยกน้ำมันดิบสามารถใช้ในการผลิตพอลิเมอร์ได้ทันที ถ้าจำนวนคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลอยู่ในช่วง 5 – 35 อะตอม สารประกอบคาร์บอนที่กลั่นแยกได้จะอยู่ในสถานะของเหลว และถ้าจำนวนคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลมีมากกว่า 35 อะตอม สารประกอบคาร์บอนที่แยกได้จะอยู่ในสถานะของแข็ง สำหรับสารประกอบคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอม มากกว่า 4 อะตอม ต้องนำมาทำให้โมเลกุลแตกสลายกลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็กก่อนด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การทำแครกกิง (cracking) จึงสามารถนำไปผลิตพอลิเมอร์ได้ เช่น แนฟทาเมื่อนำมาทำแครกกิงจะได้ เอทิลีนซึ่งนำไปใช้ผลิต พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิเอทิลีน เป็นต้น

## 2.2 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับพลาสติกชีวภาพ

ขณะที่พลาสติกจากปิโตรเคมีคงสภาพอยู่ในธรรมชาติได้นานโดยใช้เวลาหลายร้อยปีโดยวิธีฝังกลบเพราะจุลินทรีย์ในดินไม่สามารถย่อยสลายได้ และเมื่อนำมาเผาทำลายก็จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นก๊าซทำให้เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจกแต่พลาสติกชีวภาพนั้นสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่าจึงช่วยลดปัญหาหมอกพิษในสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากพลาสติกชีวภาพในปัจจุบันได้แก่ ใช้เป็นแคปซูลบรรจุยา เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารและบรรจุภัณฑ์ทั่วไป กระดาษต้นไม้มารวมถึงส่วนผสมของคอมพิวเตอร์ เป็นต้น



### 2.2.1 คำจำกัดความของพลาสติกชีวภาพ

ตามมาตรฐาน ASTM D6866-06 ได้กล่าวว่าพอลิเมอร์ชีวภาพเป็นพอลิเมอร์ที่มีความพิเศษเนื่องจากได้รวมสิ่งมีชีวิตหรือสารอินทรีย์ในกระบวนการสังเคราะห์ ดังนั้นจึงมีชีวเคมีตั้งต้นบางส่วนหรือทั้งหมดที่สามารถผลิตได้จากธรรมชาติ, วัสดุที่ได้จากพลังงานหมุนเวียน เช่น พืช หรือชีวมวล เป็นต้น ซึ่งอาจจะย่อยสลายได้ตามมาตรฐาน ASTM D6400-04หรือไม่ก็ได้

ดังนั้นพลาสติกชีวภาพจึงหมายถึงวัสดุที่มีพอลิเมอร์ชีวภาพตั้งต้นในเปอร์เซ็นต์ต่างๆ และสามารถขึ้นรูปได้ด้วยความร้อนและแรงดัน ด้วยเหตุนี้พลาสติกชีวภาพจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาทดแทนเทอร์โมพลาสติกแบบดั้งเดิมซึ่งได้จากพอลิเมอร์ที่ผลิตจากปิโตรเคมี เช่น พอลิโอเลฟิน และ พอลิเอสเตอ์ เป็นต้น

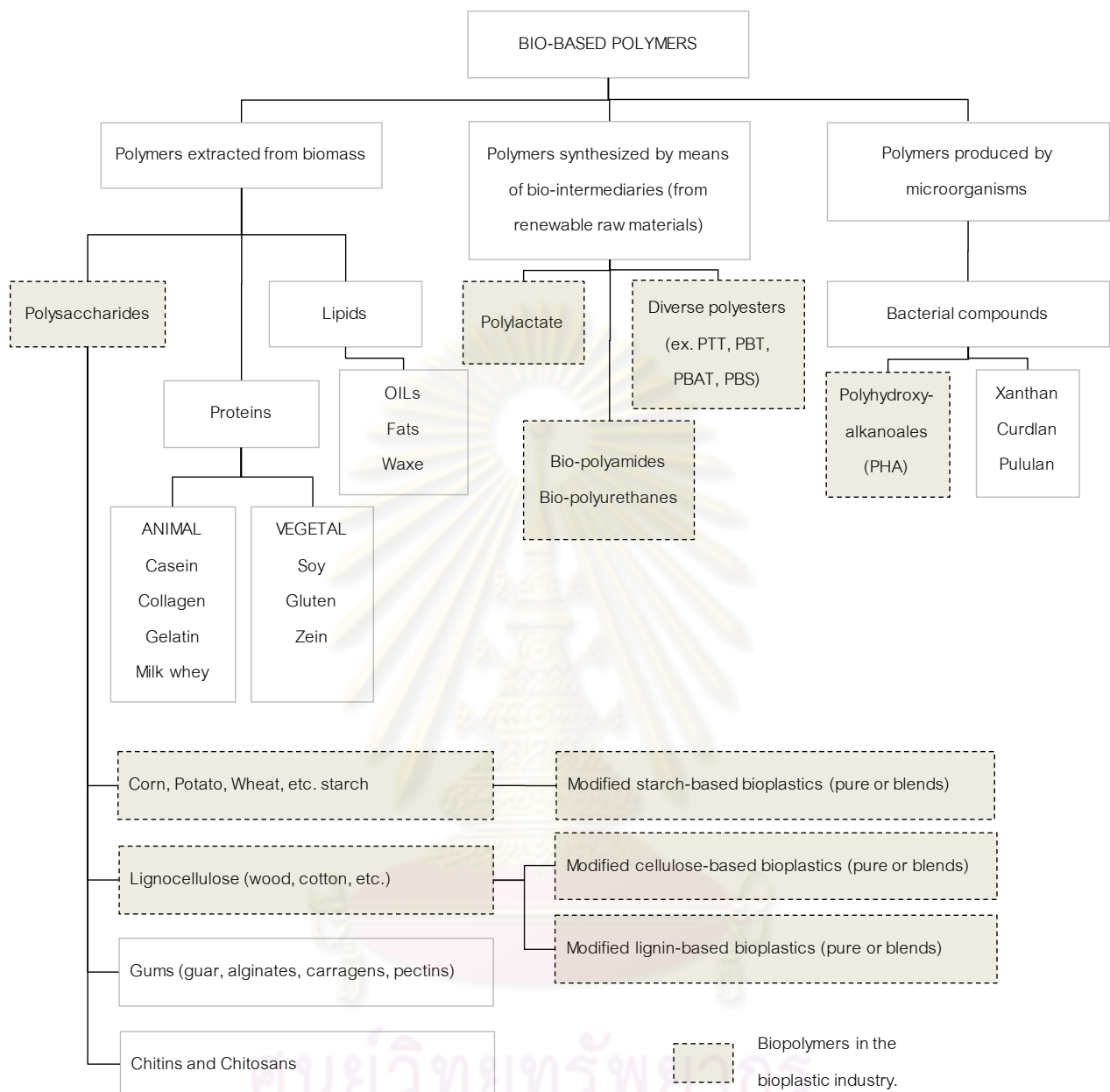
ในปัจจุบันยังไม่มีข้อตกลงอย่างเป็นทางการเป็นเอกฉันท์ถึงชีวอนุพันธ์ที่จำเป็นในการแยกประเภทของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่เป็นพลาสติกชีวภาพ ซึ่งส่วนใหญ่เน้นได้กำหนดให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนของวัสดุที่ได้จากพลังงานหมุนเวียนตั้งต้นอยู่ระหว่าง 25 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์และนอกจากนี้พลาสติกย่อยสลายได้ทั้งหมดยังถือว่าเป็นพลาสติกชีวภาพถึงแม้ว่าจะการเรียงตัวของพอลิเมอร์ตั้งต้นที่ได้จากปิโตรเคมี เช่น พอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone; PCL) พอลิบิวทีลีน อะดิเพต ทาเรฟทาเลต (Polybutyleneadipate / terephthalate; PBAT) และอื่นๆ เป็นต้น

### 2.2.2 ประเภทของพลาสติกชีวภาพ

จากการจำแนกพอลิเมอร์ชีวภาพตั้งต้นสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้

1. พอลิเมอร์ที่สกัดโดยตรงจากชีวมวล เช่น พอลิเมอร์จากเซลลูโลส
2. พอลิเมอร์ที่ผลิตโดยตรงจากจุลินทรีย์ในสภาพธรรมชาติหรือมีการดัดแปลงพันธุกรรมเช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoates; PHAs)
3. พอลิเมอร์ที่ได้จากการรวมกันของวัสดุทั้งชีวภาพซึ่งผลิตจากวัสดุตั้งต้นที่ได้จากพลังงานหมุนเวียน เช่น พอลิแลคติก แอซิด (Polylactic acid; PLA) ไบโอบอลิเอทิลีน (Biopolyethylene; BPE) ซึ่งได้จากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันเอทิลีนที่ผลิตจากไบโอ เอทานอล เป็นต้น

โดยจากแนวคิดข้างต้นสามารถแบ่งประเภทของพลาสติกชีวภาพที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพในปัจจุบันได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งในปัจจุบันนี้มีเพียงแค่บางส่วนเท่านั้นที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์



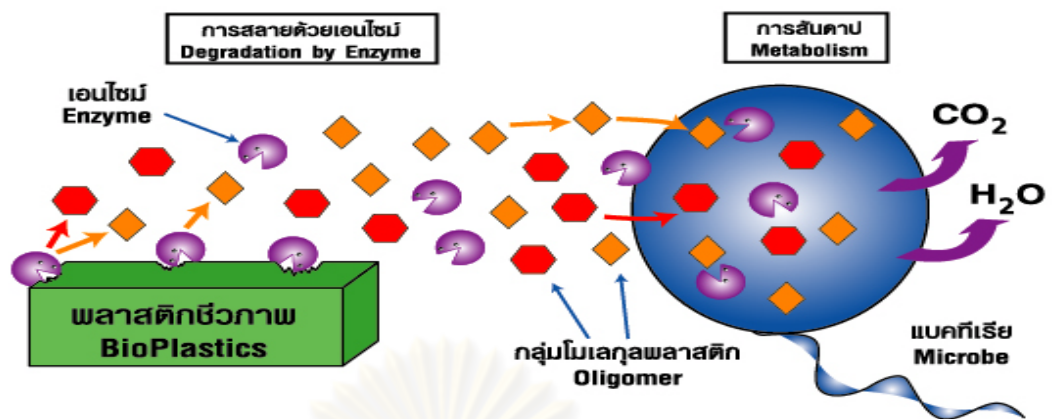
รูปที่ 2.1 ประเภทของพลาสติกชีวภาพ

และหากพิจารณาที่การย่อยสลายสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) และพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Non-biodegradable plastic) ซึ่งในปัจจุบันได้มีหลายองค์กรให้คำจำกัดความเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้เช่น (ASTM D6400-99) พลาสติกย่อยสลายได้คือพลาสติกที่ย่อยสลายต่อเนื่อง จากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา และสาหร่าย

(ISO472:1998) พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือพลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยวิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น BPS Japan(1994) พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงได้โดยมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งจากคำจำกัดความแต่ละอันข้างต้นนั้นจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือพลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้สามารถย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastic : EDP) ที่เหมาะสม ซึ่งหมายถึงพลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่างๆในสภาวะแวดล้อมเช่น กรด ต่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงจากดวงอาทิตย์ แรงแค้นจากการกระทบของเม็ดฝนและแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีกลายเป็นสารที่ถูกดูดซึมและย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอินทรีย์และมวลชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยพลาสติกชีวภาพในกลุ่มพลาสติกย่อยสลายได้นั้นสามารถทำการแบ่งตามกลไกการสลายตัวได้อีก 5 ประเภท ดังนี้

1. Biodegradable คือการย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งจะได้พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆและมวลชีวภาพ (biomass) เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ที่มา : สมาคมอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพไทย

รูปที่ 2.2 กระบวนการย่อยสลายแบบ Biodegradable

2. Compostable จัดเป็นพอลิเมอร์ Biodegradable ชนิดหนึ่งซึ่งการสลายตัวจะเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักที่อุณหภูมิสูงกว่า 50 °C
3. Hydro-biodegradable พอลิเมอร์ที่สลายตัวได้โดยการสลายพันธะเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ (hydrolysis)
4. Photo-biodegradable คือพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้โดยการสลายพันธะด้วยแสงหรือรังสียูวี (UV)
5. Bio-erodable คือพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้โดยไม่ต้องพึ่งพาจุลินทรีย์ โดยจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางเคมีต่างๆ เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความชื้น แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ

สำหรับพลาสติกชีวภาพที่ไม่สามารถย่อยสลายได้นั้นได้จัดว่าเป็นพลาสติกชีวภาพที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมีเนื่องจากวัสดุชนิดนี้ผลิตจากพืชชีวมวลแต่มีคุณสมบัติที่ไม่ย่อยสลายเนื่องจากการเติมสารเติมแต่งหรืออัตราการย่อยสลายและระยะเวลาสั้นเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด

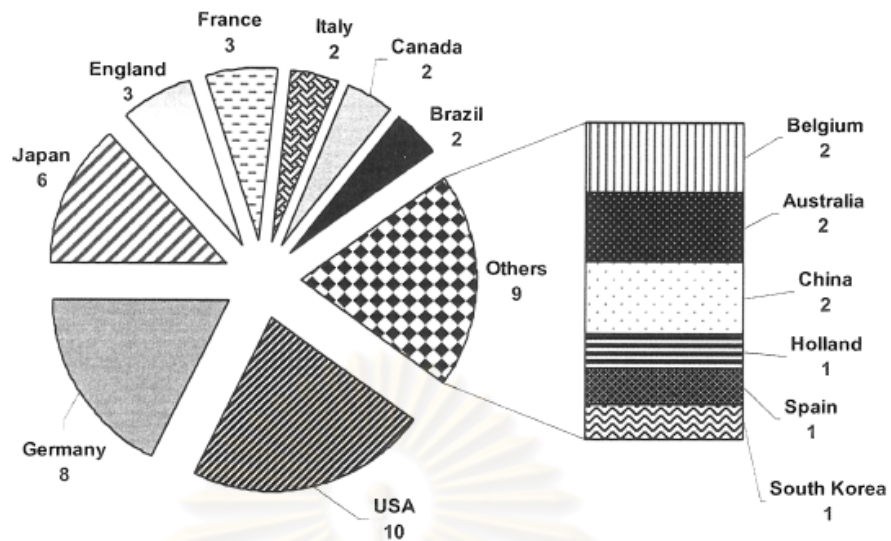
### 2.2.3 การพัฒนาในอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ

ในตลาดปัจจุบันพบว่าทั่วโลกมีบริษัทที่ผลิตเกี่ยวกับพลาสติกชีวภาพประมาณ 180 บริษัท โดยในกลุ่มนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นบริษัทที่เป็นผู้ผลิตในระดับอุตสาหกรรมและอีกประเภทคือบริษัทนำร่องเพื่อทดสอบตลาดสำหรับพลาสติกชีวภาพ 17 ชนิดโดยในการวิจัยและพัฒนาจะเน้นการพัฒนากระบวนการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพซึ่งเป็นสารตั้งต้นใหม่ๆเป็นหลัก โดยการพัฒนาชีวมวลชนิดใหม่หรือมีการดัดแปลงพันธุกรรมของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง หรือเร่งระยะปฏิกิริยา เป็นต้น แต่ในขณะเดียวกันการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆก็ยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของพลาสติกชีวภาพให้ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า

สำหรับตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นการผลิตพลาสติกชีวภาพทั้งในระดับอุตสาหกรรมและระดับนำร่องซึ่งจำแนกตามชนิดของพอลิเมอร์ที่สามารถผลิตได้โดยจากบริษัทผู้ผลิตทั้งหมด 180 บริษัทมีบริษัทที่พร้อมทำการผลิตทั้งหมด 45 บริษัท ซึ่งมียอดผลิตรวมประมาณ 400,000 ตันต่อปีสำหรับ 14 ประเทศ โดยประเทศที่มีกำลังการผลิตสูงสุดได้แก่ อเมริกา เยอรมันนี และญี่ปุ่น ตามลำดับ

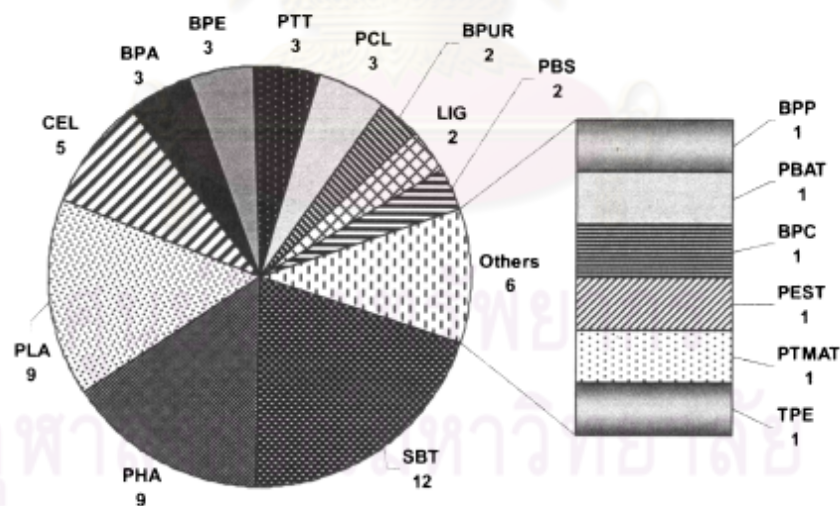
ตารางที่ 2.1 การผลิตพลาสติกชีวภาพในระดับอุตสาหกรรมและระดับนำร่อง

Type of Polymer	Bioplastics Group	Generic Acronym	Observation
Polysaccharide	Starch-based thermoplastic	SBT	Includes starch blends
	Cellulose-based thermoplastic	CEL	Includes composites
	Lignin-based thermoplastic	LIG	Includes composites
Polyester	Polylactic acid	PLA	PHA includes PHB, PHBV, blends and copolymers
	Polybutylene adipate-terephthalate	PBAT	
	Polybutylene succinate	PBS	
	Polycaprolactone	PCL	
	Thermoplastic elastomer	TPE	The other acronyms include blends and copolymers
	Polyethylene succinate-terephthalate	PEST	
	Polyhydroxyalkoanate	PHA	
	Polytetramethyl adipate-terephthalate	PTMAT	
	Polytrimethylene-terephthalate	PTT	
Polyamide	Bio-based polyamide	BPA	From vegetal oils
Polyurethane	Bio-based polyurethane	BPUR	From bio-polyols, for ex., from vegetal oils
Polyolefin	Bio-polyethylene	BPE	From biomass ethanol (ex.: sugarcane)
	Bio-polypropylene	BPP	
Polycarbonate	Bio-polycarbonate	BPC	Sequester carbon by combination of ethylene-glycol and ethoxylates with CO <sub>2</sub> and CO.



รูปที่ 2.3 บริษัทผู้ผลิตพลาสติกชีวภาพจำแนกตามประเทศ

จาก 45 ผู้ผลิตพบว่า มีพลาสติกชีวภาพทั้งหมด 11 ชนิดที่มีกำลังการผลิตมากกว่า 10,000 ตันต่อปี โดยรูปที่ 2.4 แสดงการจําแนกบริษัทผู้ผลิตโดยจําแนกตามชนิดของพลาสติกชีวภาพ



SBT= starch-based thermoplastic;  
 PHA= polyhydroxyalcanoate  
 PLA= polylactic acid  
 CEL= cellulose polymers  
 BPA= bio-polyamide  
 BPE= bio-polyethylene  
 PTT= polytrimethylene terephthalate  
 PCL= polycaprolactone

BPUR= biopolyurethane  
 PBS= polybutylene succinate  
 BPP= bio-polypropylene  
 PBAT= polybutylene adipate-terephthalate  
 BPC= bio-polycarbonate  
 PEST= polyethylene succinate terephthalate  
 PTMAT= polytetramethylene adipate-terephthalate  
 TPE= thermoplastic elastomer

รูปที่ 2.4 บริษัทผู้ผลิตพลาสติกชีวภาพจำแนกตามประเภท

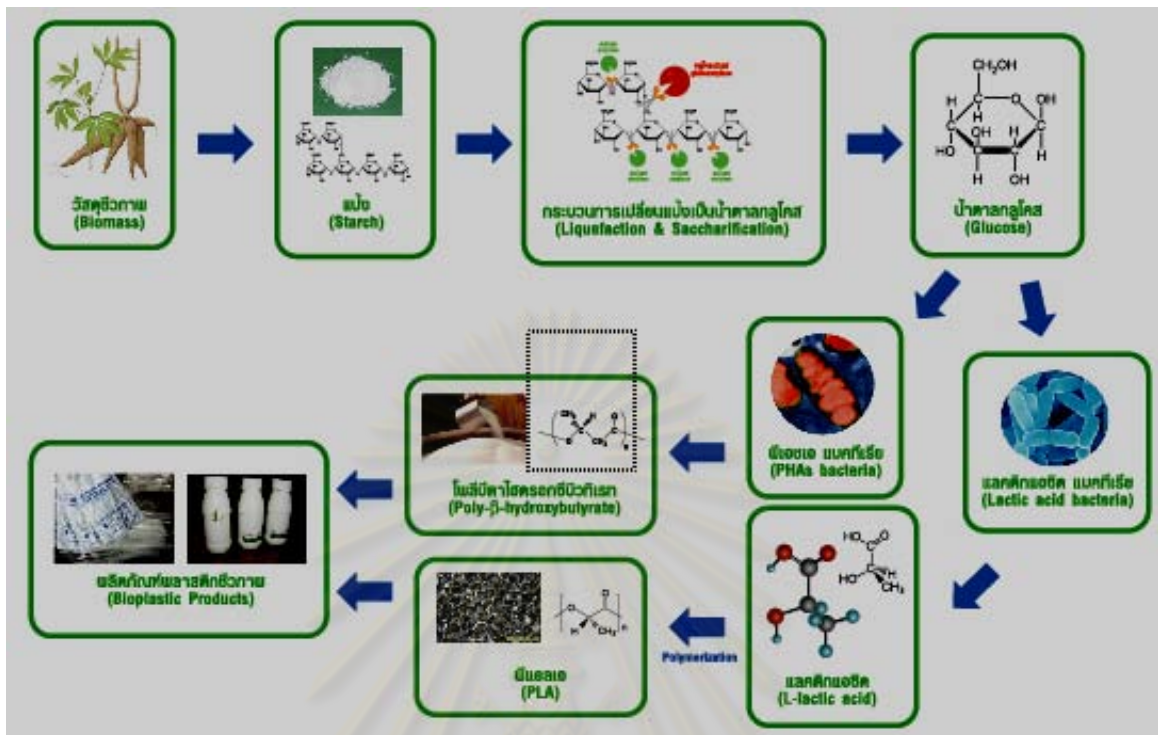
การพัฒนาส่วนใหญ่มักจะเกี่ยวข้องกับวัตถุดิบตั้งต้น, กระบวนการผลิต และ ปัจจัยในการดำเนินการในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกชีวภาพ แป้ง, เซลลูโลส, น้ำตาล, น้ำมันพืชและไม้ เป็นสิ่งที่ได้จากธรรมชาติและวัตถุดิบหมุนเวียนที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพหรือกึ่งชีวภาพมากที่สุด

คุณสมบัติของพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้จากแป้งข้าวโพด, มันฝรั่ง, มันสำปะหลัง, ข้าวสาลีและมันเทศ นั้นจะสามารถย่อยสลายได้ซึ่งโดยส่วนมากนิยมที่จะนำไปผสมกับ พอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone; PCL) และ พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (PVOH) และสารเคมีอื่นๆ อย่างไรก็ตามการเพิ่มคุณสมบัติของโคพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะเป็นการเสริมคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ธรรมชาติให้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการปรับสูตรให้เหมาะสม

ปัจจุบันแป้งชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch; SBT) นั้นไม่ใช่เทอร์โมพลาสติกโดยแท้จริงแต่ได้มีการผ่านกระบวนการพลาสติกไซเซอ์ (plasticizer) เพื่อให้สามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้ (90-180°C) ซึ่งการหลอมเหลวของวัสดุและการไหลเมื่อทำการขึ้นรูปด้วยการฉีด, การอัด และการเป่า สามารถใช้อุปกรณ์เดิมที่ใช้กับเม็ดพลาสติกสังเคราะห์ทั่วไปได้

#### 2.2.4 กระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพ

การผลิตพลาสติกชีวภาพหลักจะเป็นการผลิตไบโอพอลิเอสเตอ์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น พอลิแลคติก แอซิด (Polylactic acid; PLA) วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตคือพืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด, อ้อย, หัวบีทและมันสำปะหลัง เป็นต้น กระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการบดหรือไม่พืชนั้นให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลและนำไปหมักด้วยจุลินทรีย์จนเกิดเป็น Lactic acid แล้วนำมาผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นวงแหวนที่เรียกว่า Lactide หลังจากนั้นนำมากลั่นในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นพอลิเมอร์ของ Lactide ที่เป็นสายยาวขึ้นเรียกว่า พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid) หรือ PLA นอกจากนี้ PLA ยังสามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์อื่นๆ เช่น PCL, PHA, SBT เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบเป่าและฉีด เช่นหากในการหมักใช้จุลินทรีย์ชนิดพิเศษชื่อ Escherichia coli ที่กินน้ำตาลเป็นอาหารสามารถเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลภายในตัวจุลินทรีย์เองได้เป็นพอลิไฮดรอกซีอัลคานอย (polyhydroxyalkanoates) หรือ PHAs เป็นต้น

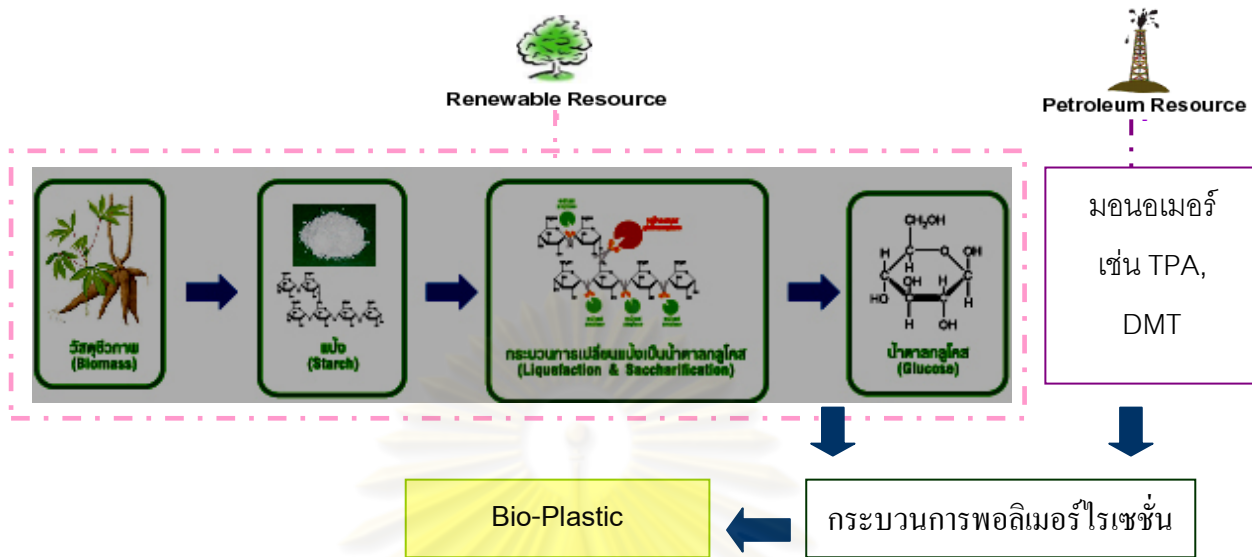


ที่มา : สมาคมอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพไทย

รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

นอกจากนี้โพลีไตรเมทิลีน เทเรฟทาเลต (Polytrimethylene Terephthalate ; PTT) ยังเป็นพลาสติกชีวภาพอีกชนิดที่มีความสำคัญในกลุ่มพอลิเอสเตอร์ โดยกระบวนการผลิตจะประกอบด้วยการหมักแป้งจากข้าวโพดเพื่อเปลี่ยนแป้งให้เป็นน้ำตาลกลูโคสจากนั้นนำกลูโคสที่ได้ผ่านกระบวนการเฟอร์เมนเทชัน (Fermentation process) เพื่อทำให้กลูโคสแตกตัวเป็นมอนอเมอร์ โดยในที่นี้จะได้อมอนอเมอร์ในกลุ่มโพรเพนไดออล (1,3 Propanediol; PDO) จากนั้นเติมกรดเทเรฟทาเลต (Terephthalate acid; TPA) หรือ ไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethylterephthalate; DMT) ซึ่งเป็นสารที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน (transesterification) และผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเพื่อเปลี่ยนมอนอเมอร์ให้เป็นพอลิเมอร์ซึ่งจากกระบวนการดังกล่าวจะทำให้ได้ นอกจากนี้ PTT ยังสามารถผสมกับมอนอเมอร์อื่น ๆ ที่ได้จากปิโตรเลียมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่สามารถผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยการฉีดและขึ้นรูปแผ่นได้





รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (petroleum-based material)

### 2.3 การเสื่อมของพอลิเมอร์ (Polymer Degradation)

เรารู้จักการเสื่อมของพอลิเมอร์กันมาเป็นเวลานานแล้ว เช่น การเสื่อมลง (Deterioration) ของเซลลูโลสในไม้ การเสื่อมของยางรถยนต์ การแตกหรือเหลืองของฟิล์ม โดยชนิดของการเสื่อมนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่นำพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ ไปใช้งาน กระบวนการผลิตและโครงสร้างของพอลิเมอร์ การเสื่อมและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (oxidation) ของพอลิเมอร์ธรรมชาตินั้นเกิดขึ้นโดยธรรมชาติ เช่นเดียวกับไม้และเซลลูโลส โดยในหลายปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเสื่อมมากขึ้นเนื่องจากพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีความซับซ้อนของการเสื่อมที่ต่างกัน

#### 2.3.1 ชนิดของการเสื่อมของพอลิเมอร์

ชนิดของการเสื่อมของพอลิเมอร์มีดังต่อไปนี้

1. Thermal เกิดขึ้นขณะอยู่ในกระบวนการผลิตหรือที่อุณหภูมิสูง
2. Mechanical เกิดขึ้นขณะให้แรงหรือเกิดการแตกหักทางดัดสลายภาพทำ

ให้สลายโซ่ขาดจากกัน

3. Ultrasonic เกิดจากเสียงที่มีความถี่พอดีที่จะทำให้สายโซ่สั้นสะเทือนและขาดจากกัน

4. Hydrolytic เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ที่มี Function Groups ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับน้ำเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ (Esterification) ได้กรดและไกลคอล (Glycol) เป็นผลิตภัณฑ์

5. Chemical เกิดจากการกักกร่อนทางเคมีหรือจากก๊าซ เช่นโอโซนเข้าไปทำลายโครงสร้างของพอลิเมอร์ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ขาด

6. Biological เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์ที่มี Function Groups ที่จุลินทรีย์สามารถเข้าไปทำลายได้

7. Radiation เกิดจากการแผ่รังสี (Exposure) กับแสงอาทิตย์หรือการแผ่รังสีของพลังงานสูง พอลิเมอร์หรือสารปนเปื้อนจะดูดรังสีเหล่านี้เข้าไปทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์แยกจากกัน

ในบรรดาชนิดของการเสื่อมที่ได้กล่าวมา การเสื่อมแบบ Thermal และ Radiation สำคัญที่สุดที่เกิดขึ้นในบรรดาพอลิเมอร์ที่ใช้งานกันมาก

### 2.3.2 คุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ขณะเกิดการเสื่อม ปรากฏได้หลายรูปแบบขึ้นกับชนิดของกระบวนการเสื่อม คุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. การเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ เกิดการลดลงของน้ำหนักโมเลกุล ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงกระแทก ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาด การสูญเสียความแวววาว และการกักกร่อนที่ผิว

2. การเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมี เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี คือเกิดการฟอร์มตัวของ function Groups เช่นการไม่อิ่มตัว การเกิดคาบอนิล ไฮดรอกซิล และไฮโดรเพอรอกไซด์ เป็นต้น

### 2.3.3 การเสื่อมโดยความร้อน (Thermal Degradation)

เมื่ออุณหภูมิในการใช้งานหรือการผลิตเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการเสื่อมของพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดนั้นจะมีการเสื่อมที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปแบ่งออกได้ 3 ชนิดคือ

1. Depolymerization Reactions สายโซ่พอลิเมอร์ถูกตัดขาดจากกันเป็นผลิตภัณฑ์ตัวใหม่ที่มีโครงสร้างคล้ายเดิมแต่น้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า เช่น การเกิด Depolymerization Reactions ของ polymethyl Metacrylate

2. Elimination Reactions เกิดการฟอร์มตัวเป็นส่วนย่อย (fragment) หรือโมเลกุลที่มีน้ำหนักน้อยกว่าเดิมโดยไม่สัมพันธ์กับพอลิเมอร์ดั้งเดิม เช่น เกิดน้ำ หรือกรดไฮโดรคลอริก ตัวอย่างเช่น การเกิด Dehydrochlorination ของ PVC

3. Substituent Reactions สายโซ่หลักถูกแทนที่เนื่องจากธรรมชาติทางเคมีของหน่วยย่อยเปลี่ยนแปลงไป โดยที่โครงสร้างยังเหมือนเดิม เช่น วัฏจักรการเกิดแบ็ค โอลอน (Black Orlon)

### 2.3.4 การเสื่อมโดยรังสียูวี (Ultraviolet Radiation Degradation)

การดูดกลืนรังสีเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะเกิดขึ้นก่อนการเสื่อมสลายด้วยแสงจากตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นช่วงความยาวคลื่นที่ทำให้พอลิเมอร์และพอลิเมอร์ชีวภาพไม่เสถียรซึ่งจากหลักทฤษฎีแล้วนั้นพอลิเมอร์ที่โปร่งแสงจะไม่ดูดกลืนแสงยูวี แต่เนื่องจากความไม่บริสุทธิ์ของสารตลอดจนการเติมสารเติมแต่งดังนั้นจึงเป็นเหตุทำให้พอลิเมอร์นั้นๆเกิดการดูดกลืนรังสียูวีและเกิดการเสื่อมสลายด้วยแสงในที่สุด ลักษณะการเสื่อมสภาพด้วยแสงที่สำคัญสำหรับพอลิเมอร์สังเคราะห์และพอลิเมอร์ชีวภาพนั้นคือการเปลี่ยนสี(กลายเป็นสีเหลืองหรือมีสีไม่สม่ำเสมอ)และการสูญเสียคุณสมบัติทางกล เช่นการสูญเสียความแข็งแรง ความทนทานต่อแรงกระแทกซึ่งการสูญเสียสมบัติเชิงกลนี้สะท้อนให้เห็นว่าสายโซ่ของพอลิเมอร์ถูกทำลาย (Polymer chains scission)

ตารางที่ 2.2 การดูดกลืนรังสียูวีสำหรับพอลิเมอร์สังเคราะห์และพอลิเมอร์ธรรมชาติ

Polymer	Cut-off [nm] <sup>a</sup>	Abs.max. [nm]	Stability <sup>b</sup>	Ref. <sup>c</sup>	Spectral sensitivity	
					Range [nm]	Property
Polyethylene	<180		4		260–360	Optical density
Polypropylene	<180		5		315–330	Extensibility
Polyoxymethylene	<210		4		—	
Poly(vinyl chloride)	<240		4		310–325	Yellowing
Polyamides	~240		3			
Polystyrene	~270		4		280	Chain scission
Polycarbonate	~280		4		310–340	Yellowing
Poly(phenyleneoxide)	~280		3			
Polyurethanes	~280		3			
Poly(ethylene terephthalate)	~310		2			
Poly(vinyl acetate)		240		[3]		
Poly(methylmethacrylate)	~240		1		300 <sup>e</sup>	Chain scission
Poly(methyl vinyl ketone)		~290		[3]		
Poly(phenyl vinyl ketone)		240		[3]		
Cellulose		270 <sup>d</sup>	4	[4]		
Lignin-softwood		280–285 <sup>d</sup>	5	[5]	334–354	Yellowing
-hardwood		274–276 <sup>d</sup>		[5]		
Wool		205, 280	3	[6]	340–420	Yellowing
Chitosan (acetylglucosamine)		193, 197	4	[7]		

<sup>a</sup>Cut-off wavelength indicated is that at which absorbance of a 10-micron film reaches 1.0.

<sup>b</sup>Stability is a relative, qualitative measure of the resistance of the polymer to terrestrial solar radiation.

<sup>c</sup>Data from [1] where not otherwise indicated. Data on spectral sensitivity are from [2]. Absorption maxima indicated in column 3, are for solution spectra.

<sup>d</sup>Biopolymers shown absorb very strongly at wavelengths shorter than the absorption maximum indicated.

<sup>e</sup>Based on quantum yield measurements.

### 2.3.5 เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาการเสื่อมและการมีเสถียรภาพของพอลิเมอร์

การศึกษการเสื่อมนั้นแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ 1) การศึกษาของนักเทคโนโลยีพอลิเมอร์โดยจะสนใจคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป และ 2) การศึกษาของนักวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จะสนใจเหตุผลที่ว่าทำไมถึงมีการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาทั้ง 2 แบบนี้ ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ถ้ายังต้องการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความทนทานกันอยู่ นักวิทยาศาสตร์ต้องเข้าใจคุณสมบัติทั้งทางด้านเคมีและกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมและความมีเสถียรภาพของพอลิเมอร์ภายใต้สภาวะทางเทคนิคนั้นๆ ด้วย

1. กระบวนการทดสอบทางด้านเทคนิค การทดสอบทางด้านเทคนิคจะใช้ความทนทานในระยะเวลาใช้งานเป็นเกณฑ์ ตัวอย่างของการทดสอบ เช่น Accelerated Aging Air Oven Test เป็นต้น นอกจากนี้อาจใช้กฎเกณฑ์การเสื่อมลง (deterioration) ของพอลิเมอร์มากกว่าพฤติกรรมทางกลโดยพอลิเมอร์หลายชนิดอาจสังเกตการเสื่อมได้จากการเปลี่ยนสีของพอลิเมอร์ (discoloration) ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่สายโซ่ถูกตัดขาดจากกัน

2. กระบวนการทดสอบทางด้านวิทยาศาสตร์ วิธีการศึกษาแบ่งออกเป็น

2.1 วิธีการทดสอบทางกายภาพ (Physical Method) การศึกษาวิธีนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 วิธีดังนี้

- 2.1.1 เทคนิคการวิเคราะห์ทางด้านน้ำหนักโมเลกุล
- 2.1.2 เทคนิคการวิเคราะห์ทางด้านความร้อน
- 2.1.3 การวิเคราะห์โดยวิธีสเปกโตรสโคปี (Spectroscopy)
- 2.1.4 การวิเคราะห์โดยวิธีโครมาโตกราฟี (Chromatography)

2.2 วิธีการวัดการดูดซับของออกซิเจนภายในเวลาที่ใช้งานและการเปลี่ยนแปลงของออกซิเจนเมื่อมี Functional Groups

## 2.4 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ทำการศึกษา

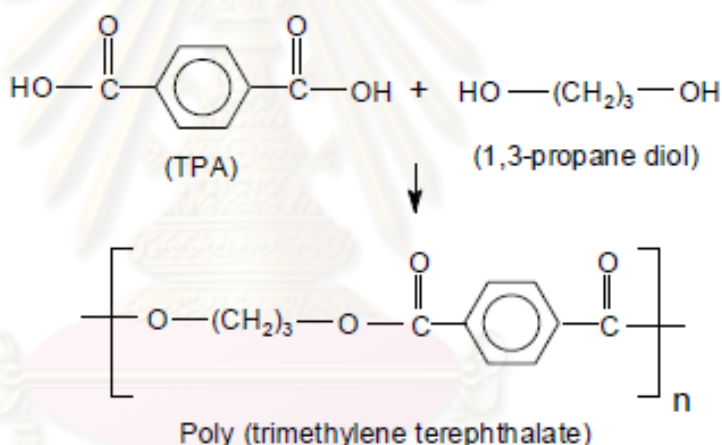
2.4.1 อะคริโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน ((Acrylonitrile Butadiene Styrene : ABS)

เอบีเอสเป็นพลาสติกสังเคราะห์จำพวกเทอร์โมพลาสติกที่ได้จากการทำปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ของโมโนเมอร์ 3 ชนิด คือ สไตรีน (Styrene) อะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) และโพลิบิวทาไดอีน (Polybutadiene) ซึ่งโพลิเมอร์ที่ได้จากโมโนเมอร์ 3 ชนิดเรียกว่า เทอร์พอลิเมอร์ (Terpolymer) โมโนเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบสังเคราะห์เอบีเอสขึ้นมานั้น ล้วนมีผลต่อสมบัติของพลาสติกทั้งสิ้น อะคริโลไนไตรล์มีผลต่อสมบัติการทนความร้อนและสารเคมี บิวทาไดอีนมีผลต่อสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength) และสไตรีนมีผลทำให้พลาสติกมีพื้นผิวที่เป็นมันเงา ตัดแต่งวัสดุได้ง่ายและช่วยลดต้นทุน เนื่องจากเอบีเอสเป็นพลาสติกที่ได้จากการนำโมโนเมอร์ 3 ชนิดมาผลิตดังนั้นผู้ผลิตเอบีเอสจึงสามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนของโมโนเมอร์ทั้งสามชนิดเพื่อให้ได้สมบัติอย่างที่ต้องการซึ่งเอบีเอสที่จำหน่ายในท้องตลาดจะประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ประมาณ 15 – 30% โพลิบิวทาไดอีน ประมาณ 5 – 30 % และสไตรีนประมาณ 45 – 75 %

2.4.2 พอลิไตรเมทิลีน เทเรพทาเรตเสริมแรงกลีาสไฟเบอร์

P15 และ P30 เป็นพลาสติกชีวภาพที่ถูกพัฒนาโดยบริษัท DuPont มีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.7 ซึ่งพลาสติกในกลุ่มนี้ได้มาจากการสกัดแบ่งจากข้าวโพดและทำการหมักเพื่อเปลี่ยนแปลงให้เป็นน้ำตาลกลูโคสจากนั้นนำกลูโคสที่ได้ผ่านกระบวนการเฟอร์เมนที่เทชั่น

(Fermentation process) เพื่อให้ได้กลูโคสแตกตัวเป็นมอนอเมอร์ โดยในที่นี้จะได้ออนอเมอร์ในกลุ่มโพรเพนไดโอด (Propanediol; PDO) จากนั้นเติมกรดเทเรพทาเลต (Terephthalate acid; TPA) และผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเพื่อเปลี่ยนมอนอเมอร์ให้เป็นพอลิเมอร์ซึ่งจากกระบวนการดังกล่าวจะทำให้ได้ โพลีไตรเมทิลีน เทเรพทาเลต (Polytrimethylene Terephthalate resin; PTT) โดยปกติ PTT นั้นจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นส่วนใหญ่เนื่องด้วยมีความยืดหยุ่นสูงและได้มาจากธรรมชาติ เส้นใย PTT ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางและนำมาทดแทนไนลอนไนพรมและสิ่งปกคลุม เช่น ผ้าคลุมเตียง ผ้าห่ม และเสื้อผ้า เป็นต้น นอกจากนี้ PTT ยังสามารถใช้เป็นพลาสติกวิศวกรรม (Engineering thermoplastic) เนื่องจากทนความร้อนและมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี (A.K. Mohanty, W.Liu, L.T.Drzal and M.Misra, 2003) โดย P15 นั้นจะทำการเสริมแรงด้วยกลาสไฟเบอร์ 15 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับ P30 จะทำการเสริมแรงด้วยกลาสไฟเบอร์ 30 เปอร์เซ็นต์เพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางกล



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไตรเมทิลีน เทเรพทาเลต

## 2.5 กรรมวิธีชุบผิวด้วยฟิล์ม (Dipping Process)

Dipping Process หรือ Cubic Coating Printing หรือ Hydrographic printing หรือ water transfer printing หรือ fluid imaging เป็นเทคโนโลยีในการเคลือบสีหรือลายต่างๆโดยใช้ฟิล์มที่ประกอบด้วยลายจากภาพธรรมชาติหรือภาพพื้นที่สวยงาม เช่น ลายไม้ ลายหินอ่อนลงบนชิ้นงานพลาสติก โลหะ ยาง และวัสดุอื่นๆ ตัวอย่างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Dipping แสดงดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Dipping

### 2.5.1 คำจำกัดความ

#### 1. ฟิล์ม (Film dipping)

ฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบชิ้นงานนั้นผลิตมาจาก PVA film โดยลักษณะของฟิล์มนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือ 1 ชั้นฟิล์ม ซึ่งมีลวดลายต่างๆ และ 2 คือชั้นของกาวที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานกับชิ้นงานหลังจากที่ถูกทำละลายด้วยตัวทำละลาย

#### 2. Activator

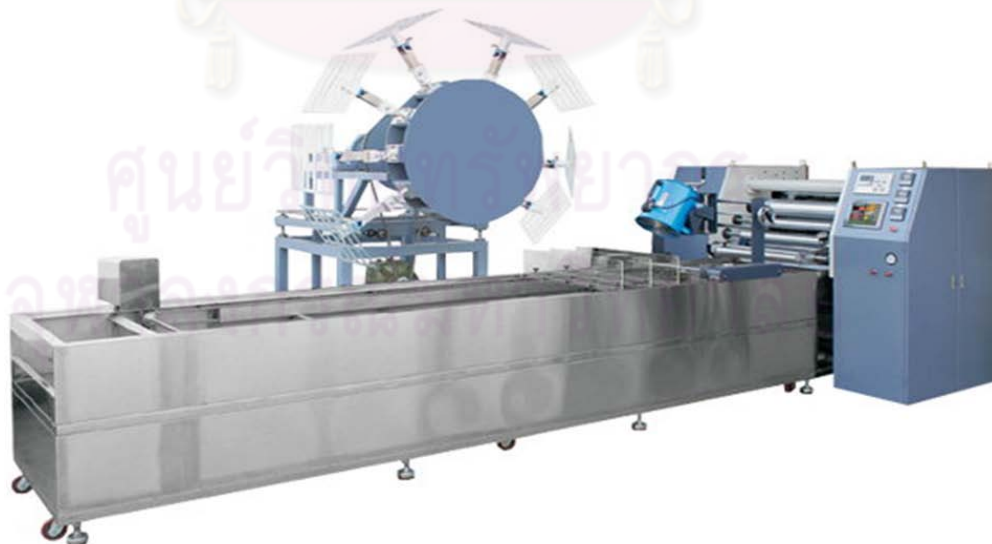
ตัวทำละลายกาวที่ติดกับฟิล์ม

#### 3. บ่อชุบ (Dipping Tank)

ขนาดของบ่อชุบจะมีผลต่อขนาดของชิ้นงานเนื่องจากถ้าชิ้นงานมีขนาดใหญ่แต่บ่อชุบตื้นจะทำให้ชิ้นงานชนกับพื้นของบ่อทำให้ไม่สามารถทำการเคลือบผิวได้



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของฟิล์มที่ใช้ในกระบวนการ Dipping



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของบ่อชุบ



### 2.5.2 ขั้นตอนของกระบวนการเคลือบฟิล์มสามารถอธิบายโดยสังเขปได้ดังนี้

1. ร้อยม้วนฟิล์มผ่าน roller และ Gravure
2. ละลายฟิล์มด้วยตัวทำละลาย (Activator)

Gravure จะทำหน้าที่ในการวัดตัวทำละลายขึ้นมาให้สัมผัสกับฟิล์มซึ่งปริมาณของตัวทำละลายนั้นจะมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน หากทำละลายฟิล์มน้อยจะทำให้ฟิล์มแข็งและจะเกิดปัญหาเคลือบไม่เต็มชิ้นงาน

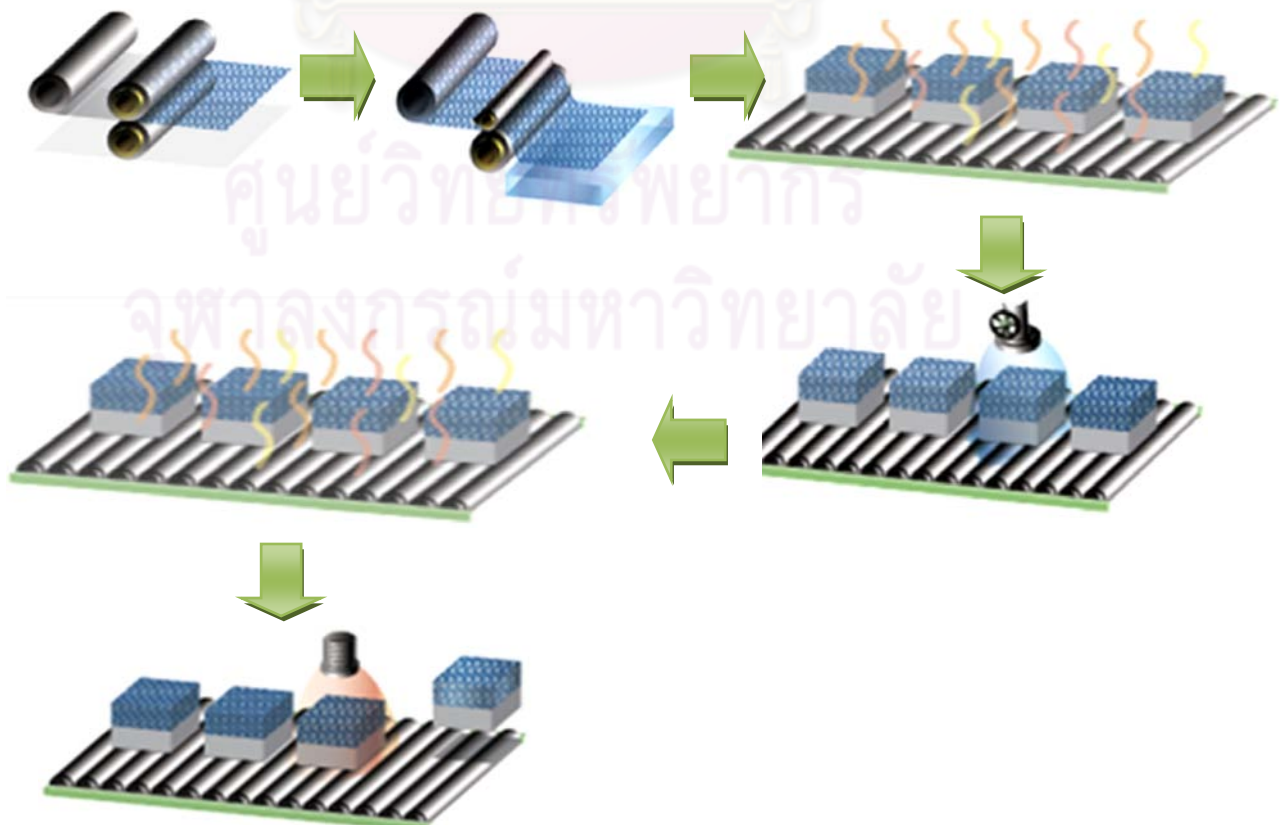
3. จุ่มชิ้นงานลงบน Film (Transfer)

ฟิล์มที่ถูกทำละลายด้วยตัวทำละลายแล้วจะถูกปล่อยไหลไปตามน้ำในบ่อชุบ จากนั้นจึงนำชิ้นงานจุ่มลง

4. ทำการล้างฟิล์ม

ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบฟิล์มแล้วจะถูกนำมาล้างคราบฟิล์มและน้ำยาออกด้วยน้ำ RO

5. ทำการเผาชิ้นงานให้แห้งและนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 80°C เป็นเวลา 30 นาที
6. นำชิ้นงานไปเคลือบผิวด้วยสี Top Coat อีกชั้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับผิวชิ้นงาน



## รูปที่ 2.11 กระบวนการ Dipping

### 2.6 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึง (Tensile test) เป็นการวัดความต้านทานของวัสดุโดยการให้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ (Static load) จนกระทั่งวัสดุขาดจากกัน ซึ่งงานทดสอบนี้ได้หลายลักษณะซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องทดสอบ หัวจับขึ้นทดสอบและขนาดแรงดึงที่ใช้

ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะมีการกำหนดขนาดต่างๆไว้เป็นมาตรฐานไม่ว่าจะเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวของชิ้นทดสอบ และรัศมีความโค้งของบริเวณบ่าล็อกเพื่อจับดึงซึ่งเมื่อมีการติดตั้งชิ้นทดสอบบนเครื่องทดสอบแล้วจะมีการให้แรงดึง (F) ซึ่งเรียกว่า ภาระ (Load) หรือแรงกระทำและเมื่อมีเครื่องมือวัดการยืดตัว (Strain gauge หรือ extensometer) ติดอยู่บนชิ้นทดสอบเพื่อวัดความยาวที่เปลี่ยนไป ในช่วงความยาวเกจ จากนั้นทำการบันทึกค่าของแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอและความยาวของชิ้นทดสอบที่ยืดออกในช่วงของแรงต่างๆจนกระทั่งชิ้นงานขาด

กราฟความเค้นความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain Curve) ค่าของแรงและความยาวที่เปลี่ยนไปจะถูกนำมาเปลี่ยนเป็นค่าของความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress) และความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain) กราฟความเค้น-ความเครียดแสดงได้ดังรูปที่ 2.12

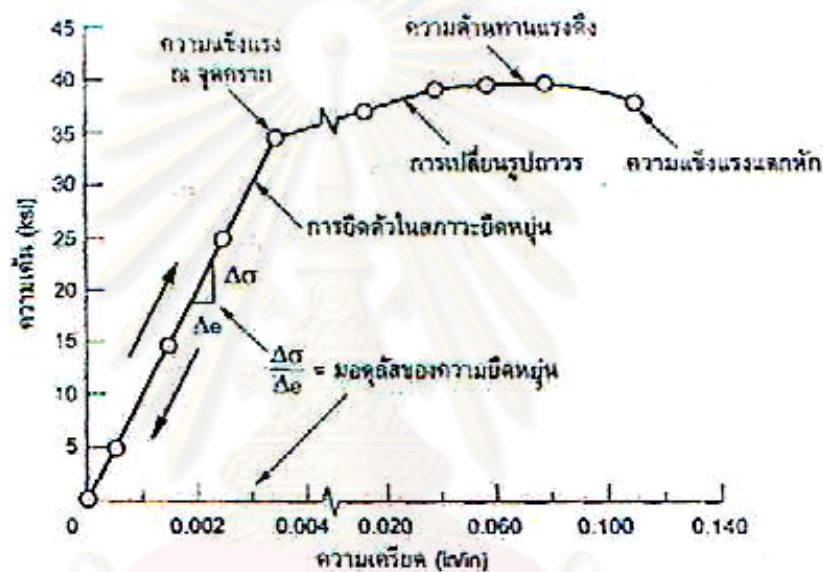
สมบัติต่างๆที่ได้จากการทดสอบแรงดึงนั้นประกอบด้วยสิ่งสำคัญ ได้แก่ ความเค้น ณ.จุดคราก (Yield strength) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (tensile strength) สมบัติในสภาวะยืดหยุ่น (elastic properties) และความเหนียว (ductility) (ณรงค์ศักดิ์, 2549)

1. ความเค้น ณ.จุดคราก (Yield strength; YS หรือ  $\sigma_y$ ) หมายถึงจุดที่วัสดุมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร โดยหากให้แรงกระทำกับวัสดุเกินจุดครากนี้ไป วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปไปและไม่กลับสู่สภาพเดิม 100%

2. ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength; TS หรือ UTS หรือ  $\sigma_T$ ) คือค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับได้หากดูความเค้นความเครียดในจุดที่มีความเค้นสูงสุดของกราฟ ณ. จุดนี้ชิ้นทดสอบจะเริ่มเกิด คอคอด (necking) ขึ้นที่บริเวณความยาวเกจ และเมื่อผ่านจุดนี้ไป วัสดุจะมีพื้นที่หน้าตัดลดลงเรื่อยๆจนเกิดการแตกหัก บางครั้งเรียกความเค้นแรงดึงนี้ว่า ความเค้นต้านทานแรงดึง (ultimate tensile strength; UTS)

3. สมบัติในสภาวะยืดหยุ่น การเปลี่ยนรูปของวัสดุในสภาวะนี้จะเป็นการเปลี่ยนรูปที่ไม่ถาวรโดยมีค่าที่สำคัญอยู่ค่าหนึ่งเรียกว่า โมดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity; E) หรือโมดูลัสยัง (Young's modulus) ซึ่งเป็นค่าความชันของกราฟความเค้นกับความเครียด

สำหรับการทดสอบแรงดึงจะเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ซึ่งชิ้นทดสอบจะเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbell) หรือรูปกระดูก (Bone) ชิ้นทดสอบควรมีความกว้างไม่ต่ำกว่า 5 มิลลิเมตร จำนวนที่จะทำการทดสอบถ้าตัวอย่างเป็น Isotropic ควรใช้ตัวอย่างอย่างน้อย 5 ตัวอย่าง



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างกราฟความเค้น-ความเครียด

## 2.7 การทดสอบความทนต่อแรงกระแทก

การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) ของวัสดุเป็นการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการรับแรงที่มากกระทำกับวัสดุด้วยความเร็ว (dynamic load) ความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุหมายถึง การที่วัสดุสามารถดูดกลืนหรือเก็บพลังงานกระแทกไว้ได้มากน้อยเพียงใด ถ้าวัสดุสามารถเก็บพลังงานสะสมต่อหน่วยปริมาตรตั้งแต่เริ่มต้นได้รับแรงกระแทกจนกระทั่งแตกหักไว้ได้สูงก็หมายความว่าวัสดุนั้นมีทัพเนสส์ (Toughness) สูงหรือมีความทนทานต่อแรงกระแทกนั้นสูง

หลักการทดสอบแรงกระแทกจะใช้ค้อนเหวี่ยง (Hammer) กระแทกชิ้นทดสอบที่ทำเป็นรอยบากมาตรฐานไว้ ซึ่งลักษณะการเหวี่ยงจะคล้ายลูกตุ้มนาฬิกา จากนั้นก็นำผลต่างของ

ระดับสูงต่ำของลูกตุ้มเมื่อเริ่มแกว่งและหลังจากที่แกว่งไปกระทบขึ้นทดสอบให้หักไปคำนวณ (ณรงค์ศักดิ์, 2549)

โดยการบากชิ้นงานเป็นการป้องกันการสูญเสียพลังงาน โดยรอยบากบนชิ้นงาน เป็นที่ทำหน้าที่เป็นจุดที่แรงกระทำมาสะสมกัน ทำให้การเปลี่ยนรูปของชิ้นงานเกิดขึ้นได้ยากเพราะ การแตกขาดจะเกิดขึ้นบริเวณรอยบากเท่านั้น การทดสอบการทนแรงกระทำชิ้นงานที่มีรอยบาก 2 วิธีคือ Charpy Impact Test และ Izod Impact Test ทั้งสองมีวิธีความแตกต่างกันในทางปฏิบัติ คือ วิธี Charpy Impact Test นั้นรอยบากจะอยู่ด้านตรงข้ามกับทางเดินของค้อนตีและตัวอย่างจะ วางในแนวแกนนอน ส่วนวิธี Izod Impact Test รอยบากจะอยู่ด้านเดียวกับทางเดินของค้อนตีและ ตัวอย่างจะวางในแนวแกนตั้ง

## 2.8 การวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการหาสมการเส้นตรงหรือเส้น โค้งสมการเหล่านี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองประเภท คือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable) หนึ่งตัวและตัวแปรอิสระ (Independent Variable) อีกตัวหนึ่งหรือมากกว่า สมการที่ได้ จากเทคนิคดังกล่าวจะแสดงว่าตัวแปรตามจะมีการผันแปรตามตัวแปรอิสระอย่างไร

ประเภทการวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ คือ

### 1. การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression)

การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม กับตัวแปรอิสระหนึ่งตัว โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นตรง โดยให้  $x$  เป็นตัวแปร อิสระ และ  $y$  เป็นตัวแปรตาม ซึ่งอาจเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้เป็น

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + e \quad (2.1)$$

$\beta_0$  คือ ค่าที่เท่ากับจุดตัดบนแกน  $y$  เมื่อกำหนดให้  $x = 0$

$\beta_1$  คือ ความชันของเส้นตรง

$e$  คือ ค่าความแตกต่างของ  $y$  ที่เกิดขึ้นจริงกับ  $y$  บนเส้นถดถอย

### 2. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อน (Multiple Regression Analysis)

ในหลายๆกรณี ตัวแปรตามอาจมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวขึ้นไปซึ่งสามารถ เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1, 2, \dots, n} \beta_i x_i + e \quad (2.2)$$

$\beta_0$  คือ ค่าที่เท่ากับค่าของ  $y$  เมื่อกำหนดให้  $x_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$

$\beta_i$  คือ ค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $y$  กับ  $x_i$  และดัชนีการเปลี่ยนแปลงใน  $y$  เมื่อ  $x_i$  เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย

$e$  คือ ค่าความแตกต่างของ  $y$  ที่เกิดขึ้นจริงกับ  $y$  บนเส้นถดถอย

$i$  คือ ลำดับที่ของตัวแปรอิสระในสมการ

### 3. รูปแบบการถดถอยอย่างอื่น (Other Regression Model)

#### 3.1 การถดถอยสำหรับสองตัวแปรที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้ง

การพยากรณ์โดยใช้เทคนิคถดถอยนั้น ปกติใช้ในกรณีที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระเป็นเส้นตรง โดยที่ลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรมักจะอยู่ในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง ในกรณีนี้สงสัยว่าลักษณะของความสัมพันธ์จะมีรูปแบบที่แน่นอน เช่น เป็นเส้นโค้งแบบ Exponential ก็อาจนำเอาวิธีการถดถอยมาใช้ในการวิเคราะห์หาสมการถดถอยได้โดยการแปลงลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรให้อยู่ในรูปเส้นตรงก่อน หลังจากวิเคราะห์หาสมการถดถอยในเชิงเส้นตรงได้แล้วจึงเปลี่ยนรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรกลับไปสู่รูปเดิม อย่างเช่น ข้อมูลมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นโค้ง แบบ exponential ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$y = e^{a+bx} \quad (2.3)$$

$a$  คือ ค่าที่เท่ากับจุดตัดแกน  $y$  เมื่อกำหนดให้  $x = 0$

$b$  คือ ความชันของเส้นตรง

จากสมการข้างบนใส่  $\ln$  ทั้งสองข้างได้เป็น

$$\ln(y) = a + bx$$

$$\ln(y) = y$$

ดังนั้น จึงแปลงสมการให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงได้ดังนี้

$$y = a + bx \quad (2.4)$$

### 3.2 การถดถอยสำหรับสองตัวแปรที่มีความสัมพันธ์แบบพหุนามในเมียดีกรี 2

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (2.5)$$

วิธีการหาสมการถดถอยทำได้โดยการแปลงลักษณะความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของเส้นตรงก่อนหลังจากวิเคราะห์หาสมการถดถอยในเชิงเส้นตรงแล้วจึงเปลี่ยนรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรกลับสู่รูปเดิม

การเลือกรูปแบบของสมการถดถอยที่เหมาะสม

เราต้องการหาสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปรตาม  $y$  กับกลุ่มตัวแปรอิสระกลุ่มหนึ่งซึ่งคาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับ  $y$  คือ  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  สิ่งที่เราต้องการคือ

1. สมการที่สามารถพยากรณ์ค่าตัวแปรตามได้แม่นยำที่สุด เราต้องการที่จะมีตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อ  $y$  มากที่สุดในสมการเพื่อให้ได้สมการที่มีความเชื่อถือมากที่สุด
2. ไม่ต้องการใช้ตัวแปรอิสระในสมการมากเกินไปจนความจำเป็น

### 2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Anthony L. Andrady เอกสารฉบับนี้ได้อธิบายถึงการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ด้วยแสง โดยกล่าวว่าการดูดกลืนรังสีเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะเกิดขึ้นก่อนการเสื่อมสภาพด้วยแสงซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดก็จะเสื่อมสภาพในแต่ละช่วงความยาวคลื่น แต่จากหลักทฤษฎีแล้วนั้นพอลิเมอร์ที่โปร่งแสงจะไม่ดูดกลืนแสงยูวี แต่เนื่องจากความไม่บริสุทธิ์ของสารตลอดจนการเติมสารเติมแต่งดังนั้นจึงเป็นเหตุทำให้พอลิเมอร์นั้นเกิดการดูดกลืนรังสียูวีและเกิดการเสื่อมสภาพด้วยแสงในที่สุดลักษณะการเสื่อมสภาพด้วยแสงที่สำคัญสำหรับพอลิเมอร์สังเคราะห์และพอลิเมอร์ชีวภาพนั้นคือการเปลี่ยนสี(กลายเป็นสีเหลืองหรือมีสีไม่สม่ำเสมอ)และการสูญเสียคุณสมบัติทางกล เช่น การสูญเสียความแข็งแรง ความทนทานต่อแรงกระแทกซึ่งการสูญเสียสมบัติเชิงกลนี้สะท้อนให้เห็นว่าสายโซ่ของพอลิเมอร์ถูกทำลาย (Polymer chains scission)

Antonio.B.Queiroz, Fernada P. Collares-Queiroz (2009) บทความนี้ได้กล่าวถึงนวัตกรรมและแนวโน้มอุตสาหกรรมสำหรับพลาสติกชีวภาพในตลาดปัจจุบันโดยพบว่าทั่วโลกมีบริษัทที่ผลิตเกี่ยวกับพลาสติกชีวภาพประมาณ 180 บริษัท โดยในกลุ่มนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นบริษัทที่เป็นผู้ผลิตในระดับอุตสาหกรรมและอีกประเภทคือบริษัทนำร่องเพื่อทดสอบตลาดสำหรับพลาสติกชีวภาพ 17 ชนิดโดยในการวิจัยและพัฒนาจะเน้นการพัฒนากระบวนการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพซึ่งเป็นสารตั้งต้นใหม่ๆเป็นหลัก โดยการพัฒนาชีวมวลชนิดใหม่หรือมีการดัดแปลงพันธุกรรมของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง หรือเร่งระยะเวลาปฏิกิริยา เป็นต้น แต่ในขณะเดียวกันการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆก็ยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของพลาสติกชีวภาพให้ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าโดยประเทศที่มีกำลังการผลิตสูงสุดได้แก่ อเมริกา เยอรมันนี และญี่ปุ่น ตามลำดับ การพัฒนาส่วนใหญ่มักจะเกี่ยวข้องกับวัตถุดิบตั้งต้น, กระบวนการผลิต และปัจจัยในการดำเนินการในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกชีวภาพ แป้ง, เซลลูโลส, น้ำตาล, น้ำมันพืชและไม้ เป็นสิ่งที่ได้จากธรรมชาติและวัตถุดิบหมุนเวียนที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพหรือกิ่งชีวภาพมากที่สุด คุณสมบัติของพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้จากแป้งข้าวโพด, มันฝรั่ง, มันสำปะหลัง, ข้าวสาลีและมันเทศ นั้นจะสามารถย่อยสลายได้ซึ่งโดยส่วนมากนิยมที่จะนำไปผสมกับ พอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone; PCL) และ พอลิไวโนแอลกอฮอล์ (PVOH) และสารเคมีอื่นๆ อย่างไรก็ตามการเพิ่มคุณสมบัติของโคพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะเป็นการเสริมคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ธรรมชาติให้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการปรับสูตรให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้ (90-180°C) ซึ่งการหลอมเหลวของวัสดุและการไหลเมื่อทำการขึ้นรูปด้วยการฉีด, การอัด และการเป่า สามารถใช้อุปกรณ์เดิมที่ใช้กับเม็ดพลาสติกสังเคราะห์ทั่วไปได้

K. Mohanty (2005) บทความนี้ได้ทำการทดลองเติมปริมาณกลาสไฟเบอร์ใน Poly (trimethylene terephthalate) ที่อยู่ในกลุ่มของ DuPont SORONA และทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆโดยจากการทดลองได้ทำการเติมกลาสไฟเบอร์ทั้งหมด 3 กลุ่มด้วยกันคือ 0% 15% 30% และ 40% โดยจากการทดลองพบว่ากลาสไฟเบอร์นั้นทำให้ crystallization temperature ของ PTT เพิ่มขึ้น คุณสมบัติที่เกี่ยวกับ Impact strength tensile strength modulus และ Flexure PTT คอมโพสิตที่ทำการเสริมแรงด้วยกลาสไฟเบอร์นั้นจะมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใย อุณหภูมิ HDT ของ PTT คอมโพสิตที่ทำการเสริมแรงด้วยกลาสไฟเบอร์ได้ถูกปรับเพิ่มเป็น 2 ครั้ง ซึ่งจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าช่วงการใช้งานของ PTT คอมโพสิตที่ทำการเสริมแรงด้วยกลาสไฟเบอร์นั้นค่อนข้างกว้างซึ่งวัสดุชนิดนี้จะมีแนวโน้มที่ดีในการที่จะเป็นวัสดุทาง

วิศวกรรมชนิดใหม่ที่มีการนำไปใช้งานที่หลากหลายเช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และ ชิ้นส่วนรถยนต์

K. Van de Velde, P. Kiekens (2001) บทความนี้ได้กล่าวถึงภาพรวมของคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องของ Biodegradable Polymer โดยมีจุดประสงค์เพื่อหา Biopolymer ชนิดเทอร์โมพลาสติกที่เหมาะสมสำหรับสารประกอบเสริมแรงด้วยใยป่าน ในที่นี้ความหนาแน่นและอุณหภูมิมีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการเลือกพอลิเมอร์ที่เหมาะสม

M. Flieger, M.Kantorova, A. Prell, T. Rezanka, J. Vtruba (2003) บทความนี้ได้ทำการสรุปข้อมูลการใช้งานของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ความสามารถในการย่อยสลาย ความน่าเชื่อถือทางการค้าและการผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน หรือการสังเคราะห์จากเคมีสังเคราะห์

M. Kolybaba (2003) บทความนี้ได้กล่าวถึงตลาดของวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีการขยายเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากไม่ว่าจะเป็น การนำมาใช้ในบรรจุภัณฑ์ การเกษตร และ ยา เป็นต้น ดังนั้นจึงทำให้แนวโน้มในการผลิตวัสดุที่เป็นมิตรกับธรรมชาติและออกแบบพอลิเมอร์คอมโพสิตที่แตกต่างกันมีจำนวนเพิ่มขึ้นและนอกจากนี้วัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพยังจะช่วยลดการผลิตพลาสติกสังเคราะห์ลงตลอดจนช่วยลดมลภาวะอีกด้วย โดยบทความนี้มุ่งเน้นที่จะนำเสนอแนวคิดในการทำงานเกี่ยวกับการวิจัยและพัฒนาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หลักการ การประยุกต์ใช้ และการทำงานในอนาคตที่เกี่ยวข้องกับวัสดุชนิดนี้

R. Chandra, Renu Rustgi (1998) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทั่วไปของ biodegradable polymers โดยปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลาย ลักษณะของการย่อยสลาย วิธีการทดสอบและมาตรฐานของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพตลอดจนการนำพลาสติกย่อยสลายได้ไปประยุกต์ใช้

Seung-Woo Choi (2006) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้คือการพิสูจน์ผลของการอบโดยใช้ความร้อน (Thermal Aging) ที่มีผลต่อการย่อยสลายของแป้งที่เติมลงใน Polybutylene Succinate (PBS) ซึ่ง Bio-composites ชนิดนี้เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการที่จะนำมาทดแทนพลาสติกที่มีอยู่ในปัจจุบันที่ใช้สำหรับผลิตชิ้นส่วนภายในรถยนต์ งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการอบภายใต้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วัน ซึ่งขนาดของแป้งเมื่อเทียบตามสเกล mesh จะมีขนาด 80-100 mesh และนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติด้านความ



ร้อนและคุณสมบัติทางเคมี และนอกจากนี้ยังทำการวัดน้ำหนักที่สูญเสียไปของโมเลกุลด้วยวิธี Gel Permeation chromatography (GPC) โดยจากการทดลองพบว่าหากเพิ่มระยะเวลาในการอบมากขึ้นจะส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของ Bio-composites ลดลงและหากเพิ่มปริมาณของแป้งมากขึ้นก็จะทำให้คุณสมบัติเชิงกลต่ำมากยิ่งขึ้น ซึ่งผลกระทบของการอบ Bio-composites ด้วยความร้อนจะขึ้นอยู่กับเมทริกพอลิเมอร์มากกว่าการย่อยสลายทางชีวภาพ เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของ MA grafted PBS 5% ที่เติม PBS-WF 30% (PBS-WF30%-PBS-MA 5%) Zeolite ที่เติม PBS-WF30% (PBS-WF30%-Zeolite 5%) และ PBS-WF 30% จะพบว่า PBS-MA และ Zeolite มี Tensile strength และ Thermal Resistance ที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ผลที่ได้จากกราฟ TGA ของ PBS และ PP เมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการอบจะพบว่า thermal Stability ของ PBS และ PP จะลดลงแต่อัตราการลดลงของ PBS จะมากกว่า PP เนื่องจากสารเติมแต่งที่เติมลงไปทำให้ thermal stability ของ Bio-composites เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

จากกราฟ DSC หากไม่คำนึงถึงระยะเวลาในการอบจะพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญต่อ Tg และ Tm ของ PBS และ PP นอกจากนี้กราฟ FTIR-ATR ยังได้ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของ PBS และ PP ในกรณีของ PBS โมเลกุล C-C-O จะยืดออกเพื่อจับกลุ่มกับพันธะเอสเทอร์และการยืดหดตัวของโมเลกุล C=O จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและแสดงออกมาทางกราฟ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอบ Mw และ Mn ใน PBS และ PP จะลดลง ทำให้เห็นว่ปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของ PBS จะเริ่มต้นจากกักร้อนที่ผิววัสดุตามด้วยการที่โมเลกุลหลักขาดท่อนเป็นช่วงๆ แบบสุ่มของ PBS และ PP อันเนื่องมาจากความร้อน

Tomofumi Maekawa (2004) บทความนี้ได้กล่าวถึงการทดลองการเติมเส้นใยสังเคราะห์ขนาดต่างๆลงในโพลีไตรเมทิลีน เทเรฟทาเลต (Polytrimethylene Terephthalate; PTT) เพื่อเปรียบเทียบถึงคุณสมบัติต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปโดยจากการทดลองพบว่าปริมาณการเติมเส้นใยมีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติทางกลโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของการทนต่อความด้า สำหรับชิ้นส่วนรถยนต์ซึ่งมีโครงสร้างที่หลากหลายนั้นเรซินเสริมแรงเป็นสิ่งที่เหนือกว่ามากในเรื่องของความทนทานซึ่งชิ้นส่วนพวกนี้มักต้องการความน่าเชื่อถือค่อนข้างสูงในเรื่องของระยะเวลาการใช้งาน และจากการทดลองการเสริมแรงซึ่งประกอบด้วยโพลีไตรเมทิลีน เทเรฟทาเลตและเส้นใยสังเคราะห์พบว่าไม่ว่าจะเส้นใยสังเคราะห์ประเภทไหน ปริมาณของเส้นใยที่เติมลงไปควรจะประมาณ 5-7% โดยน้ำหนักของน้ำหนักรวมทั้งหมดของเรซินคอมโพสิต โดยเส้นใยเสริมแรงส่วน

ใหญ่อาจจะเป็นกลาส ไฟเบอร์เพียงชนิดเดียว หรือ กลาส ไฟเบอร์ร่วมกับเส้นใยสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ

จิระเชษฐ บัญแก้ว (2552) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนผสมและอุณหภูมิในการหลอมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรไพลีนใหม่ (Virgin Polypropylene; PP) กับพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใหม่ (Recycled Polypropylene; PR) ที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล โดยการวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ 1 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการหลอมและสัดส่วนผสมของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมครั้งที่ 1 และ 2 ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนการผสมและจำนวนครั้งของพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6 โดยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเกี่ยวกับ ดัชนีการหลอมไหล โครงสร้างระดับจุลภาค ความถ่วงจำเพาะ ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสของความยืดหยุ่น เปอร์เซนต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด ความแข็ง และความทนต่อแรงกระแทก

อภิณันทนา อุดมศักดิ์ (2541) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE) กับพอลิโพรไพลีน (Polypropylene : PP) โดยมีเอทิลีนโพรไพลีน ไดอีน เทอร์โพลิเมอร์ (Ethylene Propylene Diene Terpolymer : EPDM) เป็นตัวที่ทำให้เข้ากัน คุณสมบัติทางกายภาพที่ศึกษาได้แก่แรงดึง ความแข็ง และความทนต่อแรงกระแทก การทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ส่วนแรกศึกษาดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมและอุณหภูมิในการขึ้นรูป ส่วนที่สองศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เชิงกล และโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม ผลการทดลองพบว่า ในขั้นตอนแรกพบว่าควรฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม HDPE/PP/EPDM ที่อุณหภูมิ 210° C คุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะแปรไปตามพอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่า แต่เปอร์เซนต์ความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม HDPE/PP (75/25) จะมีค่ามากที่สุดคือ 428.37% เมื่อเติม EPDM เข้าไปจะทำให้ดัชนีการหลอมไหล ความถ่วงจำเพาะ ความทนแรงดึง 100% โมดูลัสของความยืดหยุ่นลดลงแต่จะทำให้ความทนต่อแรงเพิ่มขึ้น

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนต่างๆในการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติการใช้งานของพลาสติกชีวภาพโดยเริ่มตั้งแต่การเตรียม วิธีการทดสอบ และการวิเคราะห์ผลทดสอบ โดยวัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติในด้านต่างๆของพลาสติกชีวภาพ 2 ชนิดซึ่งประกอบด้วย P15 และ P30 เปรียบเทียบกับ ABS และนอกจากนี้ในการทดลองยังได้ทำการแบ่งกลุ่มของวัสดุตามกระบวนการผลิตออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือกลุ่มของชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีชุบฟิล์มและกลุ่มของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีชุบฟิล์มซึ่งสามารถแยกเป็นขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยได้ดังนี้

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. เม็ดพลาสติก อะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene : ABS)
2. เม็ดพลาสติก พอลิไตรเมทิลีน เทเรฟทาเลตเสริมแรงกลีาสไฟเบอร์ 15 เปอร์เซ็นต์ (15% Glass fiber reinforced Polytrimethylene Terephthalate ; P15)
3. เม็ดพลาสติก พอลิไตรเมทิลีน เทเรฟทาเลตเสริมแรงกลีาสไฟเบอร์ 30 เปอร์เซ็นต์ (30% Glass fiber reinforced Polytrimethylene Terephthalate ; P30)
4. เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding Machine) ขนาด 150 ตันยี่ห้อ Fanuc
5. เครื่องวิเคราะห์ Thermogravimetric (TGA)
6. เครื่องปล่อยแสงยูวี
7. เครื่องทดสอบแรงดึง SHIMADSU Model EHF-EM 50kN-20L
8. เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod Impact Test

### 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. นำเม็ดพลาสติกที่เป็นวัสดุตั้งต้นแต่ละชนิดมาทำการทดสอบความเสถียรของวัสดุด้วยความร้อนโดยใช้วิธี Thermogravimetric Analysis (TGA) เพื่อหาความทนทานความร้อนของวัสดุโดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุแต่ละชนิดในบรรยากาศปกติซึ่งทำการศึกษาโดยการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปจนกระทั่งถึง 800°C

2. นำเม็ดพลาสติกที่เป็นวัสดุตั้งต้นแต่ละชนิดมาขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดพลาสติกขนาด 150 ตัน ของบริษัท Fanuc Co., Ltd. โดยแม่พิมพ์ที่ใช้จะประกอบด้วยแม่พิมพ์รูปดัมเบลตามมาตรฐาน ASTM D-368M Type III ลักษณะของชิ้นทดสอบรูปดัมเบลแสดงดังรูปที่ 3.1 แม่พิมพ์รูปแผ่นทดสอบ (Test Piece) ขนาด 50 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร x 3 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2 และ แม่พิมพ์รูปแท่งทดสอบแรงกระแทก แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยหลังจากที่เครื่องฉีดขึ้นรูปชิ้นทดสอบหลุดจากแม่พิมพ์แล้วเก็บชิ้นทดสอบไว้เพื่อทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.1 ลักษณะของชิ้นทดสอบรูปดัมเบล



รูปที่ 3.2 ลักษณะของซึ้นทดสอบรูปแผ่น



รูปที่ 3.3 ลักษณะของซึ้นทดสอบรูปแท่งทดสอบแรงกระแทก

3. แบ่งชิ้นทดสอบในข้อ 2 มาทำการเคลือบผิวด้วยกระบวนการ Dipping
4. นำชิ้นงานในข้อ 2 และ 3 ผ่านแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น 365 nm ที่ระดับความเข้มแสง 2.36, 3.54 และ 4.72 mW/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ
5. นำชิ้นงานสำหรับทดสอบคุณสมบัติภายใต้แรงดึง (รูปดัมเบล) ในข้อ 2, 3 และ 4 มาทำการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D-638 ประกอบด้วยค่าความทนแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength;  $\sigma_T$ ) ค่าความเค้นจุดคราก (Yield Strength;  $\sigma_y$ ) ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด (Modulus of Elasticity; E) และค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด (Elongation at Break; %EL) จำนวนขนาด 5 ตัวอย่างต่อการทดสอบ
5. นำชิ้นงานสำหรับทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก ในข้อ 2 และ 3 มาทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-256
6. นำชิ้นงานรูปแผ่นทดสอบในข้อ 4 มาทำการทดสอบคุณสมบัติการเสื่อมสลายด้วยแสงยูวีโดยในการทดสอบนั้นจะพิจารณาจากลักษณะสีของชิ้นงานทดสอบหลังจากผ่านแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น 365 nm ที่ระดับความเข้มแสง 2.36, 3.54 และ 4.72 mW/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ
7. นำชิ้นงานรูปแผ่นทดสอบในข้อ 2 และ 3 มาผ่านความร้อนด้วยการอบในช่วงอุณหภูมิต่างๆดังต่อไปนี้
  - 7.1 กลุ่ม High Temperatures ประกอบด้วยอุณหภูมิ 30°C , 50°C , 85°C และ 95°C
  - 7.2 กลุ่ม High Temperatures และ High Humidity กระทำที่อุณหภูมิและความชื้นดังนี้ 30°C และ 70%Rh, 30°C และ 80%Rh, 30°C และ 90%Rh, 50°C และ 70%Rh, 50°C และ 80%Rh, 50°C และ 90%Rh, 85°C และ 70%Rh, 85°C และ 80%Rh, 85°C และ 90%Rh, 90°C และ 70%Rh, 90°C และ 80%Rh และ 90°C และ 90%Rh
8. นำชิ้นงานในข้อ 7 มาทำการทดสอบคุณสมบัติการเสื่อมสภาพทางกายภาพและทดสอบการยึดติด (Adhesive Characteristics) ซึ่งประกอบด้วยเทคนิค Checkerboard cutter, Cross cut, peeling และ Pencil scratch

เนื่องจากความหลากหลายของวัสดุที่ทำการศึกษา ดังนั้นจึงกำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้แทนดังต่อไปนี้

P151 คือ ชิ้นงานที่ใช้วัสดุ P15 และไม่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีชุบฟิล์ม

P152 คือ ชิ้นงานที่ใช้วัสดุ P15 และจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีชุบฟิล์ม

P301 คือ ชิ้นงานที่ใช้วัสดุ P30 และไม่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีชุบฟิล์ม

P302 คือ ชิ้นงานที่ใช้วัสดุ P30 และจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีชุบฟิล์ม

ABS1 คือ ชิ้นงานที่ใช้วัสดุ ABS และไม่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีชุบฟิล์ม

ABS2 คือ ชิ้นงานที่ใช้วัสดุ ABS และจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีชุบฟิล์ม

### 3.3 การทดสอบคุณสมบัติ

#### 3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติการเสื่อมสภาพทางความร้อน

การทดสอบนี้จะใช้เทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) เพื่อทำการวิเคราะห์หาอุณหภูมิในการย่อยสลาย โดยการทำงานจะเริ่มเมื่อนำวัสดุซึ่งบรรจุภายในชองรับ (Sample pan) ได้รับความร้อนจากเตาภายใต้บรรยากาศที่ควบคุม เมื่อถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมองค์ประกอบในวัสดุจะสลายตัวเป็นผลให้น้ำหนักรวมของวัสดุลดลงในขณะที่ความร้อนและองค์ประกอบสลายตัวนี้เครื่อง TGA (แสดงดังรูป 3.4) จะบันทึกค่าอุณหภูมิและน้ำหนักไปพร้อมกันและแสดงผลออกมาในรูปแบบกราฟ TGA curve



รูปที่ 3.4 ลักษณะของเครื่อง TGA

### 3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยแสงยูวี

การทดสอบนี้จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงสภาพของชิ้นทดสอบหลังจากผ่านแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น 365 nm ที่ระดับความเข้มแสง  $2.36 \text{ mW} / \text{cm}^2$ ,  $3.54 \text{ mW} / \text{cm}^2$  และ  $4.72 \text{ mW} / \text{cm}^2$  ตามลำดับ

### 3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกล

คุณสมบัติทางกลที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ

#### 1. การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

สมบัติต้านทานแรงดึงของวัสดุ เป็นตัวบอกความแข็งแรงและความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุจนขาดในระยะเวลาสั้นๆ ด้วยอัตราดึงคงที่ โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะใช้ชิ้นทดสอบรูปดัมเบล (Dumbbell) ที่เตรียมไว้มาทดสอบหาคุณสมบัติภายใต้แรงดึงโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Tester) ดังรูปที่ 3.5 ด้วยอัตราเร็ว (Cress head speed) 50 มิลลิเมตรต่อนาที ตามลำดับงานวิจัยนี้จะนำเสนอข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงในรูปของค่าความทนแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength;  $\sigma_t$ ) ค่าความเค้นจุดคราก (Yield Strength;  $\sigma_y$ ) ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity; E) และค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.



จุดขาด (Elongation at Break; %EL) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตรที่แสดงในสมการที่ 3 – 4 ตามลำดับ ในการทดสอบนั้นจะทำการทดสอบสำหรับแต่ละตัวอย่างเท่ากับ 5 ชิ้น

ความต้านทานแรงดึงสูงสุด Tensile strength ( $\sigma_t$ )

เป็นอัตราส่วนของแรงดึงที่ชิ้นงานได้รับซึ่งมีค่าสูงสุดกับพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นดังสมการที่ 1 เมื่อ  $F_{max}$  คือแรงสูงสุดที่ชิ้นงานสามารถรับได้

$$\text{Tensile strength } (\sigma_t) = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (3.1)$$

ค่าความเค้นจุดคราก (Yield Strength;  $\sigma_y$ )

$$\text{Yield strength } (\sigma_y) = \frac{F}{A_0} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \frac{L_i - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.3)$$

โดย  $\sigma_y$  คือ ความเค้น มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

$\varepsilon$  คือ ความเครียด

$F$  คือ แรงดึงที่ให้กับชิ้นงานมีหน่วยเป็นนิวตัน

$A_0$  คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานในช่วงความยาวเกจ

(Gauge length) มีหน่วยเป็นตารางเมตร

$L_i$  คือ ความยาวชิ้นงาน ณ ตำแหน่งหรือระยะยืดใด ๆ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

$L_0$  คือ ความยาวชิ้นงานเริ่มต้นในช่วงความยาวเกจมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity; E)

ค่า Modulus of Elasticity; E คือค่าที่สามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงก่อนถึงจุดคราก (Yield) ของเส้นกราฟซึ่งในช่วงดังกล่าวชิ้นงานตัวอย่างจะสามารถกลับคืนสู่ขนาดเดิมก่อนทำการดึงชิ้นงานตัวอย่างได้เมื่อปล่อยแรงที่ให้กับชิ้นงาน โดยสูตรที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังสมการที่ 4

$$\text{Modulus of Elasticity (E)} = \frac{E}{\sigma} \quad (3.4)$$

ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาด (Elongation at Break; %EL)

$$\%EL = \left( \frac{L_{max} - L_0}{L_0} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

โดย %EL คือ เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น

$L_{max}$  คือ ความยาวของชิ้นงานสูงสุดที่อ่านได้ก่อนขาด (mm)

$L_0$  คือ ความยาวของชิ้นทดสอบที่ใช้เป็นเกณฑ์ (Gage Length)

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 ลักษณะของเครื่องทดสอบแรงดึง

## 2. การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test)

โดยในการทดสอบจะทดสอบแบบ Izod Impact Test นำมาทดสอบหาความทนทานต่อแรงกระแทกโดยใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Tester) ขนาดตุ้มน้ำหนัก 60 kg, โดยวิธีการทดสอบปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D-256 ดังนี้

1. นำชิ้นงานวางบนแท่นจับ ปรับเข็มบนหน้าปัดให้ชี้ที่เลขศูนย์
2. ปล่อยตุ้มน้ำหนักให้ตกลงบนชิ้นงานเครื่องทดสอบจะบอกค่าพลังงาน

ที่สูญเสียในการตีออกมาหน่วยเป็นจูลคำนวณความทนต่อแรงกระแทกด้วยสมการ 3.6

$$\text{ความทนต่อแรงกระแทก (KJ/m}^2\text{)} = \frac{\text{พลังงานที่สูญเสียขณะตีชิ้นทดสอบ (J)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดรับแรง (mm}^2\text{)}} \times 1000 \quad (3.6)$$

### 3.3.4 การทดสอบคุณสมบัติการหลุดลอกฟิล์ม

#### 1. นำชิ้นงานอบในช่วงอุณหภูมิต่างๆดังต่อไปนี้

1.1 กลุ่ม High Temperatures ประกอบด้วยอุณหภูมิ 30°C , 50°C , 85°C และ 95°C

1.2 กลุ่ม High Temperatures และ High Humidity กระทำที่อุณหภูมิและความชื้นดังนี้ 30°C และ 70%Rh, 30°C และ 80%Rh, 30°C และ 90%Rh, 50°C และ 70%Rh, 50°C และ 80%Rh, 50°C และ 90%Rh, 85°C และ 70%Rh, 85°C และ 80%Rh, 85°C และ 90%Rh, 90°C และ 70%Rh, 90°C และ 80%Rh และ 90°C และ 90%Rh

#### 2. คุณสมบัติการหลุดลอกฟิล์มที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ

##### 2.1 คุณสมบัติการยึดติด (Adhesive Characteristics)

การทดสอบนี้จะสังเกตการหลุดลอกของฟิล์มที่เคลือบผิวของชิ้นทดสอบโดยเทคนิคที่ใช้ในการทดสอบคือ Checkerboard cutter, Cross cut peeling และ Pencil scratch โดยวิธีทดสอบในแต่ละหัวข้อเป็นดังต่อไปนี้

##### 2.1.1 Checkerboard cutter

การทดสอบนี้จะใช้คัตเตอร์กรีดที่ผิวชิ้นทดสอบให้เป็นช่องขนาด 2 มิลลิเมตร x 2 มิลลิเมตร จำนวน 100 ช่อง จากนั้นจะใช้เทปกาวขนาด 18-30 มิลลิเมตรทำการดึงเพื่อดูการยึดติดของผิวเคลือบ

##### 2.1.2 Cross-cut

การทดสอบนี้จะใช้คัตเตอร์กรีดที่ผิวชิ้นทดสอบให้เป็นเส้นตรงตัดกัน 2 เส้น โดยเส้นทั้ง 2 จะทำมุมระหว่าง 60° - 90 ° จากนั้นจะใช้เทปกาวขนาด 18-30 มิลลิเมตรทำการดึงเพื่อดูการยึดติดของผิวเคลือบ

##### 2.1.3 Peeling

การทดสอบนี้จะใช้เทปกาวขนาด 18-30 มิลลิเมตรทำการดึงเพื่อดูการยึดติดของผิวเคลือบ

##### 2.1.4 Pencil scratch test

การทดสอบนี้เป็นทดสอบความแข็งแรงของพื้นผิวโดยใช้ดินสอทดสอบที่มีค่าความแข็งขนาด HB ซึ่งวิธีทดสอบนั้นสามารถอ้างอิงได้จาก JIS K 5400

(Test method for paint) โดยให้ดินสอทำมุม 45° กับพื้นทดสอบออกแรง 3 Kg<sub>f</sub> โดยประมาณเพื่อดันให้ดินสอไปข้างหน้าประมาณ 10 มิลลิเมตรจากนั้นทำการตรวจสอบดูการหลุดลอกของชิ้นงาน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

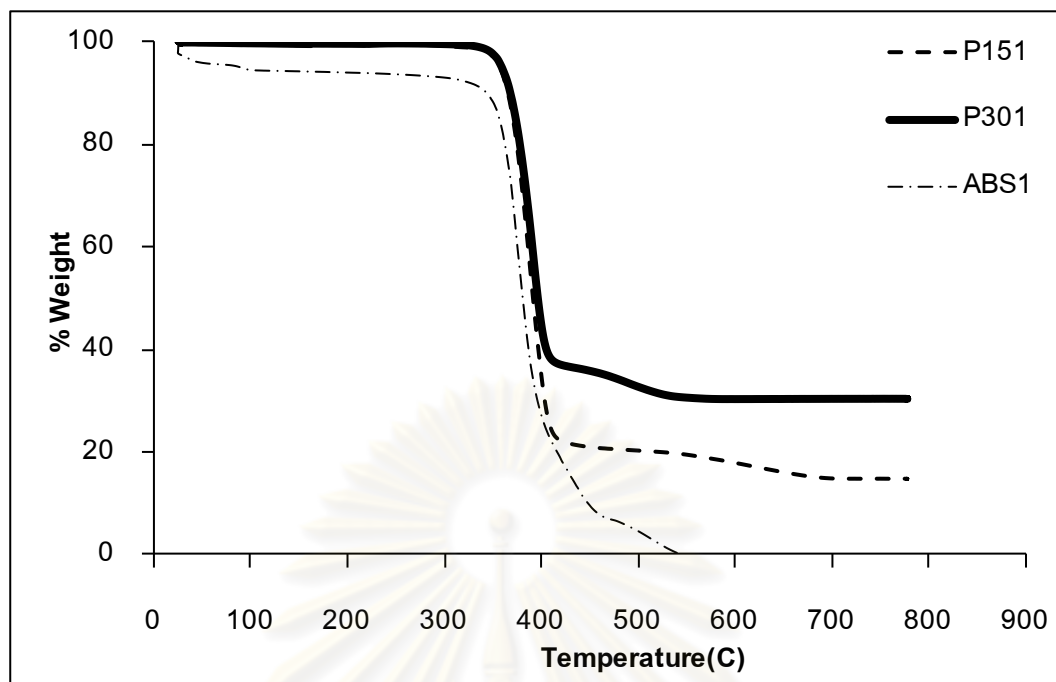
การดำเนินงานวิจัยนี้ได้ถูกกำหนดให้เป็นไปตามขั้นตอนดังบทที่ 3 และในงานวิจัยนี้ได้กำหนดการทดสอบออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ ขั้นที่ 1 เป็นการศึกษาคุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน ขั้นที่ 2 เป็นการศึกษาคุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยแสงยูวี ขั้นที่ 3 เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกล และขั้นที่ 4 เป็นการศึกษาคุณสมบัติการหลุดลอกฟิล์มดังกล่าวมาแล้วเพื่อศึกษาคุณสมบัติการใช้งานของพลาสติกชีวภาพซึ่งประกอบด้วยวัสดุ P15 และ P30 เปรียบเทียบกับ วัสดุ ABS โดยในบทนี้จะเป็นการรายงานผลการทดสอบ, วิเคราะห์ข้อมูลและการเลือกวัสดุที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ผลิตเป็น ฟิน แอสซี คอนโซล พาเนลมากที่สุดซึ่งลำดับผลการทดสอบและการวิเคราะห์ต่าง ๆ มีดังนี้

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน
2. ผลการทดสอบคุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยแสงยูวี
3. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล
4. ผลการทดสอบคุณสมบัติการหลุดลอกฟิล์ม
5. ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ
6. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของวัสดุ
7. การเลือกวัสดุด้วยวิธีดัชนีถ่วงน้ำหนักของคุณสมบัติ (Weighted property indexes)

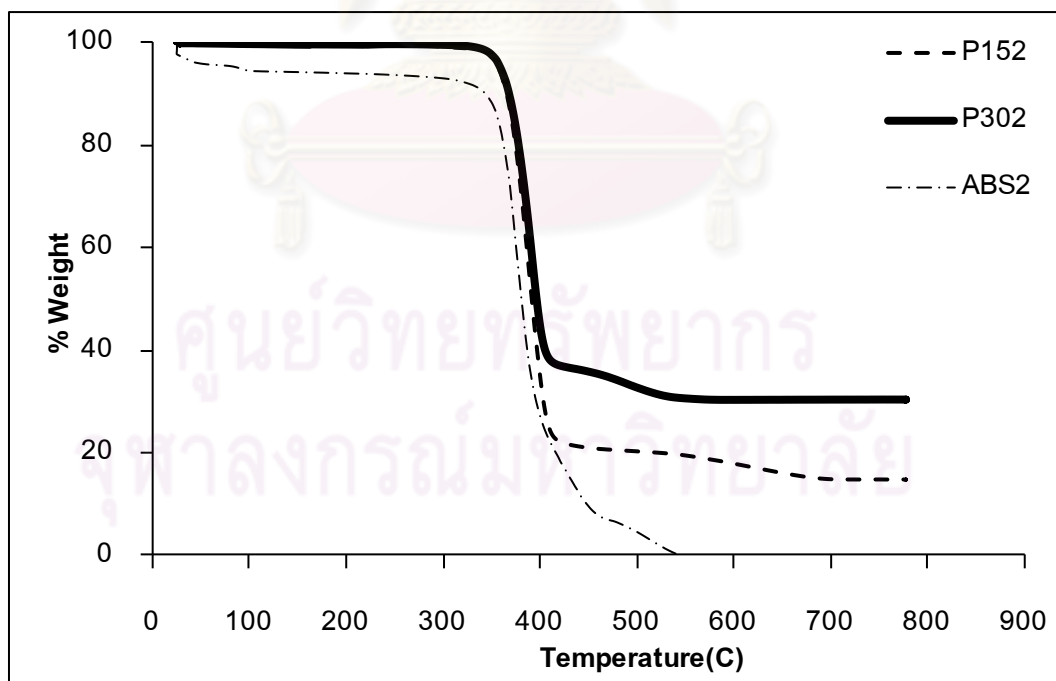
#### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของวัสดุกับอุณหภูมิโดยรูปที่ 4.1 นั้นเป็นวัสดุก่อนการเคลือบด้วยฟิล์มและรูปที่ 4.2 เป็นวัสดุหลังการเคลือบฟิล์มโดยจากรูปทั้ง 2 พบว่าพลาสติกทั้ง 3 ชนิดเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน น้ำหนักของชิ้นงานมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้มีค่ามากขึ้นโดยผลของการเสื่อมสภาพระหว่างวัสดุที่ทำการเคลือบฟิล์มและไม่เคลือบฟิล์มนั้นไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งการสลายตัวด้วยความร้อนเริ่มเกิดขึ้น (Initial decomposition temperature; IDT) ที่  $340^{\circ}\text{C}$  และน้ำหนักของวัสดุจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง  $410^{\circ}\text{C}$  สำหรับ P30 และ  $350^{\circ}\text{C} - 420^{\circ}\text{C}$  สำหรับ P15 ส่วน ABS นั้นจะอยู่ในช่วง  $350^{\circ}\text{C} - 460^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจากค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ABS นั้นมีความเสถียรมากที่สุดเมื่อเทียบกับพลาสติกชีวภาพที่ทำการศึกษา

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของวัสดุกับเวลาโดยรูปที่ 4.3 นั้นเป็นวัสดุก่อนการเคลือบด้วยฟิล์มและรูปที่ 4.4 เป็นวัสดุหลังการเคลือบฟิล์มโดยจากรูปทั้ง 2 พบว่าช่วงเวลาในการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนของ P30 จะใช้เวลา 40 นาที P15 และ ABS จะใช้เวลา 42 และ 45 นาที ตามลำดับโดยเวลาในการเสื่อมสภาพระหว่างวัสดุที่ทำการเคลือบฟิล์มและไม่เคลือบฟิล์มนั้นไม่มีความแตกต่างกัน

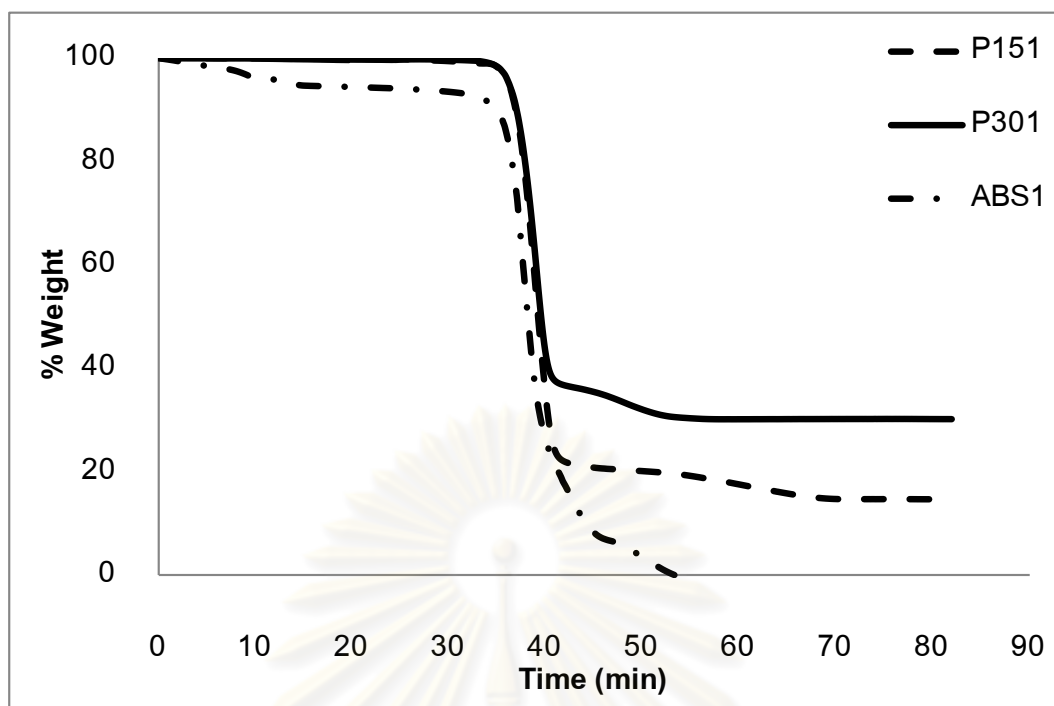


รูปที่ 4.1 อุณหภูมิและน้ำหนักสูญเสียบนวัสดุก่อนการเคลือบด้วยฟิล์มวิเคราะห์โดย TGA

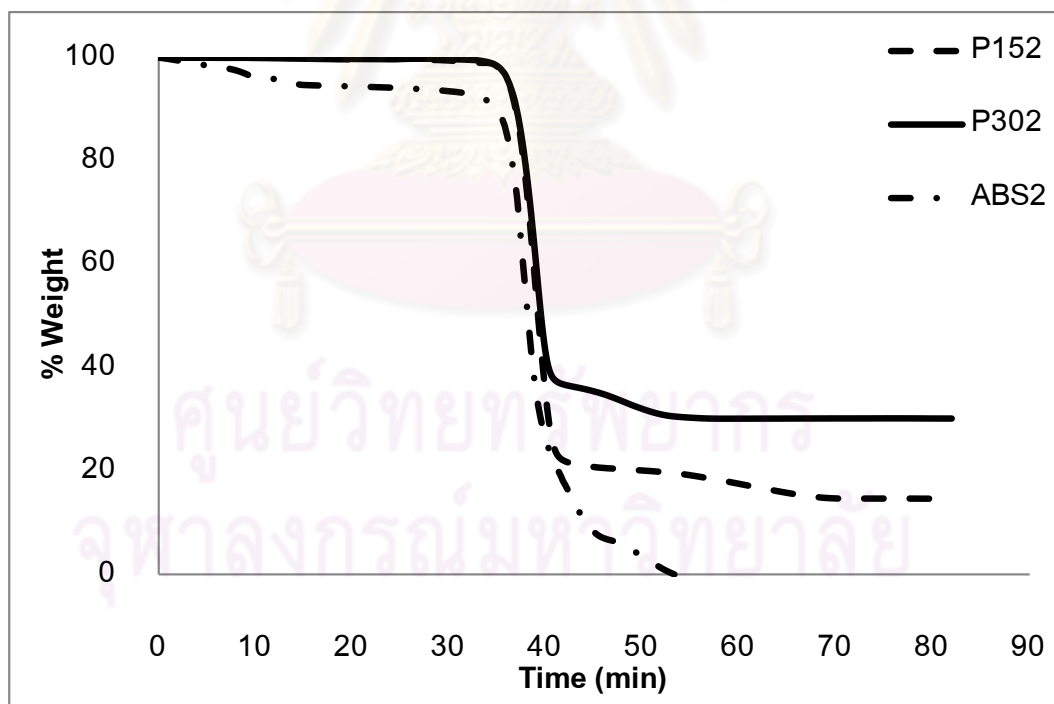


รูปที่ 4.2 อุณหภูมิและน้ำหนักสูญเสียบนวัสดุหลังการเคลือบด้วยฟิล์มวิเคราะห์โดย TGA





รูปที่ 4.3 เวลาและน้ำหนักสูญเสียนองวัสดุก่อนการเคลือบด้วยฟิล์มวิเคราะห์โดย TGA



รูปที่ 4.4 เวลาและน้ำหนักสูญเสียนองวัสดุหลังการเคลือบด้วยฟิล์มวิเคราะห์โดย TGA

## 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยแสงยูวี

การทดสอบนี้จะสังเกตการณ์เสื่อมของชิ้นงานโดยวิธีการดูสีและความมันวาวที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากนำชิ้นงานผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสงต่างๆ ซึ่งผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1 แสดงการเสื่อมสภาพของชิ้นงานหลังผ่านแสงยูวีที่เวลาต่างๆ พบว่าที่ความเข้มแสง  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  พลาสติกทั้ง 3 ชนิดยังสามารถคงเสถียรภาพอยู่ได้แต่เมื่อเพิ่มความเข้มแสงเป็น  $3.54 \text{ mW/cm}^2$  ชิ้นงานของ P15 เริ่มมีการเปลี่ยนสีเมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีและสำหรับ ABS นั้นชิ้นงานจะเสียรูปเมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 2.4 นาที นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มความเข้มแสงเป็น  $4.72 \text{ mW/cm}^2$  ชิ้นงานของ P30 จะมีการเปลี่ยนสีเมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที และ ABS จะมีการเสียรูปเร็วขึ้นเมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 1.6 นาที โดยผลของการเสื่อมสภาพระหว่างวัสดุที่ทำการเคลือบฟิล์มและไม่เคลือบฟิล์มนั้นไม่มีความแตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความมันวาวของชิ้นงานหลังจากผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสงและเวลาต่างๆ โดยพบว่าที่ความเข้มแสง  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความมันวาวของพลาสติกทั้ง 3 ชนิด แต่เมื่อเพิ่มความเข้มแสงเป็น  $3.54 \text{ mW/cm}^2$  ชิ้นงานของ P15 เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความมันวาวเมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีซึ่ง ณ ช่วงเวลาดังกล่าวชิ้นงานมีการเปลี่ยนสีด้วยและสำหรับ ABS นั้นความมันวาวของชิ้นงานจะเปลี่ยนเมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 0.8 นาที นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มความเข้มแสงเป็น  $4.72 \text{ mW/cm}^2$  ความมันวาวของชิ้นงาน P30 จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที

ตารางที่ 4.1 การเสื่อมสภาพของชิ้นงานหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสงและเวลาต่างๆ ( $\Delta E$ )

ความเข้มแสง (mW/cm <sup>2</sup> )	ชนิดของวัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	เวลา (นาที)						
2.36	0.8	0.67	0.45	0.39	0.49	0.70	0.74
	1.6	0.68	0.47	0.34	0.32	0.73	0.71
	2.4	0.48	0.55	0.42	0.40	0.76	0.75
	3.2	0.56	0.62	0.44	0.41	0.80	0.76
	6.4	0.66	0.63	0.46	0.47	0.79	0.88
3.54	0.8	0.76	0.69	0.43	0.45	0.86	0.82
	1.6	0.84	0.81	0.48	0.44	0.96	0.86
	2.4	0.88	0.76	0.59	0.55	X	X
	3.2	0.92	0.89	0.62	0.57	X	X
	6.4	1.53 <sup>•</sup>	1.47 <sup>•</sup>	0.69	0.64	X	X
4.72	0.8	0.73	0.76	0.62	0.67	0.99	0.96
	1.6	0.79	0.80	0.69	0.75	X	X
	2.4	0.84	0.73	0.66	0.82	X	X
	3.2	0.97	0.89	0.70	0.85	X	X
	6.4	1.49 <sup>•</sup>	1.58 <sup>•</sup>	1.28 <sup>•</sup>	1.21 <sup>•</sup>	X	X

หมายเหตุ      ยังคงเสถียรภาพคือ มีค่า  $\Delta E$  ต่ำกว่า 1 ( $\Delta E$  spec)

- คือ ชิ้นงานเปลี่ยนสี (สีเหลือง) X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความมันวาวของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสงและเวลาต่างๆ

ความเข้มแสง (mW /cm <sup>2</sup> )	ชนิดของวัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	เวลา (นาที)						
2.36	0.8	24.1	24.7	23.8	22.7	28.0	25.9
	1.6	26.3	22.9	24.0	23.3	29.5	28.6
	2.4	22.5	24.5	25.2	24.9	28.6	27.3
	3.2	26.3	25.2	23.8	24.2	27.4	26.8
	6.4	25.9	26.1	25.7	23.9	29.4	28.9
3.54	0.8	24.0	26.9	24.9	25.3	87.5 <sup>•</sup>	88.4 <sup>•</sup>
	1.6	25.5	27.6	24.6	25.1	90.4 <sup>•</sup>	92.1 <sup>•</sup>
	2.4	28.4	27.8	26.5	23.7	X	X
	3.2	29.5	28.8	25.2	24.9	X	X
	6.4	30.4 <sup>•</sup>	31.6 <sup>•</sup>	26.6	26.4	X	X
4.72	0.8	27.1	26.9	26.1	25.9	96.8 <sup>•</sup>	98.6 <sup>•</sup>
	1.6	27.9	28.4	26.3	27.7	X	X
	2.4	28.4	28.0	28.2	28.4	X	X
	3.2	29.8	29.3	29.7	28.8	X	X
	6.4	30.8 <sup>•</sup>	33.2 <sup>•</sup>	32.8 <sup>•</sup>	31.3 <sup>•</sup>	X	X

หมายเหตุ      ยังคงเสถียรภาพคือ มีความมันวาวอยู่ระหว่าง 22.5 – 30.0 (Gloss spec)

- คือ ความมันวาวเกินเกณฑ์ที่กำหนด X คือ ชีงงานเสียรูป

### 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่จะกล่าวต่อไปนี้ ประกอบด้วยคุณสมบัติ ภายใต้แรงดึงและความทนต่อแรงกระแทก การทดสอบแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นผล การทดสอบของวัสดุทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์ม สำหรับส่วนที่สองเป็นผลการ ทดสอบของวัสดุ หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มและเวลาต่างๆโดยที่คุณสมบัติภายใต้แรงดึงจะเพิ่ม การทดสอบในช่วงความเข้มแสง 2.36, 3.54 และ 4.72 mW /cm<sup>2</sup> ซึ่งผลการทดสอบคุณสมบัติเป็น ดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

##### 1. ความทนต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength; $\sigma_T$ )

1) ผลของการทดสอบวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มต่อ ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด

จากการทดสอบค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นทดสอบได้ผล ตามตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของชนิดวัสดุ พบว่าค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของ วัสดุชนิดเดียวกันมีความใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ย 105.22, 98, 150.2, 156, 66.87 และ 65 เม กะปาสคาล สำหรับ P151, P152, P301, P302, ABS1 และ ABS2 ตามลำดับ

2) ผลของการทดสอบวัสดุหลังผ่านแสงยูวีต่อความทนต่อแรงดึงสูงสุด

จากการทดสอบค่าความทนต่อแรงดึงของชิ้นทดสอบได้ผลตาม ตารางที่ 4.4 - 4.6 เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของความเข้มแสงยูวี พบว่าค่าความทนต่อแรงดึง สูงสุดของวัสดุชนิดเดียวกันมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความ ทนต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยแต่ละชนิดของวัสดุกับเวลาในแต่ความเข้มแสงยูวี แสดงตามรูปที่ 4.5 - 4.7 แสดงให้เห็นว่าค่าความทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้ม แสงเพิ่มขึ้นค่าความทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่จะมีค่าลดลงเมื่อชิ้นงานเริ่มเปลี่ยนสี ดังแสดงตามรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.3 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์ม

หน่วย : เมกะปาสคาล

ชนิดของวัสดุ การทดลอง	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
1	97.69	97.50	150.691	157.14	66.65	65.27
2	97.76	97.64	152.912	156.91	67.02	65.20
3	108.59	98.63	149.08	155.55	66.83	65.08
4	109.17	98.58	145.565	155.73	66.67	64.54
5	112.88	97.65	151.838	154.65	67.17	64.90
เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	105.22	98.00	150.02	156.00	66.87	65.00
STDEV ( $\sigma$ )	7.04	0.56	2.87	1.03	0.22	0.29

ศูนย์วิจัยการแพทย์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW/cm<sup>2</sup>

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	102.85	101.05	163.22	163.45	62.25	62.15
	2	103.33	102.07	162.22	163.46	62.56	62.5405
	3	101.66	108.46	162.36	162.36	62.24	62.0401
	4	103.91	102.01	162.30	163.10	62.64	62.6215
	5	105.66	106.50	163.16	163.06	62.68	62.5771
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	103.48	104.02	162.65	163.08	62.47	62.39
	STDEV ( $\sigma$ )	1.47	3.26	0.49	0.45	0.21	0.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW /cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
1.6	1	109.28	110.10	161.42	161.42	62.86	62.76
	2	102.56	112.56	165.06	165.36	62.16	63.56
	3	108.89	108.89	164.24	164.44	62.72	62.88
	4	97.52	99.52	163.90	163.51	63.21	64.21
	5	108.37	108.27	161.94	163.84	62.48	62.48
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	105.32	107.87	163.31	163.71	62.69	63.18
	STDEV ( $\sigma$ )	5.15	4.95	1.56	1.46	0.40	0.70



ตารางที่ 4.4 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW /cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	110.00	110.00	163.73	163.93	63.10	64.30
	2	108.63	107.86	163.80	163.60	62.53	63.53
	3	110.64	107.64	163.52	164.82	62.42	64.66
	4	107.75	107.63	163.56	163.89	63.17	63.64
	5	107.81	106.81	164.20	164.60	62.63	63.63
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	108.97	107.99	163.76	164.17	62.77	63.95
	STDEV ( $\sigma$ )	1.30	1.19	0.27	0.52	0.34	0.50

ตารางที่ 4.4 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW /cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ  การทดลอง	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
		3.2	1	109.25	109.05	164.23	164.20
	2	107.46	107.56	164.38	164.30	63.21	64.21
	3	110.23	109.39	165.18	164.58	63.60	63.64
	4	108.12	108.70	163.83	163.93	63.75	63.95
	5	110.28	110.34	164.77	164.66	63.24	64.24
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	109.07	109.01	164.48	164.33	63.51	63.98
	STDEV ( $\sigma$ )	1.26	1.01	0.52	0.30	0.27	0.25

ตารางที่ 4.4 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW /cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	111.55	108.05	164.52	164.52	63.30	63.10
	2	113.14	113.15	164.80	164.79	64.87	64.72
	3	108.54	108.25	165.56	163.56	64.60	64.10
	4	113.21	113.15	164.79	165.49	63.92	64.02
	5	108.55	108.55	163.79	165.19	63.10	64.10
	เฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	111.00	110.23	164.69	164.71	63.96	64.01
	STDEV ( $\sigma$ )	2.34	2.67	0.64	0.74	0.78	0.58

ตารางที่ 4.5 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง  $3.54 \text{ mW/cm}^2$

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	94.99	99.49	151.05	161.25	67.36	67.38
	2	103.25	110.14	152.26	161.26	67.19	67.99
	3	98.86	97.74	150.29	161.15	67.32	67.52
	4	103.32	103.04	150.06	161.06	66.76	66.76
	5	107.34	100.14	151.82	160.82	67.49	67.49
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	101.56	102.11	151.10	161.11	67.22	67.43
	STDEV ( $\sigma$ )	4.74	4.88	0.95	0.18	0.28	0.44

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้มแสง 3.54 mW /cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาท)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
1.6	1	109.37	103.55	162.10	165.65	67.20	67.60
	2	105.38	104.85	162.23	167.15	67.15	67.65
	3	97.72	104.72	161.46	163.95	67.36	67.46
	4	97.61	103.61	161.85	164.85	67.20	67.95
	5	107.49	107.19	161.75	164.95	67.60	67.60
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	103.51	104.78	161.88	165.31	67.30	67.65
	STDEV ( $\sigma$ )	5.52	1.47	0.30	1.19	0.18	0.18

ตารางที่ 4.5 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW /cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	106.78	106.78	161.55	164.95	X	X
	2	109.33	108.33	162.48	166.18	X	X
	3	97.82	100.82	162.29	164.25	X	X
	4	112.21	111.21	162.23	165.53	X	X
	5	97.56	97.86	161.66	166.56	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	104.74	105.00	162.04	165.49	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	6.72	5.51	0.41	0.93	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.5 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW /cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ  การทดลอง	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
		3.2	1	107.22	106.218	165.10	166.50
	2	97.53	99.4548	163.89	165.94	X	X
	3	97.72	104.448	164.26	164.56	X	X
	4	111.22	106.816	163.43	166.83	X	X
	5	111.33	108.132	163.33	167.23	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	105.00	105.01	164.00	166.21	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	6.94	3.38	0.72	1.04	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.5 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW /cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	112.34	109.13	164.57	167.63	X	X
	2	97.76	98.94	166.64	166.62	X	X
	3	110.34	110.12	165.93	165.74	X	X
	4	97.66	99.64	164.55	165.56	X	X
	5	109.34	107.34	166.73	166.83	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	105.49	105.04	165.68	166.48	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	7.18	5.34	1.07	0.85	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป



ตารางที่ 4.6 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW/cm<sup>2</sup>

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	97.88	99.68	159.88	160.18	66.50	66.90
	2	112.91	105.01	161.06	163.06	66.83	66.83
	3	73.90	98.75	161.57	162.57	66.47	66.77
	4	79.16	103.06	162.68	161.79	67.03	67.28
	5	97.65	98.55	164.36	162.36	66.75	66.66
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	92.30	101.01	161.91	161.99	66.72	66.89
	STDEV ( $\sigma$ )	15.78	2.88	1.70	1.11	0.23	0.24

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW /cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
1.6	1	101.75	102.79	163.01	163.05	X	X
	2	104.69	104.49	162.31	162.35	X	X
	3	99.87	107.17	163.06	163.16	X	X
	4	99.36	99.14	161.13	161.13	X	X
	5	98.65	97.60	160.60	160.50	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	100.86	102.24	162.02	162.04	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	2.43	3.90	1.11	1.18	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.6 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW /cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	97.67	99.77	163.12	162.52	X	X
	2	113.55	112.45	162.45	162.45	X	X
	3	98.81	105.81	162.71	162.61	X	X
	4	98.57	103.55	161.70	161.69	X	X
	5	97.77	97.87	162.46	161.63	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	101.27	103.89	162.49	162.18	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	6.88	5.71	0.52	0.48	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.6 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW /cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
3.2	1	108.68	108.48	164.10	164.13	X	X
	2	108.73	106.23	163.25	163.26	X	X
	3	109.60	99.70	162.59	162.79	X	X
	4	108.64	104.69	163.25	163.80	X	X
	5	104.75	103.65	163.82	163.86	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	108.08	104.55	163.40	163.57	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	1.90	3.26	0.58	0.54	X	X

หมายเหตุ

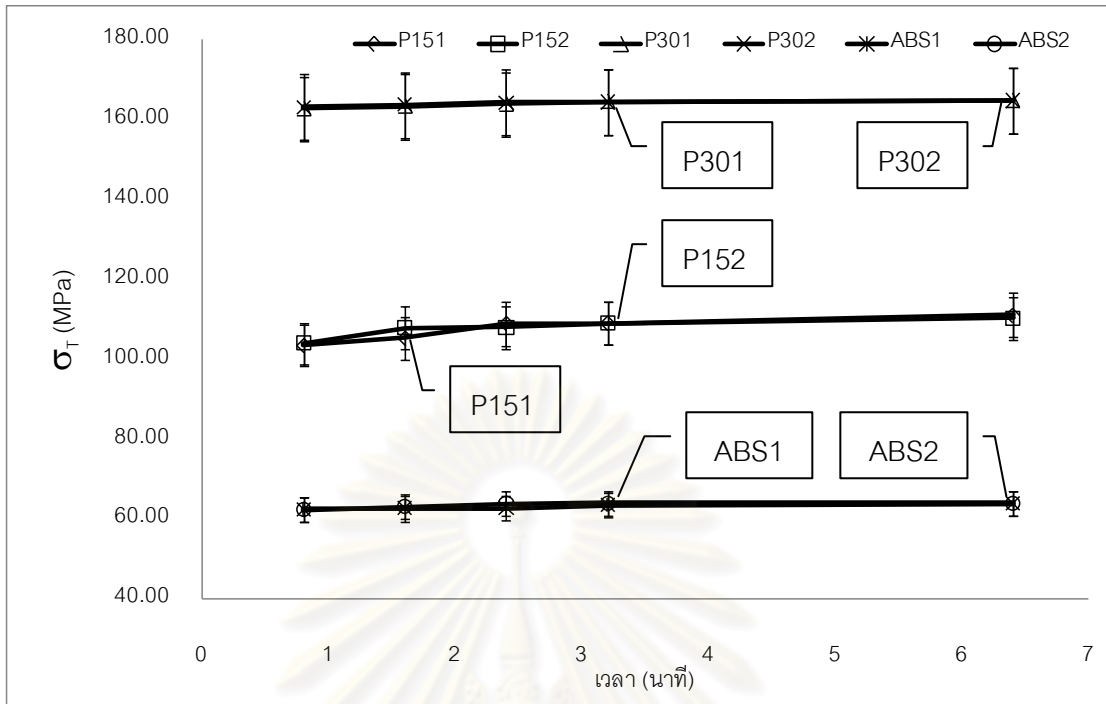
X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.6 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW /cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

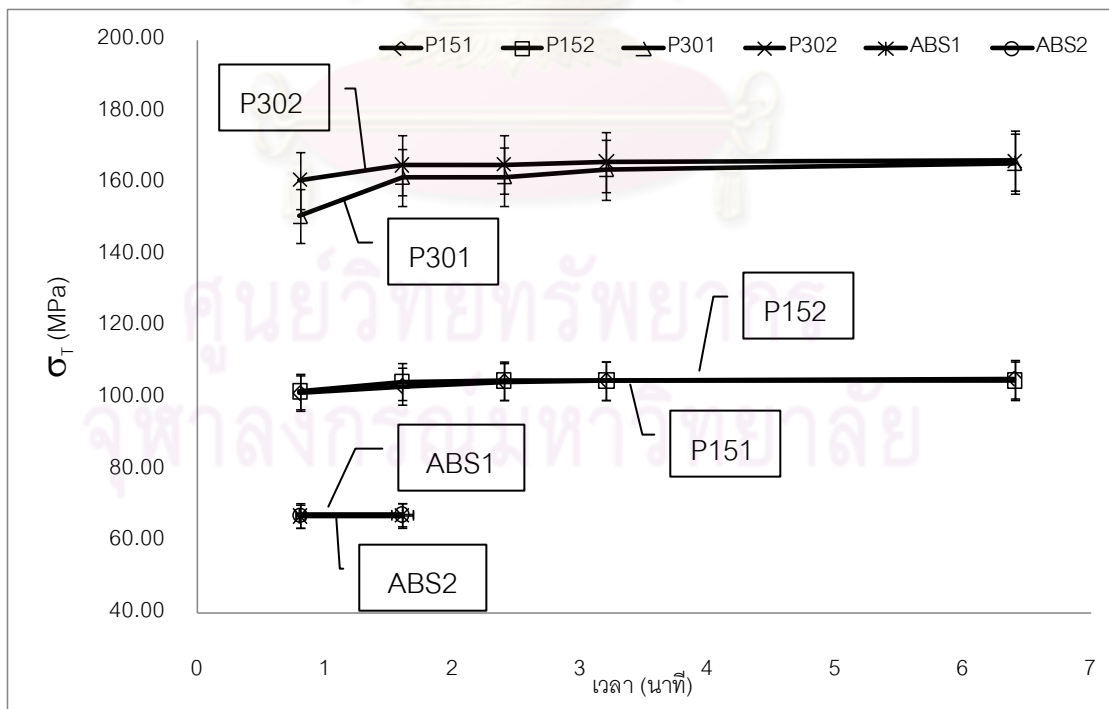
หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	108.44	107.65	163.36	162.66	X	X
	2	106.33	110.43	164.44	164.48	X	X
	3	100.90	100.85	164.20	163.36	X	X
	4	104.69	104.64	163.25	164.44	X	X
	5	104.65	103.65	162.59	165.15	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	105.00	105.44	163.57	164.02	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	2.77	3.70	0.75	0.99	X	X

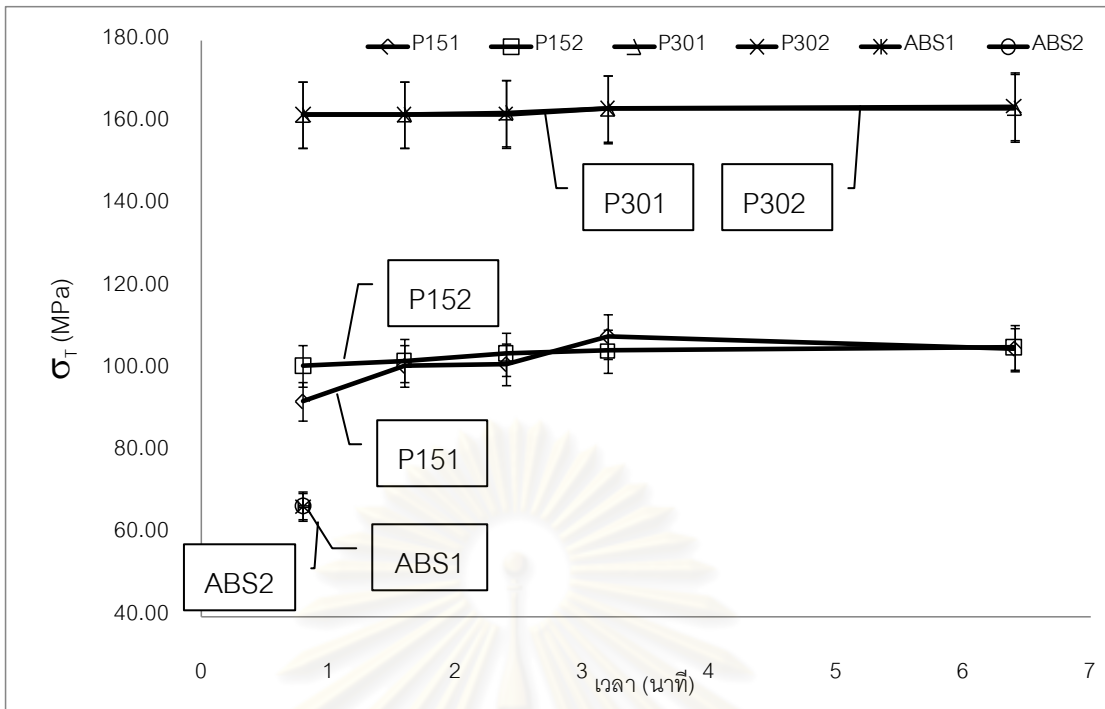
หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป



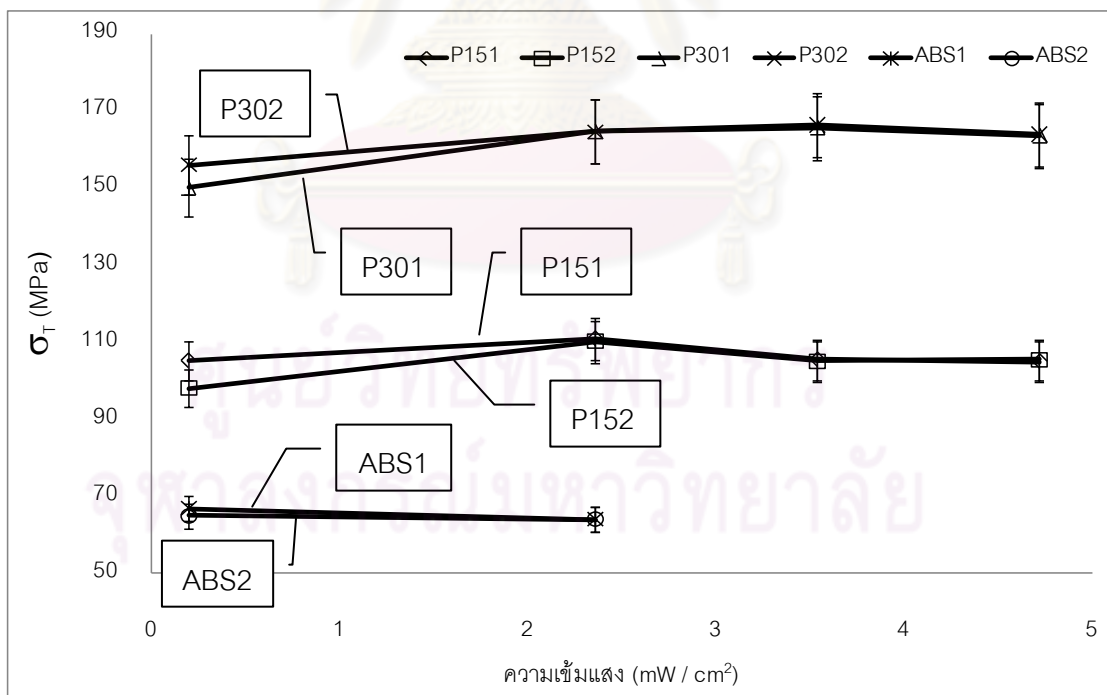
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 3.54 mW/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ  $4.72 \text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยกับความเข้มแสงต่างๆ เมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที

## 2. ค่าความเค้นจุดคราก (Yield Strength; $\sigma_y$ )

1) ผลของการทดสอบวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มต่อค่าความเค้นจุดคราก

จากการทดสอบค่าความเค้นจุดครากของชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของชนิดวัสดุ พบว่าค่าความเค้นจุดครากของวัสดุชนิดเดียวกันมีความใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ย 105.23, 100, 146.04, 145, 66.45 และ 63 เมกะปาสคาล สำหรับ P151, P152, P301, P302, ABS1 และ ABS2 ตามลำดับ

2) ผลของการทดสอบวัสดุหลังผ่านแสงยูวีต่อค่าความเค้นจุดคราก

จากการทดสอบค่าความเค้นจุดครากของชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.8 - 4.10 เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของความเข้มแสงยูวี พบว่าค่าความเค้นจุดครากของวัสดุชนิดเดียวกันมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ยแต่ละชนิดของวัสดุกับเวลาในแต่ความเข้มแสงยูวี แสดงตามรูปที่ 4.9 – 4.11 แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นจุดครากมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นค่าความเค้นจุดครากมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน ดังแสดงตามรูปที่ 4.12



ตารางที่ 4.7 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์ม

หน่วย : เมกะปาสคาล

ชนิดของวัสดุ การทดลอง	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
1	103.64	104.91	142.88	146.05	66.14	63.65
2	106.63	111.66	152.912	145.15	66.58	59.92
3	105.46	97.69	146.981	145.10	66.54	63.36
4	103.08	95.76	138.901	143.19	66.41	63.86
5	107.35	90.00	148.518	145.50	66.58	64.24
เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	105.23	100.00	146.04	145.00	66.45	63.00
STDEV ( $\sigma$ )	1.85	8.42	5.37	1.08	0.19	1.75

ตารางที่ 4.8 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง  $2.36 \text{ mW/cm}^2$

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	4.12	4.12	156.53	157.33	66.83	66.53
	2	5.24	5.14	155.79	157.69	66.94	66.54
	3	4.22	4.22	155.34	156.35	65.81	65.89
	4	5.18	5.08	156.98	157.16	66.76	66.67
	5	4.22	4.12	157.35	157.18	66.73	66.55
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	4.59	4.53	156.40	157.14	66.61	66.44
	STDEV ( $\sigma$ )	0.56	0.53	0.83	0.49	0.46	0.31

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ  การทดลอง	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
		1.6	1	4.04	4.64	153.93	153.93
	2	4.04	4.34	156.96	156.99	66.39	66.29
	3	4.12	4.22	156.62	156.62	66.67	67.61
	4	4.38	4.38	157.32	157.32	65.96	65.55
	5	4.18	4.38	157.15	157.15	66.39	66.41
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	4.15	4.39	156.39	156.40	66.37	66.40
	STDEV ( $\sigma$ )	0.14	0.15	1.40	1.41	0.26	0.76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  (ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	3.16	4.14	158.01	157.01	66.37	65.88
	2	4.04	4.24	155.33	155.93	66.42	66.89
	3	3.06	4.16	156.14	156.92	66.39	65.59
	4	4.02	4.22	155.30	155.30	66.35	66.69
	5	3.68	4.61	156.16	156.46	66.20	66.67
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.59	4.27	156.19	156.32	66.35	66.34
	STDEV ( $\sigma$ )	0.46	0.19	1.10	0.72	0.09	0.57

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
3.2	1	3.29	3.30	156.56	156.43	66.84	65.38
	2	2.83	2.83	155.90	155.75	65.61	65.61
	3	2.91	4.23	156.62	156.52	66.59	65.49
	4	3.16	3.45	156.16	156.26	66.52	65.55
	5	3.01	3.46	155.41	156.41	66.06	65.56
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.04	3.46	156.13	156.28	66.32	65.52
	STDEV ( $\sigma$ )	0.19	0.50	0.50	0.31	0.49	0.09

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	2.04	2.44	156.41	156.41	63.98	63.98
	2	2.11	2.43	156.37	155.87	64.81	63.61
	3	2.34	2.26	156.41	156.11	63.03	64.28
	4	2.31	2.15	155.67	157.17	64.88	64.25
	5	2.04	2.04	155.57	155.27	62.78	63.98
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.17	2.26	156.09	156.17	63.89	64.02
	STDEV ( $\sigma$ )	0.15	0.17	0.43	0.70	0.98	0.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW/cm<sup>2</sup>

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	3.45	3.65	156.52	156.92	66.35	66.20
	2	3.74	3.03	158.24	156.67	66.91	66.11
	3	3.13	3.65	157.25	157.59	66.32	66.32
	4	3.17	3.82	157.35	156.95	65.51	65.49
	5	2.93	2.03	158.15	156.75	66.65	66.25
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.28	3.23	157.50	156.98	66.35	66.07
	STDEV ( $\sigma$ )	0.32	0.74	0.71	0.36	0.53	0.34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
1.6	1	3.76	3.36	155.78	155.78	65.16	65.46
	2	2.69	3.59	157.05	157.22	66.25	66.25
	3	2.96	2.92	155.89	155.89	66.44	65.64
	4	2.75	2.85	158.78	156.78	65.84	65.93
	5	3.13	3.13	156.84	156.84	66.83	66.65
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.06	3.17	156.87	156.50	66.10	65.98
	STDEV ( $\sigma$ )	0.43	0.31	1.21	0.63	0.64	0.48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.9 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	1.72	1.72	156.71	157.51	X	X
	2	1.96	1.36	155.55	157.15	X	X
	3	1.70	1.70	157.15	157.15	X	X
	4	1.57	1.65	157.15	155.35	X	X
	5	1.96	1.84	155.25	155.25	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	1.78	1.65	156.36	156.48	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.17	0.18	0.90	1.09	X	X

หมายเหตุ

X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.9 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
3.2	1	0.95	0.76	155.68	155.34	X	X
	2	0.96	0.96	155.90	155.20	X	X
	3	0.70	0.72	157.76	154.56	X	X
	4	1.09	0.90	155.84	154.84	X	X
	5	0.94	0.84	156.60	156.20	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	0.93	0.84	156.36	155.23	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.14	0.10	0.86	0.62	X	X

หมายเหตุ

X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.9 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	0.35	0.33	153.92	153.57	X	X
	2	0.42	0.31	153.74	155.13	X	X
	3	0.25	0.43	154.24	154.10	X	X
	4	0.30	0.35	154.85	154.56	X	X
	5	0.40	0.33	154.84	154.84	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	0.34	0.35	154.32	154.44	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.07	0.05	0.51	0.62	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.10 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW/cm<sup>2</sup>

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	4.10	2.95	157.55	154.45	65.60	64.60
	2	3.18	2.78	155.97	154.30	65.98	63.98
	3	2.75	2.95	157.32	154.16	65.44	64.15
	4	3.92	4.22	156.67	153.89	66.31	63.76
	5	2.92	2.97	157.22	154.25	66.10	65.10
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.38	3.17	156.94	154.21	65.89	64.32
	STDEV ( $\sigma$ )	0.60	0.59	0.63	0.21	0.36	0.53

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
1.6	1	2.50	2.80	154.61	154.76	X	X
	2	2.61	2.91	156.54	153.74	X	X
	3	2.72	2.72	155.56	153.76	X	X
	4	2.68	2.85	157.58	153.00	X	X
	5	2.81	2.81	159.37	154.37	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.66	2.82	156.73	153.92	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.12	0.07	1.84	0.67	X	X

หมายเหตุ

X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.10 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	2.02	1.85	156.43	152.93	X	X
	2	2.12	1.66	157.01	154.05	X	X
	3	2.01	1.76	155.56	154.16	X	X
	4	2.01	1.81	156.76	152.86	X	X
	5	2.01	1.86	155.57	152.41	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.03	1.79	156.27	153.28	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.05	0.08	0.67	0.78	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.10 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
3.2	1	0.53	1.43	154.62	152.25	X	X
	2	0.50	1.40	153.69	152.59	X	X
	3	0.55	1.38	155.18	153.18	X	X
	4	0.46	1.46	154.06	153.07	X	X
	5	0.51	1.51	155.71	152.76	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	0.51	1.44	154.65	152.77	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.03	0.05	0.82	0.37	X	X

หมายเหตุ

X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.10 ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

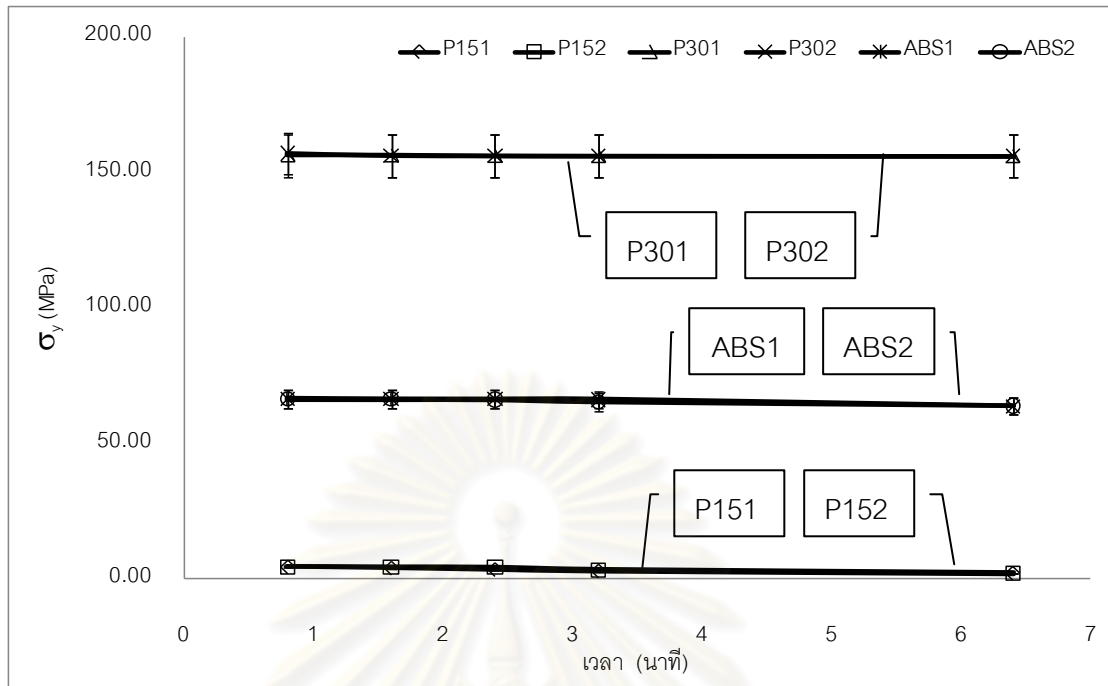
หน่วย : เมกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	0.33	0.42	151.19	151.19	X	X
	2	0.35	0.35	153.40	153.30	X	X
	3	0.35	0.33	154.22	151.46	X	X
	4	0.36	0.36	153.49	153.35	X	X
	5	0.32	0.41	154.18	153.22	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	0.34	0.38	153.30	152.51	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.02	0.04	1.24	1.08	X	X

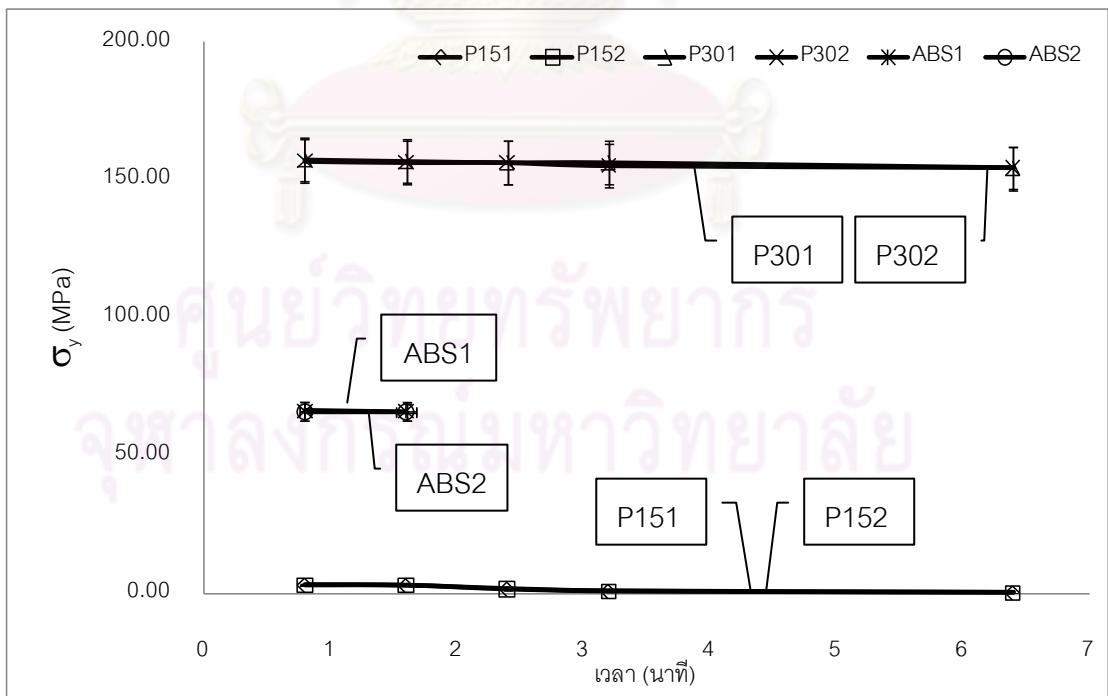
หมายเหตุ

X คือ ชิ้นงานเสียรูป

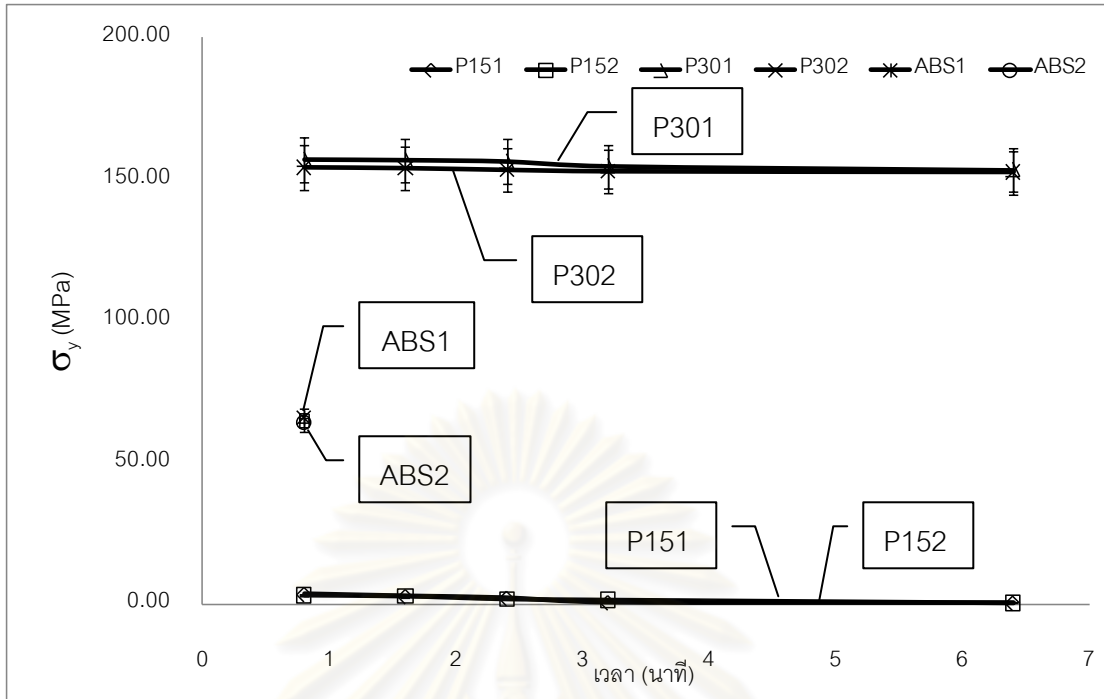




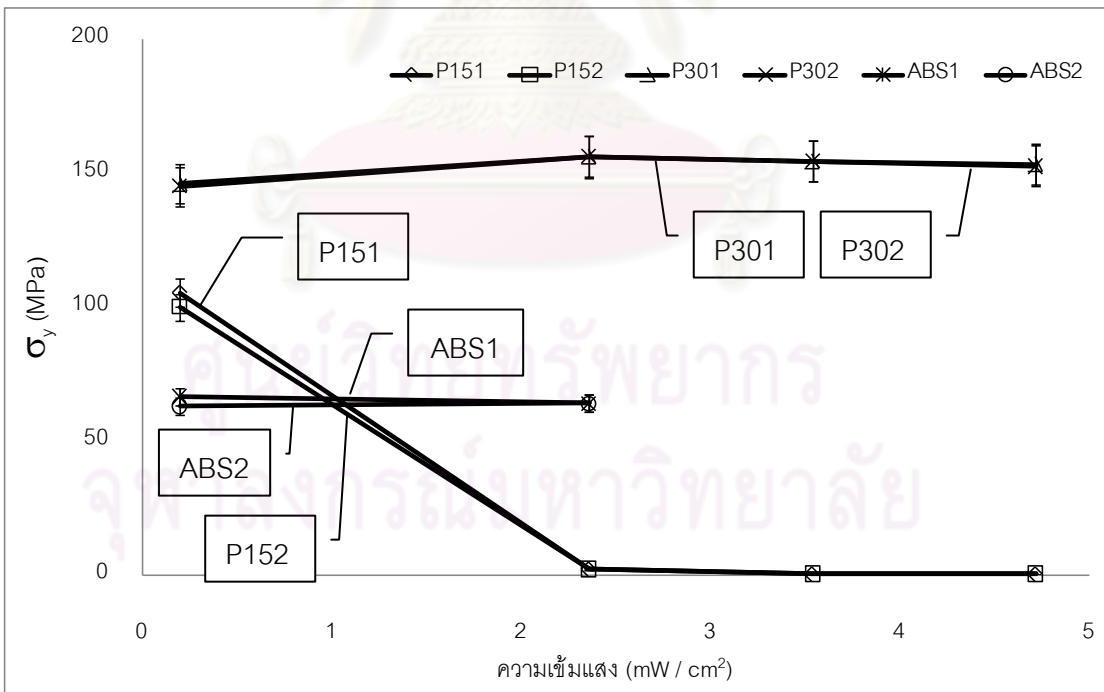
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 2.36 mW /cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 3.54 mW /cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ 4.72 mW /cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ยกับความเข้มแสงต่างๆ เมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที

### 3. ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity; E)

1) ผลของการทดสอบวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มต่อ  
ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น

จากการทดสอบค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของชิ้นทดสอบได้ผล  
ตามตารางที่ 4.11 เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของชนิดวัสดุ พบว่าค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของ  
วัสดุชนิดเดียวกันมีความใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ย 2.2, 2, 3.8, 3, 2.9 และ 2 กิกะปาสคาล  
สำหรับ P151, P152, P301, P302, ABS1 และ ABS2 ตามลำดับ

2) ผลของการทดสอบวัสดุหลังผ่านแสงยูวีต่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น

จากการทดสอบค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของชิ้นทดสอบได้ผล  
ตามตารางที่ 4.12 - 4.14 เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของความเข้มแสงยูวี พบว่าค่าโมดูลัสของ  
ความยืดหยุ่นของวัสดุชนิดเดียวกันมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  
ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยแต่ละชนิดของวัสดุกับเวลาในแต่ความเข้มแสงยูวี แสดงตามรูปที่  
4.13 - 4.15 แสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น  
และเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่เมื่อขึ้นงาน  
เกิดการเสื่อมสภาพจะทำให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงตามรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.11 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์ม

หน่วย : กิกะปาสคาล

ชนิดของวัสดุ การทดลอง	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
1	2.40	2.00	2.82	2.98	2.31	2.01
2	2.38	2.00	3.59	3.00	2.29	2.02
3	2.30	2.00	3.12	3.01	2.28	1.99
4	1.88	1.99	2.73	3.00	2.31	2.00
5	2.04	2.00	3.14	3.01	2.26	2.00
เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.20	2.00	3.08	3.00	2.29	2.00
STDEV ( $\sigma$ )	0.23	0.00	0.34	0.01	0.02	0.01

ตารางที่ 4.12 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW/cm<sup>2</sup>

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	2.25	2.09	3.42	3.42	2.12	2.12
	2	2.24	2.12	3.33	3.43	2.10	2.13
	3	2.26	2.18	3.44	3.44	2.12	2.13
	4	2.26	2.16	3.32	3.41	2.11	2.14
	5	2.27	2.18	3.41	3.43	2.10	2.13
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.26	2.15	3.39	3.42	2.11	2.13
	STDEV ( $\sigma$ )	0.01	0.04	0.06	0.01	0.01	0.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้มแสง 2.36 mW/cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
1.6	1	2.26	2.28	3.40	3.42	2.11	2.14
	2	2.28	2.28	3.41	3.54	2.11	2.19
	3	2.27	2.30	3.41	3.56	2.12	2.19
	4	2.26	2.29	3.57	3.59	2.12	2.18
	5	2.24	2.29	3.57	3.57	2.13	2.15
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.26	2.29	3.47	3.54	2.12	2.17
	STDEV ( $\sigma$ )	0.01	0.01	0.09	0.07	0.01	0.02

ตารางที่ 4.12 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้มแสง  $2.36 \text{ mW/cm}^2$   
(ต่อ)

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	2.29	2.49	3.88	3.91	2.13	2.13
	2	2.29	2.48	3.88	3.90	2.13	2.32
	3	2.27	2.47	3.89	3.91	2.12	2.13
	4	2.29	2.45	3.89	3.82	2.14	2.22
	5	2.29	2.50	3.89	3.90	2.12	2.22
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.29	2.48	3.89	3.89	2.13	2.20
	STDEV ( $\sigma$ )	0.01	0.02	0.01	0.04	0.01	0.08

ตารางที่ 4.12 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้มแสง 2.36 mW/cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
3.2	1	2.36	2.52	3.98	3.88	2.13	2.23
	2	2.31	2.51	3.99	3.87	2.16	2.24
	3	2.35	2.51	3.89	3.94	2.14	2.22
	4	2.34	2.51	3.89	3.87	2.15	2.21
	5	2.31	2.51	3.94	3.94	2.16	2.20
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.33	2.51	3.94	3.90	2.15	2.22
	STDEV ( $\sigma$ )	0.02	0.00	0.05	0.04	0.01	0.02



ตารางที่ 4.12 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้มแสง 2.36 mW/cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	2.40	2.56	3.99	3.89	2.18	2.29
	2	2.42	2.55	3.98	4.00	2.20	2.26
	3	2.40	2.55	3.89	3.89	2.20	2.25
	4	2.42	2.54	3.95	3.90	2.18	2.36
	5	2.40	2.53	3.96	3.91	2.20	2.28
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.41	2.55	3.95	3.92	2.19	2.29
	STDEV ( $\sigma$ )	0.01	0.01	0.04	0.05	0.01	0.04

ตารางที่ 4.13 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW/cm<sup>2</sup>

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	2.24	2.21	3.58	3.55	2.11	2.16
	2	2.22	2.20	3.59	3.57	2.11	2.15
	3	2.32	2.35	3.58	3.64	2.09	2.14
	4	2.21	2.22	3.58	3.45	2.10	2.10
	5	2.20	2.20	3.59	3.49	2.12	2.16
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.24	2.24	3.59	3.54	2.10	2.14
	STDEV ( $\sigma$ )	0.05	0.06	0.01	0.07	0.01	0.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.13 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้มแสง 3.54 mW/cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
1.6	1	2.23	2.26	3.92	3.82	2.09	2.29
	2	2.23	2.28	3.94	3.83	2.10	2.23
	3	2.23	2.25	3.92	3.82	2.11	2.31
	4	2.34	2.34	3.82	3.82	2.12	2.21
	5	2.27	2.27	3.96	3.83	2.10	2.10
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.26	2.28	3.91	3.82	2.11	2.23
	STDEV ( $\sigma$ )	0.05	0.04	0.05	0.01	0.01	0.08

ตารางที่ 4.13 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้มแสง  $3.54 \text{ mW/cm}^2$   
(ต่อ)

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	2.27	2.34	3.91	3.91	X	X
	2	2.25	2.35	3.93	3.95	X	X
	3	2.28	2.37	3.92	3.94	X	X
	4	2.29	2.31	3.91	3.92	X	X
	5	2.30	2.30	3.93	3.85	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.28	2.33	3.92	3.91	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.02	0.03	0.01	0.04	X	X

หมายเหตุ

X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.13 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้มแสง 3.54 mW/cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
3.2	1	2.30	2.35	3.89	3.96	X	X
	2	2.27	2.37	3.90	3.88	X	X
	3	2.21	2.31	3.91	3.95	X	X
	4	2.33	2.33	3.96	3.97	X	X
	5	2.37	2.37	3.96	3.96	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.30	2.35	3.92	3.94	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.06	0.03	0.03	0.04	X	X

หมายเหตุ

X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.13 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้มแสง  $3.54 \text{ mW/cm}^2$   
(ต่อ)

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	2.30	2.41	4.01	4.01	X	X
	2	2.31	2.33	4.00	4.00	X	X
	3	2.31	2.41	4.00	3.96	X	X
	4	2.33	2.33	4.02	3.95	X	X
	5	2.29	2.31	3.97	3.94	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.31	2.36	4.00	3.97	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.01	0.05	0.02	0.03	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.14 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW/cm<sup>2</sup>

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาที่)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	2.16	2.26	3.90	3.87	2.10	2.23
	2	2.16	2.26	3.89	3.88	2.11	2.13
	3	2.26	2.26	3.87	3.87	2.09	2.21
	4	2.35	2.31	3.90	3.88	2.12	2.12
	5	2.34	2.32	3.90	3.85	2.09	2.29
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.25	2.28	3.89	3.87	2.10	2.20
	STDEV ( $\sigma$ )	0.09	0.03	0.01	0.01	0.01	0.07

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้มแสง  $4.72 \text{ mW/cm}^2$   
(ต่อ)

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
1.6	1	2.29	2.29	3.94	3.94	X	X
	2	2.24	2.34	3.90	3.91	X	X
	3	2.28	2.33	3.92	3.92	X	X
	4	2.29	2.29	3.87	3.88	X	X
	5	2.29	2.29	3.86	3.89	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.27	2.30	3.90	3.91	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.02	0.02	0.03	0.02	X	X

หมายเหตุ

X คือ ชิ้นงานเสียรูป



ตารางที่ 4.14 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้มแสง 4.72 mW/cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	2.20	2.40	3.89	3.96	X	X
	2	2.31	2.34	3.93	3.93	X	X
	3	2.30	2.30	3.88	3.91	X	X
	4	2.34	2.35	3.92	3.92	X	X
	5	2.23	2.33	3.93	3.96	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.27	2.34	3.91	3.94	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.06	0.04	0.02	0.02	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.14 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้มแสง 4.72 mW/cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
3.2	1	2.35	2.35	4.00	4.00	X	X
	2	2.17	2.37	3.95	3.97	X	X
	3	2.29	2.39	3.89	3.89	X	X
	4	2.35	2.35	3.94	3.95	X	X
	5	2.33	2.33	3.95	3.95	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.30	2.36	3.95	3.95	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.08	0.02	0.04	0.04	X	X

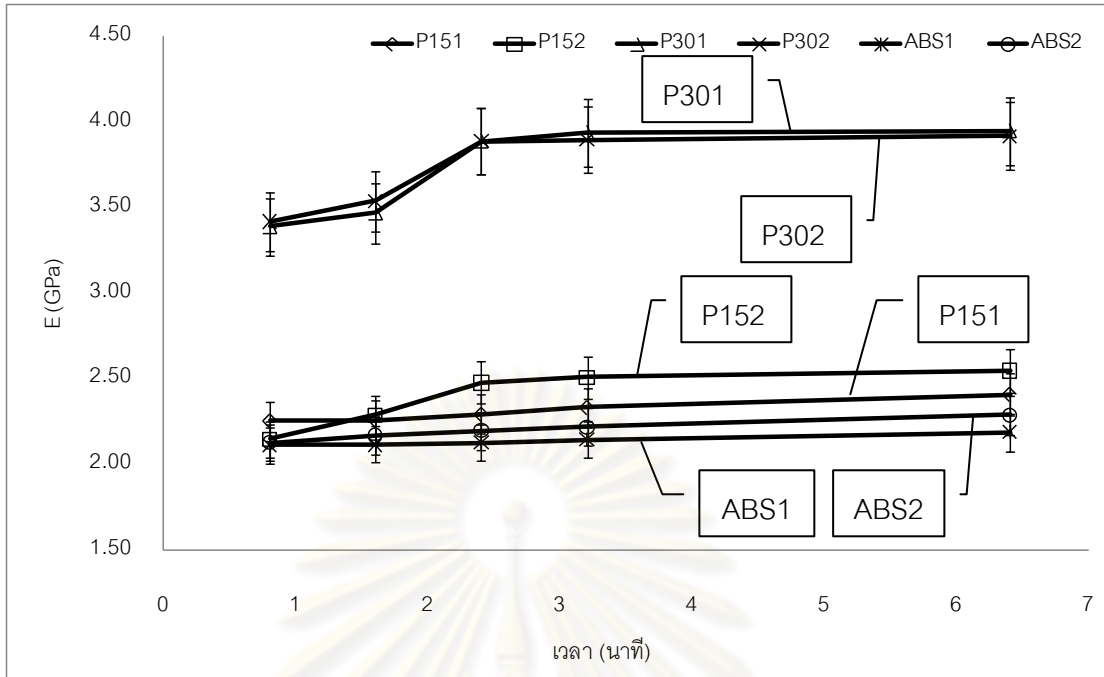
หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.14 ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้มแสง 4.72 mW/cm<sup>2</sup>  
(ต่อ)

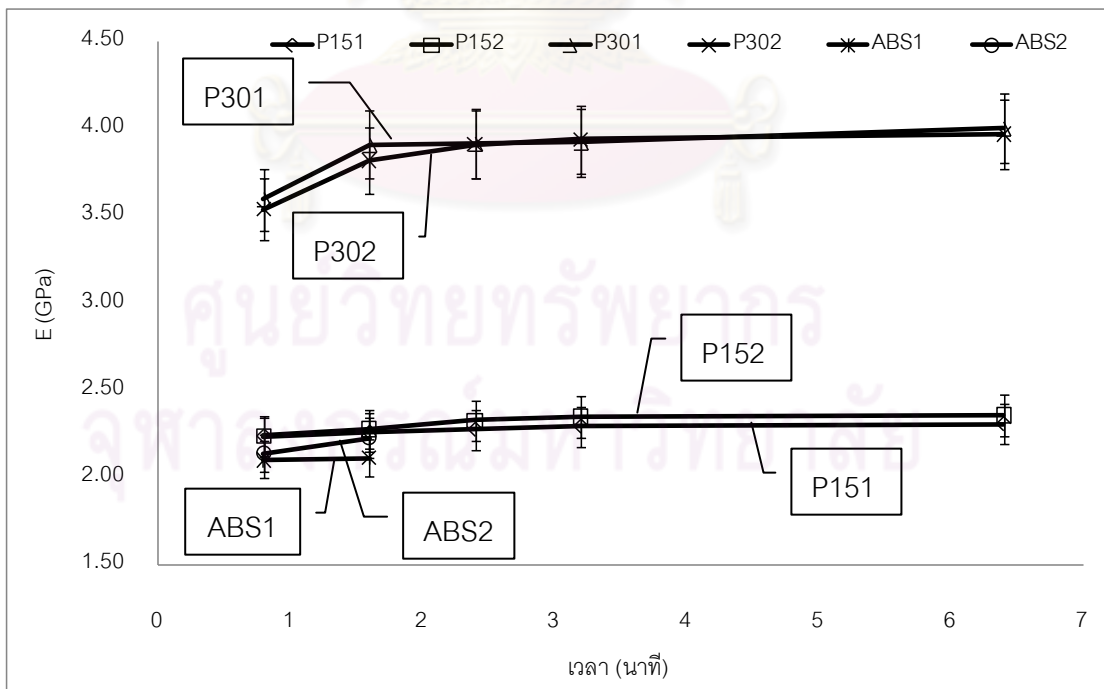
หน่วย : กิกะปาสคาล

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	2.35	2.39	4.32	4.49	X	X
	2	2.37	2.43	4.42	4.52	X	X
	3	2.35	2.36	4.55	4.38	X	X
	4	2.35	2.37	4.51	4.51	X	X
	5	2.33	2.39	4.42	4.55	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.35	2.39	4.45	4.49	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.01	0.03	0.09	0.07	X	X

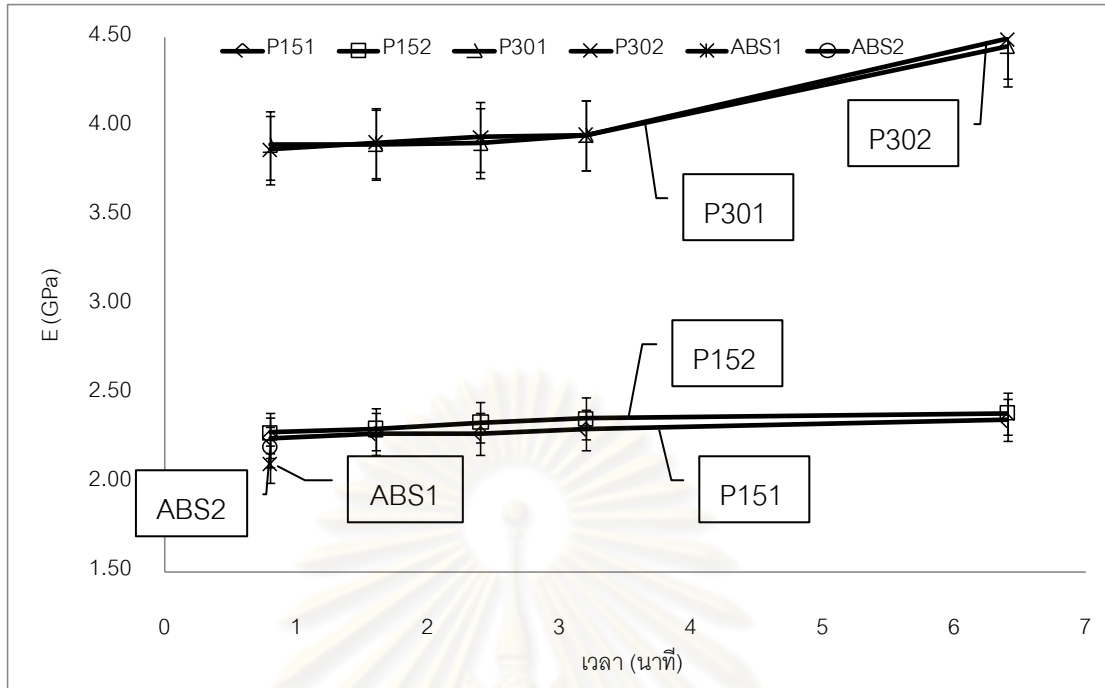
หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป



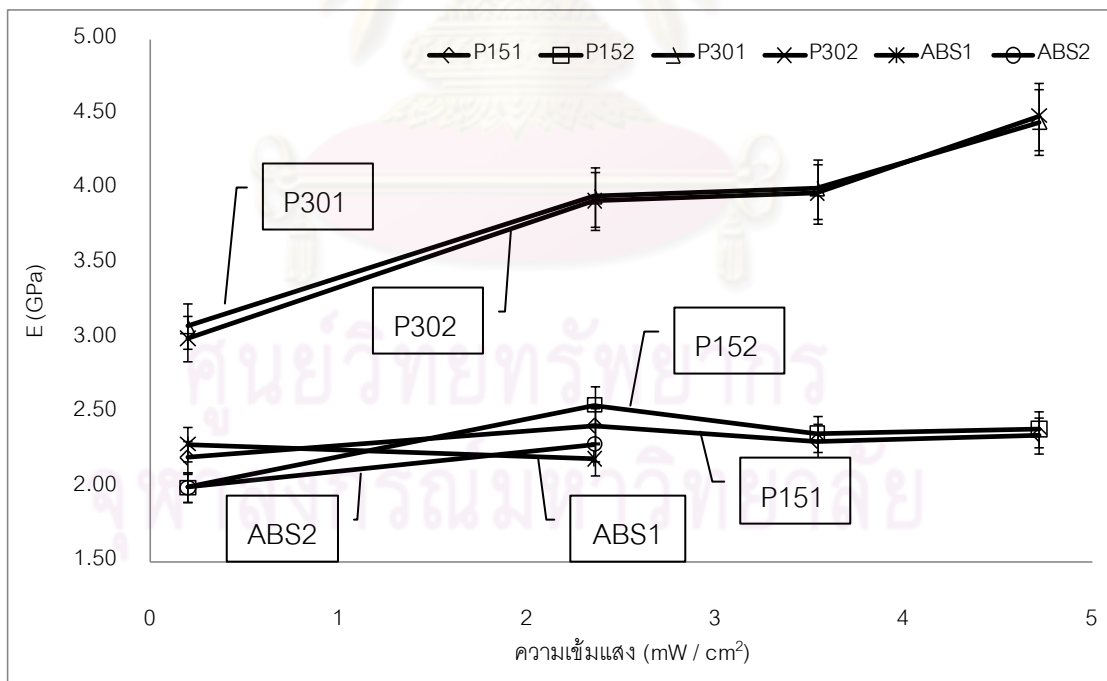
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ  $3.54 \text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ  $4.72 \text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยกับความเข้มแสงต่างๆ เมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที

#### 4. ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด (Elongation at Break; %EL)

1) ผลของการทดสอบวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด

จากการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด ของชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.15 เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของชนิดวัสดุ พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด ของวัสดุชนิดเดียวกันมีความใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ย 7.2, 7, 15.65, 15, 8.66 และ 8 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ P151, P152, P301, P303, ABS1 และ ABS2 ตามลำดับ

2) ผลของการทดสอบวัสดุหลังผ่านแสงยูวีต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด

จากการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด ของชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.16 - 4.18 เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของความเข้มแสงยูวี พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด ของวัสดุชนิดเดียวกันมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด เฉลี่ยแต่ละชนิดของวัสดุกับเวลาในแต่ความเข้มแสงยูวี แสดงตามรูปที่ 4.17 – 4.19 แสดงให้เห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่เมื่อชิ้นงานเกิดการเสื่อมสภาพจะทำให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงตามรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.15 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์ม

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

ชนิดของวัสดุ การทดลอง	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
1	7.26	7.12	27.0085	15.06	7.52	8.25
2	6.94	6.94	20.406	14.83	8.92	7.89
3	7.12	7.01	15.448	15.14	9.06	7.82
4	7.14	7.00	9.777	14.82	8.42	8.22
5	7.12	6.94	5.61875	15.15	9.39	7.82
เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	7.12	7.00	15.65	15.00	8.66	8.00
STDEV ( $\sigma$ )	0.11	0.07	8.47	0.16	0.73	0.22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง  $2.36 \text{ mW/cm}^2$

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	6.85	5.95	7.14	8.12	8.86	7.46
	2	6.38	5.88	8.22	8.12	7.95	7.98
	3	7.52	6.22	7.86	7.61	8.74	8.89
	4	7.22	5.72	8.30	7.10	8.79	8.69
	5	7.15	6.25	7.95	7.62	8.42	8.92
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	7.02	6.00	7.89	7.71	8.55	8.39
	STDEV ( $\sigma$ )	0.43	0.23	0.46	0.43	0.38	0.64



ตารางที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
1.6	1	7.11	6.11	7.91	7.85	8.82	8.62
	2	6.80	5.81	7.41	7.50	8.23	8.53
	3	6.04	5.94	7.01	7.63	8.55	7.60
	4	7.80	5.81	6.75	7.44	7.95	7.55
	5	6.53	5.52	7.76	7.97	8.78	8.88
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	6.86	5.84	7.37	7.68	8.47	8.24
	STDEV ( $\sigma$ )	0.66	0.22	0.49	0.23	0.37	0.62

ตารางที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	6.18	6.18	7.18	7.83	7.95	7.88
	2	7.64	5.64	7.12	7.22	8.12	8.42
	3	7.57	5.62	7.36	7.26	8.06	7.86
	4	5.22	5.02	7.23	7.03	9.29	8.29
	5	6.84	4.88	7.32	7.82	8.45	8.45
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	6.69	5.47	7.24	7.43	8.37	8.18
	STDEV ( $\sigma$ )	1.01	0.53	0.10	0.37	0.54	0.29

ตารางที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
3.2	1	6.16	5.40	7.32	7.22	8.22	8.02
	2	6.93	4.93	7.17	7.17	7.92	7.85
	3	6.84	5.62	6.87	7.70	8.39	8.09
	4	6.36	4.81	6.96	7.72	8.24	8.15
	5	6.18	5.81	7.59	7.25	7.95	8.10
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	6.50	5.32	7.18	7.41	8.14	8.04
	STDEV ( $\sigma$ )	0.37	0.43	0.29	0.27	0.20	0.12

ตารางที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	5.71	4.91	6.85	6.95	7.81	7.64
	2	6.38	5.29	7.19	7.14	8.12	8.19
	3	5.71	5.21	6.95	6.95	7.45	8.11
	4	6.18	5.28	7.01	7.11	8.82	8.17
	5	5.71	5.21	7.09	7.75	7.85	7.91
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	5.94	5.18	7.02	7.18	8.01	8.01
	STDEV ( $\sigma$ )	0.32	0.16	0.13	0.33	0.51	0.23

ตารางที่ 4.17 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง  $3.54 \text{ mW/cm}^2$

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	5.79	5.89	6.74	5.84	7.72	7.75
	2	5.50	5.97	6.46	6.66	9.80	8.71
	3	5.17	5.94	7.55	6.29	9.97	8.77
	4	5.40	5.70	6.96	6.83	8.08	8.38
	5	5.73	5.73	6.79	6.79	7.38	7.58
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	5.52	5.85	6.90	6.48	8.59	8.24
	STDEV ( $\sigma$ )	0.25	0.12	0.41	0.42	1.21	0.55

ตารางที่ 4.17 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
1.6	1	5.74	5.80	6.73	6.53	6.87	7.57
	2	5.78	5.38	7.05	6.05	7.41	7.46
	3	5.45	5.17	6.85	6.65	9.40	8.25
	4	4.92	4.92	6.86	6.44	7.21	7.76
	5	5.51	5.51	6.80	5.94	8.62	8.32
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	5.48	5.36	6.86	6.32	7.90	7.87
	STDEV ( $\sigma$ )	0.34	0.33	0.12	0.31	1.07	0.39

ตารางที่ 4.17 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	5.78	5.45	6.87	6.62	X	X
	2	5.51	5.71	7.50	6.45	X	X
	3	4.95	4.75	6.82	5.82	X	X
	4	5.47	5.34	6.98	5.68	X	X
	5	4.93	4.93	5.93	6.63	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	5.33	5.24	6.82	6.24	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.37	0.39	0.57	0.46	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.17 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
3.2	1	5.50	5.6965	6.50	6.40	X	X
	2	4.65	4.75675	6.79	6.69	X	X
	3	5.01	5.009	6.66	6.29	X	X
	4	6.17	5.23725	6.41	5.71	X	X
	5	5.31	4.90725	6.21	5.81	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	5.33	5.12	6.51	6.18	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.57	0.37	0.22	0.41	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป



ตารางที่ 4.17 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	5.36	5.04	6.06	6.05	X	X
	2	5.00	4.75	6.16	6.14	X	X
	3	5.04	5.32	6.31	6.16	X	X
	4	4.98	4.85	6.24	6.09	X	X
	5	5.13	5.05	5.76	5.71	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	5.10	5.00	6.11	6.03	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.16	0.22	0.21	0.18	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง  
4.72 mW /cm<sup>2</sup>

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	5.91	5.05	5.66	5.62	8.43	8.43
	2	6.02	5.80	5.81	5.71	9.20	8.20
	3	5.65	5.85	6.29	6.09	7.88	7.88
	4	5.42	4.82	5.77	5.76	8.55	8.55
	5	4.64	4.69	6.01	6.05	9.90	9.90
	เฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	5.53	5.24	5.91	5.85	8.79	8.59
	STDEV ( $\sigma$ )	0.55	0.55	0.25	0.21	0.78	0.77

ตารางที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
1.6	1	5.55	5.05	5.88	5.88	X	X
	2	5.37	5.37	5.81	5.81	X	X
	3	5.44	5.22	5.94	5.87	X	X
	4	5.24	5.14	5.65	5.65	X	X
	5	4.96	4.70	5.97	5.77	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	5.31	5.10	5.85	5.80	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.23	0.25	0.13	0.09	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	4.91	4.96	5.85	5.85	X	X
	2	6.03	5.23	5.82	5.62	X	X
	3	4.99	4.99	6.06	6.02	X	X
	4	4.89	4.89	5.47	5.47	X	X
	5	5.09	5.29	5.77	5.77	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	5.18	5.07	5.79	5.74	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.48	0.18	0.21	0.21	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาทีก)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
3.2	1	5.05	4.65	5.79	5.44	X	X
	2	5.08	5.08	5.83	5.73	X	X
	3	5.15	5.02	5.69	5.39	X	X
	4	5.15	5.27	5.76	5.46	X	X
	5	5.09	5.09	5.84	5.36	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	5.10	5.02	5.78	5.48	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.04	0.23	0.06	0.15	X	X

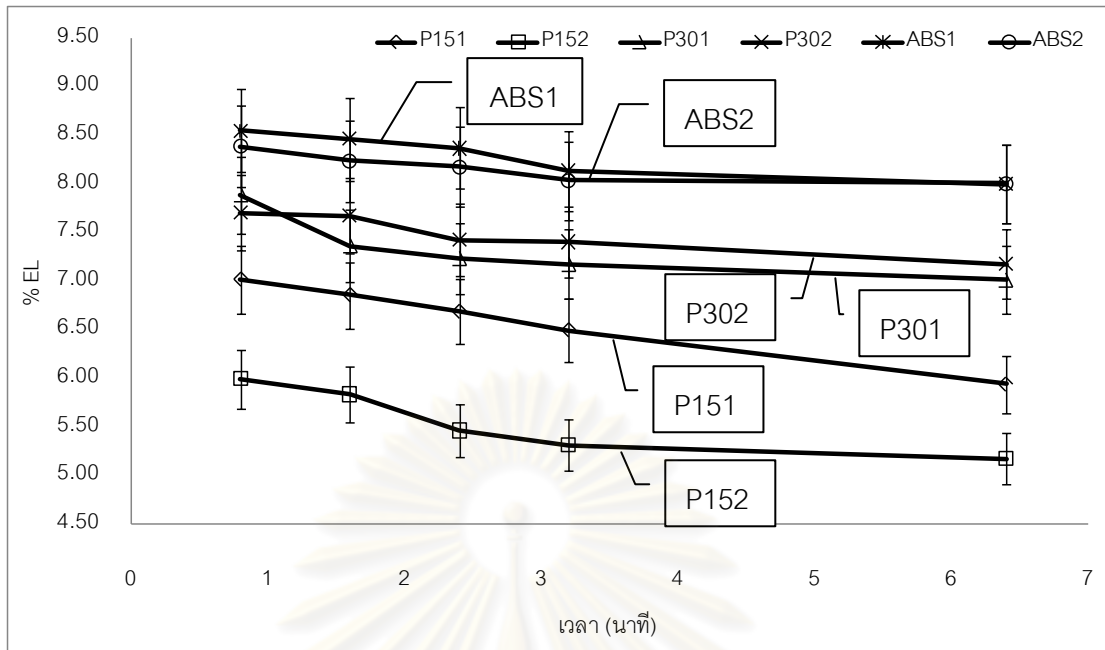
หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72 mW /cm<sup>2</sup> (ต่อ)

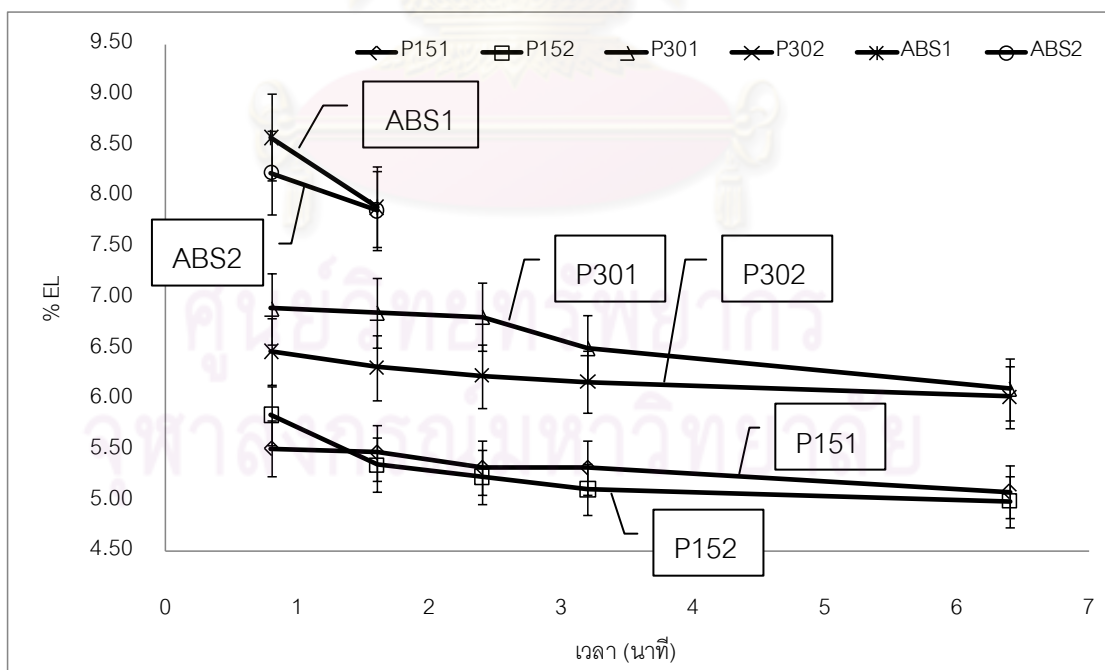
หน่วย : เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาท)	ชนิดของ วัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	4.85	4.71	5.76	5.46	X	X
	2	5.07	4.85	5.64	5.48	X	X
	3	5.02	5.02	5.79	5.66	X	X
	4	5.14	5.27	5.73	5.38	X	X
	5	5.09	5.09	5.69	5.79	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	5.03	4.99	5.72	5.55	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.11	0.22	0.06	0.17	X	X

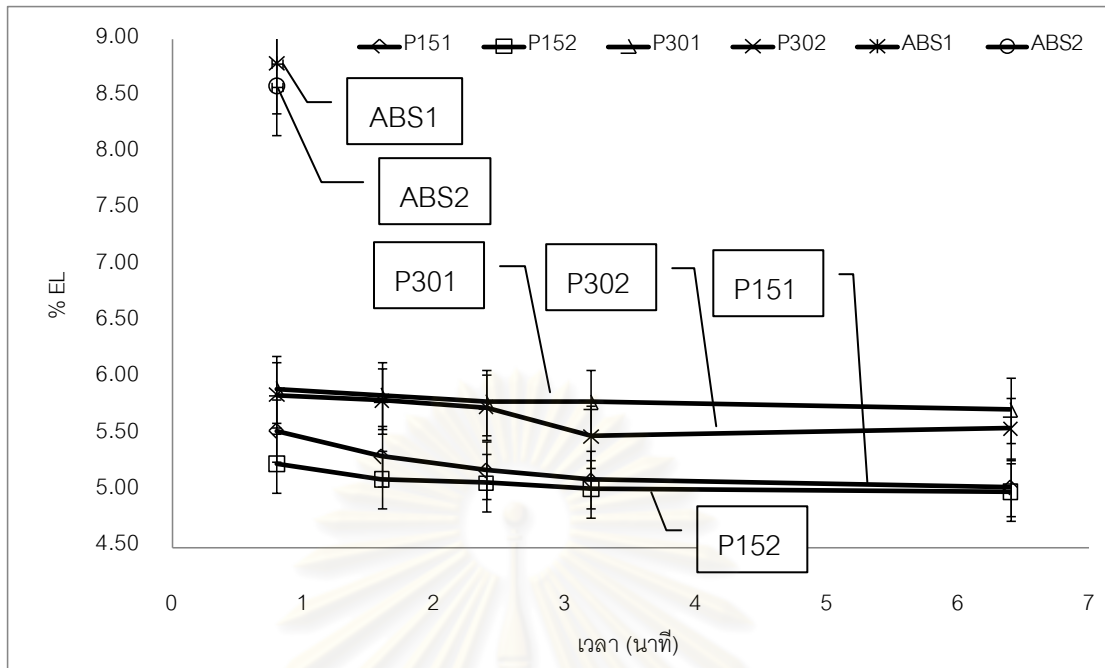
หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป



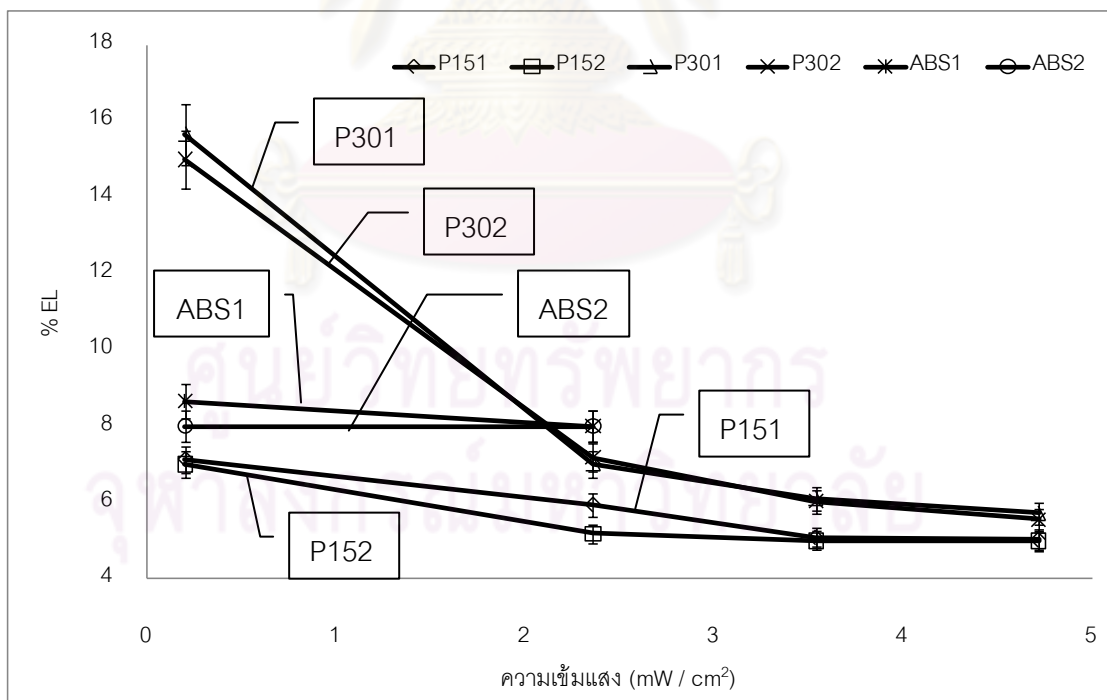
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด เฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด เฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ  $3.54 \text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด เฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ  $4.72 \text{ mW / cm}^2$



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด เฉลี่ยกับความเข้มแสงต่างๆ เมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที



#### 4.3.2 การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test)

1) ผลของการทดสอบวัสดุก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มต่อค่าความทนต่อแรงกระแทก

จากการทดสอบค่าความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.19 เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของชนิดวัสดุ พบว่าค่าความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุชนิดเดียวกันมีความใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ย 9.17, 8.91, 12.32, 11.40, 13.44 และ 12.32 กิโลจูลต่อตารางเมตรสำหรับ P151, P152, P301, P302, ABS1 และ ABS2 ตามลำดับ

2) ผลของการทดสอบวัสดุหลังผ่านแสงยูวีต่อความทนต่อแรงกระแทก

จากการทดสอบค่าความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.20 - 4.22 เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของความเข้มแสงยูวี พบว่าค่าความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุชนิดเดียวกันมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยแต่ละชนิดของวัสดุกับเวลาในแต่ความเข้มแสงยูวี แสดงตามรูปที่ 4.21 - 4.23 แสดงให้เห็นว่าค่าความทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นค่าความทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน ดังแสดงตามรูปที่ 4.24

ตารางที่ 4.19 ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกก่อนและหลังผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์ม

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

ชนิดของวัสดุ การทดลอง	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
1	9.26	8.76	10.75	10.92	13.55	12.39
2	9.29	8.61	14.37	12.51	13.22	12.47
3	9.02	9.47	13.65	10.12	13.43	12.51
4	9.5	8.67	11.03	11.50	12.93	11.82
5	8.79	9.02	11.81	11.94	14.06	12.39
เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	9.17	8.91	12.32	11.40	13.44	12.32
STDEV ( $\sigma$ )	0.27	0.35	1.61	0.92	0.42	0.28

ตารางที่ 4.20 ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36  
mW/cm<sup>2</sup>

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	3.54	3.88	5.39	5.46	6.60	7.41
	2	3.59	2.87	6.06	6.45	8.77	5.68
	3	4.23	2.23	4.44	3.57	5.78	5.35
	4	2.98	3.52	5.45	3.51	4.50	5.82
	5	2.91	3.88	4.16	6.42	6.09	6.02
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.39	3.27	5.15	5.08	6.18	6.05
	STDEV ( $\sigma$ )	0.54	0.72	0.78	1.46	1.56	0.80

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.20 ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36  
mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
1.6	1	3.84	3.80	8.19	3.85	6.83	6.08
	2	2.78	3.46	5.18	5.78	8.20	5.44
	3	2.76	3.13	5.16	4.18	6.23	5.91
	4	2.79	2.22	4.52	5.51	5.79	6.16
	5	3.88	3.55	3.53	5.78	4.18	5.82
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.29	3.23	5.12	5.02	6.11	5.88
	STDEV ( $\sigma$ )	0.59	0.61	1.74	0.93	1.47	0.28

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.20 ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36  
mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	3.50	3.55	7.61	6.38	5.29	5.83
	2	3.00	3.84	5.21	4.71	6.99	5.19
	3	2.84	2.92	4.94	3.75	6.14	5.80
	4	2.86	2.88	3.23	4.16	5.84	5.39
	5	3.55	2.56	3.23	5.49	5.82	5.49
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.21	3.15	4.82	4.89	5.94	5.54
	STDEV ( $\sigma$ )	0.35	0.53	1.80	1.05	0.62	0.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.20 ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36  
mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
3.2	1	3.82	3.24	6.03	5.82	6.86	6.79
	2	2.81	3.88	4.42	5.12	8.40	6.14
	3	2.86	2.87	2.91	4.15	4.52	4.20
	4	2.88	2.27	4.79	4.75	5.59	3.88
	5	2.76	2.91	5.48	4.52	3.92	5.82
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.07	3.03	4.76	4.87	5.72	5.36
	STDEV ( $\sigma$ )	0.45	0.59	1.19	0.64	1.81	1.26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.20 ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36  
mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	3.83	3.55	5.74	5.82	5.28	5.49
	2	2.94	3.14	5.95	4.52	6.06	5.82
	3	2.35	2.91	4.20	4.85	5.82	5.82
	4	2.91	2.59	3.86	4.85	5.51	4.51
	5	2.91	2.85	3.89	3.88	5.82	5.17
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.04	3.01	4.64	4.78	5.66	5.36
	STDEV ( $\sigma$ )	0.53	0.36	1.03	0.70	0.30	0.55

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.21 ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54  
mW/cm<sup>2</sup>

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ การทดลอง	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
		0.8	1	4.15	3.55	6.05	4.52
	2	2.80	2.91	5.73	4.85	6.05	5.82
	3	2.85	2.91	5.14	5.49	6.14	6.14
	4	2.39	3.23	4.20	5.49	5.82	6.14
	5	3.88	3.55	4.52	4.85	6.14	6.14
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.33	3.23	5.12	5.04	5.92	6.01
	STDEV ( $\sigma$ )	0.76	0.32	0.78	0.43	0.26	0.18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.21 ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54  
mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
1.6	1	3.84	3.23	5.70	4.85	6.83	5.49
	2	2.79	3.21	5.70	4.85	7.84	5.82
	3	2.43	2.91	5.61	4.85	7.13	5.82
	4	2.83	2.89	4.20	5.17	4.52	5.82
	5	3.17	3.23	4.20	4.85	4.52	5.49
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.08	3.09	4.99	4.91	5.99	5.69
	STDEV ( $\sigma$ )	0.53	0.18	0.81	0.14	1.55	0.18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.21 ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54  
mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ การทดลอง	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
		2.4	1	3.83	2.91	5.40	4.85
	2	3.35	3.23	4.83	4.52	X	X
	3	2.97	2.91	4.77	4.52	X	X
	4	2.86	2.91	4.20	4.85	X	X
	5	2.19	2.91	4.52	5.17	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.03	2.97	4.74	4.78	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.61	0.14	0.44	0.27	X	X

หมายเหตุ

X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.21 ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54  
mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ การทดลอง	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
		3.2	1	3.52	3.23	5.72	4.85
	2	2.96	2.91	4.17	4.49	X	X
	3	3.47	2.89	4.20	4.85	X	X
	4	2.91	2.88	4.81	4.21	X	X
	5	2.26	2.91	4.20	4.85	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.00	2.96	4.64	4.65	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.51	0.15	0.67	0.29	X	X

หมายเหตุ

X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.21 ความทนทานต่อแรงกระทำของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54  
mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	3.52	3.23	5.06	4.85	X	X
	2	2.40	2.91	3.89	4.49	X	X
	3	2.85	2.91	4.20	4.49	X	X
	4	2.91	2.59	4.50	4.49	X	X
	5	2.91	2.26	4.20	4.85	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.95	2.78	4.37	4.63	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.40	0.37	0.44	0.20	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.22 ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72  
mW/cm<sup>2</sup>

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
0.8	1	3.82	3.23	6.01	5.49	7.12	5.49
	2	3.24	2.91	5.20	4.82	6.01	6.14
	3	3.32	2.91	5.24	4.87	6.20	5.82
	4	2.41	3.23	4.50	4.52	5.17	6.14
	5	2.26	3.55	4.54	5.45	4.85	5.82
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	3.01	3.17	5.07	5.03	5.84	5.88
	STDEV ( $\sigma$ )	0.66	0.27	0.62	0.42	0.90	0.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.22 ความทนทานต่อแรงกระทำของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72  
mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ การทดลอง	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
		1	3.82	2.91	6.02	6.14	X
1.6	2	3.30	3.17	4.66	4.85	X	X
	3	2.81	3.24	4.76	4.52	X	X
	4	2.98	2.91	4.20	4.20	X	X
	5	1.91	2.91	4.20	4.20	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.94	3.03	4.76	4.78	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.70	0.16	0.75	0.81	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.22 ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72  
mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
2.4	1	3.53	2.91	6.03	4.85	X	X
	2	3.23	2.91	5.35	4.52	X	X
	3	2.97	2.91	4.21	4.85	X	X
	4	3.22	2.59	4.20	4.52	X	X
	5	1.62	2.59	3.88	4.52	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.85	2.78	4.72	4.65	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.75	0.18	0.91	0.18	X	X

หมายเหตุ X คือ ชิ้นงานเสียรูป

ตารางที่ 4.22 ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72  
mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
3.2	1	4.14	2.91	5.73	3.88	X	X
	2	2.88	2.91	4.59	4.85	X	X
	3	2.77	2.59	4.18	4.85	X	X
	4	1.94	2.59	4.17	4.52	X	X
	5	1.94	2.91	4.21	4.20	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.72	2.78	4.56	4.46	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.90	0.18	0.67	0.42	X	X

หมายเหตุ

X คือ ชิ้นงานเสียรูป



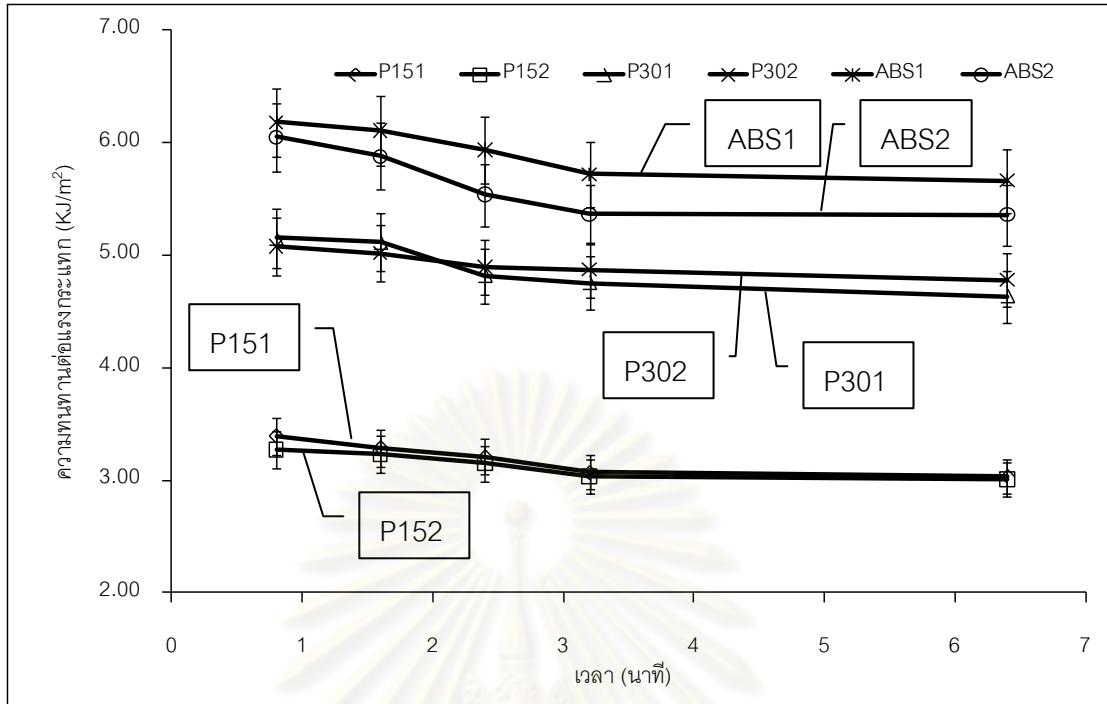
ตารางที่ 4.22 ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72  
mW/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

หน่วย : กิโลจูลต่อตารางเมตร

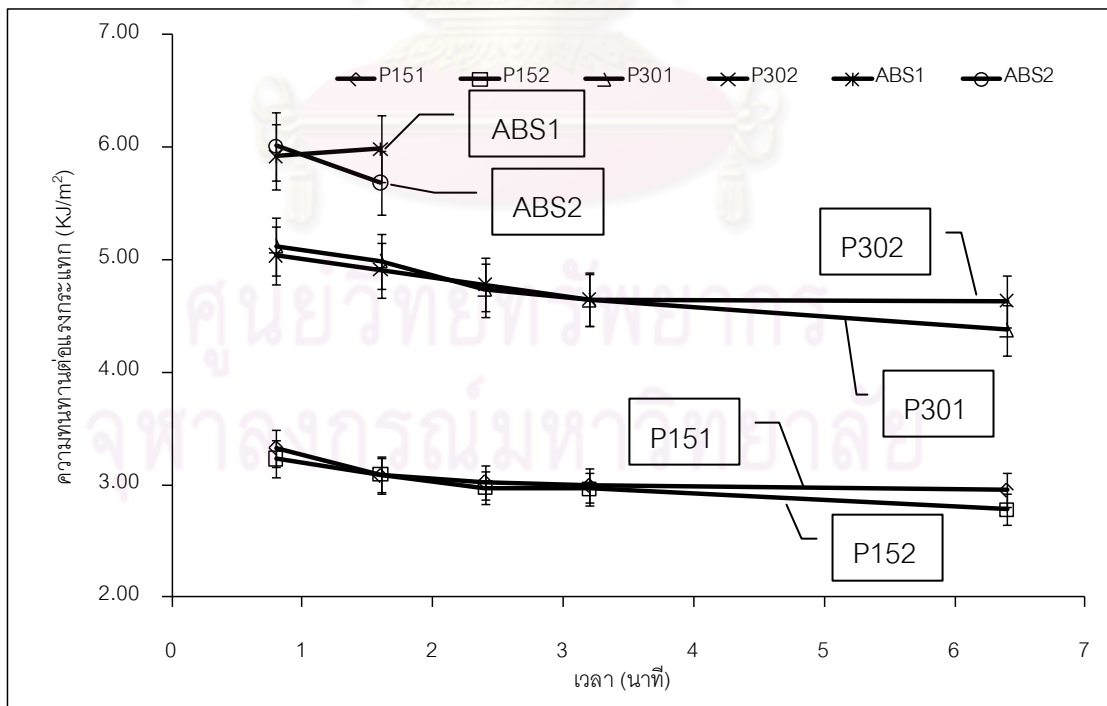
เวลา (นาที่)	ชนิดของวัสดุ	P151	P152	P301	P302	ABS1	ABS2
	การทดลอง						
6.4	1	3.52	2.91	5.73	4.85	X	X
	2	2.86	2.59	3.88	4.14	X	X
	3	2.96	2.26	4.16	4.48	X	X
	4	2.26	2.59	3.91	4.16	X	X
	5	2.26	2.91	3.55	4.17	X	X
	เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	2.75	2.65	4.25	4.36	X	X
	STDEV ( $\sigma$ )	0.53	0.27	0.86	0.31	X	X

หมายเหตุ

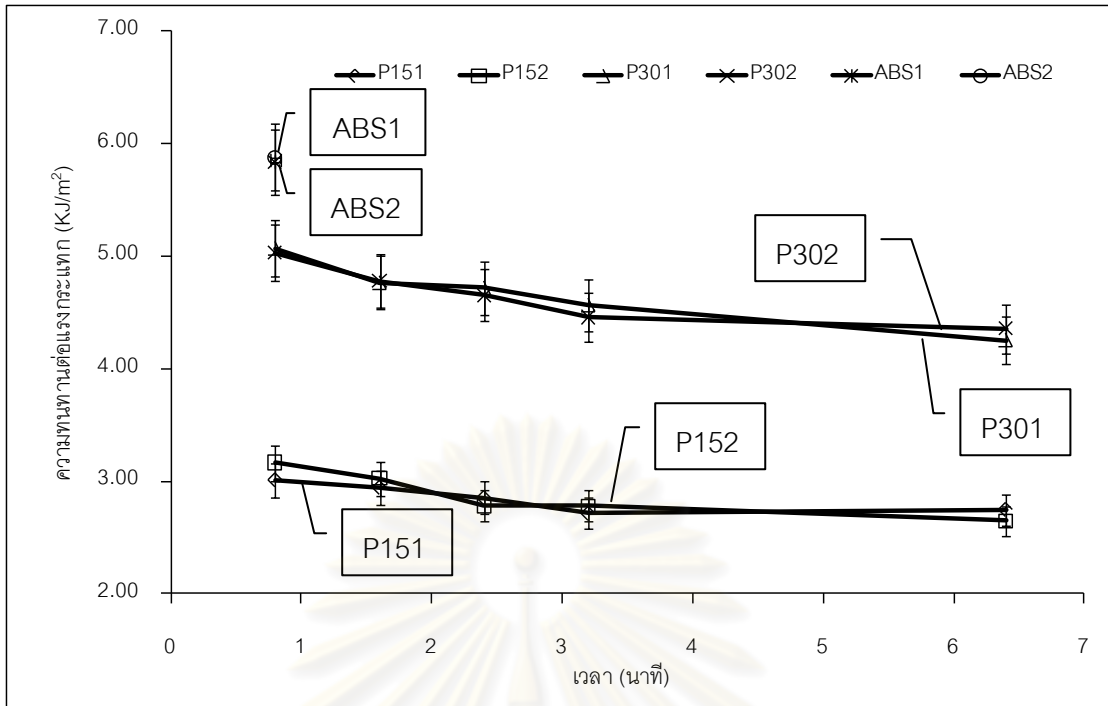
X คือ ชิ้นงานเสียรูป



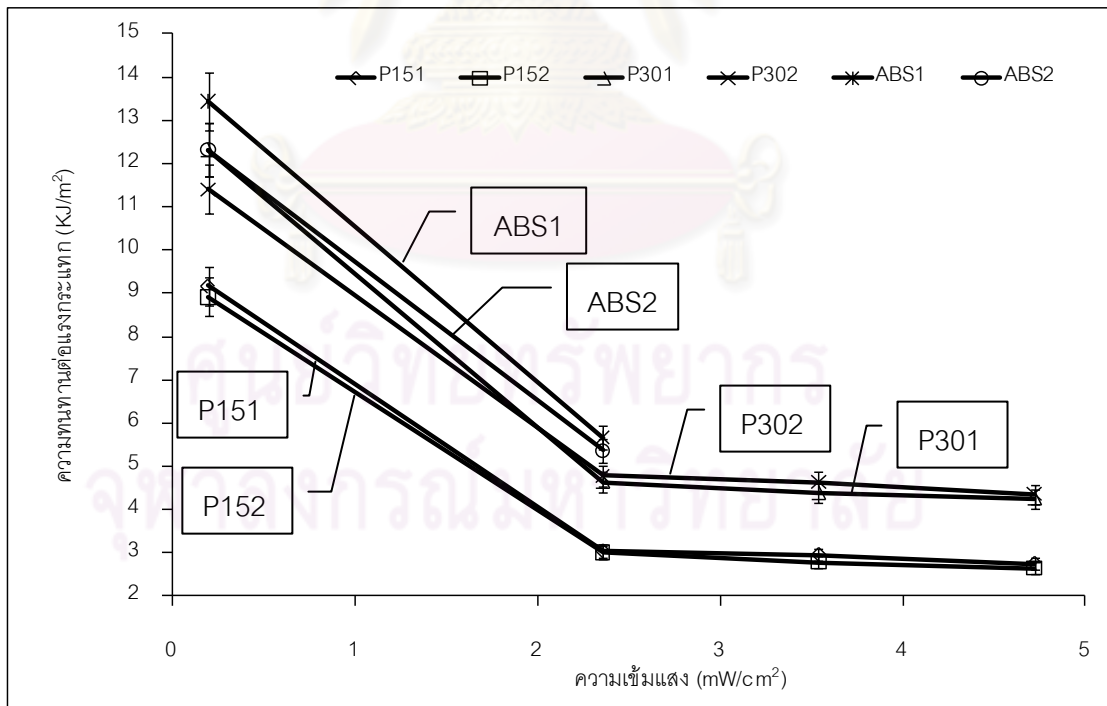
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นต่อแรงกระทำเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นต่อแรงกระทำเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ  $3.54 \text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ยกับเวลาเมื่อผ่านความเข้มแสงยูวีที่ระดับ  $3.54 \text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ยกับความเข้มแสงต่างๆ เมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที

#### 4.4 ผลการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติการหลุดลอกฟิล์ม

การทดสอบคุณสมบัติการหลุดลอกฟิล์มที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็น การทดสอบการยึดติดของฟิล์มหลังจากที่ผ่านอุณหภูมิ ความชื้น และแสงยูวี เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการยึดติดของฟิล์มโดยวิธีการที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย Checkerboard cutter, Cross-cut, Peeling และ Pencil scratch test การทดสอบแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นผลการทดสอบของวัสดุที่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มและนำไปอบที่อุณหภูมิและความชื้นต่างๆ สำหรับส่วนที่สองเป็นผลการทดสอบของวัสดุ หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มและเวลาต่างๆ โดยที่การทดสอบคุณสมบัติการยึดติดนั้นจะเพิ่มการทดสอบที่ช่วงความเข้มแสง 2.36, 3.54 และ 4.72 mW/cm<sup>2</sup> ซึ่งผลการทดสอบคุณสมบัติเป็นดังต่อไปนี้

1) ผลของการทดสอบวัสดุหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิและความชื้นต่างๆ จากการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดของฟิล์มบนชิ้นทดสอบ ได้ผลตามตารางที่ 4.23 - 4.38 โดยพบว่าอุณหภูมิและความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปไม่มีผลต่อการหลุดลอกของฟิล์มที่ใช้เคลือบบนวัสดุ P152 และ P302 เนื่องจากไม่มีการหลุดลอกเช่นเดียวกับ ABS2 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตในปัจจุบัน

2) ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดของวัสดุหลังผ่านแสงยูวี จากการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดของฟิล์มบนชิ้นทดสอบได้ผลตามตารางที่ 4.39 - 4.41 โดยพิจารณาเฉพาะปัจจัยความเข้มแสงยูวีและเวลานั้นพบว่าปัจจัยทั้งสองไม่มีผลต่อการหลุดลอกของฟิล์มที่ใช้เคลือบบนวัสดุ P152 และ P302 เนื่องจากไม่มีการหลุดลอกเช่นเดียวกับ ABS2 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตใน

ตารางที่ 4.23 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 30°C

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Cross-cut	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Peeling	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pencil scratch test	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

หมายเหตุ ○ ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.24 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 50°C

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Cross-cut	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Peeling	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pencil scratch test	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

หมายเหตุ ○ ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.25 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 85°C

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Cross-cut	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Peeling	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pencil scratch test	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

หมายเหตุ ○ ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.26 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 95°C

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Cross-cut	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Peeling	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pencil scratch test	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

หมายเหตุ ○ ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.27 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 30°C และ 70%Rh

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Cross-cut	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Peeling	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pencil scratch test	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

หมายเหตุ ○ ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.28 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 30°C และ 80%Rh

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Cross-cut	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Peeling	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pencil scratch test	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

หมายเหตุ ○ ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.29 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 30°C และ 90%Rh

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Cross-cut	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Peeling	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pencil scratch test	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

หมายเหตุ ○ ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.30 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 50°C และ 70%Rh

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Cross-cut	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Peeling	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pencil scratch test	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

หมายเหตุ ○ ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม x มีการหลุดลอกของฟิล์ม



ตารางที่ 4.31 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 50°C และ 80%Rh

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Cross-cut	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Peeling	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pencil scratch test	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

หมายเหตุ ○ ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.32 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 50°C และ 90%Rh

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Cross-cut	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Peeling	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pencil scratch test	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

หมายเหตุ ○ ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.33 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 85°C และ 70%Rh

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cross-cut	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peeling	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pencil scratch test	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ      0 ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม      x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.34 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 85°C และ 80%Rh

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cross-cut	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peeling	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pencil scratch test	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ      0 ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม      x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.35 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 85°C และ 90%Rh

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cross-cut	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peeling	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pencil scratch test	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ            0 ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม            x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.36 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 95°C และ 70%Rh

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cross-cut	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peeling	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pencil scratch test	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ            0 ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม            x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.37 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 95°C และ 80%Rh

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cross-cut	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peeling	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pencil scratch test	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ      0 ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม      x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.38 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดที่อุณหภูมิ 95°C และ 90%Rh

หัวข้อการทดสอบ	P152					P302					ABS2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cross-cut	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peeling	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pencil scratch test	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ      0 ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม      x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.39 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36  
mW /cm<sup>2</sup>

หัวข้อการ ทดสอบ	ชนิดของวัสดุ การทดลอง เวลา (นาที)	P152					P302					ABS2					
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
		Checkerboard cutter	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cross-cut	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peeling	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pencil scratch test	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ

○ ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม

x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.40 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 3.54  
mW /cm<sup>2</sup>

หัวข้อการทดสอบ	ชนิดของวัสดุ	P152					P302					ABS2									
		การทดลอง		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5			
		เวลา (นาทีก)																			
Checkerboard cutter	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cross-cut	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peeling	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pencil scratch test	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ

0 ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม

x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

ตารางที่ 4.41 ผลของการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดหลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 4.72  
mW /cm<sup>2</sup>

หัวข้อการทดสอบ	ชนิดของวัสดุ	P152					P302					ABS2				
		การทดลอง					การทดลอง					การทดลอง				
	เวลา (นาที่)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Checkerboard cutter	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cross-cut	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peeling	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pencil scratch test	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ

0 ไม่มีการหลุดลอกของฟิล์ม

x มีการหลุดลอกของฟิล์ม

## 4.5 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ

จากข้อมูลของผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลสำหรับชิ้นงานหลังผ่านแสงยูวี พบว่าผลการทดสอบที่ได้ระหว่างชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มและไม่เคลือบฟิล์มมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการทดสอบด้วยวิธี Two Way ANOVA จะทดสอบเฉพาะข้อมูลของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มของวัสดุทั้ง 3 ชนิดซึ่งประกอบด้วย P152, P302 และ ABS2 เท่านั้น โดยปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ได้แก่ปัจจัยทางด้านความเข้มแสงยูวีและเวลาที่ชิ้นงานผ่านแสงยูวีซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab Version 15 มาช่วยในการคำนวณ และผลการวิเคราะห์เป็นดังต่อไปนี้

### 4.5.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

1. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวี

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีแสดงดังตารางที่ 4.42 – 4.44 แสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงยูวีและเวลาที่ชิ้นงานผ่านแสงยูวีมีผลต่อความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานแรงดึงสูงสุดกับความเข้มแสงและเวลาตามรูปที่ 4.5 – 4.8 แสดงให้เห็นถึงลักษณะแนวโน้มของความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและหากพิจารณาร่วมกับค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of Square : SS) ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าค่าผลรวมกำลังสองของความเข้มแสงยูวีมีค่ามากกว่าปัจจัยในด้านของเวลาแสดงให้เห็นว่าถ้าปัจจัยของเวลาคงที่แต่เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงยูวีจะส่งผลต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดมากกว่าเมื่อปัจจัยของความเข้มแสงยูวีคงที่แล้วเปลี่ยนแปลงเวลา ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างความเข้มแสงยูวีและเวลาที่มีผลต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เช่นเดียวกัน ยกเว้น P152 เนื่องจากจำนวนข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์นั้นอาจไม่เพียงพอต่อการพิจารณาเนื่องจากค่า R-Sq (adj) ค่อนข้างต่ำ



ตารางที่ 4.42 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	267.02	133.512	9.05	0.000
เวลา	4	181.10	45.275	3.07	0.023
Interaction	8	24.07	3.009	0.20	0.989
Error	60	885.33	14.755		
Total	74	1357.52			

S = 3.841 R-Sq = 34.78% R-Sq (adj) = 19.57%

ตารางที่ 4.43 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	58.805	29.4025	38.40	0.000
เวลา	4	81.559	20.3896	26.63	0.000
Interaction	8	40.178	5.0222	6.56	0.000
Error	60	45.940	0.7657		
Total	74	226.482			

S = 0.8750 R-Sq = 79.72% R-Sq (adj) = 74.98%

ตารางที่ 4.44 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	33579.0	16789.5	168313.60	0.000
เวลา	4	23530.4	5882.6	58972.67	0.000
Interaction	8	21745.9	2718.2	27250.13	0.000
Error	60	6.0	0.1		
Total	74	78861.2			

S = 0.3158 R-Sq = 99.99% R-Sq (adj) = 99.99%

## 2. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวี

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีแสดงดังตารางที่ 4.45 – 4.47 แสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงยูวีและเวลาที่ขึ้นงานผ่านแสงยูวีมีผลต่อความเค้นจุดครากอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจุดครากกับความเข้มแสงและเวลาตามรูปที่ 4.9 – 4.12 แสดงให้เห็นถึงลักษณะแนวโน้มของความเค้นจุดครากมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญและหากพิจารณาร่วมกับค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of Square : SS) ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าค่าผลรวมกำลังสองของเวลามีค่ามากกว่าปัจจัยในด้านของความเข้มแสงยูวีแสดงให้เห็นว่าถ้าปัจจัยของความเข้มแสงยูวีคงที่แต่เปลี่ยนแปลงเวลาจะส่งผลต่อค่าความเค้นจุดครากมากกว่าเมื่อปัจจัยของเวลาคงที่แล้วเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงยูวี ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างความเข้มแสงยูวีและเวลามีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.45 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	60.251	30.1256	270.81	0.000
เวลา	4	72.847	18.2117	163.71	0.000
Interaction	8	5.130	0.6412	5.76	0.000
Error	60	6.675	0.1112		
Total	74	144.902			

S = 0.3335 R-Sq = 95.39% R-Sq (adj) = 94.32%

ตารางที่ 4.46 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	139.461	69.7303	127.32	0.000
เวลา	4	28.463	7.1158	12.99	0.000
Interaction	8	7.408	0.9260	1.69	0.119
Error	60	32.860	0.5477		
Total	74	208.192			

S = 0.7400 R-Sq = 84.22% R-Sq (adj) = 80.53%

ตารางที่ 4.47 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	37721.7	18860.8	166244.17	0.000
เวลา	4	23190.8	5797.7	51102.40	0.000
Interaction	8	19537.6	2442.2	21526.22	0.000
Error	60	6.8	0.1		
Total	74	80456.9			

S = 0.3368 R-Sq = 99.99% R-Sq (adj) = 99.99%

3. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวี

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวีแสดงดังตารางที่ 4.48 – 4.50 แสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงยูวีและเวลาที่ชิ้นงานผ่านแสงยูวีมีผลต่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับความเข้มแสงและเวลาตามรูปที่ 4.13 – 4.16 แสดงให้เห็นถึงลักษณะแนวโน้มของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและหากพิจารณาร่วมกับค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of

Square : SS) ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าค่าผลรวมกำลังสองของเวลามีค่ามากกว่าปัจจัยในด้านของความเข้มแสงยูวี แสดงให้เห็นว่าถ้าปัจจัยของความเข้มแสงยูวีคงที่แต่เปลี่ยนแปลงเวลาจะส่งผลต่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมากกว่าเมื่อปัจจัยของเวลาคงที่แล้วเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงยูวี ปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงยูวีและเวลามีผลต่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.48 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	1.13875	0.569377	328.11	0.000
เวลา	4	2.26619	0.566548	326.48	0.000
Interaction	8	0.78459	0.098075	56.52	0.000
Error	60	0.10412	0.001735		
Total	74	4.29366			

S = 0.04166 R-Sq = 97.58% R-Sq (adj) = 97.01%

ตารางที่ 4.49 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	1.13875	0.569377	328.11	0.000
เวลา	4	2.26619	0.566548	326.48	0.000
Interaction	8	0.78459	0.098074	56.52	0.000
Error	60	0.10412	0.001735		
Total	74	4.29366			

S = 0.04166 R-Sq = 97.58% R-Sq (adj) = 97.01%

ตารางที่ 4.50 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลมูลค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลา และความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	42.1881	21.0940	14737.34	0.000
เวลา	4	24.0020	6.0005	4192.24	0.000
Interaction	8	24.0212	3.0027	2097.80	0.000
Error	60	0.0859	0.0014		
Total	74	90.2971			

S = 0.03783 R-Sq = 99.90% R-Sq (adj) = 99.88%

#### 4. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น

ณ. จุดขาดกับเวลาและความเข้มแสงยูวี

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.

จุดขาดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีแสดงดังตารางที่ 4.51 – 4.53 แสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงยูวีและเวลาที่ชิ้นงานผ่านแสงยูวีมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาดกับความเข้มแสงและเวลาตามรูปที่ 4.17 – 4.20 แสดงให้เห็นถึงลักษณะแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาดมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญและหากพิจารณาพร้อมกับค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of Square : SS) ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าค่าผลรวมกำลังสองของความเข้มแสงยูวีมีค่ามากกว่าปัจจัยในด้านของเวลาแสดงให้เห็นว่าถ้าปัจจัยของเวลาคงที่แต่เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงยูวีจะส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาดมากกว่าเมื่อปัจจัยของความเข้มแสงยูวีคงที่แล้วเปลี่ยนแปลงเวลา

ตารางที่ 4.51 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับ เวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	2.8434	1.42172	13.84	0.000
เวลา	4	3.8348	0.95871	9.34	0.000
Interaction	8	0.9223	0.11529	1.12	0.361
Error	60	6.1619	0.10270		
Total	74	13.7625			

S = 0.3205 R-Sq = 55.23% R-Sq (adj) = 44.78%

ตารางที่ 4.52 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับ เวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	42.3257	21.1629	229.65	0.000
เวลา	4	1.8041	0.4510	4.89	0.002
Interaction	8	0.2261	0.0283	0.31	0.961
Error	60	5.5291	0.0922		
Total	74	49.8850			

S = 0.3036 R-Sq = 88.92% R-Sq (adj) = 86.33%

ตารางที่ 4.53 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับ เวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	569.69	284.845	2135.24	0.000
เวลา	4	386.05	96.513	723.48	0.000
Interaction	8	299.35	37.418	280.49	0.000
Error	60	8.00	0.133		
Total	74	1263.09			

S = 0.3652 R-Sq = 99.37% R-Sq (adj) = 99.22%

5. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและความเข้มแสงยูวี

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและความเข้มแสงยูวีแสดงดังตารางที่ 4.54 – 4.56 แสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงยูวีและเวลาที่ขึ้นงานผ่านแสงยูวีมีผลต่อความทนทานต่อแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ยกเว้น P302 เนื่องจากจำนวนข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์นั้นอาจไม่เพียงพอต่อการพิจารณาเนื่องจากค่า R-Sq (adj) ค่อนข้างต่ำ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงกระแทกกับความเข้มแสงและเวลาตามรูปที่ 4.21 – 4.24 แสดงให้เห็นถึงลักษณะแนวโน้มของความทนทานต่อแรงกระแทกมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญและหากพิจารณาร่วมกับค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of Square : SS) ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าค่าผลรวมกำลังสองของความเข้มแสงยูวีมีค่ามากกว่าปัจจัยในด้านของเวลาแสดงให้เห็นว่าถ้าปัจจัยของเวลาคงที่แต่เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงยูวีจะส่งผลต่อค่าความทนทานต่อแรงกระแทกมากกว่าเมื่อปัจจัยของความเข้มแสงยูวีคงที่แล้วเปลี่ยนแปลงเวลา

ตารางที่ 4.54 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	0.8322	0.416081	2.85	0.000
เวลา	4	1.5719	0.392965	2.69	0.000
Interaction	8	0.1399	0.017485	0.12	0.998
Error	60	8.7562	0.145937		
Total	74	11.3001			

S = 0.3820 R-Sq = 22.51% R-Sq (adj) = 4.43%

ตารางที่ 4.55 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	0.9429	0.471429	1.08	0.347
เวลา	4	2.0521	0.513030	1.17	0.331
Interaction	8	0.2458	0.030731	0.07	1.000
Error	60	26.2210	0.437017		
Total	74	29.4619			

S = 0.6611 R-Sq = 11.00% R-Sq (adj) = 0.00%

ตารางที่ 4.56 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2

Source	DF	SS	MS	F	P
ความเข้มแสงยูวี	2	268.219	134.110	712.51	0.000
เวลา	4	208.326	52.082	276.70	0.000
Interaction	8	137.633	17.204	91.40	0.000
Error	60	11.293	0.188		
Total	74	625.472			

S = 0.4338 R-Sq = 98.19% R-Sq (adj) = 97.77%

#### 4.5.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล

ได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab version 15 มาช่วยในการวิเคราะห์ด้วยวิธี multiple regression โดยเลือกระดับความเชื่อมั่นที่ 95% สมการที่ได้สามารถนำไปใช้ในการทำนายคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแต่ละชนิดจากความเข้มแสงยูวีและเวลา

1. ผลการวิเคราะห์การถดถอยของความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวี



จากผลการทดสอบค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดและจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของวัสดุแต่ละชนิดสามารถสรุปได้ดังนี้

ชิ้นงาน P152

$$Y = 110 - 1.86X_1 + 0.657X_2$$

$$R^2 = 20.49\%$$

ชิ้นงาน P302

$$Y = 164 - 0.527X_1 + 0.452X_2$$

$$R^2 = 31.9\%$$

ชิ้นงาน ABS2

$$Y = 128 - 21.2X_1 + 6.45X_2$$

$$R^2 = 53.3\%$$

เมื่อ

$$Y = \text{ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (MPa)}$$

$$X_1 = \text{ความเข้มแสงยูวี (mW/cm}^2\text{)}$$

$$X_2 = \text{เวลา (นาที)}$$

$$R^2 = \text{ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ}$$

ตารางที่ 4.57 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	109.915	1.755	62.62	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-1.8627	0.4455	-4.18	0.000
เวลา	0.6569	0.2220	2.96	0.004

S = 3.71746 R-Sq = 26.7% R-Sq (adj) = 24.7%

ตารางที่ 4.58 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	164.458	0.681	241.35	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-0.5268	0.1730	-3.05	0.003
เวลา	0.45170	0.08620	5.24	0.000

S = 1.44322 R-Sq = 33.8% R-Sq (adj) = 31.9%

ตารางที่ 4.59 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	128.39	10.53	12.19	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-21.239	2.672	-7.95	0.000
เวลา	-6.448	1.332	-4.84	0.000

S = 22.2988 R-Sq = 54.6% R-Sq (adj) = 53.3%

2. ผลการวิเคราะห์การถดถอยของความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวี

จากผลการทดสอบค่าความเค้นจุดครากและจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของวัสดุแต่ละชนิดสามารถสรุปได้ดังนี้

ชิ้นงาน P152

$$Y = 6.72 - 0.791X_1 - 0.489X_2$$

$$R^2 = 75.6\%$$

ชิ้นงาน P302

$$Y = 161 - 1.32X_1 - 0.297X_2$$

$$R^2 = 69.7\%$$

## ชิ้นงาน ABS2

$$Y = 133 - 22.4X_1 - 6.50X_2$$

$$R^2 = 57.0\%$$

## เมื่อ

$$Y = \text{ค่าความเค้นจุดคราก (MPa)}$$

$$X_1 = \text{ความเข้มแสงยูวี (mW/cm}^2\text{)}$$

$$X_2 = \text{เวลา (นาที)}$$

$$R^2 = \text{ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ}$$

ตารางที่ 4.60 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	6.7240	0.3263	20.61	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-0.79068	0.08282	-9.55	0.000
เวลา	-0.48886	0.04128	-11.84	0.000

S = 0.691059 R-Sq = 76.3% R-Sq (adj) = 75.6%

ตารางที่ 4.61 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	160.783	0.436	368.55	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-1.3234	0.1107	-11.95	0.000
เวลา	-0.29739	0.05519	-5.39	0.000

S = 0.923996 R-Sq = 70.5% R-Sq (adj) = 69.7%

ตารางที่ 4.62 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความเค้นจุดครากกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	133.04	10.21	13.03	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-22.406	2.591	-8.86	0.000
เวลา	-6.499	1.291	-5.03	0.000

S = 21.6230 R-Sq = 58.2% R-Sq (adj) = 57.0%

3. ผลการวิเคราะห์การถดถอยของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวี

จากผลการทดสอบค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นและจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของวัสดุแต่ละชนิดสามารถสรุปได้ดังนี้

ชิ้นงาน P152

$$Y = 2.34 - 0.0246X_1 + 0.0335X_2$$

$$R^2 = 41.7\%$$

ชิ้นงาน P302

$$Y = 3.18 + 0.126X_1 + 0.0848X_2$$

$$R^2 = 72\%$$

ชิ้นงาน ABS2

$$Y = 4.40 - 0.747X_1 - 0.203X_2$$

$$R^2 = 54.6\%$$

เมื่อ

$$Y = \text{ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (GPa)}$$

$$X_1 = \text{ความเข้มแสงยูวี (mW/cm}^2\text{)}$$

$$X_2 = \text{เวลา (นาที)}$$

$R^2$  = ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ

ตารางที่ 4.63 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	2.33737	0.03804	61.44	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-0.024576	0.009657	-2.54	0.013
เวลา	0.033527	0.004812	6.97	0.000

S = 0.08057 R-Sq = 43.3% R-Sq (adj) = 41.7%

ตารางที่ 4.64 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	3.17714	0.06017	52.81	0.000
ความเข้มแสงยูวี	0.12610	0.01527	8.26	0.000
เวลา	0.084834	0.007611	11.15	0.000

S = 0.127429 R-Sq = 72.8% R-Sq (adj) = 72%

ตารางที่ 4.65 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	4.4011	0.3514	12.52	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-0.74712	0.8921	-8.37	0.000
เวลา	-0.20292	0.0446	-4.56	0.000

S = 0.744362 R-Sq = 55.8% R-Sq (adj) = 54.6%

4. ผลการวิเคราะห์การถดถอยของเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับเวลาและความเข้มแสงยูวี

จากผลการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดและจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลทีกล่าวมาข้างต้นนั้น เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของวัสดุแต่ละชนิดสามารถสรุปได้ดังนี้

ชิ้นงาน P152

$$Y = 6.32 - 0.202X_1 - 0.100X_2$$

$$R^2 = 39.6\%$$

ชิ้นงาน P302

$$Y = 9.39 - 0.763X_1 - 0.0748X_2$$

$$R^2 = 83.9\%$$

ชิ้นงาน ABS2

$$Y = 16.4 - 2.73X_1 - 0.825X_2$$

$$R^2 = 55.1\%$$

เมื่อ

$$Y = \text{ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาด (\%)}$$

$$X_1 = \text{ความเข้มแสงยูวี (mW/cm}^2\text{)}$$

$$X_2 = \text{เวลา (นาที)}$$

$$R^2 = \text{ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ}$$

ตารางที่ 4.66 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับ เวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	6.3235	0.1583	39.95	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-0.20203	0.04018	-5.03	0.000
เวลา	-0.10043	0.02003	-5.01	0.000

S = 0.335278 R-Sq = 41.2% R-Sq (adj) = 39.6%

ตารางที่ 4.67 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับ เวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	9.3875	0.1557	60.28	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-0.76254	0.03953	-19.29	0.000
เวลา	-0.07484	0.01970	-3.80	0.000

S = 0.329834 R-Sq = 84.3% R-Sq (adj) = 83.9%

ตารางที่ 4.68 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับ เวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	16.423	1.307	12.56	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-2.7337	0.3319	-8.24	0.000
เวลา	-0.8249	0.1654	-4.99	0.000

S = 2.76906 R-Sq = 56.3% R-Sq (adj) = 55.1%

5. ผลการวิเคราะห์การถดถอยของค่าความทนทานต่อแรง  
กระแทกกับเวลาและความเข้มแสงยูวี

จากผลการทดสอบค่าความทนทานต่อแรงกระแทกและจากการ  
วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความ  
ทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของวัสดุแต่ละชนิดสามารถสรุปได้ดังนี้

ชิ้นงาน P152

$$Y = 3.59 - 0.109X_1 - 0.0686X_2$$

$$R^2 = 16.8\%$$

ชิ้นงาน P302

$$Y = 5.43 - 0.116X_1 - 0.0760X_2$$

$$R^2 = 6.1\%$$

ชิ้นงาน ABS2

$$Y = 11.5 - 1.89X_1 - 0.610X_2$$

$$R^2 = 55.3\%$$

เมื่อ

$$Y = \text{ค่าความทนทานต่อแรงกระแทก (KJ/m}^2\text{)}$$

$$X_1 = \text{ความเข้มแสงยูวี (mW/cm}^2\text{)}$$

$$X_2 = \text{เวลา (นาที)}$$

$$R^2 = \text{ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ}$$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.69 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P152

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	3.5948	0.1683	21.36	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-0.10932	0.04272	-2.56	0.013
เวลา	-0.06862	0.02129	-3.22	0.002

S = 0.356447 R-Sq = 19.0% R-Sq (adj) = 16.8%

ตารางที่ 4.70 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน P302

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	5.4277	0.2886	18.81	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-0.11627	0.07326	-1.59	0.117
เวลา	-0.07597	0.03651	-2.08	0.041

S = 0.611269 R-Sq = 8.7% R-Sq (adj) = 6.1%

ตารางที่ 4.71 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อความทนทานต่อแรงกระแทกกับเวลาและความเข้มแสงยูวีของชิ้นงาน ABS2

Predictor	Coefficient	SE Coef	T	P
ค่าคงที่	11.5073	0.9175	12.54	0.000
ความเข้มแสงยูวี	-1.8919	0.2329	-8.12	0.000
เวลา	-0.6103	0.1161	-5.26	0.000

S = 1.94328 R-Sq = 56.5% R-Sq (adj) = 55.3%

#### 4.6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของวัสดุ

4.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับคุณสมบัติการเสื่อมสลายด้วยแสงยูวี

1. ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับเวลาในการเสื่อมสลายด้วยแสงยูวี

จากผลการทดสอบข้างต้นจะพบว่าที่ระดับความเข้มแสง 2.36 mW/cm<sup>2</sup> จะเป็นช่วงความเข้มแสงที่ไม่ก่อให้เกิดการศึกษาค้นคว้าทุกชนิดเกิดการเสื่อยรูป ดังนั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยทางด้านเวลาเมื่อขึ้นงานผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสงดังกล่าวพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับเวลาของวัสดุที่ทำการศึกษาค้นคว้าอธิบายโดยรูปแบบความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 ได้ดังต่อไปนี้

1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาในการผ่านแสงยูวี

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาของวัสดุแต่ละชนิดแสดงดังแสดงในรูปที่ 4.25 – 4.30 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกัน คือเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดก็มีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของวัสดุที่ทำการศึกษาระหว่างวัสดุที่ไม่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มและผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มพบว่าวัสดุทั้งสองชนิดนั้นมีแนวโน้มของค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดไม่แตกต่างกันโดยสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 4.72 เมื่อ

Y = ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด (MPa)

X = เวลา (นาที)

R<sup>2</sup> = ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ

1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับเวลาในการผ่านแสงยูวี

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจุดครากกับเวลาของวัสดุแต่ละชนิดแสดงดังแสดงในรูปที่ 4.31 – 4.36 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกัน คือเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าความเค้นจุดครากจะมีค่าลดลงและเมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของวัสดุที่ทำการศึกษาระหว่างวัสดุที่ไม่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มและผ่านกระบวนการเคลือบ

ฟิล์มพบว่าวัสดุทั้งสองชนิดนั้นมีแนวโน้มของค่าความจืดครากไม่แตกต่างกันโดยสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 4.72 เมื่อ

Y = ค่าความเค้นจืดคราก (MPa)

X = เวลา (นาที)

$R^2$  = ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ

1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาในการผ่านแสงยูวี

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาของวัสดุแต่ละชนิดแสดงดังแสดงในรูปที่ 4.37 – 4.42 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกัน คือเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าความโมดูลัสของความยืดหยุ่นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของวัสดุที่ทำการศึกษาระหว่างวัสดุที่ไม่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มและผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มพบว่าวัสดุทั้งสองชนิดนั้นมีแนวโน้มของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นไม่แตกต่างกันโดยสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 4.73 เมื่อ

Y = ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (GPa)

X = เวลา (นาที)

$R^2$  = ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ

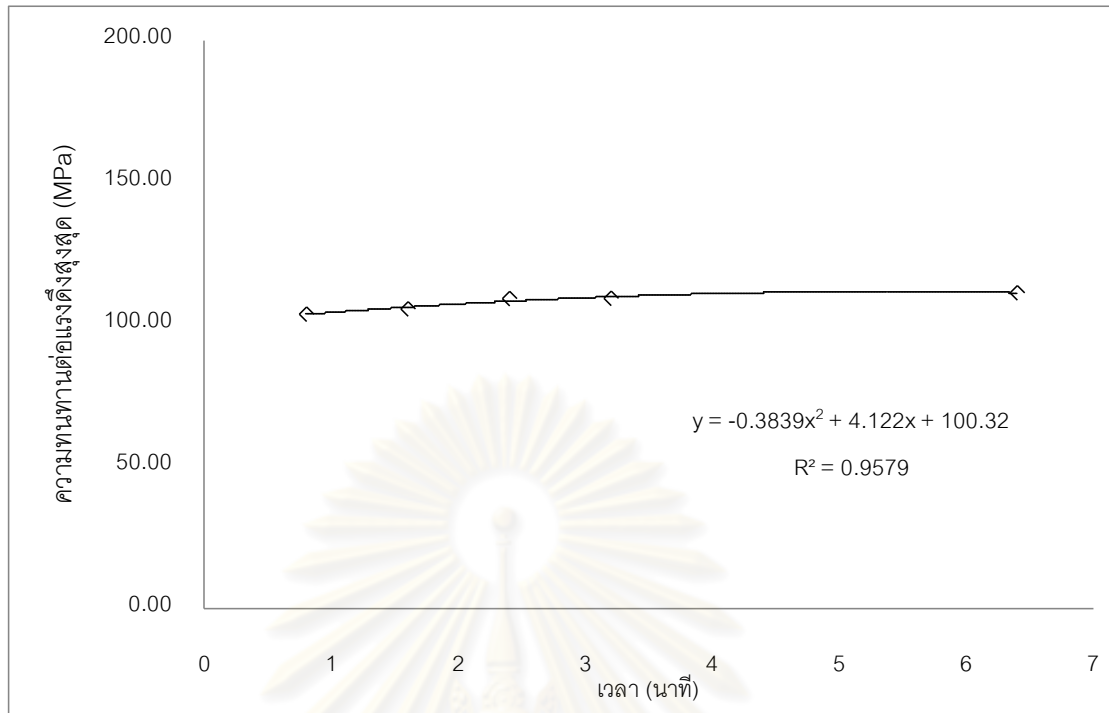
1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับเวลาในการผ่านแสงยูวี

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับเวลาของวัสดุแต่ละชนิดแสดงดังแสดงในรูปที่ 4.43 – 4.48 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกัน คือเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดจะมีค่าลดลงและเมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของวัสดุที่ทำการศึกษาระหว่างวัสดุที่ไม่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มและผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มพบว่าวัสดุทั้งสองชนิดนั้นมีแนวโน้มของค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาด ไม่แตกต่างกันโดยสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 4.75 เมื่อ

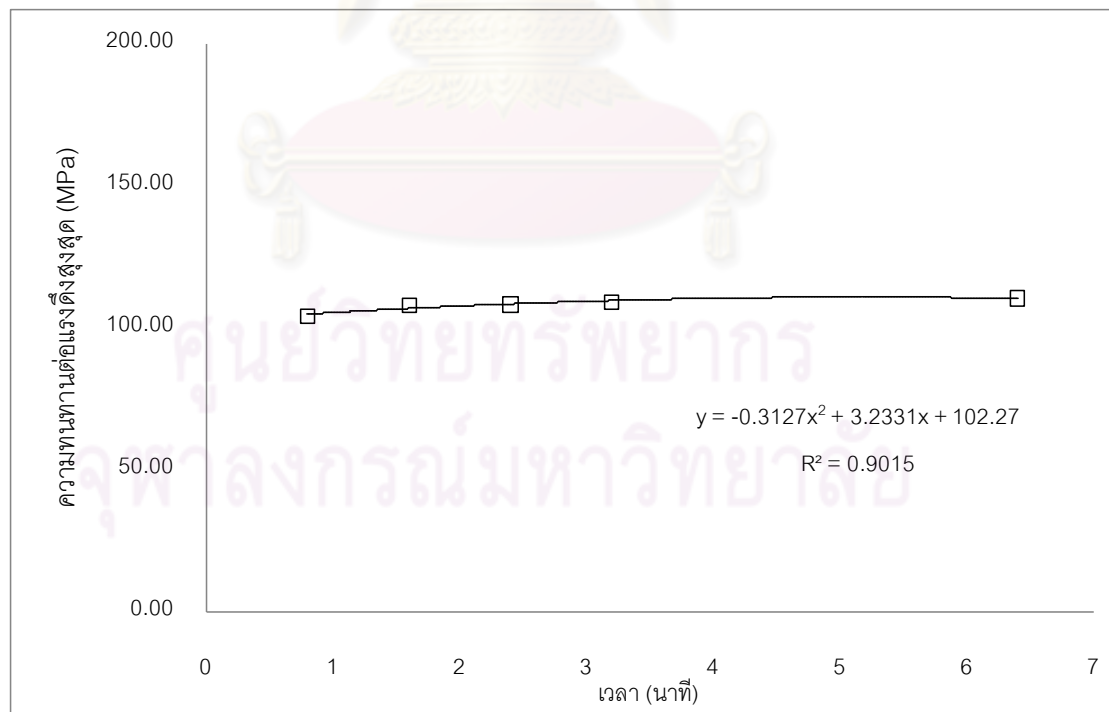
Y = ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาด

X = เวลา (นาที)

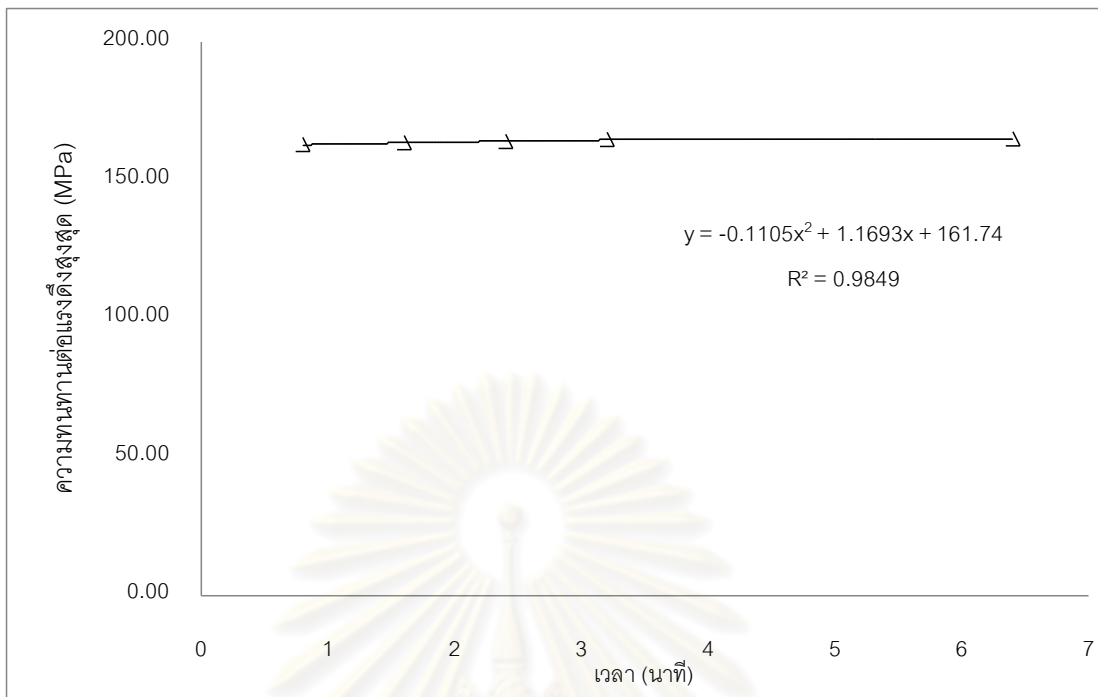
$R^2$  = ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ



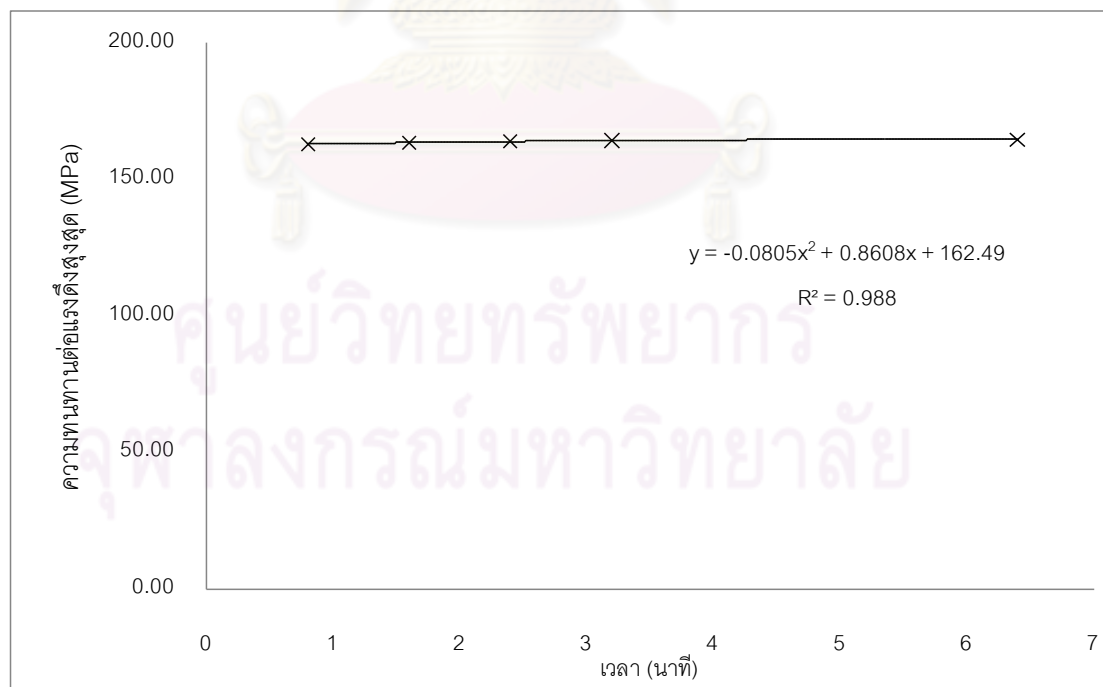
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



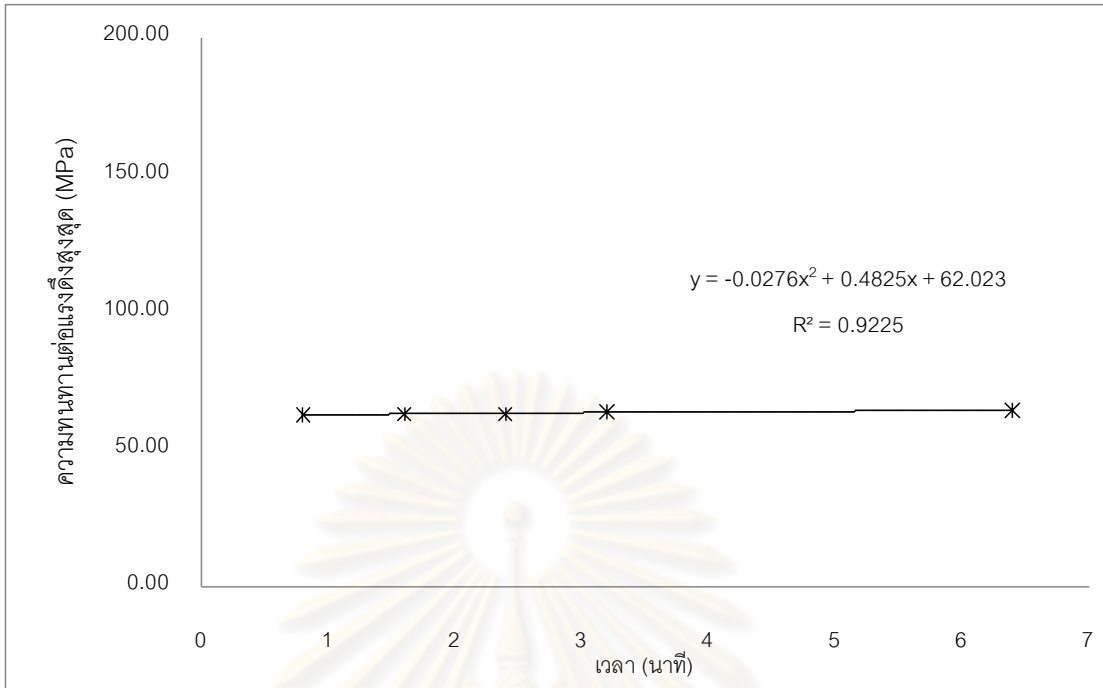
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



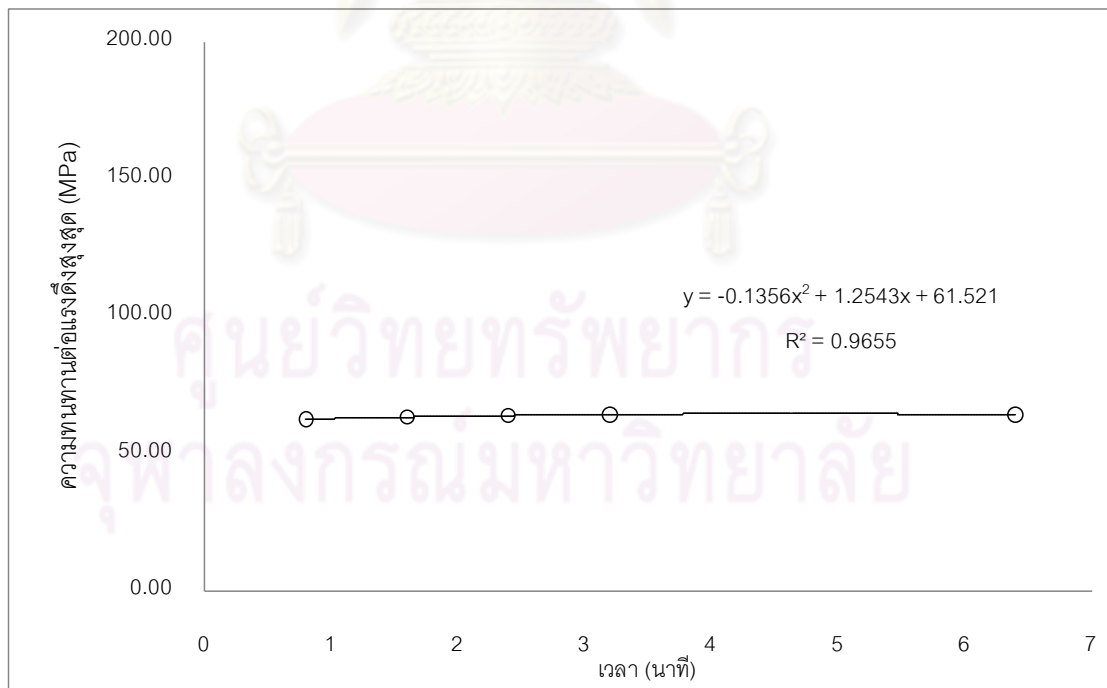
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



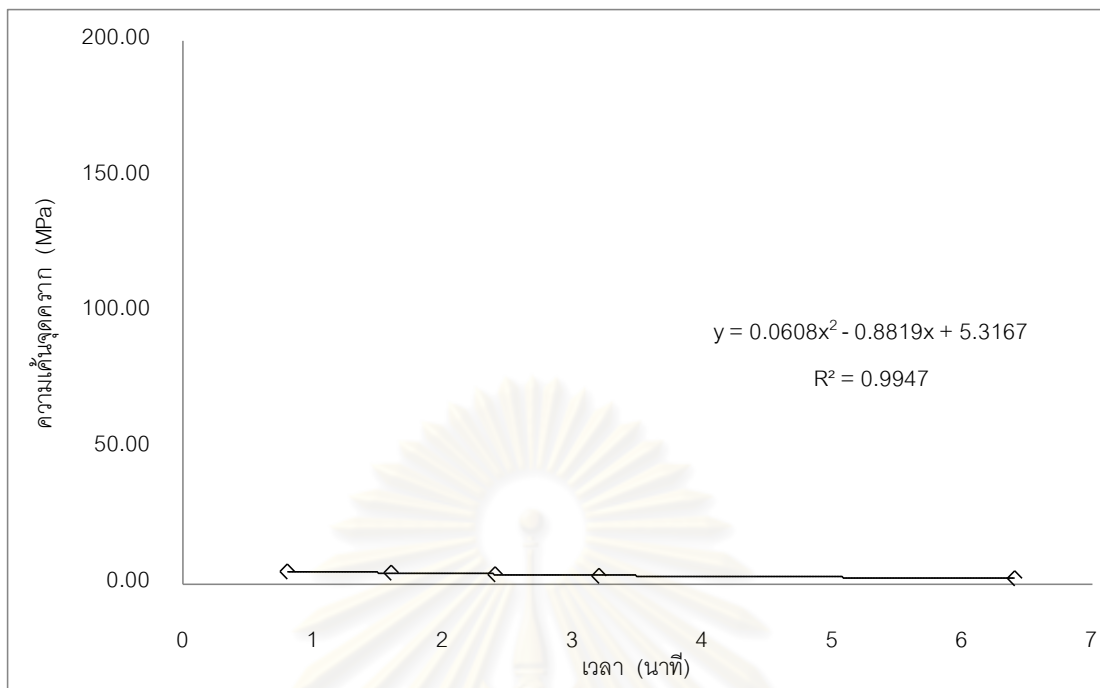
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



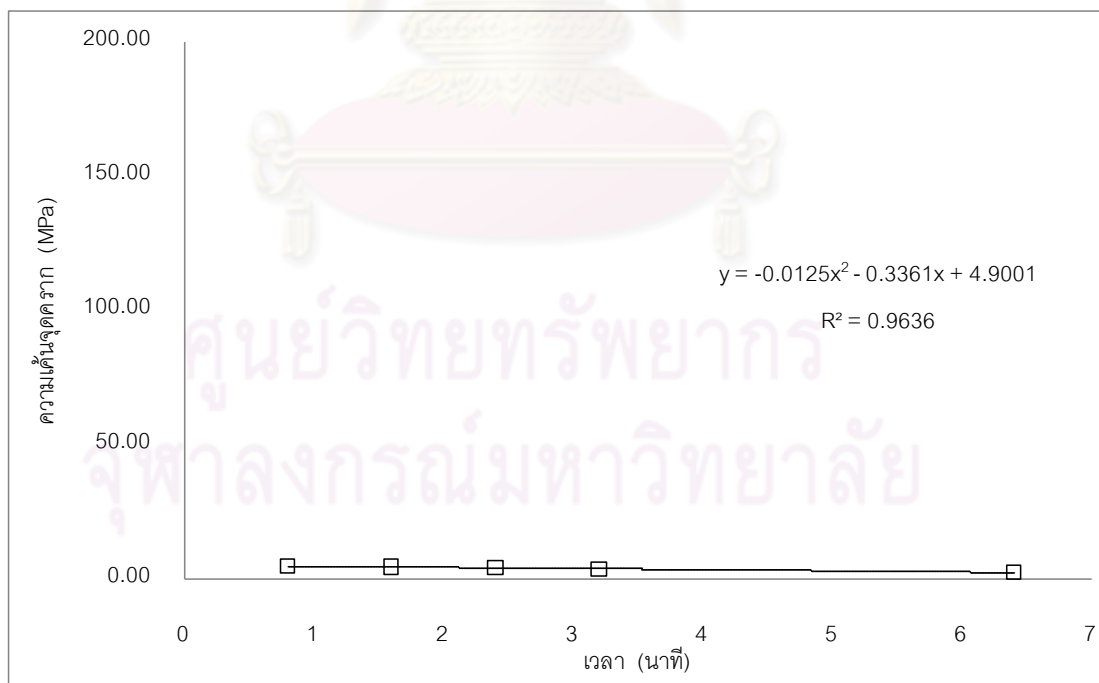
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



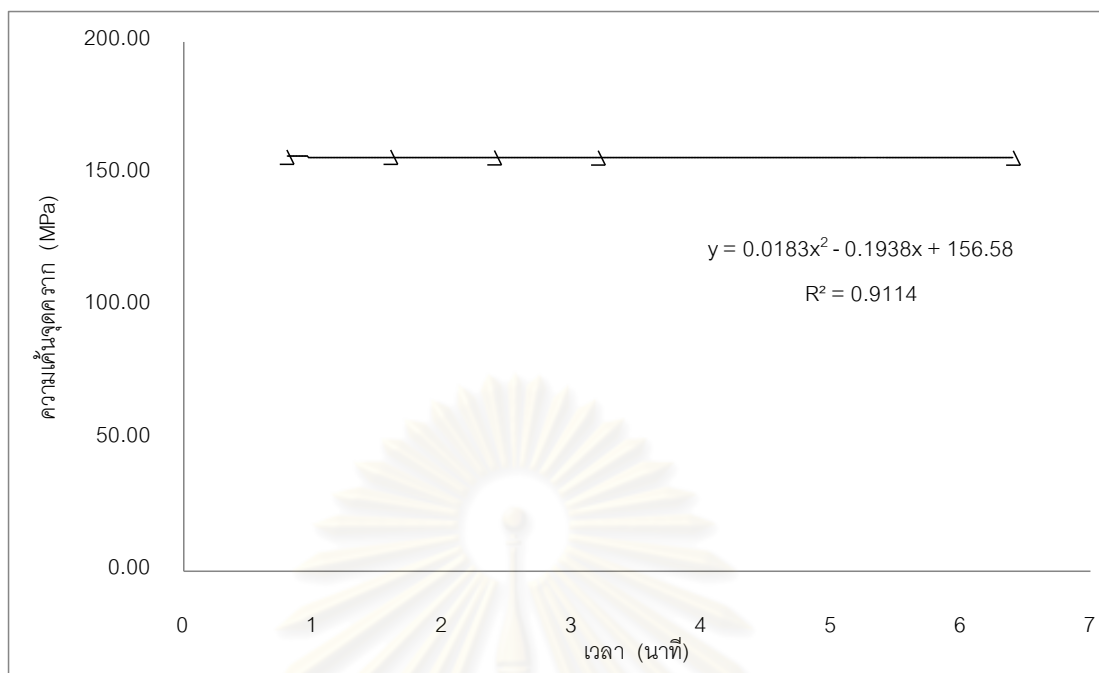
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



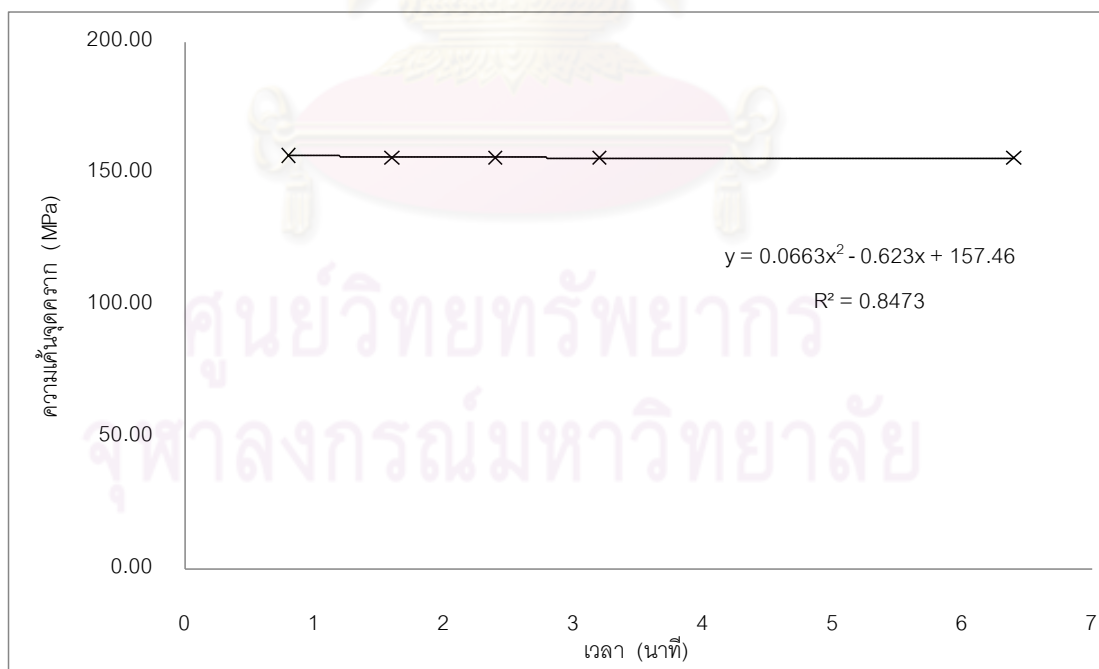
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากของวัสดุ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากของวัสดุ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ

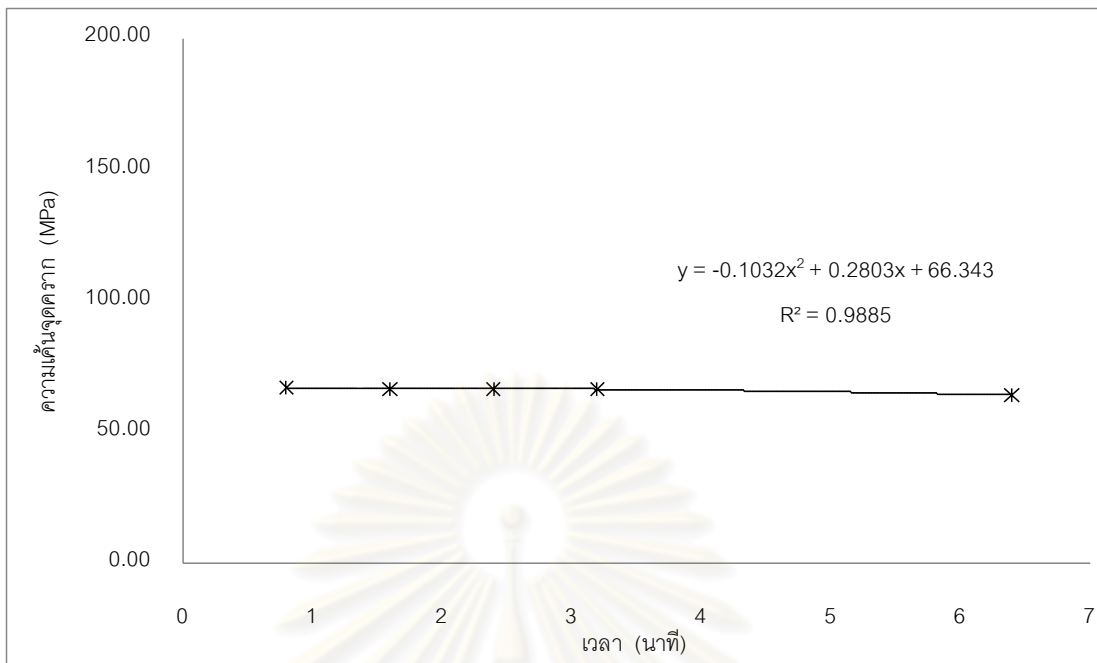


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากของวัสดุ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ

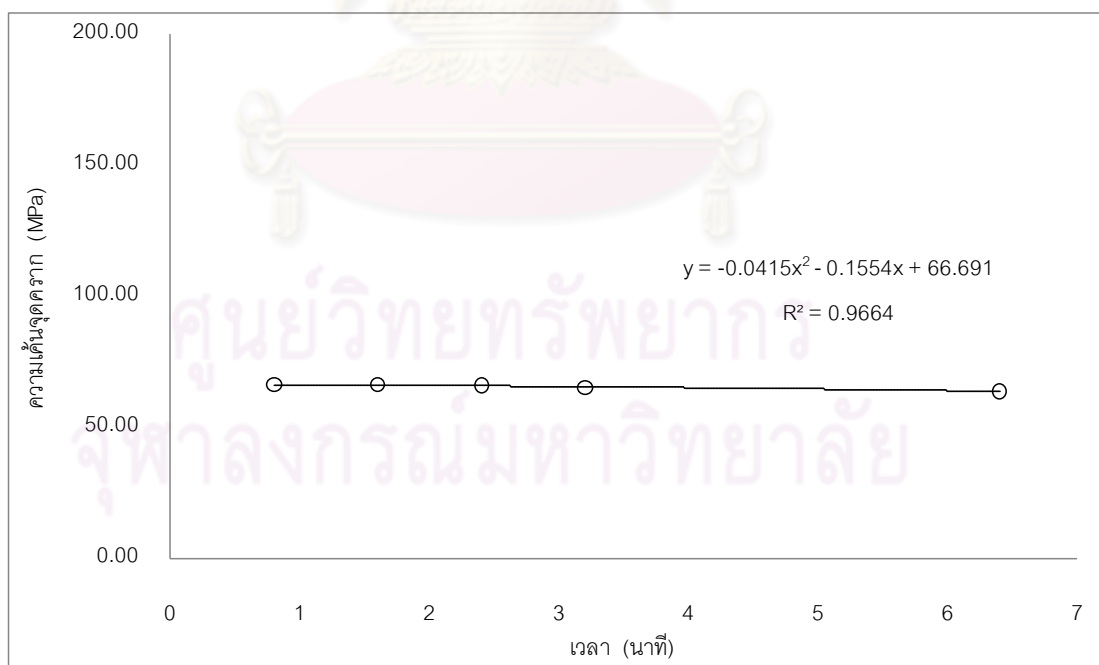


รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากของวัสดุ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ

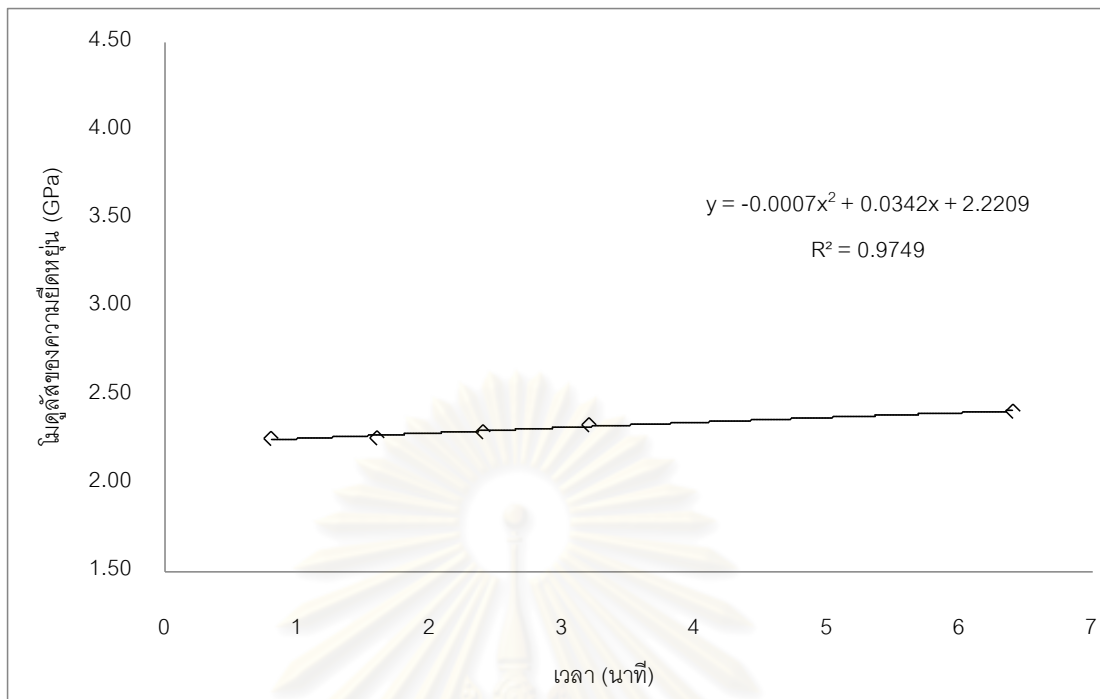




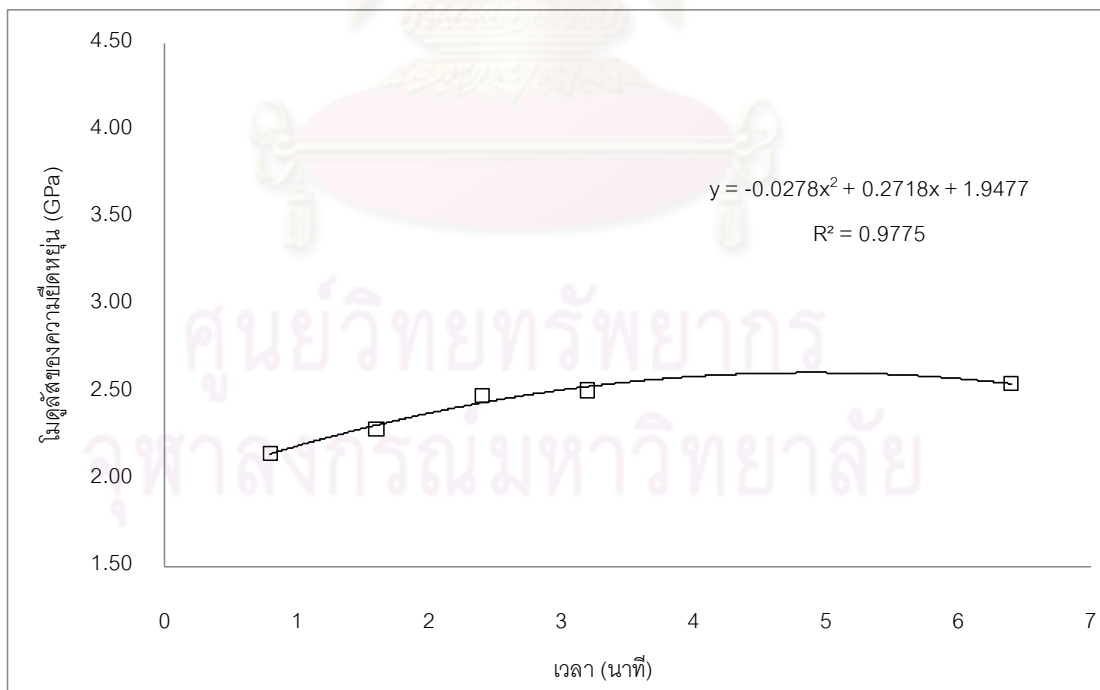
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากของวัสดุ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup> ที่เวลาต่างๆ



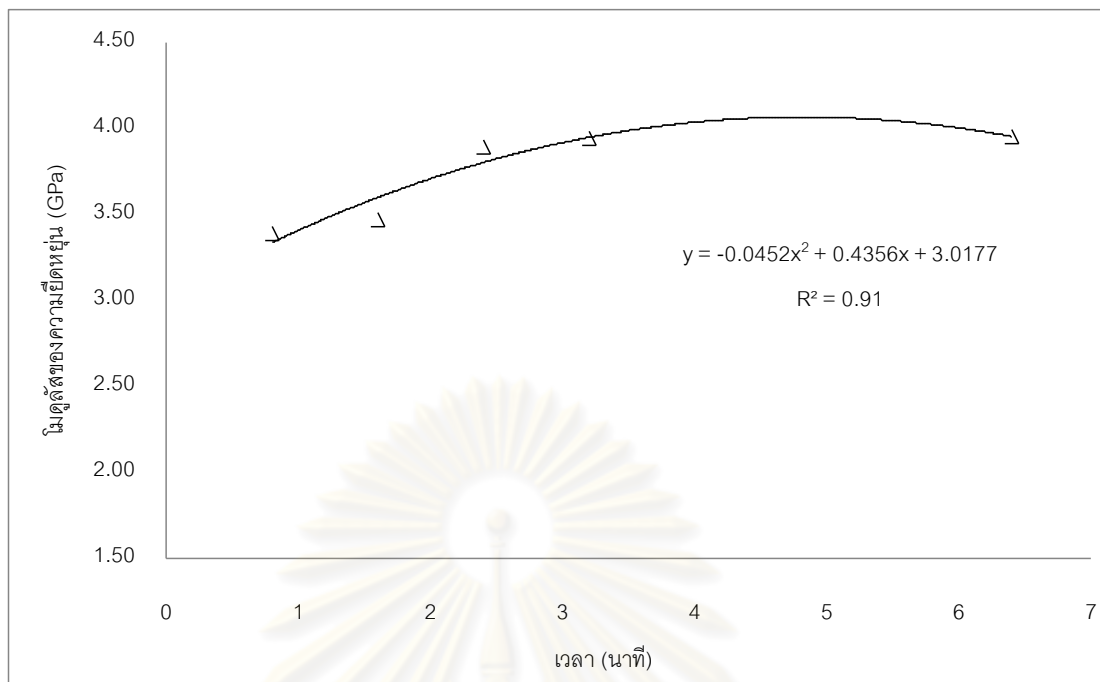
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากของวัสดุ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup> ที่เวลาต่างๆ



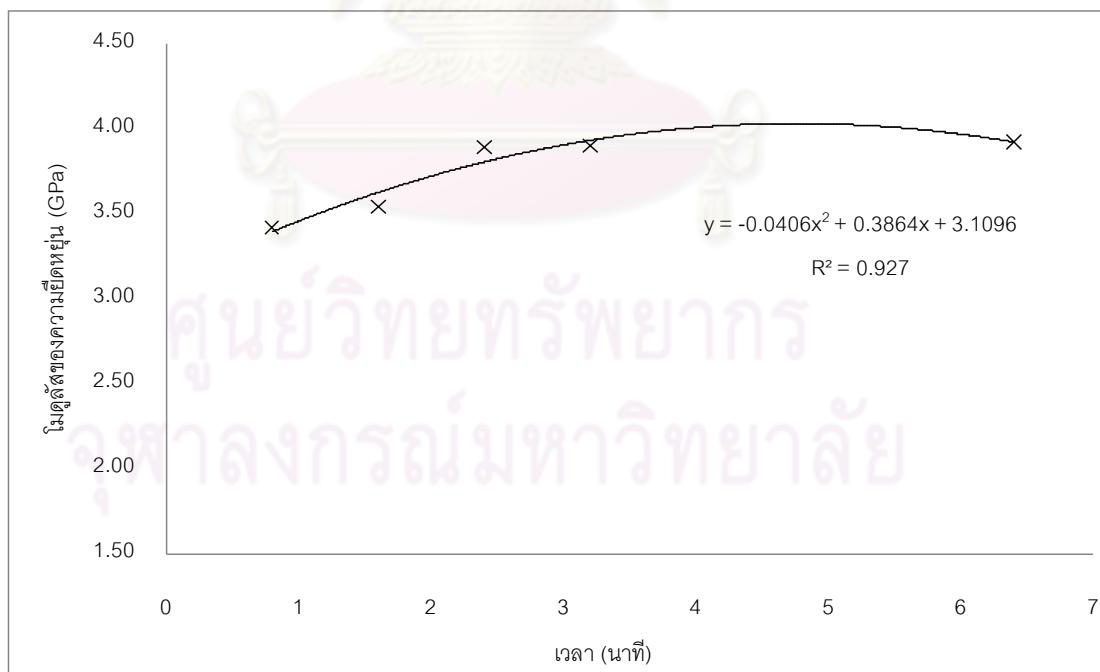
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



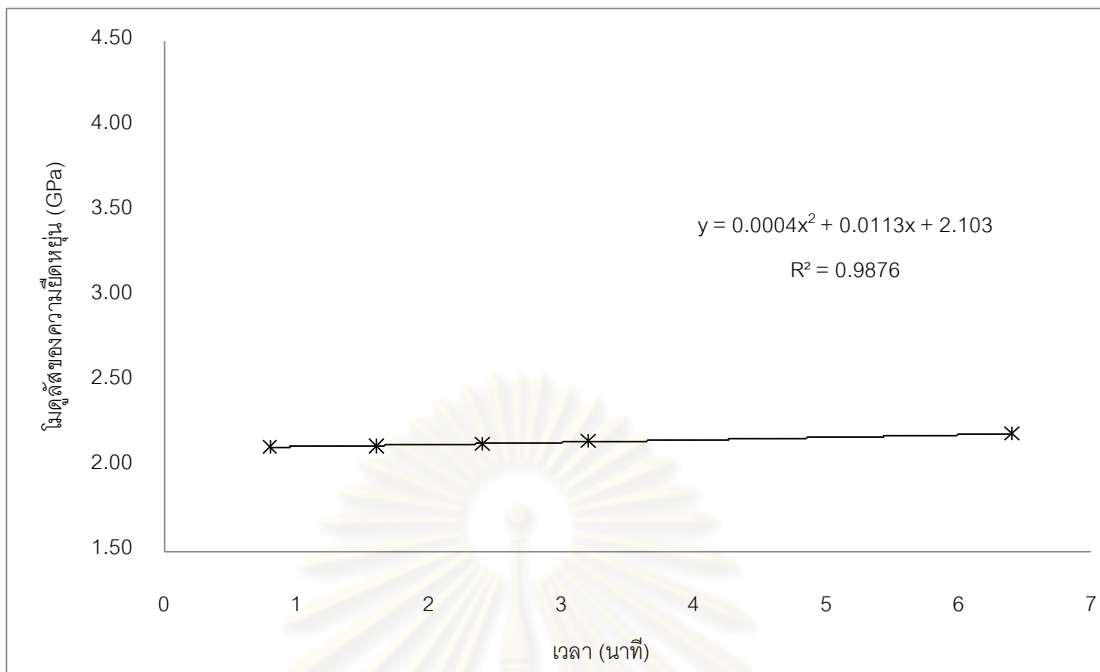
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



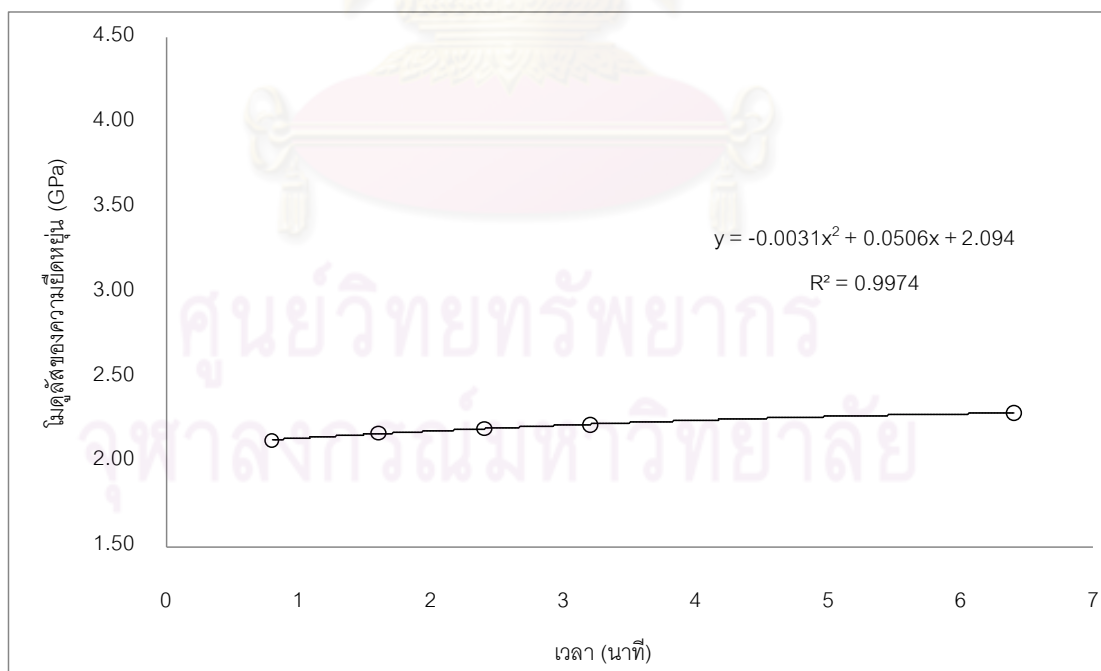
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



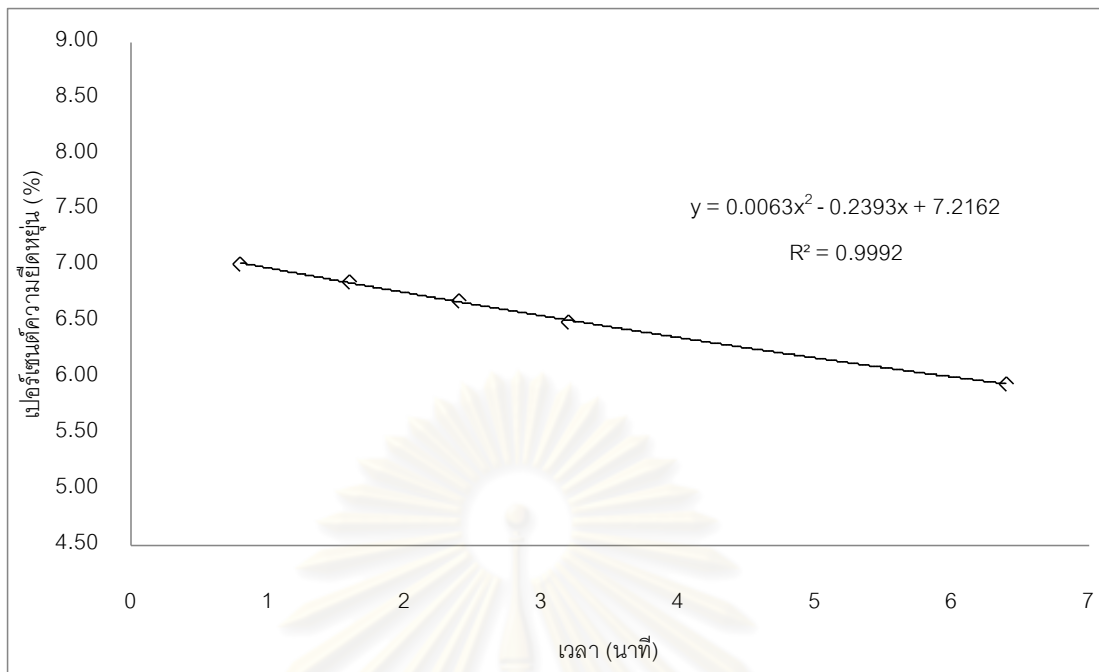
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



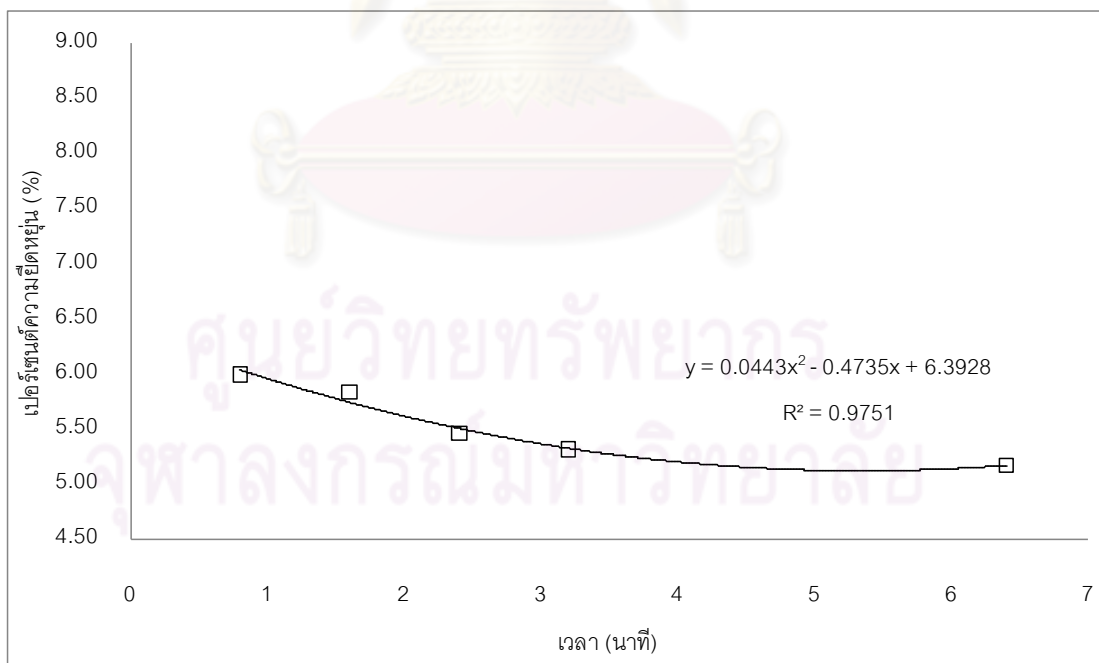
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



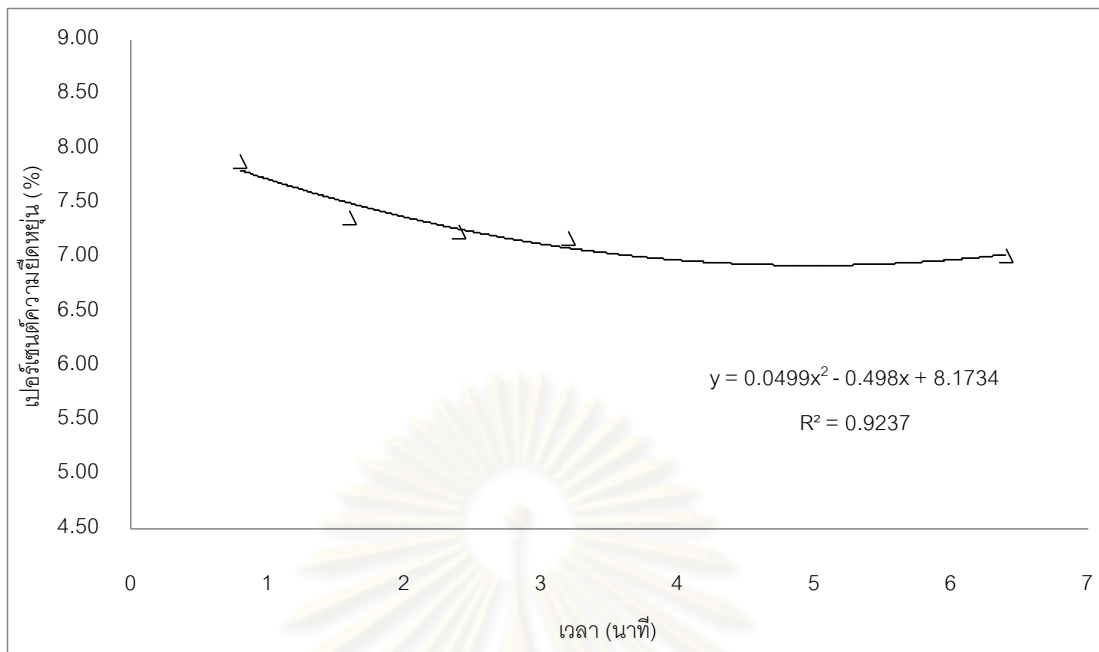
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



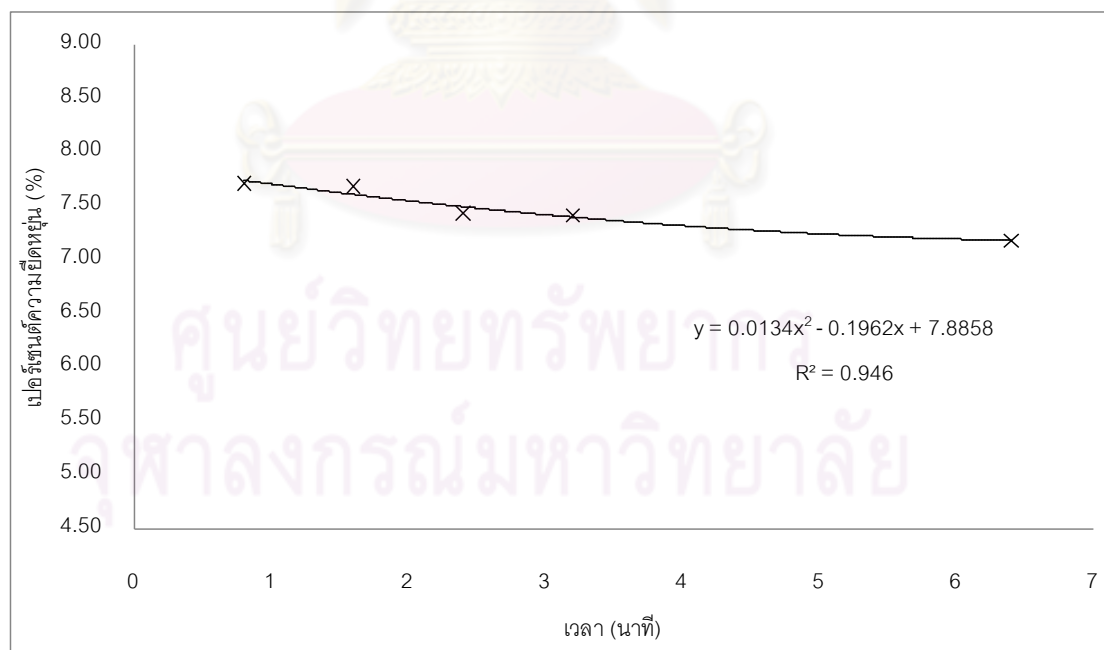
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



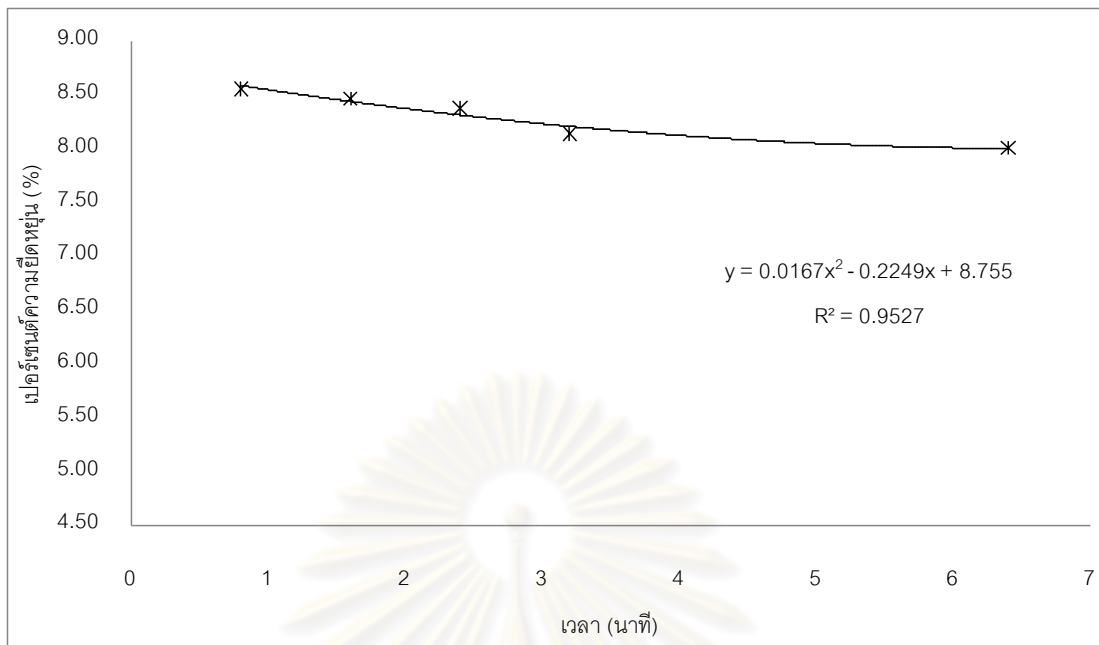
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



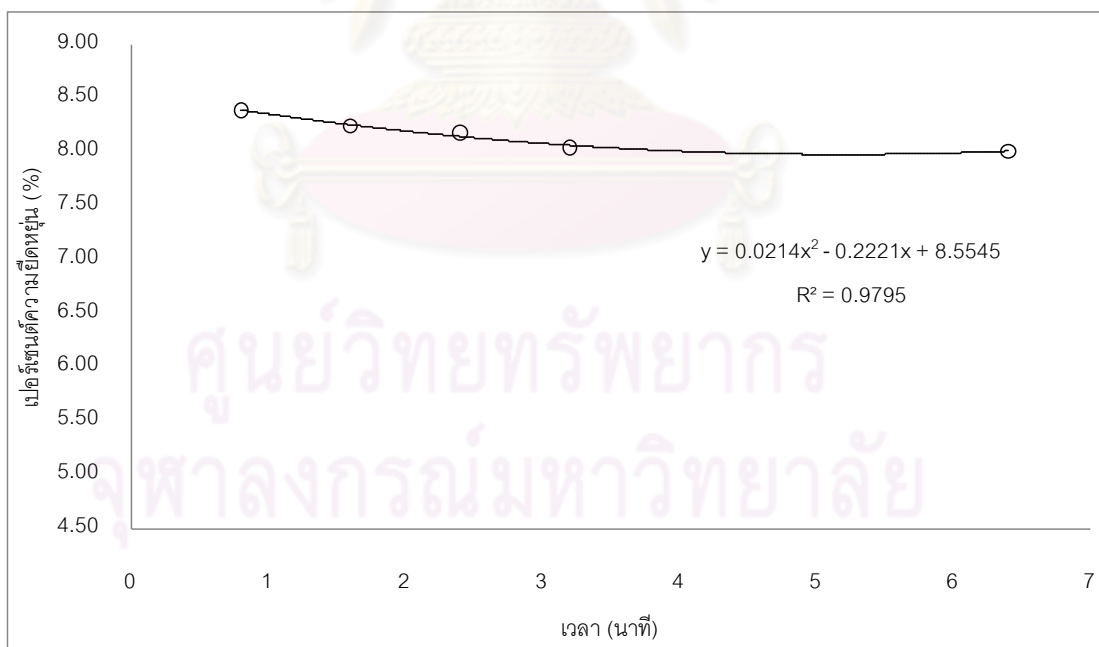
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  ที่เวลาต่างๆ

ตาราง 4.72 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับเวลาในการผ่านแสงยูวี

ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
P151	$y = -0.3839x^2 + 4.122x + 100.32$	95.79
P152	$y = -0.3127x^2 + 3.2331x + 102.27$	90.15
P301	$y = -0.1105x^2 + 1.1693x + 161.74$	98.49
P302	$y = -0.0805x^2 + 0.8608x + 162.49$	98.80
ABS1	$y = -0.0276x^2 + 0.4825x + 62.023$	92.25
ABS2	$y = -0.1356x^2 + 1.2543x + 61.521$	96.55

ตาราง 4.73 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับเวลาในการผ่านแสงยูวี

ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
P151	$y = 0.0608x^2 - 0.8819x + 5.3167$	99.47
P152	$y = -0.0125x^2 - 0.3361x + 4.9001$	96.36
P301	$y = 0.0183x^2 - 0.1938x + 156.58$	91.14
P302	$y = 0.0663x^2 - 0.623x + 157.46$	84.73
ABS1	$y = -0.1032x^2 + 0.2803x + 66.343$	98.85
ABS2	$y = -0.0415x^2 - 0.1554x + 66.691$	96.64



ตาราง 4.74 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับเวลาในการผ่านแสงยูวี

ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
P151	$y = -0.0007x^2 + 0.0342x + 2.2209$	97.49
P152	$y = -0.0278x^2 + 0.2718x + 1.9477$	97.75
P301	$y = -0.0452x^2 + 0.4356x + 3.0177$	91.00
P302	$y = -0.0406x^2 + 0.3864x + 3.1096$	92.70
ABS1	$y = 0.0004x^2 + 0.0113x + 2.103$	98.76
ABS2	$y = -0.0031x^2 + 0.0506x + 2.094$	99.74

ตาราง 4.75 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับเวลาในการผ่านแสงยูวี

ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
P151	$y = 0.0063x^2 - 0.2393x + 7.2162$	99.92
P152	$y = 0.0443x^2 - 0.4735x + 6.3928$	91.51
P301	$y = 0.0499x^2 - 0.498x + 8.1734$	92.37
P302	$y = 0.0134x^2 - 0.1962x + 7.8858$	94.60
ABS1	$y = 0.0167x^2 - 0.2249x + 8.755$	95.27
ABS2	$y = 0.0214x^2 - 0.2221x + 8.5545$	97.95

## 2. ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับความเข้มแสงยูวี

จากผลการทดสอบข้างต้นจะพบว่าวัสดุที่สามารถทนต่อแสงยูวีได้สูงสุดคือวัสดุในกลุ่ม P30 และ P15 ตามลำดับ โดยช่วงเวลา 6.4 นาฬิกาจะเป็นช่วงเวลาที่ชิ้นงานเริ่มมีการเปลี่ยนสีขณะที่ ABS เกิดการเสียรูปที่  $3.54 \text{ mW/cm}^2$  ด้วยเวลาเพียง 2.4 นาฬิกา เท่านั้น ดังนั้นในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์นี้จะไม่คำนึงถึงวัสดุ ABS แต่จะวิเคราะห์ความสัมพันธ์สำหรับ P15 และ P30 เท่านั้นและเมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยทางด้านความเข้มของแสงยูวีต่างๆที่เวลา 6.4 นาฬิกาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับความเข้มแสงยูวีของวัสดุที่ทำการศึกษาอธิบายโดยรูปแบบความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 ได้ดังต่อไปนี้

### 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับความเข้มแสงยูวี

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยกับความเข้มแสงต่างๆ เมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาฬิกาของวัสดุแต่ละชนิดแสดงดังแสดงในรูปที่ 4.49 – 4.52 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกัน คือเมื่อความเข้มแสงยูวีเพิ่มขึ้นค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดก็มีค่าเพิ่มขึ้นแต่เมื่อชิ้นงานทดสอบเกิดการเปลี่ยนสีนั้นจะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดลดลงและเมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของวัสดุที่ทำการศึกษาระหว่างวัสดุที่ไม่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มและผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มพบว่าวัสดุทั้งสองชนิดนั้นมีแนวโน้มของค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดไม่แตกต่างกันโดยสามารถสรุปความสัมพันธ์นี้ได้ดังตารางที่ 4.76 เมื่อ

$$Y = \text{ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด (MPa)}$$

$$X = \text{ความเข้มแสงยูวี (mW/cm}^2\text{)}$$

$$R^2 = \text{ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ}$$

### 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับความเข้มแสงยูวี

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจุดครากกับความเข้มแสงต่างๆ เมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาฬิกาของวัสดุแต่ละชนิดแสดงดังแสดงในรูปที่ 4.53 – 4.56 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกัน คือเมื่อความเข้มแสงยูวีเพิ่มขึ้นค่าความเค้นจุดครากจะมีค่าลดลงและเมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของวัสดุที่ทำการศึกษาระหว่างวัสดุที่ไม่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มและผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มพบว่าวัสดุทั้งสองชนิดนั้นมีแนวโน้มของค่าความจุดครากไม่แตกต่างกันโดยสามารถสรุปความสัมพันธ์นี้ได้ดังตารางที่ 4.77 เมื่อ

$$Y = \text{ค่าความเค้นจุดคราก (MPa)}$$

$X$  = ความเข้มแสงยูวี ( $\text{mW/cm}^2$ )

$R^2$  = ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ

### 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับความเข้มแสงยูวี

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับความเข้มแสงยูวีของวัสดุแต่ละชนิดแสดงดังแสดงในรูปที่ 4.57 – 4.60 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกัน คือเมื่อความเข้มแสงยูวีเพิ่มขึ้นค่าความโมดูลัสของความยืดหยุ่นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของวัสดุที่ทำการศึกษาระหว่างวัสดุที่ไม่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มและผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มพบว่าวัสดุทั้งสองชนิดนั้นมีแนวโน้มของค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นไม่แตกต่างกันโดยสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 4.78 เมื่อ

$Y$  = ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (GPa)

$X$  = ความเข้มแสงยูวี ( $\text{mW/cm}^2$ )

$R^2$  = ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ

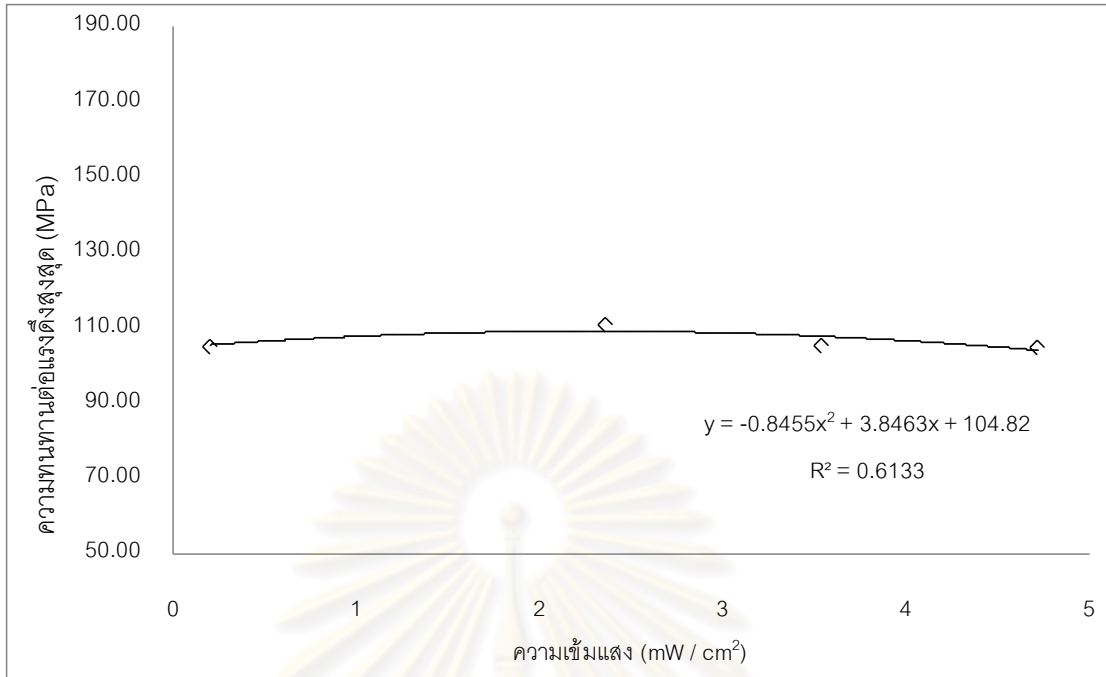
### 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับความเข้มแสงยูวี

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับความเข้มแสงยูวีของวัสดุแต่ละชนิดแสดงดังแสดงในรูปที่ 4.61 – 4.64 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกัน คือเมื่อความเข้มแสงยูวีเพิ่มขึ้นค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดจะมีค่าลดลงและเมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยของวัสดุที่ทำการศึกษาระหว่างวัสดุที่ไม่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มและผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มพบว่าวัสดุทั้งสองชนิดนั้นมีแนวโน้มของค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ไม่แตกต่างกันโดยสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 4.79 เมื่อ

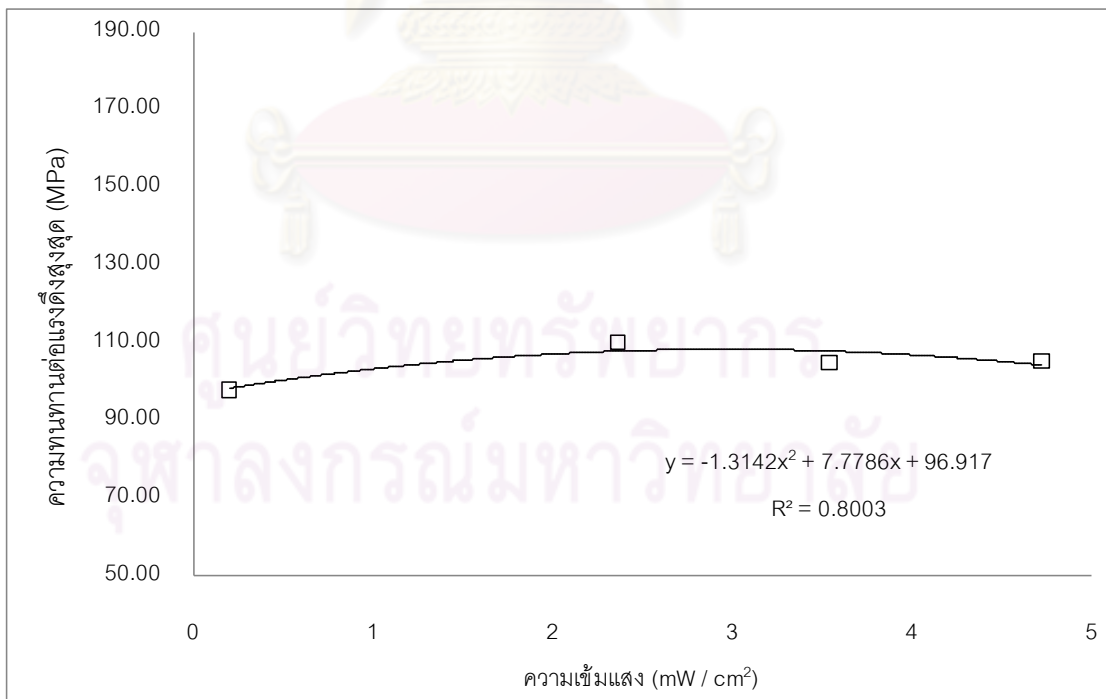
$Y$  = ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด

$X$  = ความเข้มแสงยูวี ( $\text{mW/cm}^2$ )

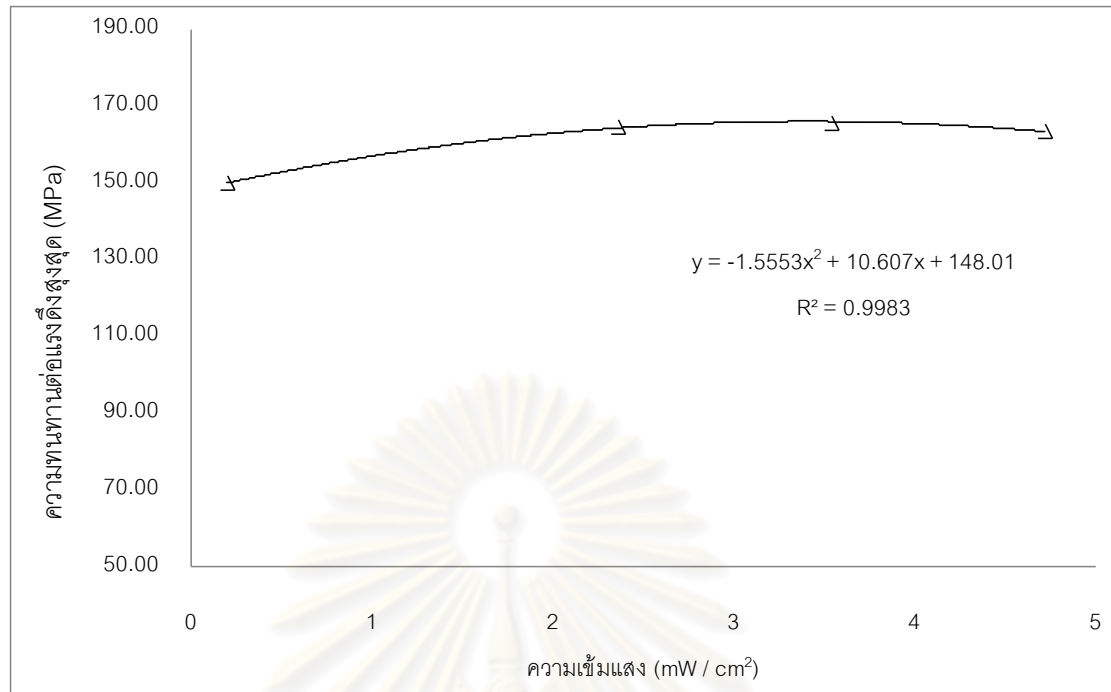
$R^2$  = ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณ



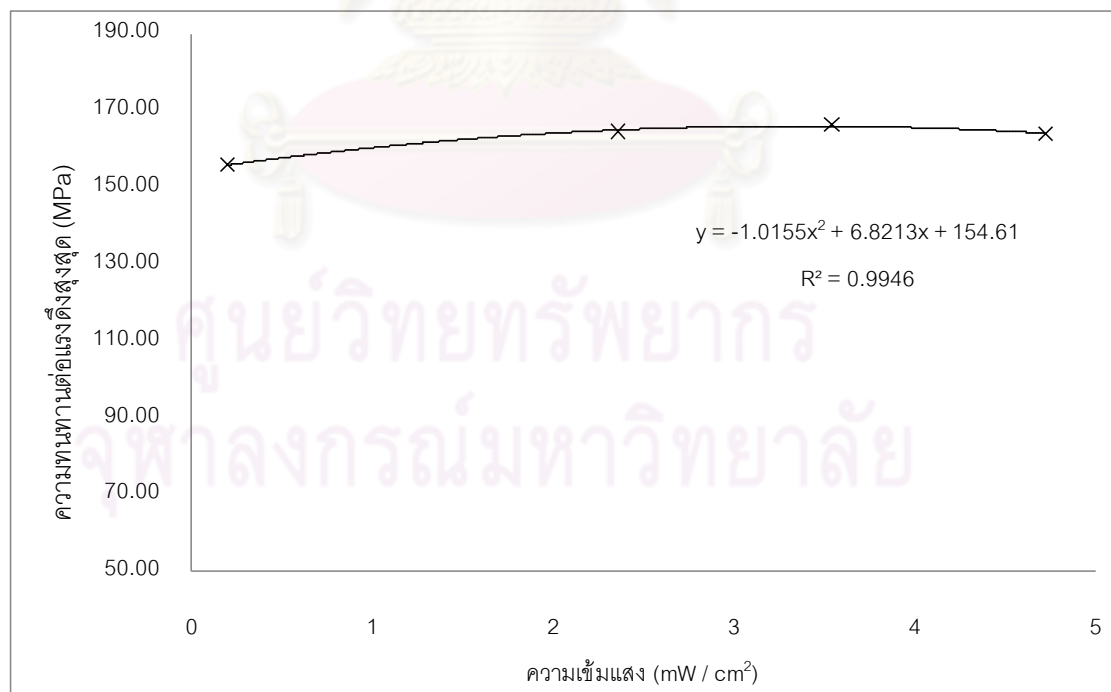
รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ P151 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ



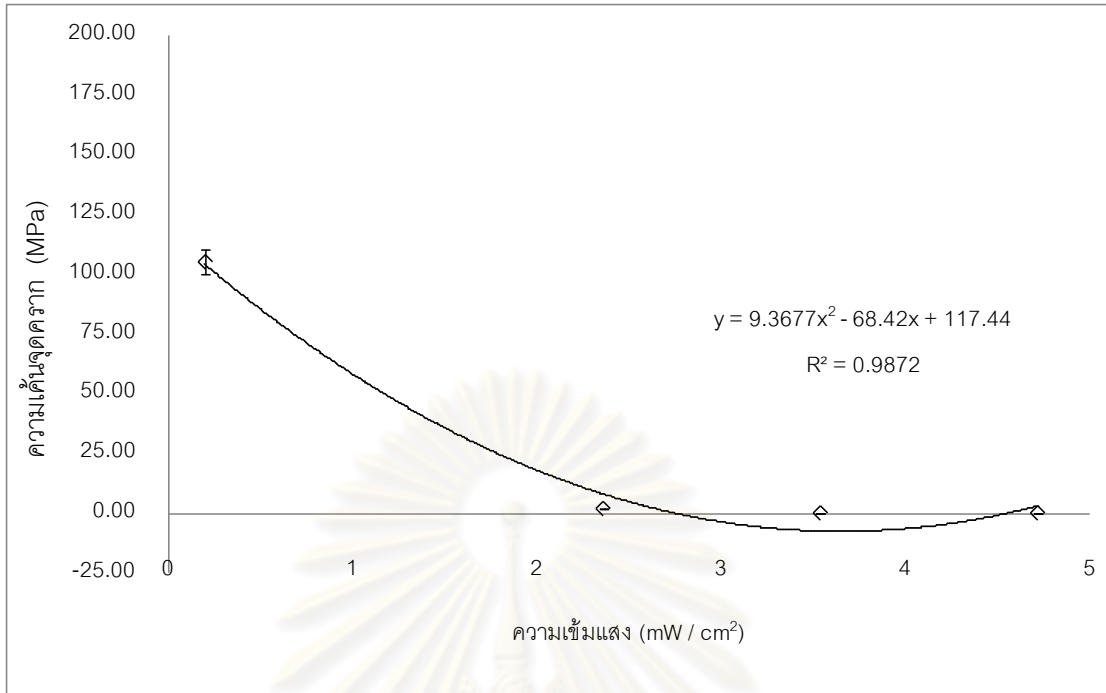
รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ P152 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ



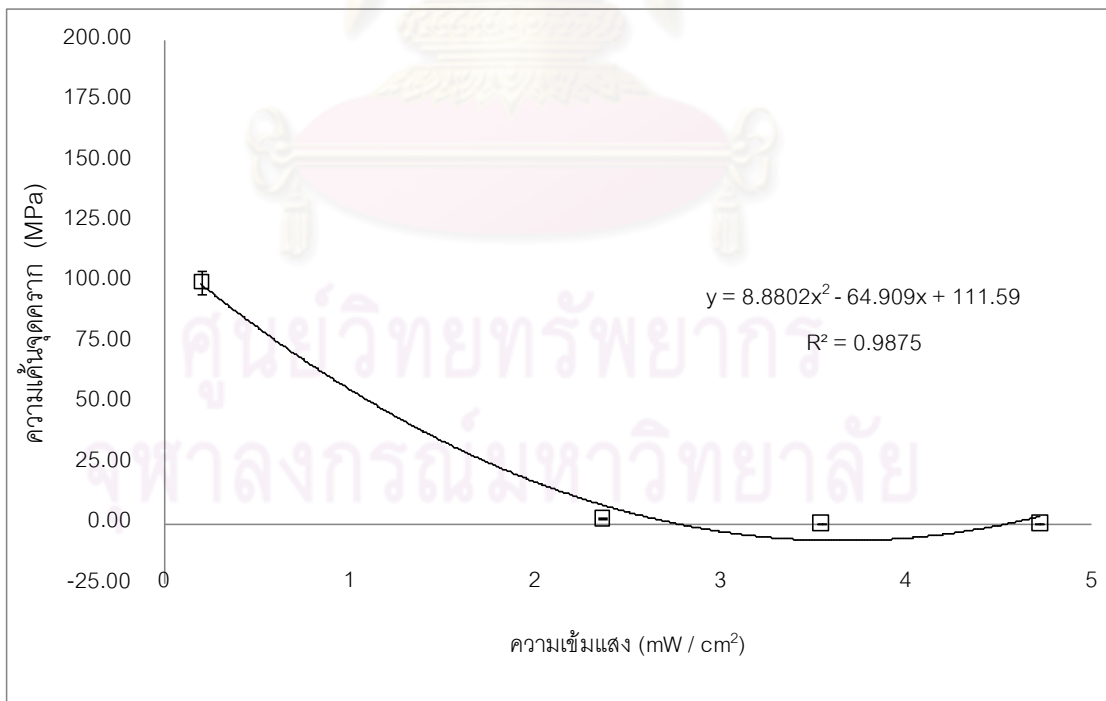
รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ P301 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ



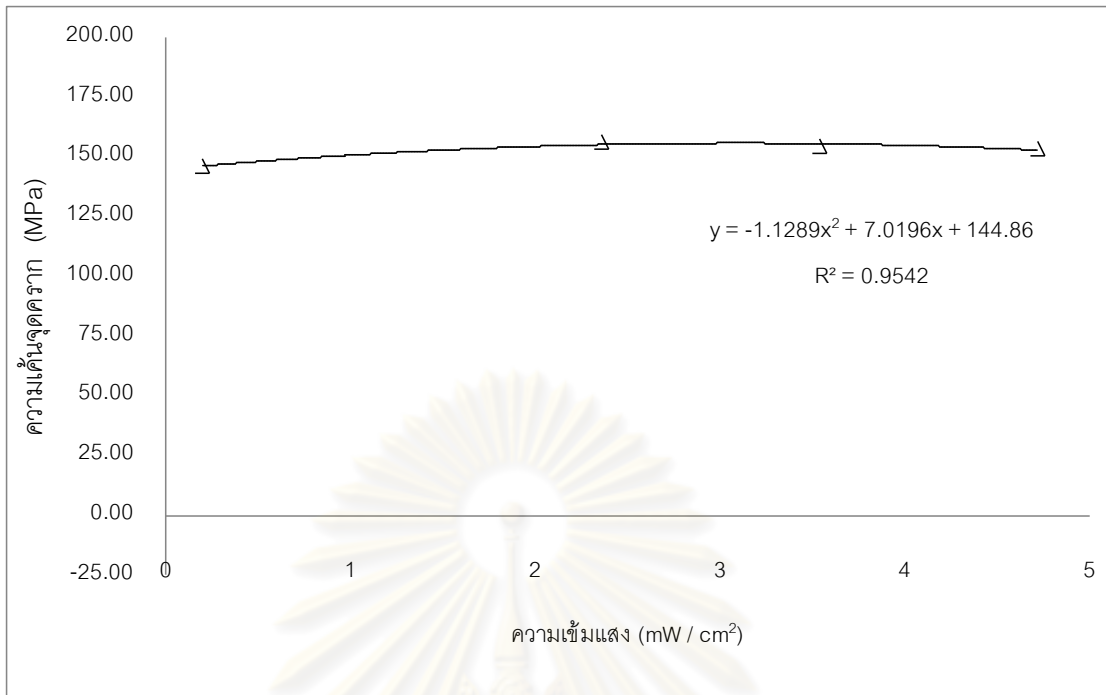
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุ P302 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ



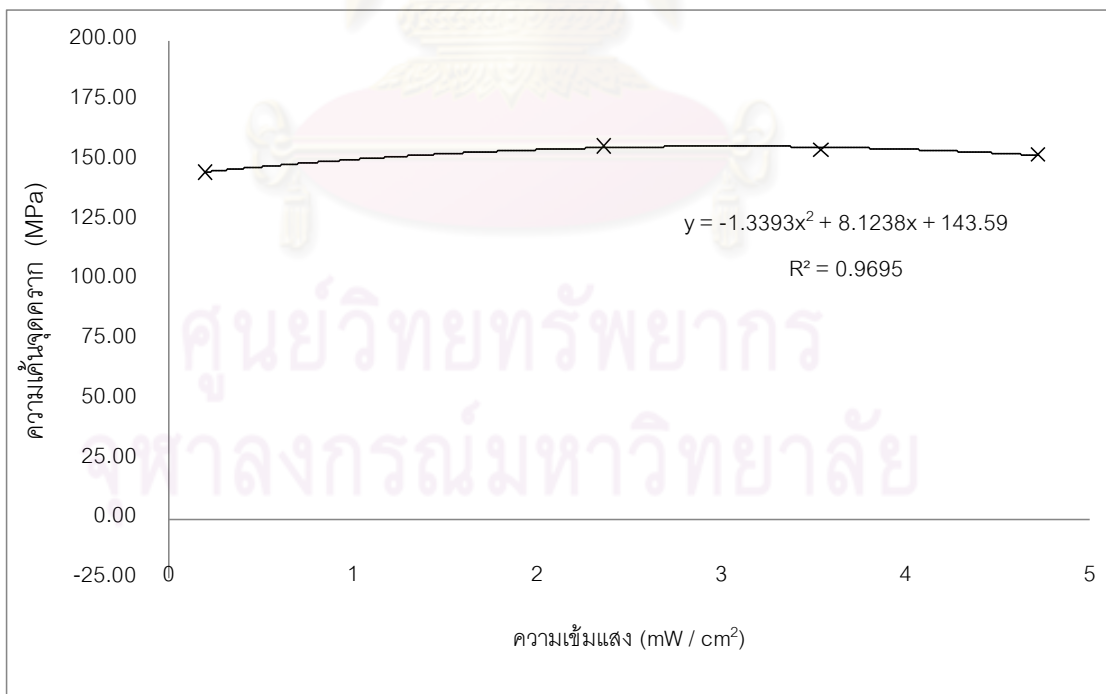
รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากของวัสดุ P151 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ



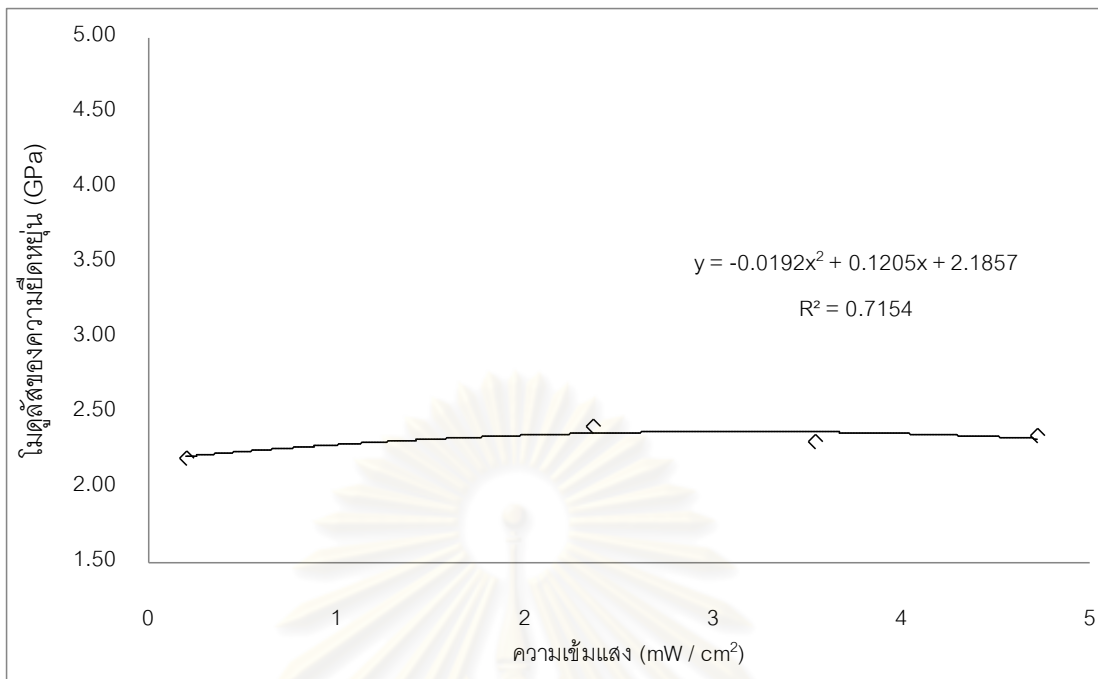
รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากของวัสดุ P152 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ



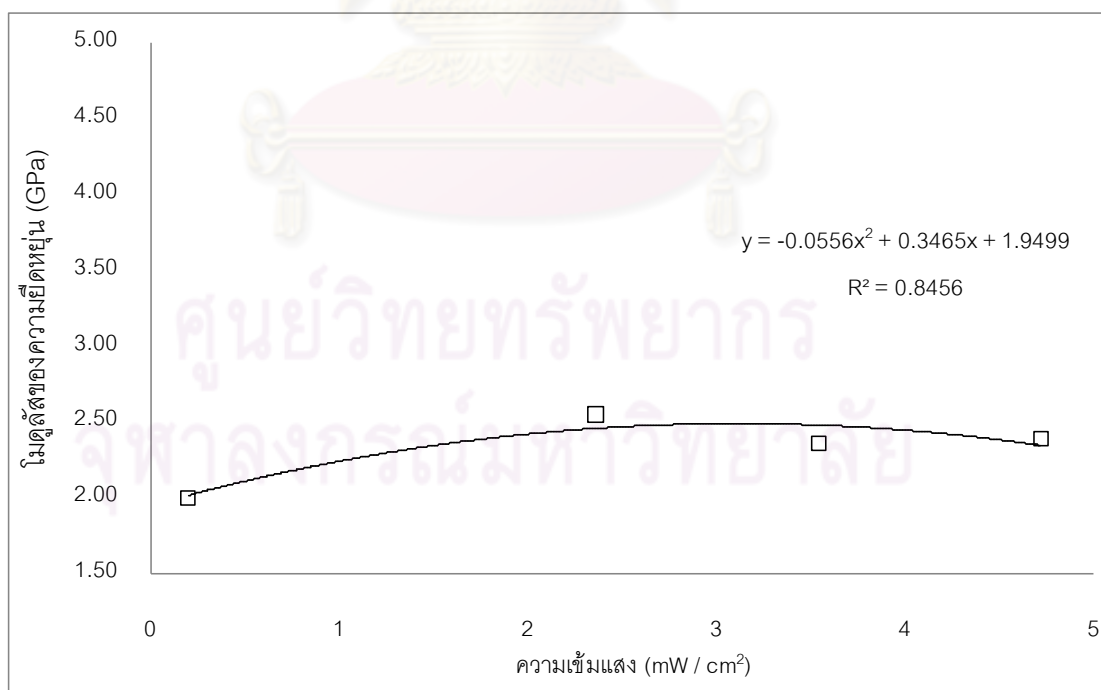
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากของวัสดุ P301 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที่ที่ความเข้มแสงต่างๆ



รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากของวัสดุ P302 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที่ที่ความเข้มแสงต่างๆ

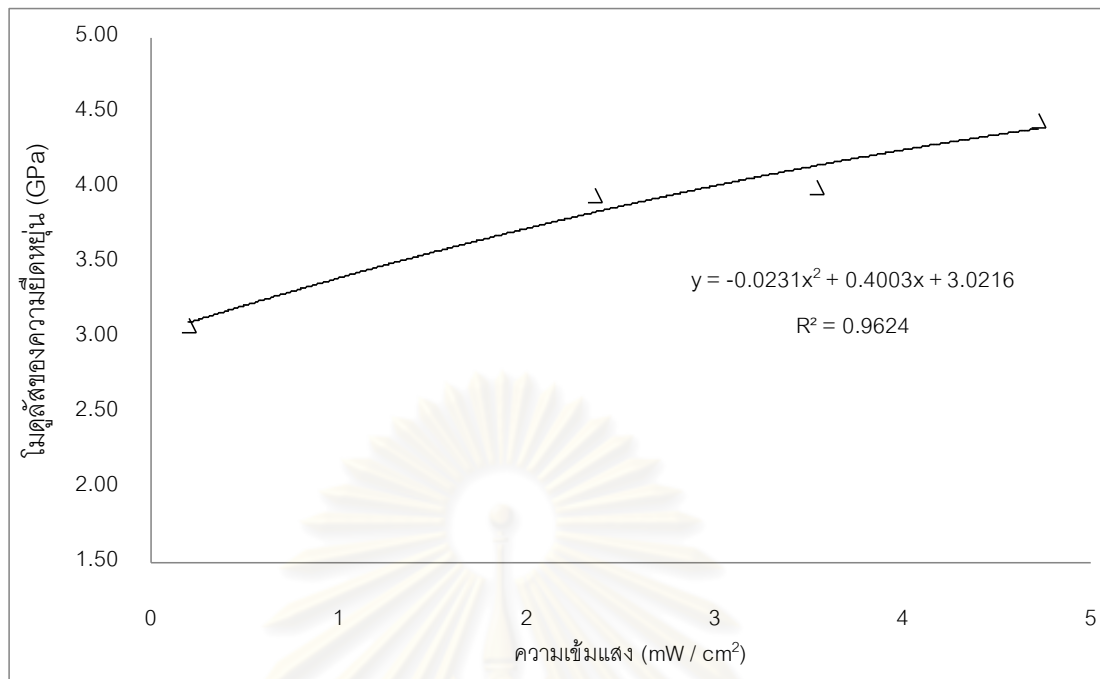


รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ P151 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ

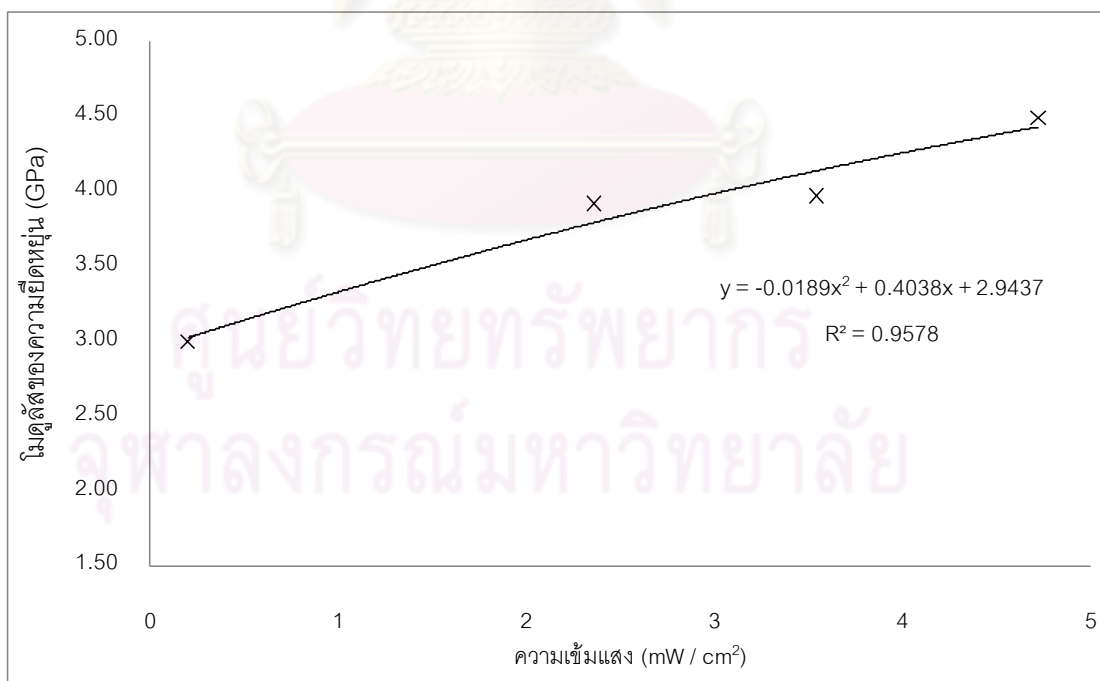


รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ P152 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ

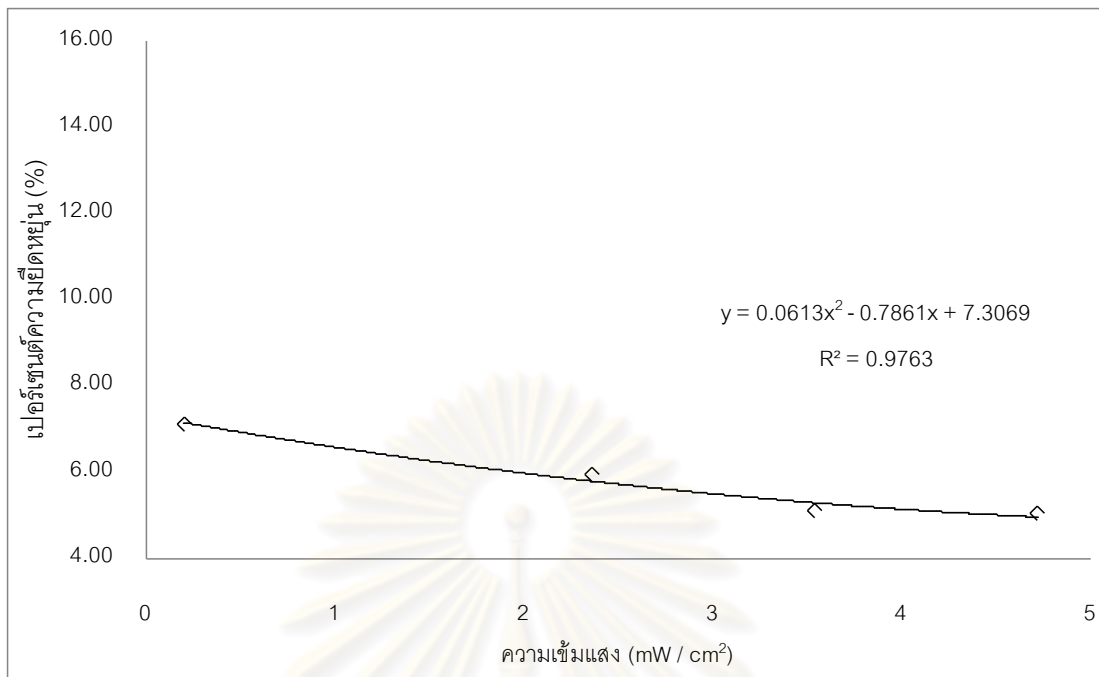




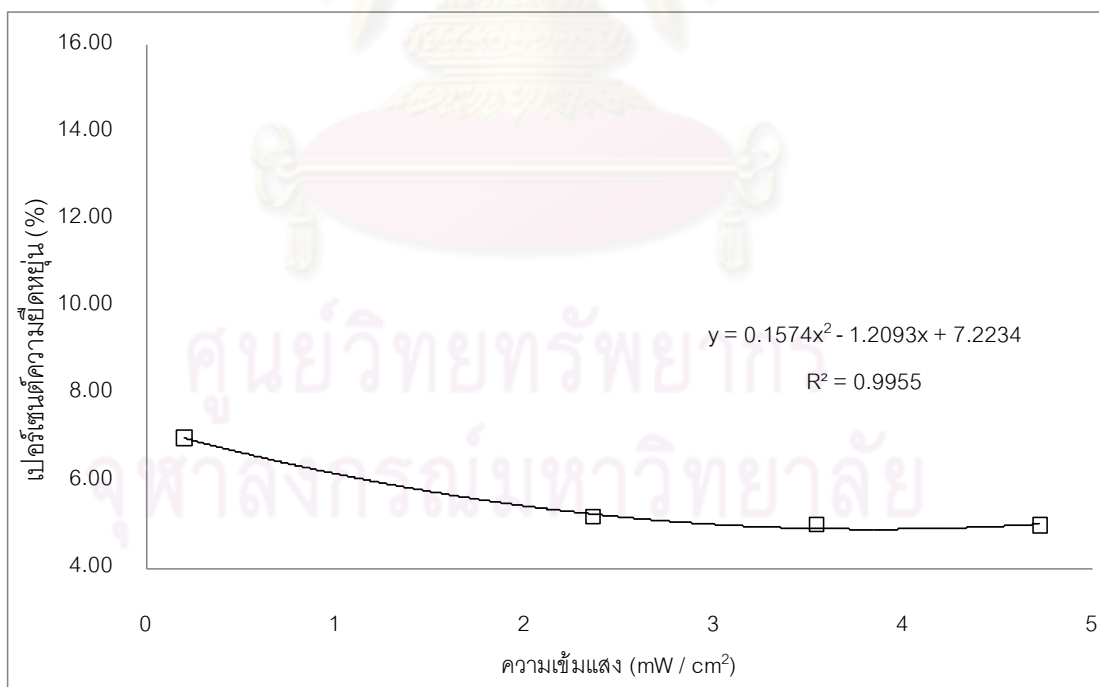
รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ P301 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ



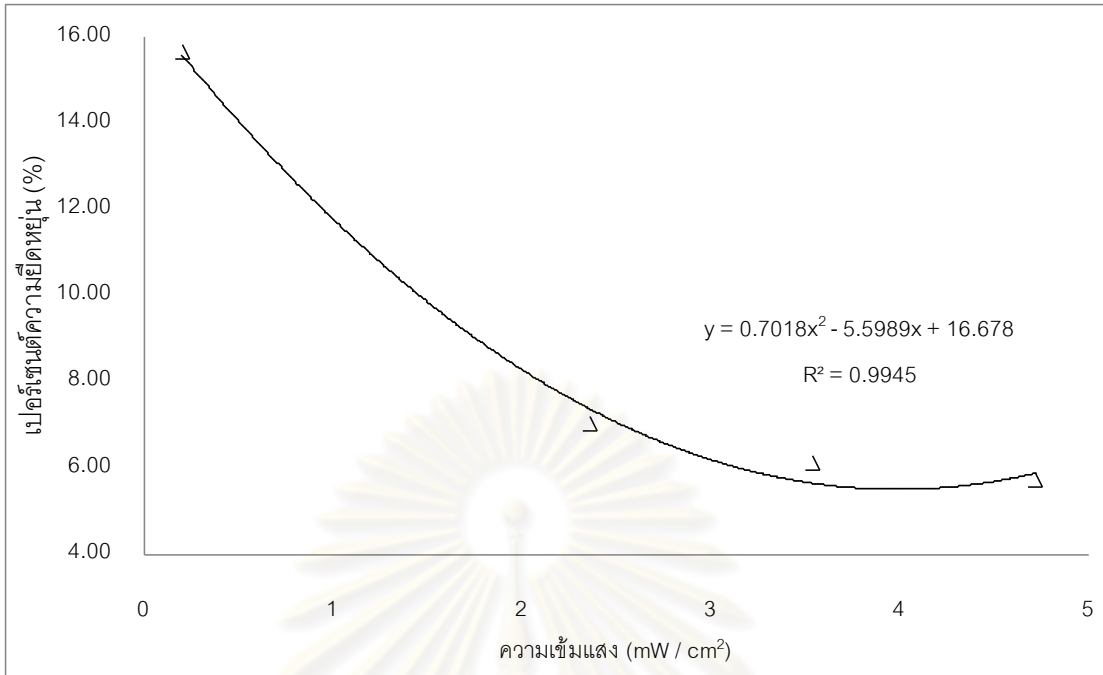
รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ P302 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ



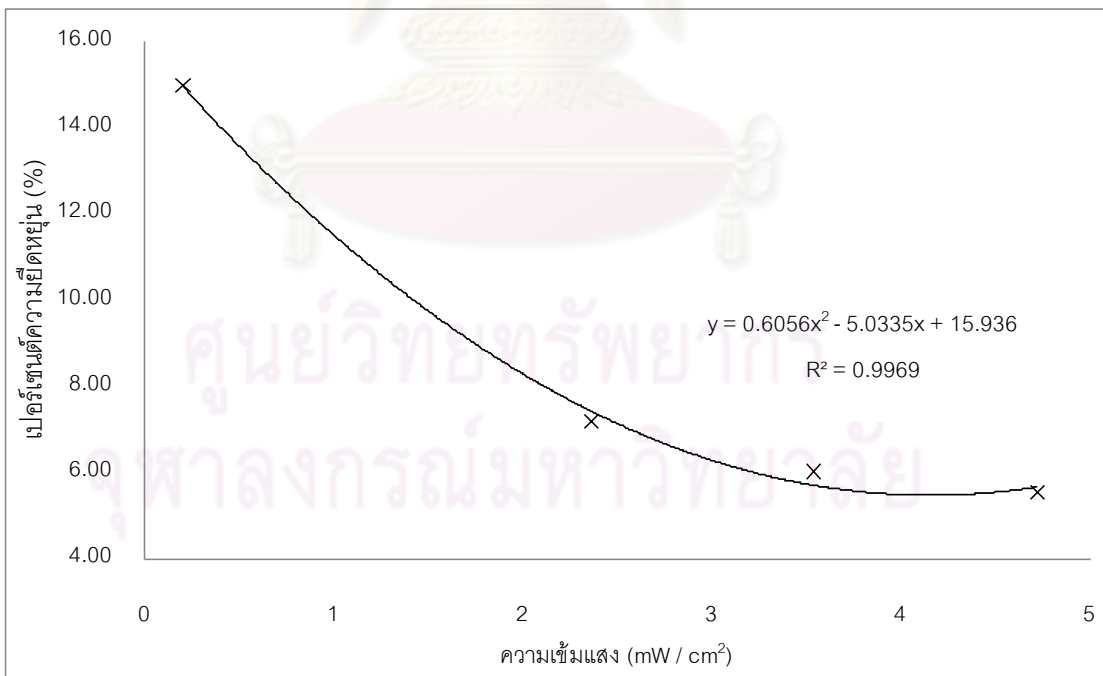
รูปที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุ P151 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ



รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุ P152 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ



รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุ P301 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ



รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของวัสดุ P302 หลังผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาทีที่ความเข้มแสงต่างๆ

ตาราง 4.76 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับความเข้มแสงยูวี

ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
P151	$y = -0.8455x^2 + 3.8463x + 104.82$	61.33
P152	$y = -1.3142x^2 + 7.7786x + 96.917$	80.03
P301	$y = -1.5553x^2 + 10.607x + 148.01$	99.83
P302	$y = -1.0155x^2 + 6.8213x + 154.61$	99.46

ตาราง 4.77 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับความเข้มแสงยูวี

ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
P151	$y = 9.3677x^2 - 68.42x + 117.44$	98.72
P152	$y = 8.8802x^2 - 64.909x + 111.59$	98.75
P301	$y = -1.1289x^2 + 7.0196x + 144.86$	95.42
P302	$y = -1.3393x^2 + 8.1238x + 143.59$	96.95

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.78 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับความเข้มแสงยูวี

ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
P151	$y = -0.0192x^2 + 0.1205x + 2.1857$	71.54
P152	$y = -0.0556x^2 + 0.3465x + 1.9499$	84.56
P301	$y = -0.0231x^2 + 0.4003x + 3.0216$	96.24
P302	$y = -0.0189x^2 + 0.4038x + 2.9437$	95.78

ตาราง 4.79 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับความเข้มแสงยูวี

ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
P151	$y = -0.0189x^2 + 0.4038x + 2.9437$	95.78
P152	$y = 0.1574x^2 - 1.2093x + 7.2234$	99.55
P301	$y = 0.7018x^2 - 5.5989x + 16.678$	99.45
P302	$y = 0.6056x^2 - 5.0335x + 15.936$	99.69

#### 4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกล

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ทำการศึกษาโดยการประมาณรูปแบบของความสัมพันธ์เป็นแบบโพลิโนเมียลดีกรี 2 ดังต่อไปนี้

4.6.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับคุณสมบัติเชิงกลด้านต่างๆมีดังต่อไปนี้

1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุที่ทำการศึกษาแสดงไว้ในรูปที่ 4.65 - 4.70 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกัน คือเมื่อค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า 100% โมดูลัสของความยืดหยุ่นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วย

2. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดของวัสดุที่ทำการศึกษาแสดงไว้ในรูปที่ 4.71 - 4.76 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันคือเมื่อค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดลดลงค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดมีแนวโน้มที่จะลดลง

3. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความเค้นจุดครากของวัสดุที่ทำการศึกษาแสดงไว้ในรูปที่ 4.77 - 4.82 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกันคือเมื่อค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดลดลงค่าความเค้นจุดครากมีแนวโน้มที่จะลดลง

4. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความทนทานต่อแรงกระทำของวัสดุที่ทำการศึกษาแสดงไว้ในรูปที่ 4.83 - 4.88 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกัน คือเมื่อค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความทนต่อแรงกระทำมีแนวโน้มที่จะลดลง

4.6.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับคุณสมบัติเชิงกลด้านต่างๆมีดังต่อไปนี้

1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดของวัสดุที่ทำการศึกษาแสดงไว้ในรูปที่ 4.89 - 4.94 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกัน คือเมื่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นมีแนวโน้มที่จะลดลง

2. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความเค้นจุดครากของวัสดุที่ทำการศึกษาดังไว้ในรูปที่ 4.95 – 4.100 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกัน คือเมื่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความเค้นจุดครากมีแนวโน้มที่จะลดลง

3. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความทนทานต่อแรงกระทำของวัสดุที่ทำการศึกษาดังไว้ในรูปที่ 4.101 – 4.106 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงลบต่อกัน คือเมื่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความทนทานต่อแรงกระทำมีแนวโน้มที่จะลดลง

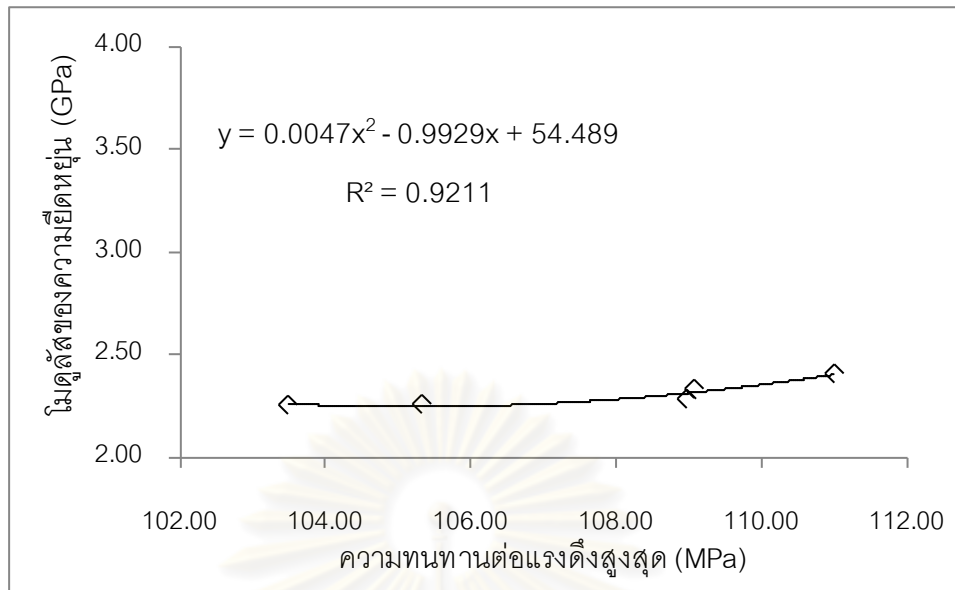
4.6.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาด กับคุณสมบัติเชิงกลด้านต่างๆมีดังต่อไปนี้

1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับค่าความเค้นจุดครากวัสดุที่ทำการศึกษาดังไว้ในรูปที่ 4.107 – 4.112 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกัน คือเมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดมีค่าลดลง ค่าความเค้นจุดครากก็มีแนวโน้มที่ลดลงด้วย

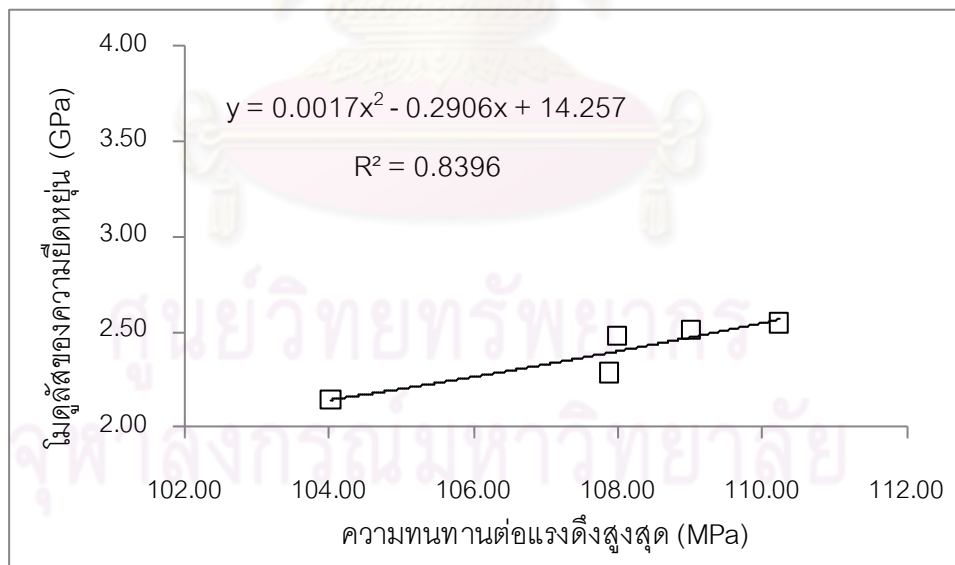
2. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับค่าความทนทานต่อแรงกระทำของวัสดุที่ทำการศึกษาดังไว้ในรูปที่ 4.113 – 4.118 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกัน คือเมื่อค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าลดลงค่าความทนทานต่อแรงกระทำก็มีแนวโน้มที่จะลดลงด้วย

4.6.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับคุณสมบัติเชิงกลด้านต่างๆมีดังต่อไปนี้

1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับค่าความทนทานต่อแรงกระทำของวัสดุที่ทำการศึกษาดังไว้ในรูปที่ 4.119 – 4.124 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มในเชิงบวกต่อกัน คือเมื่อค่าความเค้นจุดครากมีค่าลดลงค่าความทนทานต่อแรงกระทำก็มีแนวโน้มที่จะลดลงด้วย

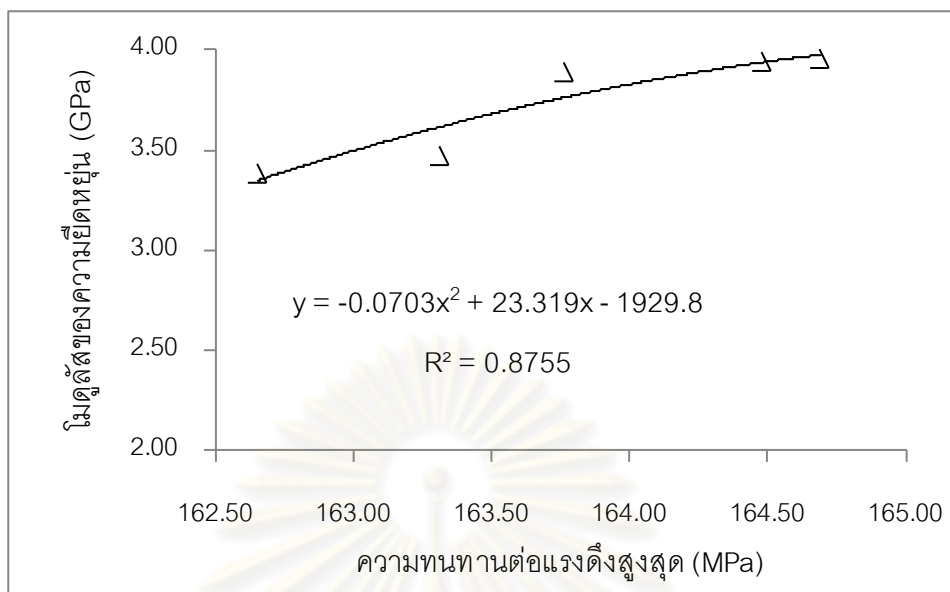


รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$

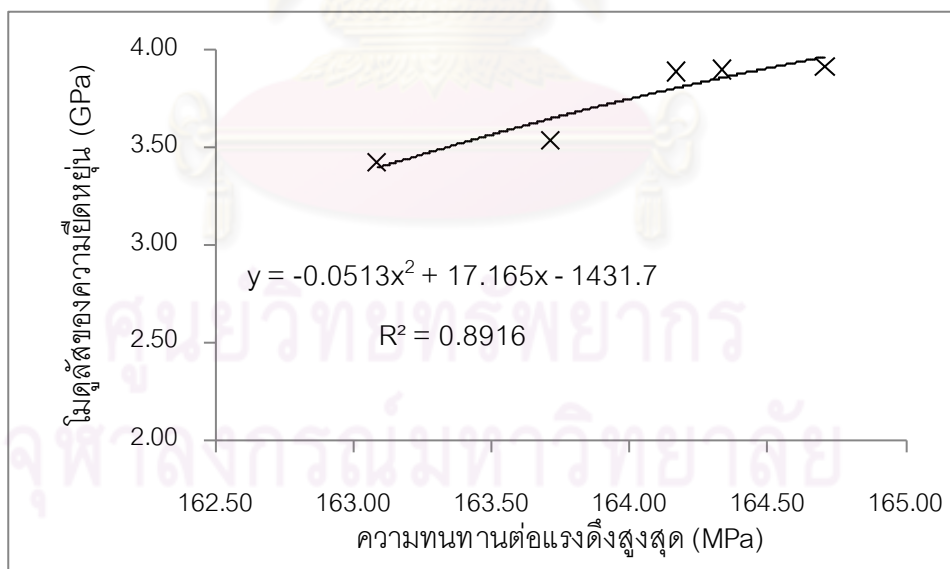


รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$

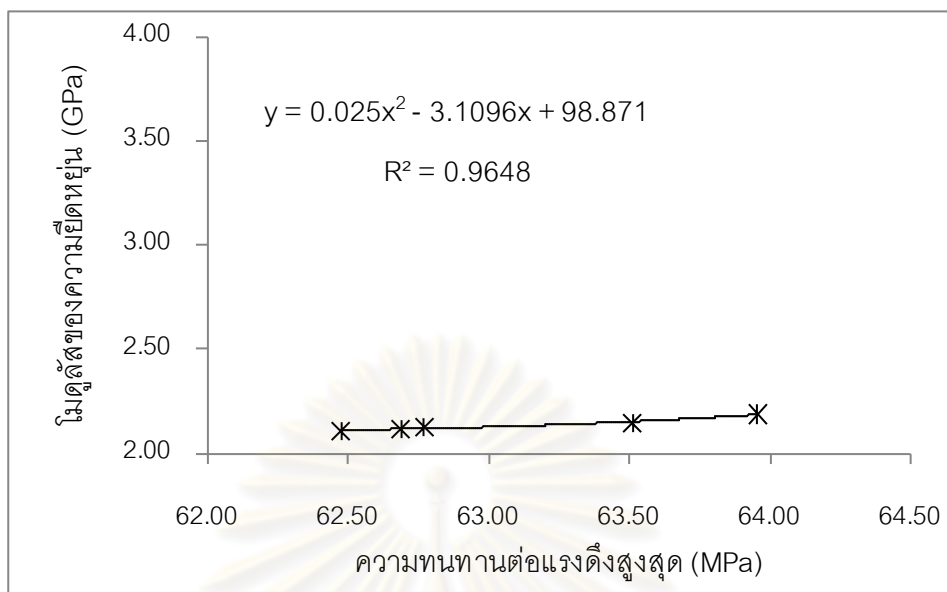




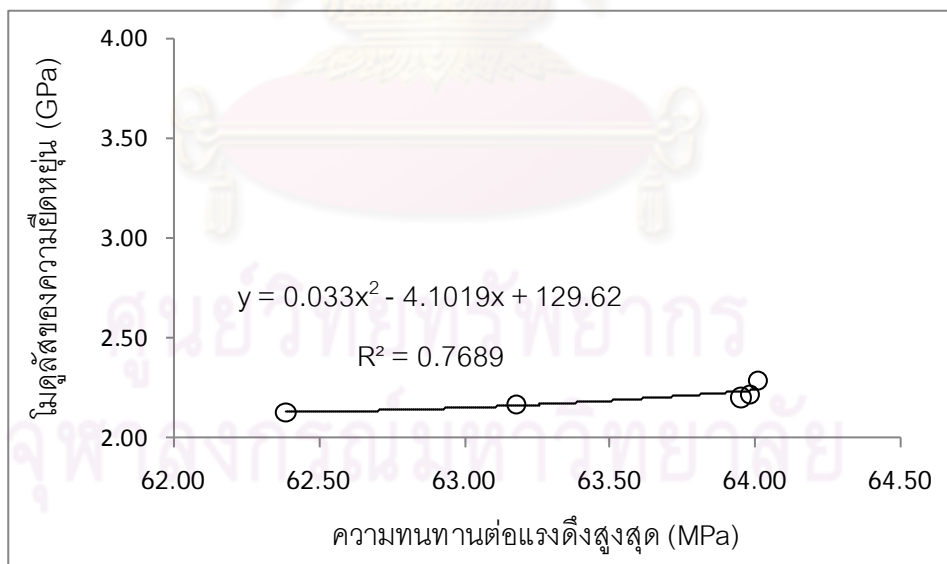
รูปที่ 4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



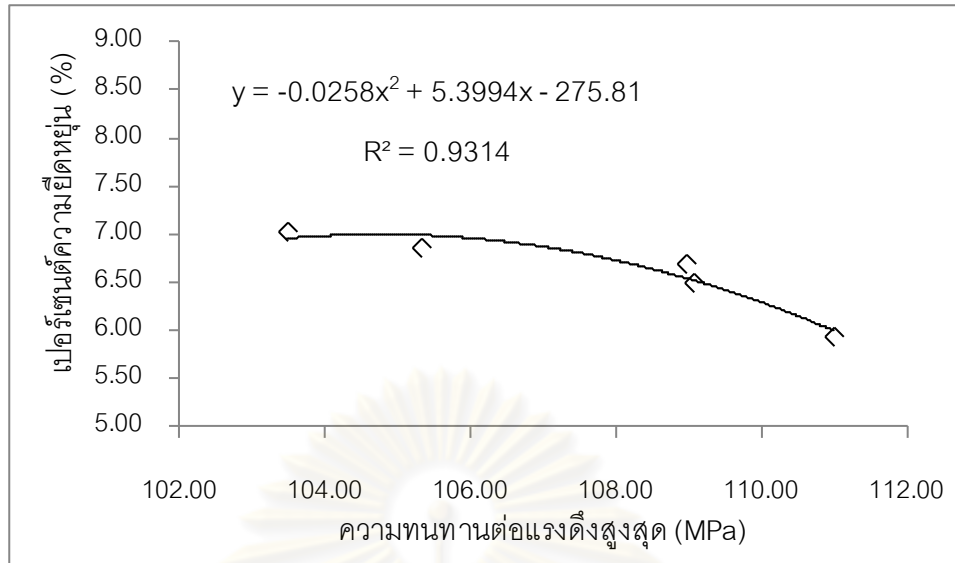
รูปที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของ P1302 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



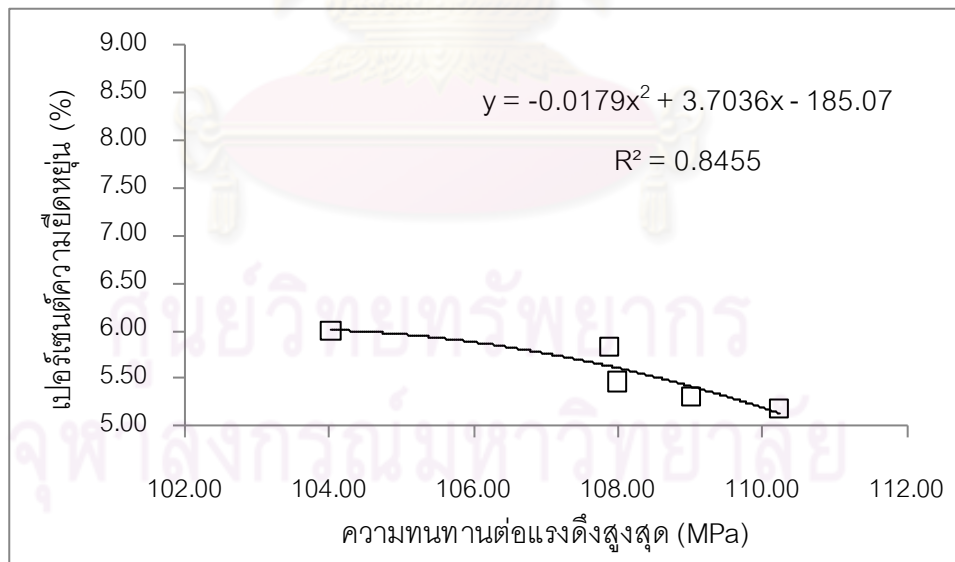
รูปที่ 4.69 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



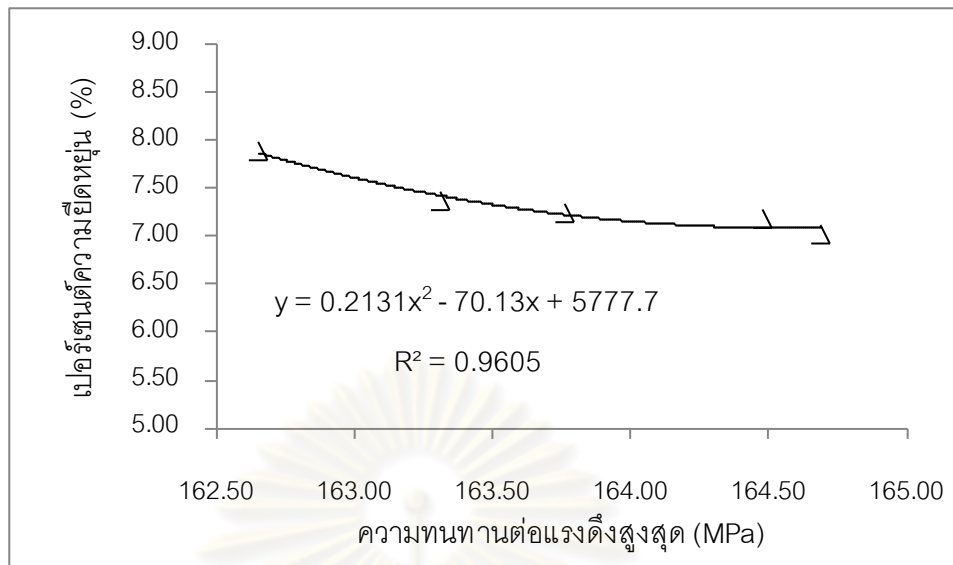
รูปที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



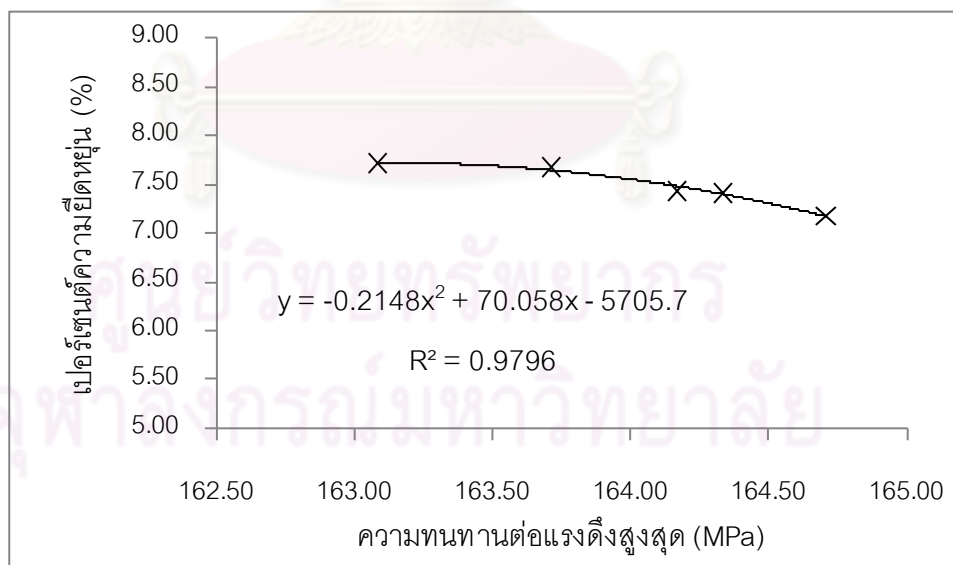
รูปที่ 4.71 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดของ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



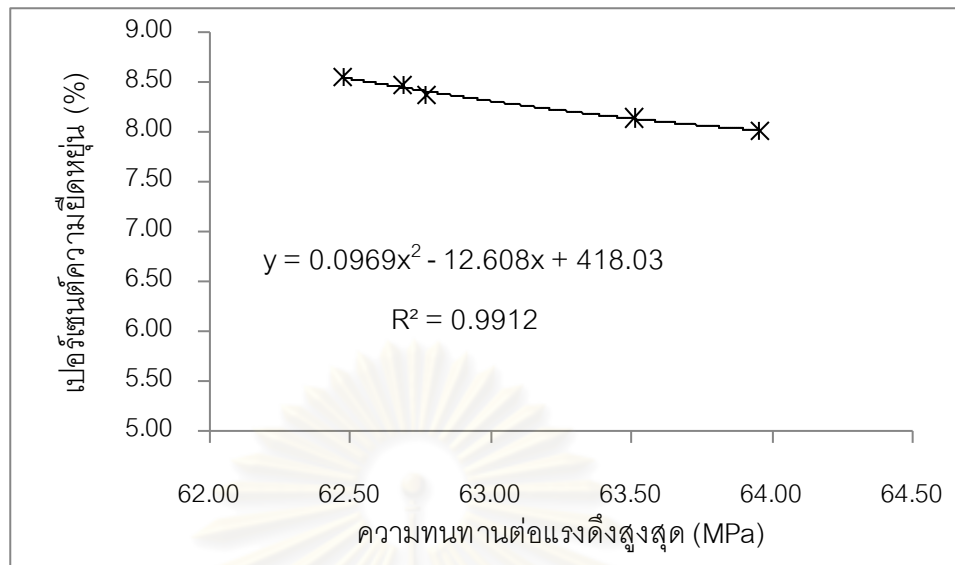
รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดของ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



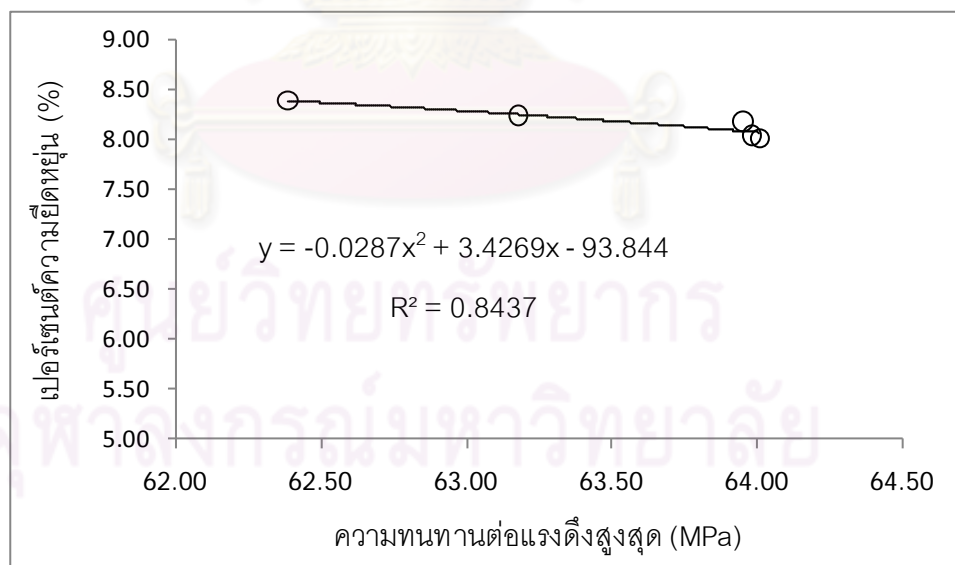
รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดของ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



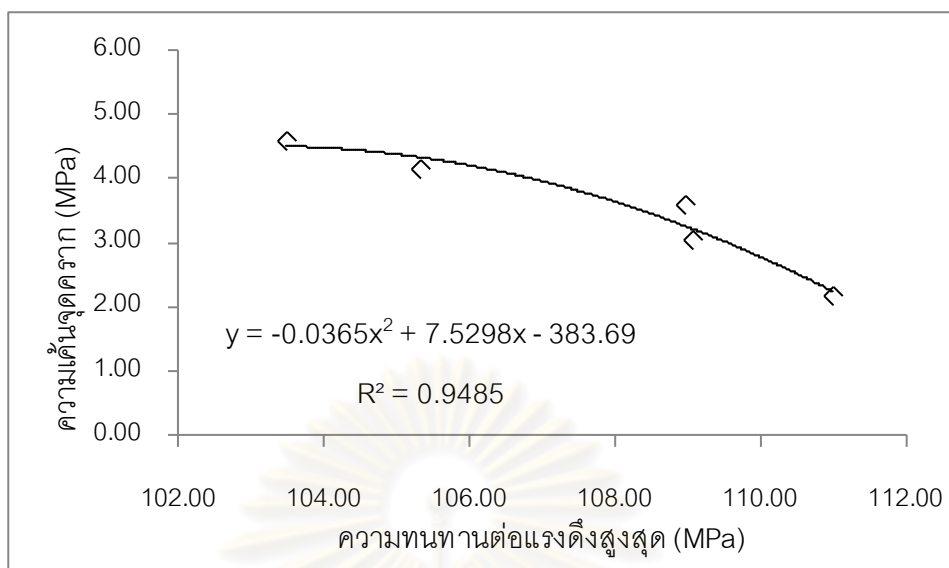
รูปที่ 4.74 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดของ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



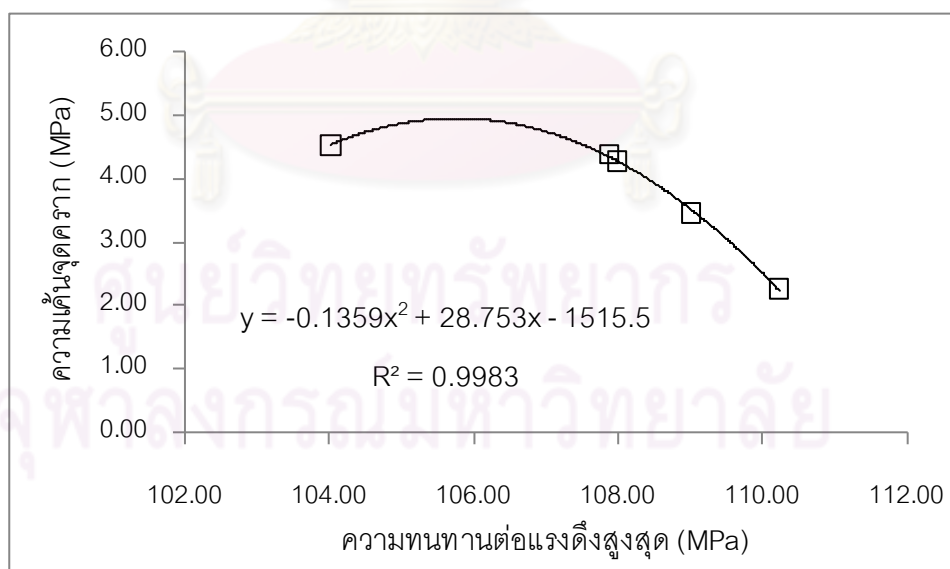
รูปที่ 4.75 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดของ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



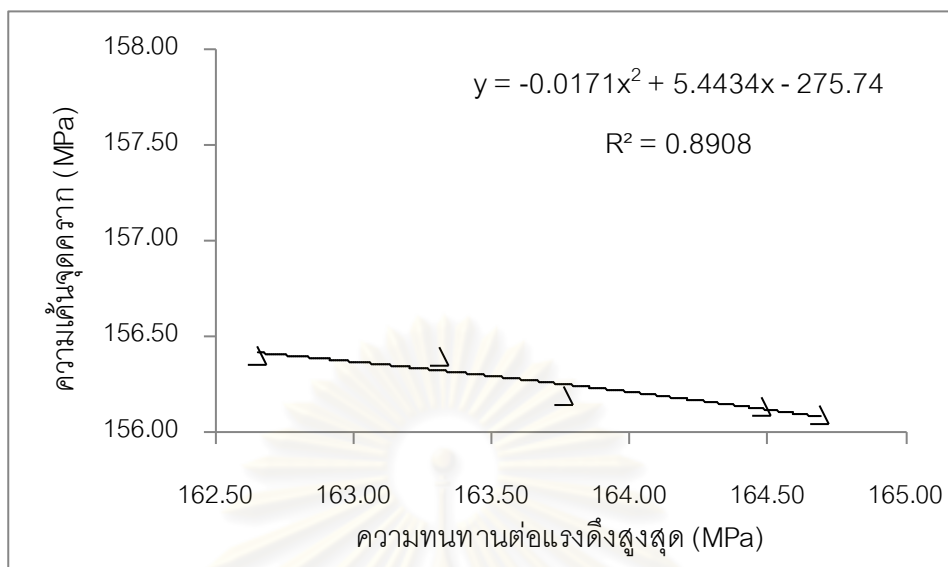
รูปที่ 4.76 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดของ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



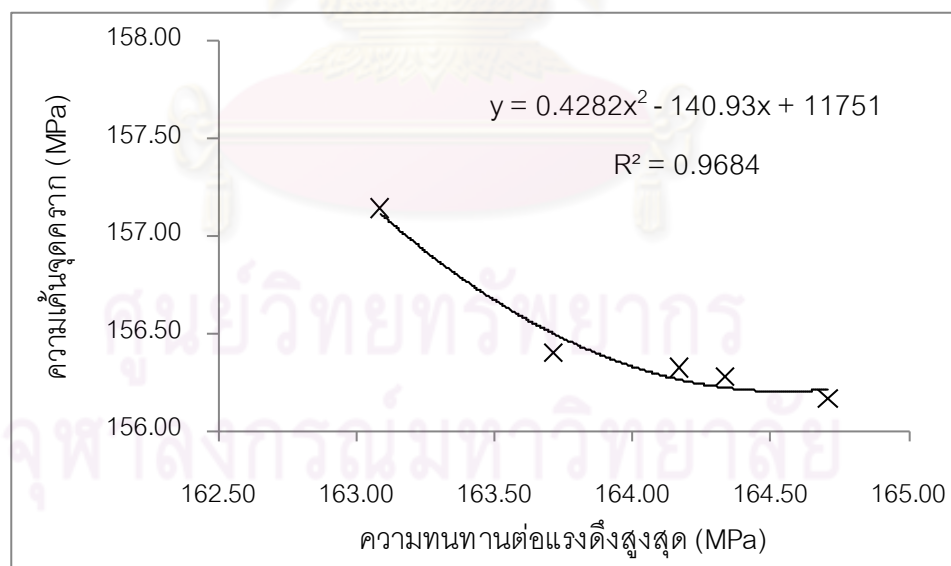
รูปที่ 4.77 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความเค้นจุดครากของ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



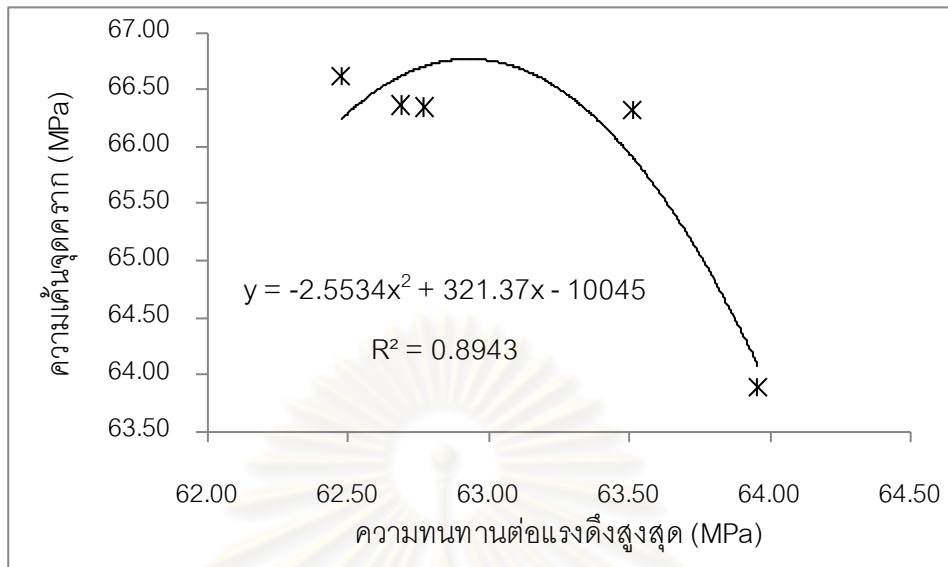
รูปที่ 4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความเค้นจุดครากของ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



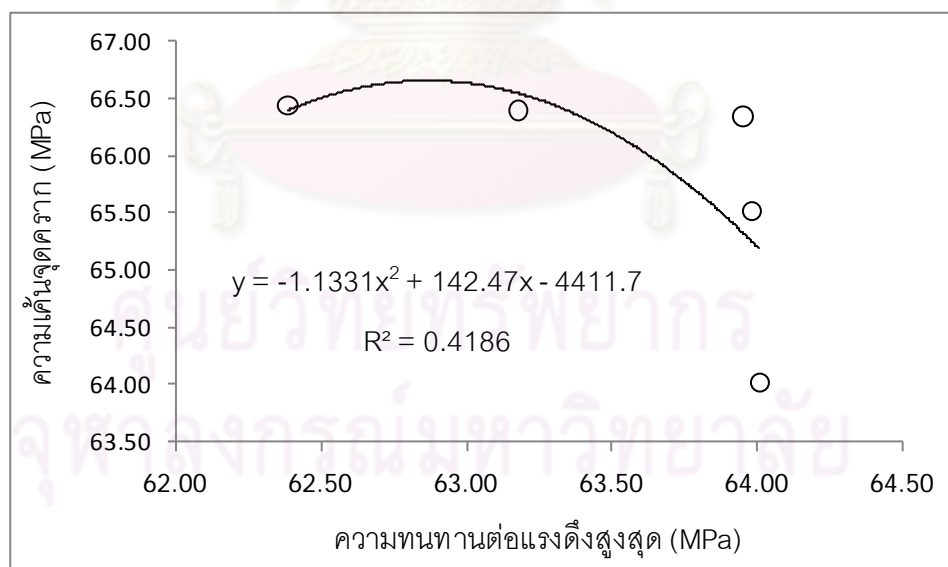
รูปที่ 4.79 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความเค้นจุดครากของ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 4.80 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความเค้นจุดครากของ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$

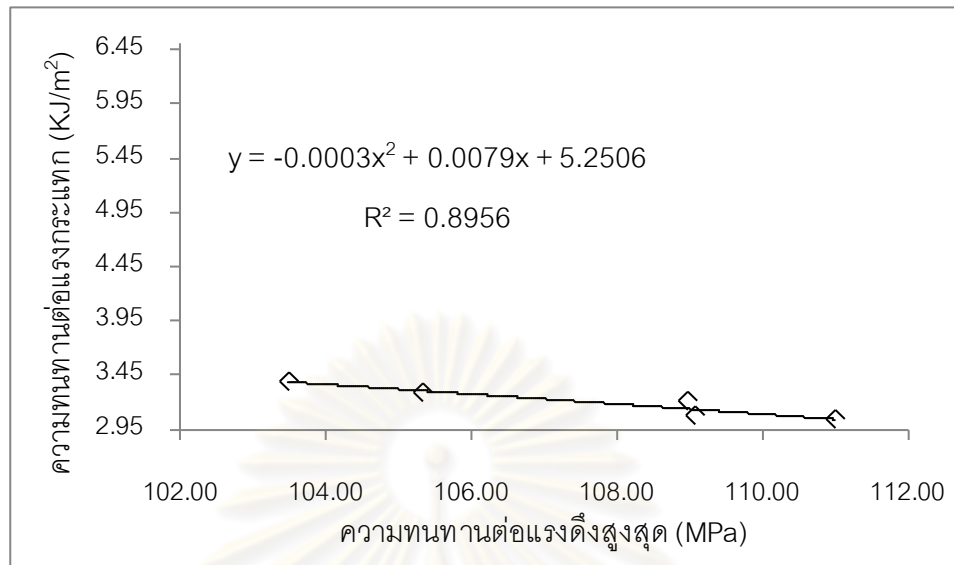


รูปที่ 4.81 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความเค้นจุดครากของ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$

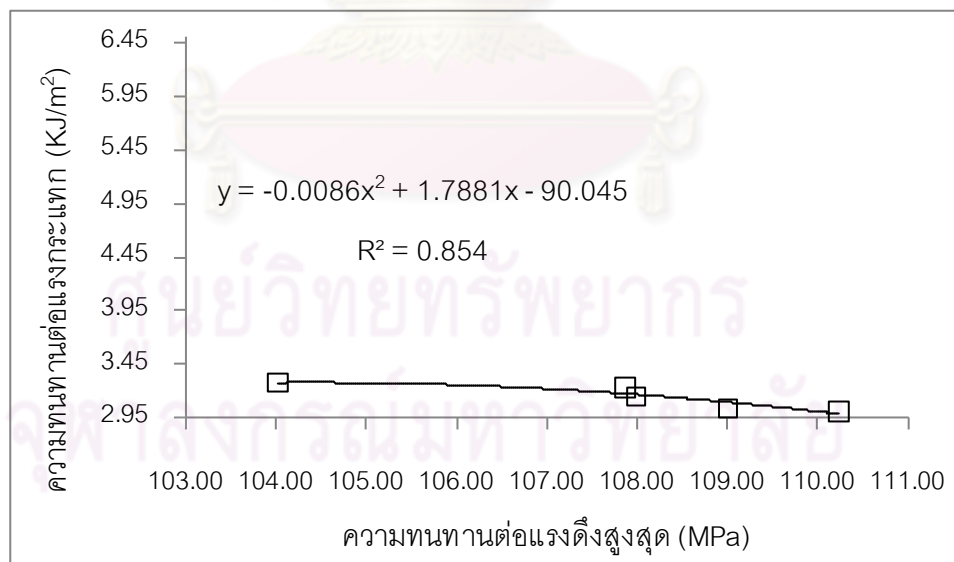


รูปที่ 4.82 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความเค้นจุดครากของ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$

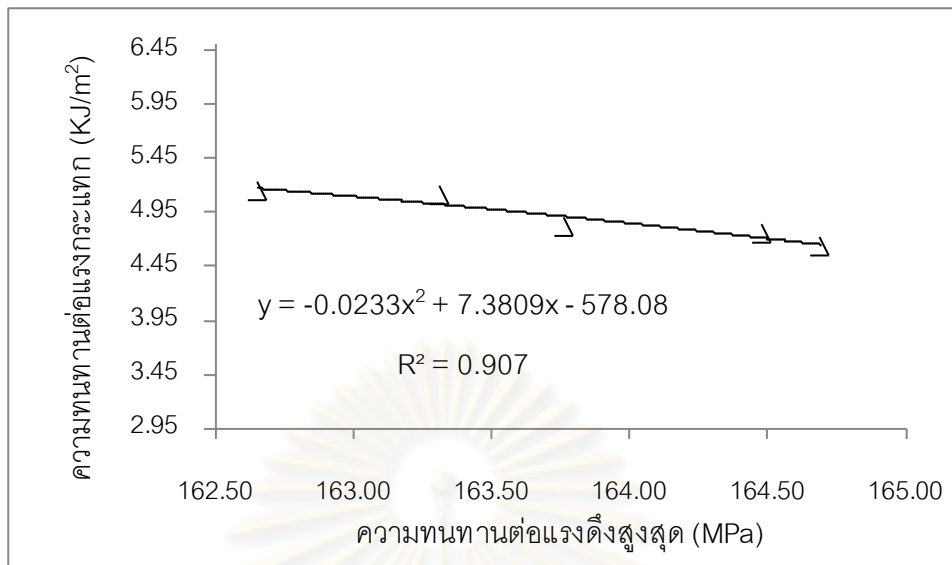




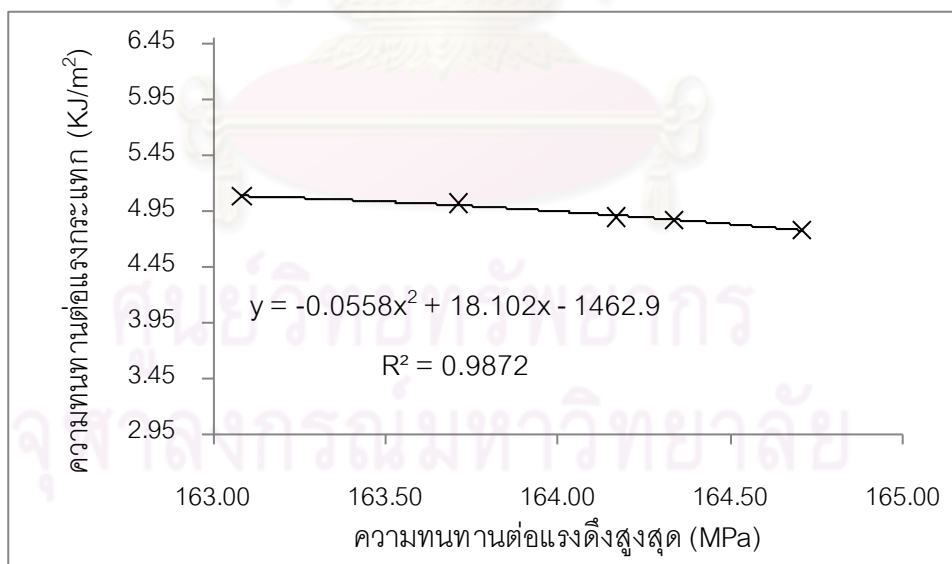
รูปที่ 4.83 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



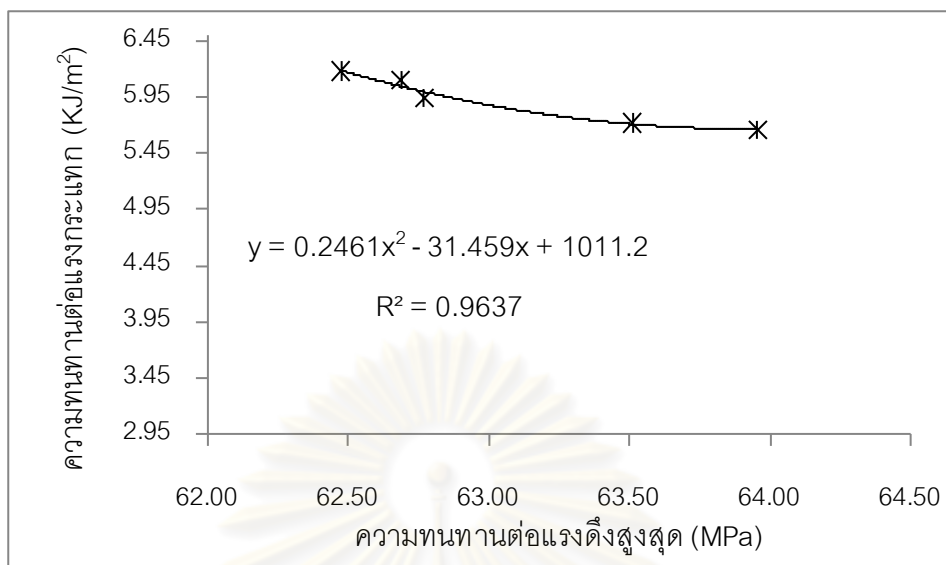
รูปที่ 4.84 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



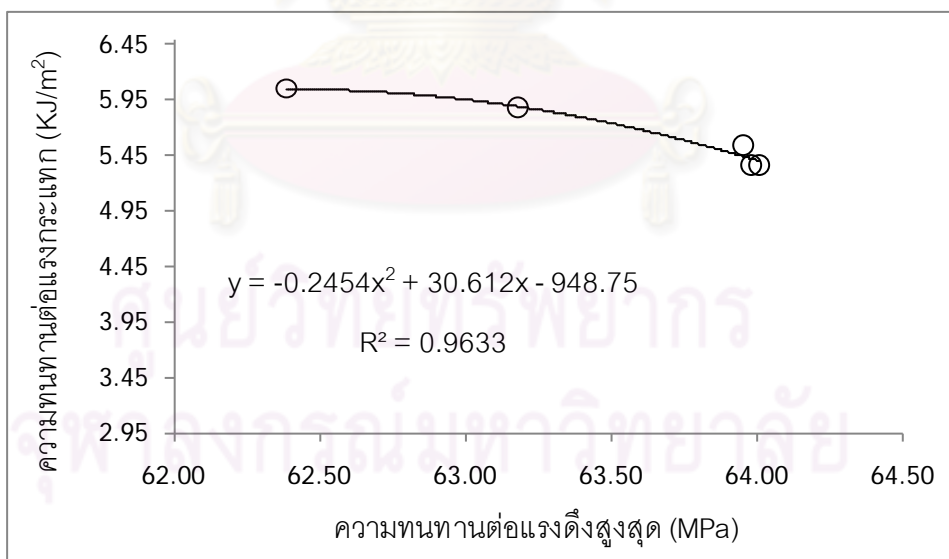
รูปที่ 4.85 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



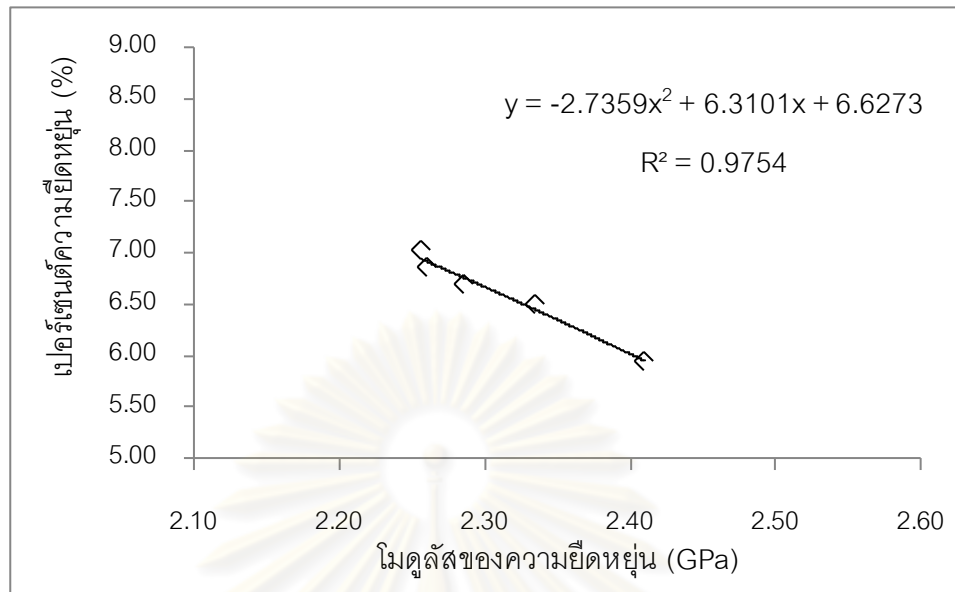
รูปที่ 4.86 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



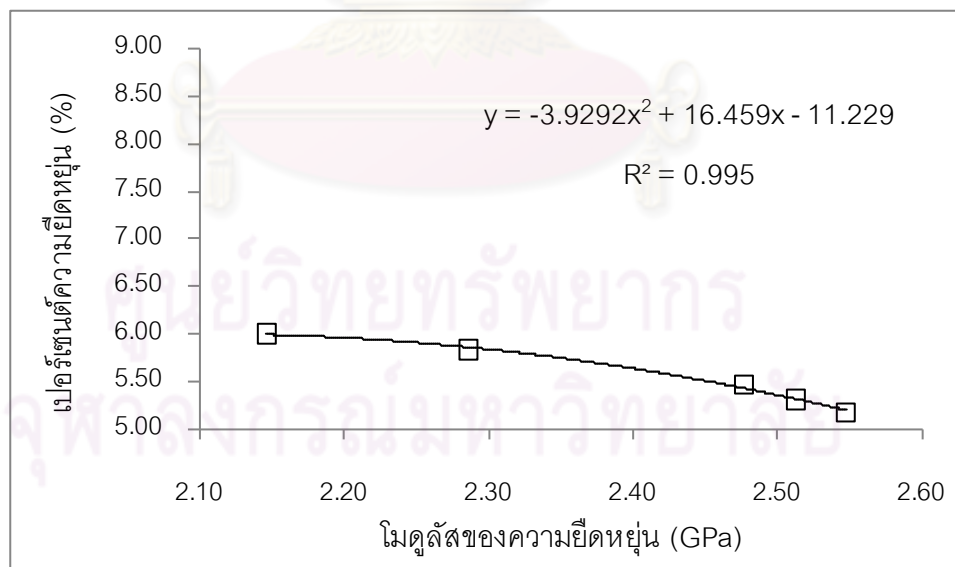
รูปที่ 4.87 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



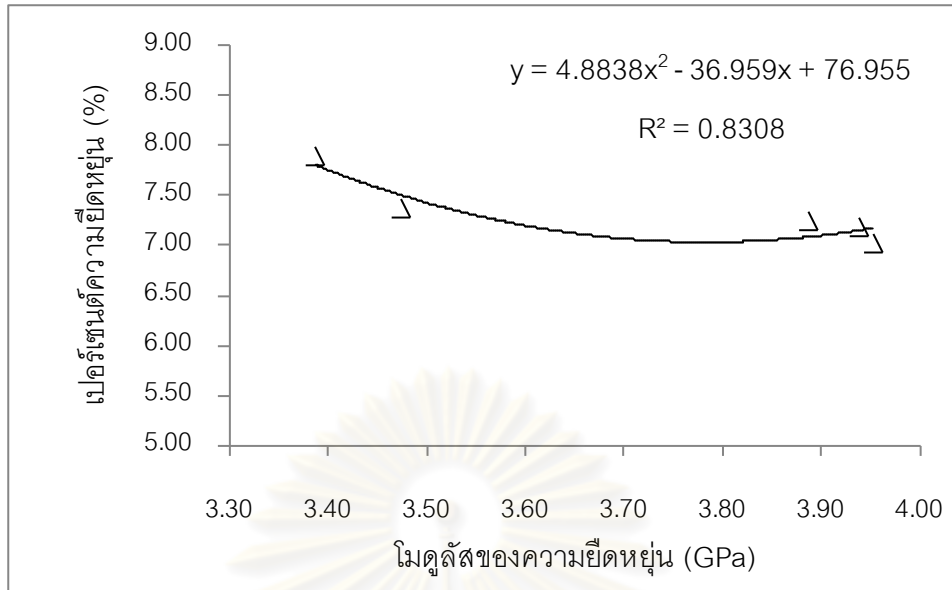
รูปที่ 4.88 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



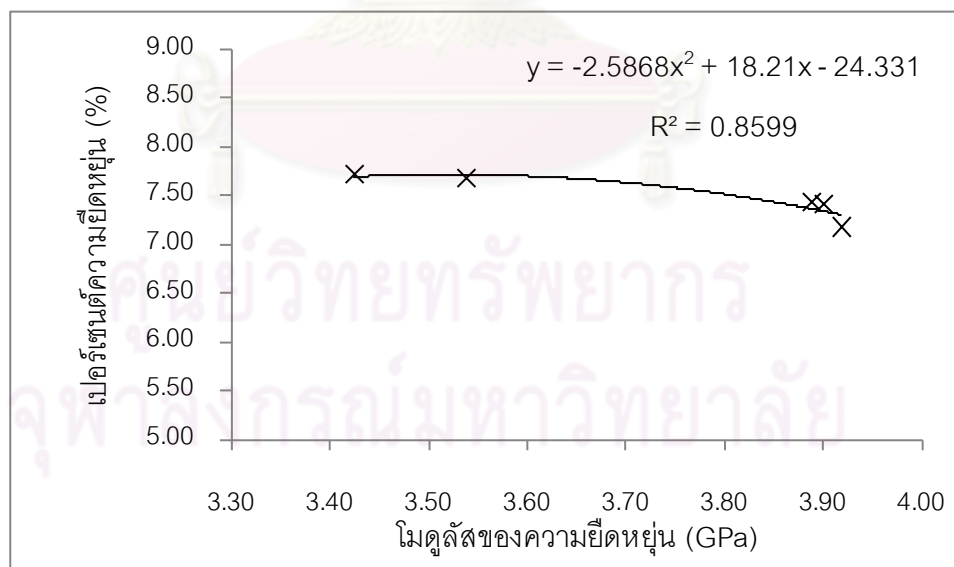
รูปที่ 4.89 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุด  
ขาดของ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



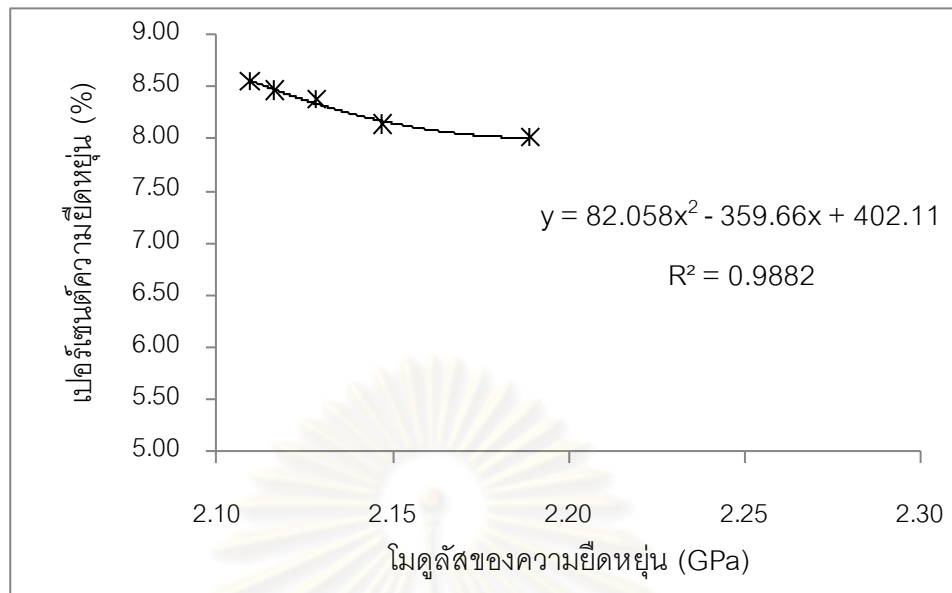
รูปที่ 4.90 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุด  
ขาดของ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



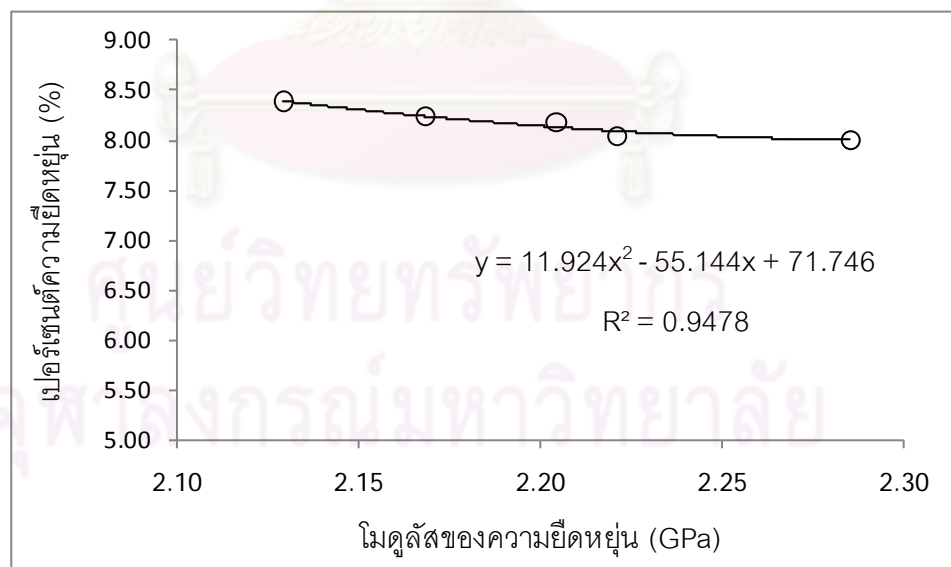
รูปที่ 4.91 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



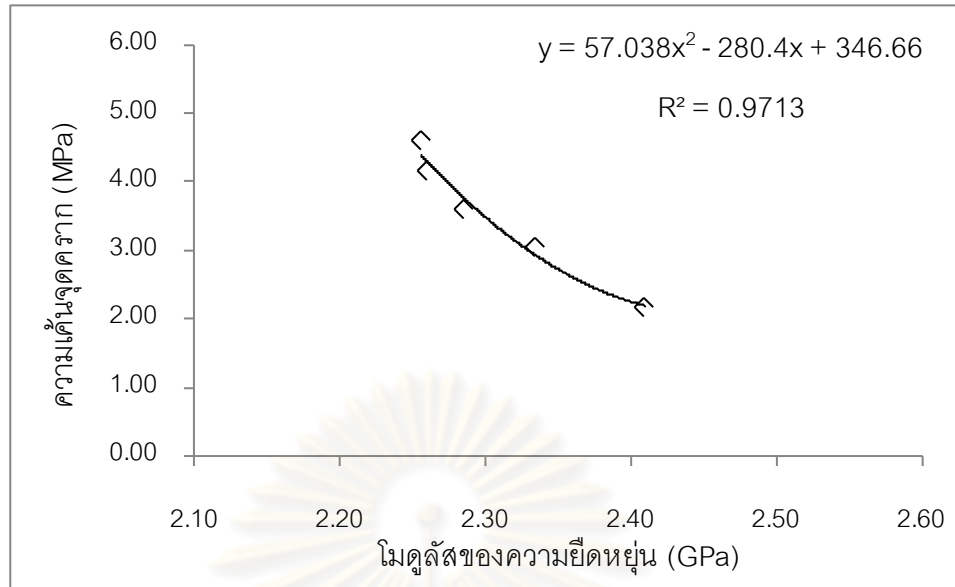
รูปที่ 4.92 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



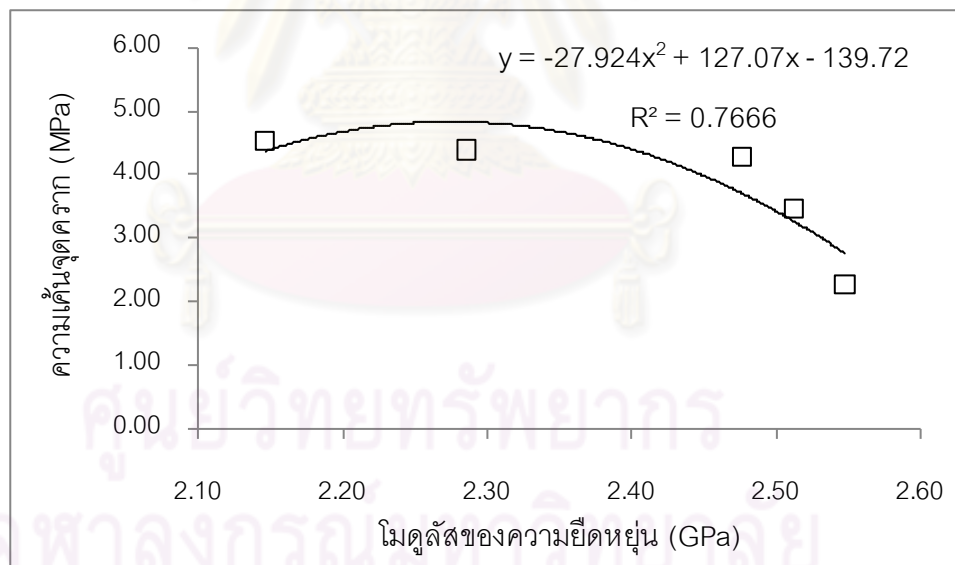
รูปที่ 4.93 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



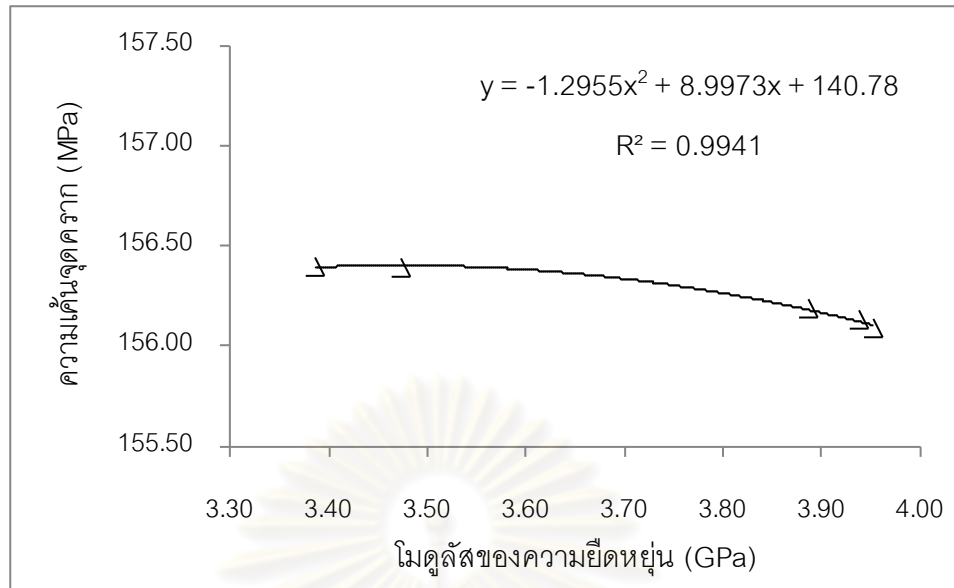
รูปที่ 4.94 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดของ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



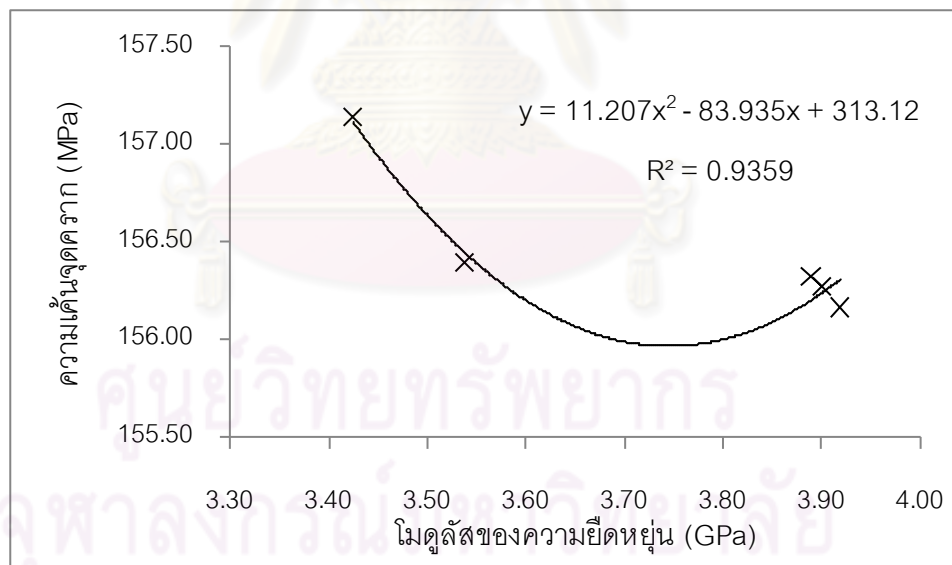
รูปที่ 4.95 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความเค้นจุดครากของ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 4.96 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความเค้นจุดครากของ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$

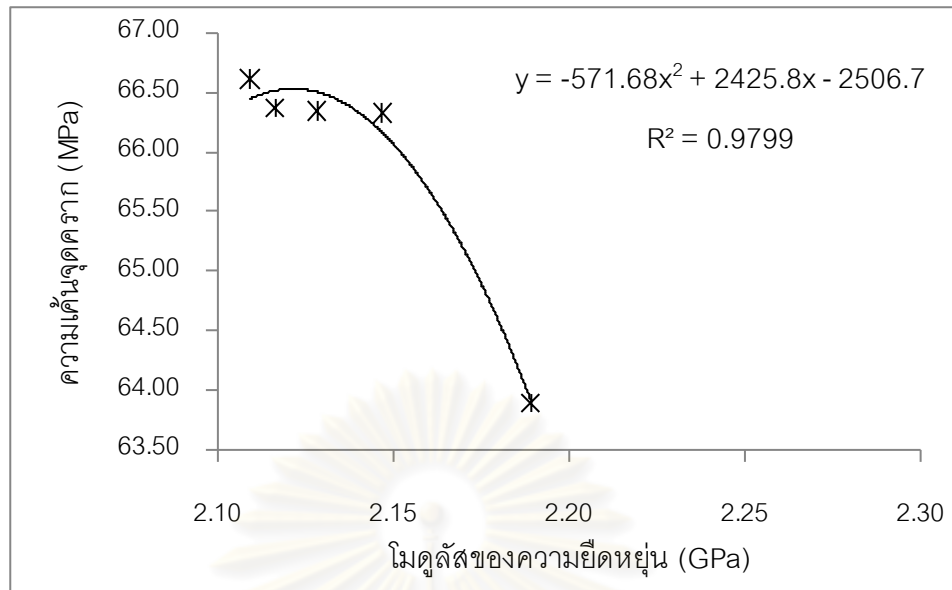


รูปที่ 4.97 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความเค้นจุดครากของ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$

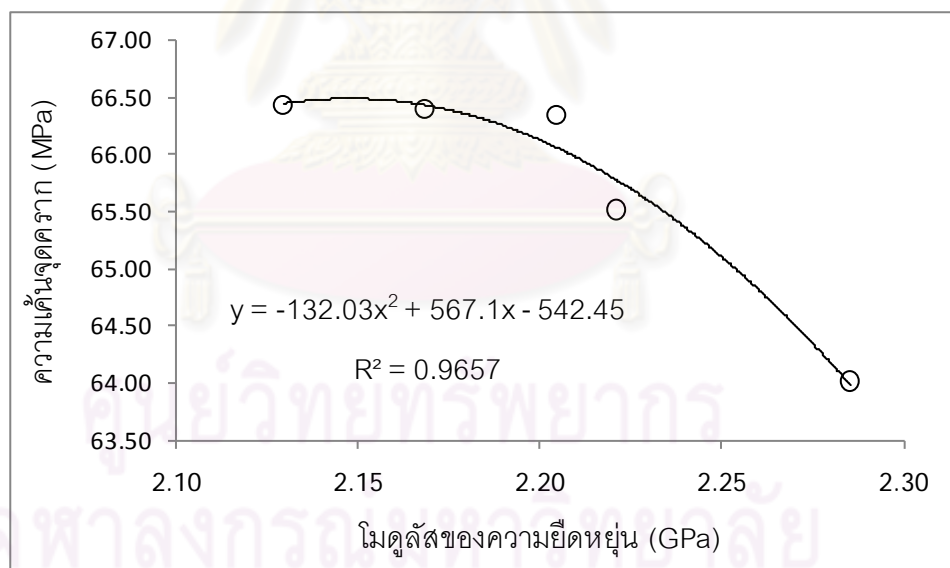


รูปที่ 4.98 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความเค้นจุดครากของ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$

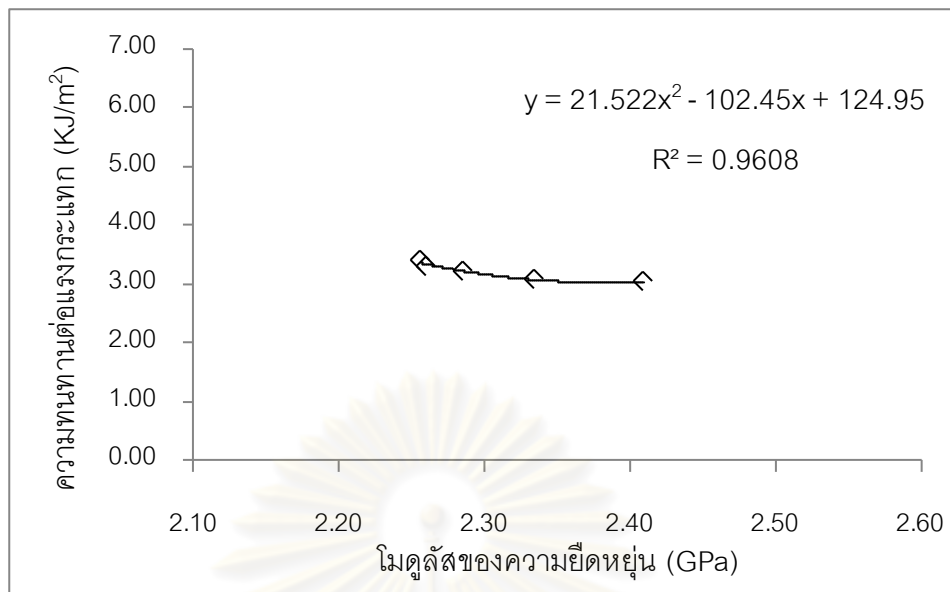




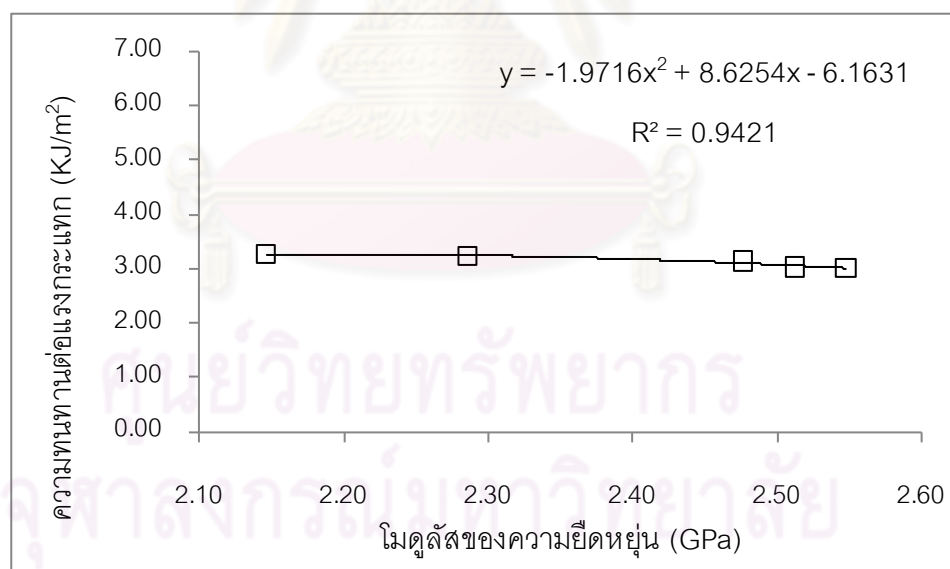
รูปที่ 4.99 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความเค้นจุดครากของ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



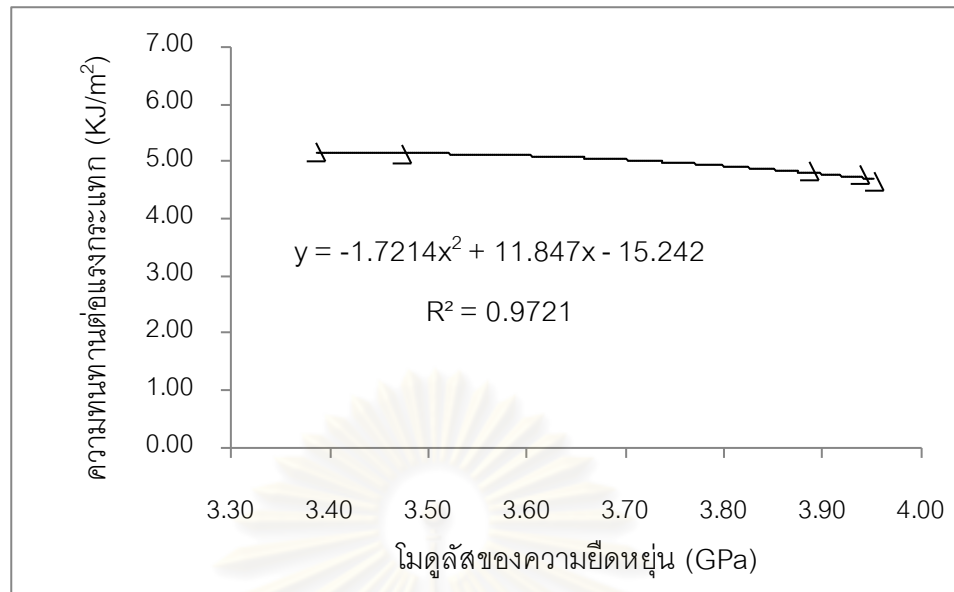
รูปที่ 4.100 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความเค้นจุดครากของ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



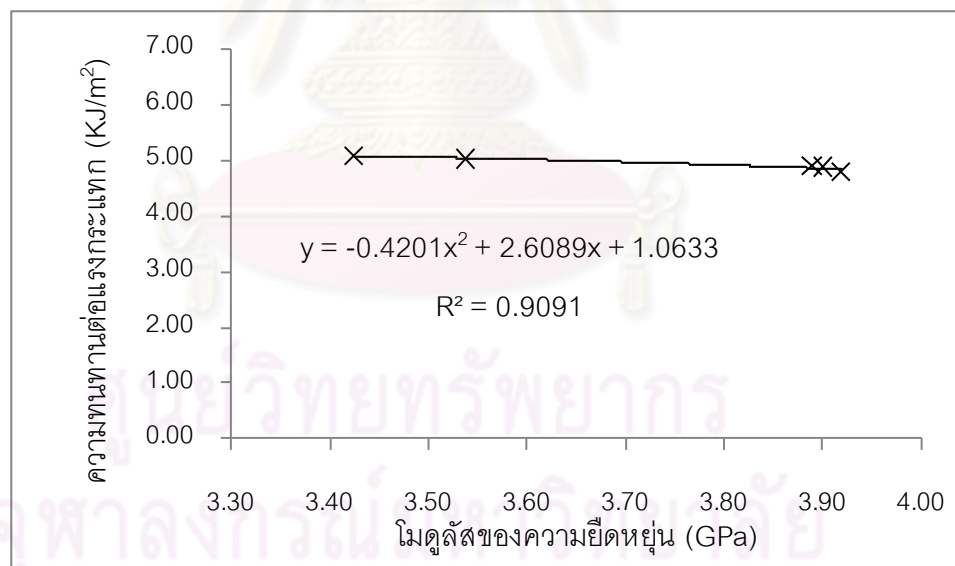
รูปที่ 4.101 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



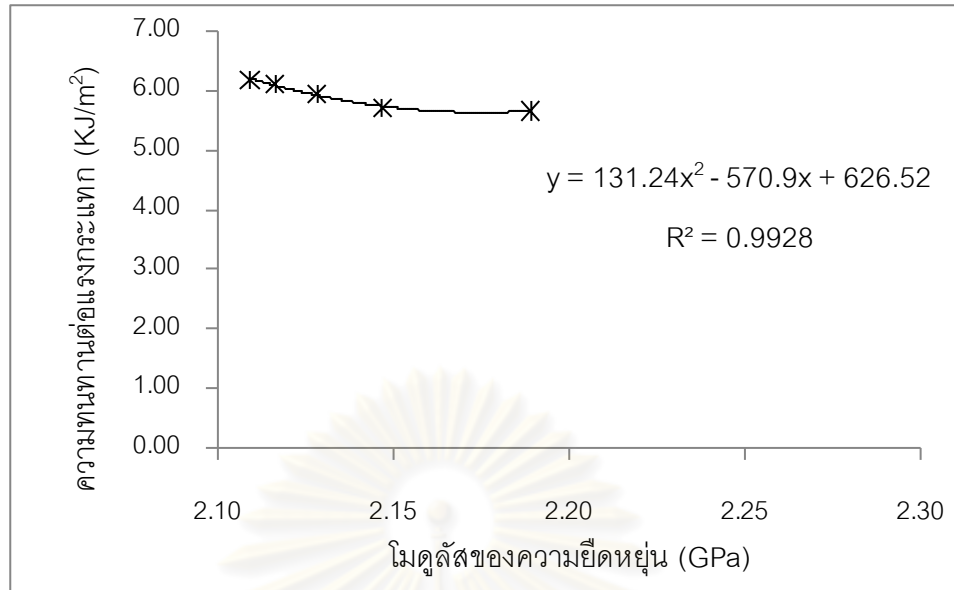
รูปที่ 4.102 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



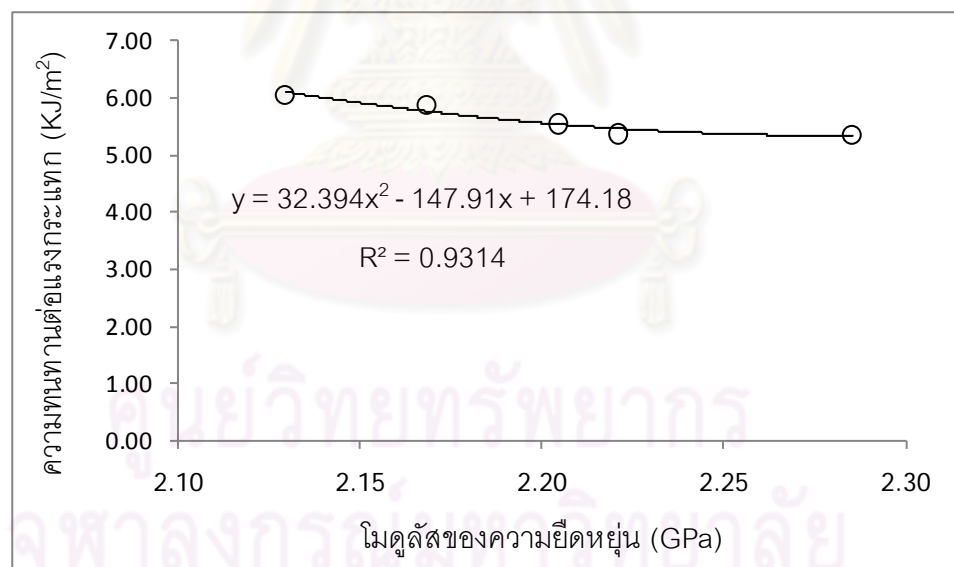
รูปที่ 4.103 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



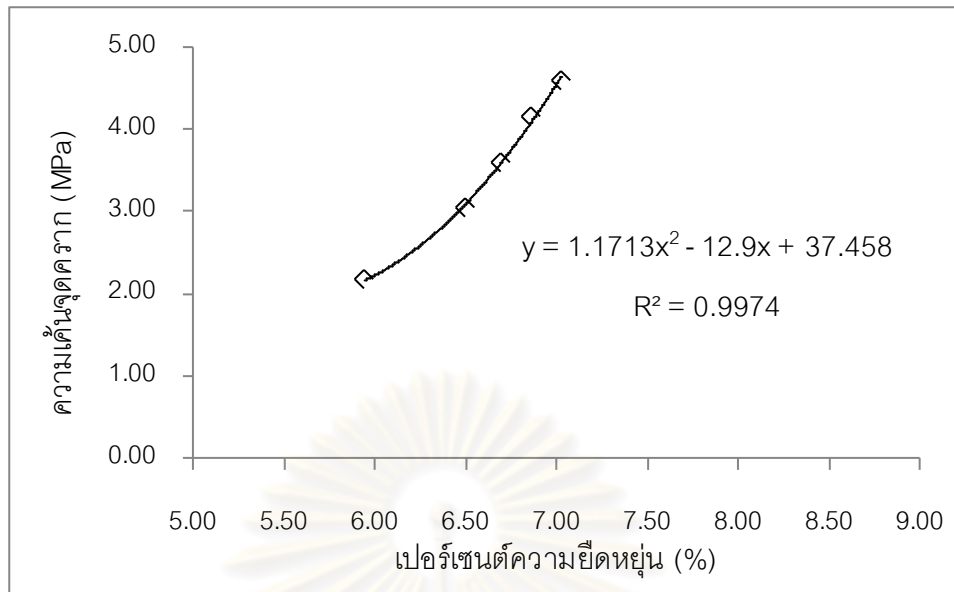
รูปที่ 4.104 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



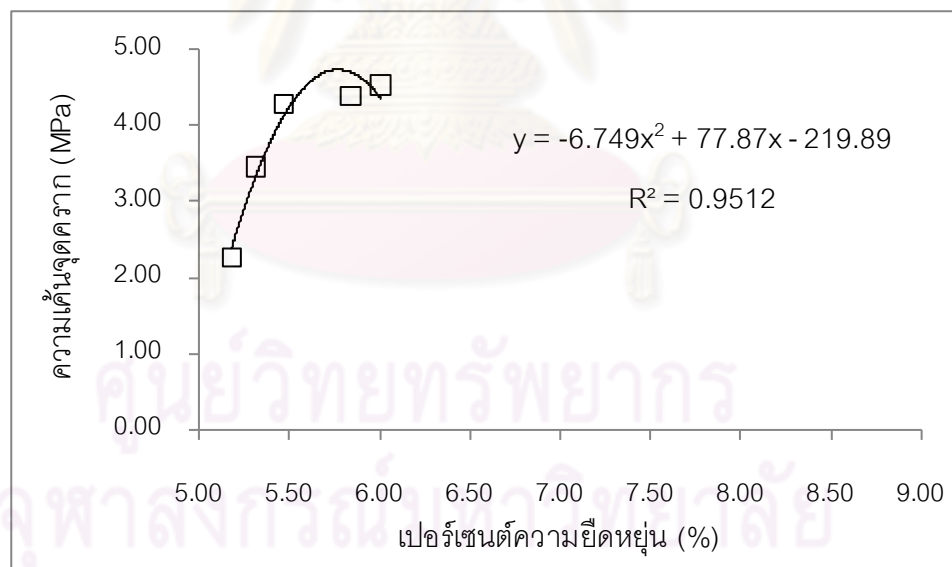
รูปที่ 4.105 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



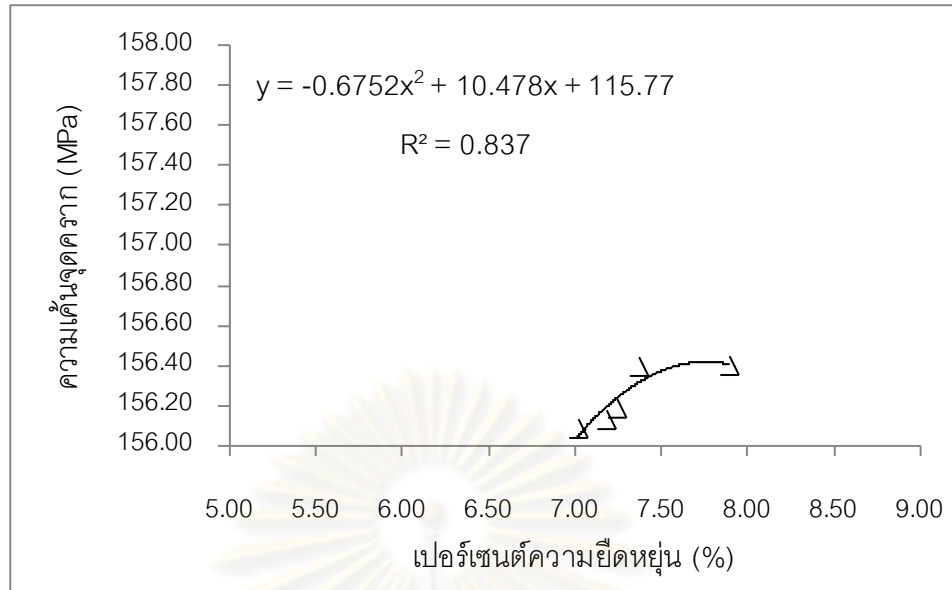
รูปที่ 4.106 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



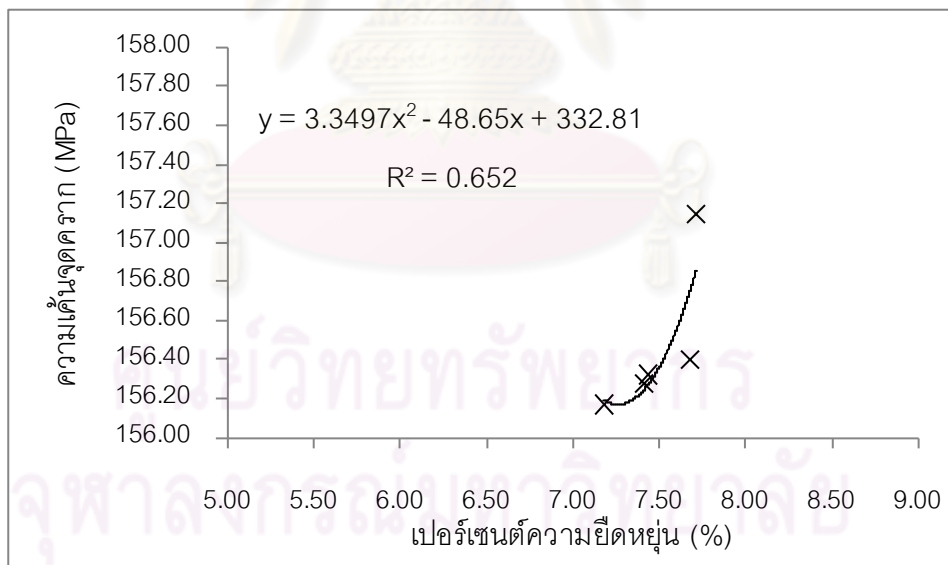
รูปที่ 4.107 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับค่าความเค้นจุดครากของ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



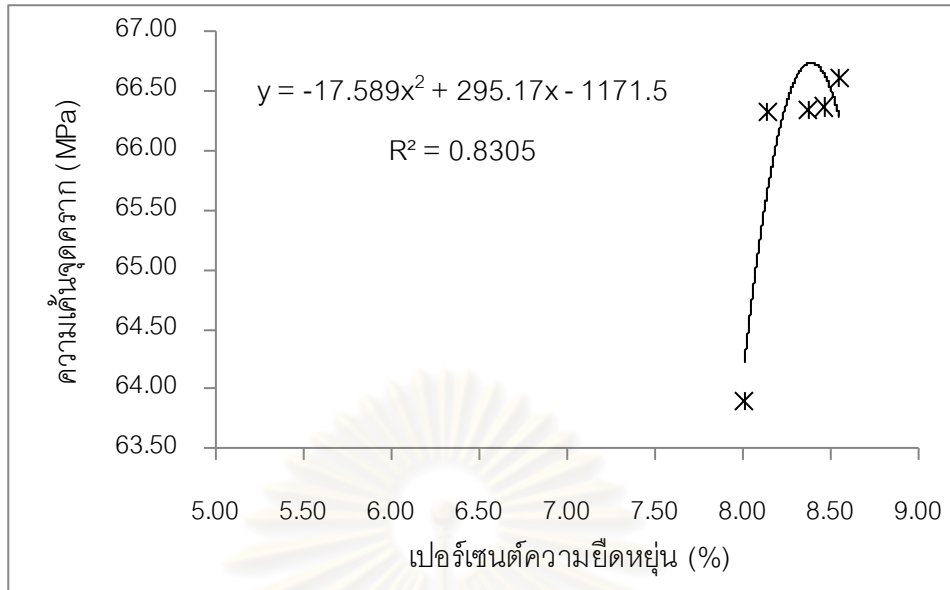
รูปที่ 4.108 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับค่าความเค้นจุดครากของ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



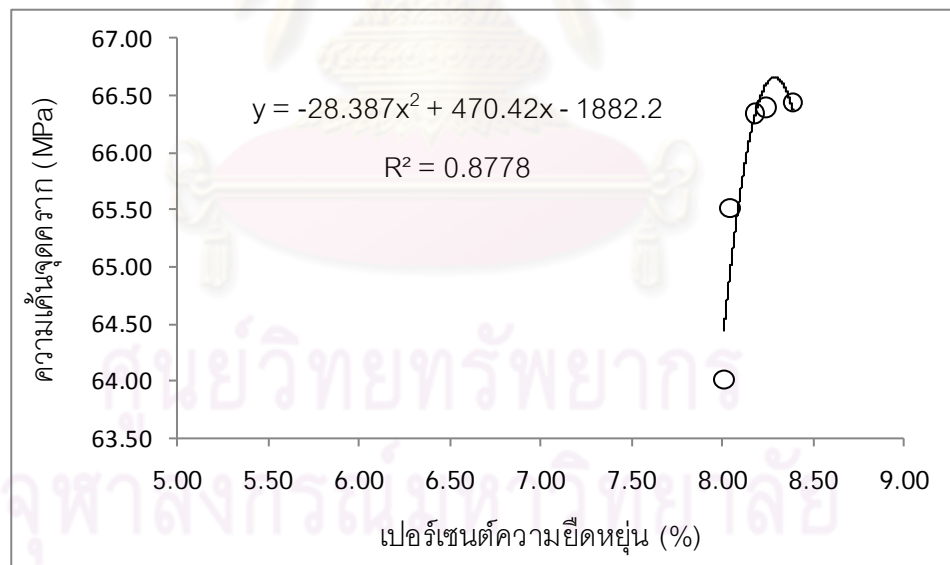
รูปที่ 4.109 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับค่าความเค้นจุดครากของ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



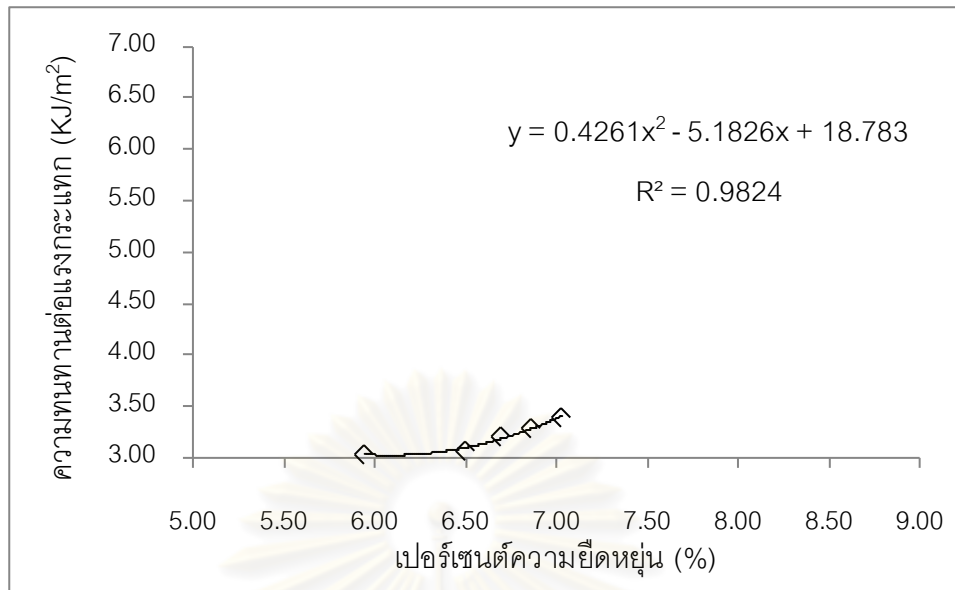
รูปที่ 4.110 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับค่าความเค้นจุดครากของ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



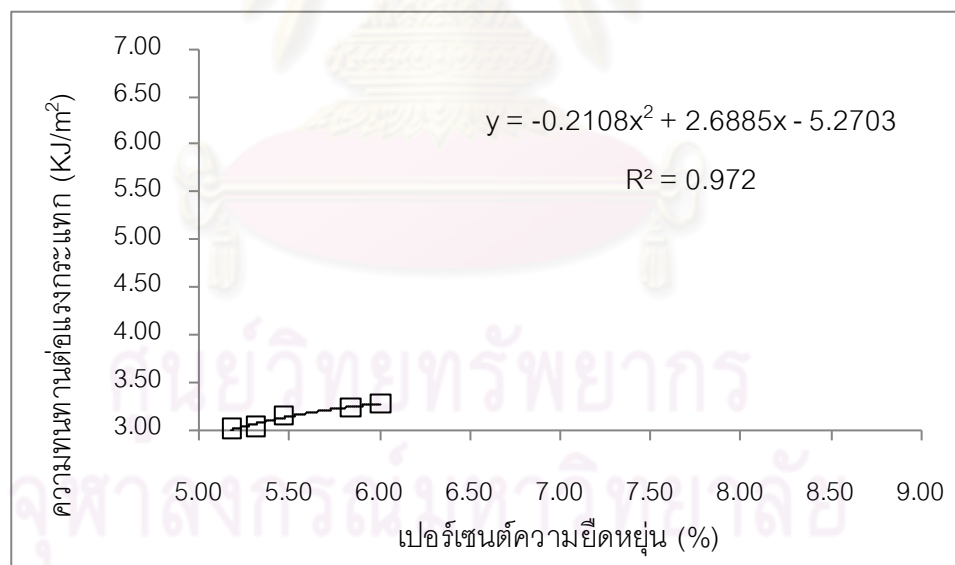
รูปที่ 4.111 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับค่าความเค้นจุดครากของ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 4.112 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับค่าความเค้นจุดครากของ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$

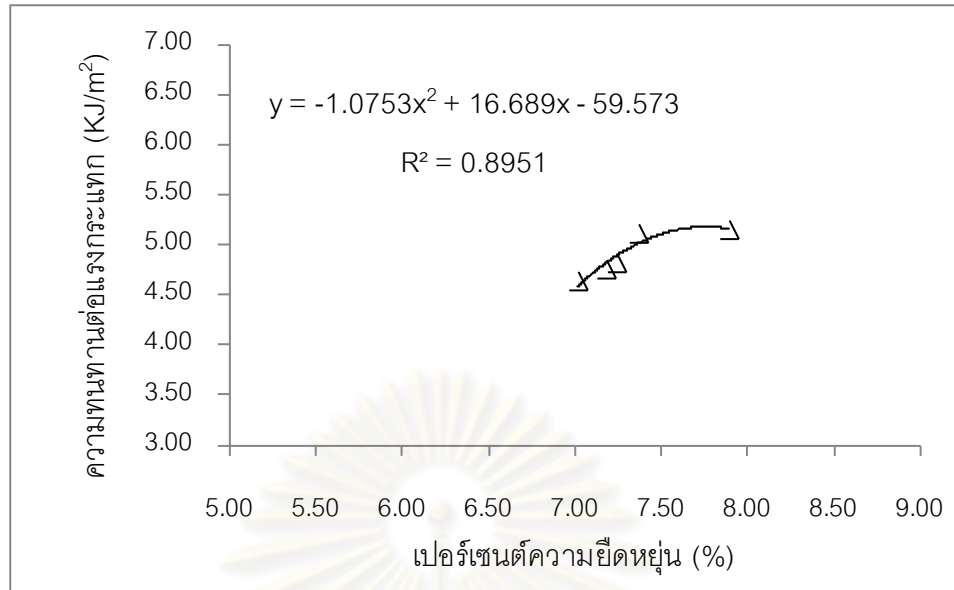


รูปที่ 4.113 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับค่าความหนาแน่นต่อแรงกระทำของ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>

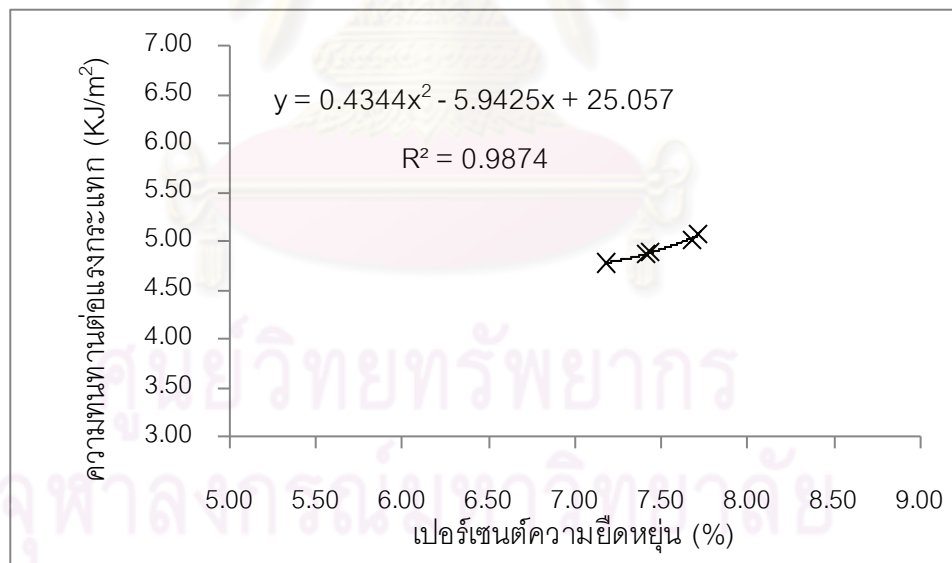


รูปที่ 4.114 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับค่าความหนาแน่นต่อแรงกระทำของ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>

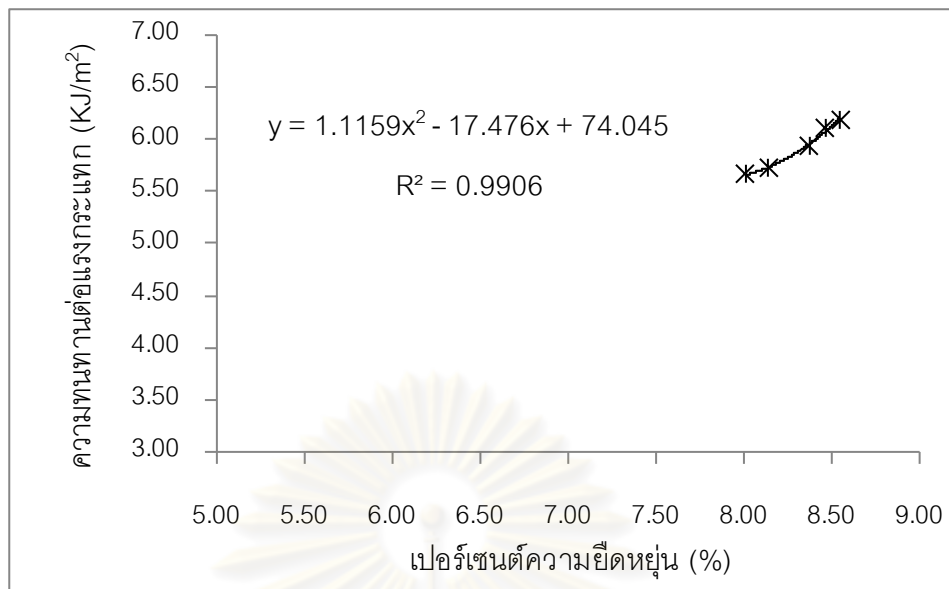




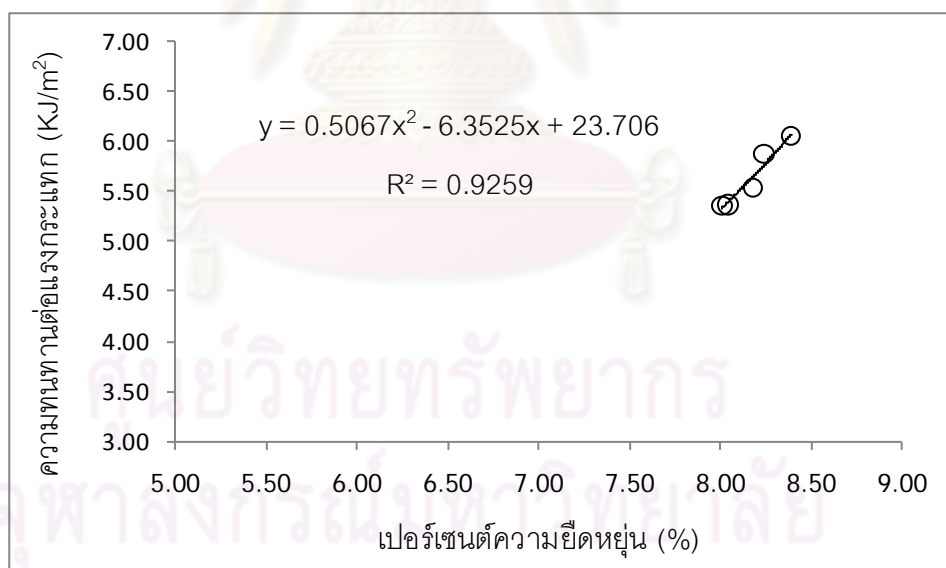
รูปที่ 4.115 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับค่าความหนาแน่นต่อแรงกระแทกของ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



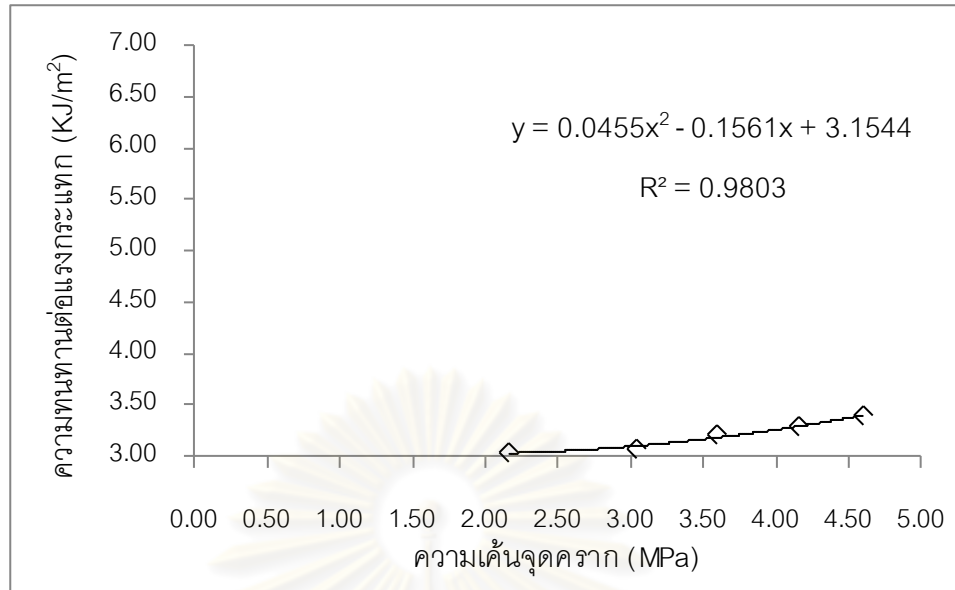
รูปที่ 4.116 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดกับค่าความหนาแน่นต่อแรงกระแทกของ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



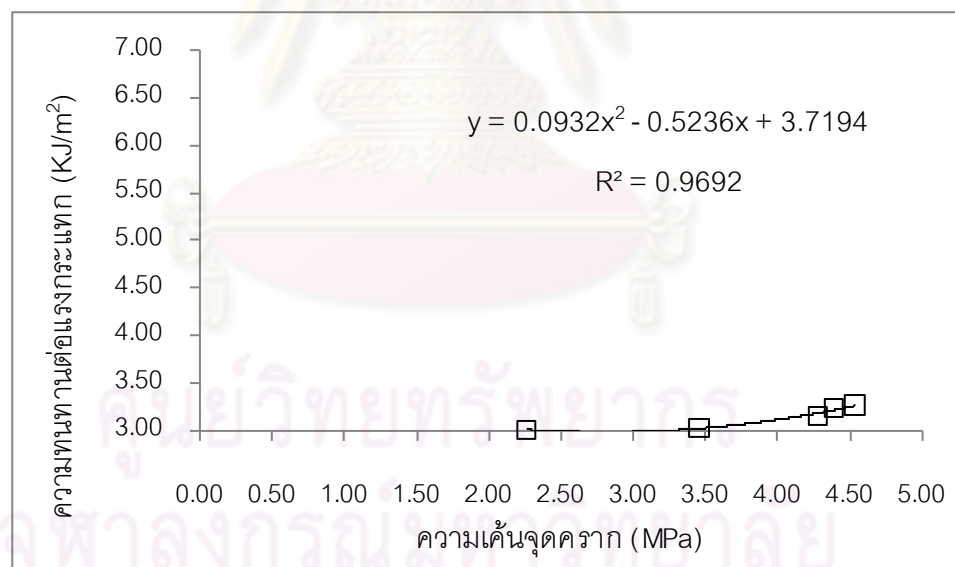
รูปที่ 4.117 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



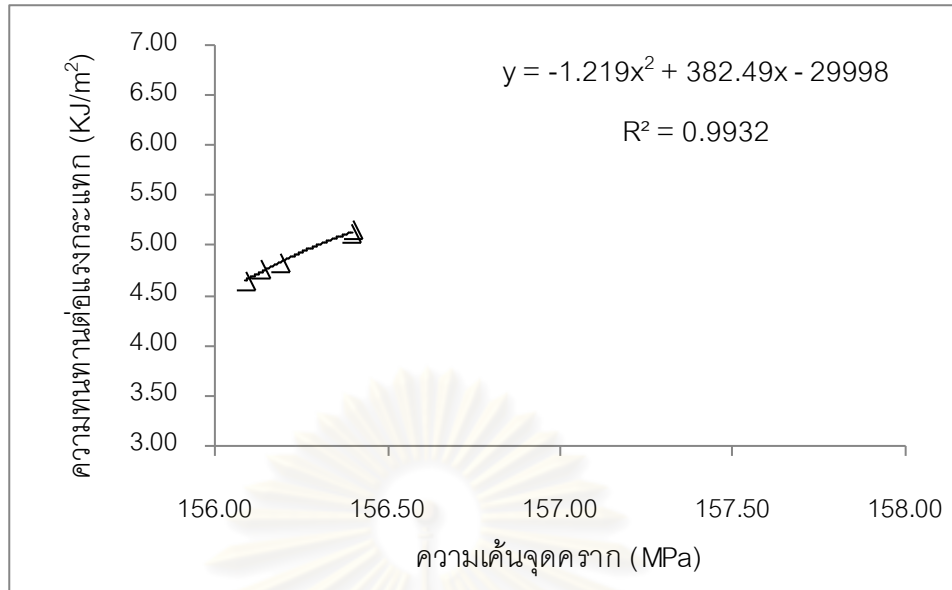
รูปที่ 4.118 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาดกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



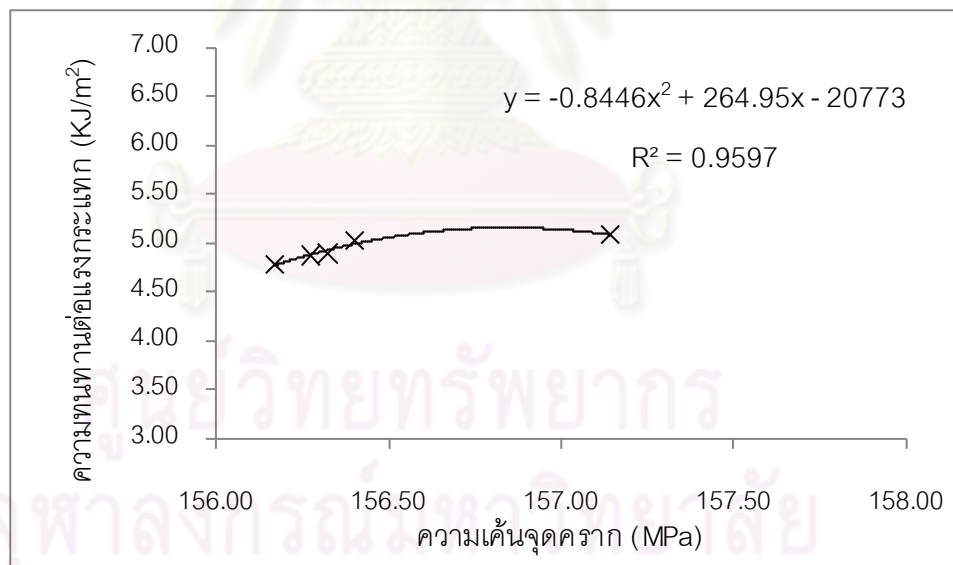
รูปที่ 4.119 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ P151 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



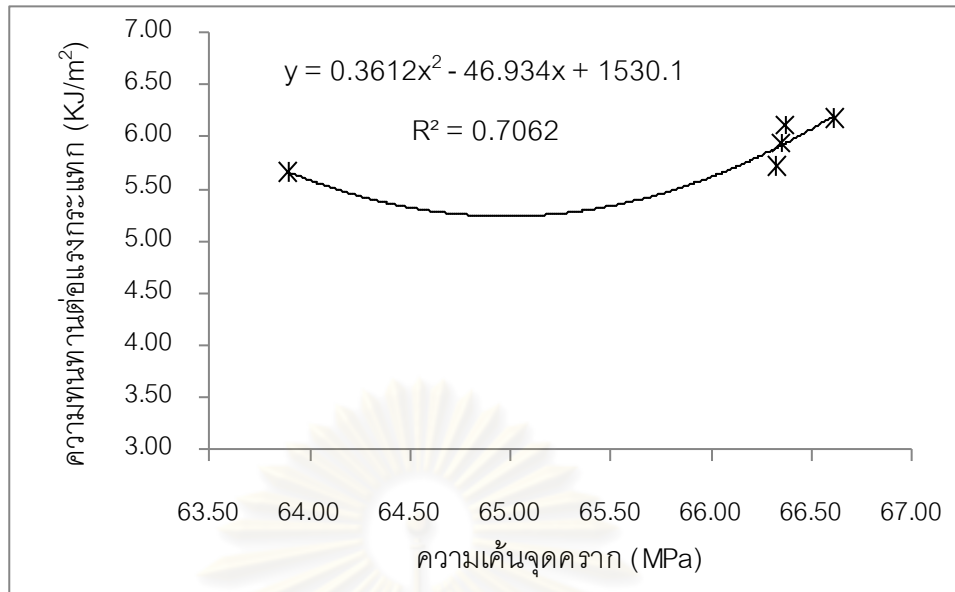
รูปที่ 4.120 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ P152 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม  $2.36 \text{ mW/cm}^2$



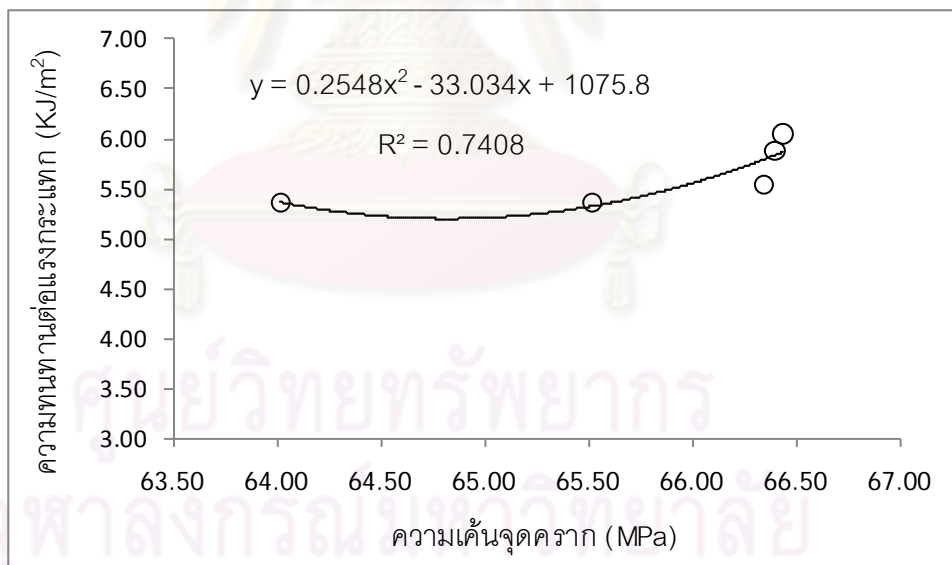
รูปที่ 4.121 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ P301 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.122 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ P302 หลังผ่านแสงยูวีที่มีความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.123 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ ABS1 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.124 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ ABS2 หลังผ่านแสงยูวีที่ความเข้ม 2.36 mW/cm<sup>2</sup>

## 4.6.3 สรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ

1. ผลสรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับเวลาในการผ่านแสงยูวี

เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยทางด้านเวลาเมื่อขึ้นงานผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง 2.36 mW/cm<sup>2</sup> พบว่าสามารถอธิบายความสัมพันธ์โดยรูปแบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 ดังตารางที่ 4.80

ตาราง 4.80 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับเวลา

คุณสมบัติ (y)	ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด	P151	$y = -0.3839x^2 + 4.122x + 100.32$	95.79
	P152	$y = -0.3127x^2 + 3.2331x + 102.27$	90.15
	P301	$y = -0.1105x^2 + 1.1693x + 161.74$	98.49
	P302	$y = -0.0805x^2 + 0.8608x + 162.49$	98.80
	ABS1	$y = -0.0276x^2 + 0.4825x + 62.023$	92.25
	ABS2	$y = -0.1356x^2 + 1.2543x + 61.521$	96.55
ค่าความเค้นจุดคราก	P151	$y = 0.0608x^2 - 0.8819x + 5.3167$	99.47
	P152	$y = -0.0125x^2 - 0.3361x + 4.9001$	96.36
	P301	$y = 0.0183x^2 - 0.1938x + 156.58$	91.14
	P302	$y = 0.0663x^2 - 0.623x + 157.46$	84.73
	ABS1	$y = -0.1032x^2 + 0.2803x + 66.343$	98.85
	ABS2	$y = -0.0415x^2 - 0.1554x + 66.691$	96.64
ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น	P151	$y = -0.0007x^2 + 0.0342x + 2.2209$	97.49
	P152	$y = -0.0278x^2 + 0.2718x + 1.9477$	97.75
	P301	$y = -0.0452x^2 + 0.4356x + 3.0177$	91.00
	P302	$y = -0.0406x^2 + 0.3864x + 3.1096$	92.70
	ABS1	$y = 0.0004x^2 + 0.0113x + 2.103$	98.76
	ABS2	$y = -0.0031x^2 + 0.0506x + 2.094$	99.74

ตาราง 4.80 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับเวลา (ต่อ)

คุณสมบัติ (y)	ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
ค่าเปอร์เซ็นต์ ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาด	P151	$y = 0.0063x^2 - 0.2393x + 7.2162$	99.92
	P152	$y = 0.0443x^2 - 0.4735x + 6.3928$	91.51
	P301	$y = 0.0499x^2 - 0.498x + 8.1734$	92.37
	P302	$y = 0.0134x^2 - 0.1962x + 7.8858$	94.60
	ABS1	$y = 0.0167x^2 - 0.2249x + 8.755$	95.27
	ABS2	$y = 0.0214x^2 - 0.2221x + 8.5545$	97.95



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ผลสรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับความเข้มแสงยูวี

เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยทางด้านความเข้มแสงยูวีสำหรับชนิดทดสอบ P15 และ P30 พบว่าสามารถอธิบายความสัมพันธ์โดยรูปแบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 ดังตารางที่ 4.81

ตาราง 4.81 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับความเข้มแสงยูวี

คุณสมบัติ (y)	ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด	P151	$y = -0.8455x^2 + 3.8463x + 104.82$	61.33
	P152	$y = -1.3142x^2 + 7.7786x + 96.917$	80.03
	P301	$y = -1.5553x^2 + 10.607x + 148.01$	99.83
	P302	$y = -1.0155x^2 + 6.8213x + 154.61$	99.46
ค่าความเค้นจุดคราก	P151	$y = 9.3677x^2 - 68.42x + 117.44$	98.72
	P152	$y = 8.8802x^2 - 64.909x + 111.59$	98.75
	P301	$y = -1.1289x^2 + 7.0196x + 144.86$	95.42
	P302	$y = -1.3393x^2 + 8.1238x + 143.59$	96.95
ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น	P151	$y = -0.0192x^2 + 0.1205x + 2.1857$	71.54
	P152	$y = -0.0556x^2 + 0.3465x + 1.9499$	84.56
	P301	$y = -0.0231x^2 + 0.4003x + 3.0216$	96.24
	P302	$y = -0.0189x^2 + 0.4038x + 2.9437$	95.78
ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด	P151	$y = -0.0189x^2 + 0.4038x + 2.9437$	95.78
	P152	$y = 0.1574x^2 - 1.2093x + 7.2234$	99.55
	P301	$y = 0.7018x^2 - 5.5989x + 16.678$	99.45
	P302	$y = 0.6056x^2 - 5.0335x + 15.936$	99.69



### 3. ผลสรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล

เมื่อนำผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ โดยการประมาณรูปแบบความสัมพันธ์เป็นแบบพหุนามดีกรี 2 จะได้ผลสรุปของความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทั้งหมด ตามตารางที่ 4.82

ตาราง 4.82 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล

คุณสมบัติตัวแปรต้น (x)	คุณสมบัติตัวแปรตาม (y)	ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
ความทนต่อแรงดึงสูงสุด	โมดูลัสของ ความยืดหยุ่น	P151	$y = 0.0047x^2 - 0.9929x + 54.489$	92.11
		P152	$y = 0.0017x^2 - 0.2906x + 14.257$	83.96
		P301	$y = -0.0703x^2 + 23.319x - 1929.8$	87.55
		P302	$y = -0.0513x^2 + 17.165x - 1431.7$	89.16
		ABS1	$y = 0.025x^2 - 3.1096x + 98.871$	96.48
		ABS2	$y = 0.033x^2 - 4.1019x + 129.62$	76.89
	เปอร์เซ็นต์ ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาด	P151	$y = -0.0258x^2 + 5.3994x - 275.81$	93.14
		P152	$y = -0.0179x^2 + 3.7036x - 185.07$	84.55
		P301	$y = 0.2131x^2 - 70.13x + 5777.7$	96.05
		P302	$y = -0.2148x^2 + 70.058x - 5705.7$	97.96
		ABS1	$y = 0.0969x^2 - 12.608x + 418.03$	99.12
		ABS2	$y = -0.0287x^2 + 3.4269x - 93.844$	84.37
	ความเค้นจุด คราก	P151	$y = -0.0365x^2 + 7.5298x - 383.69$	94.85
		P152	$y = -0.1359x^2 + 28.753x - 1515.5$	99.83
		P301	$y = -0.0171x^2 + 5.4434x - 275.74$	89.08
		P302	$y = 0.4282x^2 - 140.93x + 11751$	96.84
		ABS1	$y = -2.5534x^2 + 321.37x - 10045$	89.43
		ABS2	$y = -1.1331x^2 + 142.47x - 4411.7$	41.86

ตาราง 4.82 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล (ต่อ)

คุณสมบัติตัวแปรต้น (x)	คุณสมบัติตัวแปรตาม (y)	ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
ความทนต่อแรงดึงสูงสุด	ความทนทานต่อแรงกระแทก	P151	$y = -0.0003x^2 + 0.0079x + 5.2506$	89.56
		P152	$y = -0.0086x^2 + 1.7881x - 90.045$	85.40
		P301	$y = -0.0233x^2 + 7.3809x - 578.08$	90.70
		P302	$y = -0.0558x^2 + 18.102x - 1462.9$	98.72
		ABS1	$y = 0.2461x^2 - 31.459x + 1011.2$	96.37
		ABS2	$y = -0.2454x^2 + 30.612x - 948.75$	96.33
โมดูลัสของความยืดหยุ่น	เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด	P151	$y = -2.7359x^2 + 6.3101x + 6.6273$	97.54
		P152	$y = -3.9292x^2 + 16.459x - 11.229$	99.50
		P301	$y = 4.8838x^2 - 36.959x + 76.955$	83.08
		P302	$y = -2.5868x^2 + 18.21x - 24.331$	85.99
		ABS1	$y = 82.058x^2 - 359.66x + 402.11$	98.82
		ABS2	$y = 11.924x^2 - 55.144x + 71.746$	94.78
	ความเค้นจุดคราก	P151	$y = 57.038x^2 - 280.4x + 346.66$	97.13
		P152	$y = -27.924x^2 + 127.07x - 139.72$	76.66
		P301	$y = -1.2955x^2 + 8.9973x + 140.78$	99.41
		P302	$y = 11.207x^2 - 83.935x + 313.12$	93.59
		ABS1	$y = -571.68x^2 + 2425.8x - 2506.7$	97.99
		ABS2	$y = -132.03x^2 + 567.1x - 542.45$	96.57
	ความทนทานต่อแรงกระแทก	P151	$y = 21.522x^2 - 102.45x + 124.95$	96.08
		P152	$y = -1.9716x^2 + 8.6254x - 6.1631$	94.21
		P301	$y = -1.7214x^2 + 11.847x - 15.242$	97.21
		P302	$y = -0.4201x^2 + 2.6089x + 1.0633$	90.91
		ABS1	$y = 131.24x^2 - 570.9x + 626.52$	99.28
		ABS2	$y = 32.394x^2 - 147.91x + 174.18$	93.14

ตาราง 4.82 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล (ต่อ)

คุณสมบัติตัวแปรต้น (x)	คุณสมบัติตัวแปรตาม (y)	ชนิดของวัสดุ	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup> (%)
เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด	ความเค้นจุดคราก	P151	$y = 1.1713x^2 - 12.9x + 37.458$	99.74
		P152	$y = -6.749x^2 + 77.87x - 219.89$	95.12
		P301	$y = -0.6752x^2 + 10.478x + 115.77$	83.70
		P302	$y = 3.3497x^2 - 48.65x + 332.81$	65.20
		ABS1	$y = -17.589x^2 + 295.17x - 1171.5$	83.05
		ABS2	$y = -28.387x^2 + 470.42x - 1882.2$	87.78
	ความทนทานต่อแรงกระแทก	P151	$y = 0.4261x^2 - 5.1826x + 18.783$	98.24
		P152	$y = -0.2108x^2 + 2.6885x - 5.2703$	97.20
		P301	$y = -1.0753x^2 + 16.689x - 59.573$	89.51
		P302	$y = 0.4344x^2 - 5.9425x + 25.057$	98.74
		ABS1	$y = 1.1159x^2 - 17.476x + 74.045$	99.06
		ABS2	$y = 0.5067x^2 - 6.3525x + 23.706$	92.59
ความเค้นจุดคราก	ความทนทานต่อแรงกระแทก	P151	$y = 0.0455x^2 - 0.1561x + 3.1544$	98.03
		P152	$y = 0.0932x^2 - 0.5236x + 3.7194$	96.92
		P301	$y = -1.219x^2 + 382.49x - 29998$	99.32
		P302	$y = -0.8446x^2 + 264.95x - 20773$	95.97
		ABS1	$y = 0.3612x^2 - 46.934x + 1530.1$	70.62
		ABS2	$y = 0.2548x^2 - 33.034x + 1075.8$	74.08

#### 4.7 การตัดสินใจเลือกวัสดุ

จากผลการทดสอบข้างต้นทำการตัดสินใจเลือกวัสดุโดยใช้วิธีดัชนีถ่วงน้ำหนักของคุณสมบัติ (Weighted property Indexes) โดยพิจารณาเฉพาะวัสดุที่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มเนื่องจากในการผลิตจริงนั้นชิ้นงานจะผ่านการเคลือบฟิล์ม และพิจารณาที่ความเข้มแสง  $2.36 \text{ mW/cm}^2$  เมื่อผ่านแสงยูวีเป็นเวลา 6.4 นาที เนื่องจากในช่วงดังกล่าววัสดุทุกชนิดยังสามารถคงความเสถียรภาพอยู่ได้ โดยผลการตัดสินใจเลือกวัสดุเป็นดังต่อไปนี้

##### 4.7.1 คำนำน้ำหนักคุณสมบัติของวัสดุที่พิจารณา

คุณสมบัติที่ทำการพิจารณาประกอบด้วย

1. ความทนทานแรงดึงสูงสุด ( $\sigma_T$ )
2. ความเค้นจุดคราก ( $\sigma_y$ )
3. โมดูลัสของความยืดหยุ่น (E)
4. เปอร์เซนต์ความยืดหยุ่น ณ. จุดขาด (%EL)
5. ความทนต่อแรงกระแทก (I)
6. ราคาเม็ดพลาสติก (C)

เนื่องจากลักษณะการใช้งานของชิ้นงานจำเป็นที่จะต้องใช้คุณสมบัติเชิงกล ทั้ง 5 หัวข้อร่วมกันดังนั้นค่าความสำคัญของปัจจัยในการพิจารณาจึงมีระดับเท่ากัน แสดงดังตารางที่ 4.83 โดยผลของการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 4.84 และค่าของขนาดคุณสมบัติของวัสดุ (Scale properties; $\beta$ ) แสดงดังตารางที่ 4.85 ซึ่งจากผลการพิจารณาเลือกวัสดุโดยใช้วิธีดัชนีถ่วงน้ำหนักของคุณสมบัติ (Weighted property Indexes) พบว่าวัสดุ P302 มีความเหมาะสมในการที่จะนำไปใช้ในการผลิต ฟิน แอสซี คอนโซล พาเนล มากที่สุด เนื่องจากมีค่า Material Performance Index ( $\gamma$ ) สูงที่สุด (แสดงดังตารางที่ 4.86) เมื่อ

$$\gamma = \sum_{j=1}^n \beta_{ij} \times W_j$$

ตาราง 4.83 ค่าความสำคัญของปัจจัยในการพิจารณา

คุณสมบัติ	(1) - (2)	(1) - (3)	(1) - (4)	(1) - (5)	(1) - (6)	(2) - (3)	(2) - (4)	(2) - (5)	(2) - (6)	(3) - (4)	(3) - (5)	(3) - (6)	(4) - (5)	(4) - (6)	(5) - (6)	รวม	Weighting factor ( $w_j$ )
1	1	1	1	1	0											4	0.16
2	1					1	1	1	0							4	0.16
3		1				1				1	1	0				4	0.16
4			1				1			1			1	0		4	0.16
5				1				1			1		1		0	4	0.16
6					1				1			1		1	1	5	0.20

ตาราง 4.84 ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละคุณสมบัติ (Weight properties indexes chart; j)

วัสดุ (i)	Go,no-Go screening*			Property weighting factor					
	การทนความร้อน	การเปลี่ยนแปลงและความมั่นคง	การยึดติดของฟิล์ม	$\sigma_T$	$\sigma_y$	E	%EL	I	C
				$w_{j=1} = 0.16$	$w_{j=2} = 0.16$	$w_{j=3} = 0.16$	$w_{j=4} = 0.16$	$w_{j=5} = 0.16$	$w_{j=6} = 0.20$
P152	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	110.23	2.26	2.55	5.18	3.01	550
P302	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	164.71	156.17	3.92	7.18	4.78	550
ABS2	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	64.01	64.02	2.29	8.01	5.36	230

ตาราง 4.85 ค่าของขนาดคุณสมบัติของวัสดุ (Scale properties; $\beta$ )

วัสดุ	Go,no-Go screening*			Property weighting factor											
	การทนความร้อน	การเปลี่ยนแปลงและความผันผวน	การยึดติดของฟิล์ม	$\sigma_T$		$\sigma_y$		E		%EL		I		C	
				$w_{j=1} = 0.16$		$w_{j=2} = 0.16$		$w_{j=3} = 0.16$		$w_{j=4} = 0.16$		$w_{j=5} = 0.16$		$w_{j=6} = 0.20$	
				$j_1$	$\beta_1$	$j_2$	$\beta_2$	$j_3$	$\beta_3$	$j_4$	$\beta_4$	$j_5$	$\beta_5$	$j_6$	$\beta_6$
P152	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	110.23	66.92	2.26	1.45	2.55	65.05	5.18	72.14	3.01	62.97	550.00	239.13
P302	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	164.71	100.00	156.17	100.00	3.92	100.00	7.18	100.00	4.78	100.00	550.00	239.13
ABS2	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	64.01	38.86	64.02	40.99	2.29	58.42	8.01	111.56	5.36	112.13	230.00	100.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.86 ค่า Material Performance Index ( $\gamma$ )

วัสดุ (i)	Go,no-Go screening*			Property weighting factor						
	การทนความร้อน	การเปลี่ยนแปลงและเสถียรภาพ	การยึดติดของฟิล์ม	$\sigma_T$	$\sigma_y$	E	%EL	I	C	Material Performance Index ( $\gamma$ )
				$W_{j=1} = 0.16$	$W_{j=2} = 0.16$	$w_{j=3} = 0.16$	$w_{j=4} = 0.16$	$w_{j=5} = 0.16$	$w_{j=6} = 0.20$	
P152	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	66.92	1.45	65.05	72.14	62.97	239.13	90.79
P302	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	239.13	127.83
ABS2	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	38.86	40.99	58.42	111.56	112.13	100.00	77.91

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### วิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.1 คุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน

จากผลการทดสอบวัสดุทั้ง 3 ชนิดเริ่มสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันโดยปัจจัยที่เกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มนั้นไม่มีผลต่อการสลายตัว น้ำหนักของวัสดุจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง  $410\text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับ P30 และ  $350\text{ }^{\circ}\text{C} - 420\text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับ P15 ส่วน ABS นั้นจะอยู่ในช่วง  $350\text{ }^{\circ}\text{C} - 460\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจากค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ABS นั้นมีความเสถียรมากที่สุดเมื่อเทียบกับพลาสติกชีวภาพที่ทำการศึกษา

#### 5.2 คุณสมบัติการเสื่อมสภาพด้วยแสงยูวี

จากการพิจารณาการเปลี่ยนสีและความมันวาวของวัสดุพบว่าเวลาและความเข้มแสงมีผลต่อการเปลี่ยนสี เนื่องจากขึ้นงานเกิดการดูดกลืนรังสี ซึ่งเป็นเหตุทำให้พอลิเมอร์นั้นๆเกิดการเสื่อมสลายด้วยแสงในที่สุดโดยลักษณะการเสื่อมสภาพด้วยแสงที่สำคัญสำหรับพอลิเมอร์สังเคราะห์และพอลิเมอร์ชีวภาพนั้นคือการเปลี่ยนสี (กลายเป็นสีเหลืองหรือมีสีไม่สม่ำเสมอ) และการสูญเสียคุณสมบัติทางกล เช่นการสูญเสียความแข็งแรง ความทนทานต่อแรงกระแทกซึ่งการสูญเสียสมบัติเชิงกลนี้สะท้อนให้เห็นว่าสายโซ่ของพอลิเมอร์ถูกทำลาย (Polymer chains scission)

#### 5.3 คุณสมบัติทางกล

จากผลการทดสอบและวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่เกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มนั้นไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลแต่อุณหภูมิ, ความเข้มแสงและระยะเวลาที่ผ่านแสงยูวีนั้นจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการลดลงของค่าความทนทานต่อแรงดึง, ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นที่เกิดขึ้นนั้น เนื่องมาจากสายโซ่ของพอลิเมอร์ได้ถูกทำลายลง (Polymer chains scission) นอกจากนี้สาเหตุดังกล่าวยังส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขึ้นงานมีความเปราะมากขึ้นเมื่อผ่านแสงยูวี

#### 5.4 คุณสมบัติการหลุดลอกฟิล์ม

การทดสอบการยึดติดของฟิล์มหลังจากที่ผ่านอุณหภูมิ ความชื้น และแสงยูวี เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการยึดติดของฟิล์มจากการทดสอบคุณสมบัติพบว่าอุณหภูมิ, ความชื้น



และแสงยูวีที่เปลี่ยนแปลงไปไม่มีผลต่อการหลุดลอกของฟิล์มที่ใช้เคลือบบนวัสดุ P152 และ P302 เนื่องจากไม่มีการหลุดลอกเช่นเดียวกับ ABS2 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตในปัจจุบัน

### 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆในหัวข้อที่ 4.5 สามารถที่จะสรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติได้ดังนี้

	เวลา	ความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด	ความเค้นจุดคราก	โมดูลัสของความยืดหยุ่น	% ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาด	ความทนทานต่อแรงกระแทก
ความเข้มแสง	+	+	-	+	-	+
เวลา		+	-	+	-	+
ความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด			-	+	-	-
ความเค้นจุดคราก				-	+	+
โมดูลัสของความยืดหยุ่น					-	-
% ความยืดหยุ่น ณ.จุดขาด						+

หมายเหตุ + คือ ความสัมพันธ์แบบแปรผันตาม; - คือ ความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณสมบัติการใช้งานของพลาสติกชีวภาพ 2 ชนิดซึ่งประกอบด้วย P15 และ P30 เปรียบเทียบกับ ABS ได้ผลสรุปดังนี้

- วัสดุทั้ง 3 ชนิดเริ่มสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันที่  $340^{\circ}\text{C}$
- มวลของ P30, P15 และ ABS ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง  $410, 420$  และ  $460^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับและใช้เวลาการสลายในช่วงอุณหภูมินี้ 40, 42 และ 45 นาทีตามลำดับโดยการลดลงระหว่างชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มและชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มไม่มีความแตกต่างกัน
- ชิ้นงาน P15 และ P30 เริ่มมีการเปลี่ยนสีเมื่อผ่านแสงยูวีที่ความเข้มแสง  $3.54$  และ  $4.72\text{ mW/cm}^2$  ตามลำดับเมื่อเวลาผ่านไป 6.4 นาทีขณะที่ ABS เกิดการเสียรูปที่  $3.54\text{ mW/cm}^2$  ด้วยเวลาเพียง 2.4 นาทีโดยการเสื่อมสภาพระหว่างชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มและชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มไม่มีความแตกต่างกัน
- ความเข้มของแสงยูวีและเวลาที่ใช้มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเพิ่มขึ้นของความเข้มแสงยูวีมีผลทำให้ค่าโมดูลัสของชิ้นงานเพิ่มขึ้นขณะที่อัตรายืดลดลงจนความทนทานต่อแรงกระแทกลดลง
- ความร้อนและความชื้นไม่มีผลต่อการหลุดลอกของฟิล์มที่เคลือบบนผิวชิ้นงาน
- จากผลการพิจารณาเลือกวัสดุโดยใช้วิธีดัชนีถ่วงน้ำหนักของคุณสมบัติ (Weighted property Indexes) พบว่าวัสดุ P302 มีความเหมาะสมในการที่จะนำไปใช้ในการผลิต ฟิน แอสซี คอนโซล พาเนล มากที่สุด
- ชิ้นงาน P30 สามารถนำมาใช้ทดแทน ABS ได้

#### 6.2 อุปสรรคและปัญหาในการวิจัย

- ในการทดลองมีการประยุกต์ใช้เครื่องปล่อยแสงยูวีสำหรับทำการทดสอบเพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพด้วยแสงยูวี ซึ่งขณะที่ทำการปล่อยชิ้นงานเข้าเครื่องนั้นจะมีแสงยูวีเล็ดลอด

ออกมาบางส่วน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีความระมัดระวังอย่างสูงเนื่องจากแสงยูวีที่ปล่อยออกมานั้น อาจเป็นอันตรายต่อผิวหนังจึงไม่ควรใช้เป็นเวลานาน

2. สีของเม็ดพลาสติกชีวภาพที่ทำการศึกษาเป็นสีขาวขุ่นแต่สีของเม็ดพลาสติก ABS นั้นเป็นสีน้ำตาล ดังนั้นจึงไม่สามารถเปรียบเทียบสีขึ้นขึ้นงานได้โดยตรง

### 6.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะจากการศึกษาคุณสมบัติการใช้งานของพลาสติกชีวภาพ 2 ชนิดซึ่ง ประกอบด้วย P15 และ P30 เปรียบเทียบกับ ABS ได้ผลสรุปดังนี้

1. งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำพลาสติกชีวภาพมาใช้ในการผลิต ชิ้นส่วนภายในรถยนต์โดยชิ้นส่วนที่ทำการเลือกมาศึกษาในการวิจัยนี้คือ ฟิน แอสซี คอนโซล พาเนล ดังนั้นงานวิจัยต่อไปควรศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้กับชิ้นส่วนภายใน ชิ้นอื่นๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

จิระเชษฐ บัญแก้ว. อิทธิพลของการผสมพอลิโพรไพลีนที่นำกลับมาหลอมใหม่ต่อคุณสมบัติเชิงกลและดัชนีการหลอมไหล. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

เจริญ นาคะสวรรค์. เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : วี.เจ.พรินติ้ง, 2545.

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2549.

สุวบุญ จิระชาญ. เอกสารประกอบการบรรยายทิศทางและแนวโน้มในอุตสาหกรรมด้านพลาสติกชีวภาพไทย. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อนาคาร รัชเวทย์. พอลิเมออร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ดวงกมลพับลิชชิ่ง, 2552.

อภิเนษนา อุดมศักดิ์. คุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมออร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับพอลิโพรไพลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

### ภาษาอังกฤษ

Alexander Steinbuchel. Biotechnologies for the Production of EDPs and Bio-based Materials.

Anthony L. Andrady. Ultraviolet Radiation and Polymer, Polymer, 857-866. NC : Research Triangle Park.

Antonio U.B. Queiroz and Fernanda P. Collares-Queiroz. Innovation and Industrial Trends in Bioplastics. Polymer Reviews 2009 : 65-78.

Fujimoto et al. Polytrimethylene Terephthalate resin. Patent Application Publication 2006

Hiroshi Kawamoto. Trends in Research and Development on Plastics of Plant Origin- From the Perspective of Nanocomposite Polylactic Acid for Automobile Use- .Science & Technology Trends 2006: 62-75.

Ichiko Fuyuno. Plastic promises. Nature BUSINESS Vol446 (April 2007): 715.

- K. Mohanty. Injection Molded Glass Fiber Reinforced Poly(trimethylene terephthalate) Composites: Fabrication and Properties Evaluation. Ind. Eng. Chem. Res. 2005, 44, 857-862
- K. Van de Velde, P. Kiekens. Biopolymers: overview of several properties and consequences on their applications. Polymer Testing 2001: 433-442.
- M. Flieger, M.Kantorova, A. Prell, T. Rezanka, J. Vtruba. Biodegradable Plastic from Renewable Sources. 2003.
- MKolybaba,L.G. Tabill, S.Panigrahi, W.J.Crerar, T.Powell, B.Wang. Biodegradable Polymer: Past, Present, and Future. The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems 2003.
- R. Chandra, Renu Rustgi. Biodegradable Polymers.1998.
- Seidel et al. Polytrimethylene Terephthalate resin with improved properties. Patent Application Publication 2005
- Seung-Woo Choi. Thermal Aging of PBS Bio-composites for Automotive Interior Material. Master of Science Environmental Material Science Graduate School Seoul National University, 2006.
- Stephan Grutke. Two Unlike Brothers Unite. Kunststoffe International 2006: 108-110.
- Tomofumi Maekawa. Reinforced Polytrimethylene Terephthalate resin composition. Patent Application Publication 2004



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางคุณสมบัติเม็ดพลาสติกแต่ละชนิด

ตารางที่ 1 ข้อมูลคุณสมบัติเม็ดพลาสติกแต่ละชนิดที่ได้จากผู้ผลิต

ชนิดพลาสติก	P15	P30	ABS	Comments
<b>Physical Properties</b>				
Density	1.40 g/cm <sup>3</sup>	1.56 g/cm <sup>3</sup>	1.06 g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Filler Content	15.00%	30.00%	-	
Water Absorption	0.08%	0.08%	-	Immersion 24h; ISO 62, Similar to
Linear Mold Shrinkage	0.00500 cm/cm	0.00300 cm/cm	-	Mold 80°C; ISO 294-4
	0.00600 cm/cm	0.00400 cm/cm	-	Mold 110°C; ISO 294-4
Linear Mold Shrinkage, Transverse	0.00700 cm/cm	0.00800 cm/cm	-	Mold 80°C; ISO 294-4
	0.00800 cm/cm	0.00800 cm/cm	-	Mold 110°C; ISO 294-4
<b>Mechanical Properties</b>				
Tensile Strength at Break	123 MPa	162 MPa	47 MPa	ISO 527
Elongation at Break	3.00%	2.50%	-	ISO 527
Tensile Modulus	6.20 GPa At 23.0°C	10.4 GPa At 23.0°C	2.55 GPa At 23.0°C	ISO 527
Flexural Modulus	5.70 GPa	9.60 GPa	2.7 GPa	ISO 178

ชนิดพลาสติก	P15	P30	ABS	Comments
<b>Mechanical Properties (ต่อ)</b>				
Flexural Strength	190 MPa	245 MPa	82 MPa	ISO 178
Charpy Impact Unnotched	3.00 J/cm <sup>2</sup> At -30.0°C	4.50 J/cm <sup>2</sup> At -30.0°C	-	ISO 179/1eU
	3.00 J/cm <sup>2</sup> At 23.0°C	5.00 J/cm <sup>2</sup> At 23.0°C	-	ISO 179/1eU
Charpy Impact, Notched	0.550 J/cm <sup>2</sup> At -30.0°C	0.900 J/cm <sup>2</sup> At -30.0°C	6 KJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
	0.600 J/cm <sup>2</sup> At 23.0°C	0.900 J/cm <sup>2</sup> At 23.0°C	11 KJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
<b>Thermal Properties</b>				
CTE, linear	15.0 µm/m-°C At 23.0 - 55.0°C	7.00 µm/m-°C At 23.0 - 55.0°C	-	ISO 11359-1/-2
	22.0 µm/m-°C At 55.0 - 160°C	16.0 µm/m-°C At 55.0 - 160°C	-	ISO 11359-1/-2
	34.0 µm/m-°C At -40.0 - 23.0°C	25.0 µm/m-°C At -40.0 - 23.0°C	-	ISO 11359-1/-2
CTE, linear, Transverse to Flow	74.0 µm/m-°C At -40.0 - 23.0°C	67.0 µm/m-°C At -40.0 - 23.0°C	-	ISO 11359-1/-2
	89.0 µm/m-°C At 23.0 - 55.0°C	83.0 µm/m-°C At 23.0 - 55.0°C	-	ISO 11359-1/-2
	132 µm/m-°C At 55.0 - 160°C	120 µm/m-°C At 55.0 - 160°C	-	ISO 11359-1/-2



ชนิดพลาสติก	P15	P30	ABS	Comments
<b>Mechanical Properties (ต่อ)</b>				
Melting Point	227 °C	227 °C	-	10°C/min; ISO 11357-1/-3
Deflection Temperature at 0.46 MPa	223 °C	227 °C	-	ISO 75-1/-2
Deflection Temperature at 1.8 MPa	195 °C	210 °C	-	ISO 75-1/-2
<b>Processing Properties</b>				
Melt Temp.	250 - 270°C	250 - 270°C	-	
Mold Temp.	80.0 - 110°C	80.0 - 110°C	-	
Drying Temp.	120 °C	120 °C	-	
Dry Time	4.00 hour	4.00 hour	-	Dehumidified Dryer
Moisture Content	≤ 0.0200 %	≤ 0.0200 %	-	

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบคุณสมบัติเม็ดพลาสติกแต่ละชนิดระหว่างข้อมูลที่ได้จากผู้ผลิตกับงานวิจัย

แหล่ง ข้อมูล	Tensile Strength (MPa)			Modulus of Elasticity (GPa)			Elongation at Break (%)			Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )		
	P15	P30	ABS	P15	P30	ABS	P15	P30	ABS	P15	P30	ABS
ผู้ผลิต	123	162	47	6.2	10.4	2.55	3	2.5	-	30	45	11
งานวิจัย	105.22	150.02	66.87	2.2	3.08	2.29	7.12	15.65	8.66	9.17	12.32	13.44

หมายเหตุ วิธีการทดสอบต่างกันเนื่องจากผู้ผลิตอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO527 และทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทกด้วยวิธี Charpy Impact, Notched

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกรวิกา ช่ายทอง เกิดเมื่อวันที่ 10 กันยายน 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนฤทธิยะวรรณาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2545 และเข้ารับการศึกษาคณะหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ในปีการศึกษา 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย