

การวิเคราะห์ปัจจัยทางความร้อนที่มีผลต่อวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสม



นายเฉลิมชัย ไชยธงรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2553

**EFFECT ANALYSIS OF THERMAL FACTOR TO
POLYCARBONATE COMPOSITE MATERIAL**

Chalermchai Chaitongrat



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2010

การวิเคราะห์ปัจจัยทางความร้อนที่มีผลต่อวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสวีวุฒ)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.นิธินาถ สุภกาญจน์)

กรรมการ

(อ. ดร.วุฒิ ด่านกิตติกุล)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เฉลิมชัย ไชยณรงค์ : การวิเคราะห์ปัจจัยทางความร้อนที่มีผลต่อวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสม (EFFECT ANALYSIS OF THERMAL FACTOR TO POLYCARBONATE COMPOSITE MATERIAL) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ สีวดำรงพงศ์, 109 หน้า.

วัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมเป็นวัสดุผสมที่มีการใช้งานอย่างหลากหลายรูปแบบในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั้งที่เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรและชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ เช่น หวีประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนข้อมูลในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ ซึ่งความร้อนจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของหวีอย่างมาก แต่กลไกและผลกระทบของความร้อนต่อวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมในแง่ของอายุการใช้งานยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจังเป็นระบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลา ที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมจะถูกอบที่อุณหภูมิ 75 90 105 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1/4 3/4 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตที่ได้จะถูกทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ความร้อน และสัณฐานวิทยา ผลการศึกษาพบว่า การอบชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม ที่อุณหภูมิ และเวลาการอบที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พอลิคาร์บอเนตผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงจากวัสดุเหนียวเป็นวัสดุเปราะ จากการวิเคราะห์ทางความร้อนพบว่า เวลาที่ใช้ในการอบไม่มีผลต่อโครงสร้างหลักของพอลิคาร์บอเนตและสัดส่วนองค์ประกอบของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม แต่ความร้อนจะส่งผลให้โครงสร้างภายในของสายโซ่พอลิเมอร์ เกิดการจัดเรียงเป็นระเบียบมากขึ้น

CHALERMCHAI CHAITONGRAT : EFFECT ANALYSIS OF THERMAL
FACTOR TO POLYCARBONATE COMPOSITE MATERIAL.

THESIS ADVISOR : SOMSAK SIWADAMRONGPONG. Ph.D., 109 PP

POLYCARBONATE COMPOSITE/GLASS TRANSITION TEMPERATURE/
ELONGATION

Composite of polycarbonate is widely used in various applications as parts and products, such as comb in hard disk drive manufacturing process. It is known that heat usually deteriorates polycarbonate composite properties. The deterioration may be resulted from changing of its structure, and yield to shorter life time. However, mechanism of heat effect to life time of polycarbonate composite is still unclear. Therefore, this study aims to study effect of temperature and time to properties of polycarbonate composite. Polycarbonate composite specimen was baked at 75 90 105 and 120 degree Celsius for 1/4 3/4 4 8 12 and 24 hours. The specimens will be tested for mechanical, thermal and morphological properties. It was found that increasing of treatment time and temperature results to changing of the polycarbonate composite from ductile to brittle material. From thermal analysis, it was found that treatment time and temperature seem to be not affect to the polycarbonate structure and composition change. It was proposed that heat may result the interdiffusion of polymer matrix and lead to more order of its structure.

School of Mechanical Engineering

Student's Signature _____

Academic Year 2010

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและบริษัทซีเกท เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวคำรองพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้ความรู้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำด้านวิชาการ ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วราพงษ์ ขำพิศ คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ อาจารย์ ดร.ปภากร สุรนันทน์ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตากรุณา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดี ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

เฉลิมชัย ไชยรงค์รัตน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๓
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	2
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	2
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พอลิคาร์บอเนต.....	4
2.1.1 โครงสร้างของพอลิคาร์บอเนต.....	5
2.1.2 คุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนต.....	5
2.2 การเตรียมขึ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนต.....	6
2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด.....	6
2.2.2 ชนิดของเครื่องขึ้นรูปแบบฉีด.....	6
2.2.3 ส่วนประกอบของเครื่องฉีด.....	7
2.2.4 วงจรการทำงานของเครื่องฉีด.....	8

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.5	หลักการพื้นฐานของ Reciprocating Screw Machine ที่ใช้หน่วยยึดไฮดรอลิก.....	9
2.2.6	ขนาดและรูปร่างของชิ้นตัวอย่าง.....	10
2.2.7	ชนิดของชิ้นตัวอย่าง.....	11
2.3	การทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	13
2.3.1	มาตรฐานในการทดสอบ.....	13
2.3.2	ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม	14
2.3.3	หลักการและวิธีการทดสอบแรงดึง	15
2.3.4	เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบแรงดึง	17
2.3.5	การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึง	22
2.4	การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน	32
2.4.1	อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m).....	33
2.4.2	อุณหภูมิทรานซิชันแก้ว (T_g).....	34
2.4.3	ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat).....	35
2.4.4	การทดสอบทางความร้อน โดยวิธี DSC.....	37
2.4.5	วิธีการทดสอบ (Testing Procedure).....	39
2.4.6	การทดสอบทางความร้อน โดยวิธี TGA	41
2.5	การตรวจสอบพื้นฐานวิทยา	46
3	วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1	การศึกษาผลกระทบทางความร้อนจาก กระบวนการล้างทำความสะอาด	49
3.1.1	หวีประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	49
3.1.2	ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม	50
3.1.3	กระบวนการล้างทำความสะอาดหวี.....	51
3.2	คุณสมบัติและค่าเฉลี่ยการฉีดขึ้นรูปของ ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	การออกแบบจำลองการทดสอบสภาวะทางความร้อน	54
3.3.1	การทดสอบภายใต้สภาวะความร้อนแบบต่อเนื่อง	54
3.3.2	การทดสอบภายใต้สภาวะความร้อนแบบวัฏจักร	55
3.3.3	สภาวะทางความร้อนจากกระบวนการ ล้างวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสม	56
3.4	การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล	56
3.4.1	ทดสอบแรงดึง (Tensile Test)	56
3.5	การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน	57
3.6	การทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ	59
3.7	การทดสอบคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	60
3.7.1	การปรับลำอเล็กตรอน (Alignment)	60
3.7.2	เทคนิคการปรับภาพให้มีคุณภาพ	62
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1	ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางกล	64
4.1.1	ผลของการทดสอบแรงดึงขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบ ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสที่เวลาการอบต่าง ๆ	64
4.1.2	ผลของการทดสอบแรงดึงขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสที่เวลาการอบต่าง ๆ	66
4.1.3	ผลของการทดสอบแรงดึงขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสที่เวลาการอบต่าง ๆ	68
4.1.4	ผลของการทดสอบแรงดึงขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสที่เวลาการอบต่าง ๆ	70
4.1.5	ผลของการทดสอบแรงดึงขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบ ที่อุณหภูมิ 75-120 องศาเซลเซียส.....	72
4.1.6	ผลจากการทดสอบแรงดึง ของขึ้นตัวอย่าง ภายใต้สภาวะทางความร้อนแบบวัฏจักร	73

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.7	ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นส่วนพอลิคาร์บอเนตผสม หน้าตัดวงกลมที่ผ่านการล้างจำนวนรอบต่าง ๆ	74
4.1.8	ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นส่วนพอลิคาร์บอเนตผสม หน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ผ่านการล้างจำนวนรอบต่าง ๆ	76
4.2	ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน	78
4.2.1	ผลการทดสอบ DSC ของชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบ	78
4.2.2	ผลการทดสอบ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่ อุณหภูมิอบ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 4 \text{ hr}$	79
4.2.3	ผลการทดสอบ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่ อุณหภูมิอบ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 8 \text{ hr}$	80
4.2.4	ผลการทดสอบ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่ อุณหภูมิอบ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 12 \text{ hr}$	81
4.2.5	ผลการทดสอบ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่ อุณหภูมิอบ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 24 \text{ hr}$	82
4.3	ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน โดยวิธีเทอร์โมกราวิเมตรี TGA	84
4.3.1	ผลของการทดสอบ TGA ของ ชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบ	84
4.3.2	ผลของการทดสอบ TGA ที่อุณหภูมิอบ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 4 \text{ hr}$	85
4.3.3	ผลของการทดสอบ TGA ที่อุณหภูมิอบ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 8 \text{ hr}$	86
4.3.4	ผลของการทดสอบ TGA ที่อุณหภูมิอบ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 12 \text{ hr}$	87
4.3.5	ผลของการทดสอบ TGA ที่อุณหภูมิอบ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 24 \text{ hr}$	88

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลความร้อนที่กระทำต่อชิ้นตัวอย่าง	91
4.4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นตัวอย่าง ที่ผ่านการดิ่งทดสอบ	91
4.4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นตัวอย่าง ที่ผ่านการหักในไนโตรเจนเหลว.....	93
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อ คุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นตัวอย่าง	95
5.2 สรุปผลของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อ คุณสมบัติทางความร้อนของชิ้นตัวอย่าง.....	95
5.2.1 ผลการวิเคราะห์ DSC.....	95
5.2.2 ผลการวิเคราะห์ TGA	96
5.3 สรุปผลทางสัณฐานวิทยา.....	96
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	96
รายการอ้างอิง	97
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	99
ประวัติผู้เขียน	109

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	แสดงคุณสมบัติและค่าเฉลี่ยของการฉีดขึ้นรูป ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม..... 52
3.2	แสดงคุณสมบัติทางกล..... 52
3.3	แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้า..... 53
3.4	แสดงคุณสมบัติทางความร้อน 53
3.5	แสดงกระบวนการทั่วไปสำหรับการฉีดขึ้นรูป 54
3.6	แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบ ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนต..... 54
4.1	แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการดึงชิ้นตัวอย่างที่ผ่าน การอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส..... 65
4.2	แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการดึงชิ้นตัวอย่างที่ผ่าน การอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส..... 67
4.3	แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการดึงชิ้นตัวอย่างที่ผ่าน การอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส..... 69
4.4	แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการดึงชิ้นตัวอย่างที่ผ่าน การอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส..... 71
4.5	แสดงค่าของอุณหภูมิ T_g ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลง ความชันจากการทดสอบ DSC..... 83
4.6	แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบ ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม 90

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดง โครงสร้างทางเคมีของพอลิคาร์บอเนต.....	5
2.2	แสดงเครื่องฉีด (Injection Molding Machine)	8
2.3	แสดงรอบการทำงานของเครื่องฉีด.....	9
2.4	แสดงรูปร่างของชิ้นทดสอบในการทดสอบแรงดึง	11
2.5	แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง	14
2.6	แสดงตัวอย่างชิ้นทดสอบแรงดึง	16
2.7	แสดงการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์	18
2.8	แสดงแผนภาพเซลล์วัดแรง.....	20
2.9	แสดงภาพหน้าตัดของเซลล์วัดแรง	20
2.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ทางวิศวกรรมของวัสดุทั่วไป	22
2.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในช่วงแรกที่ความชันของกราฟมีลักษณะเป็น เส้นตรงหรือวัสดุมีการผิดรูปยืดหยุ่น	23
2.12	แสดงวิธีหาค่ามอดูลัสแบบแทนเจนต์และแบบซีแคนต์	24
2.13	แสดงตำแหน่งความเค้นจุดครากที่หาได้จากวิธีเบื้องต้น	25
2.14	แสดงปรากฏการณ์จุดครากบนและจุดครากล่าง	26
2.15	แสดงตำแหน่งของขีดจำกัดสัดส่วน	27
2.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ	29
2.17	แสดงการหาค่ามอดูลัสของรีซีเลียนซ์.....	31
2.18	แสดงการหาค่าความแกร่งของวัสดุ	32
2.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิ	35
2.20	แสดงแผนภาพของหัววัดของเครื่อง DTA	37
2.21	แสดงการวิเคราะห์พอลิเมอร์ด้วย DSC	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22	แสดงการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมิ 42
2.23	แสดงแผนภูมิแสดงองค์ประกอบของเครื่องมือ Thermobalance 43
2.24	แสดงลักษณะ Spherulite ของพอลิเมอร์ 46
3.1	แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 49
3.2	แสดงขนาดต่าง ๆ ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนต 50
3.3	แสดงกระบวนการล้างทำความสะอาด 51
3.4	แสดงการอบชิ้นตัวอย่างแบบวัฏจักรความร้อน 1 วัฏจักร 55
3.5	แสดงเครื่องทดสอบแรงดึง 57
3.6	แสดงการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC 58
3.7	แสดงการให้ความร้อนของการทดสอบ DSC 59
3.8	แสดงการทดสอบ TGA 60
4.1	แสดงกราฟความเค้นความเครียดของชิ้นตัวอย่างอบ ที่อุณหภูมิ $T_b = 75^{\circ}\text{C}$, $t_{ag} = 0-24 \text{ hr}$ 64
4.2	แสดงกราฟความเค้นความเครียดของชิ้นตัวอย่างอบ ที่อุณหภูมิ $T_b = 90^{\circ}\text{C}$, $t_{ag} = 0-24 \text{ hr}$ 66
4.3	แสดงกราฟความเค้นความเครียดของชิ้นตัวอย่างอบ ที่อุณหภูมิ $T_b = 105^{\circ}\text{C}$, $t_{ag} = 0-24 \text{ hr}$ 68
4.4	แสดงกราฟความเค้นความเครียดของชิ้นตัวอย่างอบ ที่อุณหภูมิ $T_b = 120^{\circ}\text{C}$, $t_{ag} = 0-24 \text{ hr}$ 70
4.5	แสดงความเค้นกับเวลาอบที่อุณหภูมิ $T_b = 75 \ 90 \ 105$ และ 120°C เวลา $t_{ag} = 0-24 \text{ hr}$ 72
4.6	แสดงอิลองเกชั่นกับเวลาอบที่อุณหภูมิ $T_b = 75 \ 90 \ 105$ และ 120°C เวลา $t_{ag} = 0-24 \text{ hr}$ 72
4.7	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์อิลองเกชั่นกับช่วงเวลาวัฏจักร ความร้อนที่เปลี่ยนไป ที่ $T_b = 120^{\circ}\text{C}$ 73
4.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงสูงสุดกับจำนวนรอบการล้าง 74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะยึดกับจำนวนรอบการล้าง..... 75
4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงสูงสุดกับจำนวนรอบการล้าง..... 76
4.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะยึดกับจำนวนรอบการล้าง..... 77
4.12	แสดงกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบ..... 78
4.13	แสดงกราฟการคำนวณหาค่า T_g จากการเปลี่ยนแปลงความชัน ของกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบ 78
4.14	แสดงกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบ ที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 4 \text{ hr}$ 79
4.15	แสดงกราฟการคำนวณหาค่า T_g จากการเปลี่ยนแปลงความชัน ของกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม อบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 4 \text{ hr}$ 79
4.16	แสดงกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบ ที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 8 \text{ hr}$ 80
4.17	แสดงกราฟการคำนวณหาค่า T_g จากการเปลี่ยนแปลงความชัน ของกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม อบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 8 \text{ hr}$ 80
4.18	แสดงกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบ ที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 12 \text{ hr}$ 81
4.19	แสดงกราฟการคำนวณหาค่า T_g จากการเปลี่ยนแปลงความชัน ของกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม อบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 12 \text{ hr}$ 81
4.20	แสดงกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบ ที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 24 \text{ hr}$ 82
4.21	แสดงกราฟการคำนวณหาค่า T_g จากการเปลี่ยนแปลงความชัน ของกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม อบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 24 \text{ hr}$ 82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22	แสดงกราฟ DSC ของซินตัวอย่างอบที่ อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 0-24$ hr 83
4.23	แสดงกราฟ TGA ของซินตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบ 84
4.24	แสดงกราฟ TGA ของซินตัวอย่างอบที่ อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 4$ hr 85
4.25	แสดงกราฟ TGA ของซินตัวอย่างอบที่ อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 8$ hr 86
4.26	แสดงกราฟ TGA ของซินตัวอย่างอบที่ อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 12$ hr 87
4.27	แสดงกราฟ TGA ของซินตัวอย่างอบที่ อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 24$ hr 88
4.28	แสดงกราฟ TGA Weight ของซินตัวอย่างอบที่ อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 0-24$ hr 89
4.29	แสดงกราฟ TGA Deriv. Weight ของซินตัวอย่างอบที่ อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 0-24$ hr 89
4.30	แสดงรูปถ่าย SEM ที่ผิวของซินตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนต ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง (a-g) ที่อุณหภูมิตอบ $T_b = 120^\circ\text{C}$ เวลา $t_{ag} = 0-24$ hr 92
4.31	แสดงรูปถ่าย SEM ที่พื้นผิวของการแตกหักใน ไนโตรเจนเหลวซินตัวอย่าง PC (a-g) ที่ $T_b = 120^\circ\text{C}$ เวลา $t_{ag} = 0-24$ hr 94

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

HSA	Head Stack Assembly
HDD	Hard Disk Drive
KPIV	Key Parameter Input Variable
KPIV	Key Parameter Output Variable
PC	Polycarbonate
DSC	Differential Scanning Calorimeter
DTA	Differential Thermal Analysis
DMTA	Dynamic Mechanical Thermal Analysis
TGA	Thermo Gravimetric Analysis
OM	Optical Microscopy
SEM	Scanning Electron Microscope
SEI	Second Electron Image
TEM	Transmission Electron Microscopy
DI	De Ionized
T_g	Glass Transition Temperature
T_m	Melting Temperature
T_b	Temperature baking
T_{ag}	Time aging
ASTM	American Society for Testing and Materials
YS	Yield Strength
UTS	Ultimate Tensile Strength
EL	Elongation
mm	Millimeter
E	Young's Modulus
ν	Poisson's Ratio
σ	Stress
ε	Strain

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่รู้จักกันว่าวัสดุพอลิคาร์บอเนตเป็นพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติ ทนความร้อนสูง ความแข็งแรงสูง ต้านทานการเสียดสีได้ดี จึงนิยมนำวัสดุที่ทำจากพอลิคาร์บอเนตผสมมาใช้ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ กันอย่างกว้างขวาง ทั้งที่เป็นชิ้นส่วนกลไกของเครื่องจักร และที่เป็นส่วนของผลิตภัณฑ์ เช่น ในกระบวนการประกอบฮาร์ดดิสก์ เป็นต้น กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการผลิตชุดหัวอ่าน/เขียนข้อมูล (Head Stack Assembly : HSA) ถือว่า เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญ กระบวนการหนึ่งในการประกอบฮาร์ดดิสก์ โดยกระบวนการประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟ ประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การล้างทำความสะอาดชิ้นส่วน การประกอบชิ้นส่วน การติดตั้งแปรง การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงาน กระทั่งการขนส่งผลิตภัณฑ์ให้กับกระบวนการถัดไป ในการลำเลียงชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการผลิต หลังจากที่ HSA ถูกประกอบขึ้นมาแล้ว หัวประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนข้อมูล (Comb) ซึ่งถูกออกแบบมาเฉพาะจะถูกนำไปสวมเข้ากับ HSA เพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้หัวอ่าน/เขียนข้อมูลที่อยู่ตรงปลายของ HSA เสี่ยงหายทั้งจากการกระทบกันเองหรือกับสิ่งอื่น อีกทั้งป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนย้ายในแต่ละกระบวนการผลิตอีกด้วย ดังนั้นหัวจะต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ ก่อนที่จะนำไปประกอบเข้ากับ HSA เช่น การล้างทำความสะอาด การทำให้แห้ง และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ หัวที่ถูกประกอบเข้ากับชุดหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์จะสวมอยู่ตลอดเวลา จนกระทั่ง HSA ถูกประกอบเข้ากับดิสก์ หัวจึงจะถูกถอดออกอย่างถาวร เพื่อรอกลับเข้าสู่รอบการผลิตรอบใหม่ต่อไป ซึ่งหัวทุกตัวจะต้องผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดและตรวจคัดแยกคุณภาพด้วยสายตา ก่อนจะนำกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตในรอบใหม่อีกครั้ง ซึ่งลักษณะการใช้งานดังกล่าว ในสภาวะทางความร้อนจากกระบวนการล้างทำความสะอาดนั้น จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางความร้อน นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของหัวอย่างมาก แต่กลไกและผลกระทบของความร้อนต่อหัวในแง่ของอายุการใช้งานยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจังเป็นระบบ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลา ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางความร้อนของพอลิคาร์บอเนตผสม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ทำการศึกษาวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมที่ใช้ผลิตหวีจำนวน 1 รุ่น สำหรับการผลิตฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้วของบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาและเก็บข้อมูลทางเทคนิคของ วัสดุ และกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับชุดหัวอ่าน/เขียนและหวี
3. ออกแบบการทดลองสำหรับการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่มีต่อวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสม
4. จำลองอิทธิพลทางความร้อนจากกระบวนการล้างทำความสะอาดที่กระทำต่อหวี โดยการอบขึ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม (Specimen)
5. นำชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมมาทดสอบแรงดึง (Tensile Test) Differential Scanning Calorimeter (DSC) Thermo Gravimetric Analysis (TGA) และ Scanning Electron Microscope (SEM)
6. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาต่อคุณสมบัติของชิ้นตัวอย่างเพื่อหาผลกระทบทางความร้อน
7. จัดทำเอกสารและรายงานการวิจัย

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1. อาคารศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ 4 5 และ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
2. บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. ตู้อบไฟฟ้า Memmert รุ่น UFE 600 สำหรับจำลองสภาวะทางความร้อนที่กระทำต่อชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม
2. เครื่องทดสอบแรงดึง Instron Universal Testing Machine 5560 โดยใช้โหลดเซลล์ขนาด 5 kN สำหรับทดสอบดึงชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม
3. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซอร์ฟแวร์ Pyris ใช้สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการทดสอบ
4. เครื่อง Thermo Gravimetric Analysis (TGA) ใช้สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการทดสอบ
5. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ใช้สำหรับตรวจสอบคุณภาพผิวและหน้าตัดของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการทดสอบ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางความร้อนของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมได้
2. ช่วยลดความสูญเสียกำลังคนและเวลาในการตรวจสอบคัดแยกหวีได้
3. สามารถนำผลข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์หามาปรับปรุงและออกแบบหวีให้มีประสิทธิภาพการใช้งานได้ดีขึ้น

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนหลัก ๆ สี่ส่วน คือ การเตรียมชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมรูปร่างคัมเบล ส่วนที่สองทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Property Testing) โดยการทดสอบแรงดึง เพื่อบอกถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม ในส่วนที่สามจะเป็นการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal Property Testing) และในส่วนสุดท้ายจะเป็นการตรวจสอบสัณฐานวิทยา (Morphological) ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม ซึ่งความรู้โดยทั่วไปที่เราได้นำมาศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีดังนี้

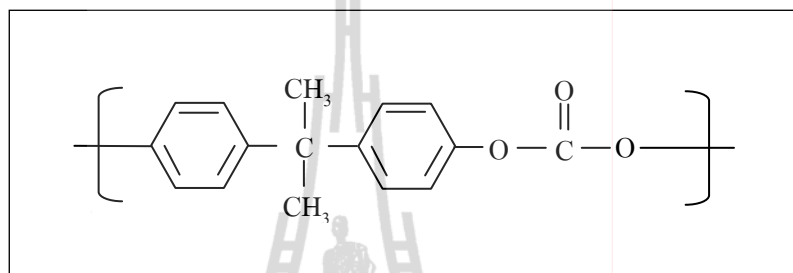
- 2.1 พอลิคาร์บอเนต
- 2.2 การเตรียมชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม
- 2.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล
- 2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน
- 2.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

2.1 พอลิคาร์บอเนต

พอลิคาร์บอเนตหรือที่รู้จักด้วยชื่อเครื่องหมายการค้า Lexan, Makrolon, Makrolear เป็นต้น เป็นกลุ่มของ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือเรซิน เป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลาย เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่อเย็นตัวลงจะแข็งตัว สามารถเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้โครงสร้างโมเลกุลเป็น โซ่ตรงยาว มีการเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมาก จึงสามารถหลอมเหลวได้ หรือเมื่อผ่านการอัดแรงมาก ๆ จะไม่ทำลายโครงสร้างเดิม

2.1.1 โครงสร้างของพอลิคาร์บอเนต

พอลิคาร์บอเนตนั้นได้รับการเรียกตามโครงสร้างที่มีกลุ่ม คาร์บอเนต (-O-(C=O)-O-) พอลิคาร์บอเนตมีลักษณะโปร่งใส แข็ง ทนแรงยึด และแรงกระแทกได้ดี ทนความร้อนสูง ทนกรด แต่ไม่ทนด่าง



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิคาร์บอเนต

จากรูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิคาร์บอเนต จะเห็นโครงสร้างหกเหลี่ยมสองด้าน โครงสร้างหกเหลี่ยมนี้เรียกว่า กลุ่มฟีนิล (Phenyl Group) นอกจากนี้ยังจะเห็น CH_3 สองกลุ่มเรียกว่ากลุ่มเมทิล (Methyl Group) โดยกลุ่มการแสดงของกลุ่มฟีนิลในห่วงโซ่โพลีเมอร์และด้านเมทิล นำไปสู่ความแข็งแรงในระดับโมเลกุลของพอลิคาร์บอเนต ความแข็งแรงนี้มีผลต่อคุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนตโดยตรง

2.1.2 คุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนต

พอลิคาร์บอเนตมาจาก Bisphenol (BPA) เป็นสารอินทรีย์ ที่มี ฟีนิล สองหมู่ ฟังก์ชัน เป็นวัสดุที่คงทนมาก ถึงแม้จะทนต่อแรงกระแทกสูง แต่ก็มี ความต้านทานรอยขีดข่วนต่ำ พอลิคาร์บอเนตมีอุณหภูมิทรานซิชันแก้ว ประมาณ 150°C ค่ายังโมดูลัสประมาณ (E) 2.0-2.4 GPa ค่าความต้านทานแรงดึง 55-75 MPa เปรอร์เซ็นต์ออลองเกชัน 80-150%

2.2 การเตรียมชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม

2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด

กระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด ใช้ในการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์หลายประเภท ทั้งเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เทอร์โมเซต (Thermoset) และยาง (Rubbers)

Hiatt, J., and Hiatt, A. (1872) ได้รับสิทธิบัตร (Patent) สำหรับเครื่องขึ้นรูปแบบฉีด ซึ่งใช้สำหรับขึ้นรูปเซลลูลอยด์หรือเซลลูโลสไนเตรท (Celluloid or Cellulose Nitrate) และ Hiatt, J. (1878) ประดิษฐ์แม่พิมพ์ที่มีหลาย (Multi-cavity mold) เครื่องแรก หลังจากปี ค.ศ. 1920 มีการผลิตเครื่องขึ้นรูปแบบฉีดในประเทศเยอรมนี

การแพร่ขยายเครื่องขึ้นรูปแบบฉีดเริ่มโดย Willet, W. S. (1956) ซึ่งประดิษฐ์เครื่องขึ้นรูปแบบใช้สกรู (Screw Injection Molding Machine) ในปัจจุบันมีบริษัทผู้ผลิตเครื่องขึ้นรูปแบบฉีดมากมายหลากหลายบริษัท เช่น บอยด์ (Boyd) แวนดอร์น (Van Dorn) โกลสตาร์ (Gold-Star) ของประเทศเกาหลี โตชิบา (Toshiba) ของประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น เครื่องขึ้นรูปแบบฉีดมีหลายขนาดตั้งแต่จำนวนกรรมน้อย ๆ ประมาณ 100 ปอนด์ แรงที่ใช้ในการยึดแม่พิมพ์ (Clamping Force) ตั้งแต่ 1-10,000 ตัน

2.2.2 ชนิดของเครื่องขึ้นรูปแบบฉีด

2.2.2.1 เครื่องขึ้นรูปแบบฉีดสำหรับเทอร์โมพลาสติก (Injection Molding of Thermoplastics)

กระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด คือ การใส่เม็ดพลาสติกเข้าไปในกรวย (Hopper) แล้วทำให้เกิดการส่งพอลิเมอร์ในสถานะของแข็งเข้าไปยังกระบอกฉีด (Injection Barrel) ที่มีอุณหภูมิมากกว่า (Glass Transition Temperature : T_g) หรือ (Melting Temperature : T_m) ซึ่งมักจะไหลภายใต้ความดันจากนั้นพอลิเมอร์หลอมจะถูกฉีดผ่านหัวฉีด Spur Runner และ Gate ตามลำดับ เข้าไปยังแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า T_g หรือ T_m จากนั้นพลาสติกจะเกิดการแข็งตัว (Solidify) ในแม่พิมพ์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิหลังจากนั้นแม่พิมพ์จะเปิดออกและผลิตภัณฑ์จะถูกกระทุ้งออก (Eject)

2.2.2.2 เครื่องขึ้นรูปแบบฉีดสำหรับยาง (Injection Molding of Rubbers)

เครื่องฉีดประเภทนี้จะมีการป้อนโดยอัตโนมัติ (Automatic Feeding) ของชิ้นส่วนยางที่ร้อนเข้าไปในกระบอกฉีด ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวัลคาไนซ์ (Vulcanization Temperature) หลังจากนั้นยางจะถูกฉีดเข้าไปยังแม่พิมพ์ โดยอุณหภูมิที่ผนังแม่พิมพ์จะถูกรักษาไว้ให้สูงพอที่จะเริ่มการวัลคาไนซ์ และทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ของยางภายในแม่พิมพ์ หลังจากนั้นแม่พิมพ์จะถูกเปิดออกและผลิตภัณฑ์จะถูกกระทุ้งออก

2.2.2.3 เครื่องขึ้นรูปแบบฉีดสำหรับเทอร์โมเซตและรีแอคทีฟฟลูอิด (Inject Molding of Thermoset and Reactive Fluids)

กระบวนการคล้ายการขึ้นรูปของเครื่องฉีดยาง คือ ใช้แม่พิมพ์ร้อน (Hot Mold) โดยทั่วไปพอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมเซตจะขึ้นรูปโดยการใส่เครื่องกดอัด (Compression Molding) แต่มีการพัฒนาการใส่เครื่องฉีดสำหรับขึ้นรูปเทอร์โมเซต เช่น เรซินพวกฟีนอลฟอร์มอลดีไฮด์ และ ยูเรียฟอร์มอลดีไฮด์ สำหรับสภาวะที่ใช้ในการฉีดวัสดุพวกเทอร์โมเซตจะมีคุณสมบัติกลับกันกับพวกเทอร์โมพลาสติก เช่น สกรูจะทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่ามากเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Cure ก่อนเวลาอันสมควร (Premature Curing) ของเรซินที่เป็นพวกเทอร์โมเซตและแม่พิมพ์จะร้อนมากกว่าเพื่อให้เกิดการ Cure ของเรซินอย่างรวดเร็ว โดยอุณหภูมิที่กระบอกฉีดฟีนอลิกจะประมาณ 75-80°C และสำหรับยูเรียจะประมาณ 100°C และอาจถึง 110°C สำหรับเมลามีน สัดส่วนการกดอัด (Compression Ratio) ของสกรู ซึ่งเป็น สัดส่วนระหว่างความลึกของต้นสกรู (Flight) ที่ส่วนป้อนส่งสาร (Feeding Zone) กับส่วนส่งรีด (Metering Zone) จะต่ำประมาณ 1 หรือ 1.1 เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการให้ความร้อนที่มากเกินไปเฉพาะจุดจากแรงเฉือน (Shear force) วัสดุที่นิยมนำมาใช้มักเป็นวัสดุจำพวกพอลิเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester) โดยเฉพาะ Dough Molding Compound (DMC)

Dough Molding Compound (DMC) สามารถใช้ได้กับสกรูที่ไม่มีส่วนกดอัดเลยและไม่มีน้ำหล่อเย็นซึ่งถูกฉีดไปในแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิ 180°C ส่วนกระบวนการ Reaction Injection Molding (RIM) จะเป็นการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันในแม่พิมพ์ จากส่วนผสมที่มีสถานะเป็นของเหลวของมอนอเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ โดยจะเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างรวดเร็ว ในขณะที่วัสดุเทอร์โมเซตเป็นของแข็งหรือสารที่มีความหนืดสูงมาก (Highly Viscous) ที่อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม

2.2.3 ส่วนประกอบของเครื่องฉีด

เครื่องฉีดจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักดังต่อไปนี้

2.2.3.1 หน่วยยึด (Clamping Unit)

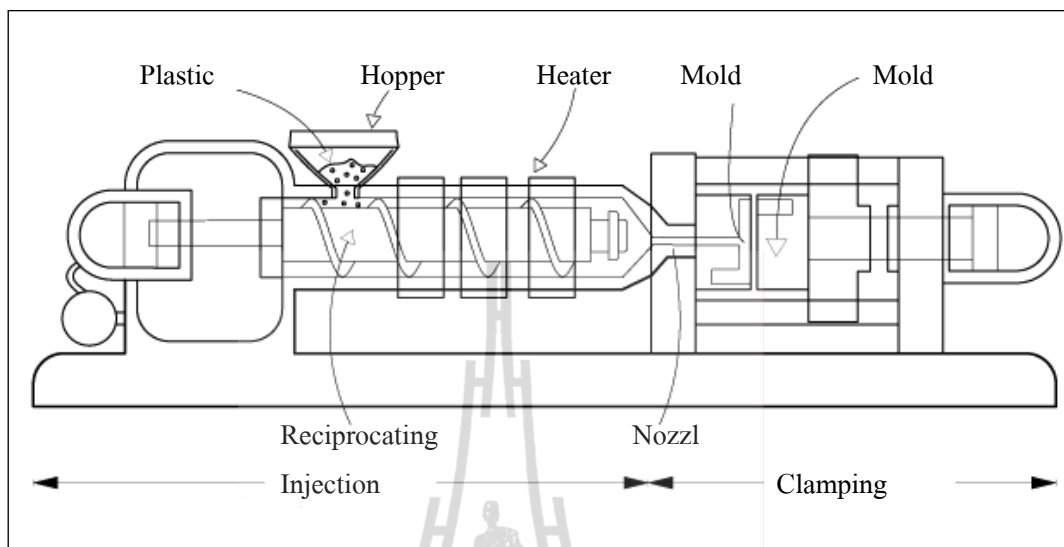
หน่วยยึด คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ยึดแม่พิมพ์และปิด/เปิดแม่พิมพ์

2.2.3.2 หน่วยฉีด (Injection Unit)

หน่วยฉีด คือ ชุดอุปกรณ์ที่มีหน้าที่ป้อน (Feeding) เม็ดพลาสติก หลอมเม็ดพลาสติก (Plasticating หรือ Melting) และส่งพลาสติกหลอมเข้าแม่พิมพ์ (Metering)

2.2.3.3 หน่วยควบคุม (Control Unit)

หน่วยควบคุม คือ ชุดอุปกรณ์ที่ควบคุมระบบการทำงานและกลไกต่าง ๆ ของเครื่อง



รูปที่ 2.2 แสดงเครื่องฉีด (Injection Molding Machine)

2.2.4 วงจรการทำงานของเครื่องฉีด

ลำดับของการทำงานของเครื่องขึ้นรูปแบบฉีดมีดังต่อไปนี้

2.2.4.1 แม่พิมพ์ปิด ในระยะนี้แม่พิมพ์จะไม่มีพอลิเมอร์หลงเหลืออยู่ พอลิเมอร์หลอมที่จะฉีดเข้าแม่พิมพ์ในครั้งต่อไปจะถูกเตรียมให้พร้อมในหน่วยฉีด

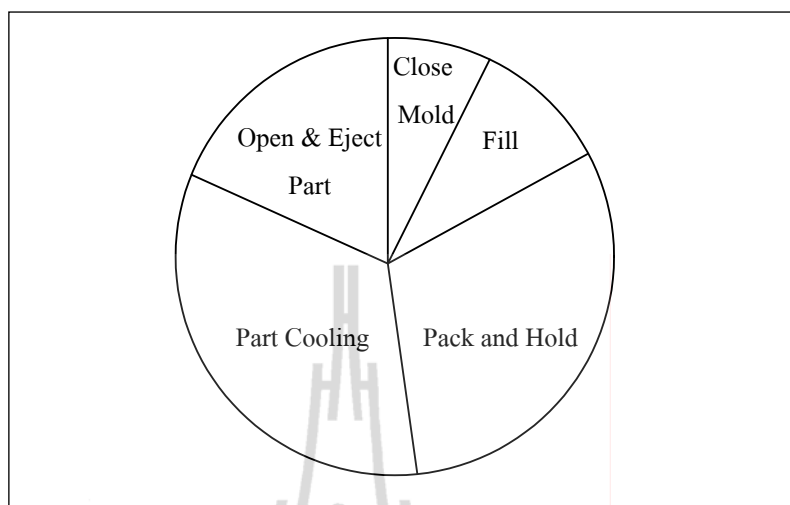
2.2.4.2 ระยะของการฉีด วาล์วจะเปิดและสกรูจะทำหน้าที่เป็น Plunger บังคับให้พอลิเมอร์หลอมผ่านหัวฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์

2.2.4.3 ระยะที่เรียกว่า Holding Stage ระยะที่ความเค้นจะถูกรักษาไว้ให้คงที่ ในช่วงแรกของระยะ การทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลง เพื่อชดเชยปริมาตรที่ลดลงเนื่องจากวัสดุเกิดการหดตัว เมื่อผลิตภัณฑ์แข็งตัวแล้วความดันนั้นก็จะถูกลดลง

2.2.4.4 วาล์วปิดและมีการเริ่มต้นการหมุนของสกรู สกรูจะหมุนถอยกลับเพื่อเก็บรวบรวมพอลิเมอร์หลอมสำหรับการฉีดในขั้นต่อไป

2.2.4.5 ในขณะที่เดียวกับระยะที่ 4 ชิ้นงานที่อยู่ในแม่พิมพ์ก็จะถูกทำให้เย็นตัวลงต่อไปและเมื่อได้เวลาที่พอลิเมอร์แข็งตัวอย่างเหมาะสม แม่พิมพ์ก็จะเปิดออกและชิ้นงานจะถูกกระทุ้งออกมา

2.2.4.6 แม่พิมพ์จะปิดอีกครั้ง และเริ่มทำงานในรอบต่อไป



รูปที่ 2.3 แสดงรอบการทำงานของเครื่องฉีด

จะเห็นได้จากรูปที่ 2.3 เวลาที่ใช้ส่วนใหญ่ในหนึ่งรอบการทำงานของเครื่องฉีด จะถูกใช้ไปในช่วงเวลาการทำให้เย็นตัวลง (Cooling Rate) จึงถือว่ามีความสำคัญ ในการลดต้นทุน ต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปอย่างมาก

2.2.5 หลักการพื้นฐานของ Reciprocating Screw Machine ที่ใช้หน่วยยึดไฮดรอลิก

2.2.5.1 วัสดุถูกใส่เข้าไปในกรวยเติมสาร (Hopper)

2.2.5.2 น้ำมัน ที่อยู่หลัง Clamp Ram จะทำให้แผ่นแม่พิมพ์ที่เคลื่อนที่ได้ (Moving platen) เคลื่อนที่ปิดแม่พิมพ์ ความดันหลัง Clamp Ram จะเพิ่มสูงขึ้น แรงเพียงพอที่จะทำให้แม่พิมพ์ปิดตลอดระยะเวลาของการฉีด ถ้าแรงที่เกิดจากพลาสติกมากกว่า Clamp Force แม่พิมพ์ จะเปิดออกทำให้พลาสติกสามารถไหลออกมาบนผิวของแม่พิมพ์เกิดเป็นครีป (Flash) ซึ่งจะต้อง กำจัดออก

2.2.5.3 ก่อนหน้านี้วัสดุจะถูกทำให้หลอมละลายด้วยการหมุนของสกรู ซึ่งจะเปลี่ยนจากพลังงานกลให้เป็นพลังงานความร้อนและรวมถึงความร้อนที่ได้จากแผ่นให้ความร้อนที่หุ้มอยู่รอบกระบอกลัด เมื่อวัสดุหลอมมันจะเคลื่อนไปข้างหน้าตามสันสกรูไปจนถึง ส่วนหน้าของสกรูและความดันที่เกิดขึ้นโดยวัสดุบนสกรูจะผลักสกรูและระบบขับเคลื่อนสกรู รวมทั้งมอเตอร์ไฮดรอลิก (Hydraulic Motor) กลับเหลือไว้แต่กองของวัสดุที่หลอมเหลวไว้หน้า สกรูสกรูจะหมุนต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งการเคลื่อนที่ถอยหลังของสกรู (Rearward Screw) ชนกับ สวิตช์อันหนึ่งที่เรียกว่า Limit Switch สามารถปรับได้ และตำแหน่งของมันจะเป็นตัวกำหนด ปริมาณของวัสดุที่อยู่หน้าสกรู การกระทำลักษณะคล้ายปั๊ม (Pumping Action) ของสกรูจะผลัก

กระบอกสูบไฮดรอลิกซึ่งอยู่ข้างละ 1 อันของสกรูกลับการไหลของน้ำมันจากไฮดรอลิกจะสามารถปรับได้จากวาล์วให้เหมาะสมซึ่งเรียกว่า ความดันย้อนกลับ ซึ่งจะสามารถปรับได้จาก 0-400 psi

2.2.5.4 เครื่องฉีดส่วนใหญ่จะชักสกรูกลับเล็กน้อย (Retract) ที่จุดนี้เพื่อขยายขนาด (Decompress) วัสดุเพื่อไม่ให้ไหลย้อน (Drool Out) จากหัวฉีด ซึ่งเราเรียกว่าการดูดกลับ (Suck Back) และสามารถควบคุมได้โดยการจับเวลา

2.2.5.5 กระบอกสูบไฮดรอลิกของเครื่องฉีดทั้ง 2 ตัว จะนำสกรูเคลื่อนที่ไปข้างหน้าฉีดวัสดุเข้าแม่พิมพ์ ความดันของเครื่องฉีดจะถูกรักษาไว้ให้คงที่เป็นระยะเวลาหนึ่งหัวของสกรูจะมีวาล์วปิดคอยป้องกันไม่ให้วัสดุรั่วเข้าไปในสันของสกรูระหว่างการฉีด วาล์วนี้จะเปิดเมื่อสกรูหมุนทำให้สกรูไหลเข้าไปอยู่ข้างหน้าได้

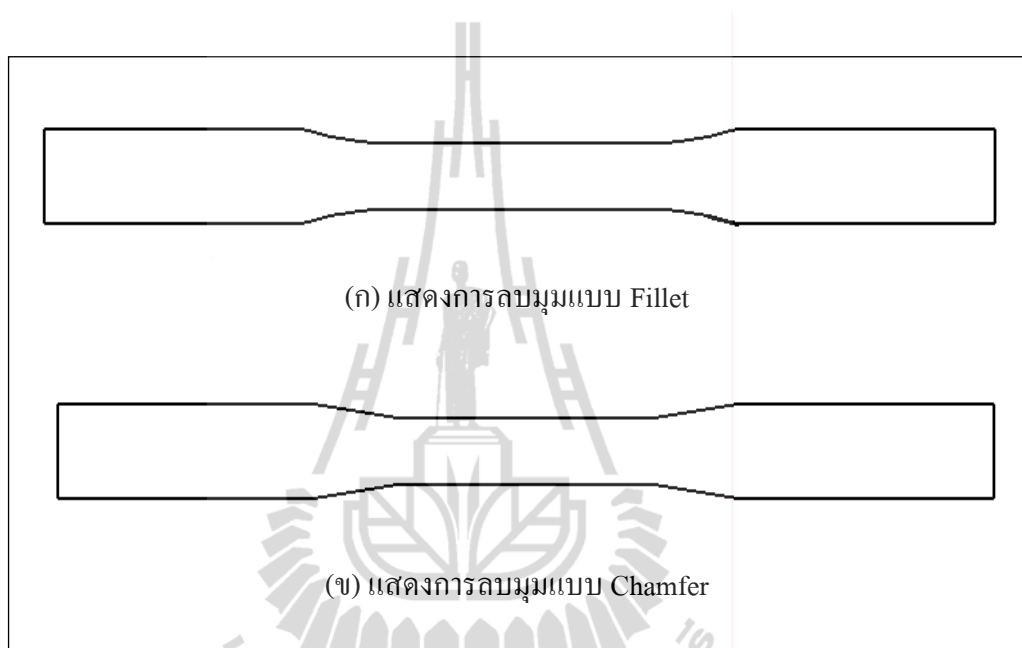
2.2.5.6 ความเร็วของน้ำมันและความดันในกระบอกสูบทั้ง 2 จะทำให้มีความเร็วที่มากพอที่จะเติมวัสดุให้เต็มแม่พิมพ์ให้เร็วที่สุดเท่าที่จำเป็นและรักษาความดันนี้เพียงพอที่จะขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยปราศจากข้อบกพร่องต่าง ๆ เช่น รอยยุบ (Sink Mark) รอยจากการไหล (Flow Mark)

2.2.5.7 ความร้อนจะค่อย ๆ ถูกระบายออกจากแม่พิมพ์ โดยการไหลเวียนของตัวหล่อเย็นผ่านรูที่เจาะไว้ที่แม่พิมพ์ เวลาในการทำให้พลาสติกแข็งตัวจนกระทั่งสามารถถูกกระทุ้งออกจากแม่พิมพ์ได้จะถูกตั้งไว้บนตัวจับเวลา (Clamp Timer) เมื่อหมดเวลา ฟาแม่พิมพ์ส่วนที่เคลื่อนที่ได้จะกลับขึ้นสู่ตำแหน่งเดิมและแม่พิมพ์ก็จะถูกเปิดออก

2.2.6 ขนาดและรูปร่างของชิ้นตัวอย่าง

ขนาด (Size) และรูปร่าง (Shape) ของชิ้นตัวอย่าง (Specimen) มีความสำคัญมากในการทดสอบวัสดุ วิธีการมาตรฐานที่มีอยู่ในปัจจุบันจะมีการกำหนด ขนาด และรูปร่างของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบที่เฉพาะเจาะจง เพื่อให้การทดสอบมีความถูกต้อง และเที่ยงตรง นอกจากขนาดและรูปร่างของชิ้นตัวอย่างแล้ว ในการทดสอบทางวัสดุนั้น การได้มาของชิ้นตัวอย่างหรือวิธีการเตรียมชิ้นตัวอย่างก็มีความสำคัญมากด้วยเหมือนกัน โดยเฉพาะวัสดุพอลิเมอร์ เช่น ชิ้นทดสอบพอลิเมอร์ 2 ชิ้น ที่ผ่านการเตรียมโดยการหลอมและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) กับชิ้นทดสอบที่ทำให้เย็นตัวอย่างช้า (Annealing) ค่าที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 ชิ้นจะไม่เท่ากัน เช่น ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของชิ้นตัวอย่างทั้งคู่จะไม่เท่ากันเป็นต้น ดังนั้นในการทดสอบเราต้องเขียนวิธีการเตรียมชิ้นทดสอบไว้อย่างละเอียด เพื่อสามารถนำผลมาใช้ในการเชิงเปรียบเทียบได้

จากรูปที่ 2.4 แสดงรูปร่างชิ้นตัวอย่างที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ที่ใช้ในการทดสอบการดึง (Tensile Test) ในการทดสอบเราจะพบว่าผลการทดสอบแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง (ข) จะเกิด Stress Raisers หรือ Stress Intensity ที่ไหล่ (Shoulders) ของชิ้นตัวอย่าง ทำให้รับแรงดึงได้น้อยกว่าชิ้นตัวอย่างแบบ (ก)



รูปที่ 2.4 แสดงรูปร่างของชิ้นตัวอย่างในการทดสอบแรงดึง

2.2.7 ชนิดของชิ้นตัวอย่าง

การทดสอบวัสดุพอลิเมอร์การได้มาซึ่งชิ้นตัวอย่างอาจแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี

- การผสมและการหล่อแบบ (Mixing and Molding)
- ตัดมาจากแผ่นตัวอย่าง (Cutting from Sheet)
- การใช้เครื่องตัดจากแผ่นตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ (Machining from Sheet of Finished Products)

รายละเอียดปลีกย่อยของวิธีการเตรียมชิ้นตัวอย่างก็จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับว่าเราจะใช้วิธีทดสอบมาตรฐานของหน่วยงานใด

สำหรับการเตรียมชิ้นตัวอย่างแบบผสม และการหล่อแบบนั้นเหมาะสำหรับการทดสอบพอลิเมอร์ที่เป็นเม็ดหรือเป็นผง โดยการนำเม็ดหรือผงนั้นมาหล่อเข้าแบบโดยอาศัยความร้อนจนได้เป็นชิ้นตัวอย่างในที่สุด พอลิเมอร์บางชนิด เช่น PVC อาจจะต้องมีการผสมสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) ก่อนที่จะหล่อเข้าแบบ ดังนั้นต้องมีการผสมสารทั้งสองให้เป็นแผ่นก่อนโดยใช้ เครื่องบดสองแกน (Two Roll Mill) จากนั้นจึงทำการกดแบบให้เป็นชิ้นตัวอย่าง ซึ่งปกติจะใช้เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Hot Pass Molding) ส่วนการเตรียมชิ้นตัวอย่างโดยการตัดจากแผ่นโดยตรง สามารถทำได้โดยวิธีง่าย ๆ คือใช้เลื่อยมือ หรือเลื่อยไฟฟ้าตัดชิ้นตัวอย่างตามขนาดที่ต้องการ หรือปัจจุบันมีเครื่องที่เรียกว่า Die Cut ซึ่งใช้ระบบไฮดรอลิกในการตัดชิ้นตัวอย่างสำหรับ Tensile Test ทำให้สะดวกและรวดเร็ว โดยปกติเมื่อเราใช้เลื่อยในการตัดชิ้นตัวอย่างเราจะต้องมีการขัดแต่งขอบของชิ้นตัวอย่างด้วยกระดาษทราย โดยเรียงลำดับจากกระดาษทรายชนิดหยาบไปหาชนิดละเอียด เพื่อให้ขอบของชิ้นตัวอย่างเรียบเสมอกันในการทำงานเดียวกันการใช้เครื่องมือตัดชิ้นตัวอย่างโดยตรงจากผลิตภัณฑ์ วิธีการสุดท้ายนี้เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนและยืดหยุ่นสูง

การนำชิ้นตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทำการทดสอบพอลิเมอร์โดยเฉพาะการทดสอบที่เกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกล ควรนำชิ้นตัวอย่างไปทำการคายสภาพ Conditioning เพื่อกำจัด Stress Raisers หรือ Stress Intensity ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเตรียมชิ้นตัวอย่าง การปรับสภาพที่นิยมทำกันมากที่สุดก็นำไปอบไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 60-70°C สำหรับวัสดุพอลิเมอร์แข็ง เป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง หรืออบที่อุณหภูมิ $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปทดสอบ ดังนั้นก่อนลงมือทดสอบวัสดุต่าง ๆ เราต้องอ่านคู่มือวิธีทดสอบให้ละเอียด และปฏิบัติตามคู่มืออย่างเคร่งครัด เราจึงจะได้ผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือ ถูกต้อง และแม่นยำ

2.3 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบแรงดึง เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางกลประเภทหนึ่ง เพื่อใช้ในการหาคุณสมบัติเชิงกลอันเนื่องจากการที่ชิ้นตัวอย่างทดสอบแรงดึง (Tensile Test Specimen) ถูกดึงให้ยืดจนขาดในแนวแกน โดยกำหนดให้ความเร็วในการดึงมีค่าต่ำและมีค่าคงที่ตลอดการดึง ทั้งนี้เพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความผิดพลาดคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด นอกจากนี้ชิ้นตัวอย่างที่ถูกดึงจะต้องไม่รับภาระกรรมอื่นนอกจากแรงดึง คุณสมบัติที่หาได้จากการทดสอบแรงดึงนั้นมีหลายอย่าง เช่น ความเค้น จุดคราก ความต้านแรงดึง ความเค้นประลัย ความเหนียว มอดุลัสของความยืดหยุ่น เป็นต้น

2.3.1 มาตรฐานในการทดสอบ

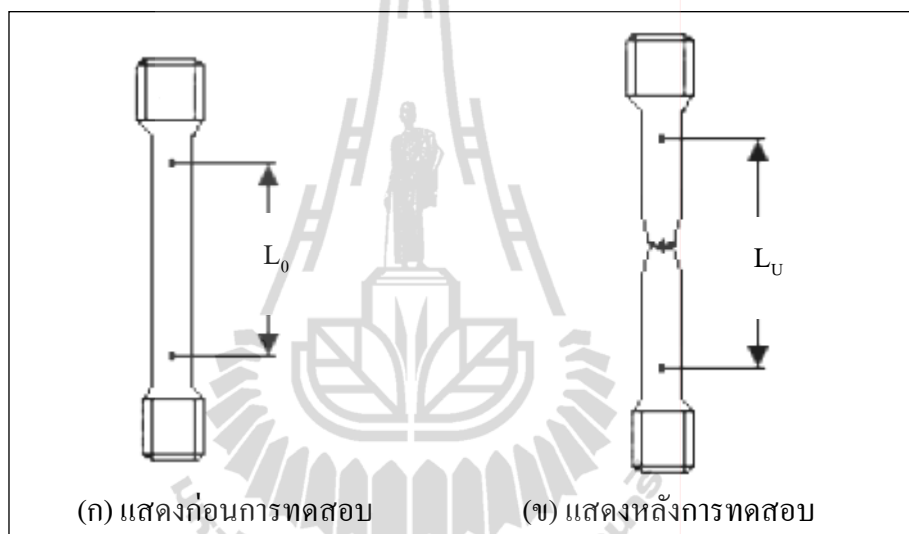
การทดสอบแรงดึงจำเป็นที่จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานต่าง ๆ ที่ถูกกำหนดขึ้น โดยการวิจัยนี้ทำการอ้างอิงตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) การประยุกต์ใช้งานโดยการอ้างอิงมาตรฐานในการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ ดังที่กล่าวมานั้น เพื่อต้องการให้สามารถทำการทดสอบได้อย่างถูกต้องและเพื่อให้ผลการทดสอบที่ได้นั้นมี ความถูกต้องและเชื่อถือได้มากที่สุด

ผลของการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุถูกใช้สำหรับจุดประสงค์มากมาย จุดประสงค์ที่สำคัญที่สุด คือ เรื่องของความปลอดภัยและความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ทางวิศวกรรม ที่ต้องการคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถบอกเป็นปริมาณตัวเลขที่ถูกต้องได้ โดยทั่วไปจุดประสงค์ของการทดสอบแรงดึง คือ

- เพื่อให้ได้ค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุทดสอบ เช่น ความเค้นครากความต้านแรงดึง
- เพื่อใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรมได้อย่างถูกต้อง
- เพื่อควบคุมคุณภาพของวัสดุและผลิตภัณฑ์
- เพื่อควบคุมตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการผลิต
- เพื่อยืนยันถึงการปลอดภัยและความเหมาะสมของวัสดุ
- เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบจัดลำดับเลือกใช้วัสดุ
- เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการทำนายสมบัติเชิงกลอื่น ๆ ของวัสดุ
- เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิจัยและพัฒนาวัสดุ

2.3.2 ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม

ในการทดสอบแรงดึงที่เกิดขึ้นตัวอย่างจะเป็นผลให้เกิดความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ในชิ้นตัวอย่างความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นนี้พิจารณาว่าเป็นความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress) และความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain) ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการที่ชิ้นตัวอย่างถูกดึงด้วยแรงดึงอย่างช้า ๆ ในแนวแกน



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง

โดยขนาดแรงดึงและความยาวของชิ้นงานจะเปลี่ยนไปในแต่ละช่วงของการทดสอบ ดังรูปที่ 2.5 และสามารถเขียนสมการการหาความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมดังนี้

2.3.2.1 ความเค้นทางวิศวกรรม

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

โดยที่ σ = ความเค้นทางวิศวกรรม
 F = แรงดึง
 A = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน

2.3.2.2 ความเครียดทางวิศวกรรม

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

โดยที่	ε	=	ความเครียดทางวิศวกรรม
	ΔL	=	ความยาวที่เปลี่ยนไป
	L_u	=	ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน
	L_0	=	ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน

โดยทั่วไปนิยมใช้ค่าความเค้นและความเครียดในการบอกสมบัติเชิงกลที่ตำแหน่งใด ๆ ในการทดสอบแรงดึง

2.3.3 หลักการและวิธีการทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบที่ง่าย สะดวก และให้ผลการทดสอบที่แสดงค่าสมบัติเชิงกลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นการทดสอบแรงดึงจึงเป็นการทดสอบที่ได้รับความนิยมและเป็นที่รู้จักกันมากที่สุดประเภทหนึ่งในการทดสอบสมบัติเชิงกลพื้นฐานของวัสดุ การทดสอบแรงดึงนั้นอาศัยหลักการ คือ การให้แรงดึงในแนวเส้นตรงแก่ชิ้นตัวอย่างในทิศตรงกันข้ามจนชิ้นงานนั้นเกิดการผิดรูปในช่วงพลาสติก (Plastic Deformation) และมีการแตกหักเกิดขึ้นในที่สุด

2.3.3.1 ประเภทของการทดสอบแรงดึง

อาจแบ่งประเภทการทดสอบแรงดึงออกได้เป็นสามประเภท ได้ดังนี้

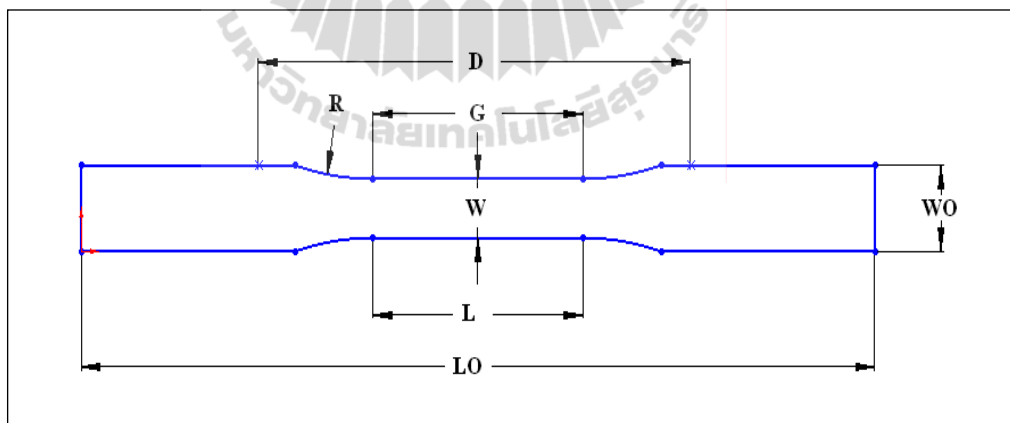
- การทดสอบแรงดึงแบบอัตราการยืดตัวคงที่ (Constant Rate of Extension Machines) การทดสอบแรงดึงแบบอัตราการยืดตัวคงที่เป็นการทดสอบที่กำหนดให้มีการเคลื่อนที่ของคอรอสเฮดที่ความเร็วคงที่โดยไม่สนใจขนาดของแรงดึงที่ให้ ส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในอัตราเร็วคงที่ ซึ่งเป็นประเภทของการทดสอบที่ใช้ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

- การทดสอบแรงดึงแบบอัตราแรงดึงคงที่ (Constant Load Rate Devices) การทดสอบประเภทนี้จะกำหนดให้แรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานทดสอบมีอัตราคงที่ โดยระบบขับเคลื่อนของเครื่องทดสอบประเภทนี้จะตอบสนองต่ออัตราแรงดึงคงที่เมื่อชิ้นงานทดสอบมีการครากเกิดขึ้น

- การทดสอบแรงดึงแบบอัตราความเครียดคงที่ (Constant Strain Rate Testing) การทดสอบแรงดึงแบบอัตราความเครียดคงที่ จะใช้ในการเปลี่ยนแปลงขนาดของความเครียดที่วัดได้จากเครื่องทดสอบอเนกประสงค์เป็นข้อมูลป้อนกลับเพื่อให้เครื่องทดสอบสามารถกำหนดอัตราความเครียดคงที่ได้ ในการทดสอบประเภทนี้ เครื่องทดสอบจะตอบสนองต่ออัตราความเครียดคงที่เมื่อชิ้นงานทดสอบมีการครากเกิดขึ้น

2.3.3.2 ตรวจสอบชิ้นตัวอย่างทดสอบแรงดึง

ก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึงทุกครั้งจำเป็นต้องทำการตรวจสอบชิ้นตัวอย่างเพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นตัวอย่างนั้นมีความเหมาะสมในการทดสอบ ในกรณีที่ตรวจพบชิ้นตัวอย่างที่มีความผิดปกติหรือตำหนิ เช่น รอยแตก ต้องทำการเปลี่ยนชิ้นตัวอย่างทันที นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างของชิ้นตัวอย่างควรเป็นไปตามหลักเกณฑ์มาตรฐานในการทดสอบแรงดึงต่าง ๆ ในกรณีที่ชิ้นตัวอย่างมีขนาดและรูปร่างที่สลับซับซ้อนไปจากที่กำหนดในมาตรฐาน ให้พิจารณาหลักเกณฑ์มาตรฐานที่ใกล้เคียงกับขนาดและรูปร่างของชิ้นตัวอย่างนั้นมากที่สุดเป็นเกณฑ์อ้างอิง และต้องทำการบันทึกข้อมูลทุกอย่างของชิ้นตัวอย่างลงในผลทำการทดสอบ ดังรูปที่ 2.6 แสดงชิ้นตัวอย่างในการทดสอบแรงดึงที่ทำจากวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสม



รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างชิ้นทดสอบแรงดึง

2.3.3.3 ติดตั้งขึ้นตัวอย่างทดสอบแรงดึงในอุปกรณ์จับยึด

การติดตั้งขึ้นตัวอย่างเข้ากับอุปกรณ์จับยึด โดยการเคลื่อนอุปกรณ์จับยึดขึ้นตัวอย่างลงมาให้ได้ระยะพอดีกับระยะจับยึดขึ้นตัวอย่าง จากนั้นควรติดตั้งขึ้นตัวอย่างเข้ากับปากจับตัวบนก่อน ทั้งนี้เพื่อให้ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นตัวอย่างระหว่างการจับยึดมีค่าน้อยที่สุด ในการจับยึดขึ้นตัวอย่างไม่ควรจับแน่นหรือหลวมเกินไป ถ้าจับแน่นไปอาจทำให้ชิ้นตัวอย่างเกิดความเสียหายก่อนเวลาอันควร ในขณะที่ทำการทดสอบแรงดึง ถ้าจับหลวมอาจทำให้ชิ้นตัวอย่างหลุดออกจากปากกาจับได้ในขณะทำการทดสอบ

2.3.4.3 ทำการทดสอบแรงดึง

เมื่อทำการติดตั้งขึ้นตัวอย่างทดสอบเข้ากับอุปกรณ์จับยึดก็พร้อมที่จะทำการทดสอบแรงดึงได้ อย่างไรก็ตามควรตรวจสอบครั้งสุดท้ายอีกครั้งว่าค่าต่าง ๆ ที่ใช้เป็นข้อมูลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุม เช่น อัตราเร็วของการดึงทดสอบเป็นไปตามกำหนดหรือไม่ เมื่อทุกอย่างเรียบร้อยก็เริ่มการทดสอบได้

2.3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบแรงดึง

เครื่องมือทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงในงานวิจัยครั้งนี้ คือ เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Universal Testing Machine 5560 ดังรูปที่ 2.7 เครื่องมือชนิดนี้จะให้แรงดึงแก่ชิ้นตัวอย่างในแนวแกนและวัดความยาวของชิ้นตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไป เครื่องมืออเนกประสงค์เป็นเครื่องมือทดสอบสมบัติเชิงกลที่นิยมอย่างแพร่หลายที่สุดเพราะสามารถนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลประเภทอื่นได้อีกนอกเหนือจากการทดสอบแรงดึง เช่น การทดสอบแรงอัด การทดสอบแรงบิด การทดสอบแรงเฉือน และการทดสอบแรงดัด เป็นต้น โดยทั่วไปเครื่องทดสอบอเนกประสงค์จะใช้ระบบนิวเมตริกในการขับเคลื่อนครอสเฮดที่มีโหลดเซลล์วัดแรงและอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานติดตั้งอยู่ ในปัจจุบันการทำงานของเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ส่วนใหญ่ถูกควบคุมโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการติดตั้งค่าการทดสอบตามที่ถูกระบุ รวมทั้งคอมพิวเตอร์ยังทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลและทำการวิเคราะห์ค่าสมบัติทางกลบางค่าให้อีกด้วย



รูปที่ 2.7 แสดงการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์

2.3.4.1 ข้อกำหนดพื้นฐานของเครื่องทดสอบอเนกประสงค์

- ระดับความผิดพลาดของแรงดึงในเครื่องทดสอบต้องไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ ของค่าที่อ่านได้
- เครื่องทดสอบจะต้องมีความไวสูงในการทดสอบอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงแม้เพียงเล็กน้อย
- อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานจะต้องทำให้ชิ้นงานนั้นอยู่ในแนวแกนเดียวกับแรงดึงหรือต้องได้ศูนย์ (Alignment)
- ในระหว่างการทดสอบจะต้องไม่มีการสั่นสะเทือน การบิดหรือการเลื่อนตำแหน่งในแนวนอนอันเกิดจากการเคลื่อนที่ของคרוสเฮด
- แรงดึงที่ให้แก่ชิ้นตัวอย่างจะต้องสม่ำเสมอ และสามารถควบคุมได้
- การติดตั้งชิ้นงานทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ ในเครื่องทดสอบอเนกประสงค์จะต้องสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว

2.3.4.2 โครงเครื่องทดสอบอเนกประสงค์

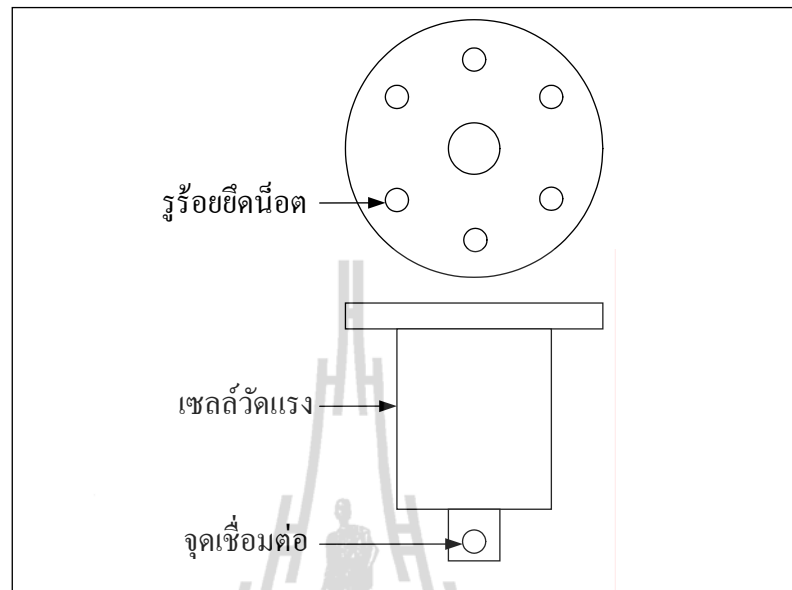
โครงเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ คือ ส่วนที่ให้ความมั่นคง แข็งแรง แก่เครื่องทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างการทดสอบแรงดึง โครงสร้างทดสอบจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ฐานเครื่องและเสาต้านข้าง โดยฐานเครื่องจะทำหน้าที่ให้ความมั่นคงแก่อุปกรณ์ทดสอบ เช่น ครอบสแคว สำหรับฐานของเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ที่ขับเคลื่อนด้วยการเคลื่อนที่ของสกรูจะเป็นส่วนที่เก็บอุปกรณ์ควบคุมระบบขับเคลื่อน เช่น มอเตอร์ สายพาน สำหรับเสาต้านข้างจะทำหน้าที่ค้ำยันครอบสแควเพื่อไม่ให้เกิดการสั่นสะเทือน การยึดตัว การหลุด และการบิดตัวในระหว่างการทดสอบ ขนาดและจำนวนเสาต้านข้างของเครื่องทดสอบขึ้นอยู่กับระดับแรงดึงสูงสุดที่เครื่องสามารถให้ได้ ยิ่งแรงดึงสูงขึ้นจำนวนเสาต้องยิ่งเพิ่มมากขึ้น โครงเครื่องทดสอบจะต้องมีความแข็งแรง เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการทดสอบแรงดึง

2.3.4.3 ครอบสแคว (Crosshead)

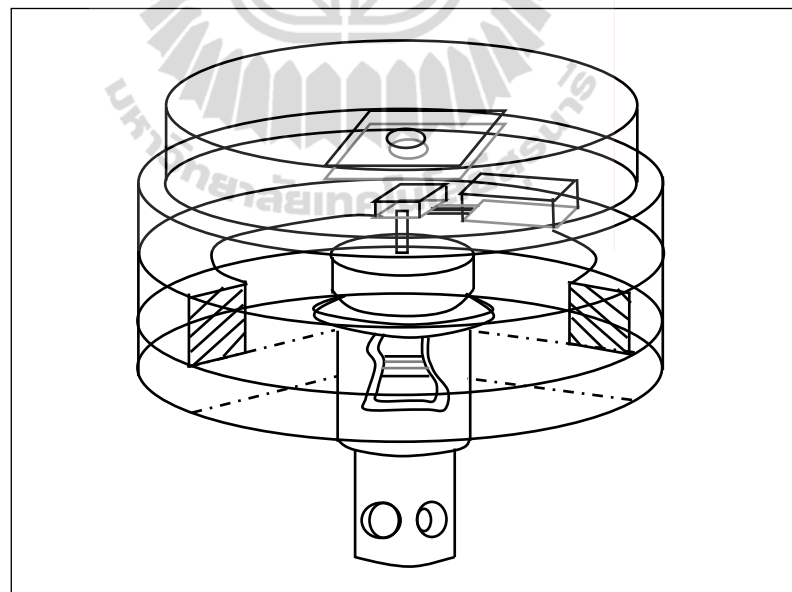
ครอบสแคว คือ ชิ้นส่วนที่วางขวางระหว่างเสาต้านข้างของเครื่องทดสอบอเนกประสงค์โดยมีเซลล์วัดแรงและอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานติดตั้งอยู่ ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ในแนวตั้งขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของการทดสอบ ซึ่งสามารถกำหนดอัตราความเร็วของครอบสแคว (Crosshead) หรือ อัตราความเค้น (Stress Rate) หรือ อัตราความเครียด (Strain Rate) ได้

2.3.4.4 เซลล์วัดแรง (Load Cell)

โดยทั่วไประบบการวัดแรงหรือโหลดในเครื่องทดสอบอเนกประสงค์จะใช้ตัวแปลงสัญญาณ (Transducer) จากแรงที่กระทำไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งก็คือ เซลล์วัดแรงแบบเกจวัดความเครียดนั่นเอง เซลล์วัดแรง คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าเครื่องกลที่ทำการเปลี่ยนข้อมูลระยะกระจัดเชิงกลที่ได้รับให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เกจวัดความเครียด คือ อุปกรณ์ที่ใช้กลไกการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงกล เซลล์วัดแรงที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงจะทำการตรวจวัดแรงดึงที่ส่งผ่านเครื่องทดสอบมาที่ชิ้นตัวอย่างและทำการบันทึกตรวจสอบ และเปลี่ยนข้อมูลกลับไปยังส่วนควบคุมเพื่อทำการขับเคลื่อนส่งแรงให้กับครอบสแควโดยเป็นสัดส่วนกับแรงดึง ภายในเซลล์วัดแรงประกอบด้วย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เกจวัดความเครียด (Strain Gauge) และอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Connector) เพื่อติดตั้งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.8 และ รูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพเซลล์วัตต์แรง



รูปที่ 2.9 แสดงภาพหน้าตัดของเซลล์วัตต์แรง

โดยปกติเซลล์วัดแรงจะเชื่อมต่อกับวงจรบริดจ์ (Bridge Circuit) ที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กมาก วงจรจะทำงานโดยสัญญาณที่ได้รับจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) ของเซลล์วัดแรงอันเป็นผลมาจากแรงที่กระทำ การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงที่กระทำจะทำให้วงจรเสถียรสมดุลและส่งสัญญาณไปยังตัวขยายสัญญาณซึ่งจะเปลี่ยนไปสู่ผลที่แสดงให้เห็นในจอแสดงผล หรือบันทึกลงในกระดาษกราฟ อุปกรณ์ขยายสัญญาณจะทำให้วงจรบริดจ์สามารถชดเชยแรงกระทำเมื่อมีความแตกต่างระหว่างน้ำหนักขณะมีขึ้นตัวอย่างและไม่มี นอกจากนี้อุปกรณ์ขยายสัญญาณยังช่วยในเรื่องของการทดสอบเทียบมาตรฐาน การเลือกช่วงของแรงดึงที่เหมาะสมกับการตั้งค่าที่ศูนย์ รวมทั้งเมื่อมีการเปลี่ยนเซลล์วัดแรงและแรงกระทำใหม่

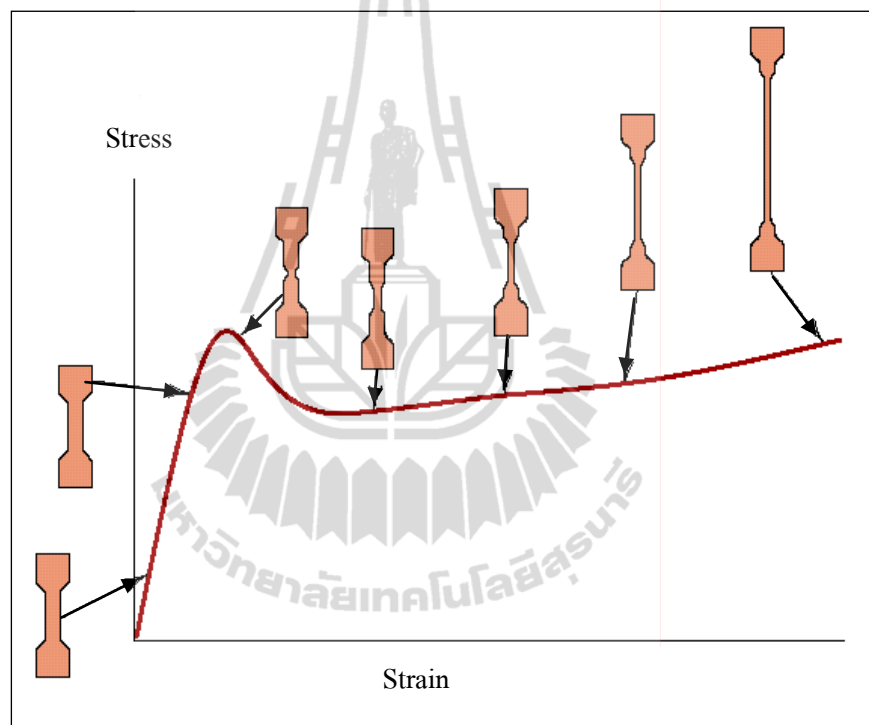
เซลล์วัดแรงจะทำการวัดแรงดึง โดยตรวจสอบสัญญาณทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกจวัดความเครียดแล้วทำการเทียบค่ากับระดับแรงดึงที่เกิดขึ้น เซลล์วัดแรงจะถูกติดตั้งในแนวระดับอยู่ภายในโครสเฮด จำเป็นต้องทำการสอบเทียบมาตรฐานเซลล์วัดแรงสม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำการทดสอบแรงดึงจำนวนมากเป็นเวลานาน สามารถตรวจสอบมาตรฐานการตรวจสอบของเซลล์วัดแรงได้จาก ASTM E4 และ ASTM E74 ตัวอย่างของเซลล์วัดแรงประเภทต่าง ๆ

2.3.4.5 ระบบควบคุม (Controller)

เครื่องทดสอบเนกประสงค์เกือบทั้งหมดที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันจะถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ระบบคอมพิวเตอร์ของเครื่องทดสอบอาจมีความสามารถตั้งแต่เพียงแค่แสดงผลการทดสอบอย่างง่าย ไปจนถึงระบบคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถควบคุมการทดสอบและทำการคำนวณผลการทดสอบที่สลับซับซ้อนได้ สามารถเก็บข้อมูลได้ในปริมาณมาก รวมทั้งยังสามารถพิมพ์รายงานการทดสอบได้ด้วย โดยทั่วไปคอมพิวเตอร์ในเครื่องทดสอบเนกประสงค์จะทำการควบคุมและตรวจสอบข้อมูลต่าง ๆ หลายอย่าง เช่น ความเร็วในการเคลื่อนที่ในโครสเฮด หรือแรงที่กระทำต่อชิ้นตัวอย่าง เป็นต้น แล้วนำข้อมูลเหล่านี้ไปทำการจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล นอกจากนี้คอมพิวเตอร์นั้นอาจวิเคราะห์ประมวลผลและแสดงผลการทดสอบมาในรูปแบบของกราฟ เช่น กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่เปลี่ยนไปกับระยะการเคลื่อนที่ของโครสเฮด เป็นต้น สามารถดูแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมคอมพิวเตอร์ของเครื่องทดสอบเนกประสงค์ได้

2.3.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึง

ผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงจะถูกแสดงออกมาในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ และสามารถนำผลที่ได้นี้มาหาความเค้นและความเครียดดังรูปที่ 2.10 ซึ่งนำไปสู่การคำนวณหาค่าสมบัติทางกลต่าง ๆ ของชิ้นตัวอย่างทดสอบ ได้ค่าสมบัติทางกลเหล่านี้ ได้แก่ มอดูลัส ความเค้นจุดคราก ชีดจำกัดสัดส่วน ความต้านแรงดึง ความเค้นประลัย ความเหนียว ความแกร่ง ความเค้นจริงและความเครียดจริง

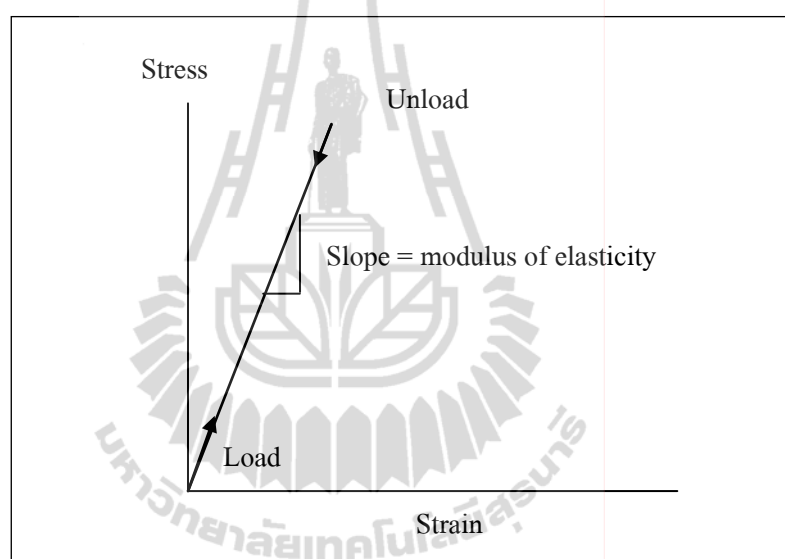


รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมของวัสดุทั่วไป

2.3.5.1 มอดูลัส (Modulus)

มอดูลัส หรือ มอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) หรือ มอดูลัสยัง (Young's Modulus) คือ ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ เมื่อมีแรงกระทำมีหน่วยเป็นกิกะปาสคาล (GPa) หรือปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ค่ามอดูลัสหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดซึ่งแปรผันตรงซึ่งกันและกัน

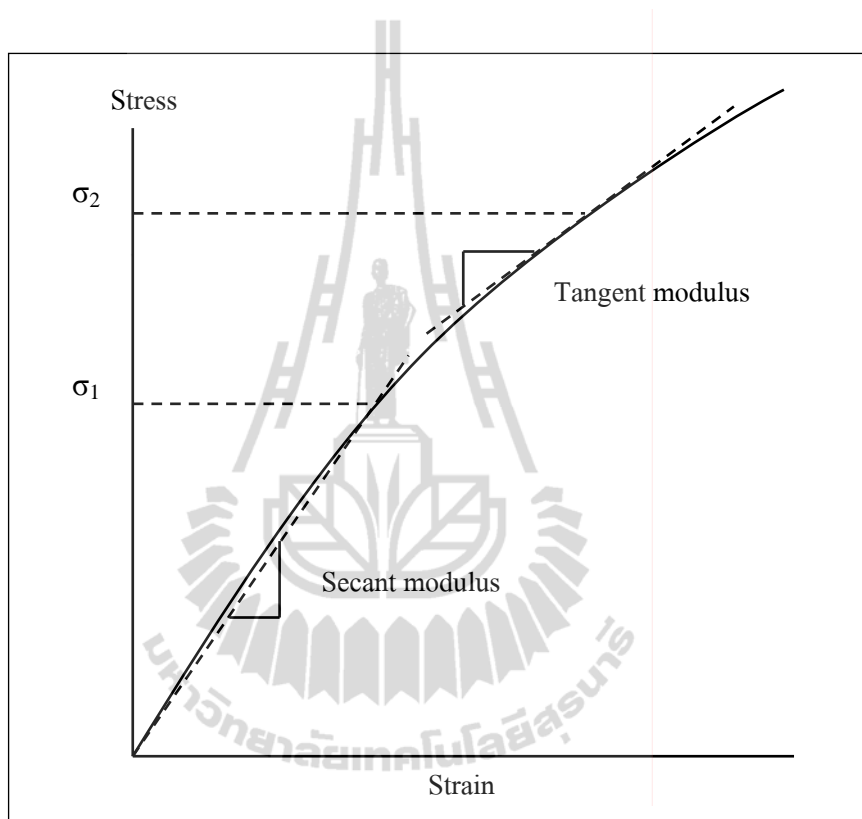
ความสัมพันธ์นี้ถูกค้นพบครั้งแรกโดย โรเบิร์ต ฮุก (Robert Hooke) และ รู้จักกันดีในนามของ กฎของฮุก (Hook's Law) วัสดุใดที่แสดงความสัมพันธ์นี้ จะมีการผิดรูปยืดหยุ่น (Elastic Deformation) นั่นหมายถึง วัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกลับมาอยู่ในสภาพเดิมทุกประการ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน ปกติวัสดุจะมีการผิดรูปยืดหยุ่นชั่วคราวในช่วงความเครียดต่ำเท่านั้น (น้อยกว่าค่าความเครียด 0.1%) ค่ามอดูลัสนี้อาจหมายถึงค่าความแข็งตึง สามารถหาค่ามอดูลัสได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงแรกที่มีความชันของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงความชันของกราฟนี้เองก็คือค่ามอดูลัส ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงแรกที่มีความชันของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง หรือวัสดุมีการผิดรูปยืดหยุ่น

โดยทั่วไปวัสดุเปราะ (Brittle Materials) จะมีการผิดรูปยืดหยุ่นในช่วงค่าความเครียดที่ต่ำมาก ๆ แต่จะได้กราฟที่มีความชันเป็นเส้นตรงที่เห็นได้ชัดเจน ในทางตรงกันข้าม วัสดุเหนียว (Ductile Materials) จะมีการผิดรูปยืดหยุ่นในช่วงความเครียดที่สูง และจะให้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ในกรณีนี้จะไม่สามารถหาค่ามอดูลัสจากความชันของเส้นตรงได้ อย่างไรก็ตามสามารถหาค่ามอดูลัสได้โดยใช้วิธีแบบแทนเจนต์ (Tangent Modulus) หรือแบบซีแคนต์ (Secant Modulus)

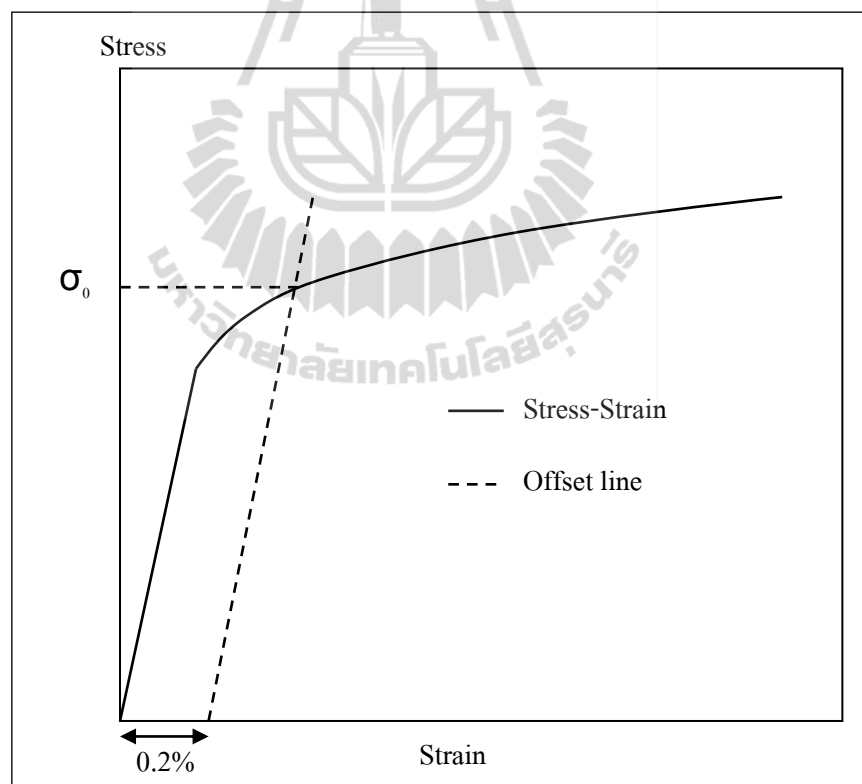
การหาค่ามอดูลัสแบบแทนเจนต์ คือ การหาค่าความชันเส้นสัมผัส ณ จุดใดจุดหนึ่งบนเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สำหรับการหาค่ามอดูลัสแบบซีแคนตันั้น คือ การหาค่าความชันเฉลี่ยของเส้นตรงที่ลากผ่านจุดสองจุดบนเส้นโค้ง โดยจุดแรกจะเป็นจุดกำเนิดและจุดที่สองจะเป็นจุดที่มีค่าความเค้น ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงวิธีหาค่ามอดูลัสแบบแทนเจนต์และแบบซีแคนตัน

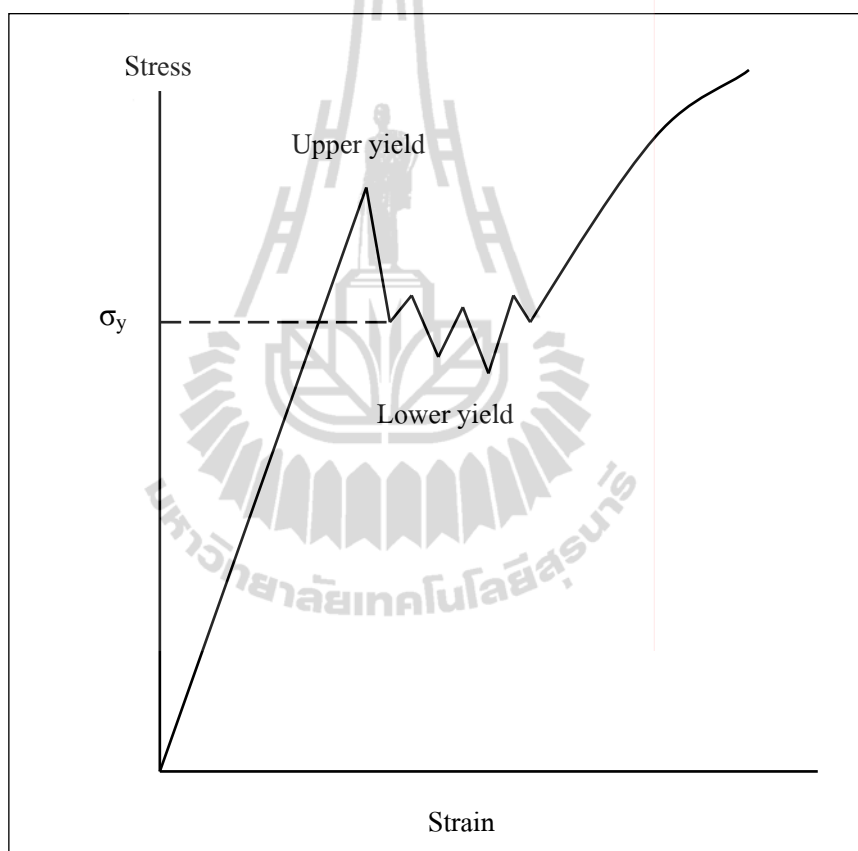
2.3.5.2 ความเค้นจุดคราก (Yield Strength)

ความเค้นจุดคราก คือ ขนาดความเค้นที่วัสดุมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นไปเป็นแบบถาวร ค่าความเค้นจุดครากมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa) หรือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) การหาค่าความเค้นจุดครากที่แท้จริงทำได้ยากและไม่แน่นอน โดยทั่วไปสามารถกำหนดจุดครากได้โดยวิธีเชิงศูนย์ (Offset) วิธีนี้ทำได้โดยลากเส้นตรงให้ขนานกับกราฟในส่วนที่เป็นเส้นตรงช่วงแรก โดยปกติจะให้เส้นตรงนี้เริ่มจากตำแหน่งที่มีความเครียดเท่ากับ 0.2% (หรือ 0.002) เมื่อเส้นตรงเส้นนี้ตัดกับเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ตำแหน่งใด (ตำแหน่งนี้จะอยู่ในบริเวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร) ให้ถือว่าจุดตัดนั้นเป็นจุดคราก (Yield Point) และมีค่าความเค้นจุดคราก ดังรูปที่ 2.13 บางครั้งอาจเรียกความเค้นจุดครากที่หาโดยวิธีนี้ว่าความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress)



รูปที่ 2.13 แสดงตำแหน่งความเค้นจุดครากที่หาได้จากวิธีเชิงศูนย์

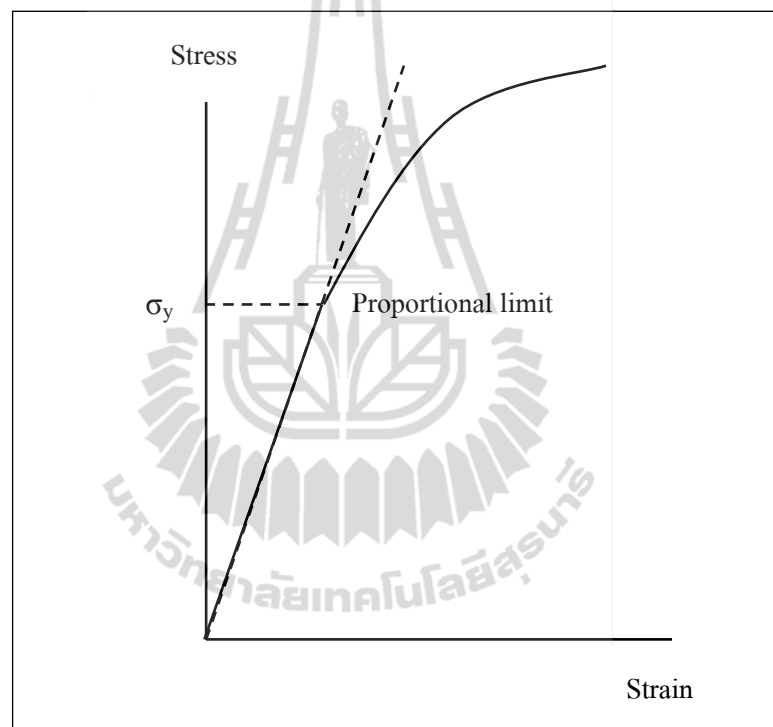
ในบางกรณีที่พฤติกรรมการผิดรูปแบบยืดหยุ่นไปเป็นแบบพลาสติกนั้นเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดเรียกว่า เกิดปรากฏการณ์จุดคราก ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งมีจุดครากสองตำแหน่งคือ จุดครากบน (Upper Yield Point) ที่เป็นจุดแรกที่วัสดุเริ่มเกิดการผิดรูปในช่วงพลาสติกและจะมีความเค้นลดลงเล็กน้อยอย่างทันทีทันใด และจุดครากล่าง (Lower Yield Point) ที่เป็นจุดที่การผิดรูปในช่วงพลาสติกเกิดต่อเนื่องเพียงเล็กน้อยภายใต้ความเค้นที่มีค่าค่อนข้างคงที่และหลังจากนั้นความเค้นนี้ก็จะเพิ่มสูงขึ้นไปตามความเครียดที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.14 แสดงปรากฏการณ์จุดครากบนและจุดครากล่าง

2.3.5.3 ขีดจำกัดสัดส่วน (Proportional Limit)

ขีดจำกัดสัดส่วนเป็นการบอกถึงตำแหน่งจุดสุดท้ายของความเค้นบนเส้นกราฟช่วงที่มีความเค้นสัมพันธ์แบบแปรผันตรงในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังรูปที่ 2.15 โดยความเค้น ณ ตำแหน่งนี้ ก็คือ ความเค้นจุดครากนั่นเอง ดังนั้นขีดจำกัดสัดส่วนจึงมีความสำคัญอย่างมากในการบอกถึงค่าของความเค้นและความเครียดที่แบ่งระหว่างขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit) และขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)



รูปที่ 2.15 แสดงตำแหน่งของขีดจำกัดสัดส่วน

2.3.5.4 ความต้านแรงดึง (Tensile Strength)

ความต้านแรงดึงหรืออาจเรียกว่าความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength : UTS) จะเกิดขึ้นหลังจากเกิดการคราก (Yielding) โดยความเค้นที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากแรงดึงที่กระทำอยู่จนถึงจุดสูงสุดของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังนั้นค่าความต้านแรงดึง ก็คือ ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุนั้น ๆ สามารถรับได้นั่นเอง บ่อยครั้งที่ค่าความต้านแรงดึงจะเป็นค่าเดียวกับค่าความเค้นจุดครากหรือค่าความเค้นประลัย (Fracture Strength) ซึ่งจะพบได้ในวัสดุเปราะ ได้แสดงให้เห็นค่าความต้านแรงดึงที่ตำแหน่งบนสุดของกราฟ ดังรูปที่ 2.16 ตัวอย่างค่าความต้านแรงดึงของวัสดุต่าง ๆ

ที่ตำแหน่งก่อนความต้านแรงดึงที่จุดสูงสุดพบว่าวัสดุจะมีการผิดรูปในช่วงพลาสติกอย่างสม่ำเสมอ แต่เมื่อถึงจุดสูงสุดนี้ขึ้นทดสอบจะเกิดคอคอด (Necking) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกจะเกิดขึ้นที่คอคอดนี้เป็นหลัก

2.3.5.5 ความเค้นประลัย (Fracture Strength)

ความเค้นประลัย คือ ความเค้นที่ขึ้นงานทดสอบเกิดการแตกหัก จุดที่เกิดการแตกหักของวัสดุจะเกิดที่บริเวณขึ้นงานทดสอบเกิดคอคอดมาอย่างต่อเนื่อง

2.3.5.6 ความเหนียว (Ductility)

ความเหนียว คือ การบอกปริมาณขนาดของการผิดรูปในช่วงพลาสติกของวัสดุจนถึงจุดที่วัสดุนั้นเกิดการแตกหัก โดยทั่วไปสามารถบอกปริมาณความเหนียวได้ในรูปของค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation : %EL) และค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (%Reduction in area : %RA) สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์ทั้งสองนี้ได้จากสมการข้างล่าง

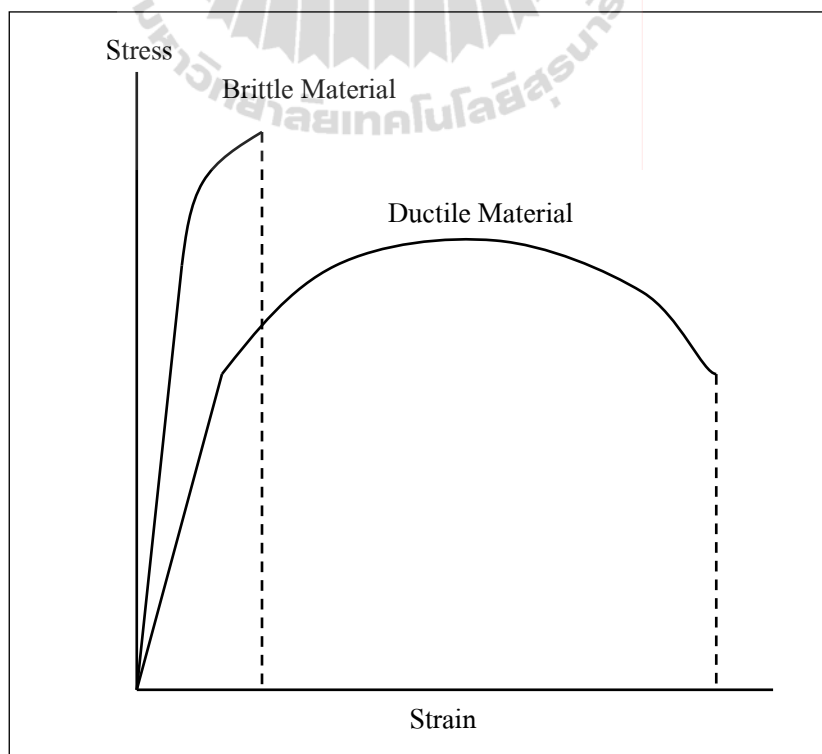
$$\%EL = \left(\frac{L_f - L_0}{L_0} \right) \times 100 \quad (2.3)$$

โดยที่ EL = อีลองเกชัน
 L_f = ความยาวเกจที่จุดแตกหัก
 L_0 = ความยาวเกจเริ่มต้นของชิ้นงาน

$$\%RA = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100 \quad (2.4)$$

โดยที่ RA = Reduction in area
 A_f = พื้นที่หน้าตัดที่จุดแตกหัก
 A_0 = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน

วัสดุที่เกิดการผิดรูปในช่วงพลาสติกได้มากจะเรียกว่าเป็นวัสดุเหนียว นั่นคือ จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดมาก ในทางตรงกันข้ามวัสดุเปราะหรือวัสดุที่มีการผิดรูปในช่วงพลาสติกได้น้อยจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดน้อยด้วย ความแตกต่างระหว่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะสามารถดูได้ ดังรูปที่ 12.16 โดยทั่วไปอาจถือว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุเปราะถ้าหากเกิดการแตกหักที่ค่าความเครียดน้อยกว่า 5% ตัวอย่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุต่าง ๆ



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ

2.3.5.7 ริชิลีเยนซ์ (Resilience)

ริชิลีเยนซ์ คือ การบอกปริมาณการดูดซับพลังงานในขณะที่วัสดุเกิดการผิดรูปยืดหยุ่นภายใต้แรงกระทำ และพลังงานนี้จะถูกคายออกมาทั้งหมดเมื่อแรงกระทำนั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยปกติจะบอกปริมาณนี้ได้ ในค่าของมอดูลัสของริชิลีเยนซ์ (U_r) มีหน่วยเป็นจูลต่อลูกบาศก์เมตร (J/m^3) หรือ นิ้ว-ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว ($in.-lb/in.^3$) พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุ สามารถหาค่ามอดูลัสของริชิลีเยนซ์ได้จากพื้นที่ใต้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่มีระยะความเครียดถึงตำแหน่งของจุดคราก ดังรูปที่ 2.17 สมการค่ามอดูลัสของริชิลีเยนซ์

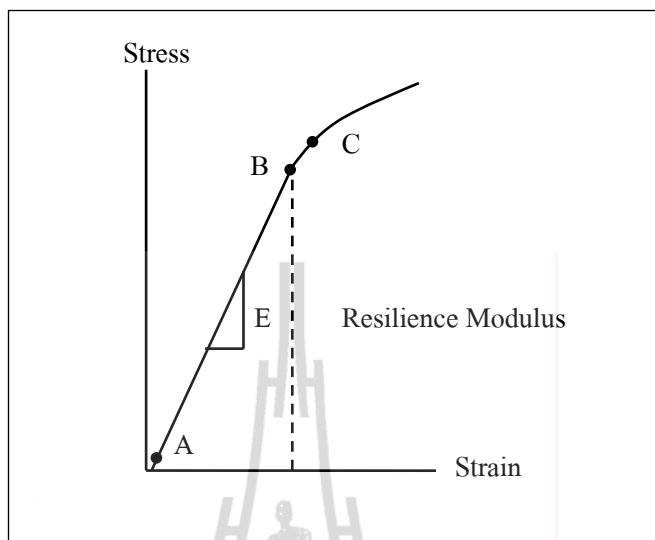
$$U_f = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon \quad (2.5)$$

โดยส่วนใหญ่สามารถประมาณค่ามอดูลัสของริชิลีเยนซ์ได้ง่าย ๆ ถ้าพิจารณาว่าพื้นที่ใต้กราฟดังกล่าวเป็นพื้นที่สามเหลี่ยม ดังนั้นสามารถหาได้จาก

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y \quad (2.6)$$

โดยที่

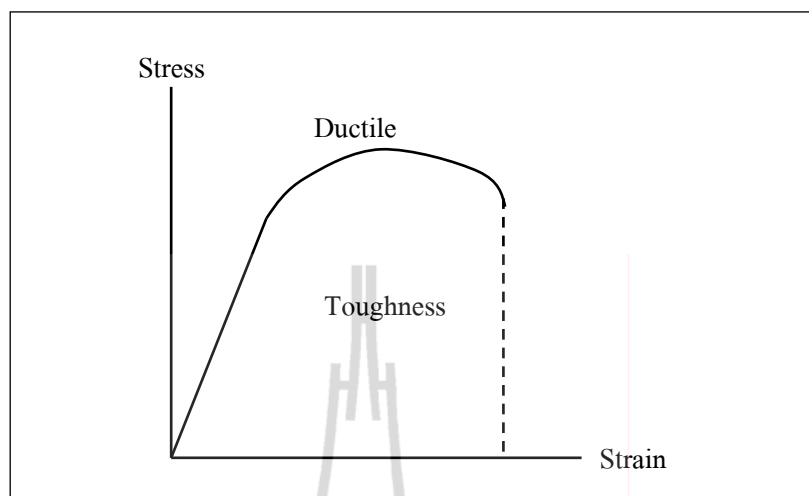
- U_r = มอดูลัสริชิลีเยนซ์
- σ_y = ความเค้นจุดคราก
- ϵ_y = ความเค้นที่ตำแหน่งของจุดคราก



รูปที่ 2.17 แสดงการหาค่ามอดูลัสของริซิเลียนซ์

2.3.5.8 ความแกร่ง (Toughness)

ความแกร่ง คือ การบอกความสามารถในการดูดซับพลังงานในขณะที่วัสดุเกิดการผิดรูปในช่วงพลาสติกจนถึงจุดแตกหักภายใต้แรงกระทำ และจะมีหน่วยเป็นจูลต่อลูกบาศก์เมตร (J/m^3) หรือนิวตัน-ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว ($in.-lb/in.^3$) เช่นเดียวกับหน่วยของริซิเลียนซ์ ดังนั้นจึงเป็นปริมาณพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุ และสามารถหาความแกร่งได้จากพื้นที่ใต้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่มีระยะความเครียดจนถึงจุดแตกหัก ดังรูปที่ 2.18 โดยปกติวัสดุเหนียวจะมีค่าความแกร่ง (พื้นที่ใต้กราฟ) มากกว่าวัสดุเปราะ



รูปที่ 2.18 แสดงการหาค่าความแข็งแรงของวัสดุ

2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุพอลิเมอร์ โดยทดสอบหาค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวของผลึกพอลิเมอร์ (Crystalline Melting Point Temperature : T_m) ค่าความร้อนจำเพาะของการหลอมเหลว และค่า (Glass Transition Temperature : T_g) โดยใช้เครื่อง (Differential Scanning Calorimeter : DSC) ในการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์นั้น จะมีการทดสอบมากมายหลายชนิดโดยเริ่มจากการทดสอบเม็ดพลาสติกที่จะเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูป ซึ่งจะรวมถึงการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูป (Processibility) เช่นการทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เหลว (Melt Flow Indexer) สุดท้ายจะเกี่ยวข้องกับการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง เช่น การทดสอบจุดอ่อนตัวเป็นต้น (Softening Point) หรือการขยายตัวด้วยความร้อน (Heat Expansion) เป็นต้น ซึ่งการทดสอบเหล่านี้จะได้ศึกษาต่อไป สำหรับการทดสอบหาค่า T_m และ T_g นั้นจะใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับกระบวนการขึ้นรูป และคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์

2.4.1 จุดหลอมเหลว (Melting Temperature : T_m)

สำหรับสารโดยทั่วไปที่มีสถานะเป็นของแข็งผลึก เมื่อได้รับพลังงานความร้อน จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะจากผลึกของแข็งเป็นของเหลว อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว เรียกว่าเป็นอุณหภูมิของการหลอมเหลว สำหรับวัสดุพอลิเมอร์นั้นจะมีโอกาสน้อยมากหรือยากมากที่โมเลกุลจะมีการเรียงตัวผลึกอย่างสมบูรณ์ (100% Crystalline Solid) แต่จะมีการเรียงตัวเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi Crystalline) โดยที่จะมีส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) แทรกตัวอยู่ระหว่างส่วนที่เป็นผลึก โดยปกติค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์จะมีค่าตั้งแต่ 100-400 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง และปัจจัยทางกายภาพอื่น ๆ ถ้าพิจารณาทางอุณหพลศาสตร์ (Thermo Dynamics) แล้วค่า T_m เป็นค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH_u) กับค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS_u) ที่จุดสมดุลของพอลิเมอร์ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะจากผลึกกลายเป็นของเหลวดังสมการ

$$T_m^o = \frac{\Delta H_u}{\Delta S_u} \quad (2.7)$$

โดยที่

T_m	=	Melting Temperature
ΔH_u	=	Enthalpy
ΔS_u	=	Entropy

โดยส่วนใหญ่แล้วค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีจะมีผลต่อค่า T_m ของพอลิเมอร์ เนื่องจากขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของพอลิเมอร์ จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงรูป (Conformation) ของพอลิเมอร์ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของดีกรีของการเคลื่อนที่ของโซ่พอลิเมอร์ จะทำให้ความอิสระของการเคลื่อนที่มีค่ามากขึ้น ค่า ΔS_u จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของระดับพลังงานการหมุนของโมเลกุล (Rotational Energy) ที่สถานะผลึกกับสถานะของของเหลว

2.4.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่า T_m ที่เห็นได้ชัด ได้แก่

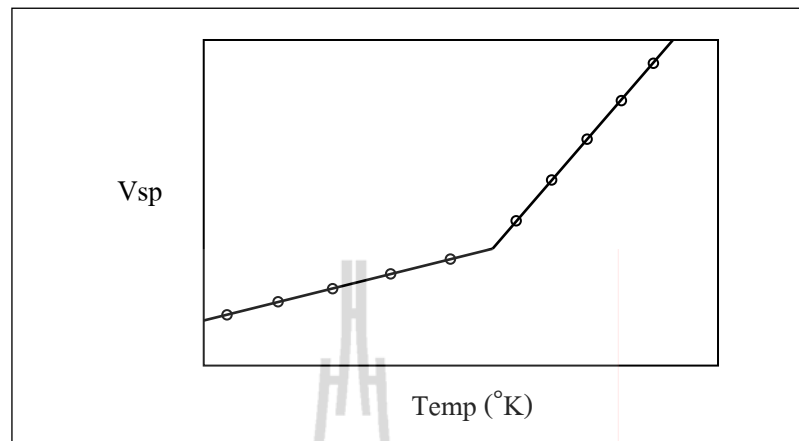
- โครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure) ของพอลิเมอร์ ซึ่งรวมไปถึง ความสมมาตรของโมเลกุล (Symmetry) แรงกระทำระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Bonding) แทคติกซิตี (Tacticity) และ กิ่งก้าน (Branching) ของพอลิเมอร์

- น้ำหนัก โมเลกุล (Molecular Weight) ปัจจัยใดก็ตามที่ทำให้การจัดเรียงตัวของโซ่ให้อยู่ในรูปผลึกได้ดีขึ้น ก็จะทำให้ค่า T_m มีค่ามากขึ้นตามวิธีในการวัดค่า T_m นั้นกระทำได้หลายวิธี วิธีที่นิยมกันมากในการวัดค่า T_m ของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่มากโดยทั่วไปก็อาจใช้ Hot Plate Microscope ภายใต้งแสง Polarized Light และสังเกตการณ์เปลี่ยนผ่านกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งกระทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า ๆ และคงที่ประมาณ 2 องศาเซลเซียส/นาทิจ ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะใช้ได้ดีสำหรับพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง แต่สำหรับพอลิเมอร์ที่มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกต่ำจะสังเกตจุด T_m ได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์ในปัจจุบันได้แก่ การใช้เครื่อง DSC ในการวิเคราะห์หาค่า T_m ซึ่งเราได้อธิบายรายละเอียดของเครื่องมือดังกล่าวต่อไป

2.4.2 อุณหภูมิทรานซิชันแก้ว (Glass transition temperature : T_g)

สำหรับพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงโมเลกุลแบบอสัณฐาน ถ้าจะอธิบายง่าย ๆ ถึงความหมายของค่า T_g อาจกล่าวได้ว่าเป็นอุณหภูมิที่อสัณฐานพอลิเมอร์แข็งหรือที่เรียกโดยทั่วไปว่า Glassy State Polymer มีการเปลี่ยนสถานะของพอลิเมอร์จากสถานะ Glassy ไปเป็นสถานะคล้ายยาง (Rubber State) เป็นลักษณะที่สำคัญและจำเพาะของพอลิเมอร์ เนื่องจากพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกายภาพ (Physical Properties) อย่างเห็นได้ชัด ไม่ว่าจะเป็นค่าความแข็ง (Hardness) หรือค่าความยืดหยุ่น (Elasticity) หรือค่าความแข็งแรง (Strength) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเป็นแบบย้อนกลับได้ (Reversible Process) การเปลี่ยนแปลงสถานะของพอลิเมอร์ ณ อุณหภูมิ T_g นี้เป็นผลอันเนื่องมาจากการที่ส่วนของโมเลกุล (Molecular Segment) เมื่อได้รับพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น เริ่มมีการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นมาอีก 1 อย่าง นอกเหนือจากการสั่น (Vibration) คือการหมุนรอบแกน (Rotation) ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume : V_{sp}) ของโมเลกุลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.19

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในการเปลี่ยนแปลงสถานะจากการ Glassy ไปเป็นสถานะ Rubbery นั้น พอลิเมอร์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาตรจำเพาะ ค่ามอดูลัส (Modulus) ค่าความจุความร้อน (Heat Capacity) ค่าดัชนีการหักเหของแสง (Refractive Index) และคุณสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ดังนั้นเราจึงสามารถใช้การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นตัวแปรที่ใช้ในการหาค่าอุณหภูมิ T_g วิธีที่นิยมกันมากได้แก่การวัดค่าปริมาตรจำเพาะเมื่อเทียบกับอุณหภูมิโดยใช้เครื่องมือวัดที่เราเรียกว่า Dilatometer หรือวิธีการวัดค่าดัชนีการหักเหของแสงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เราจะได้กราฟที่มีลักษณะคล้ายกัน ส่วนในการหาค่า T_g โดยการวัดค่าความจุความร้อนเราจะใช้เครื่อง DSC



รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิ

ปัจจัยที่สำคัญและมีผลต่อค่า T_g ของพอลิเมอร์ได้แก่

- ความยืดหยุ่นของโซ่ (Chain Flexibility)
- โครงสร้างทางเคมีของโซ่ (Chemical Structure)
- น้ำหนักโมเลกุลของโซ่ (Molecular Weight)
- กิ่งของโซ่และการเกิดร่างแห (Branching and Crosslink)

ปัจจัยใดก็ตามที่ทำให้การหมุนของโซ่ต้องใช้พลังงานมากขึ้น ก็จะทำให้ค่าสูงกว่าโซ่ที่เกิดการหมุนของโซ่ได้ง่ายกว่า และโดยปกติค่า T_g ของพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าน้ำหนักโมเลกุลของโซ่

2.4.3 ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat : c)

ค่าความร้อนจำเพาะ คือ ค่าความจุความร้อน (Heat Capacity : C) ต่อหนึ่งหน่วยมวล หรือหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยที่ค่าความจุความร้อนหาได้จาก

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (2.8)$$

โดยที่

C = Heat Capacity

dQ = การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน

dT = การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ซึ่งค่า Q เป็นพลังงานความร้อนที่ถูกดูดซับไว้โดยวัสดุทดสอบ และ T คืออุณหภูมิ ถ้าเราวัดค่าความจุความร้อนที่ความดัน (P) หรือที่ปริมาตรคงที่ (V) สัญลักษณ์ค่าความจุความร้อนก็จะเขียนเป็น C_p และ C_v ตามลำดับ จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ โดยสมมติว่างานที่เกิดขึ้นเป็นงานเชิงกล (Mechanical work) เท่านั้น ดังนั้นค่าความจุความร้อนจึงเขียนได้เป็น

$$C_p = \left(\frac{dU}{dT} \right)_p + P \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (2.9)$$

$$C_p = \left(\frac{dU}{dT} \right)_v \quad (2.10)$$

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (2.11)$$

โดยที่

B = Bulk modulus

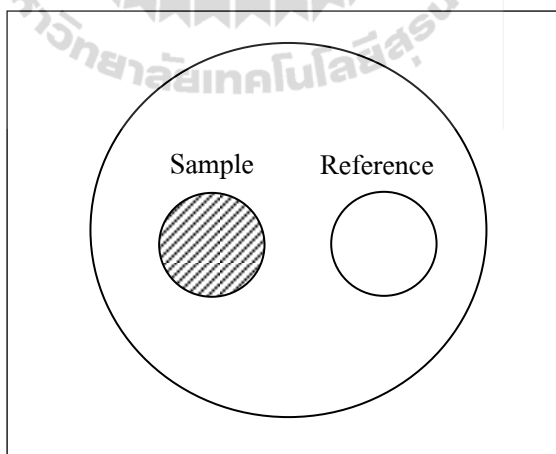
dU = การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน

dT = การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

รายละเอียดของการหาค่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตร โดยการใช้เครื่อง Dilatometer สามารถอ่านเพิ่มเติมได้จากคู่มือ ASTM D864 (1978) ซึ่งโดยทั่วไปค่าความร้อนจำเพาะของของแข็ง รวมถึงวัสดุพอลิเมอร์ จะอยู่ในช่วง 0.4-4.0 J/g.°K

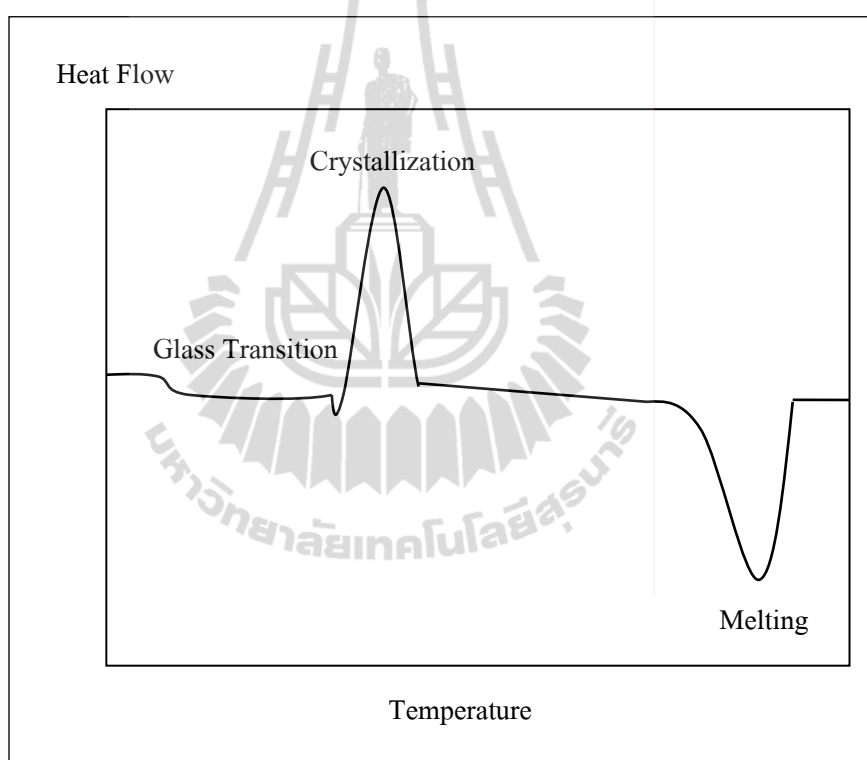
2.4.4 การทดสอบทางความร้อนโดยวิธี Differential Scanning Calorimeter : DSC)

ในอดีตเครื่องมือที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุพอลิเมอร์เรียกว่า (Differential Thermal Analysis : DTA) แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องมือดังกล่าวเป็น (Differential Scanning Calorimeter : DSC) โดยที่หลักการการทำงานของเครื่องมือทั้งสอง ยังคงคล้ายคลึงกัน โดยที่ยังให้ผลการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับ Endothermic Peak และ Exothermic Peak เมื่อพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ (Transition) ความแตกต่างระหว่าง DTA กับ DSC อยู่ที่เครื่องมือวัดแบบ DTA จะวัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารตัวอย่างกับสารอ้างอิง (ส่วนใหญ่เป็นอากาศ) ที่บรรจุอยู่ในถาดอะลูมิเนียม (Aluminium Pan) ดังรูปที่ 2.20 เมื่อให้ความร้อนแก่สารทั้งสองตัวด้วยอัตราเร็ว (Heating Rate) เท่ากัน ขณะที่สารไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะย่อมไม่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารตัวอย่างและสารอ้างอิง แต่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของพอลิเมอร์จาก Glassy ไปเป็น Rubber พอลิเมอร์ตัวอย่างต้องใช้พลังงานบางส่วนเพื่อที่จะทำส่วนของโมเลกุลเกิดการหมุนทำให้เกิดการแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ (ΔT) บนถาดของสารตัวอย่าง และสารอ้างอิง เมื่อเราพล็อตกราฟระหว่างค่า ΔT กับ อุณหภูมิเราจะได้กราฟที่แสดงตำแหน่งของ Endothermic Peak หรือ Exothermic Peak ขึ้นอยู่กับชนิดของการเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ แต่การเปลี่ยนสถานะของพอลิเมอร์โดยทั่วไปจะให้ Endothermic Peak



รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพของหัววัดของเครื่อง DTA

หลักการการทำงานของเครื่อง DSA จะแตกต่างจาก DTA ตรงที่เครื่องจะรักษาอุณหภูมิบนภาควัตถุอย่าง และภาควัตถุอ้างอิงให้เท่ากันเมื่อสารทั้งสองได้รับความร้อน โดยการให้พลังงานชดเชย (Energy Compensation) เข้าไป ซึ่งพลังงานชดเชยที่ให้เข้าก็จะถูกคำนวณกลับเป็นพลังงานโดยอาศัยหลักการทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อเราทำการพล็อตกราฟระหว่างพลังงานที่ให้เข้าไป เพื่อให้อุณหภูมิทั้งสองข้างเท่ากับค่าอุณหภูมิ เราจะได้กราฟที่มีลักษณะทั่วไปดังรูปที่ 2.21 และพื้นที่ใต้กราฟแต่ละ Peak จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าพลังงานความร้อนของการเปลี่ยนแปลงสถานะของวัสดุที่ทดสอบได้



รูปที่ 2.21 แสดงการวิเคราะห์พอลิเมอร์ด้วย DSC

ในส่วนของการวิเคราะห์ของเครื่อง DSC และรูปร่างภายนอกนั้นอาจมีความแตกต่างกันบ้างสำหรับเครื่องมือที่ผลิตจากต่างบริษัท ยิ่งปัจจุบันมีความก้าวหน้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์มากขึ้น ทำให้มีการพัฒนารูปร่างและรูปแบบเครื่องมือได้แตกต่างกันมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหลักการและทฤษฎียังคงเหมือนกันอยู่ นอกจากการวิเคราะห์ด้วยการหาค่า T_m และ T_g ด้วย DSC แล้วยังมีเทคนิคการวิเคราะห์อื่น ๆ อีก ที่สามารถหาค่า T_m และ T_g ได้ เช่น Dynamic Mechanical Thermal Analysis เป็นต้น

2.4.5 วิธีการทดสอบ (Testing Procedure)

2.4.5.1 เครื่องมือทดสอบ (Apparatus)

ในการทดสอบหาค่า T_m และ T_g ของตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตในครั้งนี้ เราจะใช้เครื่อง DSC รุ่น DSC Gold+ ของบริษัท Rheometric Scientific ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิของการทดสอบในช่วงตั้งแต่ -160°C ถึง 770°C และสามารถปรับอัตราการให้ความร้อนได้ (Heating Rate) ตั้งแต่ $0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ถึง $100^{\circ}\text{C}/\text{min}$ การเทียบมาตรฐานอุณหภูมิ (Temperature Calibration) ของเครื่องโดยใช้สารมาตรฐาน 4 ตัวคือ Indium ($T_m = 156.66^{\circ}\text{C}$, $\Delta H_f = 28.41$ mJ/mg) Tin ($T_m = 231.88^{\circ}\text{C}$, $\Delta H_f = 59.58$ mJ/mg) Lead ($T_m = 327.42^{\circ}\text{C}$, $\Delta H_f = 23.01$ mJ/mg) และ Zinc ($T_m = 419.5^{\circ}\text{C}$, $\Delta H_f = 102.09$ mJ/mg) การเก็บข้อมูลจากการทดสอบเราจะใช้ PC Computer ในการเก็บและประมวลผลข้อมูลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Plus V U5.40[®]

ข้อควรระวังก่อนลงมือทำปฏิบัติการทุกครั้งขอให้ผู้ทำการทดสอบอ่านวิธีการใช้อุปกรณ์ของเครื่อง DSC คอมพิวเตอร์และคู่มือการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้เข้าใจอย่างถ่องแท้ และขอความกรุณาอย่าลงมือทดสอบ หรือ เปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ใด ๆ โดยไม่ปรึกษาบริษัทผู้ผลิตก่อน เนื่องจากอุปกรณ์ทุกชิ้นมีราคาค่อนข้างแพง และบอบบาง ง่ายต่อการแตกหักหรือเสียหาย

2.4.5.2 ชิ้นทดสอบ (Test Specimen)

ในการทดลองหาค่า T_m และ T_g ของวัสดุพอลิคาร์บอเนตเราจะใช้เม็ดพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate Pellets) หรือผงพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate Sample) ประมาณ 2-3 ตัวอย่างถ้าเป็นตัวอย่างที่อยู่ในรูปเม็ดก็จะใช้มีดผ่าตัด (Scalpel) ตัดให้มีขนาดน้ำหนักประมาณ 8 mg จากนั้นนำชิ้นทดสอบดังกล่าวใส่ลงไปในถ้วยอะลูมิเนียม (Aluminium Pan) ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง โดยใช้เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง

ข้อสังเกตผู้ทดสอบอาจจะใช้ตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์มาทำการทดสอบหาค่า T_m และ T_g เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่รายงานไว้ในหนังสือพอลิเมอร์ทั่วไป แต่ก่อนการทดสอบต้องแน่ใจก่อนว่าชิ้นตัวอย่างทดสอบดังกล่าวปราศจาก จากสารปนเปื้อนเช่น สารเสริมสภาพพลาสติก หรือ โลหะหนักต่าง ๆ การกำจัดสารปนเปื้อนอื่นต่าง ๆ อาจกระทำได้โดยการละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม และตกตะกอนใหม่ใน Nonsolvent เช่น น้ำ เมทานอล หรือ เอทานอล เป็นต้น และจากนั้นจึงทำให้แห้งในตู้อบสุญญากาศ (Vacuum Oven) อุณหภูมิสูง ประมาณ 60°C เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง

2.4.5.3 วิธีทำการทดลอง (Experimental Procedure)

- ทำการปรับสภาพเครื่องมือวัด DSC (Conditioning) โดยการให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้อง ถึงอุณหภูมิ 330°C ในอัตราเร็ว 10°C/min และรักษาอุณหภูมิที่ 330°C เป็นเวลาประมาณ 2 นาที เพื่อที่จะกำจัดสารแปลกปลอมที่อาจจะติดอยู่บนหัววัด (DSC Cell) ออก
- ทำการหา Base line ของเครื่อง DSC โดยการวางถ้วยอะลูมิเนียมเปล่าในตำแหน่งตัวอย่าง (Sample) และอ้างอิง (Reference) ในหัววัดของเครื่อง DSC ภายใต้บรรยากาศเดียวกันกับบรรยากาศที่จะทำการวัดสารตัวอย่าง ทำการหา Base line ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 50-330°C โดยใช้อัตราการให้ความร้อน (Heat Rate) ในอัตราเดียวกันกับที่จะทำการวัดสารตัวอย่าง (ปกติจะใช้อัตราการให้ความร้อนในการวัดเป็น 10-20°C/min) เก็บบันทึกผลที่ได้ (Save Data) ไว้ในการประมวลผลต่อไป
- ทำการทดสอบค่าของอุณหภูมิมาตรฐานของเครื่อง DSC โดยการใช้ Indium เป็นตัวทดสอบ และใช้ Base line วิเคราะห์ค่า T_m และ T_g ของ Indium ว่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานหรือไม่ ถ้าค่าที่ได้เบี่ยงเบนจากค่ามาตรฐานมาก ๆ $\pm 3^\circ\text{C}$ จะต้องทำมาตรฐานอุณหภูมิของเครื่องใหม่ (Recalibration) โดยการทดสอบสารมาตรฐานที่เหลืออีก 3 สารใหม่ (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 2.4.5.1) ทั้งหมด แต่ถ้าเบี่ยงไปไม่มาก $\pm(0.5-1^\circ\text{C})$ ก็ทำการทำมาตรฐานใหม่โดยใช้เฉพาะค่า T_m ของ Indium เพียงสารเดียวเท่านั้นเป็นตัว Calibration
- ทำการวัดหาค่า T_m และ T_g ของสารตัวอย่างแต่ละตัวที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน และบรรจุอยู่ในถ้วยอะลูมิเนียม ภายใต้บรรยากาศในโตรเจน โดยใช้อะลูมิเนียมเปล่า (อากาศ) เป็นตัวอ้างอิง จากนั้นจึงเริ่มต้นการวัด โดยใช้อัตราการให้ความร้อนครั้งแรก (1st Heating) ที่ 10°C/min จากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 80°C (อุณหภูมิเริ่มต้นขึ้นอยู่กับค่า T_g ของพอลิเมอร์ ปกติจะเริ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g ประมาณ 50-80°C) เมื่อถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่กำหนดไว้แล้ว ก็ปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิเริ่มต้น จากนั้นจึงทำการให้ความร้อนครั้งที่สอง (2nd Heating) เหมือนกับการให้ความร้อนในครั้งแรก และบันทึกข้อมูล เพื่อวิเคราะห์และประมวลผลต่อไป

ข้อเสนอแนะการทดลอง DSC

- ถ้าเราไม่สามารถคาดคะเนค่า T_g และ T_m ของพอลิเมอร์ตัวอย่างได้ปกติ เราจะทำการวิเคราะห์ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ -100°C ถึง 300°C

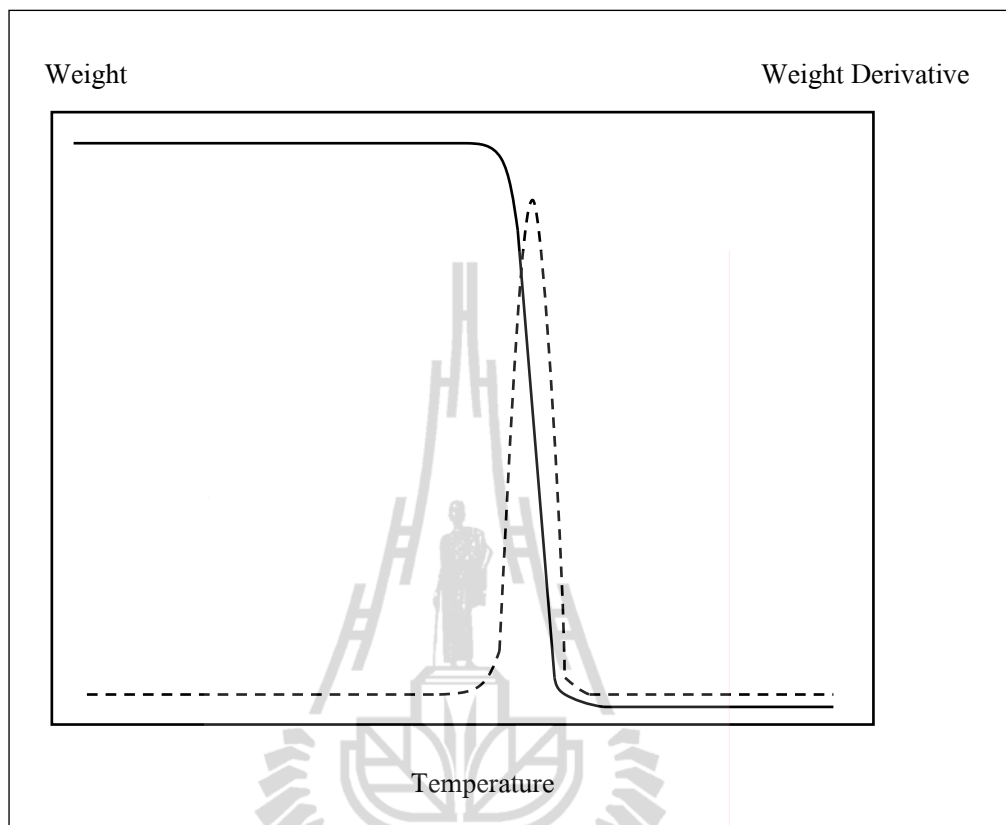
- การทำ 1st Heating เพื่อที่จะกำจัด สารปนเปื้อนที่อยู่บนพอลิเมอร์ตัวอย่าง อาจจะมีผลทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้ผิดพลาดไป ในการทดสอบตัวอย่างพอลิเมอร์ด้วย DSC โดยส่วนใหญ่เราจะไม่ใช่ข้อมูลที่ได้จากการทำ 1st Heating มาสรุปผลการทดสอบ อีกอย่างหนึ่งในการทำ 1st Heating ก็เปรียบได้กับการทำ Conditioning ตัวอย่างก่อนการวัดจริง เนื่องจากสารตัวอย่างที่ได้จากการตัดชิ้นส่วนมาจาก เม็ดพอลิเมอร์ขนาดใหญ่อาจมีบางส่วนที่เกิดส่วนที่เป็นผลึกเพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก Shear Stress ซึ่งมีผลต่อค่า T_g และ T_m ที่วิเคราะห์ได้

- ก่อนทำการทดลองวัดค่า เราจะต้องทำการป้อนข้อมูลค่าน้ำหนักที่แน่นอนของสารตัวอย่างให้กับโปรแกรมการคำนวณ เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของการเปลี่ยนแปลงสถานะของพอลิเมอร์

2.4.6 การทดสอบทางความร้อนโดยวิธี (Thermo Gravimetric Analysis : TGA)

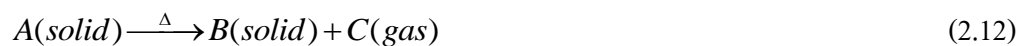
Thermo Gravimetric Analysis เป็นวิธีการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนแบบหนึ่ง โดยตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่าง เมื่อเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิคงที่หรือเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่

ในการวิเคราะห์วิธีนี้มวลของสารตัวอย่างซึ่งอยู่ในบรรยากาศที่ถูกควบคุมจะถูกบันทึกอย่างต่อเนื่อง กราฟที่ได้จาก TGA เรียกว่า TGA Thermogram หรือ Thermal Decomposition curve เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงมวลเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.22 เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมิ โดยการสลายตัวของสารเกิดขึ้นเพียงขั้นตอนเดียว T_1 หมายถึง อุณหภูมิที่เริ่มการเปลี่ยนแปลงสารตัวอย่าง และ T_2 หมายถึง อุณหภูมิสุดท้ายที่สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมิ

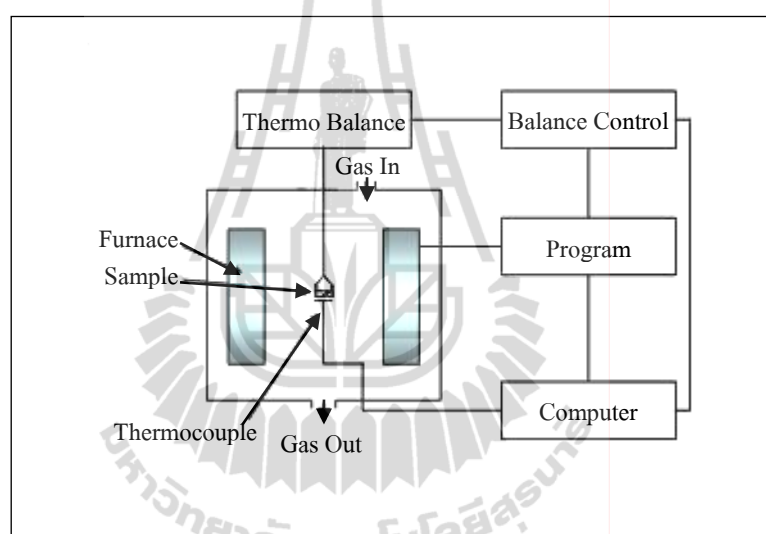
โดยทั่วไป TGA จะใช้ในการศึกษาการเสถียรภาพ (Decomposition) ความเสถียร (Stability) ของสารตัวอย่าง หรือใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ความร้อนที่เกิดขึ้นกับสารตัวอย่างภายใต้สภาวะการทดลองหนึ่ง ๆ สำหรับปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของสารอันเนื่องมาจากความร้อนอาจเขียนได้ดังนี้



การเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับสภาวะการทดลอง มวลเริ่มต้น ปริมาตรและลักษณะทางกายภาพของสารตัวอย่าง รูปร่างและธรรมชาติของวัสดุที่ใช้เป็นภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง ความดันและอัตราเร็วของการเพิ่มอุณหภูมิ

การนำก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารตัวอย่างไปวิเคราะห์ต่อ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบอื่น ๆ เช่น ก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography) อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (Infrared Spectroscopy) ฯลฯ เป็นวิธีที่จะได้ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบ

2.4.6.1 องค์ประกอบของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีเทอร์โมกราวิเมตรี
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีเทอร์โมกราวิเมตรีเรียกว่า Thermobalance หรือ Thermo Analysis มีองค์ประกอบหลัก ดังรูปที่ 2.23 ได้แก่



รูปที่ 2.23 แสดงแผนภูมิแสดงองค์ประกอบของเครื่องมือ Thermobalance

- ตาชั่งละเอียด (Microbalance) มีการออกแบบมาหลายลักษณะเพื่อให้สามารถให้ข้อมูลเชิงปริมาณของสารได้ตั้งแต่ 1-100 มิลลิกรัม แต่โดยทั่วไปปริมาณของสารตัวอย่างที่ใช้อยู่ในช่วง 5-20 มิลลิกรัม ตาชั่งต้องมีความถูกต้องและแม่นยำในช่วงอุณหภูมิที่กว้างและมีความสามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสารได้ในระดับ ± 1 ไมโครกรัม ตาชั่งจะต้องมีการปรับเทียบมาตรฐานมวล (Mass Calibration) เป็นครั้งคราวเพื่อความถูกต้องในการชั่งสารตัวอย่าง

- ภาชนะสำหรับใส่สารตัวอย่าง (Crucible) มีรูปร่าง ขนาดต่าง ๆ กัน และทำจากวัสดุหลายชนิด เช่น แพลทินัม อะลูมิเนียม คิวอर्थ หรืออะลูมินา (Ceramic) การเลือกใช้ภาชนะจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการทดลอง และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง โดยวัสดุที่ใช้ทำภาชนะจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารตัวอย่าง

- เตาเผา (Furnace) และอุปกรณ์สำหรับควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Programmer) อุณหภูมิของเตาเผาจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 1500°C อัตราการให้ความร้อนหรือการทำให้เย็นของเตาเผา สามารถปรับได้ตั้งแต่ 0-200°C/min ฉนวนกันความร้อนและการทำให้ส่วนของเตาเย็นเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไปสู่ตาชั่ง ปกติมักใช้ก๊าซออกซิเจนหรืออาร์กอนหมุนเวียน (Purge) ในเตาเผาเพื่อป้องกันการออกซิไดซ์ของสารตัวอย่าง ในบางการทดลองอาจมีการเปลี่ยนแปลงของก๊าซในระหว่างการทดลอง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มากขึ้น การติดตามอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทำการทดลอง ทำโดยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลตัวเล็ก ๆ ให้ใกล้ภาชนะบรรจุสารตัวอย่างมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้อุณหภูมิที่ถูกระบุใกล้เคียงกับอุณหภูมิจริงของสารตัวอย่าง จะต้องมีการปรับเทียบมาตรฐานอุณหภูมิ (Temperature Calibration) เป็นครั้งคราว เพื่อความถูกต้องในการวัดอุณหภูมิสารตัวอย่าง

- คอมพิวเตอร์ประมวลผลและเก็บข้อมูล Thermobalance ในปัจจุบันจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการควบคุมสภาวะการทดลองและเก็บข้อมูลที่ได้ออกจากการทดลอง ซึ่งขึ้นอยู่กับเครื่องทดสอบ

2.4.6.2 การประยุกต์ใช้งาน

ข้อมูลที่ได้จากวิธี TGA ก่อนข้างจำกัดว่าข้อมูลที่ได้อจากการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนวิธีอื่น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะต้องมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมวลสารตัวอย่างจึงจะสามารถทดสอบโดยวิธีนี้ได้ ดังนั้นวิธี TGA จึงจำกัดอยู่เฉพาะการตรวจสอบเกี่ยวกับ กระบวนการสลายตัวหรือปฏิกิริยาออกซิไดซ์ หรือกระบวนการทางกายภาพ เช่น การระเหย การระเหิด หรือการปล่อยสาร (Desorption)

ในการศึกษาทางพอลิเมอร์ TGA Thermogram ให้ข้อมูลเกี่ยวกับกลไกการสลายตัวซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะ (Character) สำหรับพอลิเมอร์แต่ละชนิด และบางกรณีใช้ในการพิสูจน์ทราบสารตัวอย่างในเชิงปริมาณ ซึ่งแสดง Thermogram จากการวิเคราะห์สารตัวอย่างคือ พอลิเอทิลีนผสมผงถ่าน (Carbon Black) เพื่อป้องกันหรือหน่วงการสลายตัวเนื่องจากแสงอาทิตย์ การวิเคราะห์โดยวิธี TGA จะทำให้รู้ปริมาตรที่แน่นอนที่ผสมอยู่กับพอลิเอทิลีน โดยในการทดลองจะมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของก๊าซจากไนโตรเจนเป็นออกซิเจนในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงมวลของสารในสถานะที่มีไนโตรเจนสิ้นสุดลง ภายใต้สถานะที่มีออกซิเจนผงถ่านจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ผลิตภัณฑ์คือน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลขึ้นอีกครั้ง นอกจากนี้ Thermogravimetry สามารถนำมาใช้ศึกษาพอลิเมอร์ในด้านอื่น ๆ เช่น

- การสลายตัวโดยความร้อนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง
- เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง
- การสลายตัวด้วยกระบวนการออกซิเดชัน
- การระเหยหรือการดูดซับสารโมเลกุลเล็กจากพอลิเมอร์

ตัวอย่าง

- การหาองค์ประกอบและปริมาณของสารตัวเติม (Filler) ใน

พอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอมโพสิต

2.4.6.3 วิธีการทดลอง

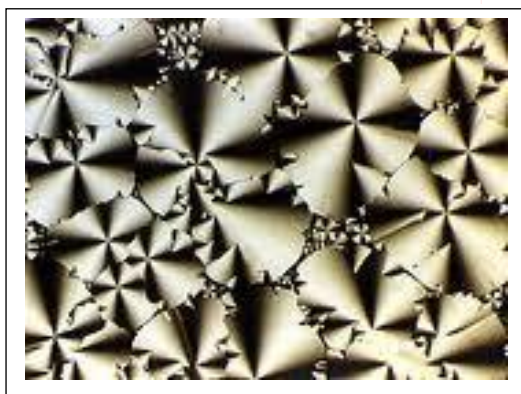
- เตรียมสารตัวอย่างน้ำหนัก ประมาณ 5-20 มิลลิกรัม
- ปรับสถานะของเครื่องมือ (Thermobalance) โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 30-850°C ด้วยอัตราเร็ว 20°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน
- ชั่งน้ำหนักของภาชนะสำหรับใส่สารตัวอย่าง (Crucible) และปรับตั้ง (Tare) ให้เป็นศูนย์
- ใส่สารตัวอย่างในภาชนะที่เตรียมไว้
- น้ำหนักที่แน่นอนของสารตัวอย่างจะถูกชั่ง โดยตาชั่งใน Thermo balance และเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์
- ปิดเตาเผา (Furnace) ที่ใส่สารตัวอย่างไว้ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน 10-15 นาที ก่อนเริ่มการทดลอง

2.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของพอลิเมอร์ที่เกี่ยวข้องกับการขยายขนาดของผลึกพอลิเมอร์ (Crystal Growth) ดังรูปที่ 2.24 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดลำแสงในช่วงที่ตามองเห็นส่องสว่างวัตถุ (Optical Microscope : OM or Light Microscope : LM)

เป็นที่ทราบกันทั่วไปว่าการจัดระเบียบของโครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์สะท้อนให้เห็นถึงตัวแปรต่าง ๆ จากกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งการจกเรียงโครงสร้างของพอลิเมอร์จะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของพอลิเมอร์นั้น ๆ ซึ่งการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์จะมีขั้นตอนการเตรียมพร้อม 2 ขั้นตอน คือ การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสม และการเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษา ดังนั้นในการศึกษาหรือสังเกตการจัดเรียงตัวของสายโซ่ต้องให้สัมพันธ์กับสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเพื่อพัฒนาไปสู่ความเข้าใจในตัวของวัสดุนั้น ๆ สำหรับการใช้งานต่อไป

Spherulite เกิดจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในระดับที่ใหญ่กว่า Lamellae มีลักษณะเป็นทรงกลมรวมตัวกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ เล็กกว่าไมโครเมตร (Submicron) จนถึงระดับหลายมิลลิเมตร ลักษณะเฉพาะของ Spherulite สังเกตได้โดยใช้ OM ชนิดแสงผ่านการโพลาไรซ์หรือแสงถูกกำจัดให้เคลื่อนที่ในระนาบที่แน่นอน ซึ่ง OM ชนิดดังกล่าวนี้เรียกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ (Polarized Light Microscope) ลักษณะเฉพาะของ Spherulite ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ คือ Circular Birefringence ที่มีรูปแบบที่เรียกว่า Maltese Cross



รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะ Spherulite ของพอลิเมอร์

Optical Microscopy เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ นอกเหนือจาก Scanning Electron Microscopy และ Transmission Electron Microscopy เช่น การใช้ Polarized Light Microscopy ในการศึกษาลักษณะของ Spherulites ของพอลิเมอร์ ข้อดีของ OM คือราคาถูกและเทคนิคการใช้ไม่ยุ่งยากเมื่อเปรียบเทียบกับ Electron Microscope เทคนิค OM จะเหมาะสำหรับการศึกษาชิ้นงานที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.1-10 ไมโครเมตร ภาพที่ปรากฏใน OM เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างแสงกับชิ้นงาน ภาพที่ได้จะแสดงรายละเอียดชิ้นของชิ้นงานในระดับกำลังขยายตั้งแต่ 2-200x และ Resolution ที่ดีที่สุดคือ 0.5 ไมโครเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงาน เลนส์วัตถุ (Objective Lens) และความยาวคลื่นของแสง ข้อมูลทางสัณฐานวิทยาที่ได้จาก OM ได้แก่ ขนาด รูปร่าง การจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์เชิงสัมพัทธ์ (Relative Arrangement) และ Orientation ข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องคือ Optical Constant เช่น ค่าดัชนีการหักเหของแสง (Refraction Index) และ Birefringence สามารถหาได้จาก OM เช่นเดียวกัน



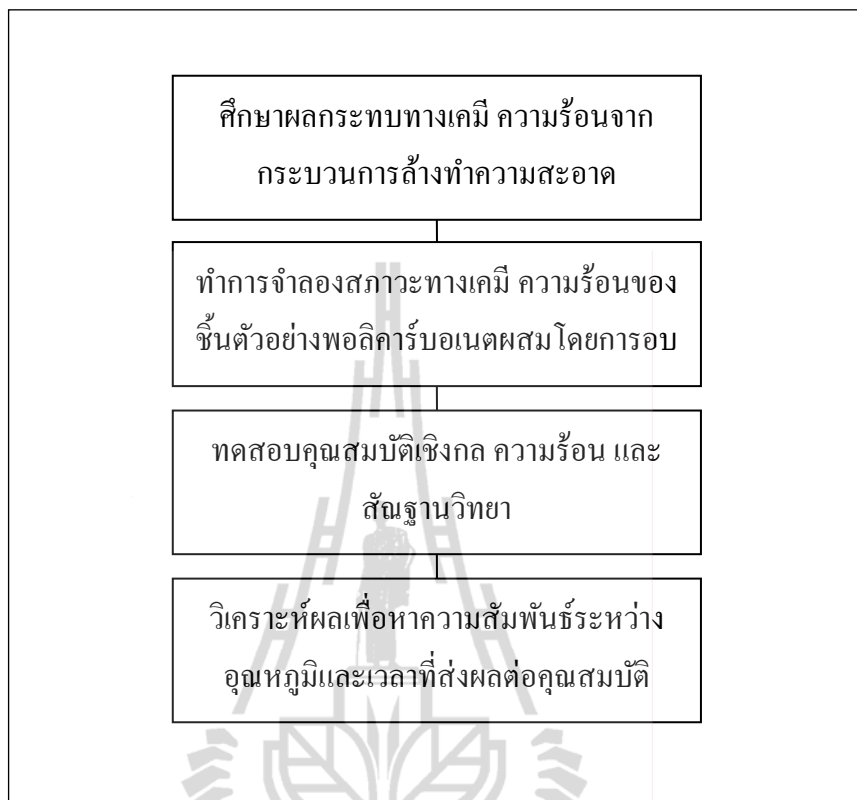
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากที่กล่าวมาข้างต้น วัสดุพอลิคาร์บอเนตเป็นพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติทนความร้อนสูง ความแข็งแรงสูง และต้านทานการเสียดสีได้ดี จึงนิยมนำวัสดุที่ทำจากพอลิคาร์บอเนตมาใช้งานอย่างมาก หลายรูปแบบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั้งสิ่งที่เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรและชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ เช่น ชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดดิสก์ วัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมถูกนำมาทำเป็นหัวประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนข้อมูล (Head Stack Assembly : HSA) เพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้หัวอ่าน/เขียนที่อยู่ตรงปลายของ HAS เสียดหาย ในกระบวนการประกอบฮาร์ดดิสก์ โดยระหว่างกระบวนการประกอบชุด HAS นั้นจะต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น กระบวนการล้างทำความสะอาด ซึ่งความร้อนจากกระบวนการล้างทำความสะอาดนั้น จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติต่าง ๆ รวมทั้งอายุการใช้งานของหัวประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อย่างมาก แต่กลไกและผลกระทบของความร้อนต่อวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมในแง่ของอายุการใช้งานยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจังเป็นระบบ ดังนั้นจุดประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาผลของอุณหภูมิและเวลา ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม

คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลา ที่ส่งผลต่อชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมเพื่ออธิบายลักษณะพฤติกรรมการเสียดหายของหัวประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ โดยทำการออกแบบการทดสอบชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

ศึกษาผลกระทบทางความร้อนที่กระทำต่อหัวประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากกระบวนการล้างทำความสะอาด จากนั้นทำการจำลองผลกระทบทางความร้อนที่กระทำต่อชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม โดยนำชิ้นตัวอย่างไปอบในช่วงอุณหภูมิเดียวกันกับกระบวนการล้างทำความสะอาด ทดสอบคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติทางความร้อน และสภาพทางสัณฐานวิทยา วิเคราะห์ผลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาผลกระทบทางความร้อนจากกระบวนการล้างทำความสะอาด

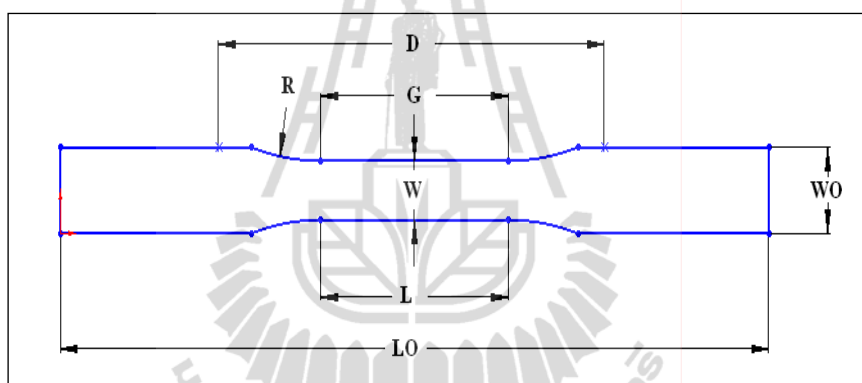
3.1.1 หวีประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟ

หวีประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟทำจากวัสดุพอลิคาร์บอนเนตผสม ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการฉีด ซึ่งหวีประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนข้อมูลทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ หัวอ่าน/เขียนที่อยู่ตรงปลายของ HSA เสียหายทั้งจากการกระทบกันเอง หรือกับสิ่งอื่น อีกทั้ง ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนย้ายในแต่ละกระบวนการอีกด้วย การศึกษา ในงานวิจัยนี้เป็นการนำชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสม ที่ใช้ผลิตหวีประกอบชุดหัวอ่าน/เขียน ฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟจำนวน 1 รุ่น สำหรับการผลิตฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟขนาด 3.5 นิ้ว ของบริษัทซีเทค เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด

3.1.2 ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม

ชิ้นตัวอย่างทำจากวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมชนิดเดียวกับที่ใช้ขึ้นรูปทำหวีประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ที่ผ่านการฉีดขึ้นรูป โดยชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ใช้ในการทำงานวิจัยครั้งนี้มีลักษณะ รูปร่างคัมเบล (Dumbbell) หน้าตัดสี่เหลี่ยม ตามมาตรฐาน Annual Society Test Method (ASTM, 2004) Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (ASTM, D638-03)

ลักษณะทางกายภาพของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม ด้วยโปรแกรม Solid work 2007 SP 2.2 โดยการถอดแบบจากชิ้นตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.2



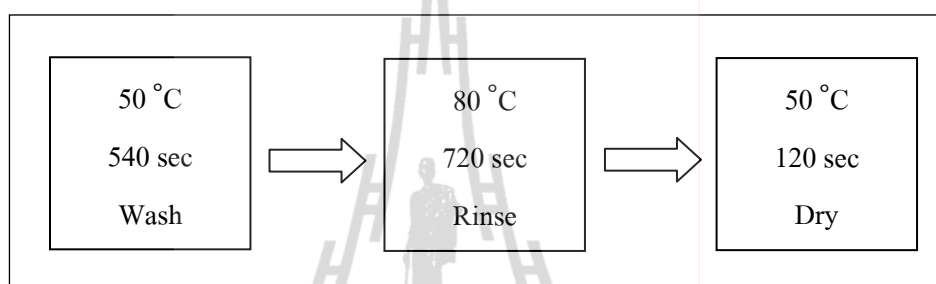
รูปที่ 3.2 แสดงขนาดต่าง ๆ ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม

จากรูปที่ 3.2 แสดงชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมโดยมีขนาดต่าง ๆ ดังนี้ ขนาดความกว้าง 12.5 ± 0.3 มิลลิเมตร ความยาว 220 ± 0.4 มิลลิเมตร และหนา 3.2 ± 0.4 มิลลิเมตร

จากการศึกษากระบวนการประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนข้อมูลในโรงงาน พบว่าสาเหตุหลักที่มีความเป็นไปได้ที่ทำให้เกิดความเสียหายกับหวี ได้แก่ ปัจจัยทางความร้อน เช่น อุณหภูมิในกระบวนการทำความสะอาด เวลาที่ใช้ในกระบวนการล้าง เป็นต้น ซึ่งจะมีผลทำให้หวีเกิดการเสียรูป ลึกหรือแตกหักจนไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ทั้งนี้ยังไม่มีการศึกษาอายุการใช้งานของหวีอย่างเป็นระบบ จึงไม่สามารถมีเกณฑ์ในการตัดสินใจเปลี่ยนชุดใหม่เข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งปัจจุบันใช้วิธีเสริมจำนวนเข้าไปทดแทนหวีที่ถูกคัดแยกออกเท่านั้น ดังนั้นหากสามารถทราบถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนตผสม ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุนแรงงานในการคัดแยกได้อีกด้วย

3.1.3 กระบวนการล้างทำความสะอาด

จากการศึกษากระบวนการประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนข้อมูลในโรงงาน พบว่าสาเหตุหลักที่มีความเป็นไปได้ที่ทำให้เกิดความเสียหายกับหัวได้แก่ปัจจัยทางความร้อน ซึ่งปัจจัยทางความร้อนนั้นเกิดจากกระบวนการล้างทำความสะอาดนั้นมีการให้ความร้อนและการคายความร้อนสลับกันตลอดกระบวนการล้าง ที่ทำให้พอลิคาร์บอเนตผสมเกิดความเสียหาย ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงกระบวนการล้างทำความสะอาด

จากการศึกษากระบวนการล้างทำความสะอาด เพื่อหาปัจจัยที่ทำให้พอลิคาร์บอเนตผสมเกิดการเสียหายและคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าความร้อนและเวลาส่งผลให้ประสิทธิภาพอายุการใช้งานของวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมลดลง

3.2 คุณสมบัติและค่าเฉลี่ยการบิดขึ้นรูปของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม

จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม สามารถทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ที่ใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติและค่าเฉลี่ยของการฉีดขึ้นรูปของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม

Permanence	English	SI Metric	ASTM
Specific Gravity	1.20	1.20	D 792
Melt Flow Rate @ 300°C, 6.7 kg	15.00-25.00 g/10 min	15.00-25.00 g/10 min	D 1238
Molding Shrinkage 1/8 in (3.2 mm) section	0.0050-0.0080 in/in	0.50-0.80%	D 955
Water Absorption 24 hrs @ 23°C	0.120%	0.120%	D 570

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติทางกล

Mechanical Properties	English	SI Metric	ASTM Test
Impact Strength, Izod - notched 1/8 in (3.2 mm) section	1.3 ft-lbs/in	69 J/m	D 256
- unnotched 1/8 in (3.2 mm) section	19.5 ft-lbs/in	1041 J/m	D 4812
Tensile Strength	8100 psi	56 MPa	D 638
Tensile Elongation	5.0-10.0%	5.0-10.0%	D 638
Tensile Modulus	0.35 x 10 ⁶ psi	2413 MPa	D 638
Flexural Strength	13300 psi	92 MPa	D 790
Flexural Modulus	0.38 x 10 ⁶ psi	2620 MPa	D 790

ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้า

Electrical Properties	English	SI Metric	ASTM Test
Impact Strength, Izod			
- notched 1/8 in (3.2 mm) section	1.3 ft-lbs/in	69 J/m	D 256
- unnotched 1/8 in (3.2 mm) section	19.5 ft-lbs/in	1041 J/m	D 4812
Volume Resistivity	< 1E4 ohm.cm	< 1E4 ohm.cm	D 257
Surface Resistivity	< 1E5 ohm	< 1E5 ohm	D 257
Surface Resistance	0.35 x 10 ⁶ psi	2413 MPa	STM11.11
Static Decay			
MIL-PRF-81705D, 5kV to 50 V, 12% RH	< 2.00 s	< 2.00 s	FTMS101C404 6.1

ตารางที่ 3.4 แสดงคุณสมบัติทางความร้อน

Thermal Properties	English	SI Metric	ASTM Test
Deflection Temperature @ 264 psi (1820 kPa)	260°F	127°C	D 648
Ignition Resistance Flammability	HB @ 1/16 in	HB @ 1.5 mm	D 635
Coefficient of Linear Thermal Expansion	4.2 x 10 ⁻⁵ /°F	7.6 x 10 ⁻⁵ /°C	E 831
Flow Direction Transverse Direction	10.5 x 10 ⁻⁵ /°F	18.9 x 10 ⁻⁵ /°C	E 831
Thermal Conductivity Through-plane	1.83 (BTU.in)/(hr.ft ² .°F)	0.26 W/(m.K)	E1530

ตารางที่ 3.5 แสดงกระบวนการทั่วไปสำหรับการฉีดขึ้นรูป

Injection Molding	English	SI Metric
Injection Pressure	10000-15000 psi	69-103 MPa
Melt Temperature	550-600°F	288-316°C
Mold Temperature	180-250°F	82-121°C
Drying	4 hrs @ 250°F	4 hrs @ 121°C
Moisture Content	0.02%	0.02%
Dew Point	-20°F	-29°C

3.3 การออกแบบจำลองการทดสอบสถานะทางความร้อน

3.3.1 การทดสอบภายใต้สถานะทางความร้อนแบบต่อเนื่อง

จากการศึกษาปัจจัยความร้อนของกระบวนการล้างทำความสะอาดที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อพอลิคาร์บอเนตผสม ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้งานในกระบวนการล้างทำความสะอาดอยู่ในช่วง 50-90 องศาเซลเซียส และจากข้อมูลของคุณสมบัติทางความร้อน ที่อุณหภูมิการเปลี่ยนรูปร่างของพอลิคาร์บอเนต อยู่ที่ 127 องศาเซลเซียส จึงทำให้สามารถออกแบบจำลองการทดสอบสถานะทางความร้อนได้ดังนี้

ตารางที่ 3.6 แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนต

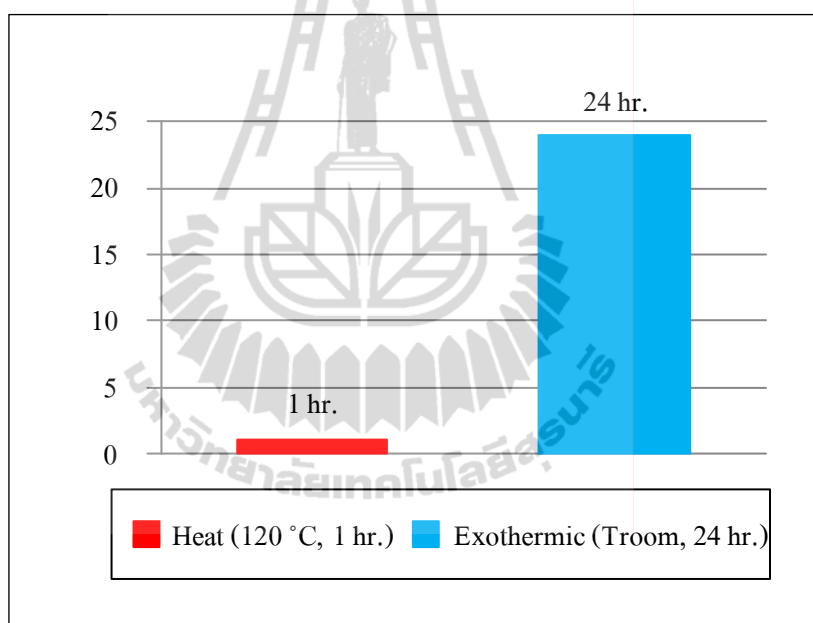
Specimen	Temperature, °C	Baking Time, hr.
Polycarbonate	75	1/4, 3/4, 4, 8, 12, 24
Polycarbonate	90	1/4, 3/4, 4, 8, 12, 24
Polycarbonate	105	1/4, 3/4, 4, 8, 12, 24
Polycarbonate	120	1/4, 3/4, 4, 8, 12, 24

หลังจากทำการจำลองการทดสอบสถานะทางความร้อนด้วยการอบชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมตามอุณหภูมิและช่วงเวลาดังตารางที่ 3.6 แล้วปล่อยให้ชิ้นตัวอย่างเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมมาทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ

3.3.2 การทดสอบภายใต้สภาวะทางความร้อนแบบวัฏจักร

จากการศึกษาปัจจัยความร้อนของกระบวนการล้างทำความสะอาดวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสม ที่ทำให้เกิดความเสียหาย ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้งานในกระบวนการล้างทำความสะอาดวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสม อยู่ในช่วง 50-90 องศาเซลเซียส และได้รับความร้อนสลับกับการคายความร้อนเป็นช่วง ๆ จึงทำการทดสอบภายใต้สภาวะทางความร้อนแบบเป็นวัฏจักร

โดยทำการอบขึ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้ขึ้นตัวอย่างเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง คิดเป็น 1 วัฏจักรความร้อน ซึ่งทำการทดสอบกับขึ้นตัวอย่างที่ 10 20 และ 40 วัฏจักรความร้อน



รูปที่ 3.4 แสดงการอบขึ้นตัวอย่างแบบวัฏจักรความร้อน 1 วัฏจักร

เนื่องจากหวีประกอบชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟมีขนาดเล็กยากต่อการจับยึดชิ้นงานและการทดสอบ เพื่อให้สะดวกและเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM ในการทดสอบหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น คุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ขึ้นตัวอย่างที่เกิดจากการฉีดขึ้นรูปด้วยวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปหวีประกอบชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟ ในการทดสอบหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ข้างต้น

3.3.3 สภาวะทางความร้อนจากกระบวนการล้างวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสม

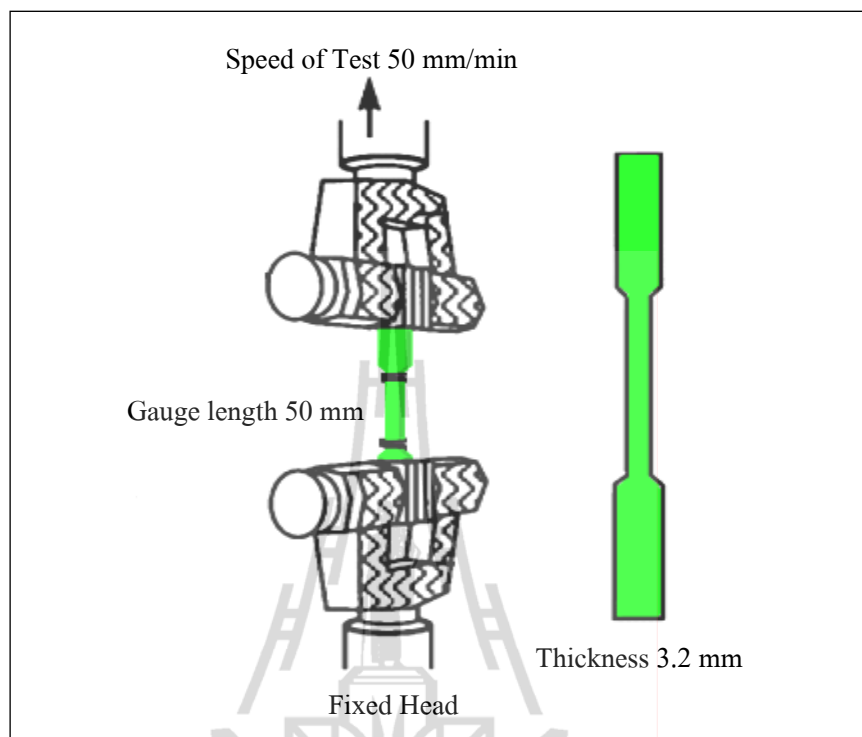
หลังจากทำการจำลองการล้างวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมตามอุณหภูมิและช่วงเวลาดังรูปที่ 3.3 แล้วปล่อยให้วัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง คิดเป็น 1 รอบการล้าง ซึ่งทำการล้างวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 15 20 25 30 35 40 45 และ 50 รอบการล้าง

3.4 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

3.4.1 ทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ซึ่งความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) คือ คุณสมบัติทางกลพื้นฐานของพอลิเมอร์ และสามารถพิจารณา ประกอบการประยุกต์ใช้ประโยชน์พอลิคาร์บอเนตผสมได้ คุณสมบัตินี้สามารถทำการทดสอบได้โดยการดึงขึ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมด้วยแรงที่ควบคุมได้ในขณะเดียวกันก็วัดการยืดตัวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับขนาดของแรงที่ใช้ โดยการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) จากนั้นจึงคำนวณความเค้น จากอัตราส่วนของแรงต่อหน่วยพื้นที่ และคำนวณความเครียด จากอัตราการยืดของชิ้นตัวอย่างต่อความยาวเริ่มต้น กราฟที่ได้จากความเค้นและความเครียด มีลักษณะและความชัน (Slope) ที่ต่างกันตามสมบัติพอลิคาร์บอเนตผสม โดยความชันของกราฟจะบอกถึงความแข็ง (Modulus) ของพอลิคาร์บอเนตผสม

ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการอบดังตารางที่ 3.6 โดยให้ชิ้นตัวอย่างเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการทดสอบแรงดึง เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนไปกับชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบทดสอบ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Instron Universal Testing Machine 5560 โหลดเซลล์ขนาด 5 KN ด้วยความเร็วในการทดสอบแรงดึง (Speed of Test) 50 มิลลิเมตร/นาที และ ระยะความยาวพิคัด (Gauge Length) 50 มิลลิเมตร Medhat et al. (2010) ดังรูปที่ 3.5 ตามวิธีการทดสอบมาตรฐานสำหรับคุณสมบัติแรงดึงของพลาสติก (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Designation : D 638-03) เพื่อบันทึกค่าต่าง ๆ ที่บอกถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกล เช่น ความเค้นสูงสุด อีลองเกชัน และคุณสมบัติอื่น ๆ ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม

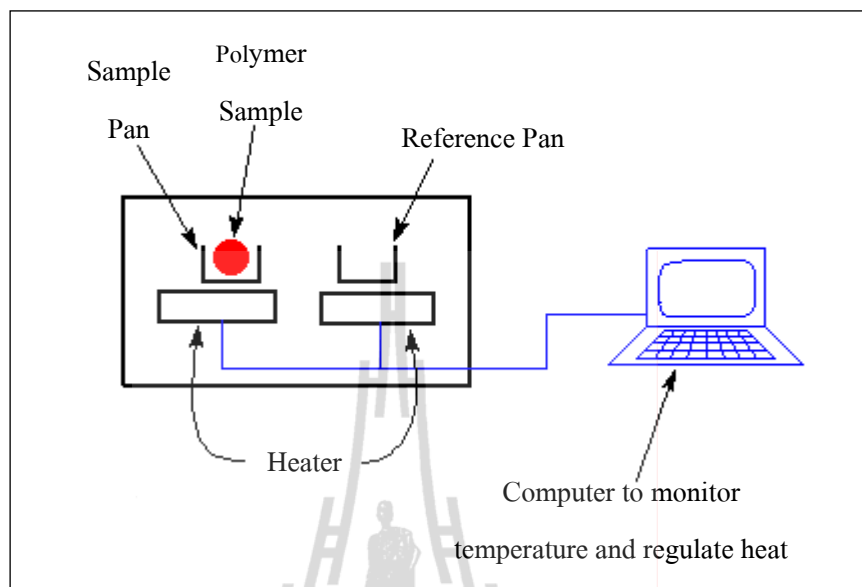


รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องทดสอบแรงดึง

3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน

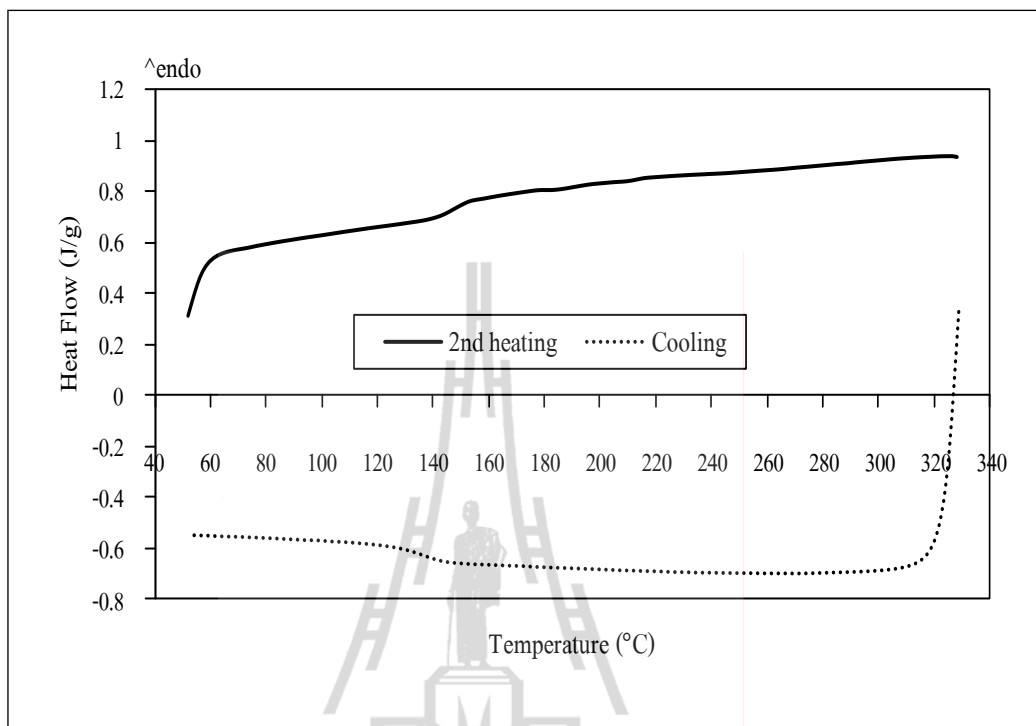
จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลสามารถทราบถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลที่เกิดขึ้นกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการอบทดสอบได้ แต่ไม่สามารถระบุสาเหตุของการแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมจากผลของอุณหภูมิและเวลาได้ จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนเพื่อหาค่าพลังงานเปลี่ยนแปลงที่ทำให้สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นดังกล่าว

ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการอบดังตารางที่ 3.6 โดยการนำชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการอบทดสอบมาทำการบดให้เป็นผงหรือชิ้นเล็ก ๆ เพื่อเอาไปทดสอบการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ผ่านเข้าออกกับชิ้นตัวอย่างผสม โดยการบรรจุใส่ถาดอะลูมิเนียมประมาณ 8 มิลลิกรัม เทียบกับถาดอะลูมิเนียมที่ทำการให้ความร้อนเดียวกันด้วยเครื่อง (Differential Scanning Calorimeter : DSC) ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC

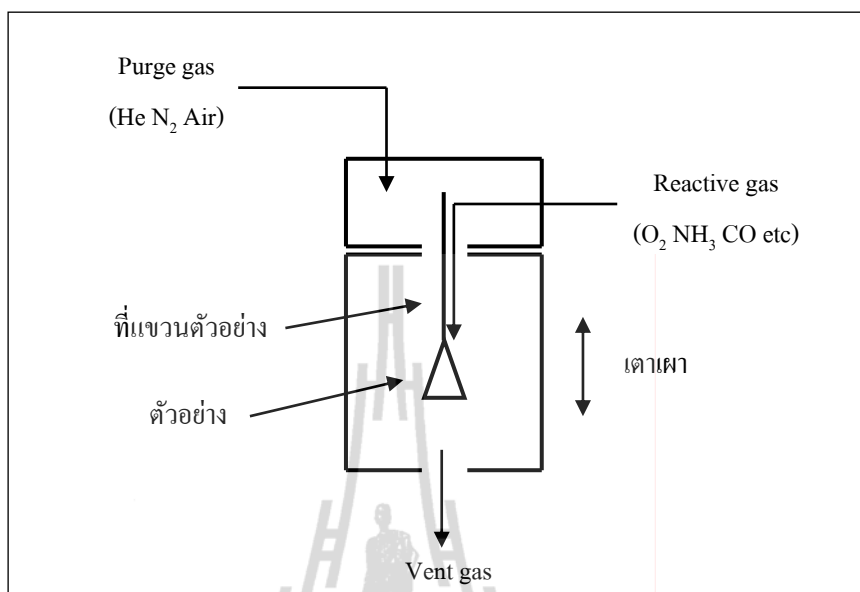
ซึ่งในการทดสอบ DSC ใช้ซอฟต์แวร์ Pyris ในการคำนวณและบันทึกค่า ซึ่งทุกชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสมที่ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนด้วยการให้ความร้อนด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียส/นาที โดยเริ่มจากการให้ความร้อนแรกจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ไปจนถึงอุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส เพื่อบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบจากตารางที่ 3.6 ซึ่งอุณหภูมิการให้ความร้อนแรกนั้น เป็นช่วงที่ครอบคลุมอุณหภูมิทรานซิชันแก้ว (T_g) จากนั้นทำการรักษาอุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ให้คงที่ไว้เป็นเวลา 2 วินาที จึงทำการลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ไปที่ 50 องศาเซลเซียส แล้วทำการให้ความร้อนรอบสองจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ไปจนถึงอุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (Yiqing and David, 2005) ดังรูปที่ 3.7 เพื่อเป็นการบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความร้อนของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบ ซึ่งใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิงกับชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบทดสอบ จากการบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงการคายความร้อนและการดูดความร้อนของชิ้นตัวอย่าง เมื่อชิ้นตัวอย่างถูกให้ความร้อนหรือเย็นตัว ซึ่งจะนำไปสู่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนกับช่วงของเวลา



รูปที่ 3.7 แสดงการให้ความร้อนของการทดสอบ DSC

3.6 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ

ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสมที่ผ่านการอบดังตารางที่ 3.6 โดยเทียบกับชิ้นตัวอย่างมาตรฐานที่ไม่ผ่านการอบ ด้วยเครื่อง Mettler Toledo TGA/SDTA 851° โดยใช้เทคนิคในการทดสอบ (Thermo Gravimetric Analysis : TGA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ความร้อนที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เช่น หาปริมาณขององค์ประกอบแต่ละชนิดในชิ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ โดยอาศัยหลักการการสลายตัวทางความร้อนของสาร ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกัน หลักการพื้นฐานของเทคนิค TGA คือการวัดน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นตัวอย่างตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุม จากนั้นจึงทำการพล็อตกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.8 จาก การทดสอบด้วยเครื่อง TGA โดยการให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสจนถึงอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิกว่า 20 องศาเซลเซียส/นาที บันทึกผลในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงการสลายตัวของ ส่วนประกอบที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ จึงสามารถบอกถึงอุณหภูมิที่เริ่มสลายตัว (Decomposition Temperature) และปริมาณส่วนประกอบ (Composition) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดได้



รูปที่ 3.8 แสดงการทดสอบ TGA

3.7 การทดสอบคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา

3.7.1 การปรับลำอิเล็กตรอน (Alignment)

เมื่อต้องการจะใช้กล้อง SEM ก่อนอื่นเราจะต้องทำการ Alignment กล้องก่อนเป็นอันดับแรก ซึ่งการ Alignment คือ การปรับแต่งสถานะต่าง ๆ ของกล้องให้อยู่ในระดับที่ใช้การได้และเหมาะสมกับลักษณะงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และลักษณะของตัวอย่างในการ Alignment จะใช้ตัวอย่างที่เราทราบลักษณะขนาดและรูปร่างที่แน่นอน เช่น ZnO_2 ซึ่งจะมีขนาดประมาณ 1 ไมโครเมตร ซึ่งมีขั้นตอนการปฏิบัติดังนี้

- นำ ZnO_2 ติดบนแท่นของตัวอย่าง (Stub) แล้วนำไปวางบน Specimen Holder สอดตัวอย่างเข้าไปในเครื่องโดยใช้ก้านส่งตัวอย่าง (Specimen Exchanger Rod)
- เมื่อนำตัวอย่าง ZnO_2 เข้าไปในส่วนของ Specimen Exchange Chamber ซึ่งเป็นส่วนที่ติดต่อกับภายนอกและดูดอากาศออกแล้วจึงนำตัวอย่างเข้าไปในบริเวณ Specimen Chamber
- สอดตัวอย่างเข้าไปใน Specimen Chamber วางบน Specimen Stage หลังจากนั้นกำหนดค่าศักดาไฟฟ้า (15-20 kV) แล้วเปิด Accel Voltage แล้วไปอัสกระแสที่ Filament

- เมื่อ Filament ร้อนขึ้น เราจะพบสัญญาณของอิเล็กตรอน โดยใช้ Mode Wave Form ถ้าไม่พบเราจะต้องทำการปรับ Gun Alignment ทั้งในทาง X และ Y จนพบสัญญาณของอิเล็กตรอน

- เมื่อพบสัญญาณของลำอิเล็กตรอนแล้วจึงเพิ่มกระแสไบอัสของ Filament เรา จะพบจังหวะการเพิ่มขึ้นของสัญญาณสองจังหวะ ซึ่งจังหวะแรกเรียก First Peak และจังหวะที่สอง เรียก Second Peak จาก Second Peak นี้ เมื่อเราเพิ่มกระแส Filament ไปจนสุด (หมุนตามเข็มนาฬิกา) เราจะพบว่าระดับ Waveform ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตรงบริเวณจุดเริ่มต้นของ Second Peak (ประมาณที่ 12.30 นาฬิกา) และหมุนปุ่ม Gun Alignment ทั้งซ้ายและขวาใน แนว X-Y จนได้ระดับ Waveform สูงสุด จะเป็นจุดใช้งานสำหรับกระแสไบอัสซึ่ง ณ จุดนี้อายุของ Filament จะยืนยาว (ไม่น้อยกว่า 30 ชั่วโมง) แต่ถ้าใช้กระแส Filament เพิ่มขึ้นอีก ความสว่างของภาพจะลดลงทำให้กำลังในการแจกแจงลดลง

- เมื่อเราพบสัญญาณอิเล็กตรอนแล้วนำภาพ (Second Electron Image : SEI) ขึ้นบนจอ จากนั้นเรากดปุ่ม Wobbler เพื่อทดสอบว่า ลำอิเล็กตรอนผ่านบริเวณตรงกลางของ Objective Aperture หรือไม่ ซึ่งถ้าลำอิเล็กตรอนไม่ผ่านบริเวณตรงกลางของ Objective Aperture ความสว่างของภาพจะลดลง โดยเราสังเกตว่า เมื่อกดปุ่ม Wobbler แล้วลักษณะของภาพ จะหมุนลักษณะการหมุนจะต้องหมุนแล้วภาพไม่ส่าย ถ้าส่ายนั้นหมายถึง ลำอิเล็กตรอนไม่ผ่าน บริเวณตรงกลางของ Objective Aperture ซึ่งเราแก้ไข โดยการหมุนที่ Aperture Centering Knob (X/Y) จนภาพไม่ส่ายมีลักษณะ Zoom เข้าออกเท่านั้น

- หลังจากนั้นให้ปิดปุ่ม Wobbler แล้วสังเกตว่าลักษณะของภาพสมมาตรหรือไม่ ถ้าภาพมีลักษณะบิดเบือนไปทางซ้ายหรือขวา ให้เราปรับที่ปุ่ม Stigmator เพื่อแก้การบิดเบือนของภาพ เราสามารถแก้ได้ทั้งทางทิศซ้ายและขวา หลังจากแก้แล้วก็กลับไปโฟกัสภาพอีกครั้ง ถ้าภาพยังไม่ชัดเจนให้ลดขนาด Spot Size เพื่อจะให้ภาพคมขึ้นแล้วลองโฟกัสใหม่อีกครั้ง

3.7.2 เทคนิคการปรับภาพให้มีคุณภาพ

เมื่อเราทำการ Alignment และแก้ความบิดเบือน (Stigmator) แล้วเราก็สามารถใช้งานได้ซึ่งก่อนที่เราจะบันทึกภาพเราจะต้องปรับโฟกัสภาพและปรับ Contrast และ Brightness ให้เหมาะสมก่อนซึ่งจะมีขั้นตอนต่อไปนี้

เลือกภาพหรือบริเวณที่สนใจที่ต้องการบันทึกภาพในขนาดกำลังขยายที่เหมาะสม แล้วสังเกตว่าลักษณะของภาพนั้นมีความชัดเจน หรือไม่ถ้าไม่ชัดเจนให้ปรับโฟกัสโดยการให้ทดลองหมุนไปในทิศทางเดิมก่อนแล้วจึงสังเกตว่าภาพชัดเจนหรือไม่ถ้าไม่ให้หมุนไปในทิศทางตรงกันข้ามจนได้ภาพที่ชัดเจนแต่โดยทั่วไปการปรับโฟกัสเราจะต้องปรับในกำลังขยายที่สูงกว่ากำลังขยายที่ต้องการบันทึกภาพถ้าในกรณี ที่กล้องปกติ เมื่อเราปรับโฟกัสในกำลังขยายที่สูงแล้วมาบันทึกภาพในกำลังขยายที่ต่ำกว่าโฟกัสจะต้องไม่เปลี่ยนในกรณีที่ลักษณะภาพมีลักษณะความสูงต่ำไม่เท่ากันในพื้นที่ที่เราสนใจทำให้เราไม่สามารถโฟกัสให้ชัดเจนทั้งพื้นที่กล่าวคือ ถ้าเราโฟกัสในบริเวณที่สูงกว่าในบริเวณที่สูงกว่าก็จะมีลักษณะเป็น Over Focused ถ้าเราโฟกัสในบริเวณที่สูงกว่าในบริเวณที่ต่ำกว่าจะมีลักษณะเป็น Under Focused ซึ่งปัญหานี้เราสามารถแก้ไขได้โดยใช้วิธี Dynamic Focus Correction ซึ่งเราจะได้ภาพที่มีความชัดเจน ทั้งบริเวณที่สูงและต่ำทั้งนี้ภาพนั้นจะมีความชัดเจนมากขึ้นก็ขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ ประกอบกับเช่น ระยะของพื้นผิวชิ้นตัวอย่างกับออฟเฟกทีฟเลนส์ (Working Distance) ขนาดของ Spot Size ไฟฟ้าที่ใช้แรงอิเล็กทรอนิกส์ ความสมดุลของ Contrast และ Brightness เป็นต้น

เมื่อเลือกบริเวณที่ต้องการและปรับโฟกัสเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะบันทึกภาพจะต้องปรับ Contrast และ Brightness ให้สมดุลกัน โดยใช้ Waveform Monitoring จะมีอยู่ 6 ระดับ ตั้งแต่ 0-5 V Contrast และ Brightness ของภาพกำหนดด้วยระดับความสูง (Amplitude) และระดับฐาน (Basic Line) ของกราฟ ถ้าฐานของกราฟอยู่ในระดับที่สูงภาพจะมีความสว่างมากแต่ถ้าความสูงของกราฟมากภาพก็จะมี Contrast สูง ค่าที่เหมาะสมสำหรับเครื่อง 6400 คือ ฐานของกราฟอยู่ในบริเวณระดับที่ 2 (1 V) และความสูงของกราฟไม่เกินระดับที่ 5 (4 V)

เมื่อปรับ contrast และ brightness ให้สมดุลกันแล้ว ในขั้นตอนต่อไปเราก็จะทำการบันทึกภาพซึ่งการบันทึกภาพเราจะต้องเลือก ความเร็วในการบันทึกภาพให้เหมาะสมคือถ้าเราใช้กำลังขยายสูงความเร็วในการบันทึกก็ต้องช้า เพื่อจะได้ความละเอียดของภาพสูงขึ้น (สำหรับเครื่อง 6400 เราเลือกใช้ตั้งแต่ 40-120 วินาที ต่อ 1 ภาพ)

บทที่ 4

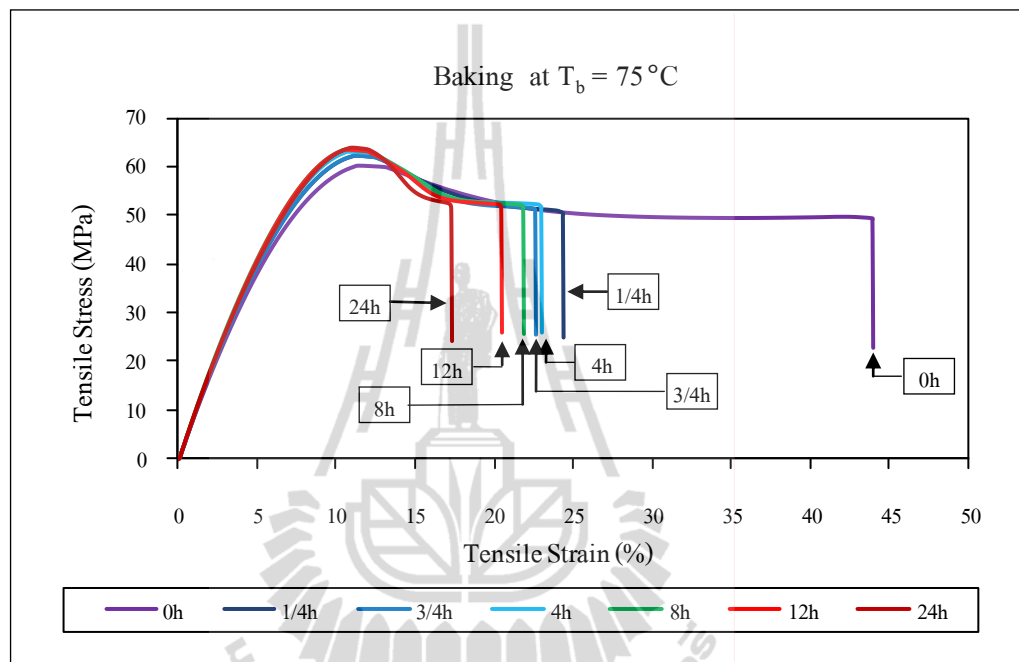
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากผลการดำเนินงานในการศึกษาผลกระทบทางความร้อน เพื่อวิเคราะห์หาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาต่อคุณสมบัติของชั้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม โดยการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ความร้อน การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ และสัญญาณวิทยา เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของหวีประกอบชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟ โดยในการประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนข้อมูลแบบเดิมนั้นไม่สามารถทราบถึงอายุการใช้งานของหวีจึงทำให้ต้องสูญเสียกำลังคนและเวลาในการตัดแยกหวีที่เสียหายออกจากกระบวนการผลิตและไม่มีการนำหลักการทางสถิติเข้ามาใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของหวีที่เหมาะสม ทั้งที่มีความจำเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงทำการศึกษาและวิจัยในเรื่องดังกล่าว ซึ่งผลในการดำเนินงานมีดังนี้

- 4.1 ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางกล
- 4.2 ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน
- 4.3 ผลที่ได้จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ
- 4.4 ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางสัญญาณวิทยา

4.1 ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางกล

4.1.1 ผลของการทดสอบแรงดึงของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 75°C ที่เวลาการอบต่าง ๆ เทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบ



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 75^{\circ}\text{C}$, $t_{ag} = 0-24$ hr.

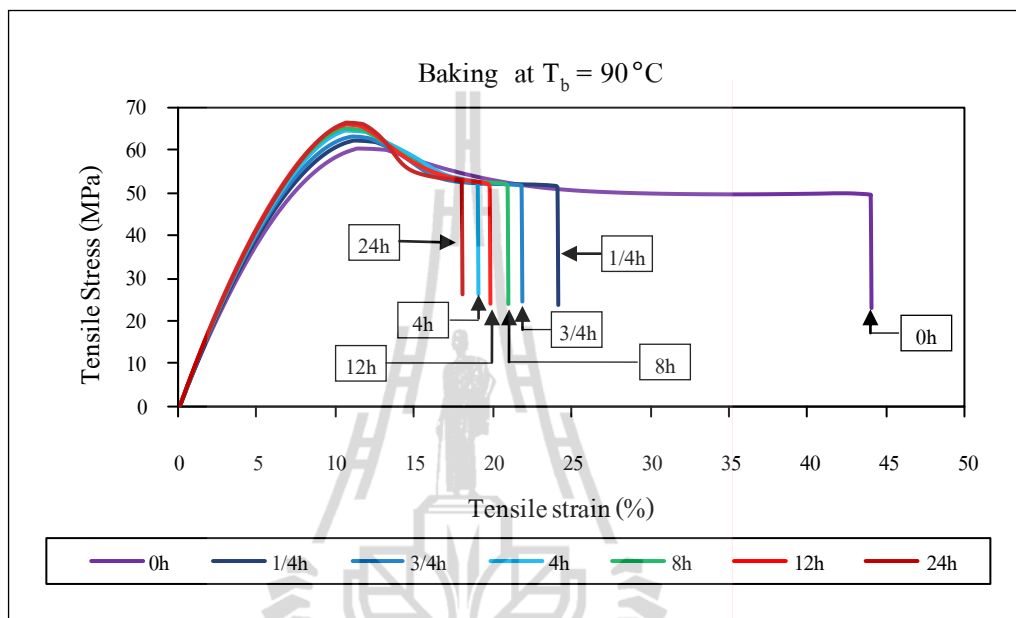
รูปที่ 4.1 กราฟความเค้นความเครียดจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ที่เวลา $1/4$ $3/4$ 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง เทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิง จากรูปที่ 4.1 สามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ลักษณะกราฟของชิ้นตัวอย่างมาตรฐานที่ไม่ผ่านการอบทดสอบมีคุณสมบัติแบบวัสดุพลาสติกชนิดยืดหยุ่น (Flexible Plastic) กล่าวคือ ในช่วงแรกชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมจะยืดตัวได้ค่อนข้างน้อยเมื่อเพิ่มความเค้น จนถึงขณะหนึ่งจะเปลี่ยนเป็นยืดตัวอย่างมากเมื่อเทียบกับความเค้นและขาดในที่สุด ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์อีลลองเกชันประมาณ 44% เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการอบทดสอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ที่เวลาการอบที่ $1/4$ ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ ค่าอีลลองเกชันลดลงอย่างมากโดยมีค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อเวลาการอบที่อุณหภูมิดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันค่าเปอร์เซ็นต์อีลลองเกชันก็ลดลงตามเวลาการอบที่เพิ่มขึ้น

โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการดึงขึ้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1/4 3/4 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง เทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมมาตรฐานที่ไม่ผ่านการอบใช้เป็นตัวอย่างอิงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการดึงขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

เวลาอบ T_b (min)	Tensile stress max. (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
0	60.29	43.95	909.92
15	62.25	24.39	967.3
45	62.45	22.49	952.79
240	63.18	22.99	954.12
480	63.65	21.83	979.8
720	63.57	20.4	955.5
1440	63.76	17.28	966.52

4.1.2 ผลของการทดสอบแรงดึงของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 90°C ที่เวลาการอบต่าง ๆ เทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบ



รูปที่ 4.2 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 90^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{ag}} = 0-24$ hr.

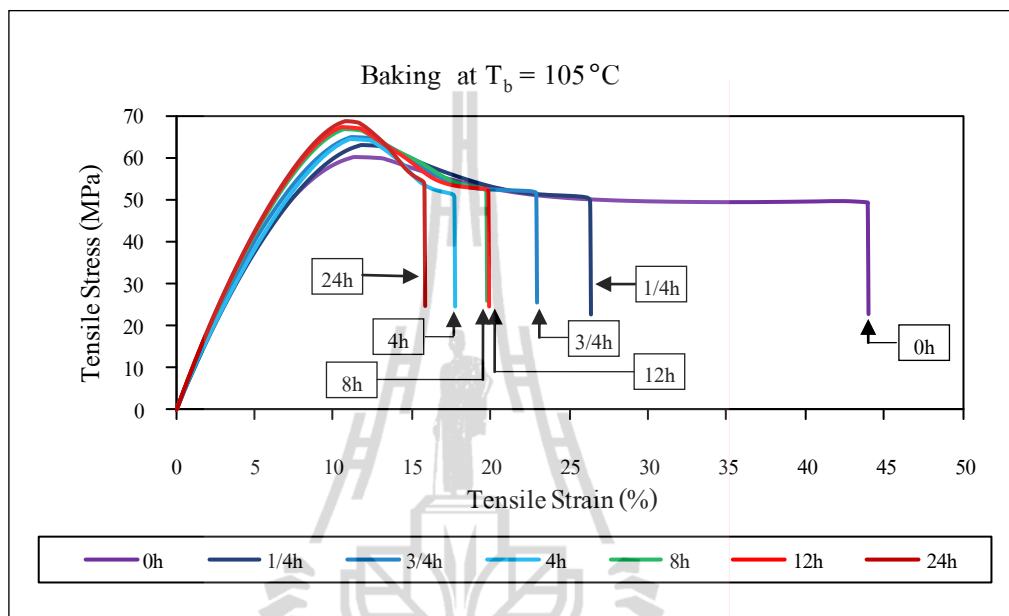
รูปที่ 4.2 กราฟความเค้นความเครียดจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 90°C องศาเซลเซียส ที่เวลา $1/4$ $3/4$ 4 8 12 และ 24 ชั่วโมงเทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิง จากรูปที่ 4.2 สามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ลักษณะกราฟของชิ้นตัวอย่างมาตรฐานที่ไม่ผ่านการอบทดสอบมีคุณสมบัติแบบวัสดุพลาสติกชนิดยืดหยุ่น (Flexible Plastic) กล่าวคือในช่วงแรกชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมจะยืดตัวได้ค่อนข้างน้อยเมื่อเพิ่มความเค้น จนถึงขณะหนึ่งจะเปลี่ยนเป็นยืดตัวอย่างมากเมื่อเทียบกับความเค้นและขาดในที่สุด ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์อีลองเกชันประมาณ 44% เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการอบทดสอบที่อุณหภูมิ 90°C องศาเซลเซียสที่เวลาการอบที่ $1/4$ ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือค่าอีลองเกชันลดลงอย่างมากโดยมีค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อเวลาการอบที่อุณหภูมิดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมมีความเค้นเพิ่มขึ้นและในขณะเดียวกันค่าเปอร์เซ็นต์อีลองเกชันก็ลดลงตามเวลาการอบที่เพิ่มขึ้น

โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการดึงขึ้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1/4 3/4 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง เทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบใช้เป็นตัวอ้างอิงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการดึงขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

เวลาอบ T_0 (min)	Tensile stress max. (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
0	60.29	43.95	909.92
15	62.16	23.95	948.88
45	63.02	21.81	977.12
240	64.39	18.98	982.93
480	65	20.87	994.9
720	65.95	19.72	998.34
1440	66.32	18.08	974.06

4.1.3 ผลของการทดสอบแรงดึง ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105°C ที่เวลาการอบต่าง ๆ เทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบ



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 105^{\circ}\text{C}$, $t_{ag} = 0-24$ hr.

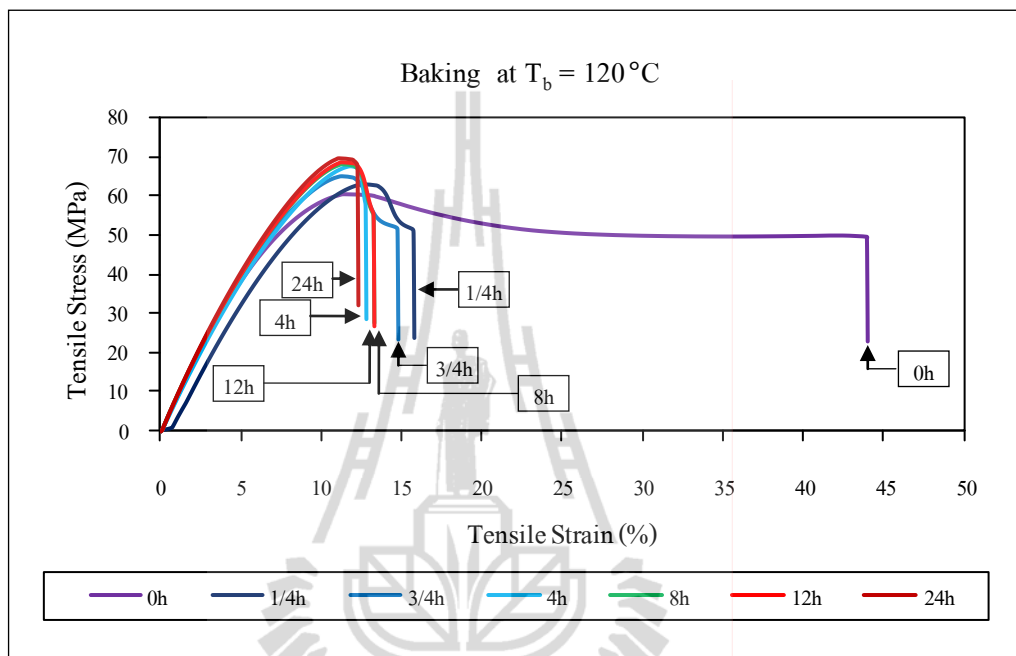
รูปที่ 4.3 กราฟความเค้นความเครียดจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ที่เวลา $1/4$ $3/4$ 4 8 12 และ 24 ชั่วโมงเทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิง จากรูปที่ 4.3 สามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ลักษณะกราฟของชิ้นตัวอย่างมาตรฐานที่ไม่ผ่านการอบทดสอบมีคุณสมบัติแบบวัสดุพลาสติกชนิดยืดหยุ่น (Flexible Plastic) กล่าวคือในช่วงแรกชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตจะยืดตัวได้ค่อนข้างน้อยเมื่อเพิ่มความเค้น จนถึงขณะหนึ่งจะเปลี่ยนเป็นยืดตัวอย่างมากเมื่อเทียบกับความเค้นและขาดในที่สุด ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์อีลองเกชันประมาณ 44% เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการอบทดสอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสที่เวลาการอบที่ $1/4$ ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือค่าอีลองเกชันลดลงอย่างมากโดยมีค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อเวลาการอบที่อุณหภูมิดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมมีความเค้นเพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันค่าเปอร์เซ็นต์อีลองเกชันก็ลดลงตามเวลาการอบที่เพิ่มขึ้น

โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการดึงขึ้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1/4 3/4 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง เทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิงดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการดึงขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

เวลาอบ T_b (min)	Tensile stress max. (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
0	60.29	43.95	909.92
15	63.24	26.27	876.7
45	64.93	22.9	968.07
240	65.07	18.5	920.74
480	67.13	19.67	995.64
720	67.63	19.89	1004.56
1440	68.89	15.65	1013.66

4.1.4 ผลของการทดสอบแรงดึง ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120°C ที่เวลาการอบต่าง ๆ เทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบ



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^{\circ}\text{C}$, $t_{ag} = 0-24$ hr.

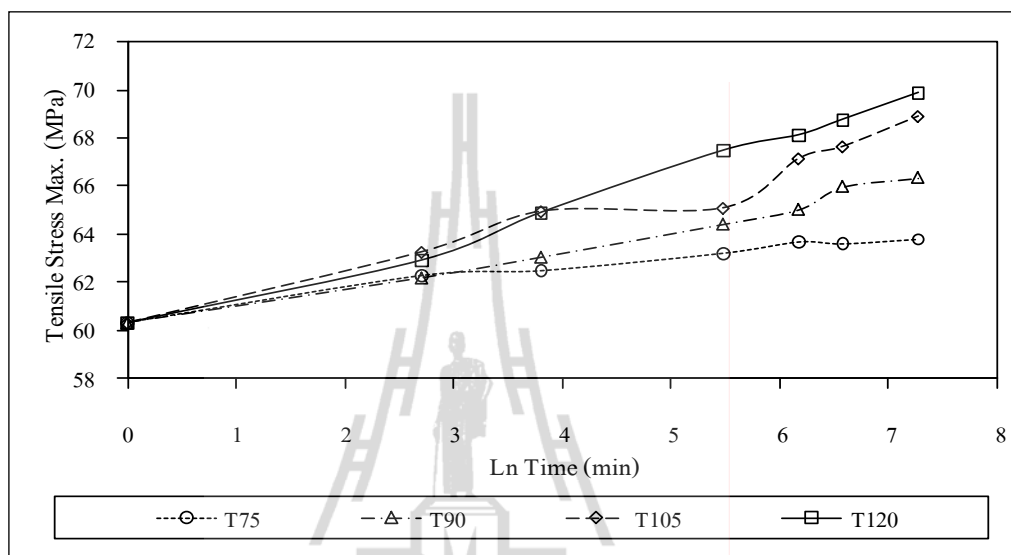
รูปที่ 4.4 กราฟความเค้นความเครียดจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ที่เวลา $1/4$ $3/4$ 4 8 12 และ 24 ชั่วโมงเทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิง จากรูปที่ 4.4 สามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ลักษณะกราฟของชิ้นตัวอย่างมาตรฐานที่ไม่ผ่านการอบทดสอบมีคุณสมบัติแบบวัสดุพลาสติกชนิดยืดหยุ่น (Flexible Plastic) กล่าวคือในช่วงแรกชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมจะยืดตัวได้ค่อนข้างน้อยเมื่อเพิ่มความเค้น จนถึงขณะหนึ่งจะเปลี่ยนเป็นยืดตัวอย่างมากเมื่อเทียบกับความเค้นและขาดในที่สุด ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์อีลองเกชันประมาณ 44% เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการอบทดสอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสที่เวลาการอบที่ $1/4$ ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือค่าอีลองเกชันลดลงอย่างมาก โดยมีค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อเวลาการอบที่อุณหภูมิดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันค่าเปอร์เซ็นต์อีลองเกชันก็ลดลงตามเวลาการอบที่เพิ่มขึ้น

โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการดึงขึ้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1/4 3/4 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง เทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิงดังแสดงในตารางที่ 4.4

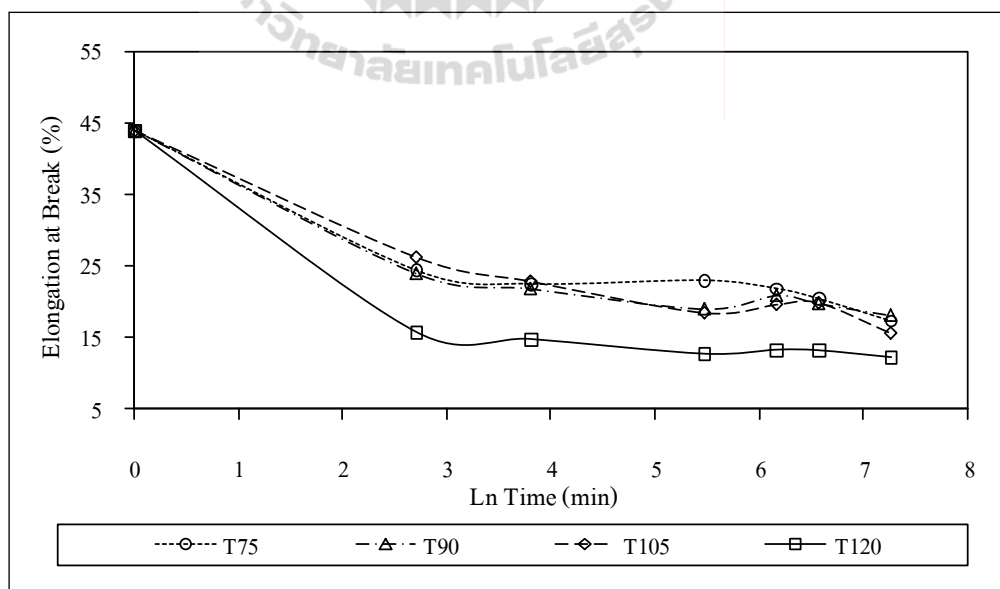
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการดึงขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

เวลาอบ T_b (min)	Tensile stress max. (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
0	60.29	43.95	909.92
15	62.89	15.7	791.71
45	64.88	14.7	922.76
240	67.46	12.63	861.57
480	68.1	13.2	944.59
720	68.75	13.11	953.39
1440	69.86	12.15	954.46

4.1.5 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 75-120 องศาเซลเซียส



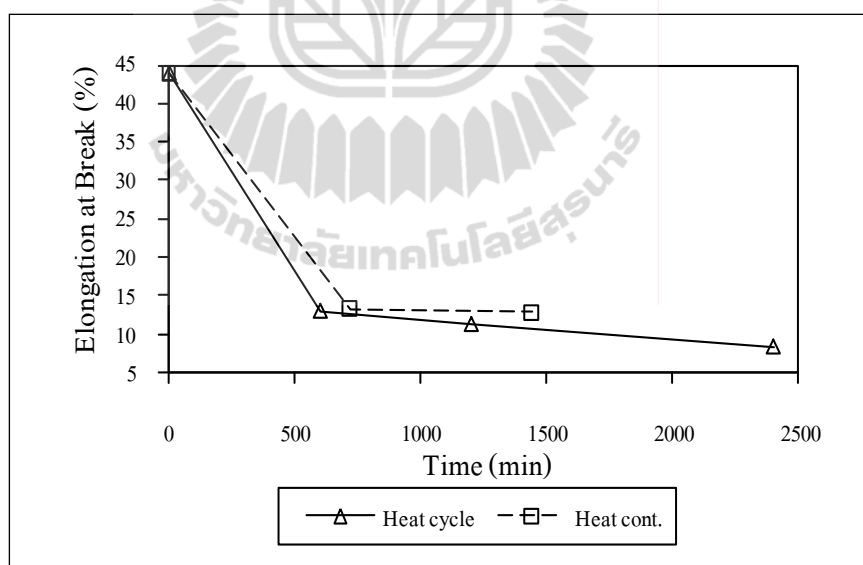
รูปที่ 4.5 แสดงความเค้นกับเวลาอบที่อุณหภูมิ $T_b = 75$ 90 105 และ 120°C เวลา $t_{ag} = 0-24$ hr.



รูปที่ 4.6 แสดงอีลองเกชันกับเวลาอบที่อุณหภูมิ $T_b = 75$ 90 105 และ 120°C เวลา $t_{ag} = 0-24$ hr.

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 สามารถกล่าวได้ว่า ที่เวลาการอบที่ 1/4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือค่าอืดองเกชั่นลดลงอย่างมากโดยมีค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้เวลาการอบที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าอืดองเกชั่นมีแนวโน้มลดลง โดยอุณหภูมิอบที่ 75 90 และ 105 องศาเซลเซียส แสดงการลดลงของค่าอืดองเกชั่นอย่างมีนัยสำคัญ และอุณหภูมิอบที่ 120 องศาเซลเซียส แสดงการลดลงของค่าอืดองเกชั่นชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.6 และในลักษณะเดียวกันเมื่อเวลาการอบเพิ่มมากขึ้นค่าความเค้นสูงสุดก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิอบที่ 75 กับ 120 องศาเซลเซียส ค่าความเค้นสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.5 จากผลดังกล่าวสามารถกล่าวได้ว่าเวลาการอบและอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตมีค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันค่าอืดองเกชั่นก็มีแนวโน้มลดลงด้วย

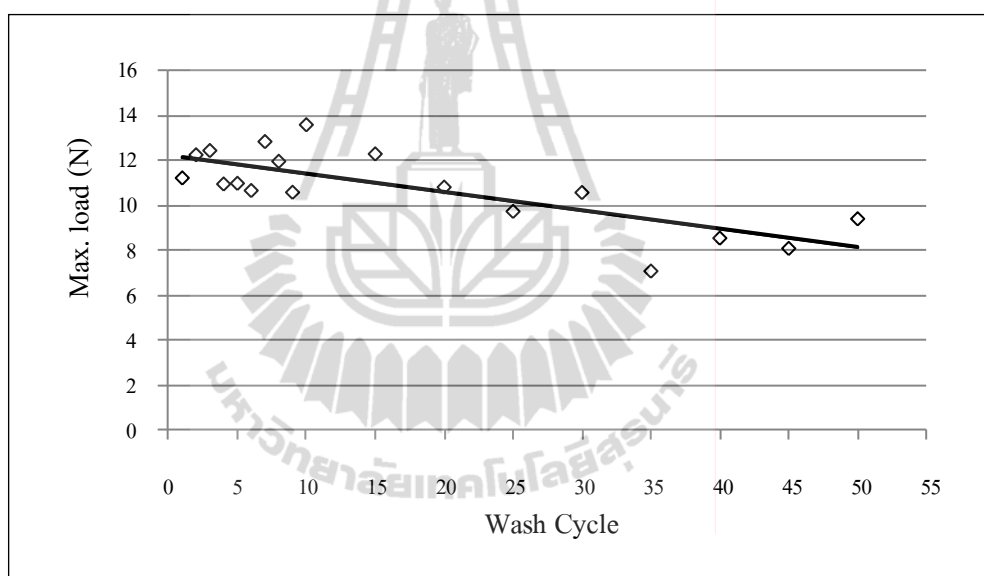
4.1.6 ผลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนต ภายใต้สภาวะทางความร้อนแบบวัฏจักร



รูปที่ 4.7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์อืดองเกชั่นกับช่วงเวลาวัฏจักรความร้อนที่เปลี่ยนไป ที่ $T_b = 120^\circ\text{C}$

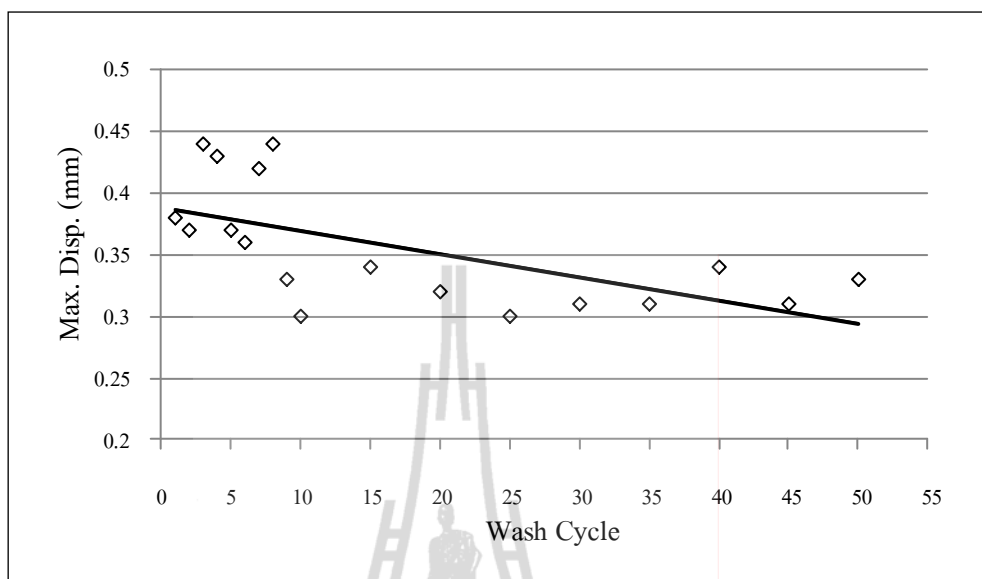
การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลภายใต้อิทธิพลของวัฏจักรความร้อน จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอืดองเคชั้กับช่วงเวลาความร้อนที่เปลี่ยนไป ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการให้ความร้อนแบบวัฏจักรเทียบกับชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่ผ่านการให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง จากรูปที่ 4.7 สามารถแสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อวัฏจักรความร้อนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าอืดองเคชั้มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแบบต่อเนื่องที่มีแนวโน้มคงที่ ที่อุณหภูมิอบเวลาอบเดียวกัน โดยจะลดลงอย่างมากที่ 10 รอบ

4.1.7 ผลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นส่วนพอลิคาร์บอเนตผสมหน้าตัดวงกลมที่ผ่านการล้างจำนวนรอบต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงสูงสุดกับจำนวนรอบการล้าง

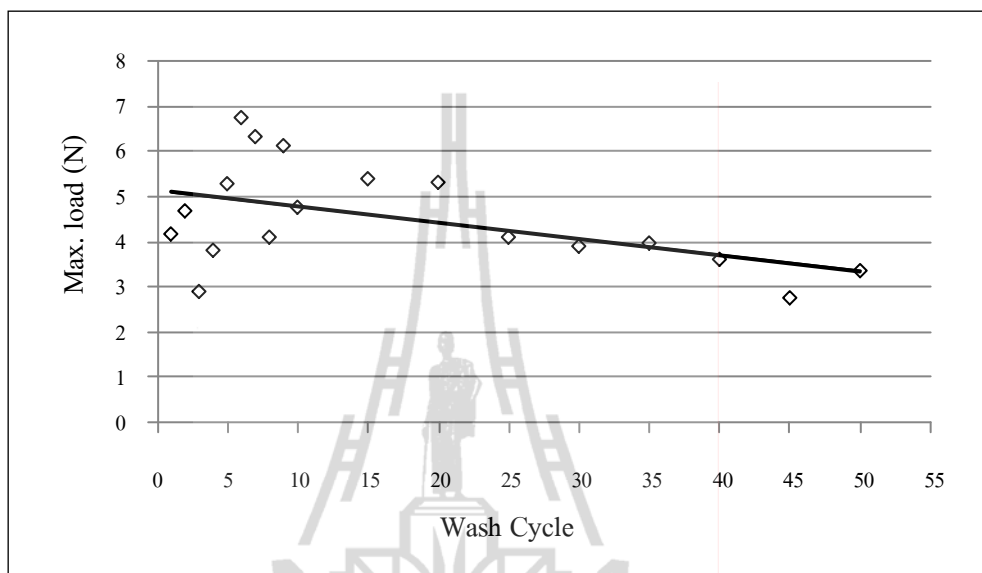
การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลภายใต้อิทธิพลความร้อนจากกระบวนการล้าง จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงสูงสุดกับจำนวนรอบการล้าง ของชิ้นส่วนพอลิคาร์บอเนตผสมหน้าตัดวงกลม แสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อจำนวนรอบการล้างเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าค่าแรงสูงสุดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยค่าของแรงจะลดลงอย่างมากที่จำนวนรอบการล้างที่ 20 รอบ



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะยืดกับจำนวนรอบการล้าง

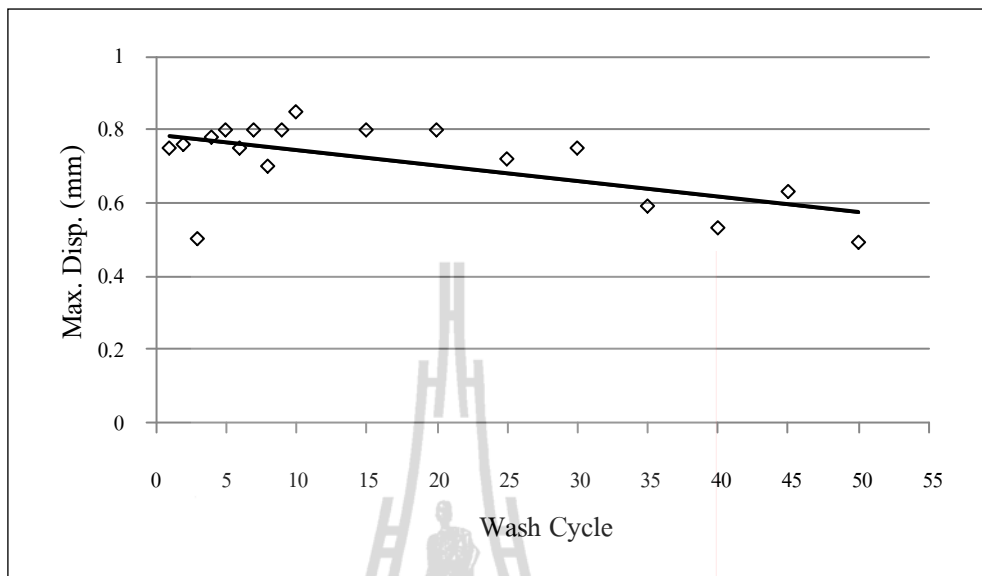
การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลภายใต้อิทธิพลความร้อนจากกระบวนการล้าง จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะยืดกับจำนวนรอบการล้าง ของชิ้นส่วนพอลิคาร์บอเนตผสมหน้าตัดวงกลม แสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อจำนวนรอบการล้างเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าระยะยืดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยค่าของระยะยืดจะลดลงอย่างมากที่จำนวนรอบการล้างที่ 15 รอบ

4.1.8 ผลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นส่วนพอลิคาร์บอเนตผสมหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ผ่านการล้างที่จำนวนรอบต่าง ๆ



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงสูงสุดกับจำนวนรอบการล้าง

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลภายใต้อิทธิพลความร้อนจากกระบวนการล้าง จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงสูงสุดกับจำนวนรอบการล้าง ของชิ้นส่วนพอลิคาร์บอเนตผสมหน้าตัดสี่เหลี่ยม แสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อจำนวนรอบการล้างเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าค่าแรงสูงสุดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยค่าของแรงจะลดลงอย่างมากที่จำนวนรอบการล้างที่ 25 รอบ



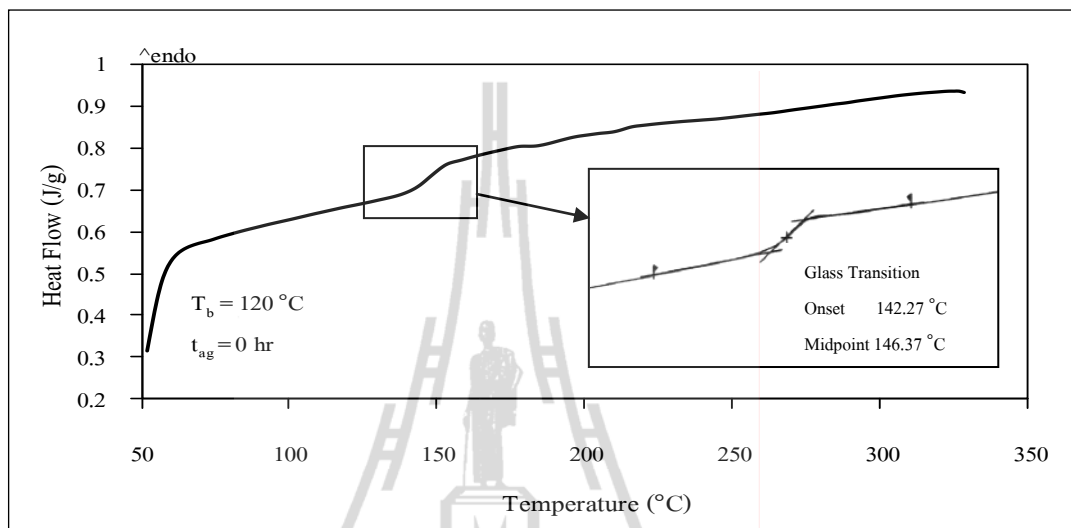
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะยืดกับจำนวนรอบการล้าง

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลภายใต้อิทธิพลความร้อนจากกระบวนการล้าง จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะยืดกับจำนวนรอบการล้าง ของชิ้นส่วนพอลิคาร์บอเนตผสมน้ำคัตสีเหลือง แสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อจำนวนรอบการล้างเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าระยะยืดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยค่าของระยะยืดจะลดลงอย่างมากที่จำนวนรอบการล้างที่ 35 รอบ

จากผลดังกล่าวสามารถกล่าวได้ว่าเวลาการอบและอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม มีค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันค่าอืดองก์ชั้นก็มีแนวโน้มลดลงด้วย Hassan, M., et al. (2010) เนื่องจากพลังงานความร้อนจากการอบอ่อนเป็นสาเหตุของการเพิ่มการเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิเมอร์เมทริกซ์ การเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์จะช่วยให้เกิด Interdiffusion และ ส่งผลทำให้เกิดรูปแบบพันธะที่แข็งแรง Sekhon, G.S., et al. (2008) อย่างไรก็ตามความชันในช่วงยืดหยุ่น (Young's Modulus) ของแต่ละชั้นตัวอย่างที่ทำการทดสอบแรงดึงนั้นมีค่าใกล้เคียงกันในทุกอุณหภูมิการอบ

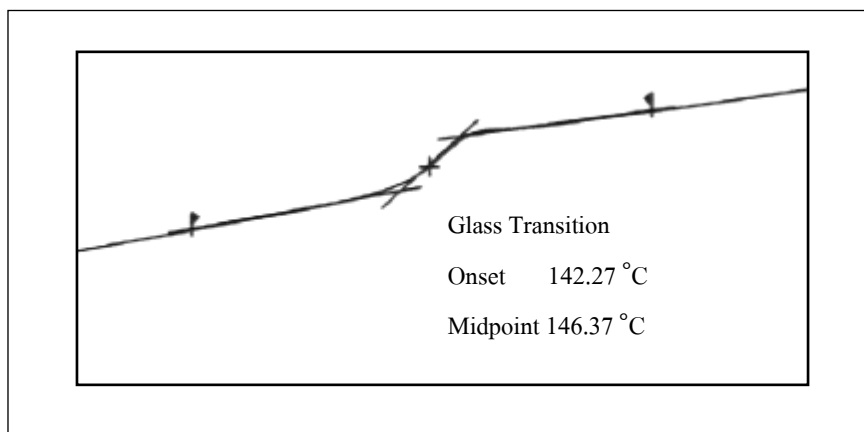
4.2 ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน

4.2.1 ผลการทดสอบ DSC ของชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบ



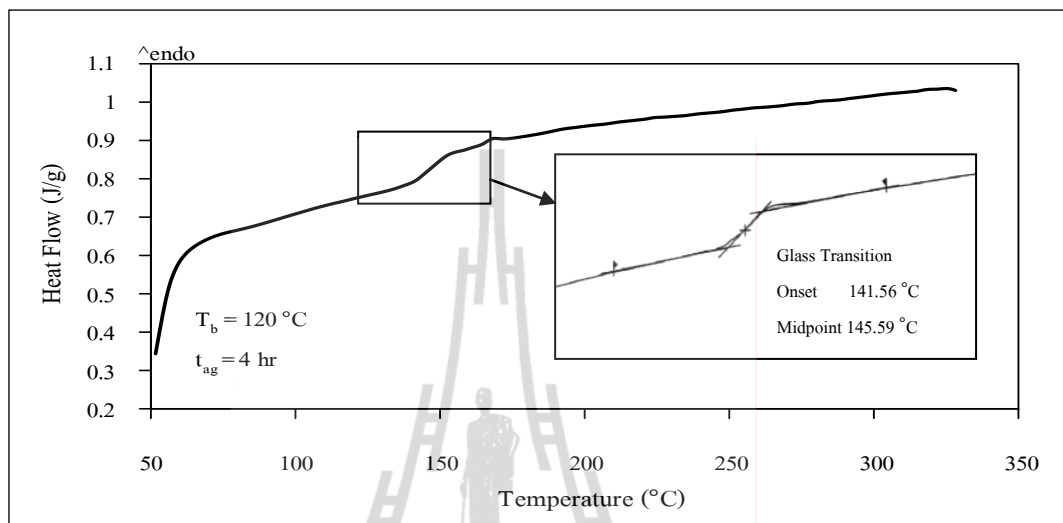
รูปที่ 4.12 แสดงกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบ

รูปที่ 4.12 กราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบ เมื่อชิ้นตัวอย่างได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 145 องศาเซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟโดย Base Line จะเลื่อนขึ้นไปด้านที่เป็น Endothermic Process



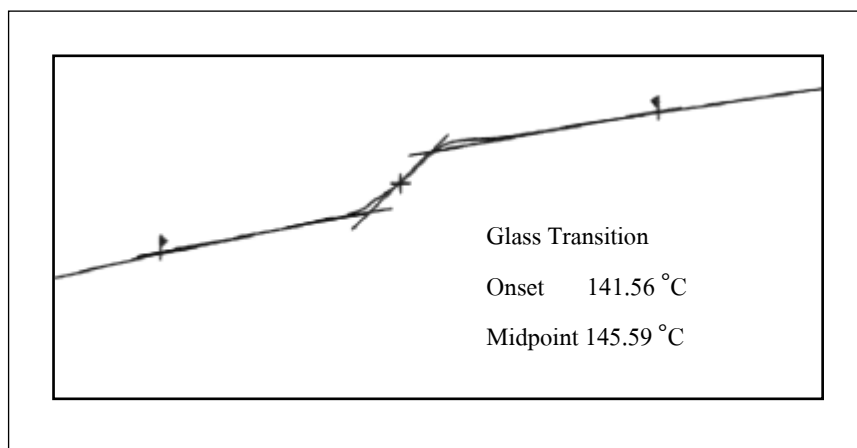
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟการคำนวณหา T_g จากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสมที่ไม่ผ่านการอบ

4.2.2 ผลการทดสอบ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 4$ hr.



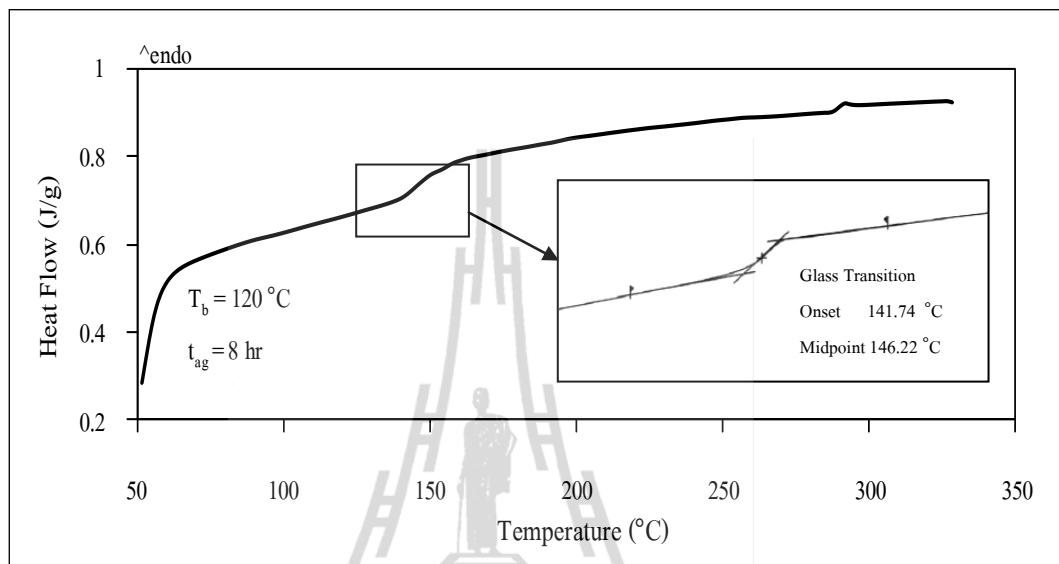
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 4$ hr.

รูปที่ 4.14 กราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 4$ hr. เมื่อชิ้นตัวอย่างได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 145 องศาเซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟโดย Base Line จะเลื่อนขึ้นไปด้านที่เป็น Endothermic Process



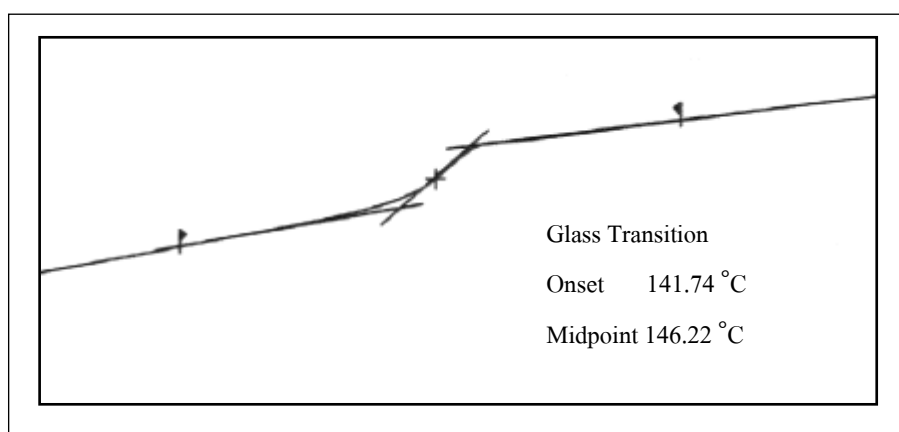
รูปที่ 4.15 แสดงกราฟการคำนวณหา T_g จากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเตผสมอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 4$ hr.

4.2.3 ผลของการทดสอบ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 8 \text{ hr}$.



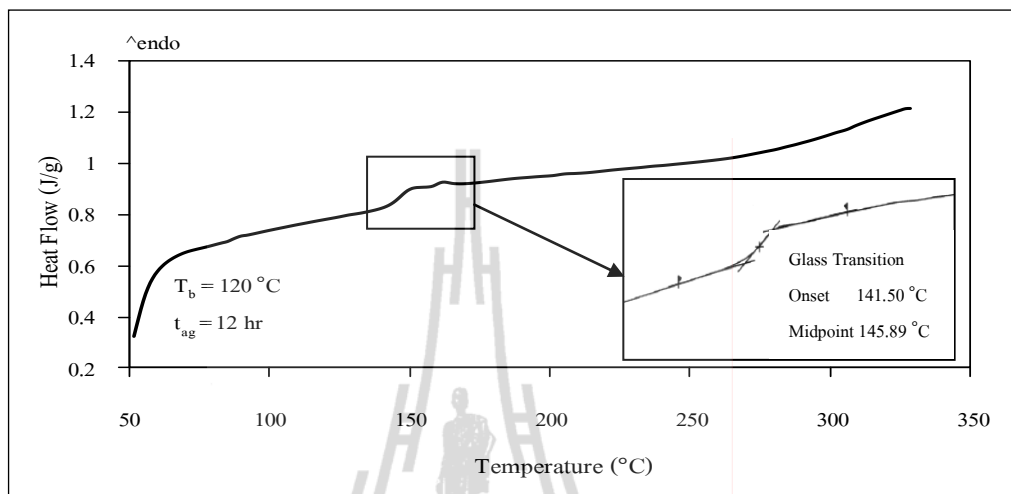
รูปที่ 4.16 แสดงกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 8 \text{ hr}$.

รูปที่ 4.16 กราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 8 \text{ hr}$. เมื่อชิ้นตัวอย่างได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 145 องศาเซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟโดย Base Line จะเลื่อนขึ้นไปด้านที่เป็น Endothermic Process



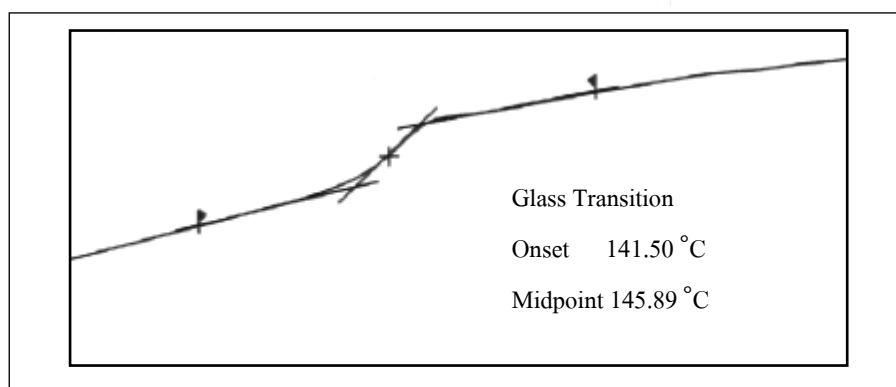
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟการคำนวณหาค่า T_g จากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 8 \text{ hr}$.

4.2.4 ผลของการทดสอบ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 12$ hr.



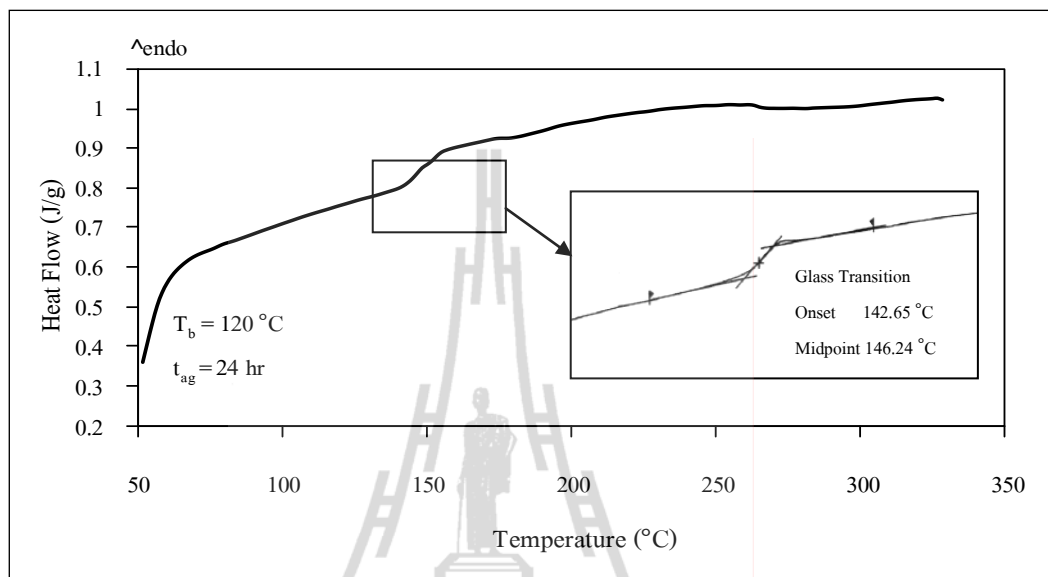
รูปที่ 4.18 แสดงกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 12$ hr.

รูปที่ 4.18 กราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 12$ hr. เมื่อชิ้นตัวอย่างได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 145 องศาเซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟโดย Base Line จะเลื่อนขึ้นไปด้านที่เป็น Endothermic Process



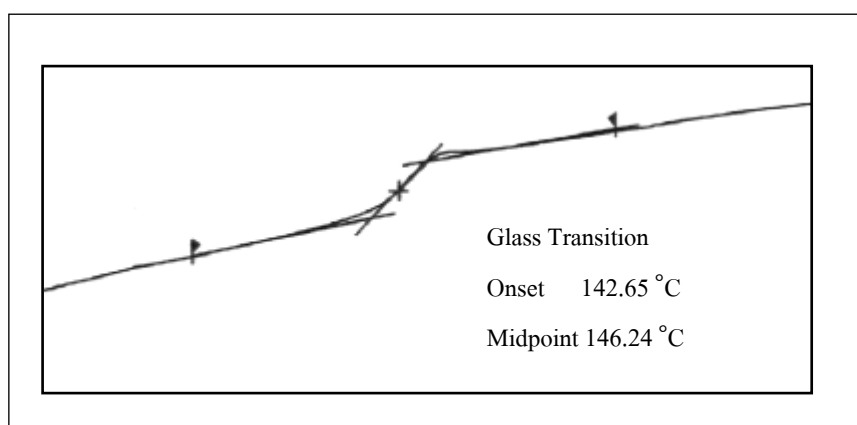
รูปที่ 4.19 แสดงกราฟการคำนวณหาค่า T_g จากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 12$ hr.

4.2.5 ผลของการทดสอบ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 24$ hr.

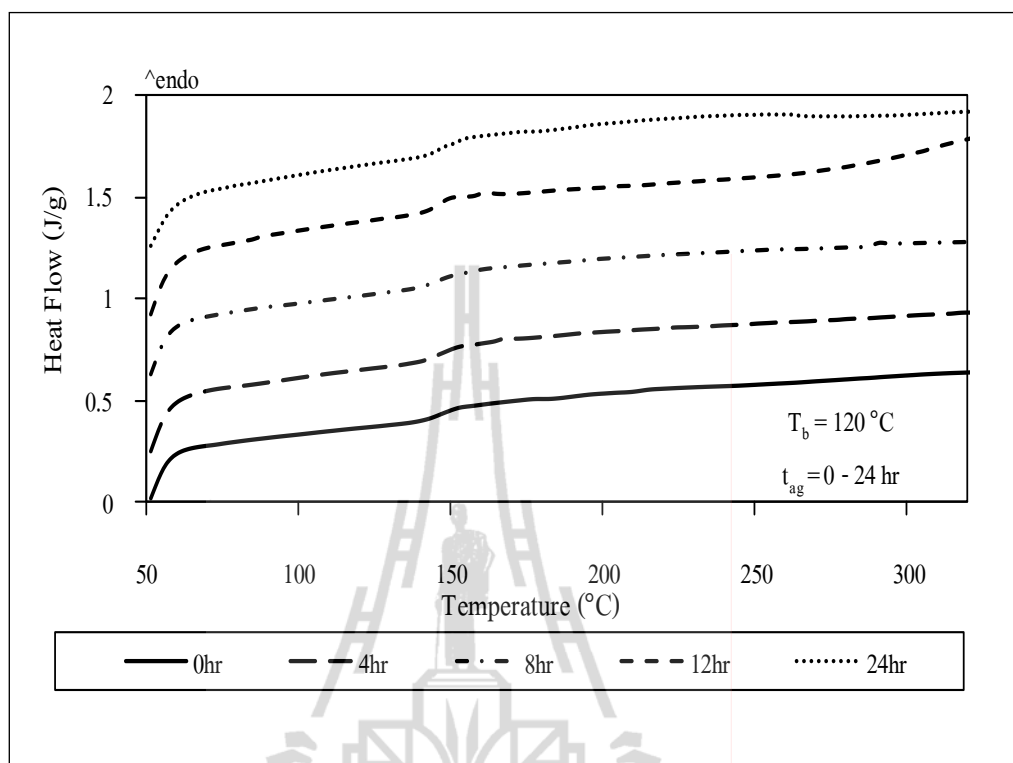


รูปที่ 4.20 แสดงกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 24$ hr.

รูปที่ 4.20 กราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 24$ hr. เมื่อชิ้นตัวอย่างได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 145 องศาเซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟโดย Base Line จะเลื่อนขึ้นไปด้านที่เป็น Endothermic Process



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟการคำนวณหา T_g จากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสมอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 24$ hr.



รูปที่ 4.22 แสดงกราฟ DSC ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120\text{ }^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 0-24\text{ hr}$.

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าของอุณหภูมิ T_g ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความชันจากการทดสอบ DSC

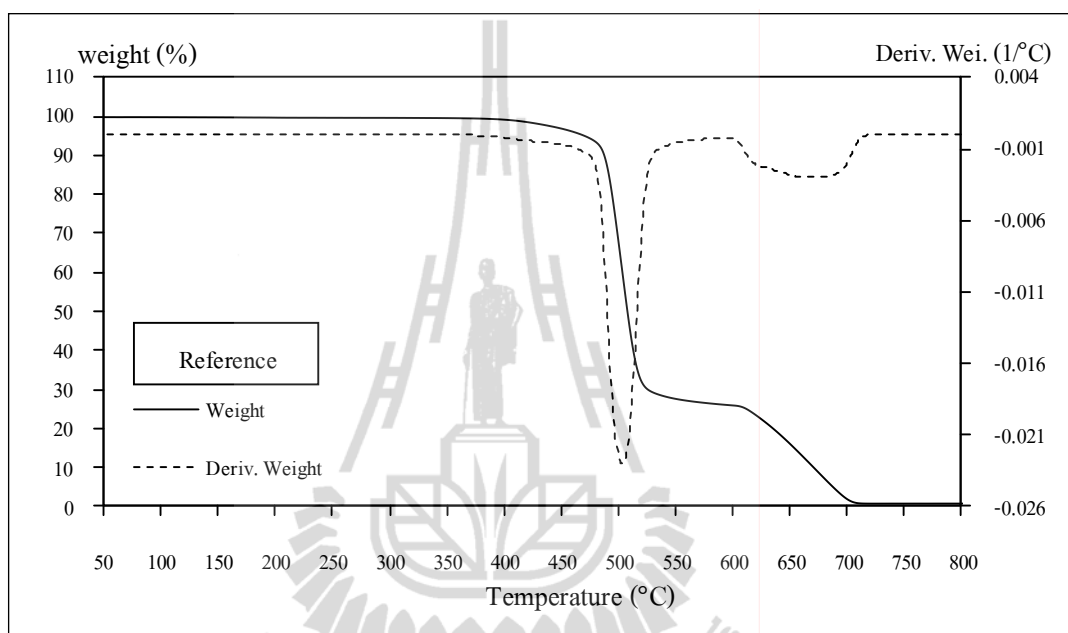
เวลาอบ T_b (hr)	Onset ($^\circ\text{C}$)	Midpoint ($^\circ\text{C}$)
0	142.27	146.37
4	141.56	145.59
8	141.74	146.22
12	141.50	145.89
24	142.65	146.24
Mean	141.94	146.06

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าทุกช่วงเวลาการอบทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงความชันที่อุณหภูมิประมาณ $146\text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิทรานซิชันแก้ว (T_g) ซึ่งจากตารางที่ 4.5 พบว่า T_g ของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามเวลาที่ใช้ในการอบ

4.3 ผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ

(Thermo Gravimetric Analysis : TGA)

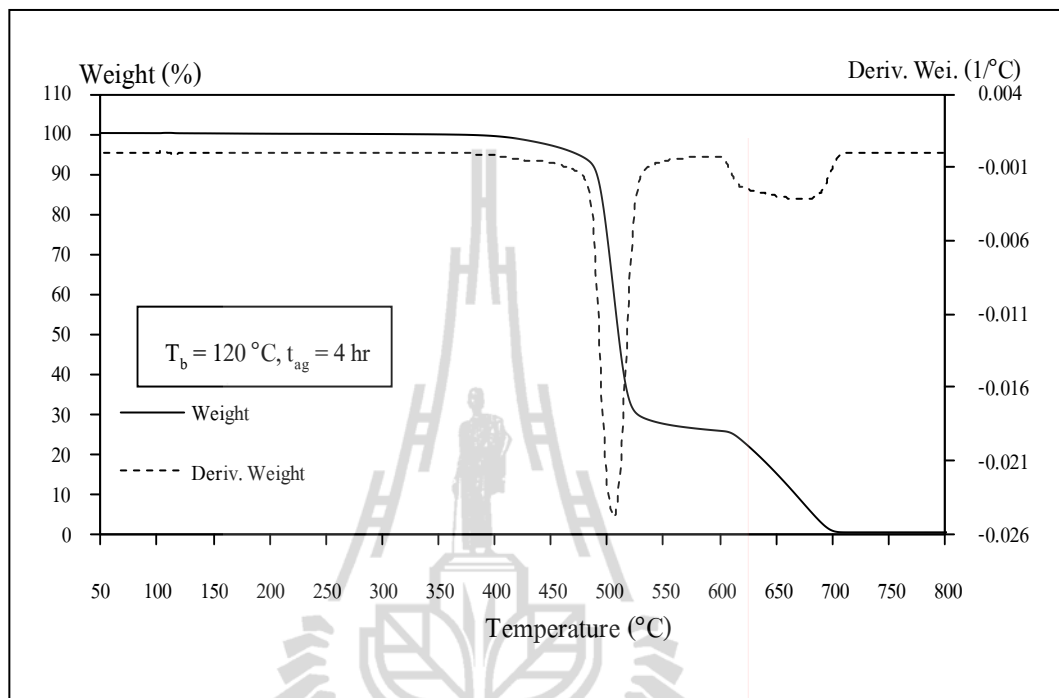
4.3.1 ผลของการทดสอบ TGA ของชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบ



รูปที่ 4.23 แสดงกราฟ TGA ของชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบ

จากรูปที่ 4.23 แสดงกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิ จากน้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของความชื้น สำหรับน้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างช่วงอุณหภูมิ 480-520 องศาเซลเซียส นั้นส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของพอลิคาร์บอนेट คิดเป็นส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไป 74.1504 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 600-710 องศาเซลเซียส เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบที่เติมเข้าไปเพื่อให้ชิ้นตัวอย่างมีคุณสมบัติที่ต้องการเพิ่มขึ้นคิดเป็นส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไป 25.296 เปอร์เซ็นต์ จากกราฟจะเห็นได้ว่ามีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันอยู่สองช่วง ซึ่งบอกได้ว่าชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนेटผสมที่นำมาทดสอบนั้นมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่สองส่วน

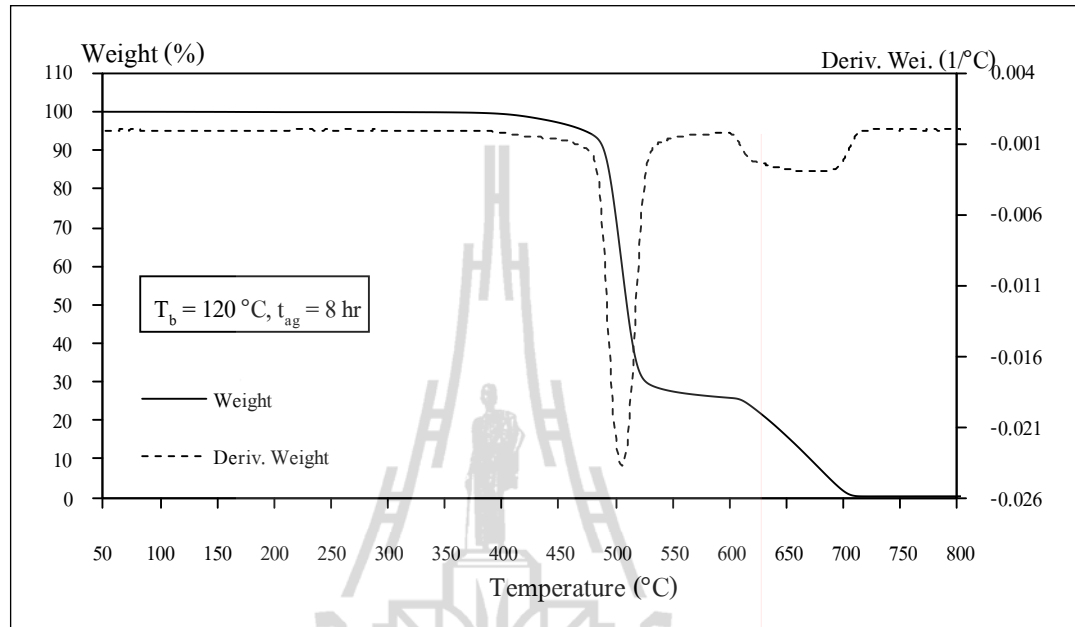
4.3.2 ผลของการทดสอบ TGA ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 4 \text{ hr}$.



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟ TGA ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 4 \text{ hr}$.

จากรูปที่ 4.24 แสดงกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิ จากน้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของความชื้น สำหรับน้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างช่วงอุณหภูมิ 480-520 องศาเซลเซียส นั้นส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของพอลิคาร์บอนเนต คิดเป็นส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไป 74.266 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 600-710 องศาเซลเซียส เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบที่เติมเข้าไปเพื่อให้ชิ้นทดสอบมีคุณสมบัติที่ต้องการเพิ่มขึ้นคิดเป็นส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไป 25.3663 เปอร์เซ็นต์ จากกราฟจะเห็นได้ว่ามีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันอยู่สองช่วง ซึ่งบอกได้ว่าชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสมที่นำมาทดสอบนั้นมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่สองส่วน

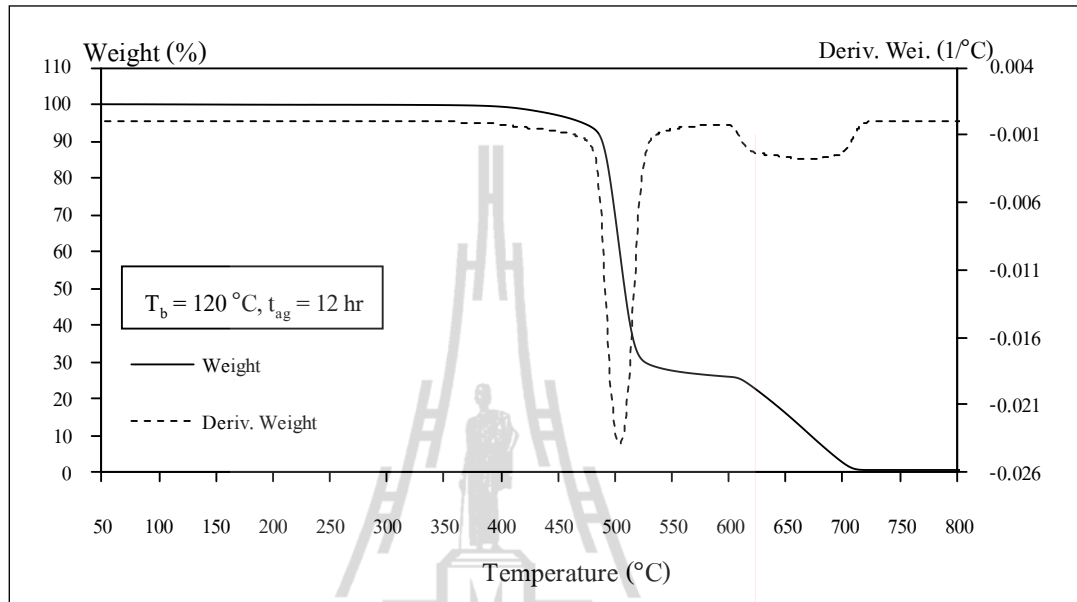
4.3.3 ผลของการทดสอบ TGA ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 8$ hr.



รูปที่ 4.25 แสดงกราฟ TGA ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 8$ hr.

จากรูปที่ 4.25 แสดงกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิ จากน้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของความชื้น สำหรับน้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างช่วงอุณหภูมิ 480-520 องศาเซลเซียส นั้นส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของพอลิคาร์บอนเนต คิดเป็นส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไป 73.9687 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 600-710 องศาเซลเซียส เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบที่เติมเข้าไปเพื่อให้ชิ้นทดสอบมีคุณสมบัติที่ต้องการเพิ่มขึ้นคิดเป็นส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไป 25.5007 เปอร์เซ็นต์ จากกราฟจะเห็นได้ว่ามีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันอยู่สองช่วง ซึ่งบอกได้ว่าชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสมที่นำมาทดสอบนั้นมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่สองส่วน

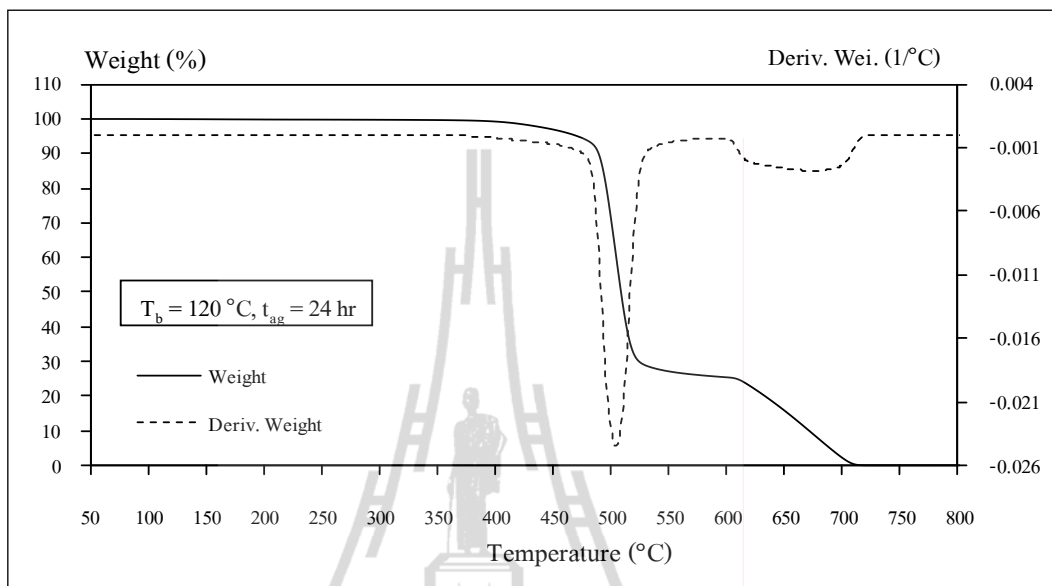
4.3.4 ผลของการทดสอบ TGA ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 12$ hr.



รูปที่ 4.26 แสดงกราฟ TGA ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 12$ hr.

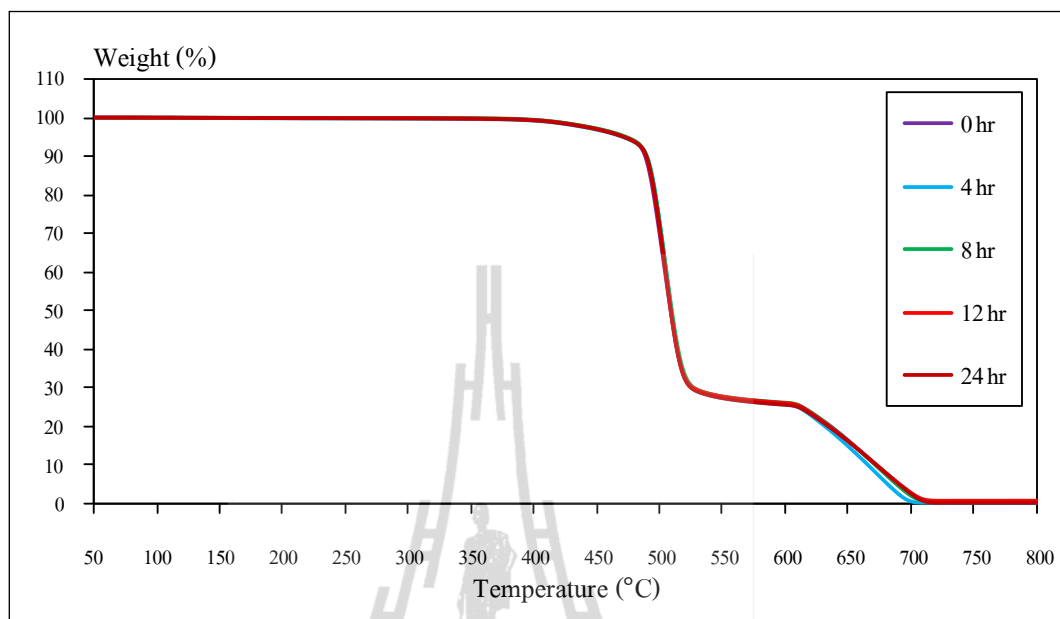
จากรูปที่ 4.26 แสดงกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิ จากน้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของความชื้น สำหรับน้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างช่วงอุณหภูมิ 480-520 องศาเซลเซียส นั้นส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของพอลิคาร์บอนेट คิดเป็นส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไป 74.1577 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 600-710 องศาเซลเซียส เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบที่เติมเข้าไปเพื่อให้ชิ้นทดสอบมีคุณสมบัติที่ต้องการเพิ่มขึ้นคิดเป็นส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไป 25.4159 เปอร์เซ็นต์ จากกราฟจะเห็นได้ว่ามีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันอยู่สองช่วง ซึ่งบอกได้ว่าชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนेटผสมที่นำมาทดสอบนั้นมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่สองส่วน

4.3.5 ผลของการทดสอบ TGA ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 24$ hr.

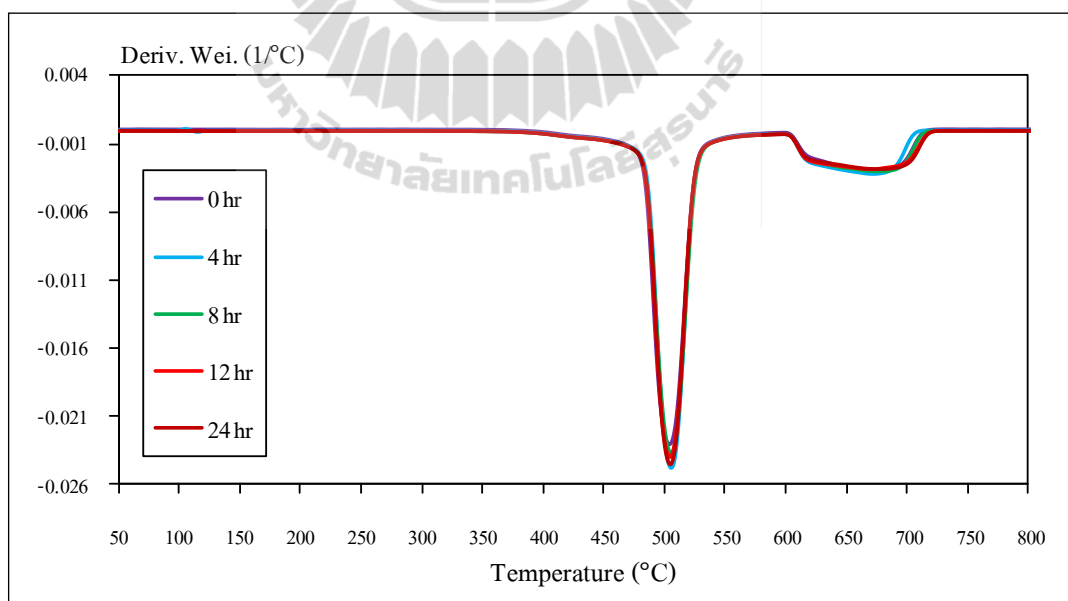


รูปที่ 4.27 แสดงกราฟ TGA ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 24$ hr.

จากรูปที่ 4.27 แสดงกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิ จากน้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของความชื้น สำหรับน้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างช่วงอุณหภูมิ 480-520 องศาเซลเซียส นั้นส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของพอลิคาร์บอนเนต คิดเป็นส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไป 74.3008 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 600-710 องศาเซลเซียส เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบที่เติมเข้าไปเพื่อให้ชิ้นทดสอบมีคุณสมบัติที่ต้องการเพิ่มขึ้นคิดเป็นส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไป 25.3707 เปอร์เซ็นต์ จากกราฟจะเห็นได้ว่ามีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันอยู่สองช่วง ซึ่งบอกได้ว่าชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสมที่นำมาทดสอบนั้นมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่สองส่วน



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟ TGA Weight ของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 0-24$ hr



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟ TGA Deriv. Weight ของชิ้นตัวอย่างอบอุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$, $t_{ag} = 0-24$ hr.

ตารางที่ 4.6 แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบขึ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม

เวลาอบ T_b (hr)	Composition 1 (%)	Composition 2 (%)
0	74.1504	25.296
4	74.266	25.3663
8	73.9687	25.5001
12	74.1571	25.4154
24	74.3008	25.3707
Mean	74.1686	25.3897

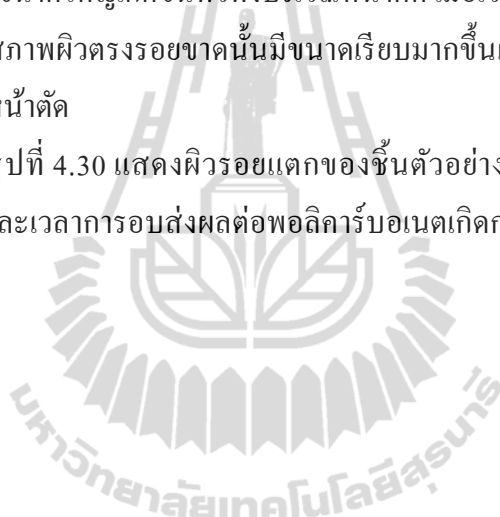
จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิด้วยเครื่อง TGA พบว่ามีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันอยู่สองช่วง ซึ่งสามารถระบุถึงขึ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่นำมาทดสอบนั้นมียุคประกอบหลัก ๆ อยู่สองส่วน คือส่วนที่เป็นพอลิคาร์บอเนต Jang, B. N., and Wikie, C. A. (2004) และส่วนที่เป็นคาร์บอนแบล็ค TA Instruments. (n.d.) จากตารางที่ 4.6 พบว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิมีสัดส่วนการสลายตัวของสารประกอบในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน ค่าเปอร์เซ็นต์การสลายตัวของสารประกอบทั้งสองก็มีค่าใกล้เคียง

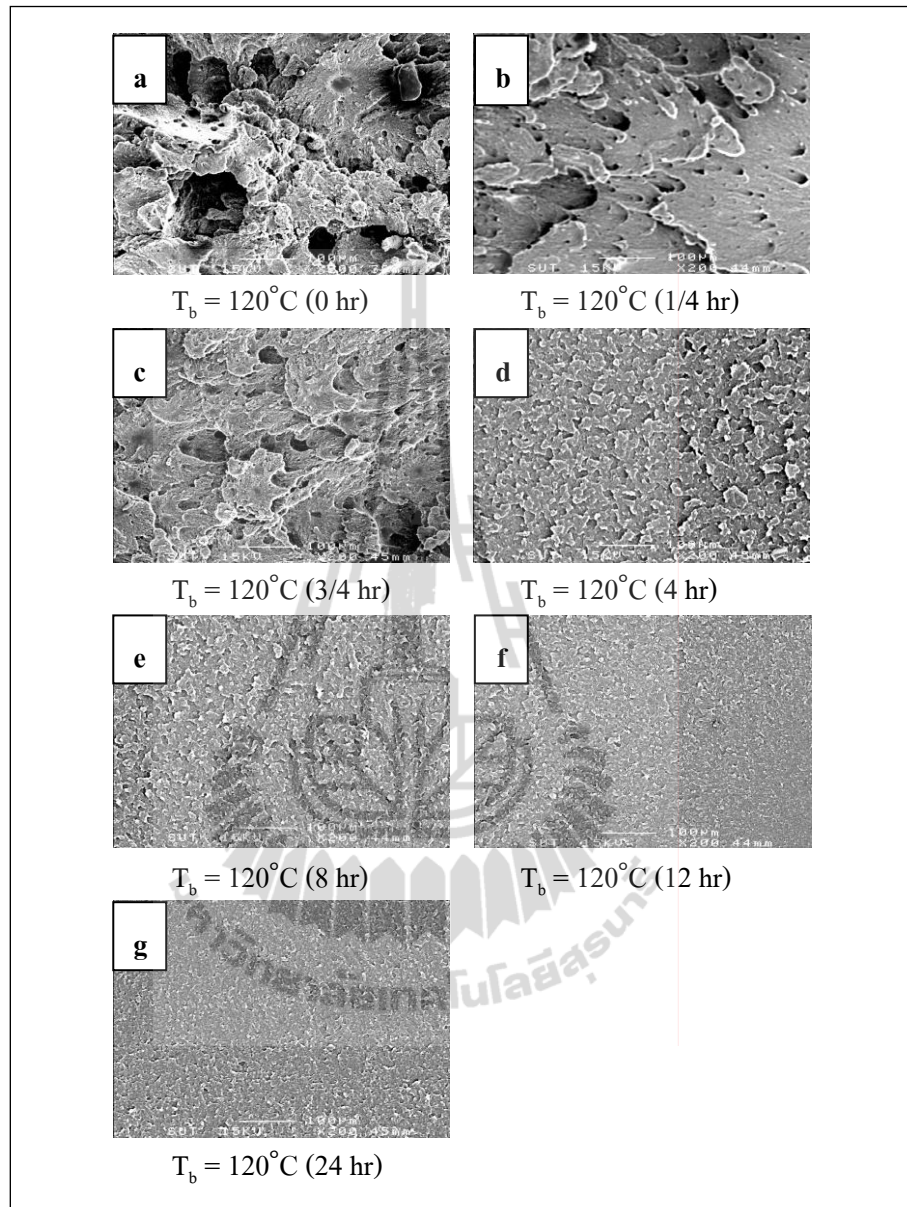
4.4 ผลที่ได้จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยา

4.4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการดิ่งทดสอบ

จากการจำลองผลกระทบทางความร้อน โดยนำชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ที่เวลา 0 1/4 3/4 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง แล้วทำการดิ่งทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไป นั้นมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลจากผลกระทบทางความร้อนเกิดขึ้นกับชิ้นตัวอย่าง โดยสามารถบอกได้จากภาพถ่ายด้วยวิธี (Scanning Electron Microscope : SEM) ที่สภาพพื้นผิวตรงรอยขาดของชิ้นงานที่ผ่านการดิ่งทดสอบ ดังรูปที่ 4.30 พบว่า จากชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบนั้นที่ผิวของรอยขาดนั้นมีสภาพผิวที่ขรุขระและรอยหลุมขนาดใหญ่เกิดขึ้นทั่วทั้งบริเวณหน้าตัด เมื่อเวลาการอบเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิการอบข้างต้น ทำให้สภาพผิวตรงรอยขาดนั้นมีขนาดเรียบมากขึ้นและและรอยหลุมมีขนาดเล็กลงกระจายทั่วทั้งบริเวณหน้าตัด

จากรูปที่ 4.30 แสดงผิวรอยแตกของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม สามารถบอกได้ว่าความร้อนและเวลาการอบส่งผลต่อพอลิคาร์บอเนตเกิดการเปลี่ยนแปลงจากวัสดุเหนียวเป็นวัสดุเปราะมากขึ้น





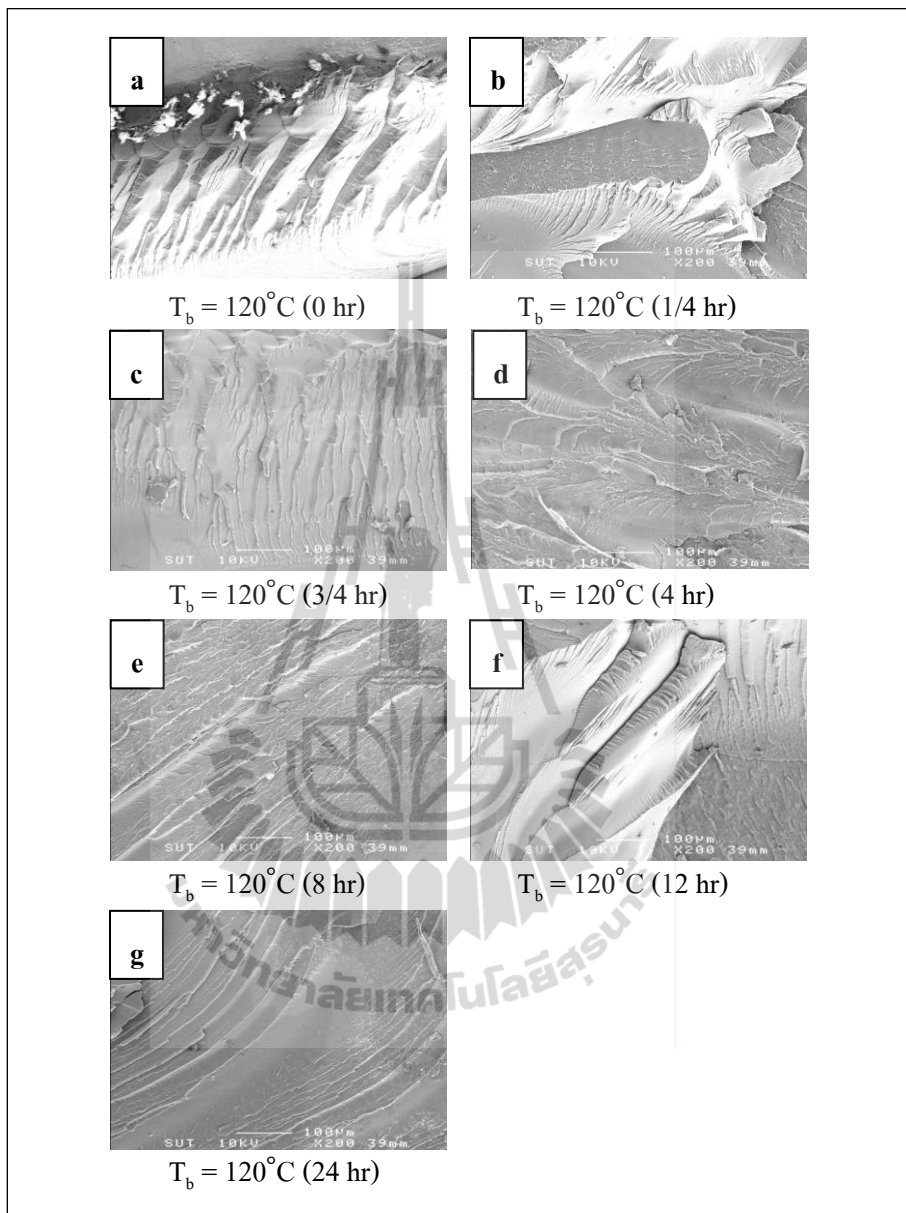
รูปที่ 4.30 แสดงรูปถ่าย SEM ที่ผิวของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเตผสมที่ผ่านการทดสอบแรงดึง (a-g) ที่อุณหภูมิอบ $T_b = 120^\circ\text{C}$ เวลา $t_{ag} = 0-24$ hr.

4.4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านหักในไนโตรเจนเหลว

รูปที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบรูปร่างจาก SEM กำลังขยาย 200 ที่พื้นผิวการแตกหักในไนโตรเจนเหลวของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม ที่ผ่านการอบอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 1/4 3/4 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.31a ที่สภาพพื้นผิวตรงรอยแตกหักของชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบพบว่า พื้นผิวจะหยาบด้วยหลายสายการฉีกขาดและกิ่งก้าน ลักษณะของการเสียหายนั้นแสดงให้เห็นว่ามีความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ที่สูงของสารตัวเติมคาร์บอนแบล็ค รูปที่ 4.31b สำหรับชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบ 1/4 ชั่วโมง แม้ว่าพื้นผิวการแตกหักยังแสดงสายการฉีกขาดบางส่วนของเมทริกซ์และบริเวณข้างเคียงที่ราบเรียบไม่แสดงถึงรอยฉีกขาดนั้นเป็นผลมาจากการรวมตัวผสมกันเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous) ของพอลิเมอร์เมทริกซ์กับสารตัวเติม นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นลักษณะที่คล้ายกันได้ดังรูปที่ 4.31c โดยมีขนาดสายการฉีกขาดที่เล็กลงแล้วส่วนพื้นที่ของการเป็น Homogeneous เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นดังรูปที่ 4.31g

เมื่อเวลาการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิการอบข้างต้น ทำให้สภาพพื้นผิวตรงแตกหักนั้นมีการเป็น Homogeneous มากขึ้น กล่าวคือ พื้นผิวรอยแตกหักเรียบมากขึ้น เป็นผลมาจากความร้อนและเวลาในการอบ โดยจากการศึกษาวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ทางด้านความร้อนที่ส่งผลต่อวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสม ทำให้ผู้ทำวิจัยเชื่อมั่นได้ว่า ความร้อนส่งผลให้เกิดการกระตุ้นการเกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น Hassan, M., et al. (2010) ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่ไปในทิศทางที่เป็นระเบียบมากขึ้น โดยการอบความร้อนนำไปสู่กระบวนการ Thermal Healing จากการเกิด Interdiffusion ของโมเลกุลในสายโซ่ทั้งหมด วิธีการซ่อมแซมแบบนี้เรียกว่า การเชื่อมพลาสติก Sekhon, G.S., et al. (2008)



รูปที่ 4.31 แสดงรูปถ่าย SEM ที่พื้นผิวการแตกหักในไนโตรเจนเหลวของชิ้นตัวอย่างพอลิเอทรีนเทอเรนทอ (a-g) ที่ $T_b = 120^\circ\text{C}$ เวลา $t_{ag} = 0-24$ hr.

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยและผลของงานวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์ปัจจัยทางความร้อนที่มีผลต่อวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสม ซึ่งประกอบด้วยวัสดุประสงค์ต่าง ๆ ของงานวิจัย คือ ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของชิ้นตัวอย่าง ซึ่งผลการวิจัยนั้นมีผลออกมาสามารถสรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ ดังนี้

- 5.1 สรุปผลของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นตัวอย่าง
- 5.2 สรุปผลของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของชิ้นตัวอย่าง
- 5.3 สรุปผลทางสัณฐานวิทยา
- 5.4 ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นตัวอย่าง

จากการวิจัยครั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเวลาการอบและอุณหภูมิอบเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมมีค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันค่าอืดองก์ชั้นลดลงและยังส่งผลต่อพอลิคาร์บอเนตผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงจากวัสดุเหนียวเป็นวัสดุเปราะมากขึ้นอีกทั้งผลของวัฏจักรความร้อนส่งผลให้พอลิคาร์บอเนตผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวข้างต้นได้เร็วขึ้น โดยพบว่าชิ้นส่วนพอลิคาร์บอเนตจะสามารถรับภาระกรรมได้ลดลงหลังจากกระบวนการล้างทำความสะอาดที่จำนวนรอบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลของพอลิคาร์บอเนตผสมจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ และเวลาที่ใช้ในการอบ

5.2 สรุปผลของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของชิ้นตัวอย่าง

5.2.1 ผลการวิเคราะห์ DSC

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนของชิ้นตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับอุณหภูมิ จากการทดสอบ DSC พบว่าค่า T_g มีค่าเท่ากับ 146 องศาเซลเซียส ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่อบ การจำลองสถานะทางความร้อน สามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างหลักของพอลิคาร์บอเนตไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่อบ

5.2.2 ผลการวิเคราะห์ TGA

การวิเคราะห์ความความสัมพัทธ์ระหว่างน้ำหนักของสารตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าชิ้นตัวอย่างของทุกเวลาการอบมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันอยู่สองช่วง ซึ่งสามารถระบุถึงชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสมที่นำมาทดสอบนั้นมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่สองส่วนคือ ส่วนที่เป็นพอลิคาร์บอนเนต (Polymer Matrix) และส่วนที่เป็นคาร์บอนแบล็ค (Filler) สามารถสรุปได้ว่าเวลาที่ใช้ในการอบไม่มีผลต่อสัดส่วนขององค์ประกอบทั้งสอง

5.3 สรุปผลทางสัณฐานวิทยา

จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่าพลังงานความร้อน เป็นสาเหตุของการเคลื่อนที่ของสายโซ่ นำไปสู่การเกิด Thermal Healing เนื่องจากโมเลกุลเกิดการ Interdiffusion ส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสมนั้นมีความเป็น Homogeneous มากขึ้น สรุปได้ว่าผลของอุณหภูมิและเวลาไม่ส่งผลต่อโครงสร้างหลักของพอลิคาร์บอนเนต

5.4 ข้อเสนอแนะ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของพอลิคาร์บอนเนตนั้น จำเป็นต้องเป็นชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองควรเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นตัวอย่าง ในกรณีที่ทำการศึกษาทางด้านความร้อน เช่น การอบ เป็นต้น ควรทำการคายความร้อนของชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบ

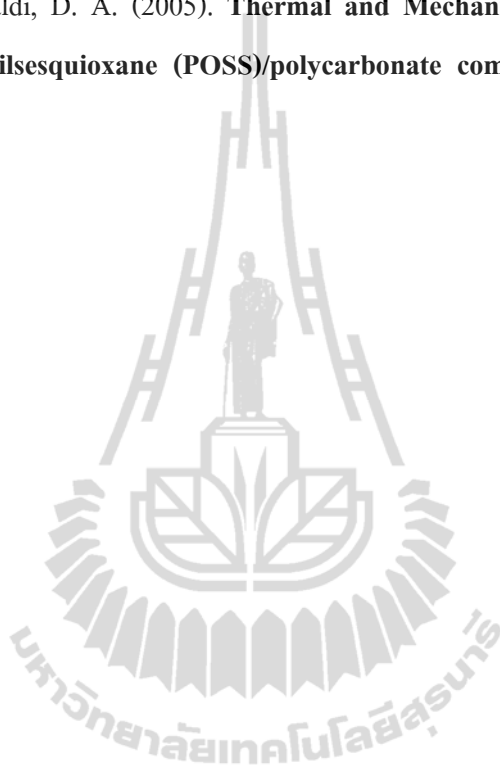
รายการอ้างอิง

- ปราณี ชุมสำโรง นิธินาถ ศุภกาญจน์ วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ และ จันทิมา ดิประเสริฐกุล. 2550. **ปฏิบัติการทดสอบพอลิเมอร์**. สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์. **กระแสวิทยาพอลิเมอร์และกระบวนการขึ้นรูปเบื้องต้น**. สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ จันทิมา ดิประเสริฐกุล. 2553. **สมบัติเชิงฟิสิกส์ของพอลิเมอร์ 1**. สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- อุทัย มีคำ. (มปป). **การทดสอบวัสดุพอลิเมอร์**. สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- Annual Book of ASTM Standards. (2004). **Section Eight Plastics Volume 08.01 Plastics**. International Standards Worldwide. (I) D256-D2324.
- Yin, B., Zhao, Y., Yang, W., Pan, M. M., Yang, M. B. (2006). **Polycarbonate/liquid crystalline polymer blend : Crystallization of polycarbonate**. Polymer. 47, 8237-8240
- Jang, B. N., and Wikie, C. A. (2004). **A TGA/FTIR and mass spectral study on the thermal degradation of bisphenol A polycarbonate**. Polymer Degradation and Stability. 86, 419-430
- Sekhon, G. S., Kumar, S., Kaur, C., Verma, N. K., Chakarvarti, S. K. (2008). **Effect of thermal annealing on pore density, pore size and pore homogeneity of polycarbonate NTFs**. Radiation Measurements. 43, 1357-1359
- Groves, I., Lever, T., and Hawkins, N. (2008). **Thermal Analysis Application Brief Determination of Carbon Black Pigment in Nylon 66 by TGA**. Thermal Analysis & Rheology. Number TA-122
- Hassan, M. M., Badway, N. A., Gamal, A. M., Elnaggar, M. Y., Hegazy, E. S. A. (2010). **Effect of carbon black on the properties of irradiated recycled polyamide/rubber waste composites**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B 268,2527-2534

Wang, N., Zhang, X., Ma, X., Fang, J. (2008). **Influence of carbon black on the properties of plasticized poly (lactic acid) Composites.** Polymer Degradation and Stability, 93, 1044-1052

TA Instruments. (n.d.) **Thermal Analysis Application Brief.** TA-122

Zhao, Y., and Schiraldi, D. A. (2005). **Thermal and Mechanical properties of polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS)/polycarbonate composites.** Polymer. 46, 11640-11647



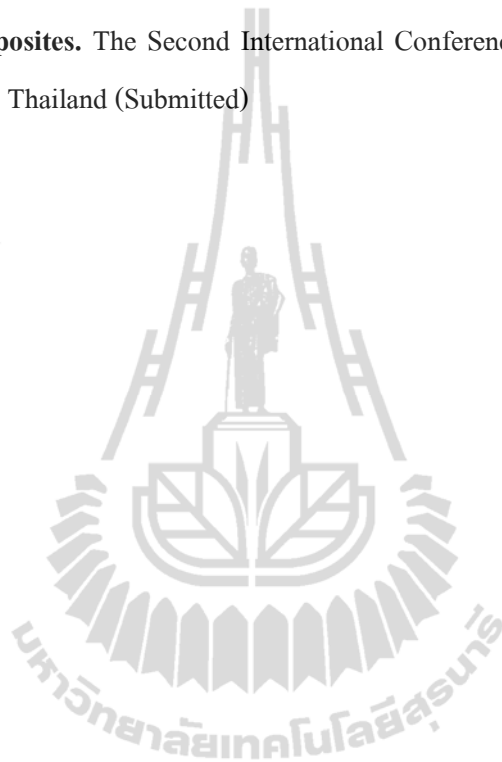


ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Siwadumrongpong, S., and Chaitongrat, C. (2011). **Effect of Heat on Properties of Polycarbonate Composites**. The Second International Conference on Mechanical Engineering. 19-21 October. Krabi. Thailand (Submitted)





AMM: Applied Mechanics, Materials and Manufacturing

Effect of Heat on Properties of Polycarbonate Composites

Somsak Siwadumrongpong¹, Chalermchai Chaitongrat²

^{1,2} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhonratchasima, Thailand 30000

* Corresponding Author: Tel: 087 243 2909, Fax: 045 353 309,

E-mail: ton-phai@hotmail.com

Abstract

Composite of polycarbonate is widely used in various applications as parts and products, such as parts in Hard Disk Drive. It is known that heat usually affects the deterioration trend of polycarbonate composite properties. The deterioration may be resulted from changing of its structure, and yield to shorter life time. However, mechanism of heat effect to life time of part or product is still unclear. Therefore, aim of this study was to study effect of temperature and time to properties of polycarbonate composite. Polycarbonate composite specimen was baked at 75 90 105 120 degree Celsius for 1/4 3/4 4 8 12 and 24 hours. It was found that increasing of treatment time and temperature results to changing of the polycarbonate composite from ductile to brittle material. From thermal analysis, it was found that treatment time and temperature seem to be not affect to the polycarbonate structure and composition change. It was proposed that heat may result the interdiffusion of polymer matrix and lead to more order of its structure.

Keywords: Polycarbonate, Composite Material, Heat & Time effect, Elongation, Glass transition Temperature



1. Introduction

It is well known that the PC material is polymer capable, high heat resistance, high strength and good resistance to wear. PC is widely used in various industries as parts and products, such as parts in Hard Disk Drive (HDD). We are known that heat will affect the alignment of the chain and crystallinity of PC at the Glass Transition Temperature (T_g) led to changes in physical properties. Which affect the performance and lifetime of parts extremely. However, mechanism of heat effect to lifetime of part or product is still unclear.

The purpose of this study was to study effects of temperature and time to properties of PC specimen.

2. Experiment

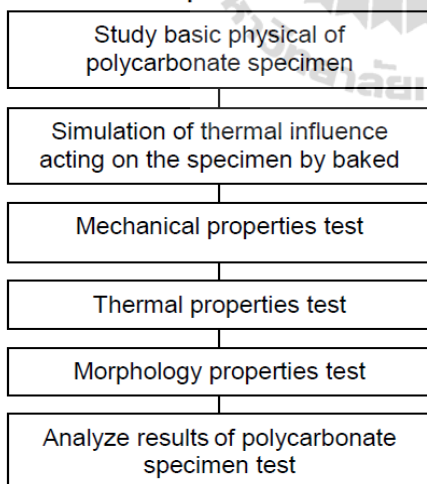


Fig. 1 Operating plan

2.1 Experimental Apparatus

This study used sample through forming injection by standard American Society for Testing and Materials (ASTM, 2004) dumbbell shaped test PC specimen with the geometry show in figure 2. Length

220 ± 0.4 mm, width 12.5 ± 0.4 mm, thick 3.2 ± 0.4 mm.

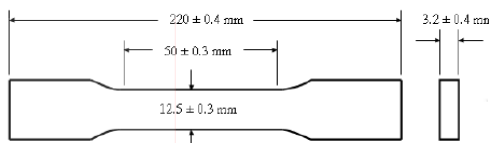


Fig. 2 Polycarbonate specimen standard

Then simulate the impact of thermal annealing PC specimen with heat apparatus Over Memmert Model UFE 600. Polycarbonate specimen was baked at (Temperature baking: T_b) 75, 90, 105 and 120 °C for 1/4, 3/4, 4, 8, 12 and 24 hours, as show in table 1.

Table. 1 The temperature and duration time used for baked PC specimen

Temperature, C ; T_b	Duration, hr. ; t_{ag}
75	1/4, 3/4, 4, 8, 12, 24
90	1/4, 3/4, 4, 8, 12, 24
105	1/4, 3/4, 4, 8, 12, 24
120	1/4, 3/4, 4, 8, 12, 24

2.2 Mechanical properties test

2.2.1 Testing the influence of heat continuous

In testing changes mechanical properties of PC specimen through baked in Table 1 by the specimens were cooled for 24 hours at room temperature. Then tensile test specimens compare the change mechanical properties of specimen baked to the PC specimen standard does not baked. The tensile tests were carried out on an Instron Universal Testing Machine model 5560 load cell 5 KN measured at extension rate of 50 mm/min (Constant rate of extension) and gauge length 50 mm at room



temperature (~ 23 °C) as shown in Figure 3 under standard test methods for properties in tension of the plastic (ASTM: D638 - 03).

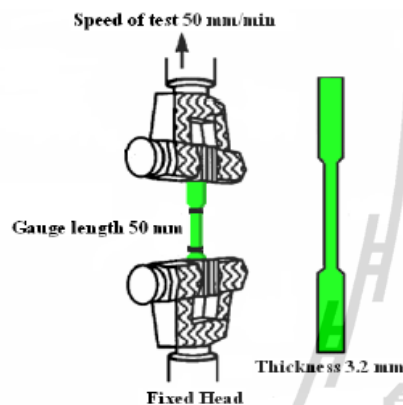


Fig. 3 The mechanical properties of PC specimen with tensile test

To record the various changes mechanical properties such as maximum stress, young's modulus, elongation and other properties of the PC specimens. Three specimens of each composite were tested and then averaged results and standard deviations were reported.

2.2.2 Testing the influence of heat cycles

By making an PC specimens were baked at 120 °C for 1 hour and then leave the specimens were cooled at room temperature for 24 hours thinking as a heat cycle. The specimens were tested with 10, 20, 40 heat cycles.

2.3 Differential Scanning Calorimeter (DSC)

In testing changes thermal energy of PC specimens through baked in Table 1, compared with standard specimens that do not baked as reference specimens. Thermal properties testing were carried out on an

Mettler Toledo DSC model 822^o and Pyris testing program to calculate and record. The specimens were PC is used as a powder or small tablets packed in aluminum cups, about 8 mg tested under nitrogen atmosphere. Compared which aluminum cup not sample used as a reference. Rate of the first heating (1st) at 10 °C / min. From the initial temperature at 50 °C to 330 °C for remove contaminants on the sample and then let it cool down at start. Then the heat was second heating (2nd) with the same rate of heating for the first time

2.4 Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

The thermal stability of PC specimen through baked as shown in Table 1, compared with PC specimens standards does not baked as reference was measured by thermo gravimetric analysis using a Mettler Toledo TGA / SDTA 851. Sample weigh ranged about 14 mg. Weight loss was traced as samples were heated at a rate 20 °C / min from 50 °C to 850 ° under a dry nitrogen purge.

3. Results and Discussion

3.1 Effects of the mechanical properties

3.1.1 Influence of heat continuous

From figure 4 shows the stress-strain curves of the PC specimen through backed at temperature 120 °C at 1/4, 3/4, 4, 8, 12 and 24 hours compared with PC specimen reference. Figure 4 demonstrate that unique characteristics of the specimen reference are Flexible plastic material. Initially of PC is relatively low elongation with

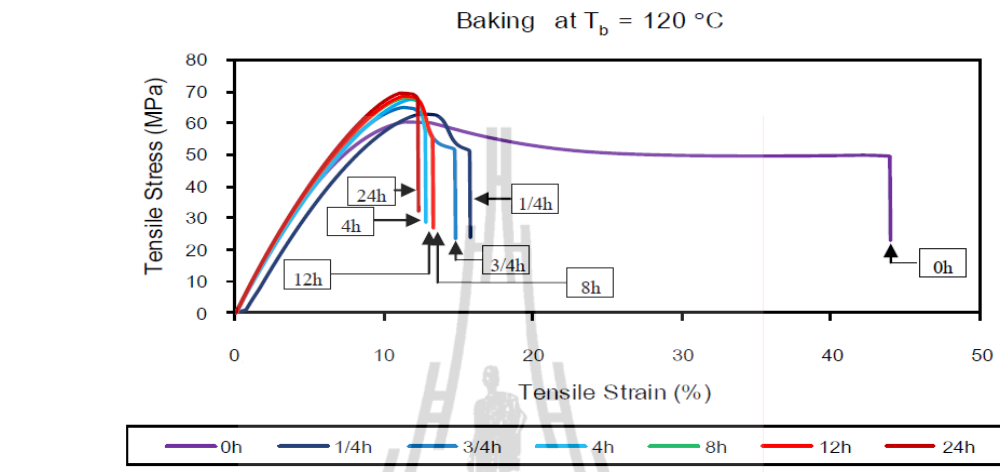


Fig. 4 Stress-strain curve of PC specimen at baking temperature $T_b=120\text{ }^\circ\text{C}$, $t_{ag}=0-24$ hr.

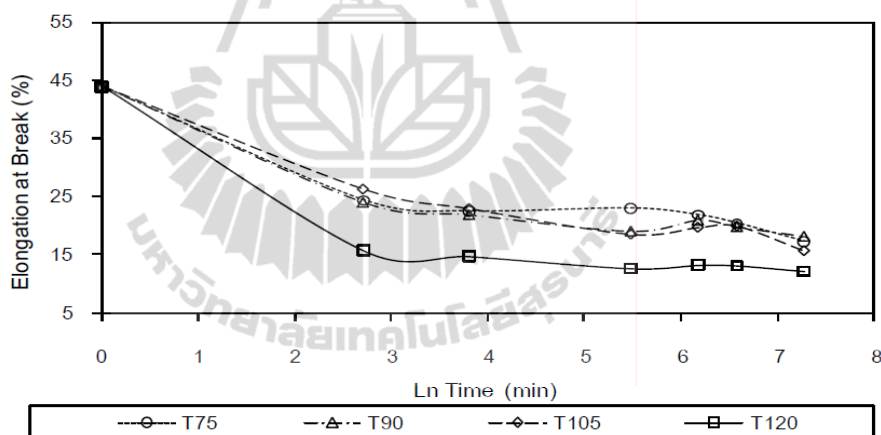


Fig. 5 The relation between elongation and duration of baking temperature $T_b=75-120\text{ }^\circ\text{C}$, $t_{ag}=0-24$

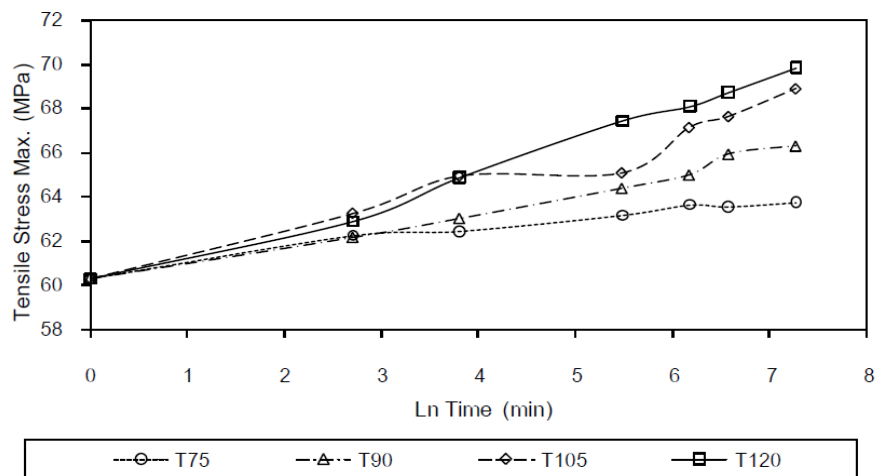


Fig. 6 The relation between maximum stress and duration of baking $T_b=75-120\text{ }^\circ\text{C}$, $t_{ag}=0-24$ hr.



increasing stress. So far a stretch to change dramatically compared to the stress, and lacking in most as the elongation about 44% when compared with PC specimens through the baked test at 120 °C at the duration of baking 1/4 hours to demonstrate changes significantly. That is, the elongation a huge drop and maximum stress increased slightly. In addition, the duration of baking increased to affect the elongation has decreased, as shown in Figure 5 and in the same time, duration of baking increases the stress maximum increases as shown in Figure 6. From results can be said that the duration for baking increased and higher temperatures will made PC specimens have maximum stress increase and the elongation it tended to decrease. However, the slope (Young's modulus) of each sample in tension tested is similar for all baking temperatures.

3.1.2 Influence of heat cycles

From Figure 7 shows the relationship between the elongation and duration of baking has changed PC specimens through the heat cycle compared with PC specimens through a heat continuous. From Figure 7 show that. When the heat cycle increases will the elongation has decreased continuously compared with the heat continuous at baking temperature the duration same. It decreased significantly at 10 cycles of heat cycles.

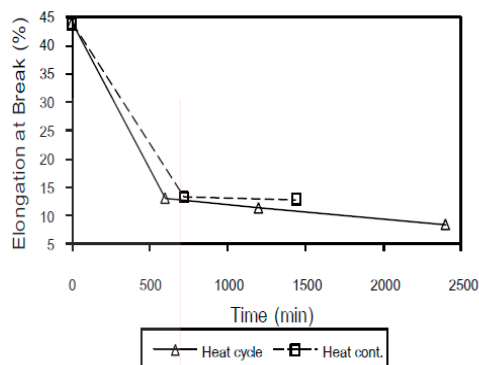


Fig. 7 The relation between elongation and duration of baking temperature $T_b=120\text{ }^\circ\text{C}$

3.2 Effects of the thermal properties

Figure 8 shows the heat flow from the DSC tested PC specimens Through the baking temperature at 120 °C duration 4, 8, 12 and 24 hours compared with PC specimens does not baked as reference. From Figure 8 shows that, when the duration baking and rate of heat flow increased. And every duration baked Change the slope at the location of endothermic at about 146 °C for thermal properties are important and unique of the polymer is the glass transition temperature change (T_g). From Table 2 it was found T_g of PC specimens does not change under influence of thermal.

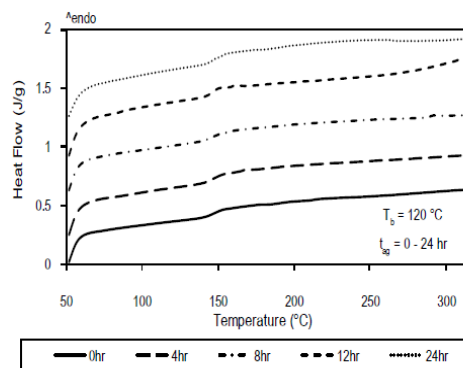


Fig. 8 Slope DSC test of PC specimen at baking temperature $T_b=120\text{ }^\circ\text{C}$, $t_{ag}=0-24\text{ hr}$.



Table. 2 The temperature and duration time used for baked PC specimen

Duration baking; t_{ag} , hr.	Temperature; T_g , °C
0	146.37
4	145.59
8	146.22
12	145.89
24	146.24
Mean	146.06

3.3 Effects of the thermal gravimetric analysis

From figure 9 shows graphs of the weight loss to the temperature rise. From results can be analyzed to determine the weight lost during a temperature below 400 °C mainly due to the decomposition of moisture. For weight loss in the temperature range 480-520 °C is decomposition of compound 1, equivalent to the weight loss of about 74 percent, and weight loss in the temperature range 600-710 °C due to decomposition of compound 2, equivalent to the weight loss of about 25 percent, as shown in table 3. From the analysis can determine that compound 1, the decomposition of PC and the second compound is the decomposition of compounds at to the match Carbon Black (CB). From figure 9 show the changes in weight to the temperature of the PC specimen through annealing at 120 °C for 0, 4, 8, 12, 24 hours. Found that weight change to the temperature have the proportional decomposition of compounds at same temperature range as shown in Figure 9 and tested by such conditions. The decomposition percentages of both compounds have similar values, as shown in Table 3.

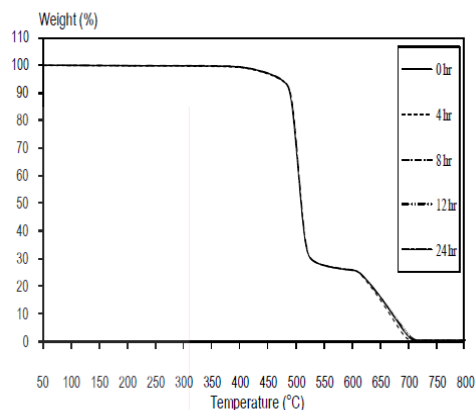


Fig. 9 Weight loss and temperature from TGA test of PC specimen at baking temperature $T_b=120$ °C, $t_{ag}=0-24$ hr.

Table. 3 Decomposition percentages

Duration, hr.	Composite 1, %	Composite 2, %
0	74.1504	25.296
4	74.266	25.3663
8	73.9687	25.5001
12	74.1571	25.4154
24	74.3008	25.3707
Mean	74.1686	25.3897

3.4 Effects of the thermal Acting on the surface of the PC specimen

From simulations the thermal effect by PC specimen baking temperature at 120 °C for 0 to 24 hours. Then tensile tested for mechanical properties change. You can tell the thermal effects to changes mechanical properties at occur with the specimens from a photo by Scanning Electron Microscope (SEM) as shown in Figure 10. Showed that the specimens were not heat at surface through cracks and lack of skin that is rough and a large hole occur throughout the section. When the duration baking increase at temperature above. Made to more smooth surface and welded holes smaller dispersed throughout the section.

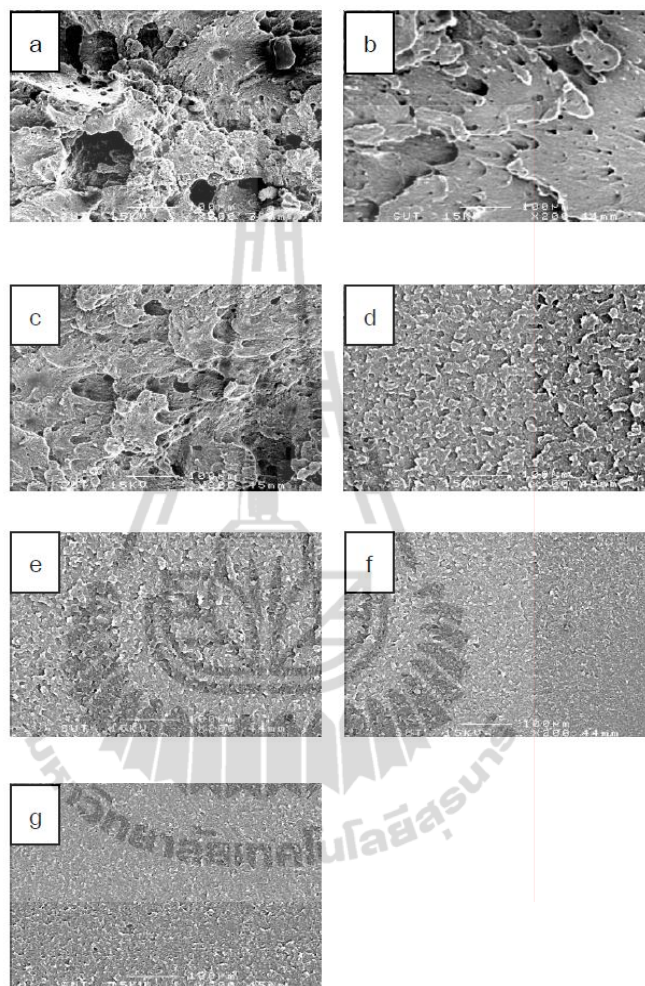


Fig. 10 The SEM photographs on surface of PC specimen (a-g) at baking $T_b=120\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{ag}=0-24\text{ hr}$.

4. Conclusion

Effect of temperature and time affect the PC specimen can be concluded that the duration baking and baking temperature increases, the maximum stress increase. In the meantime, elongation reduced. And the affect of PC material changes from ductile material is more brittle. In addition, the effect of thermal cycle resulting in PC changes the above-mentioned earlier faster. The mechanical properties of PC will depend on the temperature and duration baked.

The tests of thermal properties can be measured DSC glass transition temperature (T_g) of approximately $146\text{ }^{\circ}\text{C}$. Can be concluded that main structural of PC are not changes to duration baking.

The thermal gravimetric analysis (TGA) showed decomposition temperatures differ in two sessions. Which can identify the specimen have the two main components are PC and carbon black can be concluded that duration baking not affect the ratio of two components.



From the test morphology found that the heat is causing the movement of the chain leading to the thermal healing due to molecular scrutiny interdiffusion and the resulting polycarbonate with homogeneous.

References

- [1] Annual Book of ASTM Standards. (2004). Section Eight Plastics Volume 08.01 Plastics. International Standards Worldwide. (I) D256-D2324.
- [2] Bo Yin, Yin Zhao, Wei Yang, Min-min Pan, Ming-bo Yang. (2006). Polycarbonate/liquid crystalline polymer blend: Crystallization of polycarbonate. *Polymer*. 47, 8237-8240
- [3] Bok Nam jang, Charles A. Wikie. (2004). A TGA/FTIR and mass spectral study on the thermal degradation of bisphenol A polycarbonate. *Polymer Degradation and Stability*. 86, 419-430
- [4] G.S. Sekhon, Sunil Kumar, Charanjit Kaur, N.K. Verma, S.K. Chakarvarti. (2008). Effect of thermal annealing on pore density, pore size and pore homogeneity of polycarbonate NTFs. *Radiation Measurements*. 43, 1357-1359
- [5] I. Groves, T. Lever, and N. Hawkins. (2008). Thermal Analysis Application Brief Determination of Carbon Black Pigment in Nylon 66 by TGA. *Thermal Analysis & Rheology*. Number TA-122
- [6] Medhat M. Hassan, Nagwa A. Badway, Azza M. Gamal, Mona Y. Elnaggar, El-Sayed A. Hegazy. (2010). Effect of carbon black on the properties of irradiated recycled polyamide/rubber waste composites. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B* 268,2527-2534

ประวัติผู้เขียน

นายเฉลิมชัย ไชยขจรรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2529 ที่อำเภอตะพานหิน จังหวัดพิจิตร เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านกุดเขียว จังหวัดร้อยเอ็ด มัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนอาจสามารถวิทยา และมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนศรีธวัชวิทยาลัย จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษาวศกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากสำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2550 และได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม ขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 2 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล และ (2) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1 จากที่มีประสบการณ์ด้านการสอนปฏิบัติการและการทำวิจัย ทำให้ผู้วิจัยมีความเข้าใจทางด้านคุณสมบัติของวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมเป็นอย่างดี โดยมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ปรากฏดังภาคผนวก ก.

