

ผลกระทบของความร้อนและเวลาต่อคุณสมบัติ ของพอลิคาร์บอเนตผสม

Heat and Time Effect on Properties of Polycarbonate Composites

เฉลิมชัย ไชยธรรณ (Chalermchai Chaitongrat)* สุวิมล ปัทมประดิษฐ์ (Tawisanee Patamapradit)*
ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ (Dr.Somsak Siwadamrongpong)**

บทคัดย่อ

วัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมเป็นวัสดุผสมที่มีการใช้งานอย่างมากหลายรูปแบบในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั้งที่เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรและชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ ซึ่งความร้อนจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนอย่างมาก แต่กลไกและผลกระทบของความร้อนต่อวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมในแง่ของอายุการใช้งานยังไม่มี การศึกษาอย่างจริงจังเป็นระบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาผลกระทบของความร้อนและเวลา ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมจะถูกอบ ที่อุณหภูมิ 75 90 105 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1/4 3/4 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง ผลของการศึกษา พบว่า การอบชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิและเวลาการอบที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พอลิคาร์บอเนตผสมเกิดการเปลี่ยนแปลง จากวัสดุเหนียวเป็นวัสดุเปราะ จากการวิเคราะห์ทางความร้อนพบว่า เวลาที่ใช้ในการอบไม่มีผลต่อโครงสร้างหลักของพอลิคาร์บอเนตและสัดส่วนองค์ประกอบของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม แต่ความร้อนจะส่งผลให้ โครงสร้างภายในของสายโซ่พอลิเมอร์ เกิดการจัดเรียงเป็นระเบียบมากขึ้น

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 in deterioration 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 the changing of the composite properties from ductile to brittle material. From thermal analysis, it was found that the composite structure and composition

* มหาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

** อาจารย์ ประจำหลักสูตรวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

not changed with increasing of treatment time and temperature. It was proposed that heat may result the interdiffusion in polymer matrix and lead to more order of its structure.

คำสำคัญ: พอลิคาร์บอเนต วัสดุผสม ผลกระทบของความร้อนและเวลา อีลองเกชัน อุณหภูมิทรานซิชันแก้ว

Key Words: Polycarbonate, Composite material, Heat and time effect, Elongation, Glass transition temperature

บทนำ

เป็นที่รู้จักกันว่าวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมเป็นพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติ ทนความร้อนสูง ความแข็งแรงสูง ด้านทานการเสียดสีได้ดี [1] (Chiu and Ting, 2007) จึงนิยมนำวัสดุที่ทำจากพอลิคาร์บอเนตผสมมาใช้ในการอุตสาหกรรมต่าง ๆ กันอย่างกว้างขวาง ทั้งที่เป็นชิ้นส่วนกลไกของเครื่องจักร และที่เป็นส่วนของผลิตภัณฑ์ เช่น ชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ เป็นต้น เป็นที่ทราบทั่วไปว่าความร้อนจะส่งผลกระทบต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่และปริมาณผลึก (Crystallinity) ของพอลิ-คาร์บอเนตผสม นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่ง ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของชิ้นส่วนอย่างมาก แต่กลไกและผลกระทบของความร้อนต่อวัสดุพอลิคาร์บอเนตผสมในแง่ของอายุการใช้งานยังมีการศึกษาค้นคว้าจำกัด

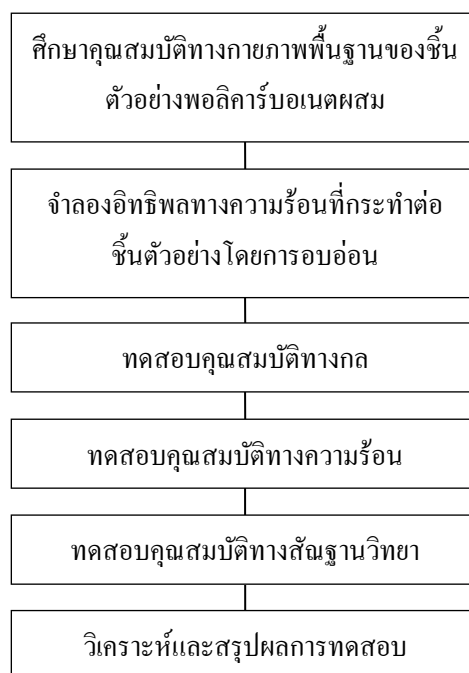
วัตถุประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เพื่อหาผลกระทบของความร้อนและเวลา ที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม

วิธีการวิจัย

1. แผนการดำเนินงาน

ภาพที่ 1 แสดงแผนการดำเนินงานของการศึกษาผลกระทบความร้อนและเวลาที่กระทำต่อชิ้นตัวอย่างพอลิ-คาร์บอเนตผสม (PC) โดยเริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม เช่น การจัดเรียงตัวของสายโซ่ เป็นต้น จากนั้นจำลองอิทธิพลทางความร้อนที่

กระทำต่อชิ้นตัวอย่าง PC โดยทำการอบอ่อน (Annealing) แล้วนำชิ้นตัวอย่างที่ได้ ทำการทดสอบเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ ทั้งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกล ทางความร้อน และทางสัณฐานวิทยา (Morphology) เพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาที่เกิดขึ้น

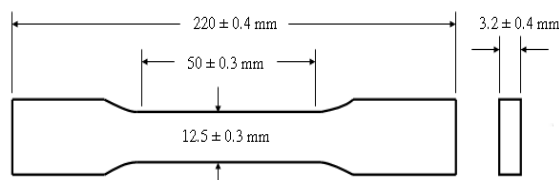


ภาพที่ 1 แผนการดำเนินงานวิจัย

2. ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม

การศึกษาในครั้งนี้ได้นำชิ้นตัวอย่าง PC ที่ผ่านการขึ้นรูปแบบฉีด (Injection Molding) โดยมีลักษณะรูปร่างดัมเบล (Dumbbell) หน้าตัดสี่เหลี่ยม

ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials ASTM D638 [2] ขนาดความยาว 220 มิลลิเมตร กว้าง 12.5 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม

3. การอบอ่อน (Thermal Annealing)

การจำลองผลกระทบทางความร้อนโดยการอบชิ้นตัวอย่าง PC ด้วยเครื่องอบไฟฟ้า Oven Memmert รุ่น UFE 600 ในช่วงอุณหภูมิการอบ (Baking Temperature: T_b) ที่ 75 90 105 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1/4 3/4 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นให้ชิ้นตัวอย่างเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกล

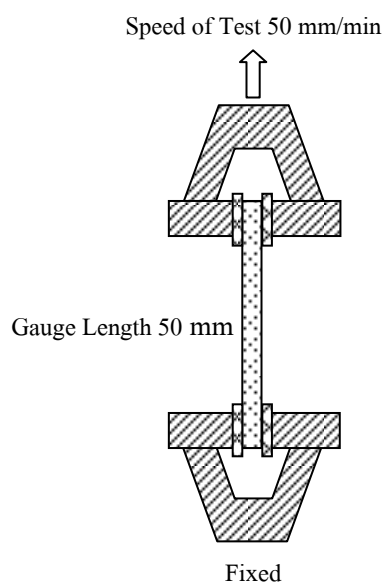
ตารางที่ 1 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน

Specimen	Baking (T_b), °C	Duration (t_{ag}), h
PC	75	1/4, 3/4, 4, 8, 12, 24
PC	90	1/4, 3/4, 4, 8, 12, 24
PC	105	1/4, 3/4, 4, 8, 12, 24
PC	120	1/4, 3/4, 4, 8, 12, 24

4. ทดสอบคุณสมบัติทางกล

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นตัวอย่าง PC รูปร่างดัมเบล ดังภาพที่ 2 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Instron Universal Testing Machine 5560 โหลดเซลล์ขนาด 5 KN โดยใช้การทดสอบแรงดึงแบบอัตราการยืดตัวคงที่ (Constant rate of extension machines) ด้วยความเร็วในการทดสอบแรงดึง

(Speed of Test) 50 มิลลิเมตร/นาที ที่อุณหภูมิห้อง 25 °C [3] ดังภาพที่ 3 ตามวิธีการทดสอบมาตรฐานสำหรับคุณสมบัติแรงดึงของพลาสติก Standard test Method for Tensile Properties of Plastics (ASTM D638-03) จำนวน 3 ชิ้นตัวอย่าง ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองของความร้อนและเวลาที่กระทำต่อชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม เพื่อบันทึกค่าต่าง ๆ ที่บอกถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกล เช่น ความเค้นสูงสุดลดลงเพิ่มขึ้น ตามลำดับค่าคุณสมบัติทางกลคำนวณโดยใช้ค่าเฉลี่ยจาก 3 ชิ้นตัวอย่าง



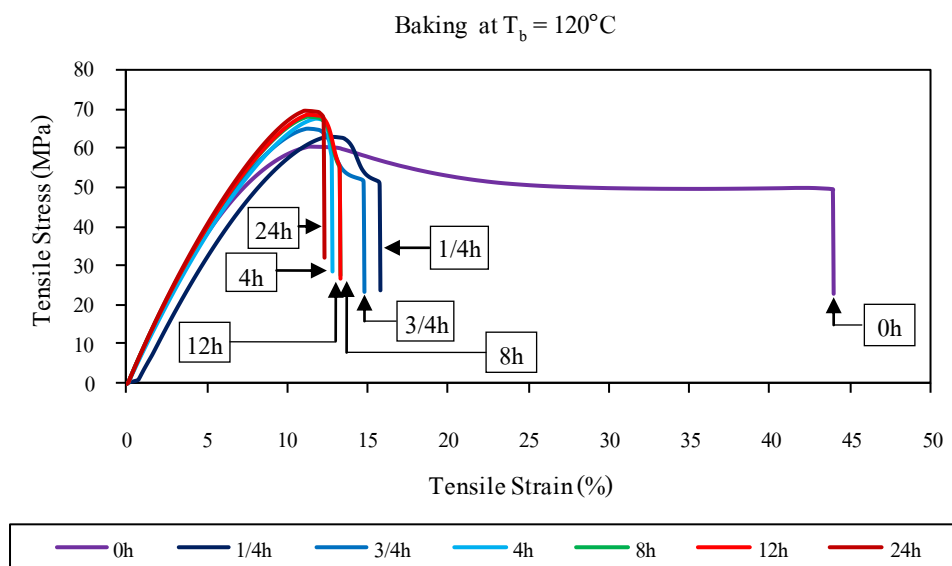
ภาพที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

5. Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสม ด้วยเครื่อง Mettler Toledo DSC 822° โดยใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) การทดสอบใช้โปรแกรม Pyris ในการคำนวณและบันทึกค่า ซึ่งชิ้นตัวอย่าง PC จะใช้เป็นผงหรือเม็ดขนาดเล็ก บรรจุลงในถ้วยอะลูมิเนียม

ประมาณ 8 มิลลิกรัม โดยใช้เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง ทดสอบ DSC โดยใช้ถ้วยอะลูมิเนียมเปล่า (อากาศ) เป็นตัวอ้างอิง การให้ความร้อนครั้งแรก (1st Heating) เพิ่มอุณหภูมิจาก 50 องศาเซลเซียส ถึง 330 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่บนพอลิเมอร์ตัวอย่าง แล้วลดอุณหภูมิจาก 330 องศา

เซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงให้ความร้อนครั้งที่สอง (2nd Heating) เพิ่มอุณหภูมิจาก 50 องศาเซลเซียสถึง 330 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน [4]



ภาพที่ 4 ความเค้นและความเครียดของชิ้นตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $T_b = 120^\circ\text{C}$ เวลา $t_{ag} = 0-24\text{ h}$

6. Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิของชิ้นตัวอย่าง PC ด้วยเครื่องทดสอบ Mettler Toledo TGA/SDTA 851 โดยใช้เทคนิค Thermo Gravimetric Analysis (TGA) ในการทดสอบเตรียมสารตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 14 มิลลิกรัม ให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึง อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิกว่า 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และเปลี่ยนเป็นออกซิเจนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส [4]

7. ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

การสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) JSM-6400 (JEOL, Tokyo, Japan) ดำเนินงานที่อัตราเร่งแรงดันไฟฟ้า 10 kV ใช้ในการสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวแตกหักของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการดึงทดสอบ โดยผิวแตกหักซึ่งเคลือบด้วยไอออนทองคำที่สุญญากาศก่อนทำการทดสอบ [5]

ผลการวิจัย

1. ผลทางกายภาพพื้นฐาน

พอลิคาร์บอเนตหรือที่รู้จักด้วยชื่อเครื่องหมายการค้า Lexan, Makrolon, Makrolear เป็นต้น เป็นกลุ่มของ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือเรซิน เป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายเมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่อเย็นตัวลงจะแข็งตัว สามารถเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้ โครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาว มีการเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมาก พอลิคาร์บอเนตมีลักษณะโปร่งใส แข็ง ทนแรงยืด และแรงกระแทกได้ดี ทนความร้อนสูง ทนกรด แต่ไม่ทนด่าง

2. ผลของคุณสมบัติทางกล

ภาพที่ 4 แสดงความเค้นกับความเครียดจากการทดสอบแรงดึง ของชิ้นตัวอย่าง PC ที่ผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1/4 3/4 4 8 12 และ 24 ชั่วโมงเทียบกับชิ้นตัวอย่าง PC ที่ไม่ผ่านการอบอ่อน

จากภาพที่ 4 แสดงให้เห็นได้ว่า ลักษณะกราฟของชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบอ่อน มีสมบัติแบบวัสดุพลาสติกชนิดยืดหยุ่น (Flexible Plastic) กล่าวคือ ในช่วงแรก PC จะยืดตัวได้ค่อนข้างน้อยเมื่อเพิ่มความเค้น จนถึงขณะหนึ่งจะเปลี่ยนเป็นยืดตัวอย่างมากเมื่อเทียบกับความเค้น และขาดในที่สุด ซึ่งมีค่าอิลองเกชันประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่าง PC ที่ผ่านการอบทดสอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ที่เวลาการอบอ่อน 1/4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ ค่าอิลองเกชันลดลงอย่างมากโดยมีค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย [3] นอกจากนี้เมื่อเทียบกับเวลาการอบของลอการิทึมธรรมชาติ (Ln Time) ที่ 3/4 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง จะทำให้ค่าอิลองเกชันมีแนวโน้มลดลงตามเวลาการอบที่เพิ่มมากขึ้น โดยอุณหภูมิอบที่ 75 90 และ 105 องศาเซลเซียส แสดงการลดลงของค่าอิลองเกชันที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิอบ 120 องศาเซลเซียส

แสดงการลดลงของค่าอิลองเกชันที่มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพที่ 5 และในลักษณะเดียวกันเมื่อเวลาการอบของลอการิทึมธรรมชาติ (Ln Time) เพิ่มมากขึ้นค่าความเค้นสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิอบที่ 75 กับ 120 องศาเซลเซียส ค่าความเค้นสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญดังภาพที่ 6

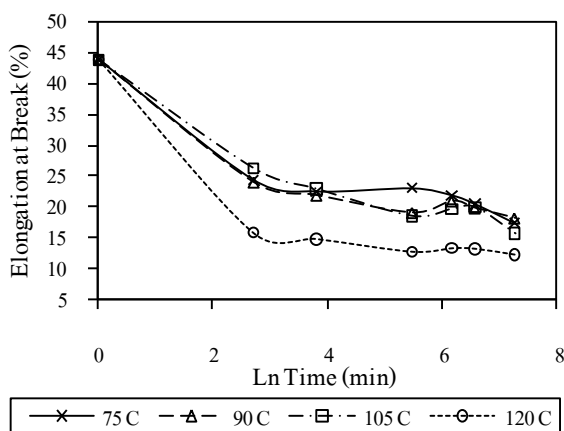
จากผลดังกล่าวสามารถกล่าวได้ว่าเวลาการอบและอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้ชิ้นตัวอย่าง PC มีค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันค่าอิลองเกชันก็มีแนวโน้มลดลงด้วย [3] โดยสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ชิ้นตัวอย่าง PC มีแนวโน้มแสดงพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะมากขึ้น อย่างไรก็ตามความชันในช่วงยืดหยุ่น (Young's Modulus) ของแต่ละชิ้นตัวอย่างที่ทำการทดสอบแรงดึงนั้นมีค่าใกล้เคียงกันในทุกอุณหภูมิการอบอ่อน ดังแสดงในตารางที่ 2 ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์หรือการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบในชิ้นตัวอย่าง PC

ตารางที่ 2 ค่ายังมอดูลัสของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อน

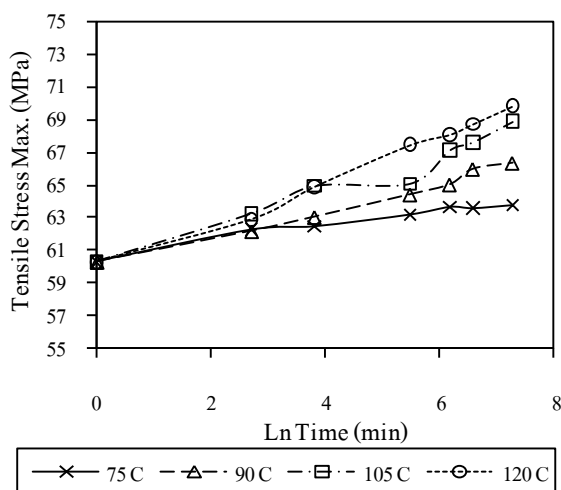
Baking (T_b), °C	Duration (t_{ag}), h	Young's modulus, MPa
75	8	979.8
90	8	994.9
105	8	995.6
120	8	944.6

3. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน DSC

ภาพที่ 7 แสดงกราฟการไหลของความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ที่การให้ความร้อนครั้งที่สอง (2nd Heating) ของชิ้นตัวอย่าง PC ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ที่เวลาการอบอ่อน 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง เทียบกับชิ้นตัวอย่าง PC ที่ไม่ผ่านการอบอ่อน



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลองเกชันกับ
ช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป ที่ $T_b = 75-120^\circ\text{C}$



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุดกับ
ช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป ที่ $T_b = 75-120^\circ\text{C}$

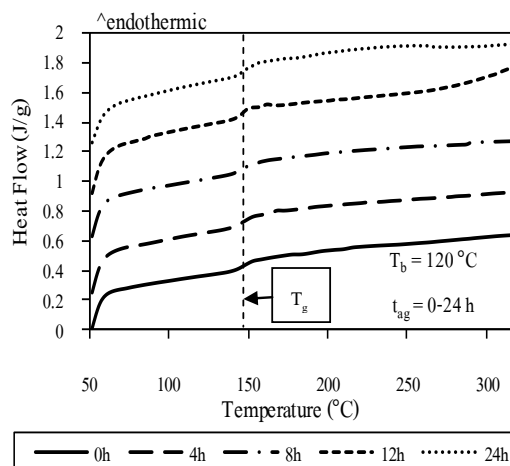
จากภาพที่ 7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อช่วงเวลารอบเพิ่มมากขึ้น อัตราการไหลของความร้อนยิ่งเพิ่มมากขึ้น และทุกช่วงเวลารอบทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงความชันที่ตำแหน่งของการดูดความร้อน (Endothermic) ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ คือ อุณหภูมิทรานซิชันแก้ว (T_g) ที่อุณหภูมิประมาณ 146 องศาเซลเซียส [6] ซึ่งจากตารางที่ 3 พบว่า T_g ของชิ้นตัวอย่าง PC ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามเวลาที่ใช้ในการอบชิ้นตัวอย่าง แสดง

ให้เห็นถึงโครงสร้างหลักสายโซ่พอลิ-คาร์บอนเนตในชิ้นตัวอย่าง PC ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ

จากการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน DSC สามารถกล่าวได้ว่า เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลนั้นไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิคาร์บอนเนต เช่นการขาดของสายโซ่ หรือการเกิดผลึก (Crystallinity) เป็นต้น แต่เกิดจากพลังงานความร้อนจากการอบอ่อน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ จะช่วยทำให้เกิด Interdiffusion และทำให้เกิดรูปแบบพันธะที่แข็งแรง [7]

ตารางที่ 3 ค่าของอุณหภูมิ T_g ที่ได้จากการทดสอบ DSC

เวลาการอบ T_{ag} , h	อุณหภูมิ T_g , $^\circ\text{C}$
0	146.37
4	145.59
8	146.22
12	145.89
24	146.24
Mean	146.06



ภาพที่ 7 การทดสอบ DSC ของชิ้นตัวอย่างที่
 $T_b = 120^\circ\text{C}$ เวลา $t_{ag} = 0\ 4\ 8\ 12\ 24\ \text{h}$

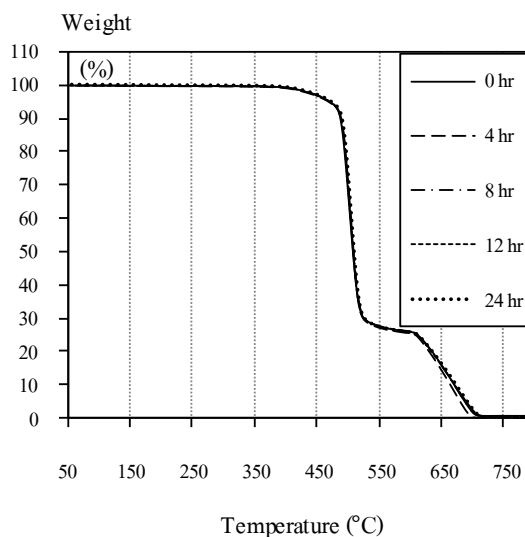
4. ผลของคุณสมบัติทางความร้อน TGA

ภาพที่ 8 แสดงกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า น้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของความชื้น สำหรับน้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างช่วงอุณหภูมิ 480-540 องศาเซลเซียส นั้นส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบชนิดที่ 1 คิดเป็นส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไปประมาณ 74 เปอร์เซ็นต์ และน้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงอุณหภูมิ 610-710 องศาเซลเซียส เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบชนิดที่ 2 คิดเป็นส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไปประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ดังแสดงในตารางที่ 4

จากการทดสอบ TGA วิเคราะห์ช่วงอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของสารประกอบ สามารถสรุปได้ว่า สารประกอบชนิดที่ 1 เป็นการสลายตัวของพอลิคาร์บอนเนต [8] และสารประกอบชนิดที่ 2 คือ การสลายตัวของสารประกอบที่เติมเข้าไปซึ่งตรงกับคาร์บอนแบล็ค [9] จากภาพที่ 8 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิของชิ้นตัวอย่าง PC ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 0 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง พบว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิมีสัดส่วนการสลายตัวของสารประกอบในช่วงอุณหภูมิเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 8 นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การสลายตัวของสารประกอบทั้งสองก็มีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งแสดงถึงความคงตัวขององค์ประกอบในชิ้นตัวอย่าง PC โดยไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ

5. ผลของลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ภาพที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบรูปถ่ายจาก SEM กำลังขยาย 200 ที่พื้นผิวการแตกหักของชิ้นตัวอย่าง PC ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 1/4 3/4 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 8 น้ำหนักที่สูญเสียไปกับอุณหภูมิที่

$$T_b = 120^\circ\text{C} \text{ เวลา } t_{ag} = 0-24 \text{ h}$$

ตารางที่ 4 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบชิ้นตัวอย่าง PC

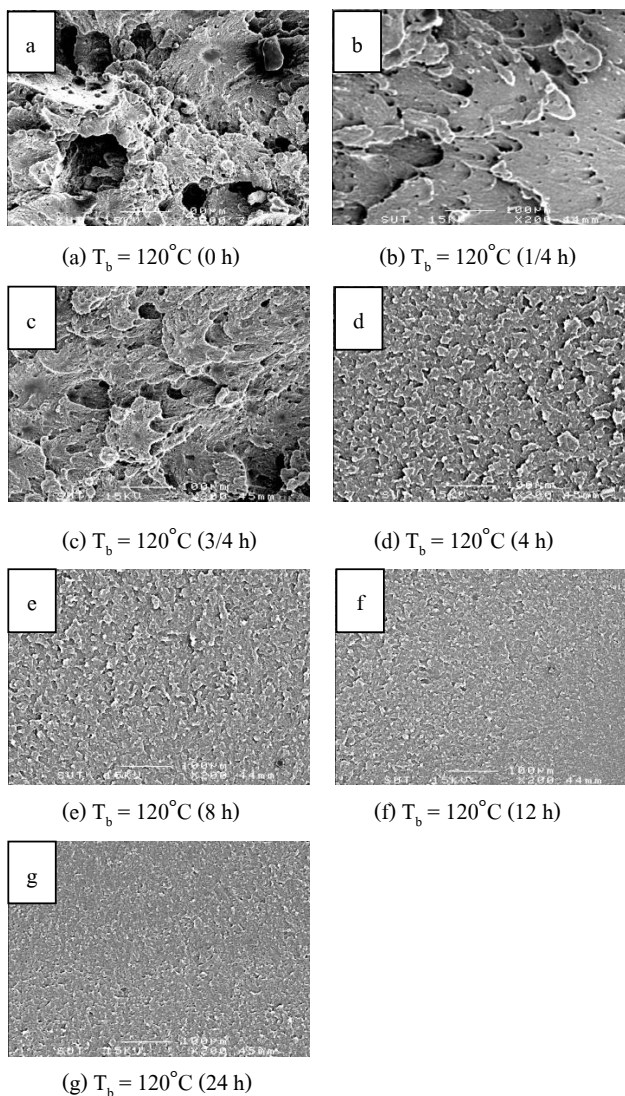
เวลาอบ, h	Composite 1, %	Composite 2, %
0	74.1504	25.296
4	74.266	25.3663
8	73.9687	25.5001
12	74.1571	25.4154
24	74.3008	25.3707
Mean	74.1686	25.3897

จากภาพที่ 9a ที่สภาพพื้นผิวตรงรอยแตกหักของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อน พบว่า พื้นผิวจะหยาบด้วยหลายสายการฉีกขาดและกิ่งก้าน ลักษณะของการเสียหายนั้นแสดงให้เห็นถึงการเสียหายแบบเหนียว (Ductile Failure) โดยมีการต้านทานแรงฉีกขาด (Tear Strength) ซึ่งเกิดจากสารตัวเติมคาร์บอนแบล็ค ภาพที่ 9b สำหรับชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อน 1/4 ชั่วโมง แม้ว่าพื้นผิวการแตกหักยังแสดงสายการฉีกขาดบางส่วนของเมทริกซ์และบริเวณข้างเคียงที่ราบเรียบไม่แสดงถึงรอยฉีกขาดนั้นเป็นผลมาจากการ

รวมตัวผสมเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous) ของพอลิเมอร์เมทริกซ์กับคาร์บอนแบล็ค นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นลักษณะที่คล้ายกันได้ในรูปแบบที่ 9c โดยมีขนาดสายการฉีกขาดที่เล็กลงแล้วส่วนพื้นที่ของการเป็น Homogeneous เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นดังภาพที่ 9g

เมื่อเวลาการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิการอบข้างต้น ทำให้สภาพพื้นผิวตรงแตกหักนั้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น กล่าวคือ พื้นผิวรอย

แตกหักเรียบมากขึ้น คาดว่าเป็นผลมาจากความร้อนส่งผลให้เกิดการกระตุ้นการเกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น [3] ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่ไปในทิศทางที่เป็นระเบียบมากขึ้น การอบความร้อนนำไปสู่กระบวนการ Thermal Healing จากการเกิด Interdiffusion ของโมเลกุลในสายโซ่ทั้งหมด ซึ่งเรียกวิธีการซ่อมแซมแบบนี้ว่า Plastic Welding [7]



ภาพที่ 9 รูปถ่าย SEM ที่ผิวของชิ้นตัวอย่าง PC (a-g) ที่อุณหภูมิอบ $T_b = 120^\circ\text{C}$ ที่ $t_{ag} = 0 \ 1/4 \ 3/4 \ 4 \ 8 \ 12$ และ 24 h

4. สรุปผลการวิจัย

ผลของความร้อนและเวลาที่ส่งผลต่อชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมคาร์บอนแบล็ค สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเวลาการอบและอุณหภูมิอบเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมคาร์บอนแบล็คมีค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันค่าอีลองเกชันลดลงและยังส่งผลต่อพฤติกรรมพอลิคาร์บอเนตผสมคาร์บอนแบล็คให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากวัสดุเหนียวเป็นวัสดุเปราะมากขึ้น เนื่องจากการเสื่อมสภาพ (Degradation) และพลังงานความร้อนจากการอบอ่อน เป็นสาเหตุของการเพิ่มการเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิเมอร์เมทริกซ์ การเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์จะช่วยให้เกิด Inter-diffusion และทำให้เกิดรูปแบบพันธะที่แข็งแรง [7] ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลของพอลิคาร์บอเนตผสมคาร์บอนแบล็คจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน

จากการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน DSC สามารถวัดอุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้ว (T_g) ได้ประมาณ 146 องศาเซลเซียส ที่ทุกเงื่อนไขการทดสอบ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างหลักของสายโซ่พอลิคาร์บอเนตไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่อบอ่อน

จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิด้วยเครื่อง TGA พบว่ามีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันอยู่สองช่วง ซึ่งสามารถระบุถึงชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมที่นำมาทดสอบนั้นมียอดประกอบหลัก อยู่สองส่วนและสามารถสรุปได้ว่าเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนขององค์ประกอบทั้งสอง

จากการทดสอบทางสัญญาณวิทยาพบว่าพลังงานความร้อน เป็นสาเหตุของการเคลื่อนที่ของสายโซ่ นำไปสู่การเกิด Thermal Healing เนื่องจากโมเลกุลเกิดการ Interdiffusion ส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างพอลิคาร์บอเนตผสมคาร์บอนแบล็คนั้นมีความเป็น Homogeneous มากขึ้น สรุปได้ว่าผลของอุณหภูมิและเวลาไม่ส่งผลต่อโครงสร้างหลักของพอลิคาร์บอเนต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ซีเกทเทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด สำหรับข้อมูลที่เป็นประโยชน์ และทุนสนับสนุนในการทำวิจัยและขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Chiu, FC., and Ting, MH. 2007. Thermal properties and phase morphology of melt-mixed poly(trimethylene terephthalate)/polycarbonate blends-Mixing time effect. *Polymer Testing*, 26, 338-350.
2. Annual Book of ASTM Standards. 2004. Section Eight Plastics Volume 08.01 Plastics. International Standards Worldwide. (I) D256-D2324.
3. Hassan, MM., Badway, NA., Gamal, AM., Elnaggar, MY., and Hegazy, ESA. 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.
4. Zhao, Y., and Schiraldi, DA. 2005. Thermal and mechanical properties of polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS)/polycarbonate composites. *Polymer*. 46, 11640-11647.
5. Wang, N., Zhang, X., Ma, X., and Fang, J. 2008. Influence of carbon black on the properties of plasticized poly (lactic acid) Composites. *Polymer Degradation and Stability*, 93, 1044-1052.

6. Yin, B., Zhao, Y., Yang, W., Pan, MM., and Yang, MB. 2006. Polycarbonate/liquid crystalline polymer blend: Crystallization of polycarbonate. *Polymer*. 47, 8237-8240.
7. Sekhon, GS., Kumar, S., Kaur, C., Verma, NK., Chakarvarti, SK. 2008. Effect of thermal annealing on pore density, pore size and pore homogeneity of polycarbonate NTFs. *Radiation Measurements*. 43, 1357-1359.
8. Jang, BN., and Wikie, CA. 2004. A TGA/FTIR and mass spectral study on the thermal degradation of bisphenol A polycarbonate. *Polymer Degradation and Stability*. 86, 419-430.
9. 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.