บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET กับ PC

4.1.1 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมที่ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET กับ PC ที่ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ทำการผสมด้วยอุณหภูมิสูงที่สุดคือ 290 ^{o}C และใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยามากที่สุดคือ 1.5% (Sb4-290-S และ Zn4-290-S) เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาในภาวะการผสมเดียวกัน (B-290-S) พบว่ามีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันแตกต่างกันไม่มากนัก (ตารางที่ 4.1) กล่าวคือการผสมพอลิเมอร์ระหว่าง PET และ PC ที่ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวและมีการใช้สารเร่งปฏิกิริยาแอนทิมอนีไตรออกไซด์ (Sb_2O_3) หรือซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ไม่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้นจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาเข้าไป

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมที่ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว

พอลิเมอร์ผสม	T_{g1} (^{o}C)	T_{g2} (^{o}C)	T_m (^{o}C)
B-290-S	80.6	139.4	243.2
Sb4-290-S	82.6	137.1	245.3
Zn4-290-S	83.9	138.2	241.9

4.1.2 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมที่ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่

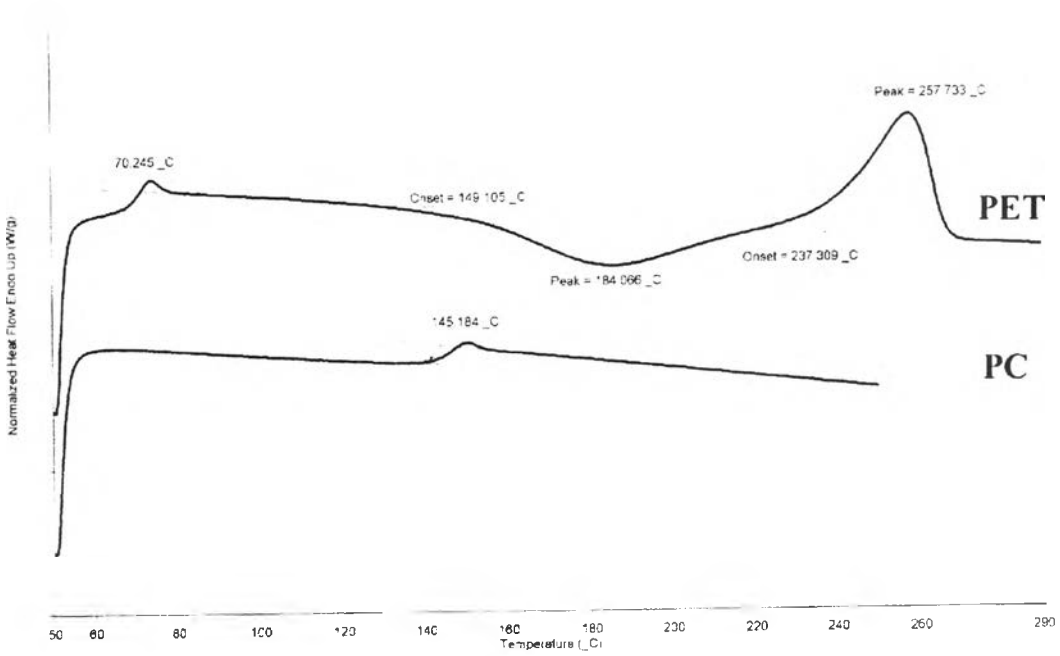
พอลิเมอร์ผสมที่ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ด้วยการใช้อุณหภูมิในการผสมสูงที่สุดและใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยามากที่สุด (Sb4-290-T และ Zn4-290-T) เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาในภาวะการผสมเดียวกัน (B-290-T) พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่ตรวจสอบได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเหมือนกับในกรณีของการผสมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว กล่าวคือพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ PC ที่ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ไม่มีความเข้ากันได้เมื่อมีการใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 หรือ ZnO เติมเข้าไปในขั้นตอนการผสมพอลิเมอร์

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมที่ทำการผสมด้วยเครื่องอัดสกรูคู่

พอลิเมอร์ผสม	T_{g1} (^{o}C)	T_{g2} (^{o}C)	T_m (^{o}C)
B-290-T	81.6	136.8	244.9
Sb4-290-T	84.1	135.4	241.5
Zn4-290-T	83.6	134.2	243.4

โฮโมพอลิเมอร์ของ PET และ PC มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 70 ^{o}C และ 145 ^{o}C ตามลำดับ (รูปที่ 4.1)และเมื่อนำพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้มาผสมกันด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวหรือเครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา จาก DSC พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมแสดงให้เห็นถึง 2 ตำแหน่ง โดยอุณหภูมิกลาสทรานซิชันใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของโฮโมพอลิเมอร์แต่ละชนิด แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ PC ที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาไม่มีความเข้ากันได้

และเมื่อมีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 หรือ ZnO เข้าไปในการผสมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวหรือเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ต่างก็พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมยังแสดงค่าถึง 2 ตำแหน่ง กล่าวคืออุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมยังใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของโฮโมพอลิเมอร์ PET และ PC ดังนั้นการผสมพอลิเมอร์โดยการเติมสารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 หรือ ZnO เข้าไปในการผสมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวหรือเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ไม่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้



รูปที่ 4.1 DSC ของ PET และ PC โฮโมพอลิเมอร์

4.1.3 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมที่ทำการผสมด้วยเครื่องบราเบนเดอร์

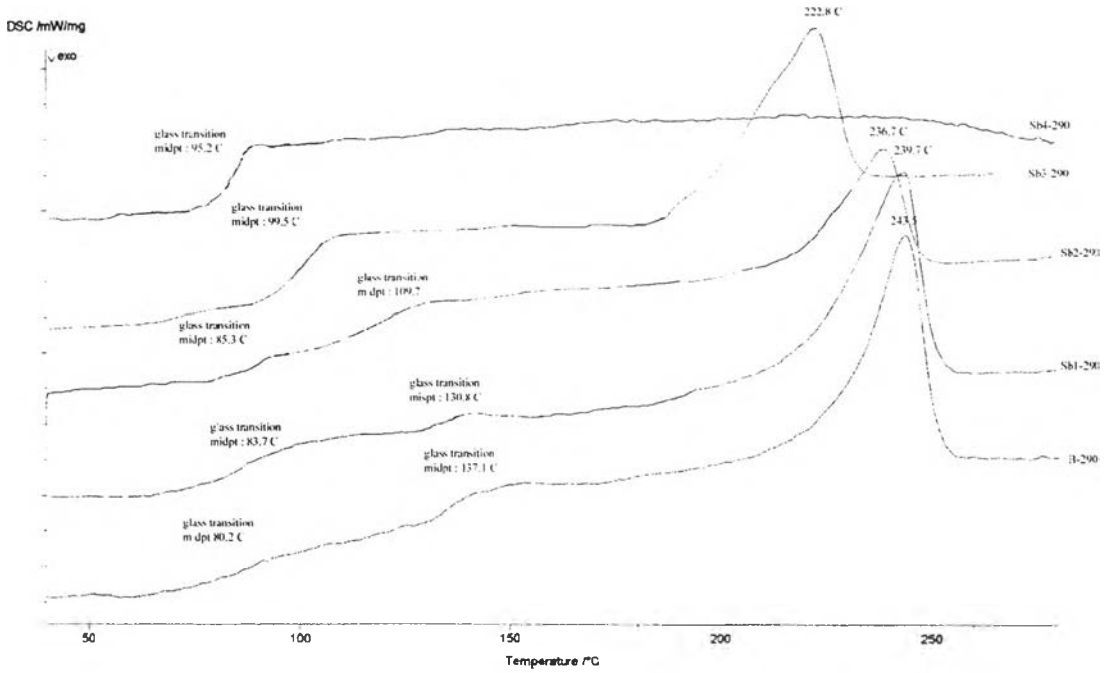
อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ PC ที่ทำการผสมด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ จากตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิในการผสมสูงที่สุด คือ 290 °C และใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาสูงที่สุดในการผสมคือ 1.5% พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสม (Sb4-290 และ Zn4-290) ปรากฏเพียงตำแหน่งเดียว คือ 95.2 °C สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 และ 97.2 °C สำหรับการใช้ ZnO เป็นสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมนี้มีความเข้ากันได้ ดังนั้นการตรวจสอบสมบัติเฉพาะอื่นๆ ต่อไปนี้จะตรวจสอบเฉพาะพอลิเมอร์ผสมที่ทำการผสมด้วยเครื่องบราเบนเดอร์เท่านั้น

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมที่ทำการผสมด้วยเครื่องบราเบนเดอร์

พอลิเมอร์ผสม	T_{g1} (°C)	T_{g2} (°C)	T_m (°C)
B-290	80.2	137.1	243.5
Sb4-290	95.2	-	-
Zn4-290	97.2	-	218.3

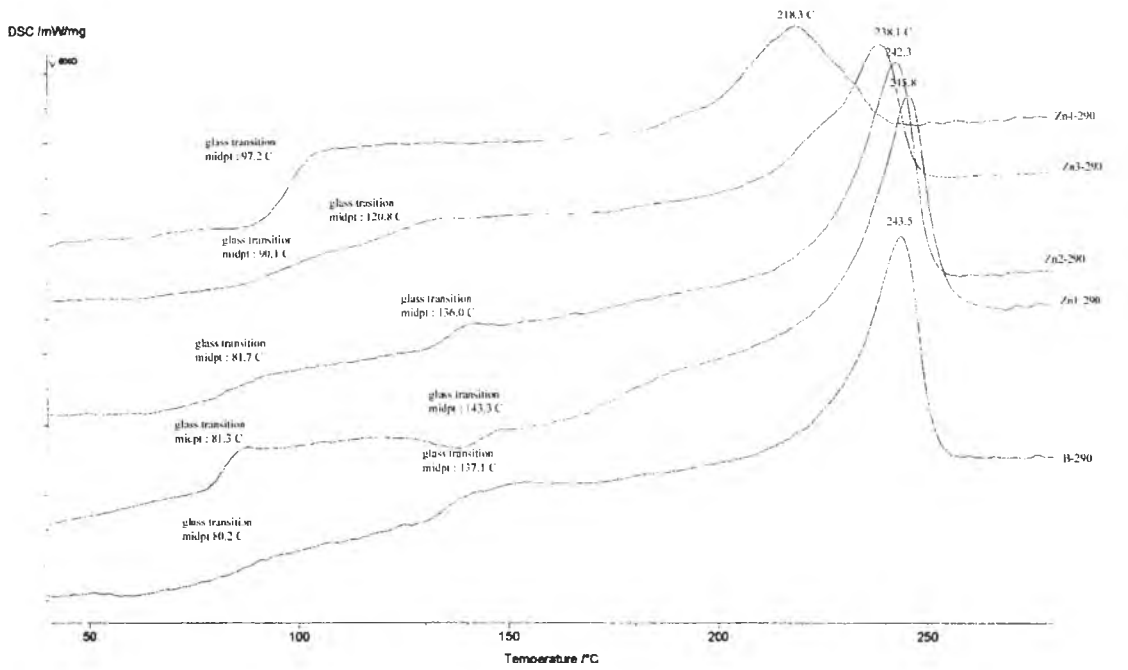
เมื่อทำการผสม PET และ PC ในเครื่องบราเบนเดอร์ที่อุณหภูมิ 245°C พบว่าพอลิเมอร์ผสมนี้ (B-245) จะแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเป็น 2 ตำแหน่ง คือ 78.3°C และ 142.1°C โดยค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของ PET และ PC โฮโมพอลิเมอร์ตามลำดับ ส่วนการผสม PET และ PC ที่อุณหภูมิ 290°C พอลิเมอร์ผสมนี้ (B-290) ยังคงปรากฏอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเป็น 2 ตำแหน่งเช่นเดียวกัน แต่มีการเคลื่อนที่เข้าหากันเล็กน้อย โดยมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 80.2 °C และ 137.1 °C ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PET และ PC ที่ทำการผสมกันด้วยเครื่องบราเบนเดอร์โดยไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาเข้าไปทำให้พอลิเมอร์ผสมยังคงมีความไม่เข้ากันอยู่ ซึ่งผลของอุณหภูมิในการผสมจะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

เมื่อพิจารณาถึงผลของปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้การผสม PET และ PC โดยใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 ในปริมาณที่แตกต่างกันด้วยอุณหภูมิการผสม 290 °C เท่ากัน จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 ปริมาณ 0.05% จะทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสม (Sb1-290) เคลื่อนที่เข้าหากันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารเร่งปฏิกิริยา (B-290) โดยพอลิเมอร์ผสมนี้ปรากฏอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่ 83.7 °C และ 130.8 °C และเมื่อปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 0.25% อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสม (Sb2-290) ยังคงปรากฏเป็น 2 ตำแหน่งอยู่แต่มีการเคลื่อนเข้าหากันมากขึ้นโดยมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 85.3 °C และ 109.7 °C อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 เพิ่มขึ้นเป็น 0.75% และ 1.5% พอลิเมอร์ผสม (Sb3-290 และ Sb4-290) ปรากฏอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียงตำแหน่งเดียว คือ 99.5 °C และ 95.2 °C ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 DSC **ของพอลิเมอร์ผสมเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสม** 290 °C **และใช้สารเร่งปฏิกิริยา** Sb_2O_3 **ในปริมาณต่างกัน**

สำหรับในกรณีของการผสม PET และ PC โดยใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO ในปริมาณที่แตกต่างกันด้วยอุณหภูมิในการผสม 290 °C เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO 0.05% (Zn1-290) ยังคงมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 2 ตำแหน่งอยู่เช่นเดียวกับกรณีการใช้ Sb_2O_3 ในปริมาณ 0.05% นั่นคือ 81.3 °C และ 143.3 °C และเมื่อปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา ZnO ที่ใช้ในการผสมเพิ่มขึ้นเป็น 0.25% โดยพอลิเมอร์ผสม (Zn2-290) ยังคงมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา (B-290) อยู่ โดยมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 81.7 °C และ 136.0 °C แต่สารเร่งปฏิกิริยา ZnO จะมีผลต่อการผสมของพอลิเมอร์มากขึ้นเมื่อใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้นเป็น 0.75% โดยพอลิเมอร์ผสม (Zn3-290) จะปรากฏอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเข้าใกล้กันมากขึ้น คือ 90.1 °C และ 120.8 °C เมื่อใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา ZnO มากที่สุดคือ 1.5% จะทำให้พอลิเมอร์ผสม (Zn4-290) ปรากฏอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียงค่าเดียว คือ 97.2 °C



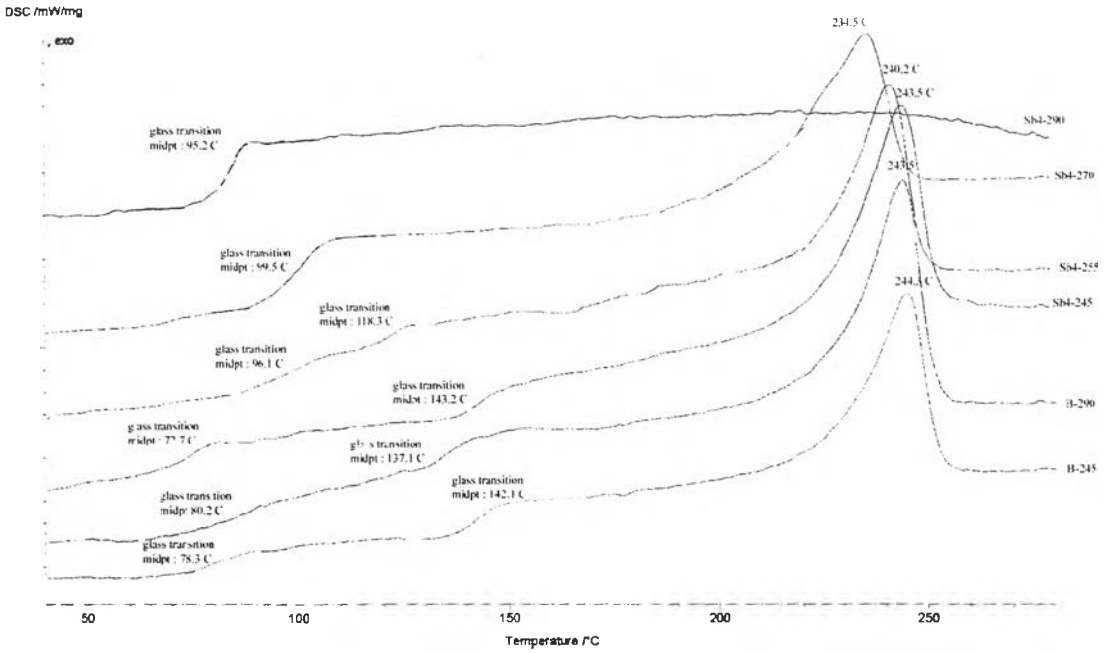
รูปที่ 4.3 DSC **ของพอลิเมอร์ผสมเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสม** 290 °C **และใช้สารเร่งปฏิกิริยา** ZnO **ในปริมาณต่างกัน**

จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าการที่จะทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ PC มีความเข้ากันได้นั้นเมื่อพิจารณาจากอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสม พบว่าสารเร่งปฏิกิริยาต้องมีปริมาณมากพอที่จะสามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันให้เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ PET กับ PC ได้เป็นโคพอลิเมอร์ที่จะช่วยเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างเฟสของแต่ละโฮโมพอลิเมอร์ได้

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ PC ที่ใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาต่ำจะยังคงมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันปรากฏเป็น 2 ตำแหน่งที่ต่างกันอย่างชัดเจนอยู่ เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 ปริมาณ 0.05% (Sb1-290) พบว่าสารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 สามารถทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันเคลื่อนที่เข้าหากันได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO (Zn1-290) เล็กน้อย จากนั้นพบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้นเป็น 0.25% พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 (Sb2-290) มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่เข้าใกล้กันมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO (Zn2-290) อย่างชัดเจน และประสิทธิภาพของการใช้ Sb_2O_3 เป็นสารเร่งปฏิกิริยาจะปรากฏให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อใช้สารเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.75% โดยพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่ง Sb_2O_3 (Sb3-290) จะปรากฏอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียงตำแหน่งเดียว กล่าวคือพอลิเมอร์ผสมนี้มีความเข้ากันได้ ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO

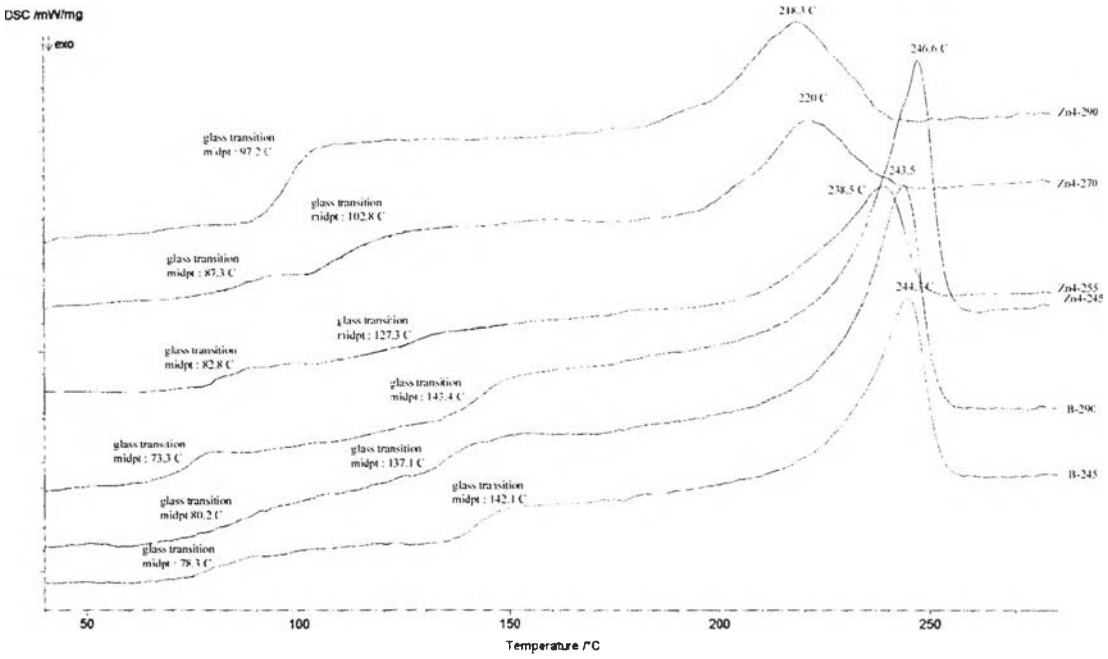
(Zn3-290) จะเข้ากันได้เพียงบางส่วนเท่านั้น โดยอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมนี้จะเคลื่อนที่เข้าใกล้กันแต่ยังคงปรากฏเป็น 2 ตำแหน่งอยู่ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาสูงที่สุดคือ 1.5% พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิด (Sb4-290 และ Zn4-290) จะมีความเข้ากันได้เป็นอย่างดีซึ่งปรากฏอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียง 1 ตำแหน่งเท่านั้นโดยมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่คำนวณได้จากสมการของฟอกซ์ (Fox's equation) ($1/T_g = W_1/T_{g1} + W_2/T_{g2}$ โดย T_{gi} และ W_i คืออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และเศษส่วนน้ำหนักของโฮโมพอลิเมอร์แต่ละชนิด ตามลำดับ) ซึ่งสามารถคำนวณอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ PC ที่มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 70 °C และ 145 °C ตามลำดับ ได้ดังนี้คือ 94.42 °C

สำหรับผลของอุณหภูมิในการผสมพอลิเมอร์นั้นจะเลือกพิจารณาเฉพาะกรณีที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 และ ZnO ในปริมาณที่สูงที่สุดคือ 1.5% ดังนั้นเมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ PC ที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 ในการผสมเป็นปริมาณ 1.5% ณ อุณหภูมิในการผสมที่แตกต่างกันพบว่าดังรูปที่ 4.4 เมื่อใช้อุณหภูมิในการผสม 245 °C พบว่าพอลิเมอร์ผสม (Sb4-245) ยังแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 2 ตำแหน่ง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา (B-245) อยู่ โดยพอลิเมอร์ผสมนี้มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 72.7 °C และ 143.2 °C และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผสมสูงขึ้นเป็น 255 °C พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 (Sb4-255) ยังคงแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเป็น 2 ตำแหน่งอยู่แต่มีค่าเคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากขึ้นคือมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 96.1 °C และ 118.3 °C แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมนี้มีความเข้ากันได้บางส่วน จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผสมสูงขึ้นเป็น 270 °C และ 290 °C พอลิเมอร์ผสม (Sb4-270 และ Sb4-290) จะปรากฏอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้นคือที่อุณหภูมิ 99.5 °C และ 95.2 °C ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 DSC ของพอลิเมอร์ผสมเมื่อใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 1.5% เมื่อใช้อุณหภูมิในการผสมต่างกัน

สำหรับในกรณีของ ZnO พบว่าการใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO ปริมาณ 1.5% ในการผสมพอลิเมอร์ที่ 245 °C นั้นพอลิเมอร์ผสม (Zn4-245) ยังคงมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเป็น 2 ตำแหน่งอยู่ คือ 73.3 °C และ 143.4 °C ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้ Sb_2O_3 เป็นสารเร่งปฏิกิริยา และในทำนองเดียวกันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผสมเป็น 255 °C พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO (Zn4-255) จะมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่เคลื่อนที่เข้าหากันมากขึ้นคือมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 82.8 °C และ 127.3 °C และแม้ว่าจะใช้อุณหภูมิในการผสมถึง 270 °C แล้วก็ตามพอลิเมอร์ผสมนี้ (Zn4-270) ก็ยังคงมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 2 ตำแหน่งอยู่แต่มีการเคลื่อนที่เข้าหากันมากขึ้น คือมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 87.3 °C และ 102.8 °C อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสมสูงที่สุดคือ 290 °C พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO ปริมาณ 1.5% (Zn4-290) จึงจะมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันปรากฏเพียงตำแหน่งเดียวคือ 97.2 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 DSC ของพอลิเมอร์ผสมเมื่อใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO 1.5% เมื่อใช้อุณหภูมิในการผสมต่างกัน

จากที่กล่าวมาพอจะสรุปได้ว่าอุณหภูมิในการผสมพอลิเมอร์มีส่วนสำคัญในการทำให้การผสมพอลิเมอร์ระหว่าง PET และ PC มีความเข้ากันได้ โดยอุณหภูมิในการผสมที่สูงขึ้นจะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้น อีกทั้งสารเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกันจะมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาได้แตกต่างกัน จากการทดลองข้างต้นพบว่าสารเร่งปฏิกิริยา ZnO จะเริ่มทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ PC มีความเข้ากันได้บางส่วนที่อุณหภูมิในการผสม 255 °C เช่นเดียวกับสารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 แต่พบว่า Sb_2O_3 นี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารเร่งปฏิกิริยา ZnO เล็กน้อยที่ 255 °C และเมื่อพิจารณาจากอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสมสูงขึ้นเป็น 270 °C พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 (Sb4-270) จะมีความเข้ากันได้มากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO (Zn4-270) โดยพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 จะมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียงค่าเดียวเท่านั้น ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO ยังคงมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันอยู่ 2 ตำแหน่งเช่นเดิม อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสมสูงที่สุด คือ 290 °C พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 และพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO (Sb4-290 และ Zn4-290) จะมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียงตำแหน่งเดียว นั่นคือที่อุณหภูมิในการผสม 290 °C นี้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ PC จะมีความเข้ากันได้นั่นเอง

4.2 อุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณผลึก

PET โฮโมพอลิเมอร์มีอุณหภูมิการหลอมเหลว 257 °C ในขณะที่ PC โฮโมพอลิเมอร์ไม่มีอุณหภูมิการหลอมเหลว เนื่องจาก PC โฮโมพอลิเมอร์เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน และไม่สามารถเกิดผลึกได้ง่าย เนื่องจากโครงสร้างของ PC

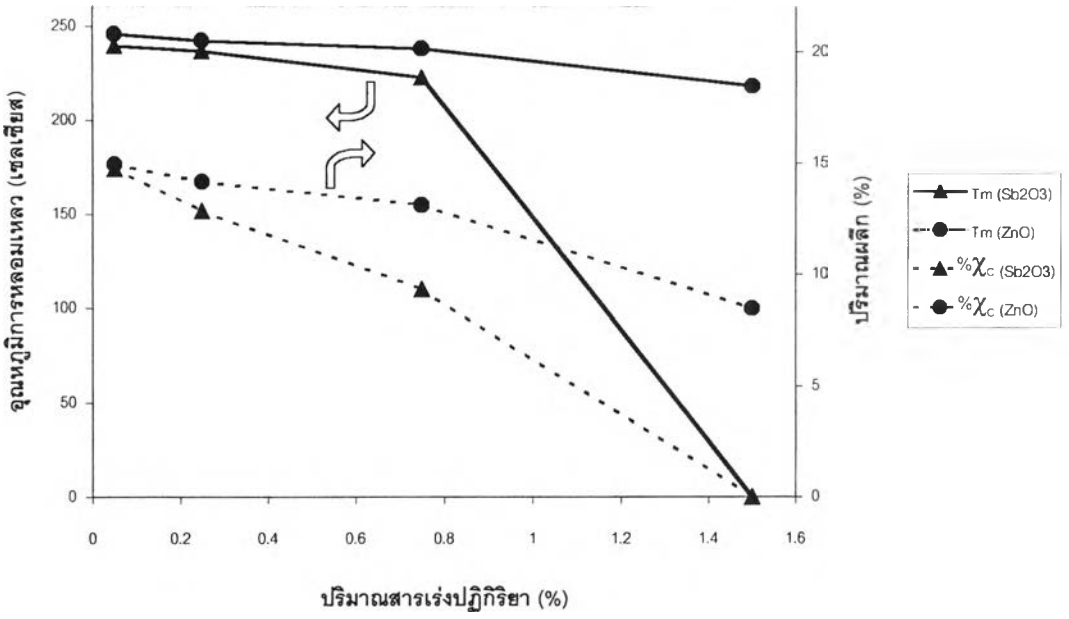
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 ร่วมกับตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อทำการผสมพอลิเมอร์ระหว่าง PET และ PC ที่อุณหภูมิ 290 °C ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์โดยไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิการหลอมเหลว 243.5 °C และมีปริมาณผลึก 15.25% ในการผสมพอลิเมอร์เมื่อใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 ในปริมาณต่ำคือ 0.05% พบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิการหลอมเหลว 239.7 °C และมีปริมาณผลึก 14.75% ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 ปริมาณ 0.25% ปรากฏอุณหภูมิการหลอมเหลว 236.7 °C ปริมาณผลึก 12.84% และเมื่อใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้นเป็น 0.75% ปรากฏว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณผลึกลดลงอย่างมากโดยมีอุณหภูมิการหลอมเหลว 222.8 °C และปริมาณผลึก 9.33% และสำหรับพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 สูงที่สุดคือ 1.5% จะไม่ปรากฏว่ามีอุณหภูมิการหลอมเหลวให้เห็นอีกต่อไป

ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 4.3 พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO ในการผสมแบบรีแอคทีฟนี้มีแนวโน้มคล้ายกับพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 กล่าวคือ พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO ปริมาณ 0.05% ปรากฏอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 245.8 °C และมีปริมาณผลึก 14.94% ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO ปริมาณ 0.25% ปรากฏอุณหภูมิการหลอมเหลว 242.3 °C และมีปริมาณผลึก 14.16% และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาขึ้นอีกเป็น 0.75% พอลิเมอร์ผสมจะมีอุณหภูมิการหลอมเหลวลดลงเป็น 238.1 °C และมีปริมาณผลึกลดลงเป็น 13.11% และเมื่อใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO ในปริมาณสูงที่สุดคือ 1.5% พอลิเมอร์ผสมปรากฏอุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณผลึกที่ลดลงอย่างชัดเจน โดยมีค่า 218.3 °C และ 8.462% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้อุณหภูมิในการผสม 290 °C และใช้สารเร่งปฏิกิริยาปริมาณต่างกัน

ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา (%)	อุณหภูมิการหลอมเหลว (°C)		ปริมาณผลึก (%)	
	Sb_2O_3	ZnO	Sb_2O_3	ZnO
0	243.5		15.25	
0.05	239.7	245.8	14.75	14.94
0.25	236.7	242.3	12.84	14.16
0.75	222.8	238.1	9.33	13.11
1.5	-	218.3	-	8.46

เนื่องจาก PC ไม่มีความเป็นผลึกดังนั้นอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมที่ปรากฏจึงเป็นอุณหภูมิการหลอมเหลวที่เกิดจากเฟสของ PET เพียงอย่างเดียว จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าในการผสมพอลิเมอร์ระหว่าง PET และ PC ที่อุณหภูมิ 290 °C พบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณผลึกลดลงอย่างชัดเจน กล่าวคือเมื่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเกิดขึ้นในระหว่างการผสมพอลิเมอร์นั้นทำให้สายโซ่โมเลกุลของ PET สั้นลง เนื่องจากการเกิดเป็นบล็อกโคโพลิเมอร์ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ PET กับ PC ขึ้น จึงเปรียบเสมือนเป็นการขัดขวางการเกิดผลึกของ PET ในพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้อุณหภูมิในการผสม 290 °C

จากรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้อุณหภูมิในการผสม 245 °C และไม่มีการเติมการเร่งปฏิกิริยาปรากฏอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 244.3 °C และมีปริมาณผลึก 15.55% เมื่อใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 ปริมาณ 1.5% ในการผสมพอลิเมอร์ พบว่าพอลิเมอร์ผสมจะปรากฏอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 243.5 °C และมีปริมาณผลึก 14.88% ซึ่งน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาเล็กน้อย และเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสมเพิ่มขึ้นเป็น 255 °C และ 270 °C พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 จะมีอุณหภูมิการหลอมเหลวลดลงเป็น 240.2 °C และ 234.5 °C ตามลำดับ ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวจะมีปริมาณผลึกลดลงจาก 14.88% เป็น 12.36% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการผสมขึ้นเป็น 255 °C และ 8.15% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผสมขึ้นเป็น 270 °C ตามลำดับ ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่ใช้อุณหภูมิในการผสม 290 °C และใช้สารเร่ง Sb_2O_3 จะไม่ปรากฏอุณหภูมิการหลอมเหลว

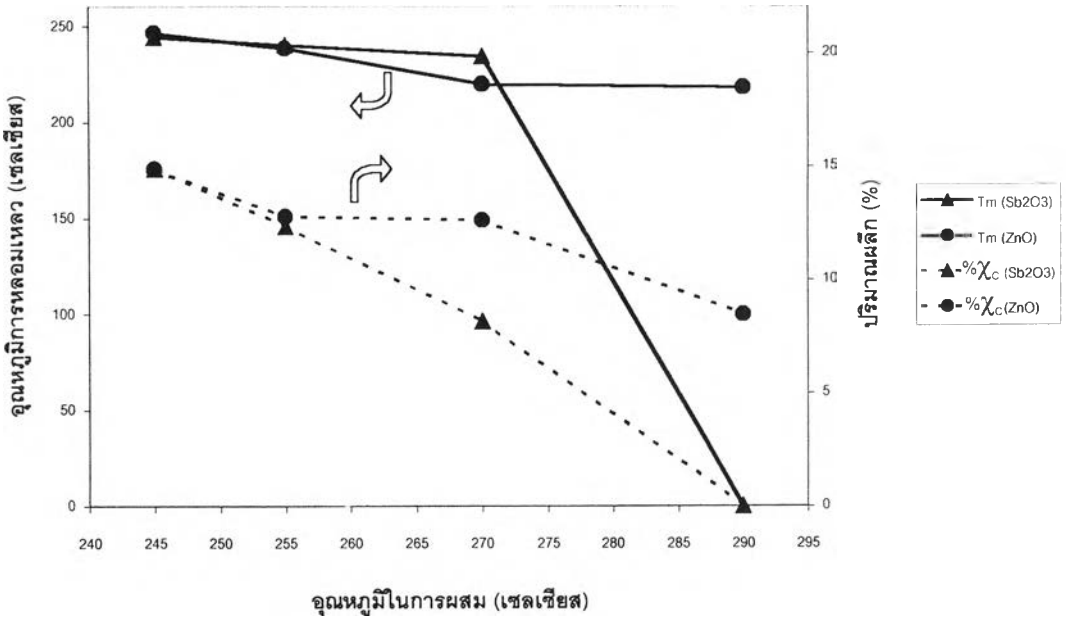
ในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.5 พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO เป็นปริมาณ 0.05% และใช้อุณหภูมิในการผสม 245 °C พบว่ามีอุณหภูมิการหลอมเหลว 246.6 °C ซึ่งใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่มีปริมาณผลึก 14.85% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเล็กน้อยซึ่งคล้ายกับในกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ Sb_2O_3 เป็นสารเร่งปฏิกิริยา และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผสมขึ้น

เป็น 255 °C พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO มีอุณหภูมิการหลอมเหลว 238.5 °C และมีปริมาณผลึก 12.78% ต่อจากนั้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสม 270 °C พอลิเมอร์ผสมจะมีอุณหภูมิการหลอมเหลวลดลงเป็น 220 °C และมีปริมาณผลึก 12.62% และเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสมสูงที่สุดคือ 290 °C พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO จะมีอุณหภูมิการหลอมเหลวลดลงอย่างมากโดยมีอุณหภูมิการหลอมเหลวเป็น 218.3 °C และมีปริมาณผลึกลดลงอย่างชัดเจนคือ 8.46%

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา 1.5 % และใช้อุณหภูมิในการผสมต่างกัน

อุณหภูมิในการผสม (°C)	อุณหภูมิการหลอมเหลว (°C)			ปริมาณผลึก (%)		
	ไม่เติม	Sb_2O_3	ZnO	ไม่เติม	Sb_2O_3	ZnO
245	244.3	243.5	246.6	15.55	14.88	14.85
255	-	240.2	238.5	-	12.36	12.78
270	-	234.5	220.0	-	8.16	12.62
290	243.5	-	218.3	15.25	-	8.46

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปให้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นโดยพิจารณาจากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าการใช้สารเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1.5% และใช้อุณหภูมิในการผสม 245 °C จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณผลึกใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาเล็กน้อย เนื่องจากสารเร่งปฏิกิริยาที่เติมเข้าไปไม่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ ดังนั้นอุณหภูมิการหลอมเหลว และปริมาณผลึกจึงแทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่การใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็น 255 270 และ 290 °C จะทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีการใช้สารเร่งปฏิกิริยามีอุณหภูมิการหลอมเหลว และปริมาณผลึกมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน

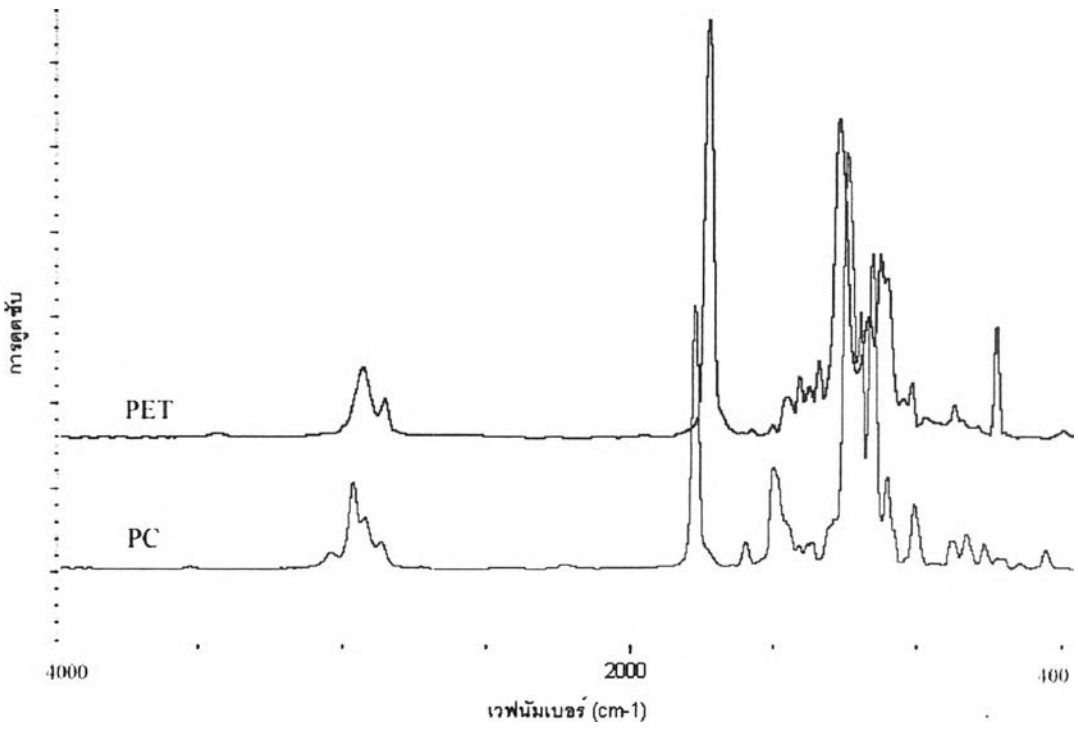


รูปที่ 4.7 อุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา 1.5 %

4.3 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของพอลิเมอร์ผสม

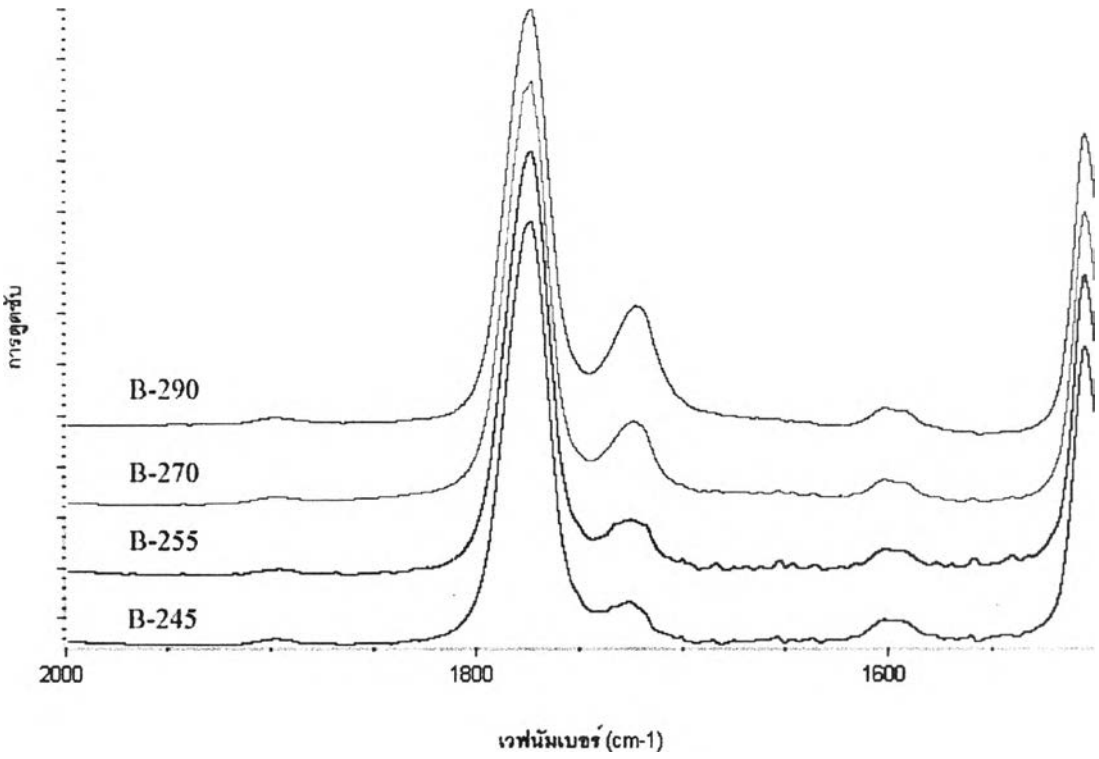
แถบการดูดซับ (absorption band) เนื่องจากการสั่นตัวของหมู่คาร์บอนิลใน PET และ PC จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (IR) ปรากฏที่ 1725 และ 1775 cm^{-1} ตามลำดับ (รูปที่ 4.8) เมื่อทำการผสมพอลิเมอร์ระหว่าง PET และ PC ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ โดยการใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการผสมที่ต่างกันเรียบร้อยแล้ว นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมมาละลายในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (CH_2Cl_2) ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ดีของ PC แล้วนำฟิล์มที่ได้จากการระเหยสารละลายของพอลิเมอร์ผสมมาทำการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค IR ทำให้สามารถตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของส่วนที่ละลายในสารละลาย CH_2Cl_2 (soluble fraction) ที่สกัดออกมาได้

ส่วนที่ละลายใน CH_2Cl_2 ควรจะเป็นส่วนของ PC เพียงอย่างเดียว เนื่องจาก PET ไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย CH_2Cl_2 แต่การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างสายโซ่ของ PC และ PET สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลเข้าด้วยกัน ดังนั้นหากพอลิเมอร์ผสมที่เกิดขึ้นมีแถบการดูดซับของ PET แสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสายโซ่ขึ้นจริง



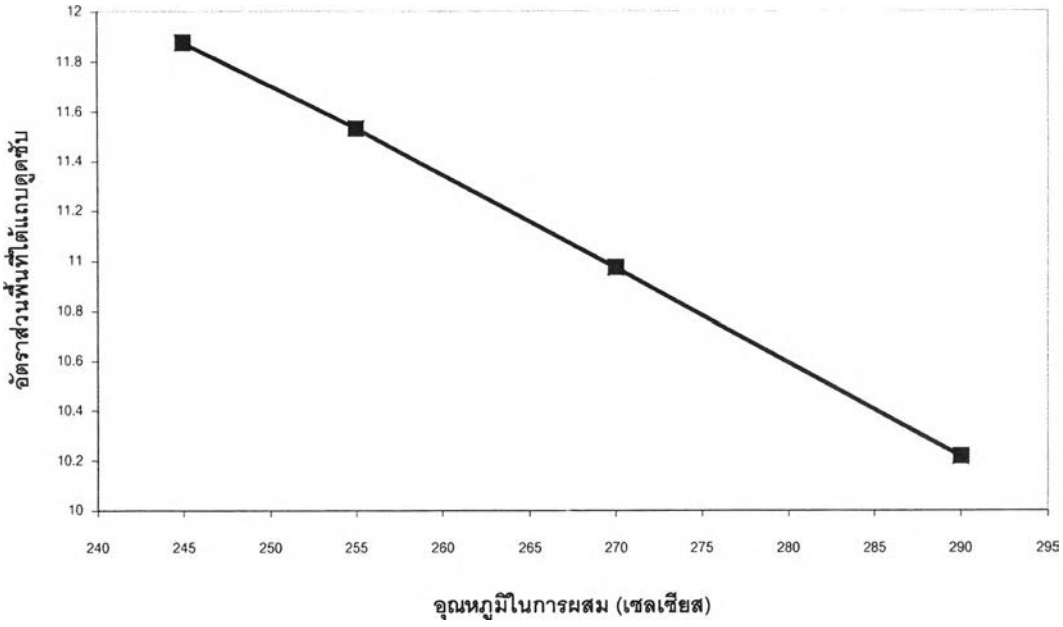
รูปที่ 4.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PET โฮโมพอลิเมอร์ และ PC โฮโมพอลิเมอร์

รูปที่ 4.9 แสดง IR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ PC ที่ใช้อุณหภูมิในการผสม 245 255 270 และ 290 °C และไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในการผสม จาก IR สเปกตรัมพบว่าแถบการดูดซับปรากฏที่ 1775 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่คาร์บอนิลของ PC อย่างชัดเจน ในขณะที่แถบการดูดซับของ PET ที่ 1725 cm^{-1} ปรากฏเพียงยอดเล็กๆ เท่านั้น



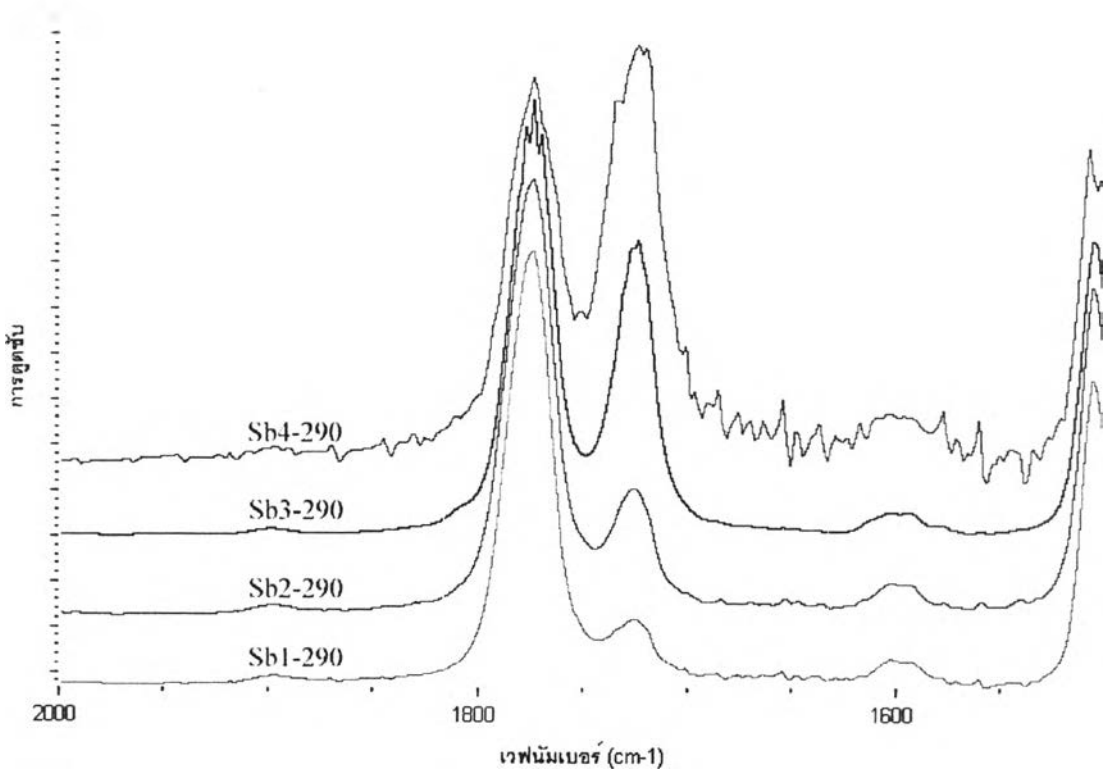
รูปที่ 4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาในการผสมและใช้อุณหภูมิในการผสมต่างกัน

เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้แถบการดูดซับระหว่างหมู่คาร์บอนิลของ PC ซึ่งแสดงแถบการดูดซับที่ 1775 cm^{-1} (A_{PC}) และของ PET ซึ่งแสดงแถบการดูดซับที่ 1725 cm^{-1} (A_{PET}) กล่าวคือเป็นอัตราส่วนของพื้นที่ใต้แถบการดูดซับระหว่างหมู่คาร์บอนิล หรือ A_{PC}/A_{PET} (รูปที่ 4.10) พบว่าในการผสมพอลิเมอร์ระหว่าง PET และ PC โดยไม่มีการเติมการเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในการผสม เมื่ออุณหภูมิในการผสมพอลิเมอร์สูงขึ้นจะทำให้ A_{PC}/A_{PET} มีแนวโน้มลดต่ำลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น กล่าวคือพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในการผสมพอลิเมอร์ด้วยอุณหภูมิ 290 °C จะมี A_{PC}/A_{PET} ลดลงจากการใช้อุณหภูมิในการผสมที่ 245 °C เพียง 14% เท่านั้น

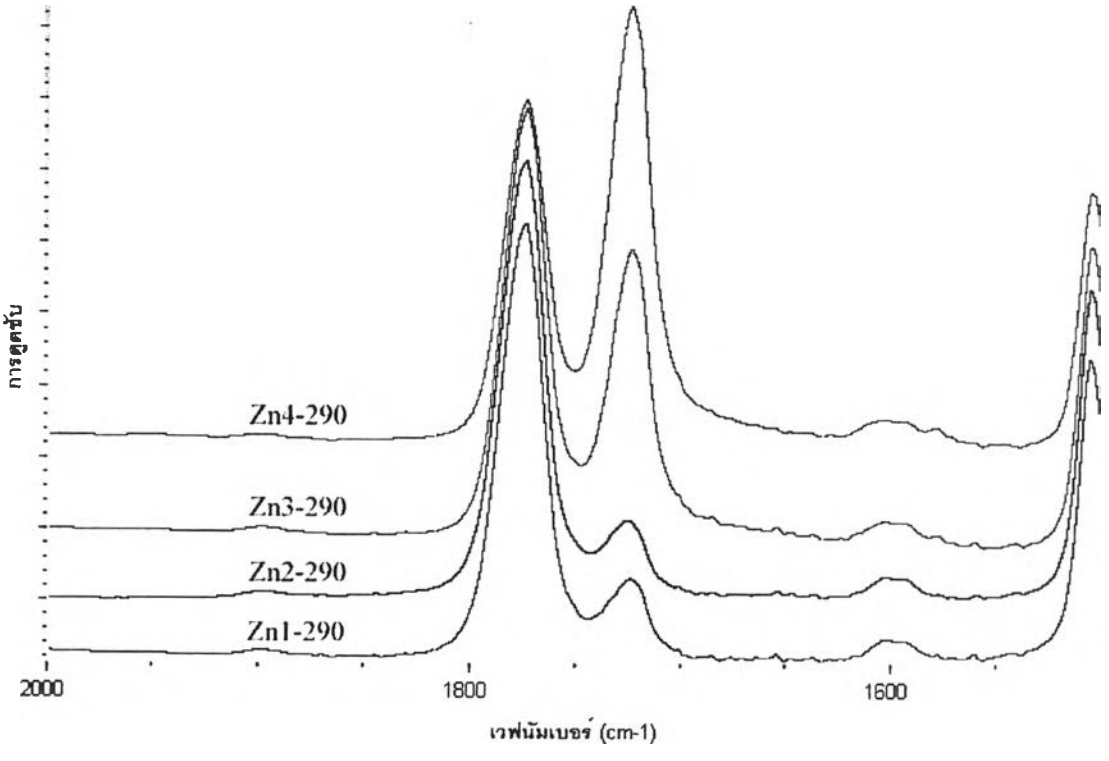


รูปที่ 4.10 A_{PC}/A_{PET} ของพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาในการผสมและใช้อุณหภูมิในการผสมต่างกัน

เมื่อใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 และ ZnO ในการผสม PET และ PC ที่อุณหภูมิในการผสม 290 ^{o}C พบว่า IR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาให้ผลในทำนองเดียวกันดังในแสดงรูปที่ 4.11 และ 4.12 สำหรับ Sb_2O_3 และ ZnO ตามลำดับ นั่นคือพบว่าเมื่อมีการใช้สารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้แถบการดูดซับที่ 1725 cm^{-1} มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามไปด้วย

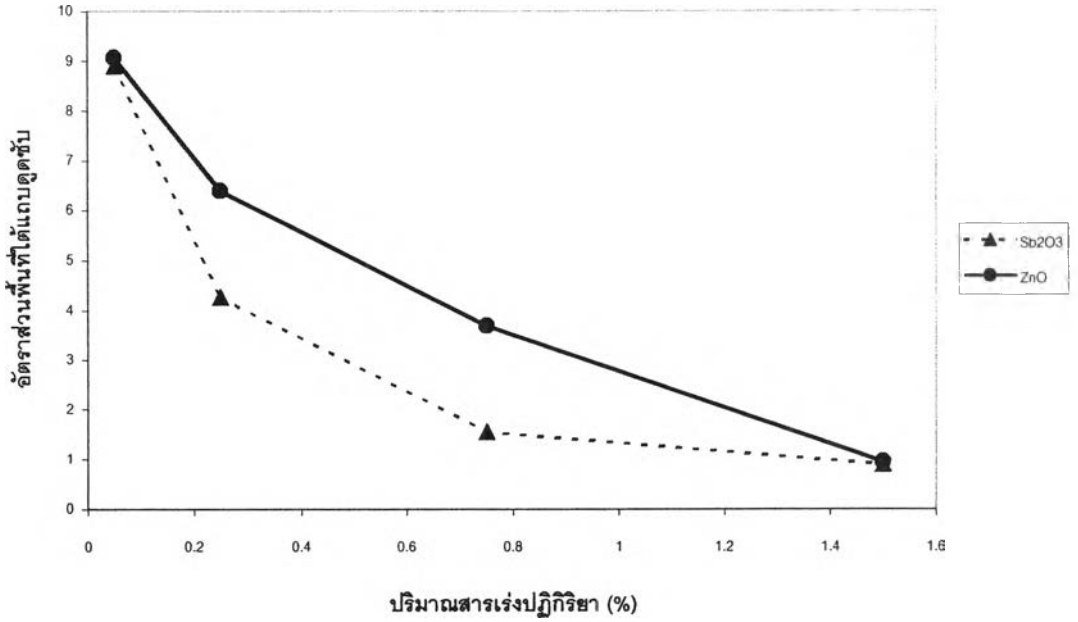


รูปที่ 4.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสม 290 °C และใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3ในปริมาณที่ต่างกัน



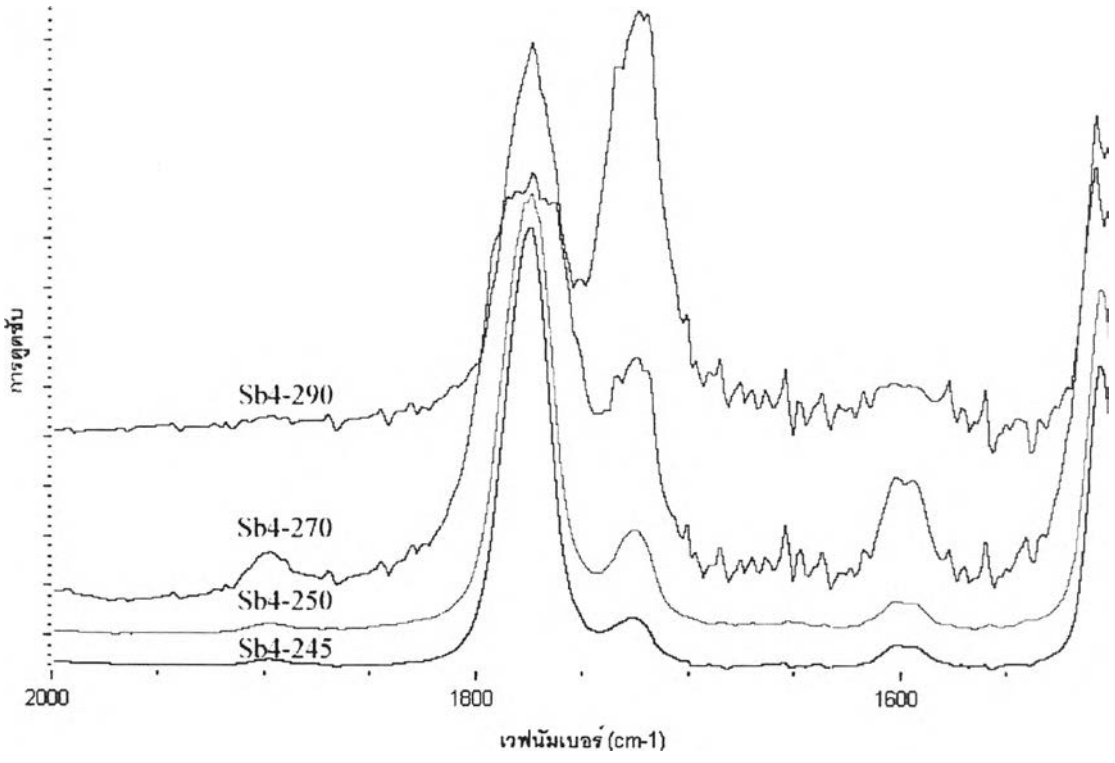
รูปที่ 4.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสม 290 °C และใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO ในปริมาณที่ต่างกัน

และในทำนองเดียวกับกรณีที่ไม่มีสารเร่งปฏิกิริยาเมื่อนำแถบการดูดซับมาเปรียบเทียบกัน จากรูปที่ 4.13 พบว่า A_{PC}/A_{PET} มีแนวโน้มไปตามที่คาดไว้จาก IR สเปกตรัม กล่าวคือการใช้สารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้อัตราส่วน A_{PC}/A_{PET} ลดลง โดยพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 มีแนวโน้มการลดลงของ A_{PC}/A_{PET} ที่รวดเร็วกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา ZnO เข้าไปในการผสม

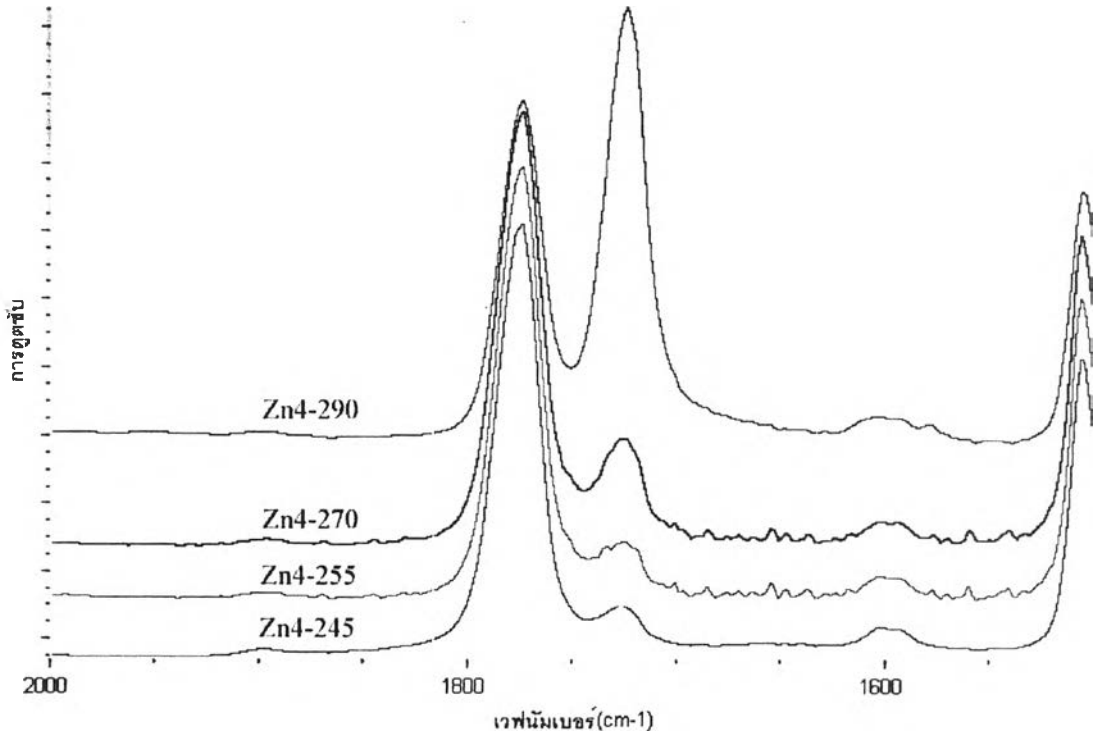


รูปที่ 4.13 A_{PC}/A_{PET} ของพอลิเมอร์ผสมเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสม 290 °C และใช้สารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่ต่างกัน

รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ PC ที่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในการผสม เมื่อใช้อุณหภูมิในการผสมเพิ่มขึ้นจาก 245 °C จนถึง 290 °C จากรูปแสดงให้เห็นว่า IR สเปกตรัมของแถบการดูดซับที่ 1725 cm^{-1} มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการผสมเพิ่มสูงขึ้น

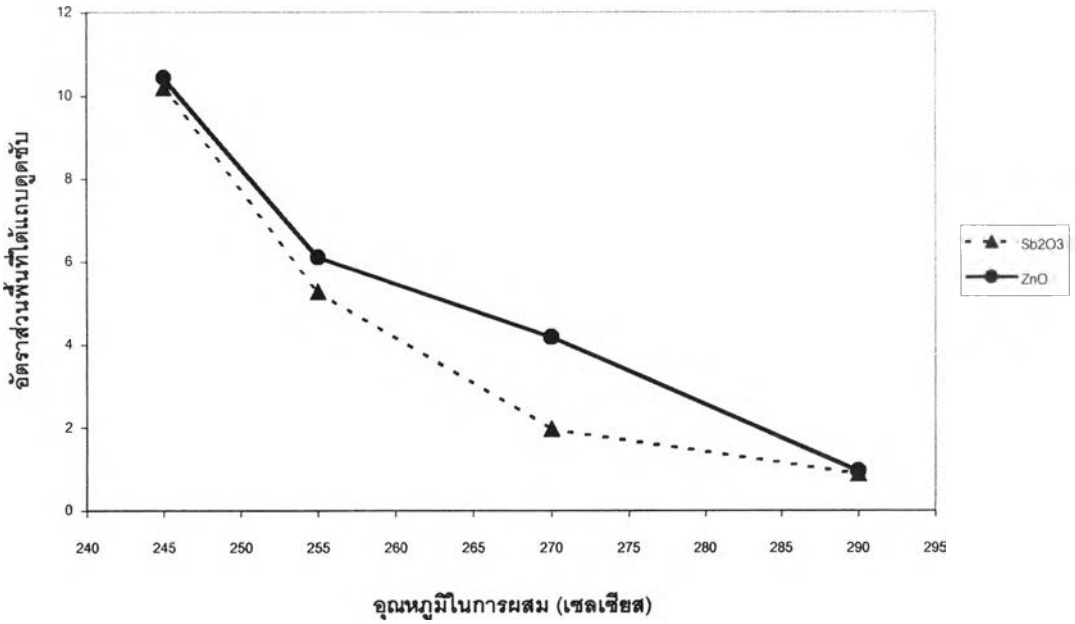


รูปที่ 4.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 1.5 % ในการผสมด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน



รูปที่ 4.15 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา ZnO 1.5 % ในการผสมด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน

และเมื่อพิจารณา A_{PC}/A_{PET} (รูปที่ 4.16) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับ IR สเปกตรัมที่ได้กล่าวไปข้างต้น กล่าวคือพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 มีการลดลงของ A_{PC}/A_{PET} อย่างสูงอย่างชัดเจน ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO มี A_{PC}/A_{PET} ค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าอัตราส่วนของ A_{PC}/A_{PET} สามารถบอกถึงแนวโน้มของสายโซ่โมเลกุลของ PET ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ได้ โดยเมื่อ A_{PC}/A_{PET} มีค่าลดลงแสดงว่าฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการใช้ตัวทำละลาย CH_2Cl_2 นี้มีสายโซ่โมเลกุลของ PET อยู่ในปริมาณที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.16 A_{PC}/A_{PET}ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา 1.5 % ในการผสมที่อุณหภูมิต่างกัน

4.4 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสม

การหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคเจลเปอร์มีเอชันโครมาโทกราฟฟี (GPC) ต้องใช้พอลิเมอร์ที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่ใช้ในการฉีดสารละลายของพอลิเมอร์เข้าไปในเครื่อง GPC ซึ่งในที่นี้ใช้เตตระไฮโดรฟูเรน (THF) ซึ่งเป็นสารที่สามารถละลาย PC ได้แต่ไม่สามารถละลาย PET ได้

ดังนั้นการใช้ THF เป็นตัวทำละลายจึงไม่สามารถหาน้ำหนักโมเลกุลของ PET ได้ด้วยเครื่อง GPC นี้ ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมเมื่อเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ PET และ PC ทำให้มีบางส่วนที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย THF จึงสามารถหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมได้

เมื่อพิจารณาในด้านปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ด้วยอุณหภูมิในการผสม 290 ^{o}C จากตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อมีการใช้สารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณสูงคือ 1.5% จะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมลดลงอย่างมาก โดยจะเห็นได้ชัดเจนในพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 ซึ่งมีการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่ใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา 0.05% มีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการใช้สารเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (polydispersity) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อใช้สารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่สูงขึ้น

ตารางที่ 4.6 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้อุณหภูมิในการผสม 290 ^{o}C และใช้สารเร่งปฏิกิริยาปริมาณที่ต่างกัน

ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา (%)	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (Mn)		น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Mw)		การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (Mw/Mn)	
	Sb_2O_3	ZnO	Sb_2O_3	ZnO	Sb_2O_3	ZnO
0	15,786		31,005		1.964	
0.05	15,982	15,921	31,302	31,165	1.959	1.958
1.5	8,065	9,187	16,844	20,061	2.088	2.184

จากตารางที่ 4.7 พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสมเพิ่มขึ้นจาก 245 °C ไปเป็น 290 °C จะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาลดลงเล็กน้อย ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1.5% เมื่อใช้อุณหภูมิในการผสมเพิ่มขึ้นจาก 245 °C ไปเป็น 290 °C จะทำให้พอลิเมอร์ผสมนี้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลงอย่างมากหรือประมาณครึ่งหนึ่งจากที่อุณหภูมิ 245 °C เช่นเดียวกับข้อมูลในตารางที่ 4.6 พบว่าการใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่าการใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO ในขณะที่การใช้อุณหภูมิในการผสม 245 °C พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย

การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการใช้สารเร่งปฏิกิริยาในการผสมพอลิเมอร์เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิในการผสมสูงขึ้นจะทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเร่งปฏิกิริยามีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่สูงขึ้นอีกด้วย

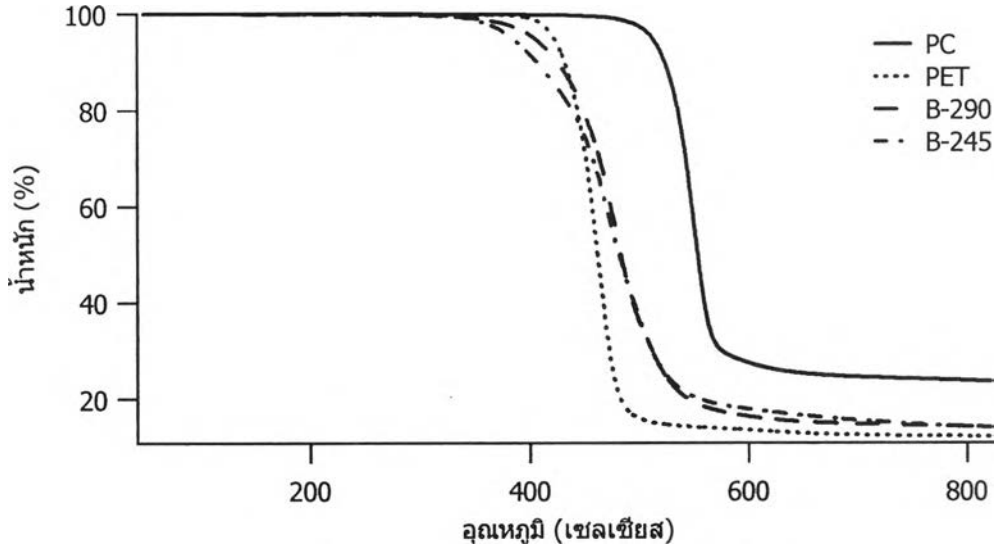
ตารางที่ 4.7 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1.5% ในการผสมด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน

อุณหภูมิในการผสม (°C)	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (Mn)			น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Mw)			การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (Mw/Mn)		
	ไม่เติม	Sb_2O_3	ZnO	ไม่เติม	Sb_2O_3	ZnO	ไม่เติม	Sb_2O_3	ZnO
245	19,377	17,519	17,699	38,595	34,989	37,277	1.992	1.997	2.106
290	15,786	8,065	9,187	31,005	16,844	20,061	1.964	2.088	2.184

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าทั้งปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ระหว่าง PET และ PC นั้นมีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสม กล่าวคือเมื่อปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการผสมสูงขึ้นจะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่สูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่เกิดขึ้นไม่เพียงแต่จะทำให้พอลิเมอร์ระหว่าง PET และ PC เกิดพันธะต่อกันและเกิดเป็นโคพอลิเมอร์ได้แล้ว ยังสามารถทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมสั้นลงได้อีกด้วย

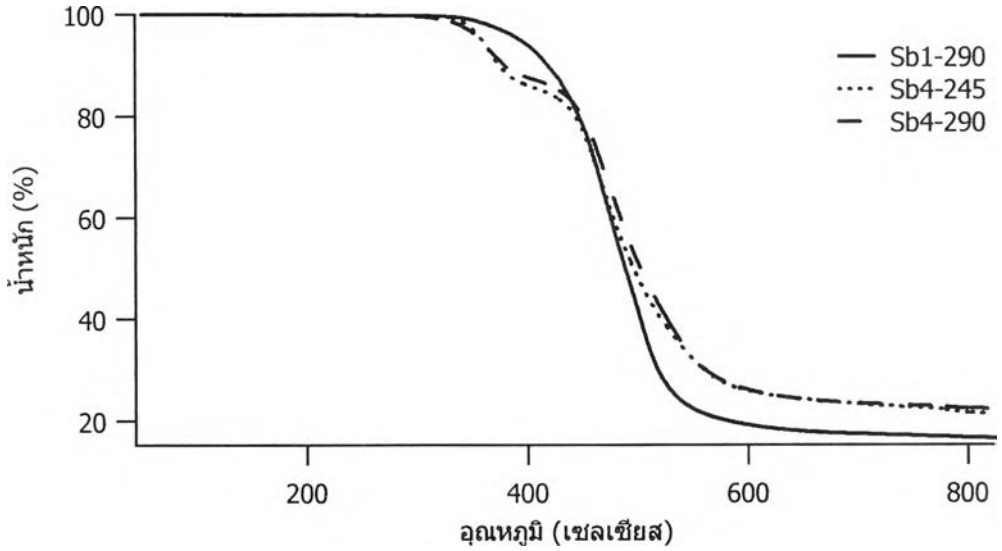
4.5 เสถียรภาพทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม

เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์สามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิคเทอร์โมแกรวิเมทรี (TGA) จากรูปที่ 4.17 พบว่า PC มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า PET โดย PC มีอุณหภูมิการสลายตัว 525 °C ในขณะที่ PET มีอุณหภูมิการสลายตัว 433 °C และเมื่อทำการผสมพอลิเมอร์เข้าด้วยกันโดยใช้อุณหภูมิในการผสมที่ 245 °C และ 290 °C โดยไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา พบว่าพอลิเมอร์ผสมนี้ (B-245 และ B-290) มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่า PET เล็กน้อย โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวใกล้เคียงกันคือ 423 °C และ 433 °C ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 TGA ของโฮโมพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาในการผสม

การใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 ปริมาณ 1.5% และใช้อุณหภูมิในการผสม 245 °C พบว่าพอลิเมอร์ผสม (Sb4-245) มีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้อุณหภูมิในการผสมที่ 290 °C (Sb4-290) เพียงเล็กน้อย โดยพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 1.5% และใช้อุณหภูมิในการผสม 245 °C และ 290 °C จะมีอุณหภูมิการสลายตัว 350 °C และ 340 °C ตามลำดับ (ตาราง 4.8) ในขณะที่พอลิเมอร์ที่ทำการผสมที่อุณหภูมิ 290 °C แต่ใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 ต่ำกว่า (Sb1-290) พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าและมีอุณหภูมิการสลายตัว 423 °C (รูปที่ 4.18)

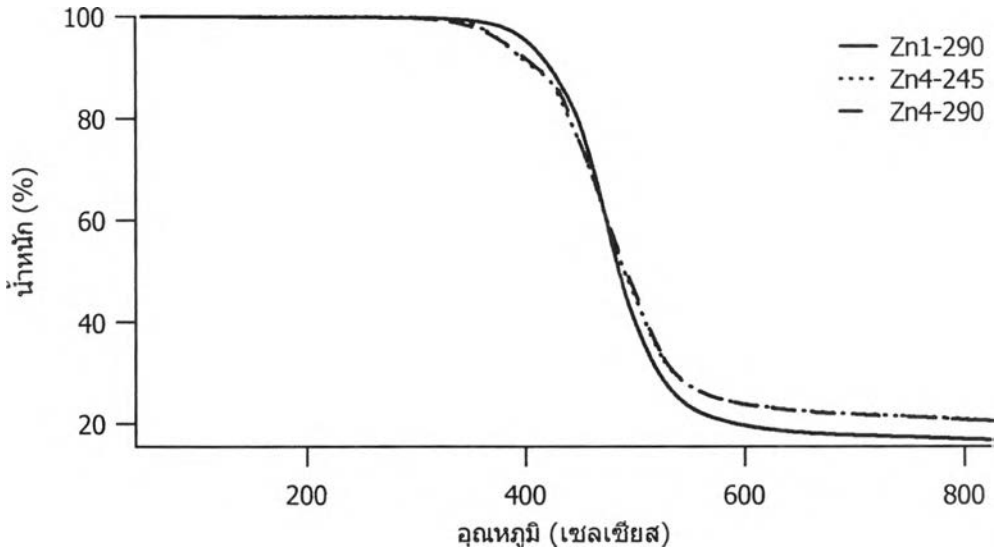


รูปที่ 4.18 TGA **ของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา** Sb_2O_3 **ในการผสม**

ตารางที่ 4.8 **อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาและใช้อุณหภูมิในการผสมที่ต่างกัน**

อุณหภูมิในการผสม(°C)	ไม่เติมสารเร่งปฏิกิริยา	Sb_2O_3		ZnO	
		0.05%	1.5%	0.05%	1.5%
245	423	-	350	-	410
290	433	423	340	426	382

ส่วนการใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มในการมีเสถียรภาพทางความร้อน คล้ายการใช้สารเร่งปฏิกิริยา Sb_2O_3 กล่าวคือเมื่อใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา ZnO 1.5% เท่ากันแต่อุณหภูมิในการผสมต่างกันคือ 245 °C และ 290 °C พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้อุณหภูมิในการผสมต่ำกว่า (Zn4-245) จะมีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้อุณหภูมิในการผสม 290 °C เล็กน้อย โดยพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO ปริมาณ 1.5% และใช้อุณหภูมิในการผสม 245 °C และ 290 °C จะมีอุณหภูมิการสลายตัว 410 °C และ 382 °C ตามลำดับ ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่ใช้อุณหภูมิในการผสม 290 °C แต่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ZnO ในปริมาณที่ต่ำกว่า (Zn1-290) จะทำให้พอลิเมอร์ผสมนี้มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าพอลิเมอร์ที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่สูงกว่า (Zn4-290) โดยพอลิเมอร์ผสมนี้มีอุณหภูมิการสลายตัว 426 °C (รูปที่ 4.19)



รูปที่ 4.19 TGA **ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา** ZnO **ในการผสม**

จะเห็นได้ว่าการใช้สารเร่งปฏิกิริยาในการผสมพอลิเมอร์แบบรีแอคทีฟนี้เมื่อใช้อุณหภูมิในการผสมที่ 290 ^{o}C เท่ากันแต่ใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันจะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนที่แตกต่างกัน โดยพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่สูงกว่า (Sb4-290 และ Zn4-290) จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำกว่าการใช้สารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณต่ำกว่า (Sb1-290 และ Zn1-290) ในขณะที่การใช้สารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณ 1.5% เท่ากันแต่ใช้อุณหภูมิในการผสมต่างกันจะทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ใช้อุณหภูมิในการผสมที่ต่ำกว่า (Sb4-245 และ Zn4-245) มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าพอลิเมอร์ที่ใช้อุณหภูมิในการผสมที่สูงกว่า (Sb4-290 และ Zn4-290) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์จะมีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ได้อย่างชัดเจน