

การใช้ดินขาวเคโอลิน ทัลก์ และไตรฟีนิลฟอสเฟตเพื่อปรับปรุงสมบัติห่วงไฟ
และด้านการหลอมหยดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

นายวสันต์ ปือกหลง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

USE OF KAOLIN, TALC AND TRIPHENYL PHOSPHATE TO IMPROVE FLAME RETARDANT AND
ANTI-DRIPPING PROPERTIES OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE)

Mr. Wasan Poklong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้ดินขาวเคโอลิน ทัลก์ และไตรฟีนิลฟอสเฟตเพื่อปรับปรุงสมบัติห่วงไฟและด้านการหลอมหยดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

โดย

นายวสันต์ ป็อกหลง

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อาจองค์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

วสันต์ ป็อกหลง : การใช้ดินขาวเคโอลิน ทัลก์ และไตรฟีนิลฟอสเฟตเพื่อปรับปรุงสมบัติ
 หน่วงไฟและด้านการหลอมหยดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต. (USE OF KAOLIN,
 TALC AND TRIPHENYL PHOSPHATE TO IMPROVE FLAME RETARDANT AND
 ANTI-DRIPPING PROPERTIES OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE))
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:
 รศ. ดร.ประณัฐ โพธิยะราช 129 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติหน่วงไฟและด้านการหลอมหยดของพอลิเอทิลีนเทเรฟ
 ทาเลตหรือพีดีด้วยตัวเติมสองชนิด คือ ดินขาวเคโอลินและทัลก์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-
 aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane ร่วมกับไตรฟีนิลฟอสเฟต โดยเริ่มจากการเตรียมมาสเตอร์
 แบบท์ของพีดี/ดินขาวเคโอลินและพีดี/ทัลก์ด้วยการผสมแบบหลอมเหลวในเครื่อง อัดรีดสกรูคู่ในอัตราส่วน
 ของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าพีดีคอมพาวนด์ที่มีดินขาวเคโอลินหรือทัลก์มี
 ความหนืดหลอมเหลวและค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (LOI) สูงกว่าพีดีบริสุทธิ์และเพิ่มขึ้นอีกเมื่อใช้ดินขาว
 เคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไซเลน จึงเลือกนำมาสเตอร์แบบท์ที่ใช้ตัวเติมที่ได้รับการ
 ปรับผิวนี้ไปเตรียมเป็นพีดีคอมพาวนด์โดยผสมกับพีดีบริสุทธิ์โดยให้มีปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์
 ในปริมาณร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อนำไปทดสอบพบว่าค่า LOI ของพีดีคอมพาวนด์ที่มีปริมาณ
 ดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักมีค่าเป็นร้อยละ 27.0 และ 26.1 ตามลำดับ ซึ่งแม้ว่าจะสูงกว่า
 พีดีบริสุทธิ์ที่มีค่า LOI ร้อยละ 23.0 แต่เพื่อเพิ่มค่า LOI ให้สูงขึ้นไปอีกจึงได้เติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10
 โดยน้ำหนักลงไปในช่วงขั้นตอนการฉีดขึ้นรูป ผลจากการทดลองพบว่าพีดีคอมพาวนด์ที่ใช้ดินขาว
 เคโอลินหรือทัลก์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่า LOI สูงถึง ร้อยละ 31.1 และ 30.7 ตามลำดับ และเมื่อทดสอบ
 การลุกไหม้ในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94V พบว่าการเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ในปริมาณร้อยละ 2 ช่วย
 ด้านการหลอมหยดของพีดีได้ใกล้เคียงกัน อยู่ในระดับ V0 แต่การเติมในปริมาณร้อยละ 5 พบว่าดินขาว
 เคโอลินช่วยด้านการหลอมหยดได้ดีกว่าทัลก์ และการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตยังคงช่วยด้านการหลอมหยดอยู่
 ในระดับ V0 แต่การเติมทัลก์ในปริมาณร้อยละ 5 ร่วมกับไตรฟีนิลฟอสเฟตกลับไม่ช่วยด้านการหลอมหยดอยู่
 ในระดับ V2 เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลพบว่าพีดีคอมพาวนด์ที่มีปริมาณดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ร้อยละ 2
 โดยน้ำหนักมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด แต่การเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเทเรฟ
 ทาเลตคอมพาวนด์ลดลง เมื่อพิจารณาจากสมบัติหลายด้านประกอบกันสามารถสรุปได้ว่าการใช้ดินขาว
 เคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไซเลนในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักร่วมกับการใช้
 ไตรฟีนิลฟอสเฟตเป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมกับการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2554.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

##5372439423: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) / CLAY / COMPOUNDS

WASAN POKLONG: USE OF KAOLIN, TALC AND TRIPHENYL PHOSPHATE TO IMPROVE FLAME RETARDANT AND ANTI-DRIPPING PROPERTIES OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE). ADVISOR : ASST. PROF. SIREERAT CHARUCHIDA, Ph.D., CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., 129 pp.

The aim of this research is to improve flame retardant and anti-dripping properties of poly(ethylene terephthalate) or PET by using kaolin and talc as well as triphenyl phosphate. PET and the fillers were prepared into PET/kaolin and PET/talc masterbatches by melt mixing using a twin-screw extruder at 20%w/w of the filler. The masterbatches were also prepared by using kaolin and talc treated with N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane. It was found that the melt flow indexes (MFI) and limiting oxygen index (LOI) of PET masterbatches with untreated fillers are higher than those of neat PET. MFI and LOI were further increased when silane-treated fillers were used. The masterbatches with treated fillers were then mixed with neat PET in order to obtain PET compounds of 2 and 5%w/w of the filler. The results demonstrated that the LOI of PET compounds with 5%w/w of treated kaolin or talc were 27.0% and 26.1%, respectively, slightly higher than that of neat PET. When 10 %w/w of triphenyl phosphate was added into the compounds in the injection time, the LOI increased up to 31.1%. The UL-94V testing showed that addition of 2%w/w of kaolin and talc alone improved anti-dripping property of PET and the addition of triphenyl phosphate also led to improve anti-dripping property. However, the addition of 5% w/w of kaolin and talc alone and also with triphenyl phosphate diminished anti-dripping property. PET compounds with 2%w/w of kaolin or talc possessed the highest mechanical properties but the addition of triphenyl phosphate led to decreasing mechanical properties. It can be conclude that using of 2 %w/w of treated kaolin or treated talc with the addition of triphenyl phosphate is the optimum ratio which can be further developed.

Department : Materials Science Student's Signature.....
 Field of Study : .. Applied Polymer Science and Textile .. Advisor's Signature.....
 Academic Year : 2011..... Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้โอกาสในการทำวิจัยครั้งนี้ กรณณาให้ความรู้ คำปรึกษา และระยะเวลาในการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ด้วยความดูแลเอาใจใส่อย่างดียิ่งตลอดงานวิจัย

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อูษา แสงวัฒนาโรจน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีภูกลกิจ รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์ และรองศาสตราจารย์ ไพพวรรณ สันติสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาตรวจแก้ไขและให้แนวคิด รวมทั้งคำแนะนำที่มีคุณค่าแก่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ดร. สรินทร ลิ้มปนาท รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา แนวคิด และคำแนะนำ เกี่ยวกับดินขาวเคโอลินและทัลก์ซึ่งเป็นสารเคมีที่สำคัญสำหรับงานวิจัยนี้ รวมทั้งความเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณแหล่งทุนสนับสนุนด้านการศึกษาและงานวิจัยจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านสิ่งทอ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยโพลีเอสเตอร์ จำกัด สำหรับเม็ดพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณภาคีชาววัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกระหว่างการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ๆ เพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 วงจรการเผาไหม้ของวัสดุพอลิเมอร์.....	3
2.2 กลไกการหน่วงไฟ.....	5
2.2.1 การหน่วงไฟทางกายภาพ.....	5
2.2.2 การหน่วงไฟทางเคมี.....	6
2.3 สารหน่วงไฟ.....	7
2.3.1 สารหน่วงไฟประเภทแฮโลเจน.....	8
2.3.2 สารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัส.....	9
2.3.3 สารหน่วงไฟประเภทไนโตรเจน.....	11
2.3.4 สารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์.....	12
2.3.4.1 โลหะไฮดรอกไซด์.....	12
2.3.4.2 ไฮดรอกไซด์คาร์บอนเนต.....	12
2.3.4.3 บอเรต.....	13
2.3.4.4 สารประกอบซิลิกอน.....	13
2.3.4.5 อนุภาคนาโน.....	14
2.3.4.6 อลูมิเนียมซิลิเกตเคลย์.....	16
2.4 สารประกอบไฮเลน.....	22

บทที่	ช หน้า
2.5 การทดสอบการติดไฟในห้องปฏิบัติการ.....	24
2.5.1 ดัชนีออกซิเจนจำกัด.....	24
2.5.2 เทคนิคการทดสอบการลุกไหม้ในแนวตั้ง.....	25
2.6 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	27
2.7 การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	31
2.8 กระบวนการออกซิเดชันของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	34
2.9 การปรับปรุงสมบัติของไฟในพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	39
2.10 การใช้ดินขาวเคโอลินและทัลก์สำหรับหน่วงไฟในพลาสติก.....	41
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
3.1 สารเคมี.....	42
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	46
3.4 การปรับผิวอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์ด้วยสารประกอบไฮโดรเจน.....	47
3.5 การเตรียมมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	47
3.6 การเตรียมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ด้วยวิธีอัดขึ้นรูป.....	49
3.7 การเตรียมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ด้วยวิธีการฉีดแบบ.....	50
3.8 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของมาสเตอร์แบทช์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต คอมพาวนด์ที่เตรียมได้.....	51
3.8.1 การทดสอบสมบัติของไฟและด้านการหลอมหยด.....	51
3.8.2 การทดสอบทางความร้อน.....	56
3.8.3 การทดสอบดัชนีการไหลหลอมเหลว.....	57
3.8.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	57
3.8.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะพื้นฐานวิทยา.....	60
3.8.6 การวัดสีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	62
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	64
4.1 ลักษณะทางกายภาพของดินขาวเคโอลินและทัลก์.....	64
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเคโอลินและทัลก์.....	65
4.3 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค.....	65

บทที่	ณ หน้า
4.4 โครงสร้างทางเคมีของดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไฮเลต.....	68
4.5 สีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	71
4.6 ดัชนีการไหลหลอมเหลวของมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	73
4.7 สมบัติด้านการหน่วงไฟและหลอมหยุดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	74
4.7.1 ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (LOI).....	74
4.7.2 ผลการวิเคราะห์การทดสอบการลุกไหม้ในแนวตั้ง.....	80
4.8 สมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	83
4.8.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส.....	83
4.9 สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	86
4.9.1 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง.....	86
4.9.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก.....	88
4.9.3 การทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง.....	89
4.10 สันฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	90
4.10.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	90
4.10.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.....	96
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	101
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	101
5.1.1 สมบัติหน่วงไฟและด้านการหลอมหยุด.....	101
5.1.2 สมบัติทางความร้อน.....	101
5.1.3 สีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	102
5.1.4 ความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นงาน.....	102
5.1.5 สมบัติเชิงกล.....	102
5.1.6 สันฐานวิทยาและการกระจายตัว.....	102
5.1.7 ข้อสรุป.....	103
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	103
รายการอ้างอิง.....	104

	ญ
ภาคผนวก.....	108
บทที่	หน้า
ภาคผนวก ก.....	109
ภาคผนวก ข.....	110
ภาคผนวก ค.....	114
ภาคผนวก ง.....	116
ภาคผนวก จ.....	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	128

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณในดินขาวลำปาง (LPCV).....	19
2.2	ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีในทัลก์ที่มีสูตรทางเคมีต่างๆกัน.....	21
2.3	การจำแนกผลการทดสอบการติดไฟของวัสดุตามมาตรฐาน UL-94.....	26
2.4	คุณสมบัติติดไฟและค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของเส้นใยชนิดต่างๆ.....	30
3.1	สมบัติเบื้องต้นของเม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์.....	42
3.2	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเคโอลิน.....	43
3.3	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของทัลก์.....	43
3.4	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	44
3.5	สูตรการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	48
3.6	สูตรการเตรียมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ด้วยวิธีอัดขึ้นรูป.....	50
3.7	สูตรการเตรียมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ด้วยวิธีการฉีดแบบ.....	51
3.8	เกณฑ์การจำแนกระดับของการติดไฟในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94V	56
4.1	ดัชนีความขาวและดัชนีความเหลืองของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	72
4.2	ค่าดัชนีการไหลหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	74
4.3	ค่า LOI ของมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักทั้งที่ไม่เติมและเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10.....	76
4.4	ค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจน ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10 ในขั้นตอนการอัดรีดและขั้นตอนของการฉีดขึ้นรูป.....	78
4.5	ค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจน ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักทั้งที่ไม่เติมและเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10 ในขั้นตอนการฉีด	

		๗
	ชินรูป.....	79
ตารางที่		หน้า
4.6	ผลของปริมาณการเติมดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์รวมทั้งการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อการลุกไหม้ในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94V ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	83
4.7	คุณสมบัติการสลายตัวและปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่ของดินขาวเคโอลิน ทัลก์ ไตรฟีนิลฟอสเฟต พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	84
4.8	ค่า 2θ ของตำแหน่งพีคที่ปรากฏและระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์ (d) ที่ได้จากการคำนวณของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ ดินขาวเคโอลิน ทัลก์ และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์	91

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	สามเหลี่ยมไฟ.....	4
2.2	วงจรกิจกรรมเผาไหม้ของวัสดุพอลิเมอร์.....	5
2.3	กลไกการเผาไหม้และการรวมตัวกันของเคลือบเป็นชั้นป้องกันที่ผิว.....	15
2.4	คาร์บอนนาโนทิวชนิดหลายชั้นและชั้นเดียว.....	16
2.5	โครงสร้างของ Al- และ Zn-isobutyl silsesquioxane.....	16
2.6	โครงสร้างของเคโอดิโนต์.....	18
2.7	รูปร่างอนุภาคดินขาวเคโอดิโน.....	20
2.8	ลักษณะอนุภาคของทัลก์.....	20
2.9	โครงสร้างของทัลก์ (brucite sheet).....	21
2.10	ลักษณะการทดลองและเครื่องมือทดสอบดัชนีออกซิเจนจำกัด.....	24
2.11	การเตรียมอุปกรณ์และการทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 V	26
2.12	Intramolecular back-biting หรือ Intramolecular transfer.....	31
2.13	กลไกการเกิด cyclic oligomers.....	32
2.14	กลไกการเกิด dioxine โดย Hovenkamp และ Munting.....	32
2.15	β -C-H hydrogen transfer.....	32
2.16	การสลายตัวของ ethylene glycol end-group.....	33
2.17	กลไกการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	34
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	46
3.2	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่(Twin Screw Extruder) ของ Thermo scientific รุ่น PRISM TSE 24.....	48
3.3	ช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	49
3.4	เครื่องอัดขึ้นรูปของ Labtech, Samut Prakan/Thailand.....	50
3.5	เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Machine) ของ Topfine รุ่น A-25.....	51
3.6	เครื่องวิเคราะห์ดัชนีออกซิเจนจำกัดของ Stanton Redcroft รุ่น FTA.....	54
3.7	ชุดอุปกรณ์การทดสอบการติดไฟในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94 V.....	55
3.8	เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ ของ Mettler-Toledo รุ่น TGA/SDTA	

	851 ^e	56
รูปที่		หน้า
3.9	เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของ KAYENESS INC. รุ่น 7053.....	57
3.10	ขนาดขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I	58
3.11	เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ของ Lloyd รุ่น LR 100K.....	58
3.12	เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด ของ GOTECH	59
3.13	เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง Lloyd รุ่น Lloyd 500.....	59
3.14	เครื่องวัดขนาดอนุภาคของ Malvern Instruments Ltd. รุ่น Mastersizer 2000	60
3.15	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของ Thermo Nicolet รุ่น NICOLET 6700.....	61
3.16	เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ Philips รุ่น PW 3710.....	61
3.17	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Jeol รุ่น JSM-5800LV.....	62
3.18	เครื่องวัดสีของ Macbeth รุ่น Color-Eye 7000.....	62
4.1	SEM micrograph ของอนุภาค (ก) ดินขาวเคโอลิน (ข) ทัลก์ ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	64
4.2	เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทแกรมของ (ก) ดินขาวเคโอลิน (ข) ทัลก์.....	65
4.3	กราฟการกระจายของขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ไม่ผ่านการ ปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮเลน (ก) ดินขาวเคโอลิน (ข) ทัลก์.....	66
4.4	กราฟการกระจายของขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ผ่านการ ปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮเลน (ก) ดินขาวเคโอลิน (ข) ทัลก์.....	67
4.5	โครงสร้างทางเคมีของ N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane....	69
4.6	FTIR-spectra ของดินขาวเคโอลิน ทัลก์และสารประกอบไฮเลน.....	70
4.7	ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิ เอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	71
4.8	ดัชนีการไหลของมาสเตอร์แบทช์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	74
4.9	ค่าLOI ของมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มี ปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วย สารประกอบไฮเลน ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักทั้งที่ไม่เติมและเติมไตรฟีนิล ฟอสเฟตร้อยละ 10.....	76

รูปที่	หน้า	
4.10	ค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณของดินขาว เคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจน ร้อยละ 2 โดย น้ำหนัก และเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10 ในขั้นตอนการอัดรีดและขั้นตอน ของการฉีดขึ้นรูป.....	78
4.11	ค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณของดินขาว เคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจนร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักทั้งที่ไม่เติมและเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10 ในขั้นตอนการ ฉีดขึ้นรูป.....	80
4.12	ลักษณะการจุดติดไฟและการหลอมหยดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่วินาทีที่ 6.....	82
4.13	TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เติม ดินขาวเคโอลิน.....	85
4.14	TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมทัลก์.....	85
4.15	กราฟความต้านแรงดึงของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	87
4.16	มอดูลัสของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต คอมพาวนด์.....	87
4.17	ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	88
4.18	กราฟความทนแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	89
4.19	กราฟความต้านทานแรงดัดโค้งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	89
4.20	XRD patterns ของดินขาวเคโอลินและทัลก์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิว ด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane.....	94
4.21	XRD patterns ของดินขาวเคโอลินที่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3- aminopropyltrimethoxysilane พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิ	

		ณ
	เอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมดินขาวเคโอลิน.....	95
รูปที่		หน้า
4.22	XRD patterns ของทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมทัลก์.....	95
4.23	SEM micrographs ของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตบริสุทธิ์และมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	97
4.24	SEM micrographs ของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพต (Poly(ethylene terephthalate) or PET) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ในกลุ่มของพอลิเอสเทอร์ ทั้งนี้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติหลายประการ เช่น ทนต่อความร้อนและสารเคมี มีสมบัติเชิงกลดี เป็นต้น จึงทำให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ และการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดอัคคีภัยขึ้นมาพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจะเกิดการหลอมหลอมหลอมหรือติดไฟไหม้หรือติดไฟไหม้ผู้สวมใส่จนอาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ อีกทั้งความร้อนจากพอลิเมอร์ที่หลอมหลอมหลอมลงมายังสามารถทำให้วัสดุเชื้อเพลิงที่อยู่บริเวณใกล้เคียงติดไฟแล้วลุกลามไปอย่างรวดเร็วสร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้บริโภคได้ อีกทั้งปริมาณควันที่ปลดปล่อยออกมาซึ่งมีความหนาแน่นและเป็นอุปสรรคต่อการมองเห็นของผู้ประสพภัยที่จะหาทางหนีรอดออกมาได้ จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีความพยายามในการปรับปรุงพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตให้มีสมบัติทนไฟและต้านการหลอมหลอมที่ดียิ่งขึ้น โดยกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต คือ การเติมสารหน่วงไฟลงในพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตขณะขึ้นรูป โดยสารหน่วงไฟที่ใช้กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสามารถจำแนกเป็น 4 ประเภทหลักๆตามองค์ประกอบทางเคมีได้แก่ สารประกอบแฮโลเจน (halogenated compounds) สารประกอบแฮโลเจน/แอนติโมนี (halogen/antimony compounds) สารประกอบฟอสฟอรัส (phosphorus compounds) และสารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compounds)

การใช้สารหน่วงไฟในกลุ่มแฮโลเจนให้ประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีและมีความคงทนสูง แต่มีข้อเสียคือสารดังกล่าวเป็นสารก่อมะเร็งและเมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดแก๊สแฮโลเจน เช่น ไฮโดรเจนคลอไรด์ (hydrogen chloride, HCl) และไฮโดรเจนโบรไมด์ (hydrogen bromide, HBr) ซึ่งเป็นแก๊สพิษที่เป็นอันตรายต่อชีวิตหากสูดดมเข้าไป ส่งผลให้หลายประเทศได้ยกเลิกการใช้สารหน่วงไฟแฮโลเจน ด้วยเหตุนี้จึงหันมามุ่งเน้นการใช้สารหน่วงไฟในกลุ่มฟอสฟอรัสและสารอนินทรีย์แทน โดยสารหน่วงไฟในกลุ่มฟอสฟอรัสให้ประสิทธิภาพในการหน่วงไฟสูงเนื่องจากมีกลไกการหน่วงไฟทั้งในวัฏภาคแก๊สโดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะเข้าขัดขวางการลุกลามไหม้โดยการจับกับอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้สิ้นสุดลงและในวัฏภาคของแข็งโดยทำให้เกิดชั้นชาร์ที่มีความคงทนต่อความร้อนปกคลุมผิววัสดุและมีการขจัดน้ำออกมา

ส่วนสารประกอบอินทรีย์ซึ่งไม่เป็นพิษ หาได้ง่ายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจะช่วยให้พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตมีความเหนียวเหนียวเพิ่มขึ้นส่งผลให้สามารถต้านการหลอมหยดได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งซาร์ที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการเผาไหม้ยังมีเสถียรภาพที่ดี ชั้นซาร์จะปกคลุมผิวหน้าของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตกันไม่ให้ออกซิเจนและความร้อนจากเปลวไฟผ่านเข้าไปสัมผัสกับเนื้อวัสดุที่อยู่ด้านล่างได้ส่งผลให้พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตติดไฟยากขึ้น นอกจากนี้สารอินทรีย์ดังกล่าวยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลบางประการของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตได้อีกด้วย

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการปรับปรุงสมบัติด้านการหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตด้วยการนำดินขาวเคโอลินและทัลก์ซึ่งเป็นสื่อนำอินทรีย์ในตระกูลซิลิเกตและหาได้ง่ายในประเทศมาใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตร่วมกับการใช้ไตรฟีนิลฟอสเฟต โดยอาศัยกระบวนการผสมแบบหลอมเหลว (melt mixing) ซึ่งได้มีการปรับแต่งพื้นผิวของสารอินทรีย์ด้วยสารประกอบไฮโดรเจนเพื่อช่วยปรับปรุงความสามารถในการกระจายตัวของสารอินทรีย์ทั้งสองในเนื้อของพอลิเมอร์ โดยคาดว่าจะเกิดการทำงานร่วมกันระหว่างสารอินทรีย์ทั้งสองและสารประกอบฟอสฟอรัสในการปรับปรุงสมบัติหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตพร้อมทั้งช่วยเสริมประสิทธิภาพในการกระจายตัวของอนุภาคของสารอินทรีย์ทั้งสองในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาเปรียบเทียบหาปริมาณที่เหมาะสมระหว่างดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ในการเติมแต่งลงในพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตเพื่อปรับปรุงสมบัติหน่วงไฟและต้านการหลอมหยด ความสามารถในการกระจายตัวให้ดีขึ้นรวมทั้งสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ให้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่ใช้ดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ร่วมกับไตรฟีนิลฟอสเฟตเป็นสารเติมแต่ง
2. ทดสอบสมบัติหน่วงไฟและต้านการหลอมหยด สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ได้พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีสมบัติหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดที่ดีขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

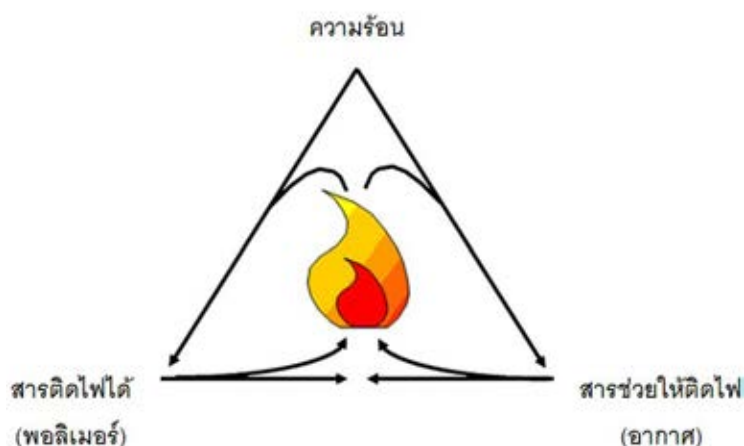
2.1 วงจรการเผาไหม้ของวัสดุพอลิเมอร์ [1-3]

เมื่อพอลิเมอร์ได้รับพลักรความร้อนปริมาณที่มากเพียงพอจากการแผ่รังสีความร้อนของเปลวไฟ จะทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวด้วยความร้อน และปลดปล่อยไอระเหยที่เป็นแก๊ส (volatile gases) คาร์บอนชาร์ที่เป็นของแข็ง (solid carbonaceous char) และควันไฟ (smoke) ซึ่งสารระเหยเหล่านี้ประกอบด้วยไอระเหยและแก๊สหลายชนิดทั้งที่ติดไฟได้ ตัวอย่างสารที่ติดไฟได้ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และตัวอย่างสารที่ติดไฟไม่ได้ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ และ น้ำ เป็นต้น การแพร่ของสารระเหยเหล่านี้จากพอลิเมอร์สู่บริเวณที่มีเปลวไฟแล้วเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศร่วมกับความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากไฟทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากการเผาไหม้ (final combustion products) ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ควัน และมีคาร์บอนมอนอกไซด์เล็กน้อย สำหรับกระบวนการที่จะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องนั้น ปริมาณความร้อนย้อนกลับ (feed-back) จะต้องเพียงพอ และพอลิเมอร์ต้องได้รับความร้อนนั้นอย่างต่อเนื่องจึงจะทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ให้ได้เป็นแก๊สที่ติดไฟได้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักสองประการ คือ **มีสารติดไฟได้ (combustible หรือ reducing agent)** และ **สารที่ทำให้เกิดการติดไฟ (combustive หรือ oxidizing agent)** โดยทั่วไปการเผาไหม้เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนในบรรยากาศปกติ การเผาไหม้ของพอลิเมอร์นั้นโดยปกติแล้วเริ่มจากการที่วัสดุพอลิเมอร์ได้รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนแล้วมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งความร้อนนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่โมเลกุลภายในพอลิเมอร์ สารระเหยที่เกิดจากการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์จะระเหยเข้าสู่อากาศและทำให้เกิดเป็นแก๊สผสมที่เกิดการติดไฟได้ ซึ่งนิยมเรียกสารระเหยที่ติดไฟได้นี้ว่า **เชื้อเพลิง (fuel)** แก๊สนี้จะลุกติดไฟได้เมื่อถึงอุณหภูมิหนึ่งที่สามารถติดไฟได้เอง (auto-ignition temperature) ในอีกกรณีหนึ่งเชื้อเพลิงสามารถที่จะติดไฟได้เองที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ถ้ามีแหล่งความร้อนภายนอกที่มีความเข้มของพลังงานสูง เช่น ประกายไฟ หรือเปลวไฟ เป็นต้น

ช่วงเวลาติดไฟของวงจร (life span of the combustion cycle) ขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาระหว่างที่เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง หากปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาอยู่ในระดับที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของวัสดุของแข็ง ก็จะมีการ

ปลดปล่อยสารที่ติดไฟได้ออกมา ซึ่งวงจรของการติดไฟเรียกว่า **สามเหลี่ยมไฟ (fire triangle)** ดังแสดงในรูปที่ 2.1

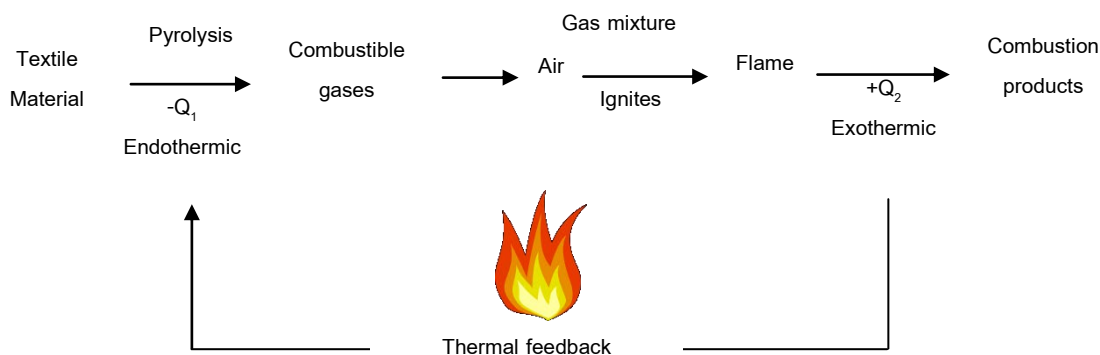


รูปที่ 2.1 สามเหลี่ยมไฟ [1]

กระบวนการเผาไหม้ประกอบด้วยขั้นตอนย่อยๆหลายขั้นตอน โดยกระบวนการเผาไหม้ นับว่าเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและประกอบด้วยปฏิกิริยาต่างๆมากมาย อีกทั้งยังเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์การถ่ายโอนในวัฏภาคของแข็ง แก๊ส และวัฏภาคระหว่างพื้นผิว (transport phenomena in the solid, gaseous and interfacial phases) อันเกิดจากการกระจายพลังงาน ความร้อนของแหล่งความร้อนภายนอก ซึ่งอาจเกิดจากการแผ่รังสีความร้อน การพาความร้อน และการนำความร้อน หรือความร้อนอาจเกิดจากกระบวนการทางเคมี เช่น การหมัก หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นต้น โดยในวัสดุพอลิเมอร์ปริมาณของความร้อนที่สามารถทำให้เกิดการเผาไหม้ได้นั้นจะแปรผันไปตามลักษณะทางกายภาพ (physical characteristics) ของพอลิเมอร์ เมื่อให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline thermoplastics) พอลิเมอร์จะเกิดการอ่อนตัว หลอมเหลว และหลอมหยุด ทั้งนี้พลังงานที่สะสมอยู่ในพอลิเมอร์ขณะที่เกิดการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับ ความจุความร้อนสะสม (heat-storage capacity) เอนทัลปีของการหลอมละลาย (enthalpy of fusion) และระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของความร้อน (heat flow rate) ในทางตรงกันข้าม พอลิเมอร์ชนิดอสัณฐานและเทอร์โมเซตพอลิเมอร์จะไม่มีจุดหลอมเหลว แต่ความร้อนจะทำให้เกิดการสลายตัวได้โดยตรง

การสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ เช่น การแตกออกของพันธะโคเวเลนต์ จัดเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งจำเป็นจะต้องใส่พลังงานเข้าไปภายในระบบ โดยพลังงานดังกล่าวจะต้องมีค่ามากกว่าพลังงานพันธะ โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าประมาณ 200 – 400 kJ/mol สำหรับ

คาร์บอน-คาร์บอน พอลิเมอร์ (c-c polymers) และกลไกการสลายตัวของพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่แล้วจะขึ้นอยู่กับพันธะที่อ่อนแอที่สุด (weakest bond) เพราะการสลายตัวจะเกิดที่พันธะนี้ก่อน อีกทั้งการมีหรือไม่มีออกซิเจนในวัฏภาคของแข็งและวัฏภาคแก๊ส โดยทั่วไปแล้วการสลายตัวทางความร้อนเป็นผลมาจากการรวมตัวกันของสิ่งที่เกิดขึ้นจากความร้อนและออกซิเจน (combination of the effect of heat and oxygen) รูปที่ 2.2 แสดงวงจรการเผาไหม้ของวัสดุพอลิเมอร์



รูปที่ 2.2 วงจรของการเผาไหม้ของวัสดุพอลิเมอร์ [2]

การหยุดยั้งหรือการยับยั้งกระบวนการเผาไหม้ของพอลิเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับกลไกการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟ ซึ่งแบ่งเป็นการหน่วงไฟทางกายภาพและการหน่วงไฟทางเคมี ซึ่งทั้งสองกลไกนี้จะเข้าไปรบกวนกระบวนการต่างๆในการเผาไหม้ของพอลิเมอร์ดังที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.2 กลไกการหน่วงไฟ [1-4]

กลไกการหน่วงไฟเป็นสิ่งที่จูงใจให้เกิดการยับยั้งหรือหยุดกระบวนการเผาไหม้ของวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งกลไกของการหน่วงไฟสามารถแบ่งได้เป็นกลไกการหน่วงไฟทางกายภาพและทางเคมี โดยมีสาระสำคัญดังต่อไปนี้

2.2.1 การหน่วงไฟทางกายภาพ (physical action)

การสลายตัวแบบดูดความร้อนของสารหน่วงไฟบางชนิดจะเหนี่ยวนำให้เกิดการลดลงของอุณหภูมิโดยสารหน่วงไฟจะทำหน้าที่ดูดซับพลังงานความร้อนไว้ กระบวนการนี้ยังรวมไปถึงการเย็นตัวของสารตัวกลางในปฏิกิริยาภายใต้คุณสมบัติของการเผาไหม้ของพอลิเมอร์ ตัวอย่างของสารและกลไกในระบบนี้ เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ หรือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสารทั้งสองนี้จะปลดปล่อยไอน้ำออกมาที่อุณหภูมิประมาณ 200 และ 300 องศาเซลเซียสตามลำดับ ทำให้อุณหภูมิจนของระบบลดลง โดยทั่วไปแล้วเราจะเรียกกลไกของปฏิกิริยาอย่างนี้ว่า

heat sink หรือเมื่อสารหน่วงไฟเกิดการสลายตัวแล้วเกิดเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น H_2O , CO_2 และ NH_3 เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของแก๊สที่สามารถติดไฟได้ถูกเจือจาง การติดไฟจึงเกิดได้ยากขึ้น

นอกจากนี้สารหน่วงไฟบางชนิดยังทำให้เกิดชั้นของของแข็งหรือแก๊สที่รอยต่อระหว่างวัฏภาคของแข็ง (พอลิเมอร์) กับวัฏภาคแก๊ส (อากาศ) ในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้แทนการเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนของวัฏภาคของแข็ง ชั้นป้องกันที่เกิดขึ้นนี้ทำหน้าที่จำกัดการถ่ายโอนมวล เช่น แก๊สระเหยที่สามารถติดไฟได้และออกซิเจน ผลที่เกิดขึ้น คือ ปริมาณของแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ลดลงไปเป็นอย่างมาก นอกจากนี้แก๊สที่เป็นเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ยังถูกแยกออกจากแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศ ซึ่งเป็นการป้องกันการเกิดกระบวนการเผาไหม้ได้เป็นอย่างดี

2.2.2 การหน่วงไฟทางเคมี (chemical action)

กลไกการหน่วงไฟทางเคมีนี้เกิดขึ้นได้ในวัฏภาคแก๊สหรือวัฏภาคของแข็ง (condense phase) กลไกของการหน่วงไฟเกิดจากการที่สารหน่วงไฟสลายตัวแล้วปลดปล่อยอนุมูลที่มีความจำเพาะ (specific radicals) เช่น $Cl\cdot$ และ $Br\cdot$ ออกมาในวัฏภาคแก๊ส ซึ่งอนุมูลเหล่านี้สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ เช่น $H\cdot$ และ $OH\cdot$ แล้วกลายเป็นโมเลกุลที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ หรือทำให้ความว่องไวต่อปฏิกิริยาลดลง การดัดแปรวิถีของปฏิกิริยาการเผาไหม้ (combustion reaction pathway) ทำให้ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาลดลง อีกทั้งยังทำให้อุณหภูมิและปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงลดลงด้วยเช่นกัน

สำหรับในวัฏภาคของแข็งนั้น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากสารหน่วงไฟสามารถเกิดได้ 2 แบบ คือ

1. สารหน่วงไฟเข้าเร่งให้เกิดการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้พอลิเมอร์หลอมหาย ซึ่งเป็นการย้ายมวลของพอลิเมอร์ออกจากบริเวณที่มีการเผาไหม้

2. ในกรณีนี้สารหน่วงไฟเข้าไปทำให้เกิดการฟอร์มคาร์บอน (formation of a carbonized) หรือเกิดเป็นชั้นใสคล้ายแก้ว (vitreous layer) ที่ผิวของพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่สลายตัว ชาร์หรือชั้นใสที่เกิดขึ้นนี้ทำหน้าที่เสมือนเป็นชั้นของฉนวนที่กั้นระหว่างวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของแข็ง

เนื่องจากสารหน่วงไฟมีหลายชนิด กลไกการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟบางชนิด อาจเป็นกลไกการหน่วงไฟทางกายภาพหรือทางเคมีเพียงอย่างเดียว หรืออาจมีกลไกการหน่วงไฟ ทั้งสองแบบก็เป็นได้ โดยจะได้กล่าวรายละเอียดของสารหน่วงไฟชนิดต่างๆในหัวข้อถัดไป

2.3 สารหน่วงไฟ [1-5]

ในกรณีที่เกิดอัคคีภัยวัสดุสิ่งทอที่มีพอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบ เช่น เบาะ พรม ฝ้าย ผ้า และเสื้อผ้าต่างๆ จะเป็นเชื้อเพลิงที่ดี ดังนั้น จึงจำเป็นต้องปรับปรุงวัสดุให้มีความต้านทานต่อการ ลุกไหม้ รวมทั้งระดับหรือปริมาณควันและแก๊สพิษที่ปลดปล่อยออกมาให้น้อยที่สุด ซึ่งการปรับปรุง สามารถทำได้สองวิธี คือ การพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดใหม่และการพัฒนาสารหน่วงไฟสำหรับ พอลิเมอร์

วิธีการลดการติดไฟโดยสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ให้มีความทนความร้อนได้สูง อาจมี ปัญหาด้านการขึ้นรูปและมีสมบัติไม่เหมาะสมกับการใช้งาน อีกทั้งยังทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น อีกด้วย

ออกซิเจนและไฮโดรเจนในพอลิเมอร์จะเพิ่มความสามารถในการติดไฟ ในขณะที่อะตอม ของธาตุแฮโลเจน (halogen) ช่วยยับยั้งการติดไฟได้ ดังนั้น แฮโลจีเนตเตดพอลิเมอร์ (halogenated polymer) จึงมีความสามารถต้านทานการติดไฟได้ดีกว่าไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์ (hydrocarbon polymer)

1. เข้าไปยังยังในปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิเมอร์ หรือขัดขวางกลไกการเผาไหม้
2. ลดอัตราการเกิดแก๊สเชื้อเพลิง และทำให้เกิดสารที่มีเสถียรภาพทางความร้อน สูงขึ้นมาแทน
3. แตกสลายหรือเปลี่ยนแปลงสถานะ หรือเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนที่ได้จาก เปลวไฟเข้าไป ทำให้อุณหภูมิที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ลดลง
4. เป็นฉนวนความร้อนบนผิวของพอลิเมอร์ โดยเร่งปฏิกิริยาการเกิดชาร์ (char) บนผิวของพอลิเมอร์ในบริเวณที่ได้รับความร้อน ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเจนและความร้อน เข้าไปถึงพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่อยู่ด้านใน
5. แตกสลายให้สารระเหยเข้าไปในเปลวไฟและกำจัดอนุมูลอิสระ (free radical) ที่เกี่ยวข้องกับการปฏิกิริยาลุกไหม้

การใช้สารหน่วงไฟอาจทำได้ 2 วิธี คือ เป็นสารเติมแต่ง (additive) หรือเป็น reactive components

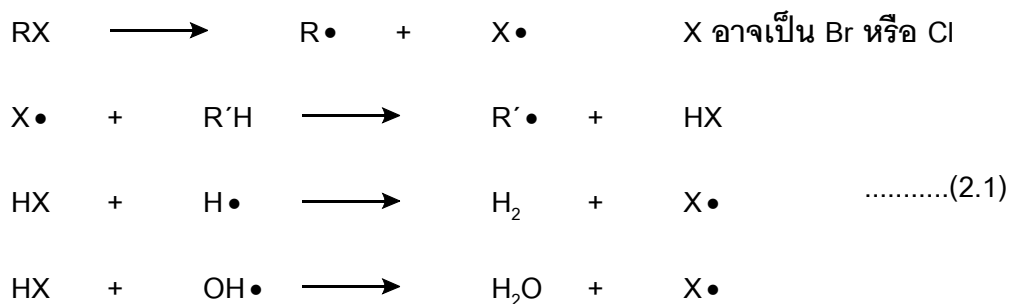
- **การใช้เป็นสารเติมแต่ง** ทำได้โดยผสมพอลิเมอร์กับสารหน่วงไฟ ซึ่งวิธีนี้ทำได้ง่าย ไม่ยุ่งยากในการผลิต แต่อาจมีข้อด้อยอยู่บ้าง คือ สารหน่วงไฟอาจหลุดหายไปภายใต้สภาวะของการใช้งานหรือเมื่อนำไปซ้กล้าง

- **การใช้เป็น reactive component** สารหน่วงไฟจะเกิดพันธะกับสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วมักใช้กับเทอร์โมพลาสติก โดยอาจใช้เป็นมอนอเมอร์ร่วมในการผลิต หรืออาจให้เข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ในขั้นตอนของการเชื่อมขวางโมเลกุล หรือขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งของการผลิตก็ได้ ข้อดีคือ จะติดแน่นกับพอลิเมอร์อย่างถาวร ไม่มีปัญหาการถูกระบาย ส่วนข้อเสียคือ ทำต้องปรับปรุงขั้นตอนการผลิต และอาจทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป เพราะโครงสร้างเปลี่ยนไป และยากที่จะใส่โบรมีน (Br), คลอรีน (chlorine) หรือฟอสฟอรัส (phosphorus) เข้าไปในโครงสร้างได้มากพอที่จะทำให้มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟ

การจำแนกสารหน่วงไฟตามประเภทขององค์ประกอบสามารถจำแนกได้ ดังนี้

2.3.1 สารหน่วงไฟประเภทแฮโลเจน (halogen – based flame retardants)

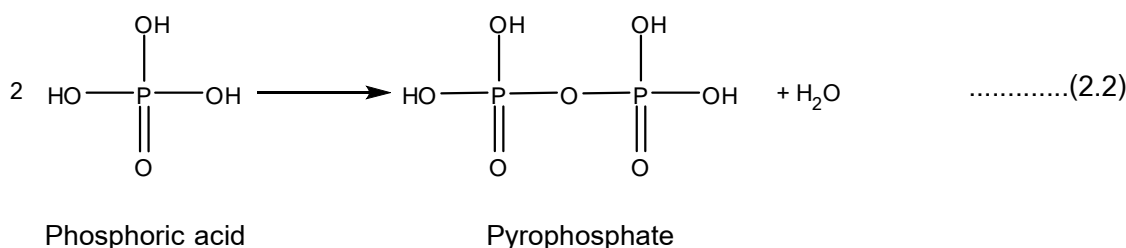
ประสิทธิภาพในการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟประเภทแฮโลเจนนั้นขึ้นอยู่กับประเภทของธาตุแฮโลเจนเป็นสำคัญ สารประกอบประเภทฟลูออรีนและไอโอดีนไม่สามารถนำมาใช้ได้เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆของพอลิเมอร์ขณะเกิดการเผาไหม้ ทั้งนี้ สารประกอบฟลูออรีนมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีมากกว่าพอลิเมอร์ทั้งหลาย อีกทั้งยังไม่เกิดการปลดปล่อยอนุมูลของธาตุแฮโลเจน (halogen radical) ในช่วงอุณหภูมิเดียวกันหรือต่ำกว่า อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ ส่วนสารประกอบประเภทไอโอดีนนั้นมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำมาก ซึ่งต่ำกว่าพอลิเมอร์มาก เพราะฉะนั้นจึงมีการปลดปล่อยสารพวกแฮโลเจน (halogenated species) ในระหว่างกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ (polymer processing) สำหรับโบรมีนและคลอรีนนั้นสามารถเกิดการปลดปล่อยอนุมูลของธาตุแฮโลเจนออกมาได้อย่างรวดเร็ว ขณะเกิดการเผาไหม้ของพอลิเมอร์เนื่องจากค่าพลังงานพันธะระหว่างธาตุทั้งสองกับคาร์บอนอะตอมมีค่าต่ำ สำหรับกลไกการหน่วงไฟจะเกิดขึ้นในวัฏภาคแก๊สแสดงได้ดังในสมการที่ (2.1) ดังนี้



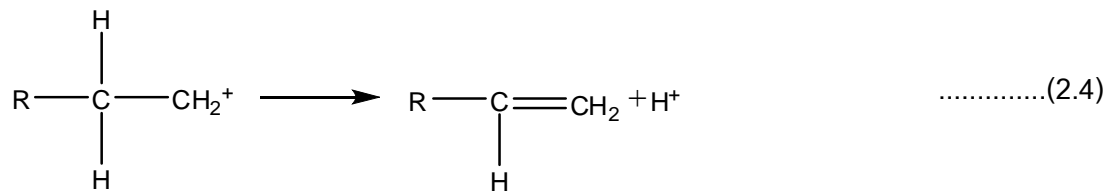
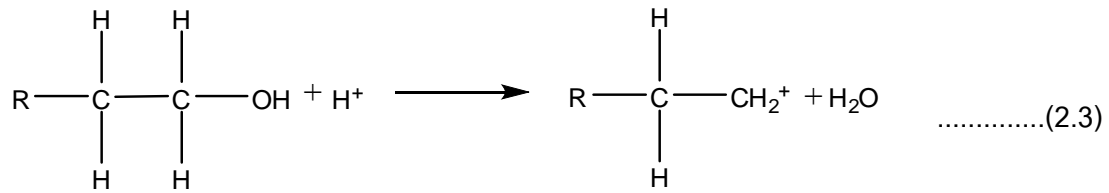
2.3.2 สารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัส (phosphorous – based flame retardants)

สารหน่วงไฟประเภทนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางและมักใช้กับพอลิเมอร์ที่มีปริมาณออกซิเจนหรือไนโตรเจนสูง เช่น พอลิเอสเตอร์ พอลิเอไมด์ เซลลูโลสและอนุพันธ์ของเซลลูโลส เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้กับพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถเกิดขาร์ได้เมื่อเกิดการเผาไหม้ อันเกิดจากการที่พอลิเมอร์นั้นไม่มีหมู่ที่ว่องไวและเหมาะสมต่อการเกิดขาร์ ด้วยเหตุนี้พอลิเมอร์ในกลุ่มดังกล่าวจึงจำเป็นต้องเติมสารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัสลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติหน่วงไฟ ตัวอย่างสารหน่วงไฟที่นิยมใช้ ได้แก่ ฟอสเฟต ฟอสโฟเนต ฟอสพิเนต ฟอสฟินออกไซด์ และฟอสฟอรัสแดง ซึ่งสารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัสนี้สามารถใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิเมอร์หรือใช้สังเคราะห์ร่วมกับมอนอเมอร์ชนิดอื่นให้ได้เป็นพอลิเมอร์ก็ได้

สำหรับกลไกการหน่วงไฟของฟอสฟอรัสนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในวัฏภาคของของแข็งและวัฏภาคแก๊ส โดยในวัฏภาคของของแข็งเกิดขึ้นโดยการที่สารประกอบฟอสฟอรัสเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนแล้วเกิดกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) จากนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของกรดฟอสฟอริกไปเป็นไพโรฟอสเฟต (pyrophosphate) อย่างรวดเร็วพร้อมกับการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมาซึ่งสามารถเจือจางความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ได้ ดังสมการที่ (2.2)



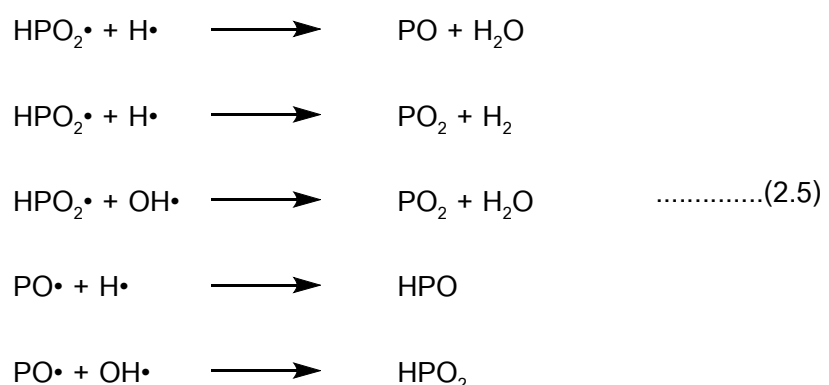
ในอีกกรณีหนึ่งกรดฟอสฟอริกและไพโรฟอสเฟตจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (dehydration) ของเทอร์มินัลแอลกอฮอล์ (terminal alcohol) แล้วเกิดเป็นคาร์โบแคทไอออน (carbocation) และสารประกอบคาร์บอนที่มีพันธะคู่ในโครงสร้างของโมเลกุล ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)



ที่อุณหภูมิสูงกรดฟอสฟอริกชนิดออร์โธ (orthophosphoric acid) จะเปลี่ยนไปเป็นกรดฟอสฟอริกชนิดเมตา (metaphosphoric acid) ที่มีโครงสร้างเป็นเหมือนพอลิเมอร์ “(PO₃H)_n” ส่วนฟอสเฟตแอนไฮไดรด์ (ไพโรฟอสเฟตและพอลิฟอสเฟต) จะเข้ารวมตัวกันกลายเป็นชั้นคาร์บอนซาร์ ซึ่งชั้นคาร์บอนซาร์นี้จะแยกตัวออกมาและป้องกันพอลิเมอร์จากเปลวไฟ จำกัดการเกิดเป็นไอระเหยของสารเชื้อเพลิงและป้องกันการเกิดอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้น จำกัดการแพร่ผ่าน (diffusion) ของออกซิเจน และเป็นฉนวนกันความร้อนให้กับพอลิเมอร์

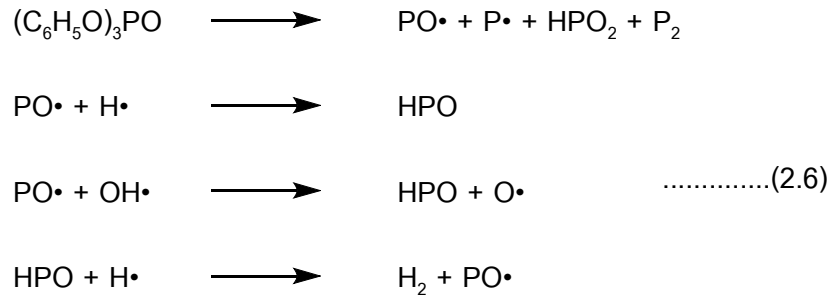
กลไกการหน่วงไฟในวัฏภาคแก๊สของสารประกอบประเภทฟอสฟอรัสนั้นเกิดจากการสลายตัวแล้วได้เป็นไอระเหยของอนุมูลที่ว่องไว เช่น PO₂•, PO• และ HPO• ซึ่งจะทำหน้าที่ดักจับอนุมูลของ H• และ OH• โดยอนุมูลของสารประกอบฟอสเฟตนี้มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟสูงสุดซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วมีค่าสูงกว่าอนุมูลของโบรมีน 5 เท่า และสูงกว่าอนุมูลของคลอรีน 10 เท่า

กลไกการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัส แสดงได้ดังสมการที่ (2.5)



ตัวอย่างของสารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัสนี้ เช่น ไตรฟีนิลฟอสเฟต (triphenyl phosphate (C₆H₅)₃PO) ซึ่งกลไกการหน่วงไฟเกิดขึ้นเกิดได้ทั้งในวัฏภาคของแข็งและวัฏภาค

แก๊ส โดยเมื่อไตรฟีนิลฟอสเฟตได้รับความร้อนแล้วสลายตัวจะปลดปล่อยอนุมูลอิสระของ $\text{PO}\cdot$ และไอระเหยของ $\text{P}\cdot$, HPO_2 และ P_2 เล็กน้อย โดย $\text{PO}\cdot$ มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับ $\text{H}\cdot$ และ $\text{OH}\cdot$ ซึ่งเป็นการทำให้กระบวนการเผาไหม้สิ้นสุดลงดังแสดงในสมการที่ (2.6)



HPO ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยานี้มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาที่น้อยกว่า $\text{H}\cdot$ และ $\text{OH}\cdot$ ด้วยเหตุนี้การเผาไหม้ของเปลวไปจึงถูกจำกัด ส่วนกลไกถัดมาเกิดขึ้นในวัฏภาคแก๊สซึ่งเกิดจากการที่ไอระเหยของฟอสฟอรัสปกคลุมผิวหน้าของวัสดุพอลิเมอร์ไว้ การที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะเมื่อไตรฟีนิลฟอสเฟตสลายตัวแล้วจะปลดปล่อยไอระเหยของสารที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก ซึ่งไอระเหยนี้เป็นโมเลกุลของสารหนักจึงปกคลุมที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์ไว้จึงเป็นการป้องกันการอพยพผ่านของออกซิเจนเข้าสู่ภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้

นอกจากนี้ฟอสฟอรัสในโมเลกุลของไตรฟีนิลฟอสเฟตยังเร่งให้เกิดชั้นชาร์ที่ผิวหน้าของวัสดุพอลิเมอร์ซึ่งชั้นชาร์นี้ทำหน้าที่ป้องกันการแพร่ผ่านของไอระเหยที่ติดไฟได้จากด้านในของพอลิเมอร์เมทริกซ์เข้าสู่เปลวไฟ รวมทั้งยังช่วยเพิ่มความหนืดและเร่งให้เกิดการหลอมหดยดของพอลิเมอร์อีกด้วย

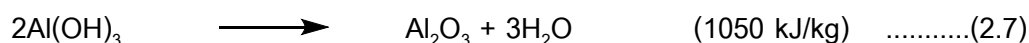
2.3.3 สารหน่วงไฟประเภทไนโตรเจน (nitrogen – based flame retardants)

สารหน่วงไฟประเภทนี้ทำหน้าที่ในรูปของการเกิดอินทูเมสเซนส์ (intumescent) คือ เป็นลักษณะที่เกิดการพองตัวเป็นชั้นของชาร์ที่มีลักษณะคล้ายโฟม ทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและการสัมผัสกับออกซิเจนให้แก่วัสดุ สารประกอบไนโตรเจนหากนำมาใช้เพียงชนิดเดียวจะไม่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีหรืออาจต้องใช้มากถึง 17% จึงจะช่วยให้เซลล์ลูโลสมีความสามารถในการหน่วงไฟได้ปานกลาง สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ เมลามีน เมลามีนไฮยานูเรต เมทิลอลเมลามีน สารประกอบกัวนิตีน ยูเรีย ไชยานาไดเอไมด์ เป็นต้น

2.3.4 สารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์ (inorganic flame retardants)

สารประกอบอนินทรีย์ที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟหรือใช้เป็นองค์ประกอบร่วมในระบบหน่วงไฟกับสารประกอบโบรมีน สารประกอบฟอสฟอรัส หรือสารประกอบไนโตรเจน มีหลายชนิด เช่น แกร์ไฟต์ ซิลิกา โลหะ โลหะไฮดรอกไซด์ และอลูมิเนียมซิลิเกตเคลย์ เป็นต้น สารหน่วงไฟประเภทนี้ นอกจากจะมีราคาถูก ไม่เป็นพิษ มีสมบัติในการหน่วงไฟแล้ว ยังมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้อีกด้วย อย่างไรก็ตามสารประเภทนี้มีความคงทนต่ำ สารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์สามารถจำแนกได้ดังนี้

2.3.4.1 โลหะไฮดรอกไซด์ (metal hydroxide) โดยทั่วไปสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์เหล่านี้ถูกใช้เป็นสารหน่วงไฟอย่างกว้างขวาง กลไกการหน่วงไฟของสารประเภทนี้เกิดขึ้นโดยการสลายตัวแบบดูดความร้อนแล้วปลดปล่อยน้ำออกมาที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการขึ้นรูปพอลิเมอร์แต่ยังอยู่ในช่วงของอุณหภูมิสลายตัวของพอลิเมอร์ สารหน่วงไฟโลหะไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้คือ อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ (aluminium tri-hydroxide; ATH) และแมกนีเซียมไดไฮดรอกไซด์ (magnesium di-hydroxide; MDH) ตัวอย่างการสลายตัวของสารหน่วงไฟประเภทนี้ เช่น อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ เมื่ออะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์เกิดการสลายตัวทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 180 ถึง 200 องศาเซลเซียส ก็จะปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำเข้าสู่ระบบการเผาไหม้และกลายเป็นอะลูมินา ดังสมการที่ 2.7



อย่างไรก็ตามการใช้สารหน่วงไฟประเภทนี้จำเป็นจะต้องใช้ในปริมาณมากจึงจะช่วยปรับปรุงสมบัติหน่วงไฟของพอลิเมอร์ได้ดี ตัวอย่างเช่นจำเป็นจะต้องใช้อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์สูงถึงร้อยละ 75 เพื่อให้ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (LOI) ของเอทิลีนไวนิลแอซิเตต (EVA) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกร้อยละ 50 นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดการใช้งานโดยสารหน่วงไฟประเภทนี้สามารถใช้ได้กับพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิของการขึ้นรูปไม่สูงมากนัก เช่น เอทิลีนไวนิลแอซิเตตและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นต้น

2.3.4.2 ไฮดรอกซีคาร์บอเนต (hydroxycarbonate) สารหน่วงไฟประเภทนี้มีกลไกการหน่วงไฟโดยปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ระบบการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง สารหน่วงไฟประเภทนี้มีเพียงแมกนีเซียมคาร์บอเนต (magnesium carbonate; $\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$) และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate; $\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$) เท่านั้นที่สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า

1,000 องศาเซลเซียส โดยแมกนีเซียมคาร์บอเนตมีอุณหภูมิของการสลายตัวต่ำที่สุดที่ประมาณ 550 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามสารหน่วงไฟประเภทนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้เท่าใดนัก

2.3.4.3 บอเรต (borate) สารหน่วงไฟประเภทนี้เป็นสารเติมแต่งหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์อีกประเภทหนึ่ง โดยเฉพาะซิงค์บอเรต (zinc borate) เป็นที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งซิงค์บอเรตมีสูตรโมเลกุลเป็น $2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$ โดยอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของซิงค์บอเรตอยู่ในช่วง 290 ถึง 450 องศาเซลเซียส โดยจะปลดปล่อยน้ำ กรดบอริกและโบรอนออกไซด์ (B_2O_3)

โบรอนออกไซด์ (B_2O_3) ละลายตัวได้ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และไหลได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นชั้นป้องกันลักษณะคล้ายแก้ว (protective vitreous layer) สำหรับการใส่สารหน่วงไฟประเภทบอเรตในพอลิเมอร์ที่มีอะตอมของออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ กรดบอริกที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของบอเรตจะทำพอลิเมอร์สลายตัวแล้วเกิดเป็นชั้นคาร์บอนซึ่งชั้นคาร์บอนนี้จะทำหน้าที่ป้องกันความร้อนและออกซิเจนรวมทั้งป้องกันการปลดปล่อยแก๊สที่ติดไฟได้อีกด้วย

2.3.4.4 สารประกอบซิลิกอน (silicon compounds)

การเติมสารประกอบซิลิกอนเพียงเล็กน้อย สามารถปรับปรุงสมบัติหน่วงไฟของพอลิเมอร์ได้ ตัวอย่างสารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ ซิลิโคน ซิลิกา ออร์แกโนซิลิโคน และซิลิเกต เป็นต้น ซึ่งการใช้งานสารประกอบซิลิกอนนี้สามารถผสมเข้าไปในเนื้อของพอลิเมอร์หรืออาจนำไปสังเคราะห์ร่วมกับมอนอเมอร์ชนิดอื่นให้ได้เป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer) ได้ ตัวอย่างการใช้งานสารหน่วงไฟประเภทซิลิกอนมีดังนี้

● ซิลิโคน (silicone)

ซิลิโคนมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีเยี่ยมและต้านทานความร้อนได้ดี ปลดปล่อยแก๊สพิษในปริมาณที่น้อยมากขณะเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน การใช้งานซิลิโคนสามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์ได้โดยตรง (direct blending) หรือนำไปสังเคราะห์ร่วมกับมอนอเมอร์ให้ได้เป็นบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (block/graft copolymer) ซึ่งซิลิโคนจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและความทนทานความร้อนที่อุณหภูมิสูงให้กับพอลิเมอร์ อีกทั้งยังจำกัดการปลดปล่อยสารพิษที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิเมอร์อีกด้วย

- ซิลิกา (silica)

การนำซิลิกาไปใช้ร่วมกับพอลิเมอร์พบว่าการใช้ซิลิกาช่วยลดอัตราการปลดปล่อยความร้อน (heat release rate; HRR) ได้ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนเนื่องจากทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะเกิดไฟโรไลซิสเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งทำให้ไอระเหยแพร่ผ่านได้ยากและยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์อีกด้วย

2.3.4.5 อนุภาคขนาดนาโน (nanometric particles)

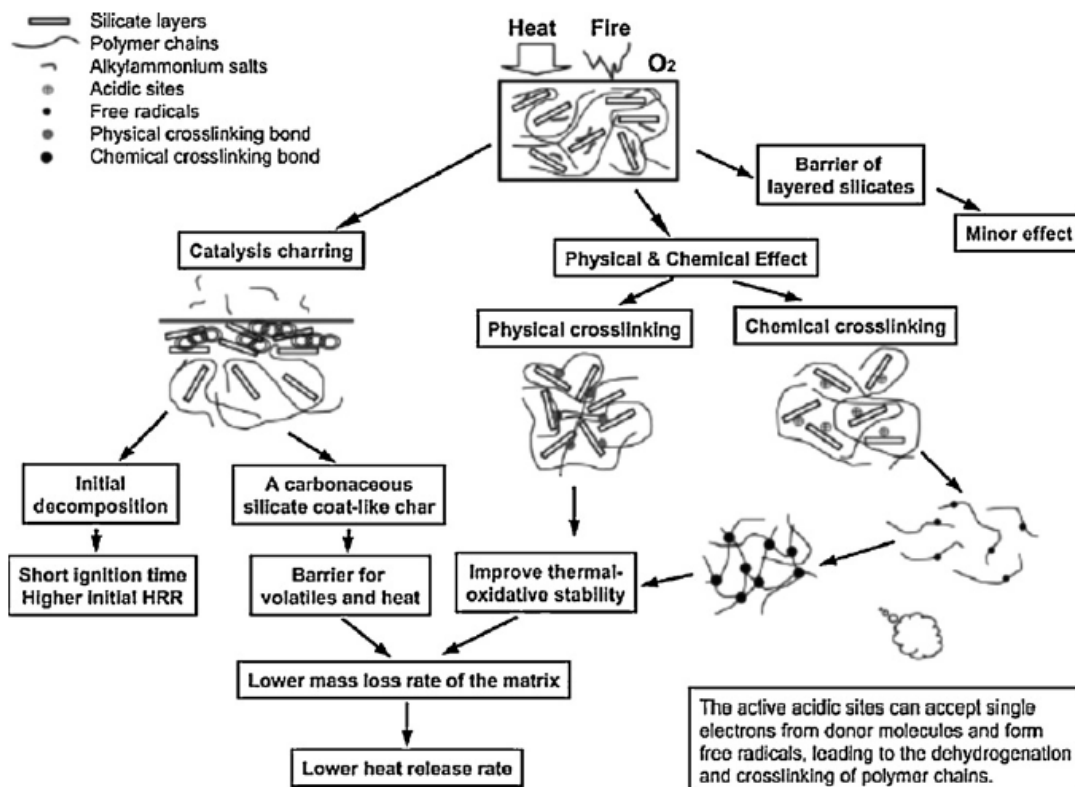
การเติมอนุภาคขนาดนาโนลงไปพอลิเมอร์สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และต้านทานต่อไฟได้ดีขึ้นโดยปริมาณการใช้ไม่มากนัก เนื่องจากพื้นที่ผิวของอนุภาคมีค่าสูงจึงเข้ากันกับพอลิเมอร์ได้ดี ซึ่งอนุภาคดังกล่าวที่นำมาใช้อาจมีรูปร่างของอนุภาคได้หลายแบบ เช่น รูปร่างแบบแผ่นบางและแบบเส้นใย เป็นต้น

การนำอนุภาคขนาดนาโนมาใช้พัฒนาสมบัติหนองไฟของพอลิเมอร์นั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงโครงสร้างทางเรขาคณิตและโครงสร้างทางเคมีของสารซึ่งเป็นองค์ประกอบของอนุภาคขนาดนาโนดังกล่าว ตัวอย่างของอนุภาคขนาดนาโนที่ใช้เป็นสารหนองไฟมีดังนี้

1) นาโนเคลย์ (nanoclays)

การใช้นาโนเคลย์เป็นสารหนองไฟในพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการผสมลงไปเนื้อของพอลิเมอร์ได้โดยตรงขณะทำการขึ้นรูป การจะทำให้นาโนเคลย์มีประสิทธิภาพในการหนองไฟที่ดีจำเป็นต้องทำให้อนุภาคของนาโนเคลย์กระจายตัวได้ดีในเนื้อของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังอาจทำการดัดแปรนาโนเคลย์โดยการเปลี่ยนไอออนที่อยู่ในชั้นผลึกของเคลย์ด้วย

การเติมนาโนเคลย์ลงไปแม้เพียงปริมาณเล็กน้อยก็ช่วยทำให้เกิดชั้นป้องกันความร้อนและไฟ (protective layer) ขณะที่เกิดการเผาไหม้ได้ ซึ่งกลไกการเกิดชั้นป้องกันดังกล่าวนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3



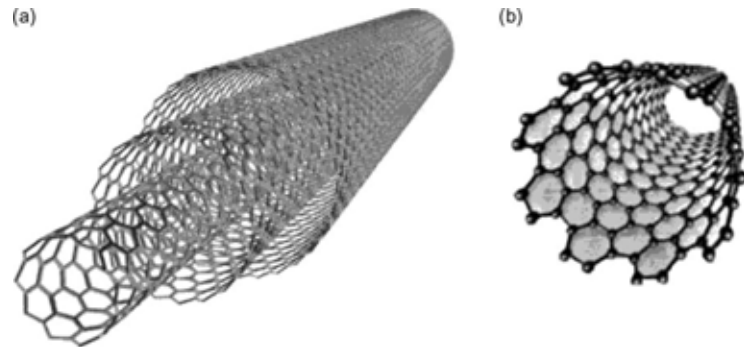
รูปที่ 2.3 กลไกการเผาไหม้และการรวมตัวกันของเคลือบเป็นชั้นป้องกันที่ผิว [6]

2) ท่อคาร์บอนนาโน (carbon nanotubes)

ท่อคาร์บอนนาโน ที่ใช้ร่วมกับพอลิเมอร์นั้นช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ได้ในหลายด้าน เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติด้านการไหล และสมบัติด้านการหน่วงไฟ ซึ่งการใช้ท่อคาร์บอนนาโนปริมาณเพียงเล็กน้อย (อาจน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์) ก็สามารถปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้นได้

ท่อคาร์บอนนาโน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

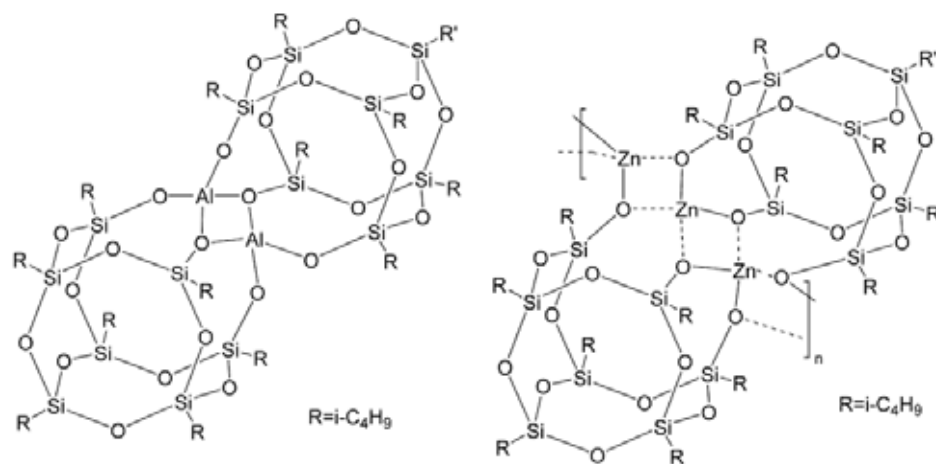
- พวกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก คือ ขนาด 1 – 2 นาโนเมตร พวกนี้จะมีเพียงชั้นเดียว (single-walled nanotubes: SWNTs)
- พวกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ คือ ขนาด 10 – 100 นาโนเมตร พวกนี้จะมีจำนวนชั้นหลายชั้น (multi-walled nanotubes: MWNTs)



รูปที่ 2.4 คาร์บอนนาโนทิวชนิด (a) หลายชั้น และ (b) ชั้นเดียว

3) nanoscale particulate additives

สารหน่วงไฟกลุ่มนี้ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กของออกไซด์ของโลหะ (metal oxides) ซิลิกา (silica) และ polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS) ซึ่งสารเหล่านี้ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและเพิ่มสมบัติการหน่วงไฟของพอลิเมอร์ได้ ในรูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของ POSS บางชนิด



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ Al- และ Zn-isobutyl silsesquioxane

2.3.4.6 **อลูมิโนซิลิเกตเคลย์ (aluminosilicate clay)** เป็นสินแร่ที่ได้จากธรรมชาติ (mineral clay) ซึ่งในปัจจุบันนอกจากจะถูกนำมาใช้เป็นสารตัวเติมแล้วยังถูกนำมาใช้เป็นสารหน่วงไฟในพอลิเมอร์อีกด้วย แต่ถึงกระนั้นก็ยังไม่สามารถนำมาใช้เป็นสารหน่วงไฟสำหรับพอลิเมอร์ในทางการค้าได้ ในที่นี้จะกล่าวถึงดินขาวเคโอลินและทัลก์เป็นสำคัญ

2.3.4.6.1 ดินขาวเคโอลิน (Kaolin) [7-9]

2.3.4.6.1.1 พื้นฐานเกี่ยวกับดินขาวเคโอลิน

คำว่า “kaolin” เป็นคำที่มาจากภาษาจีนคำว่า “kaoling” หมายความว่า “ภูเขาสูง” ซึ่งเป็นแหล่งที่มาของดินขาวเคโอลิน ในประเทศอังกฤษเรียกดินขาวเคโอลินว่า “china clay” ส่วนในสหรัฐอเมริกาเรียกดินที่หลังจากการเผาแล้วที่มีสีขาวนี้ว่า “ดินขาว”

ดินขาวเคโอลิน (Kaolin) เป็นดินที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ มีสีขาวทั้งขณะแห้งและหลังจากเผา นอกจากนี้จะใช้เป็นส่วนผสมในเนื้อดินปั้นแล้ว ยังใช้เป็นสารตัวเติม และสารเคลือบผิว ในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและยาง ใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ เป็นต้น โดยประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณดินขาวเคโอลินทั้งหมดอยู่ในอุตสาหกรรมกระดาษ และในอุตสาหกรรมยาก็ยังใช้ดินขาวเคโอลินเป็นสารตัวเติมมากเป็นอันดับสองรองจากเขม่าดำ (carbon black)

แหล่งที่พบดินขาวเคโอลินอาจแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. **แหล่งต้นกำเนิด** เป็นแหล่งที่เดิมเป็นแหล่งของหินเพกมาไทต์ (pegmatite) หินนี้ประกอบด้วยเฟลด์สปาร์ หรือแร่ฟันม้า (feldspar) และควอตซ์ (quartz) ดินขาวเคโอลินเกิดจากการผุพังอยู่กับที่ของหินเพกมาไทต์หรือด้วยวิธีการอื่นๆ

2. **แหล่งสะสมที่ลุ่ม** เกิดจากกระแสน้ำพัดเอาดินดินขาวเคโอลินจากแหล่งแรกไปจมตัวสะสมในแหล่งน้ำนิ่งและมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ทั้งระหว่างการพัดพาไปและขณะสะสมอยู่

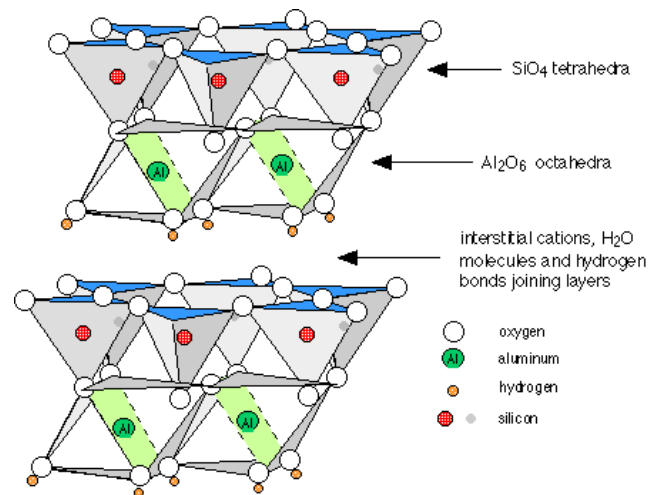
ผลึกบริสุทธิ์ของดินขาวเคโอลินมีองค์ประกอบทางเคมีเป็น $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ หรือ 39.8% Al_2O_3 , 46.3% SiO_2 และ 13.9% H_2O โดยที่ส่วนประกอบทางเคมีของดินจะมีความแตกต่างกันไปตามแหล่งที่พบ ซึ่งเกิดจาก 2 ปัจจัย คือ

1. เนื่องจากในโครงสร้างของดินขาวเคโอลินมีการแทนที่กันของโลหะธาตุที่มีประจุบวก

2. เนื่องจากมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ เช่น quartz, feldspar, rutile, pyrite, tourmaline, zircon, hematite, magnetite, fluorite และ muscovite เป็นต้น

2.3.4.6.1.2 แร่ดินขาวเคโอลิน (kaolin mineral)

แร่ดินขาวเคโอลินมีหลายอย่างแตกต่างกันไปตามโครงสร้างและสูตรทางเคมี สูตรเคมีพื้นฐานคือ $(OH)_4Al_2(Si_2O_5)$ ซึ่งในแร่ดินขาวเคโอลินมีแร่เคโอลิไนต์ (kaolinite) ปริมาณมากที่สุด โครงสร้างของเคโอลิไนต์ ประกอบด้วยหนึ่งชั้นในหนึ่งเซลล์ ซึ่งเกิดจากการจับกันของ tetrahedral sheet กับ octahedral sheet ลักษณะโครงสร้างจึงเป็นแบบไตรคลินิก (triclinic)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเคโอลิไนต์

2.3.4.6.1.3 สมบัติทางกายภาพของดินขาวเคโอลิน

องค์ประกอบทางเคมีของดินมีความสำคัญที่จะช่วยระบุสมบัติทางกายภาพของดินขาวเคโอลินนั้น เช่น การที่ดินมีปริมาณของซิลิกา (SiO_2) มาก แสดงให้รู้ว่าอาจจะทนไฟได้มาก เพราะซิลิกามีจุดหลอมตัวอยู่ที่ประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส หรือการที่ดินมีปริมาณของอะลูมินา (Al_2O_3) มาก ก็อาจจะทนไฟได้มากเช่นกัน ทั้งนี้เพราะอะลูมินามีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 2,000 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมี Na_2O , K_2O , CaO , MgO ซึ่งทั้งสี่ตัวที่กล่าวมานี้ประพฤติตัวเป็นฟลักซ์ (flux) คือ เป็นตัวลดจุดหลอมตัว นอกจากนี้ยังมี Fe_2O_3 และ TiO_2 จะเป็นตัวทำให้เกิดสีหลังการเผา โดยเฉพาะปริมาณ TiO_2 ที่ยังมีปริมาณมากยิ่งทำให้ดินหลังการเผามีสีเข้มมากขึ้น

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเคโอลินชนิดดินขาวลำปาง (LPCV) ของบริษัท Sibelco Mineral (Thailand)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณ (%) ในดินขาวลำปาง (LPCV)

องค์ประกอบเคมี	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
ปริมาณ (%)	63.71	24.65	0.93	0.18	0.09	0.48	5.55	0.07

สมบัติที่ควรศึกษาของดินขาวเคโอลิน ได้แก่

1. **ขนาดของอนุภาค (particle size)** สมบัตินี้ถือว่าเป็นสมบัติที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง เพราะมีความเกี่ยวข้องกับสมบัติด้านความเหนียว (plasticity) ความแข็งแรงเมื่อแห้ง (dry strength) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูลและการหดตัวเมื่อแห้ง (dry shrinkage) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วดินที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะให้ความเหนียว การหดตัว และความแข็งแรงเมื่อแห้งที่ดีกว่าดินที่มีอนุภาคขนาดใหญ่

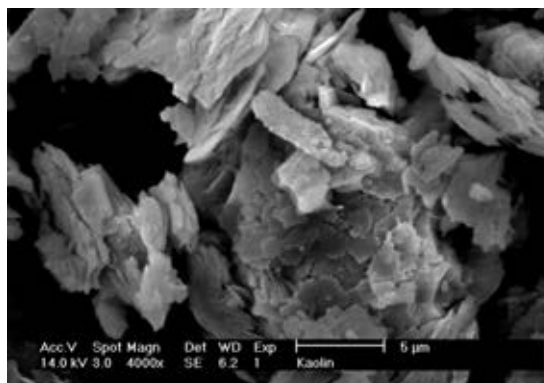
2. **รูปร่างของอนุภาค (particle shape)** แร่เคโอลินในดินขาวเคโอลินมีรูปร่างเป็นแผ่นหกเหลี่ยม มีขนาดจาก 0.05 ถึง 10 ไมครอน โดยเฉลี่ยขนาดอยู่ระหว่าง 0.5 ไมครอน นอกจากนี้เคโอลินตัวยังมีความยาวสูง มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและทนทานต่อเคมีภัณฑ์สูง

3. **ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูล (base exchange capacity)** สมบัติข้อนี้สำหรับแร่เคโอลินในดินขาวมีน้อยมาก เพราะในแร่มีการแทนที่กันของอนุมูลบวกในโครงสร้างน้อยมาก โดยเฉพาะผลึกของเคโอลินที่มีบริสุทธิ์จะไม่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูลเลย อย่างไรก็ตามแร่เคโอลินที่เป็นผลึกไม่สมบูรณ์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนอนุมูลได้

การที่ดินขาวเคโอลินมีรูปร่างเป็นแผ่นบางๆ เมื่อนำไปใช้ในพลาสติกจึงช่วยให้พลาสติกทนน้ำและความชื้นได้ดีขึ้น เพิ่มสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าและความทนทานต่อเคมีภัณฑ์ นอกจากนี้ยังลดการแตก (crack) ของผลิตภัณฑ์ และทำให้ความแข็งตึงและความแข็งสูงขึ้นอีกด้วย

การใช้งานของดินขาวเคโอลินในอุตสาหกรรมพลาสติกส่วนใหญ่ใช้เป็นสารตัวเติมในพลาสติกที่ทำเป็นสายเคเบิลและฉนวนสำหรับสายไฟฟ้า รวมทั้งใช้ในแผ่นโวนิลปูพื้น ฟิล์ม และของเล่นเด็ก นอกจากนี้ การที่ดินขาวเคโอลินมีความยาวและมีค่าดัชนีหักเหสูง (ประมาณ 1.56) จึงมีข้อดีคือ สามารถนำมาใช้แทนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ในปริมาณถึง 20 เปอร์เซ็นต์

การนำดินขาวเคโอลินไปใช้เป็นสารตัวเติมในพลาสติกอาจปรับแต่งผิวด้วยไฮดรอกไซด์เพื่อช่วยให้กระจายตัวในพลาสติกได้ดี



รูปที่ 2.7 รูปร่างอนุภาคของดินขาวเคโอลิน

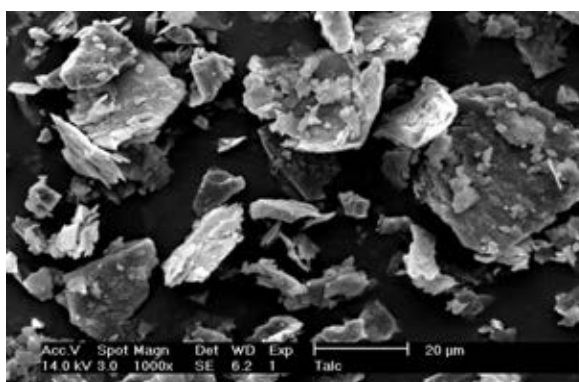
2.3.4.6.2 ทัลก์ (talc) [6-8]

2.3.4.6.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทัลก์

คำว่า talc อาจมาจากภาษาอระบิกคำว่า talq หรือมาจากภาษากรีก kerolite ซึ่ง keros หมายถึง ชี้ผึ้ง และ lithos หมายถึง หิน ซึ่งให้ความหมายถึงประกายเหมือนชี้ผึ้ง

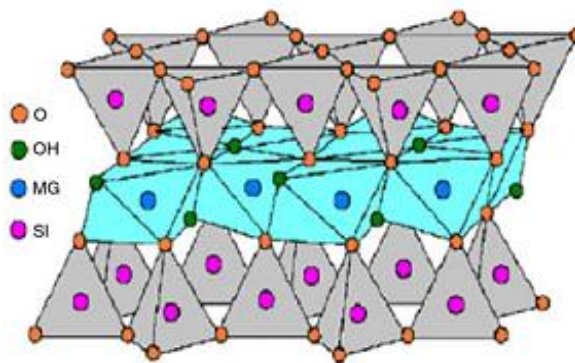
แร่ทัลก์มีสูตรโครงสร้างเป็น $(\text{OH})_2 \text{Mg}_3 (\text{Si}_2\text{O}_5)_2$ ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลงไปด้วยเหตุผลสองประการ คือ

1. การแทนที่กันของอนุมูล เช่น Mg^{2+} ถูกแทนที่ด้วย Al^{3+}
2. มีแร่อื่นเข้าผสม แร่ทัลก์เกือบทั้งหมดมีรูปเป็นแบบแผ่นหรือเส้น เนื่องจากอะตอมของมันจับกันเป็นแผ่นหรือเป็นลูกโซ่ แร่ที่จัดเป็นพวกเดียวกันกับทัลก์ ได้แก่ คลอไรต์ (chlorites) และแอมฟิโบล (amphiboles)



รูปที่ 2.8 ลักษณะอนุภาคของทัลก์

แร่ทัลก์มีโครงสร้าง TOT (tetrahedral sheet: octahedral sheet: tetrahedral sheet) เหมือนกับพวกมอนต์มอริลโลไนต์ แต่ Al^{3+} ใน octahedral sheet ถูกแทนที่ด้วย Mg^{2+} (brucite sheet) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างออกซิเจนกับออกซิเจนของแต่ละชั้นไม่แข็งแรง จึงเป็นเหตุให้เกิดรอยแตกตั้งฉากกับแกน C ได้ง่าย และเป็นเหตุให้แร่นี้มีเนื้อแร่ที่อ่อนนุ่ม ส่วนประกอบทางเคมีตามทฤษฎี คือ 63.5% SiO_2 , 31.7% MgO และ 4.8% H_2O ในรูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของทัลก์



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของทัลก์ (brucite sheet) [10]

2.3.4.6.2 องค์ประกอบทางเคมีของทัลก์

ส่วนมากทัลก์มีส่วนประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับสูตรอุดมคติ มีการแทนที่เล็กน้อยของ Fe, Mn หรือแคทไอออนอื่นๆ ในตำแหน่งออกตะฮีดรอล และ Al ใน Si ในตำแหน่งเตตระฮีดรอล ทัลก์ที่มีปริมาณ Fe สูงมีชื่อเรียกว่า **มินเนโซไทต์ (minnesotite)** $[Fe_2Si_4O_{10}(OH)_2]$ พบในหมวดหินเหล็กแปรสภาพ ในตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีในทัลก์ที่มีสูตรทางเคมีต่างๆกัน

ตารางที่ 2.2 ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีในทัลก์ที่มีสูตรทางเคมีต่างๆกัน [9]

องค์ประกอบ	(1)	(2)	(3)
SiO_2	60.06	62.16	63.37
Al_2O_3	1.60	0.88	
FeO	1.74	1.41	
MgO	30.83	30.86	31.88
CaO	0.40		
H_2O	5.02	4.92	4.75
รวม	99.65	100.23	100

2.3.4.6.2.3 สมบัติของทัลก์และการใช้งานร่วมกับพลาสติก

ทัลก์เป็นแร่ธาตุที่มีอนุภาคอ่อนที่สุด (Mohs scale = 1) มีความหนาแน่น 2.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าดัชนีหักเห 1.57 – 1.59 และมีการดูดซับน้ำมันเท่ากับ 28 – 51 กรัมของน้ำมันต่อทัลก์ 100 กรัม

การผสมทัลก์ในเทอร์โมพลาสติกจะทำให้พลาสติกมีความแข็งตึง ความทนแรงดัดโค้ง และค่า HDT (heat distortion temperature) สูงขึ้น ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางรูปร่าง (dimensional stability) ลดการหดตัวและการบิดเบี้ยวของชิ้นงานและทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานต่อการคืบ (creep resistance) ที่อุณหภูมิสูง

ทัลก์มีความเฉื่อยต่อเคมีภัณฑ์ทั่วไป ทนต่อความร้อนและความชื้นได้ดี ดังนั้นเมื่อนำมาใช้ในพลาสติกจะช่วยให้พลาสติกทนความชื้นและความร้อนได้ดี ช่วยเพิ่มสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าและความทนทานต่อเคมีภัณฑ์ นอกจากนี้ทัลก์ยังมีสมบัติผลัดน้ำ (water repellency) และลื่น ด้วยเหตุนี้ นอกจากจะใช้ทัลก์เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์แล้ว ทัลก์ที่ผ่านการบดจนละเอียดยังสามารถนำมาใช้เป็นสารกันติด (antiblocking agent) สำหรับแผ่นฟิล์มบางๆ ได้อีกด้วย

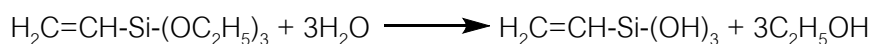
2.4 สารประกอบไซเลน [8]

ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์โดยการใส่สารตัวเติมหรือเส้นใยเสริมแรงนั้น วัสดุเชิงประกอบที่ได้จะมีสมบัติที่ดีถ้าทำให้สารตัวเติมหรือเส้นใยเสริมแรงกระจายตัวหรือยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี ซึ่งวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันมานานแล้วคือ การเคลือบหรือปรับแต่งพื้นผิวของสารตัวเติมหรือเส้นใยเสริมแรงด้วยสารที่สามารถเข้ากันได้ดีกับทั้งพอลิเมอร์และสารตัวเติมหรือเส้นใยเสริมแรง

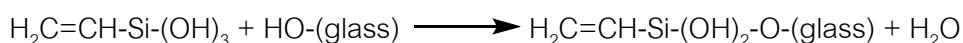
การปรับปรุงการยึดระหว่างสารตัวเติมหรือเส้นใยเสริมแรงกับพอลิเมอร์ นอกจากการใช้สารปรับแต่งพื้นผิวแล้วยังอาจใช้สารเติมแต่งอีกประเภทหนึ่งคือสารประสานหรือสารช่วยยึด (coupling agent or adhesion promoters) ซึ่งสารประเภทนี้จะทำหน้าที่เป็นสะพานหรือตัวกลางเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมหรือเส้นใยเสริมแรงโดยการสร้างพันธะที่แข็งแรงกับเฟสทั้งสอง

ไซเลนเป็นสารประสานที่นิยมใช้มากที่สุดกับผลิตภัณฑ์พลาสติกเสริมแรงด้วยใยแก้ว มีสูตรทั่วไปคือ $Y-Si(OR)_3$ โดยหมู่ OR (เช่น $-OCH_3$, $-OC_2H_5$) จะเข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับใยแก้ว ในขณะที่หมู่ Y (เช่น หมู่ไวนิล หมู่อะมิโน หมู่อีพอกซี หมู่ mercapto) จะทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ซึ่งมีผลทำให้เส้นใยแก้วยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี ตัวอย่างเช่น การใช้ไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน (vinyltriethoxysilane) จะช่วยให้ใยแก้วยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดังนี้คือ

ขั้นที่ 1 หมูเอทอกซีถูกไฮโดรไลซ์ได้เป็นหมูไฮดรอกซิล (Si-OH)



ขั้นที่ 2 ไฮดรอกซิลเข้าทำปฏิกิริยากับหมู OH ที่พื้นผิวของใยแก้ว เกิดเป็นพันธะ Si-O-Si ระหว่างสารประสานกับใยแก้ว



ในขณะเดียวกันหมูไวนิลจะเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์เกิดเป็นพันธะโคเวเลนต์ระหว่างสารประสานกับพอลิเมอร์ โดยวิธีการนี้จึงทำให้ใยแก้วมีแรงยึดกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี

กาใช้สารประกอบไฮเลนจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อนำไปใช้เป็นสารประสานสำหรับสารตัวเติมต่อไปนี้ คือ ซิลิกา แก้ว อะลูมินา และอะลูมิโนซิลิเกต ในทางตรงกันข้ามเมื่อนำไปใช้กับแคลเซียมคาร์บอเนต ไฮเลนจะไม่มีประสิทธิภาพเลย

ไฮเลนที่ผลิตออกจำหน่ายในทางการค้ามีหมูฟังก์ชัน (หมู Y) แตกต่างกันหลายแบบเพื่อให้เหมาะสมในกาใช้งานกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ตัวอย่างเช่น ไฮเลนซึ่งประกอบด้วยหมูไวนิลจะถูกนำไปใช้งานกับพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ในขณะที่ไฮเลนซึ่งประกอบด้วยหมูอีพอกซีหรือหมู อะมิโนก็จะนำไปใช้กับพอลิเอไมด์ อีพอกซีเรซินหรือพอลิยูรีเทนชนิดเทอร์โมเซต

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการปรับปรุงสมบัติด้านการหน่วงไฟและด้านการลดอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วยการนำดินขาวเคโอลินและทัลก์ซึ่งเป็นสินแร่อนินทรีย์ในตระกูลซิลิเกตและหาได้ง่ายในประเทศมาใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตร่วมกับการใช้ไตรฟีนิลฟอสเฟต โดยอาศัยกระบวนการผสมแบบหลอมเหลว (melt mixing) โดยมีการปรับแต่งพื้นผิวของสารอนินทรีย์ด้วยสารประกอบไฮเลนเพื่อช่วยปรับปรุงความสามารถในการกระจายตัวของสารอนินทรีย์ทั้งสองในเนื้อของพอลิเมอร์ โดยคาดว่าจะเกิดการทำงานร่วมกันระหว่างสารอนินทรีย์ทั้งสองและสารประกอบฟอสฟอรัสในการปรับปรุงสมบัติหน่วงไฟและด้านการลดอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตพร้อมทั้งช่วยเสริมประสิทธิภาพในการกระจายตัวของอนุภาคของสารอนินทรีย์ทั้งสองในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ โดยงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาเปรียบเทียบหาปริมาณที่เหมาะสมของดินขาวเคโอลินและทัลก์ในการเติมแต่งลงในพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเพื่อปรับปรุงสมบัติหน่วงไฟและด้านการลดอุณหภูมิ ความสามารถในการกระจายตัวรวมทั้งสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ให้ดีขึ้น

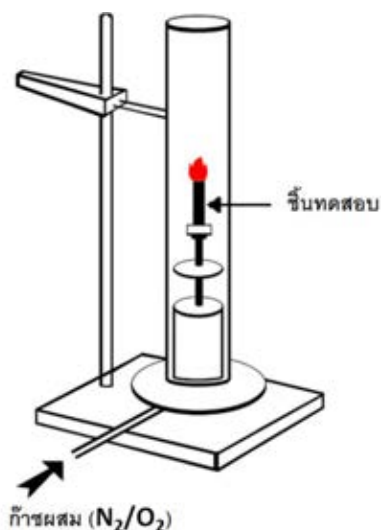
2.5 การทดสอบการติดไฟในห้องปฏิบัติการ [1-2]

การทดสอบการเผาไหม้ของพอลิเมอร์จำเป็นต้องทดสอบความสามารถการจุดติดไฟ (ignitability) อัตราการลามไฟ (flame-spread rate) และปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยขณะเผาไหม้ (heat release) ทั้งนี้การทดสอบจะทดสอบสิ่งใดบ้างก็ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำวัสดุ นั้นไปใช้งาน ซึ่งในห้องปฏิบัติการนิยมทดสอบดังต่อไปนี้

2.5.1 ดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index: LOI)

การทดสอบนี้ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1966 โดย Fenimore และ Martin โดยใช้เป็นเครื่องชี้วัดความสามารถในการติดไฟของวัสดุ โดยแต่ละประเทศนำไปกำหนดเป็น มาตรฐานสำหรับการทดสอบ เช่น มาตรฐาน NF T 51-071 สำหรับประเทศฝรั่งเศส ASTM D2863 สำหรับสหรัฐอเมริกา และ ISO 4589-2 สำหรับมาตรฐานนานาชาติ

ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดนิยามว่าเป็นความเข้มข้นของออกซิเจน $[O_2]$ ที่น้อยที่สุดในอากาศผสมระหว่างออกซิเจนและไนโตรเจน $[O_2/N_2]$ ที่ทำให้วัสดุเกิดการเผาไหม้ด้วยเปลวไฟ เป็นเวลา 3 นาที หรือเกิดการลามไฟเป็นระยะทาง 5 เซนติเมตร โดยจัดวางชิ้นงานไว้ในแนวตั้ง ซึ่งที่ด้านบนของชิ้นงานถูกจุดให้ติดไฟด้วยตะเกียง (burner) โดยในรูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการ ทดลองและเครื่องมือสำหรับวัดค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 2.10 ลักษณะการทดลองและเครื่องมือทดสอบดัชนีออกซิเจนจำกัด [1]

สำหรับการคำนวณหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดเป็นเปอร์เซ็นต์ดังสมการต่อไปนี้

$$LOI = \frac{[O_2]}{[O_2] + [N_2]} \times 100$$

ตามมาตรฐาน ISO 4589 การวัดค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดจะทำการเตรียมชิ้นทดสอบขนาด 80 x 10 x 4 มิลลิเมตร³ แล้วนำไปวางในแนวตั้งภายในท่อกระบอแก้ว (glass chimney) โดยให้อากาศผสมไหลเข้าทางด้านล่างของเครื่องมือแล้วไหลขึ้นไปยังด้านบน เพื่อให้อากาศผสมดังกล่าวรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ได้ดี อากาศดังกล่าวจึงต้องไหลผ่านเม็ดแก้วที่อยู่ด้านล่างของอุปกรณ์ก่อนจะไหลไปสู่ในท่อกระบอแก้ว จากนั้นเปลวไฟจากแก๊สขนาดเล็กจะถูกนำไปจุดที่ปลายด้านบนของชิ้นทดสอบแล้วจึงดูลักษณะของการเผาไหม้ (burning behavior)

ในอากาศปกติประกอบด้วยออกซิเจนประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นวัสดุชนิดใดที่มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดต่ำกว่า 21 เปอร์เซ็นต์ ก็จัดว่าเป็นวัสดุที่ติดไฟได้ (combustible) ส่วนวัสดุชนิดใดที่มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดสูงกว่า 21 เปอร์เซ็นต์ จัดว่าเป็นวัสดุพวกที่ดับไฟได้เอง (self-extinguishing) และวัสดุที่มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดมากกว่า 100 จัดว่าเป็นวัสดุพวกไม่ติดไฟ ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดที่สูงแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นมีสมบัติหน่วงไฟที่ดี

2.5.2 เทคนิคการทดสอบการลุกไหม้ในแนวตั้ง

การทดสอบเทคนิคการทดสอบการลุกไหม้ (UL-94) ได้รับการพัฒนาโดย Underwriters' Laboratories ซึ่งเป็นการทดสอบการติดไฟของวัสดุพลาสติกที่ใช้สำหรับชิ้นส่วนอุปกรณ์และเครื่องใช้ นอกจากนี้ยังรวมไปถึงช่วงของการติดไฟ (range of flammability tests) ในทางปฏิบัติการทดสอบที่นิยมมากที่สุดคือ UL-94 V สำหรับวัดการจุดติดไฟและการลามไฟของชิ้นทดสอบในแนวตั้งที่สัมผัสกับเปลวไฟขนาดเล็ก การทดสอบนี้เป็นไปตามมาตรฐานสากล คือ IEC 60695-11-10 โดยใช้เปลวไฟขนาดเล็กขนาด 50 วัตต์ และจำเป็นต้องใช้ชิ้นทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้น การทดสอบนี้แบ่งกลุ่มของผลการทดสอบอย่างง่ายได้เป็น 3 กลุ่ม คือ V - 0, V - 1 และ V - 2 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

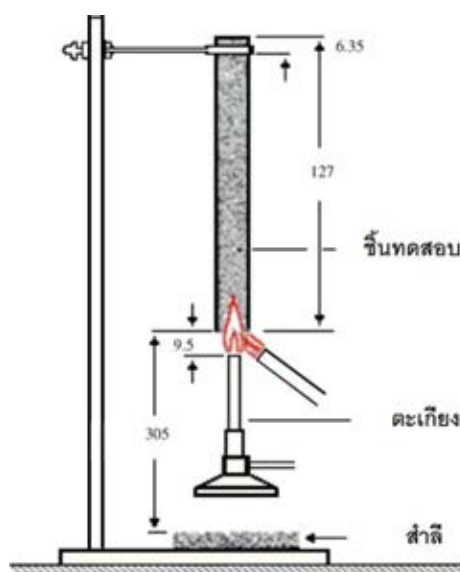
เปลวไฟถูกควบคุมให้ได้เปลวไฟสีฟ้าที่มีความสูง 20 มิลลิเมตร จากจุดกึ่งกลางของเปลวไฟ อีกทั้งยังต้องมีกำลังเพียง 50 วัตต์ เท่านั้น จากนั้นนำเปลวไฟนี้ไปเผาที่ด้านปลายล่างของชิ้นทดสอบ โดยปลายล่างของชิ้นทดสอบสัมผัสกับเปลวไฟสูง 10 มิลลิเมตร โดยวัดจากจุดกึ่งกลางของเปลวไฟ ซึ่งชิ้นทดสอบจะสัมผัสกับเปลวไฟเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นจึงนำเปลวไฟ

ออก เมื่อนำเปลวไฟออกแล้วสังเกตการติดไฟของชิ้นทดสอบจนกระทั่งไฟดับได้เอง ซึ่งเวลาดังกล่าวนี้เรียกว่า t_1 จากนั้นนำเปลวไฟนี้ไปเผาที่ด้านปลายล่างของชิ้นทดสอบอีกครั้งหนึ่งเป็นเวลา 10 วินาที แล้วจึงนำเปลวไฟออก สังเกตการณ์ติดไฟเช่นเดียวกับครั้งที่หนึ่งแล้วจึงบันทึกเวลาดังกล่าวเป็น t_2 และทำซ้ำเป็นครั้งที่ 3 พร้อมทั้งจับเวลาที่ทำให้เปลวไฟดับ (fire glow to disappear) และบันทึกเวลาเป็น t_3

ระยะห่างระหว่างเปลวไฟกับชิ้นงานต้องคงที่เสมอ หากชิ้นงานเกิดหลอมหยดจำเป็นจะต้องเอียงเปลวไฟโดยมีค่ามุมเอียงสูงสุดได้ไม่เกิน 45 องศา ระหว่างการทดสอบหากเกิดการหลอมหยดแล้วทำให้สำลี (a piece of cotton) ที่อยู่ด้านล่างของชิ้นทดสอบเกิดติดไฟก็ต้องบันทึกผลนั้นด้วย

ตารางที่ 2.3 การจำแนกผลการทดสอบการติดไฟของวัสดุตามมาตรฐาน UL-94 [3]

Observation	Classification		
	V-0	V-1	V-2
t_1 or t_2 for any specimen	10 s	30 s	30 s
$t_1 + t_2$ for 5 specimens	50 s	250 s	250 s
$t_2 + t_3$ for any specimen	30 s	60 s	60 s
Afterflame or afterglow up to clamp, any specimen	No	No	No
Ignition of cotton	No	No	Yes



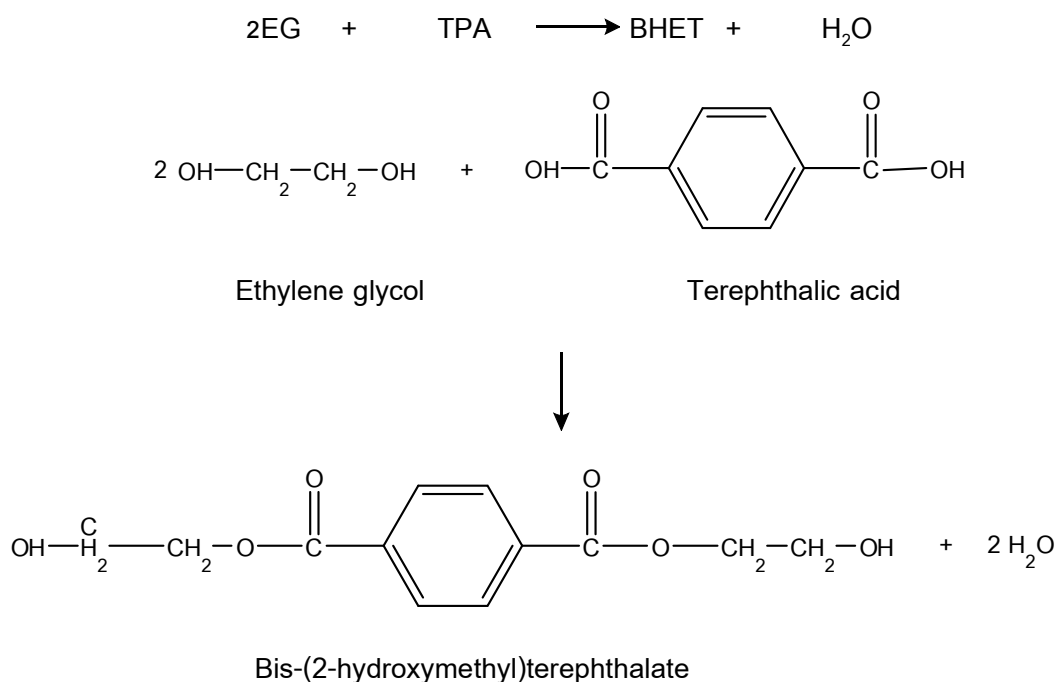
รูปที่ 2.11 การเตรียมอุปกรณ์และการทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 V [1]

2.6 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [5, 11-14]

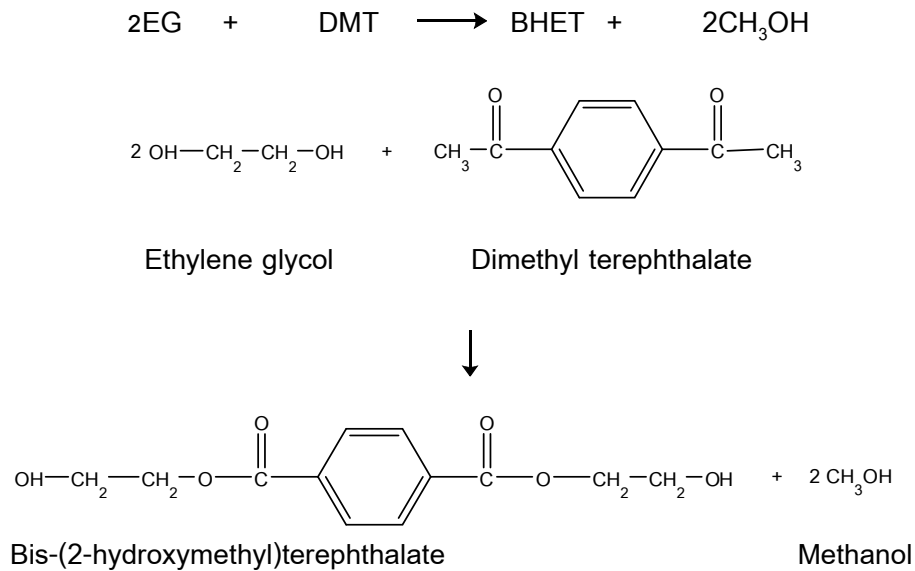
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพต (Poly(ethylene terephthalate), PET) เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline polymer) ที่มีสมบัติหลายประการ เช่น สมบัติทางแสง สมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อน และการดูดซึมความชื้นที่ต่ำ เป็นต้น จึงทำให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตถูกนำมาใช้งานในหลายๆด้าน เช่น ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ เส้นใยสำหรับผลิตสิ่งทอ และใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตผลิตได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) ระหว่างกรดเทเรฟทาลิก (terephthalic acid, TPA) กับเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, EG) หรือปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (ester interchange) ของไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate, DMT) กับเอทิลีนไกลคอล โดยปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน” (transesterification) ซึ่งไม่ว่าจะปฏิกิริยาใด การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจะแบ่งเป็นสองขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1: โดยการผสมกรดเทเรฟทาลิก (TPA) กับเอทิลีนไกลคอล (EG) ปริมาณมากเกินไปที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บรรยากาศ สารที่ได้ในขั้นตอนนี้เป็นไดเอสเทอร์ (di-ester) ซึ่งได้แก่ bis-(2-hydroxymethyl)terephthalate หรือ BHET ดังสมการต่อไปนี้

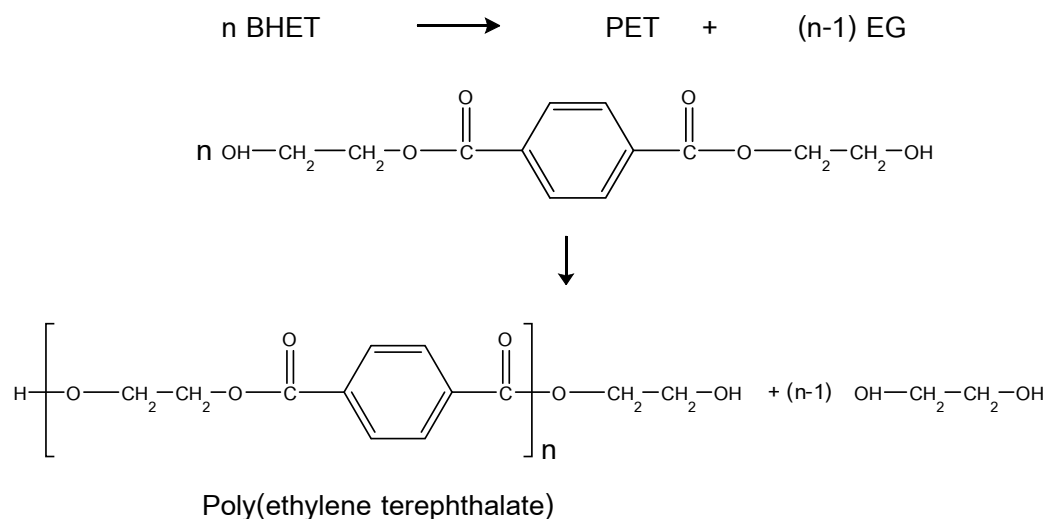


หรือผสมไดเมทิลเทเรฟทาเลต (DMT) กับเอทิลีนไกลคอล (EG) ปริมาณมากเกินไปที่อุณหภูมิ 150 – 210 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีเมทานอล (methanol) เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



น้ำหรือเมทานอลที่เกิดขึ้นจะต้องถูกกำจัดออกไปจากระบบเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ และสารที่ได้ส่วนใหญ่เป็น BHET หรือมีโพลิโเมอร์ (oligomer) เกิดขึ้นบ้างเล็กน้อยถึงเฮกซะเมอร์ (hexamer)

ขั้นที่ 2: ไม่ว่าสารตั้งต้นจะเป็น TPA หรือ DMT ปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จะไม่ต่างกัน โดยการเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 270 – 280 องศาเซลเซียส ภายใต้สุญญากาศ ปฏิกิริยาจะดำเนินไปจนได้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดย EG ที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดออกไปด้วยระบบระบบสุญญากาศ (66 – 133 Pa หรือ 0.5 – 1 torr) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้มีดังนี้



ขั้นที่ 1 จะเป็นการพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (solution polymerization) และขั้นที่ 2 เป็นการพอลิเมอไรเซชันแบบหลอมเหลว (melt polymerization) เพราะอุณหภูมิของขั้นตอนนี้สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ของพอลิเมอร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้นตอนที่ 1 ได้แก่ เกลือแอสเตตของโลหะ เช่น แมงกานีส, สังกะสี, แคดเมียม, โคบอลต์ หรือแมงนีเซียม และปกติใช้แอนติโมนี (III) ออกไซด์ (Sb_2O_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับขั้นตอนที่ 2

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นสารที่มีความแข็งแรง ไม่มีสี โครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงมีระเบียบ จึงมีความเป็นผลึกสูง แต่ในการผลิตเป็นเส้นใยที่ได้ออกมาเย็นตัวอย่างรวดเร็ว จึงมีความเป็นอสัณฐานมากและทำให้อ่อนลงเพื่อใช้เป็นเส้นใยได้ ส่วนการใช้งานในด้านแผ่นฟิล์มนั้น นิยมใช้วิธีขึ้นรูปโดยการฉีดแบบซึ่งอาจใช้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตได้ทั้งแบบผลึกและอสัณฐาน กรณีที่พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีลักษณะอสัณฐานสมบูรณ์จะมีลักษณะใสและทนแรงกระแทกได้ดี แต่ถ้ามีระดับความเป็นผลึกสูงจะทำให้มีความแข็งแรงสูงขึ้นและมีความต้านทานการขีดได้ดี

อุณหภูมิการหลอมตัว (T_m) ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสูงถึง 265 องศาเซลเซียส และเป็นพอลิเมอร์มีขั้วแต่ก็เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากการจัดตัวของสภาพขั้วอยู่กับที่ สำหรับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตนั้นมีค่าประมาณ 80 องศาเซลเซียส

สมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตต่อความร้อนนั้นพบว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีเสถียรภาพต่อความร้อนดีแต่ก็สามารถเกิดการติดไฟได้ (flammability) รวมทั้งยังเกิดการหลอมหยด (dripping) ขณะเกิดการเผาไหม้ได้อีกด้วย ซึ่งค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีค่าประมาณ 20 – 21 โดยตารางที่ 2.4 แสดงอุณหภูมิติดไฟและค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของเส้นใยพอลิเมอร์บางชนิด

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติไฟและค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของเส้นใยชนิดต่างๆ [4]

เส้นใย	T_g , °C (soften)	T_m , °C (melts)	T_p , °C (pyrolysis)	T_c , °C (ignition)	LOI, %
ฝ้าย			350	350	18.4
วิสโคสเรยอน			350	420	18.9
ขนสัตว์			245	600	25
พอลิเอสเตอร์	80 – 90	255	420 – 477	480	20 – 21
ไนลอน 6	50	215	431	450	20 – 21.5
ไนลอน 6,6	50	265	403	530	20 – 21.5
อะคริลิก	100	>220	290	450	18.2
			(มีการสลายตัว)		
มอดอะคริลิก	<80	>240	273	690	29 - 30
นอเมกซ์	275	375	410	>500	29 - 30
เคฟลาร์	340	560	>550	>590	29

การขึ้นรูปพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วยวิธีการฉีดแบบยังไม่ประสบความสำเร็จ ทั้งนี้เพราะพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีอัตราการเกิดผลึกค่อนข้างช้าและมี T_g สูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเป็นอสัณฐาน เพราะเกิดผลึกได้จำกัดระหว่างการเย็นตัว ชิ้นงานจะโปร่งใสและไม่แข็งแรง จึงไม่มีคุณค่าทางก้ามากนัก ซึ่งต้องนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส จึงจะเกิดผลึกเพิ่มขึ้น แต่วิธีการนี้มีผลทำให้ชิ้นงานบิดเบี้ยว หดตัวและชุ่น ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยการใช้สารก่อนิวเคลียส การใส่พลาสติกไซเซอร์หรือการใช้แม่แบบที่ร้อน จากการใช้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีสารก่อนิวเคลียสและตั้งอุณหภูมิเครื่องฉีดที่ประมาณ 265 องศาเซลเซียส ฉีดเข้าไปในแม่แบบที่ร้อน 130 – 140 องศาเซลเซียส จะทำให้โมเลกุลมีเวลาจัดเรียงตัว ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเป็นผลึกสูง แต่จะชุ่นและแข็งเกร็ง สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงระดับ 120 องศาเซลเซียส แต่ถึงกระนั้นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตก็ยังไม่เป็นที่น่าสนใจในการขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดแบบเท่าใดนัก

เนื่องจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีสมบัติที่ดีหลายประการจึงสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย รูปแบบการใช้งานของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตโดยทั่วไปอยู่ในรูปของเส้นใย ขวดเพตฟิล์มและซีท โดยเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นที่รู้จักในชื่อของเส้นใย Terylene และ Dacon และถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางโดยนำไปผสมกับเส้นใยชนิดอื่นๆโดยไม่ทำให้สมบัติที่ดีเด่นของเส้นใยที่ผสมนั้นเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้สมบัติของเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตยังมีความโดดเด่นทั้งในขณะเปียกและแห้ง ส่วนการใช้งานในรูปของฟิล์มและซีทนั้น ในทางการค้ารู้จัก

กันดีในชื่อของฟิล์มไมลาร์ (Mylar) และฟิล์มโคดาร์ (Kodar) ซึ่งจะขึ้นรูปโดยวิธีการดึง 2 สองทิศทาง (Biaxial oriented) โดยฟิล์มที่ได้จะมีปริมาณผลึกสูง มีความทนแรงดึงที่ดี สามารถนำไปใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ ฟิล์มหัด ฟิล์มถ่ายรูป แผ่นดิสก์ ฉนวนกันไฟฟ้าและฟิล์มเคลือบ ตกแต่ง เป็นต้น สำหรับขวดพेटมีความเหนียว ทนทานการตกแตก ใส ด้านทานกลืน ป้องกันการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ จึงนิยมนำไปใช้บรรจุน้ำอัดลม

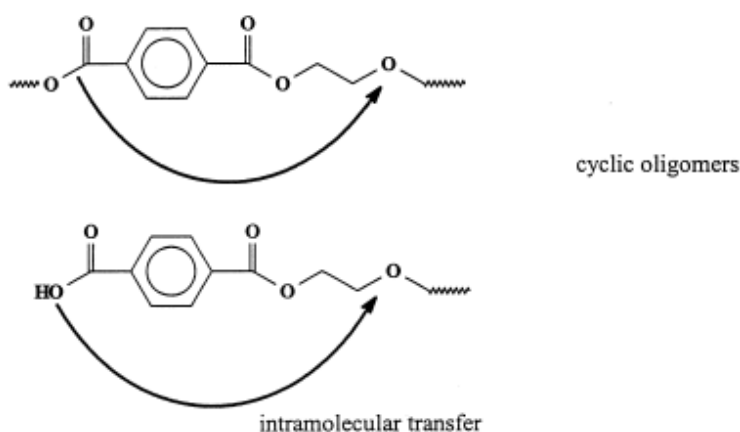
2.7 การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [3, 15]

จากงานวิจัยที่ผ่านมากล่าวว่า ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ได้แก่ carbon dioxide, acetaldehyde, vinyl benzoate, terephthalic acid, terephthalaldehydic acid, linear dimmers และผลิตภัณฑ์รอง ได้แก่ carbon monoxide, methane, ethylene, ketene, 1,4-dioxane, toluene, benzaldehyde, divinyl terephthalate, benzoic acid, cyclic oligomers ซึ่งประกอบด้วยมอนอเมอร์ไม่เกิน 3 หน่วย

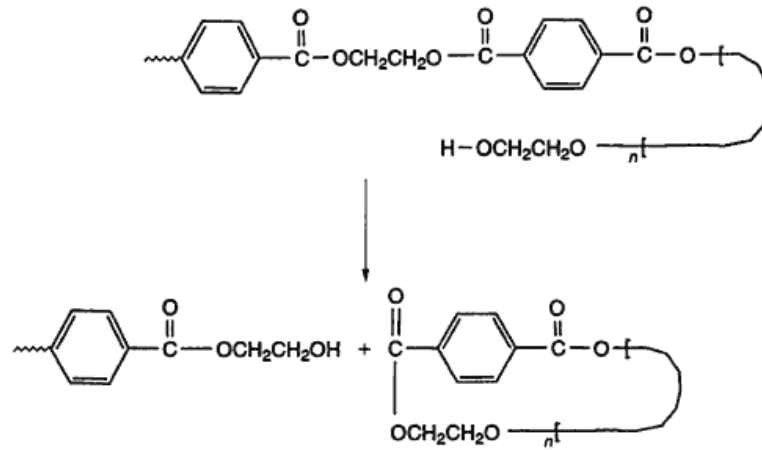
แต่เดิมมีความเชื่อว่า การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเกิดจาก 2 กรณีเท่านั้น คือ Intramolecular back-biting และ chain scission จากปฏิกิริยา β -C-H hydrogen transfer จนกระทั่งในปี ค.ศ.1994 มีการค้นพบว่า aliphatic ends-groups มีความไวต่อการสลายตัวทางความร้อนมากกว่า

กลไกการสลายทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ประกอบด้วยกรณีดังต่อไปนี้

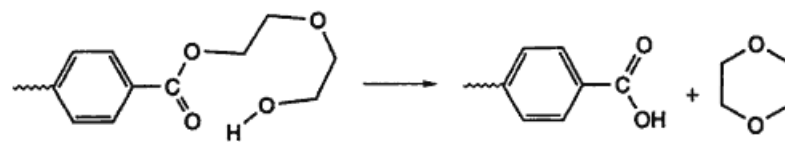
1) Intramolecular back-biting ซึ่งทำให้เกิด cyclic oligomers



รูปที่ 2.12 Intramolecular back-biting หรือ Intramolecular transfer

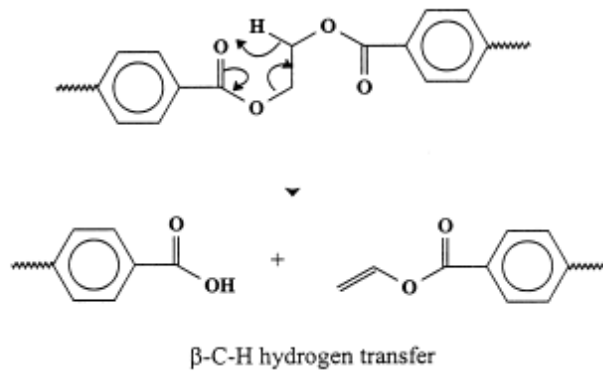


รูปที่ 2.13 กลไกการเกิด cyclic oligomers



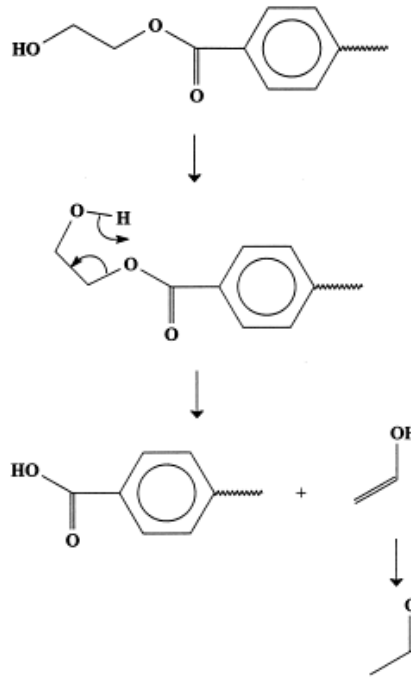
รูปที่ 2.14 กลไกการเกิด dioxine โดย Hovenkamp และ Munting

2) Chain scission จากปฏิกิริยา β -C-H hydrogen transfer ซึ่งจะทำให้เกิด vinyl ester และ acid end-groups



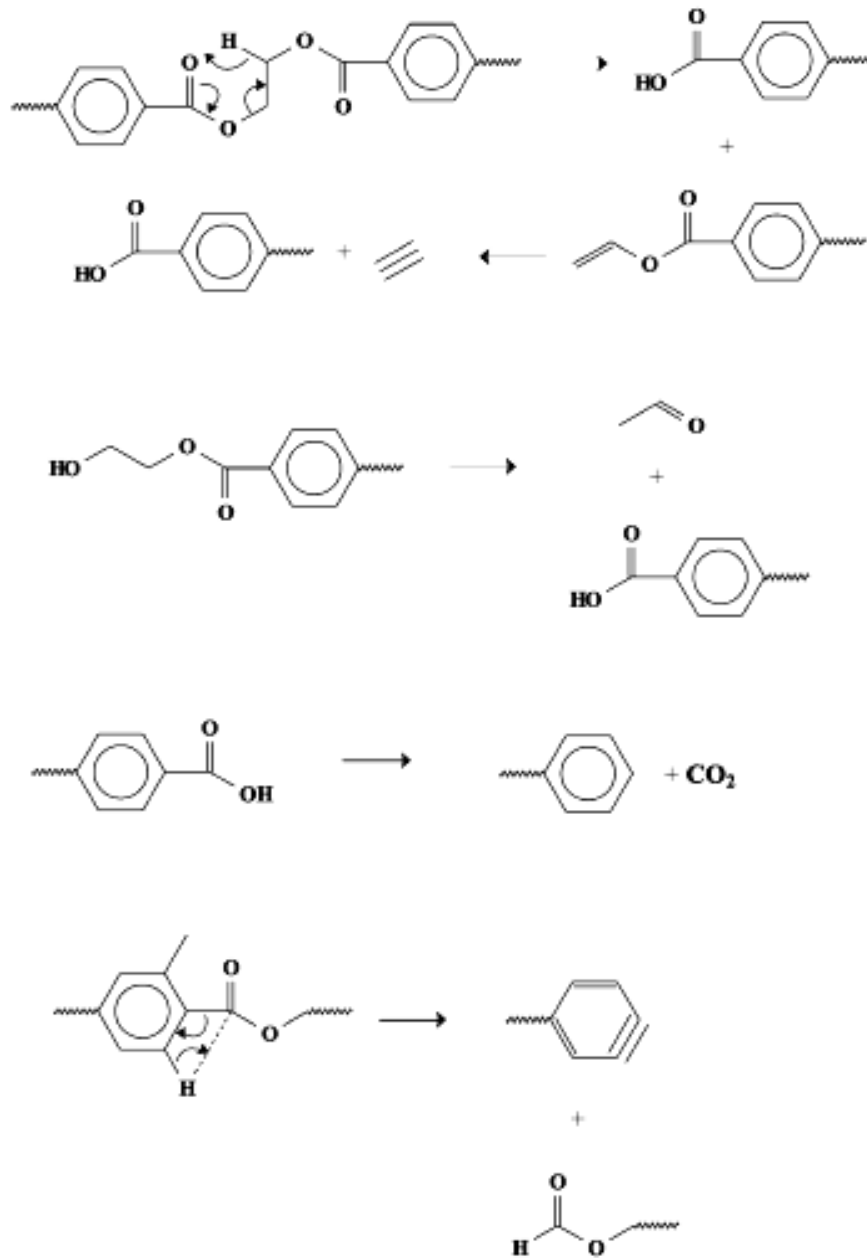
รูปที่ 2.15 β -C-H hydrogen transfer

3) การสลายตัวของ ethylene glycol end-group ซึ่งทำให้เกิด acetaldehyde และ acid end-group



รูปที่ 2.16 การสลายตัวของ ethylene glycol end-group

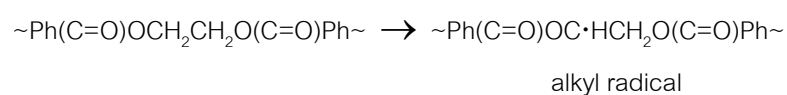
4) การสลายตัวทางความร้อนแบบ scission aliphatic side-chain ซึ่งพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต มีทั้งแบบ β -C-H hydrogen transfer และ ethylene glycol end-group โดยจะเกิดผลิตภัณฑ์เป็น acid end-groups



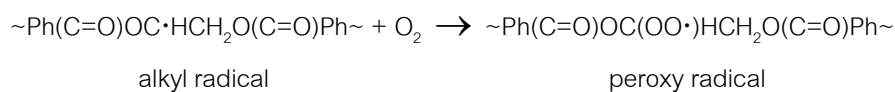
รูปที่ 2.17 กลไกการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

2.8 กระบวนการออกซิเดชัน (thermal oxidation) ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [3]

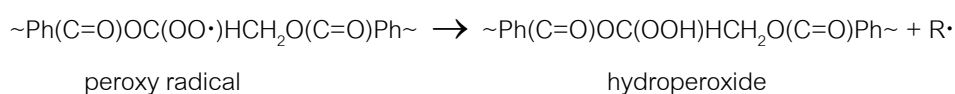
Buxbaum ได้ให้คำอธิบายเกี่ยวกับการเกิดออกซิเดชันของ PET ไว้ว่า ไฮโดรเจนในตำแหน่ง alpha ของหมู่เอสเตอร์ใน back bone ของ PET นั้นถูกดึงออกได้ง่ายที่สุด จึงทำให้เกิดการ initiation ของระบบ free radical ขึ้น



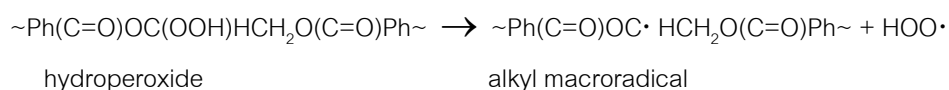
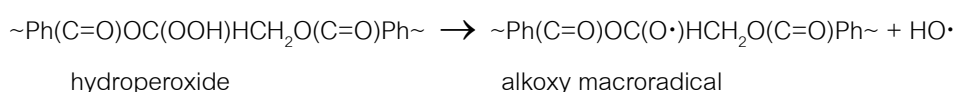
เมื่อมีออกซิเจนอยู่ alkyl radical ที่เกิดจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว เกิดเป็น peroxy radical



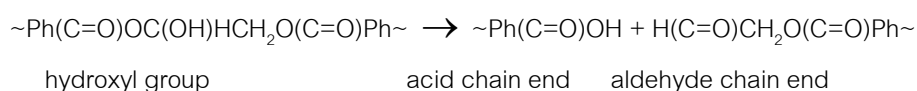
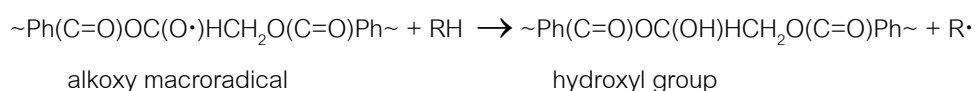
Peroxy radical จะเข้าไปตั้งไฮโดรเจนจากสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ข้างเคียง แล้วเกิดเป็น hydroperoxide



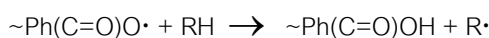
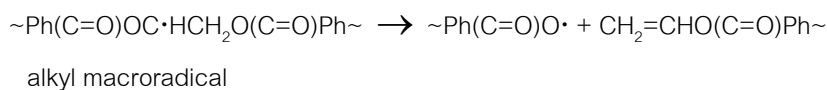
ขั้นตอนต่อไป คือ การแตกออก (scission) ของ hydroperoxide โดยสามารถเกิดขึ้นได้หนึ่งจากสองวิธี คือ 1) การแตกออก O-O bond เกิดเป็น alkoxy macroradical และ HO· หรือ 2) การแตกออก C-O bond เกิดเป็น alkyl macroradical และ HOO·



Alkoxy macroradical จะเข้าไปตั้งไฮโดรเจนเกิดเป็น hydroxyl group แล้ว species นี้จะเกิดการแตกตัวของสายโซ่ (chain scission) โดยผ่าน cyclic intermediate เกิดเป็น acid chain end และ aldehyde chain end หลังจากนั้น aldehydic chain end อาจถูกออกซิไดส์เป็น carboxylic acid



นอกจากนี้ alkyl macroradical อาจเกิดการแตกตัวของสายโซ่ (chain scission) ผ่านทาง homolytic ได้ด้วย



จากข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการเกิดออกซิเดชันของ PET และกลไกการแตกตัวของสายโซ่ตามกล่าวมา พบว่า ระบบ aerobic และ anaerobic degradation มีความแตกต่างกัน คือ การมีปรากฏของหมู่ aldehyde เป็นปลายสายโซ่ เพิ่มเติมจากเดิมที่มีหมู่ปลายสายโซ่เป็น encountered acid และ unsaturated

โดยที่แต่ละสายโซ่อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้อีก 3 แบบ คือ concerted ester pyrolysis (CEP), tranesterification/hydrolysis (TH) และ oxidation (OX)

ปลายสายโซ่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไป ได้แก่

$\sim\text{Ph}(\text{C}=\text{O})\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	Hydroxyl
$\sim\text{Ph}(\text{C}=\text{O})\text{OH}$	Acid
$\sim\text{Ph}(\text{C}=\text{O})\text{OCH}=\text{CH}_2$	Unsaturated
$\sim\text{Ph}(\text{C}=\text{O})\text{OCH}_2(\text{C}=\text{O})\text{H}$	Aldehyde

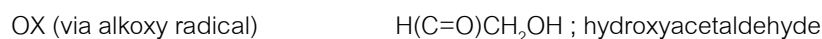
Species ที่เป็นไปได้ซึ่งจะเกิดขึ้น ได้แก่

1) เมื่อปลายสายโซ่เป็น hydroxyl จะเกิดปฏิกิริยาได้ 3 แบบ ได้แก่

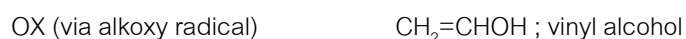
a) ปฏิกิริยา tranesterification/hydrolysis (TH) แล้วสามารถเกิดปฏิกิริยา dimerisation ต่อไปได้อีกเกิดเป็น 1, 4-dioxane หรือ 2-methyl-1, 3-dioxolane ซึ่งแบบหลังสามารถแตกออกเกิดเป็น acetaldehyde สองโมเลกุล



b) ปฏิกิริยา oxidation ผ่านทาง alkoxy radical (OX) ได้เป็น hydroxyacetaldehyde ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียร มักเกิดการเปลี่ยนรูปเป็น formaldehyde สองโมเลกุล



c) ปฏิกิริยา oxidation ผ่านทาง alkyl radical (OX) หรือปฏิกิริยา concerted ester pyrolysis (CEP) ซึ่งต่างเกิดผลิตภัณฑ์เป็น vinyl alcohol และจะเกิด isomerizes อย่างรวดเร็วเกิดเป็น acetaldehyde ซึ่งจะถูกออกซิไดส์เป็น acetic acid ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม



CEP

 $\text{CH}_2=\text{CHOH}$; vinyl alcohol

2) เมื่อปลายสายโซ่เป็น acid

ปลายสายโซ่ที่เป็น acid เกิดจากการแบ่งโมเลกุลเล็กๆ ออกของปลายสายโซ่ที่เป็นชนิดอื่น โดยใน transition state (ซึ่งบางส่วนเกิดผ่าน potential homolytic pathways) จะเกิดการแตกออกของสายโซ่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส ได้แก่ CO และ CO_2 โดยแก๊สดังกล่าวจะเกิดขึ้นในระหว่างที่ยังมีปฏิกิริยาของปลายสายโซ่ non-acid อยู่ ซึ่งเกิดโดยการเข้าทำปฏิกิริยาของปลายสายโซ่ acid ที่เหลืออยู่ ปฏิกิริยาต่อมาอาจเกิดในรูปแบบ phenyl radicals, hydrogen abstraction (ปลายสายโซ่เป็น aromatic), hydroxyl radicals (ปลายสายโซ่เป็น phenolic) และ alkyl radical อื่นๆ (เกิดการยาวออกของสายโซ่ หรือ crosslinking)

3) เมื่อปลายสายโซ่เป็น unsaturated จะเกิดปฏิกิริยาได้ 2 แบบ ได้แก่

a) ปฏิกิริยา tranesterification/hydrolysis (TH) ได้เป็น vinyl alcohol หรือ เกิดปฏิกิริยา concerted ester pyrolysis (CEP) ได้เป็น acetylene แต่โดยทั่วไปมักไม่ค่อยเกิดขึ้น

TH

 $\text{CH}_2=\text{CHOH}$; vinyl alcohol

CEP

 $\text{CH}\equiv\text{CH}$; acetylene

b) ปฏิกิริยา oxidation ผ่านทาง alkoxy radical (OX) ได้เป็นสารประกอบที่ไม่เสถียร ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยา oxidation ต่อผ่านทาง alkyl radical (OX) เกิดเป็น acetylene

OX (via alkoxy radical)

 $\text{CH}_2=\text{C}=\text{O}$; ketone

OX (via alkyl radical)

 $\text{CH}\equiv\text{CH}$; acetylene

ในภาพรวมแล้วการเกิดออกซิเดชันของปลายสายโซ่ที่เป็น unsaturated ของ PET โดยการ abstraction ของไฮโดรเจนจากหมู่ unsaturated มักไม่ค่อยเกิดขึ้น โดยเฉพาะเมื่อมี labile hydrogen มากๆ

4) เมื่อปลายสายโซ่เป็น aldehyde

เกิดปฏิกิริยา tranesterification/hydrolysis (TH) ได้เป็น hydroxyacetaldehyde หรือ เกิดปฏิกิริยา concerted ester pyrolysis (CEP) ได้เป็น ketene ซึ่งกลไกนี้จะต้องมีการ transfer ของ aldehydic hydrogen ในสภาวะ cyclic transition state แต่อย่างไรก็ตาม เป็นกลไกที่มีโอกาสเกิดได้น้อยกว่าการ abstraction ของไฮโดรเจนจากหมู่ unsaturated และหาก

ปลายสายโซ่ aldehyde ถูกออกซิไดส์ด้วยกรดตั้งแต่นั้น จะไม่มีปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเลยเพราะ β -hydrogen ซึ่งเป็นที่ต้องการไม่สามารถเคลื่อนที่ได้

TH HOCH₂(C=O)H ; hydroxyacetaldehyde

CEP CH₂=C=O ; ketene

เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผ่านทาง alkoxy radical (OX) ได้เป็น glyoxal ซึ่งสามารถถูกออกซิไดส์เป็น glyoxilic acid หรือ oxalic acid หรือเกิดปฏิกิริยา oxidation ผ่านทาง alkyl radical (OX) เกิดเป็น ketene

OX (via alkoxy radical) H(C=O)(C=O)H ; glyoxal

OX (via alkyl radical) CH₂=C=O ; ketene

จากทฤษฎีและข้อมูลทีกล่าวมาข้างต้น พบว่า acetaldehyde เป็นผลิตภัณฑ์หลักซึ่งได้จากการสลายตัวทางความร้อนและการเกิดออกซิเดชันของ PET อย่างไรก็ตาม ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่า ผลิตภัณฑ์ตัวใดที่มีบทบาทสำคัญในการสลายตัวดังกล่าว อาจเกิดจากการเข้าทำปฏิกิริยาของโมเลกุลเล็กๆ ที่เกิดในตอนต้น หรืออาจเป็น species อื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสลายตัวก็ได้

เมื่อมองจากแง่ของการใช้งานปัญหาจากการเกิดการสลายตัวเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของ PET นอกจากการเกิด species ที่เป็นอันตรายอย่าง acetaldehyde ก็คือ การเปลี่ยนสีของพอลิเมอร์ ซึ่ง Buxbaum ได้กล่าวไว้ว่าเกิดจาก unsaturated polymeric species เช่น vinyls และ aldol derivatives ต่อมา EDGE และคณะ ได้ทำการศึกษาเรื่องนี้ ซึ่งสรุปได้ว่า species ที่มีสีเกิดจาก hydroxylation ของวงแหวน terephthalate ตามมาด้วยการเกิด unsaturated ester species และการเกิดโครงสร้างแบบ quinonoid

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมด แสดงให้เห็นว่า การเกิด thermo-oxidative degradation ของ PET นั้นต่างจาก polyolefins ทั่วไป คือ จะมีระบบ non-oxidative thermal degradation ร่วมด้วยโดยเฉพาะในช่วงแรกๆ จึงจัดได้ว่า ระบบ thermo-oxidative ของ PET เป็นระบบที่มีความซับซ้อนอย่างยิ่ง และเมื่อไม่นานมานี้การศึกษาโดยใช้เทคนิค state-of-the-art mass spectroscopic ให้หลักฐานเพิ่มเติมเกี่ยวกับบทบาทของ hydroxylated terephthalate fragments ในการเปลี่ยนสีของ PET

Oxidative degradation ของ PET สามารถเกิดในรูปของ crosslinking และ gel formation ได้ด้วย

2.9 การปรับปรุงสมบัติห่วงไฟในพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

แม้ว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจะมีสมบัติที่ดีเยี่ยมหลายประการดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น แต่การที่พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสามารถหลอมหยดและจุดติดไฟได้ย่อมนำไปสู่การเกิดเหตุเพลิงไหม้ได้ง่าย ซึ่งในปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายที่พัฒนาสมบัติด้านทานการติดไฟหรือเพิ่มสมบัติการห่วงไฟให้กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ดังตัวอย่างต่อไปนี้

Lecomte และคณะ [16] ได้ศึกษาลักษณะกลไกการห่วงไฟและการสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตโดยใช้สารห่วงไฟทางการค้า 2 ชนิด คือ Ukanol[®] (U) และ Phosgard[®] (P) ซึ่งเป็นสารห่วงไฟทางการค้าที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ โดยในงานวิจัยนี้ในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตได้ใช้สารห่วงไฟทั้งสองเป็นมอนอเมอร์ร่วม (comonomer) จากนั้นได้ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ TGA รวมทั้งศึกษากลไกการห่วงไฟและการเกิด ไพโรไลซิสของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตอีกด้วย ซึ่งจากงานวิจัยนี้พบว่าทั้ง Ukanol[®] และ Phosgard[®] มีผลต่อเสถียรภาพและการสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เพียงเล็กน้อยเพียงแต่มีผลต่อความเร็ว-ช้าในการปลดปล่อยไอระเหยเท่านั้น และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวของ PET , PET-P และ PET-U อยู่ที่ 371, 380 และ 380 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยสารห่วงไฟทั้งสองนี้ทำหน้าที่เร่งการเกิดชั้นชาร์ที่ผิวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

Swoboda และคณะ [17] ศึกษาสมบัติด้านการห่วงไฟของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไตรไซเคิลและพอลิคาร์บอนเนตโดยมีไตรฟีนิลฟอสไฟต์เป็นสารห่วงไฟ โดยเตรียมชิ้นงานด้วยเทคนิคการผสมแบบหลอมเหลวระหว่างพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิคาร์บอนเนตที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ เมื่อผสมจนเข้ากันได้ดีแล้วจึงเติมไตรฟีนิลฟอสไฟต์ลงไป จากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปทำการทดสอบการติดไฟตามมาตรฐาน UL94 และวิเคราะห์อัตราการปลดปล่อยความร้อนขณะเผาไหม้ด้วยแคลอริมิเตอร์แบบโคน ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าไตรฟีนิลฟอสไฟต์เข้าไปยับยั้งปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ระหว่างพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิคาร์บอนเนต นอกจากนี้ไตรฟีนิลฟอสไฟต์ยังทำหน้าที่ขยายขนาดของสายโซ่ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตอีกด้วย ทั้งนี้พิจารณาได้จากความยาวสายโซ่เฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุที่เตรียมได้พบว่ามีค่าอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงขึ้น สำหรับการทดสอบการติดไฟของชิ้นงานที่เตรียมได้ตามมาตรฐาน UL94 พบว่าลักษณะการติดไฟของชิ้นงานอยู่ในระดับ V-0 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่เปลวไฟดับเองได้และไม่มีการ

หลอมหยุดเกิดขึ้น อีกทั้งยังมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ความสามารถในการติดไฟและความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาขณะเผาไหม้มีค่าลดลงอย่างมากเช่นกัน ส่วนชาร์ที่ เกิดจากการเผาไหม้นั้นจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเมื่อมีการเติมพอลิคาร์บอนเนตลงไป

Zhang และคณะ [18] ทำการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและสมบัติการหน่วงไฟของ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตโดยการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตกับ nano-boehmite (PET/AIOOH) ซึ่งลักษณะของการเผาไหม้และการติดไฟพิจารณาจากค่าดัชนี ออกซิเจนจำกัดและการทดสอบอัตราการปลดปล่อยความร้อนขณะเผาไหม้ด้วยแคลอริมิเตอร์ แบบโคน สำหรับลักษณะพื้นฐานของชาร์ที่เหลือจากการเผาไหม้ศึกษาจากรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งจากการทดลองพบว่าการเติม nano-boehmite ทำให้ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 18 เป็น 25 และการทดสอบอัตราการปลดปล่อยความร้อนขณะเผาไหม้ด้วยแคลอริมิเตอร์แบบโคนพบว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต/nano-boehmite ปลดปล่อยความร้อนและควันในปริมาณที่น้อยกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ อีกทั้งยังมีปริมาณชาร์ที่เหลือจากการเผาไหม้มีปริมาณที่สูงกว่าเช่นกัน โดยลักษณะของชาร์ที่เหลือจากการเผาไหม้มีลักษณะเป็นแผ่นหนา ซึ่งจากการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่า nano-boehmite มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟสำหรับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ด้านเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้พบว่าการเติม nano-boehmite ช่วยให้วัสดุเชิงประกอบมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น

Wang และคณะ [19] ทำการศึกษาสมบัติด้านการหน่วงไฟของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต/แอลฟา-เซอร์โคเนียมฟอสเฟต (α -ZrP) โดยในขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่เป็น โคพอลิเมอร์โดยสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างกรดเทเรฟทาลิก เอทิลีนไกลคอล แอลฟา-เซอร์โคเนียมและ DDP (9,10-dihydro-10[2,3-di(hydroxycarbonyl)propyl]-10-phosphaphenanthrene-10-oxide) โดยเติม แอลฟา-เซอร์โคเนียมปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยา เสถียรภาพทางความร้อนและลักษณะของการเผาไหม้ สำหรับการกระจายตัวของสารตัวเติมศึกษาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ทั้งแบบส่องกราดและส่องผ่าน (SEM และ TEM) ซึ่งจากการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดสูงขึ้นจาก 21.2 เป็น 32.6 การทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 อยู่ในระดับขั้น V-0 และเมื่อทดสอบด้วยเทคนิค cone calorimetry พบว่าปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาขณะเกิดการเผาไหม้มีค่าลดลงแต่ช่วงเวลาของการติดไฟไม่เปลี่ยนแปลง

2.10 การใช้ดินขาวเคลือบและทัลก์สำหรับหน่วงไฟในพลาสติก

Chang และคณะ [20] ได้ศึกษาการเสริมประสิทธิภาพการหน่วงไฟของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/EPDM โดยใช้ nano-kaolin และ nano-HAO (nano-sized hydroxyl aluminium oxalate) พบว่า nano-kaolin จะไปช่วยเสริมประสิทธิภาพการหน่วงไฟของ nano-HAO ให้ดียิ่งขึ้น แม้ว่าการใช้ nano-kaolin หรือ nano-HAO เพียงชนิดเดียวในปริมาณที่เท่ากันทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดเพิ่มขึ้นแต่การใช้ nano-HAO ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดเพิ่มขึ้นมากกว่า อย่างไรก็ตามหากใช้ nano-kaolin ร่วมกับ nano-HAO ในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดสูงขึ้นถึงร้อยละ 35 แสดงว่า nano-kaolin เป็นสารช่วยเสริมประสิทธิภาพการหน่วงไฟร่วมกับ nano-HAO สำหรับการทดสอบการติดไฟของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน UL94 พบว่าการใช้ nano-kaolin หรือ nano-HAO เพียงอย่างเดียวนั้นทำให้พอลิเมอร์ผสมมีการติดไฟอยู่ในระดับ V-1 แต่ nano-HAO จะให้ผลการทดลองที่ดีกว่าเพียงเล็กน้อย หากใช้ nano-kaolin ร่วมกับ nano-HAO จะให้ผลที่ดีกว่า คือ อยู่ในระดับ V-0 และไม่พบว่าการหลอมหยดเกิดขึ้น นอกจากนี้การใช้ nano-kaolin ร่วมกับ nano-HAO ยังช่วยลดอัตราความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาขณะเผาไหม้ อีกทั้งยังเร่งให้พอลิเมอร์สลายตัวและเกิดเป็นชั้นชาร์เร็วขึ้นซึ่งเป็นการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สเข้าไปยังภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์นอกจากนี้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์รวมทั้งแก๊สพิษอื่นๆลดลงอีกด้วย

Zhou และคณะ [10] ได้ศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนและเชิงกลของพอลิโพรพิลีนที่เติมทัลก์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักและซิลิเกต-เคลย์ (silicate-clay) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าการเติมทัลก์หรือนาโนเคลย์มีผลให้อุณหภูมิของการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีผลต่ออุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิของการหลอมเหลว สำหรับค่าความทนแรงดึงนั้นแสดงให้เห็นว่าการเติมทัลก์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักมีผลให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (yield strength) ลดลง ส่วนการเติมนาโนเคลย์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักช่วยเพิ่มมอดูลัสและความแข็งแรง ณ จุดคราก (yield point) ได้เป็นร้อยละ 90 และ 5 ตามลำดับ เมื่อทดสอบความด้าแสดงให้เห็นว่านาโนเคลย์ช่วยให้พอลิโพรพิลีนมีสมบัติทนต่อความด้าที่ดีกว่าการเติมทัลก์

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี

3.1.1. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ชนิดเม็ดเกรดฉีดเส้นใย ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยโพลีเอสเตอส์ จำกัด ซึ่งมีสมบัติเบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติเบื้องต้นของเม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์

สมบัติ	ค่า
สี	สีขาว
ความหนืดแท้จริง (intrinsic viscosity)	0.633 เดซิลิตร/กรัม
หมู่ปลายคาร์บอกซิล (carboxyl end group)	31.0 มิลลิโมล/กิโลกรัม
ปริมาณไดเอทิลีนไกลคอล (diethylene glycol content)	ร้อยละ 1.14 โดยน้ำหนัก
ค่าสี (colour value)	2.54
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก
น้ำ	ร้อยละ 0.112 โดยน้ำหนัก
จุดหลอมเหลว (melting point)	260.0 องศาเซลเซียส
ดัชนีการไหลหลอมเหลว (melt flow index, MFI)	125 กรัมต่อ 10 นาที

3.1.2 ดินขาวเคโอลิน มีขนาดอนุภาคสามารถผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช ได้มากกว่า ร้อยละ 98 (จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด) เกรดคุณภาพเชิงพาณิชย์ โดยมีองค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 3.2

3.1.3 ทัลก์ มีขนาดอนุภาคสามารถผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช ได้มากกว่าร้อยละ 98 (จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด) เกรดคุณภาพเชิงพาณิชย์ โดยมีองค์ประกอบทางเคมีแสดงใน ตารางที่ 3.3

3.1.4 ไตรฟีนิลฟอสเฟต (Triphenyl phosphate ((C₆H₅)₃PO₄)) น้ำหนักโมเลกุล 326.28 กรัม/โมล (จากบริษัท เมอร์ค จำกัด) เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์

3.1.4 N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane (C₈H₂₂N₂O₃Si) น้ำหนัก โมเลกุล 222.36 กรัม/โมล (จากบริษัท เมอร์ค จำกัด) เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์

3.1.5 เมทานอล (Methanol (CH₃OH)) น้ำหนักโมเลกุล 32 กรัม/โมล (จากบริษัท รวม เคมี 1986 จำกัด) เกรดคุณภาพเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 3.2 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเคโอลิน

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ซิลิกา (Silica, SiO ₂)	57.96
อะลูมินา (Alumina, Al ₂ O ₃)	39.0
เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide, Fe ₂ O ₃)	0.4
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO)	-
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO)	-
โซเดียมออกไซด์ (Sodium oxide, Na ₂ O)	-
โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide, K ₂ O)	2.0
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO ₂)	1.0

ตารางที่ 3.3 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของทัลก์

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ซิลิกา (Silica, SiO ₂)	35.0
แมกนีเซียมซิลิเกต (Magnesium silicate, Mg ₃ H ₂ (SiO ₃) ₄)	30.24
เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide, Fe ₂ O ₃)	0.36
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO)	34.4
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO)	-
โซเดียมออกไซด์ (Sodium oxide, Na ₂ O)	-
โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide, K ₂ O)	-
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO ₂)	-

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

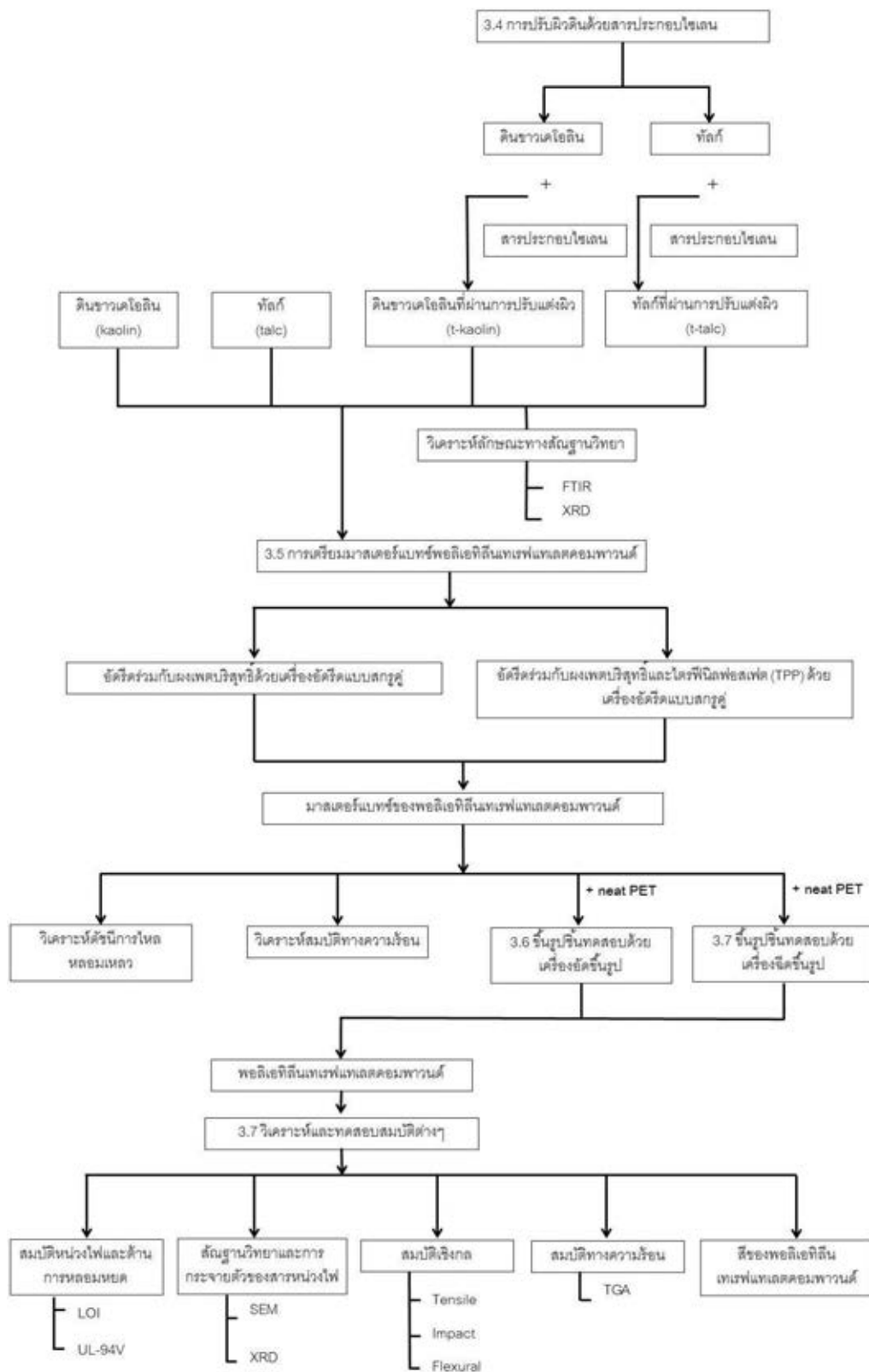
ชื่อเครื่องมือ	รุ่น/บริษัทผู้ผลิต	ประเทศผู้ผลิต
1. เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder)	PRISM TSE 24/Thermo scientific	Germany
2. เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Machine)	A-25/Topfine	Hong Kong
3. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding Machine)	Labtech, Samut Prakan	Thailand
4. เครื่องวัดการกระจายขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution Analyzer, PSD)	Mastersizer 2000/ Malvern Instruments Ltd.	United Kingdom
5. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)	PW 3710/Philips	Netherlands
6. เครื่องฟูเรียร์ ทรานฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Furior Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)	NICOLET 6700/Thermo Nicolet	United State of America
7. เครื่องวัดสีแบบ reflectance Spectrophotometer (reflectance Spectrophotometer)	Color-Eye 7000/GretagMacbeth	United State of America
8. เครื่องวัดดัชนีการไหลหลอมเหลว (Melt Flow Indexer, MFI)	7053/KAYENESS INC.	United State of America
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	JSM-5800LV/Jeol	Japan
10. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer, TGA)	TGA/SDTA851e/Mettler Toledo	Switzerland
11. เครื่องวัดดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index Analyzer, LOI)	FTA/Stanton Redcroft	United Kingdom
12. เครื่องทดสอบการลุกไหม้ไฟในแนวตั้ง (UL-94V)	ATLAS HVUL2 Horizontal vertical flame chamber	United State of America
13. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Testing Machine)	LR100K/Lloyd	United Kingdom

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อเครื่องมือ	รุ่น/บริษัทผู้ผลิต	ประเทศผู้ผลิต
14. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact Testing Machine)	GOTECH	Taiwan
15. เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (Universal Testing Machine)	LLOYD 500	United Kingdom

3.3 การดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4 การปรับแต่งผิวอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์ด้วยสารประกอบไฮเลน [21, 22]

การดัดแปรผิวอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์ด้วยสารประกอบไฮเลน คือ N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane มีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 เตรียมตัวทำละลายผสมปริมาตร 1 ลิตร โดยประกอบด้วยเมทานอล/น้ำกลั่น โดยให้ปริมาณของเมทานอลต่อน้ำเป็น 75:25 โดยปริมาตร

3.4.2 เติมสารประกอบไฮเลนลงในตัวทำละลายในข้อที่ 3.4.1) ปริมาณ 5 มิลลิลิตร

3.4.3 ชั่งดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ปริมาณ 500 กรัม จากนั้นเติมลงในสารละลายที่เตรียมได้ในข้อที่ 3.4.2) แล้วกวนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.4.4 กรองสารที่ได้ด้วยวิธีการกรองและล้างด้วยเมทานอล 5-6 ครั้ง ครั้งละ 10 มิลลิลิตร เพื่อกำจัดสารประกอบไฮเลนที่เหลืออยู่

3.4.5 อบสารที่ได้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช เพื่อคัดขนาด

3.5 การเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

งานวิจัยนี้เตรียมมาสเตอร์แบตช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์โดยการนำผงพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ ดินขาวเคโอลินทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับแต่งผิว ทัลก์ทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับแต่งผิวและไตรฟีนิลฟอสเฟตผสมกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยมีสูตรการเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.5

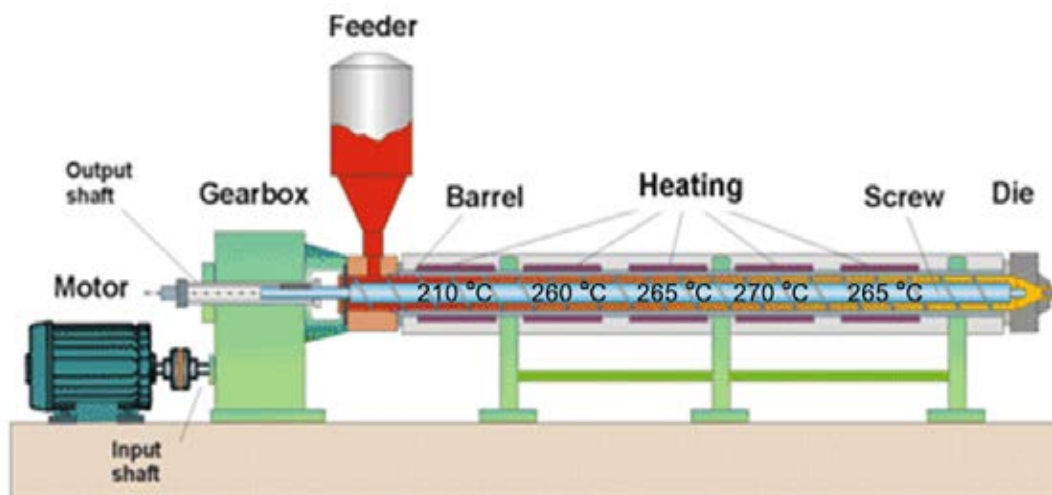
ตารางที่ 3.5 สูตรการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทแรพทาเลตคอมพาวนด์

ตัวอย่าง	ร้อยละโดยน้ำหนัก					
	PET	kaolin	talc	t-kaolin	t-talc	TPP
1	100	-	-	-	-	-
2	80	20	-	-	-	-
3	80	-	20	-	-	-
4	80	-	-	20	-	-
5	80	-	-	-	20	-
6	70	20	-	-	-	10
7	70	-	20	-	-	10
8	70	-	-	20	-	10
9	70	-	-	-	20	10

สำหรับการผสมใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) ของ Thermo scientific รุ่น PRISM TSE 24 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยขึ้นรูปภายใต้ภาวะอุณหภูมิ 265/270/265/260/210 องศาเซลเซียส จากหัวตายจนกระทั่งถึงส่วนป้อนเม็ดพลาสติกตามลำดับ ดังแสดงรูปที่ 3.3 และความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 30-32 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ของ Thermo scientific รุ่น PRISM TSE 24



รูปที่ 3.3 ช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

หมายเหตุ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเบื้องต้นสำหรับการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีน เทแรฟ เทเลตคอมพาวนด์สูตรต่างๆที่มีการเติมดินขาวเคโอลินและทัลก์ปริมาณแตกต่างกันที่ร้อยละ 10 – 30 โดยน้ำหนัก แล้วพบว่าที่ปริมาณร้อยละ 20 เป็นปริมาณสูงสุดที่สามารถขึ้นรูปมาสเตอร์แบทช์ด้วยวิธีการอัดรีดได้ หากปริมาณสูงกว่านี้จะไม่สามารถขึ้นรูปมาสเตอร์แบทช์ได้

3.6 การเตรียมพอลิเอทิลีน เทแรฟ เทเลตคอมพาวนด์ด้วยวิธีอัดขึ้นรูป

นำมาสเตอร์แบทช์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.5 ผสมกับผงพอลิเอทิลีน เทแรฟ เทเลตบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆตามตารางที่ 3.6 จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบของพอลิเอทิลีน เทแรฟ เทเลตคอมพาวนด์คือ PET/t-kaolin/TPP และ PET/t-talc/TPP ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปของ Labtech, Samut Prakan/Thailand โดยให้พอลิเอทิลีน เทแรฟ เทเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้มีอัตราส่วนของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยการขึ้นรูปกระทำภายใต้ภาวะอุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.6 สูตรการเตรียมพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์ด้วยวิธีอัดขึ้นรูป

ตัวอย่าง	อัตราส่วนที่ใช้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		เทียบเป็นปริมาณสารเติม แต่งหน่วยไฟในพอลิเมอร์ เมทริกซ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไตรฟีนิลฟอสเฟต (ร้อยละโดย น้ำหนัก)
	PET	มาสเตอร์แบทช์		
PET/t-K2/10TPP	80	10	2	10
PET/t-T2/10TPP	80	10	2	10



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดขึ้นรูปของ Labtech, Samut Prakan/Thailand

3.7 การเตรียมพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์ด้วยวิธีฉีดแบบ

นำมาสเตอร์แบทช์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.5 ผสมกับผงพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตบริสุทธิ์ในอัตราส่วนต่างๆตามตารางที่ 3.7 จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์ คือ PET/t-kaolin, PET/t-talc, PET/t-kaolin/TPP และ PET/t-talc/TPP ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปของ Topfine รุ่น A-25 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้มีอัตราส่วนของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ใน พอลิเมอร์เมทริกซ์ร้อยละ 2 และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยการขึ้นรูปกระทำภายใต้ภาวะอุณหภูมิ 270/270/270/270 องศาเซลเซียส จากหัวฉีดจนถึงส่วนป้อนเม็ดพลาสติก ตามลำดับ นอกจากนี้ อัตราการฉีดเท่ากับ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

ตารางที่ 3.7 สูตรการเตรียมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ด้วยวิธีการฉีดแบบ

ตัวอย่าง	อัตราส่วนที่ใช้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		เทียบเป็นปริมาณสารเติม แต่งหน่วงไฟในพอลิเมอร์ เมทริกซ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไตรฟีนิลฟอสเฟต (ร้อยละโดย น้ำหนัก)
	PET	มาสเตอร์แบทช์		
PET/t-K2	90	10	2	
PET/t-K5	75	25	5	
PET/t-T2	90	10	2	
PET/t-T5	75	25	5	
PET/t-K2/10TPP	80	10	2	10
PET/t-K5/10TPP	65	25	5	10
PET/t-T2/10TPP	80	10	2	10
PET/t-T5/10TPP	65	25	5	10



รูปที่ 3.5 เครื่องฉีดขึ้นรูปของ Topfine รุ่น A-25

3.8 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของมาสเตอร์แบทช์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้

3.8.1 การทดสอบสมบัติหน่วงไฟและด้านการหลอมหยด

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการลุกไหม้และด้านการหลอมหยดโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์หัดชันออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index Analysis, LOI) ตาม

มาตรฐาน ISO 4589 และเทคนิคการทดสอบการลุกไหม้ในแนวตั้ง (Vertical Burning Test) ตามมาตรฐานการทดสอบ Underwriters' Laboratories 94V (UL-94 V)

1) เทคนิคการวิเคราะห์หัดซ์น้ออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index Analysis, LOI) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่ต่ำที่สุด (minimal oxygen concentration) ในบรรยากาศผสมระหว่างออกซิเจนและไนโตรเจนที่สามารถทำให้วัสดุติดไฟและมีการลามไฟอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์หัดซ์น้ออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index Analyzer) ของ Stanton Redcroft รุ่น FTA ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยมีรายละเอียดการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 4589 ดังนี้

ขนาดชิ้นงาน 80 x 10 x 4 มิลลิเมตร

เชื้อเพลิง แก๊สผสมระหว่างออกซิเจนและไนโตรเจน

ก่อนการทดสอบให้จุดตัวอย่างในอากาศแล้วสังเกตพฤติกรรมการลุกไหม้เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกค่าความเข้มข้นออกซิเจนเริ่มต้น

ก) เลือกค่าเริ่มต้นที่ร้อยละ 18 เมื่อตัวอย่างจุดติดไฟในอากาศและลุกไหม้อย่างรวดเร็ว

ข) เลือกค่าเริ่มต้นที่ร้อยละ 21 เมื่อตัวอย่างจุดติดไฟในอากาศแต่มีลักษณะการลุกไหม้ไม่รุนแรงและไม่คงที่

ค) เลือกค่าเริ่มต้นที่ร้อยละ 25 เมื่อตัวอย่างไม่สามารถจุดติดไฟได้ในอากาศหรือไม่สามารถลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่องและจุดติดไฟยาก

เริ่มทดสอบโดยการวางตำแหน่งชิ้นทดสอบที่ระดับกลางปล่องแก้วซึ่งวางในแนวตั้ง และด้านบนของตัวอย่าง (ที่ใช้จุด) ต้องอยู่ต่ำกว่าปากปล่องแก้วไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร แต่จะต้องไม่ต่ำกว่า 100 มิลลิเมตรเหนือช่องจ่ายแก๊ส จากนั้นทำการปรับปริมาณแก๊สผสมระหว่างออกซิเจนและไนโตรเจนให้มีปริมาณของแก๊สออกซิเจนตามที่ต้องการ โดยปล่อยให้แก๊สไหลผ่านปล่องแก้วที่ความเร็ว 40 ± 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็นเวลาอย่างน้อย 30 วินาที ก่อนการจุดไฟในแต่ละชิ้นตัวอย่าง ทำการจ่อเปลวไฟให้สัมผัสที่ผิวตัวอย่างแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 30 วินาที โดยทุก 5 วินาที ยกเปลวไฟขึ้นสังเกตผิวด้านบนเกิดการลุกไหม้หรือไม่ ถ้าผิวดังกล่าวติดไฟให้รีบกดหัวจุดออก บันทึกข้อมูลช่วงเวลาและระยะทางที่เกิดการเผาไหม้ รวมทั้งสังเกตพฤติกรรมการลุกไหม้ หากการลุกไหม้ดับลงแต่เกิดการลุกไหม้ติดขึ้นมาได้ใหม่ใน 1 วินาที ให้สังเกตและบันทึกข้อมูลต่อไป

การเลือกค่าความเข้มข้นออกซิเจน (oxygen concentration, co) ในแต่ละตัวอย่างเป็นไปตามหลักการ up-and-down ดังต่อไปนี้

ลดค่าความเข้มข้นของออกซิเจน (co) ลงถ้าหากตัวอย่างทดสอบก่อนหน้ามีการลุกไหม้อย่างต่อเนื่องและการลุกไหม้มีช่วงเวลาเกิน 180 วินาที หรือ เกินระยะ 5 มิลลิเมตร นับจากด้านบนสุดของตัวอย่าง (กำหนดสัญลักษณ์พฤติกรรมการลุกไหม้แบบนี้เป็น “X”)

เพิ่มค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน (co) ขึ้นหากตัวอย่างทดสอบก่อนหน้ามีการลุกไหม้ไม่ต่อเนื่องและการลุกไหม้มีช่วงเวลาไม่เกิน 180 วินาที หรือ ระยะทางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร นับจากด้านบนสุดของตัวอย่างทดสอบ (กำหนดสัญลักษณ์พฤติกรรมการลุกไหม้แบบนี้เป็น “O”)

สังเกตลักษณะของการลุกไหม้ที่เกิดขึ้น เช่น การหลอมหยด การเกิดชาร์ การลุกไหม้ที่ไร้ทิศทาง การคุแดงหรือการเกิดการคุแดงหลังเปลวไฟดับและรายงานประกอบในแต่ละกรณี

ภายหลังการทดสอบเสร็จสิ้น นำตัวอย่างทดสอบออกจากปล่องแก้ว ทำความสะอาดเครื่องทดสอบให้มีสภาพพร้อมทดสอบตามภาวะเริ่มต้นที่กำหนดทุกครั้งของการทดสอบ

หลังจากที่ได้ใช้หลักการกำหนดค่าเบื้องต้นค่าใดค่าหนึ่งแล้วให้ทำการเพิ่มหรือลดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในแต่ละครั้งเท่ากับร้อยละ 1 จนทำให้เกิดผลการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการลุกไหม้จาก “O” ไปเป็น “X” ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ทำให้ได้ผลคู่ดังกล่าว ให้ใช้ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ทำให้ผลเป็น “O” เป็นค่าเริ่มต้น

โดยปกติในบรรยากาศมีออกซิเจนร้อยละ 21 ดังนั้น วัสดุที่มีค่า LOI ต่ำกว่า 21 จะสามารถลุกไหม้ได้ง่ายในบรรยากาศปกติ

เราสามารถจำแนกชนิดของวัสดุพอลิเมอร์ตามค่า LOI ดังนี้

$LOI < 21$	จัดอยู่ในพวกติดไฟได้ (flammable)
$21 < LOI < 28$	จัดอยู่ในพวกติดไฟได้ช้า (slow burning)
$LOI > 28$	จัดอยู่ในพวกดับไฟได้เอง (self-extinguishing)
$LOI > 100$	จัดอยู่ในพวกไม่ติดไฟ (intrinsically non-flammable)



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์หัดชันีออกซิเจนจำกัดของ Stanton Redcroft รุ่น FTA

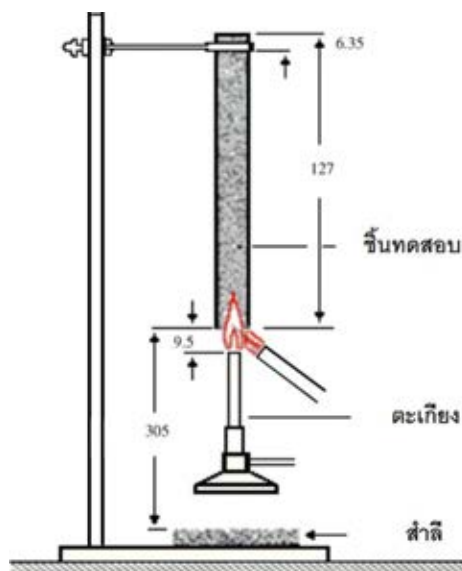
2) เทคนิคการทดสอบการลุกไหม้ในแนวตั้ง (Vertical Burning Test) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการลุกไหม้และการหลอมหยดของวัสดุที่ทำให้แผ่นสำลีส่องรับด้านล่างติดไฟและลุกไหม้ โดยใช้ชุดอุปกรณ์การทดสอบตามมาตรฐาน UL-94V (รูปที่ 3.7) ซึ่งมีรายละเอียดของการทดสอบดังนี้

ขนาดชิ้นงาน	127 x 12.7 x 3	มิลลิเมตร
ความสูงเปลวไฟ	20	มิลลิเมตร
เชื้อเพลิง	แก๊สมีเทน	

ทดสอบโดยจ่อไฟบริเวณด้านล่างของชิ้นทดสอบที่ยึดในแนวตั้งเป็นเวลา 10 วินาที โดยให้ความสูงของเปลวไฟส่วนที่สัมผัสกับชิ้นทดสอบมีขนาดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร จากนั้นจึงนำไฟออก พร้อมจับเวลาการลามไฟ (afterflame time 1, t_1) ของชิ้นทดสอบ รวมทั้งสังเกตว่ามีการหยดของวัสดุหลอมเหลวลงบนแผ่นสำลีส่องรับที่อยู่ด้านล่างหรือไม่ หลังจากที่ไฟที่ลามบนชิ้นทดสอบดับลงให้จุดไฟเผาบริเวณด้านล่างของชิ้นทดสอบซ้ำเป็นครั้งที่ 2 เป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำไฟออก พร้อมจับเวลาการลามไฟ (afterflame time 2, t_2) และสังเกตลักษณะการเผาไหม้ว่าเป็นอย่างไร พร้อมทั้งสังเกตว่ามีการคุ้แดงเกิดขึ้นหรือไม่และจับเวลาการเกิดการคุ้แดง (afterglow time, t_3) ในการทดสอบนี้ได้มีการบันทึกภาพเคลื่อนไหวด้วยกล้องดิจิทัล Sony Handycam Model DCR-PC 101E

หมายเหตุ

1. เวลาที่ใช้ในการจ่อไฟ (flame application time) หมายถึง ระยะเวลาที่เปลวไฟจากแหล่งจุดไฟสัมผัสกับวัสดุ
2. เวลาเริ่มจุดติดไฟ (ignition time) หมายถึง ระยะเวลาที่วัสดุเริ่มจุดติดไฟหลังจากที่นำเปลวไฟจากแหล่งจุดไฟสัมผัสกับวัสดุ (flame application)
3. เวลาการลามไฟ (afterflame time) หมายถึง ระยะเวลาที่เปลวไฟยังคงลุกไหม้บนวัสดุต่อไปหลังจากนำแหล่งจุดไฟออกไป
4. เวลาเริ่มหลอมหยด (time delay before melt dripping) หมายถึง ระยะเวลาที่วัสดุเริ่มหลอมเหลวหยดลงบนแผ่นสำลีสองชั้นหลังจากนำแหล่งจุดไฟออกไป



รูปที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์การทดสอบการติดไฟในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94V

เกณฑ์การจำแนกระดับของการติดไฟในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94V แบ่งเป็น 3 ระดับ (V0, V1 และ V2) ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 เกณฑ์การจำแนกระดับของการติดไฟในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94V

Observation	Classification		
	V-0	V-1	V-2
t_1 or t_2 for any specimen	10 s	30 s	30 s
$t_1 + t_2$ for 5 specimens	50 s	250 s	250 s
$t_2 + t_3$ for any specimen	30 s	60 s	60 s
Afterflame or afterglow up to clamp, any specimen	No	No	No
Ignition of cotton	No	No	Yes

3.8.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ภายหลังจากผสมด้วยดินขาวเคโอลิน ทัลก์และไตรฟีนิลฟอสเฟตในอัตราส่วนต่างๆกัน โดยเป็นการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการสลายตัวของชิ้นงาน ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer) ของ Mettler-Toledo รุ่น TGA/SDTA 851^e ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยใช้ภาวะการทดสอบแบบไดนามิกส์ ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหลของแก๊ส 20 มิลลิลิตรต่อนาที ช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์ตั้งแต่ 40 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 3.8 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ ของ Mettler-Toledo รุ่น TGA/SDTA 851^e

3.8.3 การทดสอบดัชนีการไหลหลอมเหลว

ความหนืดและลักษณะเฉพาะของการไหลของพอลิเมอร์เป็นปัจจัยสำคัญต่อวิธีการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยค่าดัชนีการไหลหลอมเหลวเป็นค่าที่ผูกผันกับความหนืด กล่าวคือถ้าค่าดัชนีการไหลหลอมเหลวมีค่าสูงแสดงว่าความหนืดต่ำ

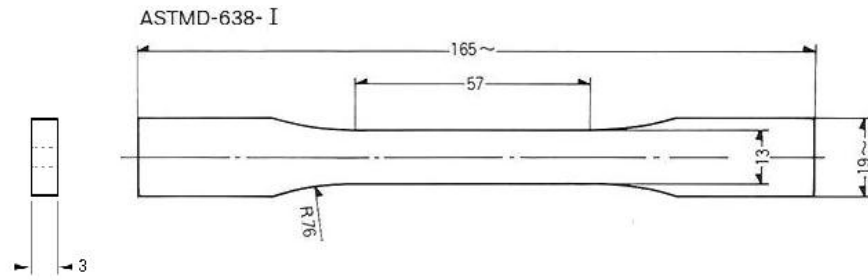
ค่าดัชนีการไหลหลอมเหลวเป็นจำนวนกรัมของพอลิเมอร์ที่ถูกอัดรีดออกจากช่องเปิดเล็กๆ ในเวลา 10 นาที ด้วยแรงกด 2160 กรัม โดยใช้เครื่องทดสอบดัชนีการไหลหลอมเหลวของบริษัท KAYENESS INC. รุ่น 7053 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1238



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบดัชนีการไหลหลอมเหลวของ KAYENESS INC. รุ่น 7053

3.8.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

1) การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง เป็นการทดสอบความแข็งแรงเชิงกลของชิ้นงานพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตภายหลังการผสมด้วยดินขาวเคโอลิน ทัลก์ และไตรฟีนิลฟอสเฟต ในอัตราส่วนต่างๆกัน ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ของ Lloyd รุ่น LR 100K ดังรูปที่ 3.11 การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยทดสอบภายใต้ภาวะของการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความขึ้นลัมพ์พัทธ์ร้อยละ 50 load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน และความเร็วในการทดสอบ 50 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.10 ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบแรงดึงประสงค์ของ Lloyd รุ่น LR 100K

2) การทดสอบความทนแรงกระแทก เป็นการวัดความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของชิ้นงานพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตภายหลังการผสมด้วยดินขาวเคโอลิน ทัลก์และไตรฟีนิลฟอสเฟต ในอัตราส่วนต่างๆกัน ภายใต้การตกกระทบ ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด ของ GOTECH ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยทดสอบภายใต้ภาวะของการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดของ GOTECH

3) การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง เป็นการทำให้ชิ้นทดสอบรับแรงดึงและแรงอัดในเวลาเดียวกัน ผลการทดสอบที่ได้สามารถบอกถึงมอดุลัสความยืดหยุ่น ความแข็งแรงสูงสุด และสมบัติอื่นๆแบบเดียวกับการทดสอบแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ของ Lloyd รุ่น Lloyd 500 ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D790 โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะการทดสอบอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ความเร็วในการทดสอบ 10 มิลลิเมตรต่ออนาที และระยะ span 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้งของ Lloyd รุ่น Lloyd 500

3.8.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะสัณฐานวิทยา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเคโอลินและทัลก์ด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction Analysis, XRD) จากนั้นศึกษา ลักษณะสัณฐานวิทยาและความสามารถในการกระจายตัวของดินขาวเคโอลินและทัลก์ในชิ้นงานที่เตรียมได้โดยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

1) เทคนิคการวัดขนาดและการกระจายของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) เป็นการตรวจสอบขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยและการกระจายขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์ โดยใช้เครื่องวัดการกระจายขนาดอนุภาคของ Malvern Instruments Ltd. รุ่น Mastersizer 2000 ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดขนาดอนุภาคของ Malvern Instruments Ltd. รุ่น Mastersizer 2000

2) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของดินขาวเคโอลินและทัลก์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจนด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) เป็นการวิเคราะห์เพื่อระบุหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรเจน โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ของ Thermo Nicolet รุ่น NICOLET 6700 ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยทำการทดสอบด้วยโหมด transmission ในช่วง wavenumber $4000-400\text{ cm}^{-1}$ จำนวนรอบของการสแกนเท่ากับ 16 ซึ่งดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่นำมาทดสอบนั้นมีลักษณะเป็นผง ดังนั้นจึงต้องเตรียมชิ้นทดสอบโดยผสมกับ KBr แล้วบรรจุลงในภาชนะที่ใช้เตรียมตัวอย่างพร้อมลูกบิด เขย่าให้เข้าเป็นเนื้อเดียว ใช้เวลาประมาณ 30 วินาที แล้วอัดเป็นแผ่นวงกลมบางๆ จากนั้นนำไปบรรจุลงในชิ้นยึดตัวอย่างของเครื่อง ทำการสแกนในช่วง wavenumber และจำนวน

สแกนที่เท่ากัน นำภาพที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปของดินขาวเคโอลินและทัลก์



รูปที่ 3.15 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ของ Thermo Nicolet รุ่น NICOLET 6700

3) เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction Analysis) เป็นการตรวจสอบและวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเคโอลินและทัลก์ โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) ของ Philips รุ่น PW 3710 ดังรูปที่ 3.16 โดยโหมดของการทดสอบแบบ step scan, step size เท่ากับ 0.02 องศา step time เท่ากับ 1 วินาที และช่วงการทดสอบตั้งแต่ 2θ เท่ากับ 5 ถึง 80 องศา



รูปที่ 3.16 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ Philips รุ่น PW 3710

4) เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เป็นการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของดินขาวเคโอลินและทัลก์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ Jeol รุ่น

JSM-5800LV ดังรูปที่ 3.17 โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 5,000 เท่า และทำการเคลือบผิวของตัวอย่างด้วยทองคำก่อนนำไปทำการวิเคราะห์เพื่อเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า และป้องกันการเกิดประจุเล็กตรอนบนพื้นผิวของตัวอย่าง



รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Jeol รุ่น JSM-5800LV

3.8.6 การวัดสีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

เนื่องจากชนิดของสารเติมแต่งหน่วงไฟและภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปมาสเตอร์แบทช์ และคอมพาวนด์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตอาจทำให้เฉดสีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้เปลี่ยนแปลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวัดการเปลี่ยนสีหรือความขาวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ภายหลังการผสมด้วยดินขาวเคโอลิน ทัลก์และไตรฟีนิลฟอสเฟตด้วยเครื่องวัดสีแบบ Reflectance Spectrophotometer ของ Macbeth รุ่น Color-Eye 7000 ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 เครื่องวัดสี ของ Macbeth รุ่น Color-Eye 7000

ภาวะที่ใช้ในการวัดสีเป็นการวัดในโหมดที่ไม่รวมความมันเงา (specular exclude, SPE) แต่รวมแสง UV (UV include) เลือกใช้ Illuminant Daylight 6500K (D65) และ

10° Standard observer ขึ้นทดสอบแต่ละชั้นจะวัดสี 3 ตำแหน่งแล้วนำมาเฉลี่ย และเครื่องวัดสี จะคำนวณดัชนีความขาว (CIE whiteness index) จากสมการที่ 3.1 และดัชนีความเหลือง (yellowness index ASTM E313) จากสมการที่ 3.2 เองโดยอัตโนมัติ

$$WI_{(CIE)} = Y + 800(0.3138 - x) + 1700(0.3310 - y) \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

โดย $WI_{(CIE)}$ = ดัชนีความขาว (CIE whiteness index)
 Y = CIE Tristimulus value
 x, y = Chromaticity coordinate

$$YI_{(E313)} = \frac{100(1.3013X - 1.1498Z)}{Y} \quad \dots\dots (3.2)$$

โดย $YI_{(E313)}$ = ดัชนีความเหลือง (yellowness index ASTM E313)
 X, Y, Z = CIE Tristimulus value

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีหรือความขาวของชิ้นงาน PET สำหรับงานวิจัยนี้มีเกณฑ์ดังนี้

- 1) ค่า WI (Whiteness index)
 WI ยิ่งมีค่าสูงยิ่งมีความขาวมากขึ้น
- 2) ค่า YI (Yellowness index)
 YI ยิ่งมีค่าสูงยิ่งเหลืองขึ้น
- 3) ค่า Db^*
 Db^* ยิ่งมีค่าสูงยิ่งเหลืองขึ้น
- 4) ค่า $DE_{CMC(1:1)}$

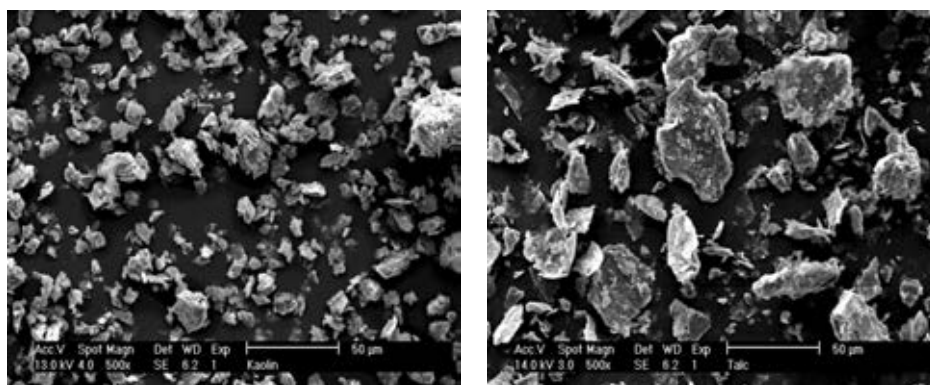
ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความขาวได้กำหนดให้เครื่องวัดสีแสดงการประเมินผลของ $DE_{CMC(1:1)}$ ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 หมายถึง PASSED แต่ถ้ามากกว่า 1 หมายถึง FAILED ซึ่งแสดงว่าชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูปมีสีเหลืองมากกว่าชิ้นงานก่อนการขึ้นรูป ซึ่งเราสามารถมองเห็นความแตกต่างดังกล่าวและไม่สามารถยอมรับความแตกต่างนั้นได้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะทางกายภาพของดินขาวเคโอลินและทัลก์

เมื่อนำดินขาวเคโอลินและทัลก์ทั้งที่ผ่านการปรับผิวและไม่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไซเลน คือ N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane มาบดด้วยเครื่องบดละเอียด (pulverizer) จะได้ผงละเอียดสีขาว จากนั้นนำมาคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อน (sieve) ขนาด 200 เมช พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่ร่อนผ่านตะแกรงได้ นอกจากนี้สีของผงดินทั้งสองที่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไซเลนเปลี่ยนแปลงไปโดยมีสีเหลืองเข้มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผงดินที่ไม่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไซเลน แสดงให้เห็นว่าการใช้สารประกอบไซเลนในการปรับแต่งผิวของดินขาวเคโอลินและทัลก์เป็นผลให้ลักษณะทางกายภาพของดินทั้งสองเปลี่ยนแปลง เมื่อนำอนุภาคดังกล่าวไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์มีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แต่จะสังเกตเห็นได้ว่าอนุภาคของทัลก์มีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลิน



(ก)

(ข)

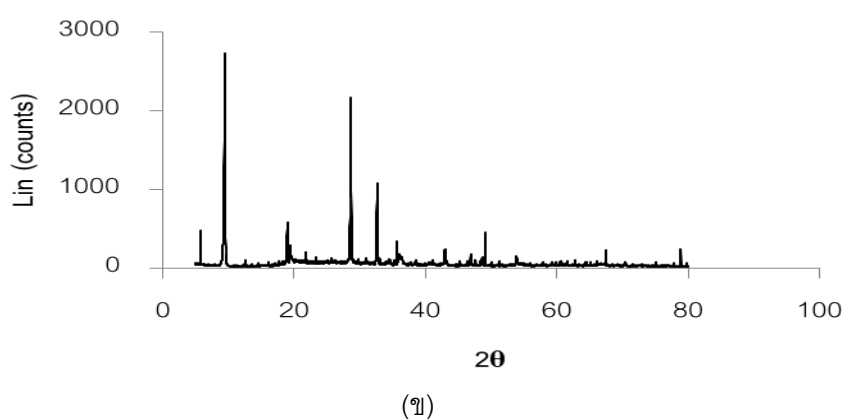
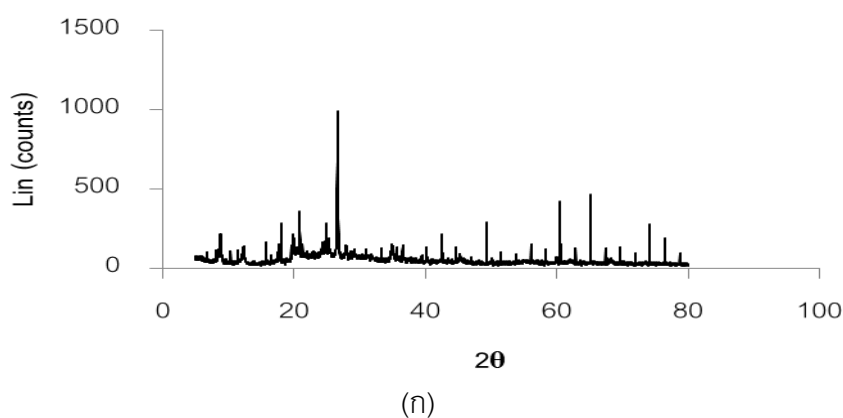
รูปที่ 4.1 SEM micrograph ของอนุภาค (ก) ดินขาวเคโอลิน (ข) ทัลก์ ที่กำลังขยาย 500 เท่า

การที่ดินขาวเคโอลินมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าอนุภาคของทัลก์เป็นเพราะดินขาวเคโอลินเป็นดินเบา สามารถบดให้อนุภาคของผงดินมีขนาดเล็กและมีความละเอียดของผงดินได้ง่าย แม้ว่าทัลก์จะมีความแข็งตามระดับความแข็งของโมห์ที่ต่ำกว่าก็ตาม [8]

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเคโอลินและทัลก์

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเคโอลินและทัลก์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า ดินขาวเคโอลินมีองค์ประกอบของแร่เคโอลินไนต์ประมาณร้อยละ 28 โดยพีคที่สามารถระบุปริมาณของแร่เคโอลินไนต์จะปรากฏที่มุม 2θ ประมาณ 12.31, 24.85 และ 62.35 องศา นอกจากนี้ยังพบว่ามีแร่ชนิดอื่นๆ เช่น ควอตซ์ (quartz) อิลไลต์ (illite) และ คริสโทไบไลต์ (cristobalite) เป็นองค์ประกอบในปริมาณเพียงเล็กน้อย

เนื่องจากทัลก์มีองค์ประกอบหลักเป็นแมกนีเซียมซิลิเกต (magnesium silicate) จึงปรากฏพีคของแมกนีเซียมซิลิเกตชัดเจนที่มุม 2θ ประมาณ 9.5, 19 และ 29 องศา โดยจากเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของทัลก์พบว่ามีองค์ประกอบของแมกนีเซียมซิลิเกตอยู่สูงสุดถึง 30 เปอร์เซ็นต์

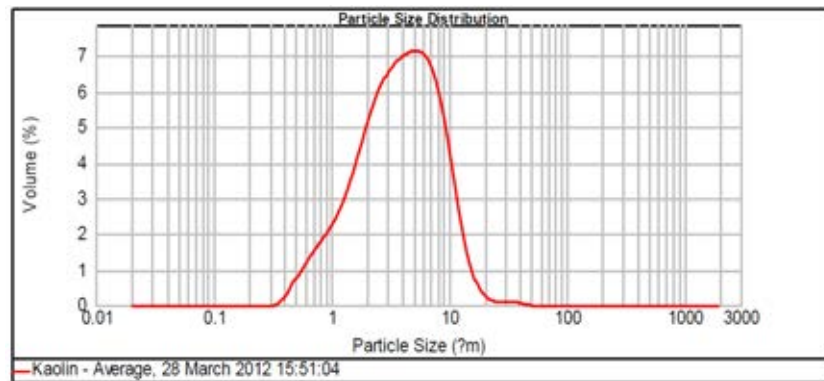


รูปที่ 4.2 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของ (ก) ดินขาวเคโอลิน (ข) ทัลก์

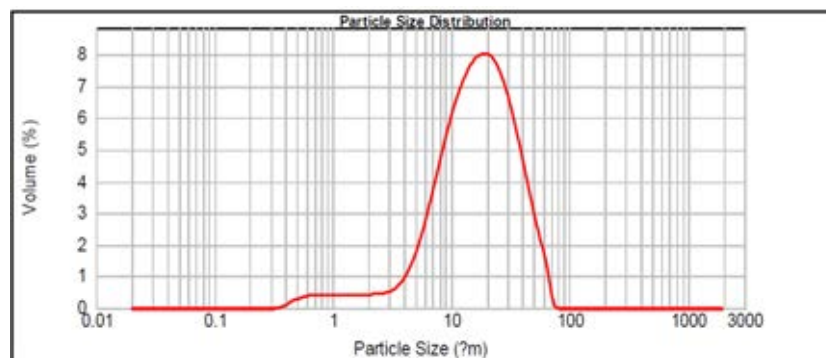
4.3 ขนาดและการกระจายของขนาดอนุภาค

ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์ทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจน พบว่าขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ไม่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจนมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 3.841 และ 16.790

ไมโครเมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาค่า span แล้วพบว่าทัลก์มีการกระจายขนาดอนุภาคที่แคบกว่าของดินขาวเคโอลินเล็กน้อยเนื่องจาก span ของอนุภาคทัลก์มีค่า 2.044 ในขณะที่ span ของอนุภาคดินขาวเคโอลินมีค่า 2.204 โดยกราฟแสดงการกระจายของขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ไม่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจนแสดงไว้ในรูปที่ 4.3



(ก)



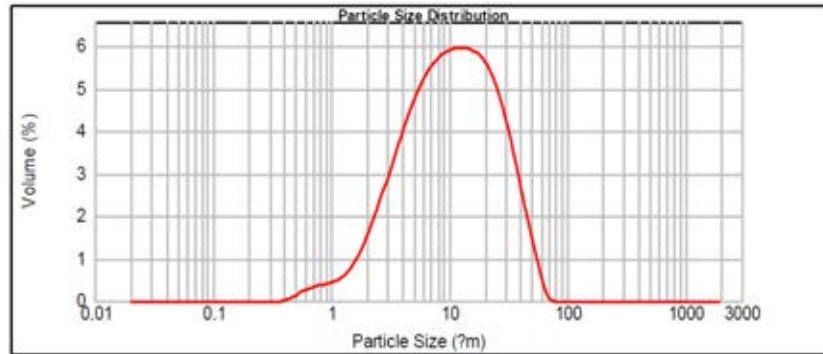
(ข)

รูปที่ 4.3 กราฟการกระจายของขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ไม่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจน (ก) ดินขาวเคโอลิน (ข) ทัลก์

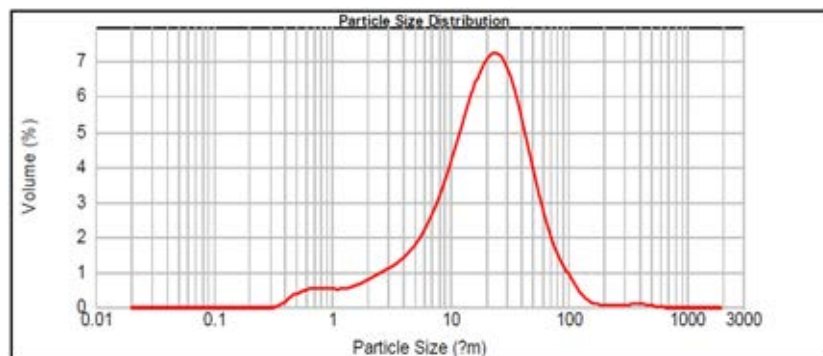
การที่อนุภาคของดินขาวเคโอลินมีขนาดเล็กกว่าเพราะดินขาวเคโอลินเป็นดินเบา มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าทัลก์ จึงกระจายตัวและแขวนลอยในตัวกลางที่เป็นของเหลวได้ดีกว่า [22] ด้วยเหตุนี้ขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลินที่วัดได้จึงมีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคของทัลก์

สำหรับขนาดและการกระจายของขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจนพบว่าขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์มีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 10.374 และ 19.749 ไมโครเมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาค่า span แล้วพบว่าทัลก์มีการกระจายขนาดอนุภาคแคบกว่าของดินขาวเคโอลินเล็กน้อยเนื่องจาก span ของอนุภาคทัลก์มีค่า 2.544 ขณะที่ span ของอนุภาคดินขาวเคโอลินมีค่า 2.757 โดยกราฟแสดง

การกระจายของขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจนแสดงไว้ในรูปที่ 4.4



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 กราฟการกระจายของขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจน (ก) ดินขาวเคโอลิน (ข) ทัลก์

การที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของดินขาวเคโอลินและทัลก์มีค่าสูงขึ้นเกิดจากการรวมกลุ่มกันของอนุภาค (agglomerate) โดยที่พื้นผิวของอนุภาคของดินทั้งสองมีสารประกอบไฮโดรเจนที่มีหมู่ที่ไม่ใช่ไฮดรอกซิลขนาดใหญ่เกาะอยู่ เมื่อนำอนุภาคของดินทั้งสองไปละลายในน้ำซึ่งน้ำมีสภาพขี้ผึ้งทำให้เกิดความไม่เข้ากันระหว่างสารประกอบไฮโดรเจนกับน้ำ สารประกอบไฮโดรเจนจึงรวมกลุ่มกันเอง ซึ่งการรวมกลุ่มกันเองของสารประกอบไฮโดรเจนมีผลให้การกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคของดินในน้ำลดลง อนุภาคของดินอยู่ชิดกันมากขึ้น เมื่อทำการวัดขนาดอนุภาคจึงเห็นว่าขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้น [23]

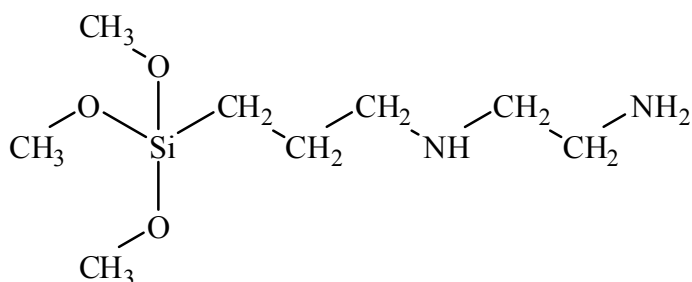
4.4 โครงสร้างทางเคมีของดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไฮเลน

เมื่อนำดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR และเปรียบเทียบสเปกตรัมระหว่างดินขาวเคโอลินและทัลก์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไฮเลน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของดินขาวเคโอลินทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไฮเลนปรากฏพีกของหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกันทั้งหมด ซึ่งต่างก็แสดงพีกที่ตำแหน่ง 3691.144 cm^{-1} ที่เป็นลักษณะเฉพาะของการสั่นแบบยืด (stretching) ของหมู่ -OH ที่พื้นผิวด้านใน (inner-surface hydroxyl group) ของโมเลกุล ส่วนพีกที่ปรากฏที่ตำแหน่ง 910.2507 cm^{-1} นั้นแสดงการสั่นของหมู่ -OH ที่พื้นผิวด้านในของโมเลกุลในลักษณะของการเกิดดีฟอร์เมชัน (deformation) นอกจากนี้ยังปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 1025.96 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นของหมู่ Si-O แบบ perpendicular mode อีกด้วย

สำหรับการวิเคราะห์ทัลก์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไฮเลนด้วยเทคนิค FT-IR นั้น พบว่าลักษณะของ FT-IR สเปกตรัมปรากฏที่ wavenumber เดียวกันแต่ลักษณะของสเปกตรัมที่แสดงถึงปริมาณ transmittance แตกต่างกัน โดยสเปกตรัมของทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane มี intensity ที่ลดลง ซึ่งพีกที่ปรากฏที่ตำแหน่ง 3675.761 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชัน -OH ที่เป็นลักษณะเฉพาะของการสั่นแบบยืด (stretching) ของหมู่ -OH ที่พื้นผิวด้านใน (inner-surface hydroxyl group) ของโมเลกุล และปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 663.403 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชันของ -OH ของ octahedral Mg-O-H ในทัลก์ การที่ intensity ของหมู่ -OH ลดนั้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณของหมู่ -OH ของทัลก์ที่เหลืออยู่มีปริมาณลดลง แสดงว่าหมู่ -OH ที่ผิวของทัลก์ทำปฏิกิริยากับ N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane นั้นเอง

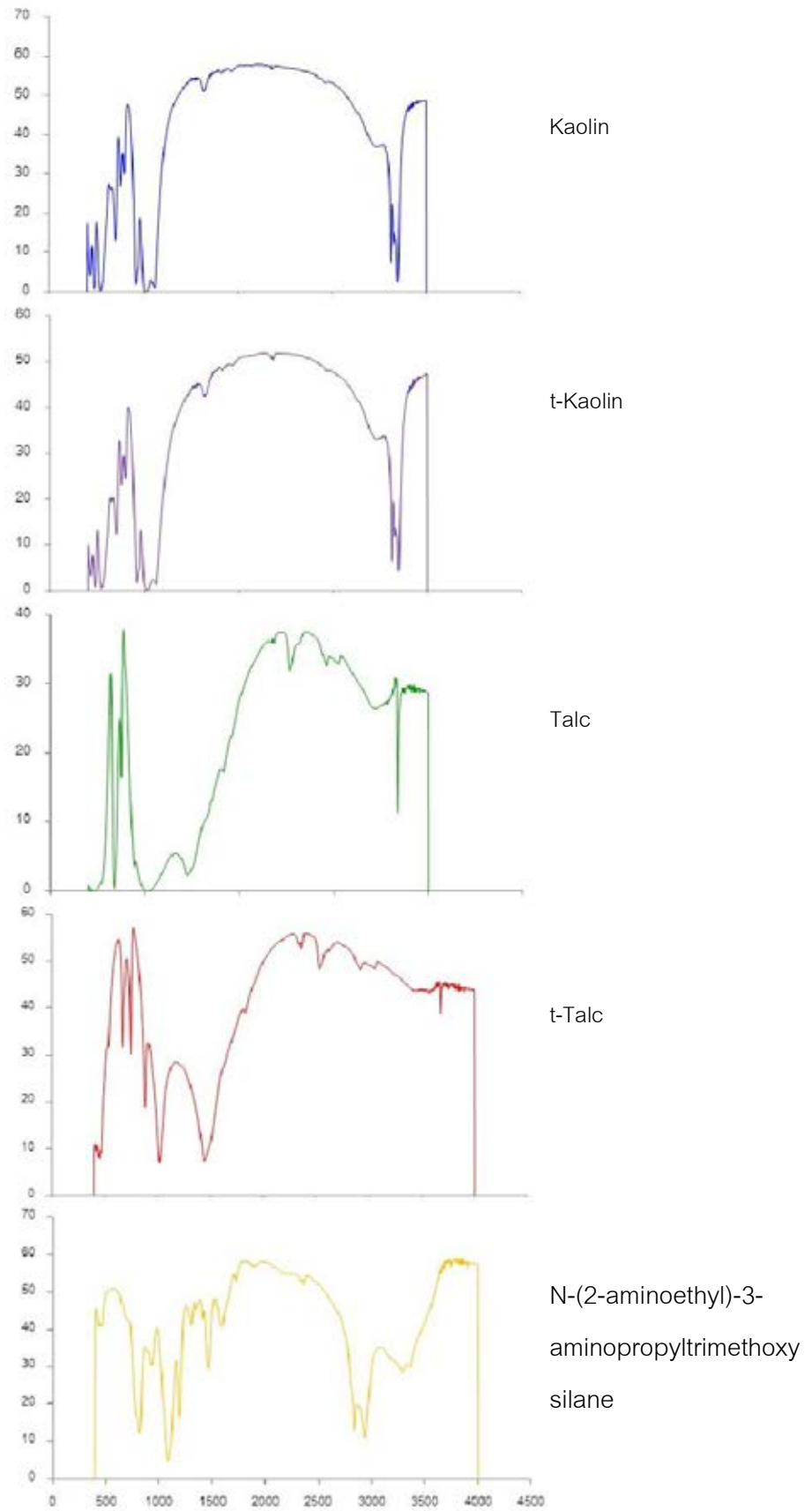
สำหรับการวิเคราะห์ N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane บริสุทธิ์ด้วยเทคนิค FT-IR นั้น พีกที่ปรากฏที่ตำแหน่ง 3236.018 cm^{-1} แสดงการสั่นของหมู่เอมีนปฐมภูมิ และพีกที่ปรากฏที่ตำแหน่ง 3178.163 cm^{-1} แสดงการสั่นของหมู่เอมีน (amine) ซึ่งเป็นเอมีนทุติยภูมิ และพีกที่ปรากฏที่ตำแหน่ง 2838.748 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชัน -CH₂- ภายในโมเลกุลของสารประกอบไฮเลนนี้ ซึ่งมีลักษณะการสั่นแบบยืด และพีกที่ปรากฏที่ตำแหน่ง 1454.087 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกที่แสดงหมู่ -O-CH₃ และพีกที่ปรากฏที่ตำแหน่ง 1072.244 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชัน Si-O-

Aliphatic ของสารประกอบไฮเลนนี ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของ N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane แสดงไว้รูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 โครงสร้างทางเคมีของ N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของดินขาวเคโอลินและทัลก์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane ด้วยเทคนิค FT-IR แสดงให้เห็นว่าสารประกอบไฮเลนนีที่ใช้สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของโมเลกุลของทัลก์ได้ดีกว่าของดินขาวเคโอลิน ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีพีคที่ปรากฏที่ตำแหน่ง 3178.163 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของเอมีนทุติยภูมิที่อยู่ภายในสายโซ่โมเลกุลของสารประกอบไฮเลนนี



รูปที่ 4.6 FTIR-spectra ของดินขาวเคโอลิน ทัลก์และสารประกอบไซเลน

4.5 สีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

สีหรือความขาวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่เปลี่ยนไปภายหลังจากกระบวนการขึ้นรูปร่วมกับดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane ในอัตราส่วนร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่วัดด้วยเครื่องวัดสีแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และลักษณะของชิ้นงานที่เตรียมได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 ซึ่งจากการตรวจพินิจด้วยตาเปล่าพร้อมทั้งพิจารณา 1) ค่า WI 2) ค่า YI 3) ค่า Db* และ 4) ค่า $DE_{CMC(1:1)}$ จะสังเกตเห็นได้ว่าความขาวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตลดลงและมีความเหลืองที่เพิ่มขึ้น และจะเหลืองยิ่งขึ้นเมื่อปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่เติมเพิ่มสูงขึ้นคือร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังเห็นได้ชัดว่าการใช้ดินขาวเคโอลินทำให้สีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเปลี่ยนแปลงมากกว่าการใช้ทัลก์ในปริมาณที่เท่ากัน โดยจะเห็นได้ว่าค่า WI ลดลงมา ค่า YI เพิ่มขึ้นมาก ค่า Db* และ $DE_{CMC(1:1)}$ มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นมาก (ประมาณ 8.2 ถึง 11.8) ซึ่งค่า $DE_{CMC(1:1)}$ ที่สูงมากเช่นนี้แสดงว่าสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีได้ด้วยตาเปล่าและอยู่ในระดับที่ยอมรับไม่ได้ ซึ่งการที่สีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่เติมดินขาวเคโอลิน หรือทัลก์เปลี่ยนแปลงเช่นนี้เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป



รูปที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

1 หมายถึง neat PET	2 หมายถึง PET/t-K2	3 หมายถึง PET/t-K5
4 หมายถึง PET/t-T2	5 หมายถึง PET/t-T5	6 หมายถึง PET/t-K2/10TPP
7 หมายถึง PET/t-K5/10TPP	8 หมายถึง PET/t-T2/10TPP	9 หมายถึง PET/t-T5/10TPP

ตารางที่ 4.1 ดัชนีความขาวและดัชนีความเหลืองของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

ตัวอย่าง	L*	a*	b*	DL*	Da*	Db*	WI-CIE	YI-E313	DE _{cmc(1:1)}	Visual
neat PET	88.17	-1.64	0.83	0	0	0	68.36	0.36	0	-
	L*	a*	b*	DL*	Da*	Db*	WI-CIE	YI-E313	DE _{cmc(1:1)}	Visual
PET/t-K5/10TPP	85.24	0.25	7.59	-2.93 D	1.89 R	6.76 Y	28.75	15.62	9.45	Failed
PET/t-T2/10TPP	86.14	-0.32	4.65	-2.03 D	1.32 R	3.82 Y	45.33	9.25	5.47	Failed
PET/t-K5/10TPP	81.87	0.33	9.31	-6.30 D	1.97 R	8.48 Y	12.22	19.6	11.84	Failed
PET/t-K2/10TPP	85.02	-0.3	6.75	-3.15 D	1.34 R	5.92 Y	32.37	13.54	8.2	Failed
PET/t-T5	83.66	0.25	7.04	-4.51 D	1.88 R	6.21 Y	27.85	14.77	8.83	Failed
PET/t-T2	85.77	-0.12	5.82	-2.40 D	1.52 R	5.00 Y	38.7	11.78	7.05	Failed
PET/t-K5	82.76	-0.21	6.57	-5.42 D	1.43 R	5.74 Y	28.18	13.55	8.14	Failed
PET/t-K2	85.45	-0.37	6.3	-2.72 D	1.27 R	5.47 Y	35.58	12.55	7.58	Failed

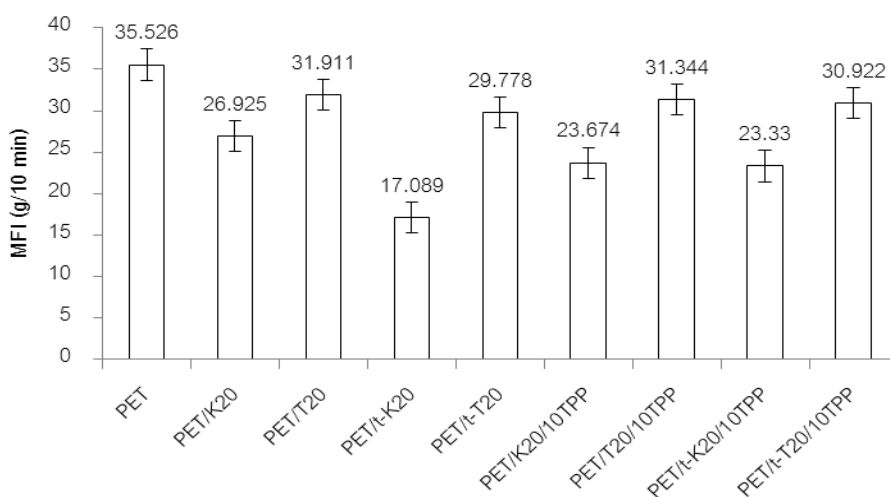
4.6 ดัชนีการไหลหลอมเหลวของมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

สมบัติด้านวิทยากระแส (rheological property) ของพอลิเมอร์มีความสำคัญต่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์และการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูป ในทางอุตสาหกรรมการหาความหนืดหรือความสามารถในการไหลตัวของพอลิเมอร์ทำได้โดยการวัดค่าดัชนีการไหลหลอมเหลวของพอลิเมอร์ หลอมเหลว (melt flow index, MFI) ถ้าค่า MFI มีค่ามาก แสดงว่าพอลิเมอร์มีความหนืดหลอมเหลว (melt viscosity) ต่ำ ทำให้มีการไหลที่ดี ในทางตรงกันข้ามถ้ามีค่า MFI ต่ำ แสดงว่าพอลิเมอร์มีความหนืดหลอมเหลวสูงทำให้ไหลได้ยาก

เม็ดพลาสติกที่ได้จากการอัดรีดผงพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ผสมกับดินขาวเคโอลินทัลก์ ร่วมกับไตรฟีนิลฟอสเฟต ถูกนำมาวัดค่าดัชนีการไหลหลอมเหลว เพื่อเป็นข้อมูลประกอบสำหรับกำหนดภาวะในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบในขั้นตอนต่อมา ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.8 โดยพบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งหน่วงไฟผสมเข้าไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ค่าดัชนีการไหลหลอมเหลวลดลงโดยค่าดัชนีการไหลหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมดินขาวเคโอลินมีค่าต่ำกว่าเติมทัลก์และจะลดต่ำลงอีกเมื่อมีการปรับแต่งผิวของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ด้วยสารประกอบไฮโดรเจน การที่พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่ผสมดินขาวเคโอลินมีค่าดัชนีการไหลที่ต่ำกว่าการเติมทัลก์นั้นเป็นผลมาจากการที่ดินขาวเคโอลินมีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่าทัลก์นั่นเอง ซึ่งการที่สารตัวเติมที่เติมเข้าไปมีอนุภาคขนาดเล็กจะมีผลให้มีความหนืดสูงขึ้นในปริมาณที่มากกว่าในกรณีของสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่ ทั้งนี้เพราะสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิว (surface area) ที่มากกว่า ทำให้มีตำแหน่งที่จะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์และ/หรือระหว่างสารตัวเติมด้วยกันเอง [24, 25] ส่วนการเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจนนั้นมีผลให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวสูงขึ้นนั้น สันนิษฐานว่าการปรับแต่งผิวดินทำให้อนุภาคของสารเติมแต่งกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี จึงทำให้อนุภาคของสารเติมตัวเติมสามารถขัดขวางการไหลของพอลิเมอร์ได้มากขึ้น [25] สำหรับการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตมีผลให้ค่าดัชนีการไหลหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะไตรฟีนิลฟอสเฟตทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (lubricant) ได้ ซึ่งไตรฟีนิลฟอสเฟตจะเข้าไปลดแรงเสียดทานของ polymer bulk ระหว่างการไหล และยังมีส่วนช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือและพอลิเมอร์หลอมเหลวอีกด้วย [25] ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วนี้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมไตรฟีนิลฟอสเฟตจึงไหลได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.2 ค่าดัชนีการไหลหลอมเหลวของมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

ตัวอย่าง	ดัชนีการไหลหลอมเหลว (กรัม/10 นาที)
PET	35.526
PET/K20	26.925
PET/T20	31.911
PET/t-K20	17.089
PET/t-T20	29.778
PET/K20/10TPP	23.674
PET/T20/10TPP	31.344
PET/t-K20/10TPP	23.330
PET/t-T20/10TPP	30.922



รูปที่ 4.8 ดัชนีการไหลของมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

4.7 สมบัติด้านการหน่วงไฟและหลอมหยดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

4.7.1 ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (LOI)

4.7.1.1 ผลของการเติมดินขาวเคโอลิน ทัลก์ และไตรฟีนิลฟอสเฟต ต่อค่า LOI ของมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

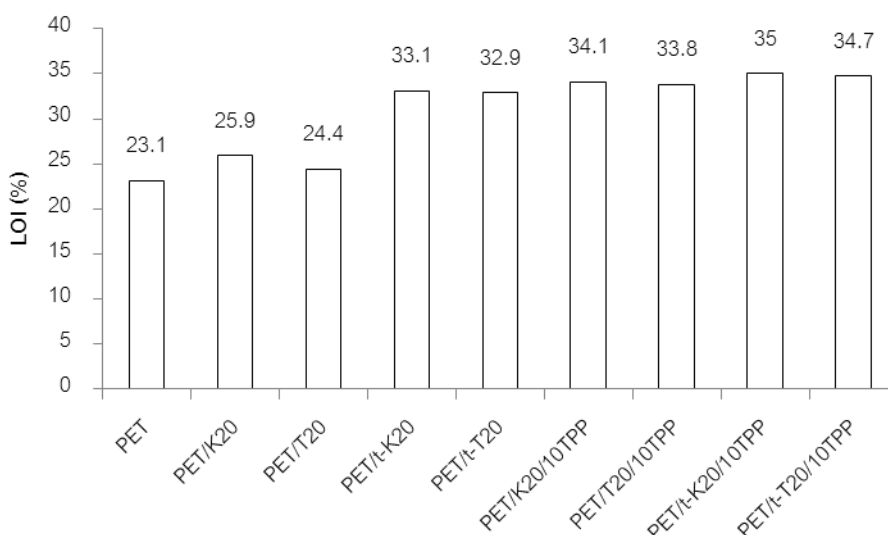
เมื่อนำมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมดินขาวเคโอลินและทัลก์ในปริมาณร้อยละ 20 ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และมีการเติมไตรฟีนิล

ฟอสเฟตลงไปด้วยนั้นไปขึ้นรูปเป็นชั้นทดสอบและนำไปทดสอบเพื่อหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (LOI) เปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9 พบว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดที่สูงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ โดยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์มีค่า LOI ค่อนข้างต่ำ คือร้อยละ 23.1 นั่นคือพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์สามารถติดไฟได้ค่อนข้างง่ายในบรรยากาศปกติที่มีปริมาณออกซิเจนประมาณร้อยละ 21 แต่การเติมดินขาวเคโอลิน ทัลก์ ร่วมกับไตรฟีนิลฟอสเฟต ทำให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดสูงขึ้น การเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์เพียงอย่างเดียวทำให้วัสดุมีค่า LOI สูงขึ้นเล็กน้อย โดยดินขาวเคโอลินทำให้วัสดุมี LOI สูงขึ้นประมาณ 25.9 ในขณะที่ทัลก์ทำให้วัสดุมีค่า LOI สูงขึ้นเพียง 24.4 เท่านั้น ทั้งนี้เพราะดินขาวเคโอลินมีองค์ประกอบของแร่เคโอลินในต์มากที่สุดโดยมีอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ประกอบด้วยชั้นของซิลิกาเรียงสลับกับชั้นของอะลูมินาซึ่งมีความคล้ายคลึงกับมอนต์มอริลโลไนต์ จึงทำให้ดินขาวเคโอลินมีความสามารถในการหน่วงไฟได้ดีเทียบเท่ากับมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) [6] โดยชั้นซิลิเกตเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดชั้นชาร์ที่มีความคงทนต่อความร้อนปกคลุมพื้นผิววัสดุ เปรียบเสมือนฉนวนกันความร้อนจากเปลวไฟและป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนไม่ให้เข้าไปใกล้วัสดุ เช่นเดียวกับอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อยู่ในองค์ประกอบก็ได้ช่วยทำให้เกิดชั้นชาร์เพิ่มขึ้นและป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเจนเข้าไปใกล้วัสดุการเผาไหม้จึงเกิดได้ยากขึ้น ในขณะที่ทัลก์มีองค์ประกอบของซิลิกาปริมาณที่น้อยกว่า อีกทั้งไม่มีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมออกไซด์แต่มีแมกนีเซียมออกไซด์ [6] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์จะทำให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีค่า LOI สูงขึ้นมากถึงร้อยละ 33 ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์จะมีระยะช่องว่างระหว่างชั้นของดินเพิ่มขึ้นทำให้ดินขาวเคโอลินและทัลก์สามารถแทรกเข้าไปในเนื้อพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตได้มากขึ้น มาสเตอร์แบทช์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่ได้จึงมีค่า LOI สูงขึ้นมากกว่ามาสเตอร์แบทช์คอมพาวนด์ที่เติมด้วยดินขาว เคโอลินหรือทัลก์ที่ไม่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์ [26] และที่น่าสนใจคือเมื่อเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตลงไป ในมาสเตอร์แบทช์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีการเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์พบว่าคอมพาวนด์ดังกล่าวมีค่า LOI เพิ่มสูงขึ้นอีกอยู่ในช่วงร้อยละ 34-35 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อไตรฟีนิลฟอสเฟตได้รับความร้อนจะสลายตัวได้เป็นอนุมูลอิสระและไอระเหยของฟอสเฟต ($PO\cdot$, $P\cdot$, HPO_2 , P_2) ซึ่ง $PO\cdot$ มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ของพอลิเมอร์และมีความว่องไว ได้แก่อนุมูลอิสระของไฮโดรเจน ($H\cdot$) และไฮดรอกไซด์ ($OH\cdot$) กลายเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟหรือติดไฟได้ลดลงส่งผลให้ปฏิกิริยาการขยายต่อ (propagation) ของสายโซ่อนุมูลอิสระของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสิ้นสุดลง การเผา

ไหม้ของพอลิเมอร์จึงลดลง นอกจากนี้ไตรฟีนิลฟอสเฟตยังสลายตัวให้กรดที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการเกิด cross-link ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตทำให้ผิวของวัสดุเกิดขึ้นซารีในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเคลือบผิววัสดุ ผิวหน้าของวัสดุจึงไม่สัมผัสความร้อนและไม่เกิดการลุกไหม้ต่อไป [27]

ตารางที่ 4.3 ค่า LOI ของมาตรฐานเบทซ์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไซเลน ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักทั้งที่ไม่เติมและเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10

ตัวอย่าง	ดัชนีออกซิเจนจำกัด (%)
PET	23.1
PET/K20	25.9
PET/T20	24.4
PET/t-K20	33.1
PET/t-T20	32.9
PET/K20/10TPP	34.1
PET/T20/10TPP	33.8
PET/t-K20/10TPP	35.0
PET/t-T20/10TPP	34.7



รูปที่ 4.9 ค่า LOI ของมาตรฐานเบทซ์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไซเลน ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักทั้งที่ไม่เติมและเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10

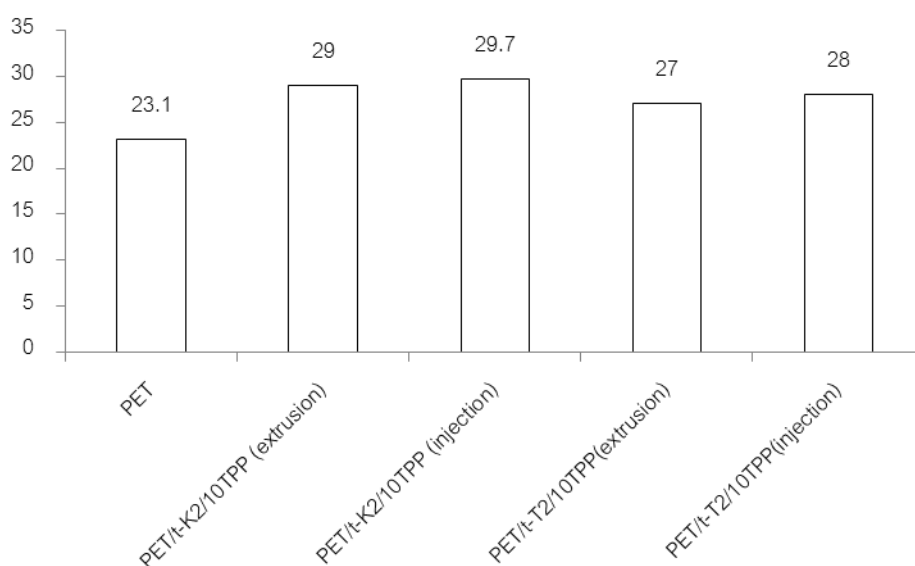
4.7.1.2 ผลของการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตในขั้นตอนการอัดรีดและขั้นตอนการฉีดแบบต่อค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์

จากผล LOI ของมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์ในข้อ 4.5.1.1 พบว่าการเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไซเลนให้ค่า LOI สูงกว่าที่ไม่ผ่านการปรับแต่งผิว ดังนั้นในการนำมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตมาผสมกับผงพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตบริสุทธิ์เพื่อผลิตเป็นพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์ จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบแล้วนำไปทดสอบสมบัติอื่นๆต่อไปนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกนำดินขาวและทัลก์ที่ปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไซเลนเท่านั้นมาใช้ และเพื่อศึกษาผลการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตในขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างกันต่อค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์จึงได้ทดลองนำมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์มาผสมกับผงพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตบริสุทธิ์ในอัตราส่วนที่มีปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก และเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10 โดยน้ำหนักมาขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดแบบ โดยมีการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตในขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างกัน คือในขั้นตอนการอัดรีดและขั้นตอนการฉีดขึ้นรูป

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.10 แสดงค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์ที่มีการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตในขั้นตอนการอัดรีดและขั้นตอนการขึ้นรูป พบว่าการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตในขั้นตอนของการฉีดขึ้นรูปมีผลให้ค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์เพิ่มสูงมากกว่าการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตในขั้นตอนของการอัดรีด ทั้งนี้เป็นเพราะไตรฟีนิลฟอสเฟตมีจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิสลายตัวที่ต่ำกว่าอุณหภูมิสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต ดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ใช้เป็นสารเติมแต่งหน่วงไฟ เมื่อไตรฟีนิลฟอสเฟตผ่านกระบวนการอัดรีดที่อุณหภูมิสูง (270 องศาเซลเซียส) ไตรฟีนิลฟอสเฟตจึงอาจสลายตัวไปบ้างบางส่วน จากนั้นเมื่อนำมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์ที่ผ่านกระบวนการอัดรีดมาผสมกับพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตบริสุทธิ์แล้วขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยวิธีฉีดแบบก็จะทำให้ไตรฟีนิลฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์ได้รับความร้อนอีกครั้งหนึ่ง ไตรฟีนิลฟอสเฟตที่เหลืออยู่จึงเกิดการสลายตัวได้อีกด้วยเหตุนี้ปริมาณของไตรฟีนิลฟอสเฟตที่มีอยู่ในพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์ที่ได้จากขั้นตอนดังกล่าวเหลืออยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าชิ้นทดสอบที่เติมไตรฟีนิลฟอสเฟตในขั้นตอนของการขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดแบบ เพราะฉะนั้นค่า LOI ของ พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมไตรฟีนิลฟอสเฟตในขั้นตอนของการฉีดขึ้นรูปมีค่าสูงกว่าการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตในขั้นตอนของการอัดรีด

ตารางที่ 4.4 ค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณของดินขาว เคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮเลน ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และเติม ไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10 ในขั้นตอนการอัดรีดและขั้นตอนของการฉีดขึ้นรูป

ตัวอย่าง	LOI (%)
PET	23.1
PET/t-K2/10TPP (extrusion)	29.0
PET/t-K2/10TPP (injection)	29.7
PET/t-T2/10TPP (extrusion)	27.0
PET/t-T2/10TPP (injection)	28.0



รูปที่ 4.10 ค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณของดินขาว เคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮเลน ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และเติม ไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10 ในขั้นตอนการอัดรีดและขั้นตอนของการฉีดขึ้นรูป

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การขึ้นรูปพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ สูตรต่างๆสำหรับการทดสอบด้วยกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดแบบ

4.7.1.3 ผลของการเติมดินขาวเคโอลิน ทัลก์ และไตรฟีนิลฟอสเฟต ต่อค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

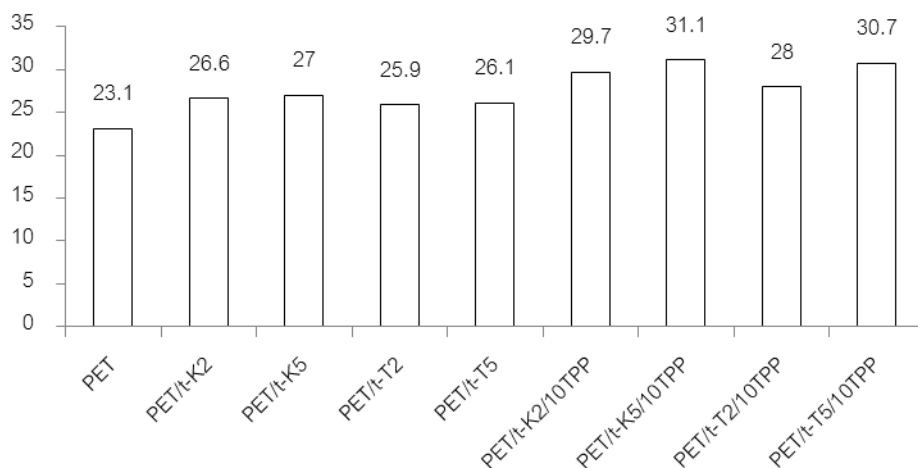
จากผลการทดสอบหาค่า LOI ของมาตรฐานเบสท์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์และผลของการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตในขั้นตอนที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้จึงเลือก

เตรียมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์โดยการเติมดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจน ในปริมาณร้อยละ 2 และ 5 และเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูป

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11 แสดงค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์โดยเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจน ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักทั้งที่ไม่เติมและเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10 ในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูป พบว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้มีค่า LOI สูงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และการเพิ่มปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ทำให้ค่า LOI เพิ่มขึ้นแต่เพิ่มเพียงเล็กน้อย แต่หากมีการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตลงไปด้วยยิ่งทำให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์มีค่า LOI เพิ่มสูงขึ้นมากประมาณ 30-31

ตารางที่ 4.5 ค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจน ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักทั้งที่ไม่เติมและเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10 ในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูป

ตัวอย่าง	ดัชนีออกซิเจนจำกัด (%)
PET	23.1
PET/t-K2	26.6
PET/t-K5	27.0
PET/t-T2	25.9
PET/t-T5	26.1
PET/t-K2/10TPP	29.7
PET/t-K5/10TPP	31.1
PET/t-T2/10TPP	28.0
PET/t-T5/10TPP	30.7



รูปที่ 4.11 ค่า LOI ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจน ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักทั้งที่ไม่เติมและเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10 ในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูป

4.7.2 ผลการวิเคราะห์การทดสอบการลุกไหม้ในแนวตั้ง

การทดสอบการลุกไหม้ในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94V เป็นการศึกษากิจกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์แสดงผลในรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.6 จากรูปที่ 4.12 ที่แสดงภาพ burner กำลังจ่อไฟที่ขึ้นทดสอบในวินาทีที่ 6 พบว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ติดไฟและหลอมหยดภายในเวลาไม่ถึง 10 วินาทีที่เริ่มจ่อไฟที่ขึ้นทดสอบในขณะที่ขึ้นทดสอบที่เติมดินขาวเคโอลิน ทัลก์ แต่ไม่เติมไตรฟีนิลฟอสเฟตสังเกตว่าขึ้นทดสอบเริ่มติดไฟแต่ยังไม่มีหลอมหยด อย่างไรก็ตามหากเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตลงไปด้วยพบว่าขึ้นทดสอบกลับไม่ติดไฟและไม่มีหลอมหยดเกิดขึ้น และจากตารางที่ 4.6 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์มีการลุกไหม้อยู่ในระดับ V2 มีการหลอมหยดเกิดขึ้น การเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ในปริมาณร้อยละ 2 ช่วยต้านการหลอมหยดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตได้ใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบจัดอยู่ในระดับ VO แต่การเติมในปริมาณสูงขึ้นร้อยละ 5 กลับพบว่าดินขาวเคโอลินช่วยต้านการหลอมหยดได้ดีกว่าทัลก์ และการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตยังคงช่วยต้านการหลอมหยด ผลการทดสอบจัดอยู่ในระดับ VO แต่การเติมทัลก์ในปริมาณร้อยละ 5 ร่วมกับไตรฟีนิลฟอสเฟตกลับไม่ช่วยต้านการหลอมหยด ผลการทดสอบจัดอยู่ในระดับ V2 ทั้งนี้เกิดจากการที่อนุภาคของผงดินทั้งสองเคลื่อนตัวมาอยู่ที่ผิวหน้าของวัสดุในบริเวณที่ได้รับความร้อนแล้วเกิดเป็นชั้นชาร์ที่มีเสถียรภาพและป้องกันการแพร่ผ่านของแก๊สออกซิเจนเข้าไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ รวมทั้งยังป้องกันการแพร่ผ่านของแก๊สติดไฟได้ที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ออกมาสู่บรรยากาศ อย่างไรก็ตามการเติมทัลก์ในปริมาณมากขึ้นร้อยละ 5

อาจทำให้ทัลก์ที่มีอนุภาคใหญ่กว่าดินขาวเคโอลินกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ไม่ดี ส่วนการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตมีส่วนช่วยด้านการหลอมหยด รวมทั้งลดเวลาของการลุกไหม้และลามไฟหลังนำแหล่งจุดไฟออกด้วยเช่นกัน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเมื่อไตรฟีนิลฟอสเฟตได้รับความร้อนแล้วจะสลายตัวให้อนุมูลอิสระและไอระเหยของฟอสฟอรัสที่มีประสิทธิภาพในการดักจับอนุมูลอิสระ เพราะฉะนั้นการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตจึงมีผลให้การจุดติดไฟและการลามไฟเกิดได้ยากขึ้น หรือทำให้เวลาที่พอลิเมอร์เริ่มหลอมหยดช้าลง [2]



neat PET



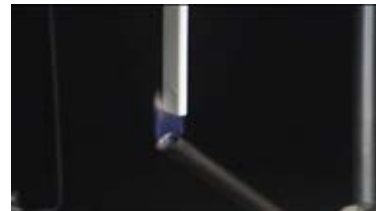
PET/t-K2



PET/t-K5



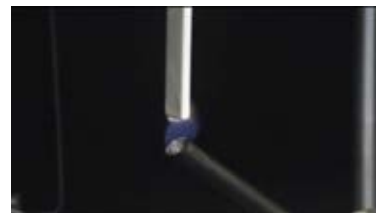
PET/t-T2



PET/t-T5



PET/t-K2/10TPP



PET/t-K5/10TPP



PET/tT2/10TPP



PET/t-T5/10TPP

รูปที่ 4.12 ลักษณะการจุดติดไฟและการหลอมหยดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่วินาทีที่ 6

ตารางที่ 4.6 ผลของปริมาณการเติมดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไซเลน รวมทั้งการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อการลุกไหม้ในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94V ของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์

ตัวอย่าง	ระดับของมาตรฐาน UL-94	$t_1 + t_2$ (s)	การติดไฟของแผ่น สำลี
PET	V-2	5.0	ใช่
PET/t-K2	V-0	1.6	ไม่ใช่
PET/t-K5	V-0	1.6	ไม่ใช่
PET/t-T2	V-0	0	ไม่ใช่
PET/t-T5	V-2	6.2	ใช่
PET/t-K2/10TPP	V-0	0	ไม่ใช่
PET/t-K5/10TPP	V-0	0	ไม่ใช่
PET/t-T2/10TPP	V-0	0	ไม่ใช่
PET/t-T5/10TPP	V-2	8.6	ใช่

หมายเหตุ:

- 1) t_1 หมายถึง เวลาการลามไฟของชั้นทดสอบแต่ละชั้น หลังจากนำแหล่งจุดไฟครั้งที่ 1 ออก (afterflame time 1)
- 2) t_2 หมายถึง เวลาการลามไฟของชั้นทดสอบแต่ละชั้น หลังจากนำแหล่งจุดไฟครั้งที่ 2 ออก (afterflame time 2)
- 3) $t_1 + t_2$ หมายถึง ผลรวมของระยะเวลาการลามไฟของชั้นทดสอบจำนวน 5 ชั้น หลังจากนำแหล่งจุดไฟครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ออก

4.8 สมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์

4.8.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส

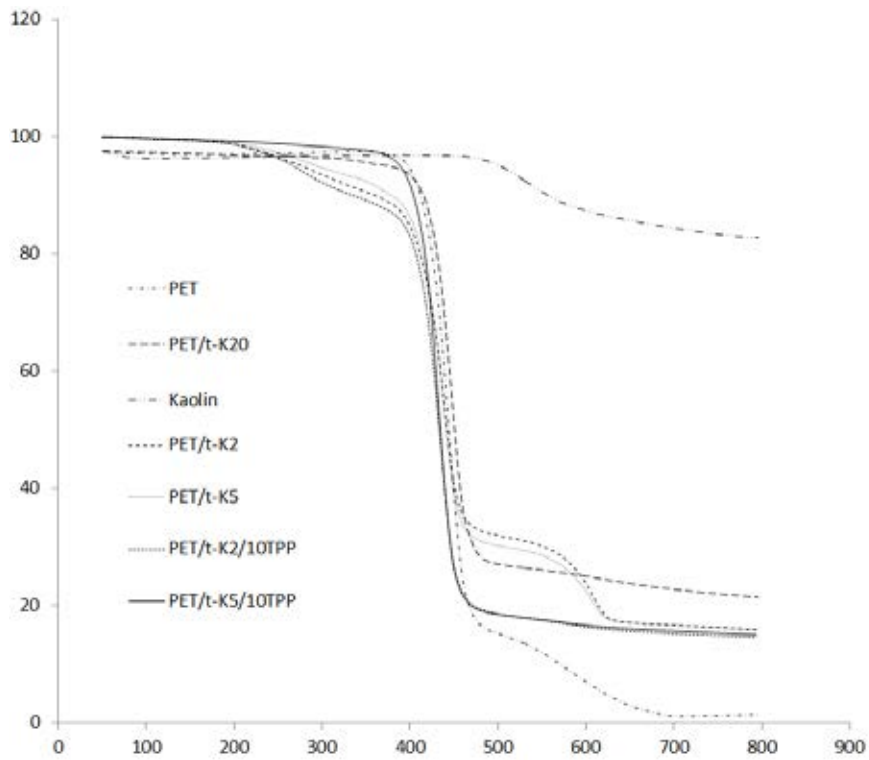
งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและปริมาณชาร์ที่เกิดขึ้นของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมผงของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ และไตรฟีนิลฟอสเฟต โดยอาศัยเทคนิค TGA ในตารางที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวและปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่ของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์ และรูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดง TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตคอมพาวนด์

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติการสลายตัวและปริมาณขาร์ที่เหลืออยู่ของดินขาวเคโอลิน ทัลก์ ไตรฟีนิลฟอสเฟต พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

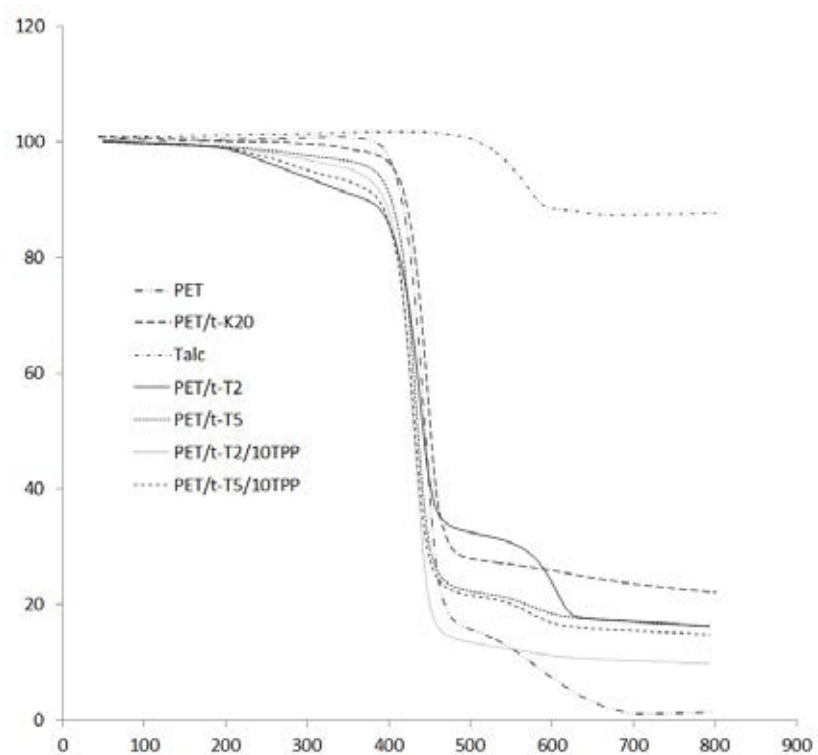
ตัวอย่าง	T_D^i (°C)	$T_D^{5\%}$ (°C)	$T_D^{50\%}$ (°C)	wt_D^{800} (%)
PET	333.93	393.86	413.75	0.91
Kaolin	456.49	519.51	-	84.86
Talc	502.79	540.04	-	86.94
Triphenyl phosphate	173.25	201.09	253.58	0.87
PET/t-K20	271.28	392.51	440.56	21.54
PET/t-T20	382.63	401.54	443.39	18.52
PET/t-K2	188.0	272.33	441.0	15.92
PET/t-K5	196.67	295.33	441.0	15.92
PET/t-T2	188.0	272.33	441.0	16.20
PET/t-T5	203.33	379.67	433.33	16.01
PET/t-K2/10TPP	180.33	264.67	433.33	14.65
PET/t-K5/10TPP	226.33	387.33	436.40	15.06
PET/t-T2/10TPP	188.0	356.67	433.33	9.77
PET/t-T5/10TPP	188.0	341.33	441.0	14.78

หมายเหตุ:

- 1) T_D^i หมายถึง อุณหภูมิเริ่มการสลายตัว
- 2) $T_D^{5\%}$ หมายถึง อุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนักไป 5%
- 3) $T_D^{50\%}$ หมายถึง อุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนักไป 50%
- 4) wt_D^{800} หมายถึง ปริมาณขาร์ที่เหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมดินขาวเคโอลิน



รูปที่ 4.14 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมทัลก์

จากการทดลองพบว่าไตรฟีนิลฟอสเฟตที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวที่ต่ำที่สุด โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวที่ประมาณ 173.25 องศาเซลเซียส ขณะที่พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ ดินขาวเคโอลินและทัลก์มีอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวที่สูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ทั้งสิ้น โดยดินขาวเคโอลินมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวต่ำกว่าทัลก์เล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะเสถียรภาพทางความร้อนซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและสารเติมแต่งหน่วงไฟทั้งสองชนิดนี้เอง [18]

เมื่อพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์พบว่าดินขาวเคโอลินและทัลก์มีผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ลดลง เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเคโอลินและทัลก์เอง การที่อุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตลดลงมีผลให้เร่งการเกิดชั้นชาร์ที่เร็วขึ้น ซึ่งชั้นชาร์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำหน้าที่ป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซและไอระเหยต่างๆที่ทำให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเกิดการจุดติดไฟและลุกไหม้ไฟได้ มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีความสามารถในการดูดซับความร้อนได้ดีกว่าอีกด้วย

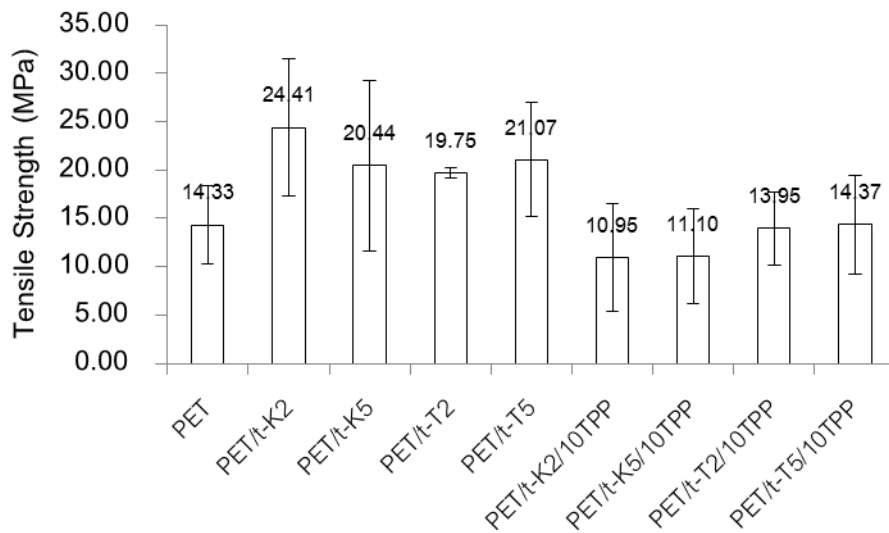
4.9 สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้ ประกอบด้วยการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง ความทนแรงกระแทก และความต้านแรงดัดโค้ง ซึ่งการทดสอบดังกล่าวนี้สามารถบอกถึงความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้

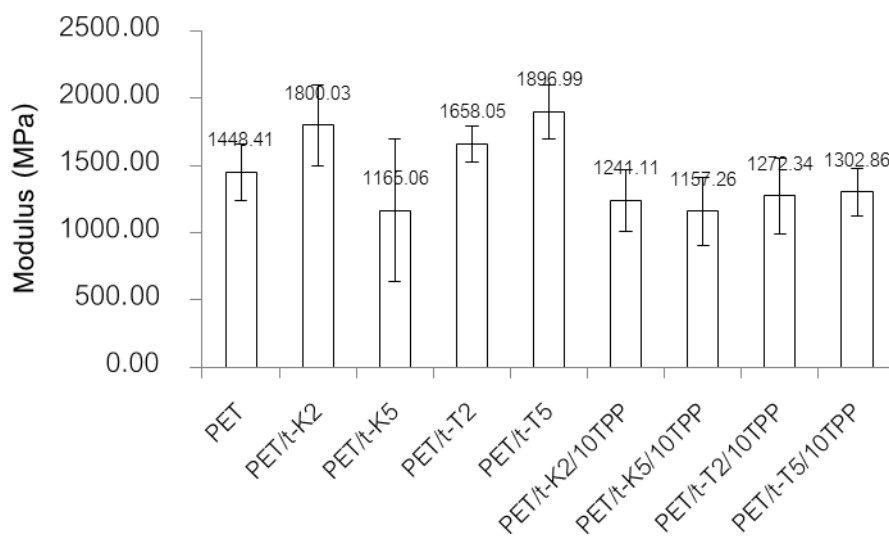
4.9.1 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

การทดสอบความทนแรงดึงเป็นการทดสอบความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ ซึ่งจากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้แสดงให้เห็นว่า การเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์มีผลให้ค่ามอดูลัสของวัสดุสูงขึ้น โดยค่ามอดูลัสนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดหรืออัตราส่วนระหว่างแรงดึงต่อระยะที่ยืดออกของวัสดุภายในช่วงขีดจำกัดของการยืดแบบสัดส่วน ซึ่งการที่พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้มีค่ามอดูลัสที่สูงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์แสดงให้เห็นว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์มีความแข็งตึง (stiffness) เพิ่มสูงขึ้น การที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะอนุภาคของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์จะขัดขวางการเคลื่อนที่

และการจัดเรียงตัวของสายโมเลกุลของพอลิเมอร์ในทิศทางเดียวกันกับแรงกระทำ เพราะฉะนั้น การดึงเพื่อให้ชิ้นงานมีระยะยืดที่สูงขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้แรงดึงสูง [28, 29]



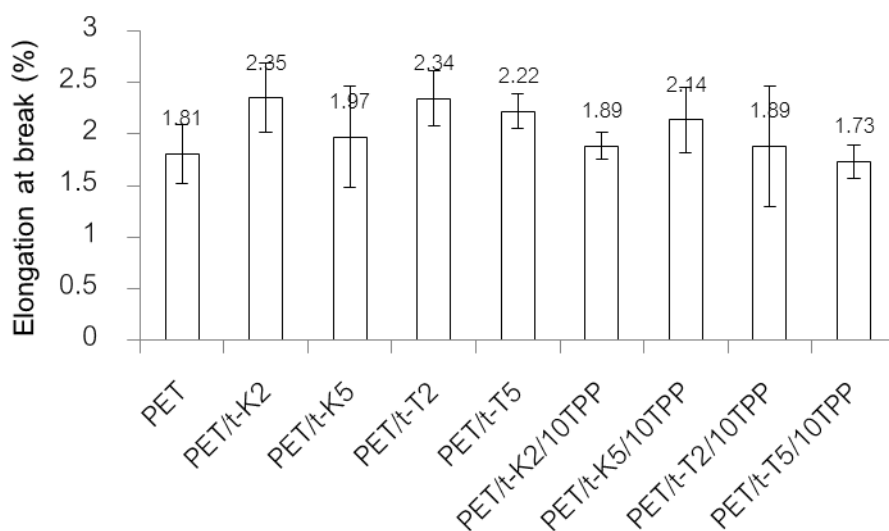
รูปที่ 4.15 กราฟความต้านแรงดึงของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์



รูปที่ 4.16 มอดุลัสของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

โดยปกติแล้วพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์จะมีความแข็งดึงค่อนข้างสูง ทั้งนี้ เป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเองที่การหมุนรอบพันธะภายในของ สายโซ่โมเลกุลทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์จึงยืดตัวเมื่อมีแรงดึงมากกระทำ ได้น้อย และการที่พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์มีความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่ต่ำกว่าของ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์นั้นเป็นเพราะดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่เติมเข้าไปจะทำให้เกิด

ความไม่ต่อเนื่องภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ อันเนื่องมาจากความไม่เข้ากันระหว่างสารเติมแต่ง
 หน่วงไฟทั้งสองกับพอลิเมอร์ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเฟสของสารเติมแต่งหน่วงไฟและพอลิเมอร์
 เมทริกซ์ เพราะฉะนั้นเมื่อพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ถูกแรงดึงกระทำจึงทำให้พอลิเมอร์
 ผน บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคของสารเติมแต่งหน่วงไฟและ พอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดการฉีกขาด
 ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกและแตกขยายต่อไปจนชิ้นงานฉีกขาด ด้วยเหตุนี้ความยืดสูงสุด ณ
 จุดขาดของชิ้นงานจึงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ [28, 29]

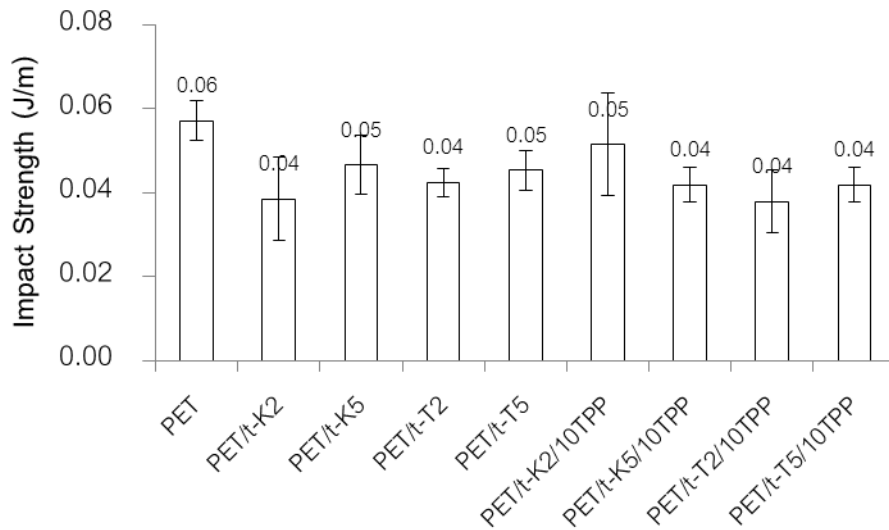


รูปที่ 4.17 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์
 และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

4.9.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก

การทดสอบความทนแรงกระแทกเป็นการวัดการส่งถ่ายพลังงานที่จำเป็นในการ
 แตกหักของวัสดุ ค่าความแข็งแรงการกระแทกจะบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงแบบ
 ฉับพลัน

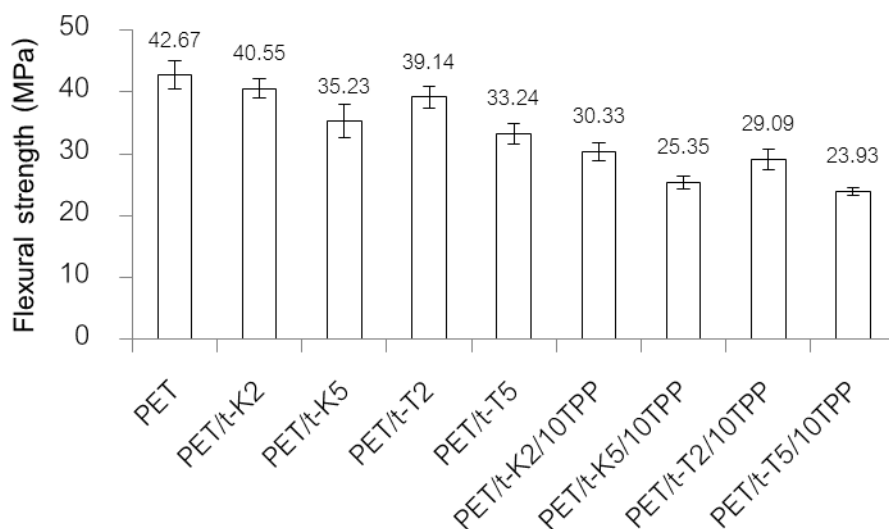
จากการทดสอบความทนแรงกระแทกพบว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์
 ที่เตรียมได้มีความทนแรงกระแทกที่ต่ำกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่า
 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์มีความสามารถในการดูดซับพลังงานการกระแทกได้น้อย
 กว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์มี
 ความเปราะมากกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ ซึ่งอนุภาคของสารเติมแต่งหน่วงไฟที่อยู่ใน
 พอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของพอลิเมอร์เมทริกซ์ นอกจากนี้ยังเกิดแรงกระทำ
 ระหว่างอนุภาคของสารเติมแต่งหน่วงไฟและพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ต่ำ ดังนั้นเมื่อถูกแรงกระทำจึงเกิด
 การฉีกขาดของพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ง่ายมากขึ้น [30]



รูปที่ 4.18 กราฟความทนแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

4.8.3 การทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง

ในการทดสอบความต้านแรงดัดโค้งซึ่งทดสอบจะได้รับแรงดึงสูงสุดบนพื้นผิวหนึ่ง และได้รับแรงกดสูงสุดบนพื้นผิวด้านตรงข้าม รูปที่ 4.19 แสดงแรงกดสูงสุด (maximum load) ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์



รูปที่ 4.19 กราฟความต้านทานแรงดัดโค้งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

จากรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าการเติมดินขาวเคโอลิน ทัลก์ และไตรฟีนิลฟอสเฟต มีผลให้ความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากดินขาวเคโอลินและทัลก์เป็นสารอนินทรีย์ที่อนุภาคมีความแข็งสูง เมื่อได้รับแรงดึงจึงไม่สามารถที่จะยืดตัวได้ เพราะฉะนั้นเมื่อพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ได้รับแรงดัดโค้งพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์จะยืดตัวออกได้น้อยแล้วจึงเกิดการแตกหัก [31]

4.10 สันฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

4.10.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction Analysis)

การวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างชั้นเคลือบของดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนและหลังการขึ้นรูปร่วมกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ โดยอาศัยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และใช้กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ในการคำนวณ

จากกฎของแบรกก์

$$2d\sin(\theta) = n\lambda$$

โดยที่ d คือ ระยะห่างระหว่างชั้นเคลือบ (นาโนเมตร)

θ คือ มุมตกกระทบ (องศา)

n คือ จำนวนเต็ม (1, 2, 3, ...)

λ คือ ความยาวคลื่น (0.154 นาโนเมตร)

สามารถแสดงค่าระยะห่างระหว่างชั้นเคลือบซึ่งได้จากการคำนวณโดยใช้กฎของแบรกก์ได้ดังตารางที่ 4.8 และ 4.9

1) ดินขาวเคโอลินและทัลก์ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane

จากการวิเคราะห์ XRD patterns ของดินขาวเคโอลินและทัลก์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เกิดจากการที่สารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าไปแทนที่ไฮดรอกซิลของอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมในดินขาวเคโอลินและทัลก์ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ค่า 2θ ของตำแหน่งพีคที่ปรากฏและระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์ (d) ที่ได้จากการคำนวณของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ ดินขาวเคโอลิน ทัลก์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

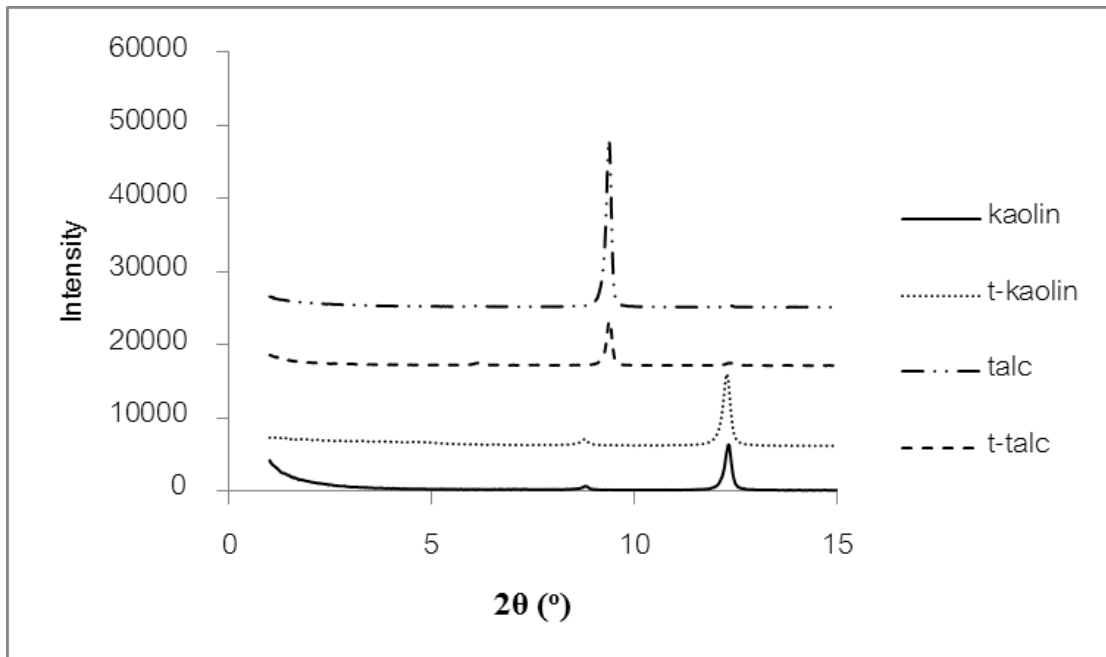
ตัวอย่าง	2θ (องศา)	d (นาโนเมตร)
neat PET	1.80	489.94
	1.96	449.64
	2.06	429.40
	9.50	93.03
	12.30	71.89
Kaolin	12.44	71.11
	8.80	100.40
	12.32	71.76
t-Kaolin	4.90	180.19
	8.78	100.68
	12.29	71.94
Talc	6.17	143.17
	9.37	94.29
	12.39	71.38
t-Talc	6.15	143.68
	9.40	94.08
	12.35	71.62
PET/t-K20	8.90	99.32
	11.83	74.76
	12.34	71.65
PET/t-T20	1.77	499.58
	2.05	429.93
	3.88	227.37
	6.13	114.17

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) ค่า 2θ ของตำแหน่งพีคที่ปรากฏและระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์ (d) ที่ได้จากการคำนวณของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ ดินขาวเคโอลิน ทัลก์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

ตัวอย่าง	2θ (องศา)	d (นาโนเมตร)
PET/t-T20	8.92	99.10
	9.30	94.98
	9.39	94.14
	12.34	71.65
PET/t-K2	8.85	99.89
	9.46	93.38
	12.37	71.52
PET/t-K5	8.83	100.12
	9.46	93.38
	12.35	71.58
PET/t-T2	1.44	614.95
	1.80	490.50
	1.94	455.65
	6.08	145.32
	6.17	143.17
	6.40	138.04
	9.42	93.84
	12.36	71.53
PET/t-T5	1.92	460.07
	6.14	143.89
	9.39	94.10
	12.35	71.64
PET/t-K2/10TPP	1.74	508.65
	1.91	461.65

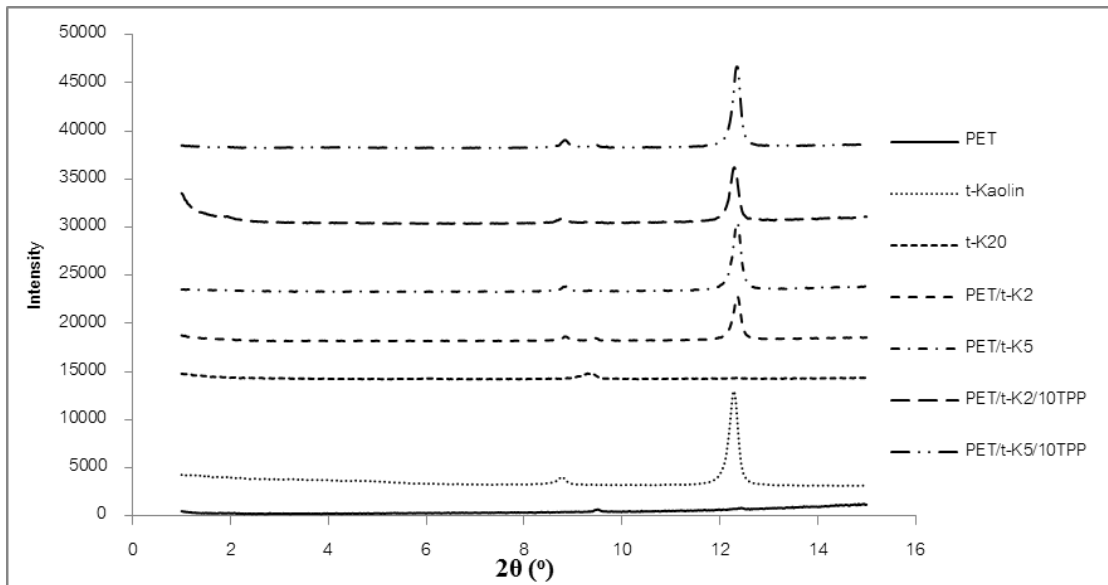
ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ค่า 2θ ของตำแหน่งพีคที่ปรากฏและระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์ (d) ที่ได้จากการคำนวณของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ ดินขาวเคโอลิน ทัลก์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

ตัวอย่าง	2θ (องศา)	d (นาโนเมตร)
PET/t-K2/10TPP	8.79	100.52
	9.39	94.08
	12.30	71.91
PET/t-K5/TPP	8.84	99.96
	9.46	93.63
	12.35	71.64
PET/t-T2/10TPP	1.93	456.52
	6.15	143.53
	9.39	94.07
	12.29	71.94
PET/t-T5/10TPP	1.79	491.89
	1.87	492.96
	2.44	361.26
	6.08	145.28
	9.32	94.75
	12.26	72.14

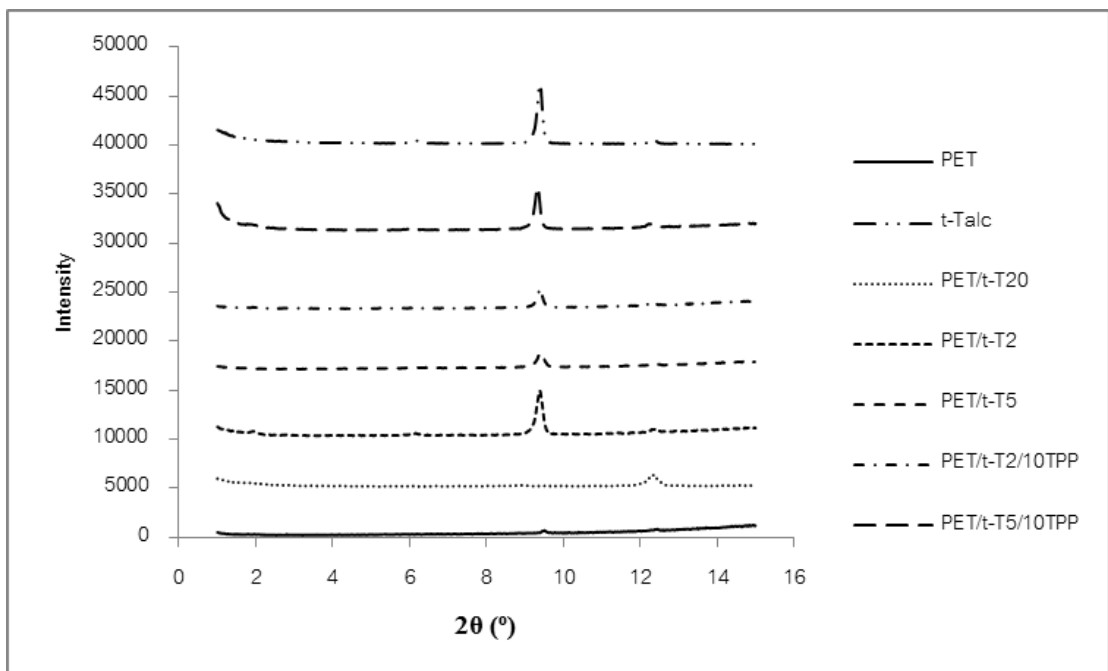


รูปที่ 4.20 XRD patterns ของดินขาวเคโอลินและทัลก์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane

และเมื่อพิจารณา XRD patterns ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมดินขาวเคโอลินและทัลก์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นเคลือบเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าโมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างชั้นเคลือบได้ อย่างไรก็ตามระยะห่างระหว่างชั้นเคลือบมีจำนวนหลายค่าแสดงว่าโมเลกุลของพอลิเมอร์เข้าไปแทรกตัวในช่องว่างระหว่างชั้นเคลือบได้แตกต่างกัน นอกจากนี้พีคของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์จะมีค่า intensity ที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่เติมเพิ่มสูงขึ้นอันเนื่องมาจากปริมาณของอนุภาคของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มากขึ้นนั่นเอง [3]



รูปที่ 4.21 XRD pattern ของดินขาวเคโอลินที่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมดินขาวเคโอลิน



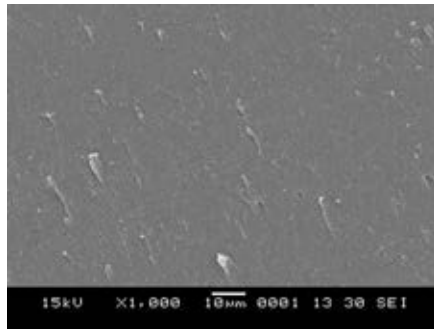
รูปที่ 4.22 XRD pattern ของทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เติมทัลก์

4.10.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

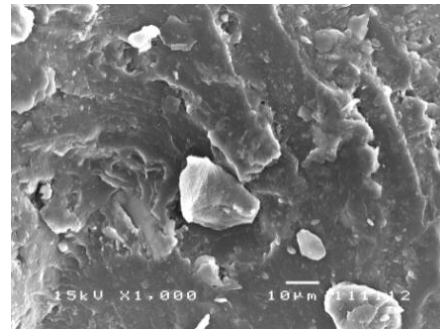
ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของดินขาวเคโอลินและทัลก์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจนด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 และเพื่อพิสูจน์ทราบว่าอนุภาคที่กระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นดินขาวเคโอลินและทัลก์หรือไม่ จึงทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารดังกล่าวด้วยเทคนิค EDX หรือ Energy Dispersion X-ray analysis ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ค.

เนื่องจากดินขาวเคโอลินมีองค์ประกอบสำคัญคือแร่เคลอิไนต์ โดยแร่เคลอิไนต์เป็นแร่ในกลุ่มอะลูมิโนซิลิเกต ดังนั้นในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX จึงจำเป็นต้องปรากฏธาตุอะลูมิเนียมและซิลิกอนเป็นธาตุหลัก ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าอนุภาคดังกล่าวประกอบด้วยธาตุ Al, Si, Fe, Zn จึงสามารถระบุได้ว่าเป็นอนุภาคของดินขาวเคโอลิน สำหรับทัลก์นั้นเป็นแร่ในกลุ่มแมกนีเซียมซิลิเกต เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX จึงจำเป็นต้องปรากฏธาตุแมกนีเซียมและอะลูมิเนียม ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าอนุภาคดังกล่าวประกอบด้วยธาตุ Mg, Si, Na, Ca จึงสามารถระบุได้ว่าเป็นอนุภาคของทัลก์

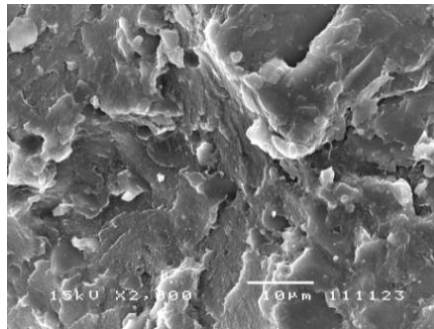
จากการทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาและการกระจายตัวของอนุภาคของสารเติมแต่งหน่วงไฟโดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า สารเติมแต่งหน่วงไฟที่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไฮโดรเจนมีการกระจายตัวภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี เนื่องจากสารเติมแต่งหน่วงไฟมีความเป็นขั้วสูงในขณะที่พอลิเมอร์มีความเป็นขั้วที่ต่ำมาก เพราะฉะนั้นสารเติมแต่งหน่วงไฟจึงกระจายตัวและเข้ากันกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ยาก การที่สารประกอบไฮโดรเจนมีหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ด้านหนึ่งซึ่งเข้ากับสารเติมแต่งหน่วงไฟได้ดีและปลายอีกด้านหนึ่งเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดี จึงทำให้สารประกอบไฮโดรเจนช่วยให้สารเติมแต่งหน่วงไฟมีความเข้ากันได้และกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยสารประกอบไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นสารประสานระหว่างสารเติมแต่งหน่วงไฟและพอลิเมอร์เมทริกซ์ [7]



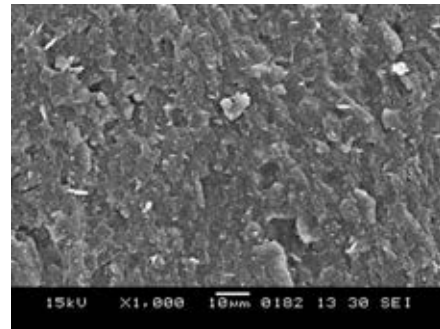
PET



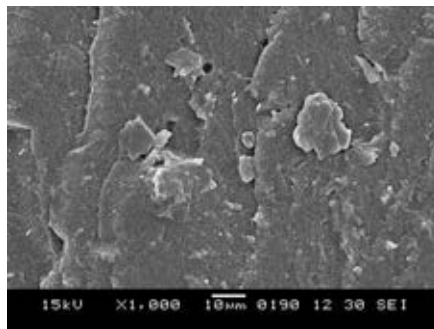
PET/K20



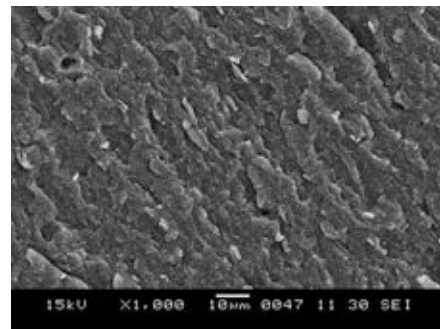
PET/T20



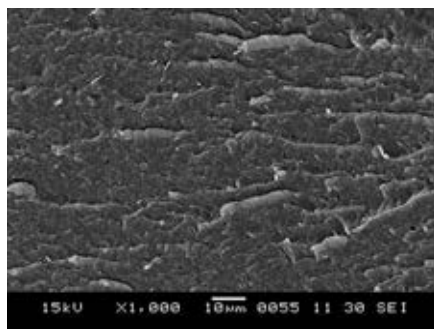
PET/t-K20



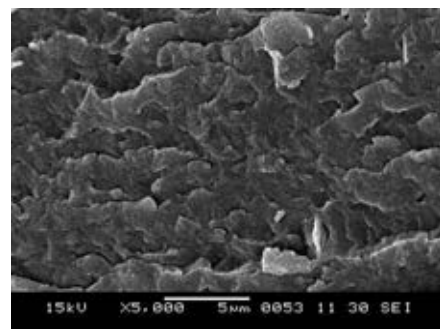
PET/t-T20



PET/K20/10TPP

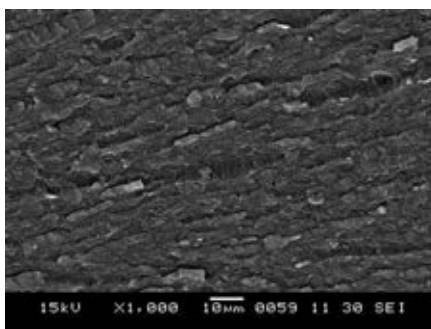


PET/T20/10TPP



PET/t-K20/10TPP

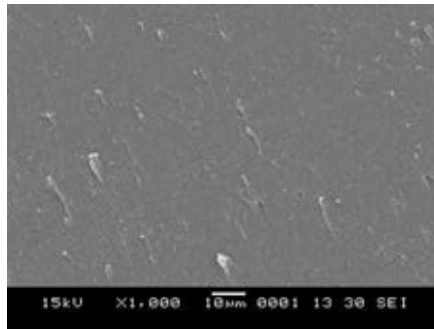
รูปที่ 4.23 SEM micrographs ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์



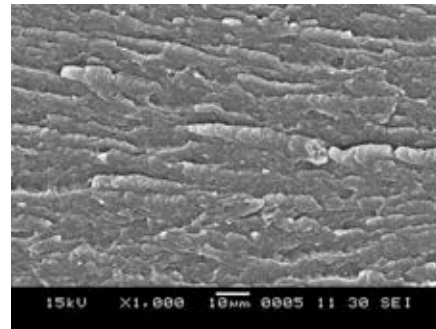
PET/t-T20/10TPP

รูปที่ 4.23 (ต่อ) SEM micrographs ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

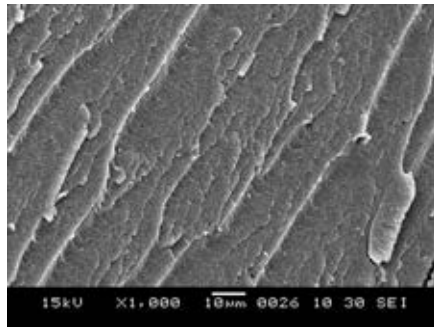
สำหรับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับแต่งผิวด้วยสารประกอบไฮเลนเป็นองค์ประกอบในปริมาณร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักพบว่าลักษณะของรอยแตกมีลักษณะของการดึงตัวของเนื้อพอลิเมอร์ในลักษณะที่คล้ายรอยพับเช่นเดียวกับรอยแตกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณการเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้มีลักษณะแข็งแรง ทั้งนี้สังเกตได้จากการฉีกขาดของพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดขึ้นที่บริเวณโดยรอบของอนุภาคดิน ซึ่งเกิดจากการที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติมไม่ค่อยดีนัก ในขณะที่รอยแตกเรียบของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์แสดงถึงลักษณะการแตกหักแบบวัสดุเปราะคล้ายแก้ว [32]



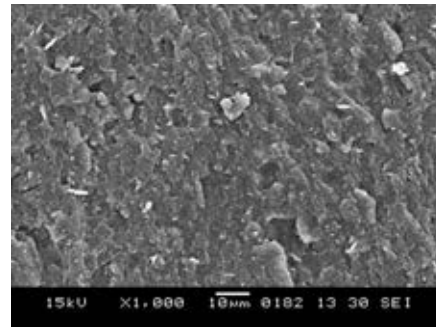
PET



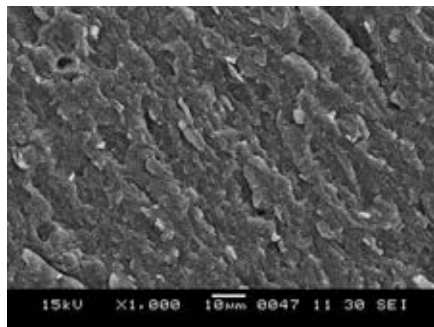
PET/t-K2



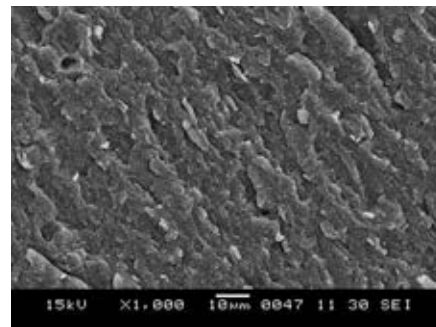
PET/t-T2



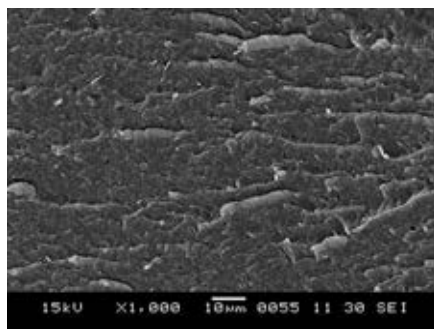
PET/t-K5



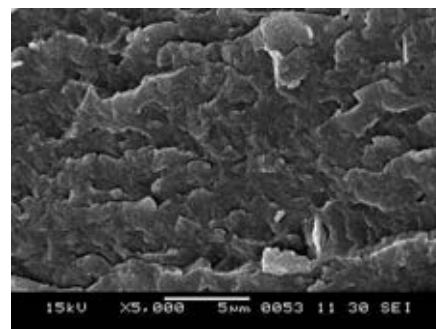
PET/t-T5



PET/t-K2/10TPP

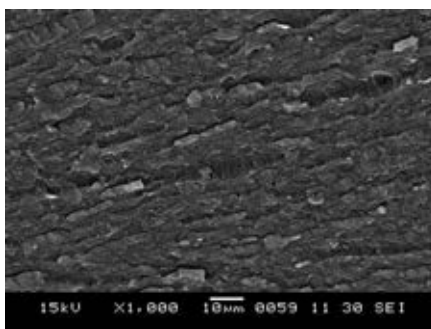


PET/t-T2/10TPP



PET/t-K5/10TPP

รูปที่ 4.24 SEM micrographs ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์



PET/t-T5/10TPP

รูปที่ 4.24 (ต่อ) SEM micrographs ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์
และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติหนองไฟและด้านการหลอมหยดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือพีทีด้วยสารตัวเติมสองชนิด คือ ดินขาวเคโอลินและทัลก์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane ร่วมกับไตรฟีนิลฟอสเฟตโดยการเตรียมเป็นมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ด้วยกระบวนการหลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากนั้นจึงทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์โดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 สมบัติหนองไฟและด้านการหลอมหยด

การเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่การปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane ลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้วัสดุมีสมบัติหนองไฟและด้านการหลอมหยดที่ดีขึ้น โดยผลการทดสอบจัดอยู่ในระดับชั้น V-0 และมีค่า LOI สูงขึ้น แต่การเติมทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไซเลนดังกล่าวในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักกลับทำให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้มีสมบัติด้านทนการหลอมหยดได้ไม่ดี

5.1.2 สมบัติทางความร้อน

การเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane ลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์มีผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้ลดลง โดยอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์และจะลดลงอีกเมื่อเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักในขั้นตอนของการฉีดแบบ

5.1.3 สีของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์

การเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์มีผลให้สีของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้เหลืองขึ้น โดยเฉพาะการเติมดินขาวเคโอลินมีผลให้พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์เหลืองขึ้นมากกว่าการเติมทัลก์เมื่อเปรียบเทียบในอัตราส่วนที่เท่ากัน

5.1.4 ความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงาน

การเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์มีผลให้ค่าดัชนีการไหลหลอมเหลวของมาตรฐานเบบท์ของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์ลดลงและจะลดลงอีกเมื่อเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane ส่วนการเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักในขั้นตอนของการอัดรีดจะทำให้มาตรฐานเบบท์ของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์มีค่าดัชนีการไหลหลอมเหลวของที่เพิ่มสูงขึ้น

5.1.5 สมบัติเชิงกล

การเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane เข้าไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์นั้นมีผลให้สมบัติด้านแรงดึงและความต้านแรงดัดโค้งดีขึ้น แต่เมื่อปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไซเลนเดมที่สูงขึ้นกลับทำให้สมบัติด้านแรงดึงและความต้านแรงดัดโค้งลดลง อีกทั้งความทนแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้ยังลดลงอีกด้วย นอกจากนี้การเติมไตรฟีนิลฟอสเฟตมีผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตลดลงมากยิ่งขึ้น

5.1.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาและการกระจายตัว

อนุภาคของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane กระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้สม่ำเสมอและทั่วถึง แต่เมื่อปริมาณของดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วยสารประกอบไซเลนเดมที่เติมเพิ่มสูงขึ้นกลับเกิดการรวมกลุ่มกัน นอกจากนี้โมเลกุลของพอลิเมอร์ยังสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในระหว่างชั้นดินได้อีกด้วย

5.1.6 ข้อสรุป

เมื่อพิจารณาสมบัติต่างๆของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ที่เตรียมได้ สามารถสรุปได้ว่าการใช้ดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วย N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane และการใช้ไตรฟีนิลฟอสเฟตช่วยปรับปรุงสมบัติหนองไฟและด้านการหลอมหยดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตได้ โดยการเติมดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนักร่วมกับการใช้ไตรฟีนิลฟอสเฟตเป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมกับการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

การใช้ดินขาวเคโอลินหรือทัลก์ในการปรับปรุงสมบัติหนองไฟและด้านการหลอมหยดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตอาจใช้ร่วมกับสารเติมแต่งหนองไฟชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น นอกจากนี้อาจเลือกใช้ดินขาวเคลินหรือทัลก์ที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กลง

รายการอ้างอิง

- [1] Laoutid, F., Bonnaud, L., Alexandre, M., Lopez-Cuesta, J.-M. and Dubois, Ph. New projects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites. Materials Science and Engineering R 63 (2009): 100 – 125.
- [2] Mouritz, A. P. and Gibson, A. G. Fire properties of polymer composite materials. Netherlands: Springer, 2006.
- [3] ชิดชนก ตังบุญอนุสรณ์. การปรับปรุงสมบัติหน่วงไฟและด้านการหลอมหยดของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตด้วยเบนโทไนด์และเบนโทไนด์ดัดแปร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [4] สิริรัตน์ จารุจินดา. สิ่งทอป้องกันความร้อนและเปลวไฟ. การทดสอบสิ่งทอสมบัติพิเศษ, 12-30. กรุงเทพฯ: พิทู ดีไซน์ แอนด์ พรินท์, 2553.
- [5] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. เอกสารประกอบการสอนสมบัติของพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [6] Kiliaris, P. and Papaspyrides, C.D. Polymer/layered silicate (clay) nanocomposites: An overview of flame retardancy. Progress in Polymer Science 35 (2010): 902-958.
- [7] ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. เซรามิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [8] อรุณา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [9] ประโยชน์ อุนจะนำ. วิทยาแร่เบื้องต้น. เชียงใหม่: ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2549.
- [10] Zhou, Y., Rangari, V., Mahfuza, H., Jeelani, S. and Mallick, P.K. Experimental study on thermal and mechanical behavior of polypropylene, talc/polypropylene and

- [11] ดวงดาว อาจองค์. เอกสารประกอบการสอนพลาสติกเชิงพาณิชย์และพลาสติกวิศวกรรม.
กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [12] วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. เอกสารประกอบการสอนการรีไซเคิลพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ: ภาควิชา
วัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [13] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. วิทยาศาสตร์เส้นใย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2540.
- [14] ปรีชา พหลเทพ. โพลีเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง,
2548.
- [15] Levchik, S.V. and Weil, E.D. A review on thermal decomposition and combustion of
thermoplastic polyesters. Polymer for Advance Technologies 15 (2004): 691-700.
- [16] Lecomte, H. A. and Liggat, J. J. Commercial fire-retarded PET formulations –
Relationship between thermal degradation behaviour and fire-retardant action.
Polymer Degradation and Stability 93 (2008): 498-506.
- [17] Swoboda, B., Buonomo, S., Leroy, E. and Lopez Cuesta, J.M. Fire retardant
poly(ethylene terephthalate)/polycarbonate/triphenylphosphite blends. Polymer
Degradation and Stability 93 (2008): 910-917.
- [18] Zhang, J., Ji, Q., Ping, Z., Xia, Y. and Kong, Q. Thermal stability and flame-
retardancy mechanism of poly(ethylene terephthalate)/boehmite
nanocomposites. Polymer Degradation and Stability 95 (2010): 1211-1218.
- [19] Wang, D., Liu, X., Wang, J., Yu-Zhong Wang, Y., Stec, A. A. and Hull, T.R.
Preparation and characterization of a novel fire retardant PET/ α -zirconium
phosphate nanocomposite. Polymer Degradation and Stability 94 (2009):
544-549.
- [20] Chang, Z., Guo, F., Chen, J. F., Yu, J.H. and Wang, G.Q. Synergistic flame
retardant effect of naon-kaolin and nano-HAO on LDPE/EPDM composites.
Polymer Degradation and Stability 92 (2007): 1204-1212.

- [21] Galet, L., Goalard, C. and Dodds, J.A. The importance of surface energy in the dispersion behaviour of talc particles in aqueous media. Powder Technology 190 (2009): 242–246.
- [22] Castel, C.D., Pelegrini, T.Jr., Babaosa, R.V., Liberman, S.A. and Mauler, R.S. Properties of silane grafted polypropylene/montmorillonite nanocomposites. Composites: Part A 41 (2010): 185-191.
- [23] Oliver, M.G., Fedel, M., Sciamanna, V., Vandermiers, C., Motte, C., Poelman, M., Deflorian, F. Study of the effect of nanoclay incorporation on the rheological properties and corrosion protection by silane layer
- [24] Gahleitner, M. Melt rheology of polyolefins. Progress in Polymer Science 26 (2001): 895-944.
- [25] ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และชาคริต สิริสิงห. พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว และการนำไปใช้. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.
- [26] Hamdani, S., Longuet, C., Perrin, D., Lopez-cuesta, J. M. and Ganachaud, F. Flame retardancy of silicone-base materials. Polymer Degradation and Stability 94 (2009): 465-495.
- [27] Orden, M.U., Arranz, J., Lorenzo, V., Pérez, E., Urreaga, J.M. Study of the effects of the reaction conditions on the modification of clays with polyelectrolytes and silanes. Journal of Colloid and Interface Science 342 (2010): 185-191.
- [28] Hadal, R.S., Dasari, A., Rohrmann, J. and Misra, R.D.K. Effect of wollastonite and talc on the micromechanisms of tensile deformation in polypropylene composites. Materials Science and Engineering A 372 (2004): 296–315.
- [29] Calcagno, C.I.W., Mariani, C.M., Teixeira S.R. and Mauler R.S., The role of the MMT on the morphology and mechanical properties of the PP/PET blends. Composites Science and Technology 68 (2008): 2193–2200.

- [30] ปิ่นสุภา ปิติรักษสกุล. การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2545.
- [31] ทศชัย ไวปัญญา. การเตรียมและสมบัติของพอลิไพโรฟิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/วอลลาสโทไนต์คอมพอสิต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [32] อรรถพล เตระ. คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2551.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบและเม็ดคอมพาวนด์ที่เตรียมได้



รูป ก-1 เม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์



รูป ก-2 เม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์



รูป ก-3 ดินขาวเคโอลิน



รูป ก-4 ทัลก์



รูป ก-5 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์
ที่ผสมดินขาวเคโอลิน



รูป ก-6 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์
ที่ผสมทัลก์

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายของขนาดอนุภาค

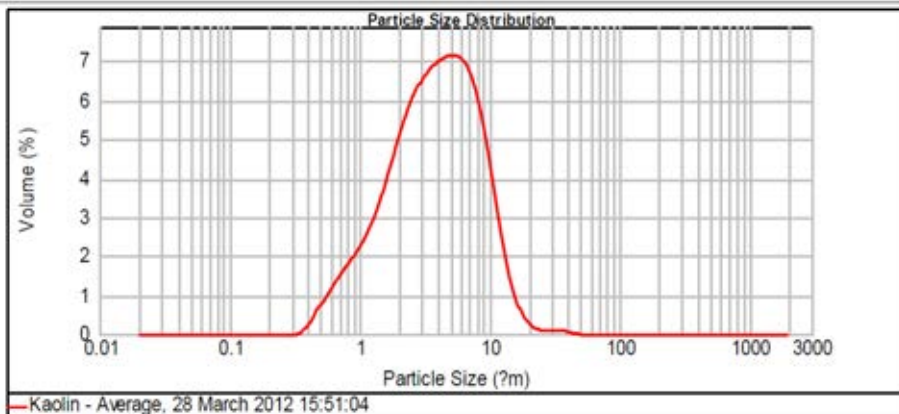


Result Analysis Report

Sample Name: Kaolin - Average SOP Name: Measured: 28 March 2012 15:51:04
 Sample Source & type: Measured by: User Analysed: 28 March 2012 15:51:05
 Sample bulk lot ref: Result Source: Averaged

Particle Name: Kaolinite high Accessory Name: Hydro 2000MU (A) Analysis model: General purpose Sensitivity: Normal
 Particle RI: 1.570 Absorption: 0.1 Size range: 0.020 to 2000.000 um Obscuration: 10.96 %
 Dispersant Name: Water Dispersant RI: 1.330 Weighted Residual: 2.188 % Result Emulation: Off
 Concentration: 0.0040 %Vol Span: 2.204 Uniformity: 0.708 Result units: Volume
 Specific Surface Area: 2.37 m²/g Surface Weighted Mean D[3,2]: 2.535 um Vol. Weighted Mean D[4,3]: 4.828 um

d(0.1): 1.154 um d(0.5): 3.841 um d(0.9): 9.621 um



Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	2.43	11.482	2.34	120.226	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	2.88	13.183	1.39	138.038	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	2.88	15.136	3.42	158.489	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	3.42	17.378	0.74	181.970	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	4.03	19.953	0.35	208.930	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	4.64	22.909	0.10	239.893	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	5.64	26.303	0.09	275.423	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	5.96	30.200	0.09	316.228	0.00
0.030	0.00	0.316	0.01	3.311	6.19	34.674	0.08	363.078	0.00
0.035	0.00	0.363	0.16	3.802	6.35	39.811	0.04	416.869	0.00
0.040	0.00	0.417	0.44	4.365	6.46	45.709	0.00	478.630	0.00
0.046	0.00	0.479	0.74	5.012	6.46	52.481	0.00	549.541	0.00
0.052	0.00	0.550	1.04	5.754	6.36	60.256	0.00	630.957	0.00
0.060	0.00	0.631	1.31	6.607	6.04	69.183	0.00	724.436	0.00
0.069	0.00	0.724	1.56	7.586	5.44	79.433	0.00	831.764	0.00
0.079	0.00	0.832	1.81	8.710	4.55	91.201	0.00	954.993	0.00
0.091	0.00	0.955	2.09	10.000	3.44	104.713	0.00	1096.478	0.00
0.105	0.00	1.096	2.09	11.482	3.44	120.226	0.00	1256.925	0.00

Operator notes:

รูป ข-1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายของขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอลิน

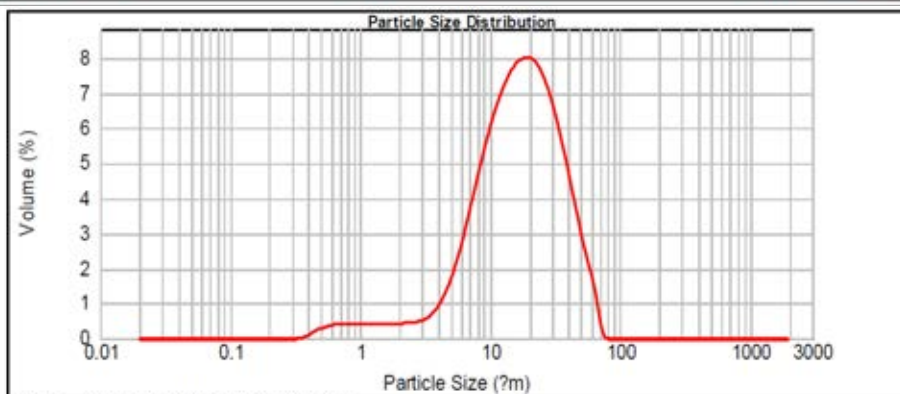


Result Analysis Report

Sample Name: Talc - Average **SOP Name:** **Measured:** 28 March 2012 15:21:54
Sample Source & type: **Measured by:** User **Analysed:** 28 March 2012 15:21:55
Sample bulk lot ref: **Result Source:** Averaged

Particle Name: Talc	Accessory Name: Hydro 2000MU (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.589	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 17.27 %
Dispersant Name: Water	Dispersant RI: 1.330	Weighted Residual: 0.908 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0222 %Vol	Span : 2.044	Uniformity: 0.63	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.723 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 8.302 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 20.096 um	

d(0.1): 5.618 um d(0.5): 16.790 um d(0.9): 39.935 um



- Talc - Average, 28 March 2012 15:21:54

Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.36	11.482	6.37	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.37	13.183	6.82	138.000	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.38	15.136	7.13	158.489	0.00	1629.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.39	17.378	7.26	181.970	0.00	1805.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.40	19.950	7.19	208.900	0.00	2167.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.40	22.909	6.89	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.42	26.303	6.36	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.49	30.200	5.64	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.315	0.00	3.311	0.64	34.674	4.77	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.91	39.811	3.83	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.07	4.365	1.32	45.709	2.89	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.045	0.00	0.479	0.28	5.012	1.89	52.481	2.02	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.34	5.754	2.60	60.256	1.23	630.957	0.00	6606.904	0.00
0.060	0.00	0.631	0.34	6.607	3.41	69.183	0.14	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.38	7.586	4.25	79.433	0.00	831.764	0.00	8709.626	0.00
0.079	0.00	0.832	0.39	8.710	5.06	91.201	0.00	954.960	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.39	10.000	5.06	104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.37	11.482	5.78	120.226	0.00	1258.925	0.00		

Operator notes:

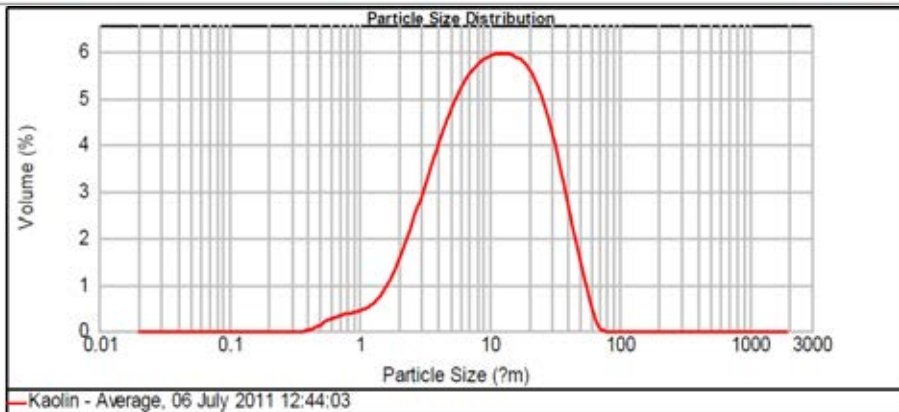
รูป ข-2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายของขนาดอนุภาคของทัลก์



Result Analysis Report

Sample Name: Kaolin - Average	SOP Name:	Measured: 06 July 2011 12:44:03	
Sample Source & type:	Measured by: User	Analysed: 06 July 2011 12:44:04	
Sample bulk lot ref:	Result Source: Averaged		
Particle Name: Kaolinite high	Accessory Name: Hydro 2000SM (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle Rf: 1.570	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 5.85 %
Dispersant Name: Water	Dispersant Rf: 1.330	Weighted Residual: 1.079 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0048 %Vol	Span : 2.757	Uniformity: 0.852	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.993 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 6.043 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 14.197 um	

d(0.1): 2.851 um d(0.5): 10.374 um d(0.9): 31.449 um



Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.47	11.482	5.39	100.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.60	13.183	5.38	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.79	15.136	5.32	158.489	0.00	1609.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.06	17.378	5.18	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.40	19.963	4.96	208.900	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	1.81	22.909	4.60	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	2.31	26.303	4.13	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	2.95	30.200	3.53	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.315	0.00	3.311	3.73	34.674	2.85	363.078	0.00	3801.884	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	4.66	39.811	2.14	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	5.78	45.709	1.40	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.14	5.012	7.14	52.481	0.84	549.541	0.00	5754.389	0.00
0.052	0.00	0.550	0.23	5.754	8.77	60.256	0.29	630.957	0.00	6606.994	0.00
0.060	0.00	0.631	0.29	6.607	10.66	69.183	0.01	724.436	0.00	7585.775	0.00
0.069	0.00	0.724	0.33	7.586	12.83	79.433	0.00	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.36	8.710	15.29	91.201	0.00	954.963	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.965	0.40	10.000	18.00	104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.40	11.482	21.00	120.226	0.00	1258.925	0.00		

Operator notes:

รูป ข-3 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายของขนาดอนุภาคของดินขาวเคโอดินที่ผ่านการปรับ
ผิวด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์



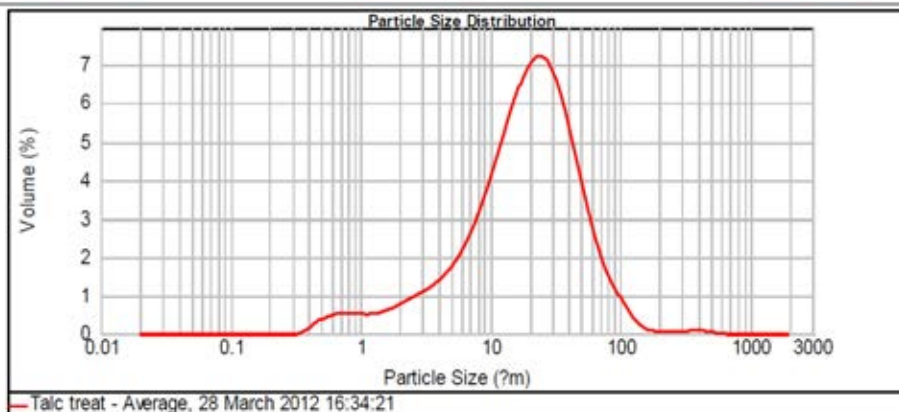
MASTERSIZER 2000

Result Analysis Report

Sample Name: Talc treat - Average
Sample Source & type:
Sample bulk lot ref:
SOP Name:
Measured by: User
Result Source: Averaged
Measured: 28 March 2012 16:34:21
Analysed: 28 March 2012 16:34:22

Particle Name: Talc
Particle RI: 1.589
Dispersant Name: Water
Accessory Name: Hydro 2000MU (A)
Absorption: 0.1
Dispersant RI: 1.330
Analysis model: General purpose
Size range: 0.020 to 2000.000 μm
Weighted Residual: 0.867 %
Sensitivity: Normal
Obscuration: 7.71 %
Result Emulation: Off
Concentration: 0.0085 %Vol
Span : 2.544
Uniformity: 0.865
Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.801 m^2/g
Surface Weighted Mean D[3,2]: 7.492 μm
Vol. Weighted Mean D[4,3]: 26.985 μm

d(0.1): 3.889 μm **d(0.5):** 19.749 μm **d(0.9):** 54.137 μm



Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.47	11.482	4.54	120.226	0.33	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.49	13.153	5.16	138.038	0.16	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.54	15.136	5.72	158.489	0.08	1659.507	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.59	17.378	6.35	181.500	0.06	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.62	19.963	6.18	208.500	0.07	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.71	22.909	6.47	239.883	0.06	2511.896	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.81	26.303	6.53	275.425	0.06	2894.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	1.02	30.200	5.92	316.228	0.06	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.01	3.311	1.15	34.674	5.29	363.078	0.07	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.10	3.802	1.30	39.811	4.53	416.889	0.08	4365.198	0.00
0.040	0.00	0.417	0.19	4.365	1.49	45.709	3.72	478.630	0.07	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.25	5.012	1.73	52.481	2.94	549.541	0.05	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.36	5.754	2.08	60.256	2.25	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.48	6.607	2.40	69.193	1.69	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.49	7.586	2.85	79.433	1.25	831.754	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.49	8.710	3.36	91.201	0.91	954.980	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.47	10.000	3.93	104.713	0.59	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.47	11.482	3.93	120.226	0.59	1258.925	0.00		

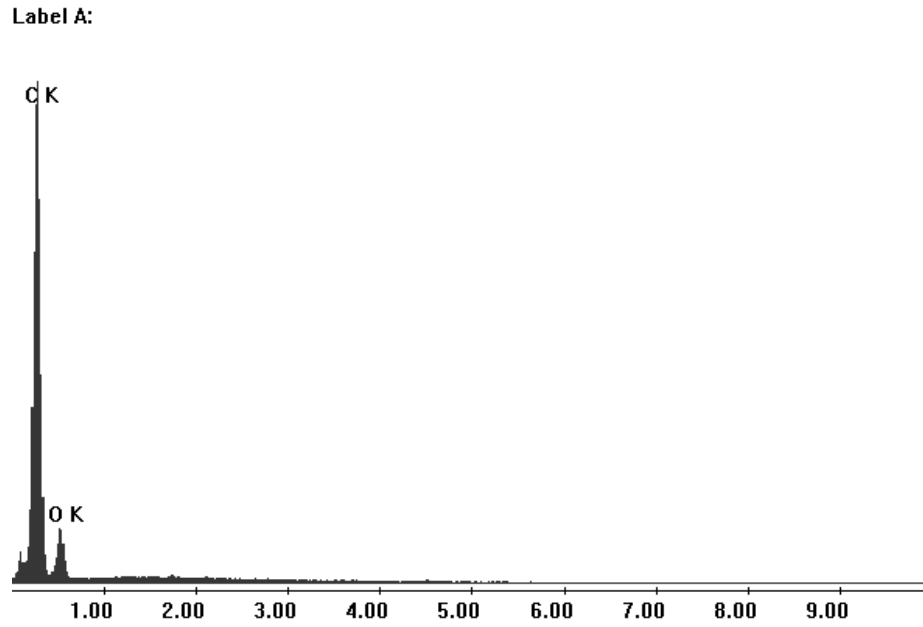
Operator notes:

รูป ข-4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายของขนาดอนุภาคของทัลก์ที่ผ่านการปรับผิวด้วย

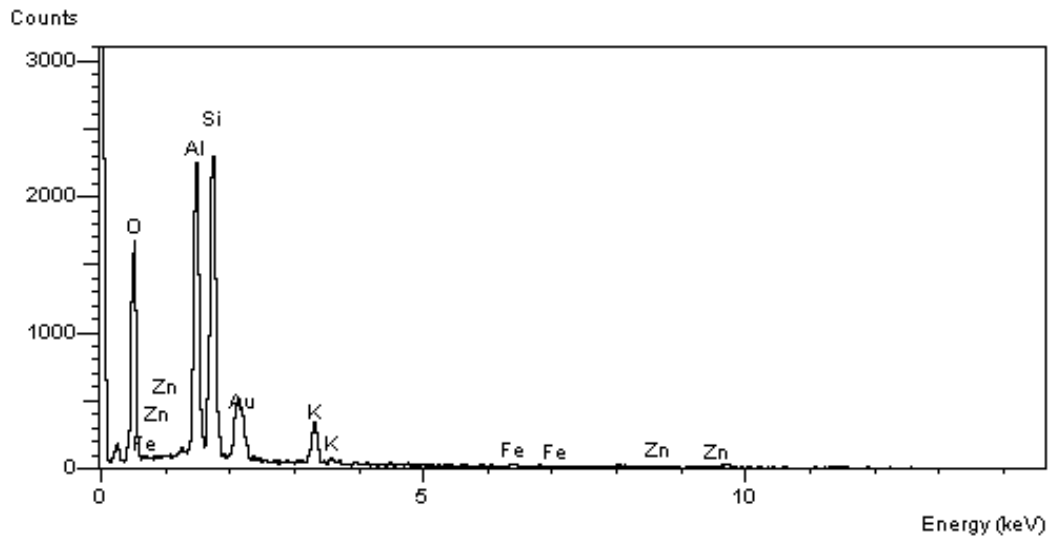
สารประกอบไฮเลน

ภาคผนวก ค

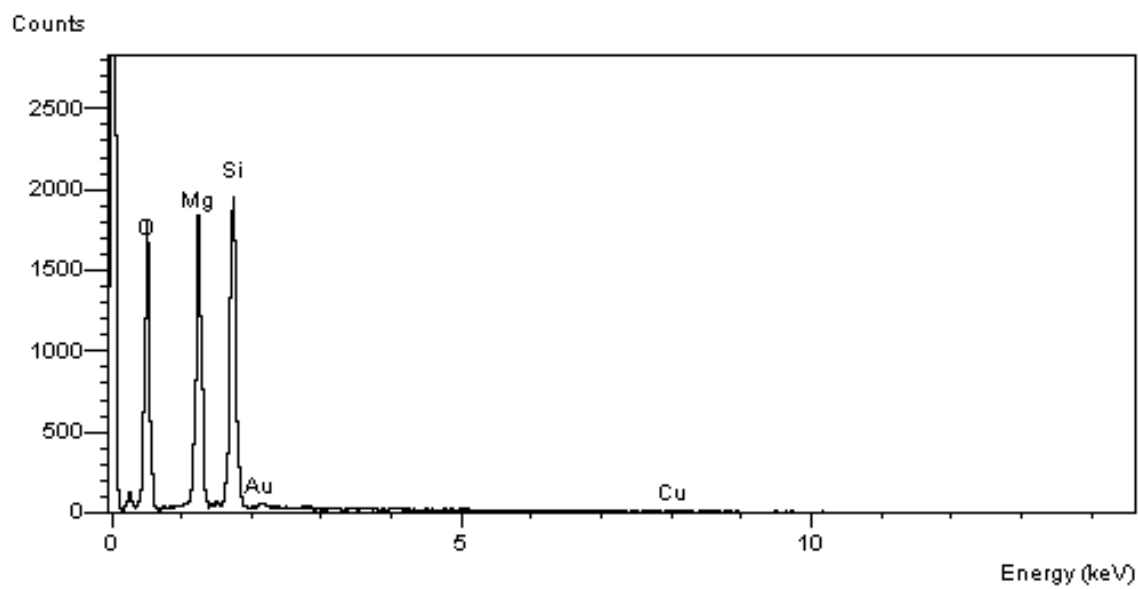
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Energy Dispersion X-ray Analysis (EDX)



รูป ค-1 EDX pattern ของเพ็ชร์บริสุทธิ์



รูป ค-2 EDX pattern ของดินขาวเคโอลิน



รูป ค-3 EDX pattern ของทัลก์

ภาคผนวก ง

ตารางผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพีดีบีเอสและพีดีคอมพาวนด์

ตาราง ง-1 ค่าความทนแรงดึงของพีดีบีเอสและพีดีคอมพาวนด์

สูตร	Tensile Strength (MPa)					AVE	SD
	1	2	3	4	5		
PET	12.80	21.47	11.20	13.09	13.08	14.33	4.07
PET/t-K2	28.25	12.40	24.61	30.83	25.98	24.41	7.12
PET/t-K5	29.81	19.91	21.82	24.61	6.06	20.44	8.86
PET/t-T2	20.25	9.59	19.77	19.23	3.00	14.37	7.74
PET/t-T5	19.99	25.74	11.26	24.47	23.91	21.07	5.89
PET/t-K2/10TPP	17.69	16.93	9.25	10.69	15.17	13.94	5.55
PET/t-K5/10TPP	20.96	14.34	6.90	13.20	16.44	14.37	4.87
PET/t-T2/10TPP	3.20	8.91	17.88	10.55	14.23	10.95	3.78
PET/t-T5/10TPP	2.89	13.82	15.30	12.60	10.91	11.10	5.12

ตาราง ง-2 ค่ายังส์มอดุลัสของพีดีบีเอสและพีดีคอมพาวนด์

สูตร	Yung's Modulus (MPa)					AVE	SD
	1	2	3	4	5		
PET	1586.52	1528.88	1639.55	1055.68	1431.41	1448.408	232.71
PET/t-K2	2056.88	1248.86	1969.73	2007.27	1717.43	1800.034	334.79
PET/t-K5	1864.91	1557.74	1020.61	317.96	1064.1	1165.064	590.05
PET/t-T2	1843.96	1404.33	1559.84	1570.36	1048.16	1485.33	291.15
PET/t-T5	2011.88	1950.29	1501.53	1992.78	2028.46	1896.988	222.99
PET/t-K2/10TPP	1500.48	1503.71	911.33	1099.67	1190.34	1241.106	258.64
PET/t-K5/10TPP	1367.90	1425.12	723.89	1183.02	1086.35	1157.256	278.22
PET/t-T2/10TPP	790.92	1305.21	1652.60	1194.09	1418.87	1272.338	318.21
PET/t-T5/10TPP	1033.22	1426.72	1359.64	1526.64	1168.08	1302.860	199.70

ตาราง ง-3 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของพีตบริสุทธิ์และพีตคอมพาวนด์

สูตร	Elongation at Break (%)					AVE	SD
	1	2	3	4	5		
PET	1.42	2.31	1.85	1.74	1.73	1.81	0.32
PET/t-K2	2.32	1.76	2.32	2.61	2.75	2.35	0.38
PET/t-K5	2.69	2.00	1.92	2.10	1.15	1.97	0.55
PET/t-T2	2.04	0.88	2.30	2.69	0.69	1.72	0.89
PET/t-T5	2.31	2.44	1.95	2.26	2.15	2.22	0.18
PET/t-K2/10TPP	2.07	1.91	1.78	1.71	1.96	1.88	0.14
PET/t-K5/10TPP	2.42	2.08	1.65	1.99	2.55	2.14	0.36
PET/t-T2/10TPP	0.86	1.91	2.67	1.93	2.06	1.88	0.65
PET/t-T5/10TPP	1.53	2.00	1.83	1.66	1.65	1.73	0.18

ตาราง ง-4 ค่าความทนแรงกระแทกของพีตบริสุทธิ์และพีตคอมพาวนด์

สูตร	1	2	3	4	5	AVE	SD
PET	0.0623	0.0506	0.0545	0.0613	0.0571	0.0572	0.0048
t-K2/TPP	0.0293	0.0379	0.0350	0.0553	0.0350	0.0385	0.0099
t-K2/10TPP	0.0641	0.0654	0.0427	0.0414	0.0440	0.0515	0.0121
t-K5/TPP	0.0414	0.0440	0.0440	0.1027	0.0572	0.0578	0.0258
t-K5/10TPP	0.0453	0.0427	0.0427	0.0440	0.0348	0.0419	0.0041
t-T2/TPP	0.0480	0.0414	0.0427	0.0400	0.0400	0.0424	0.0033
t-T2/10TPP	0.0414	0.0361	0.0440	0.0427	0.0256	0.0379	0.0075
t-T5/TPP	0.0427	0.0453	0.0414	0.0440	0.0533	0.0453	0.0047
t-T5/10TPP	0.0453	0.0427	0.0427	0.0440	0.0348	0.0419	0.0041

ตาราง ง-4 ค่าความทนแรงดัดโค้งของพีตบริสุทธิ์และพีตคอมพาวนด์

สูตร	No.	Maximum load (N)	3 point bend (N/mm ²)	Width (mm)	Thick (mm)	Flexural strength
PET	1	41.78	49.43	12.85	3.4	42.19
	2	42.23	48.76	12.8	3.45	41.58
	3	40.69	48.51	12.83	3.4	41.15
	4	41.01	48.82	12.75	3.4	41.74
	5	41.94	49.05	12.75	3.25	46.71
	mean	41.53	48.914	12.796	3.38	42.67
	SD	0.651267994	0.34659775	0.045607017	0.07582875	2.29

สูตร	No.	Maximum load (N)	3 point bend (N/mm ²)	Width (mm)	Thick (mm)	Flexural strength
PET/t-K2	1	38.83	62.03	12.72	3.32	41.54
	2	38.41	61.23	12.7	3.3	41.66
	3	39.17	60.57	12.7	3.45	38.87
	4	38.12	63.33	12.7	3.4	38.95
	5	38.46	66.4	12.7	3.3	41.71
	mean	38.598	62.712	12.704	3.354	40.55
	SD	0.407394158	2.30395747	0.008944272	0.0676757	1.50

ตาราง ง-4 (ต่อ) ค่าความทนแรงดัดโค้งของพีดีบิสูทิกและพีดีคอมพาวนด์

สูตร	No.	Maximum load (N)	3 point bend (N/mm ²)	Width (mm)	Thick (mm)	Flexural strength
PET/t-K5	1	35.04	70.1	12.78	3.3	37.77
	2	36.18	70.2	12.83	3.32	38.38
	3	30.84	66.79	12.78	3.27	33.85
	4	31.23	63.08	12.82	3.37	32.17
	5	31.04	66.79	12.82	3.27	33.96
	mean	32.866	67.392	12.806	3.306	35.23
	SD	2.540881737	2.93837881	0.024083189	0.04159327	2.70

สูตร	No.	Maximum load (N)	3 point bend (N/mm ²)	Width (mm)	Thick (mm)	Flexural strength
PET/t-T2	1	36.59	48.55	12.7	3.33	38.97
	2	35.78	53.02	12.7	3.33	38.11
	3	36.39	50.76	12.7	3.25	40.69
	4	35.72	49.2	12.72	3.2	41.14
	5	36.02	54.18	12.7	3.4	36.80
	mean	36.1	51.142	12.704	3.302	39.14
	SD	0.379934205	2.41826798	0.008944272	0.0779102	1.80

สูตร	No.	Maximum load (N)	3 point bend (N/mm ²)	Width (mm)	Thick (mm)	Flexural strength
PET/t-T5	1	32.84	61.68	12.8	3.4	33.29
	2	32.79	58.91	12.73	3.4	33.42
	3	31.56	56.46	12.7	3.5	30.43
	4	32.22	57.58	12.73	3.3	34.86
	5	31.46	61.33	12.68	3.3	34.17
	mean	32.174	59.192	12.728	3.38	33.24
	SD	0.654201804	2.28599431	0.045497253	0.083666	1.69

ตาราง ง-4 (ต่อ) ค่าความทนแรงดัดโค้งของพีตบริสุทธิ์และพีตคอมพาวนด์

สูตร	No.	Maximum load (N)	3 point bend (N/mm ²)	Width (mm)	Thick (mm)	Flexural strength
PET/t-K2/10TPP	1	29.31	52.91	12.8	3.5	28.04
	2	29.5	59.73	12.8	3.3	31.75
	3	28.07	51.72	12.8	3.3	30.21
	4	28.68	51.31	12.8	3.3	30.86
	5	28.64	56.65	12.8	3.3	30.82
	mean	28.84	54.464	12.8	3.34	30.33
	SD	0.573367247	3.61944471	0	0.08944272	1.40

สูตร	No.	Maximum load (N)	3 point bend (N/mm ²)	Width (mm)	Thick (mm)	Flexural strength
PET/t-K5/10TPP	1	25.31	52.3	12.73	3.4	25.80
	2	25.07	47.7	12.72	3.47	24.55
	3	24.75	58.29	12.7	3.45	24.56
	4	25.02	52.62	12.7	3.45	24.83
	5	25.5	58.79	12.77	3.33	27.01
	mean	25.13	53.94	12.724	3.42	25.35
	SD	0.286966897	4.63180850	0.028809721	0.05656854	1.06

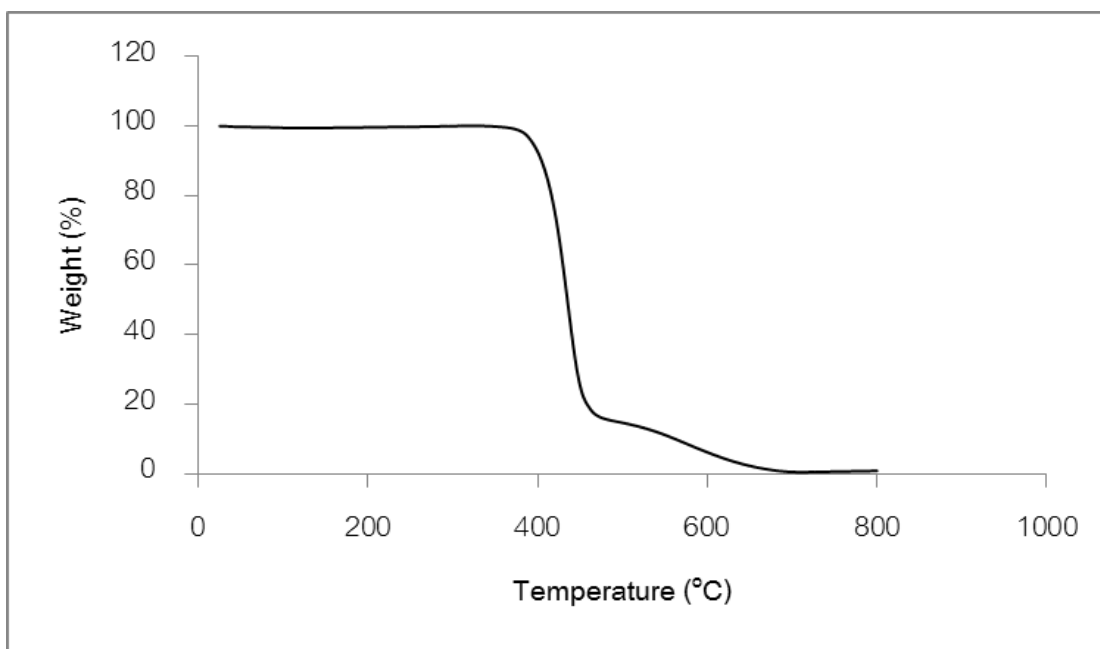
ตาราง ง-4 (ต่อ) ค่าความทนแรงดัดโค้งของพีดีบีเอสและพีดีคอมพาวนด์

สูตร	No.	Maximum load (N)	3 point bend (N/mm ²)	Width (mm)	Thick (mm)	Flexural strength
PET/t-T2/10TPP	1	27.31	52.91	12.8	3.5	26.13
	2	27.5	59.73	12.8	3.3	29.59
	3	28.07	51.72	12.8	3.3	30.21
	4	27.68	51.31	12.8	3.3	29.79
	5	72.64	56.65	12.8	3.3	78.17
	mean	36.64	54.464	12.8	3.34	38.78
	SD	20.12656826	3.61944471	0	0.08944272	22.08

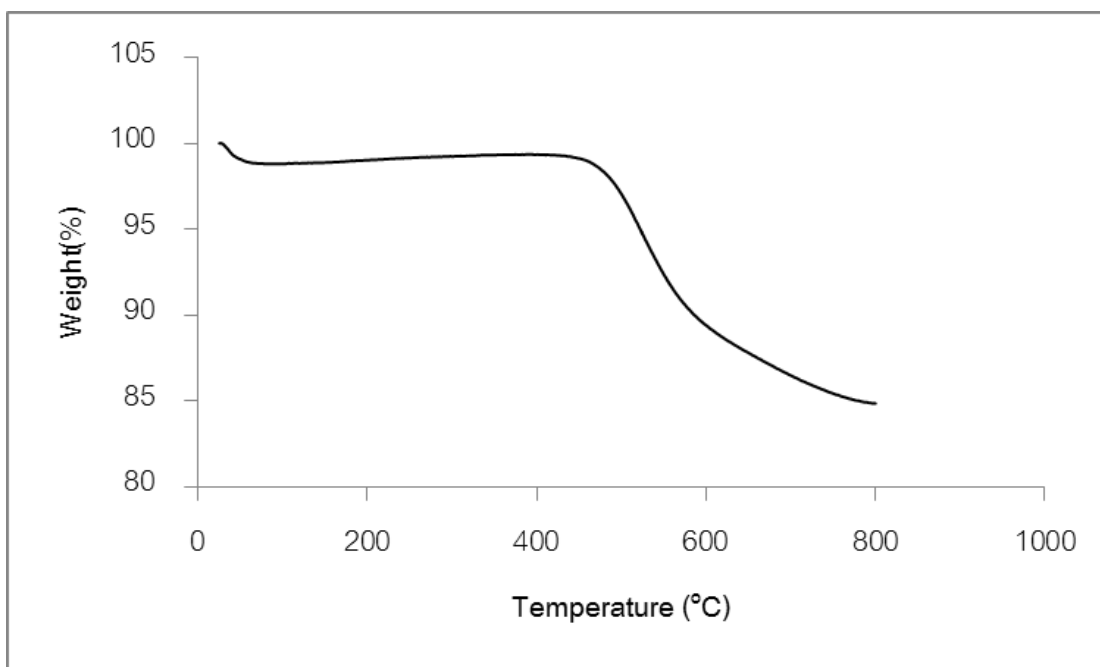
สูตร	No.	Maximum load (N)	3 point bend (N/mm ²)	Width (mm)	Thick (mm)	Flexural strength
PET/t-T5/10TPP	1	23.31	52.3	12.73	3.4	23.76
	2	24.07	47.7	12.72	3.47	23.57
	3	23.75	58.29	12.7	3.45	23.57
	4	24.02	52.62	12.7	3.45	23.84
	5	23.5	58.79	12.77	3.33	24.89
	mean	23.73	53.94	12.724	3.42	23.93
	SD	0.327643099	4.63180850	0.028809721	0.05656854	0.55

ภาคผนวก จ

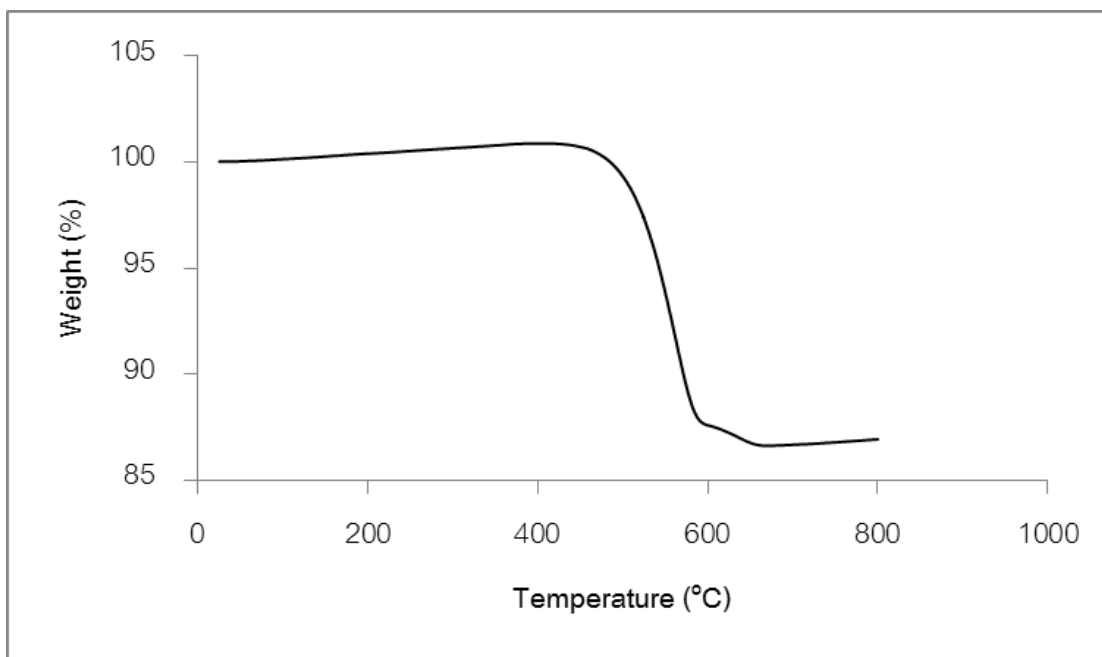
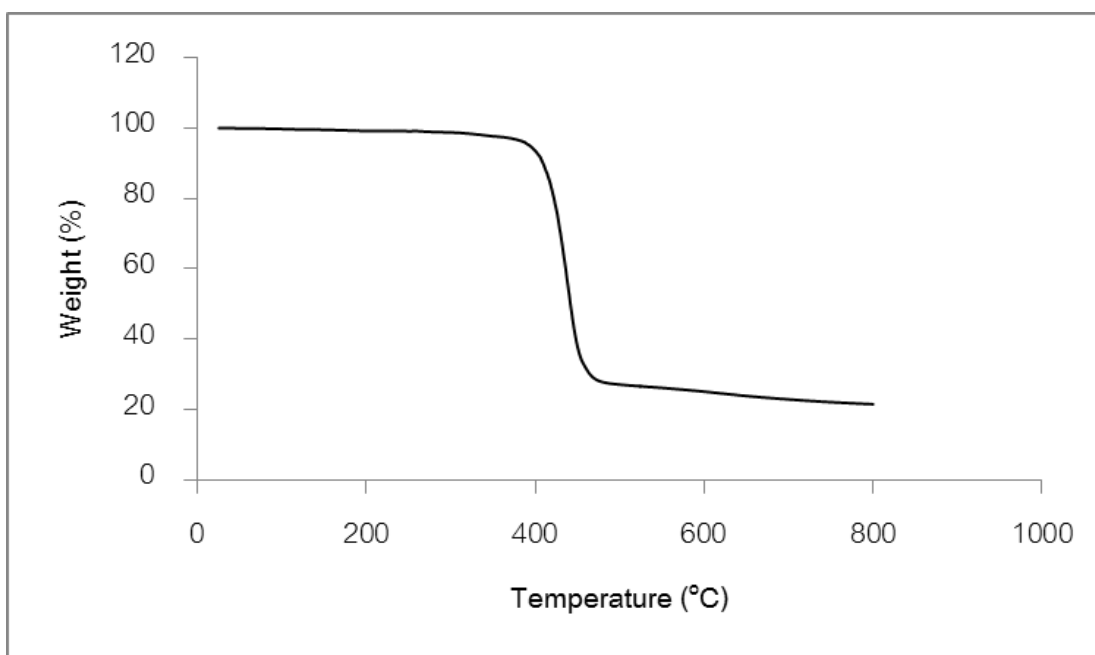
เทอร์โมแกรมของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยและพีตคอมพาวนด์

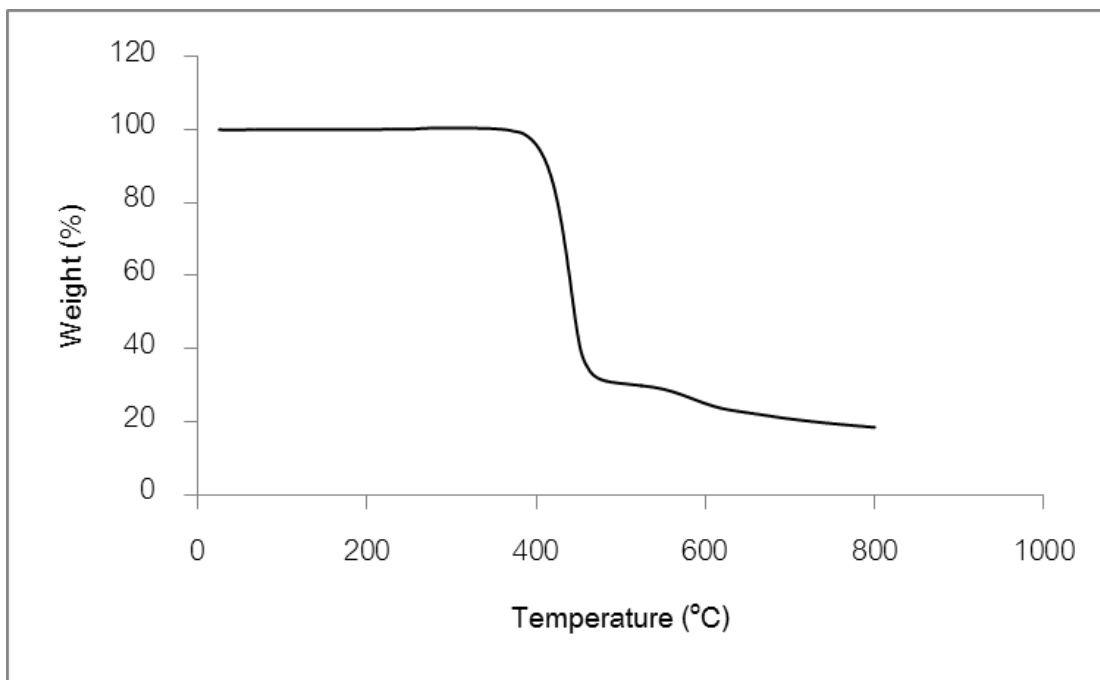


รูป จ-1 เทอร์โมแกรมของพีตบริสุทธิ์

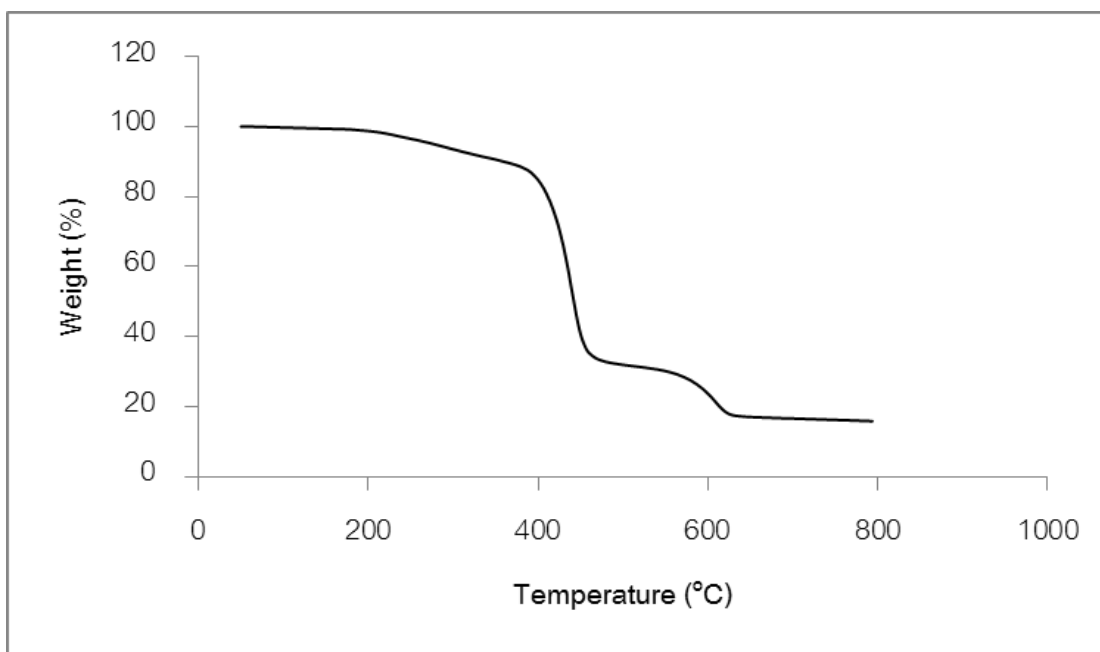


รูป จ-2 เทอร์โมแกรมของดินขาวเคโอลิน

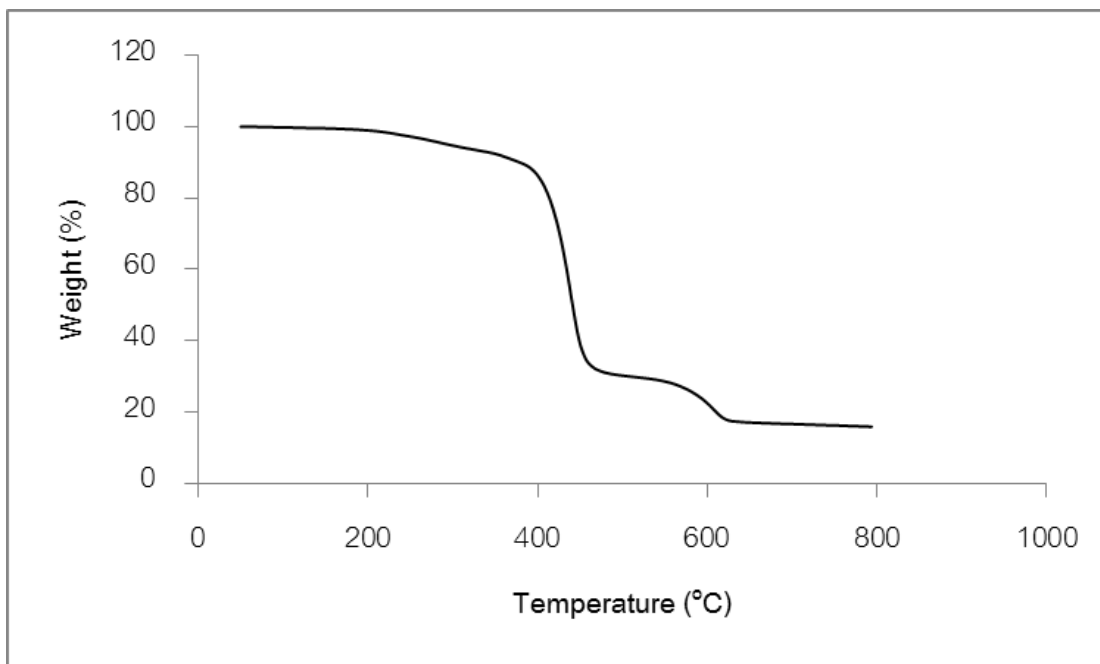
รูป จ-3 เทอร์โมแกรมของ K₂Oรูป จ-4 เทอร์โมแกรมของ PET/t-K₂O



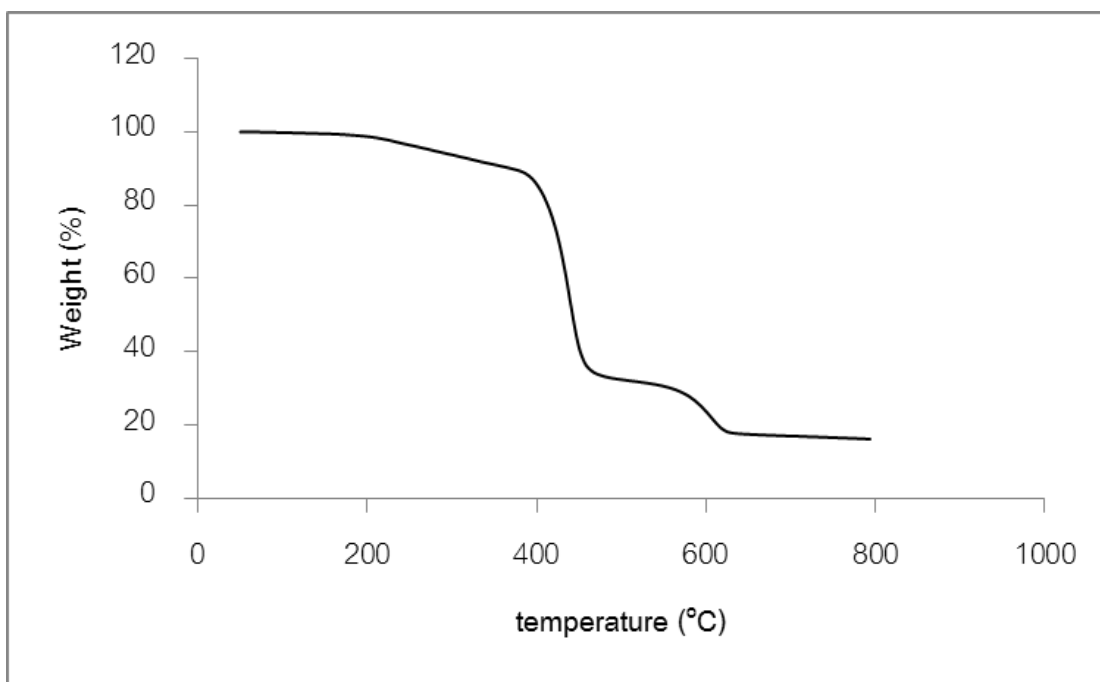
รูป จ-5 เทอร์โมแกรมของ PET/t-T20



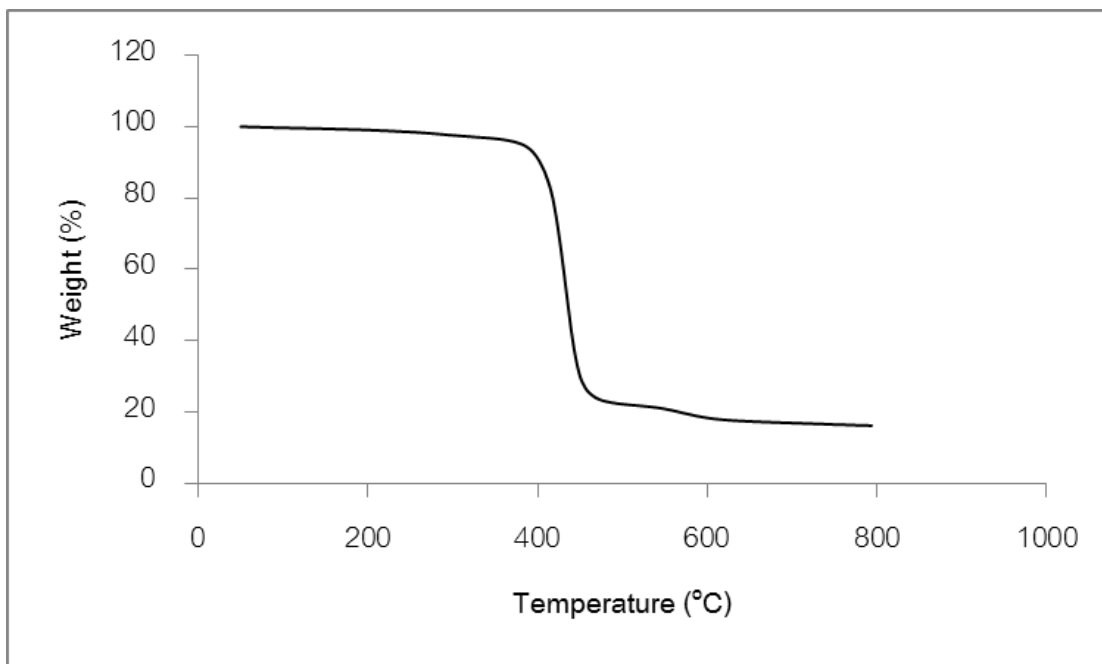
รูป จ-6 เทอร์โมแกรมของ PET/t-K2



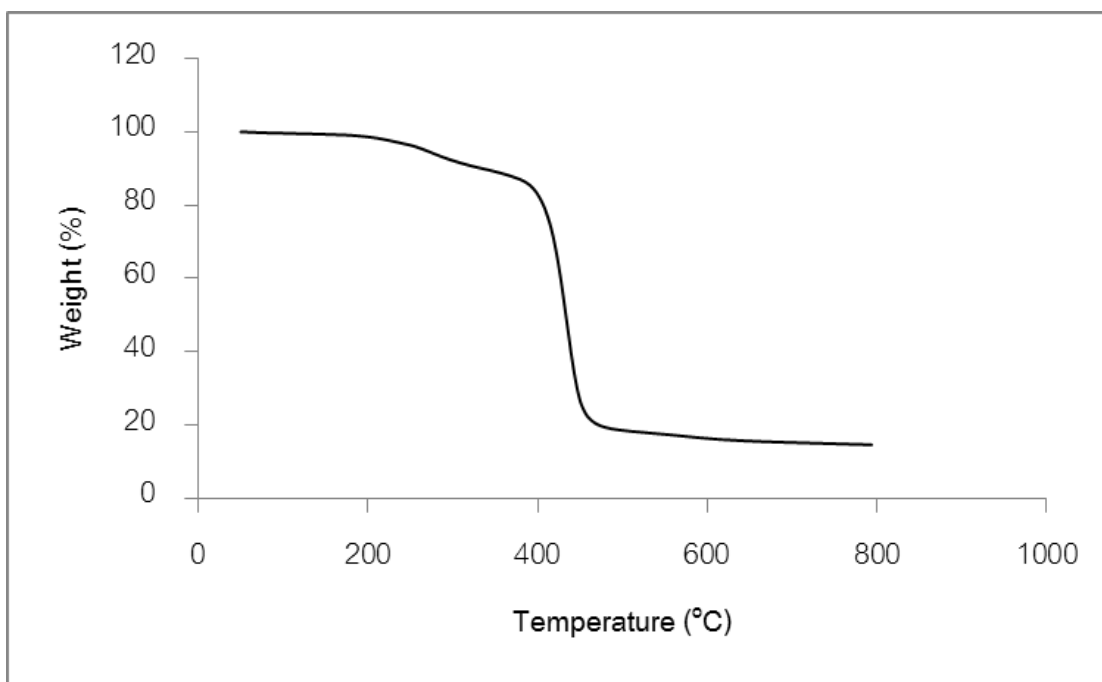
รูป จ-7 เทอร์โมแกรมของ PET/t-K5



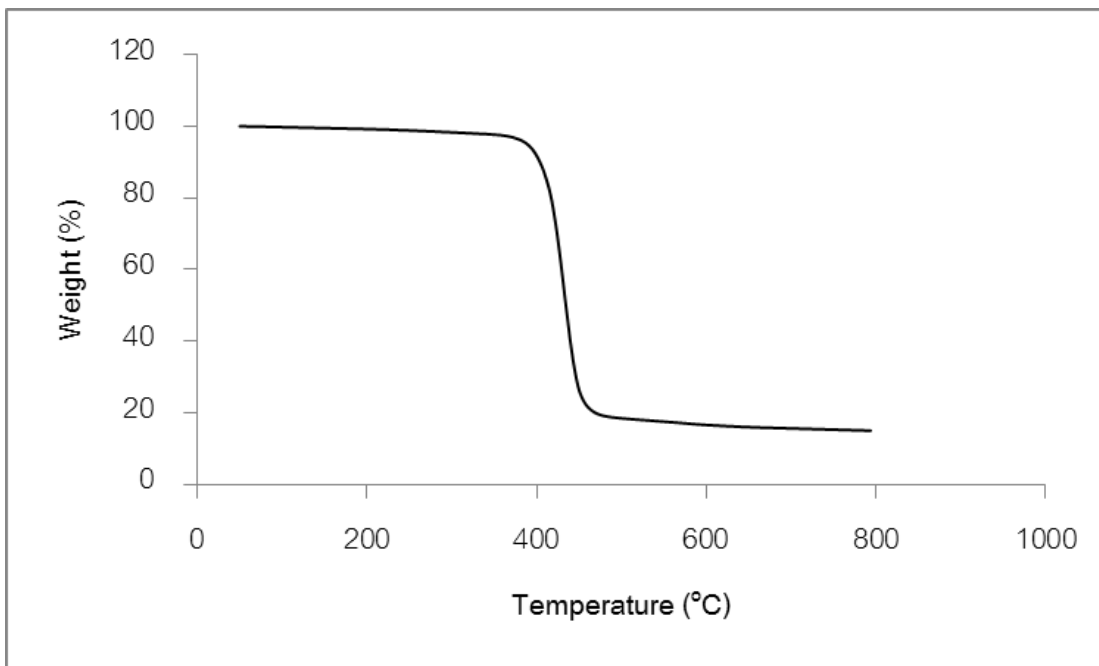
รูป จ-8 เทอร์โมแกรมของ PET/t-T2



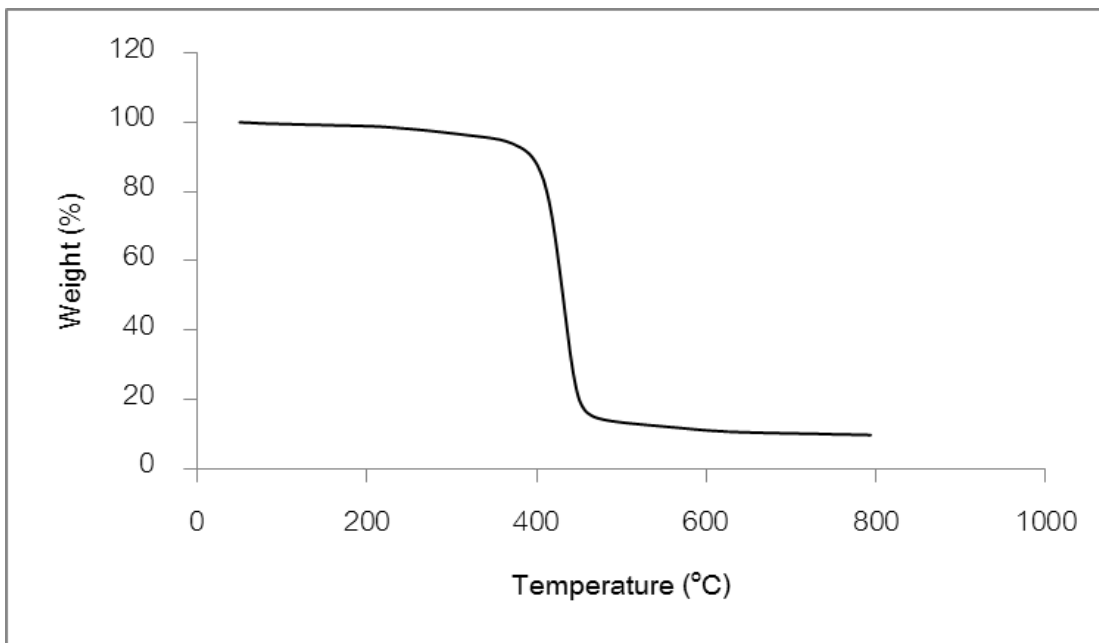
รูป จ-9 เทอร์โมแกรมของ PET/t-T5



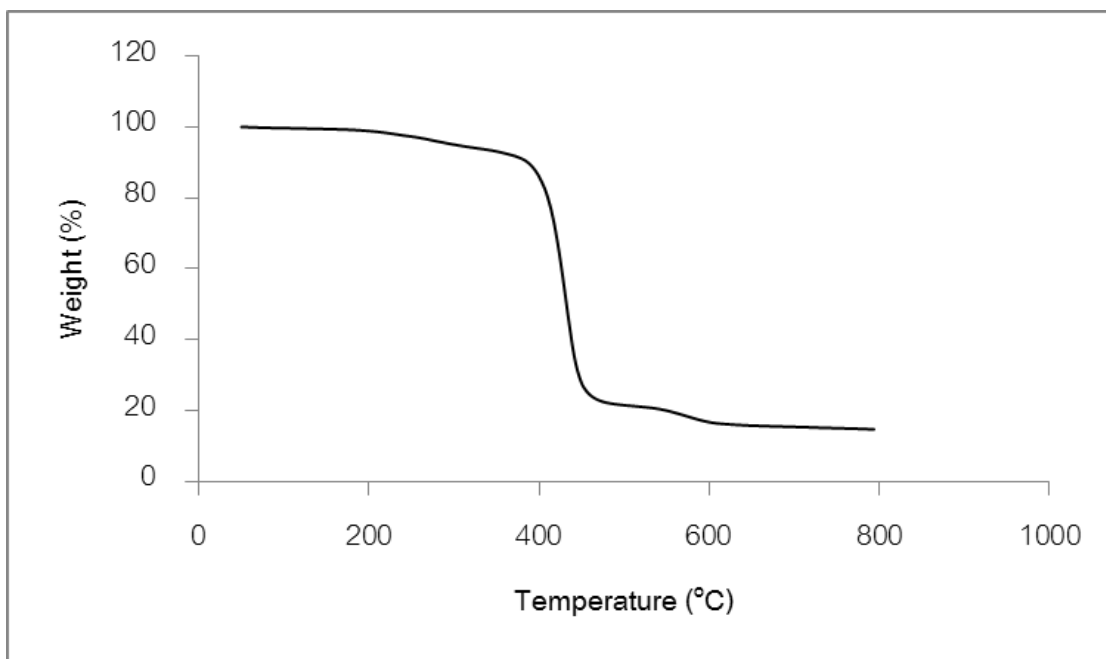
รูป จ-10 เทอร์โมแกรมของ PET/t-K2/10TPP



รูป จ-11 เทอร์โมแกรมของ PET/t-K5/10TPP



รูป จ-12 เทอร์โมแกรมของ PET/t-T2/10TPP



รูป จ-13 เทอร์โมแกรมของ PET/t-T5/10TPP

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวสันต์ ปोकหลง เกิดเมื่อวันที่ 12 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาพอลิเมอร์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2551 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นในปีการศึกษา 2553 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2554

การเสนอผลงานวิจัย ดังนี้

Wasan Poklong, Sireerat Charuchinda and Pranut Potiyaraj, Talc and Kaolin as Additives in Poly(ethylene terephthalate): Preparation and Thermal Stability, The 7th Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress 2011 (MPSGC2011), December 12-14, 2011, Singapore.

Wasan Poklong, Sireerat Charuchinda and Pranut Potiyaraj, On the Flammability of Poly(ethylene terephthalate) containing Kaolin and Talc as Inorganic Additives, The 1st ASEAN Plus Three Graduate Research Congress (AGRC2012), March 1-2, 2012, Thailand