รหัสโครงการ SUT7-710-57-18-07

รายงานการวิจัย

การปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

(Improvement of flame retardancy of sawdust/recycled high density polyethylene composites)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยนี้เป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-710-57-18-07

รายงานการวิจัย

การปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

(Improvement of flame retardancy of sawdust/recycled high density polyethylene composites)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ผลงานวิจัยนี้เป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง ผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2557 ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย นางสาวรพิศา จารปัญญาชีพ นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัทเคมิคอล อินโนเวชั่น จำกัด (Chemical Innovation Co., Ltd) ที่ให้ความอนุเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน (Fusabond® E MB100D, DuPont) บริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์อะลูมิเนียมไตรไฮเดรท (APYRAL® 40CD, Nabaltec) และโรงเลื่อยหัวทะเล จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงขี้เลื่อยอินเดียนวอลนัท (Albizia lebbeck Benth)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

ผลของปริมาณของผงขี้เลื่อยและการดัดแปรอัลคาไลน์ต่อสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ววิเคราะห์ ปริมาณผงขี้เลื่อยคือ 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต้านทานต่อแรงดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อการติดไฟ และความเสถียรต่ออ้อนลดลงเมื่อปริมาณผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการดัดแปรเพิ่มขึ้น ในขณะที่มอดูลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น การดัดแปรอัลคาไลน์ปรับปรุงสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ และความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ทุกปริมาณของผงขี้เลื่อย พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่มีการปรับปรุงพื้นผิวชนิดอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีปริมาณผงขี้เลื่อย 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแสดงสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ ความเสถียรต่อความร้อนที่สูงที่สุด ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงการยึดติดที่อินเตอร์เฟสระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยการดัดแปรอัลคาไลน์

อะลูมิเนียมไตรไฮเดรทถูกนำมาใช้เป็นสารหน่วงไฟ ที่ปริมาณ 10 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟและความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทได้รับการปรับปรุงเมื่อเพิ่มปริมาณของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท ในขณะที่ไม่ส่งผลกระทบมากนักต่อสมบัติทางกล ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นการยึดติดที่อินเทอร์เฟสที่ไม่ดีระหว่างอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทในปริมาณ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท มีสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟและความเสถียรต่อความร้อนที่สูงที่สุด

ซิงค์บอเรทนำมาใช้รวมกันกับอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท อัตราส่วนของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่อซิงค์บอเรท คือ1 ต่อ 1 1 ต่อ 2 และ 2 ต่อ 1 การรวมกันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรท เพิ่มสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีปริมาณผงขี้เลื่อย 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีการใส่อะลูมิเนียมไตรไฮเดรท พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีปริมาณผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

และมีปริมาณซิงค์บอเรท 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท มีสมบัติทางกล ความเสถียรต่อความร้อนที่สูงที่สุด แต่มีสมบัติการต้านทานต่อไฟที่ต่ำที่สุด การรวมกันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรท ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 1 และ 2 ต่อ 1 แสดงผลการเสริมกันในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟพอลิเมอร์คอมโพสิท พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท และมีปริมาณซิงค์บอเรท 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทมีสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟที่สูงที่สุด

นอกจากนี้ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนนำมาใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากันที่ปริมาณ 1 3 และ 5 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท เมื่อเพิ่มปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรกราฟท์พอลิเอทิลีน สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ และความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นไม่เพียงแต่การปรับปรุงการยึดติดที่อินเตอร์เฟสระหว่างสารตัวเติมและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว แต่ยังแสดงการกระจายตัวที่ดีของสารหน่วงไฟและผงขี้เลื่อยในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

Effects of sawdust content and alkali treatment on mechanical, flame retarding, thermal and morphological properties of sawdust/rHDPE composites were investigated. Sawdust contents were 30, 40 and 50 wt%. Tensile strength, elongation at break, impact strength, flame retardancy and thermal stability of the composites were decreased with increasing untreated sawdust content while tensile modulus was increased. Alkali treatment enhanced mechanical, flame retarding and thermal properties of the composites at all sawdust contents. rHDPE/30AT composite showed the highest mechanical properties, flame retardancy and thermal stability. SEM micrographs revealed the improvement of interfacial adhesion between sawdust and rHDPE matrix by alkali treatment.

Aluminum trihydrate (ATH) was used as a flame retardant at contents of 10, 20 and 30 phr. Flame retardancy and thermal stability of the composites were improved with increasing ATH content while mechanical properties were not much affected. SEM micrographs showed the poor interfacial adhesion between ATH and rHDPE matrix. The composite containing 30ATH showed the highest flame retardancy and thermal stability.

Zinc borate (ZB) was used in the combination with ATH. ATH/ZB ratios were 2:1, 1:1 and 1:2. The combination of ATH and ZB slightly increased mechanical properties of rHDPE/30AT composite comparing to the composite containing ATH. The composite containing 30ZB had the highest mechanical properties and thermal stability but the lowest flame retardancy. The combination of ATH and ZB at ATH:ZB ratios of 2:1 and 1:1 exhibited the synergistic effect in enhancing flame retardancy of the composites. The composite containing ATH/10ZB at the ratio of 2:1 showed the highest flame retardancy.

In addition, maleic anhydride grafted polyethylene (MAPE) was used as a compatibilizer and its contents were 1, 3 and 5 phr. With increasing MAPE content, mechanical properties of the composites were significantly improved while flame retardancy and thermal stability were slightly increased. SEM micrographs revealed not only the enhancement of interfacial adhesion between fillers and rHDPE matrix but also the good distribution of flame retardants and sawdust in rHDPE matrix.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญรูป ..... ญ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย 4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย 5
บทที่ 2 ภูมิหลัง 6
2.1 คุณลักษณะของไม้ 6
2.2 พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์ 6
2.3 การปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลส และพอลิเมอร์ 8
2.3.1 การดัดแปรพื้นผิวของสารตัวเติม 9
2.3.2 การดัดแปรพอลิเมอร์เมทริกซ์ 10
2.3.3 การใส่สารช่วยให้เข้ากัน 11
2.4 การปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์ คอมโพสิทระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์ 12
บทที่ 3 วัสดุและการทดลอง 15
3.1 วัสดุ 15
3.2 การทดลอง 15
3.2.1 การเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 15
3.2.2 การเตรียมผงขี้เลื่อย 15
3.2.3 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิท 15
3.2.4 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิท 16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.4.1 สมบัติทางกล 16
3.2.4.2 สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ 16
3.2.4.3 สมบัติทางความร้อน 17
3.2.4.4 สัณฐานวิทยา 17
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง 18
4.1 ผลของปริมาณผงขี้เลื่อยและการดัดแปรอัลคาไลน์ต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว 18
4.1.1 สมบัติทางกล 18
4.1.2 สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ 21
4.1.3 สมบัติทางความร้อน 24
4.1.4 สัณฐานวิทยา 26
4.2 ผลของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว 29
4.2.1 สมบัติทางกล 29
4.2.2 สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ 31
4.2.3 สมบัติทางความร้อน 34
4.2.4 สัณฐานวิทยา 36
4.3 ผลของการรวมกันของสารหน่วงไฟต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว 37
4.3.1 สมบัติทางกล 37
4.3.2 สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ 41
4.3.3 สมบัติทางความร้อน 43
4.3.4 สัณฐานวิทยา 45

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 ผลของสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ 47
4.4.1 สมบัติทางกล 47
4.4.2 สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ 49
4.4.3 สมบัติทางความร้อน 52
4.4.4 สัณฐานวิทยา 54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 56
บรรณานุกรม 58
ประวัติผู้วิจัย 63

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ 6

4.1 สมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว และพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ 22

4.2 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว และพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความ หนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ 23

4.3 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ 26

4.4 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปร อัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ 32

4.5 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปร อัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ 33

4.6 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่าง ผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ 34

4.7 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปร อัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มี การรวมกันของสารหน่วงไฟ 40

4.8 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัด แปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่าน การใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ 42

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.9 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ 45

4.10 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดร์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ 50

4.11 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดร์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ 51

4.12 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งาน แล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดร์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ 53

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 โครงสร้างทางเคมีของ (a) เซลลูโลส (b) เฮมิเซลลูโลส และ (c) ลิกนิน 7

4.1 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อย และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (b) มอดูลัสแรงดึง และ (c) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด 19

4.2 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อย และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ 21

4.3 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อย และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ 23

4.4 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิท ระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่าน การใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ (a) TGA และ (b) DTGA 25

4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ ที่กำลังขยาย 350 เท่า (a) rHDPE/30UT และ (b) rHDPE/30AT 27

4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) rHDPE/30UT (b) rHDPE/40UT (c) rHDPE/50UT (d) rHDPE/30AT (e) rHDPE/40AT และ (f) rHDPE/50AT 27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.7 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อย
ที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ
(a) ความต้านทานต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาด
และ (b) มอดูลัสแรงดึง 30

4.8 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อย
ที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ 31

4.9 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่
ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ 33

4.10 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิท
ระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีน
ชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณ
อะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ (a) TGA และ (b) DTGA 35

4.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดลักษณะ
การเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่าง
ผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิด
ความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ
ที่กำลังขยาย 50 และ 2000 เท่า (a) 10ATH (b) 20ATH และ (c) 30ATH 36

4.12 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่าง
ผงขี้เลื่อยที่มีการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ
(a) ความต้านทานต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และ
(b) มอดูลัสแรงดึง 38

4.13 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อย
ที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ 39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.14 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อย
ที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ 42

4.15 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิท
ระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีน
ชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ
(a) TGA และ (b) DTGA 44

4.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์
คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และ
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกัน
ของสารหน่วงไฟ ที่กำลังขยาย 50 และ 2000 เท่า (a) 30ATH
(b) 20ATH/10ZB (c) 15ATH/15ZB (d) 10ATH/20ZB และ (e) 30ZB 46

4.17 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อย
ที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิก
แอนไฮไดร์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ (a) ความต้านทานต่อแรงดึงและ
ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และ (b) มอดูลัสแรงดึง 48

4.18 สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่าง
ผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณ
มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ 49

4.19 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่าน
การดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิก
แอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ 51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.20 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิท
ระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีน
ชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกัน
ของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ
(a) TGA และ (b) DTGA 52

4.21 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์
คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีน
ชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ
ที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆที่กำลังขยาย 50 และ 2000 เท่า
(a) 20ATH/10ZB (b) 1MAPE (c) 3MAPE และ(d) 5MAPE 54

4.22 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์
คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีน
ชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ
ที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ ที่กำลังขยาย 350 เท่า
(a) 20ATH/10ZB (b) 1MAPE (c) 3MAPE และ (d) 5MAPE 55

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลส (Lignocellulosic fillers) และพอลิเมอร์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากนักวิจัยและภาคอุตสาหกรรม เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fillers) และสารตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic fillers) สารตัวเติมเซลลูโลสมีข้อดีที่น่าสนใจคือ ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ราคาถูกและน้ำหนักเบา ผงขี้เลื่อยซึ่งเป็นเศษวัสดุที่ได้จากอุตสาหกรรมไม้จัดเป็นสารตัวเติมเซลลูโลสชนิดหนึ่งที่นิยมใช้สำหรับการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างสารตัวเติมเซลูโลสและพอลิเมอร์ การใช้ผงขี้เลื่อยในการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์ส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผงขี้เลื่อย

ปัจจุบัน มีการใช้งานพลาสติกในด้านต่างๆอย่างกว้างขวาง เช่น บรรจุภัณฑ์ เฟอร์นิเจอร์ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ตกแต่งบ้าน เป็นต้น ก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติก การรีไซเคิลพลาสติกเป็นทางเลือกหนึ่งในการจัดการขยะพลาสติก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีการใช้ทั่วไป โดยมีปริมาณการใช้อยู่เป็นอันดับต้นๆ ของพลาสติกที่ใช้ในชีวิตประจำวัน นอกจากนี้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงสามารถแยกได้ง่ายจากพลาสติกชนิดอื่นและมีข้อดี เช่น มีความเหนียวสูงและความต้านทานต่อสารเคมีที่ดี พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นอย่างมาก Najafi และคณะ (2006) และ Adihikary และคณะ (2008) รายงานว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ทำจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Recycled high density polyethylene) และผงขี้เลื่อยมีสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ทำจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงแต่ราคาถูกกว่ามาก

พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีการประยุกต์ใช้งานในด้านอาคารและการก่อสร้างเพื่อแทนที่ไม้ในงานกลางแจ้ง เช่น พื้นระเบียง ราวบันได กรอบประตูและหน้าต่าง นอกจากนี้ พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ตกแต่งภายในรถยนต์และอุปกรณ์ตกแต่งภายใน เช่น พื้นและเฟอร์นิเจอร์ แต่อย่างไรก็ตามข้อจำกัดที่สำคัญของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วคือการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟส (Interfacial adhesion) ที่ไม่ดีระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิทมีสมบัติทางกลที่ไม่ดี การปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทสามารถปรับปรุงได้หลายวิธี เช่น การดัดแปร

พื้นผิวของสารตัวเติม (Fillers surface treatment) (Kaewkuk และคณะ, 2010) การดัดแปรเมทริกซ์ (Matrix modification) (Arbeliz และคณะ, 2005) และการใส่การช่วยให้เข้ากัน (Adding compatibilizer) (Lei และคณะ, 2007) การดัดแปรอัลคาไลน์ (Alkali treatment) เป็นหนึ่งในการดัดแปรพื้นผิวทางเคมีที่นิยมใช้มากที่สุด การดัดแปรอัลคาไลน์กำจัดลิกนิน (Linin) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ไขมัน (Wax) และสิ่งสกปรก (Impurities) จากสารตัวเติม ดังนั้นพื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพในการเกิดอันตรกริยากับพอลิเมอร์เมทริกซ์จึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิท (Lopattananon และคณะ, 2006; Suardana และคณะ, 2011; Elzubair และคณะ, 2012)

ข้อด้อยอีกอย่างหนึ่งของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วคือ ความไวต่อการติดไฟสูง เนื่องจากผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถติดไฟได้ (Stark และคณะ, 2010) วิธีการโดยทั่วไปในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของวัสดุที่ติดไฟได้คือการใช้สารหน่วงไฟ (Flame retardants) เนื่องจากมีราคาถูกและให้สมบัติที่ดี (Bourbigot และคณะ, 2010)

อะลูมิเนียมไตรไฮเดรท (Aluminum trihydrate) เป็นสารหน่วงไฟที่นิยมใช้สำหรับพอลิเมอร์ ข้อดีของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท คือ อันตรายต่อสุขภาพต่ำ ความบริสุทธิ์สูง ราคาถูก ไม่กัดกร่อนและลดการเกิดควัน อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องใช้ปริมาณของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทที่สูงเพื่อให้ได้สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ (Flame retardancy) ที่ดี ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลง (Chen และคณะ, 2005) งานวิจัยต่างๆ พบว่าการใส่อะลูมิเนียมไตรไฮเดรทเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิท (Schartel และคณะ, 2006; Ramazani และคณะ, 2008; Formicola และคณะ, 2009) กระบวนการเสื่อมสภาพ (Decomposition process) ของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทสามารถอธิบายดังสมการที่ 1.1 อะลูมิเนียมไตรไฮเดรทส่งผลในการต้านทานต่อการติดไฟโดยการสร้างชั้นป้องกัน (Protective layer) และปลดปล่อยน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส

$$2Al(OH)_3 \xrightarrow{200°C} Al_2O_3 + 3H_2O \qquad (1.1)$$

ซิงค์บอเรท (Zinc borate) เป็นสารหน่วงไฟชนิดหนึ่งที่ใช้รวมกับสารหน่วงไฟที่ปราศจากสารฮาโลเจน (Non-halogen flame retardant) ในพอลิเมอร์ ส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟและสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้น (Ning และ Guo 2000; Carpentier และคณะ, 2007; Formicola และคณะ, 2009) การเสื่อมสภาพของซิงค์บอเรทแสดงในสมการที่ 1.2 ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ซิงค์บอเรทมีการปลดปล่อยน้ำและสร้างชั้นป้องกันกั้นพอลิเมอร์จากไฟและออกซิเจน (Samyn และคณะ, 2007)

$$2ZnO.3B_2O_3.3H_2O \xrightarrow{320°C} 2ZnO.3B_2O_3 + 3H_2O \quad (1.2)$$

ประสิทธิภาพของสารหน่วงไฟสามารถเพิ่มได้โดยผลการเสริมกัน (Synergistic effect) การรวมกันของสารหน่วงไฟส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ (Ning และคณะ, 2009; Kurt และ Mengeloglu, 2009; Gou และ Li, 2014) Ning และ Gou (2000) พบว่าการรวมกันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรทแสดงผลเสริมกันในการเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิไวนิลคลอไรด์ Jeencham และคณะ (2010) พบว่าการรวมกันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและซิงค์บอเรทแสดงผลการเสริมกันในการเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และพอลิโพรพิลีน

นอกจากนี้ มีการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride grafted polyethylene) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารหน่วงไฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว หมู่แอนไฮไดรด์ (Anhydride group) ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนสร้างพันธะเคมีกับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ของสารหน่วงไฟ สายโซ่พอลิเอทิลีนเข้ากันกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ดังนั้นการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสารหน่วงไฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วได้ปรับปรุงโดยมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน (Hausmann และคณะ, 1997; Hippi และคณะ, 2003)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงขี้เลื่อยต่อสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการดัดแปรอัลคาไลน์ต่อสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่อสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของการรวมกันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรทต่อสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

1.2.5 เพื่อศึกษาผลของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่อสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในการศึกษานี้ พอลิเมอร์คอมโพสิทเตรียมที่ปริมาณผงขี้เลื่อย 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป การดัดแปรอัลคาไลน์นำมาใช้ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีการศึกษาผลของปริมาณผงขี้เลื่อยและการดัดแปรอัลคาไลน์ต่อสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว จากสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ และสมบัติทางความร้อน พอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีสมบัติที่ดีที่สุดเลือกไปศึกษาผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิท

อะลูมิเนียมไตรไฮเดรทถูกใช้เป็นสารหน่วงไฟที่ปริมาณ 10 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท มีการศึกษาสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว จากสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ และสมบัติทางความร้อน พอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีสมบัติที่ดีที่สุดเลือกไปศึกษาผลของการรวมกันของสารหน่วงไฟต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิท

การศึกษาผลของการรวมกันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรทต่อสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยอัตราส่วนของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่อซิงค์บอเรทคือ 2 ต่อ 1 1 ต่อ 1 และ 1 ต่อ 2 จากสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ และสมบัติทางความร้อน พอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีสมบัติที่ดีที่สุดถูกเลือกไปศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิท นอกจากนี้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนถูกใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากัน ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนคือ 1 3 และ 5 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.4.1 การวิจัยนี้จะนำมาซึ่งองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิเมอร์ที่นำกลับมาใช้ใหม่และผงขี้เลื่อย นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและเพิ่มมูลค่าให้กับผงขี้เลื่อย

1.4.2 การวิจัยนี้จะได้วัสดุที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ เฟอร์นิเจอร์ งานไม้พื้น งานศาลา งานระแนง งานฝ้า งานประตู และรั้ว เป็นต้น

1.4.3 ได้เอกสารทางวิชาการที่ตีพิมพ์ระดับชาติหรือระดับนานาชาติ

1.4.4 เป็นการพัฒนาและส่งเสริมให้นักศึกษาสนใจการทำวิจัย

1.4.5 เป็นการสร้างและพัฒนากลุ่มนักวิจัยรุ่นใหม่ให้สามารถเริ่มการวิจัยและพัฒนาได้และดำเนินการวิจัยต่อไปได้อย่างต่อเนื่องในระยะยาว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ภูมิหลัง

2.1 คุณลักษณะของไม้

ไม้จัดเป็นวัสดุเซลลูโลส (Lignocellulosic material) ซึ่งประกอบด้วยสามองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) องค์ประกอบทางเคมีของไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) และไม้เนื้ออ่อน (Soft wood) แสดงในตารางที่ 2.1 เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งให้ความแข็งแรงและความคงรูปแก่ไม้ เซลลูโลสประกอบด้วยหน่วยกลูโคสและเชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic bonds) (Hendriks และ Zeeman, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (a) เฮมิเซลลูโลสเป็นโครงสร้างคาร์โบไฮเดรทที่ซับซ้อน ซึ่งประกอบไปด้วยเพ็นโทส (Pentose) เฮ็กโซส (Hexose) และกรดน้ำตาล (Sugar acid) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (b) เฮมิเซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลสและมีกิ่งที่มีสายโซ่สั้นจึงง่ายต่อการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) (Hendriks และ Zeeman, 2009) ลิกนินเป็นวัสดุที่ยึดเส้นใยเซลลูโลสเข้าด้วยกัน ลิกนินประกอบไปด้วยหน่วยฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane units) ที่แตกต่างกันสามชนิด คือ คูมาริล (Coumaryl) โคนิเฟอริล (Coniferyl) และไซนาพิล (Sinapyl) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (c) หน้าที่หลักของลิกนินคือการรักษาโครงสร้างของไม้และต้านทานต่อจุลินทรีย์

ตาราง 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ (Kozlowski and Przybylak, 2008).

Wood type	**Cellulose (%)**	**Hemicellulose (%)**	**Lignin (%)**
Hardwood	38-49	19-26	23-30
Softwood	40-45	7-14	25-35

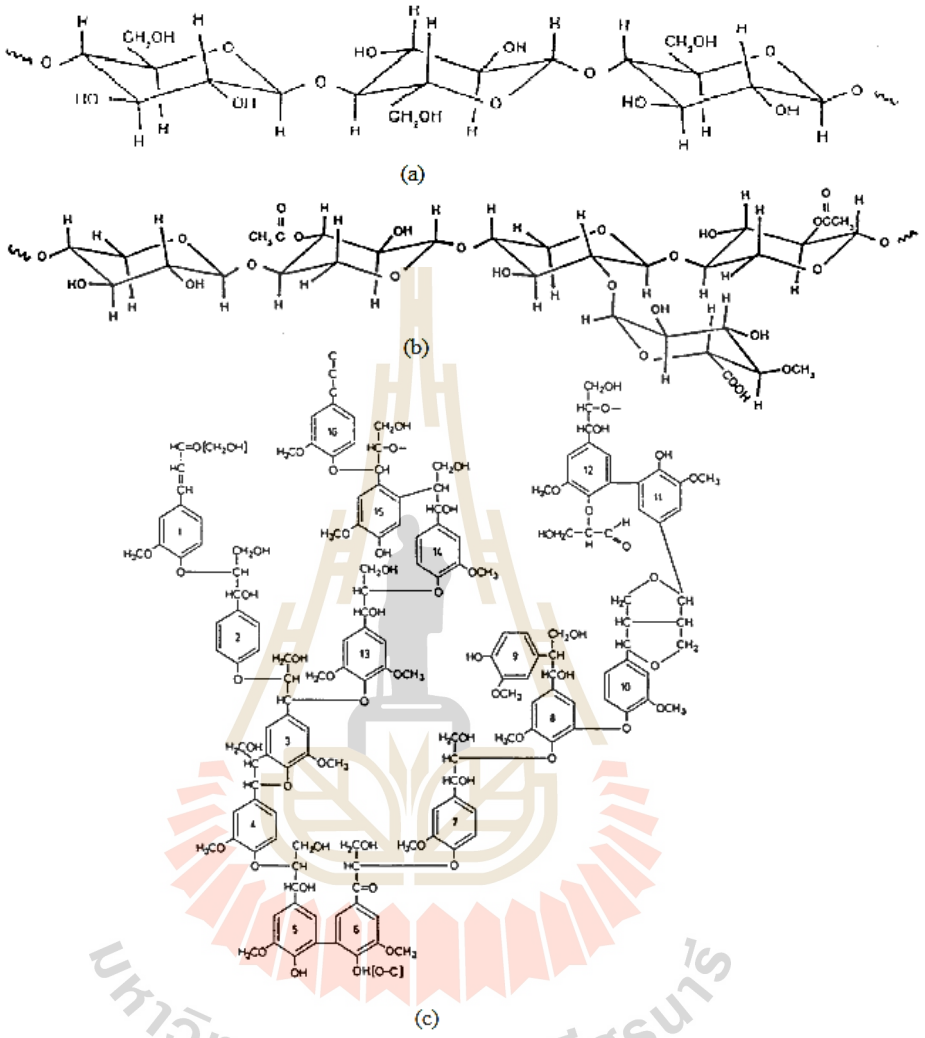
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.2 พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์

พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์สามารถผลิตได้จากพอลิเมอร์ที่ไม่ผ่านการใช้งาน (Virgin polymer) หรือพอลิเมอร์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Recycled polymer) และสารตัวเติมเซลลูโลส พอลิเมอร์คอมโพสิทนี้ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางจากนักวิจัยและภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากให้การรวมกันที่น่าสนใจระหว่างราคาและสมบัติ

Jayaraman และ Bhattacharyya (2003) ศึกษาผลของปริมาณผงไม้ (Wood flour) ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Recycled high density polyethylene) โดยปริมาณผงไม้ที่ใช้คือ 0 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์

โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และความต้านทานต่อแรงดัด (Flexural strength) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) และมอดูลัสแรงดัด (Flexural modulus) เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ (a) เซลลูโลส (b) เฮมิเซลลูโลส และ (c) ลิกนิน (Pandey, 1999).

Behzad และคณะ (2004) ศึกษาผลของปริมาณผงไม้ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) โดยปริมาณผงไม้ที่ใช้คือ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลง แต่ความต้านทานต่อแรงดัดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้นส่งผลให้มอดูลัสแรงดึงและมอดูลัสแรงดัดเพิ่มขึ้น

Najafi และคณะ (2006) ศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อย (Sawdust) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Recycled polypropylene) โดยปริมาณผงขี้เลื่อยที่ใช้คือ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง สมบัติการต้านทานต่อแรงดัด และสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วมีความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดัด มอดูลัสแรงดึงและมอดูลัสแรงดัดสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้ว แต่มีความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำกว่า นอกจากนี้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเมอร์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมีค่าใกล้เคียงกับสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยกับพอลิเมอร์ที่ไม่ผ่านการใช้งาน

Adhikary และคณะ (2008) ศึกษาผลของปริมาณผงไม้ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยปริมาณผงไม้ที่ใช้คือ 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการใส่ผงไม้ในพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็ง (Stiffness) และความเปราะ (Brittleness) เพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่าการยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ลดลง เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดัดลดลง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วเปรียบเทียบกับคอมโพสิทระหว่างผงไม้กับพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ผ่านการใช้งาน (Virgin high density polyethylene) ซึ่งพบว่าการนำพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานมาทำเป็นวัสดุคอมโพสิทนั้นไม่ส่งผลทางลบต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิท

2.3 การปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์

ปัญหาที่สำคัญของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์คือความไม่เข้ากันระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลง ความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์สามารถปรับปรุงได้ โดยการดัดแปรพื้นผิวของสารตัวเติม (Filler surface treatment) การดัดแปรเมทริกซ์ (Matrix modification) และการใส่สารช่วยให้เข้ากัน (Adding compatibilizer)

2.3.1 การดัดแปรพื้นผิวของสารตัวเติม

Thomasand และ Pavithran (1996) ศึกษาผลของการดัดแปรอัลคาไลน์ (Alkali treatment) ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal fiber) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene) โดยดัดแปรเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ที่มีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์มีค่าสูงกว่าของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ไม่ผ่านการดัดแปร เนื่องจากการดัดแปรอัลคาไลน์ปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟส (Interfacial adhesion) ระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์

Ichazo และคณะ (2001) ศึกษาผลของการดัดแปรอัลคาไลน์ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิโพรพิลีน (Polypropylene) โดยปริมาณผงไม้ที่ใช้คือ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและดัดแปรผงไม้ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 30 และ 60 นาที พบว่าการดัดแปรอัลคาไลน์เพิ่มมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิท นอกจากนี้เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการดัดแปรอัลคาไลน์พบว่าไม่มีผลต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทอย่างมีนัยสำคัญ

Pickering และคณะ (2003) ศึกษาผลของการดัดแปรไซเลน (Silane treatment) ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยไม้ (Wood fiber) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยดัดแปรเส้นใยไม้ด้วยไดคลอโรไดเอทิลไซเลน (Dichlorodiethylsilane) ที่มีความเข้มข้น 3.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณเส้นใย 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การดัดแปรไซเลนเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเป็น 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบการลดลงของความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิท เนื่องจากการเกิดการรวมกลุ่มกันของเส้นใยในพอลิเมอร์เมทริกซ์

Paul และคณะ (2008) ศึกษาผลของการดัดแปรอัลคาไลน์ต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยกล้วย (Banana fiber) และพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยดัดแปรเส้นใยกล้วยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการดัดแปรอัลคาไลน์ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความเสถียรต่อความร้อน (Thermal stability) ของพอลิเมอร์คอมโพสิท นอกจากนี้ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ไขมัน (Wax) และสิ่งสกปรก (Impurities) ของเส้นใยกล้วยที่มีความเสถียรต่อความร้อนต่ำภายหลังการดัดแปรอัลคาไลน์

Kaewkuk และคณะ (2010) ศึกษาผลของการดัดแปรทางความร้อน (Heat treatment) ต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal fibers) และพอลิโพรพิลีน โดยอบเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่อุณหภูมิ 150 170 และ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้ความดันบรรยากาศและบรรยากาศออกซิเจน ปริมาณเส้นใยป่านศรณารายณ์ที่ใช้คือ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยที่ผ่านการดัดแปรทางความร้อนและพอลิโพรพิลีนมีค่าสูงกว่าของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปรทางความร้อนและพอลิโพรพิลีน ในขณะที่อุณหภูมิการดัดแปรไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิท ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างเส้นใยป่านศรณารายณ์และพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์

2.3.2 การดัดแปรพอลิเมอร์เมทริกซ์

Balasuriya และคณะ (2001) เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ปริมาณ 50/50 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก โดยดัดแปรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) 0.5 1 2 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การดัดแปรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของความต้านทานต่อแรงดึง การยืดสูงสุด ณ จุดขาด มอดูลัสแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดัด และมอดูลัสแรงดัดของพอลิเมอร์คอมโพสิท นอกจากนี้ จากสมบัติทางกลแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีการดัดแปรพอลิเมอร์เมทริกซ์ ที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 2 เปอร์เซ็นต์แสดงสมบัติทางกลที่สูงที่สุด

Marcovich และ Villar (2003) ศึกษาผลของการดัดแปรเมทริกซ์ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene) โดยปริมาณผงไม้ที่ใช้คือ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยดัดแปรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผ่านการดัดแปรเมทริกซ์มีความต้านทานต่อแรงดึง และการยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่ดีกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ไม่ผ่านการดัดแปรเมทริกซ์ เนื่องจากการปรับปรุงของการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างผงไม้และพอลิเมอร์เมทริกซ์

Arbeliz และคณะ (2005) ศึกษาผลของการดัดแปรพอลิเมอร์เมทริกซ์ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านลินิน (Flax fiber) และพอลิโพรพิลีน ปริมาณเส้นใยที่ใช้คือ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยดัดแปรพอลิโพรพิลีนด้วยไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน (Vinyltrimethoxy silane) 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การดัดแปรพอลิเมอร์เมทริกซ์ด้วยไวนิลไตร

เมทอกซีไซเลนส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึง มอดูลัสดึง ความต้านทานต่อแรงดัด และมอดูลัสดัดของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างเส้นใยป่านลินินและพอลิโพรพิลีน

2.3.3 การใส่สารช่วยให้เข้ากัน

Oksman และ Lindberg (1997) ศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Recycled low density polyethylene) ปริมาณผงไม้ที่ใช้คือ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ สไตรลีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรลีน (Maleic anhydride grafted triblock copolymer styrene-ethylene/butylene-styrene) เป็นสารช่วยให้เข้ากัน และปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ สไตรลีน-เอทิลีน/บิวทิลีน-สไตรลีนที่ใช้คือ 2-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต้านทานต่อแรงดึง การยืดสูงสุด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของสารช่วยให้เข้ากันและมีค่าคงที่เมื่อสารช่วยให้เข้ากันมีปริมาณมากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่มอดูลัสแรงดึงลดลงเมื่อปริมาณสารช่วยให้เข้ากันเพิ่มขึ้น

Lu และคณะ (2005) ศึกษาผลของปริมาณและชนิดของสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ปริมาณผงไม้ที่ใช้คือ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (Maleic anhydride grafted high density polyethylene) และออกซิไดซ์พอลิเอทิลีน (Oxidized polyethylene) เป็นสารช่วยให้เข้ากัน โดยปริมาณสารช่วยให้เข้ากันที่ใช้คือ 1 3 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและสมบัติการต้านทานต่อแรงดัดของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารช่วยให้เข้ากันเพิ่มขึ้นและคงที่เมื่อสารช่วยให้เข้ากันมีปริมาณมากกว่า 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีประสิทธิภาพมากกว่าออกซิไดซ์พอลิเอทิลีนในการปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิท เนื่องจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีพันธะยึดเหนี่ยว (Interfacial Bonding) ที่แข็งแรงกว่าออกซิไดซ์พอลิเอทิลีน

Pracella และคณะ (2006) ศึกษาผลของไกลซิดิลเมทาคริเลทกราฟท์พอลิโพรพิลีน (Glycidyl methacrylate grafted polypropylene) ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยกัญชง (Hemp fiber) และพอลิโพรพิลีน ปริมาณเส้นใยที่ใช้คือ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลทกราฟท์พอลิโพรพิลีนคือ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึงและการยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลง การใส่สารช่วยให้เข้ากันในพอลิเมอร์คอมโพสิทส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่าง

เส้นใยกัญชงและพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ นอกจากนี้พอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันมีการกระจายตัวของเส้นใยกัญชงในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ที่ดีกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ไม่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากัน

Lei และคณะ (2007) ศึกษาผลของปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride grafted polyethylene) ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยไม้และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ปริมาณเส้นใยที่ใช้คือ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนคือ 0 ถึง 2.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มอดูลัสแรงดึงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วเพิ่มขึ้นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใส่เส้นใยไม้ลงไปในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว แต่ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลงอย่างเห็นได้ชัด ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น และคงที่เมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนสูงกว่า 1.8 เปอร์เซ็นต์

Adhikary และคณะ (2008) ศึกษาผลของปริมาณผงไม้และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิโพรพิลีน (Maleic anhydride grafted polypropylene) ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยปริมาณของผงไม้ที่ใช้คือ 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ทำจากพอลิเมอร์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ทำจากพอลิเมอร์ที่ไม่ผ่านการใช้งานเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึงและแรงดัดลดลงในขณะที่มอดูลัสแรงดึงและมอดูลัสแรงดัดเพิ่มขึ้น การใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิโพรพิลีน (5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทอย่างมีนัยสำคัญที่ทุกปริมาณของผงไม้

2.4 การปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์

ในปัจจุบันพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่สารตัวเติมเซลลูโลสมีการใช้งานในหลายๆ ด้าน อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ติดไฟได้ง่าย โดยทั่วไปวิธีในการปรับปรุงความต้านทานการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทคือการใช้สารหน่วงไฟ (Flame retardant) เนื่องจากมีราคาถูกและให้สมบัติที่ดี

Jang และ Lee (2004) ศึกษาผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างกากตะกอนเยื่อกระดาษ (Paper sludge) และพอลิโพรพิลีนโดยใช้ไตรฟีนิลฟอสเฟต (Triphenyphosphate) เอทิลีนบิสเพนตะโบรโมไดฟีนิลเอเทน (Ethylenebispenta

bromodiphenylethane) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium hydroxide) และแอนติโมนีไตรออกไซด์ (Antimony trioxide) เป็นสารหน่วงไฟ พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างกากตะกอนเยื่อกระดาษและพอลิโพรพิลีนติดไฟได้ง่าย เมื่อมีการใส่สารหน่วงไฟ สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้น นอกจากนี้มีการศึกษาผลของการทำงานเสริมกัน (Synergistic effect) ระหว่างเอทิลีนบิสเพนตะโบรโมไดฟีนิลเอเทน 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์และแอนติโมนีไตรออกไซด์ 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์ พบการทำงานเสริมกันของสารหน่วงไฟทั้งสองชนิดในการเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิท

Sain และคณะ (2004) ศึกษาผลของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ บอริกแอซิด (Boric acid) และซิงค์บอเรท (Zinc borate) ต่อสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่าง ผงไม้และพอลิโพรพิลีน โดยปริมาณแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้คือ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทอย่างมีนัยสำคัญเมื่อแทนที่แมกนิเซียมไฮดรอกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยบอริกแอซิดและซิงค์บอเรท ไม่พบการทำงานแบบเสริมกันของสารหน่วงไฟ นอกจากนี้ ยังพบว่าสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงเมื่อมีการใส่สารหน่วงไฟ

Abu Bakar และคณะ (2009) ศึกษาผลของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate) ต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิโพรพิลีน โดยปริมาณสารหน่วงไฟที่ใช้คือ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อใส่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต ความเสถียรต่อความร้อน (Thermal stability) และปริมาณเถ้า (Char residue) ของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิท

Suppakarn และ Jarukumjorn (2009) ศึกษาผลของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และซิงค์บอเรทต่อสมบัติการต้านทานการติดไฟและสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และพอลิโพรพิลีน โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิโพรพิลีนเป็นสารช่วยให้เข้ากัน เมื่อมีการใส่สารหน่วงไฟ อัตราการเผาไหม้ (Burning rate) ของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงในขณะที่ความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ลดอัตราการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิทได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าซิงค์บอเรท เมื่อมีการใช้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์รวมกันกับซิงค์บอเรทไม่พบผลของการทำงานเสริมกันระหว่างสารหน่วงไฟทั้งสองชนิด จากสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิทพบการกระจายตัวที่ดีของสารหน่วงไฟและเส้นใยป่านศรนารายณ์ในพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนคอมโพสิททั้งหมดมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำกว่าพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้การใส่แมกนีเซียมไฮดร

อกไซด์รวมกันกับซิงค์บอเรทไม่ส่งผลในทางลบต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และพอลิโพรพิลีน

Jeencham และคณะ (2010) ศึกษาผลของการรวมกันของสารหน่วงไฟต่อสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟและสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และพอลิโพรพิลีน โดยใช้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและซิงค์บอเรทเป็นสารหน่วงไฟ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและซิงค์บอเรท การรวมกันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและซิงค์บอเรทเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิท พอลิเมอร์คอมโพสิทที่มี 30 ส่วนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท และ 10 ส่วนของซิงค์บอเรทในหนึ่งร้อยของพอลิเมอร์คอมโพสิทส่วนแสดงสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟที่ดีที่สุด

Kurt และ Mengeloglu (2011) ศึกษาการทำงานเสริมกันระหว่างแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและซิงค์บอเรทต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิโพรพิลีน โดยปริมาณสารหน่วงไฟที่ใช้คือ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้เมื่อมีการแทนที่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยซิงค์บอเรท พบว่าสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ ดังนั้นแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและซิงค์บอเรทมีการทำงานแบบเสริมกันในพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิโพรพิลีน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วัสดุและการทดลอง

3.1 วัสดุ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วจากโรงงานรีไซเคิลท้องถิ่น ผงขี้เลื่อยอินเดียนวอลนัท (Albizia lebbeck Benth) ได้รับจากโรงเลื่อยหัวทะเล จังหวัดนครราชสีมา โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Carlo Erba) จากบริษัทอิตัลมาร์ ประเทศไทย จำกัด มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน (Fusabond®E MB100D, DuPont) ได้รับจากบริษัทเคมิคอล อินโนเวชั่น จำกัด อะลูมิเนียมไตรไฮเดรท (APYRAL® 40CD, Nabaltec, เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.3 ไมโครเมตร) ได้รับจากบริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด และซิงค์บอเรท (Firebrake® ZB, Rio Tinto Mineral) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 9 ไมโครเมตร) จากบริษัทโกลบอล คอนเน็คชั่นส์ จำกัด (มหาชน)

3.2 การทดลอง

3.2.1 การเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ขวดนมพาสเจอไรซ์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ทำความสะอาดและบดด้วยเครื่องบด (Retsch)

3.2.2 การเตรียมผงขี้เลื่อย

ผงขี้เลื่อยร่อนด้วยตะแกรงขนาด 40 เมซ (Mesh) และอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เรียกผงขี้เลื่อยนี้ว่า ผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Untreated sawdust, UT) ผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการดัดแปรบางส่วนถูกนำไปดัดแปรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เรียกผงขี้เลื่อยนี้ว่า ผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์ (Alkali treated sawdust, AT)

3.2.3 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิท

พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการดัดแปรหรือผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว เตรียมที่ปริมาณผงขี้เลื่อย 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์คอมโพสิทถูกผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (Barbender, DSE 35/17D) โดยใช้อุณหภูมิ 175 180 185 และ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 20 รอบต่อนาที ชิ้นงานทดสอบขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Labtech, LP20-B) จากสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ และสมบัติทางความร้อน พอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีสมบัติที่ดีที่สุด เลือกไปศึกษาผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิท

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อะลูมิเนียมไตรไฮเดรทใช้เป็นสารหน่วงไฟสำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทที่ใช้คือ 10 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท พอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ และสมบัติทางความร้อนที่ดีที่สุดจะนำไปศึกษาผลของการรวมกันของสารหน่วงไฟต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิท

ผลของการรวมกันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรทต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิทศึกษา โดยอัตราส่วนของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่อซิงค์บอเรทคือ 2 ต่อ 1 1 ต่อ 1 และ 1 ต่อ 2 พอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ และสมบัติทางความร้อนที่ดีที่สุดถูกเลือกไปศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิท นอกจากนี้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากัน ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนคือ 1 3 และ 5 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท

3.2.4 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิท

3.2.4.1 สมบัติทางกล

สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วถูกทดสอบตาม ASTM D638 โดยใช้เครื่อง Universal testing machine (Instron, 5565) โดยใช้เซลล์วัดแรง 5 กิโลนิวตัน ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที และความยาวของเกท 115 มิลลิเมตร

สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วถูกทดสอบตาม ASTM D256 โดยใช้เครื่อง Impact tester (Atlas, BPI) โดยใช้น้ำหนัก 2.7 จูล

3.2.4.2 สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ

อัตราการเผาไหม้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้ว ศึกษาโดยวิธีการทดสอบการเผาไหม้ในแนวนอนตาม ASTM D635 ชิ้นงานทดสอบจับทางแนวนอน จุดที่ไฟปลายด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบ บันทึกเวลาที่ไฟลามจากจุดอ้างอิงแรก (25 มิลลิเมตร จากปลายชิ้นทดสอบ) ถึงจุดอ้างอิงที่สอง (100 มิลลิเมตร จากปลายชิ้นทดสอบ) จากนั้นคำนวณอัตราการเผาไหม้โดยใช้สมการที่ 3.1

$$V = 60L/t \qquad (3.1)$$

โดยที่ V คือ อัตราการเผาไหม้ (มิลลิเมตรต่อนาที) L คือระยะการเผาไหม้ (มิลลิเมตร) t คือ เวลาการเผาไหม้ (วินาที)

3.2.4.3 สมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วศึกษาโดยใช้เครื่อง Thermo gravimetric analyzer (Perkin Elmer, STD 2960) ที่อุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 800 องศาเซลเซียส อัตราการใช้ความร้อนคือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที การเสื่อมสภาพทางความร้อนของตัวอย่างทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน น้ำหนักของตัวอย่างอยู่ระหว่าง 10 ถึง 15 มิลลิกรัม

3.2.4.4 สัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่แตกหักด้วยแรงดึง (Tensile fracture surface) ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วถูกศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (JEOL JCM-6010) ที่ 10 กิโลโวลต์ ชิ้นทดสอบถูกเคลือบด้วยทองก่อนศึกษา

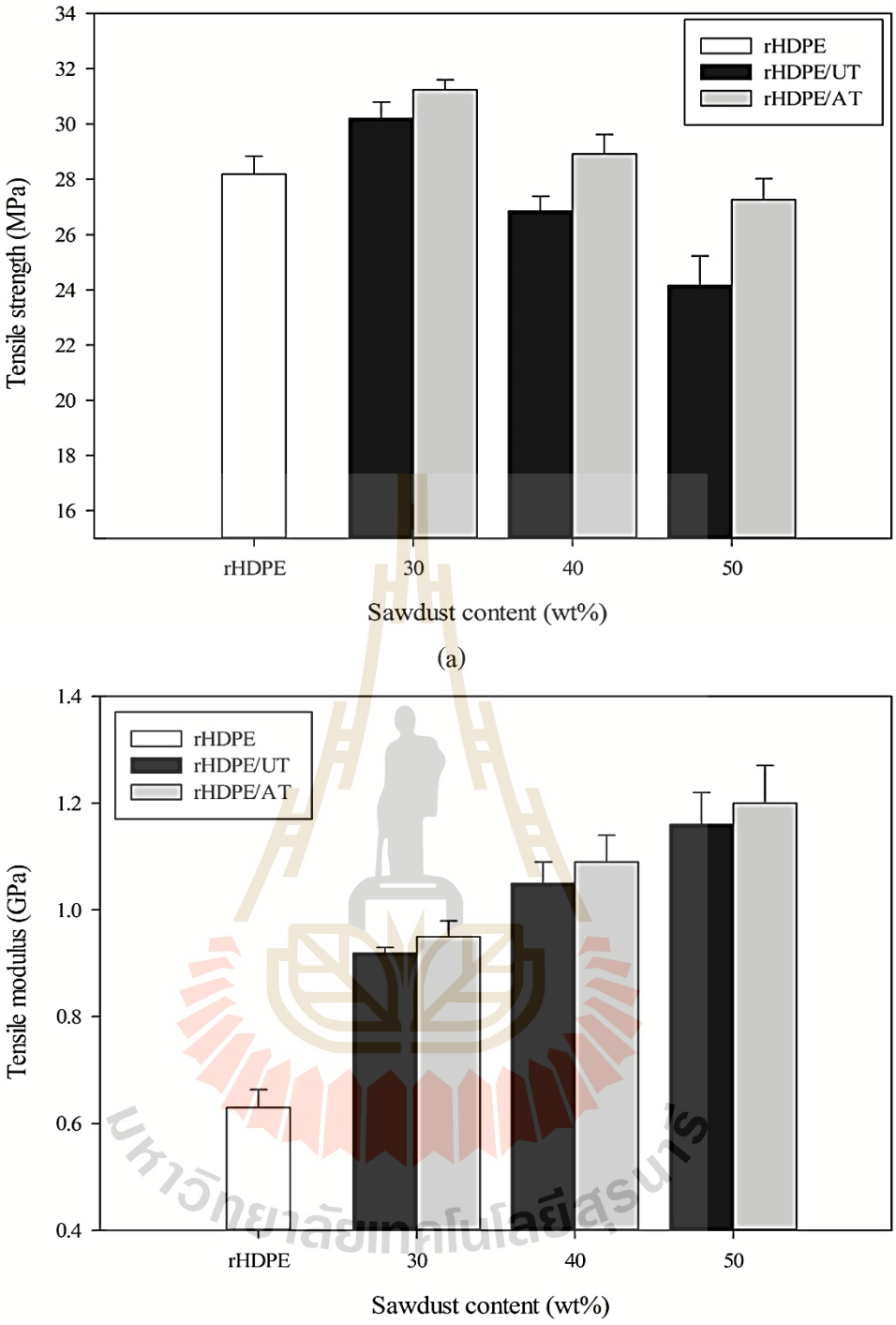
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

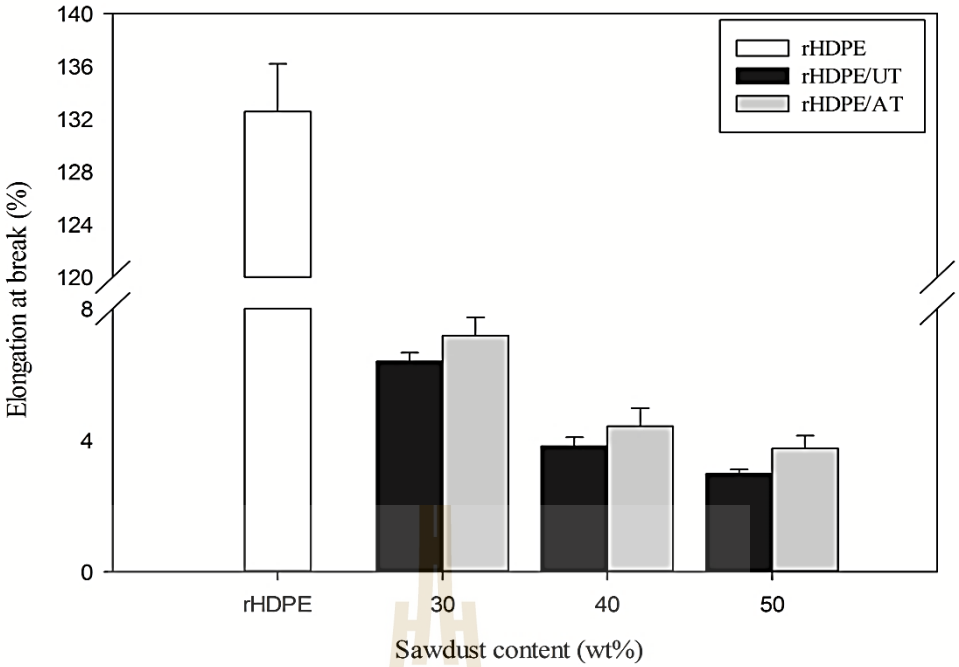
4.1 ผลของปริมาณผงขี้เลื่อยและการดัดแปรอัลคาไลน์ต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

4.1.1 สมบัติทางกล

สมบัติการต้านทานต่อแรงดึง (Tensile properties) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้ว แสดงในตาราง 4.1 เมื่อมีการใส่ผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการดัดแปร ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และมอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) เพิ่มขึ้น แต่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ลดลง แสดงให้เห็นว่าผงขี้เลื่อยเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในระบบนี้ (Danyadi และคณะ, 2007) นอกจากนี้ ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงเมื่อปริมาณผงขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูป 4.1 เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนเมทริกซ์ (Atuanya และคณะ, 2011) จากรูปที่ 4.2 มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น แสดงถึงความสามารถของผงขี้เลื่อยในการเพิ่มความแข็ง (Stiffness) ของพอลิเมอร์คอมโพสิท (Atuanya และคณะ, 2011) การลดลงของความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิทเมื่อปริมาณผงขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.3 เพราะการมีผงขี้เลื่อยส่งผลให้เมทริกซ์สูญเสียความสามารถในการเสียสภาพแบบยืดหยุ่น(Elastic deformation) (Li และคณะ, 2004) ความต้านทานต่อแรงดึง มอดูลัสแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่มีการปรับปรุงพื้นผิวชนิดอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดที่อินเตอร์เฟสระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Joseph และคณะ, 1996; Ikhlef และคณะ, 2012)



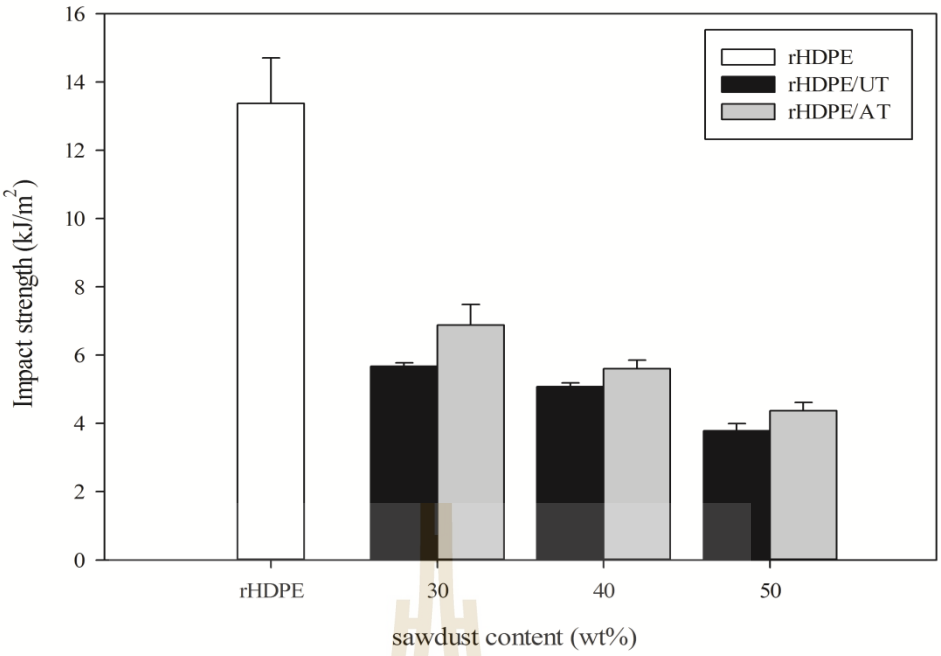
รูปที่ 4.1 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (b) มอดูลัสแรงดึง และ (c) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด



(c)

รูปที่ 4.1 (ต่อ) สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (b) มอดูลัสแรงดึง และ (c) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด

ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว แสดงในตาราง 4.1 พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิททั้งหมดแสดงความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว เพราะการใส่ผงขี้เลื่อยก่อให้เกิดความเข้มของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งต้องการพลังงานน้อยกว่าในการแตกหัก จากรูปที่ 4.2 เมื่อปริมาณผงขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการรวมตัวของสารตัวเติม (Filler agglomeration) (Yao และคณะ, 2008) ความต้านทานต่อแรงกระแทกในพอลิเมอร์คอมโพสิทที่เตรียมโดยผงขี้เลื่อยที่มีการปรับปรุงพื้นผิวชนิดอัลคาไลน์มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทที่เตรียมโดยผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการดัดแปรเนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดที่อินเตอร์เฟสระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว



รูปที่ 4.2 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ

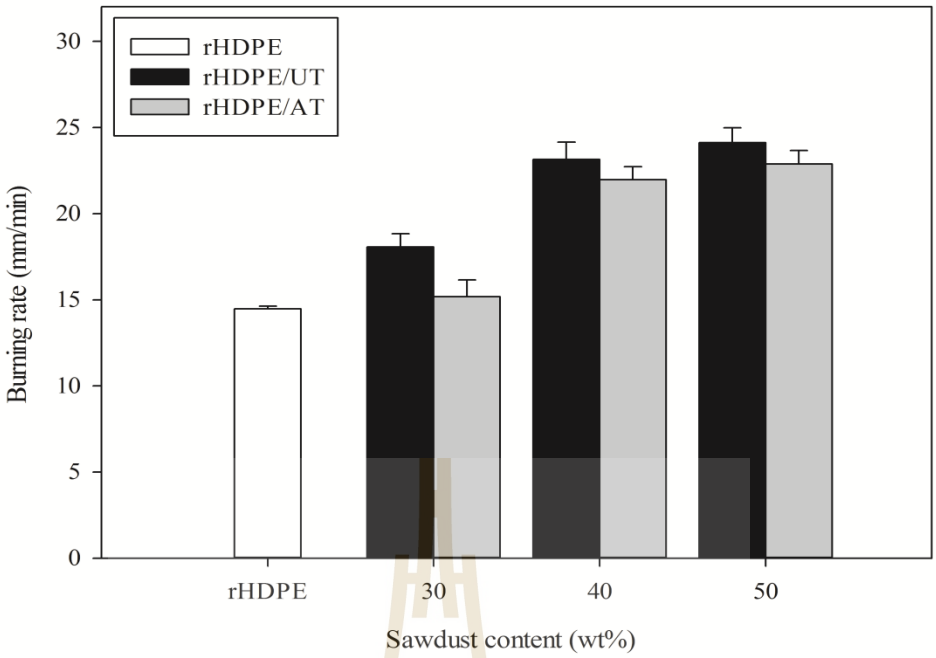
4.1.2 สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ

อัตราการเผาไหม้ (Burning rate) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว แสดงในตารางที่ 4.2 พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วมีอัตราการเผาไหม้สูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว และอัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วมีความไวต่อไฟ (Li และคณะ, 2004) พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยมีการปรับปรุงพื้นผิวชนิดอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วแสดงอัตราการเผาไหม้ต่ำกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วเล็กน้อย เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของเถ้า (Char residue) ของพอลิเมอร์คอมโพสิท (Chapple and Anadjiwala, 2012)

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ

Sample name	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)	Impact strength (kJ/m^2)
rHDPE	28.19±0.65	0.63±0.03	132.57±3.63	13.68±0.88
rHDPE/30UT	30.21±0.59	0.91±0.01	6.40±0.26	5.67±0.10
rHDPE/40UT	26.86±0.53	1.05±0.04	3.82±0.27	5.08±0.10
rHDPE/50UT	24.16±1.07	1.17±0.07	2.98±0.13	3.78±0.21
rHDPE/30AT	31.24±0.36	0.95±0.03	7.18±0.55	6.88±0.61
rHDPE/40AT	28.92±0.70	1.09±0.04	4.42±0.55	5.60±0.25
rHDPE/50AT	27.27±0.76	1.20±0.07	3.75±0.39	4.37±0.24

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.3 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ

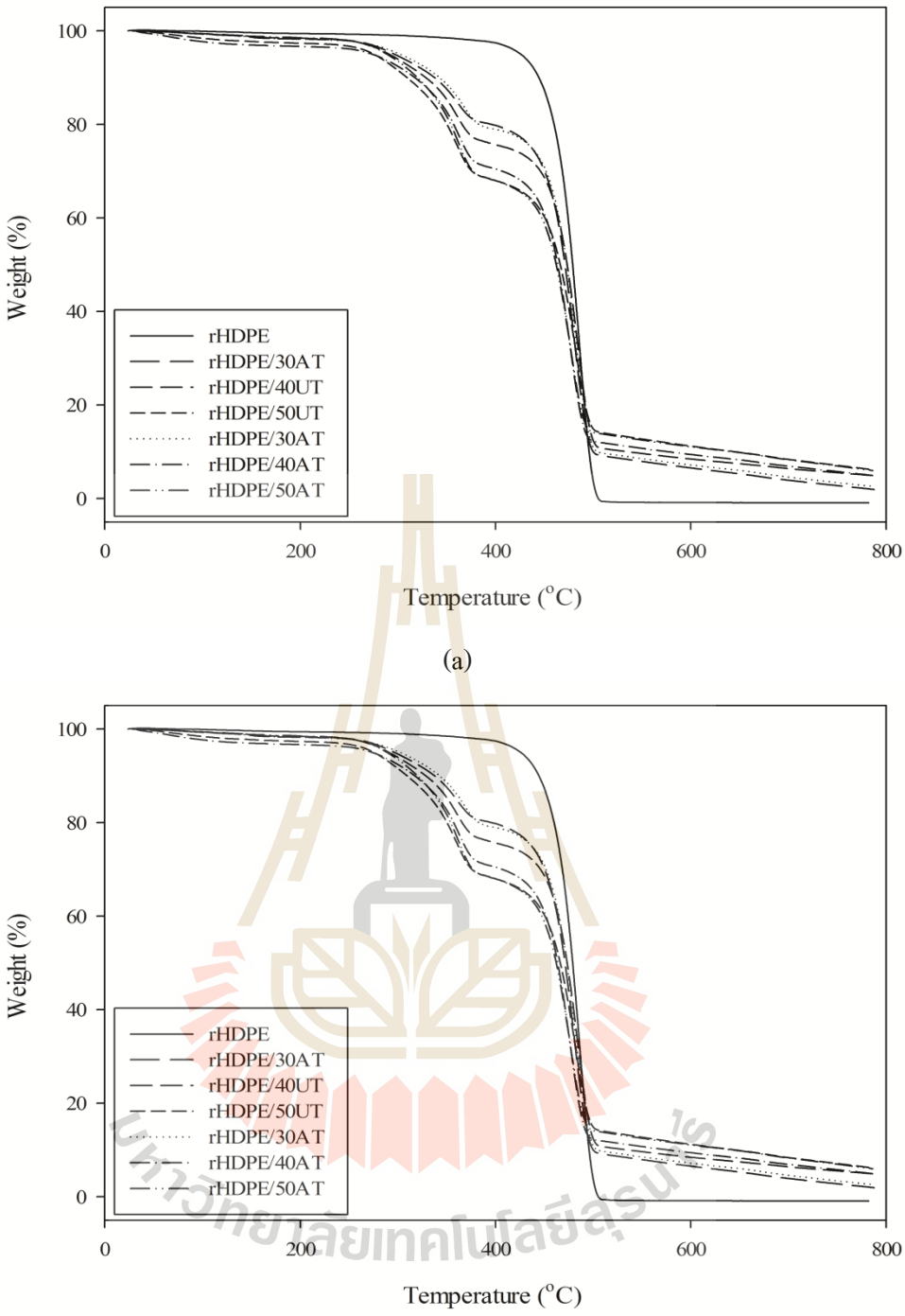
ตารางที่ 4.2 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ

Sample name	**Burning rate (mm/min)**
rHDPE	15.27±1.38
rHDPE/30UT	21.58±0.61
rHDPE/40UT	24.38±0.30
rHDPE/50UT	26.00±0.86
rHDPE/30AT	18.07±0.77
rHDPE/40AT	22.59±0.29
rHDPE/50AT	23.67±0.42

4.1.3 สมบัติทางความร้อน

กราฟ TGA และ DTGA ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว แสดงในรูปที่ 4.4 อุณหภูมิการเสื่อมสภาพทางความร้อนและปริมาณเถ้าของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการเสื่อมสภาพทางความร้อน (Thermal decomposition temperature) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและผงขี้เลื่อยคือ 477.67 และ 344.68 องศาเซลเซียสตามลำดับ พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (Weight loss step) สองลำดับ เนื่องจากการเสื่อมสภาพของผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วตามลำดับ อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (Weight loss temperature) ของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงเมื่อปริมาณผงขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการผลิตอนุมูลอิสระ เมื่อมีการเสื่อมสภาพของผงขี้เลื่อยและเร่งปฏิกริยาการเสื่อมสภาพทางความร้อน (Thermal decomposition) ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Li และคณะ, 2004) การดัดแปรอัลคาไลน์เพิ่มอุณหภูมิการเสื่อมสภาพของผงขี้เลื่อยของพอลิเมอร์คอมโพสิท เนื่องจากมีการกำจัดส่วนประกอบที่เสื่อมสภาพที่อุณหภูมิต่ำของผงขี้เลื่อยระหว่างการดัดแปรอัลคาไลน์ (Kaewkuk และคณะ, 2010) นอกจากนี้ ปริมาณเถ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนยังมีค่าสูงกว่าปริมาณเถ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ทุกปริมาณของผงขี้เลื่อย เนื่องจากปริมาณเซลลูโลสของผงขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นเมื่อมีการดัดแปรด้วยอัลคาไลน์ (Ndazi et al., 2001)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.4 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ (a) TGA และ (b) DTGA

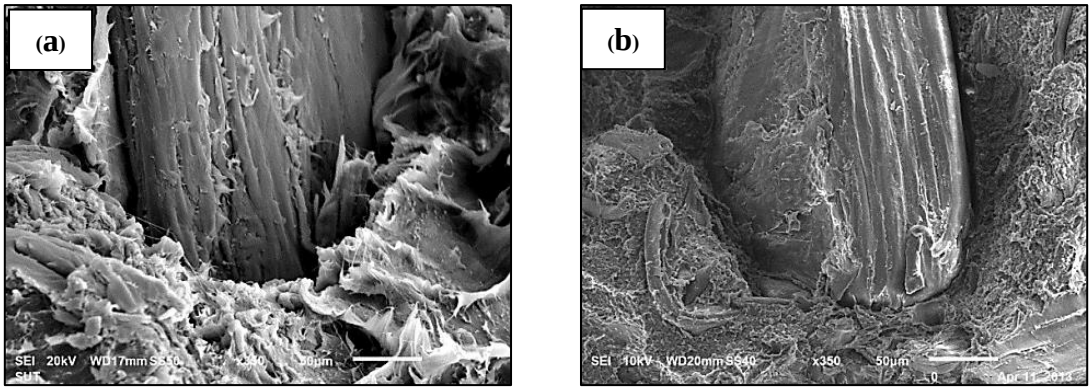
ตารางที่ 4.3 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ

Sample name	1st weight loss temperature (°C)	2nd weight loss temperature (°C)	Residue (%)
rHDPE	-	477.67	0
rHDPE/30UT	345.17	475.50	5.11
rHDPE/40UT	344.50	474.50	7.57
rHDPE/50UT	343.83	473.83	8.60
rHDPE/30AT	353.83	476.33	6.71
rHDPE/40AT	352.67	475.85	8.32
rHDPE/50AT	351.50	474.67	8.85

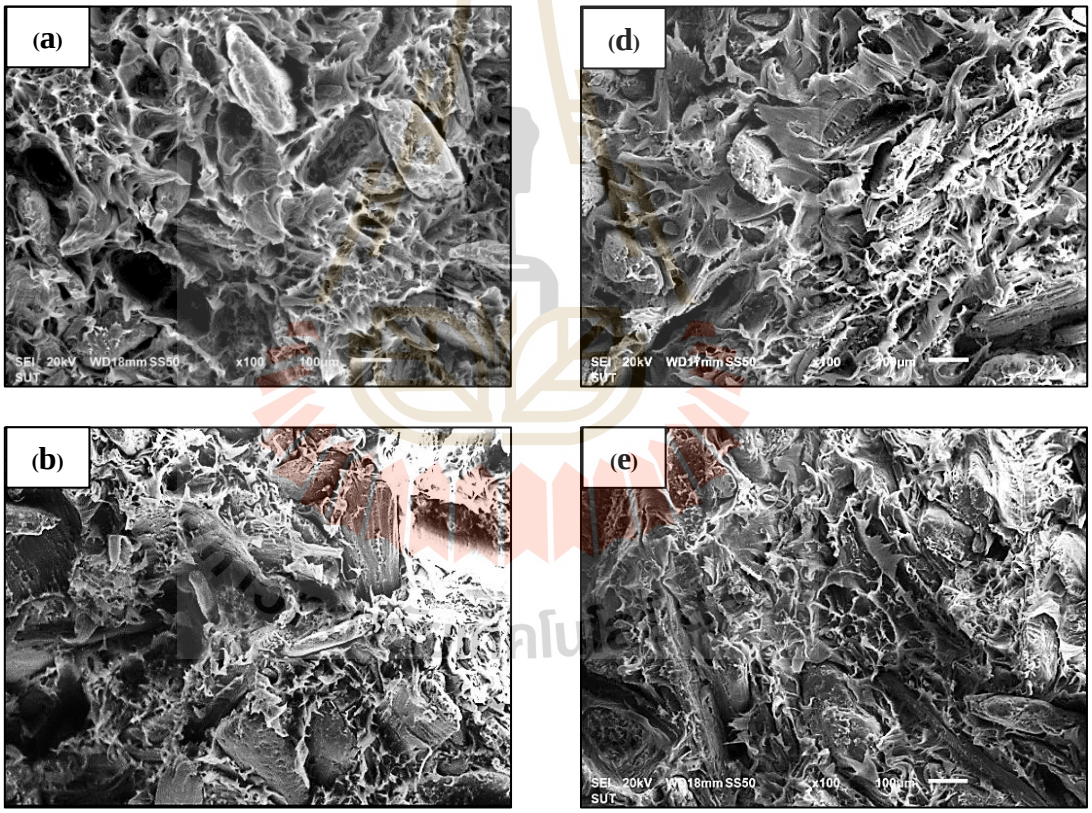
4.1.4 สัณฐานวิทยา

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักจากแรงดึง (Tensile fracture surface) ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีปริมาณผงขี้เลื่อย 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.5 พบช่องว่างระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วและผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการดัดแปรแสดงถึงความไม่เข้ากันระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (a) การดัดแปรอัลคาไลน์เพิ่มการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (b) ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นจากการดัดแปรอัลคาไลน์

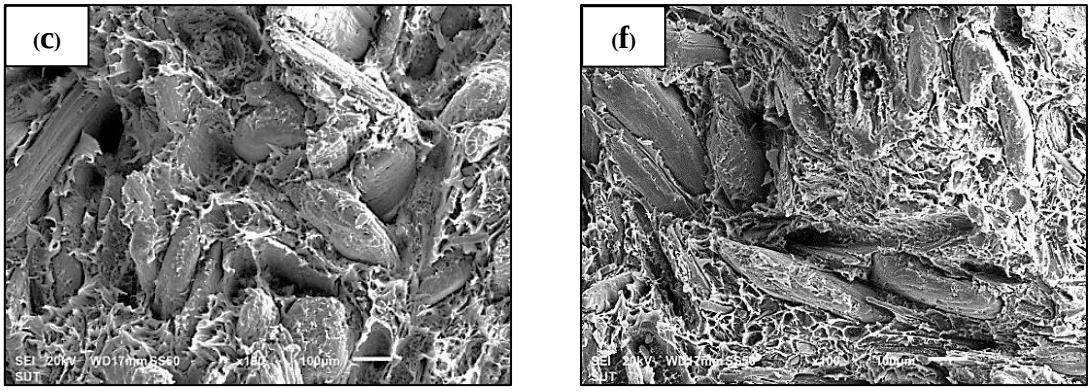
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักจากแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.6 จากรูปที่ 4.6 (a)-(c) พบรูซึ่งเกิดขึ้นภายหลังการหลุดออกของผงขี้เลื่อยจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว และเมื่อปริมาณผงขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นพบการรวมตัวกันของผงขี้เลื่อย ในทางกลับกัน พบการยึดติดที่บริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (d)-(f) นอกจากนี้ ไม่พบการรวมตัวกันของผงขี้เลื่อยในพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ ที่กำลังขยาย 350 เท่า (a) rHDPE/30UT และ (b) rHDPE/30AT



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) rHDPE/30UT (b) rHDPE/40UT (c) rHDPE/50UT (d) rHDPE/30AT (e) rHDPE/40AT และ (f) rHDPE/50AT



รูปที่ 4.6 (ต่อ) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) rHDPE/30UT (b) rHDPE/40UT (c) rHDPE/50UT (d) rHDPE/30AT (e) rHDPE/40AT และ (f) rHDPE/50AT

จากสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟและสมบัติทางความร้อนเลือก พอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีปริมาณผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไปศึกษาผลของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

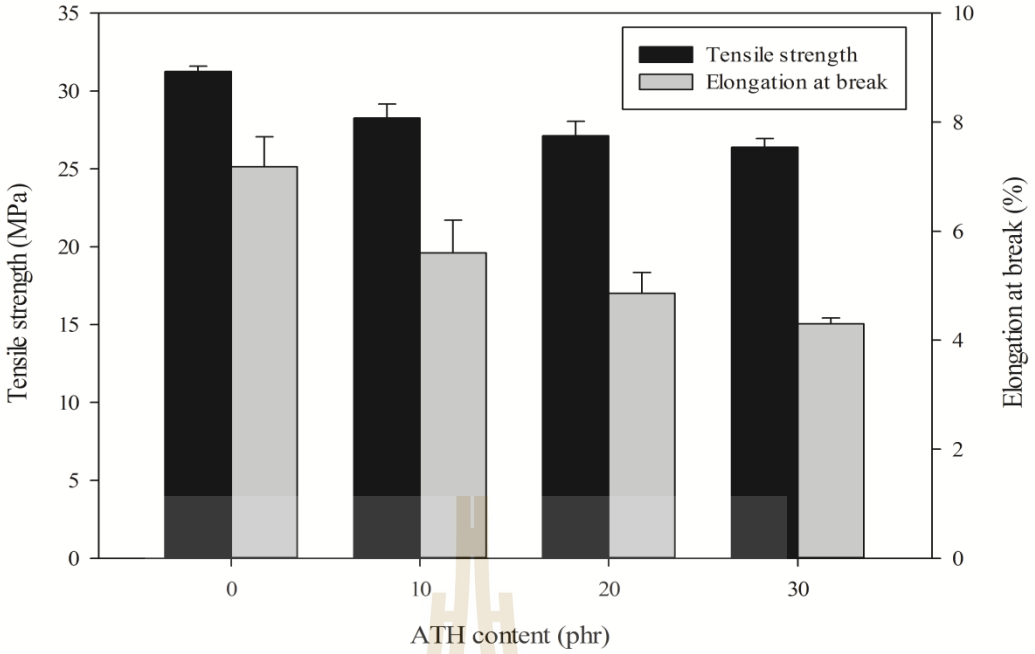
4.2 ผลของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

4.2.1 สมบัติทางกล

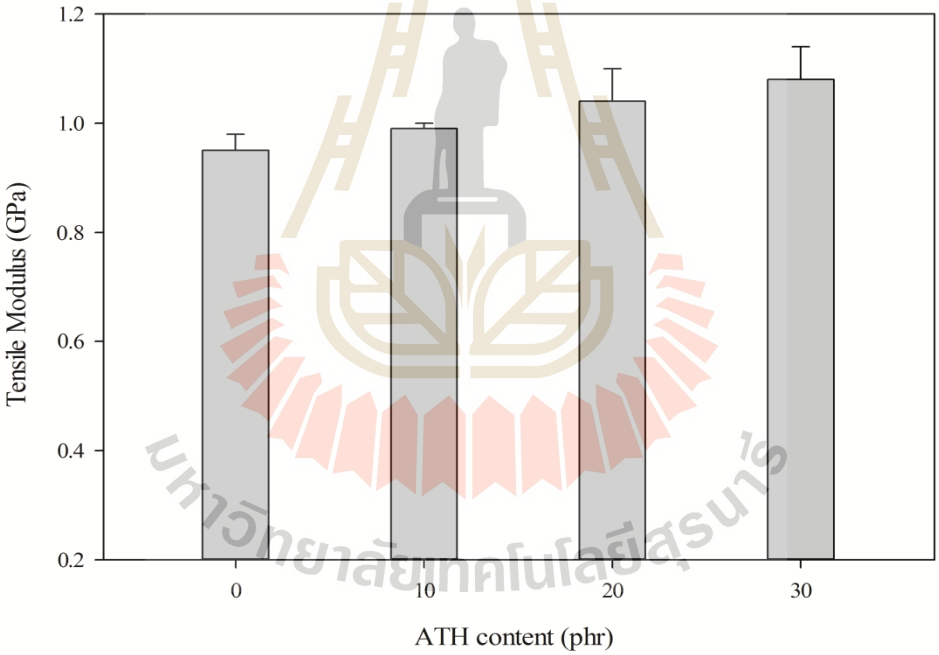
สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.4 ความต้านทานต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงเมื่อปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (a) เนื่องจากการรวมกันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทในพอลิเมอร์เมทริกซ์และการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสที่ไม่ดีระหว่างอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (b) Ramazani และคณะ (2008) พบว่าเมื่อปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทเพิ่มขึ้นความต้านทานต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิทลดลง ในขณะที่มอดูลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น

ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว แสดงในรูปที่ 4.8 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทเพิ่มขึ้น เนื่องจากการรวมกันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทในพอลิเมอร์เมทริกซ์และการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสที่ไม่ดีระหว่างอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ก่อให้เกิดความเข้มของความเค้น ซึ่งต้องการพลังงานน้อยกว่าในการแตกหัก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

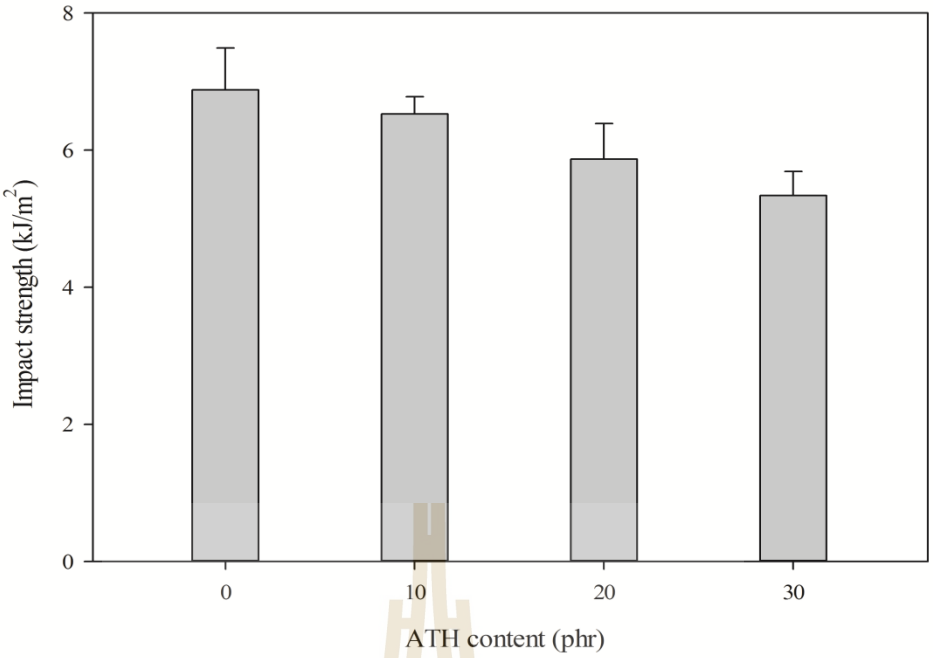


(a)



(b)

รูปที่ 4.7 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ (a) ความต้านทานต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และ (b) มอดูลัสแรงดึง



รูปที่ 4.8 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ

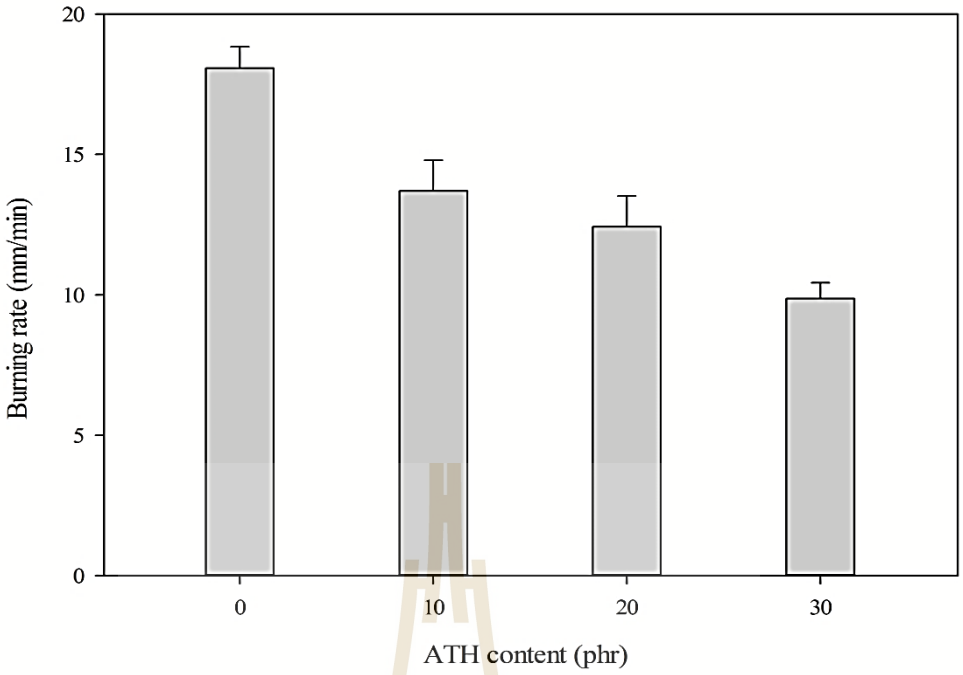
4.2.2 สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ

อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว แสดงในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.5 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิท เนื่องจากอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทปลดปล่อยน้ำและสร้างชั้นป้องกันพอลิเมอร์คอมโพสิทจากไฟและออกซิเจน (Norzali และคณะ 2011)

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ

Sample name	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)	Impact strength (kJ/m^2)
rHDPE/30AT	31.24±0.36	0.95±0.03	7.18±0.55	6.88±0.61
10ATH	28.26±0.90	0.99±0.01	5.60±0.60	6.53±0.25
20ATH	27.12±0.92	1.04±0.06	4.86±0.38	5.87±0.52
30ATH	26.39±0.54	1.08±0.06	4.30±0.10	5.34±0.11

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.9 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ

ตารางที่ 4.5 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ

Sample name	**Burning rate (mm/min)**
rHDPE/30AT	18.07±0.77
10ATH	17.88±0.90
20ATH	13.36±1.83
30ATH	11.09±0.84

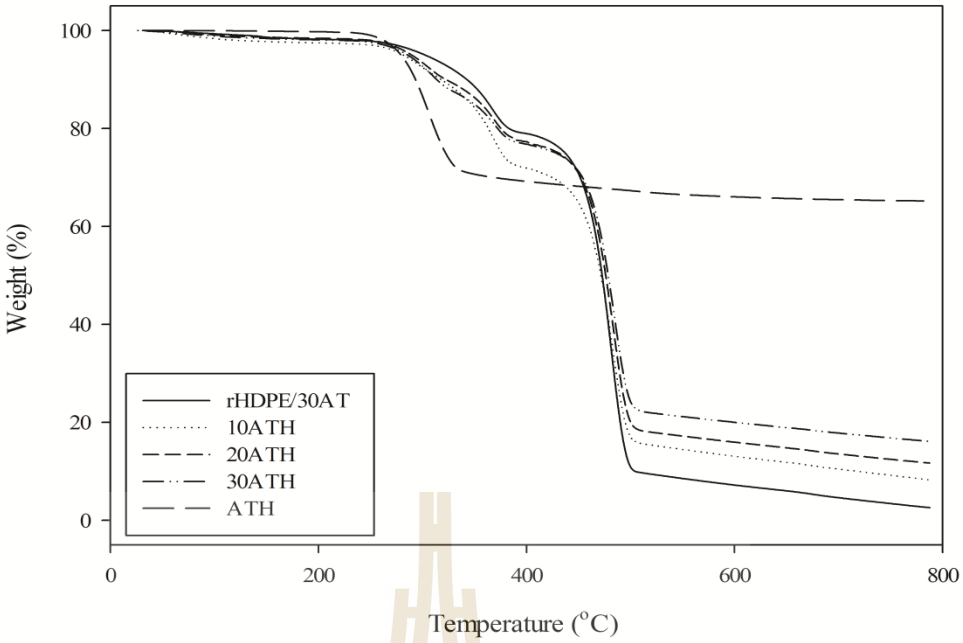
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2.3 สมบัติทางความร้อน

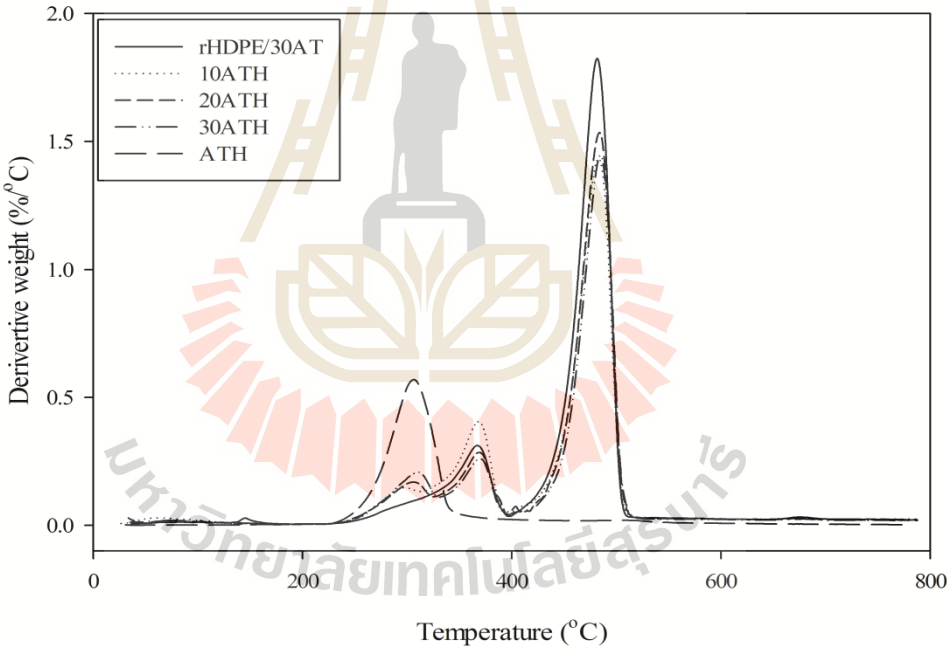
กราฟ TGA และ DTGA ของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.10 อุณหภูมิการเสื่อมสภาพทางความร้อนและปริมาณเถ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.6 อลูมินัมไตรไฮเดรทมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหนึ่งลำดับที่อุณหภูมิ 291.67 องศาเซลเซียส ในระหว่างกระบวนการเสื่อมสภาพทางความร้อนอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทปลดปล่อยน้ำและมีปริมาณเถ้าสูง (Chen และคณะ , 1989) เมื่อใส่อะลูมิเนียมไตรไฮเดรทปริมาณ 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทในพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่าง ผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วพบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสามลำดับที่อุณหภูมิ 292.24 358.40 และ 477.01 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสื่อมสภาพทางความร้อนของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท ผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วตามลำดับ อุณหภูมิการเสื่อมสภาพทางความร้อนลำดับที่ 2 และ 3 ของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทเพิ่มขึ้น เนื่องจากอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทปลดปล่อยน้ำและสร้างชั้นป้องกันชะลอกระบวนการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิท (Ramazani และคณะ, 2008)

ตารางที่ 4.6 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ

Sample name	1st weight loss temperature (°C)	2nd weight loss temperature (°C)	3rd weight loss temperature (°C)	Residue (%)
rHDPE/30AT	-	353.83	476.33	6.71
10ATH	292.24	358.40	477.01	8.31
20ATH	292.32	359.57	477.90	11.70
30ATH	292.03	360.40	478.66	15.07
ATH	291.67	-	-	65.21



(a)

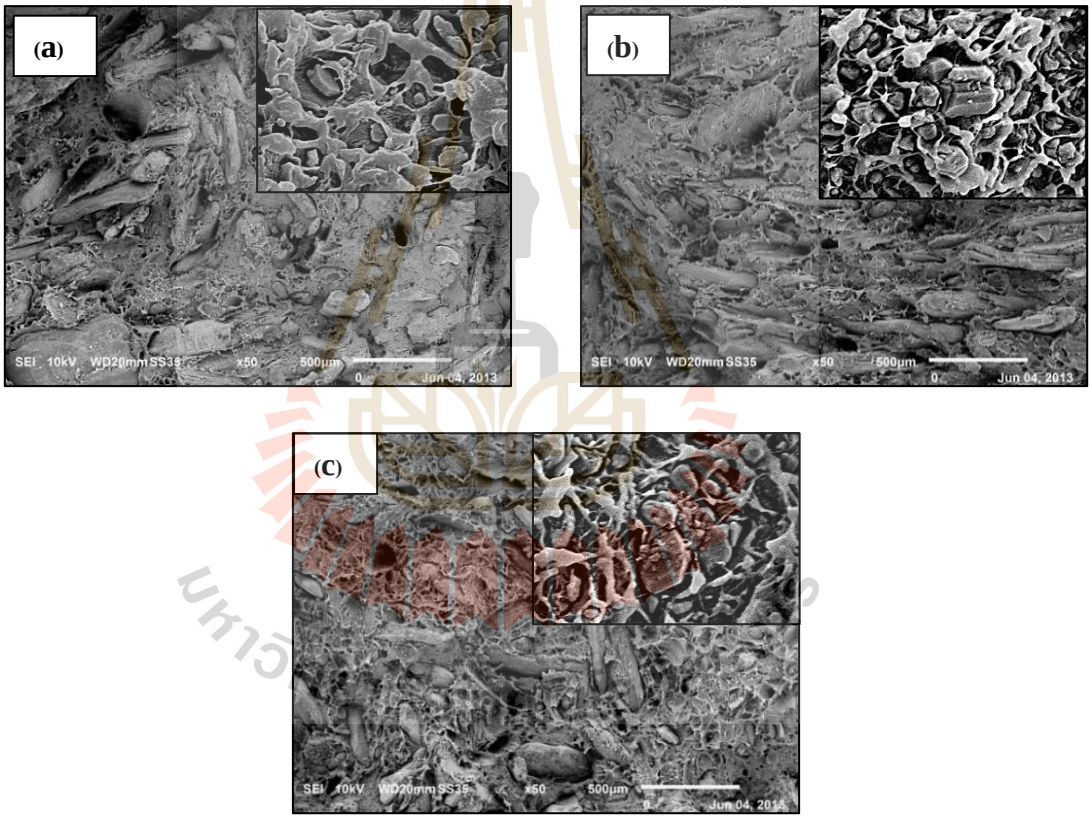


(b)

รูปที่ 4.10 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ (a) TGA และ (b) DTGA

4.2.4 สัณฐานวิทยา

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักจากแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.11 พบช่องว่างระหว่างอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ดังแสดงรูปที่ 4.11 (a) เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง นอกจากนี้ พบการรวมกลุ่มของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทเมื่อปริมาณอลูมินัมไตรไฮเดรทเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (b)-(c) ผลทางสัณฐานวิทยาสัมพันธ์กับสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิท



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่างๆ ที่กำลังขยาย 50 และ 2000 เท่า (a) 10ATH (b) 20ATH และ (c) 30ATH

จากสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อไฟและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ เลือกพอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทไปศึกษาผลของการรวมกันของสารหน่วงไฟต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

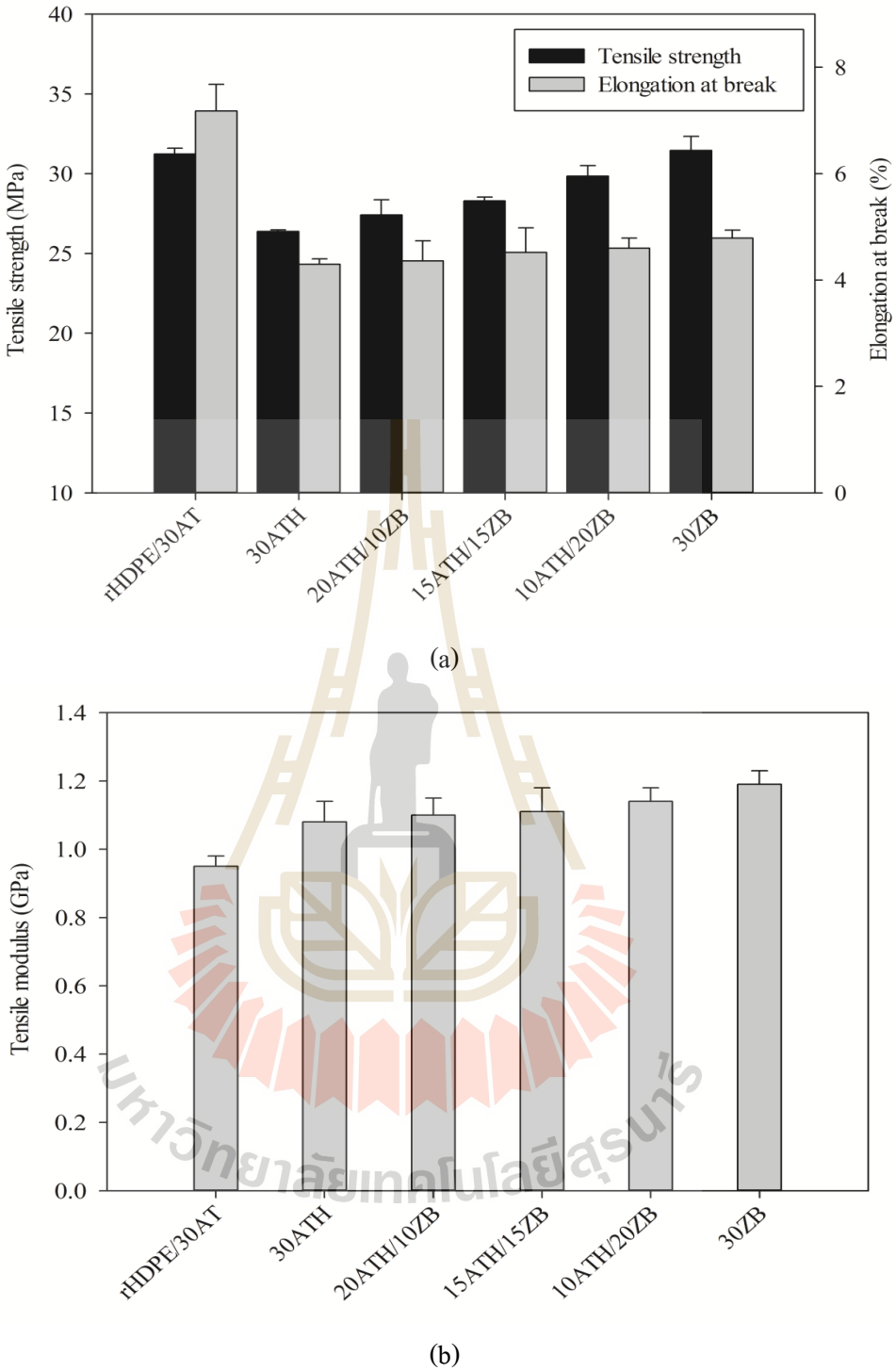
4.3 ผลของการรวมกันของสารหน่วงไฟต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

สารหน่วงไฟนิยมใช้เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างสารตัวเติมชนิดเซลลูโลสและพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามการเติมสารหน่วงไฟเพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทส่งผลให้สมบัติทางกลลดลง ประสิทธิภาพของสารหน่วงไฟสามารถปรับปรุงโดยการทำงานเสริมกัน การรวมกันของสารหน่วงไฟส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างสารตัวเติมไม้และพอลิเมอร์โดยไม่ส่งผลให้สมบัติทางกลลดลง (Garcia และคณะ, 2009; Kurt และ Mengeloglu, 2009; Bai และคณะ, 2014)

4.3.1 สมบัติทางกล

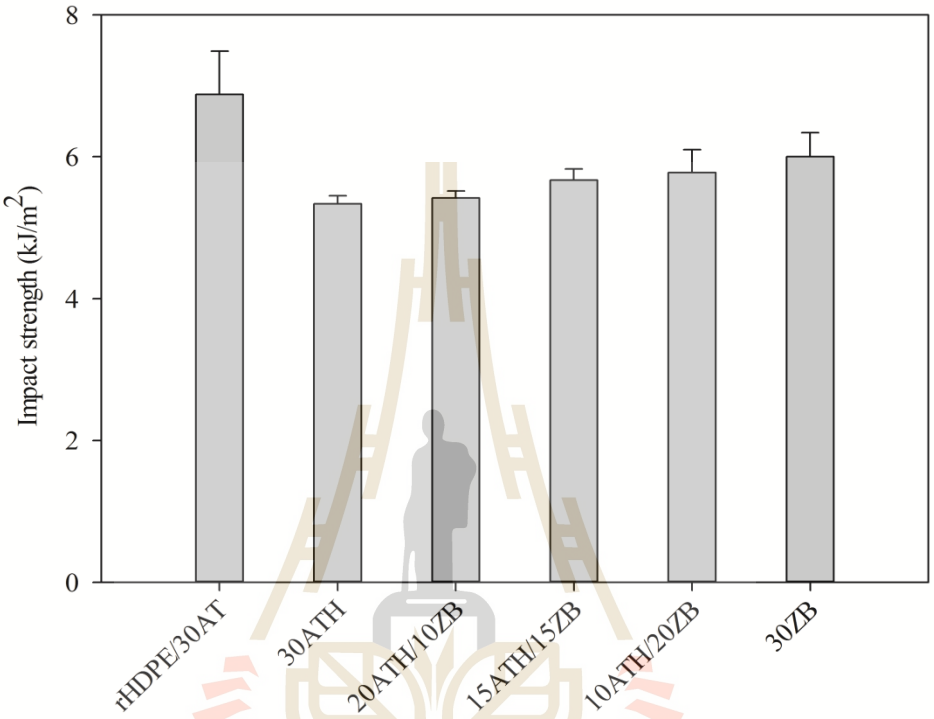
สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ แสดงในตารางที่ 4.7 เมื่อเติมอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทในพอลิเมอร์คอมโพสิท ความต้านทานต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลง แสดงในรูปที่ 4.12 (a) เนื่องจากการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสที่ไม่ดีระหว่างอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท แต่มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท ดังแสดงในรูป 4.12 (b)

การใส่การอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรท (Zinc borate) รวมกัน ที่อัตราส่วนของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรทที่ 2 ต่อ 1 (20ATH/10ZB) 1 ต่อ 1 (15ATH/15ZB) และ 1 ต่อ 2 (10ATH/20ZB) ในพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของ พอลิเมอร์คอมโพสิทเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่อะลูมิเนียมไตรไฮเดรท นอกจากนี้สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิงค์บอเรทในส่วนผสมของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรทเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่ซิงค์บอเรทแสดงสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด เพราะซิงค์บอเรทมีผิวหยาบกว่าอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทส่งผลให้เกิดการยึดติดทางกล (Mechanical interlocking) ระหว่างซิงค์บอเรทและพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Jeecham และคณะ, 2010)



รูปที่ 4.12 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่มีการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ (a) ความต้านทานต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และ (b) มอดูลัสแรงดึง

ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ แสดงในรูปที่ 4.13 พบการลดลงของความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วเมื่อมีการเติมสารหน่วงไฟ



รูปที่ 4.13 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ

Sample name	**Tensile strength (MPa)**	**Tensile modulus (GPa)**	**Elongation at break (%)**	**Impact strength (kJ/m^2)**
rHDPE/30AT	31.24±0.36	0.95±0.03	7.18±0.55	6.88±0.61
30ATH	26.39±0.54	1.08±0.06	4.30±0.10	5.34±0.11
20ATH/10ZB	27.41±0.96	1.10±0.05	4.36±0.38	5.42±0.10
15ATH/15ZB	28.29±0.24	1.11±0.07	4.49±0.46	5.67±0.16
10ATH/20ZB	29.85±0.66	1.14±0.04	4.56±0.19	5.78±0.32
30ZB	31.45±0.89	1.19±0.04	4.79±0.15	6.00±0.34

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

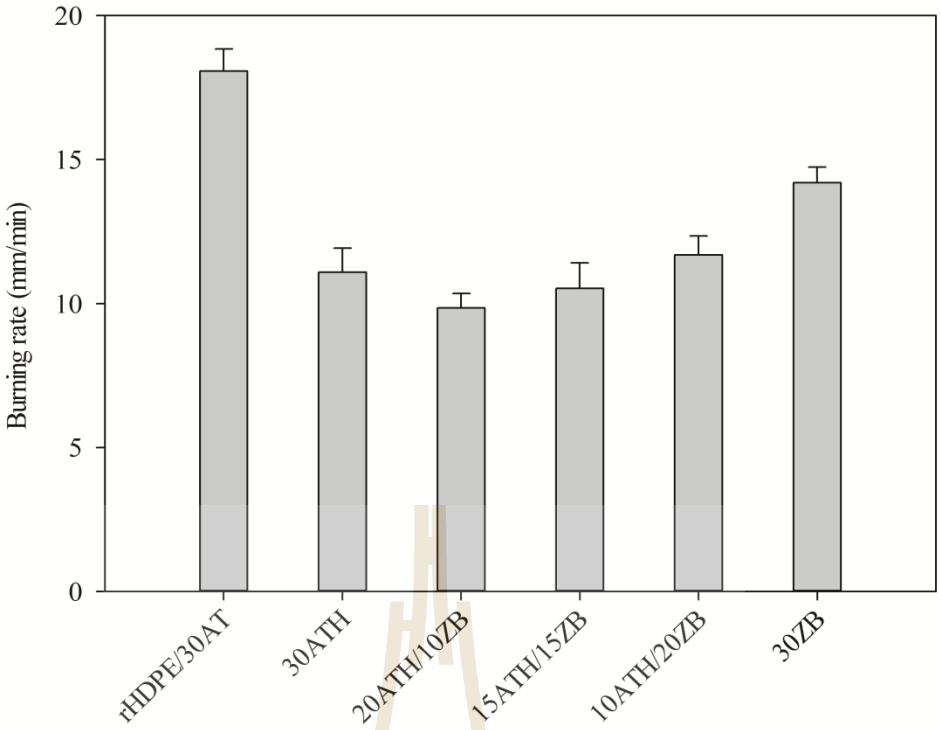
4.3.2 สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ

การเติมอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรทรวมกันในพอลิเมอร์คอมโพสิทส่งผลให้อัตราการเผาไหม้ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่อะลูมิเนียมไตรไฮเดรท ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.8 อะลูมิเนียมไตรไฮเดรทเสื่อมสภาพที่ช่วงอุณหภูมิ 220-240 องศาเซลเซียส ในระหว่างกระบวนการเสื่อมสภาพของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทปลดปล่อยน้ำและสร้างชั้นป้องกันขึ้นเพื่อป้องกันพอลิเมอร์คอมโพสิทจากไฟและออกซิเจน ที่ช่วงอุณหภูมิ 290-450 องศาเซลเซียส ซิงค์บอเรทเสื่อมสภาพ ปลดปล่อยน้ำและสร้างชั้นป้องกันแยกพอลิเมอร์คอมโพสิทจากไฟและออกซิเจนด้วยเช่นกัน (Formicola และคณะ, 2009) Ibibiko (2013) รายงานว่าการรวมกันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรทแสดงการทำงานเสริมกันในการเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่ 10ATH/20ZB มีอัตราการเผาไหม้สูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่ 20ATH/10ZB และ 15ATH/15ZB เนื่องจากความเปราะของชั้นป้องกันจากเถ้าของสารหน่วงไฟ จึงส่งผลให้ชั้นป้องกันเกิดการแตกหักในระหว่างการเผาไหม้ (Ibibiko, 2013) Ning และ Guo (2000) รายงานว่าอัตราการเผาไหม้ของพอลิไวนิลคลอไรด์ลดลงเมื่อใส่อะลูมิเนียมไตรไฮเดรทรวมกันกับซิงค์บอเรท นอกจากนี้พอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่ซิงค์บอเรทมีอัตราการเผาไหม้สูงที่สุด แสดงว่าซิงค์บอเรทเป็นสารหน่วงไฟที่ไม่ดีสำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการคัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

จากผลการทดลอง เห็นได้ว่าการรวมกันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรทแสดงการทำงานเสริมกันต่อสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่าง ผงขี้เลื่อยที่ผ่านการคัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่อัตราส่วนอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทต่อซิงค์บอเรท 2 ต่อ 1 และ 1 ต่อ 1 นอกจากนี้พอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่ 20ATH/10ZB แสดงอัตราการเผาไหม้ต่ำที่สุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.14 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ

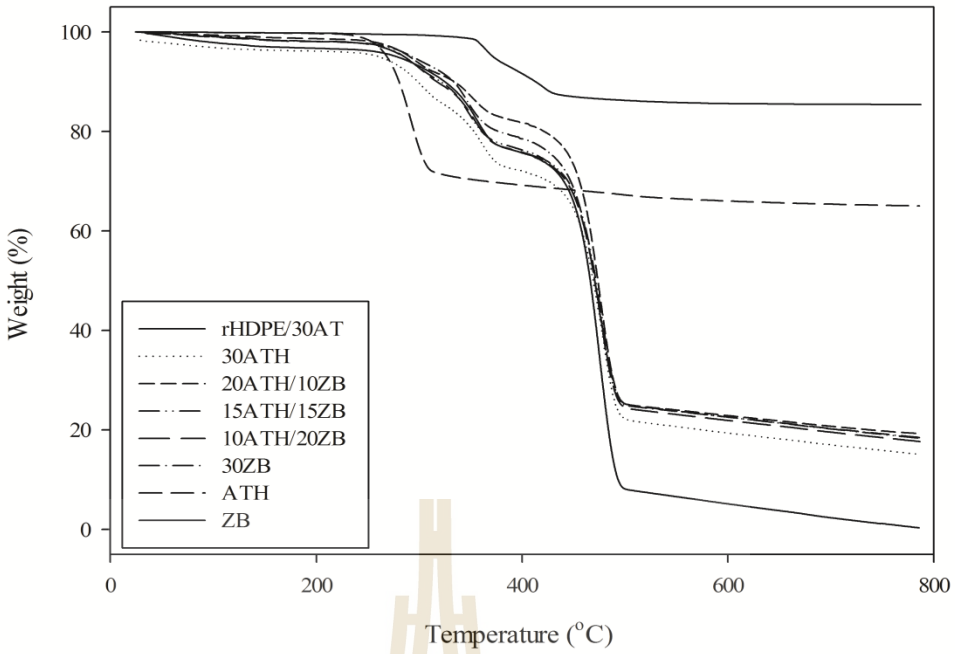
ตารางที่ 4.8 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ

Sample name	**Burning rate (mm/min)**
rHDPE/30AT	18.07±0.77
30ATH	11.09±0.84
20ATH/10ZB	9.85±0.50
15ATH/15ZB	10.53±0.88
10ATH/20ZB	11.69±0.66
30ZB	14.20±0.54

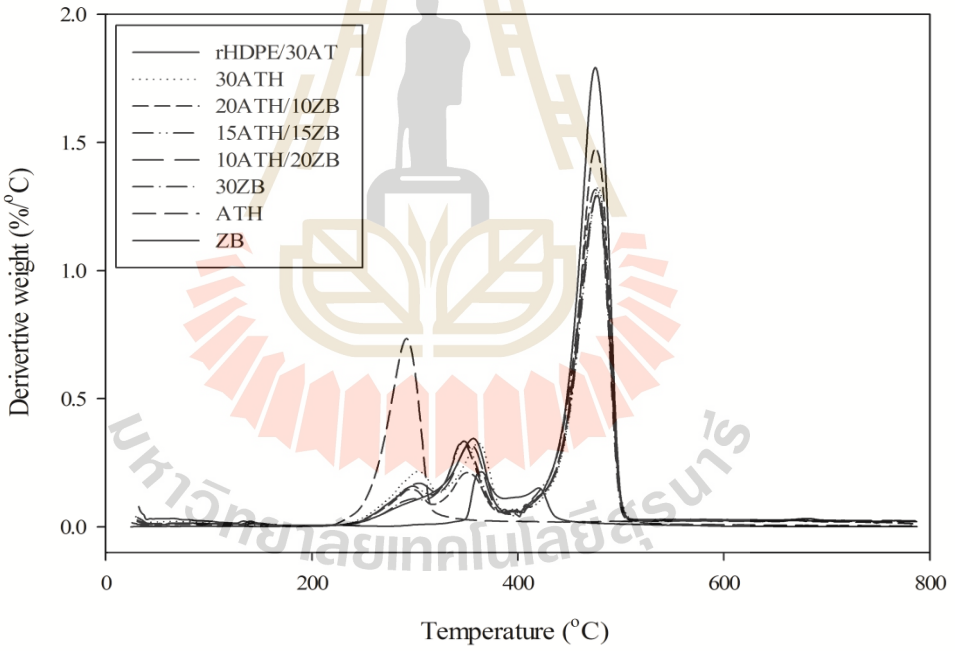
4.3.3 สมบัติทางความร้อน

กราฟ TGA และ DTGA ของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท ซิงค์บอเรทและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ใส่สารหน่วงไฟรวมกัน แสดงในรูปที่ 4.15 อุณหภูมิการเสื่อมสภาพทางความร้อนและปริมาณเถ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการคัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟแสดงในตารางที่ 4.9 พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสองลำดับ เนื่องจากการเสื่อมสภาพของผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว เมื่อมีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท พอลิเมอร์คอมโพสิทแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสามลำดับ เนื่องจากการเสื่อมสภาพของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท ผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว พอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่ซิงค์บอเรทมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสองลำดับ เพราะอุณหภูมิการเสื่อมสภาพทางความร้อนของซิงค์บอเรทซ้อนกับผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์ ซิงค์บอเรทเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิ 366.64-421.00 องศาเซลเซียส

เมื่ออะลูมิเนียมไตรไฮเดรทถูกแทนที่ด้วยซิงค์บอเรท ที่ปริมาณ 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท อุณหภูมิการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่อะลูมิเนียมไตรไฮเดรท ดังแสดงในตารางที่ 4.11 นอกจากนี้ อุณหภูมิการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิงค์บอเรทในส่วนผสมของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรทเพิ่มขึ้น เมื่ออะลูมิเนียมไตรไฮเดรทเสื่อมสภาพทางความร้อนจะปลดปล่อยน้ำและสร้างชั้นป้องกันพอลิเมอร์คอมโพสิทจากไฟและออกซิเจน ส่งผลให้เกิดการชะลอกระบวนการเสื่อมสภาพทางความร้อน เมื่อซิงค์บอเรทเสื่อมสภาพจะปลดปล่อยน้ำและสร้างชั้นป้องกันขึ้นเพื่อแยกพอลิเมอร์คอมโพสิทออกจากไฟและออกซิเจน เป็นผลให้ชั้นป้องกันมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น (Formicola และคณะ, 2009)



(a)



(b)

รูปที่ 4.15 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ (a) TGA และ (b) DTGA

ตารางที่ 4.9 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ

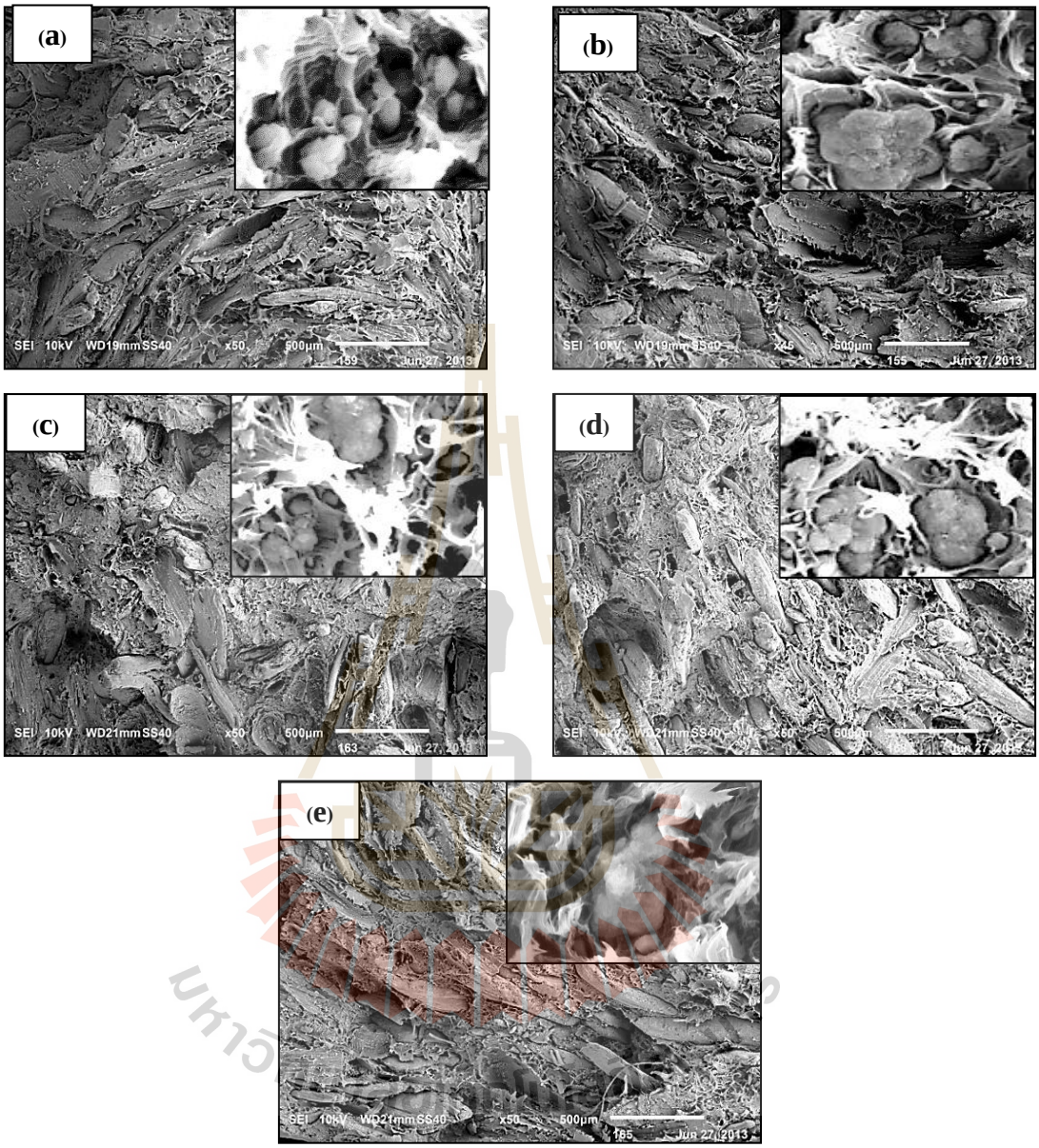
Sample name	1st weight loss temperature (°C)	2nd weight loss temperature (°C)	3rd weight loss temperature (°C)	Residue (%)
rHDPE/30AT	-	353.83	476.33	6.71
30ATH	292.03	360.40	478.66	15.07
20ATH/10ZB	293.62	360.95	479.23	17.25
15ATH/15ZB	294.16	363.95	479.80	17.63
10ATH/20ZB	297.58	364.16	480.07	18.28
30ZB	-	365.14	480.52	18.46
ATH	291.67	-	-	65.21
ZB	-	366.64	421.00	85.40

4.3.4 สัณฐานวิทยา

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักจากแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ แสดงในรูปที่ 4.16 (a)-(e) จากรูปที่ 4.16 (a) พบช่องว่างระหว่างอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว เนื่องจากการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสที่ไม่ดีระหว่างอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว อย่างไรก็ตามจากรูป 4.16 (b)-(e) แสดงให้เห็นว่าซิงค์บอเรทมีการยึดติดกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ดีกว่าอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท จากผลทางสัณฐานวิทยาสัมพันธ์กับสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิท

ในส่วนนี้ การรวมกันของสารหน่วงไฟแสดงการปรับปรุงสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิท พบการทำงานเสริมกันในการเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทเมื่อเติม 20ATH/10ZB และ 15ATH/15ZB ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิท พอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่ 20ATH/10ZB แสดงสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกพอลิเมอร์คอมโพสิทนี้ไปศึกษาผลของสารช่วยใช้เข้ากันต่อสมบัติของ

พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว



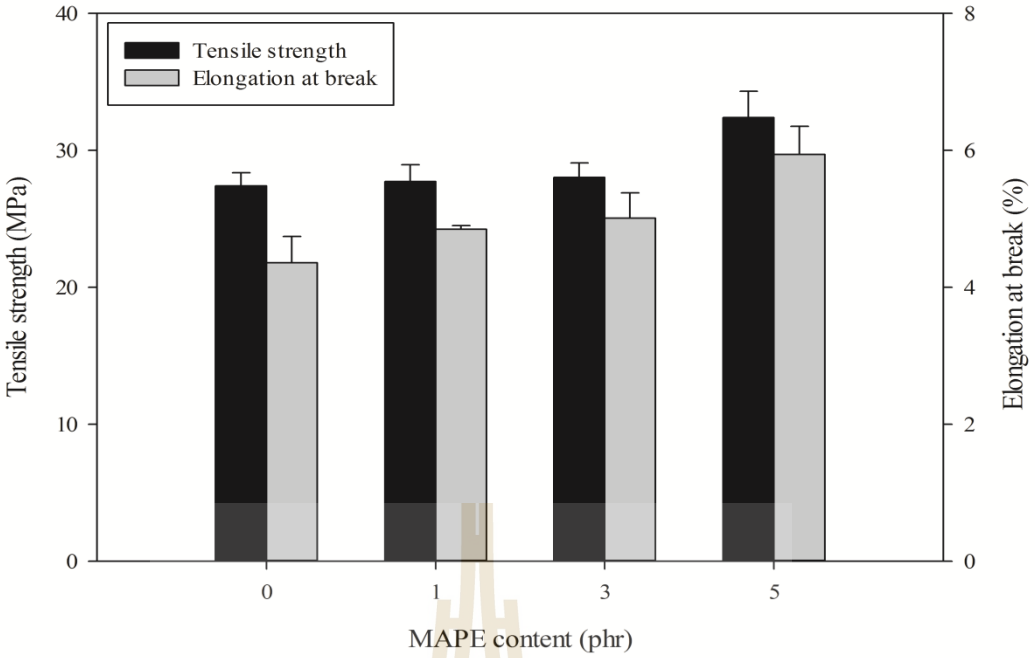
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ ที่กำลังขยาย 50 และ 2000 เท่า (a) 30ATH (b) 20ATH/10ZB (c) 15ATH/15ZB (d) 10ATH/20ZB และ (e) 30ZB

4.4 ผลของสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ

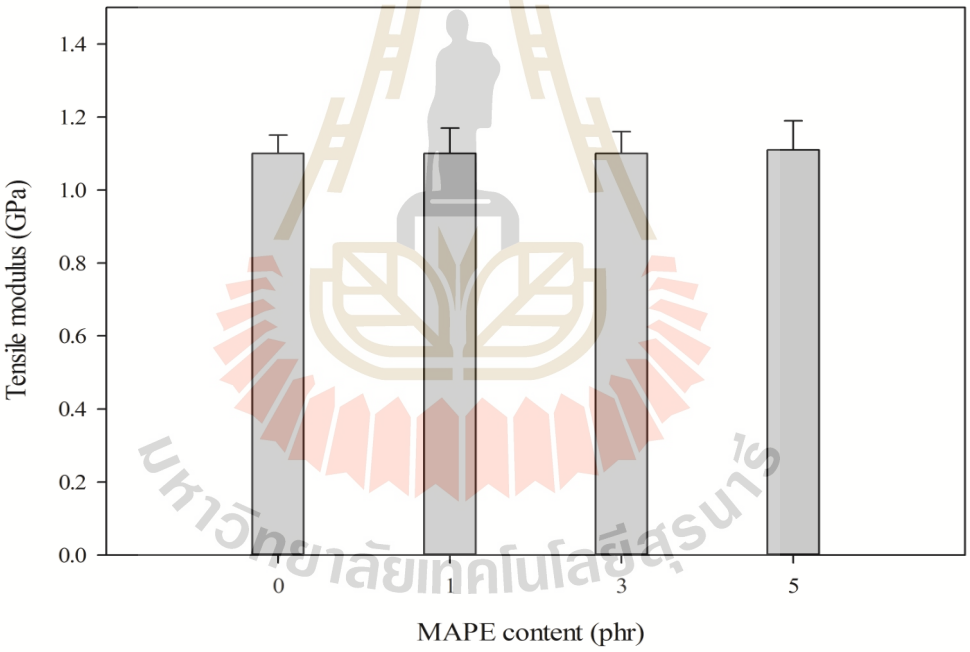
4.4.1 สมบัติทางกล

สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่ 20ATH/10ZB ที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.10 จากรูปที่ 4.17 (a) ความต้านทานต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น ในขณะที่มอดูลัสแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสารหน่วงไฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยการสร้างพันธะเคมีจากหมู่ไฮดรอกซิลของสารหน่วงไฟและหมู่แอนไฮไดรของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน ในขณะที่สายโซ่พอลิเอทิลีนเข้ากับ พอลิเอทิลีนเมทริกซ์ ดังนั้นการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสารหน่วงไฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วจึงเพิ่มขึ้นโดยการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน (Ayrilmis, 2013; Ridzuan และคณะ, 2013) นอกจากนี้การใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วได้เช่นกัน (Tai และ Li, 2001)

ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่ 20ATH/10ZB ที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.18 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น เพราะการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสารตัวเติมและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านแรงจากพอลิเมอร์เมทริกซ์สู่สารตัวเติมดีขึ้น (Yang และคณะ, 2007; Ayrilmis, 2013; Ridzuan และคณะ, 2013)

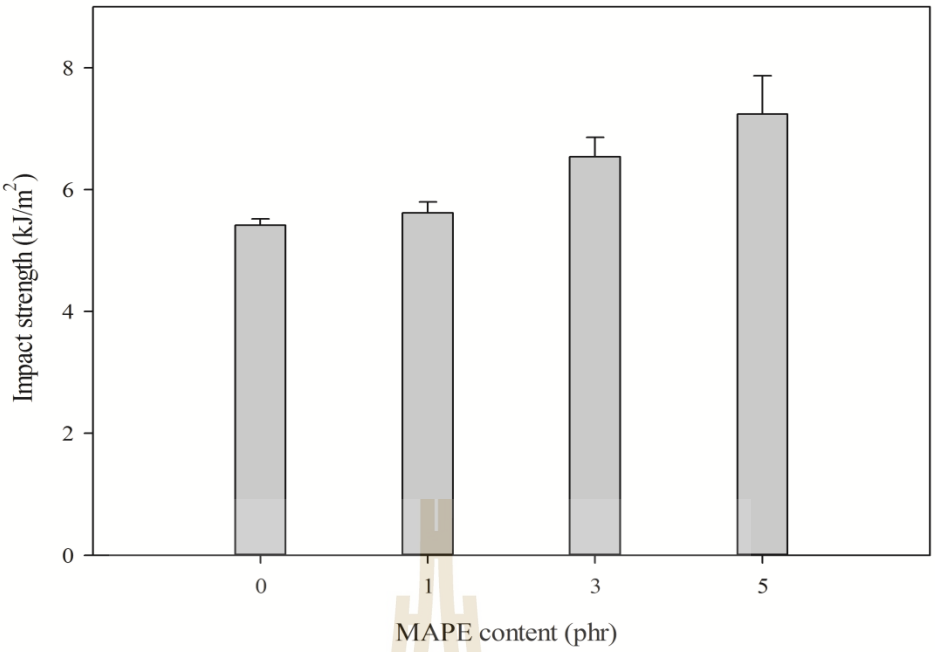


(a)



(b)

รูปที่ 4.17 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ (a) ความต้านทานต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และ (b) มอดูลัสแรงดึง



รูปที่ 4.18 สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ

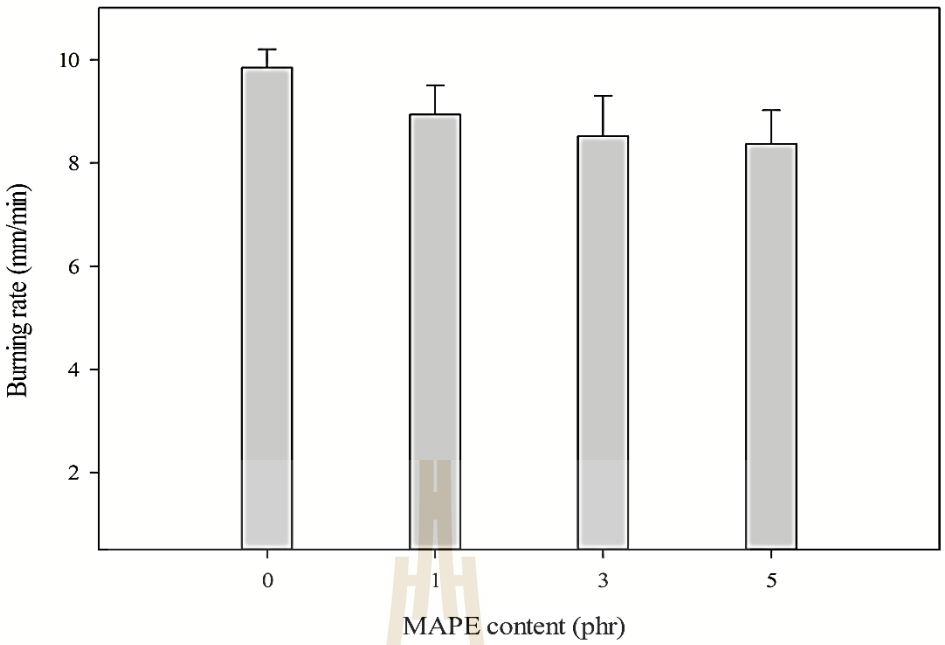
4.4.2 สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ

อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่ 20ATH/10ZB ที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.11 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของสารหน่วงไฟในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Zhang และคณะ, 2005) Li และ He (2003) รายงานว่าสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยไม้และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene) ที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟส (Ammonium polyphosphate) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.10 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ

Sample name	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)	Impact strength (kJ/m^2)
20ATH/10ZB	27.41±0.96	1.10±0.05	4.36±0.38	5.42±0.10
1MAPE	27.72±1.23	1.10±0.07	4.85±0.05	5.62±0.18
3MAPE	28.02±1.06	1.10±0.06	5.01±0.37	6.54±0.32
5MAPE	32.39±1.93	1.11±0.08	5.94±0.41	7.24±0.63

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.19 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ

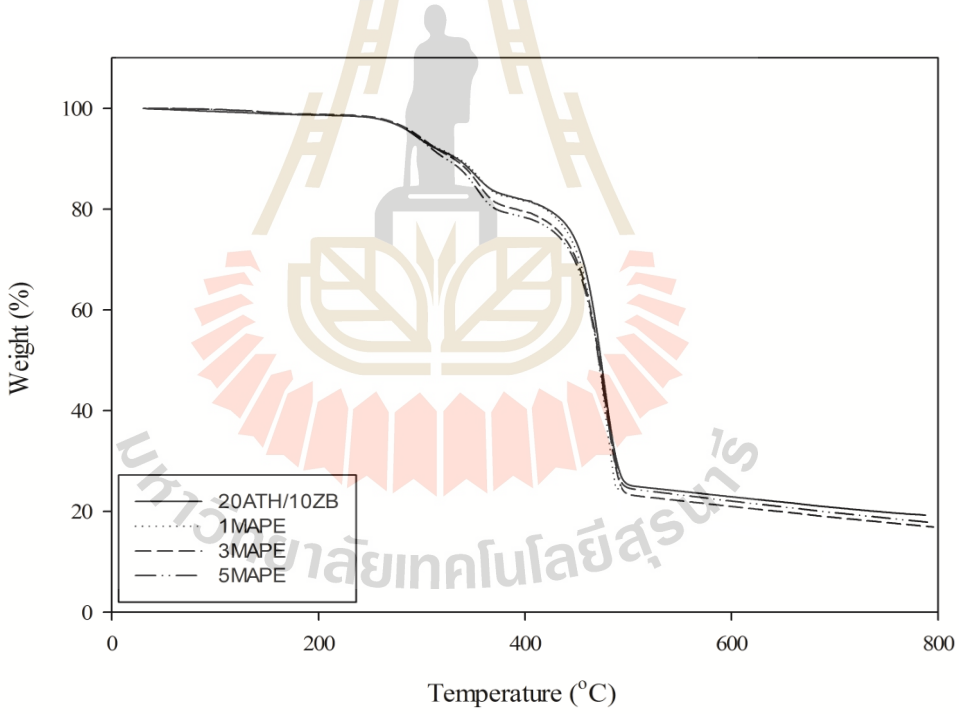
ตารางที่ 4.11 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ

Sample name	**Burning rate (mm/min)**
20ATH/10ZB	9.85±0.50
1MAPE	8.94±0.56
3MAPE	8.52±0.78
5MAPE	8.37±0.65

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

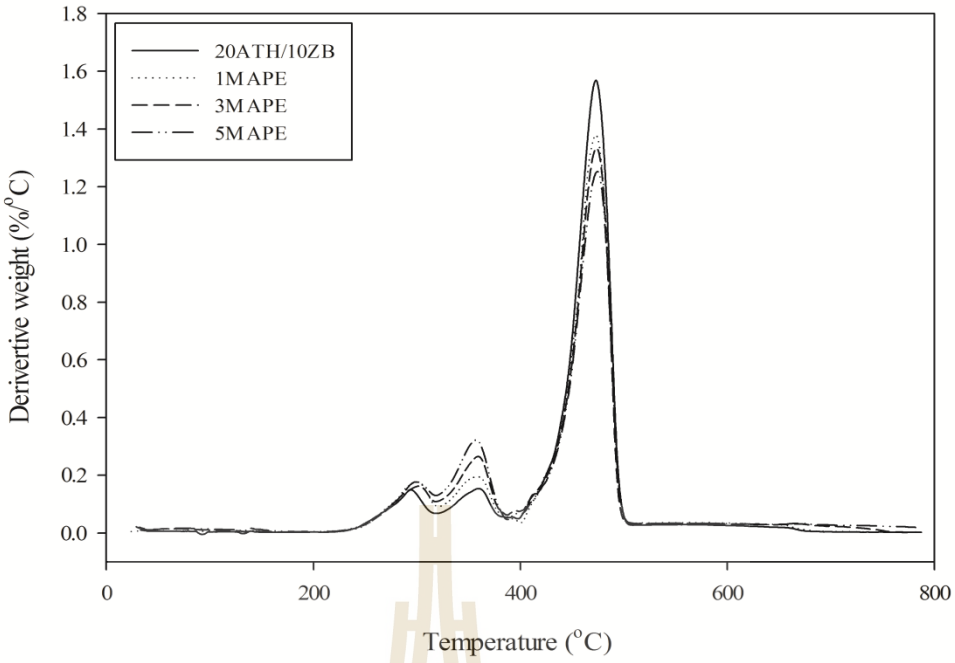
4.4.3 สมบัติทางความร้อน

กราฟ TGA และ DTGA ของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่ 20ATH/10ZB ที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.20 (a)-(b) พอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่ 20ATH/10ZB แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสามลำดับ เปลี่ยนแปลงน้ำหนักลำดับที่หนึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลำดับที่สองเกิดจากการเสื่อมสภาพของผงขี้เลื่อยและซิงค์บอเรท การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลำดับที่สามเกิดจากการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว อุณหภูมิการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสารหน่วงไฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว Li และ He (2003) รายงานว่าความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยไม้และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟสเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน



(a)

รูปที่ 4.20 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ (a) TGA และ (b) DTGA



(b)

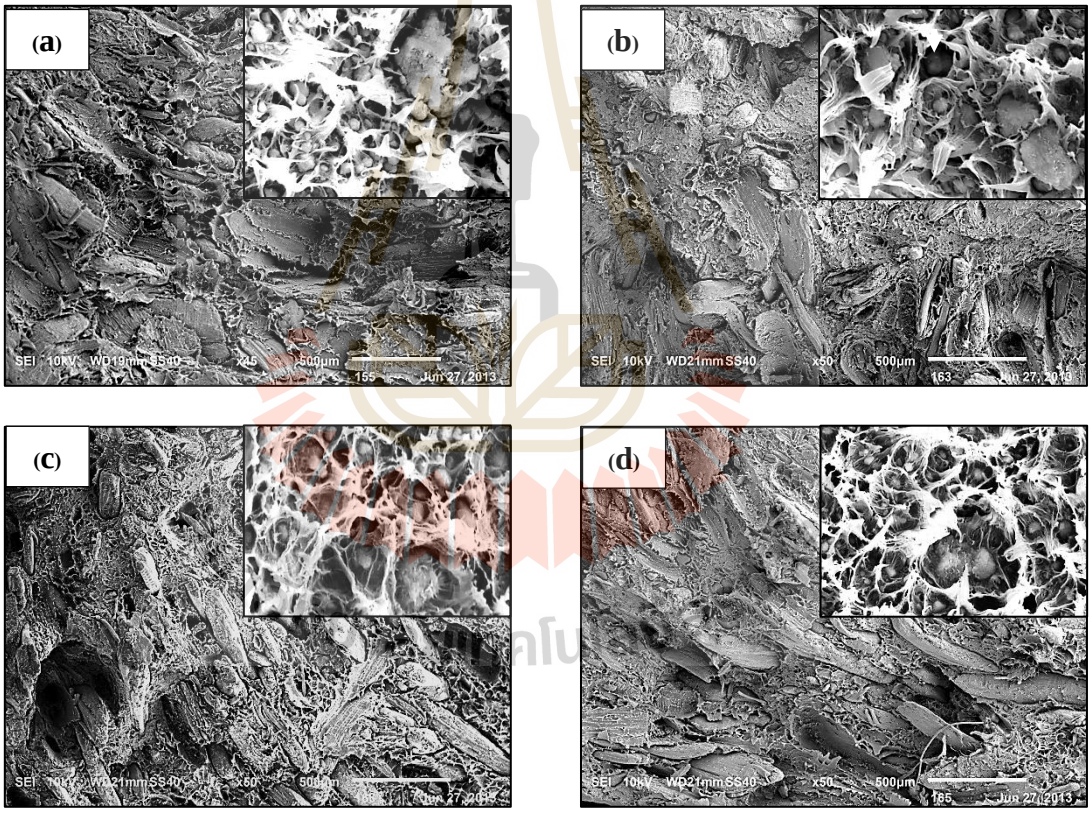
รูปที่ 4.20 (ต่อ) ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ (a) TGA และ (b) DTGA

ตารางที่ 4.12 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ

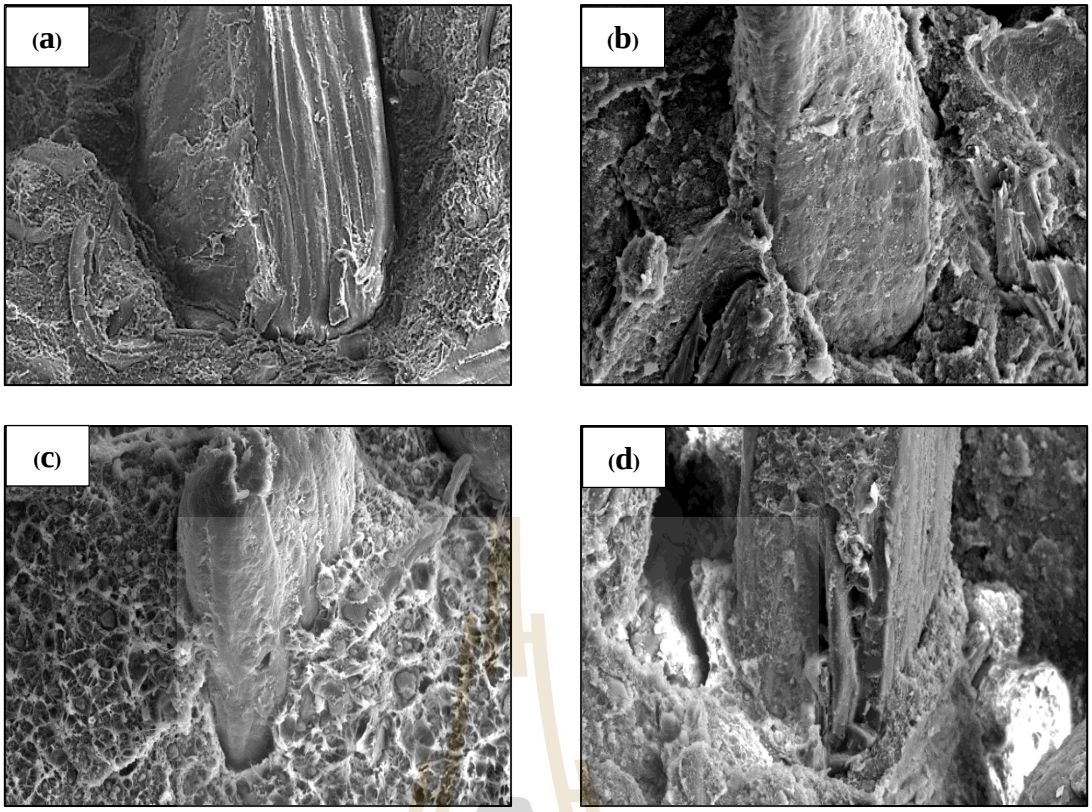
Sample name	**1st weight loss temperature (°C)**	**2nd weight loss temperature (°C)**	**3rd weight loss temperature (°C)**	**Residue (%)**
20ATH/10ZB	293.62	360.95	479.23	17.25
1MAPE	295.52	361.12	480.08	16.54
3MAPE	296.03	361.79	480.78	15.64
5MAPE	296.73	362.86	481.33	15.53

4.4.4 สัณฐานวิทยา

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักจากแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใส่ 20ATH/10ZB ที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.21 (a)-(d) พบการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสที่ไม่ดีระหว่างสารหน่วงไฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.21 (a) แต่อย่างไรก็ตามการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสารหน่วงไฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.21 (b)-(d) และพบว่าสารหน่วงไฟมีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วอีกด้วย ผลทางสัณฐานวิทยาสัมพันธ์กับสมบัติทางกล นอกจากนี้ พบการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ ที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ ที่กำลังขยาย 50 และ 2000 เท่า (a) 20ATH/10ZB (b) 1MAPE (c) 3MAPE และ (d) 5MAPE



รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีการรวมกันของสารหน่วงไฟ ที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนต่างๆ ที่กำลังขยาย 350 เท่า (a) 20ATH/10ZB (b) 1MAPE (c) 3MAPE และ (d) 5MAPE

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

ความต้านทานต่อแรงดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วลดลงเมื่อปริมาณผงขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น ในขณะที่มอดูลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น ความเสถียรต่อความร้อนและสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟลดลงด้วยเช่นกันเมื่อปริมาณผงขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการรวมกันของผงขี้เลื่อยในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว และการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสที่ไม่ดีระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว การดัดแปรอัลคาไลน์เพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณผงขี้เลื่อย ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วสูงกว่าของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสที่ดีระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว จากพอลิเมอร์คอมโพสิททั้งหมด พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีปริมาณผงขี้เลื่อย 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ ความเสถียรต่อความร้อนสูงที่สุด

อะลูมิเนียมไตรไฮเดรทปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟและความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว เพราะน้ำและชั้นป้องกันที่สร้างขึ้นระหว่างกระบวนการเสื่อมสภาพทางความร้อนของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทชะลอกระบวนการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิท เมื่อปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทเพิ่มขึ้น สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟและความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ไม่ส่งผลกระทบมากนักต่อสมบัติทางกล พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีปริมาณผงขี้เลื่อย 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทมีสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ ความเสถียรต่อความร้อนสูงที่สุด ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสที่ไม่ดีระหว่างอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

การใส่รวมกันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรทในพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เพิ่มสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีการใส่อะลูมิเนียมไตรไฮเดรท เพราะซิงค์บอเรทมีผิวที่หยาบกว่าอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิงค์บอเรทในส่วนผสมของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรทเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีปริมาณผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณซิงค์บอเรท 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท มีสมบัติทางกลและความเสถียรต่อความร้อนที่สูงที่สุด แต่มีสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟที่ต่ำที่สุด การรวมกันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและซิงค์บอเรท ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 1 และ 2 ต่อ 1 แสดงผลการเสริมกันในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟพอลิเมอร์คอมโพสิท นอกจากนี้ พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณผงขี้เลื่อยที่ผ่านการดัดแปรอัลคาไลน์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท และมีปริมาณซิงค์บอเรท 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิท มีสมบัติการต้านทานต่อการติดไฟที่ดีที่สุด ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าซิงค์บอเรทมีการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ดีกว่าอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท

เมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่สมบัติการต้านทานต่อการติดไฟ และความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่ามีการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสารตัวเติมและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว เมื่อมีการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟพอลิเอทิลีน นอกจากนี้ ยังพบการกระจายตัวที่ดีของสารหน่วงไฟและผงขี้เลื่อยในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว

บรรณานุกรม

Adhikary, K. B., Pang, S. and Staiger, M. P. (2008). Dimensional stability and mechanical behaviour of wood- plastic composites based on recycled and virgin high- density polyethylene (HDPE). **Comp. Part B.** 39: 807-815.

Arbelaiz, A., Fernandez, B., Cantero, G., Llano-Ponte, R., Valea, A., Mondragon, I. (2005). Mechanical properties of flax fibre/ polypropylene composites. Influence of fibre/ matrix modification and glass fibre hybridization. **Comp. Part A.** 36: 1637-1644.

Atuanya, C. U. and Solomon, N. (2011). Evaluation of the mechanical properties of recycled polyethylene/iroko wood saw dust particulate composite. **J. Basic. Appl. Sci. Res.** 1: 2806-2810.

Ayramidis, G., Militz, H., Avar, I., Viöl, W. and Wolkenhauer, A. (2012). Improved absorption characteristics of thermally modified beech veneer produced by plasma treatment. **EurJ. Wood Prod**. 70: 545-549.

Balasuriya, P. W., Ye, L., Mai, Y. W. and Wu, J. (2002). Mechanical properties of wood flake-polyethylene composites. II. interface modification. **J. Appl. Polym. Sci.** 83: 2505-2521.

Behzad, M., Tajvidi, M., Ebrahim, G. and Falk, R. H. (2004). Dynamic mechanical analysis of compatibilizer: effect on mechanical properties of wood flour-high density polyethylene composites. **IJE Transactions B: Applications** 17: 95-104.

Bourbigot S. and Fortaine, G. (2010). Flame retardancy of polylactide: an overview. **Polym. Chem.** 1: 1413-1422.

Carpentier, F., Bourbigot, S., Bras, M. L. and Delobel, R. (2000). Rheological investigations in fire retardancy: application to ethylene- vinyl- acetate copolymer/magnesium hydroxide/zinc borate formulations. **Polym. Int.** 49: 1216-1221.

Chen, I., Hwang, S. K. and Chen, S. (1989). Chemical kinetics and reaction mechanism of thermal decomposition of aluminum hydroxide and magnesium hydroxide at high temperatures (973-1123 K). **Ind. Eng. Chem. Res.** 28: 738-742.

Chen, T. and Shen, K. (2005). Synergistic benefits of metal hydroxides and zinc borate in flame retardant wire and cable performance compounds. 54th IWCS/ FOCUS Conference**: Proceedings of the International Wire & Cable Symposium (IWCS)**, November 13-16, Rhode Island, USA.

Danyadi, L., Janecska, T., Szabo, Z., Nagy, G., Moczo, J. and Pukanszky, B. (2007). Wood flour filled PP composites: compatibilization and adhesion. **Comp. Sci. Tech**. 67: 2838-2846.

Formicola, C., De Fenzo, A., Zarrelli, M., Frache, A., Giordano, M. and Camino, G., (2009). Synergistic effects of zinc borate and aluminium trihydroxide on flammability behaviour of aerospace epoxy system. **Express Polymer Lett.** 3: 376-384.

García, M., Hidalgo, J., Garmendia, I. and García, J. (2007). Wood-plastics composites with better fire retardancy and durability performance. **Comp. Part A.** 40: 1772-1776.

Hausmann, K. and Flaris, V. (1997). Polymeric coupling agents as property enhancers in highly filled polymer systems. **Polym. Comp.** 5: 113-119.

Hippi, U., Mattila, J., Korhonen, M. and Seppala, J. (2003). Compatibilization of polyethylene/aluminum hydroxide (PE/ATH) and polyethylene/magnesium hydroxide (PE/MH) composites with functionalized polyethylenes. **Polymer.** 44: 1193-1201

Ibibikcan, E. (2013). Use of boron compounds as synergistic flame retardant in low density polyethylene-ethylene vinyl acetate blends and nanocomposites **Master Thesis**, Middle East Technical.

Ichazo, M. N., Albano, C., González, J., Perera, R. and Candal, M. V. (2001). Polypropylene/wood flour composites: treatments and properties. **Comp. Struc.** 54: 207-214.

Ikhlef, S., Nekkaa, S., Guessoum, M. and Haddaoui, N. (2012). Effects of alkaline treatment on the mechanical and rheological properties of low-density polyethylene/spartium junceum flour composites. **ISRN Polym. Sci.** 1: 1-7.

Jayaraman, K. and Bhattacharyya, D. (2003). Mechanical performance of wood fibre-waste plastic composite materials. **Resour. Conservat. Recycl.** 41: 307-319.

Jang, J. and Lee, E. (2001). Improvement of the flame retardancy of paper sluge/ polypropylene composites. **Polym. Test.** 20: 7-13.

Jeencham, R. (2010). Effect of flame retardants on physical properties of sisal fiber/polypropylene composites. **Master thesis**. Suranaree University of Technology.

Joseph, K., Thomas, S. and Pavithran, C. (1996). Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fiber-reinforced polyethylene composites. **Polymer.** 37: 5139-5149.

Kaewkuk, S., Sutapun, W. and Jarukumjorn, K. (2010). Mechanical, thermal and morphological properties of heated sisal fibers. **11th Pacific Polymer Conference 2009.** December 6-10, Cairns, Australia.

Kurt, R. and Mengeloglu, F. (2011). Utilization of boron compounds as synergists with ammonium polyphosphate for flame retardant wood-polymer composites. Turk. J. **Agri. For.** 35: 155-163.

Lei, Y., Wu, Q., Yao, F. and Xu, Y. (2007). Preparation and properties of recycled HDPE/natural fiber composites. **Comp. Part A.** 38: 1664-1674.

Li, B. and He, J. (2004). Investigation of mechanical property, fiame retardancy and thermal degradation of LLDPE-wood-fiber composites. **Polym. Degrad. Stab**. 83: 241-246.

Li, Q. and Matuana, L. M (2003). Surface of cellulosic materials modified with functionalized polyethylene coupling agents. **J. Appl. Poly. Sci.** 88: 278-286.

Lopattananon, N., Panawarangkul, K., Sahakaro, K. and Ellis, B. (2006). Performance of pineapple leaf fiber-natural rubber composites: The effect of fiber surface treatments. **J. Appl. Polym. Sci.** 102: 1974-1984.

Lu, J. Z., Wu, Q. and Negulescu, I. I. (2005). Wood-fiber/high-density-polyethylene composites: coupling agent performance. **J. Appl. Polym. Sci.** 96: 93-102.

Marcovich, N. E. and Villar, M. A. (2003). Thermal and mechanical characterization of linear low density polyethylene/wood flour composites. **J. Appl. Polym. Sci.** 90: 2775-2784.

Najafi, S. K., Hamidinia, E. and Tajvidi, M. (2006) Mechanical properties of composites from sawdust and recycled plastics. **J. Appl. Polym. Sci.** 100: 3641-3645.

Ning, Y. and Guo, S. (2000). Flame-retardant and smoke-suppressant properties of zinc borate and aluminum trihydrate-filled rigid PVC. **J. Appl. Polym. Sci.** 77: 3119-3127.

Norzali, A., Badri, K. H. and Nuawi, M. Z. (2011). Loading effect of aluminum hydroxide onto the mechanical, thermal conductivity, acoustical and burning properties of the palm-based polyurethane composites. **Sains Malaysiana.** 40: 737-742.

Oksman, K. and Lindberg, H. (1997). Influence of thermoplastic elastomers on adhesion in polyethylene-wood flour composites. **J. Appl. Polym. Sci.** 68: 1845-1855.

Paul, S. A., Laurent Ibos, A. B., Candau, Y., Joseph, K. and Thomas, S (2008). Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials. **Comp. Part A.** 39: 1582-1588.

Pickering, K. L., Abdalla, A. J. C., McDonald, A. G. and Franich, R. A. (2003). The effect of silane coupling agents on radiata pine fibre for use in thermoplastic matrix composites. **Comp. Part A** 34: 915-926.

Pracella, M., Chionna, D., Anguillesi, I., Kulinski, Z. and Piorkowska, E. (2006). Functionalization, compatibilization and properties of polypropylene composites with hemp fibres. **Comp. Sci. Tech.** 66: 2218-2230.

Ramazani, S. A. A., Rahimi, A., Frounchi, M. and Radman, S. (2008). Investigation of flame retardancy and physicalmechanical properties of zinc borate and aluminum hydroxide propylene composites, **Mater. Des.** 29: 1051-1056.

Ridzuan, R., Beg, M. D. H., Rosli, M. Y., Rohaya, M. H., Astimar, A. A., Samahani, S. and Zawawi, I. (2013). Effects of coupling agent and flame retardant on the performances of oil palm empty fruit bunch fiber reinforced polypropylene composites. **World Acad. Sci. Eng. Tech.**7: 06-24.

Sain, M., Park, S. H., Suhara, F. and Law, S. (2004). Flame retardant and mechanical properties of natural fibre-PP composites containing magnesium hydroxide. **Polym. Degrad. Stab**. 83: 363-367.

Schartel. B., Knoll, U., Hartwig, A. and Pütz, D. (2006). Phosphonium-modified layered silicate epoxy resins nanocomposites and their combinations with ATH and organo-phosphorus fire retardants. **Polym. Adv. Tech.** 17: 281-293.

Stark, N. M., White, R. H., Mueller, S. A. and Osswald, T. A. (2010). Evaluation of various fire retardants for use in wood flour polyethylene composites. **Polym. Degrad. Stab.** 95: 1903-1910.

Suardana, N. P. G., Piao, Y. and Lim, J. K. (2011). Mechanical properties of hemp fibers and hemp fiber/PP composites: effects of chemical surface treatment. **Mater. Phys. Mech.** 11: 1-8.

Suppakarn, N. and Jarukumjorn, K. (2009). Mechanical properties and flammability of sisal/PP composites: effect of flame retardant type and content. **Comp. Part B.** 40: 613-618.

Tai, C. M. and Li, R. K. Y. (2001). Mechanical properties of flame retardant filled polypropylene composites. **J. Appl. Polym. Sci.** 80: 2718-2728.

Tu, X., Young, R. A. and Denes, F. (1994). Improvement of bonding between cellulose and polypropylene by plasma treatment. **Cellulose.** 1: 87-106

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H. and Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis, **Fuel.** 86: 1781-1788.

Yao, F., Wu, Q., Lei, Y. and Xu, Y. (2008). Rice straw fiber-reinforced high-density polyethylene composite: effect of fiber type and loading. **Ind. Crop. Prod**. 28: 63-72.

Zhang, X., Guo, F., Chen, J., Wang, G. and Liu, H. (2005). Investigation of interfacial modification for flame retardant ethylene vinyl acetate copolymer/ alumina trihydrate nanocomposites. **Polym. Degrad. Stab.** 87: 411-418.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

นางสาว กษมา จารุกำจร ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยขอนแก่น วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล และ Ph.D. (Polymer Engineering) The University of Akron, USA สาขาวิชาการที่มีความสนใจ กระบวนการขึ้นรูปและตรวจสอบพอลิเมอร์ (Polymer processing and characterization) และพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิท (Polymer blends and composites) ผลงานทางวิชาการประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 45 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 15 ฉบับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี