

อิทธิพลของอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และซิงค์บอเรตต่อสมบัติการต้านทานการติดไฟ และสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง

กมลรัตน์ คงรักษ์^{1*}, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ¹, วีระศักดิ์ หมากผิน² และเอกชัย วิมลมาลา¹

¹กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (กลุ่มวิจัย P-PROF) หลักสูตรเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²สถาบันนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

*kamonrat.khongrak21@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ (Aluminium tri-hydroxide; ATH) และซิงค์บอเรต (Zinc borate; ZB) ต่อสมบัติการต้านทานการติดไฟ และสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการแปรรูปใช้ใหม่ (recycled high-density polyethylene; rHDPE) โดยทำการเติมสารหน่วงไฟในปริมาณ 0, 30, 60, 90 และ 120 pph ทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index; LOI) สมบัติด้านแรงดึง และค่าดัชนีการไหล ผลการทดลองพบว่า การเติม ATH ใน rHDPE ที่ปริมาณ 90 และ 120 pph สามารถต้านทานการติดไฟอยู่ในระดับ V-0 และมีค่า %LOI อยู่ในช่วงระหว่าง 23-24 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุที่ติดไฟได้ยาก ในขณะที่การเติม ZB ที่ปริมาณ 120 pph มีความต้านทานการติดไฟได้ระดับ V-2 และพบว่าการเติมสารหน่วงไฟทั้งสองชนิด ไม่ส่งผลต่อสมบัติมอดุลัสแรงดึง และความทนต่อแรงดึง แต่ความสามารถในการยึดตัวที่จุดขาดและความเหนียวดึงของ rHDPE ลดลง นอกจากนี้พบว่าค่าดัชนีการไหล (Melt flow index; MFI) มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารตัวเติมหน่วงไฟที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น จากผลการทดลอง พบว่า rHDPE ที่มี ATH 90 pph เป็นสูตรที่แนะนำ เนื่องจากมีสมบัติหน่วงการติดไฟและสมบัติทนต่อแรงดึงได้ดีเยี่ยม

คำสำคัญ: การต้านทานการติดไฟ พอลิเอทิลีนรีไซเคิล อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ ซิงค์บอเรต สมบัติเชิงกล

Effects of Aluminium Tri-hydroxide and Zinc Borate on the Flame Retardancy and Mechanical Properties of Recycled High-Density Polyethylene

Kamonrat Khongrak^{1*}, Narongrit Sombatsompop¹, Teerasak Markpin² and
Ekachai Wimolmala¹

¹Polymer Processing and Flow (P-PROF) Research Group, Materials Technology Program, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT)

²Science Technology and Innovation Policy Institute,
King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT)

*kamonrat.khongrak21@gmail.com

Abstract

This work aimed to investigate the effects of aluminum tri-hydroxide (ATH) and zinc borate (ZB) on the flame retardant and mechanical properties of recycled high-density polyethylene (rHDPE). The flame retardants were added at concentrations of 0, 30, 60, 90, and 120 parts per hundred (pph). Tests were conducted following UL-94 standards, the limiting oxygen index (LOI), tensile properties, and the melt flow index (MFI). The results showed that incorporating ATH into rHDPE at concentrations of 90 and 120 pph achieved a flame-retardant rating of V-0, with an LOI value between 23 and 24, classifying it as a non-flammable material. Additionally, adding ZB at a concentration of 120 pph resulted in a flame-retardant rating of V-2. The addition of both flame retardants did not affect the tensile modulus or tensile strength. However, elongation at break and tensile toughness decreased. Furthermore, the melt flow index (MFI) tended to decrease with increasing amounts of additives. Therefore, based on the experimental results, rHDPE with 90 pph of ATH is the recommended formulation, offering both excellent flame retardancy and tensile strength properties.

Keywords: Flame retardant, Recycled polyethylene, Aluminum tri-hydroxide, Zinc borate,
Mechanical properties

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุพลาสติกนำมาใช้งานเฉพาะด้าน (Specific applications) ทางวิศวกรรมเพิ่มมากขึ้น เช่น ระบบท่อในงานอุตสาหกรรม ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์/ชิ้นส่วนในงานโครงสร้าง รวมถึงบรรจุภัณฑ์สำหรับการขนส่งสารเคมี โดยที่มีสมบัติเด่นด้านความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา ขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถนำกลับมาแปรรูปใช้ใหม่ (Recycle) เข้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประเภทของพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE) [1] ซึ่งมีสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง ความเหนียว ทนต่อแรงดึง ทนต่อตัวทำละลายและสามารถหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ อย่างไรก็ตาม HDPE มีข้อจำกัด คือ ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index: LOI) [2] อยู่ในระดับต่ำ ทำให้วัสดุสามารถติดไฟได้ง่าย เพื่อ

ลดความสามารถในการติดไฟของ HDPE จึงจำเป็นต้องเติมสารหน่วงไฟ (Flame retardants) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานการติดไฟ โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการให้วัสดุสามารถใช้งานทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยจากอัคคีภัย อีกทั้งการใช้ HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิลยังช่วยตอบโจทย์ด้านเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) และช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างยั่งยืน

สารหน่วงไฟที่มีการใช้งานในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจน (Halogen flame retardants) เช่น กลุ่มคลอไรด์และโบรมิเนต มีประสิทธิภาพการหน่วงไฟที่ดี แต่จะปลดปล่อยก๊าซพิษและไฮโดรเจนฮาโลได์จำนวนมากเมื่อเกิดการเผาไหม้ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนอีกประเภท คือสารหน่วงไฟปราศจากฮาโลเจน (Non-halogen flame retardants) ที่ได้รับความนิยม ได้แก่ สารอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ (Aluminium Tri Hydroxide: ATH) มีข้อดีคือไม่มีพิษและไม่ปลดปล่อยควันพิษเมื่อเกิดการเผาไหม้ โดยกลไกการหน่วงไฟ คือเมื่อสาร ATH ได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงถึง 220 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวทางความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic) ทำให้เกิดโมเลกุลของน้ำระหว่างการสลายตัวไอน้ำในปริมาณมาก สามารถปลดปล่อยออกมา และโมเลกุล Al_2O_3 ช่วยในการเร่งปฏิกิริยา Dehydration ในพอลิเมอร์ทำให้เกิดเป็นชั้นเขม่าของถ่าน (Charring) บริเวณชั้นผิวทำหน้าที่ป้องกันออกซิเจน [3] ที่เป็นตัวแปรหลักในการติดไฟ ส่วนกรณีสารซิงค์บอเรต (Zinc Borate: ZB) เป็นสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการลดควันเมื่อเกิดการเผาไหม้ โดยมีกลไกเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 320 องศาเซลเซียส จึงมีการสลายตัวทางโครงสร้างเคมีโดยดุดกลืนพลังงาน และมีน้ำปริมาณมากปลดปล่อยออกมาในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาที่ช่วยในการดุดกลืนความร้อน เป็นการสลายตัวเป็นชั้นโบรอนออกไซด์เกิดจากไอน้ำและกรดบอริก ลดปริมาณของออกซิเจนที่ติดไฟทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟลดลง และโบรอนออกไซด์เป็นชั้นเขม่าที่ผิวลดปริมาณของออกซิเจน ซึ่งเป็นการลดการติดไฟของวัสดุ [3,4]

ในปัจจุบัน วัสดุทางวิศวกรรมใช้งานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ และอุตสาหกรรมโครงสร้างและตกแต่ง ได้ให้ความสำคัญกับการเลือกใช้วัสดุหน่วงไฟที่ปลอดภัยฮาโลเจนเพิ่มขึ้น เพื่อความปลอดภัยต่อสุขภาพผู้ใช้งานจากก๊าซพิษระหว่างการเผาไหม้ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [5] และมาตรการควบคุมสารฮาโลเจนในผลิตภัณฑ์พลาสติกและอิเล็กทรอนิกส์อย่างเข้มงวด ทำให้ความต้องการวัสดุที่ใช้สารหน่วงไฟปลอดภัยฮาโลเจนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [6]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ศึกษาอิทธิพลและกลไกของสารหน่วงไฟชนิดอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และสารหน่วงไฟซิงค์บอเรต ที่มีต่อสมบัติต้านทานการติดไฟ สมบัติเชิงกล สมบัติกายภาพ ค่าดัชนีการไหล ของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการนำกลับมาแปรรูปใช้ใหม่ ทั้งนี้เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุใช้งานด้านวิศวกรรมจากพลาสติกรีไซเคิลที่ต้านทานต่อการติดไฟ มีความปลอดภัยต่อการใช้งาน และนำวัสดุพลาสติกแปรรูปใช้ใหม่เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2. วิธีการศึกษา

วัสดุ สารเคมี เครื่องมือ อุปกรณ์วิจัย และวิธีการดำเนินงาน ในการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

เม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการนำกลับมาแปรรูปใช้ใหม่ (Recycled High Density Polyethylene: rHDPE) จากบริษัท เอส.พี.พลาสติก อินดัสตรี จำกัด ความหนาแน่น (Density) เท่ากับ 0.981 g/cm^3 สารหน่วงไฟที่ศึกษา 1) อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ (Aluminium Tri hydroxide) ขนาดอนุภาคประมาณ 1.5 ไมโครเมตร มีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ $Al(OH)_3$ ปริมาณ 99.5%, SiO_2 ปริมาณ 0.03%, Fe_2O_3 ปริมาณ 0.02% และ Na_2O ปริมาณ 0.3% มีความชื้น 0.03% และ 2) สารซิงค์บอเรต ขนาดอนุภาคในช่วง $2.5 - 3.5 \text{ }\mu\text{m}$ มีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ Pb น้อยกว่า 10 ppm, Cd น้อยกว่า 5 ppm, Fe 20 ppm, ZnO ปริมาณ 37 – 40%, B_2O_3 ปริมาณ 46 – 48% และ H_2O ปริมาณ 13 – 15.5% (Zinc Borate) ZB200 สารหน่วงไฟทั้ง 2 ชนิด จำหน่ายโดยบริษัท ออฟติมอล เทค จำกัด

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์วิจัย

เครื่องมือที่ใช้สำหรับงานวิจัย ได้แก่ เครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (High speed mixer) รุ่น LMXS บริษัท LAB TECH Engineering จำกัด เครื่องผสมอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) รุ่น CTW 1000C บริษัท Hakke Rheomex จำกัด ประเทศเยอรมนี แสดงดังภาพที่ 1(a) เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (Cutting machine) รุ่น RP-25C1 บริษัท ไทยไฮดรอลิคเครื่องกล จำกัด ประเทศไทย และเครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding) รุ่น E-80B บริษัท Elite Precision Machinery จำกัด สาธารณรัฐประชาชนจีน (ฮ่องกง) แสดงดังภาพที่ 1(b) งานวิจัยนี้ทดสอบสมบัติด้านการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index: LOI) และทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติทางด้านแรงดึง สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความสามารถในการไหล (Flow ability) และความหนาแน่น (Density)



a)



b)

ภาพที่ 1 เครื่องผสมพลาสติก และเครื่องขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ a) เครื่องผสมอัดรีดแบบสกรูคู่ b) เครื่องฉีดพลาสติก

2.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

ทำการอบเม็ด rHDPE ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อขจัดความชื้น ต่อจากนั้นทำการเตรียมผสม rHDPE กับสารหน่วงไฟ ATH และ ZB ปริมาณ 30, 60, 90 และ 120 pph ด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง และหลอมผสม rHDPE กับสารหน่วงไฟด้วยเครื่องอัดรีดสกรูแบบคู่ (Twin screw extrusion) โดยใช้อุณหภูมิตำแหน่ง Feed zone ถึง Die zone ที่ 170, 180, 190 และ 200 °C ตามลำดับ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สามารถหลอมเหลววัสดุเชิงประกอบให้เข้ากันได้ดี โดยใช้ความเร็วรอบการหมุนสกรูในช่วง 80-90 รอบต่อนาที ทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปในแม่พิมพ์รูปร่างดรัมเบลล์ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding) อุณหภูมิการฉีดขึ้นรูปจากส่วน Feed zone ถึง หัวฉีดที่อุณหภูมิ 180, 190 และ 200 °C ตามลำดับ ความเร็วรอบของสกรู 60 รอบต่อนาที โดยเป็นสภาวะในการขึ้นรูปที่เหมาะสม ทดสอบสมบัติการติดไฟ ได้แก่ ดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index: LOI) และระดับการติดไฟของวัสดุด้วยเทคนิค UL94 ตามมาตรฐาน ASTM D3801-10 ทดสอบสมบัติเชิงกล ด้านความต้านทานแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D638-14 ความเร็วดึงขึ้นรูปทดสอบ 50 mm/min ณ อุณหภูมิห้อง ส่วนทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น (Density) ตามมาตรฐาน ASTM D792 และค่าดัชนีในการไหล (Melt Flow Index: MFI) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 อุณหภูมิในการทดสอบ 190°C น้ำหนัก Load 2.16 kg

3. ผลการวิจัย/การอภิปรายผล

การทดสอบการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 และค่า LOI ของ rHDPE ที่เติมสาร ATH และสาร ZB

จากผลของการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 ของ rHDPE ที่เติมสาร ATH และสาร ZB แสดงในตารางที่ 1 พบว่า rHDPE มีระดับการติดไฟอยู่ในระดับ V-2 แสดงถึงประสิทธิภาพในการดับไฟได้ภายใน 60 วินาที และพบการเกิด

หตุไฟขณะทดสอบ [5] การผสมสาร ATH ในปริมาณ 30 และ 60 pph พบว่ามีระดับการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 ในระดับ V-2 และเมื่อผสมสาร ATH ที่ปริมาณ 90 และ 120 pph พบว่า วัสดุเชิงประกอบ rHDPE มีระดับการติดไฟเป็น V-0 แสดงถึงความสามารถในการดับไฟได้ภายใน 10 วินาที และไม่มีหตุไฟที่แสดงถึงการติดไฟได้ยากขึ้น ส่วนในกรณีของ rHDPE ที่เติมสาร ZB ปริมาณ 30-120 pph มีระดับการติดไฟอยู่ในระดับ V-2 แสดงถึงประสิทธิภาพการหน่วงไฟลดลง ดังนั้นการเติมสาร ATH (ปริมาณตั้งแต่ 90 pph) ในวัสดุเชิงประกอบ rHDPE ทำให้มีสมบัติต้านทานการติดไฟที่ดีกว่าสาร ZB เมื่อผสมในปริมาณเดียวกัน

เมื่อทดสอบค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index: LOI) ที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการลุกติดไฟของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการนำกลับมาแปรรูปใช้ใหม่ พบว่า rHDPE มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดเท่ากับ 17.8 จัดเป็นค่าของกลุ่มของวัสดุที่ลุกติดไฟได้ง่าย (ค่า LOI น้อยกว่า 21) การผสมสาร ATH ในปริมาณ 30, 60, 90 และ 120 pph พบว่ามีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดเพิ่มขึ้น เท่ากับ 18.4, 18.8, 23.7 และ 24 ตามลำดับ โดยการผสม rHDPE กับสาร ATH ในปริมาณตั้งแต่ 90 pph มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดสูงกว่า 21 ซึ่งจัดเป็นกลุ่มวัสดุที่ติดไฟได้ช้า (ค่า LOI อยู่ในช่วง 21 ถึง 27)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 ของ rHDPE ที่เติมสาร ATH และสาร ZB

Sample	Content of flame retardants (pph)	UL-94 Classifications*	Limiting Oxygen Index (LOI)**
rHDPE	0	V-2	17.8
rHDPE/ATH	30	V-2	18.4
	60	V-2	18.8
	90	V-0	23.7
	120	V-0	24.0
rHDPE/ZB	30	V-2	18.7
	60	V-2	20.3
	90	V-2	21.9
	120	V-2	22.5

* - UL 94 V-2 : ทดสอบเผาไฟในแนวตั้ง ; การเผาไหม้หยุดลงภายใน 60 วินาที อนุญาตให้มีไฟหยดได้

- UL 94 V-1: ทดสอบเผาไฟในแนวตั้ง; การเผาไหม้หยุดลงภายใน 60 วินาที ไม่อนุญาตให้มีไฟหยด

- UL 94 V-0: ทดสอบเผาไฟในแนวตั้ง; การเผาไหม้หยุดลงภายใน 10 วินาที ไม่อนุญาตให้มีไฟหยด

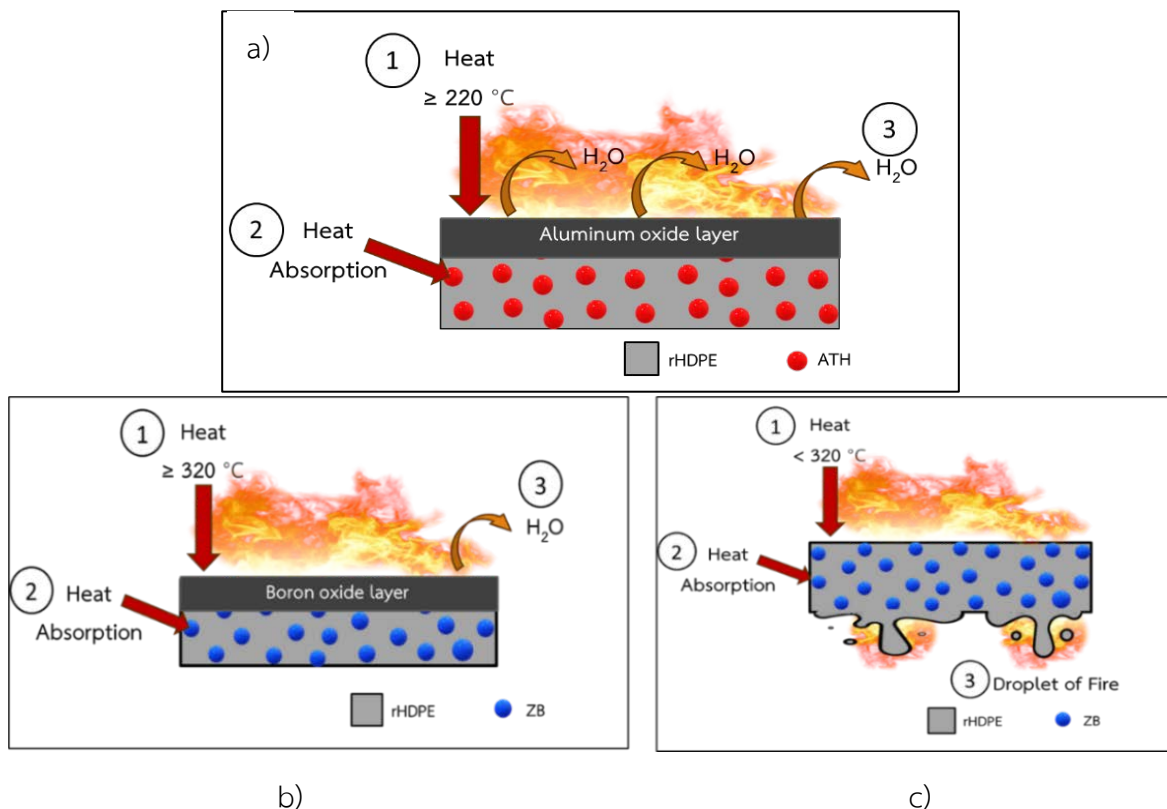
** LOI < 21: วัสดุที่สามารถติดไฟได้ง่าย

LOI อยู่ในช่วง 21 – 27 วัสดุที่ติดไฟได้ช้า

LOI >28 วัสดุที่ติดไฟได้ยาก

การผสม rHDPE กับสาร ZB ในปริมาณ 30, 60, 90 และ 120 pph พบว่ามีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 18.7, 20.3, 21.9 และ 22.5 ตามลำดับ พบว่าการผสม rHDPE กับสาร ZB ในปริมาณ 60, 90 และ 120 pph ส่งผลให้ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดสูงกว่า 21 เช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบการผสมสาร ATH และสาร ZB ในปริมาณ 90 pph พบว่าการผสม rHDPE กับสาร ATH ให้ค่าออกซิเจนจำกัดที่สูงถึง 23.7 แสดงถึงความสามารถในการติดไฟที่ยากกว่ากว่าการผสมด้วยสาร ZB ที่มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดเท่ากับ 20.3 แสดงในตารางที่ 1

จากการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 พบว่าการเติมสาร ATH ลงใน rHDPE ในปริมาณ 30 และ 60 pph มีระดับการติดไฟในระดับ V-2 และเมื่อเติมสาร ATH ที่ปริมาณ 90 - 120 pph พบว่ามีระดับการติดไฟในระดับ V-0 (ติดไฟได้ยาก) ทั้งนี้เนื่องจากสาร ATH เป็นสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงการลุกลามของไฟในวัสดุพอลิเมอร์ ที่มีกลไกกระบวนการหน่วงไฟโดยใช้กระบวนการดูดซับความร้อน (Heat absorption) เมื่ออุณหภูมิถึง 220 องศาเซลเซียส สาร ATH เกิดปฏิกิริยาสลายตัวเคมีแตกตัวเป็นโมเลกุลน้ำออกมาในระหว่างการเผาไหม้ และเกิดชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ปกป้องที่บริเวณผิวชิ้นงาน เพื่อป้องกันความร้อน และลดปริมาณออกซิเจนจากภายนอกทำให้อุณหภูมิ (ความร้อน) บริเวณพื้นผิวลดลง [6] ดังแสดงในภาพที่ 2(a) ซึ่งเป็นการตัดวงจรของปัจจัยที่ทำให้เกิดการติดไฟได้ [3] ดังนั้น การเติมสาร ATH ในปริมาณ เท่ากับ 90 pph จึงสามารถเกิดการดูดซับความร้อนและมีการปล่อยน้ำระหว่างการเผาไหม้ที่สามารถลดอุณหภูมิพื้นผิวของพอลิเมอร์ได้อย่างรวดเร็ว จึงส่งผลทำให้มีความต้านทานการติดไฟที่ดี และมีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2 กลไกการหน่วงไฟของวัสดุเชิงประกอบ rHDPE ที่ผสมสารหน่วงไฟ a) สาร ATH b), c) สาร ZB

ส่วนวัสดุเชิงประกอบ rHDPE ที่เติมสารหน่วงไฟชนิด ZB ที่ปริมาณ 90 และ 120 pph พบว่าระดับการติดไฟของวัสดุเชิงประกอบในระดับ V-2 และพบการเกิดหยดไฟขึ้นขณะเกิดการเผาไหม้ในการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากสาร ZB เกิดกลไกการหน่วงไฟขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 320 องศาเซลเซียส จึงเกิดการสลายตัวทางโครงสร้างเคมีจากดัดกลืนพลังงาน โมเลกุลของน้ำถูกปล่อยออกมา การสลายตัวนี้ทำให้เกิดไอน้ำและกรดบอริก สลายตัวเป็นชั้นโบรอนออกไซด์ปกคลุมบนผิวชิ้นงาน แสดงในภาพที่ 2(b) ซึ่งน้ำที่ปล่อยออกมาจากเชิงคอปเรตเจือจางก๊าซที่ติดไฟได้และทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟลดลง ชั้นโบรอนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันที่ผิว (เขม่า) ลดปริมาณออกซิเจนที่เป็นปัจจัยในการติดไฟ แต่พบว่า rHDPE ที่ได้รับความร้อนและเกิดการลุกไหม้เริ่มหลอมเหลวก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวเป็นน้ำได้ ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส จึงไม่สามารถลดอุณหภูมิที่พื้นผิวได้ทันที ทำให้พอลิเมอร์บางส่วนเกิดเป็นหยดไฟ ค่าการหน่วงไฟอยู่ในระดับ V-2 แสดงในภาพที่ 2(c) โดยระดับการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 และค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (LOI) แสดงในตารางที่ 2

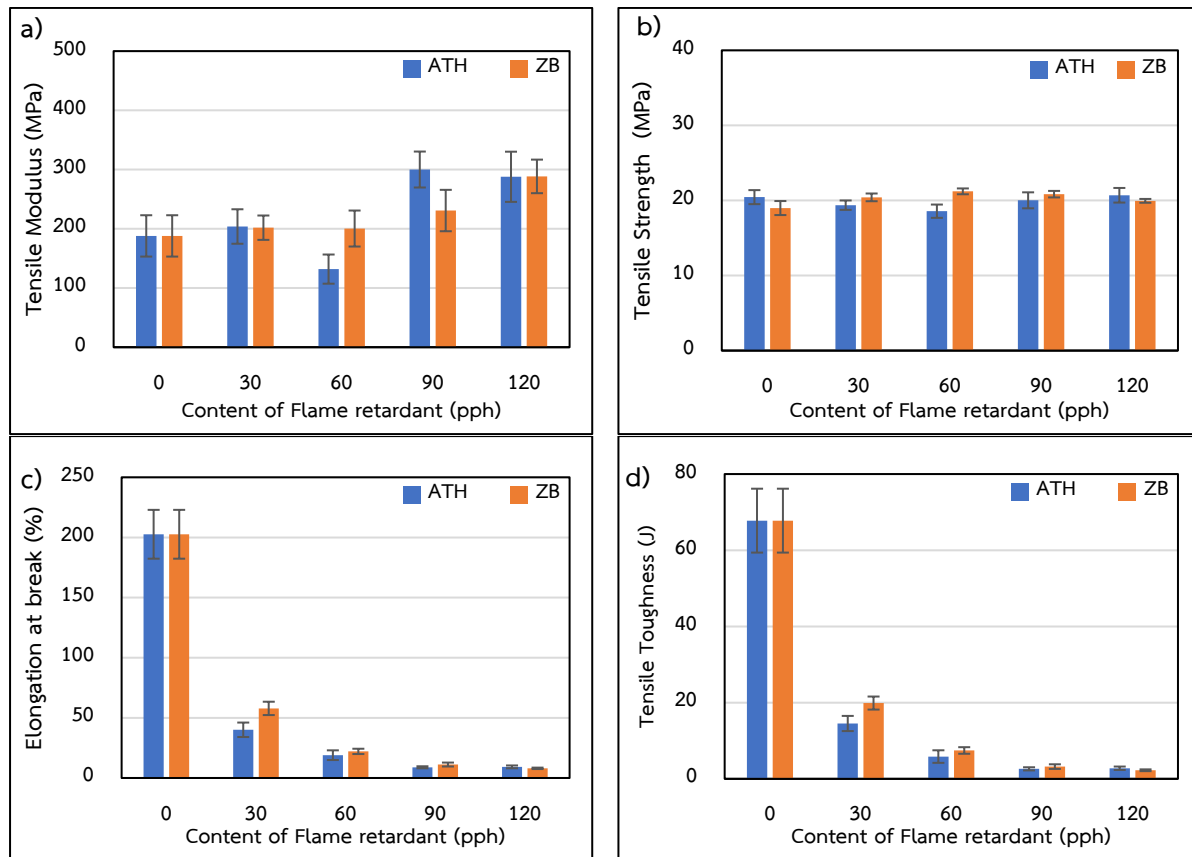
ตารางที่ 2 การทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 และค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (LOI)

สูตร	การทดสอบ UL-94	การทดสอบ LOI	สูตร	การทดสอบ UL-94	การทดสอบ LOI
rHDPE			rHDPE		
30ATH			30ZB		
60ATH			60ZB		
90ATH			90ZB		
120ATH			120ZB		

ผลทดสอบสมบัติเชิงกลของ rHDPE ที่เติมสาร ATH และ สาร ZB

การทดสอบสมบัติเชิงกลด้านมอดุลัสแรงดึง ความทนต่อแรงดึง การยืดตัวที่จุดขาด และค่าความเหนียวดึงของวัสดุเชิงประกอบ rHDPE ที่เติมสาร ATH และ สาร ZB พบว่าการเติมสารหน่วงไฟ ตั้งแต่ 30 -120 pph ไม่ส่งผลต่อค่ามอดุลัสแรงดึง และสมบัติความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ rHDPE โดยมีค่าความทนต่อแรงดึง ในช่วงระหว่าง 18-21 MPa แสดงในภาพที่ 3 (a) และ ภาพที่ 3 (b) ตามลำดับ (โดยเฉพาะการเติมสาร ATH และ สาร ZB ที่ปริมาณ 90 และ 120 pph) ทั้งนี้เนื่องจากการเติมสารหน่วงไฟชนิด ATH และ ZB ในวัสดุเชิงประกอบ rHDPE มีการกระจายตัวใน rHDPE (เมทริกซ์เฟส) ที่ดี และมีการยึดเกาะระหว่างเฟสของเมทริกซ์ และอนุภาคของสารตัวเติมที่ดี ดังแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ rHDPE ที่เติมสาร ATH และ ZB ที่ปริมาณ 120 pph ดังแสดงในภาพที่ 4(b-c) โดยค่ามอดุลัสแรงดึง และความทนแรงดึงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้พบว่า ค่าการยืดตัวที่จุดขาด และความเหนียวดึง มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสาร ATH และสาร ZB ที่เพิ่มขึ้น แสดงดังในภาพที่ 3(c-d) ทั้งนี้เนื่องจากการเติมสาร ATH และสาร ZB ที่มีอนุภาคของแข็ง (Rigidity) เมื่อเติมลงในวัสดุเชิงประกอบ rHDPE ส่งผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของวัสดุเชิงประกอบ rHDPE ถูกจำกัดการเคลื่อนไหว (Stiffness) [7,8] จึงผลทำให้สมบัติการยืดตัวและความเหนียวดึง มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติมของสาร ATH และสาร ZB โดยวัสดุมีพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุแบบเปราะ (Brittle Fracture) [8, 9] ซึ่งมีลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ rHDPE ที่เติมสาร ATH และสาร ZB มีความต่อเนื่องของเฟสเทียบเคียงกับ rHDPE ที่ไม่เติมสารหน่วงไฟ แสดงในภาพที่ 4(a)

ดังนั้น ลักษณะพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบกับสารตัวเติม มีความสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลโดยตรงของวัสดุเชิงประกอบ

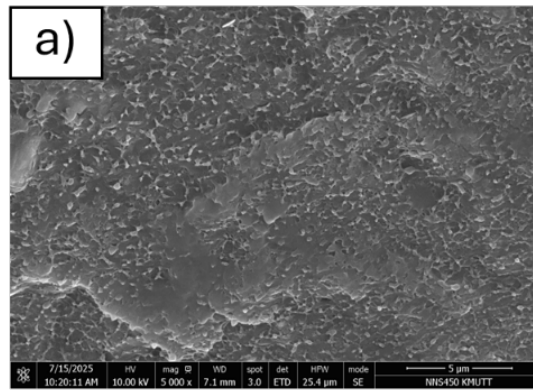


ภาพที่ 3 สมบัติด้านแรงดึง และความเหนียวดึงของวัสดุเชิงประกอบ rHDPE ที่ผสมสาร ATH และ ZB

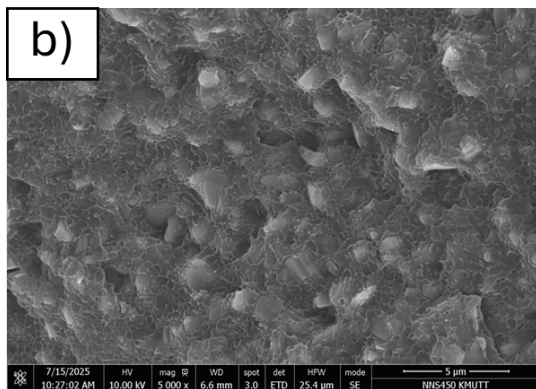
a) มอดุลัสแรงดึง b) ความทนต่อแรงดึง c) การยืดตัวที่จุดขาด และ d) ความเหนียวดึง

ผลทดสอบค่าดัชนีการไหม้และความหนาแน่นของ rHDPE ที่เติมสาร ATH และสาร ZB

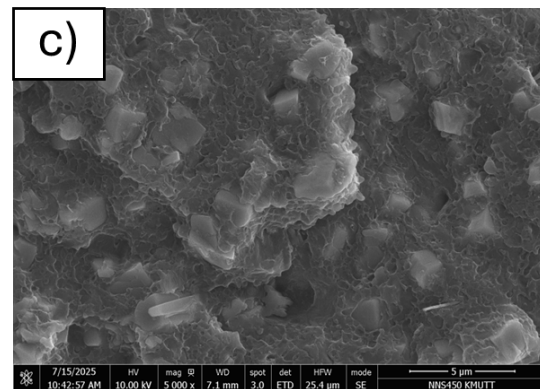
จากตารางที่ 3 แสดงค่าดัชนีการไหม้และความหนาแน่นของ rHDPE ที่ผสมสาร ATH และ ZB พบว่าวัสดุเชิงประกอบ rHDPE มีค่าดัชนีการไหม้เท่ากับ 1.31 g/10 min การผสมสาร ATH และ ZB ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีการไหม้มีแนวโน้มที่ลดลง (แสดงถึงความสามารถการไหม้ตัวได้ยาก) โดยผสมสาร ATH และ ZB ปริมาณ 120 pph มีค่า ดัชนีการไหม้เท่ากับ 0.32 และ 0.48 g/10 min ตามลำดับ โดยวัสดุเชิงประกอบ rHDPE มีค่าความหนาแน่น เท่ากับ 0.981 g/cm³ เมื่อเติมสาร ATH และ ZB ในวัสดุเชิงประกอบ rHDPE ที่ปริมาณ 30-120 pph พบว่า ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และการเติมสาร ATH และ ZB ที่ปริมาณ 120 pph พบว่า มีความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ 1.419 และ 1.514 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมหน่วงไฟเป็นกลุ่มโลหะออกไซด์มีความหนาแน่นที่มาก จึงส่งผลทำให้ความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบ rHDPE มีค่าเพิ่มขึ้น



a) ไม่เติมสารหน่วงไฟ



b) สาร ATH



c) สาร ZB

ภาพที่ 4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของของวัสดุเชิงประกอบ rHDPE a) ไม่เติมสารหน่วงไฟ b) สาร ATH และ c) สาร ZB

ตารางที่ 3 ค่าดัชนีการไหม้และความหนาแน่นของ rHDPE ที่ผสมสาร ATH และ ZB

Sample	Content of flame retardants (pph)	MFI (g/10 min)	Density (g/cm ³)
rHDPE	0	1.31 ± 0.00	0.981
rHDPE/ATH	30	0.95 ± 0.02	1.119
	60	0.72 ± 0.01	1.212
	90	0.30 ± 0.01	1.367
	120	0.32 ± 0.01	1.419
rHDPE/ZB	30	0.90 ± 0.03	1.137
	60	0.71 ± 0.01	1.284
	90	0.56 ± 0.02	1.375
	120	0.48 ± 0.02	1.514

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่า การเติมสารหน่วงไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ (ATH) ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านการแปรรูปใช้ใหม่ (rHDPE) ที่ปริมาณ 90 และ 120 pph สามารถต้านทานการติดไฟ (UL-94) ในระดับ V-0 (วัสดุจัดอยู่ในกลุ่มไม่ติดไฟ) และค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (LOI) อยู่ในช่วง 23-24 ที่มีประสิทธิภาพการต้านทานการติดไฟดีกว่าสารซิงค์บอเรต (ZB) ที่มีความต้านทานการติดไฟในระดับ V-2 และพบว่าการเติมสารหน่วงไฟทั้งสองชนิดลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการแปรรูปใช้ใหม่ ไม่ส่งผลต่อสมบัติมอดูลัสแรงดึงและความทนต่อแรงดึง แต่ค่าการยืดตัวที่จุดขาด (elongation at break) และความเหนียวดึง (Tensile toughness) มีค่าลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้พบว่าค่าดัชนีการไหล (Melt flow index; MFI) มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารหน่วงไฟที่เพิ่มขึ้น

ดังนั้น การเติมสารหน่วงไฟ ATH ที่ปริมาณ 90 pph ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการแปรรูปใช้ใหม่ มีสมบัติต้านทานการติดไฟ และสมบัติเชิงกลด้านทนต่อแรงดึงได้ดี เป็นการขยายขอบเขตการใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกกรีไซเคิลสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมในระบบท่อสายไฟในอาคาร กล้องควบคุมอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถตอบสนองแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่ลดการปล่อยมลพิษและสิ่งแวดล้อม

5. ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาผลการใช้สารหน่วงไฟแบบผสม และทดสอบสภาวะการใช้งานด้วยรังสียูวี/ความร้อน ที่มีต่อสมบัติการติดไฟ สมบัติเชิงกล สมบัติกายภาพ สันฐานวิทยา รวมถึงกลไกหลังจากการทดสอบเร่งสภาวะที่มีต่อวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยฯ ขอขอบพระคุณทุนเพชรพระจอมเกล้ามหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ขอขอบคุณโครงการวิจัยทุน Fundamental Fund; FF สนับสนุนจาก สกสว ประจำปีงบประมาณ 2567 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนทุนวิจัย และบริษัท เอส.พี.พลาสติก อินดัสตรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุพลาสติกกรีไซเคิล และหน่วยวิจัยเฉพาะทางเทคโนโลยีรังสีสำหรับวัสดุขั้นสูง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Gandhi, N., Farfaras, N., Wang, N.-H., & Chen, W.-T. (2021). Life cycle assessment of recycling high-density polyethylene plastic waste. *Journal of Renewable Materials*, 9, 1463–1483. <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.014262>
- [2] Villamil, D. A., & Schiraldi, D. A. (2020). Biomolecules as flame retardant additives for polymers: A review. *Polymers*, 12(4), 849. <https://doi.org/10.3390/polym12040849>
- [3] Shen, J. A.-O., Liang, J., Lin, X., Lin, H., Yu, J., & Wang, S. (2022). The flame-retardant mechanisms and preparation of polymer composites and their potential application in construction engineering. *Polymers*, 14(1), 82. <https://doi.org/10.3390/polym14010082>
- [4] Sanchez-Olivares, G., Sanchez-Solis, A., Calderas, F., Medina-Torres, L., Herrera-Valencia, E. E., Castro-Aranda, J. I., Manero, O., Di Blasio, A., & Alongi, J. (2013). Flame-retardant high-density polyethylene optimized by on-line ultrasound extrusion. *Polymer Degradation and Stability*, 98(11), 2153–2160. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.08.007>
- [5] Sale Group Thailand. (2020, December 15). มาตรฐานการลามไฟ UL94 คืออะไร?. Salegroupthailand.com.



<https://www.salegroupthailand.com/article>

- [6] Yuan, J., Chen, L., Huang, R., Zhang, Z., Zhang, W., Liu, J., Zhang, Y., & Yang, R. (2023). Enhanced flame retardancy and mechanical properties of PA6 composites using DOPO–zinc borate synergistic system. *RSC Advances*, 13(35), 23979–23988. <https://doi.org/10.1039/D3RA03536K>
- [7] Rezvani Ghomi, E., Khosravi, F., Mossayebi, Z., Saedi Ardahaei, A., Morshedi Dehaghi, F., Khorasani, M., Neisiany, R. E., Das, O., Marani, A., Mensah, R. A., Jiang, L., Xu, Q., Försth, M., Berto, F., & Ramakrishna, S. (2020). The flame retardancy of polyethylene composites: From fundamental concepts to nanocomposites. *Molecules*, 25(21), 5157. <https://doi.org/10.3390/molecules25215157>
- [8] Chen, L., Zhang, X., & Huang, Z. (2024). Functionalized graphene oxide for interfacial enhancement in polymer nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 245, 110811. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110811>
- [9] Zhou, H., Lin, T., & Chen, K. (2022). Mechanical response of HDPE/ZnO nanocomposites with surface modified nanoparticles. *Journal of Materials Science*, 57(18), 8964–8977. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07168-y>