

# การปรับปรุงสมบัติการทนไฟของโฟมยาง ธรรมชาติ ด้วยสารเลเซอร์ดับเพลิงไฮดรอกไซด์

วดุลย์ นิ่มไฟบุลย์ และแคะริน บุญช่วย

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยมหิดล

## บทนำ

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ประเภทโฟมจากน้ำยางธรรมชาติ เช่น หมอนและที่นอน ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่สร้างรายได้จำนวนมากให้กับประเทศโฟมจากน้ำยางธรรมชาติมีคุณสมบัติที่โดดเด่นกว่าโฟมที่ได้จากการสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ เช่น ความแข็งแรง ความคืนตัวและการระบายอากาศ แต่เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของยางธรรมชาติและลักษณะที่เป็นโพรงอากาศของโฟม ทำให้สามารถติดไฟและลามไฟได้ง่ายเมื่อเกิดความร้อนหรือเกิดประกายไฟ (Blackley. 2012) นอกเหนือจากนั้นในอนาคตบางประเทศอาจกำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านมาตรฐานการทนไฟ ทำให้ผลิตภัณฑ์โฟมยางธรรมชาติของไทยอาจสูญเสียทางการตลาดได้ ดังนั้นการปรับปรุงคุณสมบัติการทนไฟของโฟมยางธรรมชาติจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานของโฟมยางธรรมชาติและเป็นการเพิ่มความสามารถทางการแข่งขันให้กับผลิตภัณฑ์ยางพาราของไทย การปรับปรุงสมบัติ

การทนไฟสามารถทำได้โดยการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติและการเติมสารหน่วงการติดไฟ flame retardant (FR) additives ในการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาตินั้นสามารถทำได้โดยการทำปฏิกิริยาเคมีในน้ำยางธรรมชาติเพื่อเติมหมู่ฮาโลเจน เช่น คลอรีน หรือโบรมีน ไปยังสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติหรือผสมกับยางที่มีหมู่ฮาโลเจน (Blackley. 2012), (แวนอาแซ แวหามะ และคณะ. 2555) เมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดก๊าซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์มากปกคลุมที่ผิวชิ้นงานเป็นการป้องกันการปฏิกิริยาออกซิเดชันและเจือจางก๊าซออกซิเจนที่เป็นปัจจัยสำคัญของการติดและลามไฟ อย่างไรก็ตามแก๊สที่เกิดขึ้นนั้นมีความเป็นพิษสูงทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและผู้ใช้งาน การเติมสารหน่วงไฟเป็นอีกแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติการทนไฟของโฟมยางธรรมชาติได้ (Pearce. 1986), (แวนอาแซ แวหามะ และคณะ. 2556), (Kutz. 2011) ซึ่งสารหน่วงไฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ 1. กลุ่มสารฮาโลเจน เช่น

chlorinated paraffins ซึ่งมีกลไกการต้านการติดไฟและข้อเสียเช่นเดียวกันกับการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติด้วยสารฮาโลเจนดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น 2. กลุ่ม mineral-based เช่น aluminium hydroxide (ATH) โดยหวังไฟจากการเกิดปฏิกิริยาเอ็นโดเทอร์มิกและปลดปล่อยน้ำจึงช่วยลดความร้อนในระบบแต่การใช้สารกลุ่มนี้มีข้อจำกัด คือ ต้องใช้ในปริมาณที่สูงมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักจึงจะทำให้มีประสิทธิภาพในการต้านการติดไฟ ซึ่งทำให้โพลีเมอร์สูญเสียความนิ่มและความยืดหยุ่นได้ 3. สารกลุ่ม phosphorous-based เช่น ammonium polyphosphate สารกลุ่มนี้เมื่อเกิดการเผาไหม้จะสร้างถ่าน (char) ที่เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กมากปกคลุมผิวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะช่วยชะลอการลามไฟ แต่จะทำงานได้ดีในพอลิเมอร์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น พอลิยูรีเทน ในปัจจุบันนอกเหนือจากสารหน่วงติดไฟที่กล่าวข้างต้น พบว่ายังมีสารอีกกลุ่มหนึ่งที่มีคุณสมบัติในการต้านทาน/หน่วงการติดไฟ คือสารประเภท nano filler ในกลุ่มของ nano clay เนื่องจากสารกลุ่มนี้ทนอุณหภูมิสูง มีโครงสร้างที่ลักษณะเป็นแผ่น/ชั้น จึงสามารถป้องกันหรือหน่วง การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและป้องกันออกซิเจนได้โดยใช้ในปริมาณที่น้อย อีกทั้งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและผู้ใช้งาน (Norouz et al., 2015) จึงทำให้ได้รับความสนใจในการนำมาใช้เป็นสารลดการติดไฟเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหนึ่งในสารกลุ่ม nano filler ที่น่าสนใจได้แก่ สารเลเยอร์ดับเพลิงไฮดรอกไซด์ (layered double hydroxide, LDH) ซึ่งเป็นสารโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุโดยรวมของชั้นเป็นบวกซ้อนกัน

เป็นชั้น โดยมีการดุลประจุด้วยชั้นของไอออนประจุลบ สาร LDH เป็นสารหน่วงไฟที่ดีกว่าสารในกลุ่ม nano clay ตัวอื่น เนื่องจากมีรายงานว่า สาร LDH สามารถหน่วงไฟได้จากหลายกลไก เช่น จากการป้องกันการออกซิเจนจากโครงสร้างที่เป็นแผ่น โดยหวังไฟจากการเกิดปฏิกิริยาเอ็นโดเทอร์มิกและปลดปล่อยน้ำเมื่อได้รับความร้อน และยังสามารถสร้าง char ได้ด้วยตัวเอง (Gao et al, 2014) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการปรับปรุงคุณสมบัติการทนไฟของโพลีเมอร์คอมโพสิตด้วยสาร LDH ซึ่งมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยคาดหวังว่าโพลีเมอร์คอมโพสิตที่ได้จะยังมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี

### วัตถุประสงค์

ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติการทนไฟของโพลีเมอร์คอมโพสิตด้วยสารเลเยอร์ดับเพลิงไฮดรอกไซด์ layered double hydroxide หรือ LDH เพื่อให้ได้สูตรในการผลิตผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์คอมโพสิตที่ทนไฟ

### วิธีการศึกษา

#### 1. เตรียมตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติผสม LDH

นำน้ำยางผสมกับ 2.5 phr potassium oleate โดยทำการ stir ด้วย magnetic stirrer เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นนำ dispersion ของ LDH เติมลงไปใต้น้ำยางและทำการ stir ด้วย magnetic stirrer อีกเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้สารเข้ากันเป็นเนื้อเดียว

ตารางที่ 1 สูตรสารเคมีที่ใช้ในการผลิตโฟมยางธรรมชาติที่ผสม LDH

ส่วนประกอบ	หน้าที่	ความเข้มข้น (% w/w)	ปริมาณ (phr)
น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA)	เนื้อโฟม	60	100
Potassium oleate (K-oleate) ในรูปสารละลาย	สารก่อฟอง	15	2.5
Sulfur ในรูปสารแขวนลอย	สารคงรูป	50	1.5
Antioxidant (Lowinox® CPL) ในรูปสารแขวนลอย	สารต้านการเสื่อมสภาพ	50	1
Zinc diethyldithiocarbamate (ZDEC) ในรูปสารแขวนลอย	สารเร่งการคงรูป	50	1
Zinc 2-mercaptobenzthiozolate (ZMBT) ในรูปสารแขวนลอย	สารเร่งการคงรูป	60	1
Zinc oxide (ZnO) ในรูปสารแขวนลอย	สารส่งเสริมการก่อเจล	50	5
Diphenylguanidine (DPG) ในรูปสารแขวนลอย	สารส่งเสริมการก่อเจล	30	1
Sodium silicofluoride (SSF) ในรูปสารแขวนลอย	สารก่อเจล	20	1.5
LDH ในรูปสารแขวนลอย	สารหน่วงไฟ	40	0,10,20,30,40

2. เตรียมโฟมยางธรรมชาติที่ผสม LDH ที่ปริมาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิค Dunlop process โดยใช้สูตรตามตารางที่ 1

3. ขั้นตอนในการเตรียมโฟมยางธรรมชาติผสม LDH

นำน้ำยางธรรมชาติผสมกับ LDH ที่ปริมาณต่าง ๆ จากนั้นปั่นผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง magnetic stirrer เป็นระยะ 5 นาที จากนั้นเติม K-oleate, sulfur, ZDEC, ZMBT และ Lowinox® CPL ลงในน้ำยางธรรมชาติที่ผสม LDH แล้วควนให้เข้ากันด้วยแท่งแก้ว จากนั้นนำน้ำยางธรรมชาติที่ผสมสารเคมีข้างต้นเข้าเครื่องตีโฟมแบบ batch (KENWOOD®) ปั่นด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที (revolutions per minute, rpm) เป็นเวลา 4 นาทีเพื่อไล่แอมโมเนีย

และเพื่อให้สารเคมีเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นเร่งความเร็วของการปั่นเป็น 220 rpm เพื่อเป็นการเตรียมตีขึ้นโฟมเป็นระยะเวลา 1 นาที จากนั้นเร่งความเร็วของการปั่นเป็น 380 rpm เพื่อเป็นการตีให้เกิดโฟมเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นปรับลดความเร็วของการปั่นเป็น 220 rpm เพื่อย่อยฟองให้มีขนาดเล็กลงเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติม ZnO และ DPG พร้อมทั้งลดความเร็วของการปั่นเป็น 180 rpm เพื่อให้ได้ฟองที่มีความละเอียดและสม่ำเสมอโดยปั่นต่อไป 2 นาที จากนั้นเติม SSF ปั่นให้เข้ากันเป็นเวลา 40 วินาที โดยปริมาณสารเคมีต่าง ๆ ดังที่แสดงในตารางที่ 1 ขึ้นถัดไป เทโฟมที่ได้ลงในแม่พิมพ์ทิ้งไว้ให้เกิดการเจลเมื่อโฟมยางเจลอย่างสมบูรณ์แล้วนำแม่พิมพ์เข้าในหม้อนึ่งไอน้ำที่ความร้อน 100 °C เพื่อให้

เกิดการคงรูป (vulcanization) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำโฟมยางธรรมชาติที่ได้ออกจากแม่พิมพ์ ล้างด้วยน้ำสะอาด 3 รอบ เพื่อกำจัดสารเคมีบางส่วนเกิน จากนั้นอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยในการเตรียมโฟมยางนั้น ได้ศึกษาเปรียบเทียบกับโฟมยางที่ผสม ATH โดยใช้วิธีการเดียวกันในการเตรียมตัวอย่าง

#### 4. การวิเคราะห์ผลของ LDH ต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของโฟมยางธรรมชาติ

- วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน วิทยาโฟมยางธรรมชาติและลักษณะการกระจายตัวของสาร ด้วยเทคนิค SEM-EDX (FE-SEM HITACHI SU8010) ตัดชิ้นตัวอย่างโฟม ติดบน stub เคลือบตัวอย่างด้วยทอง ศึกษาที่กำลังขยาย 50 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

- ความเค้นแรงอัด (compressive stress, kPa) ทดสอบโดยเครื่อง universal mechanical tester (Instron 5569, USA) ตามมาตรฐาน ISO 7743 ตัวอย่างโฟมยางขนาด 5x5x5 cm ถูกกดด้วยหัวกดที่มีความเร็ว 50 mm/min จนถึงระยะ 50% ของความสูงชิ้นงาน โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Compressive stress} = F/A$$

โดยที่ compressive stress คือ compressive stress at 50% deformation (kPa), F คือ แรงที่ใช้ในการกดให้ตัวอย่างเปลี่ยนแปลงความสูงไป 25% (kN) และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (m<sup>2</sup>)

- Compression set ตัวอย่างโฟมยางขนาด 5x5x5 cm ถูกวางลงใต้แผ่นอัดกดให้ยุบตัว 50% ของความสูงเดิมโดยใช้แท่งเหล็กที่มีความสูง 50% ของความสูงควบคุมความหนาของชิ้นงานที่ทดสอบให้คงที่ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำฟองน้ำมาวัดความสูง ตามสูตร

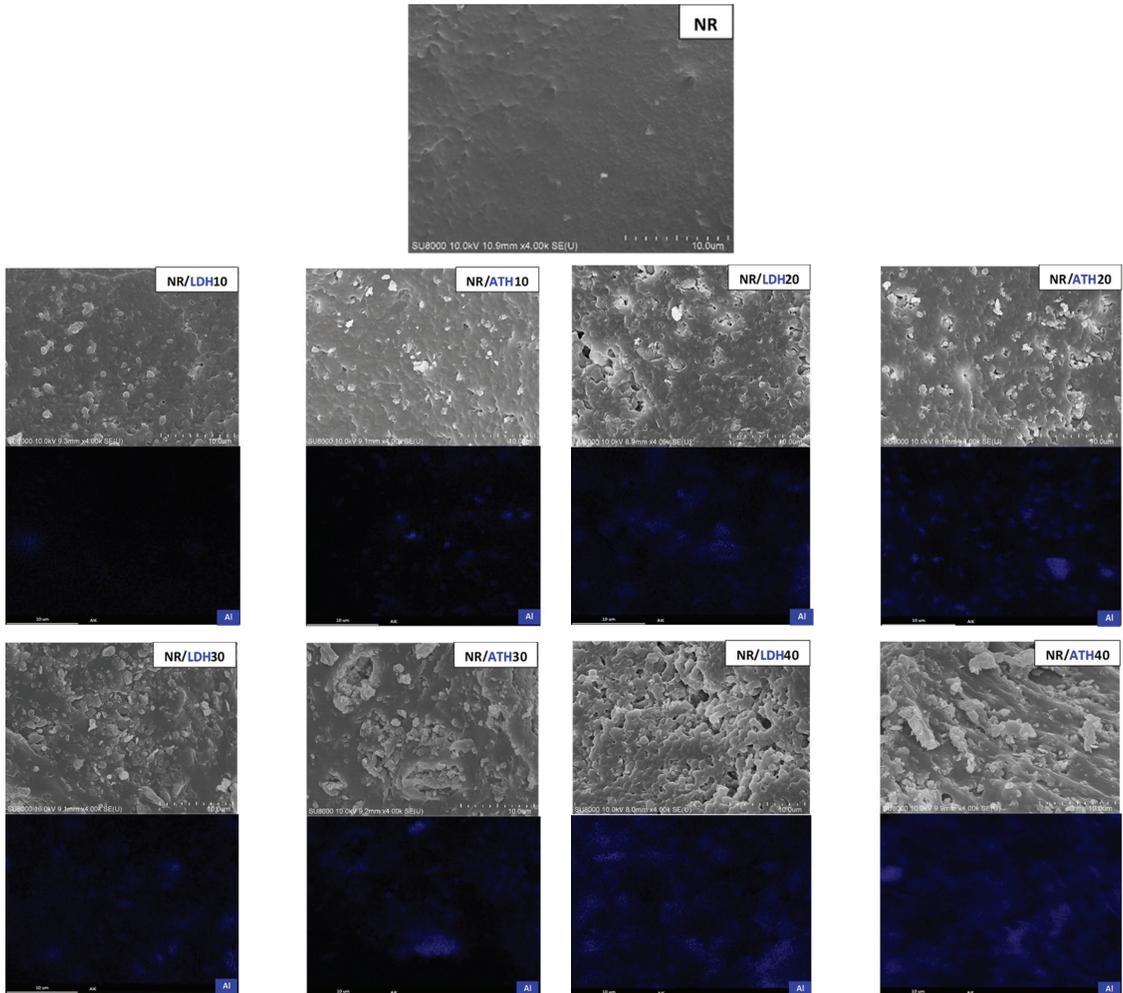
$$\text{Compression set (\%)} = \left( \frac{t_0 - t}{t_0} \right) \times 100$$

โดย  $t_0$  คือ ความสูงก่อนการทดสอบ (mm) และ  $t$  คือ ความสูงหลังการทดสอบ

#### 5. การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติทางความร้อนและสมบัติการทนไฟของโฟมยางธรรมชาติที่ปรับปรุงด้วย LDH

- สมบัติเชิงความร้อนวิเคราะห์ โดยเทคนิค thermogravimetric analysis (TGA) and derivative thermogravimetry (DTG) (Netzsch TGA 209 F1) ใช้ heating rate 20°C/min ภายใต้บรรยากาศ nitrogen และ oxygen ในอัตราส่วน 80:20 จากอุณหภูมิ 25 to 800°C และวิเคราะห์ระยะเวลาเกิดออกซิเดชัน (Oxidation induction time) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ISO 11357-1:2009

- สมบัติการต้านไฟด้วยเทคนิค cone calorimetry วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ISO 5660 ด้วยเครื่องทดสอบการลุกติดไฟ (FTTi-ConeMini) และการทดสอบลามไฟ Horizontal burning foam test ตามมาตรฐาน ASTM D4986 ด้วยเครื่อง Fire Tester (FTT UL 94)

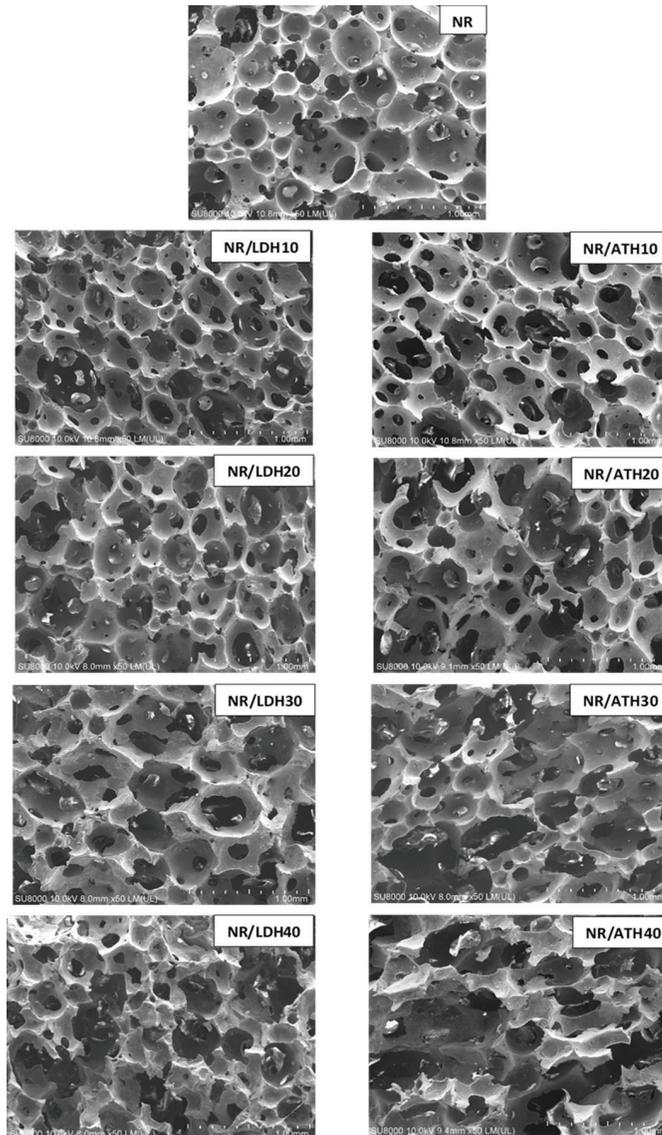


ภาพที่ 1 ภาพถ่าย SEM ลักษณะการกระจายตัวของสารหน่วงไฟ LDH และ ATH ในโฟมยางธรรมชาติ ที่ปริมาณต่าง ๆ

### ผลการศึกษา

ภาพที่ 1 แสดงภาพถ่าย SEM ของลักษณะการกระจายตัวของสารหน่วงไฟ LDH และ ATH ที่ 0 10 20 30 และ 40 phr จากผลศึกษาการกระจายตัวของสารหน่วงไฟ ในโฟมยางธรรมชาติ (ศึกษาเปรียบเทียบกับสารหน่วงไฟ Aluminium trihydroxide (ATH) ) พบว่าเมื่อเพิ่ม ปริมาณสารหน่วงไฟทั้ง LDH และ ATH การกระจายของสารหน่วงไฟตัวในโฟมยางธรรมชาติลดลง เกิดการ

รวมตัวกันของสารหน่วงไฟมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีของ LDH ที่ปริมาณสูงพบว่ายังสามารถกระจายตัวได้ดีกว่า พบการรวมกลุ่มกันเป็นก้อนที่เล็กกว่าโฟมยางธรรมชาติที่ผสม ATH ซึ่งในกรณีของATH พบว่ามีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่มากอย่างเห็นได้ชัด การรวมตัวกันเป็นลักษณะก้อนขนาดใหญ่ นั้นอาจทำให้โครงสร้างเซลล์เกิดการพังทลายได้เมื่อศึกษาผลของสารหน่วงไฟ LDH ต่อโครงสร้าง และสมบัติเชิงกลของโฟมยางธรรมชาติ



ภาพที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของโฟมยางธรรมชาติเมื่อเติมสารหน่วงไฟ LDH และ ATH ที่ปริมาณต่าง ๆ

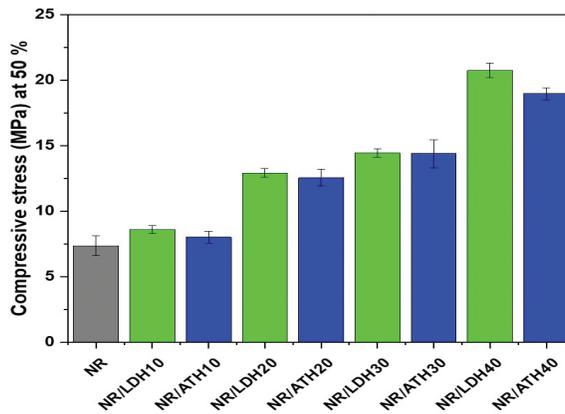
### ผลของสารหน่วงไฟต่อโครงสร้างโฟมยางธรรมชาติ

เนื่องจากโครงสร้างเซลล์ของโฟมน้ำยางธรรมชาติเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อสมบัติของโฟมน้ำยางธรรมชาติอย่างมาก จึงจำเป็นต้องศึกษาค้นคว้าผลของสารหน่วงไฟที่มีต่อโครงสร้างของโฟมน้ำยางธรรมชาติ ผลของสารหน่วงไฟต่อโครงสร้าง

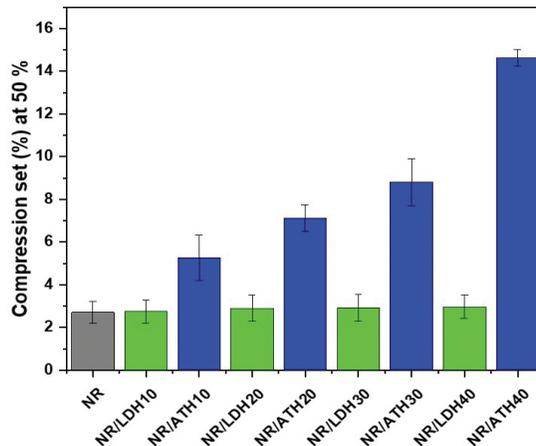
ของโฟมน้ำยางธรรมชาติสามารถดูได้จาก ภาพที่ 2 ซึ่งแสดงภาพ SEM ของโฟมน้ำยางธรรมชาติเมื่อเติมสารหน่วงไฟในปริมาณที่ต่ำ (10 phr) จนถึงปริมาณสูงสุด (40 phr) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมสารหน่วงไฟในปริมาณต่ำ (10 phr) ลักษณะของโครงสร้างของเซลล์โฟมยางทั้งในกรณีของ LDH และระบบ ATH ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ไปจากเดิมก่อนเติมสารหน่วงไฟ แสดงให้เห็นว่าการเติมสารหน่วงไฟในปริมาณที่ต่ำไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อโครงสร้างของโพน้ำยางธรรมชาติ แต่เมื่อมีการเติมสารหน่วงไฟในปริมาณสูงตั้งแต่ 30 phr พบว่าในกรณีของ ATH นั้นโครงสร้างเซลล์เริ่มเกิดการพังทลายมากขึ้นและเห็นได้ชัดเจนมากเมื่อมีการเติมสารหน่วงไฟ ATH ที่ปริมาณ 40 phr ต่างจากกรณีของการเติมสารหน่วงไฟ LDH

ที่ยังรักษาโครงสร้างเซลล์ของโพน้ำยางธรรมชาติไว้ได้และมีการพังทลายที่น้อยกว่าในระบบที่เติมสารหน่วงไฟ ATH ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษากการกระจายตัวของสารหน่วงไฟในโพน้ำยางธรรมชาติ การรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ส่งผลให้ผนังเซลล์ที่บางไม่สามารถรองรับการฝังตัวของอนุภาคได้ โครงสร้างเซลล์ผนังบางจึงพังทลายลง



ภาพที่ 3 ค่า Compressive stress ที่ 50% strain ของโพน้ำยางธรรมชาติเมื่อเติมสารหน่วงไฟที่ ปริมาณต่าง ๆ



ภาพที่ 4 ค่า compression set ของโพน้ำยางธรรมชาติเมื่อเติมสารหน่วงไฟที่ปริมาณต่าง ๆ

## ผลของ LDH ต่อสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ผสม (ศึกษาเปรียบเทียบกับ ATH)

ค่าแรงเชิงกดหรือ Compressive stress เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านแรงที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโพลีเมอร์ผสม ภาพที่ 3 แสดงค่า Compressive stress ที่ 50% strain ของโพลีเมอร์ผสมเมื่อเติมสารหน่วงไฟที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่า เมื่อมีการเติมสารหน่วงไฟ LDH และ ATH ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีความแข็งที่ปริมาณ 10 phr โพลีเมอร์ผสมมีค่า compressive stress เพิ่มขึ้นจากเดิมก่อนเติมเล็กน้อย โดยที่โพลีเมอร์ผสมที่เติม 10 phr LDH และ ATH ให้ค่า compressive stress ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเพิ่มความแข็งของ LDH และ ATH ที่มีความใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟมากขึ้นทั้งในระบบ LDH และ ATH พบว่า โพลีเมอร์ผสมมีค่า compressive stress ที่มากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถระบุได้ว่าสารหน่วงไฟที่ใช้มีผลทำให้โพลีเมอร์ผสมมีความแข็งขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่า compressive stress ระหว่างโพลีเมอร์ผสมที่เติมสารในระบบ LDH และ ATH ที่ปริมาณต่ำกว่า 40 phr พบว่าโพลีเมอร์ผสมที่เติม LDH จะให้ค่าที่สูงกว่าเล็กน้อย แต่เมื่อเติมสารหน่วงไฟในปริมาณที่สูงตั้งแต่ 40 phr ขึ้นไป พบว่า โพลีเมอร์ผสมที่เติม LDH จะมีค่า compressive stress ที่สูงกว่าในระบบ ATH ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจากสิ่งที่ส่งผลต่อค่า compressive stress นอกเหนือจากชนิดของ filler และปริมาณแล้วนั้น โครงสร้างเซลล์ของโพลีเมอร์ผสมยังส่งผลต่อค่า

compressive stress ด้วยเช่นกัน ระบบ ATH ที่ปริมาณสูงทำให้โครงสร้างเซลล์เกิดการพังทลายได้ดังที่แสดงในภาพที่ 2-3 ที่แสดงการพังทลายของเซลล์เมื่อเติม ATH ที่ 40 phr การที่โครงสร้างเซลล์ถูกทำลายไป ทำให้มีผนังเซลล์ที่มีหน้าที่รับแรงมีน้อยลงจึงทำให้ค่า compressive stress น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับ LDH ที่ใส่ปริมาณเท่ากันที่ 40 phr แต่มีโครงสร้างเซลล์ที่ดีกว่า compression set เป็นสมบัติเชิงกลที่มีความสำคัญต่อโพลีเมอร์ผสมเป็นอย่างมาก โดยเป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงความสามารถในการยืดหยุ่นคืนรูปกลับเมื่อได้รับแรงกด โดยค่า compression set ที่ต่ำแสดงถึงความสามารถในการคืนรูปกลับที่ดี ภาพที่ 4 แสดงค่า compression set ของโพลีเมอร์ผสมเมื่อเติมสารหน่วงไฟที่ปริมาณต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมสารหน่วงไฟ LDH มีค่า compression set ของโพลีเมอร์ผสมไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงจากก่อนเติม ซึ่งแตกต่างจากโพลีเมอร์ผสมที่เติมสารหน่วงไฟ ATH compression set ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบค่า compression set ของโพลีเมอร์ผสมที่เติม ATH และ LDH พบว่า LDH ทำให้โพลีเมอร์ผสมมีค่า compression set ที่ต่ำกว่า ATH ซึ่งอาจเกิดจากสมบัติพิเศษเฉพาะตัวของ LDH ที่เกิดจากขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมในด้านการปรับปรุงสมบัติด้าน compression set ซึ่งมีรายงานการวิจัยถึงความสามารถของ LDH ในการส่งเสริมสมบัติของยางให้มี compression set ที่ดีขึ้น (Cataldo, 2007) อีกทั้งกระบวนการจ่ายตัวในยางธรรมชาติของ LDH ที่ดีกว่าของ ATH ทำให้เกิดส่งผลดีต่อผลสมบัติ compression set

ตารางที่ 2 ค่า T5 (DTG) และ Tmax (DTG) ของโฟมน้ำยางธรรมชาติเมื่อเติมสารหน่วงไฟ เปรียบเทียบระบบ LDH และ ATH

Sample	T5 (°C)	Tmax (°C)
NR	303 ± 1	356 ± 2
ATH10	271 ± 2	363 ± 2
ATH20	289 ± 1	370 ± 2
ATH30	273 ± 2	405 ± 3
ATH40	260 ± 3	421 ± 3
LDH10	282 ± 2	360 ± 2
LDH20	256 ± 2	392 ± 2
LDH30	247 ± 2	411 ± 2
LDH40	243 ± 2	418 ± 2

ผลของ LDH ต่อสมบัติเชิงความร้อนของโฟมยางธรรมชาติ (ศึกษาเปรียบเทียบกับ ATH) ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน

สมบัติเชิงความร้อนนั้นเป็นสมบัติที่สำคัญสมบัติหนึ่งของวัสดุ โดยเป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการเสื่อมสภาพเมื่อใช้งานภายใต้สภาวะที่มีความร้อนยิ่งไปกว่านั้นสมบัติเชิงความร้อนยังมีความเกี่ยวข้องกับสมบัติการหน่วงไฟเมื่อทดสอบภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนเช่นเดียวกับการติดไฟ เนื่องจากกลไกการลามไฟในวัสดุพอลิเมอร์นั้น ขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดการลามไฟนั้นก็คือการเสื่อมสลายของพอลิเมอร์ (Camino et al., 1988) ซึ่งเมื่อพอลิเมอร์มีสมบัติเชิงความร้อนที่ดีจะมีความสามารถในการต้านทานต่อการเสื่อมสลายซึ่งสามารถบอกเป็นนัยได้ว่าพอลิเมอร์นั้นอาจมีสมบัติการหน่วงไฟที่ดีกว่าพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงความร้อนที่ไม่ดี ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบ

สมบัติเชิงความร้อนของโฟมน้ำยางธรรมชาติที่ปรับปรุงด้วยสารหน่วงไฟในระบบ LDH และ ATH ด้วยเทคนิค TGA ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ตารางที่ 2 แสดงผลทดสอบ TGA และ derivative thermogravimetry (DTG) โฟมยางธรรมชาติที่ปรับปรุงด้วยสารหน่วงไฟ LDH และ ATH จากการทดลอง ค่า T5 (DTG) ซึ่งคือค่าอุณหภูมิที่ตัวอย่างสูญเสียน้ำหนักไปร้อยละ 5 แสดงถึงการเริ่มต้นของการสลายตัวของวัสดุ โดยถ้าค่า T5 (DTG) อยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำลงหมายถึงมีการสลายตัวเกิดเร็วขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น พบว่าค่า T5 (DTG) ของทั้งระบบ LDH และ ATH มีค่าลดลงตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟขึ้นเป็น 40 phr พบว่าทั้งระบบ LDH และ ATH มีค่า T5 (DTG) ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าการสลายตัวในตัวอย่างเกิดขึ้นก่อนตัวอย่างที่ไม่เติมสารหน่วงไฟ ซึ่งการสลายตัวที่เกิดขึ้นนี้เป็นการสลายตัวของสารหน่วงไฟเมื่อเติมลงในปริมาณที่สูงจึงเห็นการ

เปลี่ยนแปลง ซึ่ง LDH จะมีการเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า กลไกที่ใช้ในการหน่วงไฟ คือ สลายตัวเกิดปฏิกิริยาเอนโดเทอร์มิกและมีการปลดปล่อยน้ำเกิดขึ้นทำให้ความร้อนในระบบลดลงทั้งระบบ LDH และ ATH มีค่า Tmax (DTG) สูงมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน สมบัติการต้านทานความร้อนที่ดีขึ้นนี้ของ ATH น่าจะมาจากในร่องกลไกการสลายตัวให้น้ำออกมาลดความร้อนในระบบเป็นหลัก อย่างไรก็ตามในระบบ LDH แต่ยังคงให้สมบัติการต้านทานความร้อนที่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าจะมีการปลดปล่อยน้ำในช่วงแรกน้อยกว่า ATH แสดงให้เห็นว่าระบบ LDH

อาจช่วยปรับปรุงสมบัติการทนความร้อนจากกลไกอื่น ซึ่งอาจมาจากการที่โครงสร้าง LDH มีลักษณะที่เป็นแผ่น ดังนั้นอาจส่งผลในแง่ช่วยป้องกันการแทรกซึมของออกซิเจนที่เป็นปัจจัยสำคัญในการสลายตัวด้วยความร้อนของวัสดุ (Norouz et al., 2015), (Wan et al., 2020) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าสาร LDH สามารถหน่วงไฟได้จากหลายกลไก เช่น จากการป้องกันการออกซิเจนจากโครงสร้างที่เป็นแผ่น การเกิดปฏิกิริยาเอนโดเทอร์มิกและปลดปล่อยน้ำจึงช่วยลดความร้อนในระบบ และยังสามารถสร้างเถ้าถ่าน (char) ได้ด้วยตัวเอง

ตารางที่ 3 ค่า peak heat release rate และ time to sustained ignition ที่ได้จากเทคนิค cone calorimetry ของโฟมน้ำยางธรรมชาติเมื่อเติมสารหน่วงไฟเปรียบเทียบระบบ LDH และ ATH

Samples	Peak heat release rate (kW/m <sup>3</sup> )	Time to sustained ignition (sec)
Control (no filler)	657 ± 23	12.6 ± 2.3
40 phr LDH	443 ± 24	25 ± 0.5
40 phr ATH	474 ± 15	27.5 ± 2.0

**ผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติการหน่วงไฟทดสอบด้วยเทคนิค cone calorimetry และ Horizontal burning foam test**

เนื่องจากสมบัติการหน่วงไฟด้วยสารตัวเติมนั้นจะแปรผันตรงกับปริมาณสารตัวเติม โดยจะมีสมบัติที่ดีขึ้นเมื่อมีปริมาณสารตัวเติมมาก ในการศึกษาการหน่วงไฟของโฟมน้ำยางธรรมชาตินี้ จึงได้ศึกษาเปรียบเทียบในปริมาณสูงสุดที่ 40 phr ของ LDH และ ATH ที่ใช้ปรับปรุงโฟมน้ำยาง

ธรรมชาติ จากตารางที่ 3 พบว่า peak heat release rate ของโฟมน้ำยางธรรมชาติมีค่าต่ำลงอย่างชัดเจนเมื่อมีการเติมสารตัวเติมทั้งในระบบ LDH และ ATH ค่าที่ลดลงนี้แสดงถึงการหน่วงไฟที่ดีขึ้นเนื่องจากความร้อนที่เกิดในระบบลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบระบบ LDH และ ATH พบว่าในระบบ LDH มีการหน่วงไฟที่ดีกว่าระบบ ATH ซึ่งดังที่กล่าวไปแล้วว่า LDH นั้นมีคุณสมบัติในการป้องกันการออกซิเจนจากการโครงสร้างที่เป็นแผ่น

การเกิดปฏิกิริยาเอ็นโดเทอร์มิกและปลดปล่อยน้ำ จึงช่วยลดความร้อนในระบบ และยังสามารถสร้าง ถ่าน (char) ได้ด้วยตัวเอง ซึ่งสอดคล้องกับ ผลการทดลอง TGA นอกจากนี้ผล time to sustained ignition ที่เป็นเวลาที่จุดติดไฟ พบว่า ระบบ ATH ใช้เวลาในการจุดติดไฟนานกว่า ระบบ LDH เล็กน้อย ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่ามาจากการที่ ATH คุณสมบัติในการปลดปล่อยน้ำลดความร้อน

ในระบบได้มากกว่า LDH จึงจุดติดไฟได้ช้ากว่า แต่อย่างไรก็ตาม ผลของการจุดติดไฟแล้วเกิด การเผาไหม้ ระบบที่มี LDH มีความร้อนในระบบ ขณะเกิดการเผาไหม้ที่น้อยกว่า ซึ่งอาจจะเนื่องด้วย คุณสมบัติของ LDH นั้นสามารถเกิด Char ได้ด้วย ตัวเอง เมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิด char ชั้นบนวัสดุ ซึ่งอาจจะนำไปสู่การดับไฟที่เร็วกว่าหรือเกิด การลามไฟได้น้อยกว่าระบบ ATH

**ตารางที่ 4** ผลการทดสอบการลามไฟในแนวนอน Horizontal burning foam test ของโฟมน้ำยางธรรมชาติ เมื่อเติมสารหน่วงไฟเปรียบเทียบระบบ LDH และ ATH ตามมาตรฐาน D4986

Samples	ผลการทดสอบ	
	HBF เกรด (มิลลิเมตร/นาที)	UL-94 HF เกรด
Control (no filler)	No rating	HF 2
40 phr LDH	No rating	HF 2
40 phr ATH	No rating	HF 2

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบการ ลามไฟในแนวนอน Horizontal burning foam test ของโฟมน้ำยางธรรมชาติ LDH และ ATH ซึ่งการทดสอบการลามไฟในแนวนอน Horizontal burning foam test ถือเป็นมาตรฐานหนึ่งใน ทดสอบการติดไฟและการลุกลามของไฟของ วัสดุโฟม พบว่า ถึงแม้ว่าโฟมน้ำยางธรรมชาติ เมื่อเติมสารหน่วงไฟระบบ LDH และ ATH จะมี สมบัติการหน่วงไฟที่ดีขึ้นจากผลการทดสอบด้วย เทคนิค cone calorimetry แต่จากผลการ ทดสอบการลามไฟในแนวนอน Horizontal burning foam test นั้น โฟมยางธรรมชาติที่เติม สารหน่วงไฟทั้งระบบ LDH และ ATH ยังไม่ผ่าน

มาตรฐานการทดสอบ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องพัฒนา งานวิจัยนี้ต่อไป อย่างไรก็ตามองค์ความรู้ที่ได้จาก งานวิจัยนี้ในการใช้สารตัวเติมชนิด LDH สามารถ นำมาพัฒนาต่อไปให้ดีขึ้นได้เนื่องจากสามารถ ปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของโฟมน้ำยาง ธรรมชาติได้แต่ยังรักษาสมบัติเชิงกลของโฟมน้ำ ยางธรรมชาติไว้ได้ ซึ่งโฟมน้ำยางธรรมชาติที่ ปรับปรุงด้วยระบบ LDH อาจนำมาพัฒนาเพิ่มเติม ได้โดยการใช้ร่วมกับสารหน่วงไฟชนิดอินทรีย์ใน กลุ่มสารประกอบฟอสฟอรัสอื่น ๆ ร่วม เช่น สาร ammonium polyphosphate หรือ melamine polyphosphate

## สรุป

โพลียเอทิลีนที่ปรับปรุงด้วยสารหน่วงไฟ LDH มีสมบัติเชิงกลดีกว่าโพลียเอทิลีนที่ปรับปรุงด้วยสารหน่วงไฟ ATH โพลียเอทิลีนที่ปรับปรุงด้วยสารหน่วงไฟ LDH มีสมบัติความร้อนและสมบัติการทนไฟที่ดีที่ใกล้เคียงกับโพลียเอทิลีนที่ปรับปรุงด้วยสารหน่วงไฟ ATH สาร LDH สามารถหน่วงไฟได้จากหลายกลไก เช่น จากการป้องกันการออกซิเจนจากโครงสร้างที่เป็นแผ่น การเกิดปฏิกิริยาเอ็นโดเทอร์มิกและปลดปล่อยน้ำจึงช่วยลดความร้อนในระบบ

## เอกสารอ้างอิง

Blackley, D. C. (2012). Polymer latices: science and technology volume 3: applications of latices. Springer Science & Business Media.

แหวอาแซ แหวหามะ, อติศัย รุ่งวิชานิววัฒน์, ณีฐฐพร ละเขียด, รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการเตรียมพองน้ำทนไฟจากยางธรรมชาติ เบลนด์ร่วมกับยางคลอโรพรีน, สกว. 2555.

Pearce, E. M. (1986). Flame retardants for polymer systems. *Pure and Applied Chemistry*, 58(6), 925-930.

แหวอาแซ แหวหามะ, อติศัย รุ่งวิชานิววัฒน์, ณีฐฐพร ละเขียด, รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการเตรียมพองน้ำยางธรรมชาติทนไฟด้วยสารประกอบที่มีฟอสฟอรัส, สกว. 2556.

Kutz, M. (2011). *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials*, William Andrew. Inc.: New York, NY, USA.

Gao, Y., Wu, J., Wang, Q., Wilkie, C. A., & O'Hare, D. (2014). Flame retardant polymer/layered double hydroxide nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(29), 10996-11016.

Norouzi, M., Zare, Y., & Kiany, P. (2015). Nanoparticles as effective flame retardants for natural and synthetic textile polymers: application, mechanism, and optimization. *Polymer Reviews*, 55(3), 531-560.

Cataldo, F. (2007, February). Preparation and properties of nanostructured rubber composites with montmorillonite. In *Macromolecular Symposia* (Vol. 247, No. 1, pp. 67-77). Weinheim: WILEY-VCH Verlag.

Camino, G., & Costa, L. (1988). Performance and mechanisms of fire retardants in polymers - A review. *Polymer degradation and stability*, 20(3-4), 271-294.

Norouzi, M., Zare, Y., & Kiany, P. (2015). Nanoparticles as effective flame retardants for natural and synthetic textile polymers: application, mechanism, and optimization. *Polymer Reviews*, 55(3), 531-560.

Wan, L., Deng, C., Zhao, Z. Y., Chen, H., & Wang, Y. Z. (2020). Flame retardation of natural rubber: Strategy and recent progress. *Polymers*, 12(2), 429.