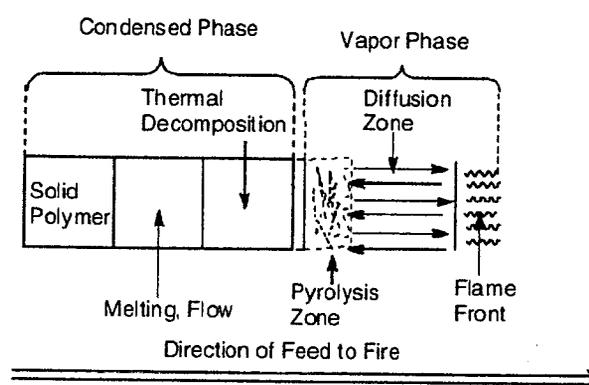


บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 หลักพื้นฐานทางเคมีของการติดไฟ

การจุดติดไฟและการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างหนึ่ง ซึ่งต้องอาศัยองค์ประกอบ 3 อย่างคือ ความร้อน เชื้อเพลิง และก๊าซออกซิเจนหากขาดองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่ง จะไม่สามารถเกิดการจุดติดไฟและเผาไหม้ขึ้นได้ โดยทั่วไปพอลิเมอร์ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นถ้าหากอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนและความร้อนแล้ว พอลิเมอร์จะเกิดการจุดติดไฟและเผาไหม้ได้ โดยกระบวนการเผาไหม้ของพอลิเมอร์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.1 เริ่มจากเมื่อพอลิเมอร์ได้รับความร้อนจะเกิดการหลอม (melting) จากนั้นเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal decomposition) หรือการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ของพอลิเมอร์เป็นอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคดังกล่าวจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอไปรวมตัวกับออกซิเจนและเกิดการเผาไหม้ ซึ่งการเผาไหม้นี้จะปลดปล่อยความร้อนปริมาณมากแพร่เข้าไปสู่เนื้อพอลิเมอร์ส่งผลให้เกิดการไพโรไลซิสของพอลิเมอร์และเกิดการเผาไหม้ต่อเนื่อง กระบวนการนี้จะหยุดลงเมื่อองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งหมดไป (ความร้อน เชื้อเพลิง หรือออกซิเจน) โดยไฟจะดับลงนั่นเอง (Morgan and Gilman, 2013)



รูปที่ 2.1 พฤติกรรมการสลายตัวของพอลิเมอร์และการเผาไหม้ (Morgan and Gilman, 2013)

จากหลักการการติดไฟของพอลิเมอร์ที่อธิบายข้างต้น ทำให้เกิดการคิดค้นหาวิธีการต่างๆ เพื่อปรับปรุงการทนไฟของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น โดยทั่วไป การทำให้พอลิเมอร์ติดไฟได้ยากขึ้นจำเป็นต้องเข้าใจหลักการหรือวิธีการลดการติดไฟของพอลิเมอร์ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.2 หลักการพื้นฐานของการลดการติดไฟ

การลดการติดไฟของวัสดุ มีหลักการทั่วไปดังนี้

2.2.1 การหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ในกระบวนการติดไฟ โดยการเติมสารยับยั้งอนุมูลอิสระ (Radical scavengers) จำพวกสารประกอบฮาโลเจน โดยสารเหล่านี้จะไปยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระที่ก่อให้เกิดการเผาไหม้ต่อเนื่อง

2.2.2 การลดหรือกำจัดเชื้อเพลิงที่ระเหยได้ ด้วยการใส่สารประกอบอนินทรีย์ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Hydrated mineral) โดยจะเกิดการสลายตัวแบบดูดพลังงานในช่วงอุณหภูมิ 180-300 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดติดไฟของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่แล้วปลดปล่อยโมเลกุลน้ำออกมา ทำให้ระบบเย็นลงและเป็นการเจือจางเชื้อเพลิง

2.2.3 การสร้างฉนวนกันความร้อน ด้วยการเตรียมวัสดุให้เป็นวัสดุคอมโพสิตนาโน (Nanocomposite) หรือใช้สารป้องกันการลามไฟชนิดขยายตัว (Intumescent) โดยเมื่อสารเหล่านี้ได้รับความร้อนแล้วจะสลายตัวให้เถ้าคาร์บอน (Carbon char) ซึ่งเกิดเป็นชั้นป้องกันผิวของพอลิเมอร์ (Barrier) จากความร้อนภายนอกที่จะแพร่เข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง

ในการลดการติดไฟของวัสดุพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการตัดแปลงโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วยสารประกอบที่มีสมบัติทนไฟ เช่น การกราฟต์หมู่ฟอสฟอรัสกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งจากการศึกษาเกี่ยวกับการตัดแปลงโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วยสารประกอบฟอสฟอรัส พบว่าพอลิเมอร์ที่ได้มีสมบัติด้านการทนไฟที่ดีขึ้น โดยไม่สูญเสียสมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ดั้งเดิม (Joseph and Tretsiakova-Mcnally, 2011) แต่เนื่องจากการตัดแปลงโมเลกุลของพอลิเมอร์มีจุดด้อยเรื่องของกระบวนการมีความยากและซับซ้อน อีกทั้งราคาค่อนข้างแพง ในเชิงอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้สารลดการติดไฟผสมกับพอลิเมอร์ในระหว่างการผสมหรือการแปรรูป เนื่องจากมีความสะดวกในการใช้งานและใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำกว่ากรณีของการตัดแปลงโมเลกุล

2.3 สารลดการติดไฟ

ในการใช้งานสารลดการติดไฟโดยการผสมกับพอลิเมอร์นั้น ปัจจุบันพบว่ามียุทธศาสตร์การลดการติดไฟหรือสารทนไฟหลายชนิดที่ได้รับความนิยมในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม อันได้แก่

2.3.1 สารทนไฟกลุ่มสารประกอบฮาโลเจน

สารประกอบฮาโลเจนเป็นสารลดการติดไฟที่นิยมใช้กันมากที่สุด มักจะใช้ในรูปของสารประกอบฮาโลเจนอินทรีย์ (Organohalogen compound) ซึ่งได้แก่ ออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine) และออร์กาโนโบรมีน (Organobromine) โดยการเติมสารประกอบกลุ่มนี้เติมลงในพอลิเมอร์จะส่งผลให้พอลิเมอร์มีความต้านทานต่อการลุกไหม้ได้ดี เนื่องจากการมีโครงสร้างที่มีพันธะ C-Cl หรือ C-Br ซึ่งมีพลังงานพันธะที่ต่ำกว่าพันธะ C-C หรือ C-H ในโครงสร้างของพอลิเมอร์

จึงเกิดการแตกตัวให้อนุมูลอิสระที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ (Cl^{\bullet} หรือ Br^{\bullet}) ได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน อนุมูลอิสระดังกล่าวจะไปยับยั้งหรือทำปฏิกิริยากับไอหรือเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของพอลิเมอร์และอยู่ในรูปของอนุมูลอิสระ (H^{\bullet} หรือ R^{\bullet}) ทำให้ลดปริมาณเชื้อเพลิงที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไปในระหว่างการลุกไหม้ (Morgan and Gilman, 2013 : Touré *et al.*, 1996) โดยทั่วไปการใช้งานสารประกอบฮาโลเจนมักจะใช้ควบคู่กับสารแอนติโมนีไตรออกไซด์ (Antimony trioxide, Sb_2O_3) เพื่อเป็นการเสริมประสิทธิภาพความต้านทานต่อการลุกไหม้ของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น

แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการใช้สารลดการติดไฟกลุ่มสารประกอบฮาโลเจนในพอลิเมอร์นั้นให้พอลิเมอร์ทนไฟและทนการลุกไหม้ได้ค่อนข้างดี แต่ข้อเสียของสารประกอบกลุ่มนี้ คือเมื่อเกิดการสลายตัวจะปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจนเฮไลด์ที่มีความเป็นกรด ส่งผลให้เกิดปัญหามลภาวะที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

2.3.2 สารทนไฟกลุ่มสารประกอบฟอสฟอรัส

สารประกอบฟอสฟอรัสที่ใช้เป็นสารทนไฟในอุตสาหกรรม โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ คือสารประกอบฟอสฟอรัสกลุ่มอินทรีย์ (Organic phosphorus compound) และสารประกอบฟอสฟอรัสกลุ่มอนินทรีย์ (Inorganic phosphorus compound) (Joseph and Ebdon, 2000) โดยสารประกอบฟอสฟอรัสสามารถลดการติดไฟของพอลิเมอร์โดยใช้หลักการการสร้างฉนวนกันความร้อน กล่าวคือเมื่อสารดังกล่าวได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวและเกิดเป็นถ่าน (Char) และปกป้องชั้นผิวของพอลิเมอร์จากความร้อนภายนอกที่เข้ามาทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับเชื้อเพลิง นอกจากนี้หากใช้ร่วมกับสารประกอบฮาโลเจนจะเสริมประสิทธิภาพการทนไฟของพอลิเมอร์เช่นเดียวกับสารแอนติโมนีไตรออกไซด์

ถึงแม้ว่าการใช้สารประกอบฟอสฟอรัสในพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์มีประสิทธิภาพการทนไฟเทียบเท่ากับสารประกอบฮาโลเจน อีกทั้งไม่ก่อให้เกิดมลภาวะที่เป็นอันตราย แต่สารประกอบฟอสฟอรัสมีข้อด้อยในเรื่องการดูดความชื้นไว้ในตัวได้รวดเร็ว ส่งผลต่อการแปรรูปพอลิเมอร์ที่กระบวนการผลิตต้องผ่านอุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น น้ำที่ถูกดูดไว้ก็จะกลายเป็นไอน้ำอัดแน่นในตัวชิ้นงาน จนอาจส่งผลให้ชิ้นงานระเบิดได้

2.3.3 สารทนไฟกลุ่มสารประกอบอนินทรีย์ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Hydrated mineral)

สารประกอบอนินทรีย์ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Hydrated mineral) เป็นสารทนไฟที่ปรับปรุงสมบัติการทนไฟของพอลิเมอร์ได้โดยไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ซึ่งสารทนไฟกลุ่มนี้ที่เป็นที่รู้จักและใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium trihydrate, ATH) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium hydroxide, MH) โดยเมื่อให้ความร้อนหรือเปลวไฟแก่วัสดุ สารทั้งสองจะเกิดการสลายตัวแบบดูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ

220 และ 300°C ตามลำดับ จากนั้นจะปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมาเพื่อทำให้ระบบเย็นลงและเจือจางเชื้อเพลิง ทำให้การจุดติดไฟและการลามไฟเกิดได้ช้าลง นอกจากนี้สารประกอบโลหะออกไซด์ ($A \text{ L}_2\text{O}_3$ และ MgO) ที่หลงเหลือจากการสลายตัวจะปกคลุมอยู่บนชั้นผิวของพอลิเมอร์ ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติการทนไฟของพอลิเมอร์ (Morgan and Gilman, 2013)

2.3.4 สารป้องกันการลามไฟชนิดขยายตัว (Intumescent)

หลักการการทำงานของสารป้องกันการลามไฟชนิดขยายตัว คือ เมื่อให้ความร้อนหรือเปลวไฟแก่วัสดุ สารกลุ่มนี้จะสร้างชั้นป้องกันผิวพอลิเมอร์ในลักษณะของโฟมคาร์บอน (Carbon foam) โดยสารกลุ่มนี้จะต้องมีองค์ประกอบ 3 อย่างทำงานร่วมกัน คือ สารที่ให้กรด (Acid source) เช่นแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate) สารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (Carbon source) เช่น เพนตะอิริทไรทอล (Pentaerythritol) และสารก่อให้เกิดฟองก๊าซ (Gas former/Spumific) เช่น เมลามีน (Melamine) โดยสารที่ให้กรดเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวและเกิดการเชื่อมโยงกับสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เกิดเป็นสารประกอบคาร์บอนที่เสถียรต่อความร้อน ส่วนสารก่อให้เกิดฟองก๊าซจะเปลี่ยนสารประกอบคาร์บอนที่ได้จากการเชื่อมโยงให้เป็นโฟมคาร์บอน ส่งผลให้ผิวของพอลิเมอร์ถูกปกป้องจากการเข้าทำปฏิกิริยาของออกซิเจนและความร้อน

2.3.5 สารทนไฟอินทรีย์

สารทนไฟอินทรีย์ที่รู้จักกันเป็นอย่างดี คือ สารโบเรท เป็นสารเคมีที่ใส่เข้าไปในพอลิเมอร์แล้วเมื่อเกิดการลุกไหม้จะทำให้วัสดุสลายตัวช้า เกิดเกรียม (char) แทน ซึ่งการเกรียมนี้ทำหน้าที่เหมือนฉนวนกันความร้อนไม่ให้เข้าไปในยาง ทำให้การสลายตัวของวัสดุด้วยความร้อนช้าลงไป พร้อมกันนั้นอาจทำให้การเกิดก๊าซ (จากการสลายตัวของพอลิเมอร์) ซึ่งไหม้ช้าลงไปอีกด้วย

2.3.6 วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิทนาโน (Polymer nanocomposite)

วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิทนาโนเป็นวัสดุกลุ่มใหม่ล่าสุดที่มีสมบัติลดการติดไฟ โดยการเติมสารเสริมแรงชนิดนาโน เช่น นาโนเคลย์ เข้าไปในพอลิเมอร์และเกิดการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์ เมื่อวัสดุได้รับความร้อนหรือเกิดการเผาไหม้ อัตราการสูญเสียน้ำหนักจะเกิดได้ช้าลง เนื่องจากอนุภาคสารเสริมแรงนาโนเคลื่อนที่ไปปกคลุมชั้นผิวของพอลิเมอร์ ทำให้อัตราการปลดปล่อยความร้อนลดลง อีกทั้งยังขัดขวางปฏิกิริยาการเผาไหม้ของพอลิเมอร์ จึงส่งผลให้วัสดุที่ได้มีสมบัติการทนไฟที่ดีขึ้น

การใช้สารตัวเติมลดการติดไฟเป็นหนึ่งในสิ่งจำเป็นที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติการทนไฟของวัสดุ นอกจากนี้ อันตรรกะจากการลดการติดไฟและวิธีการทดสอบเป็นสิ่งสำคัญมากอีกประการ เพราะสามารถนำไปสร้างวิธีการป้องกันการติดไฟของวัสดุ ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถทำนายผลการติดไฟในสถานการณ์จริงได้ว่าเป็นอย่างไร ซึ่งวิธีการทดสอบที่สำคัญมี 2 ประเภท คือ

- การทดสอบขนาดใหญ่ (Large scale test) เป็นการศึกษาลักษณะของวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ในสถานการณ์ติดไฟจริงๆ เช่น ไม้

- การทดสอบขนาดเล็ก (Small scale test) เป็นการหาความยากง่ายของการจุดติดของวัสดุขนาดเล็กโดยใช้ไฟขนาดเล็ก รวมทั้งหาอัตราการเผาไหม้ และการสร้างควัน

โดยทั่วไป ในกรณีของพลาสติกและยาง จะใช้การทดสอบแบบการทดสอบขนาดเล็ก ซึ่งวิธีหรือเทคนิคที่ใช้ในการทดสอบมีหลายวิธีด้วยกัน ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.4 การทดสอบการจุดติดไฟ

เทคนิคการวัดการจุดติดไฟของพอลิเมอร์ที่เป็นที่ยอมรับมี 3 วิธี (Kiliaris and Papaspyrides, 2010) คือ

2.4.1 วิธีการทดสอบการเผาแบบ UL-94 (Zeus Industrial Products Inc, 2005)

เป็นการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับการให้เปลวไฟแก่ชิ้นตัวอย่างที่มีรูปแบบการจัดวางในลักษณะต่างๆ และสังเกตการตอบสนองของวัสดุหลังจากนำเปลวไฟออกซึ่งการทดสอบการเผาแบบ UL-94 ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน ISO9772 และ 9773 โดยทั่วไปนิยมใช้รูปแบบการวางชิ้นตัวอย่างแบบตามแนวตั้ง (Vertical Burning Test: UL-94V) การทดสอบจะเป็นการให้ความร้อนด้วยเปลวไฟจากส่วนล่างของชิ้นตัวอย่างเป็นเวลา 10 วินาที นำเปลวไฟออกจากชิ้นตัวอย่าง จากนั้นสังเกตการตอบสนองของวัสดุและทำการจัดลำดับโดยสามารถระบุระดับการทนไฟได้เป็น 3 ระดับ ดังนี้ คือ

- การทนไฟระดับดีที่สุด คือ UL94 V-0 ชิ้นตัวอย่างแต่ละชิ้นจะเกิดการลามไฟหลังจากนำเปลวไฟออกจากเป็นเวลาน้อยกว่า 10 วินาที จากนั้นเปลวไฟจะดับและไม่เกิดการหยดของเปลวไฟ

- การทนไฟระดับดี คือ UL94 V-1 ชิ้นตัวอย่างแต่ละชิ้นจะเกิดการลามไฟหลังจากนำเปลวไฟออกจากเป็นเวลาน้อยกว่า 30 วินาที จากนั้นเปลวไฟดับและไม่เกิดการหยดของเปลวไฟ

- การทนไฟระดับน้อย คือ UL94 V-2 ชิ้นตัวอย่างแต่ละชิ้นจะเกิดการลามไฟหลังจากนำเปลวไฟออกจากเป็นเวลาน้อยกว่า 30 วินาที โดยมีการหยดของเปลวไฟบนวัสดุรองรับ (สำลี) ซึ่งก่อให้เกิดการลุกไหม้ของวัสดุรองรับ

2.4.2 วิธีการทดสอบหาค่า Limiting Oxygen Index (LOI) (Zeus Industrial Products Inc, 2005)

เป็นการทดสอบการจุดติดไฟของวัสดุ ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจนผสมออกซิเจนที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ชิ้นงานจะเกิดการติดไฟและลุกไหม้ต่อเนื่องได้ ค่าปริมาณออกซิเจนที่ได้จากการทดสอบจึงเป็นค่าที่ระบุถึงความสามารถในการจุดติดไฟของวัสดุ หากปริมาณออกซิเจนมีค่ามาก แสดงถึงชิ้นงานต้องใช้ปริมาณออกซิเจนสูงในการเกิดการติดไฟ กล่าวคือชิ้นงานมีสมบัติการทนไฟที่ดี โดยทั่วไปปริมาณออกซิเจนในสภาวะบรรยากาศปกติจะมีค่า

เท่ากับ 21% ดังนั้นหากวัสดุมีค่า LOI สูงกว่า 21% จะแสดงถึงการไม่ติดไฟของวัสดุดังกล่าวในสภาวะบรรยากาศปกติ

2.4.3 วิธีการทดสอบด้วยเทคนิค Cone calorimetry (Kiliaris and Papaspyrides, 2010)

เป็นการทดสอบการติดไฟตามมาตรฐาน ASTM E1354 หรือ ISO5660 เพื่อประเมินค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนของวัสดุ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้จากจุดติดไฟภายนอก โดยอัตราการปลดปล่อยความร้อนเป็นค่าที่วิเคราะห์จากการใช้ออกซิเจนในการเผาไหม้ นอกจากนี้ผลการทดสอบตามมาตรฐานยังรวมถึงระยะเวลารวมทั้งที่เกิดเปลวไฟในตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างที่เผาไหม้จะอยู่ภายใต้สภาพการไหลเวียนของอากาศที่ควบคุม และสัมพันธ์กับการแผ่รังสีความร้อนภายนอกในช่วง 0-100 kw/m² โดยใช้เครื่องทดสอบที่เรียกว่า Cone calorimeter ผลที่ได้จากการทดสอบ คือ อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat release rate: HRR) เวลาในการจุดติดไฟ (Time to ignition: TTI) การปลดปล่อยความร้อนรวม (Total heat released: THR) อัตราการสูญเสียน้ำหนัก (Mass loss rate: MLR) โดยอัตราการปลดปล่อยความร้อน (HRR) จะคำนวณจากความสัมพันธ์ที่คงที่ระหว่างน้ำหนักออกซิเจนในอากาศที่เข้ากับปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาตลอดการเผาไหม้

การทดสอบการจุดติดไฟทั้ง 3 แบบที่กล่าวมาข้างต้นเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการระบุถึงสมบัติการทนไฟของพอลิเมอร์ แต่อย่างไรก็ตามในการประเมินสถานการณ์จริงของการจุดติดไฟของวัสดุ อาจจะต้องมีการใช้การทดสอบอื่นร่วมด้วยเพื่อให้ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงของวัสดุมากที่สุด ซึ่งการทดสอบการสลายตัวเนื่องจากความร้อนภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจน (Thermal gravimetric analysis: TGA) เพื่อหาอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวและปริมาณเถ้าที่เหลือจากการทดสอบ ซึ่งปริมาณเถ้าที่เหลือจากการทดสอบจะสามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการทนไฟได้ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้นั้นจะปกคลุมผิววัสดุและทำหน้าที่คล้ายเป็นฉนวนกันความร้อน ช่วยป้องกันการแพร่ออกของก๊าซหรือเชื้อเพลิงและการแพร่เข้าของความร้อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

จากที่ได้อธิบายถึงหลักการลดการติดไฟของวัสดุพอลิเมอร์ รวมถึงการทดสอบสมบัติการทนไฟของพอลิเมอร์ เพื่อนำไปปรับปรุงสมบัติการทนไฟของพอลิเมอร์ได้ แต่ผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์ที่ใช้ร่วมกันในชีวิตประจำวันนั้น ส่วนมากมักไม่ได้ต้องการสมบัติเด่นเพียงด้านเดียว แต่กลับต้องการสมบัติเด่นเพื่อตอบสนองการใช้งาน และสมบัติด้านอื่นๆอยู่ในเกณฑ์ที่ควบคู่กันโดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติด้านการแปรรูป เช่น กรณีของผลิตภัณฑ์ปลอกหุ้มสายไฟ สายเคเบิ้ล ถูกกำหนดสมบัติของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน มอก 11-2531 โดยนอกจากจะคำนึงถึงสมบัติการทนไฟแล้ว สมบัติเทนไซล์ก่อนและหลังบ่มแรงต้องผ่านตามมาตรฐานกำหนด ด้วยเหตุนี้ในการเลือกใช้งานพอลิเมอร์จึงต้องคำนึงถึงทั้งสมบัติพื้นฐาน สมบัติการใช้งาน สมบัติการแปรรูป รวมถึงต้นทุนในการผลิต ซึ่งเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer, TPE) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

(Thermoplastic vulcanizate, TPVs) เป็นพอลิเมอร์อีกกลุ่มหนึ่งที่น่าสนใจ และตอบสนองความต้องการดังกล่าวของอุตสาหกรรมได้ ด้วยเหตุผลเรื่องของการมีสมบัติพื้นฐานและสมบัติการใช้งานใกล้เคียงกับยาง อีกทั้งสามารถแปรรูปซ้ำได้เหมือนเทอร์โมพลาสติก ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง

2.5 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (Thermoplastic vulcanizate, TPVs)

การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เริ่มจากนำอิลาสโตเมอร์และเทอร์โมพลาสติกมาบดผสมเข้าด้วยกันภายใต้แรงเฉือนที่สูง ซึ่งสามารถทำได้ทั้งกระบวนการแปรรูปแบบแบช (Batch process) โดยทั่วไปใช้เครื่องบดผสมแบบปิด (Internal mixer) หรือกระบวนการแปรรูปแบบต่อเนื่อง (Continuous process) จะใช้เครื่องรีดพลาสติกหรือเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูคู่ชนิดสกรูหมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating twin screw extruder) หลังจากบดผสมเข้ากันดีแล้วจึงเติมสารเคมีในการวัลคาไนซ์ ซึ่งอุณหภูมิการบดผสมต้องสูงพอที่จะหลอมเทอร์โมพลาสติก โดยการวัลคาไนซ์จะเกิดขึ้นในระหว่างการบดผสม เรียกว่าการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ (Dynamic vulcanization) และเมื่อเกิดการวัลคาไนซ์แล้วความหนืดของอิลาสโตเมอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดที่มีความหนืดระหว่างเฟสอิลาสโตเมอร์กับเฟสพลาสติกต่างกัน (Mismatch) จึงเป็นสาเหตุให้เฟสของอิลาสโตเมอร์เกิดการกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ในเฟสของพลาสติกและเกิดการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องโดยต้องมีการให้แรงเฉือนจนกระทั่งเกิดการวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์ มิฉะนั้นจะทำให้อนุภาคอิลาสโตเมอร์กลับมารวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) โดยทั่วไปสามารถติดตามการวัลคาไนซ์ได้จากทอร์คการบดผสม (Mixing torque) หรือพลังงานการบดผสม (Mixing energy) ในระหว่างกระบวนการบดผสมและหลังจากค่าทอร์คหรือพลังงานของการบดผสมขึ้นสูงสุดแล้ว ทำการบดผสมต่อไปอีกได้ เพื่อปรับปรุงความสามารถในการแปรรูปของพอลิเมอร์เบลนด์ หลังจากนั้นจึงนำพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้ออกจากเครื่องบดผสม ทำเป็นเม็ดขนาดเล็กแล้วนำไปฉีดขึ้นรูปได้

การวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์เริ่มเป็นที่สนใจในเชิงพาณิชย์ เมื่อมีการจดสิทธิบัตรการผลิตซานโตพรีน (Santoprene[®] thermoplastic elastomer) ซึ่งเป็นการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ของการเบลนด์ยางโอลิฟิน (ยางอีพีดีเอ็ม) กับพอลิโอลิฟิน ซึ่งถ้าอนุภาคยางมีขนาดเล็กเพียงพอและเกิดการวัลคาไนซ์สมบูรณ์ สมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จะดีขึ้น คือ

- การฉีดรูอย่างถาวร
- สมบัติเชิงกลที่ดี
- สมบัติด้านความต้านทานต่อของเหลว
- การใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้น
- มีความสม่ำเสมอของสีในขณะหลอมดีขึ้น
- ความแข็งแรงขณะหลอม (Melt strength) ดีขึ้น

- สามารถแปรรูปด้วยกระบวนการของเทอร์โมพลาสติกได้ง่ายขึ้น

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากยางธรรมชาติกับพอลิโอเลฟิน เพื่อลดการใช้งานยางสังเคราะห์และใช้ประโยชน์ยางธรรมชาติให้มากขึ้น โดยการนำยางธรรมชาติมาเบลนด์กับพอลิโพรไพลีน หรือพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เนื่องจากยางธรรมชาติจัดเป็นยางที่มีสมบัติเชิงกลดีเยี่ยม แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานหลายๆ ด้าน เช่น ความต้านทานต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ไม่ทนทานต่อออกซิเจนและโอโซน เป็นต้น การดัดแปลงโมเลกุลยางธรรมชาติด้วยสารเคมี เช่น มาลิกอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) เพื่อให้ได้ยางธรรมชาติมาเลียด (Maleated natural rubber, MNR) (Nakason *et al.*, 2006b) การใช้กรดเปอร์ฟอมิกเพื่อเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidised natural rubber, ENR) (Nakason *et al.*, 2006c) ทำให้ปริมาณพันธะคูในยางธรรมชาติลดลง ส่งผลให้ทนต่อออกซิเจนและโอโซนมากขึ้น และยังทำให้ยางมีสภาพขั้วเพิ่มมากกว่าเดิม จึงทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายดีขึ้น ส่วนพอลิโอเลฟินเป็นพลาสติกกลุ่มที่มีความอึดตัวและสามารถดกผลึกได้ ทำให้มีความทนทานต่อตัวทำละลายและออกซิเจนสูง นอกจากนี้พลาสติกในกลุ่มของพอลิโอเลฟินมีอุณหภูมิการหลอมของผลึกไม่สูงมากนัก คือพอลิเอทิลีนประมาณ 135°C ส่วนพอลิโพรไพลีนประมาณ 165°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิไม่สูงเกินไปที่จะนำมาใช้เบลนด์กับยางธรรมชาติ

ปัจจุบันเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากยางธรรมชาติ ถือว่าเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมสูงอย่างมาก ทั้งในด้านงานวิจัยและอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเบลนด์ยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปแบบดั้งเดิมและแบบดัดแปลงโมเลกุลกับพอลิเอทิลีนหรือพอลิโพรไพลีน ส่งผลให้สามารถใช้งานวัสดุเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนหรือพอลิโพรไพลีนได้หลากหลายมากขึ้น และใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้นด้วย จากรายงานวิจัยของ Nakason *et al.* (2008) ซึ่งได้ศึกษาสมบัติการแปรรูป การทนความร้อนและสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พบว่า ที่อัตราส่วนเบลนด์ของยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเท่ากับ 60/40 ให้วัสดุที่มีสมบัติตอบสนองการใช้งานทั้งในส่วนของชิ้นส่วนยานยนต์และอุปกรณ์กีฬา

แต่เนื่องจากทั้งยางธรรมชาติและพอลิโพรไพลีนมีโครงสร้างที่เป็นไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเป็นเหตุให้จุดติดไฟได้ง่ายและลามไฟได้เร็ว วัสดุเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้จึงมีข้อด้อยในเรื่องของสมบัติการทนไฟ ซึ่งเป็นสมบัติที่อุตสาหกรรมให้ความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน จึงเป็นสาเหตุให้มีความสนใจศึกษาเรื่องการปรับปรุงสมบัติการทนไฟของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากยางธรรมชาติและพอลิโพรไพลีน โดยจะเลือกศึกษาถึงการใส่สารทนไฟกลุ่มสารอนินทรีย์ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (ATH และ MH) เนื่องจากความไม่เป็นพิษต่อผู้ใช้งานและสิ่งแวดล้อม

2.6 การปรับปรุงสมบัติการทนไฟของพอลิเมอร์ด้วยสารตัวเติมทนไฟ ATH และ MH

การใช้สารตัวเติมทนไฟ ATH และ MH ในการปรับปรุงสมบัติการทนไฟของพอลิเมอร์ ได้รับความนิยมในภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากความไม่เป็นพิษต่อผู้ใช้งานและสิ่งแวดล้อม รวมถึงต้นทุนวัตถุดิบที่ต่ำ ทำให้ทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยถึงการใส่สารตัวเติมทนไฟ ATH และ MH ในพอลิเมอร์มากขึ้น เพื่อตอบสนองต่อการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพในภาคอุตสาหกรรม

จากผลงานวิจัยของ Rothon and Hornsby (1996) ได้กล่าวไว้ว่าแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารทนไฟซึ่งให้ผลการทนไฟในระดับสูง ซึ่งการใช้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไวนิลอะซิเตท พบว่าจะต้องใช้ออกซิเจนในปริมาณที่มากขึ้นเพื่อให้เกิดการลุกไหม้ แสดงว่าทนไฟมากขึ้น ในการใช้ MH ในพอลิโพรพิลีนจะทำให้มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนลดลงและมีปริมาณควันลดลง และ การใช้ในพอลิเอไมด์ทำให้การทนไฟอยู่ในระดับที่ดี

Sener and Demirhan (2007) ศึกษาผลของปริมาณการใช้สารทนไฟแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ใช้งานฉนวนกันความร้อน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารทนไฟ MH จาก 120-170 phr. ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดลดลง แต่ทำให้ค่า LOI เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุมีความทนต่อการจุดติดไฟมากขึ้นและจากการทดลองได้พบว่าการใช้สารทนไฟ MH ที่ปริมาณ 130-140 phr ให้วัสดุที่มีสมบัติที่ดีและผ่านมาตรฐานสำหรับการผลิตสายเคเบิลทนไฟ

Hao *et al.* (2013) ศึกษาผลของปริมาณแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติการทนไฟของเรซินพอลิเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester resin) จากผลการทดสอบการทนไฟด้วยเครื่องโคนแคลอริมิเตอร์ ได้แสดงให้เห็นว่าของเรซินพอลิเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัวมีสมบัติการทนไฟดีขึ้นเมื่อเติมสารทนไฟแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 55 wt% โดยพบว่าเวลาการจุดติดไฟเพิ่มขึ้นจาก 21 วินาที เป็น 190 วินาที และอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดลดลง จาก 436.86 kW/m² เป็น 109.26 kW/m² เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารทนไฟ จึงสรุปได้ว่าสารทนไฟแมกนีเซียมสามารถปรับปรุงสมบัติการทนไฟของเรซินพอลิเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัวได้อย่างมาก

Cross *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาถึงผลการใช้สารทนไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติการทนไฟของเอทิลีนไวนิลอะซิเตท โดยทำการทดสอบการทนไฟด้วยเครื่องโคนแคลอริมิเตอร์และเทคนิค LOI ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติมสารทนไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทิลีนไวนิลอะซิเตทในปริมาณ 100 phr สามารถปรับปรุงสมบัติการทนไฟของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทให้ดีขึ้นโดยพิจารณาจากการที่เอทิลีนไวนิลอะซิเตทต้องใช้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 20.2 เป็น 23.2 ในการจุดติดไฟ เมื่อเติมสารทนไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ 100 phr ค่าเวลาจุดติดไฟเพิ่มขึ้นจาก 51 วินาที เป็น 56 วินาที ในกรณีที่ใส่สารทนไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และ เพิ่มขึ้นจาก 51 วินาที

เป็น 71 วินาที ในกรณีที่ใช้สารทนไฟแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดลดลง จาก 1404 kW/m^2 เป็น 472 kW/m^2 กรณีใช้สารทนไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และลดลงจาก 1404 kW/m^2 เป็น 538 kW/m^2 ในกรณีที่ใช้สารทนไฟแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

Wang *et al.* (2002) ได้ศึกษาผลของปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติการทนไฟของพอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ พบว่าการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ส่งผลให้พอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำมีสมบัติการทนไฟที่ดีขึ้นและการทนไฟเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารทนไฟที่เติมในพอลิเมอร์ นอกจากนี้พบว่าการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ 140 phr สามารถเพิ่มค่า LOI จาก 17.1 เป็น 28.9 แต่การเติมสารทนไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ปริมาณมากกว่า 40 phr ทำให้สมบัติทนไฟของพอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำลดลงอย่างชัดเจน

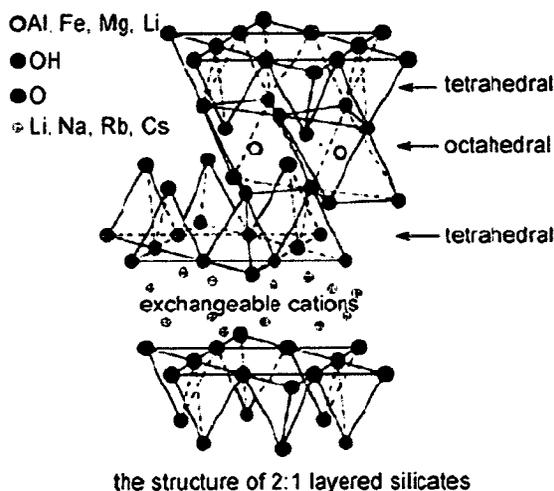
Farzad *et al.* (2013) ศึกษาผลการใช้สารทนไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ในปริมาณต่างๆ ต่อสมบัติการทนไฟของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเบลนดระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางอีพดีเอ็ม จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณสารทนไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการปรับปรุงสมบัติการทนไฟซึ่งวัดในเทอม LOI การใช้สารทนไฟ 100 phr ทำให้ต้องใช้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นเพื่อให้เกิดการจุดติดไฟโดยพบค่า LOI เพิ่มขึ้นจาก 20 (ในกรณีไม่เติมสารทนไฟ) เป็น 30

จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้นจะเห็นว่าการใช้สารทนไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์นั้นต้องใช้ในปริมาณที่สูงมาก (มากกว่า 60 wt%) จึงจะให้สมบัติการทนไฟอยู่ในระดับที่น่าพอใจ การใช้สารทนไฟปริมาณที่มากนี้ส่งผลให้สมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ลดลงอย่างมาก อีกทั้งยังยากต่อการแปรรูป ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการใช้สารตัวเติมชนิดอื่นที่มีประสิทธิภาพสูงในการลดการติดไฟ เช่น สารเสริมแรงนาโนเคลย์ร่วมกับสารทนไฟ ATH และ MH เพื่อให้ได้วัสดุพอลิเมอร์ที่มีสมบัติการทนไฟโดดเด่นโดยไม่สูญเสียสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น และสมบัติด้านการแปรรูป

2.7 การเสริมประสิทธิภาพการทนไฟของพอลิเมอร์ด้วยนาโนเคลย์

2.7.1 โครงสร้างของนาโนเคลย์และออร์กาโนเคลย์

สารตัวเติมนาโนเคลย์ หรือชั้นซิลิเกต เป็นสารเสริมแรงนาโนชนิดแผ่นที่ได้มาจากแร่ดินเหนียวมีโครงสร้างเป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ซึ่งแต่ละแผ่นของชั้นซิลิเกตมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร โดยมีขนาดความยาวที่หลากหลายตั้งแต่ 30 นาโนเมตรจนถึงระดับไมครอน ขึ้นอยู่กับชนิดของชั้นซิลิเกต ในแต่ละแผ่นของชั้นซิลิเกตจะประกอบด้วยโครงร่างที่เป็นซิลิกาเตตระฮีดรอล 2 ชั้น และชั้นของอะลูมิเนียมออกไซด์เตตระฮีดรอล 1 ชั้น โดยส่วนที่เป็นอะลูมิเนียมออกไซด์เตตระฮีดรอลจะแทรกอยู่ระหว่างชั้นของซิลิกาเตตระฮีดรอลโดยมีออกซิเจนของชั้นออกไซด์เตตระฮีดรอลเป็นตัวเชื่อมกับชั้นเตตระฮีดรอล (Ray and Okamoto, 2003) โดยแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของชั้นซิลิเกตชนิด 2:1 phyllosilicate (Ray and Okamoto, 2003)

ชั้นซิลิเกตแต่ละชั้นจะเรียงตัวซ้อนกัน โดยระหว่างชั้นซิลิเกตจะยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ เกิดช่องว่างระหว่างชั้นที่เรียกกันว่า Interlayer หรือ Gallery และเกิดการแทนที่ของธาตุภายในชั้น (Isomorphic substitution) เช่น แมกนีเซียม (Mg^{2+}) หรือเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าแทนที่อะลูมิเนียม (Al^{3+}) หรือลิเทียม (Li^+) เข้าแทนที่แมกนีเซียม (Mg^{2+}) ทำให้ผิวของชั้นซิลิเกตมีประจุลบปกคลุม และจะถูกสมดุลประจุโดยธาตุประจุบวกของโลหะหมู่ I และ II ที่ได้จากเกลือซึ่งละลายอยู่ในแร่ดินเหนียว ธาตุเหล่านี้จะแทรกอยู่ระหว่างแผ่นซิลิเกต โดยจะสามารถทราบปริมาณธาตุประจุบวกบนพื้นผิวของชั้นซิลิเกตได้จากการวัดจำนวนไอออนประจุบวกที่ถูกดูดซับในเทอมความจุของการเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity, CEC) ซึ่งแสดงเป็นหน่วย meq/100g

จากโครงสร้างของชั้นซิลิเกตจะเห็นว่าชั้นซิลิเกตมีสภาพขั้วเกิดขึ้นและการซ้อนกันของแต่ละแผ่นซิลิเกตที่ค่อนข้างเสถียร ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานกับพอลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว แต่สามารถแก้ไขได้ด้วยการดัดแปลงประจุที่ผิวของชั้นซิลิเกต โดยการใส่สารโมเลกุลเล็กแทรกเข้าไประหว่างชั้นซิลิเกต ทำให้ชั้นซิลิเกตมีสภาพขั้วที่ลดลง เนื่องจากธาตุประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นซิลิเกตสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุด้วยสารลดแรงตึงผิว เช่น แอลคิลแอมโมเนียม (alkyl ammonium) หรือแอลคิลฟอสโฟเนียม (alkyl phosphonium) ได้ ชั้นซิลิเกตที่เรียกว่า ออร์กาโนคลย์ (organoclay) ที่มีพลังงานพื้นผิวลดลง และสามารถเข้ากับพอลิเมอร์ได้มากขึ้น

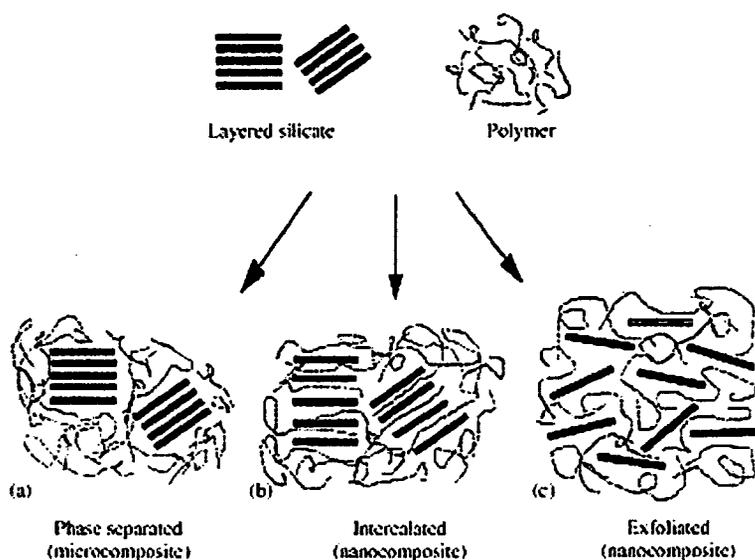
2.7.2 คอมโพสิตนาโนชนิดใช้นาโนเคลย์และออร์กาโนเคลย์

ในการใช้งานนาโนเคลย์เพื่อเสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์ โดยทั่วไปจะใช้นาโนเคลย์ในปริมาณที่น้อย จึงจำเป็นต้องทำให้นาโนเคลย์เกิดการกระจายตัวในพอลิเมอร์ เพื่อให้เกิดการเสริมแรงและสามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ได้ ซึ่งหากพิจารณาถึงลักษณะการกระจายตัวของนาโนเคลย์ในพอลิเมอร์จะสามารถจำแนกโครงสร้างของคอมโพสิตนาโนได้ 3 ประเภท (รูปที่ 3.3) คือ

(1) โครงสร้างนี้เกิดจากการที่พอลิเมอร์ไม่สามารถแทรกเข้าไประหว่างแผ่นของนาโนเคลย์ได้ ส่งผลให้วัสดุที่ได้เป็นคอมโพสิตไมโคร (Microcomposites) และเกิดการแยกเฟสของแต่ละองค์ประกอบ

(2) คอมโพสิตนาโนแบบแทรกชั้น (Intercalated nanocomposites) กรณีนี้พอลิเมอร์บางส่วนเกิดการแทรกเข้าระหว่างแผ่นซิลิเกต แสดงดังรูปที่ 3.3 (b) ทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติดีกว่าคอมโพสิตไมโคร

(3) คอมโพสิตนาโนแบบแตกตัวอิสระ (Exfoliated nanocomposites) การกระจายตัวแบบแตกตัวออกอย่างอิสระของแผ่นนาโนเคลย์ในพอลิเมอร์ แสดงดังรูปที่ 3.3 (c) โดยจะสังเกตเห็นว่าแผ่นนาโนเคลย์เกิดการฉีกออกและมีพอลิเมอร์เข้าไปแทรกระหว่างแผ่น เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของนาโนเคลย์ในเนื้อพอลิเมอร์ กรณีนี้คอมโพสิตนาโนที่ได้ จะแสดงสมบัติเด่นที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตไมโครแบบแยกเฟสและคอมโพสิตนาโนแบบแทรกชั้น



รูปที่ 2.3 การจำแนกโครงสร้างของคอมโพสิตนาโนของพอลิเมอร์และนาโนเคลย์ (Alexandre and Dubois, 2000)

ลักษณะการกระจายตัวของนาโนเคลย์ในพอลิเมอร์ ส่งผลอย่างมากต่อสมบัติของคอมโพสิตนาโน ซึ่งได้แก่สมบัติเชิงกล การกักเก็บอากาศ ความเสถียรเชิงความร้อน รวมถึงสมบัติการทนไฟของวัสดุ

เนื่องจากการใช้สารตัวเติมนาโนเคลย์ในพอลิเมอร์จะใช้ปริมาณค่อนข้างน้อย กล่าวคือ ปริมาณการเติมที่เหมาะสมมีน้อยกว่า 10 wt% (Liu *et al.*, 2008) ดังนั้นการใช้สารตัวเติมนาโนเคลย์ร่วมกับสารทนไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติด้านการทนไฟที่ดีเยี่ยม โดยไม่สูญเสียสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น ลดปัญหาเรื่องการผสมและการแปรรูป รวมถึงไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังตัวอย่างงานวิจัยดังนี้

Beyer (2001) ศึกษาการใช้สารตัวเติมนาโนเคลย์ร่วมกับสารทนไฟ ATH ต่อการปรับปรุงสมบัติการทนไฟของเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ด้วยเครื่องทดสอบการลามไฟแบบโคเนแคลอริมิเตอร์ เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเอทิลีนไวนิลอะซิเตทที่ผสมสารทนไฟ ATH 65 wt% กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตทที่ใช้นาโนเคลย์ 5 wt% ร่วมกับสารทนไฟ ATH 60 wt% พบว่า การใช้นาโนเคลย์ร่วมกับสารทนไฟ ATH ส่งผลให้ค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด (PHRR) ของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทลดลงจาก 200 kW/m^2 เป็น 100 kW/m^2 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการใช้สารทนไฟ ATH 65 wt% และหากเปรียบเทียบกับกรณีการใช้สารทนไฟ ATH เพียงอย่างเดียว จะต้องใช้สารทนไฟ ATH ปริมาณถึง 78 wt% จึงจะให้ค่า PHRR เทียบเท่ากับกรณีการใช้นาโนเคลย์ร่วมกับสารทนไฟ ATH ที่ปริมาณดังกล่าว

Zhang *et al.* (2009) ศึกษาผลการเติมนาโนเคลย์ สารทนไฟชนิด ATH และ Mg(OH)_2 ต่อการสลายตัวด้วยความร้อนและการทนไฟของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทำเปลือกหุ้มสายเคเบิล ผลการทดสอบด้วยเทคนิค TGA พบว่าการเติมนาโนเคลย์ผสมกับสารทนไฟในพอลิเมอร์ผสมไม่ส่งผลให้ความเสถียรต่อการสลายตัวของวัสดุทั้งในบรรยากาศออกซิเจนและไนโตรเจนเปลี่ยนแปลงไปจากพอลิเมอร์ผสมที่เติมเฉพาะสารทนไฟ ผลการทดสอบการทนไฟด้วยเครื่องทดสอบการทนไฟแบบโคเนแคลอริมิเตอร์ พบว่าการใช้นาโนเคลย์ร่วมกับสารทนไฟให้ค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat release rate, HRR) และ อัตราการสูญเสียน้ำหนัก (Mass loss rate, MLR) ของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้เฉพาะสารทนไฟลดลงอย่างชัดเจน แต่จากรายงานวิจัยนี้ไม่มีการรายงานสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เตรียมได้แต่อย่างใด

Cárdenas *et al.* (2008) ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการทนไฟของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทที่เสริมประสิทธิภาพด้วยนาโนเคลย์และสารทนไฟ ATH และกล่าวรายงานว่า การเติมสารตัวเติมทั้งสองชนิดพร้อมกันในเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (EVA/nanoclay/ATH=41/5/54 wt%) สามารถเพิ่มการ

ทนไฟให้พอลิเมอร์มากกว่าการเติม ATH เท่านั้น (EVA/ATH=40/60 wt%) เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบการทนไฟด้วยเครื่องทดสอบการลามไฟแบบโคนแคลอริมิเตอร์ พบว่าการใช้นาโนเคลย์ร่วมกับสารทนไฟ ATH ทำให้ค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด (PHRR) ของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทลดลงจาก 221 kW/m^2 เป็น 152 kW/m^2 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สารตัวเติมนาโนเคลย์ และยังพบว่าขนาดอนุภาคที่ต่างกันของสารทนไฟ ATH รวมถึงการปรับปรุงผิวสารทนไฟ ATH ด้วยกรดไขมันและไซเลนไม่ส่งผลให้ค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด (PHRR) ของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทที่ใช้สารทนไฟ ATH ก่อนการปรับปรุงผิว

Laoutid *et al.* (2006) ศึกษาการใช้ออร์กาโนเคลย์ร่วมกับสารทนไฟ MH ต่อการปรับปรุงสมบัติการทนไฟของเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ซึ่งทำการทดสอบสมบัติการทนไฟด้วยเทคนิค LOI และเครื่องทดสอบการลามไฟแบบโคนแคลอริมิเตอร์ เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเอทิลีนไวนิลอะซิเตทที่ผสมสารทนไฟ MH 60 wt% กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตทที่ใช้ออร์กาโนเคลย์ 5 wt% ร่วมกับสารทนไฟ MH 55 wt% พบว่า การใช้ออร์กาโนเคลย์ร่วมกับสารทนไฟ MH ในเอทิลีนไวนิลอะซิเตททำให้ต้องใช้ปริมาณออกซิเจนในการจุดติดไฟสูงขึ้น จาก 29% เป็น 34.1 % และให้ค่าเวลาการจุดติดไฟ (TTI) นานขึ้นจาก 122 วินาทีเป็น 141 วินาที