



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟด้วย
สารประกอบที่มี

ฟอสฟอรัส

Preparation of Flame Retarded Natural Rubber
Latex Foam Using Phosphorus Containing
Compounds

โดย

ดร.แวอาแซ แวหามะ

ผศ.ดร.อดิศักดิ์ รุ่งวิชานีวัฒน์

น.ส.ณัฏฐพร ละเอียด

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

เดือนพฤศจิกายน 2556

สัญญาเลขที่ RDG 5350069

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
โครงการ : การเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟด้วย
สารประกอบที่มีฟอสฟอรัส

คณะผู้วิจัย		สังกัด
1. ดร.แวอาแซ	แหวหามะ	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2. ผศ.ดร. อติศัย	รุ่งวิชานวัฒน์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
3. น.ส.ณัฐพร	ละเอียด	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชุดโครงการวิจัยขนาดกลาง เรื่องยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
 (ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

แบบสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ชื่อโครงการ: การเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟด้วยสารประกอบที่มีฟอสฟอรัส

Preparation of Flame Retarded Natural Rubber Latex Foam Using
Phosphorus Containing Compounds

ชื่อหัวหน้าโครงการ

ดร.แวอาแซ แวหามะ

หน่วยงาน

ภาควิชาวิทยาศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

โทรศัพท์

073-313930-50 ต่อ 1845

E-mail

Whasan@bunga.pn.psu.ac.th

ชื่อผู้ร่วมโครงการ

ผศ.ดร.อดิศักดิ์ รุ่งวิชานวัฒน์

หน่วย

ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

โทรศัพท์

073-313930-50 ต่อ 1861

E-mail

radisai@bunga.pn.psu.ac.th

ชื่อนักศึกษา

น.ส.ณัฐพร ละเอียด

หน่วยงาน

ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

ระยะเวลาดำเนินการ

18 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2553

ถึงวันที่ 1 เมษายน 2554

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้ได้มีการนำน้ำยางธรรมชาติมาใช้ประโยชน์มากมายโดยใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพราะเมื่อนำน้ำยางธรรมชาติมาปรับปรุงโดยการเติมสารเติมแต่งลงไปทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งาน สมบัติดีเยี่ยมทั่วไปของยางธรรมชาติคือ การทนต่อแรงดึง สมบัติเชิงพลวัตที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากสมบัติที่ดีเยี่ยมเหล่านี้จึงได้นำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมายและหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการนำยางธรรมชาติไปทำเป็นผลิตภัณฑ์นั้นคือ ฟองน้ำยางธรรมชาติเพราะยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี นุ่ม มีความทนทานต่อการใช้งาน ฟองน้ำยางธรรมชาติสามารถนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น เบาะ โซฟา ที่นอน ฟองน้ำรองพรม วัสดุกันกระแทกและฉนวนกันความร้อนต่าง ๆ แต่ฟองน้ำยางธรรมชาติสามารถที่จะเกิดการติดไฟได้ง่ายก็จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก

แนวทางในการแก้ปัญหาเพื่อที่จะปรับปรุงให้ยางธรรมชาติมีสมบัติทนไฟ ได้มีการพัฒนาโดยการเติมสารที่ช่วยหน่วงการติดไฟหรือสารมอดิไฟเออร์ที่มีความสามารถหน่วงการติดไฟได้ สารประกอบฮาโลเจนที่ใช้ร่วมกับแอนติโมนีไตรออกไซด์ หรือสารอนินทรีย์อื่น ๆ เช่น โลหะไฮดรอกไซด์ หรือโลหะออกไซด์ก็เป็นที่ยอมรับ แต่ปัญหาใหญ่ที่พบกับระบบที่ใช้ฮาโลเจนนั้นคือ จะมีการปลดปล่อยก๊าซพิษออกมาในระหว่างการติดไฟและปริมาณของควันที่ปล่อยออกมา ปัจจุบันนี้นักวิจัยได้ให้ความสนใจในการใช้สารประกอบที่มีฟอสฟอรัสซึ่งมีความสามารถที่จะป้องกันการติดไฟได้และไม่ปล่อยควันพิษ สารประกอบฟอสฟอรัสสามารถที่จะดับไฟได้โดยการกำจัด H° หรือ OH° และลดพลังงานของเปลวไฟในวัฏภาคก๊าซและยังสามารถสลายเป็นฟอสฟอริกแอซิกเพื่อป้องกันในวัฏภาคของแข็ง พอลิฟอสฟอริกแอซิกเอสเทอร์และดีไฮเดรตพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะกลายเป็นชั้นของถ้ำถ่านซึ่งเป็นชั้นที่ป้องกันความร้อนที่อุณหภูมิสูง และป้องกันเนื้อพอลิเมอร์จากการถูกทำลายโดยออกซิเจนและความร้อน สารประกอบฟอสฟอรัสที่ใช้ในการหน่วงการทนไฟสำหรับพอลิเมอร์ได้แก่ แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต ไซโครไตรฟอสฟาซีน อะโรมาติกเอมีนที่ประกอบด้วยฟอสฟอรัส ไตรเอทิลฟอสเฟต และไฮเบอร์บรานซ์พอลิฟอสเฟตเอสเทอร์ เป็นต้น

เพื่อเป็นการพัฒนาให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการลดความเป็นพิษและการป้องกันการไหม้ไฟของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ จึงได้ศึกษาโดยนำน้ำยางธรรมชาติมาเติมสารประกอบที่มีฟอสฟอรัส คือ สารแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate, APP) สารเมลามีนพอลิฟอสเฟต (Melamine polyphosphate, MPP) และสารใหม่ที่เกิดขึ้นเองคือ 1,3-ฟีนิลไดนิโตรเอมีน ไดเมทิลฟอสไฟต์ (1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite, mPDA-P) เพื่อเตรียมเป็นฟองน้ำที่สามารถต้านทานต่อการเผาไหม้มากขึ้นและเป็นเทคโนโลยีที่ปลอดภัยยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟโดยใช้สารประกอบที่มีฟอสฟอรัสเป็นสารที่ช่วยหน่วงในการติดไฟ
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาสูตรการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ
3. เพื่อศึกษาสมบัติการทนไฟและสมบัติทางกายภาพรวมไปถึงผลกระทบจากการเติมสารประกอบที่มีฟอสฟอรัส

ผลการดำเนินงาน

ศึกษาการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟด้วยสารประกอบที่มีฟอสฟอรัสโดยวิธีกระบวนการดันลอย พบว่าได้เตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟใช้สารทนไฟประเภทฟอสฟอรัส 3 ชนิด คือสารแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate, APP) สารเมลามีนพอลิฟอสเฟต (Melamine polyphosphate, MPP) และสาร 1,3-ฟีนิลีนไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์ (1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite, mPDA-P) โดยปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้ฟองน้ำยางธรรมชาติทนต่อการติดไฟคือ ใช้สาร APP 40 phr ใช้สาร MPP 35 phr และใช้สาร mPDA-P 37 phr และนอกจากนี้ได้ศึกษาการแปรปริมาณสารก่อกำเนิดหลัก (SSF) และสารก่อกำเนิดเสริม (DPG) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อกำเนิดหลักและสารก่อกำเนิดเสริมเพิ่มขึ้นพบว่าลักษณะโครงสร้างของฟองน้ำยางธรรมชาติมีสม่ำเสมอเพิ่มขึ้นและมีผลให้ค่าความหนาแน่นและค่า CFD เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ได้ศึกษาการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟโดยใช้สารอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัสพบว่า เมื่อเติมสัดส่วนของสาร ATH/APP ที่ปริมาณ 100/25 ATH/MPP ที่สัดส่วน 80/25 และ ATH/mPDA-P ที่ปริมาณ 100/25 ฟองน้ำยางธรรมชาติสามารถทนต่อการติดไฟได้คือผ่านมาตรฐาน UL-94 อยู่ในระดับ V-0

สรุปผลการวิจัย

การเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟด้วยสารประกอบที่มีฟอสฟอรัสเพื่อทำให้สมบัติการทนไฟของฟองน้ำสามารถดับไฟเอง ต้องใช้ปริมาณของสารทนไฟ APP 40 phr ใช้สาร MPP 35 phr และใช้สาร mPDA-P 37 phr และมีสารช่วยทนไฟร่วมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์โดยมีการแปรปริมาณที่สัดส่วน ATH/APP ที่ปริมาณ 100/25 ATH/MPP ที่สัดส่วน 80/25 และ ATH/mPDA-P ที่ปริมาณ 100/25 ฟองน้ำยางธรรมชาติสามารถทนต่อการติดไฟได้คือผ่านมาตรฐาน UL-94 อยู่ในระดับ V-0 และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของสารทนไฟเพิ่มขึ้นมีผลให้ระยะเวลาการเจือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติของฟองน้ำได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่า CFD และค่าการกระเด็นตัวมีแนวโน้มลดลง ยกเว้นค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัดของฟองน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อศึกษาการแปรปริมาณสารก่อกำเนิดหลัก SSF และสารก่อกำเนิดเสริม DPG พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสาร SSF และสาร DPG เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าความหนาแน่น ค่า CFD และค่าการกระเด็นตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์ฟองน้ำมีขนาดของเซลล์ที่สม่ำเสมอเพิ่มขึ้นความเป็นโพรงของเซลล์ฟองน้ำลดลง

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า สามารถเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟได้โดยใช้สารทนไฟประเภทฟอสฟอรัสคือสารทนไฟ APP 40 phr ใช้สาร MPP 35 phr และใช้สาร mPDA-P 37 phr ฟองน้ำสามารถทนต่อการติดไฟ ฉะนั้นถ้าได้ทำการวิจัยเพิ่มเติมโดยการพัฒนาสูตรฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเพื่อขยายสเกลระดับอุตสาหกรรมให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจะทำให้สามารถใช้เชิงพาณิชย์ได้

ผลงานทางวิชาที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

งานวิจัยนี้คาดว่าจะสามารถที่จะนำเผยแพร่โดยนำเสนอในงานวิจัยระดับประเทศได้

บทคัดย่อ

สารทนไฟประเภทฟอสฟอรัส 2 ชนิดคือสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต (Melamine polyphosphate, MPP) และสาร 1,3-ฟีนิลีนไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์ (1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite, mPDA-P) ได้เตรียมขึ้นโดย MPP เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตกับเมลามีนโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ mPDA-P เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่าง 1,3-ฟีนิลีนไดเอมีนกับไดเมทิลฟอสไฟต์ในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟิวแรน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และได้ศึกษาการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟด้วยสารประกอบที่มีฟอสฟอรัสได้แก่ สารแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate, APP) สารเมลามีนพอลิฟอสเฟต (Melamine polyphosphate, MPP) และสาร 1,3-ฟีนิลีนไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์ (1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite, mPDA-P) และใช้สารอะลูมิเนียมไตรไฮเดรต (Aluminium trihydrate, ATH) เป็นสารทนไฟร่วม ฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเตรียมขึ้นโดยกระบวนการดันลอยซึ่งใช้โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์เป็นสารก่อเจลหลัก ใช้ไดฟีนิลกาวินดินและไตรเอทิลลีนเตตระมีนเป็นสารก่อเจลเสริม และได้ศึกษาสมบัติของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟที่เติมสารประกอบฟอสฟอรัส และเติม ATH คือ APP, MPP, mPDA-P, ATH, ATH/APP, ATH/MPP และ ATH/mPDA-P พบว่าการใช้ปริมาณของสารทนไฟเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ระยะเวลาการเจลของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติทางกายภาพของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่า CFD และค่าการกระเด็นตัวของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟพบว่า ค่าสมบัติเหล่านี้ลดลงตามปริมาณของสารทนไฟที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัดของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารทนไฟที่เพิ่มขึ้น สำหรับการทดสอบสมบัติด้านการทนไฟและสมบัติด้านความร้อนทดสอบโดยวิธี UL-94 และ TGA พบว่าที่ระดับการเติมสารทนไฟของ APP 40 phr, MPP 35 phr, mPDA-P 37 phr, ATH 150 phr, ATH/APP (100/25), ATH/MPP (80/25) และ ATH/mPDA-P (100/25) ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 อยู่ในระดับ V-0 คือมีประสิทธิภาพการทนไฟดี และค่าน้ำหนักที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 36.01%, 37.52%, 30.25%, 46.99%, 24.95%, 39.32% และ 39.43% ตามลำดับ

คำสำคัญ : ฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ สารพอลิฟอสเฟต สารอะลูมิเนียมไตรไฮเดรต

ABSTRACT

Flame retardants were prepared in the forms of melamine polyphosphate (MPP) and 1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite (mPDA-P). MPP was prepared by the reaction of ammonium polyphosphate and melamine, using water as a medium, at 95 °C for 1 hour and mPDA-P was prepared by the reaction of 1,3-phenylenediamine and dimethylphosphite, using THF as solvent, at 70 °C for 24 hours. Preparation of flame retarded natural rubber latex foam using phosphorus containing compounds i.e. ammonium polyphosphate (APP), melamine polyphosphate (MPP) and 1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite (mPDA-P) was done and aluminium trihydrate (ATH) was also used as co-flame retardant. Flame retarded natural rubber latex foam was prepared by the Dunlop process using sodium silicofluoride (SSF) as a primary delayed action gelling agent. Diphenylguanidine (DPG) and Triethylenetetramine (TETA) were also used as a secondary gelling agent. The result showed that gel time of the foam had a tendency to increase when APP, MPP, mPDA-P, ATH/APP, ATH, ATH/MPP or ATH/mPDA-P was increased. Physical properties of the foam such as density, hardness and resilience decreased when phosphorus containing compounds was increased, however foam compression set increased. The fire retardant ability and thermal stability properties of flame retarded natural rubber latex foam were evaluated by UL-94 and TGA. It was found that the foam samples with APP of 40 phr, MPP of 35 phr, mPDA-P of 37 phr, ATH 150 phr, ATH and APP at the ratio of 100/25, ATH and MPP at the ratio of 80/25 and ATH and mPDA-P at the ratio of 100/25, were all met the requirement of UL-94 test at the level V-0 and residues after burning test were 36.01%, 37.52%, 30.25%, 46.99%, 24.95%, 39.32% and 39.43%, respectively.

Keywords : Fire retarded foam, Polyphosphate, Aluminium trihydrate

1.ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันนี้ได้มีการนำยางธรรมชาติมาใช้ประโยชน์มากมายโดยใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อที่จะผลิตเป็นชิ้นงานต่าง ๆ เพราะยางธรรมชาติสามารถปรับปรุงให้มีสมบัติที่เหมาะสมโดยการเติมสารเติมแต่ง ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นดังนี้ สมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง สมบัติเชิงพลวัตที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิสูงและที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยสมบัติที่ดีเยี่ยมเหล่านี้จึงนิยมนำไปผลิตเป็นชิ้นงานต่าง ๆ มากมายและหนึ่งในผลิตภัณฑ์ก็คือ ฟองน้ำยางธรรมชาติ เนื่องจากฟองน้ำยางธรรมชาติประกอบด้วยเซลล์ของอากาศที่ต่อเนื่องติดกันอยู่ในโครงสร้างของยาง จึงทำให้ฟองน้ำมีความยืดหยุ่นดี นุ่ม มีความหนาแน่นต่ำ และเมื่อถูกกระทำด้วยแรงกดสามารถคืนกลับสู่สภาพเดิมได้ดี ดังนั้นจึงนิยมนำฟองน้ำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เบาะ โซฟา ที่นอน วัสดุกันกระแทกและพรมปูพื้น เป็นต้น ฟองน้ำยางธรรมชาติเตรียมขึ้นโดยกระบวนการดันลอป (Dunlop process) โดยใช้ sodium silicofluoride เป็นสารก่อเจลหลัก แต่ฟองน้ำยางธรรมชาติจะเกิดการติดไฟและเผาไหม้ได้ง่าย ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นหาแนวทางในการลดความเสี่ยงต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยการเติมสารทนไฟเพื่อลดปัญหาดังกล่าว สารทนไฟประเภทแฮโลด์ก็เป็นสารที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพในการทำงานเป็นอย่างดี แต่เมื่อเกิดการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์ที่ใช้สารทนไฟประเภทนี้จะทำให้เกิดก๊าซ ซึ่งจะไปปกคลุมผิวของวัสดุเพื่อที่จะป้องกันการลุกไหม้แต่ทำให้ไม่สามารถมองเห็นทางที่จะหลบหนีได้และก๊าซที่เกิดขึ้นมีความเป็นพิษเป็นอย่างมาก ปัจจุบันการให้ความสำคัญกับสารทนไฟประเภทฟอสฟอรัสมีเพิ่มมากขึ้น เพราะความปลอดภัยการทำงานของสารประกอบนี้ดีกว่าและเป็นพิษน้อยกว่าประเภทสารประกอบพวกแฮโลด์ (Wang and Shi, 2006)

สารแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate, APP) จัดเป็นสารหน่วงการติดไฟประเภทฟอสฟอรัสที่ได้รับความนิยมชนิดหนึ่งในระดับอุตสาหกรรมเพราะสาร APP มีประสิทธิภาพในการทนไฟและมีราคาต่ำจึงทำให้ลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ โดยสาร APP ทำงานโดยเมื่อวัสดุที่เติมสาร APP ได้รับความร้อนสาร APP ก็จะไปเคลือบบริเวณพื้นที่ผิวของวัสดุเพื่อเป็นฉนวนป้องกันไม่ให้ก๊าซออกซิเจนเข้าไปช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้ และขณะเดียวกันก็จะสลายตัวให้ก๊าซแอมโมเนียซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะได้ก๊าซไนโตรเจนและน้ำ ก๊าซไนโตรเจนจะช่วยเจือจางออกซิเจนในอากาศซึ่งเป็นองค์ประกอบในการเกิดไฟอีกด้วย (เพชรรัตน์ และคณะ, 2551) และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานด้านการทนไฟและเพื่อกำจัดกรดฟอสฟอริกในสาร APP ที่หลงเหลืออยู่ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ฟองน้ำเกิดการเจลเร็วขึ้น จึงได้เตรียมเป็นสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต (Melamine polyphosphate, MPP) เพื่อแก้ปัญหากลการเจลเร็วและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานด้านการทนไฟให้ดียิ่งขึ้น

ในรายงานวิจัยนี้เพื่อเป็นการพัฒนาให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการลดความเป็นพิษและการป้องกันการไหม้ไฟของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ จึงมีแนวคิดที่ศึกษาการนำน้ำยางธรรมชาติมาเติมสารประกอบที่มีฟอสฟอรัสคือ สารแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate, APP) สารเมลามีนพอลิฟอสเฟต (Melamine polyphosphate, MPP) และสาร 1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite (mPDA-P) เพื่อเตรียมเป็นฟองน้ำที่ต้านทานต่อการเผา

ใหม่มากขึ้นและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งที่จะนำเทคโนโลยีที่ใช้สารประกอบที่มีฟอสฟอรัส แทนสารประกอบฮาโลเจนเพื่อที่จะผลิตเป็นฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ

2. วัตถุประสงค์

- 1 เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟโดยการใช้สารประกอบที่มีฟอสฟอรัสเป็นสารที่ช่วยหน่วงในการติดไฟ
- 2 เพื่อศึกษาและพัฒนาสูตรการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ
- 3 เพื่อศึกษาสมบัติการทนไฟและสมบัติทางกายภาพรวมไปถึงผลกระทบจากการเติมสารประกอบที่มีฟอสฟอรัส

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎี

3.1.1 ยางฟองน้ำ

ฟองน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากน้ำยางชั้น 60% ฟองน้ำประกอบด้วยเซลล์ของอากาศที่ต่อเนื่องติดกัน ทำให้การถ่ายเทของอากาศจากฟองน้ำเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว เป็นเหตุให้ฟองน้ำได้ถูกพัฒนาเป็นเบาะและที่นอน

ขั้นตอนสำคัญในการผลิตฟองน้ำประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้ (Blackley, 1997c)

1. ทำให้น้ำยางคอมพาวด์เกิดฟอง โดยนำอากาศหรือก๊าซต่าง ๆ เข้าสู่ น้ำยางและเกิดเป็นฟองที่มีความเสถียร ซึ่งอาจทำได้โดยการปั่นด้วยแรงกล หรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในส่วนหนึ่งของเหลวในน้ำยาง ในการเตรียมน้ำยางคอมพาวด์อาจใส่สารช่วยเกิดฟอง และสารช่วยรักษาความเสถียรของฟอง

2. ฟองยางที่ได้จะถูกบังคับให้อยู่ในรูปทรงที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากที่สุด

3. ส่วนที่เป็นอนุภาคยางภายในฟองยางเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นเฟสของยาง (Rubber phase) ที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) ซึ่งขั้นนี้อาจเรียกว่าการเกิดการแข็งตัว (Solidification) หรือการคงตัวของฟองยาง

4. ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการวัลคาไนซ์ส่วนของอนุภาคยางภายในฟองน้ำให้เกิดการเชื่อมโยงภายในสายโซ่โมเลกุลยางโดยให้ความร้อน

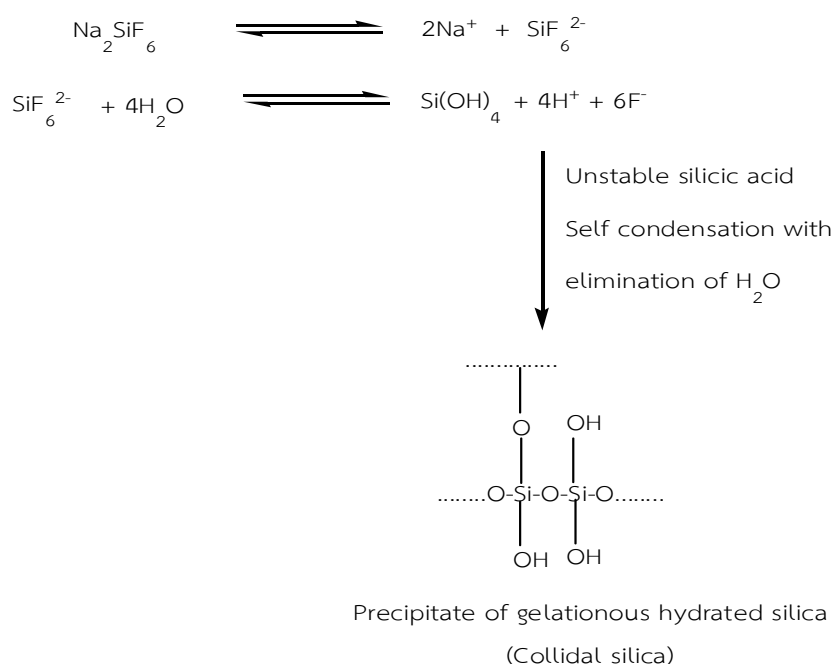
กระบวนการผลิตยางฟองน้ำมีอยู่ 2 กระบวนการหลักใหญ่ ๆ คือ กระบวนการแบบดันลอป (Dunlop process) ซึ่งได้ใช้ Sodium silicofluoride เป็นสารที่ทำให้น้ำยางจับตัวและกระบวนการทาลาเลย์ (Talalay process) ซึ่งได้ใช้ความเย็นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารทำให้น้ำยางจับตัว

3.1.2 การผลิตฟองน้ำโดยกระบวนการแบบดันลอป (Dunlop process)

กระบวนการแบบดันลอป เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในการผลิตฟองน้ำ โดยใช้สารที่ทำให้ น้ำยางเกิดการจับตัวอย่างช้า (Delayed action gelling agent) ซึ่งเป็นสารจำพวกโกละอัลคาไลของ

ซิลิโคฟลูออไรด์ (Alkali-metal-silicofluoride) แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Blackley, 1997, Fallow, 1982)

เมื่อเติมโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ลงในน้ำยางจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างน้ำกับโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ และแตกตัวให้กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) ซึ่งมีผลทำให้ค่า pH ของน้ำยางลดลง และนอกจากนี้กรดซิลิสิก (Silicic acid) ที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไม่มีความคงตัวและสามารถเกิดปฏิกิริยาควบน้ำกับตัวเองได้อย่างรวดเร็วได้เป็นคอลลอยด์ซิลิกา (Colloidal silica) ซึ่งคอลลอยด์ซิลิกาที่เกิดขึ้นจะดูดซับสารที่ช่วยรักษาความเสถียรของน้ำยางทำให้พองยางเกิดการสูญเสียสภาพหรือเกิดการเจล ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นแสดงดังนี้



3.1.3 หลักพื้นฐานทางเคมีของการติดไฟ (สิริรัตน์, 2551 และ ชาญชัย, 2555)

การติดไฟเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างหนึ่ง ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีองค์ประกอบ 3 อย่างคือ ความร้อน เชื้อเพลิง และออกซิเจน ถ้าขาดองค์ประกอบอันใดอันหนึ่ง จะไม่สามารถเกิดการติดไฟขึ้นได้ และถ้าหากองค์ประกอบอันใดอันหนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อความรุนแรงของไฟ เป็นที่ทราบดีว่าพอลิเมอร์มีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นถ้าหากอยู่ในสภาวะมีออกซิเจนและความร้อนแล้ว พอลิเมอร์จะเกิดการจุดติดและเผาไหม้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1 อย่างไรก็ตามกระบวนการเผาไหม้ไม่ใช่เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด แต่เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตามลำดับดังนี้

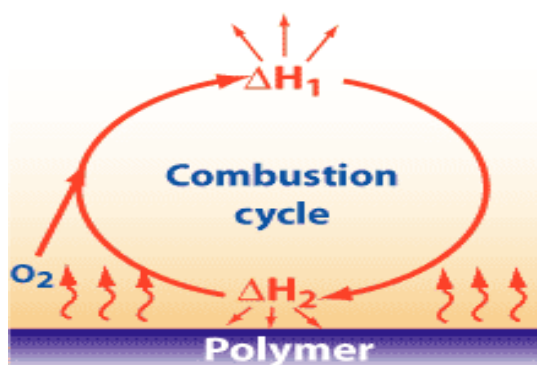
- (1) เกิดการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิด
- (2) เกิดการเสื่อมสลายของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง
- (3) เกิดการแพร่ของก๊าซและอนุภาคของเชื้อเพลิง
- (4) เกิดการผสมของเชื้อเพลิงและออกซิเจน
- (5) เกิดการจุดติด (อาจจุดติดได้เอง หรือมีตัวจุดติด)

(6) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (เกิดเปลวไฟขึ้น)

(7) ปฏิกิริยาจะดำเนินไปเรื่อยๆ

(8) เกิดการแพร่ของปฏิกิริยา

เมื่อพลังงานที่เกิดขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงความร้อนและปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบคายความร้อน มีค่ามากกว่าจากปฏิกิริยาคูดความร้อนและการแพร่ความร้อน แล้วกระบวนการจะดำเนินไปเรื่อย ๆ ได้เองดังนั้นหากเข้าใจกระบวนการติดไฟได้เป็นอย่างดีแล้ว ทำให้สามารถควบคุมการติดไฟได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 1 ปฏิกิริยาของ

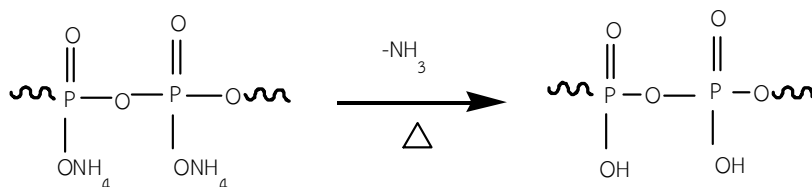
กระบวนการเผา

ไหม้ (Horrocks and Price, 2008)

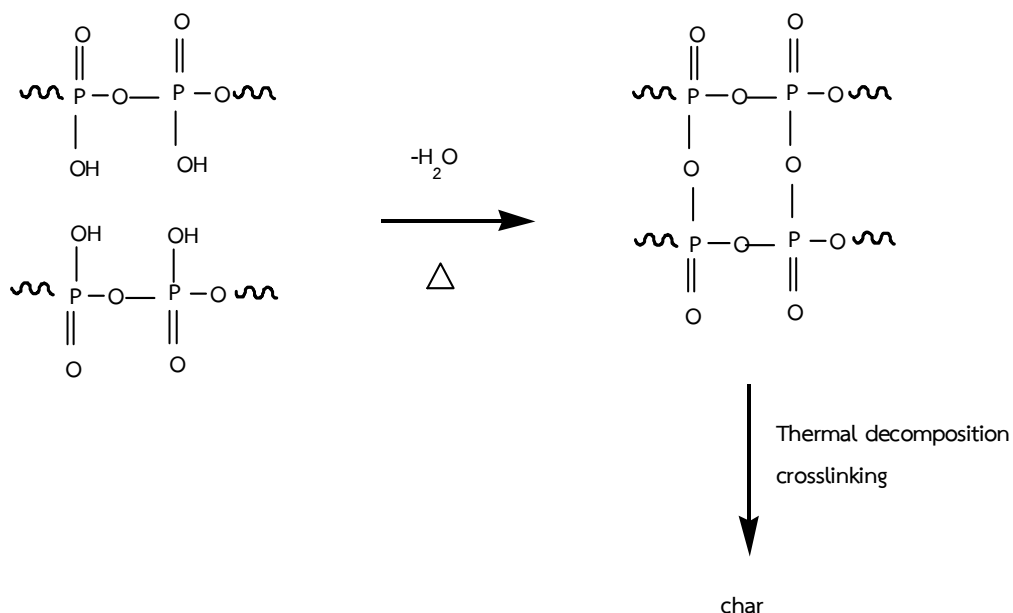
3.1.4 สารประกอบฟอสฟอรัส (Phosphorus compound) (Grassie and Scott, 1985)

สารอนินทรีย์ฟอสเฟต เช่น อะลูมิเนียมฟอสเฟต สารแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate, APP) จัดเป็นสารหน่วงการไหม้ประเภทฟอสฟอรัสที่ได้รับความนิยมชนิดหนึ่งในระดับอุตสาหกรรมเพราะ APP มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟและมีราคาต่ำจึงทำให้ลดต้นทุนในการผลิตในระดับอุตสาหกรรม โดย APP ทำงานโดยเมื่อวัสดุที่เติม APP ได้รับความร้อน APP ก็จะไปเคลือบบริเวณพื้นที่ผิวของวัสดุเพื่อเป็นฉนวนป้องกันไม่ให้ก๊าซออกซิเจนเข้าไปช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้ (Horold, 1999) และขณะเดียวกันก็จะสลายตัวให้ก๊าซแอมโมเนียซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะได้ก๊าซไนโตรเจนและน้ำ ก๊าซไนโตรเจนจะช่วยเจือจางออกซิเจนในอากาศซึ่งเป็นองค์ประกอบในการเกิดไฟอีกด้วย (เพชรรัตน์ และคณะ, 2551) โดย APP มีกลไกการทำงานดังนี้เมื่อเกิดการลุกติดไฟ APP เกิดการสูญเสียโมเลกุลของแอมโมเนียกลายเป็น polyphosphoric acid ซึ่งเกิดการสูญเสียน้ำจนกลายเป็นสารประกอบที่มีลักษณะเป็นวงและเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่พร้อม ๆ กับการสลายตัวด้วยความร้อนจนกลายเป็นถ่าน (Char) (Zhao *et al.*, 2008) และ APP ยังสลายตัวให้ก๊าซแอมโมเนียซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะได้ก๊าซไนโตรเจน โดยก๊าซไนโตรเจนจะช่วยเจือจางออกซิเจนในอากาศซึ่งเป็นองค์ประกอบในการเกิดติดไฟอีกด้วย (เพชรรัตน์ และคณะ, 2551) ดังปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 (Zhao *et al.*, 2008)

ปฏิกิริยาที่ 1

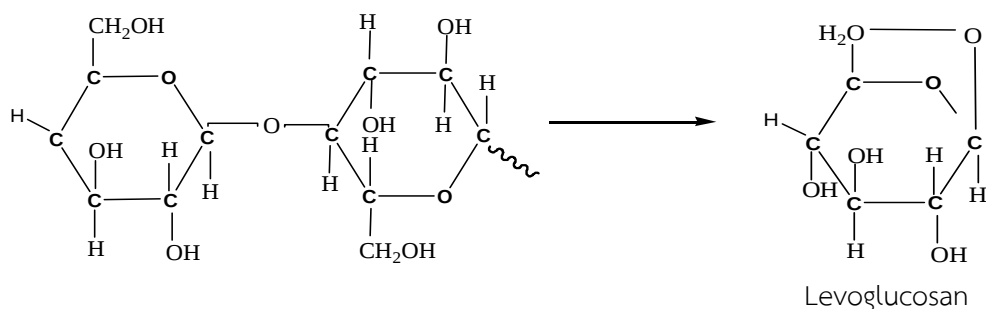


ปฏิกิริยาที่ 2



เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการนำสารพวอินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphate) มาใช้เป็นสารทนไฟเช่น triethyl phosphate และ tris-(2-chloro ethyl) phosphate และสารเหล่านี้จะมีผลต่อการป้องกันการเผาไหม้ในพอลิเมอร์หลายชนิด เกลือฟอสเฟต หรือเอสเทอร์ของฟอสเฟตจะทำหน้าที่ให้เกิดกรดฟอสฟอรัสและสมบัติการทนไฟจะเกี่ยวข้องกับกรดนี้

เมื่อให้ความร้อนแก่เซลลูโลสที่อุณหภูมิมากกว่า 250 °C ประมาณเศษหนึ่งส่วนสามของสารระเหยประกอบไปด้วย น้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และอะซีตัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) ส่วนที่เหลือจะได้สาร Levoglucosan ดังปฏิกิริยา



เมื่อมีสารทนไฟฟอสเฟต กรดฟอสฟอริก จะไปรวมกับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลส ที่จะสลายกลายเป็นพันธะคู่ในโครงสร้างทำให้เกิด Conjugated structure ขึ้นในเซลลูโลสทำให้เกิดการไหม้เกรียมขึ้น

หน้าที่ของสารประกอบฟอสฟอรัสในการดับไฟมี 2 อย่างคือ (Grassie and Scott, 1985, Jeng *et al.*, 2002)

1. เกิดส่วนที่ติดไฟมีปริมาณน้อยลง
2. พอลิเมอร์จะถูกป้องกันจากความร้อน และจะดับโดยน้ำที่คายออกมา

ส่วนสารประกอบฟอสฟอรัสจะใช้ทั้งในรูป Additive หรือ Reactive monomer โดย Reactive monomer จะได้เปรียบกว่าโดยจะเข้าไปเป็นสารทนไฟในโครงสร้างซึ่งจะเกาะแน่นในโมเลกุลของพอลิเมอร์

3.1.5 สารอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) (Grassie and Scott, 1985)

ที่ผ่านมาสารประกอบของอะลูมิเนียม เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นสารทนไฟ ที่จะใช้ในรูปของอะลูมิเนียม (Alum) ซึ่งใช้มาเป็นเวลาอย่างน้อย 200 ปี มาแล้ว โดยใช้ในเซลลูโลสจำพวกผ้าและไม้สัก อะลูมิเนียมยังคงใช้กันอยู่เพื่อเป็นสารทนไฟ แต่ไม่ค่อยเป็นสารทนไฟที่สำคัญในวัสดุพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามอะลูมิเนียมออกไซด์ไตรไฮเดรต ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ได้นำมาใช้เป็นสารประกอบทนไฟในเทคโนโลยีพอลิเมอร์ อะลูมินาเคยใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางฟิสิกส์และใช้เพื่อลดต้นทุนในการผลิตลงโดยใช้สัดส่วนประมาณ 70% โดยน้ำหนักของอะลูมินา อะลูมินาในรูปของน้ำ (Hydrated foam) ของ Al_2O_3 จะมีผลต่อการทนไฟ ซึ่งเป็นตัวสำคัญที่จะเกิดปฏิกิริยา $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ประกอบด้วยน้ำ 35% โดยน้ำหนัก และจะคายน้ำออกมาโดยการดูดความร้อน ในขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอุณหภูมิประมาณ 230 และ 330 °C ผลการทนไฟในการเกิดปฏิกิริยาจะเกี่ยวข้องกับปัจจัยดังต่อไปนี้

1. การดูดความร้อน (Endothermic) ของกระบวนการการคายน้ำ (Dehydration process) จะมีผลทำให้ความร้อนของวัสดุที่ถูกเผาไหม้เย็นลง
2. ปริมาณของน้ำจำนวนมากที่ผสมอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่มีเปลวไฟทำให้เกิดช่องว่าง และดับไฟลง

3. พอลิเมอร์ที่สลายตัวจะสลายตัวที่อุณหภูมิระหว่าง 230 ถึง 330 °C ดังนั้นจากคำกล่าวที่ว่า “ถูกกาลเทศะ” (Right place at the right time) ก็ถูกนำไปประยุกต์ให้เข้ากับหลักการดังกล่าว

4. ขี้เถ้า (Involatile ash) ของ Al_2O_3 ที่เหลืออยู่ที่ผิวของวัสดุหลังจากพอลิเมอร์ถูกทำลายจะช่วยป้องกันผิวเยื่อข้างล่างของพอลิเมอร์เอาไว้

3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chapman *et al.* (1930) รายงานว่าฟองน้ำสามารถเตรียมขึ้นจากน้ำยางธรรมชาติที่มีส่วนผสมของสารที่ทำให้เกิดฟองโดยการตีปั่นโดยการเป่าอากาศเข้าไปและพบว่าสารที่ทำให้เกิดฟองที่เหมาะสมคือแอมโมเนียมโอเลเอต ส่วนสารที่เป็นเจลหลักที่ใช้เหมาะสมเมื่อใช้กับสารที่ทำให้เกิดฟองคือโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ โพแทสเซียมซิลิโคฟลูออไรด์ หรือแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต โดยสามารถที่จะเติมลงไปก่อนการเกิดฟองได้

Blackley (1997) อธิบายกระบวนการเตรียมฟองน้ำโดยวิธีการดันลอป (Dunlop Process) โดยการใช้เครื่องตีครีมสำหรับทำขนมเค้ก ตียางฟองน้ำจากวัตถุดิบน้ำยางธรรมชาติขึ้น ซึ่งใช้สบู่เป็นสารก่อฟอง และเจลด้วยสารออกไซด์ของสังกะสี (Zinc oxide, ZnO) ปริมาณ 3-5 phr และโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) ปริมาณ 1.5 phr ทำการวัลคาไนซ์โดยการอบด้วยไอน้ำล้างและอบแห้ง

Li *et al.* (2002) โครงสร้างไบโซคลิกฟอสเฟตได้นำมาเติมในเรซินอีพอกซีเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่ทนไฟปราศจากหมู่ฮาโลเจนให้ค่า LOI การทดสอบ UL-94 คอร์เคลอริมิเตอร์ TGA และ FT-IR เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้สมบัติเชิงความร้อนและโครงสร้างของเก้าอี้ริมผลแสดงให้เห็นการใช้ไบโซคลิกฟอสเฟตในโครงสร้างอีพอกซีทำให้สมบัติการทนต่อเปลวไฟและสมบัติเชิงความร้อนดีขึ้น แก๊สพิษและควันก็ขับออกมาน้อยลง ไบโซคลิกฟอสเฟต-1-ออกโซ-4-ไฮดรอกซีเมทิล-2,6,7-ไตรออกซา-1-ฟอสฟาโบไซโครออกเทน (PEPA) ทำหน้าที่ไม่ใช้เฉพาะทำให้เป็นตัวทำให้แข็งตัวเท่านั้นแต่จะเป็นตัวกันการเกิดควันของอีพอกซีด้วย PEPA จึงเหมาะที่จะเป็นสารที่ช่วยทนไฟและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Wang and shi (2006) ไดอะครีโลลิวออกซีเอทิลเบนซีนฟอสฟอนเนส (DABP) และไดอะครีโลลิวออกซีเอทิลฟีนีลเบนซีนฟอสฟอนเนส (APBP) สังเคราะห์ได้โดยเริ่มต้นจากไดฟีนีลฟอสฟอนิกไดคลอไรด์และวิเคราะห้โครงสร้างโดยเครื่องมืออินฟราเรดสเปกโตรสโคปีและนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี ทำได้โดยนำไดอะครีโลลิวออกซีเอทิลเบนซีนฟอสฟอนเนส (DABP) และไดอะครีโลลิวออกซีเอทิลฟีนีลเบนซีนฟอสฟอนเนส (APBP) มาผสมในอัตราส่วนร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนักกับ อีพอกซีอะครีเลทโอลิโกเมอร์ (EB600) ทำให้ได้สารทนไฟที่สามารถเกิดโครงสร้างร่างแหโดยยูวี ความหนืดลดลงมากโดยการเติมสารมอนอเมอร์ที่ว่องไว ในขณะที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเมอร์ที่ใช้แสงเพิ่ม พฤติกรรมการย่อยสลายโดยความร้อนและการทนไฟของฟิล์มพอลิเมอร์เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหโดยใช้แสงยูวี ได้ศึกษาด้วยเครื่องมือเทอร์โมกราวิเมตริกานาไลเซอร์และค่าดัชนีการจำกัดออกซิเจน (LOI) ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการผสมอีพอกซีอะครีเลทกับไดอะครีโลลิวออกซีเอทิลเบนซีนฟอสฟอนเนสหรือไดอะครีโลลิวออกซีเอทิลฟีนีลเบนซีนฟอสฟอนเนสทำให้มีการปรับปรุงความเสถียรต่อความร้อนทำให้คงทนต่ออุณหภูมิสูงขึ้นและร้อยละการเผาไหม้ลดลง

มีค่า LOI สูง ข้อมูลจากการวิเคราะห์โดยเครื่องพลศาสตร์เชิงกลแสดงให้เห็นว่าไดอะครีโลลิวออกซีเอทิลเบนซีนฟอสฟอเนสและไดอะครีโลลิวออกซีเอทิลฟีนีสเบนซีนฟอสฟอเนสสามารถผสมกับอีพอกซีอะครีเลทโอลิโกเมอร์โครงสร้างได้ดีมากความหนาแน่นร่างแหเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของไดอะครีโลลิวออกซีเอทิลเบนซีนฟอสฟอเนสหรือไดอะครีโลลิวออกซีเอทิลฟีนีสเบนซีนฟอสฟอเนสที่ใช้ผสม อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนจากลักษณะคล้ายแก้วเป็นยางของเรซินผสมลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีอะครีเลทโอลิโกเมอร์บริสุทธิ์

Chougrani *et al.* (2008) สารประกอบไฮดรอกซีอะมิโนไดฟอสฟอเนส (HO-Cn-NH_2) โดย $2 \leq n \leq 11$ ได้สังเคราะห์สำเร็จโดยใช้ปฏิกิริยาคาร์แบซนิค-ฟิลด์ (Kabachnik-Field reaction) ที่อุณหภูมิ 70 องศาและได้ผลผลิตสูง แล้วนำสารประกอบไฮดรอกซีเหล่านี้ไปทำปฏิกิริยากับเมตะครีโลอิลคลอไรด์ ทำให้เกิดอะมิโนไดฟอสฟอเนสเมตะครีเลต (MACnNP_2) โดย $2 \leq n \leq 11$ จะได้ผลผลิตที่บริสุทธิ์สูงมากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเรดิคอลของ MACnNP_2 กับ MMA พบว่ามีค่า r_1 (เป็นของ MACnNP_2) อยู่ในช่วง 1.1-1.3 ส่วนค่า r_2 (เป็นของ MMA) จะมีค่าประมาณ 0.8 แสดงให้เห็นว่าหมู่ไดฟอสฟอเนส จะสร้างพันธะกับสายโซ่ของเมตะครีลิกแบบสุ่ม

Hoang *et al.* (2008) สารประกอบออร์กาโนไซคลิกฟอสฟอรัสในกลุ่มเดียวกันหลายตัวได้สังเคราะห์ขึ้นเพื่อที่จะศึกษาสมบัติการทนไฟเมื่อใช้ร่วมกับยางอะครีโลไนไตรบิวตะไดอินสไตรีน (ABS) ความสำเร็จของการสังเคราะห์ได้ยืนยันด้วย $^1\text{H-NMR}$ และ $^{31}\text{P-NMR}$ ผลจากการวิเคราะห์โดย TGA แสดงให้เห็นว่าสารประกอบออร์กาโนไซคลิกฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์ในงานวิจัยนี้แสดงการสลายตัวขึ้นตอนเดียวระหว่างอุณหภูมิ 250-400 องศาเซลเซียส เชื่อว่าเป็นผลอันเนื่องมาจากวัฏภาคไอมมากกว่าวัฏภาคควบแน่น จากการทดสอบ UL-94 ได้ผลเป็น V-0 ที่มีการเติมไซคลิกแอลคิลฟอสฟอเนต ซึ่งเป็นสารทนไฟในปริมาณ 15-35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่เดียวกันใช้เพียง 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพื่อที่จะให้ได้เป็น V-0 สำหรับพอลิคาร์บอเนต ผลของทุกๆตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าผลที่จะทำให้เกิดการหน่วงการติดไฟขึ้นอยู่กับปริมาณของฟอสฟอรัสในงานวิจัยนี้กลไกของการสารประกอบไซคลิกฟอสฟอรัสได้มีการอธิบายเช่นกัน

Hoang and Kim (2008) อิทธิพลของโครงสร้างของสารช่วยทนไฟออร์กาโนฟอสเฟตได้มีการศึกษาสารประกอบสไปโรบิสฟอสฟอรัสหลายตัวรวมถึง 3,9-ไดออกโซ-3,9-ไดออกโซ-2,4,8,10-เททระออกโซ-3,9-ไดฟอสฟาสปีโร-5,5-อันเดเคได้เตรียมขึ้นโดยวิธีการหลายอย่าง ตัวอย่างเป็นปฏิกิริยาอาร์บูซอพ โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ได้มีการยืนยันความถูกต้อง $^1\text{H-NMR}$ และ $^{31}\text{P-NMR}$ ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธี TGA พบว่าสารประกอบฟอสฟอรัสที่เป็นวงจะมีการสลายตัวเป็นขั้นตอนเดียวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 250-400 องศา และจะมีผลในวัฏภาคแก๊สมากกว่าในวัฏภาคควบแน่น สารประกอบดังกล่าวได้นำมาผสมกับยาง ABS หรือพลาสติกคาร์บอเนต สมบัติการทนไฟของวัสดุเหล่านี้ได้ทดสอบด้วย UL-94 พบว่าอยู่ในระดับ V-0 เมื่อมีสารช่วยทนไฟ 15-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและปริมาณน้อยกว่าเมื่อใช้กับพอลิคาร์บอเนตทั้ง 2 กรณีปรากฏว่าความสามารถในการทนไฟนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของฟอสฟอรัส

Zhao *et al.* (2008) ระบบการทนไฟใหม่ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ได้เตรียมขึ้นโดยใช้พอลิฟอสเฟตและเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH) จากการศึกษาวัสดุเชิงประกอบของ PVA ซึ่งประกอบด้วย PVA/APP/LDH ที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าทุกตัวอย่างของ PVA/APP/LDH

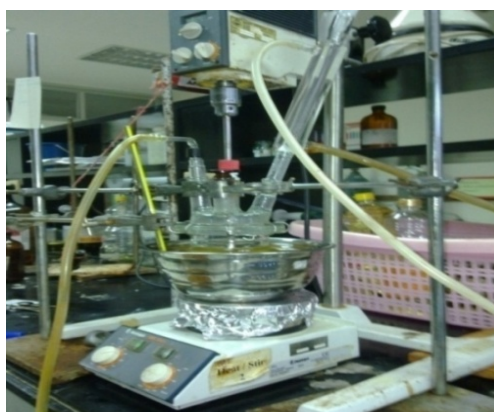
จะมีความหนาไฟเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ LDH ในช่วง 0.1-1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทำให้มีค่า LOI สูงขึ้น 33 และมีค่า UL-94 ในระดับ V-0 ของวัสดุเชิงประกอบเกือบทุกชนิด จากการศึกษาวิเคราะห์โดย TGA พบว่า PVA/APP/LDH แสดงอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นที่อุณหภูมิสูงกว่าของ PVA/APP ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างของส่วนที่เหลือจากการเผาจาก LOI เมื่อศึกษากับ FT-IR และ XPS เพื่อที่จะศึกษาถึงกลไกของการเกิดถ่านจากการทดสอบสมบัติเชิงกล LDH ช่วยเพิ่มค่างมอดุลัสและค่าระยะการยืดจนขาดของวัสดุเชิงประกอบ PVA/APP

4.วิธีการดำเนินการวิจัย

4.1 การเตรียมสารประกอบฟอสฟอรัส

4.1.1 การเตรียมสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต (Melamine polyphosphate, MPP) (Xiaomin *et al.*, 2011)

นำสารเมลามีน 126 กรัมใส่ในขวด 5 คอหลังจากนั้นเติมน้ำ 1500 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และกวนด้วยความเร็วรอบ 100 rpm เป็นเวลา 90 นาที หลังจากนั้นเติมสาร APP เกรด Exolit AP 422 ต่อน้ำในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ค่อย ๆ เติมจากนั้นผสมกวน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 95 °C ทำให้เย็นและเกิดผลึกของ MPP กรองและทำให้แห้งที่ อุณหภูมิ 100 °C หลังจากนั้นนำ MPP ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค FT-IR และ NMR



รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์การเตรียมสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต (Melamine polyphosphate, MPP)

4.1.2 การเตรียมสาร 1,3-ฟีนีลีนไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์ (1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite, mPDA-P) ดัดแปลงจากงานวิจัย Chougrani *et al.*, (2008)

นำ 1,3-Phenylenediamine 5.00 กรัม Para-formaldehyde 6.03 กรัม และเติมตัวทำละลาย Tetrahydrofuran 500 มิลลิลิตร ผสมกันในขวด 5 คอ ตั้งชุดรีฟลักซ์ภายใต้สภาวะไนโตรเจนที่อุณหภูมิที่ใช้ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นค่อย ๆ เติม Dimethylphosphite 21.5 กรัม ที่ละลายอย่างระมัดระวังพร้อมกับ Reflux อุณหภูมิที่ใช้ 70 °C 24 ชั่วโมง เกิดเป็นสารละลายที่มีสีแดงอิฐ ต่อจากนั้นนำสารที่ได้ทำให้เย็น เพื่อทำให้เกิดเป็นตะกอนจึงระเหยเพื่อเอา Tetrahydrofuran ออกจากผลิตภัณฑ์ ต่อจากนั้นล้างตะกอนด้วย 0.1 N NaOH เพื่อขจัด para formaldehyde และ

Dimethylphosphite นำไปกรองแบบลดความดัน ได้ตะกอนสีส้มนำไปอบด้วยตู้อบลดความดันที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำ mPDA-P ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค FT-IR และ NMR

หมายเหตุ ชุดอุปกรณ์การเตรียมมีลักษณะเช่นเดียวกับการเตรียมสารเมลามีนพอลิฟอสเฟตดังรูปที่ 2

4.3 การเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ

4.3.1 การบ่มน้ำยางกับสารเคมี

นำน้ำยาง สบู่ สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่ง และสารแอนติออกซิแดนท์ มาผสมกันตามสูตรดังนี้

สารที่ใช้	สูตรแห้ง
60% NR	100
20% K-Oleate	1.0
50% Sulphur	2.0
50% ZDEC	1.0
50% ZMBT	1.0
50% Wingstay L	1.0

ให้เติมสบู่ลงในน้ำยาง แล้วจึงเติมสารอื่นๆ ที่เหลือ กวน บ่มเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องพร้อม ๆ กับ กวนอย่างช้า ๆ ประมาณ 50 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดแล้วจึงนำน้ำยางที่บ่มไว้มาใช้

4.3.2 การตีฟอง

นำน้ำยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้มาตีฟองในเครื่องตีฟอง ซึ่งมีหม้อกวนกับที่ตีฟองมีซี่ลวด ความเร็วที่ใช้ตีสามารถปรับความเร็วให้ช้า เร็ว ได้ การตีฟองจะให้ฟองน้ำนิ่มหรือแข็งขึ้นอยู่กับ ปริมาตรของการฟองของฟองยาง การตีฟองในตอนแรกจะตีอย่างรวดเร็วจนได้ปริมาตรตามที่ต้องการ แล้วลดความเร็วเพื่อย่อยฟองยางเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นเติม Zinc Oxide ลงไปกวนด้วยความเร็วช้าเป็นระยะเวลา 1 นาที แล้วจึงค่อยเติม DPG+TETA สารทนไฟประเภทฟอสฟอรัส และ SSF ลงไปอย่างช้า ๆ ตามลำดับ แล้วจึงเทลงเบ้าเมื่อฟองยางเกิดการเจล นำไปอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างน้ำ จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมและสมบัติของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟด้วยสารประกอบฟอสฟอรัส

4.4.1 สังเคราะห์สารประกอบฟอสฟอรัสเมลามีนพอลิฟอสเฟตและสาร 1,3-ฟีนิลีนไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์

4.4.2 ศึกษาการทนไฟของฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสารประกอบฟอสฟอรัสที่ระดับต่าง ๆ

APP ที่ระดับ 30, 37, 40 และ 43 phr

MPP ที่ระดับ 25, 30, 35 และ 37 phr

mPDA-P ที่ระดับ 30, 35, 37 และ 40 phr

4.4.3 ศึกษาการแปรปริมาณสารก่อเจลหลัก SSF ที่ระดับ 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 phr

4.4.4 ศึกษาการแปรปริมาณสารก่อเจลเสริม DPG

เมื่อใช้กับ APP ที่ระดับ 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 phr

เมื่อใช้กับ MPP ที่ระดับ 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 phr

และเมื่อใช้กับ mPDA-P ที่ระดับ 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 phr

4.4.5 ศึกษาสมบัติการทนไฟของฟองน้ำยางธรรมชาติเมื่อใช้สารอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ที่ระดับ 50, 100, 120 และ 150 phr

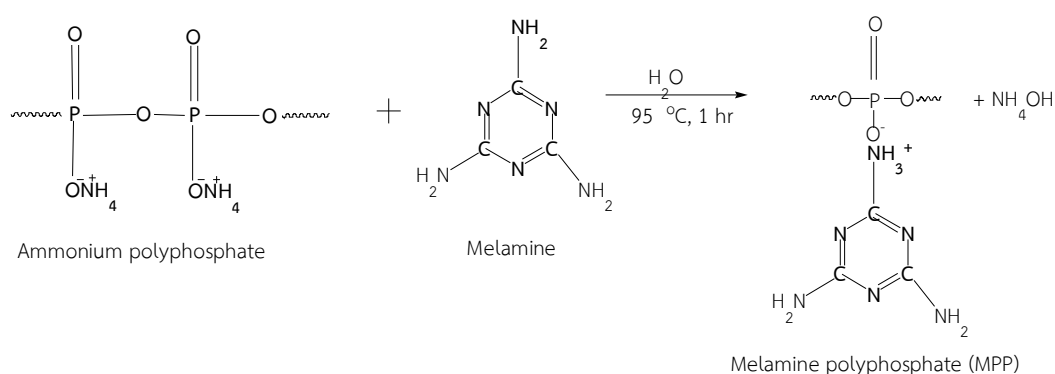
4.4.6 ศึกษาสมบัติการทนไฟโดยใช้สารอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัสที่สัดส่วนต่าง ๆ ATH/APP, ATH/MPP และ ATH/mPDA-P ที่สัดส่วน 80/20, 80/25, 100/20 และ 100/25 โดยน้ำหนัก

4.4.7 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติการทนไฟ และสมบัติเชิงความร้อน ของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟสามารถดูวิธีการได้จากภาคผนวก

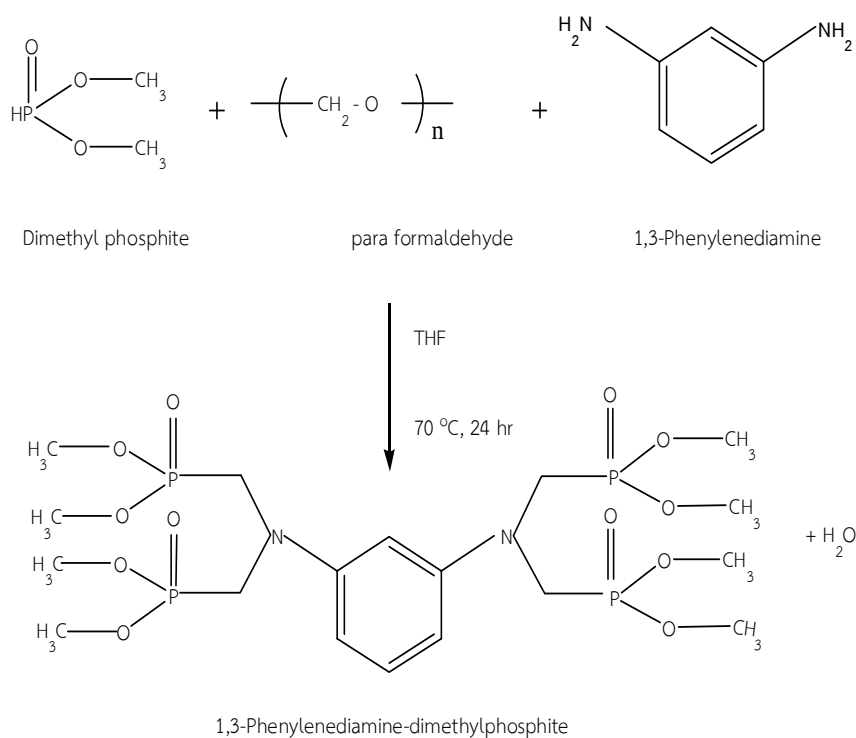
5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 การเตรียมสารเมลามีนพอลิฟอสเฟตและสาร 1,3-ฟีนิลีนไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์และการตรวจสอบโครงสร้าง

การเตรียมสารเมลามีนพอลิฟอสเฟตและสาร 1,3-ฟีนิลีนไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์ เพื่อใช้เป็นสารช่วยทนไฟประเภทฟอสฟอรัสสามารถเตรียมได้โดยการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 3 และ 4



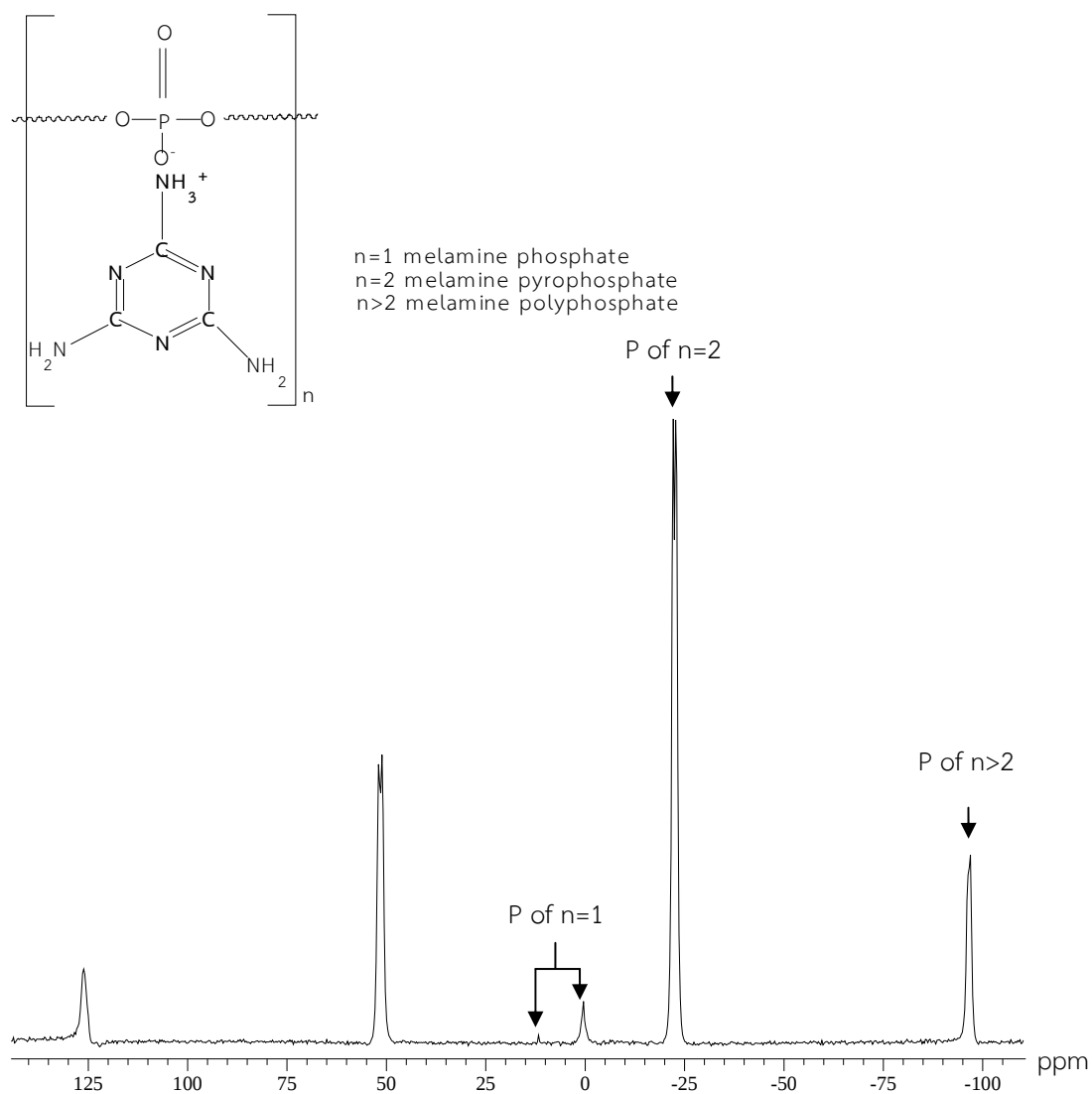
รูปที่ 3 ปฏิกิริยาการเตรียมสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต



รูปที่ 4 ปฏิกิริยาการเตรียมสาร 1,3-ฟีนีลีนไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์
การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโท
รอสโกปีและเทคนิคโปรตอน, คาร์บอน และฟอสฟอรัสนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์

รูปที่ 5 สเปกตรัมอินฟราเรดของสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต
จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่อตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของสารที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค
อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ปรากฏแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่แสดงลักษณะของหมู่ฟังก์ชันต่าง

ๆ ดังนี้ โดยพีคที่เลขคลื่น 3500 , 3410 และ 3330 cm^{-1} เป็นพีคที่แสดงถึงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เกิดจากการสั่นของพันธะ N-H ของ secondary amine พีคที่เลขคลื่น 3190 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ N-H ของ NH_3^+ ที่เลขคลื่น 1640 cm^{-1} เป็นพีคที่แสดงถึงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เกิดจากการสั่นของพันธะ C=N ที่เลขคลื่น 1422 และ 1269 cm^{-1} เป็นพีคที่แสดงถึงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เกิดจากการสั่นของพันธะ P=O ของหมู่ฟอสเฟต และที่เลขคลื่น 1086 และ 896 cm^{-1} เป็นพีคที่แสดงถึงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เกิดจากการสั่นของพันธะ P-O-P ของหมู่ฟอสเฟต

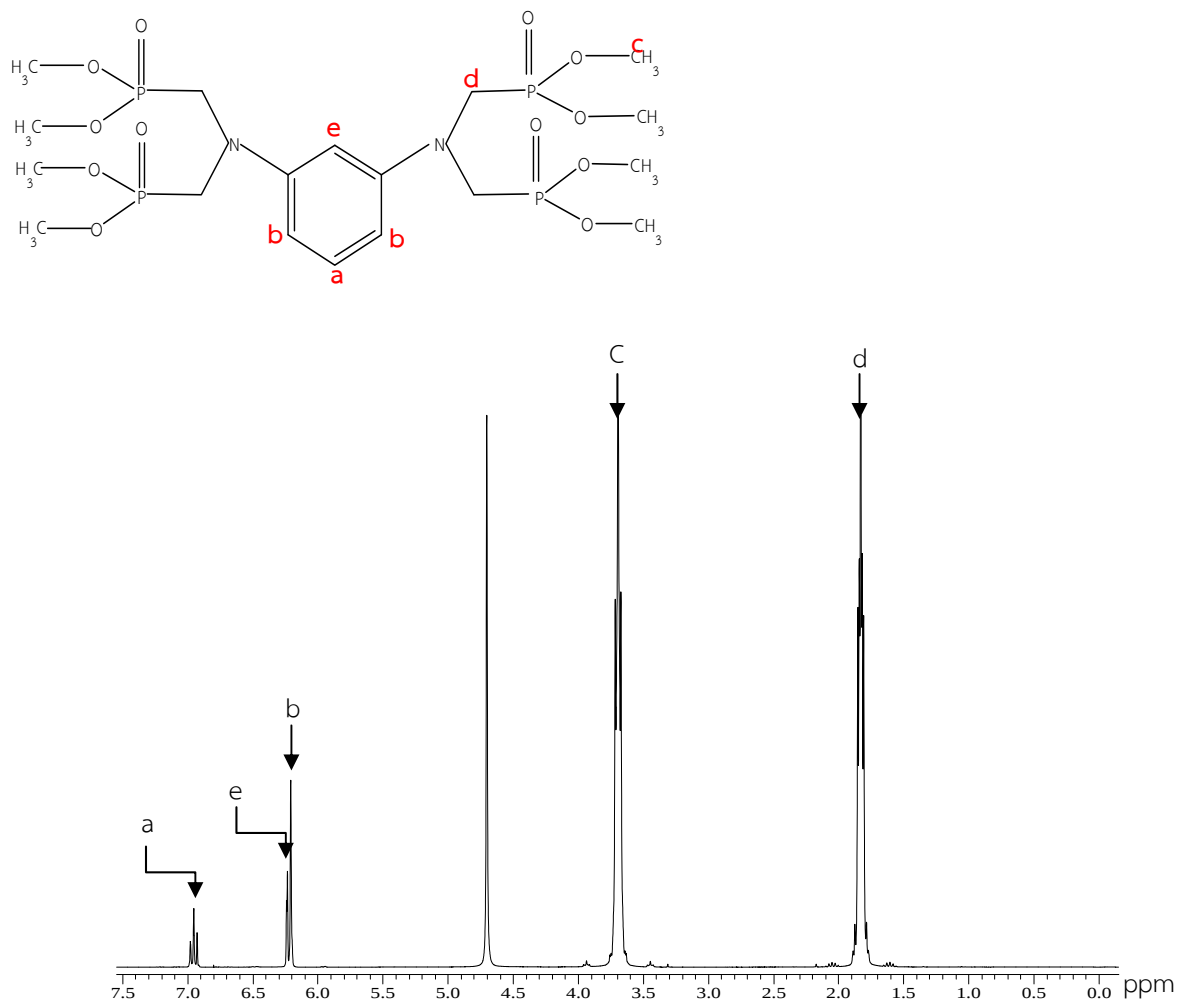


รูปที่ 6 สเปกตรัม ^{31}P -NMR ของสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต

จากรูปที่ 6 สัญญาณ ^{31}P -NMR ของตำแหน่งฟอสฟอรัสซึ่งเป็นของสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต ปรากฏที่ค่า chemical shift ที่ 2 และ 10 ppm เป็นสัญญาณตำแหน่งฟอสฟอรัสในตำแหน่งของ melamine phosphate ที่ค่า chemical shift -25 ppm เป็นสัญญาณตำแหน่งฟอสฟอรัสที่อยู่ภายในโครงสร้างของ melamine pyrophosphate และที่ chemical shift -100 ppm เป็นสัญญาณตำแหน่งฟอสฟอรัสที่อยู่ภายในโครงสร้างของ melamine polyphosphate ดังนั้นจากข้อมูลสเปกตรัมอินฟราเรดและสเปกตรัมคาร์บอน, ฟอสฟอรัสนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สามารถยืนยันโครงสร้างของสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต

รูปที่ 7 สเปกตรัมอินฟราเรดของสาร 1,3-ฟีนิลไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์

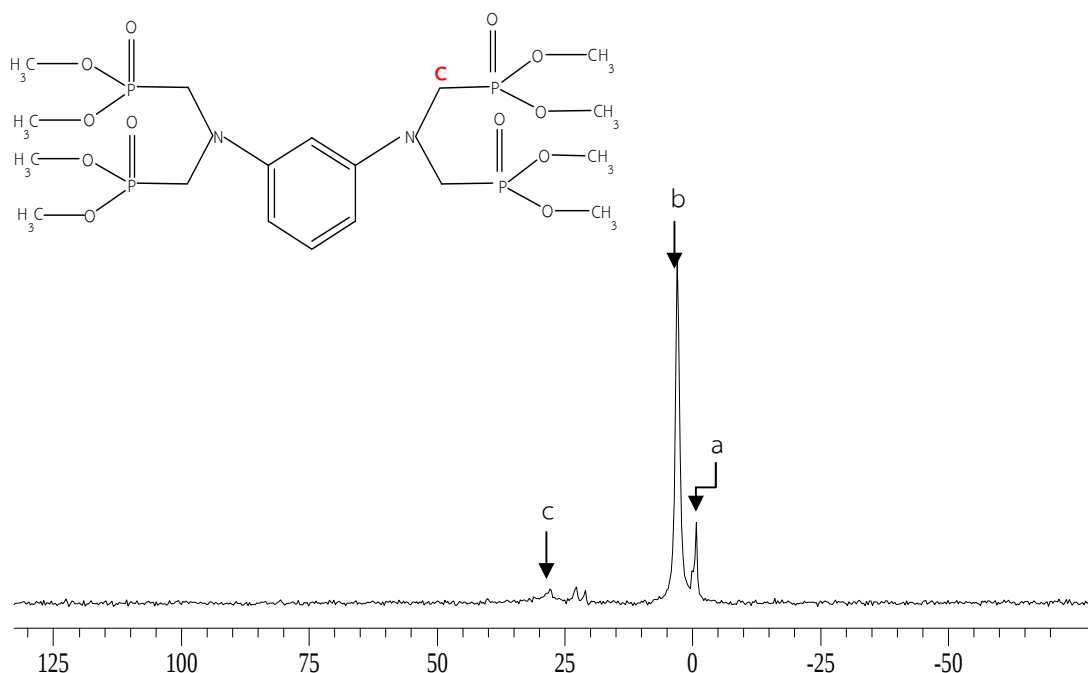
จากรูปที่ 7 พบว่าเมื่อตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของสารที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรสเปกโตรสโคปี ปรากฏแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่แสดงลักษณะเฉพาะของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนี้ โดยพีคที่เลขคลื่น 1511 และ 1460 cm^{-1} เป็นพีคที่แสดงถึงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการสั่นของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ของวงอะโรมาติก พีคที่เลขคลื่น 1251 cm^{-1} เป็นพีคที่แสดงถึงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการสั่นของพันธะ $\text{P}=\text{O}$ ของหมู่ฟอสเฟต พีคที่เลขคลื่น 1068 cm^{-1} เป็นพีคที่แสดงถึงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการงอของพันธะ $\text{C}-\text{O}$ พีคที่เลขคลื่น 1020 , 980 cm^{-1} เป็นพีคที่แสดงถึงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการสั่นของพันธะ $\text{P}-\text{O}-\text{C}$ และพีคที่เลขคลื่น 720 cm^{-1} เป็นพีคที่แสดงถึงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการงอของพันธะ $=\text{C}-\text{H}$



รูปที่ 8 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของสาร 1,3-ฟีนิลไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์

จากรูปที่ 8 ซึ่งเป็นสเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ พบว่ามีสัญญาณของตำแหน่งโปรตอนซึ่งเป็นของวงแหวนอะโรมาติก ปรากฏที่ค่า chemical shift ที่ 6.90, 6.25 และ 6.18 ppm สัญญาณของตำแหน่งโปรตอนของ Methylene ปรากฏที่ค่า chemical shift 3.70 ppm และที่สัญญาณของตำแหน่งโปรตอนของ P-H ปรากฏที่ค่า chemical shift 1.80 ppm

a
b



รูปที่ 9 สเปกตรัม ^{31}P -NMR ของสาร 1,3-ฟีนิลไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์

จากรูปที่ 9 ซึ่งเป็น ^{31}P -NMR พบว่ามีสัญญาณของตำแหน่งฟอสฟอรัสที่ต่ออยู่กับอะตอมคาร์บอน (P-C) ปรากฏที่ค่า chemical shift 27.5 ppm สัญญาณของตำแหน่งที่เป็นของ P-O ปรากฏที่ค่า chemical shift 2.97 ppm และที่สัญญาณของตำแหน่ง P=O ปรากฏที่ค่า chemical shift -0.65 ppm จากข้อมูลสเปกตรัมอินฟราเรดและสเปกตรัมโปรตอน คาร์บอน และฟอสฟอรัส นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สามารถยืนยันโครงสร้างของสารที่เตรียมได้คือสาร 1,3-ฟีนิลไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์

5.2 ผลการศึกษาการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ

5.2.1 ผลการศึกษาการแปรปริมาณสารทนไฟแต่ละชนิด

การทดลองนี้เริ่มจากการเตรียมน้ำยางคอมพาวด์โดยเติม K-Oleate, Sulphur, ZMBT, ZDEC และ Wingstay L โดยบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องพร้อมกับกวนอย่างช้า ๆ ที่ความเร็วรอบ 50 rpm (เบญจ, 2546) เมื่อครบกำหนดนำน้ำยางคอมพาวด์ที่ได้มาตีฟอง สังเกตระยะเวลาการเจล ลักษณะฟองน้ำยางธรรมชาติก่อนและหลังอบด้วยไอน้ำ และนำยางฟองน้ำที่ได้ไปทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติการทนไฟ

การทดลองนี้ศึกษาสารทนไฟประเภทฟอสฟอรัส 3 ชนิด คือ สารแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) ที่ปริมาณ 30, 37, 40 และ 43 phr สารเมลามีนพอลิฟอสเฟต (MPP) ที่ปริมาณ 25, 30, 35 และ 37 phr และสาร 1,3-ฟีนิลไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์ (mPDA-P) ที่ปริมาณ 30, 35, 37 และ 40 phr โดยปรับ pH ของสารแขวนลอยสารทนไฟทั้ง 3 ชนิดที่ระดับ 10.0 ตามสูตรที่แสดงในตาราง

ที่ 1 แล้วสังเกตระยะเวลาการเจล ลักษณะฟองน้ำที่ขึ้นรูปเป็นฟองน้ำอย่างธรรมชาติหลังการนั่งด้วยไอน้ำ และทดสอบสมบัติของฟองน้ำอย่างธรรมชาติทนไฟ

หมายเหตุ

การแปรปริมาณของสารทนไฟ APP, MPP และ mPDA-P มีหลักการแปรโดยหาช่วงที่ฟองน้ำสามารถทนไฟ เมื่อได้ระดับช่วงที่ฟองน้ำมีความสามารถทนไฟจึงทำการแปรปริมาณสารทนไฟให้มีระดับที่ถี่ขึ้น

ตารางที่ 1 สูตรที่ใช้ในการศึกษาชนิดและปริมาณสารประกอบฟอสฟอรัสต่อการเตรียมน้ำยางธรรมชาติทนไฟที่ระดับต่าง ๆ

Ingredients	Dry Weight (phr)											
	APP				MPP				mPDA-P			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Part A												
60%NR Latex	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20%K-Oleate	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%Sulphur	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
50%ZDEC	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%ZMBT	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%Wing stay L	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Part B												
50%ZnO	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	30	30	30	30
10%TETA	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
33%DPG	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
50%APP	30	37	40	43	-	-	-	-	-	-	-	-
50%MPP	-	-	-	-	25	30	35	37	-	-	-	-
50%mPDA-P	-	-	-	-	-	-	-	-	30	35	37	40
10%SSF	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

จากการเตรียมน้ำยางธรรมชาติทนไฟโดยแปรปริมาณสารทนไฟที่ปริมาณต่าง ๆ และมีการปรับ pH ของสารทนไฟแต่ละชนิดด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับ 10.0 พบว่า ฟองน้ำยางธรรมชาติมีระยะเวลาการเจลเพิ่มขึ้น และลักษณะโครงสร้างของเซลล์ฟองน้ำมีความสม่ำเสมอลดลง ความเป็นโพรงของเซลล์ฟองน้ำเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจากสารทนไฟทั้ง 3 ชนิดได้ปรับ pH ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์โดยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์บางส่วนไปเพิ่มความเสถียรให้กับน้ำยาง ส่งผลให้น้ำยางมีความเสถียรเพิ่มขึ้นจึงทำให้การก่อเจลหลักเกิดการทำงานช้าลงทำให้เซลล์ของฟองน้ำที่ได้มีความสม่ำเสมอลดลงและความเป็นโพรงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารทนไฟแสดงดังรูปที่ 10-13



(a)

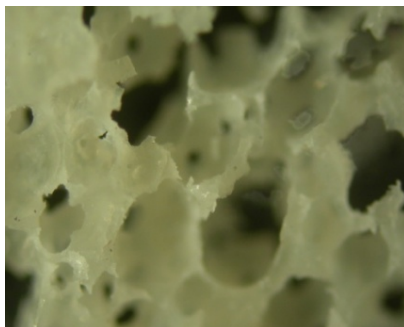


(b)



(c)

รูปที่ 10 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติ (a) เมื่อเติม APP 40 phr, (b) เมื่อเติม MPP 35 phr และ (c) เมื่อเติม mPDA-P 37 phr



รูปที่ 11 ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของฟองน้ำยางธรรมชาติเมื่อเติม APP ที่ 40 phr (กำลังขยาย x4)



รูปที่ 12 ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของฟองน้ำยางธรรมชาติเมื่อเติม ที่ 35 phr (กำลังขยาย x4)



รูปที่ 13 ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของฟองน้ำยางธรรมชาติเมื่อเติม mPDA-P ที่ 37 phr (กำลังขยาย x4)

5.2.1.1 สมบัติทางกายภาพของฟองน้ำ

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อแปรปริมาณของสารประกอบฟอสฟอรัสที่ระดับต่าง ๆ

Phosphate compound content (phr)	Gelling time (s)	Density (g/cm^3)	CFD (kPa)	Resilience (%)	Compression set (%)
Ammonium polyphosphate (APP)					
APP 30	185	0.138 ± 0.016	2.65 ± 0.43	35 ± 2	33.66 ± 1.28
APP 37	197	0.132 ± 0.013	2.49 ± 0.21	32 ± 2	35.53 ± 1.71
APP 40	207	0.129 ± 0.012	1.98 ± 0.51	30 ± 2	37.50 ± 1.95
APP 43	225	0.125 ± 0.012	1.79 ± 0.39	29 ± 1	40.50 ± 1.45
Melamine polyphosphate (MPP)					
MPP 25	250	0.143 ± 0.019	3.28 ± 0.17	37 ± 1	28.61 ± 1.25
MPP 30	267	0.139 ± 0.016	3.20 ± 0.71	34 ± 2	29.13 ± 1.39
MPP 35	275	0.135 ± 0.014	2.94 ± 0.45	33 ± 2	30.67 ± 1.35
MPP 37	287	0.132 ± 0.013	2.86 ± 0.42	29 ± 2	32.58 ± 1.38
1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite (mPDA-P)					
mPDA-P 30	230	0.140 ± 0.026	3.13 ± 0.40	36 ± 3	29.43 ± 1.45
mPDA-P 35	242	0.137 ± 0.015	3.06 ± 0.45	35 ± 2	31.32 ± 1.50
mPDA-P 37	256	0.135 ± 0.018	2.75 ± 0.57	32 ± 2	33.13 ± 1.29
mPDA-P 40	265	0.131 ± 0.023	2.61 ± 0.44	28 ± 2	34.07 ± 1.22

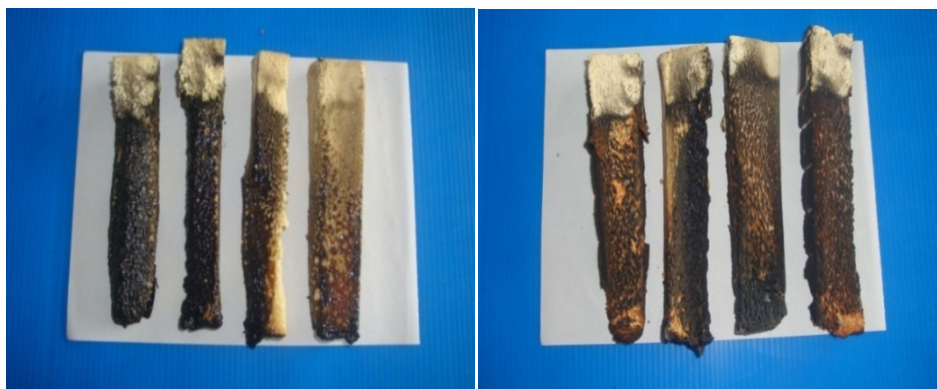
จากตารางที่ 2 แสดงสมบัติสมบัติทางกายภาพของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อแปรปริมาณของสารประกอบฟอสฟอรัสที่ระดับต่าง ๆ พบว่าฟองน้ำยางธรรมชาติที่เตรียมโดยใช้ทนไฟทั้ง 3 ชนิดเพิ่ม มีผลทำให้เวลาการเจลและค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัดของฟองน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่พบว่าค่าความหนาแน่น ค่า CFD และค่าการกระด้างตัวของฟองน้ำมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสารทนไฟทั้ง 3 ชนิดได้มีการปรับ pH ของสารทั้ง 3 ชนิดด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเมื่อเติมลงในน้ำยางส่งผลให้สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์บางส่วนไปเกาะบริเวณพื้นที่ผิวของอนุภาคมีผลให้อนุภาคของน้ำยางมีความเสถียรเพิ่มขึ้น จึงทำให้เมื่อเติมสาร SSF ลงในฟองยางเกิดการเจลอย่างช้า ๆ ไปมีผลให้ลักษณะของเซลล์ฟองน้ำมีขนาดเซลล์ไม่สม่ำเสมอจึงไปมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของฟองน้ำ และพบว่าเมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของสารทนไฟทั้ง 3 ชนิด พบว่าฟองน้ำยางธรรมชาติที่เตรียมโดยใช้สาร MPP มีสมบัติทางกายภาพดีที่สุด

5.2.1.2 ผลการทดสอบสมบัติการทนไฟ

ทำการทดสอบการทนไฟตามมาตรฐาน UL-94 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่วัดด้วยเรื่องการติดไฟและการลุกลามของไฟ โดยมีการรายงานผลเป็นช่วง V-0, V-1 และ V-2 โดยขึ้นตัวอย่างฟองน้ำที่ใช้ทดสอบคือฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสารแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate, APP) ที่ระดับ 30, 37, 40 และ 43 phr ฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต (Melamine polyphosphate, MPP) ที่ระดับ 25, 30, 35 และ 37 phr และฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสาร 1,3-ฟีนีลีนไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์ (1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite, mPDA-P) ที่ระดับ 30, 35, 37 และ 40 phr ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 14-16

ตารางที่ 3 ผลทดสอบการทนไฟของฟองน้ำยางธรรมชาติเมื่อเติมสารทนไฟประเภทฟอสฟอรัสที่ระดับต่าง ๆ

Flame retardants	Content of phosphorus compound (phr)	UL-94	
		Rating	Dripping
APP	30	No-Rating	Yes
	37	V-1	No
	40	V-0	No
	43	V-0	No
MPP	25	No-Rating	No
	30	V-1	No
	35	V-0	No
	37	V-0	No
mPDA-P	30	No-Rating	No
	35	V-1	No
	37	V-0	No
	40	V-0	No



รูปที่ 14 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมปริมาณ APP ที่ระดับ 30, 37, 40 และ 43 phr เรียงจากซ้ายไปขวาหลังการทดสอบการเผาไฟ

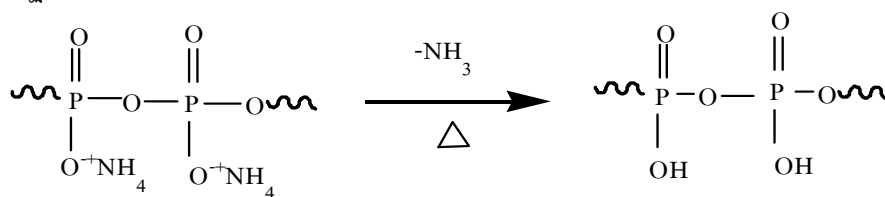
รูปที่ 15 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมปริมาณ MPP ที่ระดับ 25, 30, 35 และ 37 phr เรียงจากซ้ายไปขวาหลังการทดสอบการเผาไฟ



รูปที่ 16 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมปริมาณ mPDA-P ที่ระดับ 30, 35, 37 และ 40 phr เรียงจากซ้ายไปขวาหลังการทดสอบการเผาไฟ

จากตารางที่ 3 และรูปที่ 14 พบว่าการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟด้วยสารแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) ต้องเติมสารปริมาณ 40 phr ขึ้นไปจึงสามารถทนต่อการติดไฟได้ โดย APP สามารถช่วยทนไฟได้โดยการทำงานของสารฟอสฟอรัส กลไกการทำงานของ APP คือเมื่อเกิดการลุกติดไฟสารประกอบ APP เกิดการสูญเสียโมเลกุลของแอมโมเนียกลายเป็น polyphosphoric acid ซึ่งเกิดการสูญเสียน้ำหนักกลายเป็นสารประกอบที่มีลักษณะเป็นวงและเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่พร้อม ๆ กับการสลายตัวด้วยความร้อนจนกลายเป็นถ่าน (char) (Zhao *et al.*, 2008) และ APP ยังสลายตัวให้ก๊าซแอมโมเนียซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะได้ก๊าซไนโตรเจน โดยก๊าซไนโตรเจนจะช่วยเจือจางออกซิเจนในอากาศซึ่งเป็นองค์ประกอบในการเกิดติดไปอีกด้วย (เพชรรัตน์ และคณะ 2550) ดังปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 (Zhao *et al.*, 2008)

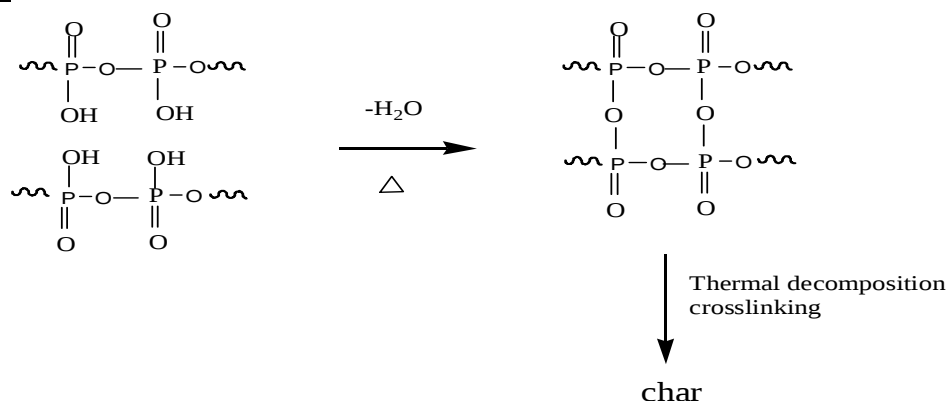
ปฏิกิริยาที่ 1



Ammonium polyphosphate

Polyphosphoric acid

ปฏิกิริยาที่ 2



รูปที่ 17 ปฏิกิริยาการสลายตัวของสารแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเมื่อได้รับความร้อน
(Zhao *et al.*, 2008)

จากตารางที่ 3 และรูปที่ 15 พบว่าฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟที่เติมสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต (MPP) ตั้งแต่ 35 phr ขึ้นไปจึงสามารถผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 อยู่ในระดับ V-0 ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสารทนไฟ MPP ภายในโครงสร้างของของ MPP มีธาตุที่สามารถช่วยหน่วงการติดไฟได้คือธาตุ ฟอสฟอรัส (P) และไนโตรเจน (N) ซึ่งเมื่อภายในโครงสร้างของสารนี้มีธาตุทั้งสองอยู่ทำให้ช่วยเสริมการทำงานร่วมกันโดยสารหน่วงไฟที่มีไนโตรเจนทำหน้าที่ในรูปของการเกิดอินทุมสเซนส์ (intumescent) เป็นลักษณะที่เกิดการพองตัวเป็นชั้นของชาร์ที่มีลักษณะคล้ายฟองยาง (สมศักดิ์, 2547 ; Laoutid *et al.*, 2009) ทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและการสัมผัสกับออกซิเจนให้แก่วัสดุ ส่วนสารหน่วงประเภทฟอสฟอรัสมีก่อการควบคุมการหน่วงไฟด้วยการขัดขวางทางกายภาพและทางเคมีในวัฏภาคแก๊ส และวัฏภาคของแข็ง (solid phase หรือ condensed phase) กลไกการทำงานคือทำหน้าที่เร่งให้คาร์บอนในโครงสร้างพองน้ำยางธรรมชาติเกิดการสลายตัวเร็วขึ้นเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟหรือเป็นถ่านคาร์บอน (char) เพื่อให้ส่วนที่มีการลุกติดไฟแยกห่างออกจากกันมากขึ้นในที่สุดไฟก็ไม่สามารถลุกลามไปส่วนนั้นได้ นอกจากนี้การทำให้เกิดถ่านคาร์บอน โดยเร่งให้วัสดุทำปฏิกิริยากับกรดลิวอิสผ่านคาร์บอนเนียมไอออนเกิดการขจัดน้ำ (dehydration) ของพองน้ำแล้วเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหและถ่านคาร์บอนจะช่วยในการหน่วงไฟโดยการเกิดเป็นชั้นถ่านคาร์บอนมาเคลือบพองน้ำไว้ ดังนั้นผิวของวัสดุไม่สัมผัสกับความร้อน

จากตารางที่ 3 และรูปที่ 16 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ mPDA-P เพิ่มขึ้นทำให้ฟองน้ำมีประสิทธิภาพการทนไฟดีขึ้น เนื่องจากการเติมปริมาณ mPDA-P ลงในน้ำยาง mPDA-P ก็จะเข้าไปแทรกอยู่ภายในโครงสร้างเซลล์ฟองน้ำมากขึ้นและลักษณะของโครงสร้าง mPDA-P มีลักษณะที่บานออกเหมือนดอกไม้ทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันกับโครงสร้างของน้ำยางที่แทรกอยู่ภายในโครงสร้างฟองน้ำ ทำให้เมื่อขั้นตอนการล้างฟองน้ำ mPDA-P มีโอกาสที่จะหลุดออกไปกับน้ำน้อย จึงทำให้ mPDA-P ที่อยู่ในโครงสร้างเซลล์ฟองน้ำทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยความสามารถการทนไฟของฟองน้ำเมื่อเติม mPDA-P จะต้องใช้ในปริมาณที่สูงกว่า 37phr ขึ้นไปทำให้ทนไฟได้โดย หลังจากทดสอบการเผาไฟของฟองน้ำตามมาตรฐาน UL-94 คือ ที่บริเวณของฟองน้ำจะมีลักษณะของแก้วเคลือบพื้นที่ผิวของฟองน้ำไว้ เพื่อป้องกันก๊าซออกซิเจนผ่านเข้าไปในโครงสร้างเซลล์ของฟองน้ำทำให้ก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบของการเผาไหม้ไม่สามารถเข้าไปได้จึงไม่สามารถที่จะลุกติดไฟได้ (Nguyen and Kim, 2008) สารทนไฟประเภทฟอสฟอรัสมีกลไกควบคุมการหน่วงไฟด้วยการขัดขวางทางกายภาพและทางเคมีในวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของแข็ง โดยการทำงานวัฏภาคของแข็ง (solid phase หรือ condensed phase) กลไกการหน่วงไฟนี้คือการที่สารหน่วงไฟทำหน้าที่เร่งให้ฟองน้ำเกิดการสลายตัวเร็วขึ้นเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟหรือถ่านคาร์บอน (char) เพื่อให้ส่วนที่มีการลุกติดไฟกับส่วนที่ยังไม่ลุกติดไฟแยกห่างออกจากกันมากขึ้น และในที่สุดไฟก็ไม่สามารถลุกลามไปถึงส่วนนั้นได้ นอกจากนี้การทำให้เกิดถ่านคาร์บอน โดยเร่งให้วัสดุทำปฏิกิริยากับกรดลิวอิสผ่านคาร์บอนเนียมไอออนเกิดการขจัดน้ำ (dehydration) ของพอลิเมอร์แล้วเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นร่างแห และถ่านคาร์บอนจะช่วยให้การหน่วงไฟโดยการเกิดเป็นชั้นถ่านคาร์บอนพอลิเมอร์ไว้ ดังนั้นผิวหน้าวัสดุจะไม่สัมผัสกับความร้อนจึงไม่ทำให้ติดไฟเมื่อเติมสารทนไฟในปริมาณ 37 phr ขึ้นไป

เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของฟองน้ำยางธรรมชาติที่เตรียมโดยใช้สารทนไฟทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติทางกายภาพไม่เท่าที่ควร ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงสูตรการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟทั้ง 3 ชนิดโดยมีการศึกษาการแปรปริมาณสารก่อเจลหลัก (SSF) และสารก่อเจลเสริม (DPG) เพื่อให้ได้ฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟทั้ง 3 ชนิดที่มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น

5.2.2 ผลการศึกษาการแปรปริมาณสารก่อเจลหลัก

ศึกษาการแปรปริมาณสารก่อเจลหลักของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟทั้ง 3 ชนิด ดังนี้ เติมสารแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate, APP) เติมสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต (Melamine polyphosphate, MPP) และสาร 1,3-ฟีนีลีนไดเอมีน-ไดเมทิลสฟอสไฟต์ (1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite ,mPDA-P) โดยใช้สารทนไฟที่ระดับ 40 phr, 35 phr และ 37 phr ตามลำดับ และได้ปรับ pH ของ APP, MPP และ mPDA-P ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับ 10.0 โดยศึกษาปริมาณของสารก่อเจลหลักที่ระดับ 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 phr

ตารางที่ 4 สูตรที่ใช้ในการศึกษาปริมาณสารก่อเจลหลักต่อการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟชนิดต่าง ๆ

Ingredients	Dry Weight (phr)											
	APP				MPP				mPDA-P			
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Part A												
60%NR Latex	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20%K-Oleate	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%Sulphur	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
50%ZDEC	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%ZMBT	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%Wing stay L	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Part B												
50%ZnO	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	30	30	30	30
10%TETA	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
33%DPG	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
50%APP	40	40	40	40	-	-	-	-	-	-	-	-
50%MPP	-	-	-	-	35	35	35	35	-	-	-	-
50%mPDA-P	-	-	-	-	-	-	-	-	37	37	37	37
10%SSF	1.0	1.2	1.4	1.6	1.0	1.2	1.4	1.6	1.0	1.2	1.4	1.6

จากการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟโดยใช้สารทนไฟแต่ละชนิดคือ APP ที่ระดับ 40 phr MPP 35 phr และ mPDA-P 37 phr โดยสารทนไฟทั้ง 3 ชนิดจะถูกปรับ pH ให้อยู่ที่ระดับ 10.0 ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) โดยมีการศึกษาการแปรปริมาณสารก่อเจลหลักที่ระดับ 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อเจลหลักเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการเจลของฟองน้ำลดลง และลักษณะของเซลล์ฟองน้ำมีความสม่ำเสมอเพิ่มขึ้น ความเป็นโพรงของเซลล์ฟองน้ำลดน้อยลงทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเติม SSF ลงในน้ำยางจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างน้ำกับโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์และเกิดการแตกตัวให้กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) ซึ่งมีผลทำให้ค่า pH ของน้ำยางค่อย ๆ ลดลง (Gazeley *et al.*, 1988; Madge, 1962) การเพิ่มปริมาณของ SSF ทำให้ฟองน้ำเกิดการเจลเร็วขึ้น จึงไปลดโอกาสการขยายตัวของฟองอากาศทำให้เซลล์ของฟองน้ำมีขนาดของเซลล์ที่ลดน้อยลงและความสม่ำเสมอของเซลล์ฟองน้ำเพิ่มขึ้น (Blackley, 1991a) ดังนั้นในการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟโดยใช้ APP เป็นสารทนไฟ และใช้สารก่อเจลหลัก SSF ปริมาณของ SSF ที่เหมาะสมที่เตรียมเป็นฟองน้ำ คือที่ระดับ 1.2 phr

และปริมาณสารก่อเจลหลักที่มีผลให้ฟองน้ำยางธรรมชาติของสาร APP, MPP และ mPDA-P คือเติมสาร SSF ที่ปริมาณ 1.2 phr แสดงดังรูปที่ 18-23



รูปที่ 18 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมสารก่อเจลหลัก SSF ที่ระดับต่าง ๆ เมื่อใช้ APP ที่ระดับ 40 phr และใช้ SSF ที่ระดับ 1.2 phr



รูปที่ 19 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมสารก่อเจลหลัก SSF ที่ระดับต่าง ๆ เมื่อใช้ MPP ที่ระดับ 35phr และใช้ SSF ที่ระดับ 1.2 phr



รูปที่ 20 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมสารก่อเจลหลัก SSF ที่ระดับต่าง ๆ เมื่อใช้ mPDA-P ที่ระดับ 37 phr และใช้ SSF ที่ระดับ 1.2 phr



รูปที่ 21 ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสาร APP และเติม SSF ที่ระดับ 1.2 phr (กำลังขยาย x4)



รูปที่ 22 ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสาร MPP และเติม SSF ที่ระดับ 1.2 phr (กำลังขยาย x4)



รูปที่ 23 ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสาร mPDA-P และเติม SSF ที่ระดับ 1.2 phr(กำลังขยาย x4)

5.2.2.1 สมบัติทางกายภาพของฟองน้ำ

ตารางที่ 5 สมบัติทางกายภาพของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อแปรปริมาณสารก่อเจลหลักที่ระดับต่าง ๆ

SSF content (phr)	Gelling time (s)	Density (g/cm ³)	CFD (kPa)	Resilience (%)	Compression set (%)
Ammonium polyphosphate (APP) 40 phr					
1.0	185	0.127±0.015	1.96±0.43	29±1	37.53±1.71
1.2	175	0.131±0.017	2.13±0.26	30±2	36.66±1.28
1.4	130	0.133±0.012	2.15±0.36	32±2	34.83±1.95
1.6	20	-	-	-	-
Melamine polyphosphate (MPP) 35 phr					
1.0	275	0.134±0.012	2.90±0.27	33±2	32.67±1.23
1.2	255	0.136±0.015	2.97±0.48	34±1	32.08±1.40
1.4	230	0.138±0.014	3.11±0.37	35±1	31.76±1.39
1.6	200	0.140±0.016	3.17±0.45	37±1	30.40±1.46
1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite (mPDA-P) 37 phr					
1.0	284	0.132±0.012	2.72±0.49	31±1	33.35±1.13
1.2	262	0.134±0.015	2.80±0.32	32±1	32.19±1.14
1.4	248	0.137±0.014	2.96±0.39	33±1	31.55±1.14
1.6	212	0.139±0.016	3.18±0.60	35±2	31.14±1.16

จากตารางที่ 5 ในการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟที่ใช้สารทนไฟประเภทฟอสฟอรัสทั้ง 3 ชนิดพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารก่อเจลหลักเพิ่มขึ้น มีผลให้ฟองน้ำเกิดการเจลเร็วขึ้น สมบัติทางกายภาพ ค่าความหนาแน่น ค่า CFD ค่าการระเบิดตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัดของฟองน้ำมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสารก่อเจลหลักไปลดโอกาสการขยายตัวของฟองยาง ทำให้ฟองยางมีขนาดเซลล์ที่สม่ำเสมอเพิ่มขึ้น

5.2.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารก่อเจลเสริมของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารก่อเจลเสริมของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟทั้ง 3 ชนิด โดย

1. เตรียมฟองน้ำโดยใช้เติม APP ที่ระดับ 40 phr ศึกษาการแปรปริมาณของสารก่อเจลเสริมที่ระดับ 0.7, 0.8, 0.9, และ 1.0 phr และได้ปรับ pH ของ APP ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับ 10.0 ใช้ TETA ที่ระดับ 1.0 phr และใช้ SSF ที่ระดับ 1.2 phr

2. เตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟโดยใช้ MPP ที่ระดับ 35 phr ศึกษาการแปรปริมาณของสารก่อเจลเสริมที่ระดับ 1.0, 1.2, 1.4, และ 1.6 phr และได้ปรับ pH ของ MPP ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับ 10.0 ใช้ TETA ที่ระดับ 1.0 phr และใช้ SSF ที่ระดับ 1.2 phr

3. และเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟโดยใช้ mPDA-P ที่ระดับ 37 phr ศึกษาการแปรปริมาณของสารก่อเจลเสริมที่ระดับ 1.0, 1.2, 1.4, และ 1.6 phr และได้ปรับ pH ของ mPDA-P ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับ 10.0 ใช้ TETA ที่ระดับ 1.0 phr และใช้ SSF ที่ระดับ 1.2 phr

สูตรการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟทั้ง 3 ชนิดแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สูตรที่ใช้ศึกษาปริมาณสารก่อเจลเสริมที่ระดับต่าง ๆ เมื่อใช้สารทนไฟชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ

Ingredients	Dry Weight (phr)											
	APP				MPP				mPDA-P			
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Part A												
60%NR Latex	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20%K-Oleate	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%Sulphur	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
50%ZDEC	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%ZMBT	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%Wing	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
stay L												
Part B												
50%ZnO	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	30	30	30	30
10%TETA	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
33%DPG	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.2	1.4	1.6	1.0	1.2	1.4	1.6
50%APP	40	40	40	40	-	-	-	-	-	-	-	-
50%MPP	-	-	-	-	35	35	35	35	-	-	-	-
50%mPDA-P	-	-	-	-	-	-	-	-	37	37	37	37
10%SSF	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

จากการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติโดยศึกษาอิทธิพลของ DPG ที่ระดับ 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 phr โดยใช้ APP ที่ระดับ 40 phr และศึกษาอิทธิพลของ DPG ที่ระดับ 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 phr เมื่อใช้ปริมาณของ MPP ที่ระดับ 35 phr หรือใช้ mPDA-P ที่ระดับ 37 phr โดยสารทนไฟทั้ง 3 ชนิดถูกปรับ pH ให้อยู่ในระดับ 10.0 ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH₄OH) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของสารก่อเจลเสริมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการเจลของฟองน้ำลดลง ทำให้ลักษณะโครงสร้างของเซลล์ฟองน้ำมีความสม่ำเสมอเพิ่มขึ้น ความเป็นโพรงของเซลล์ฟองน้ำลดลง เนื่องจากการใช้สารก่อเจลเสริมระหว่าง DPG ที่เพิ่มขึ้นและใช้ร่วมกับ TETA จึงส่งผลให้การทำงานร่วมกันของสารทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพราะว่าสารก่อเจลเสริมทั้งสองชนิดเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่ช่วยรักษาความเสถียรของฟองน้ำและช่วยส่งเสริมให้เกิดการเจล (Mausser, 1987) ทำให้ความเสถียรของฟองอากาศก่อนการเจลเพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ไปช่วยส่งเสริมการทำงานในกระบวนการเจลเกิดเร็วขึ้น ดังนั้นพบว่าการเพิ่มปริมาณของ DPG ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นและใช้ร่วมกับ TETA ส่งผลให้เซลล์ฟองน้ำมีความสม่ำเสมอเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 24-29



รูปที่ 24 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อใช้สาร APP ที่ระดับ 40 phr และเติมสารก่อเจลเสริม DPG ที่ระดับ 0.7 phr



รูปที่ 25 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อใช้สาร MPP ที่ระดับ 35 phr และเมื่อเติมสารก่อเจลเสริม DPG ที่ระดับ 1.2 phr



รูปที่ 26 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อใช้สาร mPDA-P ที่ระดับ 37 phr และเมื่อเติมสารก่อเจลเสริม DPG ที่ระดับ 1.2 phr



รูปที่ 27 ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของฟองน้ำยางธรรมชาติเมื่อเติม DPG ที่ระดับ 0.7 phr เมื่อใช้ APP ที่ระดับ 40 phr (กำลังขยาย x4)



รูปที่ 28 ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของฟองน้ำยางธรรมชาติเมื่อเติม DPG ที่ระดับ 0.7 phr เมื่อใช้ MPP ที่ระดับ 35 phr (กำลังขยาย x4)



รูปที่ 29 ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของฟองน้ำยางธรรมชาติเมื่อเติม DPG ที่ระดับ 0.7 phr เมื่อใช้ mPDA-P ที่ระดับ 37 phr (กำลังขยาย x4)

5.2.3.1 สมบัติทางกายภาพของฟองน้ำที่แปรปริมาณสารก่อเจลเสริม

ตารางที่ 7 สมบัติทางกายภาพของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อแปรปริมาณสารก่อเจลเสริมที่ระดับต่าง ๆ และใช้ร่วมกับ TETA 1.0 phr

DPG content (phr)	Gelling time (s)	Density (g/cm^3)	CFD (kPa)	Resilience (%)	Compression set (%)
Ammonium polyphosphate (APP) 40 phr					
0.7	186	0.126 ± 0.015	2.17 ± 0.43	31 ± 1	36.53 ± 1.71
0.8	156	0.129 ± 0.017	2.75 ± 0.26	32 ± 2	35.66 ± 1.28
0.9	145	0.131 ± 0.012	2.86 ± 0.36	33 ± 2	34.83 ± 1.95
1.0	120	0.129 ± 0.019	2.47 ± 0.39	32 ± 1	34.91 ± 1.45
Melamine polyphosphate (MPP) 35 phr					
1.0	270	0.134 ± 0.015	2.98 ± 0.44	33 ± 1	32.59 ± 1.26
1.2	240	0.139 ± 0.015	3.16 ± 0.41	35 ± 1	32.20 ± 1.12
1.4	213	0.141 ± 0.014	3.29 ± 0.32	37 ± 2	31.50 ± 1.19
1.6	193	0.143 ± 0.018	3.35 ± 0.50	38 ± 1	29.22 ± 1.23
1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite (mPDA-P) 37 phr					
1.0	225	0.132 ± 0.014	2.87 ± 0.59	31 ± 1	33.42 ± 1.35
1.2	190	0.135 ± 0.015	2.96 ± 0.39	33 ± 2	32.97 ± 1.45
1.4	157	0.137 ± 0.014	3.10 ± 0.53	34 ± 1	31.44 ± 1.42
1.6	137	0.139 ± 0.013	3.17 ± 0.61	37 ± 2	30.77 ± 1.38

จากตารางที่ 7 ในการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟโดยการแปรปริมาณสารก่อเจลเสริมพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารก่อเจลเสริมเพิ่มขึ้นมีผลให้เวลาการเจลของฟองน้ำมีระยะเวลาลดลง สมบัติทางกายภาพ ค่าความหนาแน่น ค่า CFD และค่าการกระด้างตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการยุบตัวมีแนวโน้มลดลงและพบว่าปริมาณการเติม APP ที่ระดับ 0.7 phr ดังสูตรที่ 37 เติมสาร MPP ที่ระดับ 1.2 phr ดังสูตรที่ 42 และเติมสาร mPDA-P ที่ระดับ 1.2 phr ดังสูตรที่ 46 ฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟมีลักษณะฟองดีที่สุด

5.2.4 อิทธิพลของปริมาณสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรตและการใช้สารอะลูมิเนียมไตรไฮดรตร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัสต่อสมบัติของฟองน้ำยางธรรมชาติ

ตารางที่ 8 สูตรที่ใช้ในการศึกษาปริมาณสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรตที่ระดับต่าง ๆ ต่อสมบัติของฟองน้ำทนไฟ

Ingredients	Dry Weight (phr)			
	49	50	51	52
Part A				
60%NR Latex	100	100	100	100
20% K-Oleate	1.0	1.0	1.0	1.0
50%Sulphur	2.0	2.0	2.0	2.0
50%ZDEC	1.0	1.0	1.0	1.0
50%ZMBT	1.0	1.0	1.0	1.0
50%Wing stay L	1.0	1.0	1.0	1.0
50% ATH	50	100	120	150
Part B				
50%ZnO	3.0	3.0	3.0	3.0
10%TETA	1.0	1.0	1.0	1.0
33%DPG	1.0	1.0	1.0	1.0
10%SSF	1.0	1.0	1.0	1.0

ตารางที่ 9 สูตรที่ใช้ในการศึกษาสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัสชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของฟองน้ำทนไฟ

Ingredients	Dry Weight (phr)											
	ATH/APP				ATH/MPP				ATH/mPDA-P			
	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
Part A												
60%NR Latex	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20%K-Oleate	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%Sulphur	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
50%ZDEC	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%ZMBT	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%Wing stay L	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%ATH	80	80	100	100	80	80	100	100	80	80	100	100
Part B												
50%ZnO	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	30	30	30	30
10%TETA	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
33%DPG	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50%APP	20	25	20	25	-	-	-	-	-	-	-	-
50%MPP	-	-	-	-	20	25	20	25	-	-	-	-
50%mPDA-P	-	-	-	-	-	-	-	-	20	25	20	25
10%SSF	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

จากตารางที่ 8 การเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติโดยแปรปริมาณ ATH ที่ ระดับ 50, 100, 120 และ 150 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของสาร ATH เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ระยะเวลาการเจลของฟองน้ำลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ที่เติมอาจจะไปดูดสารสบูจากระบบทำให้การเกิดฟองอากาศเกิดได้ยากขึ้น จึงเป็นเหตุให้ปริมาณและขนาดของฟองน้ำลดน้อยลง ฟองน้ำเสียความเสถียรเร็วขึ้น จึงมีผลให้ระยะเวลาการเจลของฟองน้ำเร็วขึ้นตามปริมาณของสารเติมที่เพิ่มสูงขึ้นด้วยการยุบตัวของฟองน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสาร ATH เพิ่มขึ้น และจากตารางที่ 9 การเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟที่ศึกษาการแปรปริมาณ ATH/APP, ATH/MPP และ ATH/mPDA-P ที่ ระดับ 80/20, 80/25, 100/20 และ 100/25 และได้ปรับ pH ของ APP, MPP และ mPDA-P ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับ pH 10.0 พบว่าเมื่อที่ระดับการเติมสาร 80/20 และ 80/25 ของ ATH/APP, ATH/MPP และ ATH/mPDA-P ความสม่ำเสมอของเซลล์ฟองน้ำมีความสม่ำเสมอลดลงเล็กน้อย และที่ระดับ 100/20 และ 100/25 ก็เช่นเดียวกัน

5.2.3.1 สมบัติทางกายภาพของฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรเตต (Aluminium trihydrate, ATH) และสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรเตตร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัส

ตารางที่ 10 ผลของปริมาณสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรเตตต่อสมบัติทางกายภาพของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ

ATH content (phr)	Properties				
	Gelling time (s)	Density (g/cm ³)	CFD (kPa)	Resilience (%)	Depression (%)
50	260	0.328±0.018	13.51±0.41	33±1	32.61±1.28
100	245	0.375±0.014	15.22±0.58	29±1	36.21±1.42
120	221	0.538±0.013	20.32±1.58	27±1	42.65±1.22
150	183	0.663±0.016	32.30±1.76	25±1	30.09±1.31

จากตารางที่ 10 ในการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟด้วยสารใช้สารอะลูมิเนียมไตรไฮดรเตต พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของสาร ATH เพิ่มขึ้น เวลาการเจลของฟองน้ำมีแนวโน้มลดลง สมบัติทางกายภาพของฟองน้ำ ค่าความหนาแน่น ค่า CFD ค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นการกระเด็งตัวมีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 11 สมบัติทางกายภาพของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรตร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัส

Phosphate compound content (phr)	Gelling time (s)	Density (g/cm^3)	CFD (kPa)	Resilience (%)	Compression set (%)
Aluminium trihydrate (ATH)/Ammonium polyphosphate (APP)					
80/20	180	0.534 ± 0.013	10.25 ± 0.29	30 ± 2	40.61 ± 1.27
80/25	195	0.529 ± 0.012	9.91 ± 0.57	29 ± 2	41.74 ± 1.19
100/20	140	0.617 ± 0.017	12.79 ± 0.55	27 ± 2	43.53 ± 1.31
100/25	155	0.602 ± 0.015	11.77 ± 0.61	26 ± 2	44.58 ± 1.22
Aluminium trihydrate (ATH)/Melamine polyphosphate (MPP)					
80/20	200	0.589 ± 0.016	12.18 ± 0.54	33 ± 1	38.58 ± 1.26
80/25	220	0.563 ± 0.017	12.00 ± 0.48	32 ± 1	38.83 ± 1.29
100/20	150	0.744 ± 0.013	15.32 ± 0.58	30 ± 1	40.17 ± 1.28
100/25	180	0.716 ± 0.015	15.20 ± 0.41	28 ± 1	41.26 ± 1.20
Aluminium trihydrate (ATH)/1,3-Phenylenediamine dimethylphosphite (mPDA-P)					
80/20	210	0.545 ± 0.013	11.87 ± 0.54	31 ± 1	40.29 ± 1.25
80/25	230	0.535 ± 0.014	9.65 ± 0.29	30 ± 2	40.41 ± 1.22
100/20	130	0.664 ± 0.012	13.08 ± 0.54	28 ± 2	42.50 ± 1.32
100/25	160	0.664 ± 0.013	13.89 ± 0.58	27 ± 2	42.72 ± 1.25

จากตารางที่ 11 ในการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟโดยใช้สารอะลูมิเนียมไตรไฮดรตร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัสของ ATH/APP, ATH/MPP และ ATH/mPDA-P ที่ระดับ 80/20 และ 80/25 พบว่า ระยะเวลาการเจลของฟองน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สมบัติทางกายภาพ ค่าความหนาแน่น ค่า CFD และค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นค่าการกระด้างตัวมีแนวโน้มลดลง และที่สัดส่วน 100/20 และ 100/25 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงมีการลักษณะเช่นกัน

5.2.4.2 สมบัติการทนไฟของฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรต (Aluminium trihydrate, ATH) และสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรตร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัส

ทำการทดสอบการทนไฟตามมาตรฐาน UL-94 ที่ว่าด้วยเรื่องการติดไฟและการลุกลามไฟของฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติม ATH ที่ระดับ 50, 100, 120 และ 150 phr โดยมีการรายงานผลเป็นช่วง V-0, V-1 และ V-2 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 12 และรูปที่ 27-30

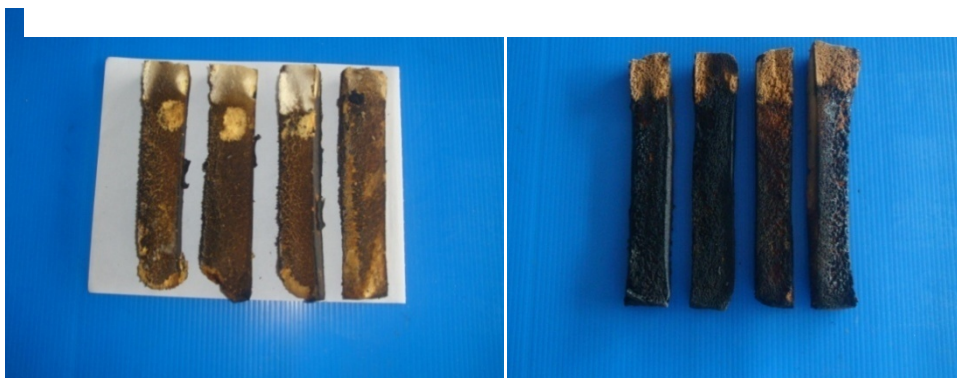
ตารางที่ 12 ผลการทนไฟของฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรต (Aluminium trihydrate, ATH) และสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรตร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัส

Flame retardants	flame retardant content (phr))	UL-94	
		Rating	Dripping
ATH	50	No-Rating	Yes
	100	V-1	Yes
	120	V-1	Yes
	150	V-0	No
Flame retardants	flame retardant content (phr)	UL-94	
		Rating	Dripping
ATH/APP	80/20	No-Rating	No
	80/25	V-2	No
	100/20	V-1	No
	100/25	V-0	No
ATH/MPP	80/20	V-1	No
	80/25	V-0	No
	100/20	V-0	No
	100/25	V-0	No
ATH/mPDA-P	80/20	V-2	No
	80/25	V-1	No
	100/20	V-1	No
	100/25	V-0	No



รูปที่ 30 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ หลังทดสอบการเผาไฟเมื่อเติมปริมาณ ATH ที่ระดับ 50, 100, 120 และ 150 phr โดยเรียงจากซ้ายไปขวา

รูปที่ 31 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ หลังทดสอบการเผาไฟเมื่อเติมปริมาณ ATH/APP ที่ระดับ 80/20, 80/25, 100/20 และ 100/25 โดยเรียงจากซ้ายไปขวา



รูปที่ 32 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ หลังทดสอบการเผาไฟเมื่อเติมปริมาณ ATH/MPP ที่ระดับ 80/20, 80/25, 100/20 และ 100/25 โดยเรียงจากซ้ายไปขวา

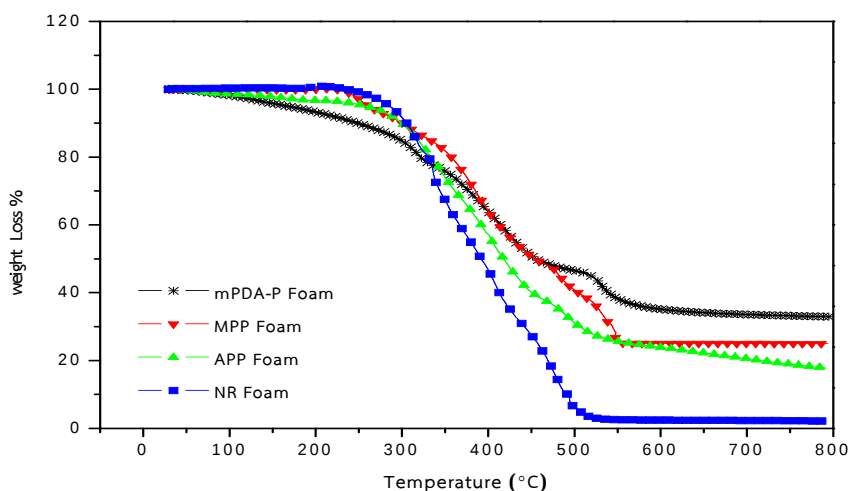
รูปที่ 33 ลักษณะของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ หลังทดสอบการเผาไฟเมื่อเติมปริมาณ สัดส่วน ATH/mPDA-P ที่ระดับ 80/20, 80/25, 100/20 และ 100/25 โดยเรียงจากซ้ายไปขวา

จากรูปที่ 30-33 เป็นรูปแสดงผลการทดสอบการทนไฟของฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสาร อะลูมิเนียมไตรไฮดรต (Aluminium trihydrate, ATH) และสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรตร่วมกับ สารประกอบฟอสฟอรัส พบว่าฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสาร ATH ปริมาณ 150 phr ขึ้นไป ฟองน้ำ จึงสามารถทนต่อการติดไฟได้ และเมื่อเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติโดยใช้สารอะลูมิเนียม ไตรไฮดรตร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัสของสาร ATH/APP, ATH/MPP และ ATH/mPDA-P ระดับที่มีผลให้ฟองน้ำทนต่อการติดไฟคือ 80/25, 100/25 และ 100/25 phr

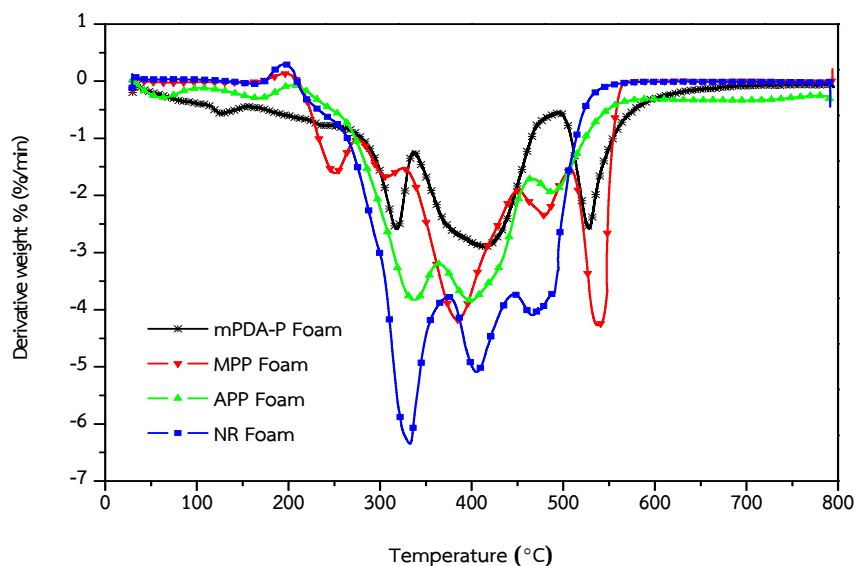
5.2.5 สมบัติเชิงความร้อนของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ

5.2.5.1 สมบัติเชิงความร้อนของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมสารประกอบฟอสฟอรัส

ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อน ด้วยเทคนิค TGA รุ่น STA 6000 เพื่อประเมินผลเสถียรภาพความร้อน และพฤติกรรมการสูญเสียน้ำหนักของฟองน้ำ ภายใต้สภาวะบรรยากาศออกซิเจน



รูปที่ 34 เทอร์โมแกรม TGA ของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมสารทนไฟประเภทฟอสฟอรัส

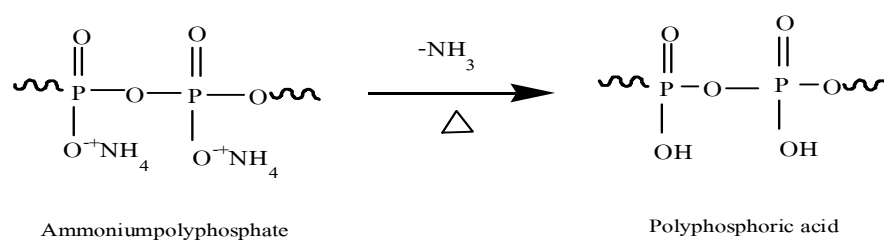


รูปที่ 35 เทอร์โมแกรม DTG ของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมสารทนไฟประเภทฟอสฟอรัส

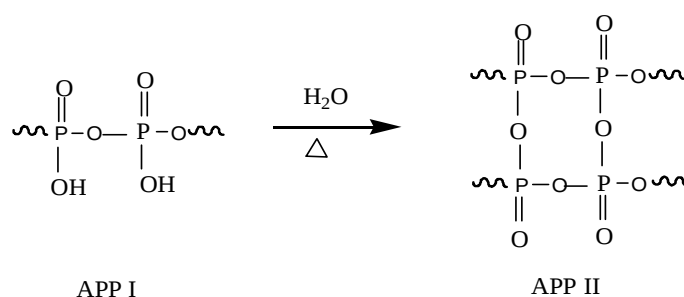
จากรูปที่ 34 และรูปที่ 35 แสดงเทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมสารทนไฟประเภทฟอสฟอรัสชนิดต่าง ๆ และฟองน้ำยางธรรมชาติโดยไม่เติมสารทนไฟ

ประกอบฟอสฟอรัสพบว่า ฟองน้ำยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารทนไฟประเภทฟอสฟอรัสมีความเสถียรต่อความร้อนต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสารทนไฟประเภทฟอสฟอรัสโดยฟองน้ำยางธรรมชาติมีขั้นตอนการสลายตัวประกอบด้วย 3 ขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 4.29 พบว่าขั้นตอนที่ 1 ที่อุณหภูมิ 332.82 °C เป็นการสลายตัวของยางฟองน้ำ การสลายตัวขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิ 406.39 และ 467.20 °C อาจจะเป็นการสลายตัวของสารตัวเติมต่างๆ ที่เติมลงไปในช่วงขั้นตอนการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติและพบว่าที่อุณหภูมิ 800 °C ฟองน้ำยางธรรมชาติมีปริมาณของน้ำหนักที่คงเหลืออยู่ (% residual) เหลืออยู่ 2.2% น่าจะเป็นสารตัวเติมที่ใช้ในการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ และเมื่อเปรียบเทียบความเสถียรต่อความร้อนของฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสารทนไฟประเภทฟอสฟอรัสชนิดต่าง ๆ พบว่าฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟที่เติม APP 40 phr มีช่วงการสลายตัว 4 step โดยขั้นตอนที่ 1 เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 171.68°C เป็นการขจัดก๊าซ NH₃ และไอน้ำ แสดงดังปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 34

ปฏิกิริยาที่ 1 การขจัดก๊าซแอมโมเนีย (Zhao *et al.*, 2008)



ปฏิกิริยาที่ 2 การขจัดไอน้ำ (Davies *et al.*, 2005)



รูปที่ 36 โครงสร้างทางเคมีของสารแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเมื่อเกิดการสลายตัว

โดย APP ที่อยู่ใน form II จะมีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่า form I การสลายขั้นตอนที่ 2 เป็นการสลายตัวของยางที่อุณหภูมิ 337.82 °C ขั้นตอนที่ 3 เป็นการสลายตัวของฟอสฟอรัสโดย APP ใน APP II จะเกิดการเชื่อมโยงต่อกันของพันธะ P-O-P หรือ P-NH เป็นร่างแหโดยเกิดการจับเป็น ultraphosphate structures โดยจะเกิดเป็น ultraphosphate structures อย่างสมบูรณ์เมื่อ NH₃ ใน APP ระเหยกลายเป็นไอน้ำ และในขั้นตอนที่ 4 เป็นการสลายตัวของ ultraphosphate structures (Davies *et al.*, 2005 ; Laoutid *et al.*, 2009) และที่อุณหภูมิ 800 °C ของฟองน้ำ

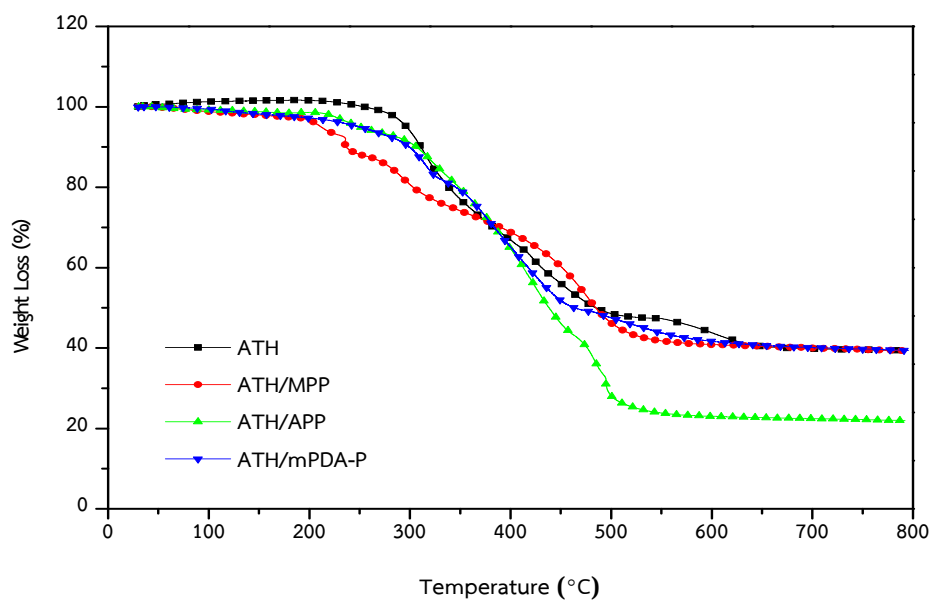
ยางธรรมชาติที่เติม APP 40 phr มีปริมาณของน้ำหนักรังที่คงเหลืออยู่ (% residual) เหลืออยู่ประมาณ 36%

ส่วนการสลายตัวของฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติม MPP 35 phr พบว่าฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟมีการสลายตัว 5 ขั้นตอนโดยขั้นตอนที่ 1 เป็นการขจัดก๊าซแอมโมเนียและไอน้ำของ APP ที่หลงเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 251.88 °C โดยจะปล่อยก๊าซ NH_3 และ H_2O ออกมาโดยก๊าซเหล่านี้จะช่วยเจือจางปริมาณออกซิเจน ซึ่งมีผลให้ลดการทำงานของเปลวไฟลงเล็กน้อย ขั้นตอนที่ 2 เป็นการสลายตัวของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 308.49 °C ขั้นตอนที่ 3 อุณหภูมิ 385.49 °C เป็นการสลายตัวของเมลามีนโดยในขั้นตอนนี้สารเมลามีนก็ปล่อยก๊าซ NH_3 ออกมา ขั้นตอนที่ 4 เป็นการสลายพันธะฟอสฟอรัสในโครงสร้างของ MPP ที่อุณหภูมิ 479.84 °C และในขั้นตอนที่ 5 เป็นการสลายตัวของเก้าอี้ที่หลงเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 537.96 °C โดยกลไกการทำงานของ MPP แสดงดังรูปที่ 4.79 โดยพบว่าเมื่อ MPP เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 479.54 °C จะปลดปล่อยก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ออกมาทำให้เมลามีนจับกับเมลามีนเกิดเป็น melam และเมื่อจับกับ APP ก็เกิดเป็น melam ultraphosphate และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอีกไปที่ 537.96 °C เป็นการสลายตัวของเก้าอี้ที่หลงเหลืออยู่และนอกจากนี้ยังมี APP ที่หลงเหลืออยู่ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับ Melamine เกิดการทำปฏิกิริยากับตัวมันเองเป็น ultraphosphate และเมื่อเกิดการสลายพันธะฟอสฟอรัสก็จะทำให้เป็นตัวเคลือบฟองน้ำเพื่อไม่ให้ก๊าซออกซิเจนเข้ามาทำปฏิกิริยาจึงไปลดปริมาณออกซิเจนทำให้ลดการติดของเปลวไฟอีกด้วย (Levchil *et al.*, 1996 ; Wu *et al.*, 2008)

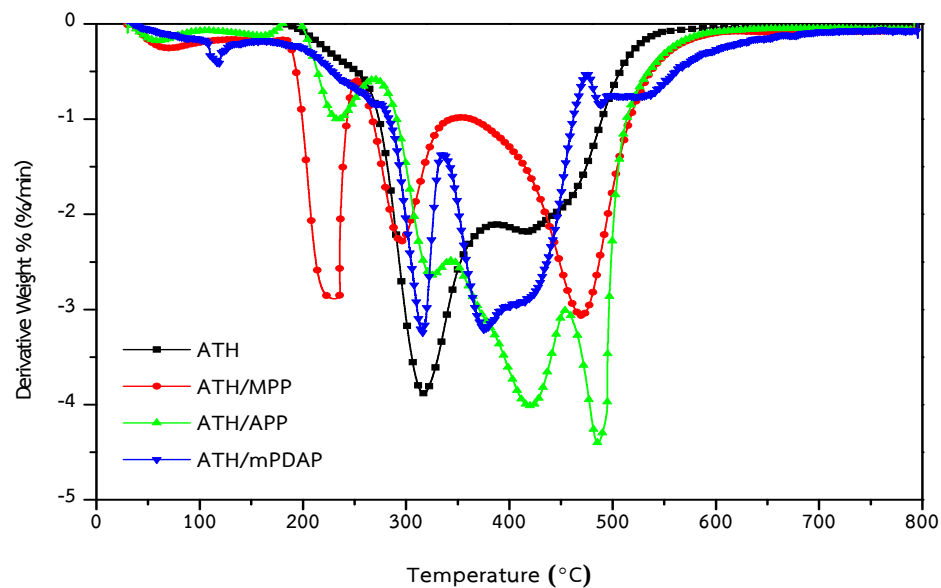
และฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติม mPDA-P ที่ระดับ 37 phr มีขั้นตอนการสลายตัว 4 ขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 4.29 พบว่าการสลายตัวขั้นตอนที่ 1 เป็นการระเหยสาร p-formaldehyde ที่หลงเหลืออยู่ปรากฏที่อุณหภูมิ 127.13 °C ขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิ 319.01 °C เป็นการสลายตัวของฟองน้ำยางธรรมชาติ ขั้นตอนที่ 4 ที่อุณหภูมิ 356.76 °C เป็นการสลายพันธะฟอสฟอรัสที่อยู่ภายในโครงสร้างของ mPDA-P ดังนั้นเมื่อพันธะ P-O-C เกิดการสลายตัวก็จะกลายเป็นของเหลวคล้ายแก้วเคลือบบริเวณพื้นที่ผิวของฟองน้ำทำให้ตรงตำแหน่งที่มีของเหลวคล้ายแก้วเคลือบอยู่ทำให้มีความเสถียรต่อความร้อน และขั้นตอนที่ 4 ที่อุณหภูมิ 518.28 °C อาจจะเป็นการสลายตัวเป็นไอของฟอสฟอรัสที่เกิดการหลอมเป็นของเหลวคล้ายแก้วที่เคลือบอยู่บริเวณฟองน้ำ

5.2.5.2 สมบัติเชิงความร้อนของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัส

ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อน ด้วยเทคนิค TGA รุ่น STA 6000 เพื่อประเมินผลเสถียรภาพความร้อน และพฤติกรรมการสูญเสียน้ำหนักของฟองน้ำ ภายใต้สภาวะบรรยากาศออกซิเจน



รูปที่ 37 เทอร์โมแกรม TGA ของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัสชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 38 เทอร์โมแกรม DTG ของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัสชนิดต่าง ๆ

จากรูปที่ 37 และ 38 เป็นรูปที่แสดงเทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัสชนิดต่าง ๆ พบว่าฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติมสารทนไฟ ATH 150 phr มีปริมาณเถ้าถ่านที่เหลืออยู่เป็นปริมาณ 46.51 % จากรูปอุณหภูมิการสลายตัวของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อเติมสารทนไฟแต่ละชนิดลงไปเป็นปริมาณต่างๆ พบว่าฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติม ATH เกิดการสลายด้วย 3 step โดยขั้นตอนที่ 1 เป็นการสลายตัวของ ATH ที่อุณหภูมิ 248.30 °C คือเป็นการสลายตัวของไอน้ำหรือเฟสแก๊ส โดยการที่ ATH ปล่อยไอน้ำออกมาทำให้ ATH กลายเป็น ceramic layer γ -Al₂O₃ (Hapuarachchi and Peijs, 2009) ซึ่งเมื่อเกิดเป็น ceramic นี้ส่งผลให้ฟองน้ำที่เติม ATH สามารถทนความร้อนได้แต่ต้องใช้ปริมาณสูง ขั้นตอนที่ 2 เป็นการสลายตัวของฟองน้ำยางธรรมชาติมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 320.05 °C และขั้นตอนที่ 3 ที่อุณหภูมิ 405.70 °C อาจจะเป็นการสลายตัวของสารตัวเติมที่ใช้ในการเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติ

การเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟโดยการใช้ ATH ร่วมกับ APP พบว่ามีการสลายตัว 5 ขั้นตอนโดยขั้นตอนที่ 1 เป็นการสลายตัวของก๊าซแอมโมเนียและไอน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างของ APP แสดงดังปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 24 ขั้นตอนที่ 2 เป็นการสลายตัวของสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 234.88 °C คือ โดยที่ ATH ปล่อยไอน้ำออกมาทำให้ ATH กลายเป็น ceramic layer γ -Al₂O₃ (Hapuarachchi and Peijs, 2009) ขั้นตอนที่ 3 ที่อุณหภูมิ 326.72 °C เป็นการสลายตัวของฟองน้ำยางธรรมชาติ ขั้นตอนที่ 4 ที่อุณหภูมิ 421.58 °C เป็นการสลายพันธะฟอสฟอรัส ใน APP II จะเกิดการเชื่อมโยงต่อกันของพันธะ P-O-P หรือ P-NH เป็นร่างแหโดยเกิดการจับเป็น ultraphosphate structures โดยเกิดเป็น ultraphosphate structures อย่างสมบูรณ์เมื่อ NH₃ ใน APP ระเหยกลายเป็นไอน้ำ และในขั้นตอนที่ 5 เป็นการสลายตัวของ ultraphosphate structures (Davies *et al.*, 2005 และ Laoutid *et al.*, 2009)

ส่วนการสลายตัวของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟเมื่อใช้ ATH/MPP พบว่ามีการสลายตัว 3 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ที่อุณหภูมิ 229.38 °C เป็นการสลายตัวของ ATH ขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิ 290.03 °C เป็นการสลายตัวของฟองน้ำยางธรรมชาติ และในขั้นตอนที่ 3 เป็นการสลายตัวของสาร MPP

และการสลายตัวของฟองน้ำยางธรรมชาติที่เติม ATH/mpDA-P พบว่าฟองน้ำมีการสลายตัว 5 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ที่อุณหภูมิ 117.98 °C เป็นการระเหยสาร p-formaldehyde ขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิ 269.79 °C เป็นการสลายตัวของ ATH ขั้นตอนที่ 3 ที่อุณหภูมิ 315.33 °C เป็นการสลายตัวของฟองน้ำยางธรรมชาติ ขั้นตอนที่ 4 ที่อุณหภูมิ 376.06 °C เป็นการพันธะฟอสฟอรัสที่อยู่ภายในโครงสร้างของ mpDA-P ดังนั้นเมื่อพันธะ P-O-C เกิดการสลายตัวก็จะกลายเป็นของเหลวคล้ายแก้วเคลือบบริเวณพื้นที่ผิวของฟองยางทำให้ตรงตำแหน่งที่มีของเหลวคล้ายแก้วเคลือบอยู่ทำให้มีความเสถียรต่อความร้อน และขั้นตอนที่ 4 ที่อุณหภูมิ 488.58 °C อาจจะเป็นการสลายตัวของฟอสฟอรัสที่เกิดการหลอมเป็นของเหลวคล้ายแก้วที่เคลือบอยู่บริเวณฟองยาง

6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

การเตรียมฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟโดยใช้สารประกอบฟอสฟอรัสเพื่อให้สมบัติการทนไฟของฟองน้ำสามารถดับได้เอง ต้องให้ปริมาณของสารทนไฟ APP 40 phr MPP 35 phr และ mPDA-P 37 phr และมีสารช่วยทนไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์โดยใช้ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัสของฟองน้ำที่เติมสาร ATH/APP, ATH/MPP และ ATH/mPDA-P ที่ระดับ 80/25 100/25 และ 100/25 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของสารทนไฟประเภทฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เวลาการเจลเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่น ค่า CFD และค่าการกระเด็นตัวมีแนวโน้มลดลง ยกเว้นค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่าใช้สารช่วยทนไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ที่ใช้ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัส พบว่าเวลาการเจลเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่น ค่า CFD และค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัดมีแนวโน้มลดลง

6.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาการใช้สารทนไฟประเภทฟอสฟอรัสชนิดอื่น ๆ อีก

7. เอกสารอ้างอิง

- ชาญชัย สิริเกษมเลิศ (ออนไลน์). 2555. สิ่งทอทนวงไฟ, สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. สืบค้นจาก <http://www.ttistextiledigest.com/articles/technology/item/2462-flame-retardant-textiles.html> [30 มีนาคม 2556]
- เบญจ ทองนวลจันทร์. 2546. การเตรียมยางฟองน้ำจากการเบลนดระหว่างน้ำยางธรรมชาติกับน้ำยางสังเคราะห์อะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เพชรรัตน์ อรุณพัฒน์ชัย, ญัฐพร โทณานนท์, ปรีชา แสงธีระปิตกุล และ ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล. 2551. ผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้นและวิธีการทำเม็ดต่อสมบัติการทนไฟของอนุภาคอินทูลเมสเซนส์. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน ครั้งที่ 4, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 28-29 มกราคม.
- สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สิริรัตน์ จารุจินดา. 2551. สิ่งทอป้องกันความร้อนและเปลวไฟ, สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. (ออนไลน์), สืบค้นจาก: http://www.thaitextile.org/main/content.php?content_id=ARC0121019172929&content_type=article [30 มีนาคม 2556]
- ASTM D 1055-90. 1994. Standard Specification for Flexible Cellular Materials Latex Foam
- ASTM D 3574-95. 1997. Standard Methods of Testing Flexible Cellular Materials-Slab Bonded and Moulded Urethane Foam

- Blackley, D.C. 1997a. *Polymer latices science and technology Vol. 1. Latex Foam Rubber*, Second Edition, London: Chapman&Hall.
- Blackley, D.C. 1997b. *Polymer latices science and technology Vol. 2 . Latex Foam Rubber*, Second Edition, London: Chapman&Hall.
- Blackley, D.C. 1997c. *Polymer latices science and technology Vol. 3. Latex Foam Rubber*, Second Edition, London: Chapman&Hall.
- Chapman, W.H., Pounder, D.W. and Murphy, E.A. 1930. *Improvements in or relating to the manufacture of good of rubber of similar material*, GB. Pat 332525 Jul. 21, 1930.
- Chougrani, K., Boutevin, B., David, G. and Boutevin, G. 2008. *New N,N-amino-diphosphonate-containing methacrylic derivatives, their syntheses and radical copolymerizations with MMA*. European Polymer Journal. 44: 1771-1781.
- Davies, P.J., Horrocks, A.R. and Alderson, A. 2005. *The sensitization of thermal decomposition of ammonium polyphosphate by selected metal ions and their potential for improved cotton fabric flame retardancy*. Polymer Degradation and Stability. 88: 114-122.
- Grassie, N. and Scott, G. 1985. *Polymer degradation and stabilization*, Cambridge University Press, London.11, 170-188.
- Hapuarachchi, T.D. and Peijs, T. 2009. *Aluminium trihydroxide in combination with ammonium polyphosphate as flame retardant for unsaturated polyester resin*. Express Polymer Letters. 3: 743-751.
- Horold, S. 1999. *Phosphorus flame retardant in thermoset resins*. Polymer Degradation and Stability. 64: 427-431.
- Hoang, D. and Kim, J. 2008. *Synthesis and applications of bicyclic phosphorus flame retardants*. Polymer Degradation and Stability. 93: 36-42.
- Horrocks A.R., Price C.D. 2008. *Flame retardant materials*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Laoutid, F., Bonnaud, L., Alexandre, M., Lopez-Cuesta, J.M. and Dubois, Ph. 2009. *New prospects in flame retardant polymer materials : From fundamentals to nanocomposites*. Materials Science and Engineering. 63: 100-125.
- Levchik, S.V., Camino, G., Luda, D. and Cortemiglia, P. 1996. *Effect of the fire-*

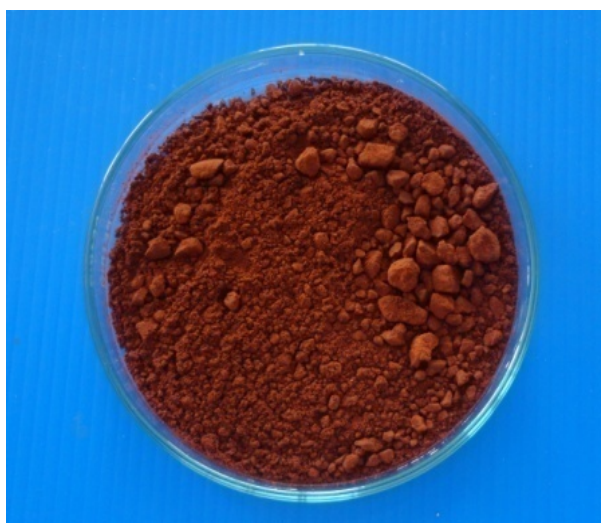
- retardant, ammonium polyphosphate, on the thermal decomposition of aliphatic polyamides. I. Polyamides 11 and 12. Polymer Degradation and Stability. 36: 34-41.*
- Li X., Qu Y. and Shi Y. 2002. *Combustion behavior and thermal degradation properties of epoxy resins with a curing agent containing a caged bicyclic phosphate. Polymer Degradation and Stability. 77: 383-390.*
- Talalay, J.A. 1936. *Improved method in and relations to the manufacture of rubber products, more particularly of porous and spongy masses and articles. British Patent No. 455,138. October 2.*
- Wang, Q. and Shi, W. 2006. *Synthesis and thermal decomposition of a novel hyperbranched polyphosphate ester used for flame retardant systems. Polymer Degradation and Stability. 91: 1289-1294.*
- Wu, K., Wang, Z. and Hu, Y. 2008. *Microencapsulated ammonium polyphosphate with urea-melamine-formaldehyde shell: preparation, characterization, and its flame retardance in polypropylene. Polymers for Advanced Technologies. 19: 1118-1125.*
- Xiaomin, F., Yuan, L., Wang, Q., Zhang, Z., Wang, Z. and Zhang, J. 2011. *Novel synthesis method for melamine polyphosphate and its flame retardancy on glass fiber reinforced polyamide 66. Polymer Degradation and Stability. 50: 1527-1532.*
- Zhang, Q. and Chen, Y. 2011. *Synergistic effects of ammonium polyphosphate/melamine intumescent system with macromolecular char former in flame-retarding polyoxymethylene. Journal of Polymer Research. 18: 293-303.*
- Zhao, C.X., Liu, Y., Wang, D.Y., Wang, D.L. and Wang, Y.Z. 2008. *Synergistic effect of ammonium polyphosphate and layered double hydroxide on flame retardant properties of poly(vinyl alcohol). Polymer Degradation and Stability. 93: 1323-1331.*

ภาคผนวก

1. ลักษณะสารทนไฟที่เตรียมได้



รูปที่ 1 ลักษณะสารเมลามีนพอลิฟอสเฟต



รูปที่ 2 ลักษณะของสาร 1,3-ฟีนิลีนไดเอมีนไดเมทิลฟอสไฟต์

2. การเตรียมสารเคมีสำหรับน้ำยาง

เนื่องจากสารเคมีส่วนใหญ่เป็นของแข็ง และของเหลวที่ไม่ละลายน้ำจึงต้องเตรียมให้สารเคมีอยู่ในรูป Dispersion หรือ Emulsion การเตรียม Dispersion agent จะใช้สาร Dispersion agent ด้วยสารดังกล่าวได้แก่ Valtamol Bentonite สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมฟองยางธรรมชาติประกอบด้วย สารที่ทำให้ยางเป็นฟอง สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่ง สารหน่วงการทนไฟ สารหน่วงการทนไฟร่วมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ สารกระตุ้น และสารทำให้น้ำยางจับตัว

2.1 สารที่ทำให้น้ำยางเป็นฟอง

ตารางที่ 1 สูตรที่ใช้ในการเตรียมสบู่

	ชนิดของสารเคมี	ปริมาณของสารเคมี (กรัม)
ส่วนที่1	กรดโอเลอิก	100
	น้ำกลั่น	402
ส่วนที่ 2	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	23
	น้ำกลั่น	43

นำส่วนที่ 1 ไปอุ่นที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส จากนั้นนำส่วนที่ 2 ลงไปในส่วนที่ 1 กวนและให้ความร้อนต่อไปอีก 1 ชั่วโมง

2.2 สารวัลคาไนซ์

ตารางที่ 2 สูตรที่ใช้ในการเตรียมสารวัลคาไนซ์

ชนิดของสารเคมี	ปริมาณของสารเคมี (กรัม)
กำมะถัน	50
Valthamol	1
Bentonite	1
น้ำกลั่น	48

นำไปบดผสมด้วยเครื่องมือผสมสารเคมี (Ball mill) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

2.3 สารตัวเร่ง

ตารางที่ 3 สูตรที่ใช้ในการเตรียมสารตัวเร่ง (ZDEC และ ZMBT)

ชนิดของสารเคมี	ปริมาณของสารเคมี (กรัม)
ZDEC และ/หรือ ZMBT	50
Valthamol	1
Bentonite	1
น้ำกลั่น	48

ทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสารเคมี (Ball mill) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.4 สารแอนติออกซิแดนท์

ตารางที่ 4 สูตรที่ใช้ในการเตรียมสารแอนติออกซิแดนท์

ชนิดของสารเคมี	ปริมาณของสารเคมี (กรัม)
Wing stay L	50
Valthamol	1
Bentonite	1
น้ำกลั่น	48

ทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสารเคมี (Ball mill) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.5 สารกระตุ้น

ตารางที่ 5 สูตรที่ใช้ในการเตรียมสารกระตุ้น

ชนิดของสารเคมี	ปริมาณของสารเคมี (กรัม)
ZnO	50
Valthamol	1
Bentonite	1
น้ำกลั่น	48

ทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสารเคมี (Ball mill) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.6 สารให้น้ำยางจับตัว

ตารางที่ 6 สูตรที่ใช้ในการเตรียมสารให้น้ำยางจับตัว

ชนิดของสารเคมี	ปริมาณของสารเคมี (กรัม)
SSF	20
Bentonite	1
น้ำกลั่น	78

ทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสารเคมี (Ball mill) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.7 สารเจลเสริมไดฟนิลกัวนิติน

ตารางที่ 7 สูตรที่ใช้ในการเตรียมสารเจลเสริมไดฟนิลกัวนิติน

ชนิดของสารเคมี	ปริมาณของสารเคมี (กรัม)
DPG	33
Valthamol	1
Bentonite	1
น้ำกลั่น	48

ทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสารเคมี (Ball mill) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.8 สารเจลเสริมเตตระเอทิลลีนเตตระมีน

ตารางที่ 8 สูตรที่ใช้ในการเตรียมสารเจลเสริมเตตระเอทิลลีนเตตระมีน

ชนิดของสารเคมี	ปริมาณของสารเคมี (กรัม)
TETA	10
น้ำกลั่น	90

นำสารเคมีที่ชั่งตามสูตรแล้วเขย่าให้เข้ากัน

2.9 สารหน่วงการทนไฟ

ตารางที่ 9 สูตรที่ใช้ในการเตรียมสารหน่วงการทนไฟ

ชนิดของสารเคมี	ปริมาณของสารเคมี (กรัม)
สารประกอบที่มีฟอสฟอรัส	50
Valthamol	1
Bentonite	1
น้ำกลั่น	48

ทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสารเคมี (Ball mill) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.10. สารหน่วงการทนไฟพร้อม

ตารางที่ 10 สูตรที่ใช้ในการเตรียมสารหน่วงการทนไฟพร้อม

ชนิดของสารเคมี	ปริมาณของสารเคมี (กรัม)
อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์	50
Valthamol	1
Bentonite	1
น้ำกลั่น	48

ทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสารเคมี (Ball mill) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3 การทดสอบสมบัติของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ

3.1 สมบัติการเจลของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ

การสังเกตพฤติกรรมการเจลเป็นการสังเกตความสม่ำเสมอของฟองน้ำ ความเสถียรของฟองน้ำขณะเจลและระยะเวลาการเจล โดยจับเวลาหลังจากที่เติมโซเดียมซัลไฟโคฟลูออไรด์ จนถึงที่ฟองน้ำเกิดการเจล ทดสอบการเจลด้วยใช้แท่งแก้วสัมผัสกับผิวของฟองน้ำแล้วบันทึกระยะเวลา เมื่อใช้แท่งแก้วไปแตะที่ฟองน้ำแล้วฟองน้ำไม่ติดมากับแท่งแก้ว

3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟองน้ำ

3.2.1 การทดสอบความหนาแน่น (Density)

โดยยึดถือตามมาตรฐาน ASTM 3574 ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้ คือ ตัดฟองน้ำยางธรรมชาติรูปทรงสี่เหลี่ยม ความกว้าง x ความยาว x ความสูง เท่ากับ 3.0 x 3.0 x 3.0 เซนติเมตร จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นแสดงดังสมการที่ 1

$$\text{Density (g/cm}^3\text{)} : D = M/V \quad (1)$$

โดยที่

D คือ ความหนาแน่นของฟองน้ำ, (g/cm³)

M คือน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบ, (g)

V คือ ปริมาตรของชิ้นงาน, (cm³)

3.2.2 การทดสอบค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัด (Compression set)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1055 มีวิธีการทดสอบดังนี้ เตรียมชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด ความกว้าง x ความยาว x ความสูง เท่ากับ 5.0 x 5.0 x 2.5 เซนติเมตร จากนั้นนำฟองน้ำวางลงใต้แผ่นอัดกดให้ยุบตัว 50% ของความสูงเดิมโดยใช้แท่งเหล็กที่มีความสูง 50% ของความสูงควบคุมความหนาของชิ้นงานที่ทดสอบให้คงที่ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 22 ชม. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำออกจากตู้อบแกะเอาแผ่นอัดออก วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำฟองน้ำมาวัดความสูง สูตรการคำนวณค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัดแสดงดังสมการที่ 2

$$\text{Compression set (\%)} = ([t_0 - t]/t_0) \times 100 \quad (2)$$

โดยที่

t₀ คือ ความสูงก่อนการทดสอบ, (mm)

t คือ ความสูงหลังการทดสอบ, (mm)

3.2.3 การกระดุ้งตัว (Resilience)

โดยยึดถือตามมาตรฐาน ASTM D 3574 โดยใช้เทคนิคแบบ Ball rebound ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้ คือ ตัดยางฟองน้ำให้มีความสูง 50 มิลลิเมตร แล้วนำลูกบอลโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร (16.3 g) ปลดปล่อยผ่านท่อแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 40 มิลลิเมตร ที่ระยะความสูง 500 มิลลิเมตร กระแทกกับยางฟองน้ำที่รองเป็นฐาน วัดระยะการกระดุ้งตัวสูงสุด สูตรคำนวณการกระดุ้งตัว แสดงดังสมการที่ 3

$$\text{Resilience (\%)} = (h/h_0) \times 100 \quad (3)$$

โดยที่

H = ความสูงจากการกระดุ้งตัว, (cm)

h₀ = ความสูงตอนเริ่มต้น, (cm)

3.2.4 การทดสอบแรงกด (Compression Force Deflection, CFD)

การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 173-2529 เป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของฟองน้ำยางธรรมชาติ โดยหวักดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร มีวิธีการทดสอบดังนี้คือ

ตัดฟองน้ำให้มีขนาดดังนี้ ความกว้าง x ความยาว x ความสูง เท่ากับ 3.0 x 3.0 x 8.0 เซนติเมตร นำฟองน้ำวางใต้แผ่นอัด แล้วใช้แรงกดจากเครื่อง ทดสอบหาความทนต่อแรงดึง ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H10KS โดยใช้ความเร็ว 50 mm/min กดโดยใช้แรงขั้นต้น (Preload) 4.5 นิวตัน กดลงบนชิ้นทดสอบ วัดความหนาชิ้นทดสอบ ให้ถือว่าความหนาที่วัดได้เป็นความหนาเดิมของชิ้นทดสอบ จากนั้นเพิ่มแรงกดต่อไปจนกระทั่งความหนาลดลงจากความหนาเดิม ร้อยละ 25 อ่านแรงที่ใช้ (ซึ่งรวมแรงกดเดิม 4.5 นิวตันด้วย) สูตรที่ใช้ในการคำนวณความแข็ง แสดงดังสมการที่ 4

$$CFD \text{ (kPa)} = F/A \quad (4)$$

โดยที่

F = แรงที่ใช้กดฟองน้ำให้ยุบตัว 25%, (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ, (m²)

3.2.5 การยุบตัว (Depression)

นำชิ้นฟองน้ำที่เตรียมได้ด้วยเบ้าอะลูมิเนียม มาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยเฉลี่ยทั่วทั้งชิ้นของฟองน้ำ แล้วนำมาวัดความสูงโดยเฉลี่ยของชิ้นฟองน้ำ ให้ตำแหน่งที่วัดความสูงอยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นฟองน้ำ แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์การยุบตัว สูตรที่ใช้ในการคำนวณการยุบตัว แสดงดังสมการที่ 5

$$\text{Depression (\%)} = [(A-B)/A] \times 100 \quad (5)$$

โดยที่

A = ความสูงของเบ้าฟองน้ำ, (cm)

B = ความสูงโดยเฉลี่ยของชิ้นฟองน้ำ, (cm)

4. การทดสอบสมบัติการทนไฟของฟองน้ำยางธรรมชาติทนไฟ

ข้อกำหนดการทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 แบบ 20 มิลลิเมตร Vertical Burning Test (V-0, V-1 or V-2) จะเป็นมาตรฐานที่ว่าด้วยเรื่องการติดไฟและการลุกลามของไฟโดยชิ้นทดสอบจะมีขนาดความยาว x ความหนา เท่ากับ 12.5 เซนติเมตร x 2.0 เซนติเมตร ซึ่งในการทดสอบ UL-94 จะทดสอบโดยใช้ตะเกียงก๊าซจุดเผาชิ้นตัวอย่างในแนวดิ่ง โดยให้ชิ้นงานห่างจากเปลวไฟ 3/4 นิ้ว เมื่อจุดไฟครั้งแรกเป็นเวลา 10 วินาที เปลวไฟก็จะเผากระจายออกไป แล้วเว้นระยะสัก 1 นาที ให้จุดไฟเผาครั้งที่ 2 เป็นเวลา 10 วินาที เปลวไฟก็จะกระจายเพิ่มอีก แล้วก็เริ่มสังเกตดูการเผาไหม้ ซึ่งผลการทดสอบจะแบ่งการเผาไหม้เป็น 3 แบบดังนี้

มาตรฐาน UL-94 ที่เป็น V-0 ซึ่งการเผาไหม้ผิวนอกจะกินเวลา 10 วินาทีหรือน้อยกว่า เปลวไฟจะไม่ลามเกินออกไปภายใน 30 วินาที การเผาไหม้ของวัสดุนั้นจะลดลงและหยุดไหม้

มาตรฐาน UL-94 ที่เป็น V-1 ซึ่งการเผาไหม้ผิวบนจะกินเวลา 30 วินาทีหรือน้อยกว่า เปลวไฟจะไม่ลามเกินออกไป ภายใน 60 วินาที การเผาไหม้ของวัสดุนั้นจะลดลงและหยุดไหม้

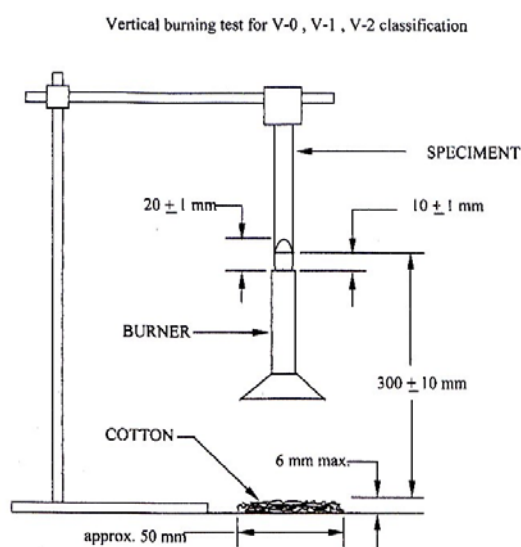
มาตรฐาน UL-94 ที่เป็น V-2 ซึ่งการเผาไหม้ผิวบนจะกินเวลา 30 วินาทีหรือน้อยกว่า เปลวไฟจะไม่ลามเกินออกไป ภายใน 60 วินาที การเผาไหม้ของวัสดุนั้นก็ไหม้ไปจนหมด

จากการทดสอบ UL-94 มาตรฐานทั้ง 3 แบบ สามารถสรุปได้ดังนี้

มาตรฐาน UL-94 ที่เป็น V-0 จะมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

มาตรฐาน UL-94 ที่เป็น V-1 จะมีประสิทธิภาพปานกลาง

มาตรฐาน UL-94 ที่เป็น V-2 จะมีประสิทธิภาพน้อยที่สุด



รูปที่ 3 ชุดทดสอบการทนไฟตามมาตรฐาน UL-94 (Vertical burning test)

5. การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค (Thermal Gravimetric Analysis, TGA)

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เครื่อง Thermalgravimetric analyzer รุ่น STA 6000 โดยนำชิ้นตัวอย่างที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 8 ถึง 10 มิลลิกรัม โดยทดสอบในสภาวะบรรยากาศ เพื่อศึกษาการสลายตัวของตัวอย่างที่เป็นผลมาจากความร้อน (Thermal degradation) เท่านั้น ซึ่งสภาวะการทดสอบ คืออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 10 mL/min ทดสอบที่อุณหภูมิในช่วง 30-800 °C ใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10°C/min ทดสอบสภาวะบรรยากาศ โดยรายงานผลเป็นค่าการสลายตัว (Decomposition temperature) และเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักการสลายตัวของชิ้นตัวอย่าง (Derivative weight)

6. วัดขนาดเซลล์ของฟองน้ำอย่างธรรมชาติด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป

นำตัวอย่างฟองน้ำอย่างธรรมชาติมาตัดแบบ cross-section ให้มีความหนาประมาณ 0.05 มิลลิเมตร นำไปวางบน plate จากนั้นนำไปส่องดูขนาดเซลล์พร้อมทั้งถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคปที่มีอุปกรณ์ถ่ายภาพติดอยู่

วิธีการวัดขนาดของเซลล์

1. ลากเส้นผ่านรูปเซลล์ที่ถ่าย แล้ววัดขนาดของเซลล์ที่เส้นลากผ่านแต่ละเซลล์ โดยเทียบ 1 ช่องสเกล เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร
2. ลากเส้นผ่านรูปอีกหลาย ๆ แนวเพื่อให้ผ่านเซลล์หลาย ๆ เซลล์ คำนวณหาขนาดเซลล์โดยเฉลี่ย