

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมพอลิยูริเทนโฟมชนิดแข็งที่หน่วยต่อการติดไฟ



T107792

นายปิยะ จันทเพชร
นายศุภกิจ เรืองสกุลพัฒน์
นางสาวอรยุพา อุณสุวรรณ

๒๕๖
๒/๖๒๗
๒๕๕๑

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

107792

14 พ.ค. 2553

b.....
i.....

๕๒๑๑๒๓๑๘

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flame Retardant of Rigid Polyurethane Foam



Mr. Piya

Janthapet

Mr. Supakit

Ruengsakulpat

Ms. Onyupa

Unsuwan

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic year 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็งที่หน่วยต่อการติดไฟ

นักศึกษา นายปิยะ จันทเพชร
 นายศุภกิจ เรืองสกุลพัฒน์
 นางสาวอรุญา ชุ่มสุวรรณ

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

ภาควิชา เคมี

คณะ วิทยาศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
 โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

	คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธุ์	
กรรมการ	ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร	
กรรมการ	รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย	



 ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี
 (หัวหน้าภาควิชา)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็งที่หน่วยต่อการติดไฟ			
นักศึกษา	นายปิยะ	จันทเพชร	รหัสนักศึกษา	46050075
	นายศุภกิจ	เรืองสกุลพัฒน์	รหัสนักศึกษา	46050095
	นางสาวอรุษา	อุ้นสุวรรณ	รหัสนักศึกษา	46050108
คณะ	วิทยาศาสตร์			
ภาควิชา	เคมี			
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม			
ปีการศึกษา	2549			
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สมศักดิ์	วรมงคลชัย		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็งที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ เพื่อเพิ่มความสามารถในการหน่วงการติดไฟของโฟม เนื่องจากโฟมเป็นวัสดุที่ติดไฟได้ง่ายและเกิดการลุกลามได้อย่างรวดเร็ว โดยทำการศึกษาค่าการเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็งที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดพอลิฟอสเฟต ทั้งแบบที่มีคลอรีนและไม่มีคลอรีนในปริมาณแตกต่างกัน จากนั้นจะศึกษาสมบัติเชิงกล เพื่อหาสภาวะและอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อใช้เตรียมพอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็งที่หน่วยต่อการติดไฟ โดยสมบัติเชิงกลที่จะทำการศึกษาคือ ความแข็งแรงการกดอัด โดยทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine เพื่อหาค่าแรงกดสูงสุด สมบัติทางกายภาพที่จะทำการศึกษาคือ การตรวจวัดความหนาแน่น โดยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานวัดปริมาตร แล้วคำนวณหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน และการเปลี่ยนแปลงขนาด โดยการวัดขนาดของชิ้นงานที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่างๆ ศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) การทดสอบสมบัติทางด้านความร้อน โดยการให้ความร้อนกับชิ้นงานแล้ววัดการไหลของความร้อนที่ผ่านพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง และการทดสอบความสามารถในการติดไฟ โดยการเผาชิ้นงานนาน 60 วินาที แล้วสังเกตว่าชิ้นงานเกิดการติดไฟหรือไม่

จากการทดสอบสมบัติต่างๆพบว่า สมบัติทางกายภาพ คือ ความหนาแน่น, สมบัติการเปลี่ยนรูป, ลักษณะของเซลล์ และสมบัติการนำความร้อนของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งทั้งชนิดที่ไม่มีสารเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และชนิดที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดพอลิฟอสเฟต ทั้งแบบที่มีคลอรีนและไม่มีคลอรีน มีค่าไม่แตกต่างกันมาก แต่ค่าความแข็งแรงกดของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดพอลิฟอสเฟตที่มีคลอรีนจะให้ค่าที่เด่นกว่า เนื่องจากสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้ดีกว่าและมีมวลโมเลกุลสูงกว่า ทำให้ผสมเข้ากับโฟมได้ดีกว่า นอกจากนี้โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดพอลิฟอสเฟตที่มีคลอรีนสามารถยับยั้งการติดไฟและมีอัตราการเผาไหม้ที่ช้ากว่า เมื่อเปรียบเทียบกับในปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟที่เท่ากัน ชนิดที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบที่สามารถช่วยหน่วงการติดไฟได้ดีโดยเมื่อโฟมเกิดการเผาไหม้จะเกิดก๊าซคลอรีนและน้ำขึ้น ซึ่งจะทำหน้าที่ปกคลุมโฟมเพื่อไม่ให้ออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศเข้ามาทำปฏิกิริยาเผาไหม้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Flame retardant of rigid polyurethane foam	
Name	Mr.Piya	Chantapetch
	Mr.Supakit	Ruengsakulpat
	MissOnyupa	Unsuwan
Program	Chemistry	
Academic Year	2005	
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somsak Woramongkolchai	

Abstract

This research aims to prepare rigid polyurethane foam with flame retardant to lessen flammability because foam is easily burn. The rigid polyurethane foam with two types of flame retardant: chlorine and non chlorine in composition was studied. Then mechanical properties were tested to find optimum conditions and ratios of rigid polyurethane foam with flame retardant. The mechanical properties were compressive strength by using Universal testing machine. The physical properties were density by weighting mass of sample and volumetric. Then calculated density of samples. The dimensional changes were measured by dimension of samples at varied temperature. Morphology studied of foam was investigated by Scanning Electron Microscopy (SEM). Thermal properties were used to measure heat flow of sample surfaces and the flammability was tested for 60 seconds as burning observation.

From results, it was found that density, forming change, cell characteristics and thermal conductivity of rigid polyurethane foam with no flame retardant and polyphosphate flame retardant containing chloride and non chloride in composition were no significant expect hardness of rigid polyurethane foam with polyphosphate flame retardant containing Chlorine was significant. This was due to higher molecular weight and attractive force between molecules. In addition to rigid polyurethane foam with polyphosphate foam retardant containing chlorine could retard flammability and be slower heating rate. In comparison to equal amount of flame retardant, the chlorine type is a good retarder. When the foam was burned, the retarder could be retarded chlorine gas and water to cover the foam and not allowing oxygen in atmosphere to enhance in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงการพิเศษนี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้เลยหากมิได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำจากท่านทั้งหลายดังนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย ที่กรุณาเป็นที่ปรึกษาในโครงการพิเศษนี้ให้รวมทั้งให้คำแนะนำ คำอธิบายตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆเกี่ยวกับเนื้อหาของหัวข้อโครงการพิเศษตลอดจนทุกๆเรื่องจนทำให้การทำหัวข้อโครงการพิเศษของข้าพเจ้าสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ รศ.ดร.มาลินี ชัยคุมภิกจลินธุ์ และอาจารย์ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรีชญาวารากรณ์ ที่ร่วมเป็นคณะกรรมการในการสอบโครงการพิเศษนี้รวมทั้งคำแนะนำต่างๆเพื่อให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณธีรวิวัฒน์ นรินทร์พงษ์ จากบริษัท ทีพีโอ ที่เอื้อเฟื้อสารเคมีอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องทดลอง อีกทั้งคำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆที่ใช้ในโครงการพิเศษ หากมิได้รับความช่วยเหลือจากท่านนี้โครงการพิเศษนี้คงมีอาจสำเร็จลุล่วงไปได้ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคุณสุดใจ สอนสะอาด และคุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวกและคำปรึกษาในการใช้เครื่องมือ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณครอบครัว เพื่อนๆทุกคนและโดยเฉพาะเพื่อนในกลุ่มที่ช่วยเป็นกำลังใจและกำลังกายให้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลอีกมากมายที่มีได้เอ่ยนาม ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

นายปิยะ จันทเพชร
นายศุภกิจ เรืองสกุลพัฒน์
นางสาวอรยุพา อุ่นสุวรรณ

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	A
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	B
กิตติกรรมประกาศ	C
สารบัญ	D
สารบัญรูปภาพ	F
สารบัญตาราง	H
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 วัสดุ	3
2.1.1 พอลิยูรีเทน	3
2.2 สารช่วยหน่วงการติดไฟ	21
2.2.1 กระบวนการเผาไหม้ในระดับมหภาค	21
2.2.2 ขั้นตอนของการเผาไหม้	24
2.2.3 ประเภทของสารช่วยหน่วงการติดไฟ	25
2.2.4 สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดว่องไวต่อปฏิกิริยา	32
2.2.5 การเลือกสารช่วยหน่วงการติดไฟ	34
2.2.6 กลไกของสารช่วยหน่วงการติดไฟ	34
2.2.7 วิธีการทดสอบ (ในห้องทดลอง)	35
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	42
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	42
3.3 วิธีการทดลอง	43
3.3.1 การเตรียมโคมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มี การเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ	43
3.3.2 การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล	44
3.3.3 การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยา	46
3.3.4 การทดสอบสมบัติทางด้านความร้อน	46
3.3.5 การทดสอบความสามารถในการติดไฟ	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	47
4.1 ผลการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล	47
4.1.1 ผลการตรวจวัดความหนาแน่น	47
4.1.2 การทดสอบสมบัติความแข็งแรงกด	48
4.1.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนรูป	50
4.2 ผลการตรวจวิเคราะห์พื้นฐานวิทยา	54
4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำความร้อน	57
4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติการหน่วงไฟ	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผลการทดลอง	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	A
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	B
กิตติกรรมประกาศ	C
สารบัญ	D
สารบัญรูปภาพ	F
สารบัญตาราง	H
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 วัสดุ	3
2.1.1 พอลิยูรีเทน	3
2.2 สารช่วยหน่วงการติดไฟ	21
2.2.1 กระบวนการเผาไหม้ในระดับมหภาค	21
2.2.2 ขั้นตอนของการเผาไหม้	24
2.2.3 ประเภทของสารช่วยหน่วงการติดไฟ	25
2.2.4 สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดวงไวต่อปฏิกิริยา	32
2.2.5 การเลือกสารช่วยหน่วงการติดไฟ	34
2.2.6 กลไกของสารช่วยหน่วงการติดไฟ	34
2.2.7 วิธีการทดสอบ (ในห้องทดลอง)	35
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	42
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	42
3.3 วิธีการทดลอง	43
3.3.1 การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มี การเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ	43
3.3.2 การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล	44
3.3.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา	46
3.3.4 การทดสอบสมบัติทางด้านความร้อน	46
3.3.5 การทดสอบความสามารถในการติดไฟ	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	47
4.1 ผลการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล	47
4.1.1 ผลการตรวจวัดความหนาแน่น	47
4.1.2 การทดสอบสมบัติความแข็งแรงกด	48
4.1.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนรูป	50
4.2 ผลการตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยา	54
4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำความร้อน	57
4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติการหน่วงไฟ	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผลการทดลอง	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปแบบการใช้ประโยชน์ของพอลิยูรีเทน	3
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดอัดกับปริมาณของสารช่วยหน่วง การติดไฟ Flamestop 380 ที่เติมลงไป	48
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดอัดกับปริมาณของสารช่วยหน่วง การติดไฟ TMCPP ที่เติมลงไป	49
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่ไม่เติมสาร ช่วยหน่วงการติดไฟ และที่เติมสารช่วยการติดไฟ Flamestop380 ในปริมาณที่แตกต่างกัน (a) โฟมที่เก็บที่อุณหภูมิ -75 องศาเซลเซียส (b) โฟมที่เก็บที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส	50
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่ไม่เติมสาร ช่วยหน่วงการติดไฟ และที่เติมสารช่วยการติดไฟ TMCPP ในปริมาณที่แตกต่างกัน (a) โฟมที่เก็บที่อุณหภูมิ -75 องศาเซลเซียส (b) โฟมที่เก็บที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส	52
รูปที่ 4.5 รูป SEM ถ่วงขยาย 30 เท่า แสดงรูปร่างเซลล์ของโฟมพอลิยูรีเทน ชนิดแข็งที่ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และที่มีการเติมช่วย หน่วงการติดไฟ Flamestop 380 (a) โฟมที่ไม่มีการเติมสารช่วย หน่วงการติดไฟ (b) โฟมที่เติม Flamestop 380 ปริมาณ 1 phr(c) โฟมที่เติม Flamestop 380 ปริมาณ 3 phr(d) โฟมที่เติม Flamestop 380 ปริมาณ 5 phr(e) โฟมที่เติม Flamestop 380 ปริมาณ 7 phr (f) โฟมที่เติม Flamestop 380 ปริมาณ 9 phr	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูปที่ 4.6 รูป SEM กำลังขยาย 30 เท่า แสดงรูปร่างเซลล์ของโพลิเมอร์ชนิดแข็งที่ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และที่มีการเติมช่วยหน่วงการติดไฟ TMCPP (a) โพลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ (b) โพลิเมอร์ที่เติม TMCPP ปริมาณ 1 phr (c) โพลิเมอร์ที่เติม TMCPP ปริมาณ 3 phr (d) โพลิเมอร์ที่เติม TMCPP ปริมาณ 5 phr (e) โพลิเมอร์ที่เติม TMCPP ปริมาณ 7 phr (f) โพลิเมอร์ที่เติม TMCPP ปริมาณ 9 phr 56
- รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของโพลิเมอร์ชนิดแข็งกับชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ 59
- รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่เกิดการติดไฟของโพลิเมอร์ชนิดแข็งกับชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ 61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	พอลิอีเทอร์ที่นิยมใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทน .	6
ตารางที่ 2.2	ความว่องไวของเอมีนตติยภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาระหว่างฟีนิลไอโซไซยาเนต และบิวทานอล	9
ตารางที่ 2.3	ความว่องไวของตัวเร่งที่ใช้เตรียมยูรีเทนจากฟีนิลไอโซไซยาเนต	11
ตารางที่ 2.4	อิทธิพลของตัวทำละลายในการพอลิเมอไรเซชันเอทิลีนไกลคอลและ ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต	13
ตารางที่ 2.5	สมบัติของสารช่วยให้เกิดฟอง	13
ตารางที่ 2.6	อุณหภูมิในการจุดติดไฟของพอลิเมอร์ (Igiton temperature of vavious polymers)	23
ตารางที่ 2.7	สารประกอบแฮโลเจนที่พบว่ามีประสิทธิภาพที่ดีเมื่อใช้ ร่วมกับแอนติโมนีออกไซด์	31
ตารางที่ 2.8	สมบัติของสารที่สามารถใช้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟได้	33
ตารางที่ 3.1	สูตรผสมพอลิยูรีเทนที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ	43
ตารางที่ 4.1	ความหนาแน่นของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง	47
ตารางที่ 4.2	ค่าการนำความร้อนของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง	58
ตารางที่ 4.3	การเผาไหม้ของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ปัจจุบันโฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane foam) ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี อีกทั้งยังทนต่อความร้อนได้สูง มนุษย์จึงได้นำโฟมพอลิยูรีเทนมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ มากมาย

โฟมพอลิยูรีเทน มีทั้งแบบชนิดแข็ง (Rigid polyurethane foam) และชนิดยืดหยุ่น (Flexible polyurethane foam) โดยสมบัติเด่นของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง คือมีประสิทธิภาพสูงในการกันกระแทกเป็นฉนวนทางความร้อนที่ดี มีความสามารถในการยืดหดสูง มีความแข็งแรงในการขึ้นรูป นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบา และสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีอีกด้วย จึงนิยมนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่กันกระแทก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ ชิ้นส่วนประกอบยานพาหนะ เป็นต้น

แต่เนื่องจากธรรมชาติของโฟมพอลิยูรีเทน เป็นวัสดุที่ติดไฟง่าย และเกิดการลุกลามได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก ซึ่งถ้าสามารถผลิตโฟมพอลิยูรีเทนที่หน่วงต่อการติดไฟได้ จะทำให้ป้องกันอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้น ทำให้ส่งผลที่ดีต่อชีวิตและทรัพย์สิน นอกจากนี้ยังสามารถนำเอาโฟมพอลิยูรีเทนมาประยุกต์ใช้ได้มากขึ้นอีกด้วย

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะทำการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีสารช่วยหน่วงการติดไฟเพื่อลดการติดไฟของโฟมลง โดยใช้สารช่วยหน่วงการติดไฟสองชนิดที่แตกต่างกัน โดยชนิดแรกจะเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดที่ไม่มีหมู่แฮโลเจน ส่วนชนิดที่สองนั้นจะเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดที่มีหมู่แฮโลเจน นอกจากนี้ยังใช้ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟที่แตกต่างกัน เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่จะผลิตโฟมพอลิยูรีเทน โดยสมบัติที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยา การทดสอบสมบัติทางด้านความร้อน และการทดสอบความสามารถในการติดไฟของโฟมที่สังเคราะห์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ ในการทำโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่หน่วงต่อการติดไฟ

1.2.2 เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟที่เหมาะสมในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่หน่วงต่อการติดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา การทดสอบสมบัติทางด้านความร้อน และการทดสอบความสามารถในการติดไฟของ โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีปริมาณและชนิดของสารช่วยหน่วงการติดไฟที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาหาปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ ที่เหมาะสมของโฟมพอลิยูรีเทนที่หน่วงต่อการติดไฟ
- 1.3.2 ศึกษาชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา การทดสอบสมบัติทางด้านความร้อน และการทดสอบความสามารถในการติดไฟของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง
- 1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและการดำเนินงาน
- 1.4.1 สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 เตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้สำหรับการทดลอง
- 1.4.3 ทำการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งโดยมีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟในปริมาณและชนิดที่แตกต่างกัน
- 1.4.4 ตรวจสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา การทดสอบสมบัติทางด้านความร้อน และการทดสอบความสามารถในการติดไฟของ โฟมที่สังเคราะห์ได้
- 1.4.5 อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถปรับปรุงสมบัติของโฟมพอลิยูรีเทนให้มีความสามารถในการหน่วงการติดไฟได้
- 1.5.2 สามารถนำพอลิยูรีเทนที่หน่วงต่อการติดไฟไปใช้งานได้มากขึ้น
- 1.5.3 ใช้ชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟที่เหมาะสมในการผลิต โฟมพอลิยูรีเทน ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของโฟมพอลิยูรีเทนที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

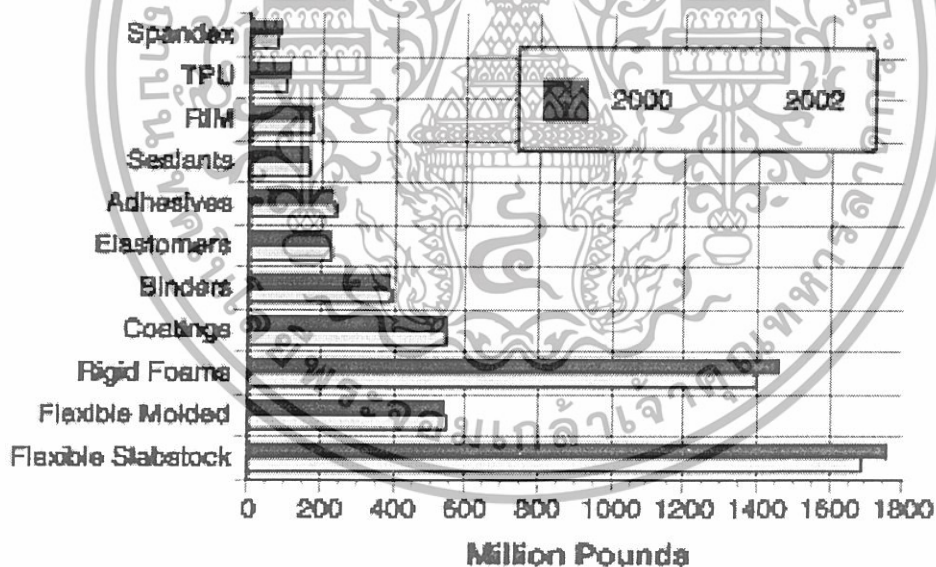
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 วัสดุ

2.1.1 พอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทน คือ การเชื่อมต่อยูรีเทนกับสารประกอบหมู่อื่นๆ เช่น อีเทอร์ เอสเทอร์ ไบยูเรต อัลโลฟาเนต เอไมด์ และสารประกอบหมู่อื่นๆ ที่นอกเหนือจากนี้อาจจะรวมอยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้

วิธีที่ใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทนที่นิยมใช้มาก คือ ปฏิกิริยาของไดฟังก์ชันนอล หรือ พอลิฟังก์ชันนอลของสารประกอบไฮดรอกซิล เช่น Hydroxyl-terminated polyether/polyester กับ ไดฟังก์ชันนอลหรือพอลิฟังก์ชันนอลของไอโซไซยาเนต



รูปที่ 2.1 รูปแบบการใช้ประโยชน์ของพอลิยูรีเทน [1]

2.1.1.1 วัตถุประสงค์สำหรับพอลิยูรีเทน

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทนจะมีเพียงไดไอโซไซยาเนตและไดออล หรือ พอลิออล เนื่องจากการเตรียมพอลิยูรีเทนในทางอุตสาหกรรมจะมาจากปฏิกิริยาการควบแน่น ระหว่างไดไอโซไซยาเนต และไดออลหรือพอลิออลเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.) ไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanates)

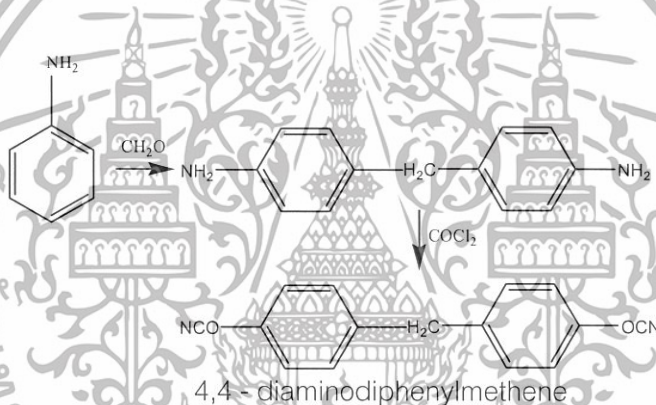
ไอโซไซยาเนตสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและฟอสจีน ดังนี้



ไดไอโซไซยาเนตที่นิยมใช้ได้แก่

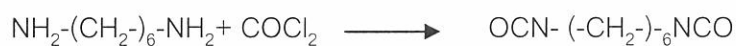
- ไดฟีนิลเมเทนไดไอโซไซยาเนต (Diphenylmethane diisocyanate, MDI)

โดยสามารถสังเคราะห์ได้จากสมการ



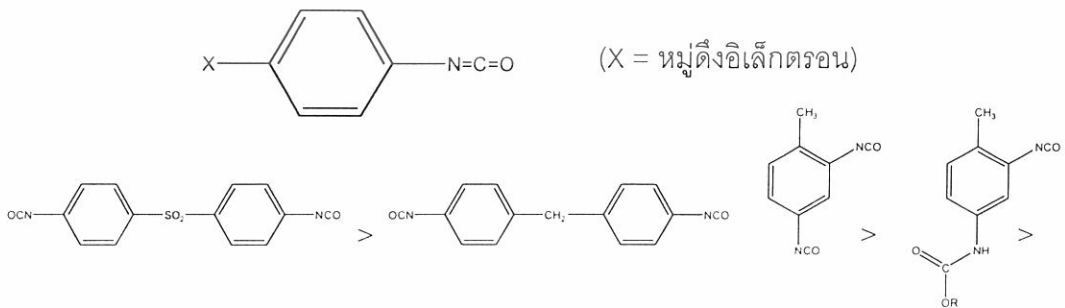
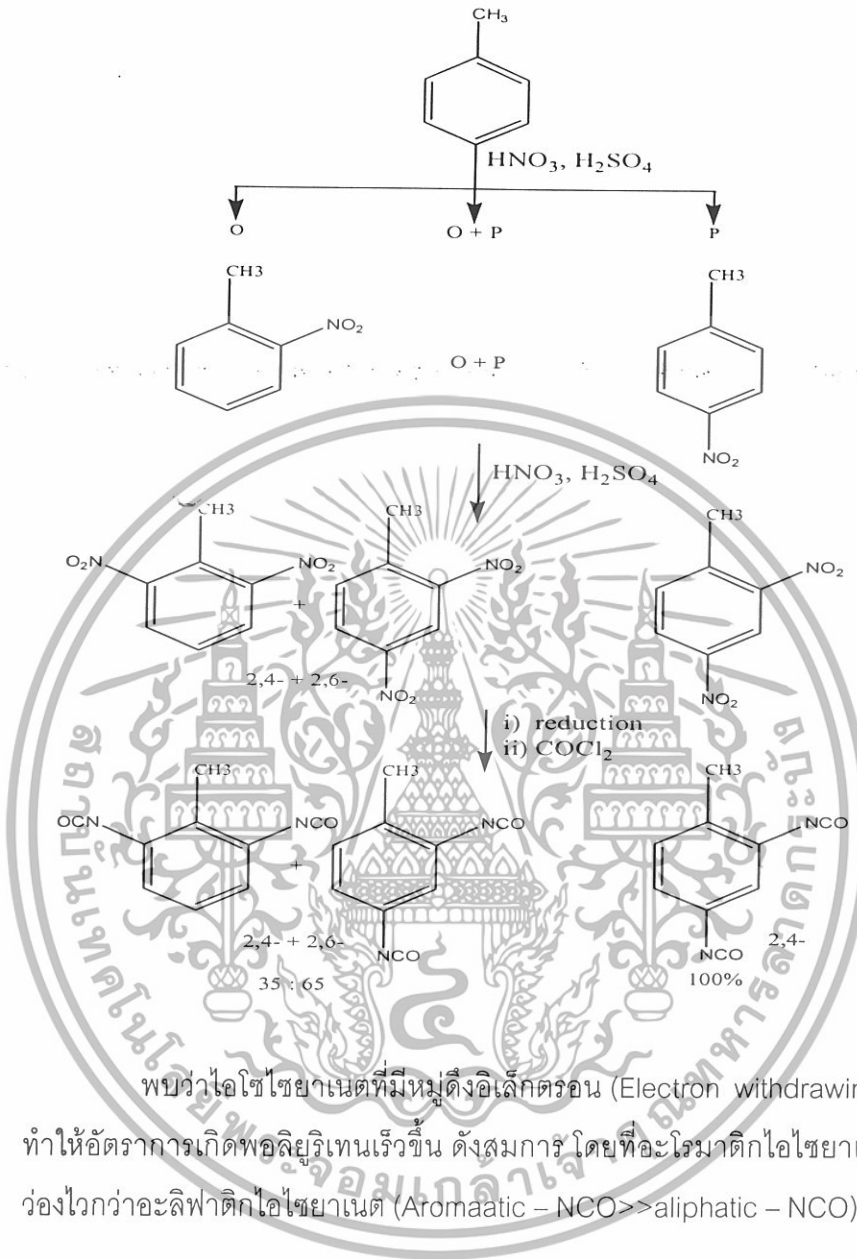
- เฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (Hexamethylene diisocyanate, MDI)

สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างเฮกซะเมทิลีนไดเอมีนและฟอสจีน ดังสมการ



- โทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate, TDI) สามารถเตรียมได้จากแผนผังดังต่อไปนี้

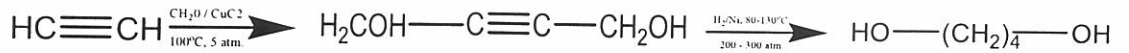
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.) ไดออลและพอลิออล (Diols and Polyols) ที่นิยมใช้ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1,4 - บิวเทนไดออล สามารถเตรียมได้จากเอเซทิลีนทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการ



นิยมใช้เตรียมเส้นใยจากพอลิยูรีเทน (Fiber forming polyurethane) แต่ปัจจุบันไม่ค่อยเป็นที่นิยมเพราะมีวัสดุอื่นมาทดแทน

พอลิอีเทอร์ (Polyethers)

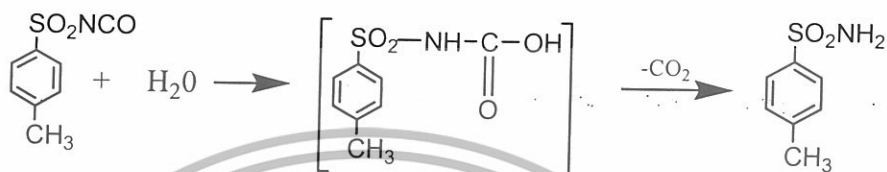
พอลิอีเทอร์ที่มีหมู่ปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซี H-(-OR-)_n-OH จัดว่าเป็นวัสดุที่สำคัญในการเตรียมพอลิยูรีเทนในปัจจุบัน (ตารางที่ 2.1) พอลิอีเทอร์ไตรออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างสูง (ประมาณ 3000) นิยมใช้ผลิตโฟมยืดหยุ่น (Flexible foams) ในขณะที่พอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงประมาณ 500 นิยมจะใช้ผลิตโฟมแข็ง (Rigid foams)

ตารางที่ 2.1 พอลิอีเทอร์ที่นิยมใช้เตรียมพอลิยูรีเทน [2]

ชนิดของพอลิออล	น้ำหนักโมเลกุล ทั่วไป	หมู่ฟังก์ชัน
$\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{OH} \\ \\ \text{OH} \end{array}$	400-4000	2
$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{HO}-\text{H}_2\text{C}-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{OH} \end{array}$	300-6000	3
$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{HOH}_2\text{C}-\text{C}-\text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$	400-600	4
$\text{HOH}_2\text{C}-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2\text{OH}$	350-750	6

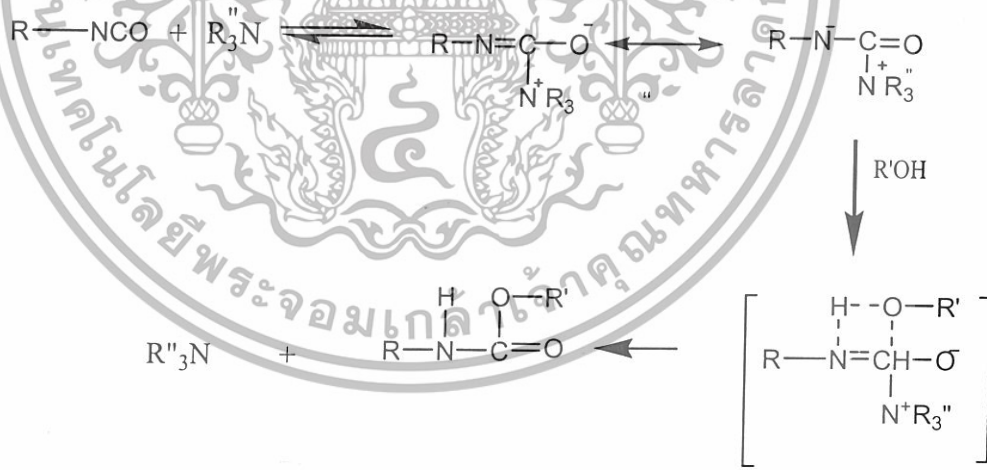
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยพบว่าน้ำจะมีความว่องไวกว่าแอลกอฮอล์ (หรือไดออล) ดังนั้นจึงนิยมเติมสารที่ทำให้แห้ง (Drying agent) หรือตัวที่ทำให้เสถียร (Stabilize) หรืออาจจะเรียกว่าตัวยับยั้ง (Inhibitor) ลงไปด้วย ไม่เช่นนั้นจะทำให้สูญเสีย -NCO เกิดเป็น R-NH₂ ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาต่อกับ -NCO ใหม่ได้



3.) ตัวเร่ง (Catalysts)

ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิยูรีเทน (หรือไอโซไซยาเนต) ในทางอุตสาหกรรมนิยมต้องเติมตัวเร่งลงไปด้วย ตัวเร่งที่นิยมใช้คือ เอมีนตติยภูมิ (Tertiary amine) หรือสารประกอบของโลหะบางชนิด โดยเฉพาะสารประกอบของโลหะดีบุก (Sn) กลไกการเกิดไอโซไซยาเนตโดยใช้เอมีนเป็นดังนี้



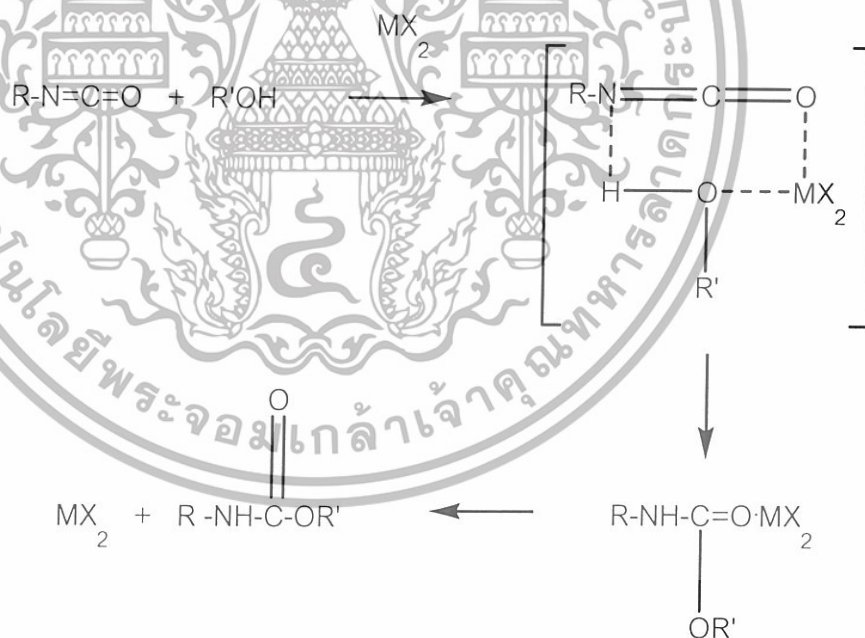
เอมีนตติยภูมิที่มีหมู่แทนที่ขนาดใหญ่ขึ้น (ความแข็งแรงของความเป็นเบสเพิ่มขึ้น) เนื่องจากอิทธิพลทางสเตอริก (Steric effect) จะทำให้มีความว่องไวมากขึ้น (ตารางที่ 2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ความว่องไวของเอมีนตติยภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาระหว่างฟีนิลไอโซไซยาเนต และ บิวทานอล [1]

ชนิดของอะมีน	Base strength (pKa)	ความว่องไวสัมพัทธ์
Trimethylamine	9.9	2.2
Ethylidimethylamine	10.2	1.6
Diethylmethylamine	10.4	1.0
Triethylamine	10.8	0.9
Triethylenediamine	8.2	3.3

สารประกอบของโลหะดีบุกที่นิยมใช้ ได้แก่ สแตนเนียออกโทเนต (Stannous octonate)



หรือ ไดบิวทิลทินไดอะซิเตต (Dibutyltin diacetate) ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ความว่องไวของตัวเร่งที่ใช้เตรียมยูรีเทนจากฟีนิลไอโซไซยาเนต [1]

	อัตราเร็วสัมพัทธ์ที่เกิดปฏิกิริยากับ		
	n-บิวทานอล	น้ำ	ไตรฟีนิลยูเรีย
ไม่มี	1.0	1.1	2.2
N-methylmorpholine	40	25	10
Triethylamine	86	47	4
Tetramethyl-1,3-butanediamine	260	100	12
Triethylenediamine	1200	380	90
Tributyltin acetate	8000	14000	8000
Dibutyltin diacetate	600000	100000	120000

4.) ตัวทำละลาย (Solvents)

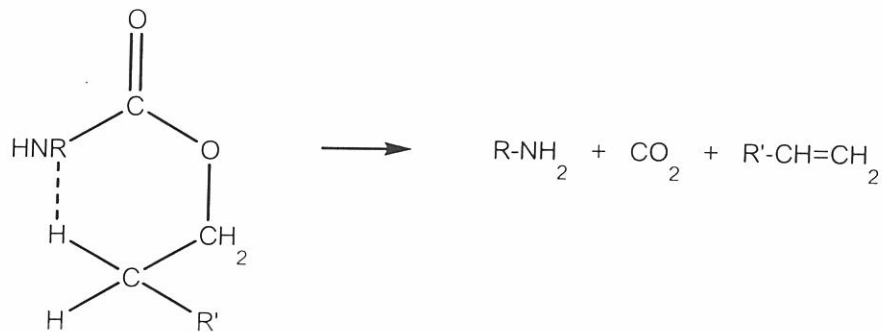
พอลิยูรีเทนที่เตรียมได้หากมีจุดหลอมตัวมากกว่า 200 องศาเซลเซียส จะยากแก่การเตรียมโดยวิธีการเกิดพอลิเมอร์แบบหลอมเหลว (Melt polymerization) เพราะว่าพันธะยูรีเทนไม่เสถียรเมื่อมีอุณหภูมิมากกว่า 220 องศาเซลเซียส การละลายของยูรีเทนที่เกิดจากไอโซไซยาเนตกับแอลกอฮอล์ อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก

แตกตัวกลับไปเป็นไอโซไซยาเนตและแอลกอฮอล์



แตกตัวกลายเป็นเอมีนปฐมภูมิ คาร์บอนไดออกไซด์และโอเลฟิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หรือแตกตัวกลายเป็นอะมีนทุติยภูมิและคาร์บอนไดออกไซด์



หรือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หมูไฮโซไซยาเนตอาจเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้ ซึ่งจะทำให้เสถียรลดลงไป เช่น อาจเกิดไตรเมโรไซกันหรือเกิดอัลโลฟานาต (Allophanate) ได้ ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง จึงนิยมเตรียมพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิไม่สูงมาก กล่าวคือ น้อยกว่า 120 องศาเซลเซียส และเป็นแบบการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลาย (Solution polymerization) ซึ่งพบว่ากรเลือกตัวทำละลาย มีความสำคัญมากในการเตรียมพอลิยูรีเทน (ตารางที่ 2.4) การที่จะได้พอลิยูรีเทนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง นิยมจะต้องเลือกใช้ตัวทำละลายที่สามารถละลายพอลิยูรีเทนที่เกิดขึ้นได้ ตัวอย่างเช่น ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethylsulfoxide) เอ็น-เมทิลไพโรลิโดน และซัลโฟเลน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 อิทธิพลของตัวทำละลายในการพอลิเมอไรเซชันเอทิลีนไกลคอลและ
ไดฟีนิลเมเทนไดไฮโซไซยานาต [2]

Solvent	Yield,		Polymer solubility
	%	η_{inh}	
Xylene	33	0.06	Precipitates at once
Perchloroethylene	62	0.12	Precipitates at once
Chlorobenzene	100	0.17	Precipitates at once
Methyl isobutyl ketone	88	0.23	Precipitates at once
<i>sym</i> -Tetrachloroethane	100	0.36	Precipitates slowly
Nitrobenzene	81	0.35	Precipitates after 30 min
Dimethyl sulfoxide	98	0.69	Soluble
Tetramethylene sulfone	100	0.76	Soluble
Dimethyl sulfoxide/methyl isobutyl ketone, 50/50	100	1.05	Soluble

พอลิยูรีเทนนิยมนำไปใช้ทำโฟม ทั้งโฟมยืดหยุ่นและโฟมแข็ง ด้วยเหตุนี้สารช่วย
ให้เกิดฟองจึงเป็นสารเติมแต่งที่สำคัญในการทำโฟม โดยสารช่วยให้เกิดฟองจะทำให้พอลิ
เมอร์เกิดรูพรุน (Pores) ได้ สารช่วยให้เกิดฟองที่นิยมใช้ ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซ
คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศและของเหลวที่ระเหยง่าย (Volatile liquids) ที่มีความถ่วงจะ
เพาะ (Specific gravity) สูง ๆ แต่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น ฟลูออรีเนตเต็ดอะลิฟาติก
ไฮโดรคาร์บอน (Fluorinated aliphatic hydrocarbon) ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติของสารช่วยให้เกิดฟอง [1]

ชนิดสารช่วยให้เกิดฟอง	น้ำหนัก โมเลกุล	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)
Cyclohexane	84.00	0.774	80.8
Trichloroethylene	131.40	1.466	87.2
1,2 Dichloroethane	98.97	1.245	83.5
1,1,2- Trichlorotrifluoroethane	187.39	1.565	47.6
Acetone	58.08	0.785	56.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

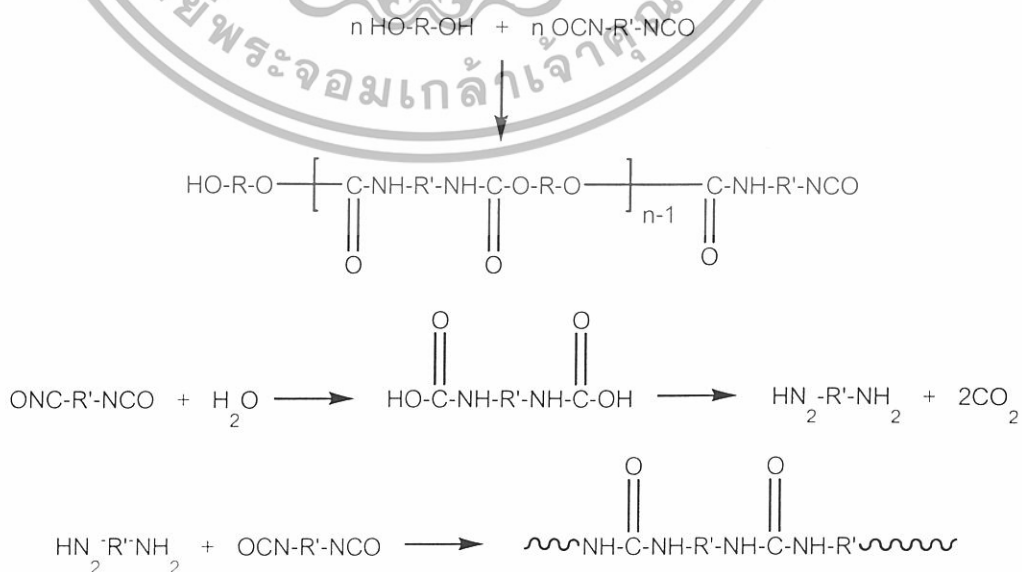
การเกิดฟองในการเตรียมพอลิยูรีเทน นิยมใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนตและน้ำหรือโดยการเติมสารช่วยให้เกิดฟองจำพวกฟลูออรีเนตเต็ดไฮโดรคาร์บอน แต่เนื่องจากสารตัวนี้ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศอย่างมาก ปัจจุบันจึงใช้สารหรือของเหลวระเหยง่ายอื่นๆ แทน

การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน ขั้นตอนการเกิดฟองหรือก๊าซ จะเกิดพร้อมกับการเกิดพอลิยูรีเทน (คือการพอลิเมอไรเซชัน) ดังนั้นจะต้องให้ปฏิกิริยาทั้งสองสมดุลกัน คือต้องให้ฟองก๊าซติดอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ (Polymer matrix) ถ้าการเกิดฟองก๊าซเร็วเกินไป จะทำให้การพองตัวของโฟมไม่ถาวร คือจะยุบลงมาได้ เนื่องจากการพอลิเมอไรเซชันยังไม่ได้สร้างพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะกักก๊าซเหล่านี้ไว้ได้ แต่ถ้าให้พอลิเมอไรเซชันเกิดขึ้นเร็วเกินไป โฟมก็จะไม่เกิดการพองตัว บางครั้งจึงต้องเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เช่น ซิลิโคน-พอลิอัลคิล ลีนออกไซด์บล็อกโคพอลิเมอร์ (Silicone-polyalkylene block copolymer) ด้วยเพื่อทำให้โฟมเสถียร (Foam stabilizer) เมื่อพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ยังไม่แข็งแรงพอ

2.1.1.2 โฟมยืดหยุ่นและโฟมแข็ง

1.) โฟมยืดหยุ่น (Flexible foams)

การผลิตโฟมยืดหยุ่นจะประกอบด้วยการใช้ไดไอโซไซยาเนต พอลิอัลกอฮอล์ และใช้น้ำเป็นสารช่วยให้เกิดฟอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิออลทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยาเนตที่มากเกินพอ จนกระทั่งมีลักษณะกลายเป็นพรีพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำก่อน แล้วจึงเติมน้ำ ตัวเร่ง และ สารเติมแต่งชนิดอื่นๆ ลงไป ไดไอโซไซยาเนตที่นิยมใช้เตรียมโฟมยืดหยุ่น คือ โทลูอินไดไอโซไซยาเนตพอลิออลที่ใช้อาจเป็นพอลิอีเทอร์หรือพอลิเอสเทอร์ก็ได้โดยประมาณ 80% ของโฟมยืดหยุ่นจะเตรียมจากพอลิอีเทอร์เพราะทนต่อการแตกตัวด้วยน้ำ(Hydrolysis) ได้ดีกว่า แต่พอลิเอสเทอร์โฟมจะทนต่อตัวทำละลายต่างๆ ได้มากกว่า

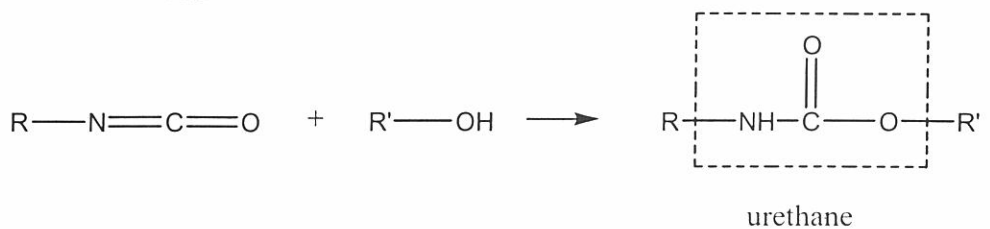
2.) โฟมแข็ง (Rigid foams)

การผลิตโฟมแข็งก็เหมือนกับการผลิตโฟมยืดหยุ่นแต่จะแตกต่างกันตรงระดับการเชื่อมต่อ (Degree of cross linking) โฟมแข็งจะมีการเชื่อมต่อมากกว่าโฟมยืดหยุ่น และส่วนใหญ่จะเตรียมจากพอลิอีเทอร์ และนิยมจะเติมสารช่วยให้เกิดฟอง เช่น ฟลูออโรคาร์บอนและคลอไรด์คาร์บอน เช่น เมทิลีนไดคลอไรด์

โฟมพอลิยูรีเทนมีข้อดีกว่าโฟมทั่วไป คือ มีสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity) ต่ำ ทนต่อความร้อน (Thermal resistance) ดีมาก ไอน้ำซึมผ่าน (Vapor permeability) ต่ำ น้ำหนักเบา และสามารถผลิตได้ง่าย

2.1.1.3 ปฏิกริยาพื้นฐานในการเกิดพอลิยูรีเทน

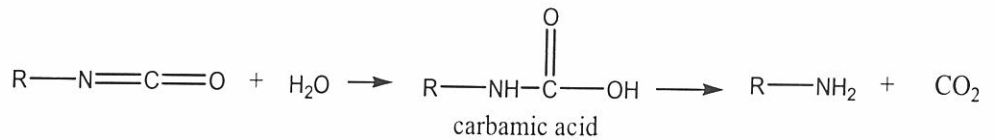
ปฏิกริยาในการเกิดพอลิยูรีเทนที่สำคัญมี 2 ปฏิกริยา คือ ปฏิกริยาระหว่างไอโซไซยาเนต และสารประกอบที่มีไฮดรอกซิลเป็นส่วนประกอบและปฏิกริยาระหว่างไอโซไซยาเนตกับน้ำซึ่งเป็นปฏิกริยาพื้นฐานสำหรับการเกิดหมู่ยูรีเทน และอาจพิจารณาได้จากปฏิกริยาลูกโซ่ สำหรับปฏิกริยาอย่างง่าย ๆ ได้นำเสนอโดยสารประกอบแบบมอนอฟังก์ชันนอลดังสมการดังต่อไปนี้



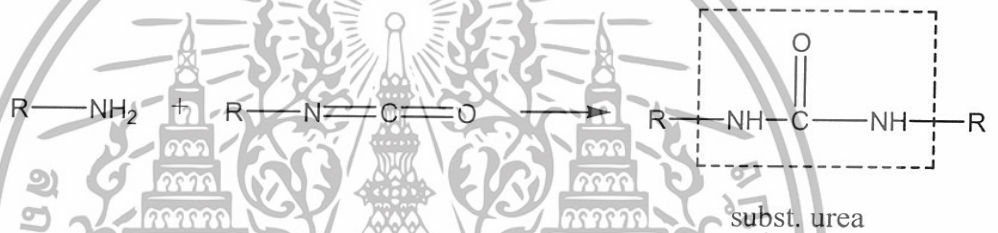
ปฏิกริยาที่สองใช้สำหรับการเกิดโฟมของพอลิเมอร์ยูรีเทน ในการผลิตโฟมแบบ

ยืดหยุ่นโดยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกพร้อมกับการเกิดของหมู่ยูรีเทนที่ไชนแทนที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เชิงพาณิชย์ การค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

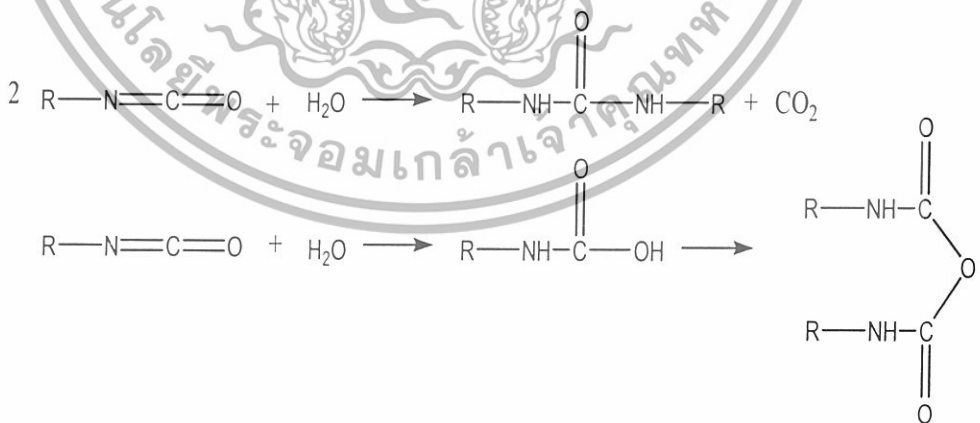
ขั้นตอนแรกของปฏิกิริยานี้เป็นการเกิดกรดคาร์บามิกที่ไม่เสถียร (Unstable carbamic acid) ที่แตกตัวเพื่อก่อตัวเป็นเอมีน และคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการข้างล่างนี้



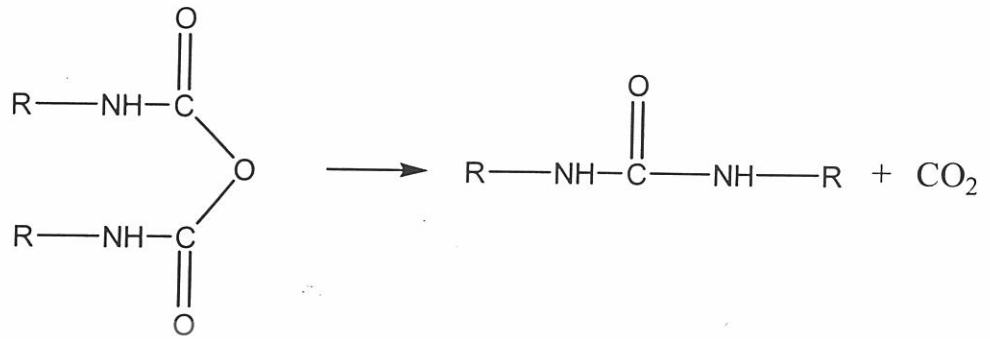
เอมีนจะทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตที่เติมลงไปเพื่อก่อตัวเป็นยูเรียที่ใช้นแทนที่ตามสมการต่อไปนี้



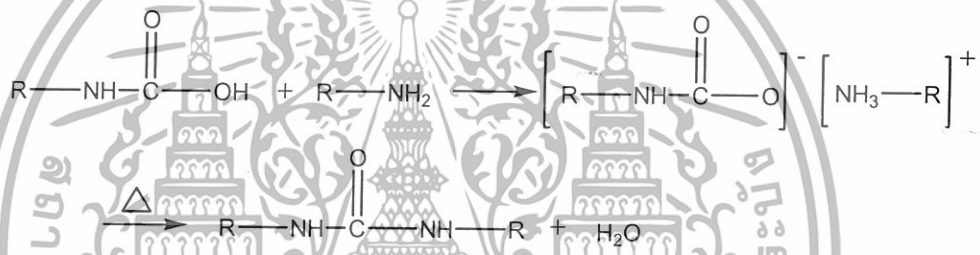
สมการแสดงกลไกของการเปลี่ยนแปลง ที่ก่อให้เกิดของกรดคาร์บามิก แอนไฮไดรด์ด้วยการแตกตัวไปเป็นยูเรียที่ใช้นแทนที่ และคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการข้างล่างนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

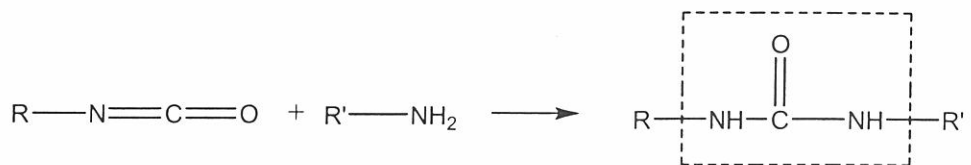


ปฏิกิริยาอีกหนึ่งปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นในบางขอบเขต คือ การเกิดเกลือของ เอไมด์ของกรดคาร์บามิกที่แตกตัวภายใต้ความร้อนเพื่อให้น้ำและยูเรีย ดังสมการ



ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนตกับน้ำ เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการแก้ไขความชื้นของสารเคลือบไอโซไซยาเนตชนิดหนึ่งส่วน (One component isocyanate-terminated coating) นอกจากนี้ การเกิดสารเคลือบผิว อีลาสโตเมอร์ที่เป็นของแข็ง และสารเชื่อมต่อนี้ประกอบด้วยหมู่ที่ไม่มีไอโซไซยาเนต ยังสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดฟองที่ไม่ต้องการซึ่งมาจากคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีกด้วย

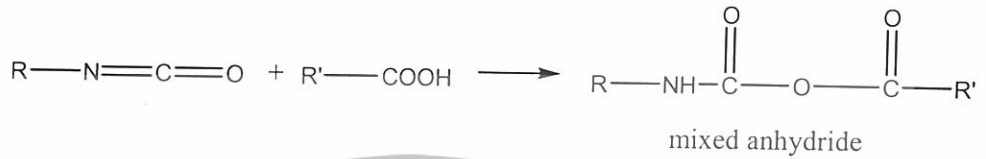
อีกปฏิกิริยาหนึ่ง จะเกิดขึ้นระหว่างไอโซไซยาเนต และหมู่ฟังก์ชันที่มีไฮโดรเจนประกอบอยู่ ซึ่งได้มีการนำเสนอเป็นวัตถุประสงค์ของยูริเทนบางชนิด ตามปฏิกิริยาดังสมการ โดยปฏิกิริยานี้เป็นค่าเฉพาะในการแผ่ขยายของโซ่ออกไปของ isocyanate terminated prepolymer เพื่อที่จะก่อตัวเป็นอีลาสโตเมอร์ของยูริเทน - ยูเรีย



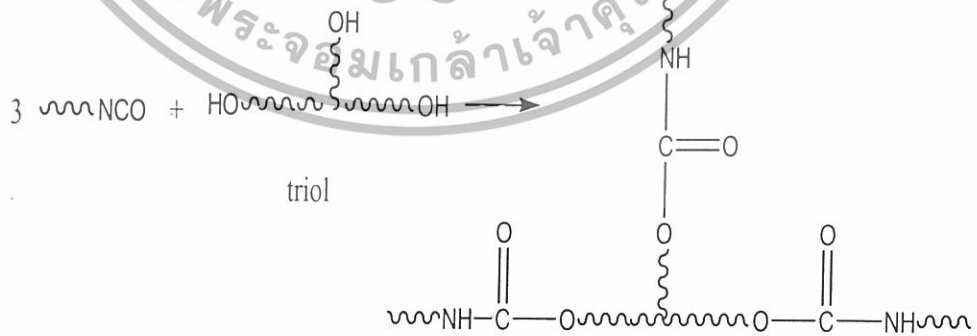
subst. urea

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
107792
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

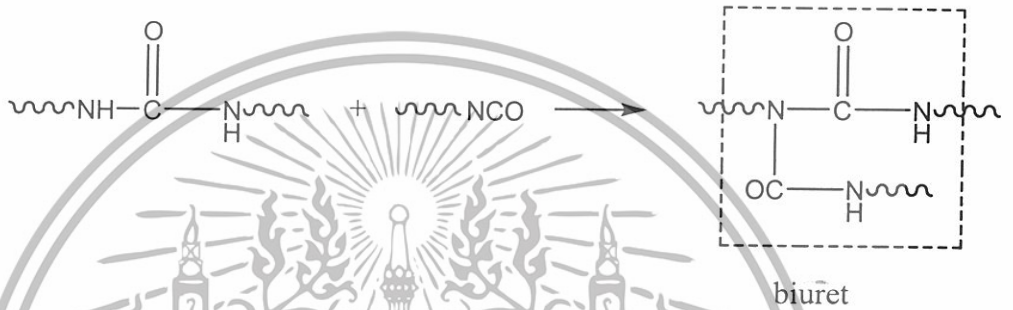
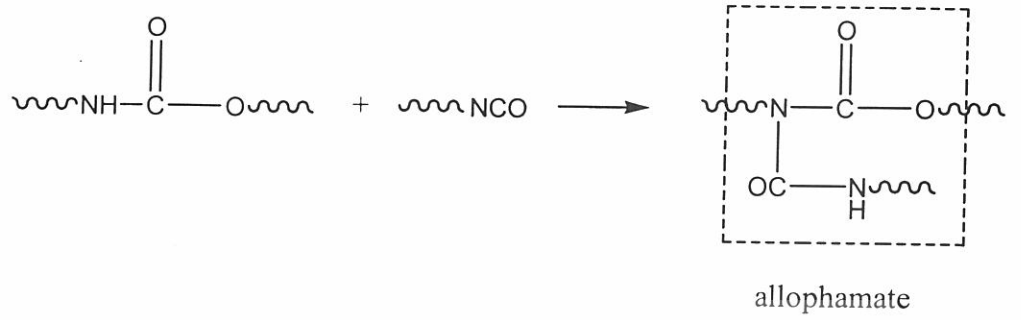
ปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตกับกรดคาร์บอกซิลิก โดยปกติจะดำเนินไปกับการเกิดของแอนไฮไดรด์ผสมตามด้วยการแตกตัวให้กรดเอไมด์ที่สอดคล้องกับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ดังสมการข้างล่างนี้



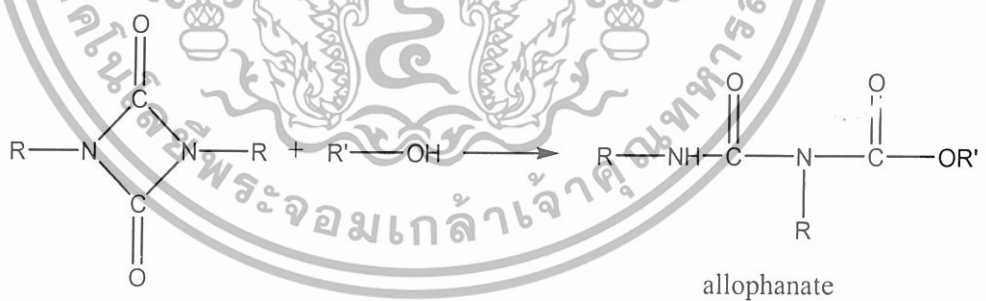
นอกจากนี้ปฏิกิริยาเหล่านี้อาจจะมีการแทนที่ของปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะ (Crosslinking reaction) ได้ ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะที่ธรรมดาที่สุด มาจากการใช้พอลิออลที่มีค่าฟังก์ชันนอลลิตีเป็น 3 หรือมากกว่า การก่อตัวของการเชื่อมโยงพันธะของยูรีเทนในปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตเป็นไปตามสมการ



ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (100 องศาเซลเซียสหรือมากกว่า) หรือที่อุณหภูมิต่ำกว่าในการที่ลดลงจะมีหมู่ยูรีเทนที่แน่นอนที่ทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตในปริมาณมาก เพื่อก่อตัวเป็นร่างแหอัลโลฟาเนต (Allophanate linkage) ตามสมการข้างล่างนี้ในทำนองเดียวกัน หมู่ยูรีเทนก็ทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนต เพื่อให้เกิดเป็นร่างแหไบยูเรต ดังสมการข้างล่าง

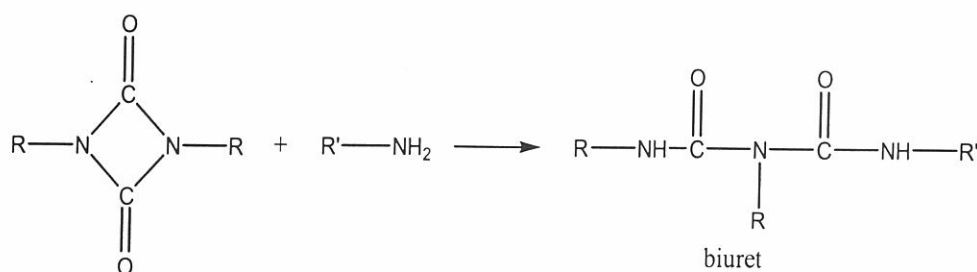


อัลโลฟานเตอาจเกิดการก่อตัวขึ้นในปฏิกิริยาของแอลกอฮอล์กับไดเมอร์ของอะโรแมติกไอโซไซยาเนตตามสมการข้างล่างนี้ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้า แต่ก็สามารถเพิ่มขึ้นเป็น 1000 เท่า ได้โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ไตรเอทิลเอมีน

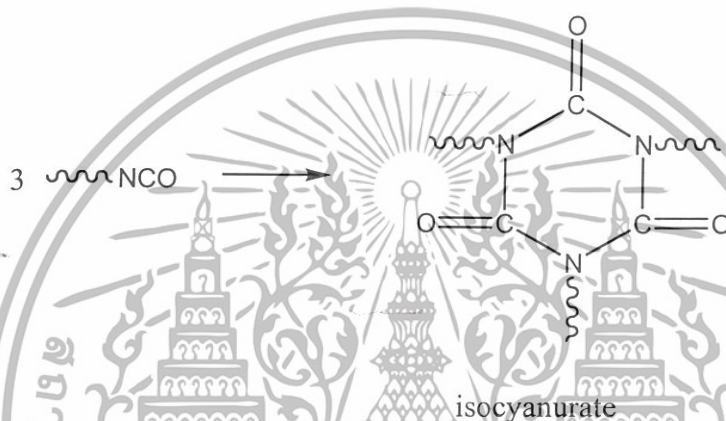


ไอโซไซยาเนตไดเมอร์ทำปฏิกิริยากับเอมีนจะให้ไบยูเรตที่สอดคล้องกัน ตามสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ปฏิกิริยาเชื่อมโองพันธะอีกปฏิกิริยาหนึ่งคือการเกิดไตรเมอร์ที่นำไปสู่การเกิดวงแหวนของไอโซไซยาเนต ดังสมการ



2.1.1.4 กระบวนการเตรียมโฟมพอลิเมอร์ โดยทั่วไปมี 3 วิธี ดังนี้

1.) การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนในขั้นตอนเดียว (One-shot process)

ทั้งพอลิอีเทอร์พอลิออลและพอลิเอสเทอร์พอลิออลสามารถเตรียมพอลิยูรีเทนได้โดยพอลิเอสเทอร์ที่ใช้ นั้นจะมีน้ำหนักโมเลกุล 2000 และของผสมทั้งหมด (พอลิเอสเทอร์พอลิออล สารไอโซไซยาเนต สารที่ทำให้เกิดฟอง ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวดัดแปลงต่างๆ) จะถูกผสมกันและผ่านในเตาปฏิกรณ์ประมาณ 2-3 นาที โฟมจะเกิดเต็มที่ เมื่อพอลิอีเทอร์พอลิออลและของผสม (พอลิอีเทอร์พอลิออล สารไอโซไซยาเนต สารที่ทำให้เกิดฟอง ตัวเร่งปฏิกิริยา และสเทบิลไลเซอร์) ผสมกันแล้ว ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นพร้อมกันและต่อเนื่องได้โฟมออกมา จากนั้นต้องนำไปอบ 10 - 24 ชั่วโมงก่อนจึงสามารถนำไปใช้งานได้

2.) กระบวนการพรีพอลิเมอร์ (Prepolymer process)

สามารถทำได้ทั้งพอลิเอสเทอร์พอลิออลและพอลิอีเทอร์กับพอลิออล แต่นิยมใช้พอลิอีเทอร์พอลิออลมากกว่า ทำได้โดยให้พอลิออลทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยาเนตที่มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกินพอก่อนจะได้พรีพอลิเมอร์ปลายโมเลกุลเป็นไฮโซไซยานเนตซึ่งเสถียรในสภาวะที่แห้งและเมื่อเติมสารที่ทำให้เกิดฟอง ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวตัดแปลงลงไปจะเกิดโฟม ออกมา

3.) ควอสิพรีพอลิเมอร์ (Quasi-prepolymer)

วิธีนี้คล้ายวิธีที่ 2 แต่ใช้ปริมาณไดไฮโซไซยานเนตมากกว่า ทำปฏิกิริยากับพอลิออลจะได้พอลิยูรีเทนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และมีไดไฮโซไซยานเนตอิสระเหลืออยู่มาก จากนั้นจะนำไปทำปฏิกิริยากับพอลิออลต่อในขั้นตอนที่ 2 พร้อมเติมสารที่ทำให้เกิดฟอง ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวตัดแปลงลงไปจะได้โฟมพอลิยูรีเทนตามต้องการ

2.2 สารช่วยหน่วงการติดไฟ

2.2.1 กระบวนการเผาไหม้ในระดับมหภาค

การพิจารณาการเผาไหม้ในระดับมหภาค (macro scale) แตกต่างกับระดับจุลภาค (micro scale) ตรงที่ระดับจุลภาคนั้นจะพิจารณาเฉพาะในส่วนของพอลิเมอร์เท่านั้น ในขณะที่ระดับมหภาคจะพิจารณาวัสดุที่รวมกับสารตัวเติม หรือสารเติมแต่งต่างๆ

การเผาไหม้ของวัสดุในหน่วยมวล เช่น 1 กรัม สามารถพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 : การให้ความร้อน (Heating) ความร้อนจากแหล่งภายนอกอาจมาจากการได้รับเปลวไฟโดยตรง (การแผ่รังสีและการพาความร้อน) หรือจากของแข็งร้อน (การนำความร้อน) อัตราของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะมีความสัมพันธ์กับอัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิที่แตกต่าง และสมบัติของวัสดุ ดังนี้

- (1) ความจุความร้อนหรือปริมาณความร้อนที่ต้องการในการทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 หน่วย วัสดุที่มีความจุความร้อนสูง อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าวัสดุที่มีความจุความร้อนต่ำ
- (2) การนำความร้อนหรืออัตราความร้อนที่ไหลผ่านวัสดุที่มีความหนาแน่นหนึ่ง ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันค่าหนึ่ง ถ้าค่าการนำความร้อนสูง หมายความว่าความร้อนถูกถ่ายโอนเข้าไปใน 1 หน่วยมวลได้เร็วกว่าในกรณีที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (3) ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว การระเหยเป็นไอ หรือการเปลี่ยนแปลงอื่นๆที่เกิดขึ้นในวัสดุในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน

ขั้นที่ 2 : การสลายตัว (Decomposition) วัสดุเมื่อได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิการสลายตัวและเริ่มการเปลี่ยนแปลงไปเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ (หรือมากกว่า) ดังต่อไปนี้

- (1) ก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้หรือก๊าซซึ่งสามารถเผาไหม้ในอากาศได้ กลุ่มนี้จะรวมถึงมีเทน อีเทน เอทิลีน ฟอรั่มัลดีไฮด์ อะซิโตน และคาร์บอนมอนอกไซด์
- (2) ก๊าซที่ไม่เกิดการสันดาปหรือก๊าซซึ่งไม่สามารถเผาไหม้ในอากาศได้ ในกลุ่มนี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนคลอไรด์ ไฮโดรเจนโบรไมด์ และไอน้ำ
- (3) ของเหลว โดยทั่วไปเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถสลายตัวได้บางส่วน และสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลสูง
- (4) ของแข็ง โดยทั่วไปเป็นถ่าน และขี้เถ้า เป็นต้น
- (5) อุณหภูมิของแข็งหรือเศษพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับควัน

ขั้นที่ 3 : การจุดติดไฟ (Ignition) ก๊าซที่เผาไหม้ได้ จะสามารถเกิดการจุดติดไฟในอากาศได้ เมื่อมีปริมาณออกซิเจนหรือสารออกซิไดซ์เพียงพอต่อการเผาไหม้ โดยการจุดติดไฟขึ้นอยู่กับแหล่งภายนอกของการจุดติดไฟ เช่น เปลวไฟหรือการจุดประกายไฟ และอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 อุณหภูมิในการจุดติดไฟของพอลิเมอร์ (Ignition temperatures of various polymers) [3]

ชนิดของพอลิเมอร์	อุณหภูมิของจุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิที่ติดไฟได้ด้วย ตัวเอง (องศาเซลเซียส)
พอลิเอทิลีน	341 – 357	349
พอลิไวนิลคลอไรด์	391	454
พอลิไวนิลคลอไรด์เอซิเตด	320 – 340	435 – 557
พอลิไวนิลดีนคลอไรด์	532	532
พอลิสไตรีน	345 – 360	488 – 496
พอลิสไตรีนอะคริไลไนไตร	366	454
พอลิสไตรีนเมทิลเมทาคริเลท	329	485
พอลิเมทิลเมทาคริเลท	280 – 300	450 – 462
พอลิคาร์บอนเนต	375 – 467	477 – 580
ไนลอน	421	424
พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน	141	530
เซลลูโลสไนเตรต	305	141
เซลลูโลสไตรเอซิเตด (เส้นใย)	291	540
เอทิลเซลลูโลส	310	296
พอลิยูรีเทน	520 – 540	416
ฟีนอล	475 – 500	571 – 580

ผลของขั้นตอนการจุดติดไฟที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ เป็นดังนี้

- (1) ก๊าซที่อยู่รอบวัสดุสามารถจุดติดไฟได้ โดยการจุดประกายไฟหรือใช้

เปลวไฟ (Flame ignition temperature)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (2) อุณหภูมิที่สามารถติดไฟได้ด้วยตัวเอง (Self-ignition temperature) หรืออุณหภูมิซึ่งปฏิกิริยาภายในวัสดุที่ทำให้เกิดการจุดติดไฟ โดยทั่วไปอุณหภูมินี้จะสูงกว่าอุณหภูมิการจุดติดไฟโดยใช้เปลวไฟ เพราะต้องการพลังงานมากกว่า
- (3) ระดับต่ำสุดของออกซิเจนที่ต้องการในการจุดประกายไฟและการเผาไหม้ (Limiting oxygen concentration) โดยทั่วไปวัสดุจะสามารถดับไฟได้เอง (Self-extinguishing) ถ้าไม่สามารถเผาไหม้ต่อไปได้กับออกซิเจนที่น้อยกว่า 21% และไม่เกิดการจุดประกายไฟ (Non-igniting)

ขั้นที่ 4 : การเผาไหม้ (Combustion) คือการเผาไหม้ของมวล 1 หน่วยที่ทำให้เกิดปริมาณความร้อนในการเผาไหม้ ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จะทำให้อุณหภูมิจึงผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิของก๊าซจากการเผาไหม้ และก๊าซที่ไม่เกิดการเผาไหม้สูงขึ้น ซึ่งจะมีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการพาความร้อน การแผ่ความร้อน และการนำความร้อน

ขั้นที่ 5 : การลุกลามของเปลวไฟ (Propagation) คือความร้อนสุทธิของการเผาไหม้ของมวล 1 หน่วย ซึ่งจะมีค่าลดลงโดยความร้อนที่สูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อม และจะเพิ่มขึ้นโดยได้รับความร้อนจากแหล่งภายนอก เช่น เปลวไฟ ซึ่งต้องเพียงพอในการทำให้มวล 1 หน่วยที่อยู่ในขั้นตอนการเผาไหม้เข้าสู่ขั้นลุกลามได้

2.2.2 ขั้นตอนของการเผาไหม้

ผลจากการลุกลามเป็นไฟของวัสดุเกิดขึ้นหลายขั้นตอน ซึ่งตามความเป็นจริงจะมีแนวโน้มคาบเกี่ยวกันในทางปฏิบัติ ดังนี้

- (1) การอ่อนตัวของวัสดุซึ่งนำไปสู่การย้อยตัวลง (Sagging)
- (2) การออกซิเดชันของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับการออกซิเดชันในชั้นบรรยากาศ โดยจะเกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน โดยเข้าทำปฏิกิริยาที่พันธะ C-H และต่อจากนั้นเป็นพันธะ C-C
- (3) การเสียสภาพทางเคมีจะได้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ
- (4) พอลิเมอร์ที่เสียสภาพจะเกิดการระเหยของสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลต่ำ

- (5) การจุดติดไฟของก๊าซผสมระหว่างสารอินทรีย์กับออกซิเจนในอากาศ จัดเป็นปฏิกิริยาประเภทคายความร้อน
- (6) การเร่งปฏิกิริยาของทั้ง 5 ขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นนี้ขึ้นอยู่กับ การสันดาปทาง ความร้อนประเภทความร้อน
- (7) การลุกท่วมของเปลวไฟ (Flashover) โดยมักจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในวิภาคไอมาถึงระดับวิกฤติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ใกล้เพดานที่มีก๊าซร้อนรวมตัวกันอยู่ จะทำให้ของผสมของสารอินทรีย์ ทั้งหมดกับออกซิเจนในบรรยากาศ ทำให้เกิดการติดไฟขึ้นทันที ทำให้เกิดมวลของเปลวไฟขึ้นในบริเวณเพดาน สิ่งนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้คนที่ติดอยู่ในเปลวเพลิงหรือแม้แต่ดับเพลิงไม่สามารถหนีออกจากเปลวเพลิงได้

2.2.3 ประเภทของสารช่วยหน่วงการติดไฟ

2.2.3.1 สารอินทรีย์

1.) อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์

จัดว่าเป็นสารที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง มีคุณสมบัติช่วยหน่วงการติดไฟที่ดีและยับยั้งควันที่จะเกิดขึ้นโดยในเปลวไฟจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) แบบดูดความร้อน ซึ่งจะดำเนินปฏิกิริยาไปพร้อมๆกัน คือ จะดูดซับพลังงานความร้อนและให้น้ำออกมา โดยจะไปเจือจางก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้และโอที่เป็นพิษ โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้กับพอลิเอสเตอร์ที่ไม่อิมตัวในอุตสาหกรรมก่อสร้างและในวัสดุหุ้มสายเคเบิล

2.) อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์

สารนี้จะเริ่มแตกตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 180 องศาเซลเซียสในปฏิกิริยาดูดความร้อน มีผลให้เกิดการลดลงของอัตราความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ในขณะที่เกิดการลุกติดไฟ รวมทั้งมีการแผ่กระจายเปลวไฟที่ผิว และเป็นตัวยับยั้งควันที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) แอนติโมนีออกไซด์

เป็นสารที่มีสีขาว มีราคาแพง และไม่ได้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ร่วมกับสารอินทรีย์ประเภทโบรมีนหรือสารอินทรีย์ประเภทคลอรีนจึงจะเกิดประสิทธิภาพ เมื่อเกิดเพลิงไหม้ขึ้นจะระเบิดเป็นควันสีขาวรวมกับควันที่เกิดจากแอสโลเจน จึงไม่เหมาะที่จะใช้ในกรณีที่ต้องการคุณสมบัติความโปร่งแสง

4.) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

มีความสามารถในการหน่วงการติดไฟและยับยั้งการเกิดควัน มีความเสถียรที่อุณหภูมิ 332 องศาเซลเซียส จึงสามารถใช้ได้กับเทอร์โมพลาสติกต่างๆ ซึ่งอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ไม่เสถียร อัตราการเกิดควันจะต่ำกว่าสารประกอบประเภทที่มีฮาโลเจน นิยมใช้ประโยชน์ในงานปลอกหุ้มสายไฟ พอลิโพรพิลีน พอลิเอไมด์ โดยอาจมีการใช้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แทนสารประกอบจำพวกอะลูมิเนียม ถ้าหากสารประกอบจำพวกอะลูมิเนียมมีราคาสูงขึ้น

5.) ฟอสฟอรัส

สารนี้ค่อนข้างมีราคาแพง สามารถใช้ได้เฉพาะในพอลิเมอร์ ซึ่งช่วยลดการติดไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่เกิดควันหรือก๊าซที่มีพิษขึ้น โดยจะทำหน้าที่เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟในวัฏภาคควบแน่น (Condensed phase) โดยที่ฟอสฟอรัสและสารประกอบของฟอสฟอรัสจะเพิ่มปริมาณของสิ่งที่เหลือในองค์ประกอบของคาร์บอนหรือถ่าน โดยอาศัยกลไก 1 หรือ 2 กลไกดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวในปฏิกิริยาได้คาร์บอนมากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ หรือคาร์บอนมอนอกไซด์
2. ชั้นผิวของถ่านจะยับยั้งออกซิเจนที่เข้ามา และป้องกันการเกิดก๊าซของคาร์บอนโดยไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

ผลของฟอสฟอรัสในปฏิกิริยาเคมีที่มีผลต่อการสลายตัว อาจเกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันบางส่วน ตามด้วยปฏิกิริยาการกำจัดน้ำออกจากโมเลกุล โดยฟอสฟอรัสบนพื้นผิวของถ่านจะมีลักษณะอยู่ในรูปออกไซด์ของฟอสฟอรัสที่ไม่ระเหย

การกระทำของสารประกอบฟอสฟอรัสที่พบ มีผลดังนี้

1. มีผลในวัฏภาคควบแน่น
2. รบกวนปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนหลักแหล่งหนึ่งในการเผาไหม้

ของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. รบวงวนปฏิกิริยาการเกิดก๊าซที่เป็นที่เป็นต้นเหตุของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและการลุกลามของเปลวไฟ

2.2.3.2 สารประกอบแฮโลเจน

1.) โบรมีน

สารอินทรีย์ประเภทโบรมีน จัดเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟที่มีประสิทธิภาพมาก และมีราคาแพง ซึ่งพันธะของ C-Br จะไม่เสถียรมากนัก โดยเฉพาะในสารประกอบอะลิฟาติก (Aliphatic) ดังนั้นจึงใช้ปกติในเบนซีน ในเวลาที่เกิดเพลิงไหม้จะทำให้เกิดควันและก๊าซที่มีพิษ จึงได้มีการจำกัดการนำผลิตภัณฑ์บางชนิดไปใช้ประโยชน์ สารอินทรีย์ประเภทโบรมีน ทำหน้าที่เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟในวัฏภาคก๊าซ (Gas phase) โดยมีกลไก 2 กลไก คือ การเปลี่ยนแปลงหรือการสิ้นสุดของปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ และการก่อรูปเป็นก๊าซโบรมีนหนัก ซึ่งทำหน้าที่ปกป้องวัฏภาคควบแน่น ด้วยการยับยั้งออกซิเจนที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเคมีที่อาจเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาแฮโลเจนชัน ตามด้วยปฏิกิริยาดีไฮโดรแฮโลเจนชัน เพื่อให้ได้กากที่เหลือเป็นพอลิเมอร์ที่มีพันธะคู่มาก ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอน การทำหน้าที่ของสารประกอบของโบรมีนจะมีผลในขั้นที่ 3 (การจุดติดไฟ) โดยจะกั้นออกซิเจนและความร้อนที่เข้าและมีผลในขั้นที่ 4 (การเผาไหม้) โดยมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยการปล่อยสารประกอบโบรมีนในวัฏภาคก๊าซ ซึ่งจะหน่วงการติดไฟที่เกิดขึ้น

สารประกอบโบรมีน อะลิฟาติก และอะลิไซคลิก จะมีประสิทธิภาพมากกว่า สารประกอบอะโรมาติกโบรมีน ในการหน่วงการติดไฟของโพลีสไตรีน โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ เป็นผลมาจากพลังงานพันธะของอะโรมาติกโบรมีนมีค่าสูงกว่า จึงทำหน้าที่เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า

2.) คลอรีน

สารอินทรีย์ประเภทคลอรีน จัดเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ แม้จะมีประสิทธิภาพไม่เท่ากับสารอินทรีย์ประเภทโบรมีนก็ตาม แต่ในทางตรงกันข้ามกลับสามารถช่วยลดค่าใช้จ่าย และพันธะของ C-Cl ค่อนข้างจะมีความเสถียรมากกว่า จึงนิยมใช้ในพอลิเมอร์ ในเวลาที่เกิดเพลิงไหม้ สารนี้จะทำให้เกิดควันและก๊าซที่มีพิษ จึงเป็นขีดจำกัดในการนำผลิตภัณฑ์บางชนิดไปใช้ประโยชน์ สารอินทรีย์ประเภทคลอรีนจะทำหน้าที่เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและวิจัยและพัฒนา โดยในวัฏภาคก๊าซจะใช้กลไกของเคมีของคาร์บอน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงหรือการสูญเสียของปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ และกลไกทางกายภาพของการเกิดก๊าซคลอรีนหนักในการปกป้องวัสดุภาคควบแน่น โดยการยับยั้งออกซิเจนและความร้อนที่เข้ามาทำปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเคมีอาจเกิดปฏิกิริยาแฮไลจิเนชัน ตามด้วยปฏิกิริยาดีไฮโดรแฮไลจิเนชันเพื่อให้ได้กากที่เหลือเป็นพอลิเมอร์ที่มีพันธะคู่มาก ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนสารประกอบประเภทคลอรีนจะมีลักษณะการทำงานเหมือนสารประกอบประเภทโบรมีนคือ เกิดในขั้นที่ 3 (การจุดติดไฟ) และขั้นที่ 4 (การเผาไหม้) โดยมีอิทธิพลต่อการสลายตัว ส่วนอะลิฟาติกคลอรีนจะมีประสิทธิภาพมากกว่าอะโรมาติกคลอรีนทั้งในพอลิเอสเทอร์และพอลิยูรีเทน

2.2.3.3 ซิงค์ บอเรต (Zinc borate)

มีความเสถียรทางอุณหภูมิถึง 290 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับเรซินพอลิเอสเทอร์ประเภทที่มีสารประกอบแฮไลเจน เป็นส่วนประกอบที่ทึบแสง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการติดไฟโดยยังคงลักษณะความใส

2.2.3.4 เคมีพื้นผิว (Surface chemistry)

เคมีพื้นผิวเป็นการใช้สารเติมแต่งเคลือบที่ผิวของพอลิเมอร์ เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนและปกคลุมพื้นผิวไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาในกระบวนการเผาไหม้ รวมทั้งช่วยยับยั้งควัน และเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ด้วย สารเติมแต่งที่นิยมใช้ได้แก่ ไสเลน (Silane) ไททานेट (Titanate) สเตียเรต (Stearate) ซิงค์สแตนเนต (Zinc stannate) ซิงค์ไฮดรอกซี (Zinc hydroxy) ซิงค์บอเรต (Zinc borate) แคลเซียมอะลูมิเนต (Calcium aluminat) และแคลเซียมหรือแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Calcium/Magnesium carbonate)

2.2.3.5 เมลามีน (Melamine)

เมลามีนไซยาไรด์ (Melamine cyanurate) ส่วนมากจะใช้ในโฟม พอลิยูรีเทน เนื่องด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 3 องค์ประกอบของกระบวนการเผาไหม้ คือ ความร้อน เชื้อเพลิง และออกซิเจน สารช่วยหน่วงการติดไฟส่วนใหญ่จะทำการขัดขวางองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่ง แต่เมลามีนไซยาไรด์จะทำการขัดขวางทั้ง 3 องค์ประกอบ โดยในขั้นแรกจะทำการดูดความร้อนและแตกตัวออกเป็นไอเมลามีน และการเผาไหม้จะทำให้เกิดก๊าซเฉื่อยไนโตรเจน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเจือจางในวัฏภาคก๊าซและสุดท้ายจะเกิดชั้นคาร์บอนขึ้น ซึ่งจะเป็นตัวป้องกันพอลิเมอร์จากการแพร่กระจายของ

เปลวไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.6 แกรไฟต์แบบขยายตัวได้ (Expandable graphite)

การที่แกรไฟต์ขยายตัวมากกว่า 100 เท่าของความหนาเดิม ทำให้ชั้นของแกรไฟต์กลายเป็นฉนวนในลักษณะเดียวกับอินทนูเมสเซนท์ ผลึกแกรไฟต์จะประกอบด้วยชั้นของระนาบอะตอมคาร์บอน และเนื่องจากไม่มีพันธะโควาเลนต์ระหว่างระนาบ ทำให้โมเลกุลอื่นสามารถแทรกอยู่ระหว่างระนาบได้ เมื่อแกรไฟต์ที่มีโมเลกุลอื่นแทรกอยู่ (ปกติในทางการค้าจะใช้กรดซัลฟูริกหรือกรดไนตริก) สัมผัสกับความร้อนหรือเปลวไฟ โมเลกุลที่แทรกตัวอยู่จะแตกตัวให้ก๊าซออกมา ชั้นแกรไฟต์ก็จะถูกดันห่างจากก๊าซและจากการขยายตัวของแกรไฟต์เอง แกรไฟต์ที่ขยายตัวนี้จะมีความหนาแน่นต่ำ ไม่ติดไฟ และเป็นฉนวนกันความร้อน

แกรไฟต์ประเภทนี้สามารถนำไปใช้กับเรซินเทอร์โมพลาสติกและเรซินเทอร์โมเซตติง ซึ่งจะช่วยให้คุณสมบัติช่วยหน่วงการติดไฟที่ดีด้วยปริมาณการใช้ไม่มาก ส่วนใหญ่จะใช้กับพอลิเมอร์ประเภทโพลีเอทิลีน โดยเฉพาะโพลีเอทิลีน ส่วนข้อจำกัดในการใช้ คือ มีสีดำ และสามารถนำไฟฟ้าได้

2.2.3.7 สารประกอบซิลิโคน

สารประเภทนี้จะผลิตชั้นเคลือบป้องกันผิวระหว่างเกิดการเผาไหม้ ทำให้ความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาลดลง ชั้นเคลือบจะทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันพลังงานที่จะย้อนกลับมาสู่พอลิเมอร์ ปริมาณเพียงเล็กน้อยของซิลิโคนในพอลิเมอร์อินทรีย์สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพดัชนีออกซิเจน (Oxygen index) และทดสอบการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 ของพอลิเมอร์ได้ จากการศึกษาพอลิเอทิลีนที่ถูกปรับปรุงโดยใช้ซิลิโคนจะพบการลดลงอย่างเห็นได้ชัดของอัตราความร้อนที่ปล่อยออกมา

2.2.3.8 ไนโตรเจน

พอลิเมอร์บางชนิดพบว่า ไนโตรเจนมีผลในการช่วยหน่วงการติดไฟ แต่ผลที่ได้ยังไม่ชัดเจน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.2.3.9 น้ำ

น้ำจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรต จัดเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟที่ดี นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นสารที่มีราคาถูก เมื่อพอลิเมอร์เข้าใกล้ความร้อนของเปลวไฟ น้ำจะระเหยกกลายเป็นไอน้ำ ทำให้วัสดุเย็นตัวลง ซึ่งจะทำให้กระบวนการเผาไหม้ช้าลง โดยไอน้ำที่เกิดขึ้นจะปกคลุมผิวของผลิตภัณฑ์ไม่ให้รวมกับออกซิเจนในบรรยากาศ จึงทำให้ไม่ล้าสักเปลวไฟ ข้อจำกัดของสารนี้ที่สำคัญ คือ

คุณสมบัติของการสลายตัวค่อนข้างต่ำ โดยพอลิเมอร์ที่สามารถแปรรูปได้ที่อุณหภูมิสูง เช่น อีพอกซีเรซิน หรือโพลีเอทิลีน จะไม่เหมาะที่จะใช้ เพราะเมื่อถูกไฟไหม้จะเกิดควันดำจำนวนมาก ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพได้ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตด้วย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิโอเลฟิน ยาง พลาสติกซอล อะคริลิคหล่อ อีพอกซี พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว พอลิยูรีเทน และลาเทกซ์ เป็นต้น การใช้อะลูมิเนียมไตรไฮดรเตดจะมีประโยชน์อย่างมาก แต่พอลิเมอร์ที่ต้องการคุณสมบัติแปรรูปที่สูงขึ้น โดยเฉพาะวัสดุที่ใช้ในทางวิศวกรรมจะเกิดการสูญเสียจากการไฮเดรชันในระหว่างกระบวนการ จึงทำให้สูญเสียการหน่วงการติดไฟ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการพัฒนาสารที่มีน้ำจากการไฮเดรชันที่ค่อนข้างเสถียร

2.2.3.10 เบนซีนในสายโซ่หลัก

พอลิเมอร์ที่ใช้ในทางวิศวกรรมที่มีเบนซีนอยู่ในสายโซ่หลัก โดยทั่วไปจะมีดัชนีออกซิเจนที่ค่อนข้างสูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างหลักเป็นอะลิฟาติก ทั้งนี้เนื่องจากเสถียรภาพจากการเรโซแนนซ์ของเบนซีน ทำให้พันธะแตกออกด้วยความร้อนเกิดเป็นก๊าซซึ่งส่งผลให้การสันดาปเกิดช้าลง

2.2.3.11 สารเติมแต่งแบบใช้ร่วม

การใช้ร่วม (Synergy) หมายถึง การรวมส่วนประกอบ 2 ชนิดหรือมากกว่า 2 ชนิด แล้วได้ผลรวมที่มากกว่าผลรวมที่คำนวณได้ วิธีนี้มีประโยชน์ คือ สารเติมแต่งหรือสารช่วยหน่วงการติดไฟแต่ละชนิดอาจมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกันหรือแตกต่างกัน ในการขัดขวางองค์ประกอบที่สนับสนุนกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งได้แก่ ความร้อน เชื้อเพลิง และออกซิเจน เมื่อทำการรวมสารเติมแต่งหรือสารช่วยหน่วงการติดไฟแต่ละชนิดเข้าด้วยกัน จะทำให้กระบวนการเผาไหม้เป็นไปได้ยากลำบากยิ่งขึ้น สารช่วยหน่วงการติดไฟบางชนิดอาจทำการขัดขวางกระบวนการเผาไหม้โดยการปล่อยน้ำออกมาเพื่อลดอุณหภูมิของแหล่งความร้อน หรือปล่อยก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซไนโตรเจนออกมาเพื่อทำให้บริเวณนั้นขาดออกซิเจน หรือโดยการเกิดอุณหภูมิความร้อนบนวัสดุพอลิเมอร์ หรือสารบางชนิดอาจทำหน้าที่หลากหลายในการขัดขวางกระบวนการเผาไหม้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อมีการนำสาร 2 ชนิดหรือมากกว่า 2 ชนิดมาทำการรวมกัน ก็จะทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดียิ่งขึ้น และในบางครั้งอาจทำการรวมกันเพื่อลดปริมาณของสารบางชนิดที่มีราคาแพงหรือมีอันตรายมากก็ได้

มีการร่วมกันของสารช่วยหน่วงการติดไฟที่มีส่วนประกอบของแฮโลเจนกับแอนติโมนีออกไซด์เพื่อใช้กับพลาสติกมาเป็นเวลานานแล้ว ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่ดีมากในการใช้กับพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ส่วนในระบบอื่นๆ นั้น ผลของการใช้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 สารประกอบแฮโลเจนที่มีประสิทธิภาพที่ใช้ร่วมกับแอนติโมนีออกไซด์ [4]

ชนิดของสารช่วยหน่วงการติดไฟ	ชนิดของพอลิเมอร์	การประยุกต์ใช้งานและข้อจำกัด
โซลิดคลอริเนตพาราฟิน (Solid chlorinated paraffins)	พอลิโอเลฟินส์, อีพอกซี, พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว	ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นต่ำแบบเป่า
ดีคาโบรโมไดฟีนอลออกไซด์ (Decabromodiphenyl oxide)	พอลิโอเลฟินส์, พอลิสไตรีน, พอลิอะคริโลไนไตร- บิวตะไดอิน-สไตรีน, อีพอกซี พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว	เป็นสารเติมแต่งทั่วไป มีส่วนประกอบของโบรมีน อยู่มาก
ออกทาโบรโมไดฟีนอลออกไซด์ (Octabromodiphenyl oxide)	พอลิอะคริโลไนไตร-บิวตะได อิน-สไตรีน, พอลิสไตรีน	-
เฮกซะโบรโมไซโคลเดเคน (Hexabromocyclodecane)	พอลิสไตรีน	-
บิส-ไตรโบรโมฟีนอกซีอีเทน (Bis-tribromophenoxyethane)	พอลิอะคริโลไนไตร- บิวตะไดอิน-สไตรีน, พอลิสไตรีน	-
เตตระโบรโม บิส-ฟีนอล เอ (Tetrabromo bis-phenol A)	พอลิอะคริโลไนไตร- บิวตะไดอิน-สไตรีน	-
เอทิลีน บิส-เตตระโบรโมพาทาลาไมด์ (Ethylene bis- tetrabromophthalamide)	พอลิโอเลฟินส์	คุณสมบัติของกระบวนการ ค่อนข้างสูง และมีความ เสถียรต่อรังสียูวีที่ดี
บิส 2,3-ไดโบรโมโพรพิลอีเทอร์ ของเตตระโบรโม บิส-ฟีนอล เอ (Bis 2,3-dibromopropyl ether of tetrabromo bis-phenol A)	พอลิโอเลฟินส์	ผสมได้ขณะหลอมเหลว เพื่อให้มีสมบัติทาง กายภาพที่ดี
สารประกอบอะลิไซคลิกคลอรีน (Alicyclic chlorine compound)	อีพอกซี	-
เพนตะโบรโมไดฟีนิล (Pentabromodiphenyl)	อีพอกซีออกไซด์, พอลิเอสเทอร์	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดว่องไวต่อปฏิกิริยา

2.2.4.1 อีพอกซีเรซิน

ประกอบด้วยเตตระโบรโม บิส-ฟีนอล เอ (Tetrabromo bis-phenol A) ใช้กับอีพอกซี เรซินและคลอเรนดิก แอนไฮไดรด์ (Chlorendic anhydride) นิยมใช้เป็นสารช่วยในการบ่มตัว

2.2.4.2 พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิมตัว

ประกอบด้วยเตตระคลอโรและเตตระโบรโม พทาลิก แอนไฮไดรด์ (Tetrachloro and Tetrabromo phthalic anhydride) และคลอเรนดิก แอนไฮไดรด์ (Chlorendic anhydride) ใช้แทนพทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) ที่ใช้ในการผลิตพอลิเอสเทอร์ และใช้เตตระโบรโม บิส-ฟีนอล เอ (Tetrabromo bis-phenol A) แทนโพรพิลีนไกลคอลในการผลิตพอลิเอสเทอร์

2.2.4.3 โฟมพอลิยูรีเทน

ส่วนมากจะใช้เป็นโฟมชนิดแข็ง ซึ่งประกอบด้วยฟอสฟอรัสที่มี พอลิออกอลอยู่

2.2.4.4 พอลิคาร์บอเนต

ส่วนมากจะใช้เตตระโบรโม บิส-ฟีนอล เอ (Tetrabromo bis-phenol A) แทนบิส-ฟีนอล เอ (Bis-phenol A) นิยมใช้ในเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิเอสเทอร์ซึ่งมีสารช่วยหน่วงการติดไฟอยู่ในโคพอลิเมอร์อะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน

ในการเลือกใช้นชนิดของสารช่วยหน่วงการติดไฟจำเป็นที่จะต้องทราบสมบัติของสารช่วยหน่วงการติดไฟดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สมบัติของสารที่สามารถใช้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟได้ [3]

ชนิดของสารช่วยหน่วงการติดไฟ	สูตรทางเคมี	น้ำหนักโมเลกุล	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)
ฟอสฟอรัสไตรออกไซด์	P_2O_3	109.95	23.8	173.8
ฟอสฟอรัสเตตระออกไซด์	P_2O_4	125.95	>100	-
ฟอสฟอรัสเพนทอออกไซด์	P_2O_5	141.94	580 – 585	300 (S)
ฟอสฟอรัสไตรฟลูออไรด์	PF_3	87.87	-151.5	-101.5
ฟอสฟอรัสเพนตะฟลูออไรด์	PF_5	125.97	-83	-75
ฟอสฟอรัสไตรคลอไรด์	PCl_3	137.33	-112	75.5
ฟอสฟอรัสเพนตะคลอไรด์	PCl_5	208.24	23.8	173.8
ฟอสฟอรัสไตรโบรไมด์	PBr_3	270.70	>100	-
ฟอสฟอรัสเพนตะโบรไมด์	PBr_5	430.52	580	300 (S)
ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์	$POCl_3$	153.33	-585	-101.5
ฟอสฟอรัสออกซีโบรไมด์	$POBr_3$	286.70	-151.5	-75
ไฮโดรเจนฟลูออไรด์	HF	20.01	-83	75.5
ไฮโดรเจนคลอไรด์	HCl	36.46	-112	162 (S)
ไฮโดรเจนโบรไมด์	HBr	80.92	-	172.9
ไฮโดรเจนไอโอไดด์	HI	127.91	-40	-
แอนติโมนีไตรออกไซด์	Sb_2O_3	291.50	-	105.3
แอนติโมนีไตรฟลูออไรด์	SbF_3	178.75	2	189.5
แอนติโมนีเพนตะฟลูออไรด์	SbF_5	216.74	56	19.54
แอนติโมนีไตรคลอไรด์	$SbCl_3$	228.11	-83.1	-84.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การเลือกสารช่วยหน่วงการติดไฟ

การเลือกสารช่วยหน่วงการติดไฟนั้น มีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงดังนี้

1. ประสิทธิภาพและราคา
2. การทำให้เป็นสารประกอบ
3. เสถียรภาพทางความร้อน
4. ความสามารถในการกัดกร่อน
5. สมบัติทางกายภาพและลักษณะที่ปรากฏ
6. ความถาวรและความสามารถในการเข้ากันได้กับวัสดุที่ใช้
7. ความเป็นพิษและความปลอดภัยทางสิ่งแวดล้อม
8. เสถียรภาพต่อแสง
9. สมบัติทางไฟฟ้า

2.2.6 กลไกของสารช่วยหน่วงการติดไฟ

2.2.6.1 การยับยั้งหรือการกำจัดอนุมูลอิสระ

ปฏิกิริยาของสายโซ่อนุมูลหลักในวัฏภาคที่เป็นไอ โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับกันว่าการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาของสายโซ่อนุมูลหลัก สารอินทรีย์ประเภท แอลกอฮอล์บางที่อาจเกิดอนุมูลของโบรมีนและคลอรีน ซึ่งสามารถแทรกแซงสายโซ่ที่เกิดการออกซิเดชัน บางคนเชื่อว่าสารอินทรีย์ประเภทฟอสฟอรัสอาจเกิดในลักษณะนี้เช่นกัน

2.2.6.2 การปกคลุมที่ไม่รวมกับออกซิเจน

สารช่วยหน่วงการติดไฟอาจทำให้เกิดก๊าซ ซึ่งจะปกคลุมพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งเป็นการทำให้วัสดุนั้นไม่สัมผัสกับออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศและป้องกันการเผาไหม้ ก๊าซประเภทนี้ ได้แก่ โบรมีน คลอรีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ แอนติโมนีออกไซด์ ออกซิเจนไฮไดรด์ และไอน้ำ เป็นต้น

2.2.6.3 การเคลือบผิว

การเผาไหม้ของสารอินทรีย์ประเภทฟอสฟอรัสทำให้เกิดฟอสฟอรัสออกไซด์ ซึ่งมีลักษณะเป็นแก้วหลอม เมื่อแข็งตัวแล้วจะทำให้เกิดการเคลือบของสารอินทรีย์บนวัสดุ จัดเป็นสารที่ไม่เกิดการติดไฟ และช่วยแยกออกซิเจนในบรรยากาศออกไป

2.2.6.4 การเกิดถ่าน

กระบวนการเผาไหม้บางชนิดจะเปลี่ยนพอลิเมอร์ประเภทสารอินทรีย์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวางนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เป็นถ่านคาร์บอนที่มีโพลีเมอร์ อยู่ โดยจะแยกออกซิเจนในบรรยากาศออก และทำหน้าที่เป็นฉนวนเก็บความร้อนของเปลวไฟไม่ให้ออกจากวัสดุ และป้องกันการแตกสลายของวัสดุไปเป็นไอของสารอินทรีย์ที่เกิดจากการสันดาปของไฮโดรคาร์บอน นักทฤษฎีหลายคนเชื่อว่าประสิทธิภาพของของสารช่วยหน่วงการติดไฟขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งเสริมการเกิดถ่าน (Char-formation) ยกตัวอย่างเช่น ฟอสฟอรัสออกไซด์ ซึ่งจะดึงน้ำออกจากโมเลกุลของสารอินทรีย์ ทำให้เหลือเพียงคาร์บอนเท่านั้น

2.2.6.5 การดูดความร้อน

ถ้าสารช่วยหน่วงการติดไฟได้จากการเปลี่ยนแปลงประเภทดูดความร้อน จะทำให้วัสดุเย็นตัวลงต่ำกว่าอุณหภูมิของการสลายตัว จึงช่วยป้องกันการเผาไหม้ โดยการระเหยกลายเป็นไอ เช่น อะลูมิเนียมไตรไฮไดรด์

2.2.6.6 การไหลเป็นหยดจากการเผาไหม้

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า สารตัวอย่างในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ จะเกิดการหลอมเหลวและไหลเป็นหยด โดยมีเปลวไฟติดอยู่ด้วย แล้วสารนั้น จะเกิดการเย็นตัวลงโดยไม่เกิดการเผาไหม้ต่อไป เรียกพฤติกรรมแบบนี้ว่า " การดับไฟด้วยตนเอง " (Self-extinguishing behavior)

2.2.7 วิธีการทดสอบ (ในห้องทดลอง)

มีวิธีการทดสอบหลายวิธีในการเปรียบเทียบความสามารถในการติดไฟ และประเมินความเสี่ยงภัย แต่ที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการมีเพียง 2 - 3 วิธี โดยเริ่มจากการทดสอบขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ตามลำดับ

2.2.7.1 แท่งวัสดุในแนวนอน (Horizontal bar)

แท่งวัสดุถูกวางอยู่ในแนวราบ โดยปลายด้านหนึ่งถูกยึดไว้ ถ้าวัสดุเกิดการโค้งงอ อาจมีการช่วยพยุงขึ้นงานด้วยตะแกรง และมีตะเกียงบนเสนาวางอยู่ได้ ปลายอีกด้านหนึ่ง เมื่อทำการเผาไหม้แล้ววัสดุไม่ติดไฟ เรียกว่า " ไม่เกิดการเผาไหม้ " (Non-burning) แต่ถ้าวัสดุเกิดการติดไฟ จะต้องวัดอัตราการเกิดเปลวไฟในหน่วยเซนติเมตรต่อนาที และรายงานผลเป็น " อัตราการเผาไหม้ " (Rate of burning) ถ้าติดไฟเพียงครึ่งทางแล้วหยุดให้รายงานเป็น " สามารถดับไฟได้ด้วยตนเอง " (Self-extinguishing) และรายงานระยะที่ถูกเผาไหม้เป็นเซนติเมตร โดยวิธีนี้จัดเป็นวิธีที่ง่าย

และมีประโยชน์อย่างมากในการวิจัยขั้นพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7.2 ดัชนีออกซิเจนหรือการทดสอบโดยอาศัยเทียนไข (Oxygen index or Candle test)

แท่งวัสดุยาวจะถูกรวบรวมเข้าไปในหลอดแก้วที่อยู่ตามแนวตั้งและตรึงไว้ที่ฐาน ผสมก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ถูกรวบรวม และป้อนเข้าไปที่ฐานของหลอดทดสอบอย่างต่อเนื่องและออกทางรูเปิดด้านบน นำเปลวไฟจ่อลงตรงส่วนบนสุดของตัวอย่างเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ เหมือนการจุดติดเทียนไข ถ้าไม่เกิดการลุกไหม้เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเกิดการลุกไหม้ขึ้น เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนจะลดลงจนกระทั่งหยุด ส่วนเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนวิกฤต (Critical percent oxygen) ซึ่งเป็นเส้นแบ่งกันสำหรับการลุกไหม้พอลิเมอร์จะถูกรายงานเป็นดัชนีออกซิเจน วิธีนี้จัดเป็นวิธีทางห้องปฏิบัติการขนาดเล็กที่นิยมใช้กันมากที่สุด ถ้าต้องการทดสอบปฏิกิริยาให้มีความรุนแรงมากขึ้นอาจทำกลับกัน โดยการติดตั้งเทียนไขตามชนิดและจุดเทียนไขตรงส่วนล่างสุด วิธีนี้จะทำให้เปลวไฟลุกลามล้อมรอบตัวอย่าง โดยจะเริ่มให้ความร้อนแก่ตัวอย่างก่อนแล้วจึงเริ่มเผาไหม้ไปตามด้านข้างทั้งหมด

2.2.7.3 แผงการแผ่รังสี (Radiant panel)

ผู้เชี่ยวชาญพิเศษหลายคนเชื่อว่า การลุกไหม้จะแผ่รังสีความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมก่อน แล้วจึงเกิดการจุดติดไฟ โดยจะเกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงมากกว่าที่จะเกิดการแผ่รังสีแบบการพาความร้อนทั่วไป ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการใช้แผงความร้อนของการแผ่รังสี (Radiant heat panel) ให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างก่อน หรือในระหว่างที่ทดสอบการจุดติดไฟ (Ignition test)

2.2.7.4 อุโมงค์ (Tunnel)

สำหรับวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งก่อสร้าง วิธีที่นิยมทดสอบจะใช้เป็นวิธีอุโมงค์ตามแนวนอน (Horizontal tunnel) กว้าง 20 นิ้วและยาว 25 ฟุต โดยจะใช้เพดานที่ทำด้วยวัสดุที่จะทดสอบการจุดติดไฟ และปล่อยอากาศเข้าไปยังอุโมงค์เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ก๊าซที่ได้จากการสันดาปจะออกไปทางด้านปลายอุโมงค์ โดยอัตราของระยะทางเปลวไฟไปตามความยาวของเพดาน คือการวัดความสามารถในการติดไฟของวัสดุนั้น วิธีนี้จะสามารถนำมาทดสอบวัสดุในทางการค้าได้ แต่สารตัวอย่างจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7.5 ห้องควัน (Smoke chamber)

มีหลายวิธีที่ดีมีการพัฒนาเพื่อที่จะวัดปริมาณของควันที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุเกิดการเผาไหม้ โดยพิจารณาถึงผลของการบดบังการมองเห็นของคนที่ยพยายามที่จะหลบหนีออกจากเปลวไฟ โดยทั่วไปกล่องที่สร้างขึ้นจะมีหน้าต่างอยู่ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง โดยแสงจากด้านหลังกล่องสามารถมองเห็นทะลุผ่านหน้าต่างได้ และวัดการส่งผ่านจากทางด้านหน้าของกล่อง โดยตัวอย่างจะถูกเผาไหม้อยู่ภายในกล่องทำให้เกิดควันขึ้น ซึ่งจะค่อยๆบดบังแสงที่สามารถผ่านทะลุมายังกล่องได้ และจากการสูญเสียการส่งผ่านสามารถวัดได้จากด้านหน้าของกล่อง วิธีนี้มีประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุที่ทำให้เกิดควันได้น้อย

2.2.7.6 ความเป็นพิษ

ก๊าซที่ได้จากการสันดาปได้นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการหนู เพื่อเปรียบเทียบอัตราที่ก๊าซนี้มีการสูญเสียไปขณะที่หลบหนี พบว่าก๊าซมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมและทำให้หนูตาย ด้วยเหตุนี้นักวิจัยคนอื่นๆได้ใช้การวิเคราะห์ทางเคมี เพื่อหา ก๊าซที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้ว่ามีปริมาณมากเท่าไร โดยทั่วไปปัญหาที่สำคัญ คือ การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

2.2.7.7 มุมห้อง (Room corner)

“มุมห้อง” จะมีลักษณะดังนี้ คือ มีผนัง 2 ผนัง พบกันที่มุมห้อง 90 องศาและปิดด้วยเพดาน มีการสร้างกองไม้ติดไฟตรงมุมห้อง เมื่อเทแก๊สโซลีนลงไปในกองไม้และจุดไฟ จะมีการบันทึกภาพในขณะที่ไฟลุกลามไปที่ผนังจนถึงเพดาน แล้วนำมาศึกษาอัตราของการเผาไหม้จากเทปบันทึกภาพ

2.2.7.8 สิ่งก่อสร้างทั้งหลัง (Whole building)

ในบางครั้งหน่วยดับเพลิงอาจมีการเผาไหม้สิ่งก่อสร้างเพื่อเป็นการกำจัดทิ้ง โดยอาจอนุญาตให้นักวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับเพลิงไหม้ และวิศวกรติดตั้งวัสดุที่จะใช้ทดสอบและบันทึกภาพว่ามีลักษณะการเผาไหม้ในสภาวะเหล่านั้นอย่างไร อย่างไรก็ตามโอกาสเช่นนี้เกิดขึ้นได้ไม่บ่อยนัก จึงไม่สามารถนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายได้

2.2.7.9 การทบทวนไฟไหม้ที่เกิดขึ้นจริง (Review of actual fires)

เมื่อเกิดไฟไหม้ขึ้นจริง นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรทางด้านเพลิงไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเรียนรู้ได้อย่างดีโดยการสังเกตหรืออย่างน้อยที่สุดโดยการทบทวนรายละเอียดของเหตุการณ์ย้อนหลัง ยกตัวอย่างเช่น ผู้ชำนาญในสาขาได้มีการเสนอตนเองเป็นผู้ช่วยนักดับเพลิง เพื่อที่จะสามารถเข้าถึงเหตุการณ์ที่เกิดเพลิงไหม้จริงและสังเกตการณ์สิ่งที่เกิดขึ้นในขณะนั้นได้

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

น้ำทิพย์ เมธิธारा และ ปราณี แสงมณีพร [1] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง ที่ใช้สารช่วยหน่วงการติดไฟที่ไม่มีแฮโลเจนเป็นองค์ประกอบประเภทต่างๆ ได้แก่ เมลามีน อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ ซิงค์ไฮดรอกไซด์ แตนเนต และซิงค์บอเรต โดยทำการปรับปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟให้ตามประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟที่วิเคราะห์ได้จากผลการทดสอบการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 HB พบว่า สำหรับการใส่สารช่วยหน่วงการติดไฟประเภทเมลามีน อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และซิงค์ไฮดรอกไซด์ แตนเนต ต้องใช้ในปริมาณอย่างต่ำ 13.46% 11.54% และ 5.77% ของน้ำหนักรวมสารตั้งต้นทั้งหมดตามลำดับ จึงจะสามารถผ่านการทดสอบการติดไฟได้ สำหรับการใส่ซิงค์บอเรต พบว่าไม่สามารถผ่านการทดสอบการติดไฟในช่วงปริมาณที่ทำการทดสอบ คือ 1-15.38% การทดลองอีกตอนหนึ่งคือ การใช้สารเติมแต่งประเภทซิลิโคนชนิดหนึ่ง ร่วมกับสารหน่วงการติดไฟแต่ละประเภทที่ใช้ในการทดลองตอนแรก พบว่าการใช้ซิลิโคนชนิดนี้ไม่สามารถช่วยให้สมบัติการหน่วงการติดไฟแต่ละประเภทดีขึ้นในด้านคุณสมบัติอื่นๆของโฟม ได้แก่ การดูดซึมน้ำ และความแข็งแรงต่อแรงกดอัด สำหรับการทดลองที่ใช้สารหน่วงการติดไฟที่ไม่มีแฮโลเจนเป็นองค์ประกอบประเภทต่างๆนี้ ไม่ทำให้คุณสมบัติดังกล่าวเปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเทียบกับโฟมที่ผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งใช้สารหน่วงการติดไฟที่มีแฮโลเจนเป็นองค์ประกอบ

J.L. Rivera-Armenta Th.Heinze และ A.M. Mendoza-Mentinez [5] พอลิยูรีเทน เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง พอลิออล พอลิอีเทอร์ หรือพอลิออลพอลิเอสเทอร์ กับ พอลิไอโซไซยาเนต โดยวิธี one-shot process พบว่าสมบัติของโฟมพอลิยูรีเทน ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ สารเติมแต่ง กระบวนการผลิต และอื่นๆสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซิล ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิยูรีเทน อาทิเช่น อนุพันธ์ของเซลลูโลส ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้เซลลูโลสอะซิเตต เซลลูโลสซัลเฟต คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และไตรเมทิลซิลิล เซลลูโลส โดยจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลของอนุพันธ์เซลลูโลสจะขึ้นกับปริมาณการแทนที่ (degree of substitutions) ในการทดลองทำเช่นเดียวกับการเกิดพอลิยูรีเทน เพียงแค่นำอนุพันธ์ของเซลลูโลสเป็นส่วนผสมเพิ่มเข้าไป จากนั้นทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสกัดโฟมด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมกับอนุพันธ์ของเซลลูโลสนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค IR และ C^{13} NMR การหาค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) โดยเทคนิค DSC พบว่าพอลิยูรีเทนที่ปรับปรุงด้วยอนุพันธ์ของเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้น จากเทคนิค TGA ปรากฏว่าพอลิยูรีเทน-เซลลูโลสซัลเฟตมีการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าโฟมพอลิยูรีเทน และโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากอนุพันธ์เซลลูโลสอื่นๆ จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีไมโครกราฟพบว่าขนาดเซลล์ที่ได้เล็กลง มีความหนาแน่นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมพอลิยูรีเทน และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMA (Dynamic mechanical analysis) พบว่าพลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของอนุพันธ์เซลลูโลสเพิ่มขึ้น และผลของปริมาณของอนุพันธ์เซลลูโลสที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

Jackson และคณะ [6] ได้ศึกษาการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งโดยปราศจากการใช้สารคลอรีเนเต็ด ฟลูโอโรคาร์บอนซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดฟอง โดยสังเคราะห์โฟมจากการทำปฏิกิริยากับ C_2-C_4 อัลคีน ออกไซด์ของโพรพิลีนไกลคอลหรือเอทิลีนไดเอมีนก่อน จากนั้นผสมกับไอโซไซยาเนตที่มีพันธะอะโรมาติก ตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำ สารลดแรงตึงผิว เซนจ์เอ็กเทนเดอร์ สี สารหน่วงไฟ สารตัวเติมและสารเติมแต่งอื่นๆ โดยเซนจ์เอ็กเทนเดอร์ที่ใช้คือ กลีเซอริน ซึ่งโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่ได้มีสมบัติเช่นเดียวกันกับโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่ใช้สารทำให้เกิดฟองเป็นคลอรีเนเต็ด ฟลูโอโรคาร์บอน

Coppola and Conn [7] ศึกษาการเตรียม Semi-rigid พอลิยูรีเทนสำหรับใช้เป็นวัสดุกันกระแทกและบรรจุก๊าซของสินค้าที่เกิดการสั่นสะเทือนแล้วเสียหายง่าย โดยโฟมสังเคราะห์ได้จากพอลิอีเทอร์พอลิออล พอลิเมอร์ลิกไอโซไซยาเนตกับน้ำปริมาณมากและสารทำให้เกิดโฟม โดยปฏิกิริยาของของผสมมีดัชนีระหว่าง NCO/OH ต่ำประมาณ 30-60 เดิมซิลิโคนเป็นสารลดแรงตึงผิวดูดเป็น 1.8-3 ส่วนในพอลิออล 100 ส่วน

Gy.Bertalan และคณะ [8] ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเอไมด์กับแอมโมเนีย โดยใช้พอลิฟอสเฟตเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟและใช้โบรอน-ซิลิโคนเป็น Synergistic reactive surfactants (SRS) พบว่า SRS จะช่วยให้สารช่วยหน่วงการติดไฟเกิดการกระจายตัวได้ดีในพอลิเอไมด์ ทำให้สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนและพอลิเอไมด์ดีขึ้น

P.A.Ubirajara และคณะ [9] ได้ศึกษาสมบัติสารช่วยหน่วงการติดไฟของเทอร์โมพลาสติก พอลิยูรีเทน อีลาสโตเมอร์ (TPU) ผสมกับไม้ก้ำ โดยใช้อะลูมิเนียมไตรไฮเดรตเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ ทำการทดสอบการหน่วงการติดไฟด้วย UL-94 เนื่องจากอะลูมิเนียมไตรไฮเดรตเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟที่มีประสิทธิภาพและมีราคาถูก ไม้ก้ำเป็นสารตัวเติมที่ช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงการผลิตและมีราคาถูก ทำการผสม TPU ไมก้า และอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว อัตราเร็วสกรู 20 rpm โดยใช้อุณหภูมิทั้ง 4 ส่วนดังนี้ 170, 172, 175 และ 180 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ 70 phr จะให้การหน่วงไฟที่ดีที่สุด และปริมาณไมก้า 20 phr จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

วารสาร *Plastics Additives & Compounding* [10] ได้รายงานว่แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟและสามารถลดควันที่เกิดขึ้นได้ดีมาก โดยเมื่อแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนจะให้น้ำออกมา ซึ่งจะทำให้ไฟดับลง

วารสาร *Plastics Additives & Compounding* [11] ได้เสนอสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดซิงค์ บอเรต เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟที่ให้ควันน้อยและเป็นพิษน้อย นิยมใช้ควบคู่กับสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดฟอสเฟต ซึ่งจะทำให้ปริมาณควันที่เกิดขึ้นน้อยลงด้วย สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดที่มีหมู่ไฮดรอกซิลจะไม่นิยมใช้ เนื่องจากเมื่อเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนจะเกิดก๊าซพิษขึ้น

C.Shin-Hsuan และคณะ [12] ได้ศึกษาสมบัติการหน่วงการติดไฟของพอลิโพรพิลีนที่ผสมแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ เปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ผสมแอมโมเนียพอลิฟอสเฟต พบว่าแอมโมเนียพอลิฟอสเฟตจะช่วยให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดี โดยมีปริมาณของควันและคาร์บอนมอนอกไซด์มาก แต่แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นลดลง มีปริมาณของควันและคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ถ้าเติมแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น จะทำให้หน่วงการติดไฟมากขึ้น ปริมาณของควันและคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง แต่จะทำให้สมบัติเชิงกลไม่ดี

A.Torikai และคณะ [13] ได้ศึกษาการสลายตัวด้วยแสงของพอลิสไตรีนผสมกับสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดที่มีโบรมีนอยู่ในโมเลกุล โดยวัดการสลายตัวของพอลิสไตรีนด้วยเครื่อง UV-Visible และ FTIR Spectroscopy พบว่าพอลิสไตรีนที่ผสมกับสารช่วยหน่วงการติดไฟ 1 phr จะเกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ความยาวคลื่นแสง 280 นาโนเมตร และพอลิสไตรีนที่ผสมกับสารช่วยหน่วงการติดไฟ 2 phr จะเกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ความยาวคลื่นแสง 300 นาโนเมตร โดยเสถียรภาพต่อแสงของพอลิสไตรีนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารช่วยหน่วงการติดไฟ และความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์กับสารช่วยหน่วงการติดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N.Shigeko และคณะ [14] ได้ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อนของเส้นใยฝ้ายที่ผสมกับ N-methylol dialkyl phosphonopropionamide (Pyrovatex - CP) เปรียบเทียบกับเส้นใยฝ้ายที่ผสมกับ Tetrakis hydroxyl methyl phosphonium sulfate (THPS) โดยใช้ Pyrovatex – CP และ THPS เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ และวัดการสลายตัวด้วยความร้อนโดยเทคนิค Thermogravimetry (TG) พบว่า Pyrovatex – CP จะช่วยให้การสลายตัวด้วยความร้อนของเส้นใยฝ้ายเกิดช้ากว่า THPS

P.P.Lizymol และ T.Sabu [15] ได้ศึกษาสมบัติของการหน่วงการติดไฟและศึกษาปริมาณควันที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสม โดยเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันได้ คือ PVC/EVA และ PVC/SAN กับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้ คือ EVA/SAN พบว่าสมบัติด้านการติดไฟและปริมาณควันที่เกิดขึ้นของพอลิเมอร์ผสมจะไม่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการผสมเข้ากันได้หรือไม่ของพอลิเมอร์ผสม แต่จะขึ้นอยู่กับปริมาณส่วนผสมหลักในพอลิเมอร์ผสม โดย PVC จะมีสมบัติในการช่วยหน่วงการติดไฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ไดเฟนิลเมเทนไดไฮโซไซยานเตต (Crude MDI) เกรดการค้าบริษัท TPI POLYOL จำกัด (มหาชน)
2. พอลิอีเทอร์พอลิออล 4190 เกรดการค้าบริษัท TPI POLYOL จำกัด (มหาชน)
3. พอลิอีเทอร์พอลิออล 4560 เกรดการค้าบริษัท TPI POLYOL จำกัด (มหาชน)
4. ตัวเร่งปฏิกิริยา DMCHA บริษัท TPI POLYOL จำกัด (มหาชน)
5. สารที่ทำให้เกิดฟอง 141b เกรดการค้าบริษัท TPI POLYOL จำกัด (มหาชน)
6. สารช่วยผสม AMS บริษัท TPI POLYOL จำกัด (มหาชน)
7. ซิลิโคน Tesosteb B 8462 เกรดการค้าบริษัท TPI POLYOL จำกัด (มหาชน)
8. น้ำกลั่น
9. สารช่วยหน่วงการติดไฟ Flamestop 380 (Diethyl N,N-bis(2hydroxyethyl) aminomethylphosphonate) เกรดการค้าบริษัท TPI POLYOL จำกัด (มหาชน)
10. สารช่วยหน่วงการติดไฟ TMCPP (tris(β -chloropropyl)phosphate) เกรดการค้าบริษัท TPI POLYOL จำกัด (มหาชน)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. มอเตอร์ปั่นกวนชนิดปรับรอบ รุ่น RE16 บริษัท IKA
2. ไม้พืดกวนสแตนเลส
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น AE-200 บริษัท Metter
4. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) รุ่น LR30K:Llyod Instrument Ltd
5. เครื่องทดสอบการนำความร้อน (Heat flow meter)
6. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)
รุ่น J EOL JSM6200
7. ตู้อบ
8. ตู้แช่เย็น
9. เครื่องทดสอบการนำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ตะเกียงบนเลน
11. ตัวจับ (Clamp)
12. ครอบพลาสติก
13. ถุงพลาสติกพอลิพรอพิลีน (PP)
14. แม่พิมพ์อะลูมิเนียม

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ

1. ชั่งสารเคมีแต่ละสูตรตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สูตรผสมพอลิยูรีเทนที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ

สาร	สูตรที่ (phr)				
	1	2	3	4	5
Crude MDI **	156.55	159.65	162.75	165.85	168.95
Polyether polyols 4190	11	11	11	11	11
Polyether polyols 4560	85	85	85	85	85
ตัวเร่งปฏิกิริยา DMCHA	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
สารที่ทำให้เกิดฟอง 141b	30	30	30	30	30
สารช่วยผสม AMS	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
ซิลิโคน Tesosteb B 8462	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
น้ำกลั่น	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
Flame stop 380*	1	3	5	7	9

* เมื่อขึ้นรูปเสร็จให้เตรียมการทดลองอีกครั้งหนึ่งโดยเปลี่ยนสารช่วยหน่วงการติดไฟเป็น TMCPP

** ปริมาณ Crude MDI เป็นปริมาณที่มากเกินไปในการทำปฏิกิริยากับ Polyol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำ Flame stop และพอลิอีเทอร์พอลิโออลมาผสมกันในกระป๋องพลาสติก ทำการปั่นกวนด้วยเครื่องกวนให้ของผสมทั้งสองเข้ากัน
3. เติมน้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาAMS ซิลิโคน และสารที่ทำให้เกิดฟอง141b ลงในของผสมข้างต้น โดยทำการเติมสารต่างๆบนเครื่องซึ่งพร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักกรวมของของผสมไว้ จากนั้นทำการปั่นกวนให้ของผสมเข้ากัน
4. ชั่งน้ำหนักของผสมอีกครั้ง (เนื่องจากสารที่ทำให้เกิดฟอง141b เป็นสารที่สามารถระเหยได้จึงต้องมีการเติมเพิ่ม) จึงทำการเติมสารที่ทำให้เกิดฟอง 141b ลงไปอีกครั้ง โดยให้มีน้ำหนักเท่ากับน้ำหนักกรวมที่ชั่งได้ในตอนแรก เพื่อให้ดฟมที่สังเคราะห์ได้มีความหนาแน่นตามที่ต้องการและคงสมบัติความเป็นฉนวนเอาไว้ จากนั้นเติม Crude MDI ลงไปในของผสมอย่างรวดเร็ว นำเข้าเครื่องปั่นกวนที่ความเร็ว 1600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 วินาที
5. เทของผสมที่ได้ลงถ่วงพลาสติกใสขนาดใหญ่ ปล่อยให้ของผสมเกิดการฟองตัวเป็นฟองขึ้นอย่างสมบูรณ์โดยไม่ยุบตัว จับเวลา และนำไปหาความหนาแน่นเพื่อเทลงแม่พิมพ์
6. ทำการทดลองซ้ำจนได้ครบทุกสูตร จากนั้นเปลี่ยนชนิดของสารช่วยหน่วงการติดไฟ

3.3.2 การตรวจวิเคราะห์สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพ

1. การตรวจวัดความหนาแน่น (ตามมาตรฐาน ASTM D-1622)
 - ตัดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยให้ชิ้นงานมีขนาดไม่เล็กมากและไม่ใหญ่จนเกินภาชนะที่ใช้ทดสอบ จำนวน 5 ตัวอย่าง
 - ชั่งน้ำหนักชิ้นงานด้วยเครื่องมาตรฐานโดยมีนัยสำคัญ 1% ในหน่วยน้ำหนักกรัม จากนั้นวัดความกว้าง ความยาว และความหนา ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์
 - คำนวณหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจากสูตร
 ความหนาแน่น (g/cm^3) = น้ำหนักของชิ้นงาน (g) / กว้าง×ยาว×หนา (cm^3)
 ($D = M/V$)

2. การทดสอบสมบัติความแข็งแรงกด (ตามมาตรฐาน ASTM D-1621)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 2 นิ้ว ยาว 2 นิ้ว หน้า 1 นิ้ว จำนวน 5 ตัวอย่าง
- นำชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบความแข็งแรงกดด้วยเครื่อง Universal testing machine โดยให้ความเร็วของการกดชิ้นงานทดสอบเท่ากับ 2.5 ± 0.25 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อหาค่าแรงกดสูงสุด และมอดูลัสที่ 10% โดยที่เซลล์ของชิ้นงานไม่เกิดการเสียหาย

3. สมบัติการเปลี่ยนรูป (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-2126)

- การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างสามารถเตรียมได้โดยเตรียมเป็นแผ่นโฟมที่มีพื้นผิวเรียบขนาด 100 มม. x 100 มม. x 25 มม. โดยจะตัดชิ้นงานตัวอย่างโฟม 2 เซตให้มีทิศทางการตัดในทิศทางที่ตั้งฉากกัน ซึ่งตัวอย่างทั้ง 2 เซตนี้จะแสดงให้เห็นถึงการจัดเรียงตัวของโฟมใน 2 ทิศทาง โดยดูจากทิศทางที่โฟมขยายตัวควรจะขยายออกในแนวขนานและแนวตั้งฉาก แต่ถ้ามีทิศทางการขยายตัวที่ไม่แน่นอน จะมีโครงสร้างเซลล์เป็นแบบแอนไอโซโทรปี โดยจะเก็บชิ้นงานตัวอย่างเป็นเวลา 20 \pm 1 ชั่วโมงภายใต้สภาวะที่กำหนดไว้ในช่วงอุณหภูมิ -55 องศาเซลเซียส \pm 3 องศาเซลเซียส ถึง 150 องศาเซลเซียส \pm 3 องศาเซลเซียส หลังจากผ่านไป 20 ชั่วโมงแล้ว ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกนำไปไว้ในสภาวะที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการวัดขนาดอีกครั้งและนำชิ้นงานตัวอย่างไปทดสอบการเสียรูปร่าง ทำการทดสอบซ้ำอีกโดยเปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้เป็น 48 \pm 2 ชั่วโมง 7 วัน และ 28 วัน เพื่อการควบคุมคุณภาพจะใช้วิธีการอย่างง่าย ๆ โดยการนำตัวอย่างชนิดเดียวกันมาทำการเปรียบเทียบกันซึ่งโดยปกติจะทำการเปรียบเทียบกันระหว่างตัวอย่างที่ถูกเก็บที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส กับที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดสอบจะถูกรายงานในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ของความกว้างและความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้สภาวะที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology)

นำตัวอย่างโฟมที่ได้ไปตรวจสอบเพื่อทำการศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) เป็นการส่องดูพื้นผิวของวัสดุอย่างละเอียดที่กำลังขยายสูง การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยนำตัวอย่างไปแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen) เป็นเวลา 10 นาทีและทำการหักชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบทันที นำชิ้นงานตัวอย่างมาเคลือบทองและนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)

3.3.4 การทดสอบสมบัติทางด้านความร้อน (ตามมาตรฐาน ASTM C-518)

- นำตัวอย่างโฟม 2 ชิ้น ไปวางระหว่างพื้นผิวที่ร้อนและเย็น (Hot and cold surface) โดยพื้นผิวทั้งสองจะต้องมีอุณหภูมิต่างกันอย่างน้อย 15 องศาเซลเซียสขึ้นไป
- ให้ความร้อนกับชิ้นงานจากนั้นวัดการไหลของความร้อน ซึ่งการนำความร้อนของโฟมคือ ความหนาแน่นของความร้อนที่ไหลผ่านพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง

3.3.5 การทดสอบความสามารถในการติดไฟ (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-1692)

การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างสามารถทำได้โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างให้มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 150 มม. \pm 1 มม. x 50 มม. \pm 1 มม. โดยชิ้นงานจะต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 5 มม. แต่จะต้องมีความหนาไม่เกิน 13 มม. วิธีการทดสอบสามารถทำได้โดยใช้ตัวจับ (Clamp) จับแท่งวัสดุในแนวราบ ถ้าแท่งวัสดุเกิดการโค้งงอ อาจช่วยพยุงตัวชิ้นงานด้วยตะแกรง โดยมีตะเกียงบุนเสนอยู่บริเวณด้านล่างของแท่งวัสดุอีกด้าน ทำการเผาานาน 60 วินาที ถ้าแท่งวัสดุไม่ติดไฟ เรียกว่า " ไม่เกิดการเผาไหม้ " (Non-burning) แต่ถ้าแท่งวัสดุเกิดการติดไฟ ต้องวัดอัตราการเกิดการเกิดเปลวไฟ ในหน่วยเซนติเมตรต่อนาทีและรายงานผลเป็น " อัตราการเผาไหม้ " (Rate of burning) ถ้าติดไฟเพียงครั้งทางแล้วหยุดให้รายงานเป็น " สามารถดับไฟได้ด้วยตนเอง " (Self-extinguishing) และรายงานระยะที่ถูกเผาไหม้เป็นเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโดยทดสอบความหนาแน่น ค่าความแข็งกด สมบัติการนำความร้อน สมบัติการเปลี่ยนรูป และสมบัติการหน่วงการติดไฟของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟทั้ง 2 ชนิด คือ Flamestop 380 ซึ่งไม่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ ในปริมาณที่แตกต่างกันจำนวน 5 สูตร และ TMCPP ซึ่งมีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ ในปริมาณที่แตกต่างกันจำนวน 5 สูตร และชนิดที่ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ รวมแล้ว 11 สูตร เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบผลการทดสอบ

4.1.1 ผลการตรวจวัดความหนาแน่น (ตามมาตรฐาน ASTM D-1622)

นำโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งทั้ง 11 สูตรมาตัดให้มีขนาดชิ้นงานละ 2 นิ้ว X 2 นิ้ว X 1 นิ้ว จำนวนสูตรละ 5 ชิ้นงาน นำมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงานแต่ละสูตร ซึ่งได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง

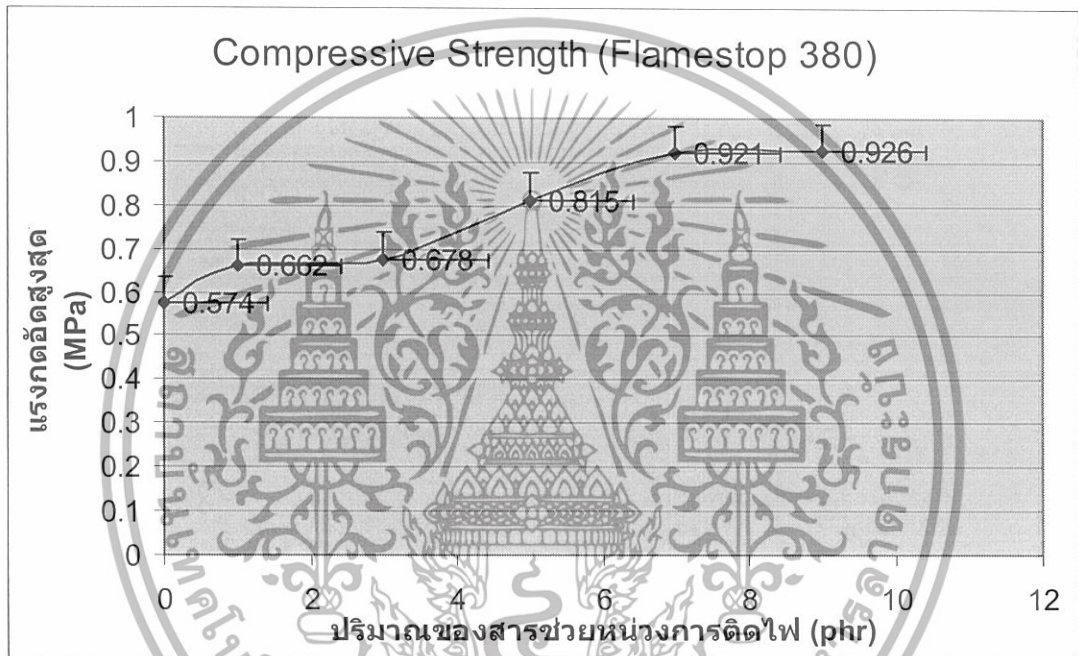
ชนิดของสารช่วยหน่วงการติดไฟ	ความหนาแน่นของโฟม (กรัม/ลบ.ซม.)				
	เมื่อมีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟลงไปปริมาณต่างๆ				
	1 phr	3 phr	5 phr	7 phr	9 phr
Flamestop 380	0.0254	0.0259	0.0256	0.0261	0.0264
TMCPP	0.0256	0.0259	0.0261	0.0263	0.0260
Non-flame retardant	0.0252				

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟไม่มีผลต่อความหนาแน่นของโฟมเนื่องจากสารช่วยหน่วงการติดไฟที่ใช้มีลักษณะเป็นของเหลว ทำให้สามารถผสมเข้ากับโฟมได้ [1] แต่ความหนาแน่นของโฟมที่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารช่วยให้เกิด

ฟอง (Blowing agent) และการปั่นกวนที่ช่วยในการกระจายตัวของฟองอากาศให้มากกว่าเดิม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

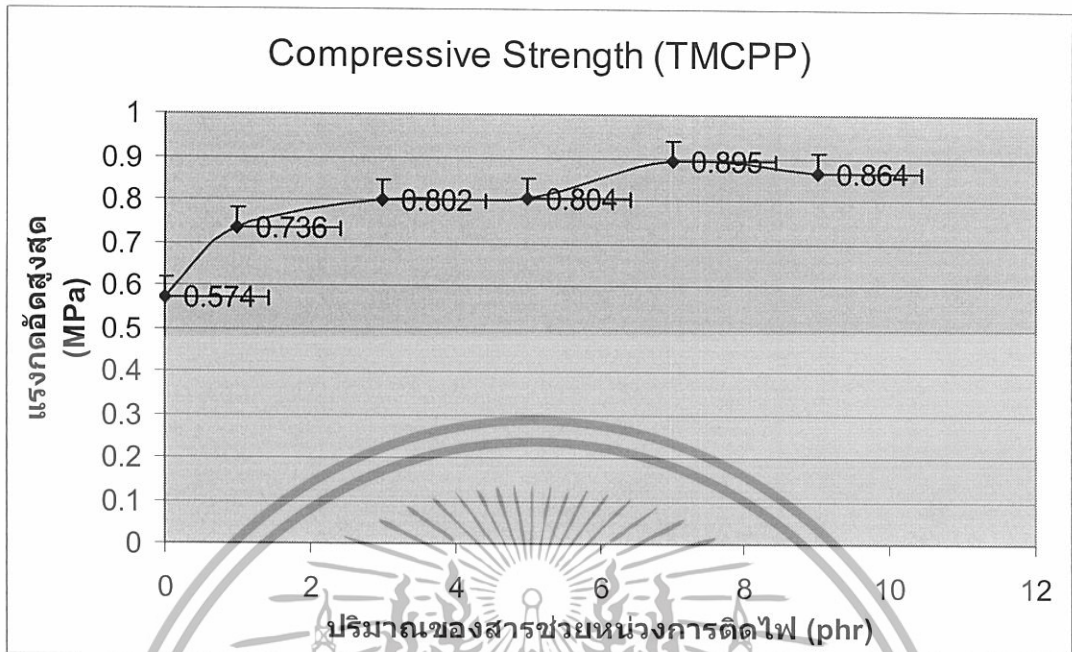
4.1.2 การทดสอบสมบัติความแข็งแรงกด (ตามมาตรฐาน ASTM D-1621)

นำโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งทั้ง 11 สูตรมาตัดให้มีขนาดชิ้นงานละ 2 นิ้ว X 2 นิ้ว X 1 นิ้ว จำนวนสูตรละ 5 ชิ้นงาน นำไปทดสอบความแข็งแรงกด โดยใช้ความเร็วของการกดชิ้นงานทดสอบเท่ากับ 2.5 ± 0.25 มิลลิเมตรต่อวินาทีเพื่อหาค่าแรงกดสูงสุด ซึ่งได้ผลดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดอัดกับปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ Flamestop 380 ที่เติมลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดอัดกับปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ TMCPP ที่เติมลงไป

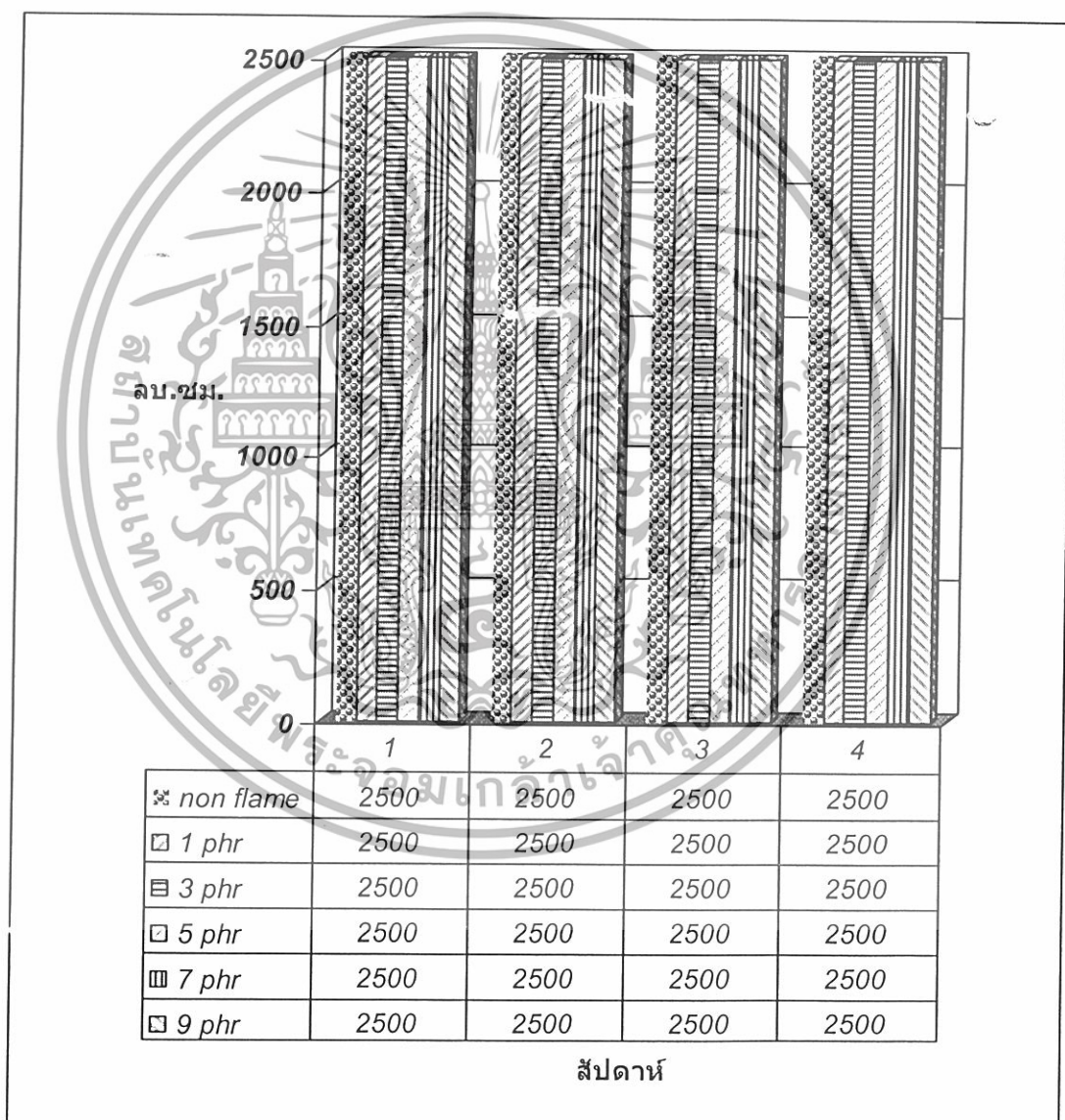
* ค่าแรงกดอัด 0.574 MPa คือ ค่าแรงกดอัดของชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ

เมื่อพิจารณาชนิดของสารช่วยหน่วงการติดไฟพบว่า Flamestop 380 จะส่งผลให้ค่าแรงกดอัดของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมในปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับ TMCPP (รูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากความสามารถในการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลในโครงสร้างของโฟมกับสารช่วยหน่วงการติดไฟและมวลโมเลกุลของสารช่วยหน่วงการติดไฟโดยปริมาณของ TMCPP ที่เติมลงไปมีผลรับแรงกดอัดเกินกว่า Flamestop 380 เนื่องจาก TMCPP สามารถผสมเข้ากับโฟมได้ดีกว่า เนื่องจากมีอะตอมของคลอรีนซึ่งสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโครงสร้างของโฟมได้ และนอกจากนี้ TMCPP ยังมีมวลโมเลกุลสูงกว่า flamestop 380 [1, 17, 18.]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

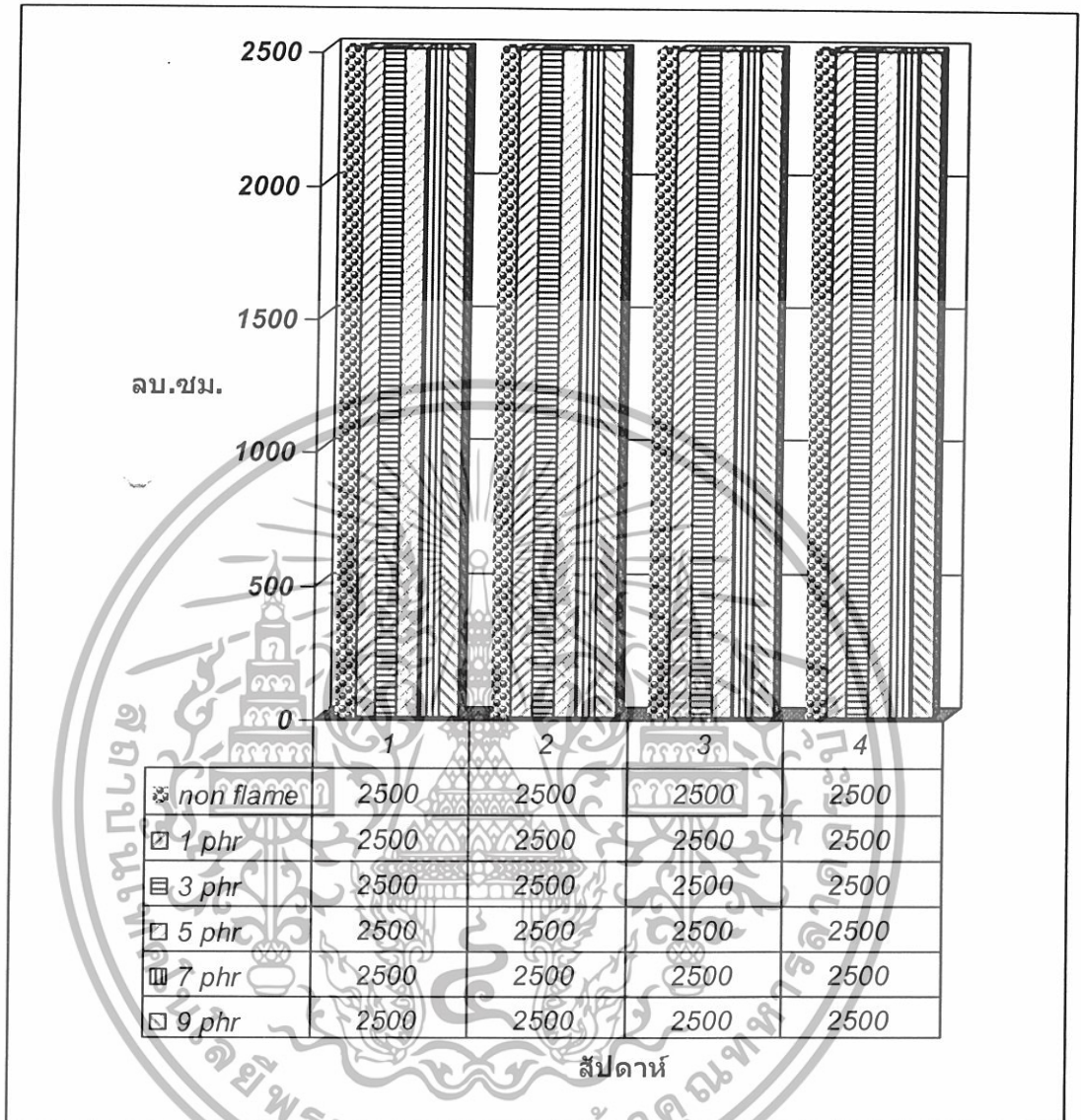
4.1.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนรูป (ตามมาตรฐาน ASTM D-2126)

นำโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งทั้ง 11 สูตรมาตัดให้มีขนาดชิ้นงานละ 10 ซม. X 10 ซม. X 2.5 ซม. จำนวนสูตรละ 2 ชิ้นงาน โดยจะแบ่งเป็นการทดสอบเป็นการเก็บชิ้นงานที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและที่อุณหภูมิ -75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน โดยจะทำการวัดขนาดชิ้นงาน ทุกๆสัปดาห์ (7 วัน) ซึ่งได้ผลการทดลองดังกราฟ



(a)

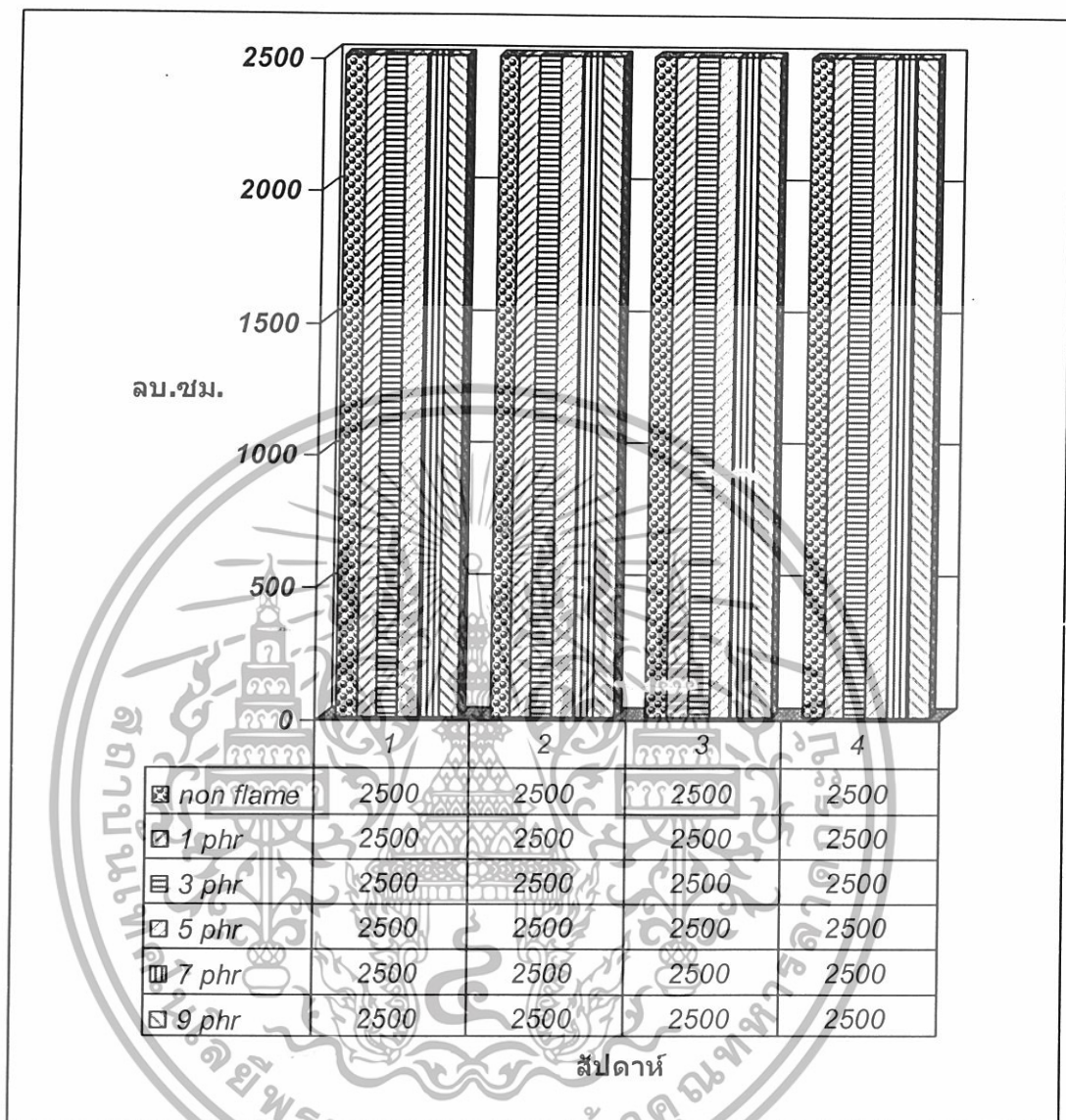
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่ไม่เติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และที่เติมสารช่วยการติดไฟ Flamestop 380 ในปริมาณที่แตกต่างกัน (a) โฟมที่เก็บที่อุณหภูมิ -75 องศาเซลเซียส (b) โฟมที่เก็บที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

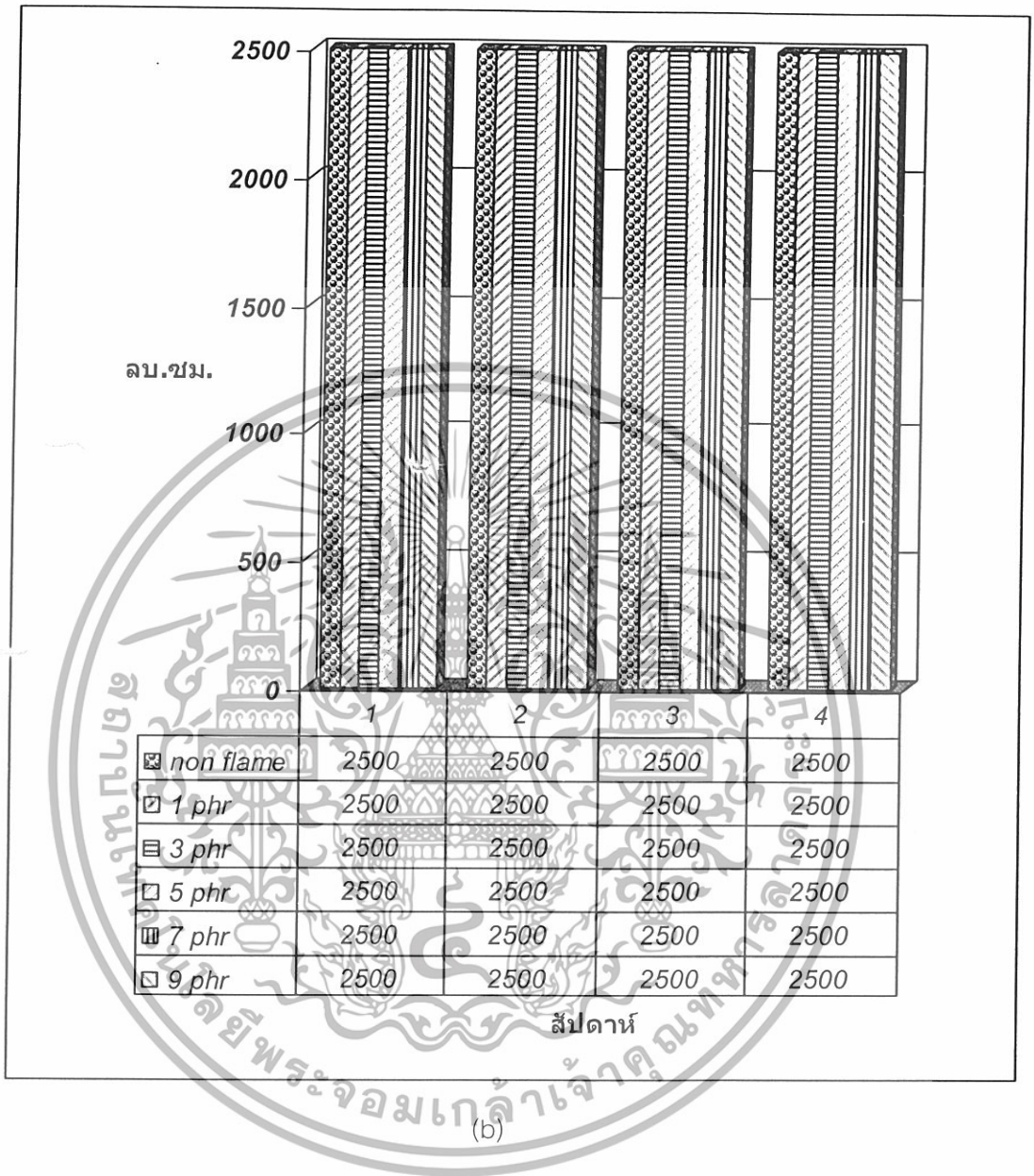
จากแผนภูมิ จะเห็นว่าขนาดของชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเก็บชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิ -75 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ทั้งชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ Flamestop 380 ในปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงว่าสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิด Flamestop 380 และปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟไม่มีผลต่อ

การเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของโฟมเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำและสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่ไม่เติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และที่เติมสารช่วยการติดไฟ TMCPP ในปริมาณที่แตกต่างกัน (a) โฟมที่เก็บที่อุณหภูมิ -75 องศาเซลเซียส (b) โฟมที่เก็บที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

จากแผนภูมิ จะเห็นว่าขนาดของชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเก็บชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิ -75 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ทั้งในชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ TMCPP ในปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงว่าสารช่วย

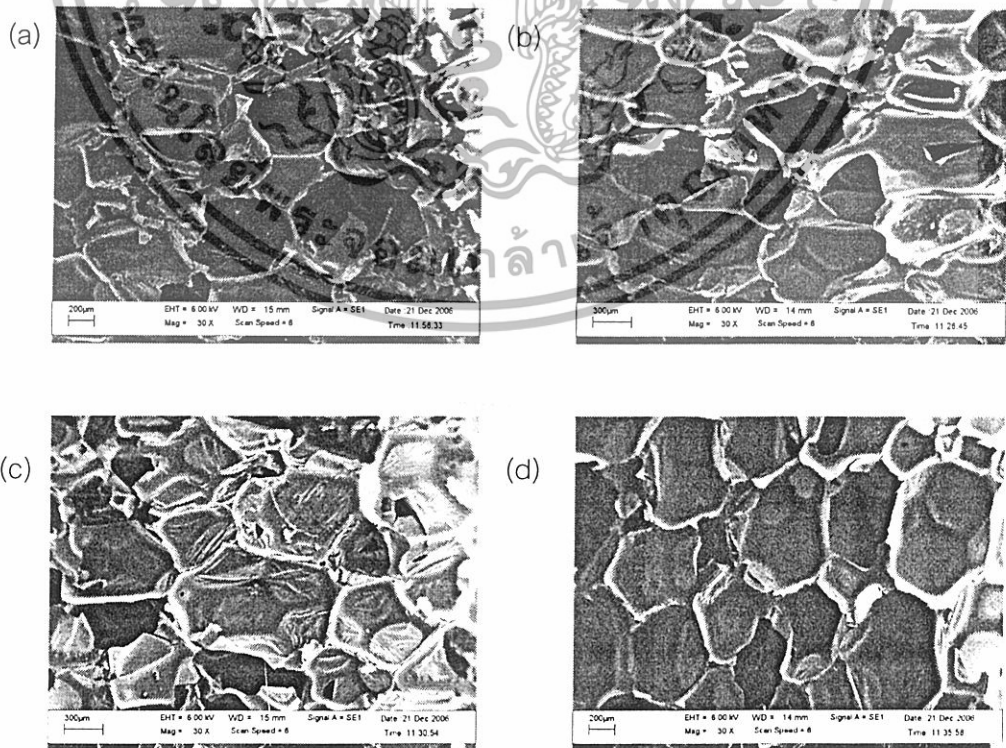
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยการติดไฟชนิด TMCPP และปริมาณของสารช่วยหน่วยการติดไฟไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของโฟมเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำและสูง

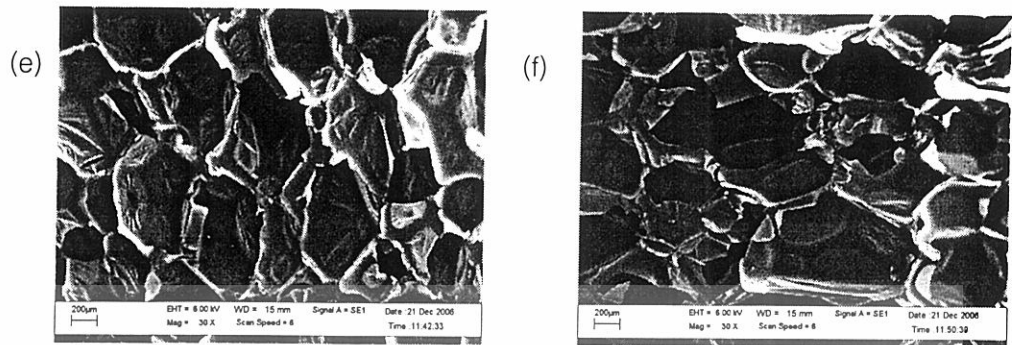
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าขนาดของชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ทั้งสิ้นในทุกๆ สัปดาห์ ไม่ว่าจะเก็บที่อุณหภูมิ -75 องศาเซลเซียส หรือที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส แสดงว่าชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วยการติดไฟไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโฟม ทั้งที่อุณหภูมิสูง และอุณหภูมิต่ำ [18] จึงสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

4.2 ผลการตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology)

นำพอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็งที่หน่วยการติดไฟที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 11 สูตร ไปศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยา โดยตัดให้มีขนาด 1 ซม. x 1 ซม. x 1 ซม. จากนั้นนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยทำการส่องบริเวณภายในของโฟม เพื่อดูลักษณะและชนิดของเซลล์ และเปรียบเทียบดูว่าชนิดและปริมาณของสารหน่วยการติดไฟที่เติมลงไปนั้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของโฟมหรือไม่ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

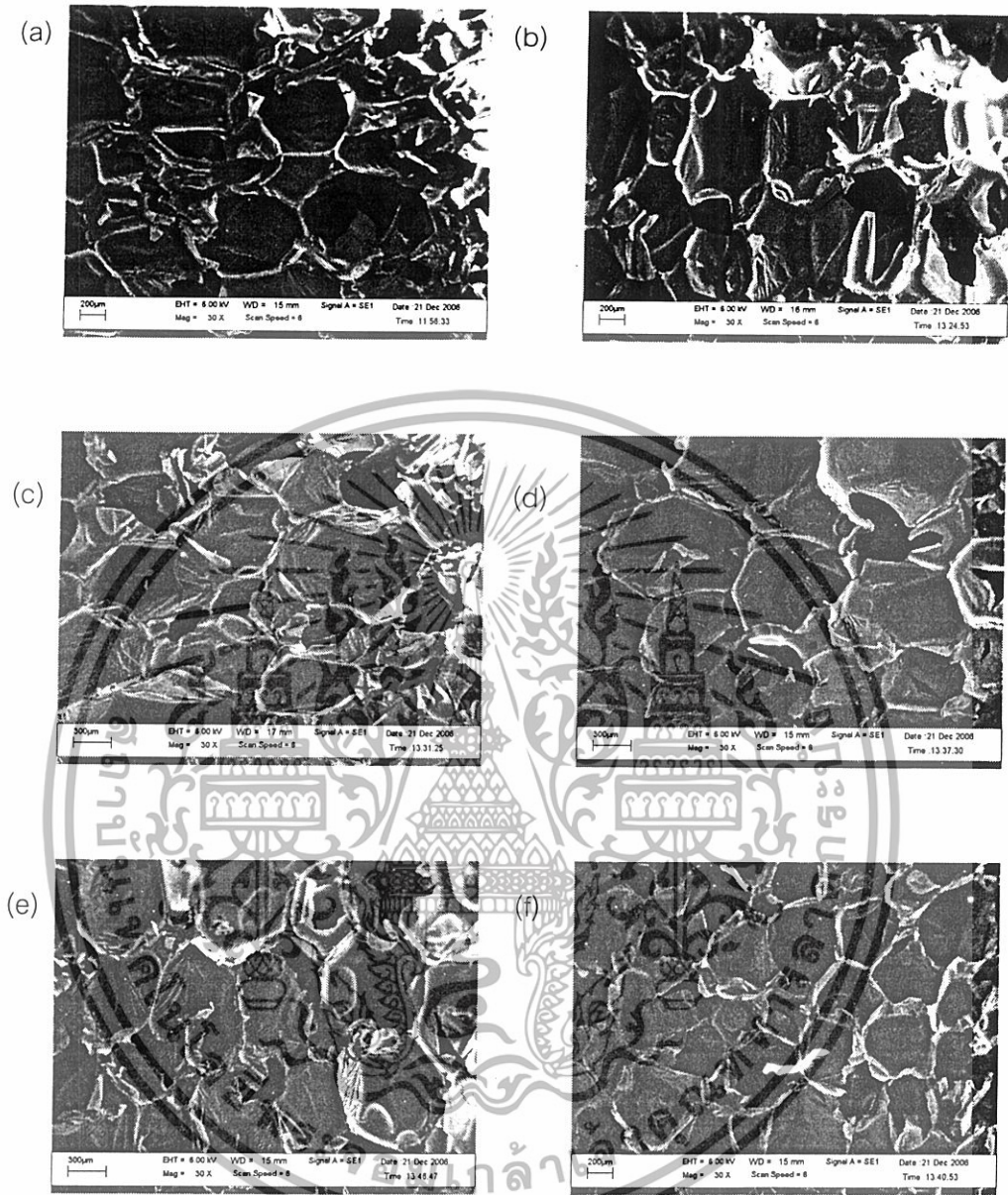


รูปที่ 4.5 รูป SEM กำลังขยาย 30 เท่า แสดงรูปร่างเซลล์ของไฟมพอลิเอทรีเทนชนิดแข็งที่ไม่มี การเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และที่มีการเติมช่วยหน่วงการติดไฟ Flamestop 380 (a) ไฟมที่ไม่มี การเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ (b) ไฟมที่เติม Flamestop 380 ปริมาณ 1 phr(c) ไฟมที่เติม Flamestop 380 ปริมาณ 3 phr(d) ไฟมที่เติม Flamestop 380 ปริมาณ 5 phr(e) ไฟมที่เติม Flamestop 380 ปริมาณ 7 phr (f) ไฟมที่เติม Flamestop 380 ปริมาณ 9 phr

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบรูปร่างของไฟมพอลิเอทรีเทนชนิดแข็งที่ไม่มี การเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ (รูป a) กับที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ Flamestop 380 (รูป b-f) พบว่า มีความแตกต่างกันน้อยมาก ลักษณะเซลล์แต่ละเซลล์มีลักษณะคล้ายกัน ไม่ได้มีขนาด ใหญ่ขึ้นหรือเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ Flamestop 380 ที่เติมลงไปนั้น ไม่มีผลกับลักษณะเซลล์ของชิ้นงาน โดยสารหน่วงการติดไฟที่ เติมเข้าไปนั้น เติมนิเวศที่ เป็นของเหลว จึงผสมรวมกันเป็นเนื้อเดียวอยู่ในไฟม อาจมีบางรูป ที่เซลล์ดูมีลักษณะรูพรุนใหญ่กว่าเซลล์อื่น เป็นผลเนื่องมาจากผลของการตัดชิ้นงาน ที่กำหนดให้มี ความกว้าง ความยาว และความสูงเท่ากัน รูปร่างของเซลล์แต่ละรูปจึงไม่เหมือนกัน โดยดูเหมือน คนละแนวภาคตัดขวาง นอกจากนี้การที่ลักษณะเซลล์มีการฉีกขาด เป็นผลมาจากขั้นตอนการบั่น กวนของผสมอาจทำให้สายโซ่ขาด ส่งผลให้เซลล์มีลักษณะฉีกขาด

เมื่อนำชิ้นงานที่เติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ TMCPP ในปริมาณที่แตกต่างกันมา ศึกษาพื้นฐานวิทยา ได้ผลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 รูป SEM กำลังขยาย 30 เท่า แสดงรูปร่างเซลล์ของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตชนิดแข็งที่ไม่มีสารเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และที่มีการเติมช่วยหน่วงการติดไฟ TMCPP (a) โฟมที่ไม่มีสารเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ (b) โฟมที่เติม TMCPP ปริมาณ 1 phr (c) โฟมที่เติม TMCPP ปริมาณ 3 phr (d) โฟมที่เติม TMCPP ปริมาณ 5 phr (e) โฟมที่เติม TMCPP ปริมาณ 7 phr (f) โฟมที่เติม TMCPP ปริมาณ 9 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบรูปร่างของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ (รูป a) กับที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ TMCPP (รูป b-f) พบว่า มีความแตกต่างกันน้อยมากเช่นเดียวกับการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ Flamestop 380 ลักษณะเซลล์แต่ละเซลล์มีลักษณะคล้ายกัน ไม่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ TMCPP ที่เติมลงไปนั้น ไม่มีผลกับลักษณะเซลล์ของชิ้นงาน โดยขนาดของเซลล์ที่ใหญ่และการฉีกขาดของเซลล์เกิดจากผลของการตัดชิ้นงานและการปั่นกววนของผสมดังได้กล่าวมาแล้ว

เมื่อพิจารณาดังนั้น จากรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทน โดยศึกษาในลักษณะภาคตัดขวาง (Cross section) ของชิ้นงาน จะเห็นว่าลักษณะของเซลล์เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ไม่ว่าจะชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟที่เติมลงไปนั้นจะเปลี่ยนแปลงก็ตาม จึงเป็นการยืนยันว่าชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟไม่มีผลกับลักษณะเซลล์ของชิ้นงาน

4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำความร้อน (ตามมาตรฐาน ASTM C-518)

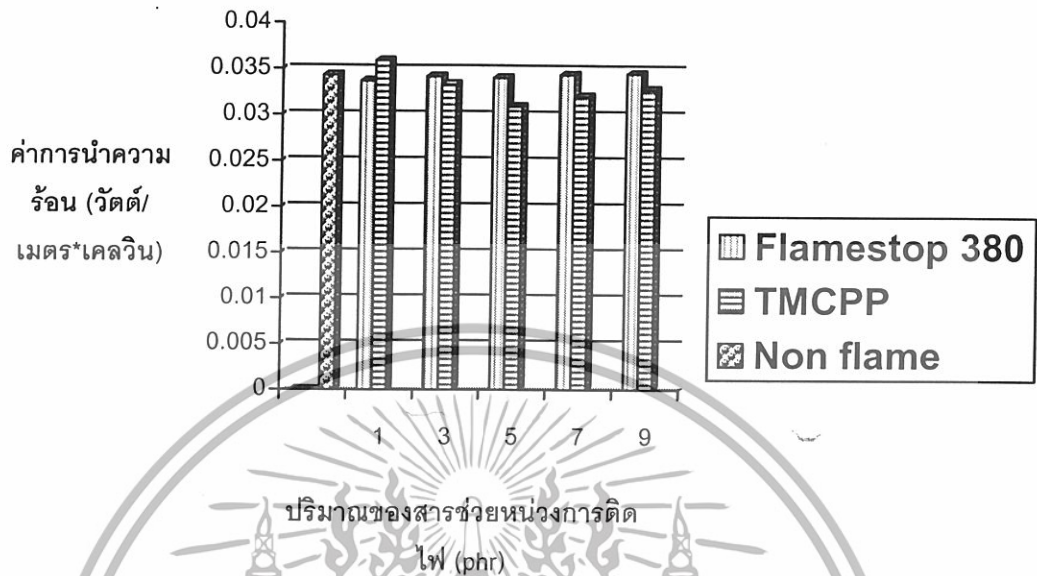
นำโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งทั้ง 11 สูตรมาตัดให้มีขนาดชิ้นงานละ 100 มม. X 100 มม. X 25 มม. จำนวนสูตรละ 2 ชิ้นงาน นำชิ้นงานไปวางระหว่างพื้นผิวที่ร้อนและเย็น แล้ววัดความร้อนที่ไหลผ่านชิ้นงาน โดยได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าการนำความร้อนของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง

ชนิดของสาร ช่วยหน่วงการติดไฟ	ปริมาณของสาร ช่วยหน่วงการติดไฟ (phr)	ค่าการนำความร้อน (วัตต์/เมตร*เคลวิน)
Flamestop 380	1	0.0337
	3	0.0342
	5	0.0340
	7	0.0344
	9	0.0345
TMCPP	1	0.0359
	3	0.0333
	5	0.0309
	7	0.0320
	9	0.0328
Non-flame retardant		0.0343

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งกับชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ จะได้กราฟดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งกับชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณของ Flamestop 380 เพิ่มขึ้น ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และเมื่อเปลี่ยนชนิดของสารช่วยหน่วงการติดไฟเป็น TMCPP และเพิ่มปริมาณขึ้นเช่นเดียวกับ Flamestop 380 ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากเช่นกัน แสดงว่าชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟไม่มีผลต่อการนำความร้อนของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง [17, 18] ซึ่งทำให้โฟมยังมีสมบัติความเป็นฉนวนที่ดี ทั้งนี้เนื่องมาจากชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ จึงไม่แสดงบทบาทการนำความร้อนออกมาอย่างชัดเจน

4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติการหน่วงไฟ (ตามมาตรฐาน ASTM D-1692)

นำโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งทั้ง 11 สูตรมาตัดให้มีขนาดชิ้นงานละ 15 ซม. X 5 ซม. X 1 ซม. จำนวนสูตรละ 3 ชิ้นงาน ทำการเผาชิ้นงานนาน 3 วินาที แล้วหยุดเผา บันทึกระยะทางที่ชิ้นงานเกิดการเผาไหม้ โดยได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

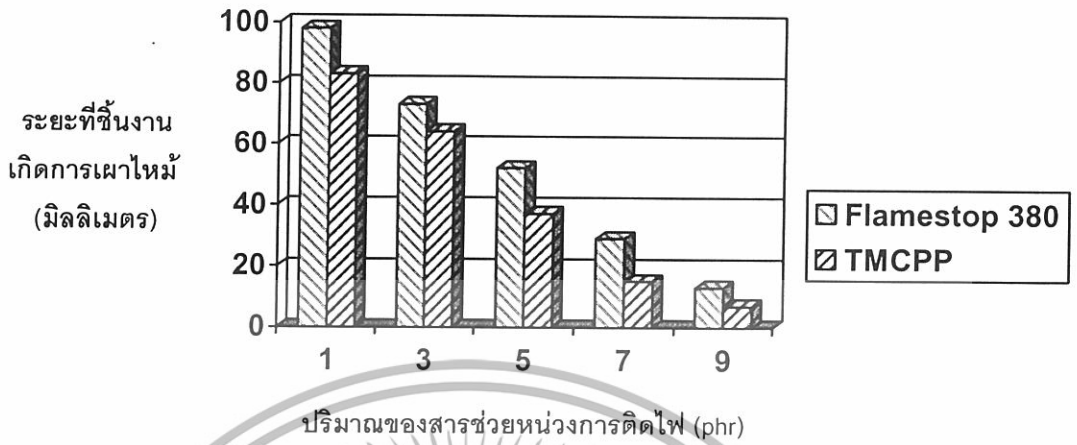
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การเผาไหม้ของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง

ชนิดของสาร ช่วยหน่วงการ ติดไฟ	ปริมาณของสาร ช่วยหน่วงการ ติดไฟ (phr)	ระยะทางที่ ชั้นงานเกิดการ เผาไหม้ (เซนติเมตร)	ระยะเวลาที่ ชั้นงานเกิดการ ติดไฟ (วินาที)	ลักษณะการ ดับไฟ
Flamestop 380	1	9.8	13	ดับไฟได้เอง
	3	7.3	10	ดับไฟได้เอง
	5	5.2	6	ดับไฟได้เอง
	7	2.9	4	ดับไฟได้เอง
	9	1.3	3	ดับไฟได้เอง
TMCPP	1	8.3	11	ดับไฟได้เอง
	3	6.4	9	ดับไฟได้เอง
	5	3.7	5	ดับไฟได้เอง
	7	1.5	4	ดับไฟได้เอง
	9	0.7	2	ดับไฟได้เอง
Non-flame retardant		เกิดการเผาไหม้ หมดทั้งชิ้นงาน	17	-

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่เกิดการติดไฟของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งกับชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ จะได้กราฟดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่เกิดการติดไฟของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งกับชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ

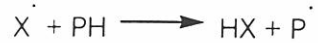
จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.8 จะเห็นว่า TMCPP ซึ่งเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟและมีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ สามารถยับยั้งการติดไฟได้ดีกว่า Flamestop 380 ที่เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟที่ไม่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ นอกจากนี้สารช่วยหน่วงการติดไฟยังมีผลต่ออัตราการเผาไหม้ของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง โดย TMCPP มีอัตราการเผาไหม้ที่ช้ากว่า Flamestop 380 เมื่อเปรียบเทียบในปริมาณที่เท่ากัน [3] โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้ของ Flamestop 380 เป็นดังนี้



ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้ของ TMCPP เป็นดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ทั้งนี้ เป็นผลเนื่องมาจาก TMCPP มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบที่สารบรรณช่วยหน่วยงานติดตั้งไฟ
 ใต้ดี โดยเมื่อไฟเกิดการเผาไหม้จะเกิดทั้งก๊าซคลอรีนและน้ำขึ้น ซึ่งจะทำหน้าที่ปกคลุมไฟเพื่อ
 ไม่ให้ออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศเข้ามาทำปฏิกิริยาเผาไหม้ได้ ส่วน Flamestop 380 จะมีแต่น้ำ
 เกิดขึ้นเพียงอย่างเดียว ทำให้มีประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ความหนาแน่น สมบัติการเปลี่ยนรูป และลักษณะของเซลล์ของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งไม่ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ โดยความหนาแน่นของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งขึ้นอยู่กับปริมาณของสารช่วยให้เกิดฟอง (Blowing agent) และการปั่นกววนเพื่อให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นเกิดการกระจายตัว
2. โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ TMCPP มีผลเพิ่มแรงกดอัดเด่นกว่า Flamestop 380 เนื่องจาก TMCPP สามารถผสมเข้ากับโฟมได้ดีกว่า เพราะมีอะตอมของคลอรีนที่กระจายตัวเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโครงสร้างของโฟมได้ดีกว่า นอกจากนี้ TMCPP ยังมีมวลโมเลกุลสูงกว่า Flamestop 380
3. ค่าการนำความร้อนของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ Flamestop 380 และ TMCPP มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ถึงแม้จะมีการเพิ่มปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ แสดงว่าชนิดและปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟไม่มีผลต่อค่าการนำความร้อนของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง
4. โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ TMCPP สามารถหน่วงการติดไฟได้ดีกว่า และมีอัตราการเผาไหม้ที่ช้ากว่าโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ Flamestop 380 และเมื่อมีปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟเพิ่มขึ้นส่งผลให้การหน่วงการติดไฟดีขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการปรับปรุงสมบัติการหน่วงการติดไฟของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งให้เกิดการหน่วงการติดไฟที่ดีขึ้น ลดต้นทุนการผลิต และช่วยลดควันพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้สารช่วยหน่วงการติดไฟที่มีคลอรีนและไม่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบควบคู่กัน
2. ถ้านำชิ้นงานไปใช้ในอุตสาหกรรมจริงควรทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิค Reaction Injection Molding (RIM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ในการทดสอบสมบัติบางประการ เช่น การทดสอบสมบัติการหน่วงไฟ สามารถทดสอบได้หลายวิธี จึงควรเลือกชนิดการทดสอบให้เหมาะสมกับสภาวะในการใช้งานจริง เพื่อให้ได้ผลที่น่าเชื่อถือเมื่อมีการนำไปใช้งาน
4. อาจมีการเปลี่ยนชนิดของพอลิออลเป็นชนิดที่ใช้ในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นแทน โดยใช้สภาวะเดียวกันกับการทดลองนี้ เพื่อสังเกตว่าสารช่วยหน่วงการติดไฟมีผลต่อโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นอย่างไร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. น้ำทิพย์ เมธีธำรา, ปราณีย์ แสงมณีพร. 2544. การศึกษาสารถ่วงการติดไฟที่ไม่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบสำหรับโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง. ปริญญาโท. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2. พลชีพ ลี้มพงษ์, อำนวยศักดิ์ ลามวิบูลย์สุข. 2541. การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่บริสุทธิ์และมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม. โครงการพิเศษ. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
3. A.F. Grand and C.A. Wilkie, Fire Retardancy of polymeric Materials, Marcel, New York, 2000
4. www.specialchem.com Are your additives in synergy ? (When 1+1 = 3)
5. J.L. Rivera-Armenta, Th. Heinze, and A.M. Mendoza-Martinez. 2004. New polyurethane foams modified with cellulose derivatives. European Polymer Journal. 40: 2803-2812.
6. Jackson, M.L., Park, A., Easterle, Rochester, and Mich. 1993. Energy absorbing Water Blown, Rigid Polyurethane Foam Articles. U. S. Patent no.5,187,204.
7. Coppola, P.J., and Conn, M. 1978. Semi-Rigid Polyurethane Foam Used in Packaging. U.S. Patent no. 4,087,389.
8. Gy.Bertalan, Gy. Marosi, P. Anna, I. Ravadits, I. Csontos and A. Toth, Role of interface Modification in Filled and Flame-Retardant Polymer System, Solid State Ionic, 141-142, 211-215, 2001
9. P.A. Ubriajara, L.L. YVisconte, J.Gallo and R.C.R. Nines, Flame retardancy in Thermoplastic Polyurethane Elastomers (TPU) with Mica and Aluminium trihydrate (ATH), Polymer Degradation and stability, 2000, Volume69, Issue3, 257-260
10. Alcan Chemicals, Flame retardant: Some new Development, Plastics Additives & Compounding, May 2000, 24-27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. Akzo Nobel Phosphorus Chemicals, Flame Retardant Additives, Plastic Additives & Compounding, May 2000, 20-23
12. C.Shin-Husan and W. WU-Kou, The dynamic Flammability and Toxicity Of Magnesium Hydroxide Filled Intumecent Fire Retardant Polypropylene, J.Appl Polym Sci, 1998, Vol.67, 989-995
13. A. Torikai, T. Kobatake and F. Okisaki, Photodegradation of Polystyrene Containing Flame Retardant:Effect of Chemical Structure of the Additives on the Efficiency of Degradation, J.Appl Polym Sci, 1998, Vol.67, 1293-1300
14. N. Shigeiko, M. Fumi and H. Toshimasa, Durable Flame-Retardant Finished Cotton Fabrics Characterized by Thermal Degradation Behaviors, J. Appl Polym Sci, 1998, Vol.71, 975-987
15. P.P. Lizymol and T.Sabu, Flame Retardant Properties of Binary Blends:A Comparison of Miscible and Immiscible Blends, Polymer Degradation and Stability, 1996, Vol.57, 187-189
16. พัชรินทร์ หอเพชรรุ่งเรือง, วนิดา อัครเลิศตระกูล. 2544 กระบวนการผลิตเส้นใยจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่และผลของสารช่วยหน่วงการติดไฟ. วิทยานิพนธ์. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
17. L.Nelson, Fire and Polymers Hazards Identification and Preventing, Florida Institute of Technology, 1989
18. Meinecke, E.A.; Clark, R.C. Mechanical Properties of Polymeric Foams; technomic Publishing Co.; Westport, CT, 1973.
19. C.S. Read, Polyurethane/Poly [bis(carboxylatophenoxy)phosphazene] blends and Their Potential as Flame-Retardant Materials. Polym. Eng.and Sci. 2000, 40, 465
20. www.specialchem.com Halogen – free fire retardancy : Overview and new approaches (Part I)
21. www.specialchem.com Halogen – free fire retardancy : Overview and new approaches (Part II)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณค่าไฮดรอกซิลของพอลิออล ("Hydroxyl value", OHV)

ค่าไฮดรอกซิลของพอลิออล ("Hydroxyl value", OHV) เป็นค่าที่ใช้วัดความเข้มข้นของไอโซไซยาเนตที่ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลต่อน้ำหนักของพอลิออล สามารถนิยามด้วย จำนวนมิลลิกรัมของโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ส่วนด้วย 1 กรัมของพอลิออล แสดงได้ดังสมการ

ค่าไฮดรอกซิล (OHV) = จำนวนมิลลิกรัมของ KOH ซึ่งสมมูลกับ 1 กรัมของพอลิออล

$$\text{OHV} = \frac{\text{ฟังก์ชันนัลลิตี} \times 56.1 \times 1000}{\text{น้ำหนักโมเลกุล}}$$

ดังนั้นการทำโพลีเอธิเรทชนิดแข็ง จึงที่สำคัญอย่างยิ่ง และจำเป็นต้องทราบก็คือชนิดของพอลิออล ซึ่งโดยปกติมักจะแสดงค่าของไฮดรอกซิล และ น้ำหนักโมเลกุล เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณของไอโซไซยาเนตเพื่อใช้ทำปฏิกิริยาสำหรับสูตรการผลิตโพลีเอธิเรทชนิดแข็ง

ตัวอย่างการคำนวณค่าดัชนีไอโซไซยาเนต (Isocyanate Index)

การคำนวณค่าดัชนีไอโซไซยาเนต (Isocyanate Index) เป็นค่าที่บอกถึงความต้องการของไอโซไซยาเนตเพื่อใช้ทำปฏิกิริยาในสัดส่วนจำนวนโมลกับพอลิออล, น้ำ และตัวเชื่อมโยง มักจะอ้างอิงในดัชนี 100

$$\text{ดัชนีไอโซไซยาเนต} = \frac{\text{จำนวนโมลเทียบเท่าไอโซไซยาเนต}}{\text{จำนวนโมลเทียบเท่าพอลิออล}} \times 100$$

การคำนวณหาปริมาณการใช้ไอโซไซยาเนตสำหรับการผลิตสำหรับการผลิตโพลีเอธิเรทชนิดแข็งสามารถคำนวณหาปริมาณการใช้โทลูอีนไดไอโซไซยาเนตได้ดังนี้

$$\text{TDI Requirement @ 100 Index (Y)} = \text{H}_2\text{O pbw} \times 9.667$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ \text{polyol pbw} \times \text{OHV} \times 0.00155$$

$$+ \text{X-Linker pbw} \times \text{OHV} \times 0.00155$$

$$\text{TDI Requirement} = (\text{isocyanat index} \times Y) / 100$$

* หมายเหตุ pbw = สัดส่วนของไอโซไซยาที่ ใช้ทำปฏิกิริยากับพอลิออลและสารเติมแต่งคิดเป็น 100 ส่วนโดยน้ำหนัก (parts by weight : pbw)

X-Linker = ค่าไฮดรอกซิลของสารเติมแต่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

Material Safety Data Sheet ของสารช่วยให้เกิดฟอง (141b)

General

Synonyms: dichlorofluoroethane, HCFC-141b, Freon 141b

Molecular formula: $C_2H_3Cl_2F$

CAS No: 1717-00-6

EINECS No:

Physical data

Appearance: colourless liquid

Melting point:

Boiling point: 32 C

Vapour density:

Vapour pressure: 707 mm.Hg at 25 C

Density ($g\ cm^{-3}$): 1.23

Flash point:

Explosion limits:

Autoignition temperature:

Water solubility: 2.6g/l at 25 C

Stability

Stable.

Toxicology

May act as an asphyxiant in high concentration.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Risk phrases

(The meaning of any risk phrases which appear in this section is given [here](#).)

R59.

Transport information

Non-hazardous for road, air and sea freight.

Personal protection

Adequate ventilation.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

Material Safety Data Sheet ของสารช่วยหน่วงการติดไฟ Flamestop 380

SAFETY DATA SHEET

According to EC-directive 2001/58/EC

FLAMSTOP 380

1. IDENTIFICATION OF THE SUBSTANCE/PREPARATION AND OF THE COMPANY/UNDERTAKING

Product label name Diethyl N,N-bis(2-hydroxyethyl)aminomethylphosphonate

Supplier JAK Chemical International

Crawford Post Office,

P.O.Box 504,

Singapore 911901

Tel.: +65 64 67 87 50

Fax: +65 64 66 02 82

Emergency telephone +65 64 67 87 50

Intended use flame retardant

2. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

This product is to be considered as a substance in conformance to EC directives Information on hazardous ingredients

Chemical description Diethyl N,N-bis(2-

hydroxyethyl)aminomethylphosphonate Composition / information on ingredients

Number % w/w CAS-number Chemical name

1 70 - 90 2781-11-5 Diethyl (N,N-bis[2-hydroxyethyl]amino)methanephosphonate

Number EC-number Annex-1 number Symbol(s) Risk-phrase(s)

1 220-482-8 none none

3. HAZARDS IDENTIFICATION

Not classified as hazardous according to the EEC Dangerous Substance Directive and Dangerous Preparation Directive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. FIRST AID MEASURES

Symptoms and effects No typical symptoms and effects

known First aid

General Always seek medical advice in case of significant exposure.

Inhalation Move to fresh air, rest, half upright position, loosen clothing. Oxygen or artificial respiration if there is difficulty in breathing.

Skin Wash immediately with soap and water. Remove contaminated clothing/shoes.

Launder clothes before reuse.

Eye Rinse immediately and as long as possible with plenty of water. Eyelids should be held away from the eyeball to ensure thorough rinsing. Seek medical advice if irritation persists.

Ingestion Rinse mouth, give water to drink.

Advice to physician No additional information available.

5. FIRE-FIGHTING MEASURES

Extinguishing media waterspray, Carbon dioxide, powder.

Unsuitable extinguishing media none known.

Special exposure hazards May emit toxic and irritating fumes under fire conditions.

The product is selfextinguishing once the source of ignition is removed.

Hazardous decomposition/ not determined.

combustion products

Protective equipment Wear self contained breathing apparatus

6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

Personal precautions Avoid contact with eyes. For personal protection see Section 8.

Environmental precautions Do not empty into drains.

Methods for cleaning up Collect as much as possible in a clean container for

(preferable) reuse or

disposal. Cover the remainder with inert absorbent (e.g. vermiculite) for

disposal.

Page 1

SAFETY DATA SHEET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

According to EC-directive 2001/58/EC

FLMASTOP 380

7. HANDLING AND STORAGE

Handling Use only in well-ventilated areas. Avoid inhalation. When using do not eat or drink.

Fire and explosion prevention When using do not smoke.

Storage requirements Keep container tightly closed in a cool place. Keep container in a well-ventilated place.

8. EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

Engineering controls Ensure good ventilation and local exhaustion of the working area.

Exposure limits No exposure limit has been established

Personal protection

Respiratory

Hand

Eye

Skin and body

9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

liquid

amber

not determined

not determined

not determined

67 °C (Pensky-Martens, closed cup)

not determined

approx. 388 °C

not applicable

not applicable

not relevant

25 Pa (20 °C)

1160 kg/m³ (25 °C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

not applicable

Soluble. Hydrolyses slowly under weak alkaline or acidic conditions

not determined

acid number 1.0 mg KOH/g (ASTM-D 974)

not determined

not determined

170 mPa.s (25 °C)

not applicable

not applicable

not applicable

10. STABILITY AND REACTIVITY

Stability Decomposition under effect of heating. Reaction with strong oxidizing agents.

Conditions to avoid heat.

Materials to avoid alkalis.

Hazardous decomposition above 125 °C: acids, ethanol

products

Page 2

Appearance

Colour

Odour

Boilin point/range

Melting point/range

Flash point

Flammability

Autoignition temperature

Explosive properties

Explosion limits

Oxidizing properties

Vapour pressure

Density

Bulk density

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Solubility in water

Solubility in other solvents

pH value

Partition coefficient

n-octanol/water

Relative vapour density

Viscosity

Active oxygen content

Peroxide content

SADT

In case of insufficient ventilation wear suitable respiratory equipment.

For permanent (>480 minutes), full contact use, 100% nitrile gloves conforming to EN 374,

e.g. KCL Dermatril 740 are recommended. If used under conditions other than given above it

is recommended that a supplier of CE approved gloves is contacted. These recommendations

are only applicable to the chemical as supplied by Borghi S.P.A

Wear eye/face protection.

Wear suitable protective clothing.

SAFETY DATA SHEET

According to EC-directive 2001/58/EC

FLAMSTOP 380

11. TOXICOLOGICAL INFORMATION

rabbit (4 hours): Non-irritating

Mildly irritating

Ames test: Not mutagenic

in vitro cell gene mutation test (in

12. ECOLOGICAL INFORMATION

ADR/RID item no. not relevant / not relevant

ADR/RID packing group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Substance Identification No. not relevant

UN number none

not restricted

not relevant

not relevant

no

not relevant

Class

UN number

MFAG

not restricted

none

not relevant

not restricted

UN number

Packing group

none

not relevant

Name

Acute toxicity

Oral LD50

Dermal LD50

Irritation

Skin

Eye

Genotoxicity

Diethyl (N,N-bis[2-hydroxyethyl]amino)methanephosphonate

rat: >5000 mg/kg

rabbit: >2000 mg/kg

mouse lymphoma cells): mutagenic

Name Diethyl (N,N-bis[2-hydroxyethyl]amino)methanephosphonate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ให้เดินทางไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ecotoxicity

fish 96h-LC50: >10.000 mg/l (*Oncorhynchus mykiss*)

bacteria Activated sludge respiration inhibition test EC50: >10.000 mg/l

Fate

Degradation Biotic Not readily biodegradable

13. DISPOSAL CONSIDERATIONS

Product According to local regulations (most probably controlled incineration).

Contaminated packaging According to local regulations.

14. TRANSPORT INFORMATION

Land transport (ADR/ RID)

ADR class not restricted

RID class not restricted

Hazard Identification No. not restricted

TREM-Card not relevant

Proper Shipping Name not relevant

Sea transport (IMDG-code/ IMO)

IMO/IMDG code

Packing group

EMS

Marine pollutant

Proper Shipping Name

Air transport (ICAO-TI/ IATA-DGR)

ICAO-TI/IATA-DGR

Class

Proper Shipping Name not relevant

15. REGULATORY INFORMATION

Chemical description Diethyl N,N-bis(2-hydroxyethyl)aminomethylphosphonate

Labelling according to EC directives

Symbol(s) none

Wassergefährdungsklasse 1 (VwVwS Anhang 3)

(WGK)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. OTHER INFORMATION

This information only concerns the above mentioned product and does not need to be valid if used with other product(s) or in any process. The information is to our best present knowledge correct and complete and is given in good faith but without warranty. It remains the user's own responsibility to make sure that the information is appropriate and complete for his special use of this product.

R-phrases information

Page 3

SAFETY DATA SHEET

According to EC-directive 2001/58/EC

FLAMSTOP 380

Chemical name Risk-phrase(s)

Diethyl none

NONE

(N, N-bis[2-hydroxyethyl]amino)meth
anephosphonate



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

Material Safety Data Sheet ของสารช่วยหน่วงการติดไฟ TMCPP



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2 - Physical properties

Property	Tris (2-chloroethyl) phosphate (TCEP)	Tris (1-chloro-2-propyl) phosphate (TCPP)	Tris (1,3-dichloro-2-propyl) phosphate (TDCPP)	Tris (2-chloro-1-propyl) phosphate	Tris (2,3-dichloro-1-propyl) phosphate
Molecule weight	285.5	327.6	430.9	NA	NA
Boiling point	145 °C (@66 Pa or 0.5 mm Hg)	NA	200 °C (@533 Pa or 4 mm Hg)	Decomposes @ 220 °C	NA
Melting point	NA (pour point approx. -70 °C)	-40 °C	27 °C	-65 °C	NA
Specific gravity	1.42	1.290 (@25 °C)	1.520 (@25 °C)	1.297 (@25 °C)	1.52
Water solubility	8 g/L (@20 °C)	1.6 g/L	0.11 g/L	1.2 g/L	0.053 g/L
Viscosity	38 mPa (@25 °C)	71 mPa (@25 °C)	1800 mPa (@25 °C)	NA	71 mPa (@25 °C)
Vapour pressure	8 Pa (@25 °C) [‡]	ND [‡]	1.3 Pa (@30 °C) ^{‡*}	< 13 Pa	NA
Henrys Law Constants	<1300 Pa [‡]	<260 Pa [‡]	5.1 Pa m ³ /mol	NA	NA
Partition coefficient to octanol/water (Log K _{ow})	1.7 [*]	2.59 [*]	3.8 [*]	NA	2.67
Partition coefficient to organic carbon ^a (Log K _{oc})	2.3	2.8	3.4	NA	NA
Flash point [*]	252 °C	218 °C	252 °C	220 °C	NA

Values at 20 °C unless otherwise stated. * Cleveland open cup (C.O.C.)[‡] source from Kemi report (1994) [†] source from IPCS report (1998)

[‡] Henrys Law Constant (H) calculated from the measured vapour pressure (from Kemi, 1994) and water solubility using $H = MW \times \text{Vapour pressure in Pascals} / \text{Water solubility in grams/cubic metre}$.

^{*} Log K_{oc} estimated from Quantitative Structure Activity Relationship from equation 4-8 of Lyman (Lyman *et al*, 1996) i.e. $\text{Log Koc} = 0.544 \times \text{Log Pow} + 1.377$. ND, not detectable; NA, not available.

Table 1 - Chemical identity of triphosphates (Cont.)

Chemical Identity	Tris (2-chloroethyl) phosphate	Tris (1-chloro-2-propyl) phosphate	Tris (1,3-dichloro-2-propyl) phosphate*	Tris (2-chloro-1-propyl) phosphate	Tris (2,3-dichloro-1-propyl) phosphate	Tris(3-chloro-1-propyl) phosphate
Molecular Formula	$C_6H_{12}Cl_2O_3P_4$	$C_9H_{18}Cl_2O_3P_4$	$C_9H_{15}Cl_3O_3P_4$	$C_9H_{18}Cl_2O_3P_4$	$C_9H_{15}Cl_4O_3P_4$	$C_9H_{18}Cl_3O_3P_4$
Structural Formula	$(ClCH_2CH_2O)_3P=O$	$(CH_3(CH_2)CHO)_3P=O$	$(ClCH_2)_2(CH_2)_3P=O$	$(CH_3CH_2CH_2O)_3P=O$	$(CH_2ClCH_2O)_3P=O$	$(ClCH_2CH_2O)_3P=O$
Molecular Weight	285.5	327.5	431	327.5	431	327.5
Trade Names	3CF Amgard Antiblaze 80 Antiblaze TCEP CEF CLP Disflamoll TCA Fyrol CEF Niax 3CF Niax Flame Retardant 3CF TCEP	Amgard TMCP Antiblaze 80 Fyrol PCF TCEP TMPP	Antiblaze 195 CRP FR 10 FR 10 (phosphate) Fyrol FR-2 PF 38 PF 38/3 TDCPP	Amgard TMCP Antiblaze 80 AP 33 Noinen R 921 Pelron 9338 TMCPp	Celluflex FR 2 Fyrol 32B Pelron 9338	NA

* Tris (2,3-dichloro-1-propyl) phosphate is present as an impurity in the commercial product.
NA, not available