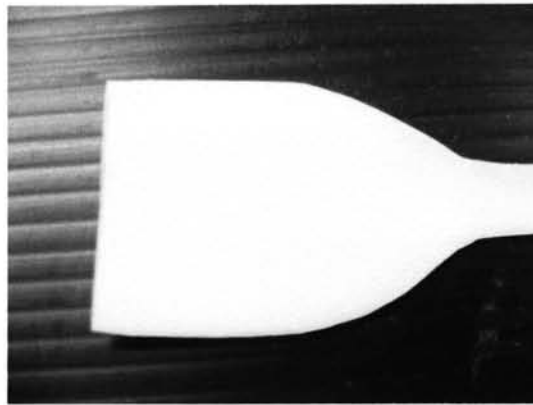


## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ชิ้นงานยางธรรมชาติที่เตรียมได้

ในงานวิจัยนี้ น้ำยางธรรมชาติถูกนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยวิธีการหล่อแบบ (casting) ดังนั้นสารเคมีที่ใช้ในการวัลคาไนซ์และสารตัวเติมอื่นๆ ที่ใช้ในสูตรการผสมยางจึงต้องถูกทำให้อยู่ในรูปดีสเพอร์ชันก่อนจึงจะสามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าสารเคมีดังกล่าวจะถูกทำให้อยู่ในรูปดีสเพอร์ชันโดยใช้สารช่วยกระจายตัวแล้ว แต่ถ้าปริมาณของสารที่ใช้มากเกินไป พบว่าในขณะที่กำลังปล่อยให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์นั้นสารเหล่านี้บางส่วนจะตกตะกอนแยกส่วนอยู่บริเวณด้านล่างของแม่แบบ ทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 จึงทำให้ปริมาณการใช้สารตัวเติมโดยเฉพาะสารหน่วงไฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณไม่มากนัก คือไม่เกิน 7 phr ส่วนรูปที่ 4.2 แสดงชิ้นงานทดสอบที่ไม่ใช้และใช้สารหน่วงไฟประเภทต่างๆ



รูปที่ 4.1 ลักษณะของชิ้นงานที่มีสารตัวเติมแยกตัวออกมา

ชิ้นงานที่เตรียมขึ้นสามารถแบ่งเป็นกลุ่มต่างๆ ได้ดังนี้

- 1) ชิ้นงานที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ คือสูตรที่ใช้สัญลักษณ์เป็น B ใช้สำหรับเป็นสูตรเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆ
- 2) กลุ่มที่ใช้แต่สารตัวเติมเพียงอย่างเดียวไม่ได้ใช้สารหน่วงไฟ คือสูตร C M และ S เพื่อใช้ศึกษาผลของสารตัวเติมต่อสมบัติต่างๆ

3) กลุ่มที่ใช้แต่สารหน่วงไฟเพียงอย่างเดียวไม่ได้ใช้สารตัวเติม คือสูตร A3 Z3 A7 และ Z7 เพื่อใช้ศึกษาผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติต่างๆ

4) กลุ่มที่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ คือ สูตร A3C A3M A3S Z3C Z3M Z3S A7C A7M A7S Z7C Z7M และ Z7S เพื่อใช้ศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมและสารหน่วงไฟร่วมกัน

สารตัวเติม สารหน่วงไฟ		0 phr	C-Black	Silica	MMT
			3 phr	3 phr	3 phr
0 phr					
Aluminium hydroxide	3 phr				
	7 phr				
Zinc Borate	3 phr				
	7 phr				

รูปที่ 4.2 ลักษณะของชิ้นงานที่ไม่ใช้และใช้สารตัวเติม/สารหน่วงไฟ

#### 4.2 Limiting Oxygen Index

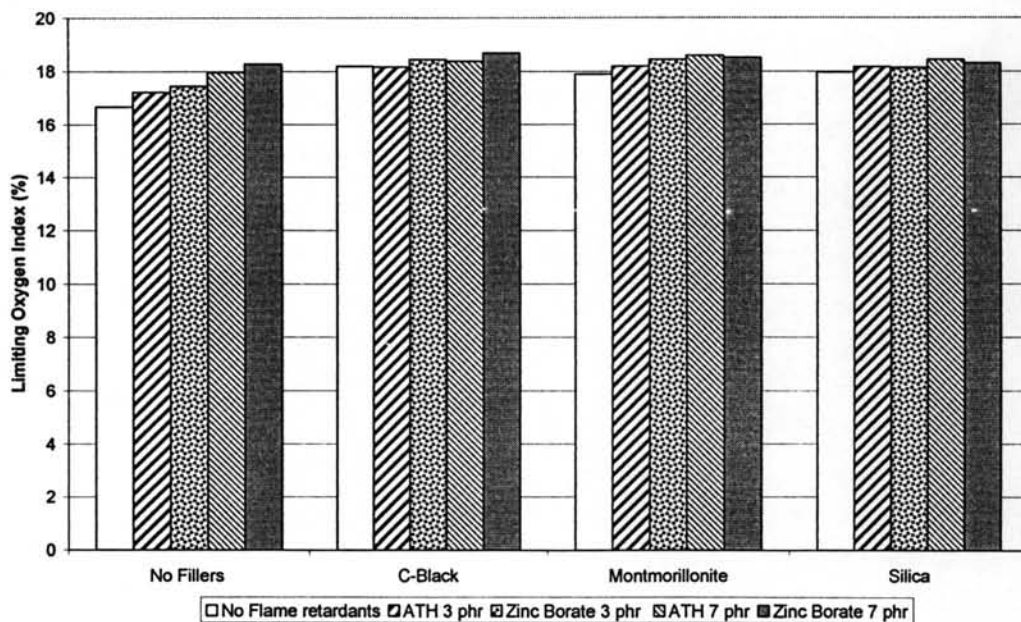
ค่า Limiting Oxygen Index หรือค่า LOI เป็นดัชนีสำคัญที่ใช้ในการตรวจสอบความสามารถในการติดไฟของวัสดุ วัสดุที่มีค่า LOI น้อยกว่า 21 วัสดุนั้นจะติดไฟและเกิดการเผาไหม้ได้ง่ายในบรรยากาศ แต่หากวัสดุมีค่า LOI มากกว่า 21 วัสดุนั้นจะไม่ติดไฟง่ายในบรรยากาศ และเป็นที่ยอมรับกันว่าวัสดุที่มีค่า LOI มากกว่า 26 นับเป็นวัสดุที่สามารถต้านไฟได้ดี

จากรูปที่ 4.3 แสดงค่า LOI ของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้และใช้สารตัวเติม/สารหน่วงไฟ พบว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟมีค่า LOI ต่ำที่สุดคือ 16.7 แสดงว่าชิ้นงานนั้นสามารถติดไฟและเกิดการเผาไหม้ได้ง่ายมากในบรรยากาศ

สำหรับกลุ่มของชิ้นงานที่ใช้แต่สารตัวเติมเพียงอย่างเดียวแต่ไม่ได้ใช้สารหน่วงไฟ พบว่าการใช้สารตัวเติม ได้แก่ เชม่าดำ หรือมอนต์มอริลโลไนต์ หรือซิลิกา มีผลทำให้ชิ้นงานค่า LOI เท่ากับ 18.2 หรือ 18.0 หรือ 18.0 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณสารตัวเติมที่ใส่ลงไปทำให้ปริมาณของยางธรรมชาติที่ติดไฟได้ง่ายลดลงจากเดิม จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีค่า LOI เพิ่มขึ้นนั่นเอง

ในขณะที่กลุ่มของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้แต่สารหน่วงไฟเพียงอย่างเดียวไม่ได้ใช้สารตัวเติมมีค่า LOI อยู่ในช่วง 17.2 ถึง 18.3 ซึ่งสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ และ LOI เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟที่ใช้พบว่าชิ้นงานที่ใช้ซิงก์บอเร็ตมีค่า LOI สูงกว่าชิ้นงานที่ใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่เท่ากัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มของชิ้นงานที่ใช้แต่สารตัวเติมเพียงอย่างเดียวแต่ไม่ได้ใช้สารหน่วงไฟพบว่าการใช้สารหน่วงไฟในปริมาณน้อยเพียง 3 phr มีผลต่อการหน่วงไฟน้อยกว่าการใช้สารตัวเติม ถึงแม้จะใช้สารหน่วงไฟในปริมาณที่สูงขึ้นเท่ากับ 7 phr ชิ้นงานก็ยังมีค่า LOI ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ใช้แต่สารตัวเติมเพียงอย่างเดียว

และเช่นเดียวกันสำหรับกลุ่มของชิ้นงานที่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ พบว่าชิ้นงานมีค่า LOI อยู่ในช่วง 18.2 ถึง 18.7 ซึ่งสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ แต่จะมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าชิ้นงานที่ใช้แต่สารตัวเติมเพียงอย่างเดียวและชิ้นงานที่ใช้แต่สารหน่วงไฟเพียงอย่างเดียว กล่าวคือการใช้สารตัวเติมร่วมกับสารหน่วงไฟเป็นการเสริมให้วัสดุติดไฟได้ยากขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามสารตัวเติมจะไม่เสริมสมบัติดังกล่าวถ้าใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณต่ำเพียง 3 phr สารตัวเติมชนิดเขม่าดิน มอนต์มอริลโลไนต์ และซิลิกา พบว่าสามารถเสริมให้วัสดุติดไฟได้ใกล้เคียงกัน

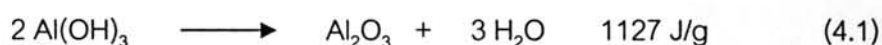


รูปที่ 4.3 ค่า LOI ของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้และใช้สารตัวเติม/สารหน่วงไฟ

โดยสรุปแล้วถึงแม้ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้และใช้สารตัวเติม/สารหน่วงไฟที่เตรียมได้ทุกสูตรมีค่า LOI สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ แต่ค่า LOI มีค่า

น้อยกว่า 21 แสดงว่าปริมาณของสารหน่วงไฟทั้งอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และซิงก์บอเรตที่ใช้มีปริมาณเพียง 3-7 phr ซึ่งน้อยเกินกว่าที่สารหน่วงไฟจะมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟได้ดี

จากผลของค่า LOI ของชิ้นงานต่างๆ ที่กล่าวมาอธิบายได้ว่าอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์นั้น เมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ถึง 450 องศาเซลเซียส และขจัดน้ำออกมา 34 % โดยน้ำหนัก ซึ่งการขจัดน้ำดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนดังสมการที่ 4.1 ความร้อนที่ถูกดึงออกมานี้จะทำให้ชิ้นงานสลายตัวช้าลง และยังคงมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิติดไฟ (ignition temperature) ของชิ้นงานนั้น นอกจากนี้เมื่ออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์สลายตัวจะเกิดสารออกไซด์ตกค้าง (oxide residue) ได้แก่  $Al_2O_3$  ที่มีความจุความร้อนสูง (high heat capacity) ซึ่งจะปลดพลังงานความร้อนที่จะถูกนำไปใช้ในการสลายตัวของชิ้นงาน และยังเสริมให้เกิดซาร์ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้ออกซิเจนสัมผัสผิวของชิ้นงานได้ ด้วยเหตุนี้ชิ้นงานที่ใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จึงติดไฟได้ยากกว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้และใช้สารตัวเติม/สารหน่วงไฟ และในระหว่างที่เกิดการเผาไหม้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ได้ขจัดน้ำออกมาเจือจางแก๊สที่ติดไฟด้วย จึงทำให้ชิ้นงานที่ใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีค่า LOI เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ จะมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีเมื่อใส่ในปริมาณสูงกว่า 40 - 70% [26] ดังนั้นชิ้นงานที่มีปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์น้อยเพียง 3-7% ถึงแม้จะมีค่า LOI สูงกว่าชิ้นงานยางธรรมชาติแต่ก็ยังสามารถติดไฟในบรรยากาศได้ง่ายนั่นเอง [10, 12, 14, 17-28]



ในทำนองเดียวกัน ซิงก์บอเรตที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์นั้น เมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียสถึง 450 องศาเซลเซียส และขจัดน้ำออกมา 15% โดยน้ำหนัก ซึ่งการขจัดน้ำดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนและเสริมให้เกิดซาร์ที่มีลักษณะเป็นโฟม นอกจากนี้เมื่อซิงก์บอเรตสลายตัวจะเกิดสารออกไซด์ตกค้าง (oxide residue) ได้แก่  $B_2O_3$  ซึ่งเป็นแก้วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำทำให้ซาร์ที่เกิดขึ้นมีเสถียรภาพที่ดี ปกป้องไม่ให้ออกซิเจนสัมผัสผิวของชิ้นงานได้ [27] ด้วยเหตุนี้ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้สารหน่วงไฟซิงก์บอเรตจึงมีค่า LOI สูงกว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้และใช้สารตัวเติม/สารหน่วงไฟ ติดไฟได้ยากกว่า แต่ก็ยังสามารถติดไฟในบรรยากาศได้ง่ายเนื่องจากเราใช้ซิงก์บอเรตในปริมาณที่น้อยเพียง 3-7 phr เท่านั้น เพราะหากใช้ในปริมาณมากกว่านี้จะทำให้ไม่สามารถเตรียมชิ้นงานด้วยวิธีการหล่อแบบได้

### 4.3 พฤติกรรมการติดไฟและการลามไฟ





























การศึกษาพฤติกรรมการติดไฟและอัตราการลามไฟในแนว 45 องศาด้วยเครื่องทดสอบ Atlas 45° automatic flammability tester เป็นการทดสอบเพื่อประเมินความปลอดภัยจากอัคคีภัยและความสามารถในการหน่วงไฟของชิ้นงาน

รูปที่ 4.4 แสดงภาพของการลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้และใช้สารตัวเติม/สารหน่วงไฟ จะเห็นว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ (B) เมื่อนำมาจุดไฟจะติดไฟทันที และเกิดการลามไฟอย่างรุนแรงและรวดเร็ว พร้อมทั้งให้ควันดำหนามาก และมีกลิ่นเหม็น หากสังเกตให้ดีแล้วจะเห็นว่าหลังจากชิ้นงานติดไฟแล้วจะหลอมละลาย ส่วนที่หลอมละลายมีลักษณะเหมือนยางมะตอยซึ่งยังคงติดไฟอยู่และหยดลงพื้นด้านล่าง ซึ่งพบว่ายางธรรมชาติที่หลอมละลายและหยดลงพื้นที่เป็นวัสดุที่ติดไฟได้เช่นกระดาษทำให้วัสดุนั้นเกิดการลุกไหม้ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวนับเป็นอันตรายอย่างยิ่ง





























ในขณะที่ชิ้นงานยางธรรมชาติที่เติมแต่งด้วยสารหน่วงไฟทุกสูตรก่อนการบ่มเร่ง จะแสดงพฤติกรรมการหน่วงไฟได้ดีกว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ กล่าวคือชิ้นงานเริ่มติดไฟค่อนข้างช้ากว่า และมีอัตราการลามไฟที่ช้ากว่า ปริมาณควันที่เกิดขึ้นเบาบางกว่าในช่วงแรก ทั้งนี้เนื่องจากสารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์ที่ใช้คืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ สามารถลดปริมาณของควันที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้ให้น้อยลงได้โดย สารออกไซด์ตกค้าง (oxide residue) ที่เกิดจากการสลายตัวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะดูดซับสาร carbonaceous ไว้ที่พื้นผิวของชิ้นงาน และต่อมาสาร carbonaceous ก็จะมีการออกซิเดชันกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะทำให้เกิดข้อจำกัดในการเกิดเขม่าควัน

อย่างไรก็ตามเมื่อชิ้นงานติดไฟแล้วก็ยังคงเกิดการหลอมละลายและหยดลงพื้นด้านล่างและทำให้วัสดุที่ติดไฟเกิดการลุกไหม้ได้เช่นเดียวกัน แต่พื้นที่ที่เกิดการเผาไหม้มีบริเวณที่เล็กกว่า นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการหน่วงการเริ่มติดไฟและการลามไฟของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซิงก์บอเรตและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้น จากการสังเกตยังพบอีกว่าชิ้นงานที่เติมแต่งด้วยสารหน่วงไฟทั้งสองชนิดเมื่อเกิดการติดไฟจะมีลักษณะเหมือนโฟม เนื่องจากความร้อนทำให้ซิงก์บอเรตและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์สลายตัวแล้วขจัดน้ำออกมาในระบบเพื่อช่วยเจือจางแก๊สที่ติดไฟง่ายให้มีปริมาณลดลง [20] และสารออกไซด์ตกค้างที่เกิดจากการสลายตัวของสารหน่วงไฟทั้งสองชนิดจะส่งเสริมการเกิดซาร์ซึ่งจะทำให้ชั้นของซาร์ปกคลุมผิวของยางธรรมชาติป้องกันไม่ให้เปลวไฟและแก๊สออกซิเจนสัมผัสผิวของชิ้นงานได้



























สูตร \ เวลา	5 วินาที	15 วินาที	25 วินาที	35 วินาที
B				
A3				
Z3				
A7				
Z7				
C				
M				

รูปที่ 4.4 การลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง

สูตร \ เวลา	5 วินาที	15 วินาที	25 วินาที	35 วินาที
S				
A3C				
A3M				
A3S				
Z3C				
Z3M				
Z3S				





























รูปที่ 4.4 (ต่อ) การลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการป่นเร่ง

สูตร \ เวลา	5 วินาที	15 วินาที	25 วินาที	35 วินาที
A7C				
A7M				
A7S				
Z7C				
Z7M				
Z7S				





























รูปที่ 4.4 (ต่อ) การลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง

ส่วนการติดไฟและการลามไฟของชิ้นทดสอบที่ผ่านการบ่มเร่ง ยังคงมีพฤติกรรมการหน่วงไฟลักษณะเดียวกับชิ้นทดสอบก่อนการบ่มเร่ง ดังผลการทดลองที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.5



























สูตร \ เวลา	5 วินาที	15 วินาที	25 วินาที	35 วินาที
B				
A3				
Z3				
A7				
Z7				
C				
M				

รูปที่ 4.5 การลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง

สูตร \ เวลา	5 วินาที	15 วินาที	25 วินาที	35 วินาที
S				
A3C				
A3M				
A3S				
Z3C				
Z3M				
Z3S				

รูปที่ 4.5 (ต่อ) การลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง

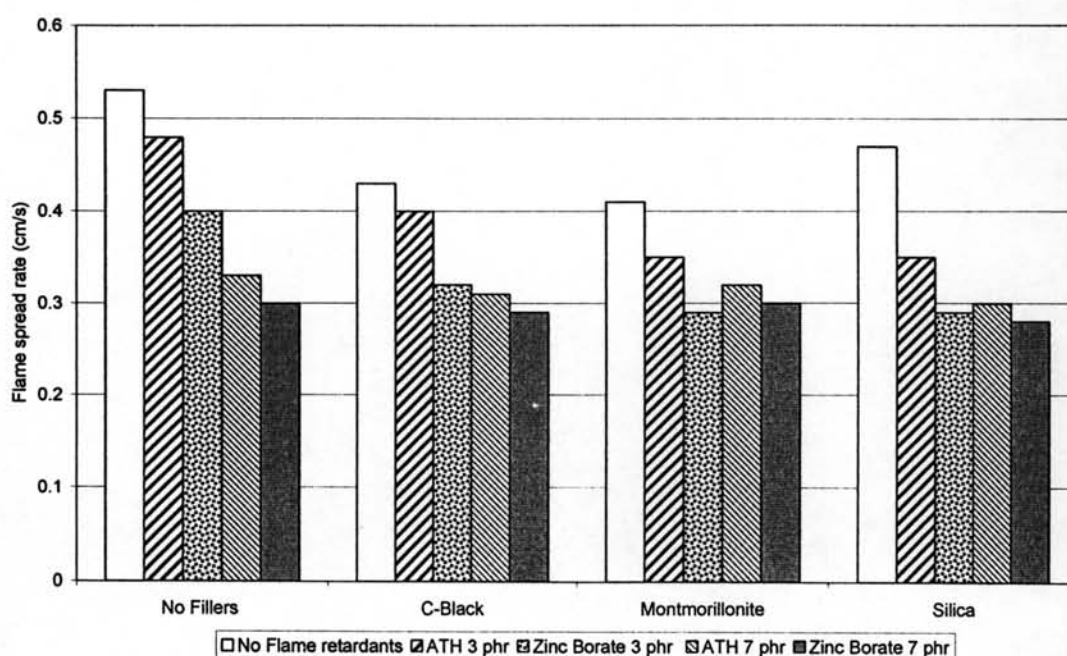
สูตร \ เวลา	5 วินาที	15 วินาที	25 วินาที	35 วินาที
A7C				
A7M				
A7S				
Z7C				
Z7M				
Z7S				

รูปที่ 4.5 (ต่อ) การลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง

ผลของอัตราการลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 โดยชิ้นงานที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟมีอัตราการลามไฟสูงถึง 0.53 ซม.ต่อวินาที แต่เมื่อใช้สารหน่วงไฟมากขึ้นทำให้ชิ้นงานมีอัตราการลามไฟลดลงมากขึ้นประมาณ 40% ซึ่งชิงก์บอเร็ตจะมีการหน่วงไฟที่ดีกว่าอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

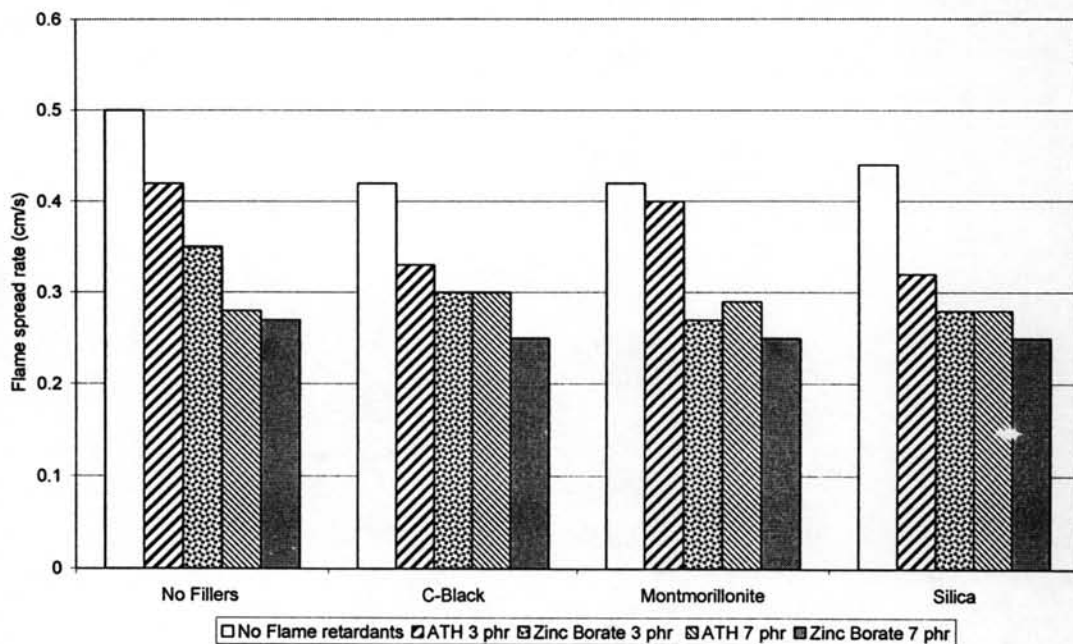
สำหรับชิ้นงานในกลุ่มที่ใช้เขม่าดำเป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้เขม่าดำเพียงอย่างเดียวก็จะช่วยหน่วงไฟได้ดี แต่เมื่อผสมร่วมกับชิงก์บอเร็ต 3 phr จะมีผลใกล้เคียงกับใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr และชิงก์บอเร็ต 7 phr สำหรับชิ้นงานในกลุ่มที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียวก็จะช่วยหน่วงไฟได้ดี แต่เมื่อผสมร่วมกับชิงก์บอเร็ต 3 phr จะมีการหน่วงไฟที่ดีกว่าใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr และมีผลใกล้เคียงกับชิงก์บอเร็ต 7 phr ในกลุ่มที่ใช้ซิลิกาเป็นส่วนประกอบพบว่าเมื่อใช้ซิลิกาเพียงอย่างเดียวก็จะช่วยหน่วงไฟได้ระดับหนึ่ง แต่เมื่อผสมร่วมกับชิงก์บอเร็ต 3 phr จะมีผลใกล้เคียงกับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr และชิงก์บอเร็ต 7 phr ซึ่งมีผลที่คล้ายกับการผสมมอนต์มอริลโลไนต์

ผลที่ได้จากสรุปได้ว่าเมื่อใช้สารตัวเติมเพียงอย่างเดียวก็สามารถช่วยหน่วงไฟได้ดี แต่เมื่อผสมสารหน่วงไฟร่วมกับสารตัวเติมจะทำให้ประสิทธิภาพในการหน่วงไฟเพิ่มมากขึ้น โดยสารหน่วงไฟชิงก์บอเร็ตที่ใช้ร่วมกับสารตัวเติมมีประสิทธิภาพดีกว่าอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เล็กน้อย



รูปที่ 4.6 อัตราการลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง













ผลของอัตราการลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่งแสดงในรูปที่ 4.7 โดยชิ้นงานที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟมีอัตราการลามไฟสูงถึง 0.50 ซม.ต่อวินาที และในทำนองเดียวกัน แนวโน้มของอัตราการลามไฟของชิ้นงานที่ใช้สารตัวเติม/สารหน่วงไฟหลังการบ่มเร่งให้ผลของอัตราการลามไฟที่ใกล้เคียงกับก่อนการบ่มเร่ง







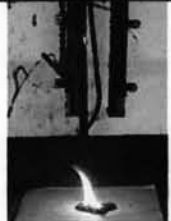







รูปที่ 4.7 อัตราการลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง

รูปที่ 4.8 เป็นภาพที่แสดงลักษณะของชิ้นงานยางธรรมชาติที่หลอมเหลวและหยดลงบนวัสดุที่ติดไฟง่าย โดยชิ้นงานยางธรรมชาติที่นำมาศึกษาลักษณะเช่นนี้ได้คัดเลือกจากสูตรที่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และซิงก์บอเรต ที่ให้ผลการหน่วงไฟที่ดีที่สุด คือ สูตร A7S และ Z7S

จากรูปแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ (B) หลังจากติดไฟแล้วจะหลอมเหลวและหยดลงบนวัสดุที่ติดไฟง่ายได้เร็วกว่า และหยดของชิ้นงานที่ตกลงมานั้นสามารถทำให้วัสดุนั้นติดไฟได้ง่าย เปลวไฟมีการแผ่ขยายเป็นวงกว้างและดับสนิทภายใน 110 วินาที ในขณะที่ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมและสารหน่วงไฟ (A7S และ Z7S) หลังจากติดไฟแล้วจะหลอมเหลวและหยดลงบนวัสดุที่ติดไฟง่ายได้ช้ากว่า และหยดของชิ้นงานที่หลอมเหลวนั้นสามารถทำให้วัสดุนั้นติดไฟได้ช้ากว่า เปลวไฟมีการแผ่ขยายเป็นวงแคบและดับสนิทภายใน 130 วินาที

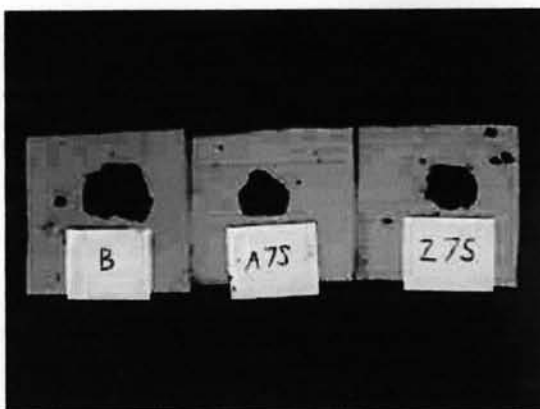
สูตร \ เวลา	5 วินาที	15 วินาที	30 วินาที	50 วินาที
B				
A7S				
Z7S				

รูปที่ 4.8 ลักษณะของชิ้นงานยางธรรมชาติที่หลอมเหลวและหยดลงบนวัสดุที่ติดไฟง่าย

สูตร \ เวลา	70 วินาที	90 วินาที	110 วินาที	130 วินาที
B				
A7S				
Z7S				

รูปที่ 4.8 (ต่อ) ลักษณะของชิ้นงานยางธรรมชาติที่หลอมเหลวและหยดลงบนวัสดุที่ติดไฟง่าย





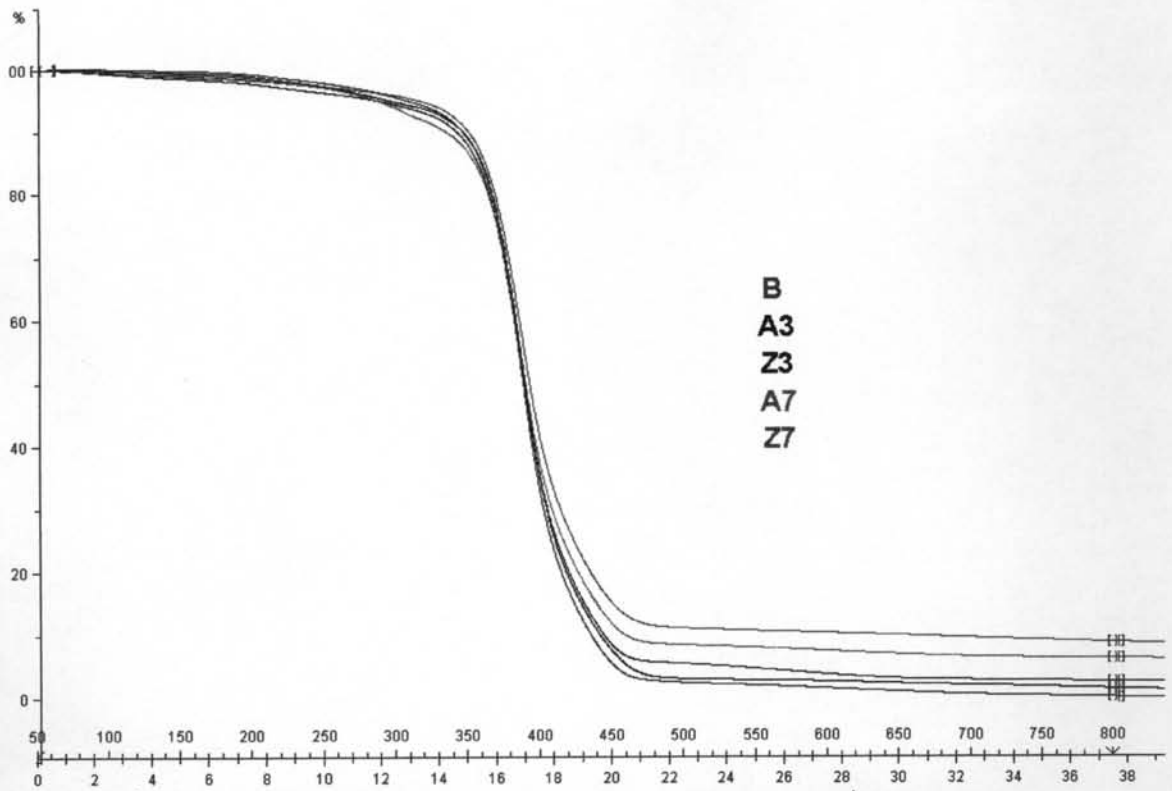
รูปที่ 4.9 บริเวณของพื้นวัสดุติดไฟง่ายที่เผาไหม้เนื่องจากชิ้นงานที่หลอมเหลวหยดลงใส่

จากรูปที่ 4.9 แสดงพื้นที่บนวัสดุที่ติดไฟง่ายหลังจากที่เกิดการเผาไหม้เนื่องจากชิ้นงานยางธรรมชาติที่หลอมเหลวหยดลงใส่ พบว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้ทั้งสารหน่วงไฟ 7 phr และซิลิกา มีพื้นที่ของหยดของเหลวหลังจากที่ไฟดับแล้วน้อยกว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ

จากผลการศึกษาพฤติกรรมการติดไฟ การหยดลงของชิ้นงานบนวัสดุที่ติดไฟง่าย และอัตราการลามไฟในแนว 45 องศาที่กล่าวมาข้างต้น อาจสรุปได้ว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมซิงก์บอเรต 7 phr กับซิลิกา มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดีกว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr กับซิลิกาเล็กน้อย แต่หากพิจารณาในแง่ของต้นทุนการผลิตแล้ว ควรใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟเนื่องจากมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับซิงก์บอเรต และมีราคาถูกกว่า

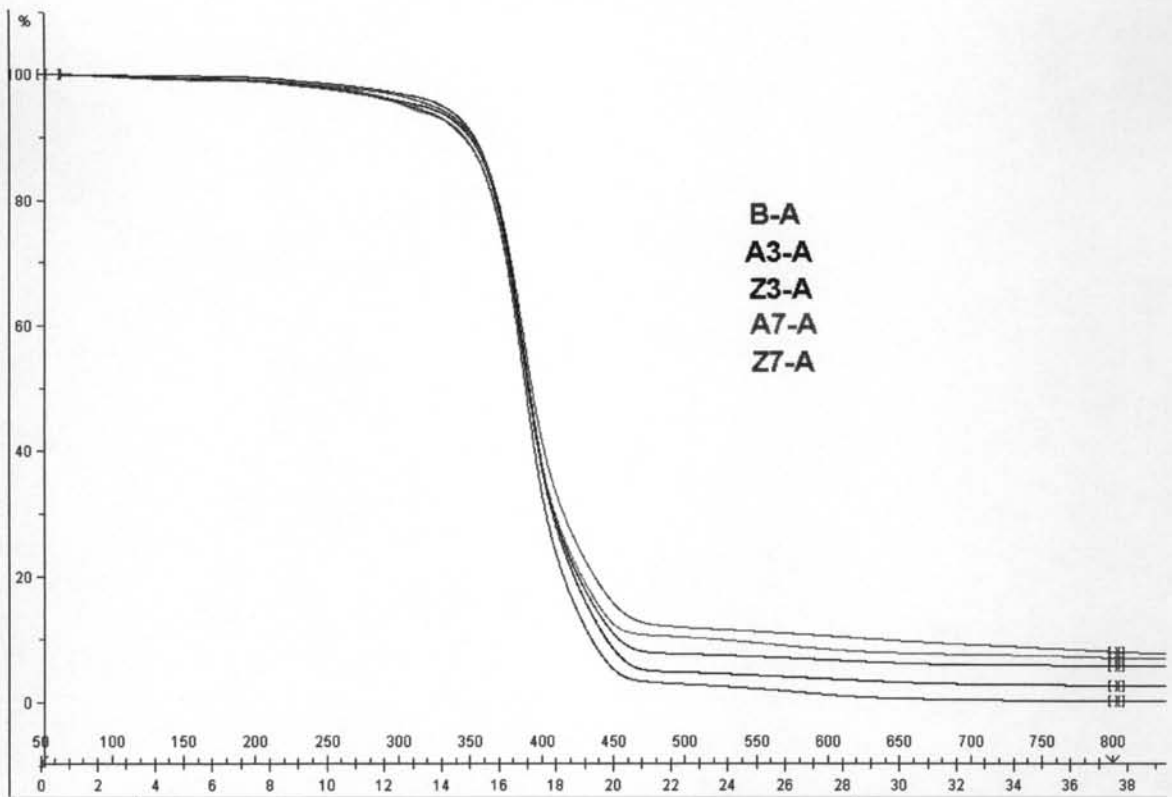
#### 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว

ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเมื่อพิจารณาถึงสมบัติการหน่วงไฟของวัสดุ คืออุณหภูมิการสลายตัว ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิสในการวิเคราะห์ดังกล่าว TGA เทอร์โมแกรมของชิ้นงานธรรมชาติแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 - รูปที่ 4.17



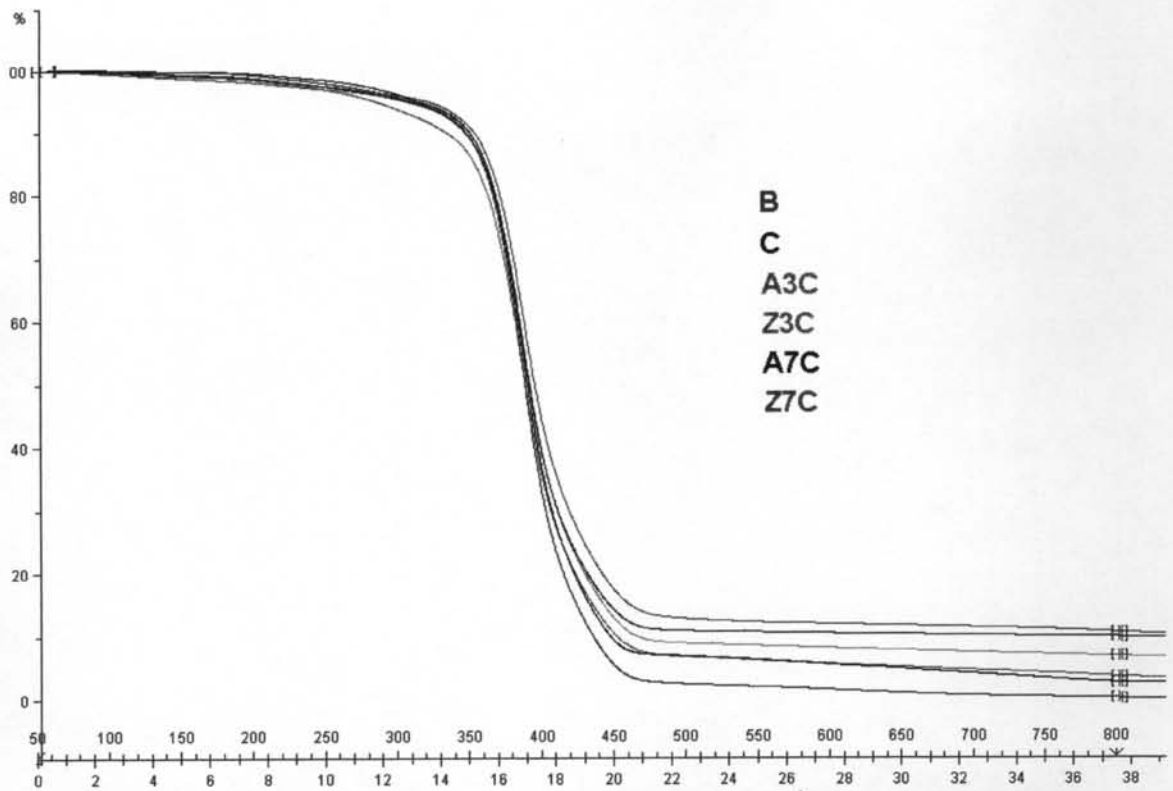
รูปที่ 4.10 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ไม่ใช้สารตัวเติม

ก่อนการบ่มแรง



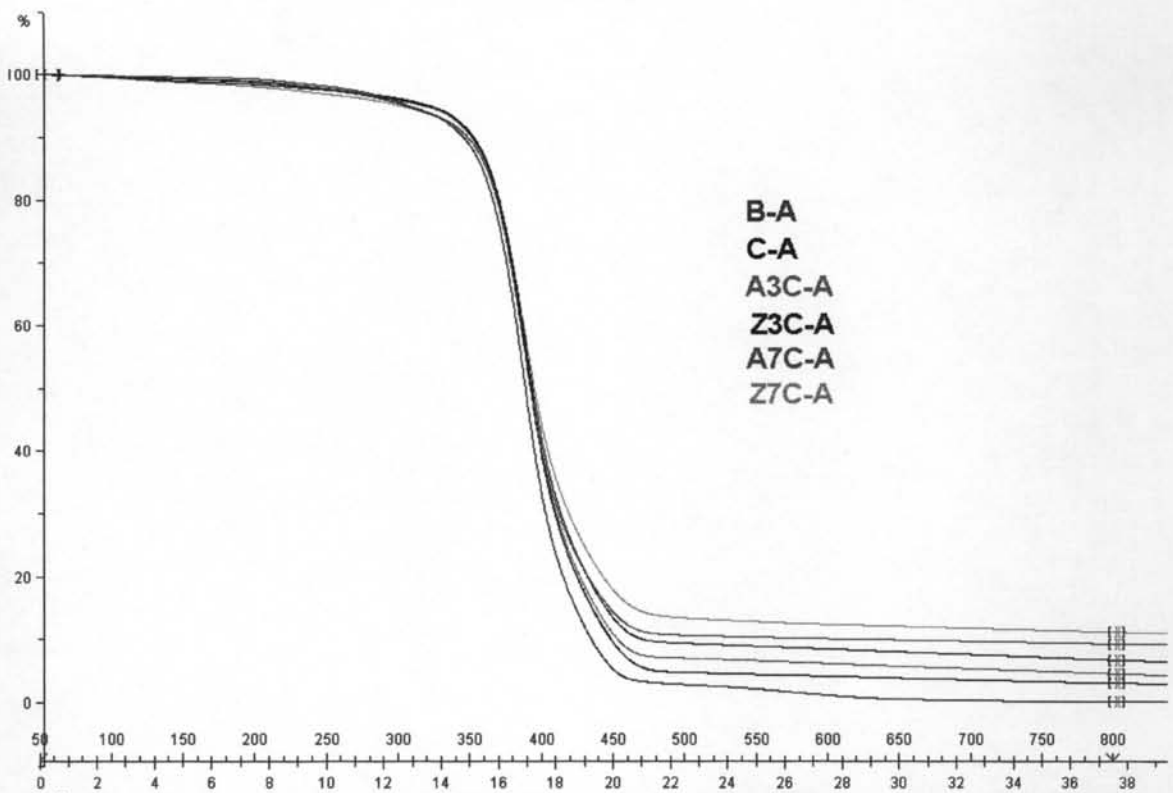
รูปที่ 4.11 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ไม่ใช้สารตัวเติม

หลังการบ่มแรง



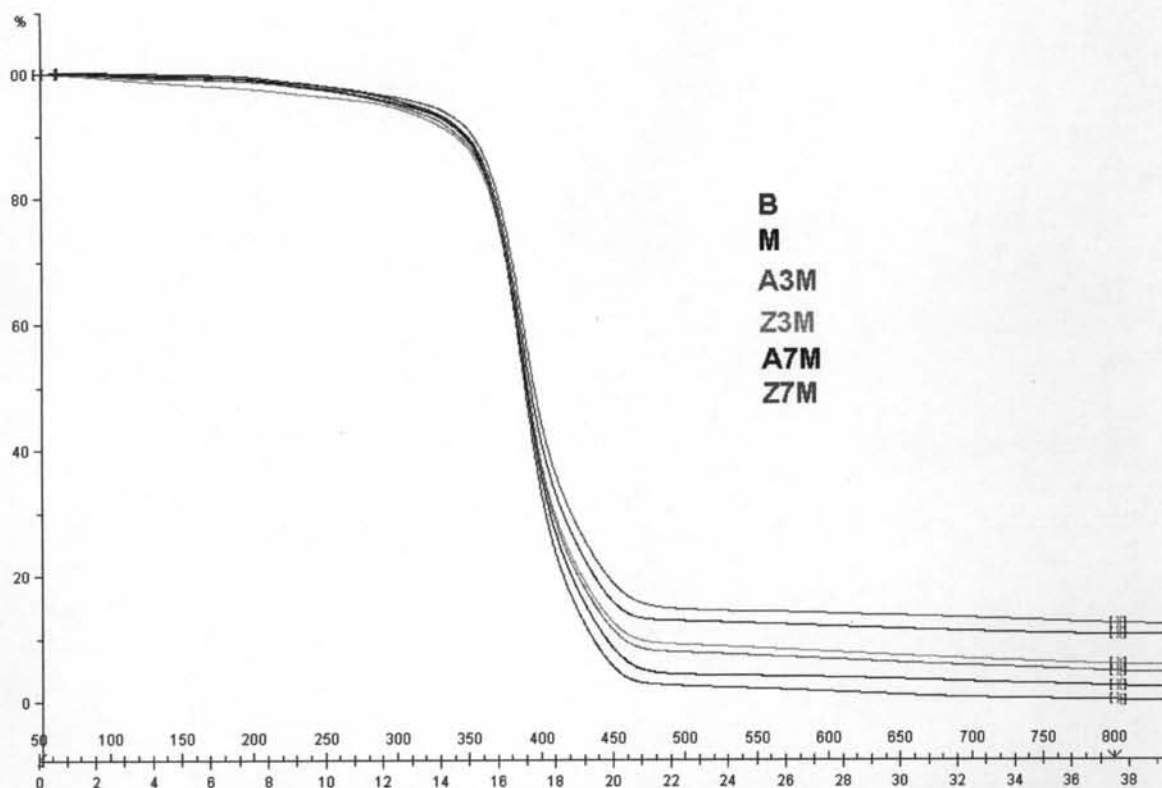
รูปที่ 4.12 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้เซมาดำเป็นสารตัวเติม

ก่อนการบ่มแรง



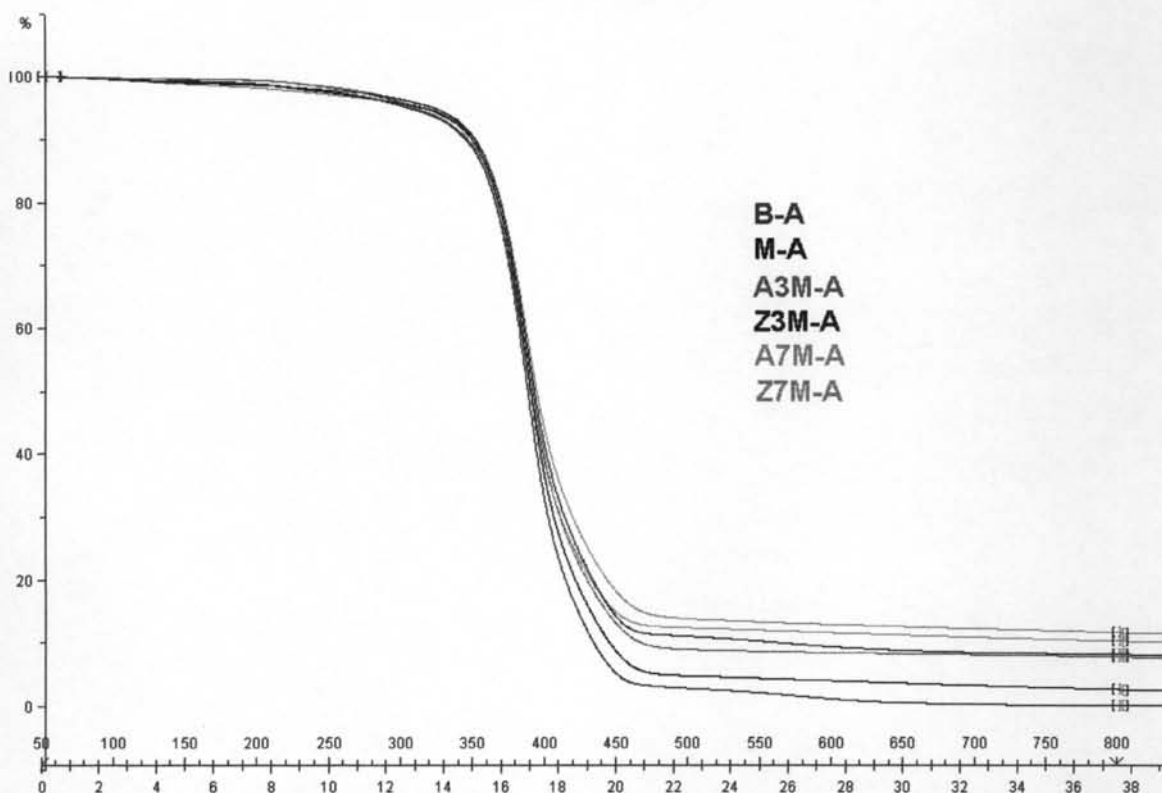
รูปที่ 4.13 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้เซมาดำเป็นสารตัวเติมหลัง

การบ่มแรง



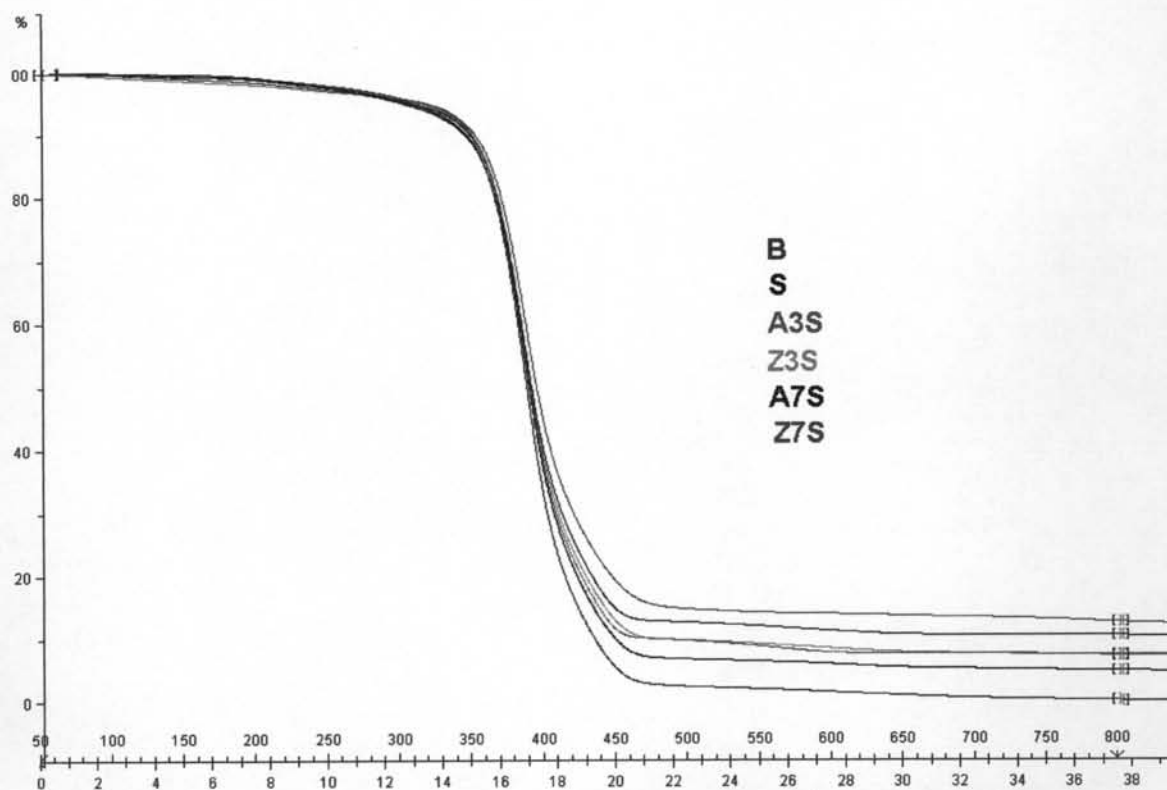
รูปที่ 4.14 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็น

สารตัวเติมก่อนการบ่มเร่ง



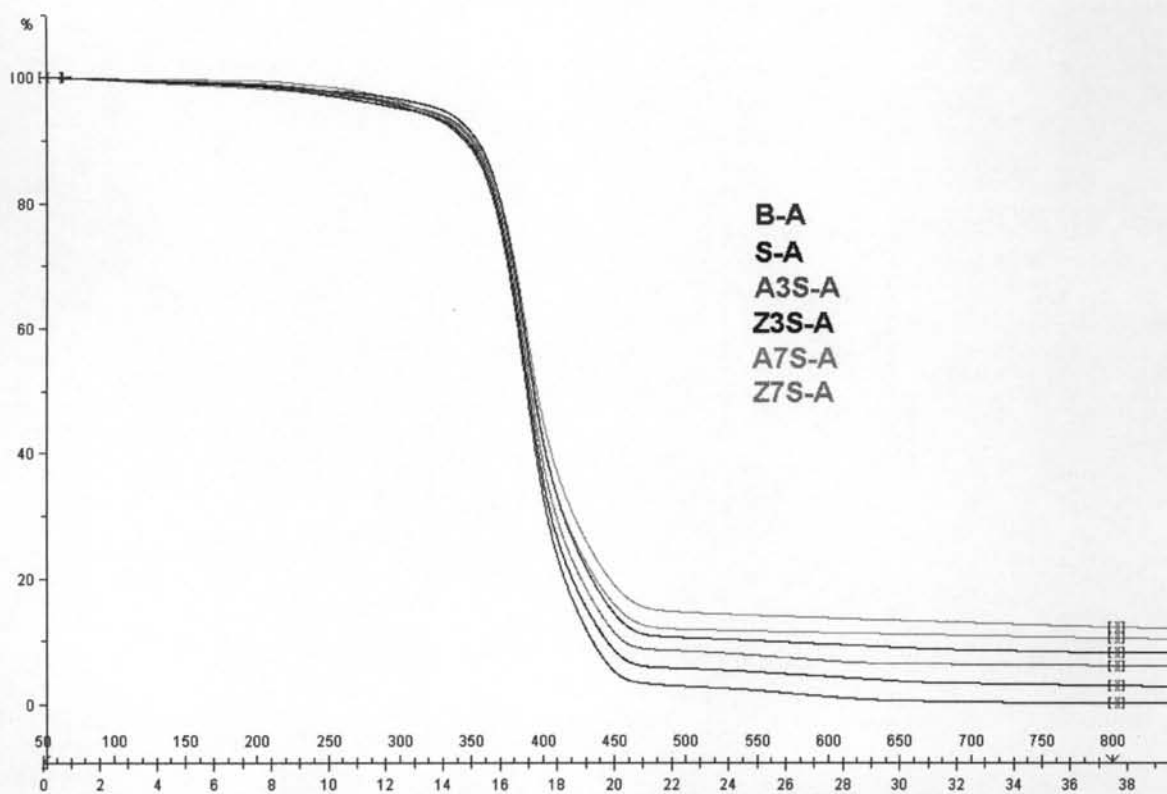
รูปที่ 4.15 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็น

สารตัวเติมหลังการบ่มเร่ง



รูปที่ 4.16 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

ก่อนการป้อนแรง



รูปที่ 4.17 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

หลังการป้อนแรง

จากรูปที่ 4.10 - รูปที่ 4.17 พบว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่เตรียมได้ทุกสูตรทั้งก่อนการบ่มแรงและหลังการบ่มแรงมี TGA เทอร์โมแกรมที่คล้ายกันมาก โดยชิ้นงานมีการสลายตัวเพียงขั้นตอนเดียว ซึ่งอาจเนื่องมาจากชิ้นงานยางธรรมชาติใส่สารตัวเติมและสารหน่วงไฟในปริมาณที่น้อยมาก โดยจะเริ่มสลายตัวตั้งแต่ 360- 420 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิเริ่มสลายตัวประมาณ 360 องศาเซลเซียส และการสลายตัวของยางธรรมชาติที่มีสารหน่วงไฟจะสิ้นสุดประมาณ 420 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวจะเป็นช่วงอุณหภูมิที่ทั้งอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และซิงก์บอเรตสลายตัวแล้วขจัดน้ำออกมา นอกนั้นยังได้สารออกไซด์ตกค้าง (oxide residue) ที่เกิดจากการสลายตัวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และซิงก์บอเรต ซึ่งจะเกิดชาร์ปกคลุมทำให้ชิ้นงานยางธรรมชาติไม่ถูกเผาไหม้หมด ในขณะที่ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟจะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการสลายตัวของชิ้นงานยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 417 องศาเซลเซียส ประมาณ 81 % และสลายตัวหมด ซึ่งผลการทดสอบจะได้ผลใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น [31-33]

จากตารางที่ 4.1-4.2 พบว่าชิ้นงานแต่ละสูตรก่อนการบ่มแรงและหลังการบ่มแรงให้ผลของน้ำหนักที่สูญหายไป และปริมาณชาร์ที่เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน โดยชิ้นงานที่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ ถ้าใช้ปริมาณสารหน่วงไฟมากขึ้นมีผลทำให้น้ำหนักที่สูญหายไปน้อยลง และเกิดชาร์มากขึ้นเนื่องจากเมื่ออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์สลายตัวจะเกิดสารออกไซด์ตกค้าง (oxide residue) ได้แก่  $Al_2O_3$  ที่มีความจุความร้อนสูง (high heat capacity) ซึ่งจะปลดพลังงานความร้อนที่จะถูกนำไปใช้ในการสลายตัวของชิ้นงาน และยังเสริมให้เกิดชาร์ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้ออกซิเจนสัมผัสผิวของชิ้นงานได้ และในทำนองเดียวกัน ซิงก์บอเรตที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์นั้น เมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียสถึง 450 องศาเซลเซียส และขจัดน้ำออกมา 15% โดยน้ำหนัก ซึ่งการขจัดน้ำดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนและเสริมการเกิดชาร์ที่มีลักษณะเป็นโฟม นอกจากนี้เมื่อซิงก์บอเรตสลายตัวจะเกิดสารออกไซด์ตกค้าง (oxide residue) ได้แก่  $B_2O_3$  ซึ่งเป็นแก้วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำทำให้ชาร์ที่เพิ่มขึ้นมีเสถียรภาพที่ดี ปกป้องไม่ให้ออกซิเจนสัมผัสผิวของชิ้นงานได้ [27]



ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการสลายตัว อุณหภูมิที่มีการสลายตัวมากที่สุด การสูญเสียน้ำหนักและปริมาณสิ่งที่เหลืออยู่ของยางธรรมชาติที่เติมแต่งสารหน่วงไฟในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนการบ่มเร่ง

สูตร	TDOP (°C)	MDRP (°C)	TDEP (°C)	Wt Loss (%)	Char (%)
B	363.86	386.88	417.12	81.35	0
A3	364.34	386.46	418.64	80.21	0.95
Z3	361.81	386.72	418.13	78.89	2.25
C	363.10	388.41	418.25	77.99	2.29
M	363.25	386.60	418.98	79.29	1.71
S	363.52	387.43	418.38	77.50	4.46
A7	364.27	386.55	418.22	76.18	5.91
Z7	363.58	387.36	419.59	73.08	8.18
A3C	360.57	385.66	416.65	77.47	2.84
A3M	360.94	385.77	415.82	76.45	4.06
A3S	362.92	387.90	417.55	75.42	7.32
A7C	361.12	385.94	417.52	74.17	9.59
A7M	361.73	386.94	418.39	71.99	10.32
A7S	362.24	386.80	417.07	72.43	10.27
Z3C	363.56	387.41	418.86	75.08	6.17
Z3M	361.23	386.65	417.74	75.51	5.27
Z3S	362.75	387.53	418.09	74.69	6.98
Z7C	364.70	386.58	420.45	71.02	9.82
Z7M	364.15	387.42	419.60	69.80	11.63
Z7S	363.15	387.38	419.74	69.66	11.96

หมายเหตุ TDOP คือ temperature degradation onset point

MDRP คือ maximum degradation rate point

TDEP คือ temperature degradation endset point

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัว อุณหภูมิที่มีการสลายตัวมากที่สุด การสูญเสียน้ำหนักและปริมาณสิ่งที่เหลืออยู่ของยางธรรมชาติที่เติมแต่งสารหน่วงไฟในอัตราส่วนต่างๆ หลังการบ่มเร่ง

สูตร	TDOP (°C)	MDRP (°C)	TDEP (°C)	Wt Loss (%)	Char (%)
B	362.40	388.53	417.11	81.37	0
A3	362.98	386.70	419.82	78.83	2.31
Z3	361.49	387.72	418.25	76.62	5.44
C	364.12	389.25	421.25	78.34	2.63
M	363.13	387.71	419.69	78.98	2.23
S	362.76	386.77	417.25	78.47	2.53
A7	358.2	384.62	413.99	74.85	6.5
Z7	359.07	384.63	416.50	72.50	7.06
A3C	364.68	389.09	419.71	76.60	3.80
A3M	362.25	387.47	419.56	75.49	7.37
A3S	362.58	387.57	417.98	75.85	5.83
A7C	361.84	385.75	418.11	73.78	8.78
A7M	358.67	385.62	416.09	73.04	9.77
A7S	361.70	386.57	419.31	72.76	10.08
Z3C	363.94	387.48	420.03	74.32	5.90
Z3M	361.47	387.72	420.24	73.38	7.81
Z3S	362.78	388.44	419.93	73.41	7.87
Z7C	362.36	386.64	421.27	71.32	10.50
Z7M	362.94	386.68	420.70	70.49	11.03
Z7S	362.99	386.74	421.40	70.12	11.62

หมายเหตุ Char หากจาก data ขณะอุณหภูมิที่ 800 องศาเซลเซียส

#### 4.5 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน

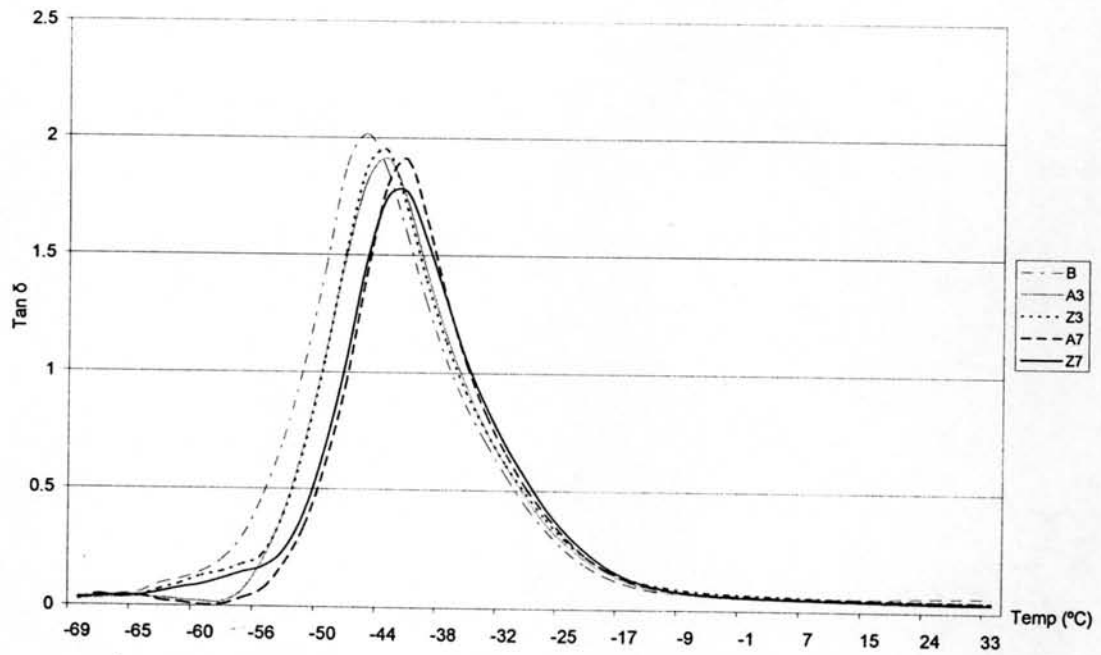
ในการใช้งานยางธรรมชาติ อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากเป็นสิ่งที่บอกให้ทราบถึงช่วงอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้ (serviced temperature range) ในงานวิจัยนี้ชิ้นงานยางธรรมชาติถูกตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์เชิงกลแบบไดนามิก (dynamic mechanical analyzer) ดังผลการทดลองซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.18 – รูปที่ 4.25

จากผลการทดลอง ค่า  $\tan \delta$  ของชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มแรงที่ไม่ใช้สารตัวเติมจะมีค่าลดต่ำลงในชิ้นงานที่ใช้สารหน่วงไฟเนื่องจากความเป็น viscose ลดลงและมีความเป็น elastic มากขึ้น ชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มแรงที่ไม่ใช้สารตัวเติมจะมีค่า  $\tan \delta$  สูงขึ้น ยกเว้นชิ้นงานที่ใช้ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr และซิงก์บอเรต 7 phr ที่มีค่า  $\tan \delta$  ลดลง โดยจุดสูงสุดของ  $\tan \delta$  ลดลง เนื่องจากการยึดเกาะกันแน่นระหว่างยางธรรมชาติกับสารตัวเติม [28] ซึ่งผลการทดลองได้ผลใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น [30-32]

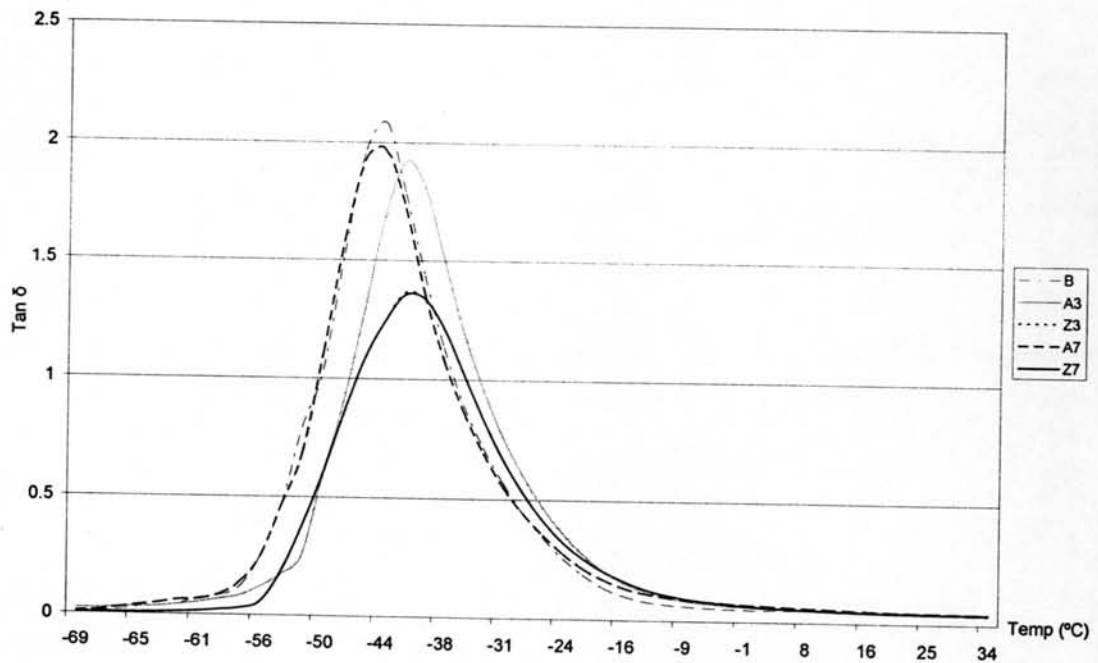
ชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มแรงที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมจะมีค่า  $\tan \delta$  ลดต่ำลงเมื่อใช้ร่วมกับสารหน่วงไฟ ( ชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มแรงที่ไม่ใช้สารตัวเติมจะมีค่า  $\tan \delta$  สูงขึ้น แต่เมื่อใช้ซิงก์บอเรต 3 phr และ 7 phr และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr ที่มีค่า  $\tan \delta$  ลดลง )

ชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มแรงที่ใช้มอนด์มอร์ริลโลไนต์เป็นสารตัวเติมจะมีค่า  $\tan \delta$  มีค่าลดต่ำลงในชิ้นงานที่ใช้สารหน่วงไฟ ชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มแรงที่ไม่ใช้สารตัวเติมจะมีค่า  $\tan \delta$  ต่ำลง ยกเว้นชิ้นงานที่ไม่ได้ใช้สารหน่วงไฟ

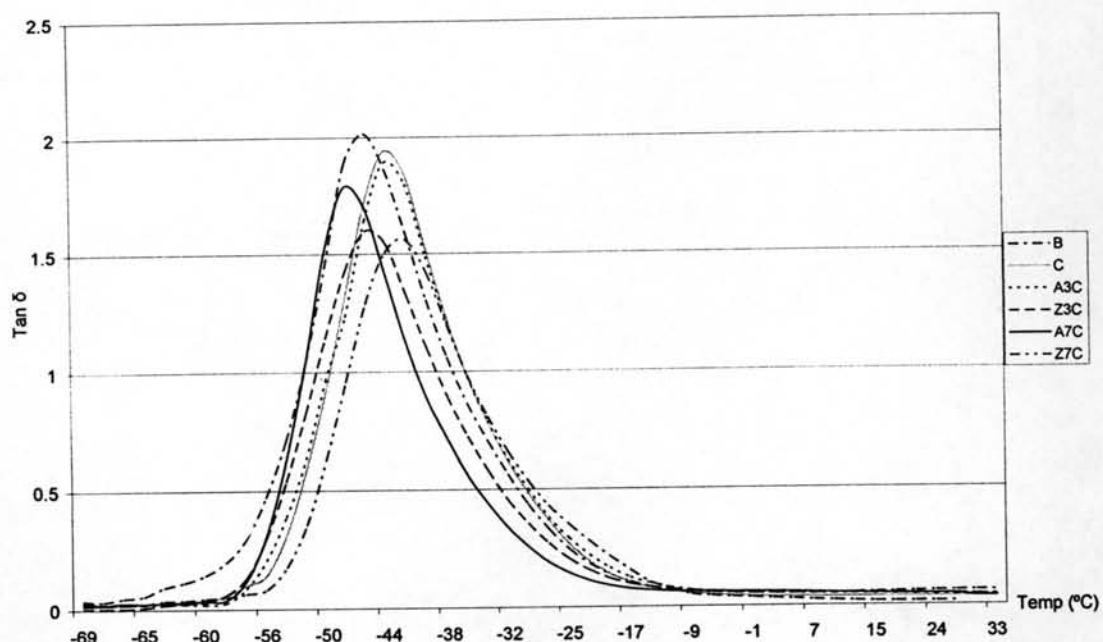
ชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มแรงที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมจะมีค่า  $\tan \delta$  ลดต่ำลงในชิ้นงานที่ใช้สารหน่วงไฟ ชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มแรงที่ไม่ใช้สารตัวเติมจะมีค่า  $\tan \delta$  สูงขึ้น แต่เมื่อใช้ซิงก์บอเรต 3 phr และ 7 phr และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr ที่มีค่า  $\tan \delta$  ลดลง



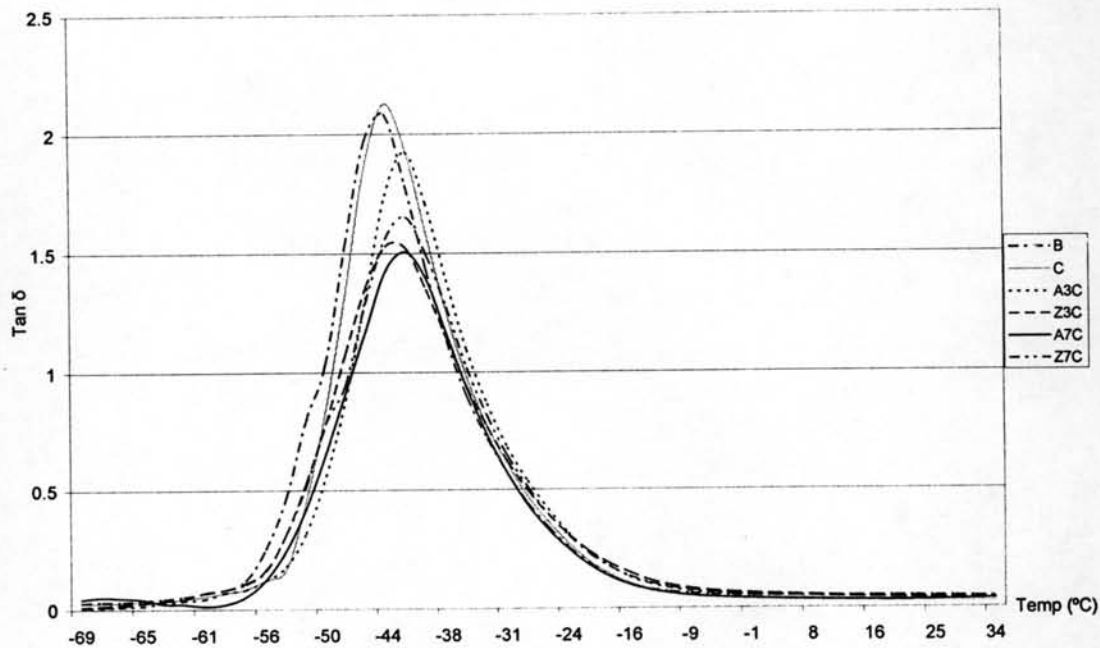
รูปที่ 4.18 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของยางธรรมชาติที่ไม่ใช้สารตัวเติมก่อนการบ่มเร่ง



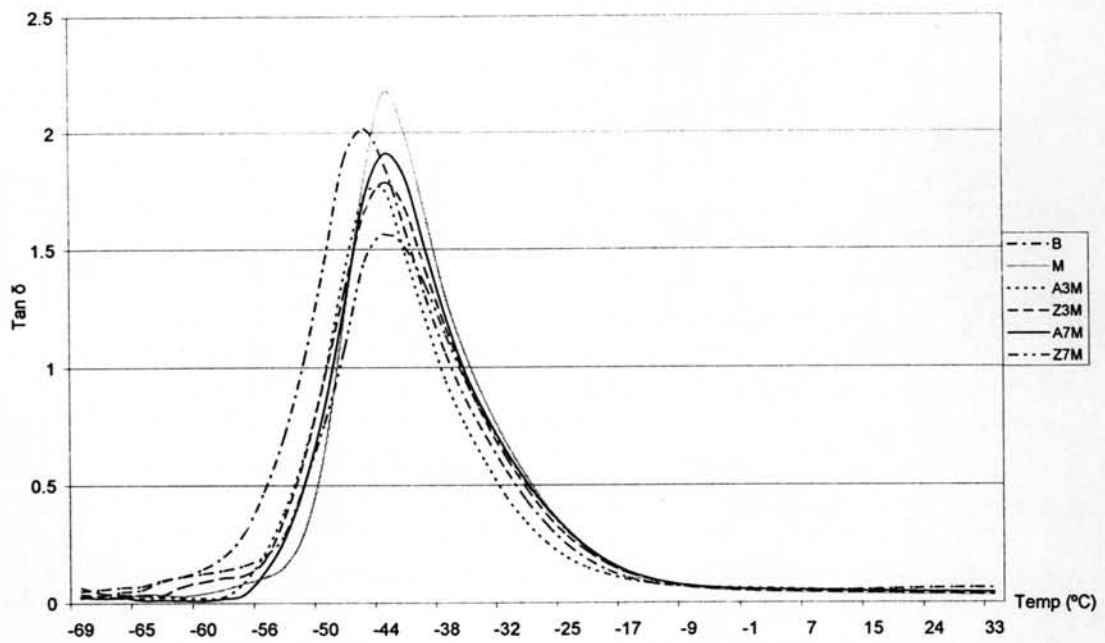
รูปที่ 4.19 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้สารตัวเติมหลังการบ่มเร่ง



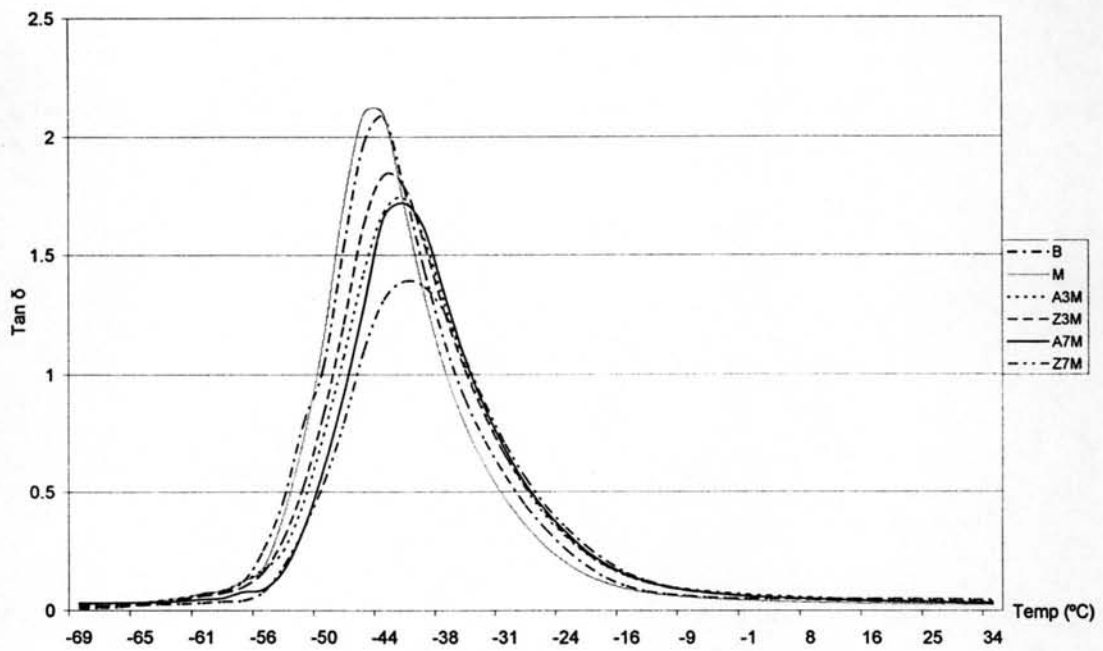
รูปที่ 4.20 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้  
เขม่าดำเป็นสารตัวเติมก่อนการบ่มแรง



รูปที่ 4.21 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้  
เขม่าดำเป็นสารตัวเติมหลังการบ่มแรง

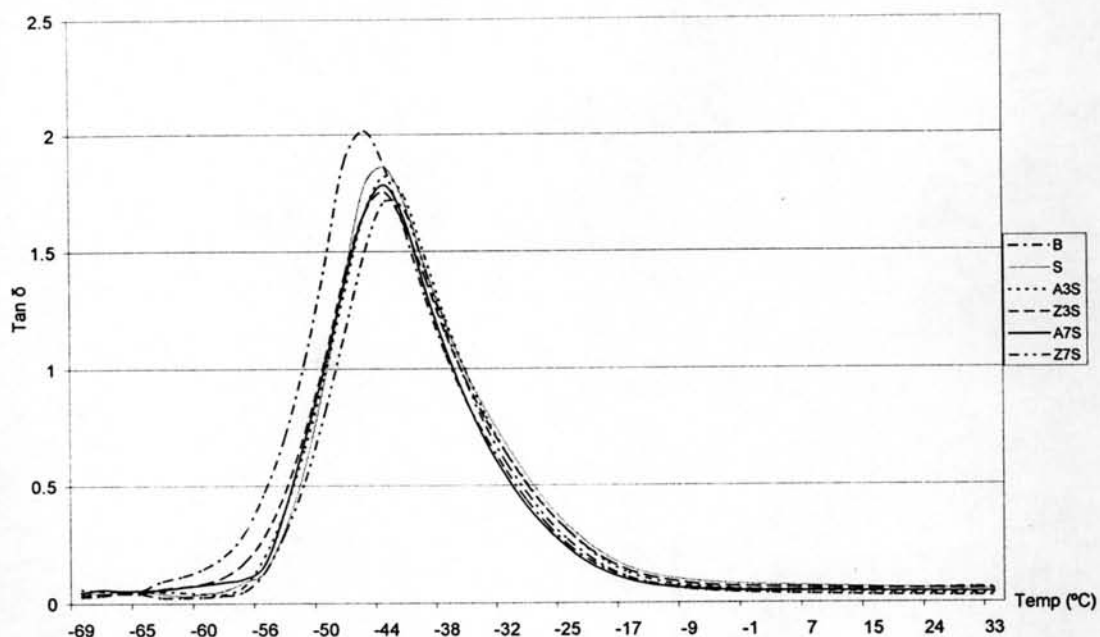


รูปที่ 4.22 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติมก่อนการบ่มแรง

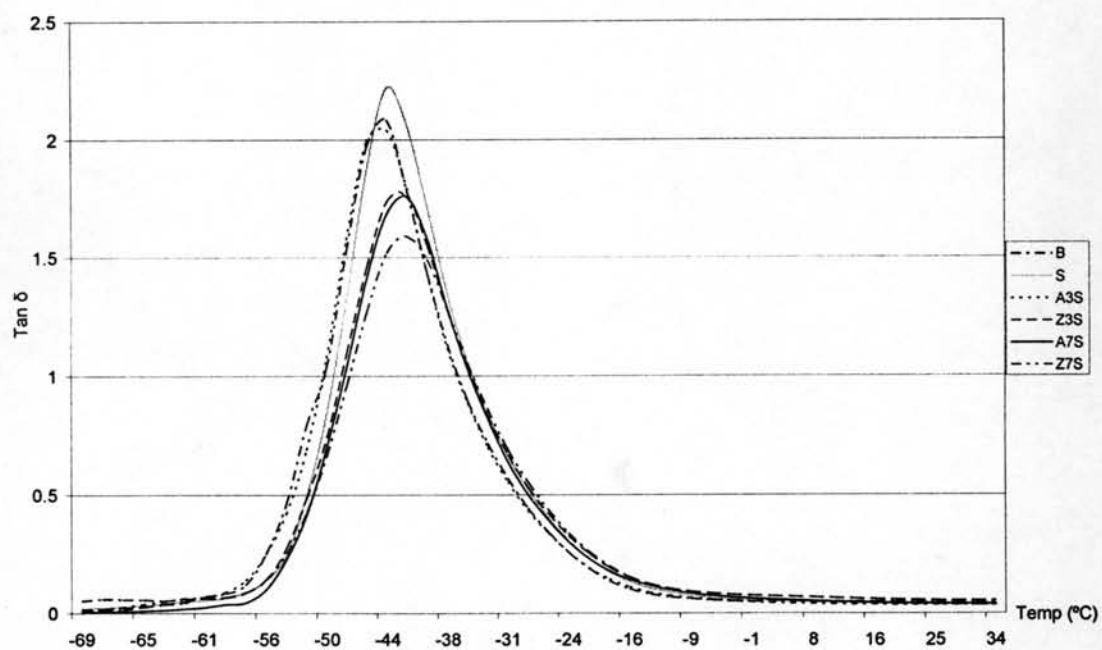


รูปที่ 4.23 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของยางธรรมชาติที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติมหลังการบ่มแรง



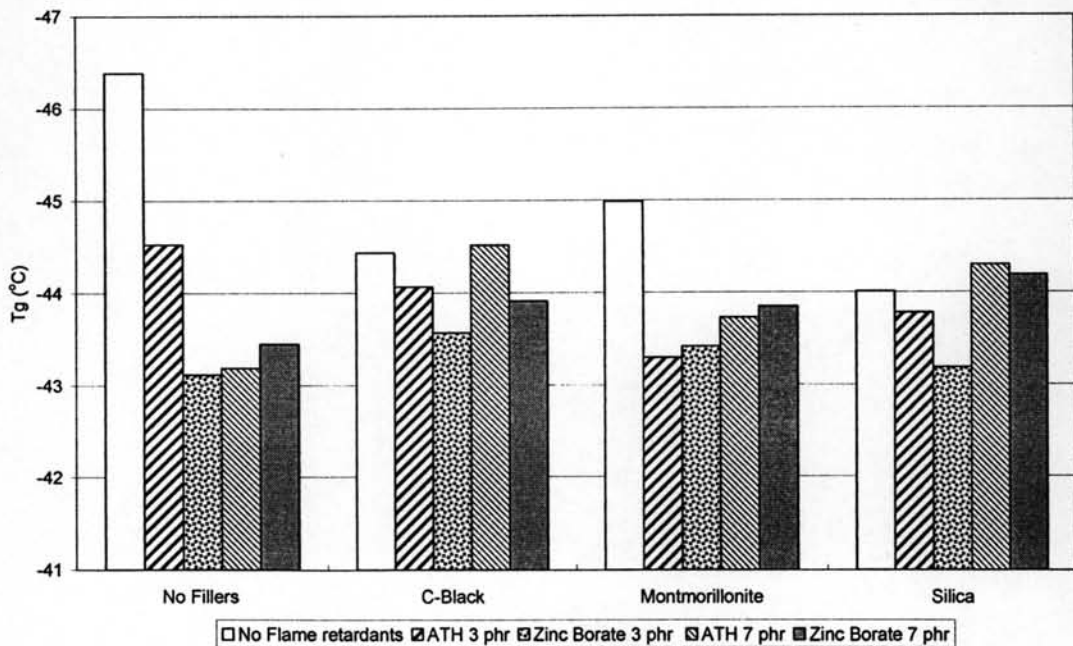


รูปที่ 4.24 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้  
ซิลิกาเป็นสารตัวเติมก่อนการบ่มเร่ง



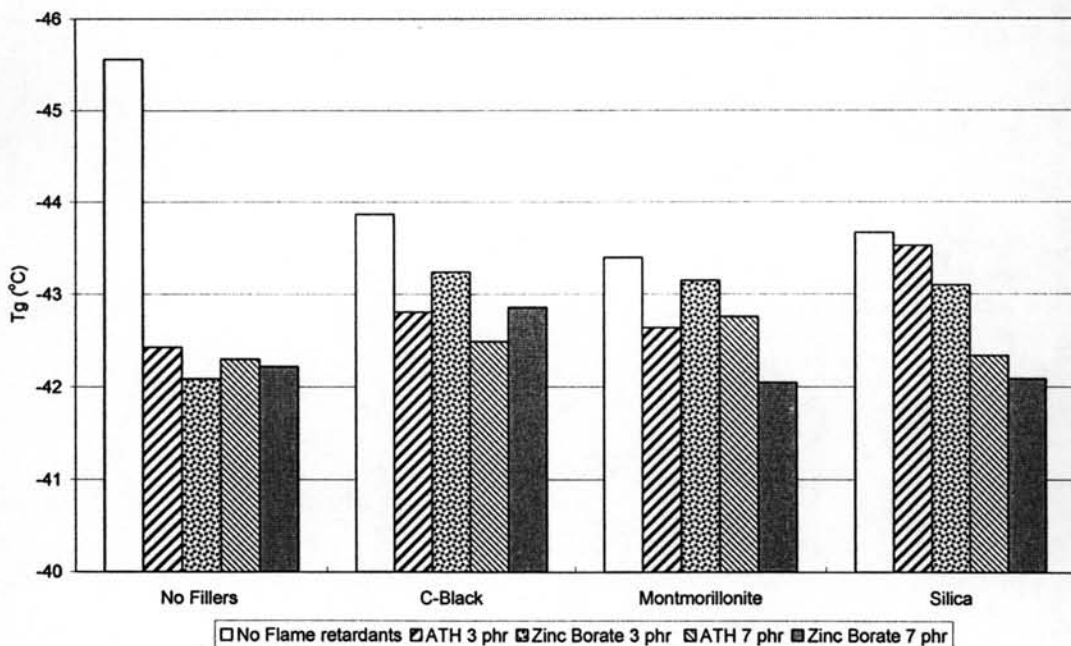
รูปที่ 4.25 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้  
ซิลิกาเป็นสารตัวเติมหลังการบ่มเร่ง

อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่งซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.26 โดยในกลุ่มที่ไม่ได้ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน -46.4 องศาเซลเซียส แต่เมื่อใช้สารหน่วงไฟอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันเพิ่มขึ้น ซึ่งการใช้ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr ทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันต่ำกว่าการใช้ซิงก์บอเรตและ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr ในกลุ่มที่ใช้เขม่าดำเป็นส่วนประกอบพบว่า การผสมเขม่าดำเพียงอย่างเดียวจะมีทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันใกล้เคียงกับการใช้ร่วมกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr ส่วนการใช้ซิงก์บอเรตและ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr จะทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันใกล้เคียงกัน ส่วนในกลุ่มที่ใช้หมอนต์มอริลโลไนต์เป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้หมอนต์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียวจะทำให้อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันต่ำที่สุด โดยชิ้นงานที่ใช้ร่วมกับซิงก์บอเรตและ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ มีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันใกล้เคียงกัน ในกลุ่มที่ใช้ซิลิกาเป็นส่วนประกอบพบว่า การใช้ร่วมกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr และซิงก์บอเรต 7 phr ส่งผลต่ออุณหภูมิกลาสแทรนซิชันใกล้เคียงกัน แต่ก็ยังมีค่าต่ำกว่าการใช้ซิลิกาเพียงอย่างเดียวและเมื่อใช้ร่วมกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr ในขณะที่การใช้ร่วมกับซิงก์บอเรต 3 phr ทำให้ชิ้นงานอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันสูงที่สุด โดยผลที่ได้อาจสรุปได้ว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้ใช้ทั้งสารหน่วงไฟและสารตัวเติมจะมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันที่ต่ำที่สุด เนื่องจากสารหน่วงไฟและสารตัวเติมที่เติมเข้าไปจะช่วยให้เพิ่มพื้นที่ยึดเกาะกันได้มากขึ้น ทำให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนตัวได้น้อยลงจึงทำให้อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันเพิ่มขึ้น อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันเพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อใช้ซิงก์บอเรต 3 phr



รูปที่ 4.26 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง

อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.27 ในกลุ่มที่ไม่ใช้สารตัวเติมในยางธรรมชาติพบว่า ยางธรรมชาติที่ไม่ได้ใช้สารหน่วงไฟจะมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน คือ  $-45.6$  องศาเซลเซียส และเมื่อใช้สารหน่วงไฟทำให้อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันเพิ่มขึ้น ในกลุ่มที่ใช้เซมาดำเป็นส่วนประกอบพบว่า การผสมเซมาดำเพียงอย่างเดียวจะอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันต่ำกว่าการผสมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และซิงก์บอเรต โดยชิ้นงานที่ใช้ร่วมกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ มีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันสูงกว่าที่ใช้ซิงก์บอเรต ส่วนในกลุ่มที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียวและเมื่อใช้ซิงก์บอเรต 3 phr อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันต่ำกว่าเมื่อใช้ร่วมกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ในขณะที่เมื่อใช้ซิงก์บอเรต 7 phr อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันสูงที่สุด ในกลุ่มที่ใช้ซิลิกาเป็นส่วนประกอบพบว่า การใช้ซิลิกาเพียงอย่างเดียว การใช้ร่วมกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr และซิงก์บอเรต 3 phr ทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันต่ำกว่าการใช้ร่วมกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr และซิงก์บอเรต 7 phr จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ได้ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันที่ต่ำที่สุด แต่เมื่อเราเพิ่มสารตัวเติมและสารหน่วงไฟเข้าไปเป็นส่วนประกอบ ทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อใช้ซิงก์บอเรต 7 phr ร่วมกับมอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ 4.27 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติการหลังบ่มเร่ง

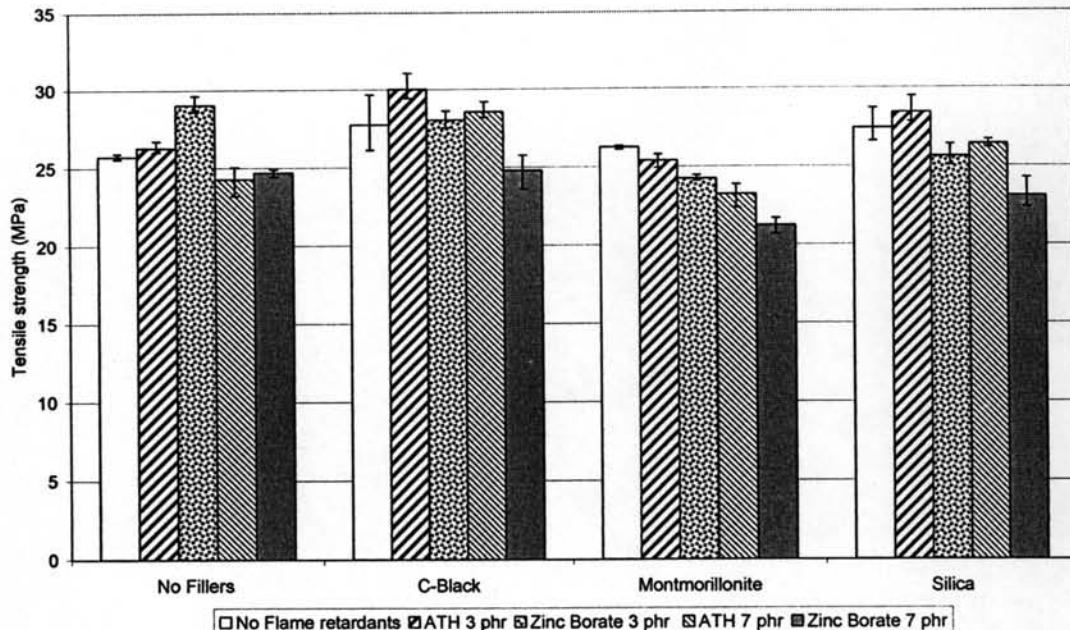
ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมและสารหน่วงไฟเป็นองค์ประกอบมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันสูงกว่าชิ้นงานธรรมชาติที่ไม่ได้ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ แต่เมื่อใส่สาร

หนองไฟและสารตัวเติมทำให้อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันเพิ่มขึ้น โดยหลังการบ่มเร่งขึ้นงานมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันใกล้เคียงกับก่อนการบ่มเร่ง

#### 4.6 สมบัติด้านแรงดึง

สิ่งที่ต้องพิจารณาอีกประการหนึ่งสำหรับการใช้สารตัวเติมในยางธรรมชาติ นั่นคือสารตัวเติมไม่ควรทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานด้อยลงไปกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ใช้สารตัวเติม ในงานวิจัยนี้จึงได้ทดสอบสมบัติด้านความต้านแรงดึงของชิ้นทดสอบ ได้แก่ ความต้านแรงดึง (ความเค้นดึงที่จุดขาด) ระยะยืดที่จุดขาด และมอดุลัสที่ระยะยืด 300% โดยทดสอบกับชิ้นงานทั้งที่ไม่ใช้และใช้สารหนองไฟ รวมทั้งชิ้นงานก่อนและหลังการบ่มเร่ง

ความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.28 โดยในกลุ่มที่ไม่ใช้สารตัวเติมพบว่า เมื่อใช้สารหนองไฟ 3 phr จะให้ค่าความต้านแรงดึงสูงขึ้นอย่างเด่นชัด คือ 29.0 MPa แต่เมื่อใช้สารหนองไฟที่ 7 phr ทำให้ค่าความต้านแรงดึงลดลงกว่าเมื่อไม่ได้ใช้สารหนองไฟ ในกลุ่มที่ใช้เซมาดำเป็นส่วนประกอบพบว่า การใช้ซิงก์บอเรต 3 phr และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr ทำให้ชิ้นงานมีค่าความต้านแรงดึงใกล้เคียงกับเมื่อใช้เซมาดำเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อใช้ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr ชิ้นงานมีค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุด แต่เมื่อใช้ซิงก์บอเรต 7 phr ชิ้นงานมีค่าความต้านแรงดึงต่ำที่สุด ในกลุ่มที่ใช้มอนด์มอริลโลไนต์เป็นส่วนประกอบพบว่า การใช้มอนด์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียวและเมื่อใช้ร่วมกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr ชิ้นงานยางธรรมชาติมีค่าความต้านแรงดึงใกล้เคียงกัน โดยเมื่อใช้ร่วมกับซิงก์บอเรต 3 phr หรือ 7 phr หรือ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr ค่าความต้านแรงดึงลดลง ในกลุ่มที่ใช้ซิลิกาเป็นส่วนประกอบพบว่า การใช้ ซิลิกาเพียงอย่างเดียวและเมื่อใช้ร่วมกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr ชิ้นงานมีค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นมากกว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ได้ใช้สารตัวเติมและสารหนองไฟ และเมื่อผสมร่วมกับซิงค์บอเรต 3 phr มีค่าความต้านแรงดึงที่ใกล้เคียงกันกับการใช้ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr แต่ชิ้นงานที่ผสมกับซิงค์บอเรต 7 phr ทำให้ค่าความต้านแรงดึงต่ำที่สุด จากผลการทดลองอาจกล่าวได้ว่า การใช้สารตัวเติมช่วยให้ความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเสริมแรงของสารหนองไฟที่มีอนุภาคเล็กทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์และช่วยเพิ่มพื้นผิวสำหรับการยึดเกาะด้วย โดยสารหนองไฟที่ใช้ร่วมกับสารตัวเติมได้ดีที่สุด คือ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr แต่เมื่อใช้ซิงค์บอเรต 7 phr ร่วมกับสารตัวเติมจะทำให้ค่าความต้านแรงดึงลดลงมาก

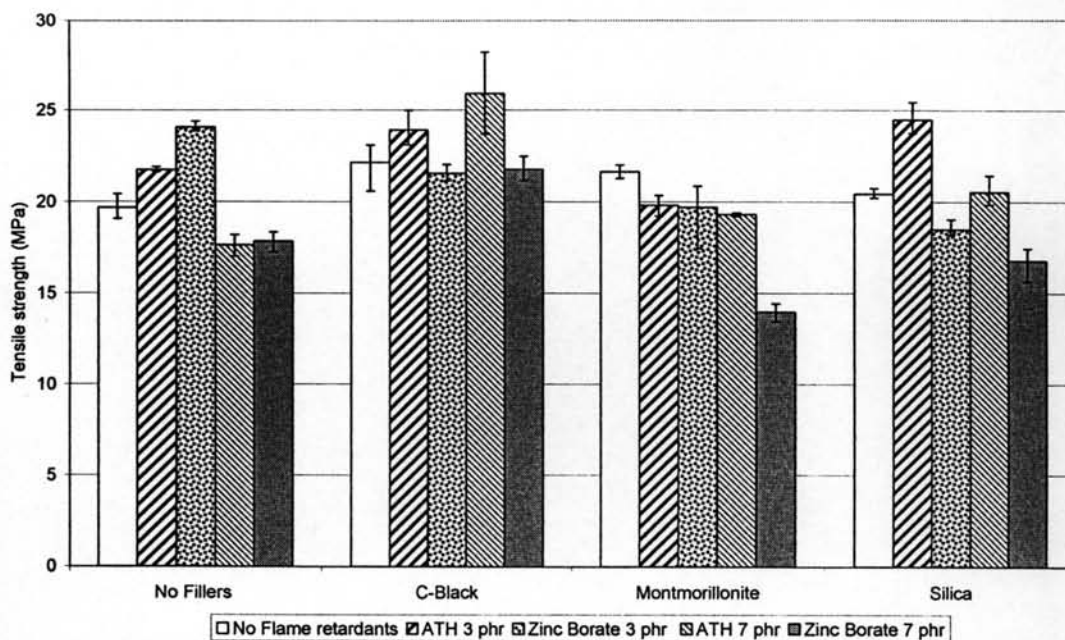


รูปที่ 4.28 ความต้านแรงดึงของชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มแรง

ผลของความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติหลังการบ่มแรงแสดงไว้ในรูปที่ 4.29 โดยในกลุ่มที่ไม่ได้ใช้สารตัวเติมในยางธรรมชาติพบว่า เมื่อใช้ซิงก์บอเรต 3 phr และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr จะให้ค่าความต้านแรงดึงสูงอย่างเด่นชัด คือ 24.1 MPa และ 21.8 MPa ตามลำดับ แต่เมื่อใช้สารหน่วงไฟที่ 7 phr ทำให้ค่าความต้านแรงดึงลดลงกว่าเมื่อไม่ได้ใช้สารหน่วงไฟ ในกลุ่มที่ใช้เข้ามาเป็นส่วนประกอบพบว่า สารหน่วงไฟที่ผสมร่วมกับเซมาดำจะมีผลให้ค่าความต้านแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งจะได้ค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุดเมื่อใช้ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr ในกลุ่มที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียวจะมีค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุด แต่เมื่อใช้ร่วมกับซิงก์บอเรต 7 phr ความทนความต้านแรงดึงลดต่ำลงมาก ในกลุ่มที่ใช้ซิลิกาเป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้ซิลิการ่วมกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr ชิ้นงานมีค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุด แต่เมื่อผสมร่วมกับซิงก์บอเรต 3 phr และ 7 phr ค่าความต้านแรงดึงลดต่ำลง

ค่าความต้านแรงดึงจะเพิ่มหรือลดลงเกิดจากส่วนผสมของสารตัวเติมและอนุภาคของยางธรรมชาติ ถ้าแรงเค้นส่งผ่านเนื้อยางธรรมชาติไปยังสารตัวเติมได้จะทำให้ค่าความทนความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยถ้าผิวของสารตัวเติมกับเนื้อยางธรรมชาติยึดติดกันได้ดีไม่ค้อยดีเนื่องมาจากการที่ไม่ผสมเข้ากันได้ดีเท่าที่ควรจะทำให้ไปลดค่าความต้านแรงดึงของชิ้นงาน [20] และยังมีงานวิจัยอื่นที่มีผลใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ [10, 17, 21, 31]

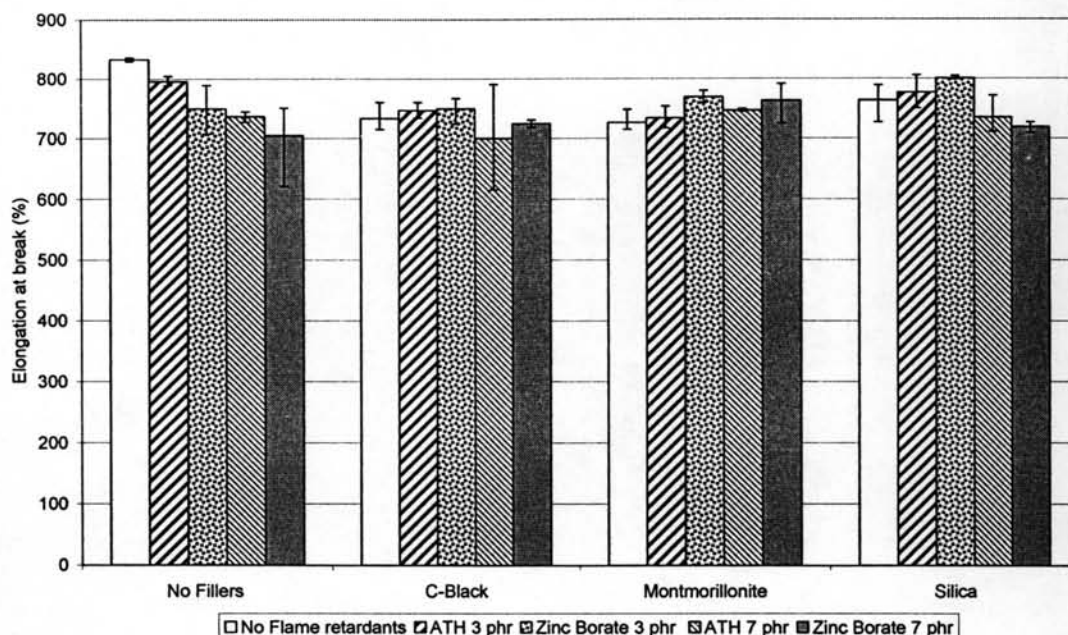




รูปที่ 4.29 ความทนความต้านแรงดึงของชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง

ผลของระยะยึดที่จุดขาดของยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.30 โดยในกลุ่มที่ไม่ได้ใช้สารตัวเติมพบว่า เมื่อไม่ได้ใช้สารหน่วงไฟทำให้ได้ระยะยึดที่จุดขาดสูงที่สุด แต่เมื่อใช้สารหน่วงไฟเพิ่มมากขึ้นทำให้ระยะยึดที่จุดขาดลดต่ำลงเรื่อยๆ ในกลุ่มที่ใช้เขม่าดำเป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้เขม่าดำเพียงอย่างเดียวจะได้ผลใกล้เคียงกับเมื่อใช้ร่วมกับซิงก์บอเรต และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr ในกลุ่มที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียวจะได้ผลใกล้เคียงกับการใช้ร่วมกับสารหน่วงไฟ ในกลุ่มที่ใช้ซิลิกาเป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้ซิลิกาเพียงอย่างเดียวจะได้ผลใกล้เคียงกับการใช้ร่วมกับซิงก์บอเรต 3 phr และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr แต่เมื่อผสมร่วมกับซิงก์บอเรต 7 phr และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr ทำให้ระยะยึดที่จุดขาดลดต่ำลง โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่เติมแต่งสารหน่วงไฟและและสารตัวเติมมีระยะยึดที่จุดขาดต่ำกว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่เติมแต่งสารหน่วงไฟและสารตัวเติม เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง สามารถยึดตัวได้มากเมื่อได้รับความต้านแรงดึง ดังนั้นการเติมแต่งสารหน่วงไฟซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ที่มีความแข็ง เมื่อผสมเข้าไปกับยางธรรมชาติจึงมีผลทำให้ระยะยึดที่จุดขาดลดลง อีกทั้งอนุภาคของสารหน่วงไฟจะไปขัดขวางการยึดตัวของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ ซึ่งบริเวณที่อยู่ใกล้กับสารตัวเติมนั้นเนื้อยางจะสูญเสียความสามารถในการเสียรูปแบบอิลาสติก ดังนั้นยางธรรมชาติที่ผสมสารหน่วงไฟจะเกิดการขาดที่ค่าการเสียรูปแบบอิลาสติกที่ต่ำ [20]

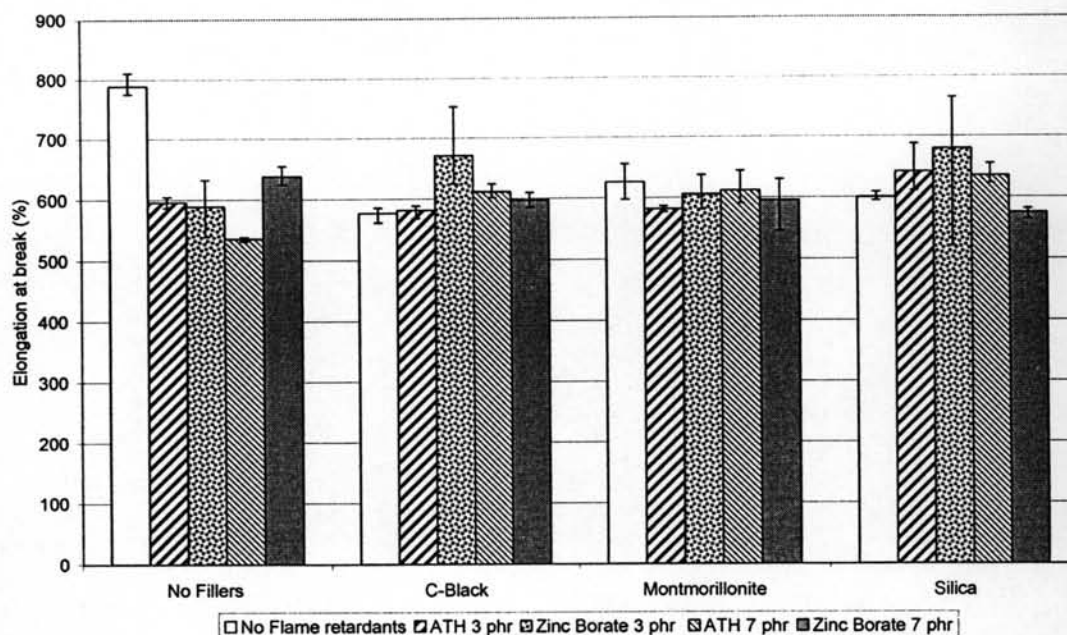




รูปที่ 4.30 ระยะยืดที่จุดขาดของชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง

ผลของระยะยืดที่จุดขาดของยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.31 โดยในกลุ่มที่ไม่ได้ใช้สารตัวเติมในยางธรรมชาติพบว่า เมื่อไม่ได้ใช้สารหน่วงไฟชิ้นงานมีระยะยืดที่จุดขาดสูงที่สุด แต่เมื่อใช้สารหน่วงไฟมากขึ้นทำให้ระยะยืดที่จุดขาดลดต่ำลง ในกลุ่มที่ใช้เขม่าดำเป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้เขม่าดำเพียงอย่างเดียวจะได้ผลใกล้เคียงกับการใช้ร่วมกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และซิงก์บอเรต 7 phr แต่เมื่อใช้ซิงก์บอเรต 3 phr ระยะยืดที่จุดขาดมีค่าสูง ในกลุ่มที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียวระยะยืดที่จุดขาดใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ใช้สารหน่วงไฟ ในกลุ่มที่ใช้ซิลิกาเป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้ซิลิกาเพียงอย่างเดียวจะได้ผลใกล้เคียงกับการใช้ร่วมกับซิงก์บอเรต 7 phr แต่เมื่อใช้ร่วมกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ระยะยืดที่จุดขาดเพิ่มขึ้น การใช้ซิงก์บอเรต 3 phr ทำให้ชิ้นงานมีระยะยืดที่จุดขาดสูงที่สุด

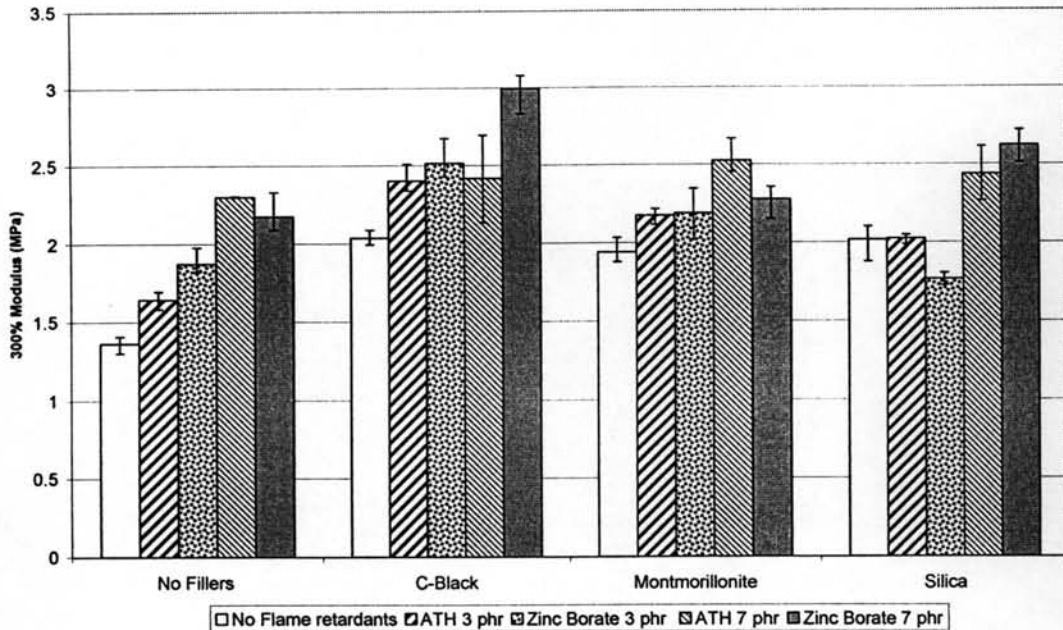
ผลที่ได้จะแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่เติมแต่งสารหน่วงไฟและสารตัวเติมจะมีระยะยืดที่จุดขาดที่สูง แต่เมื่อใช้สารหน่วงไฟและสารตัวเติมลงไปทำให้ระยะยืดที่จุดขาดลดต่ำลง และยางธรรมชาติที่เติมแต่งสารหน่วงไฟก่อนการบ่มเร่งจะมีระยะยืดที่จุดขาดสูงกว่าหลังการบ่มเร่ง เนื่องจากยางธรรมชาติได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นทำให้ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นลดลงจึงมีผลทำให้ระยะยืดที่จุดขาดลดลง



รูปที่ 4.31 ระยะยืดที่จุดขาดของชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง

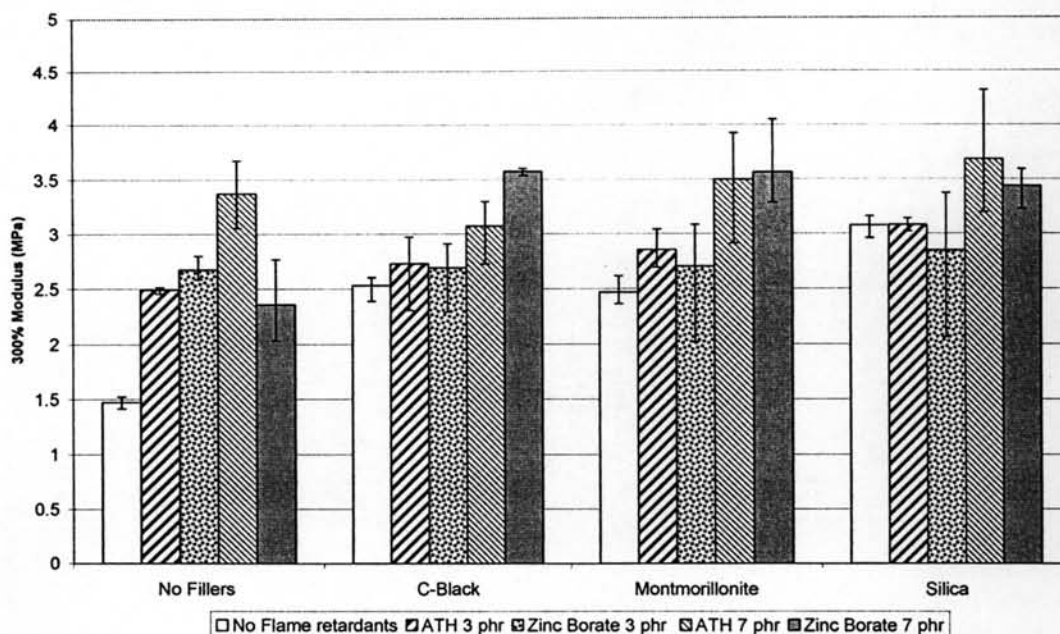
มอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.32 โดยพบว่าในกลุ่มที่ไม่ได้ใช้สารตัวเติม เมื่อไม่ได้ใช้สารหน่วงไฟมอดุลัสมีค่าต่ำที่สุด แต่เมื่อใช้สารหน่วงไฟเพิ่มมากขึ้นทำให้มอดุลัสสูงขึ้น ในกลุ่มที่ใช้เขม่าดำเป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้เขม่าดำเพียงอย่างเดียวจะทำให้มอดุลัสต่ำกว่าการใช้ร่วมกับสารหน่วงไฟ โดยเมื่อใช้ร่วมกับซิงก์บอเรต 7 phr ชิ้นงานที่ได้มีมอดุลัสสูงที่สุด ในกลุ่มที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียวชิ้นงานมีมอดุลัสต่ำกว่าเมื่อใช้ร่วมกับสารหน่วงไฟ ซึ่งเมื่อใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr ชิ้นงานมีมอดุลัสสูงที่สุด ในกลุ่มที่ใช้ซิลิกาเป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้ซิลิกาเพียงอย่างเดียวจะได้ผลใกล้เคียงกับเมื่อใช้ร่วมกับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr แต่เมื่อใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr และซิงก์บอเรต 7 phr มอดุลัสของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้นมา โดยเมื่อใช้ร่วมกับซิงก์บอเรต 3 phr มอดุลัสของชิ้นงานต่ำที่สุด

ยางธรรมชาติที่เติมแต่งสารหน่วงไฟและสารตัวเติมมีมอดุลัสมากกว่ายางธรรมชาติที่ไม่เติมแต่งสารหน่วงไฟและสารตัวเติม เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่ยืดหยุ่นสูงจึงเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายเมื่อได้รับความต้านแรงดึง เมื่อผสมสารหน่วงไฟซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ที่มีความแข็งแรงจะทำให้มอดุลัสเพิ่มขึ้น อีกทั้งอนุภาคของสารหน่วงไฟจะไปขัดขวางการยืดตัวของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ ทำให้ต้องใช้ความต้านแรงดึงยืดที่สูงมากขึ้น



รูปที่ 4.32 มอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง

มอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.33 โดยในกลุ่มที่ไม่ได้ใช้สารตัวเติมในยางธรรมชาติพบว่า เมื่อไม่ได้ใช้สารหน่วงไฟจะทำให้ได้ค่ามอดุลัสต่ำที่สุด แต่เมื่อใช้สารหน่วงไฟเพิ่มมากขึ้นทำให้มอดุลัสสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งมอดุลัสจะมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr ในกลุ่มที่ใช้ตัวเติม ได้แก่ เขม่าดำ มอนต์มอริลโลไนต์ และซิลิกา เป็นส่วนประกอบพบว่า เมื่อใช้ตัวเติมเพียงอย่างเดียวจะทำให้มอดุลัสใกล้เคียงกับเมื่อใช้สารหน่วงไฟ 3 phr แต่เมื่อใช้สารหน่วงไฟ 7 phr ทำให้มอดุลัสสูงขึ้น ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่เติมแต่งสารหน่วงไฟและสารตัวเติมมีมอดุลัสต่ำ แต่เมื่อใช้สารหน่วงไฟและสารตัวเติมลงไปทำให้มอดุลัสสูงขึ้น และยางธรรมชาติที่เติมแต่งสารหน่วงไฟก่อนการบ่มเร่งจะมีมอดุลัสต่ำกว่าหลังการบ่มเร่ง เนื่องจากเมื่อยางธรรมชาติได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นทำให้ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นลดลงมีผลทำให้มอดุลัสเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.33 มอดุลัสที่ระยะยืด 300%ของชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง

จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสม อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr กับเซมาดำมีความต้านแรงดึงดีที่สุด ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นสูงสามารถยืดตัวได้มากเมื่อได้รับความต้านแรงดึง ดังนั้นการเติมแต่งสารหน่วงไฟซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีความแข็ง เมื่อผสมเข้าไปกับยางธรรมชาติจึงมีผลทำให้ระยะยืดที่จุดขาดลดลง อีกทั้งอนุภาคของสารหน่วงไฟจะไปขัดขวางการยืดตัวของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ไม่เติมแต่งสารหน่วงไฟและสารตัวเติมจะมีค่ามอดุลัสที่ต่ำ แต่เมื่อใช้สารหน่วงไฟและสารตัวเติมลงไปทำให้มีค่ามอดุลัสที่สูงขึ้นมาก และยางธรรมชาติที่เติมแต่งสารหน่วงไฟก่อนการบ่มเร่งจะมีมอดุลัสต่ำกว่าหลังการบ่มเร่ง เนื่องจากเมื่อยางธรรมชาติได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นทำให้ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นลดลงจึงมีผลทำให้มอดุลัสเพิ่มขึ้น