บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้น้ำยางธรรมชาติถูกนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยวิธีการหล่อแบบ (casting) สารเคมีที่ใช้ในการวัลคาไนซ์และสารเติมแต่งอื่นๆ ที่ใช้ในสูตรการผสมยางจึงต้องถูกทำให้อยู่ในรูปดิสเพอร์ชันก่อนจึงจะสามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟมีค่า LOI สูงกว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟแต่มีค่าน้อยกว่า 19 ซึ่งก็ยังคงทำให้ชิ้นงานติดไฟได้ง่ายภายในบรรยากาศปกติ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารหน่วงไฟที่ใช้น้อยมากอยู่ในช่วง 3-7 phr เท่านั้น และการใช้สารตัวเติมร่วมกับสารหน่วงไฟเป็นการเสริมให้วัสดุติดไฟได้ยากขึ้นเล็กน้อย

2. ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟเริ่มติดไฟค่อนข้างช้ากว่าและมีอัตราการลามไฟที่ช้ากว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟประมาณ 40% นอกจากนี้ในช่วงแรกยังมีปริมาณควันที่เบาบางกว่า

ลักษณะของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟหลังจากติดไฟแล้วเกิดการหลอมเหลวและหยดลงบนพื้นวัสดุที่ติดไฟง่ายได้ช้ากว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟ และยังทำให้วัสดุนั้นติดไฟได้ช้ากว่าอีกด้วย นอกจากนี้เปลวไฟที่เกิดขึ้นมีการลุกไหม้เป็นวงที่แคบกว่า และบริเวณของวัสดุที่ไหม้หลังจากไฟดับแล้วมีพื้นที่น้อยกว่า

3. ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมซิงก์บอเรต 7 phr กับซิลิกามีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดีกว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr กับซิลิกาเล็กน้อย แต่หากพิจารณาในแง่ของต้นทุนการผลิตแล้วควรใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟเนื่องจากมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับซิงก์บอเรต และมีราคาถูกกว่า

4. ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟและชิ้นงานที่เตรียมได้ทุกสูตร มี TGA เทอร์โมแกรมที่มีลักษณะคล้ายกันมากทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง โดย

- ชิ้นงานยางธรรมชาติทุกสูตรสลายตัวที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน คือ 360-420 องศาเซลเซียส โดยชิ้นงานมีการสลายตัวเพียงขั้นตอนเดียว ซึ่งอาจเนื่องมาจากชิ้นงานยางธรรมชาติใส่สารตัวเติมและสารหน่วงไฟในปริมาณที่น้อยมาก

- ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้ทั้งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟจะมีการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 417 องศาเซลเซียส ประมาณ 81 % และสลายตัวหมด ในขณะที่ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้สารหน่วงไฟมากขึ้นไม่ถูกเผาไหม้จนหมด

- น้ำหนักที่สูญหายไป และปริมาณชาร์ที่เกิดขึ้นของชิ้นงานยางธรรมชาติแต่ละสูตรก่อนการบ่มเร่งและหลังการบ่มเร่งใกล้เคียงกัน โดยถ้าใช้ปริมาณสารหน่วงไฟมากขึ้นมีผลทำให้น้ำหนักที่สูญหายไปน้อยลง และเกิดชาร์มากขึ้น

5. ก่อนและหลังการบ่มเร่ง ชิ้นงานยางธรรมชาติจะมีอุณหภูมิกลาสทรานสิชันจะมีค่าใกล้เคียง คือ ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ได้ใส่ทั้งสารหน่วงไฟและสารเสริมแรงจะมีอุณหภูมิกลาส-ทรานสิชันที่ต่ำกว่าชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้สารหน่วงไฟและสารเสริมแรง

6. ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr กับผงเขม่าดำจะมีความต้านแรงดึงดีที่สุด

7. ชิ้นงานยางธรรมชาติที่มีการเติมแต่งสารหน่วงไฟเมื่อได้รับแรงดึงจะมีผลทำให้ระยะยืดที่จุดขาดลดลง เนื่องจากสารหน่วงไฟที่เป็นสารอนินทรีย์จะมีความแข็ง อนุภาคของสารหน่วงไฟจึงไปขัดขวางการยืดตัวของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ

8. ก่อนและหลังการบ่มเร่งชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่เติมแต่งสารตัวเติมและสารหน่วงไฟมีค่ามอดุลัสที่ต่ำ แต่เมื่อใช้สารตัวเติมและสารหน่วงไฟลงไปทำให้มีค่ามอดุลัสที่สูงขึ้นมาก อย่างไรก็ตามชิ้นงานยางธรรมชาติที่เติมแต่งสารหน่วงไฟก่อนการบ่มเร่งจะมีมอดุลัสต่ำกว่าหลังการบ่มเร่ง เนื่องจากเมื่อชิ้นงานยางธรรมชาติได้รับความร้อนจะทำให้เกิดจุดเชื่อมต่อเพิ่มขึ้นทำให้ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นลดลงจึงมีผลทำให้มอดุลัสเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถเตรียมชิ้นงานที่ใช้สารตัวเติมและสารหน่วงไฟเกิน 10 phr ได้ เนื่องจากสารตัวเติมและสารหน่วงไฟจะเกิดการตกตะกอนในระหว่างการเตรียมชิ้นงานยางคงรูป ทำให้ไม่เห็นผลของการใช้สารหน่วงไฟที่ชัดเจนเท่าใดนัก ถ้าเปลี่ยนมาใช้ยางธรรมชาติในลักษณะของยางแท่งก็จะทำให้สามารถใช้สารตัวเติมและสารหน่วงไฟที่มีปริมาณมากขึ้นได้ และอาจสังเกตพฤติกรรมการหน่วงไฟที่ชัดเจนมากกว่านี้

ภาคผนวก ก

ก.1 เวลาและอัตราเร็วในการลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติ

สูตร	เวลาตั้งแต่ติดไฟจนไหม้หมด (วินาที)		Flame spread rate (เซนติเมตรต่อวินาที)	
	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง
B	30.13	32.22	0.53	0.50
A3	33.63	38.12	0.48	0.42
Z3	40.03	45.78	0.40	0.35
C	37.09	38.40	0.43	0.42
M	38.56	38.03	0.41	0.42
S	34.07	36.56	0.47	0.44
A7	49.00	56.87	0.33	0.28
Z7	53.00	60.19	0.30	0.27
A3C	40.47	47.88	0.40	0.33
A3M	45.25	39.59	0.35	0.40
A3S	45.97	49.96	0.35	0.32
A7C	51.07	52.66	0.31	0.30
A7M	50.07	54.68	0.32	0.29
A7S	53.41	56.31	0.30	0.28
Z3C	50.00	53.12	0.32	0.30
Z3M	55.97	59.03	0.29	0.27
Z3S	55.05	58.18	0.29	0.28
Z7C	54.38	63.46	0.29	0.25
Z7M	53.00	63.68	0.30	0.25
Z7S	57.68	64.35	0.28	0.25

ภาคผนวก ข

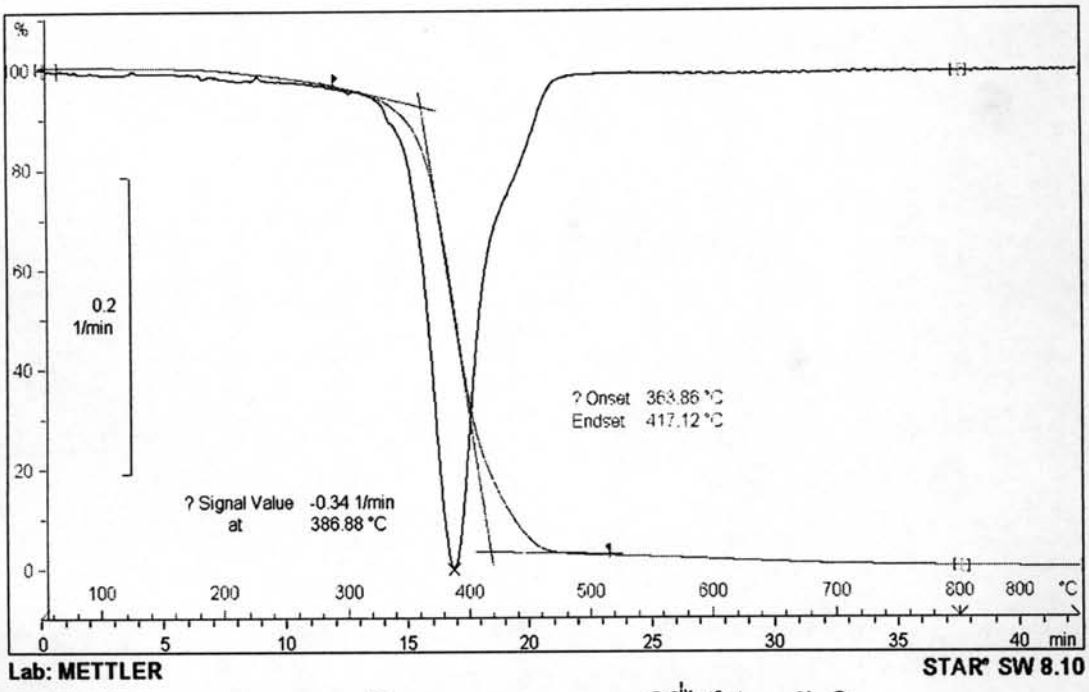
ข.1 ค่า Limiting Oxygen Index (%) ของยางธรรมชาติ

สูตร	Oxygen Index (%)
B	16.68
A3	17.23
Z3	17.45
C	18.19
M	17.9
S	17.97
A7	17.97
Z7	18.27
A3C	18.17
A3M	18.19
A3S	18.17
A7C	18.39
A7M	18.59
A7S	18.45
Z3C	18.45
Z3M	18.45
Z3S	18.14
Z7C	18.68
Z7M	18.51
Z7S	18.31

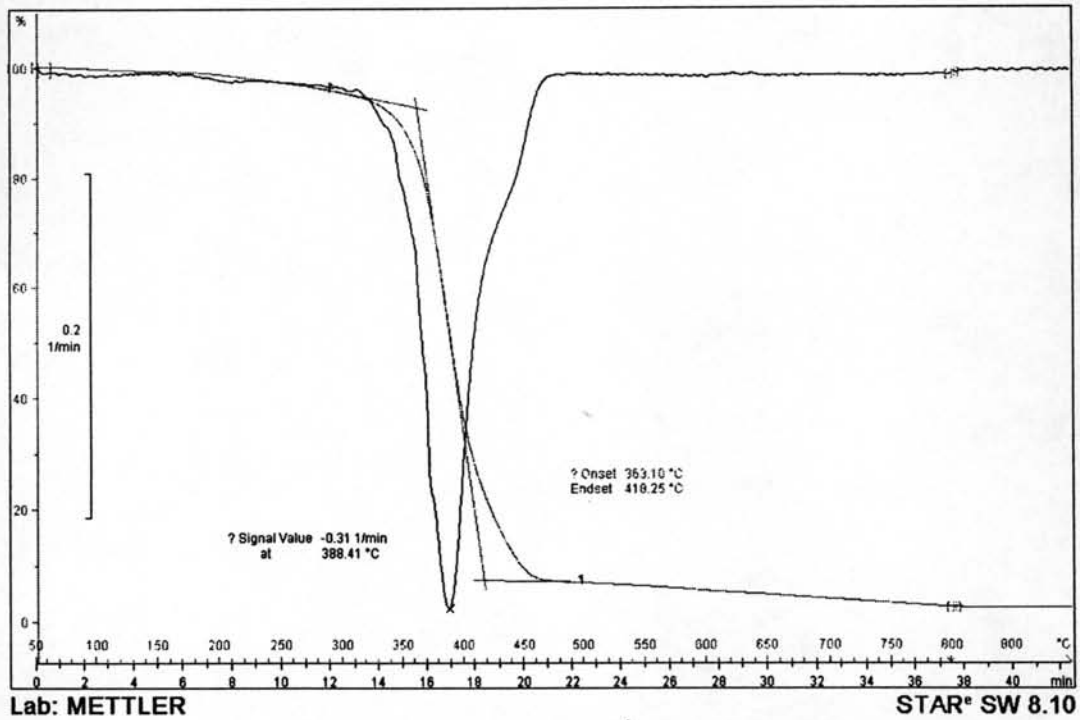
ภาคผนวก ค

ค.1 กราฟแสดงสมบัติทางด้านความร้อน (TGA เทอร์โมแกรม)ของยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง

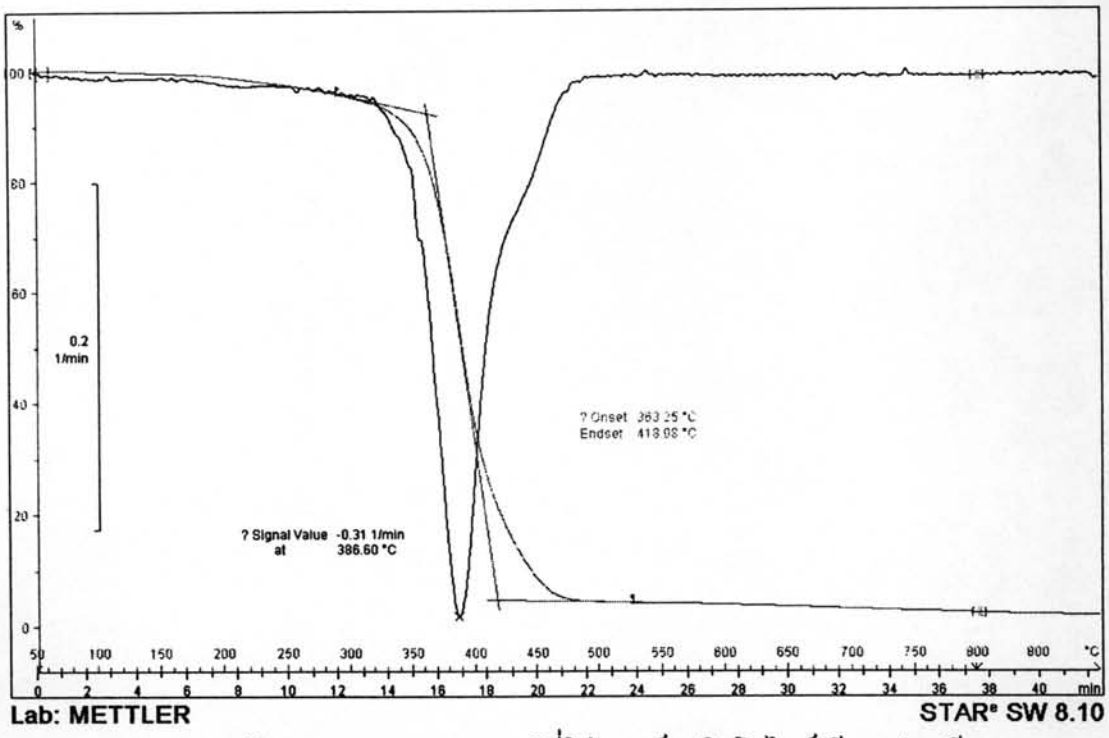
ค.1.1 กลุ่มไม่มีสารหน่วงไฟ



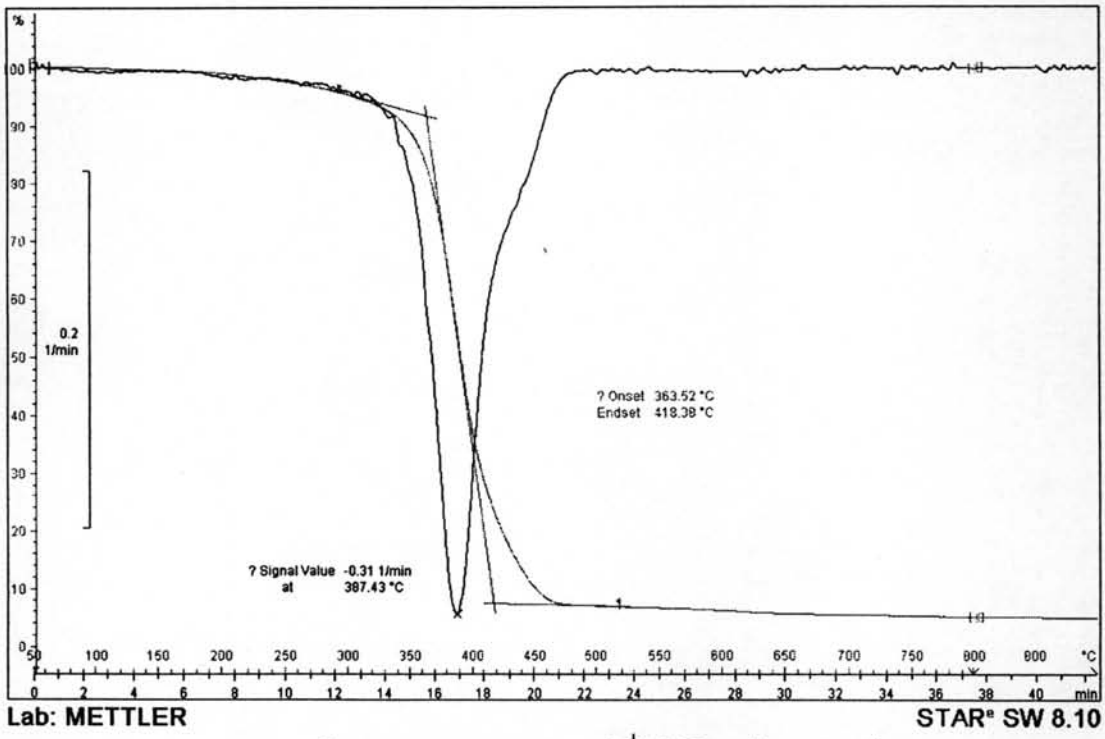
TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเพียงอย่างเดียว

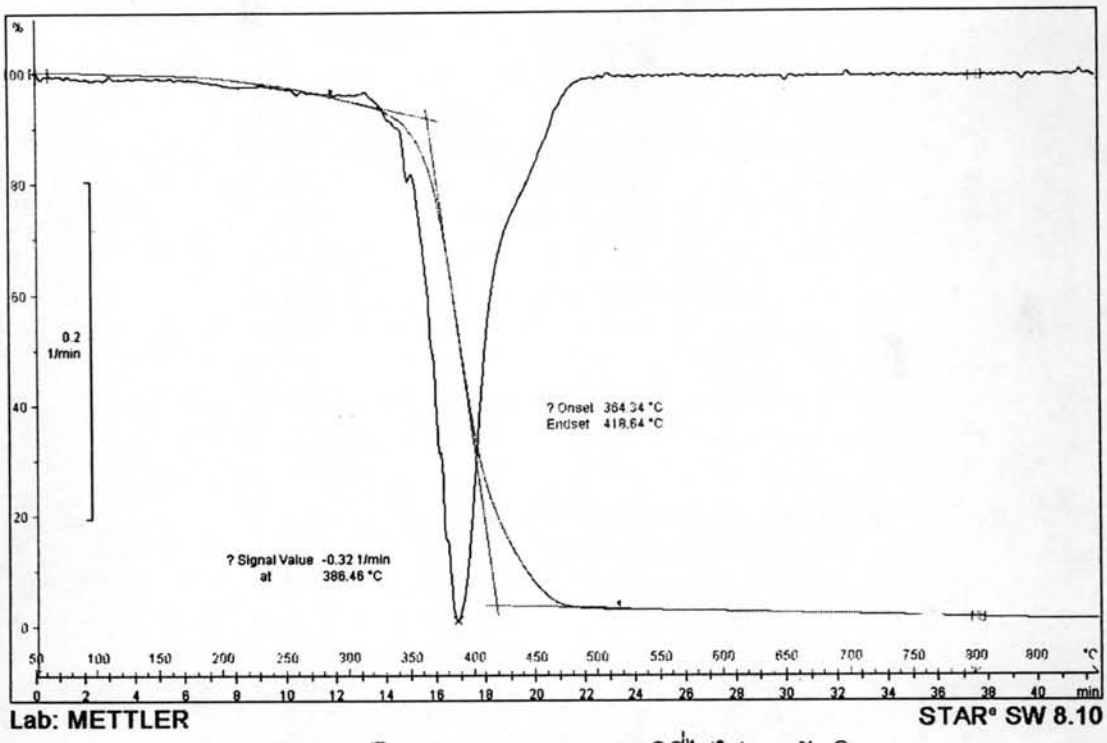


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียว

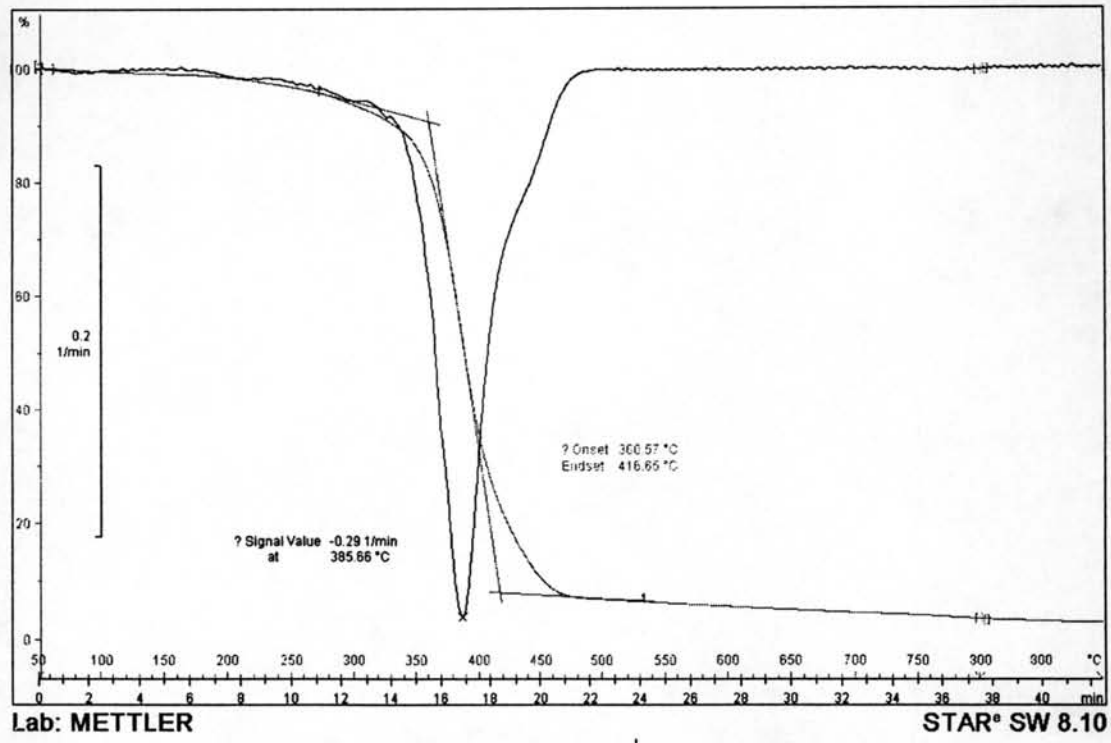


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเพียงอย่างเดียว

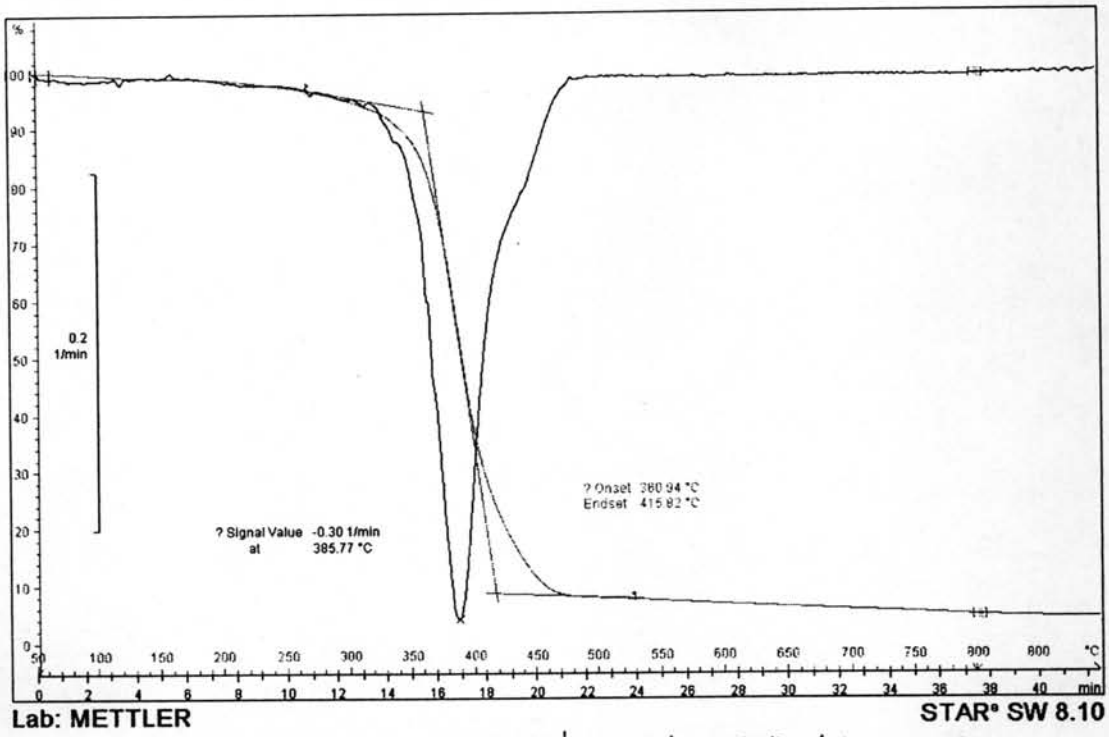
ค.1.2 กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr เป็นองค์ประกอบ



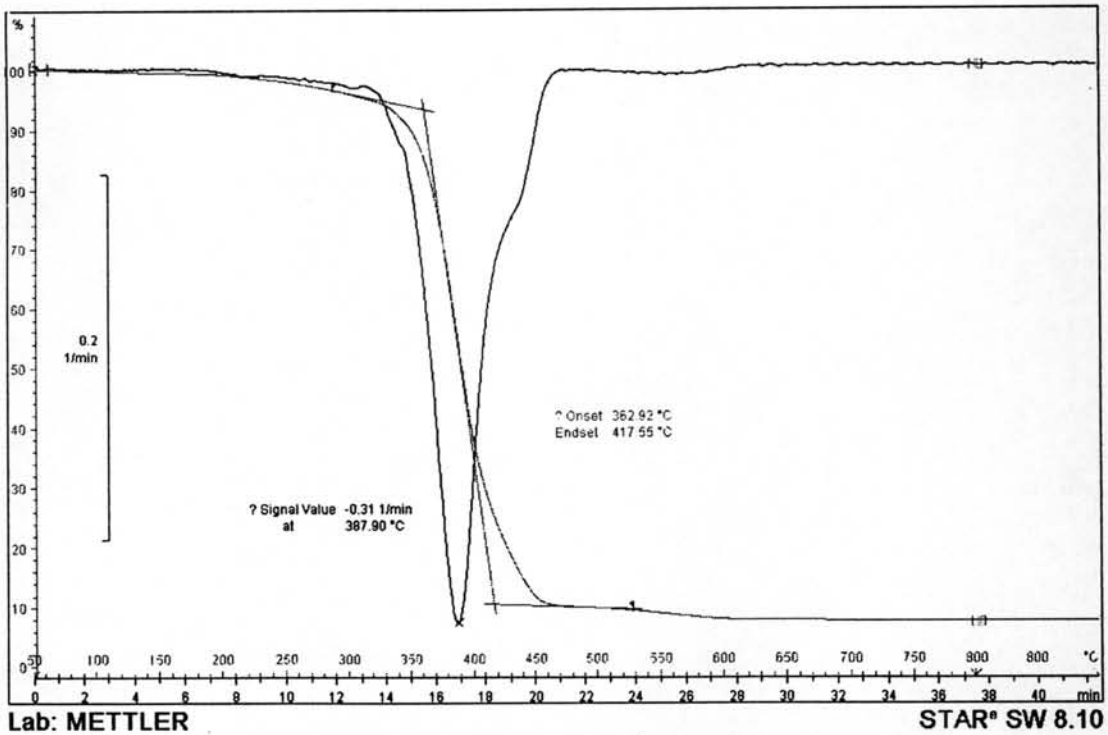
TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเป็นสารตัวเติม

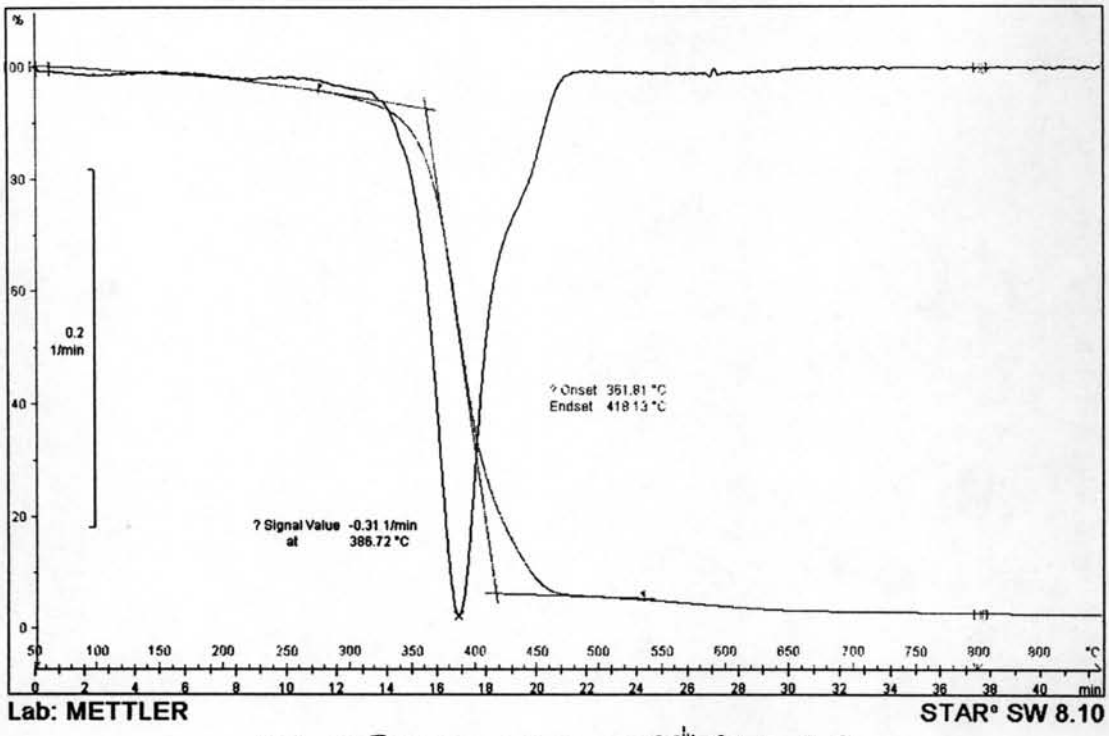


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติม

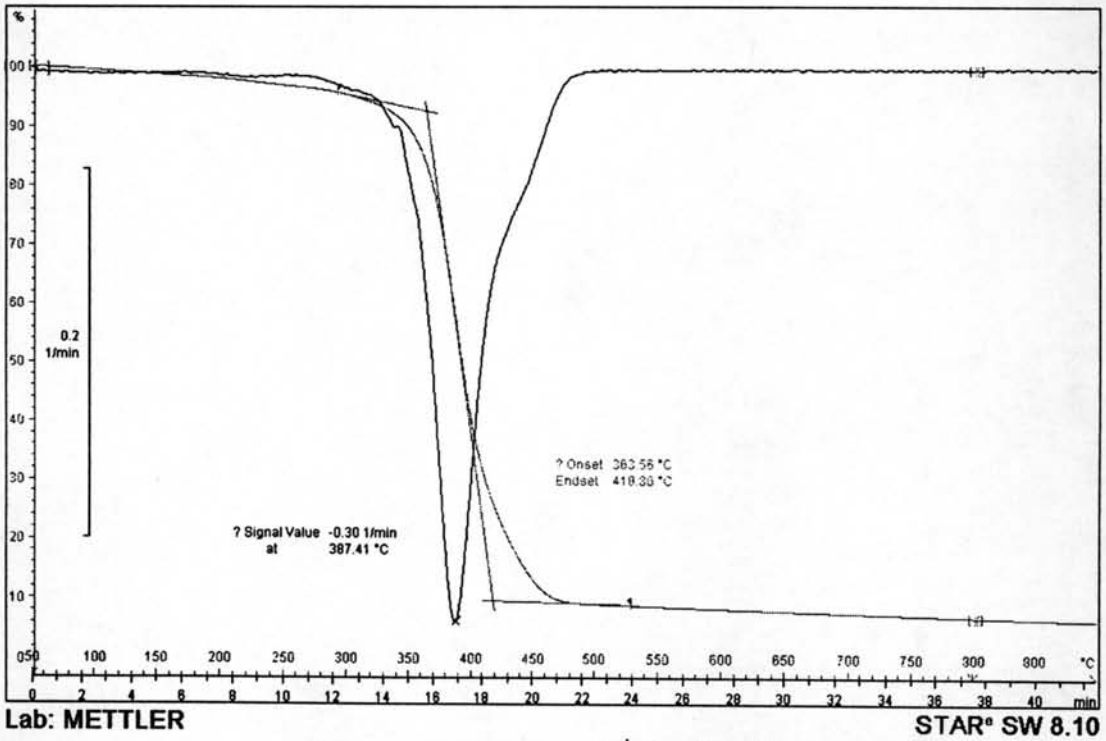


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

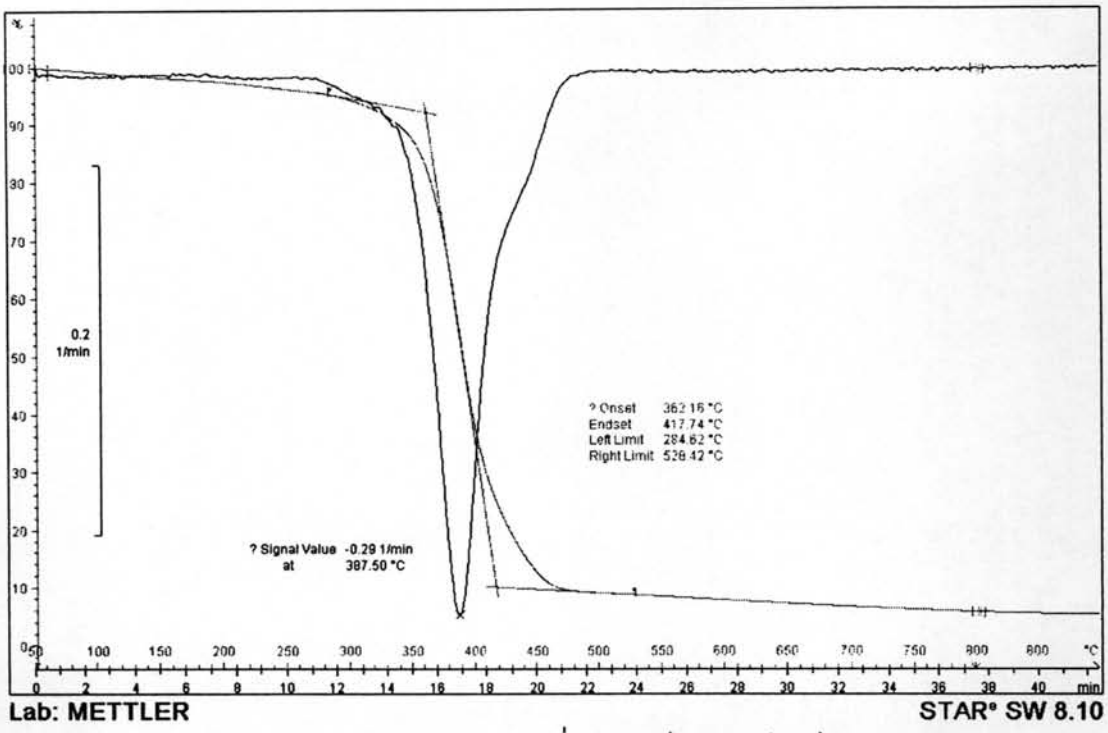
ค.1.3 กลุ่มที่มีซิงก์บอเรต 3 phr เป็นองค์ประกอบ



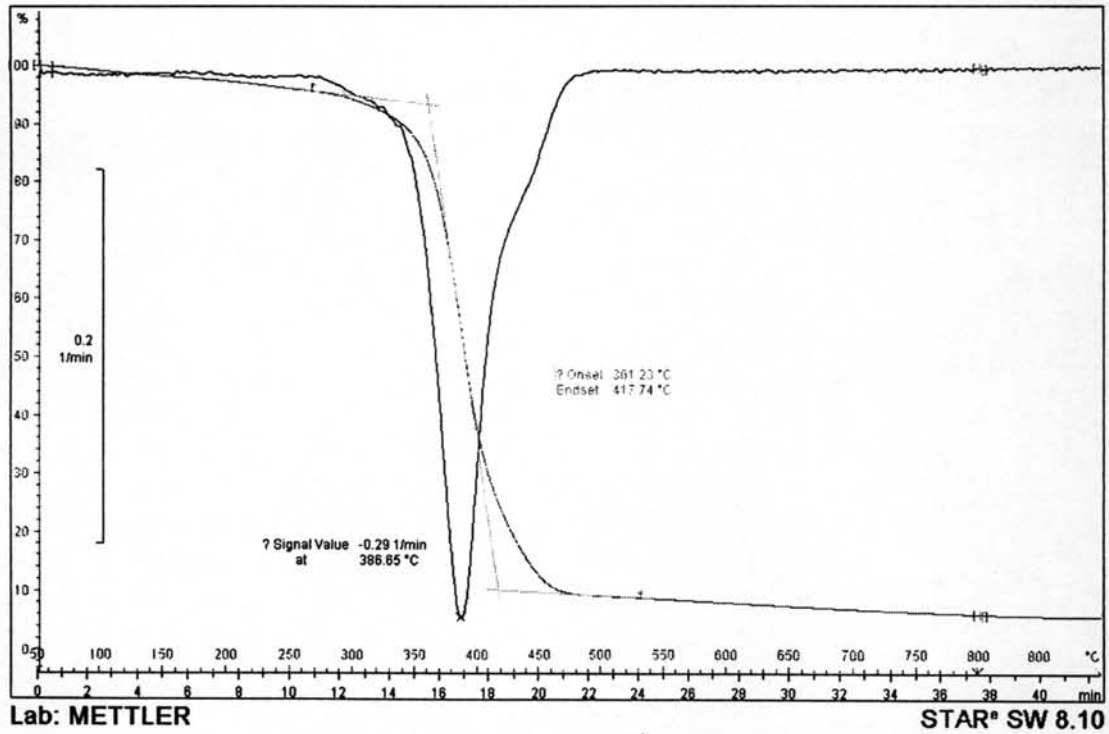
TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเป็นสารตัวเติม

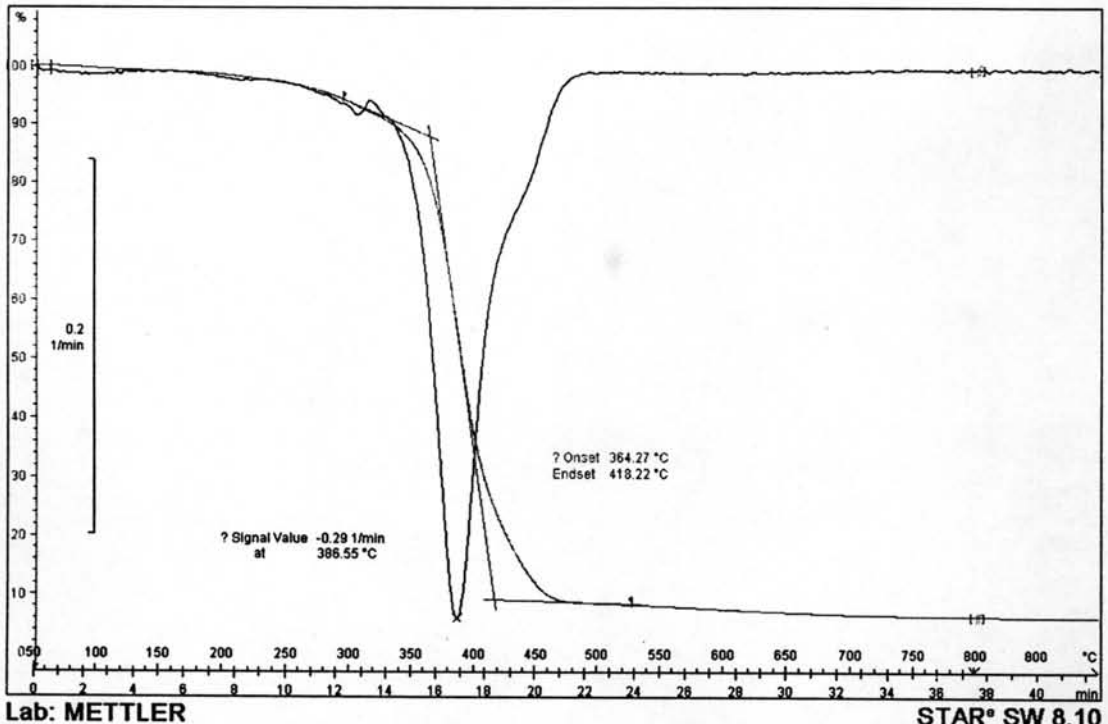


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติม

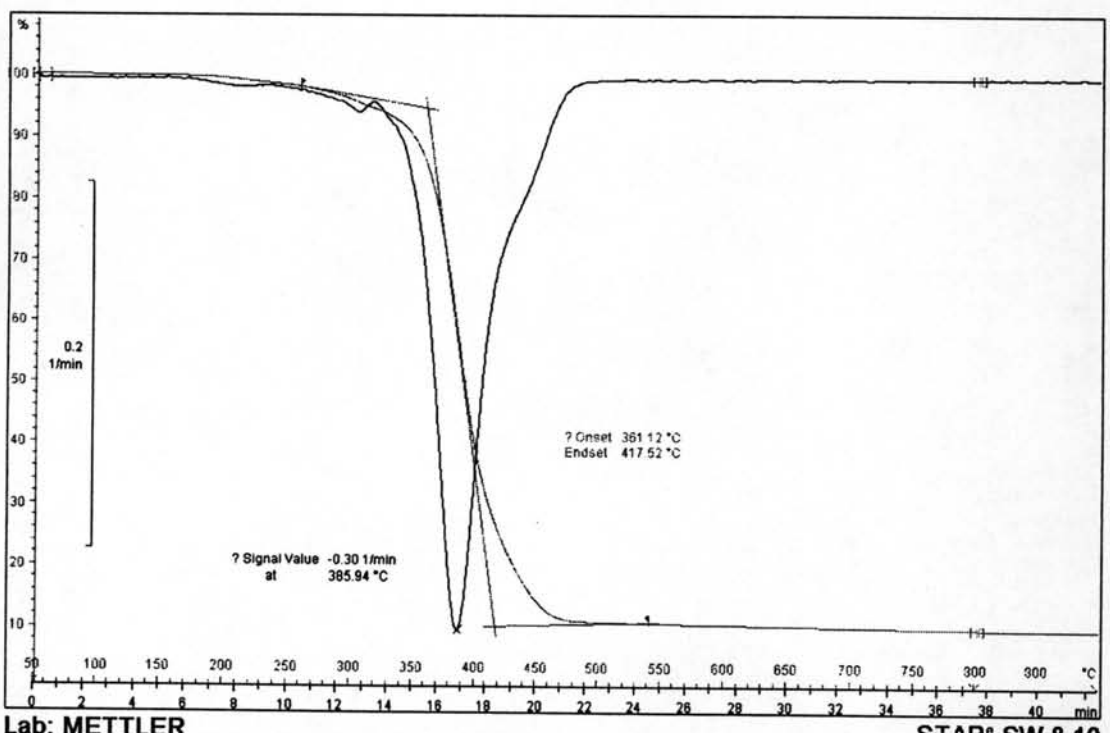


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

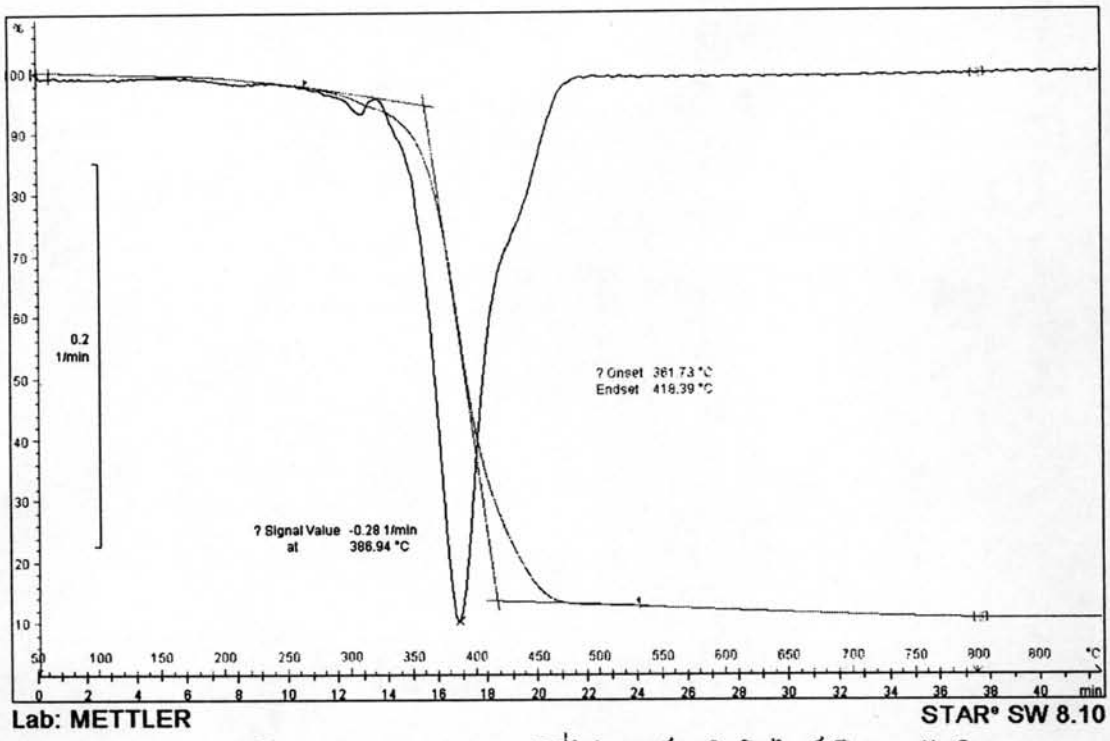
ค.1.4 กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr เป็นองค์ประกอบ



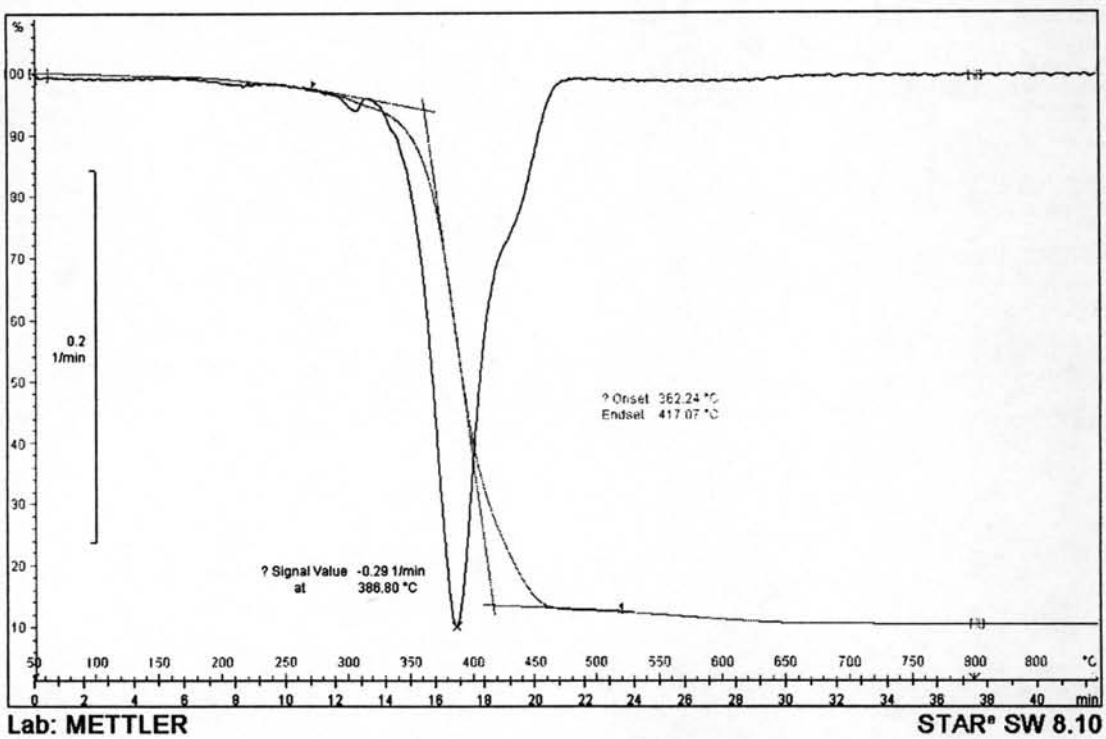
TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเป็นสารตัวเติม

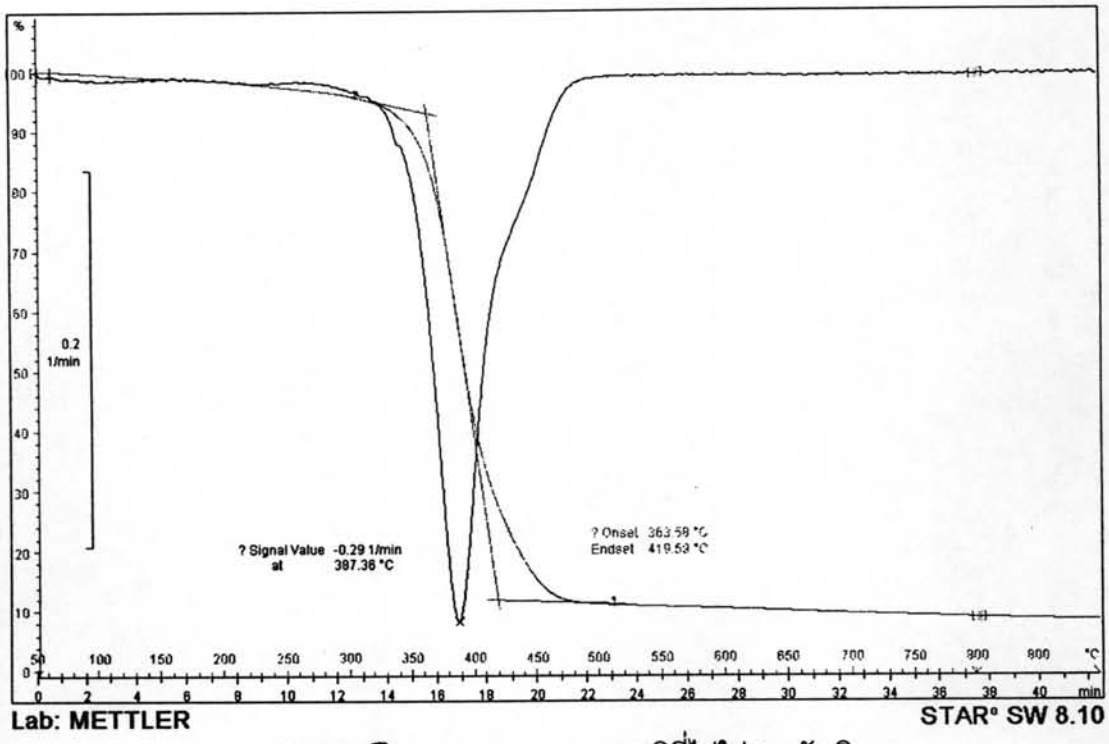


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติม

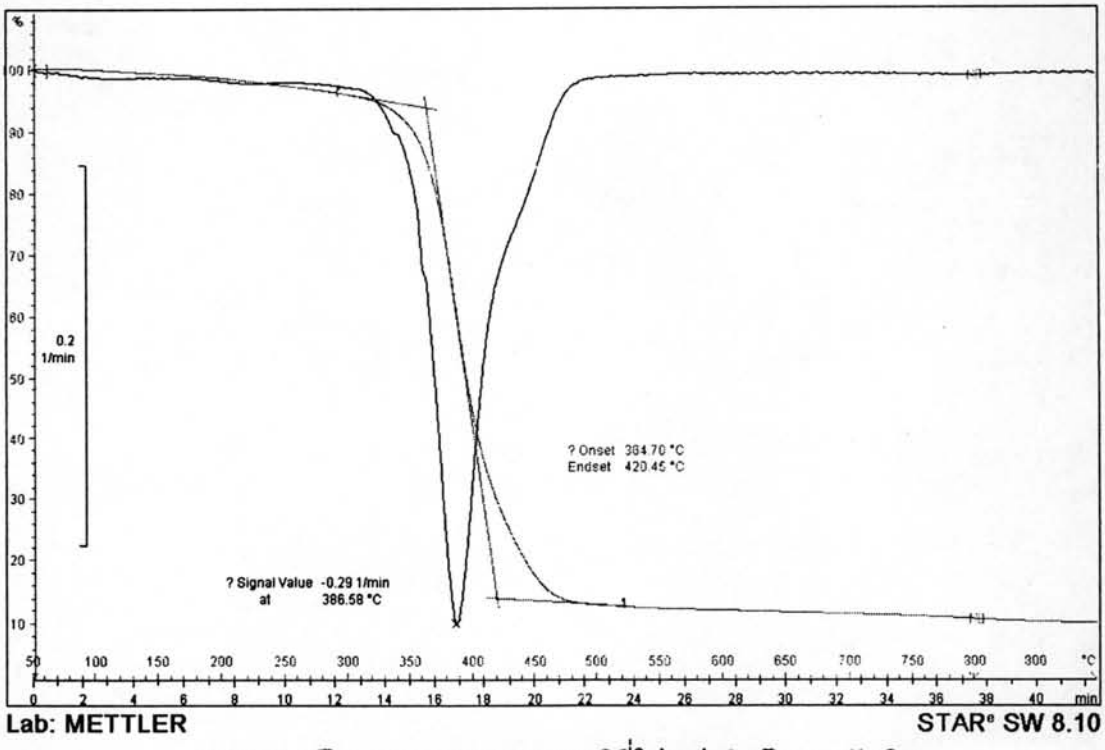


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

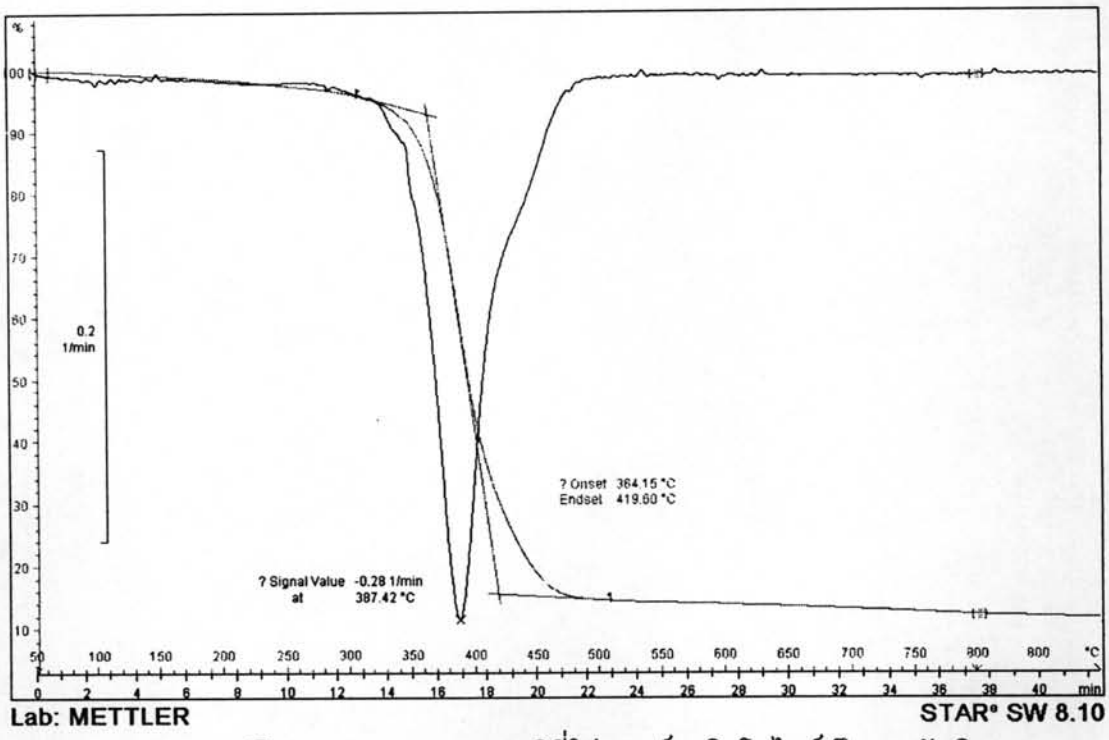
ค.1.5 กลุ่มที่มีซิงก์บอเรต 7 phr เป็นองค์ประกอบ



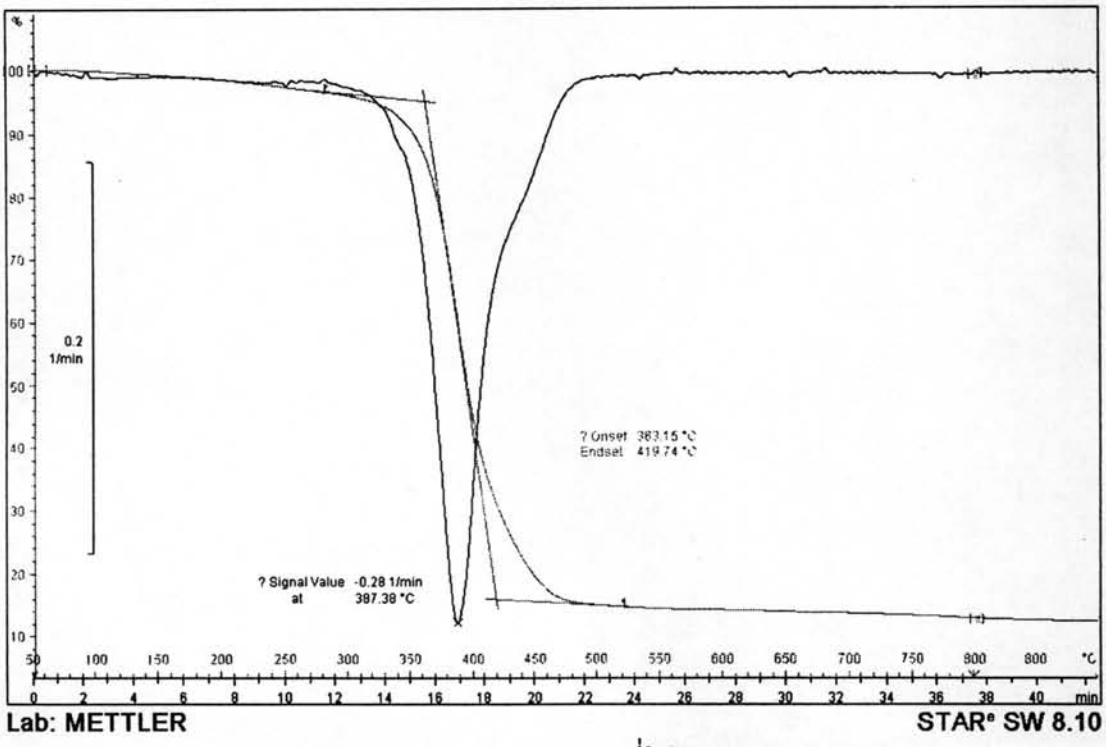
TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเป็นสารตัวเติม



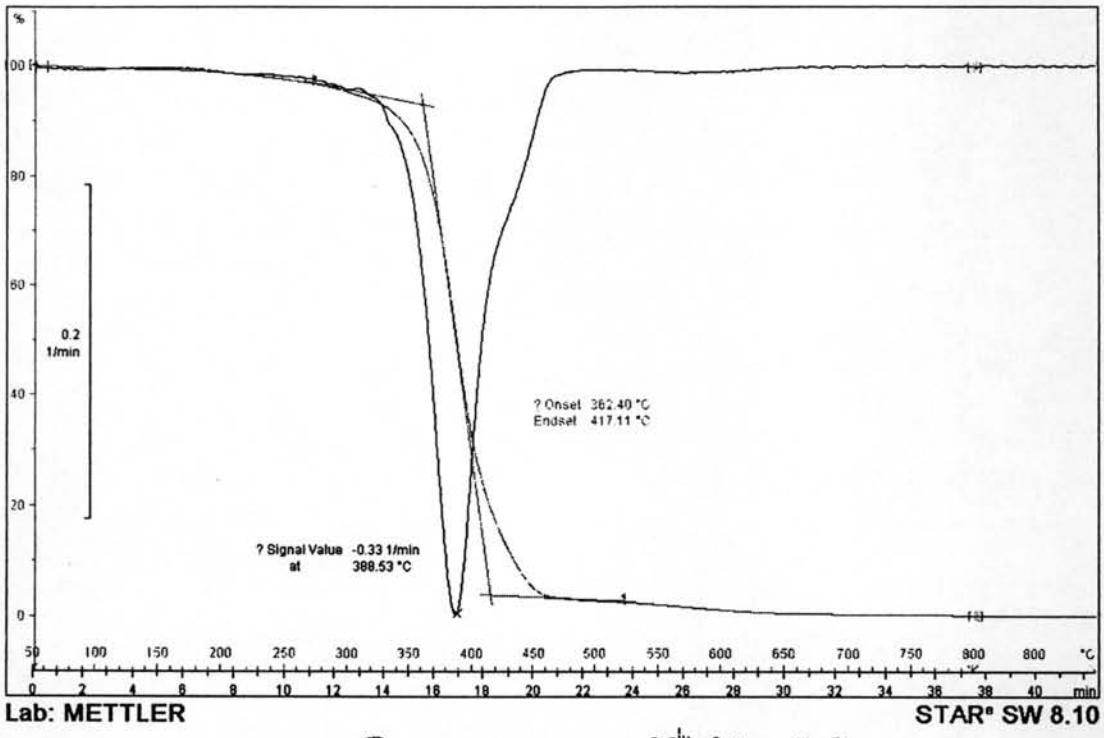
TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติม



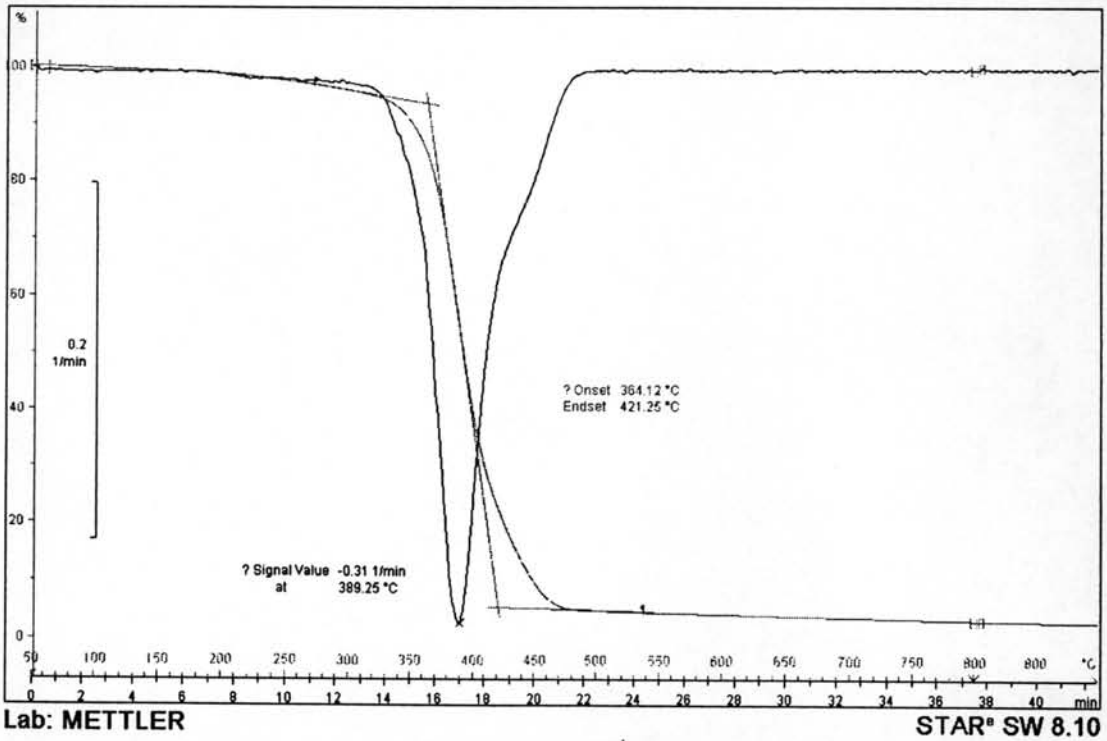
TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

ค.2 กราฟแสดงสมบัติทางด้านความร้อน (TGA เทอร์โมแกรม)ของยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง

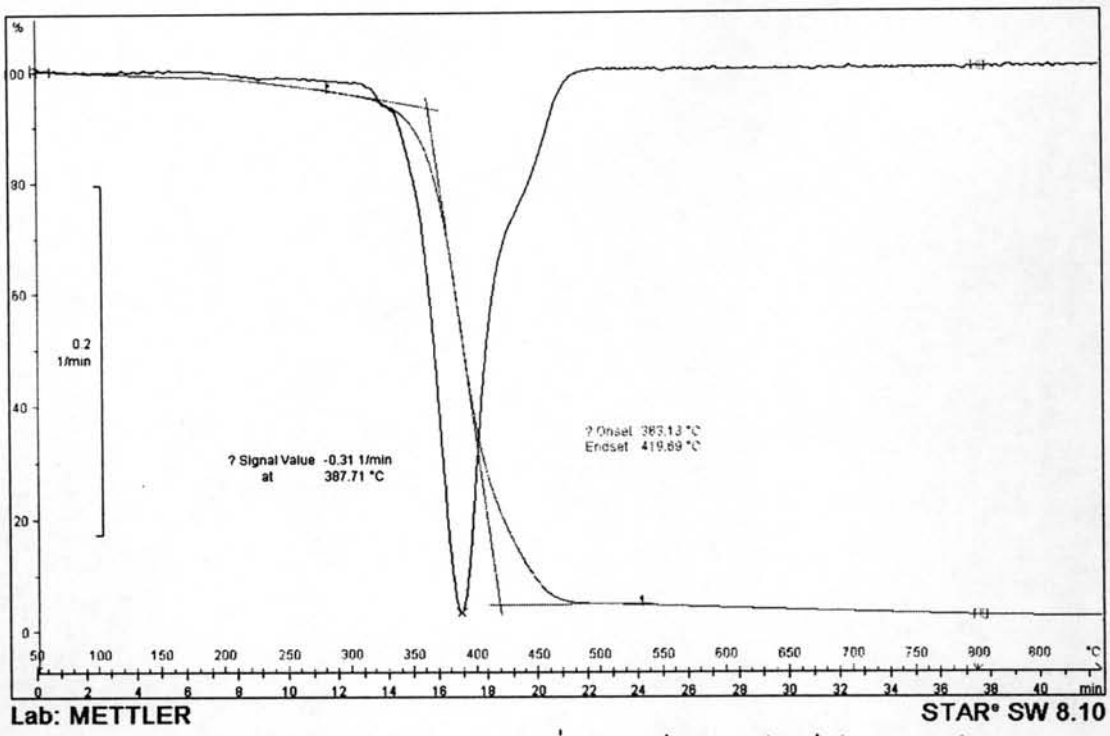
ค.2.1 กลุ่มไม่มีสารหน่วงไฟ



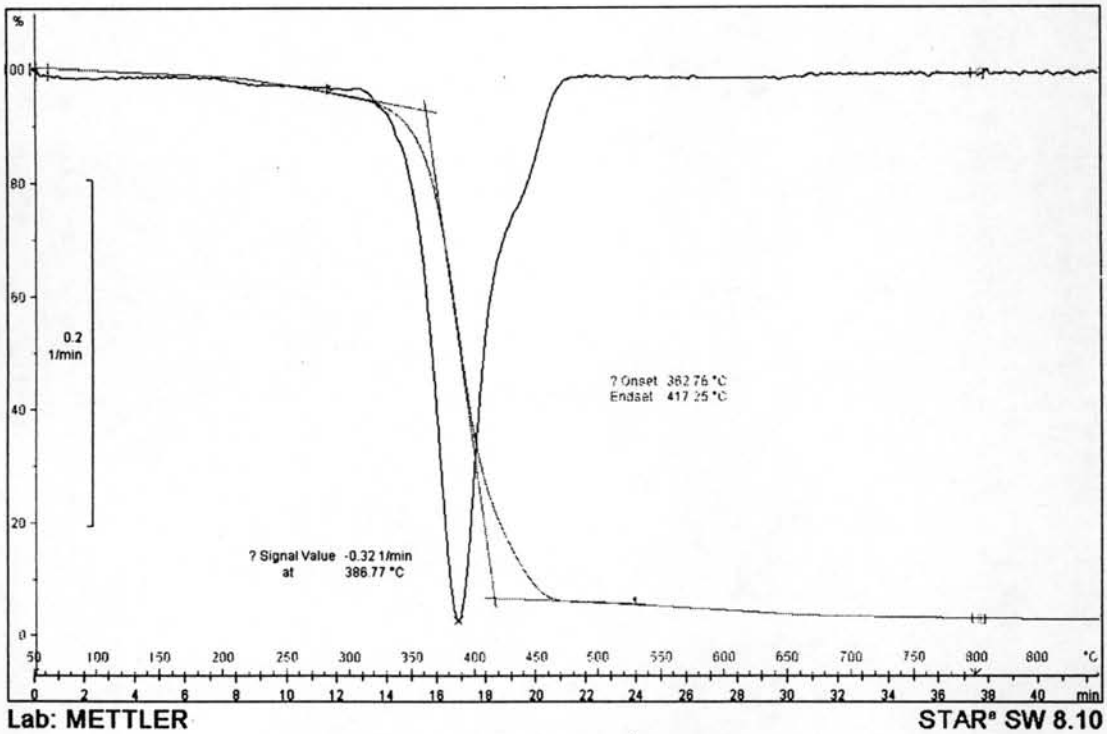
TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเพียงอย่างเดียว

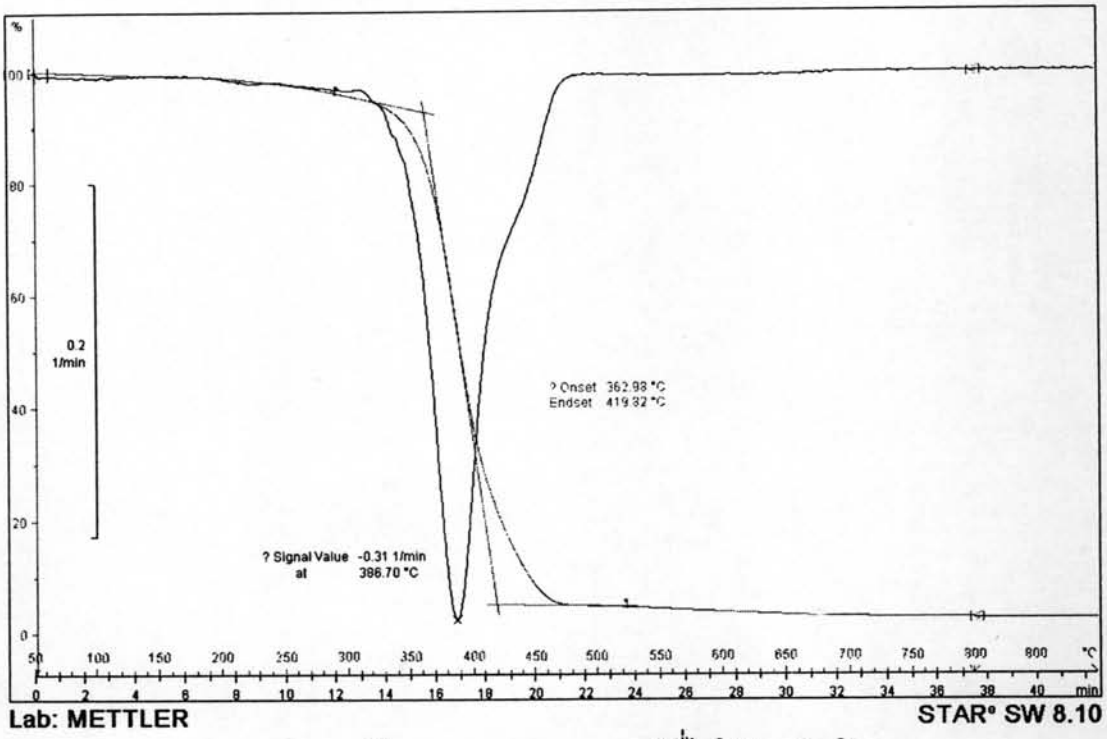


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียว

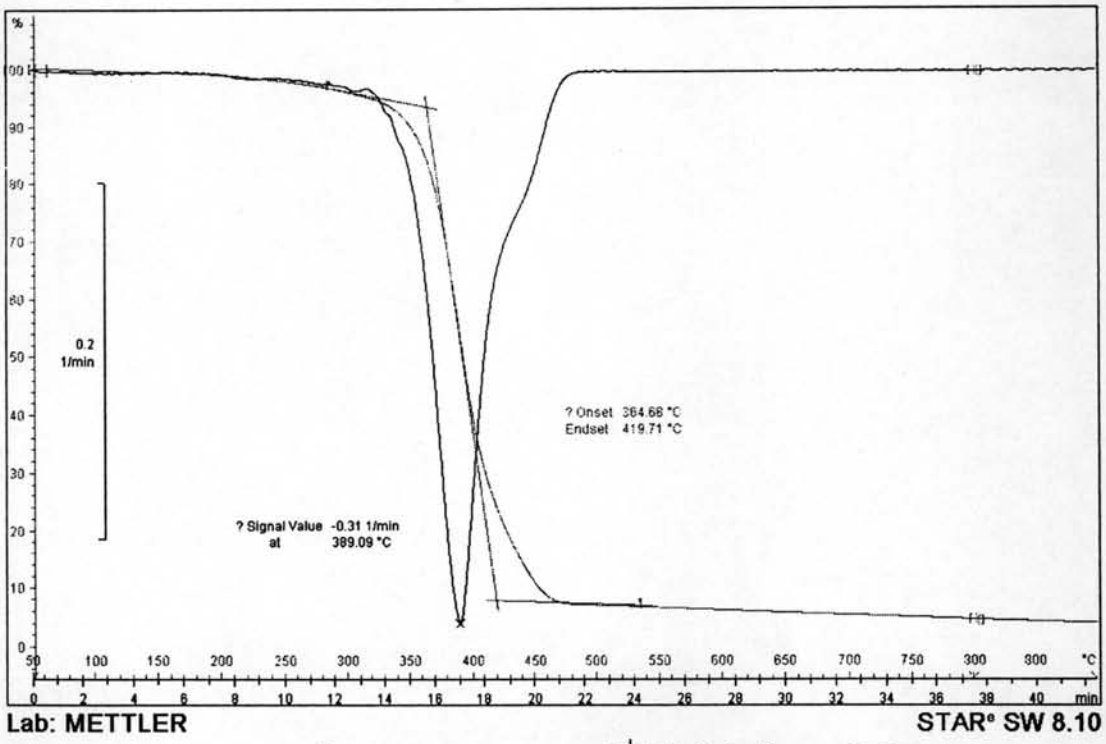


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเพียงอย่างเดียว

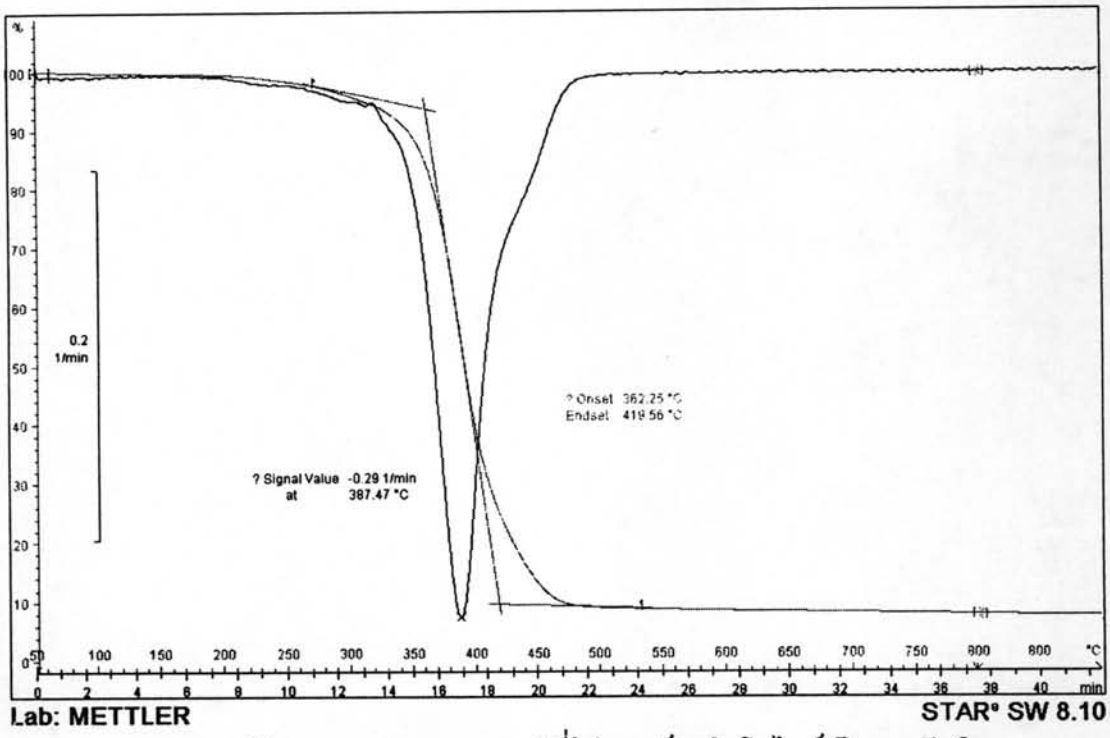
ค.2.2 กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr เป็นองค์ประกอบ



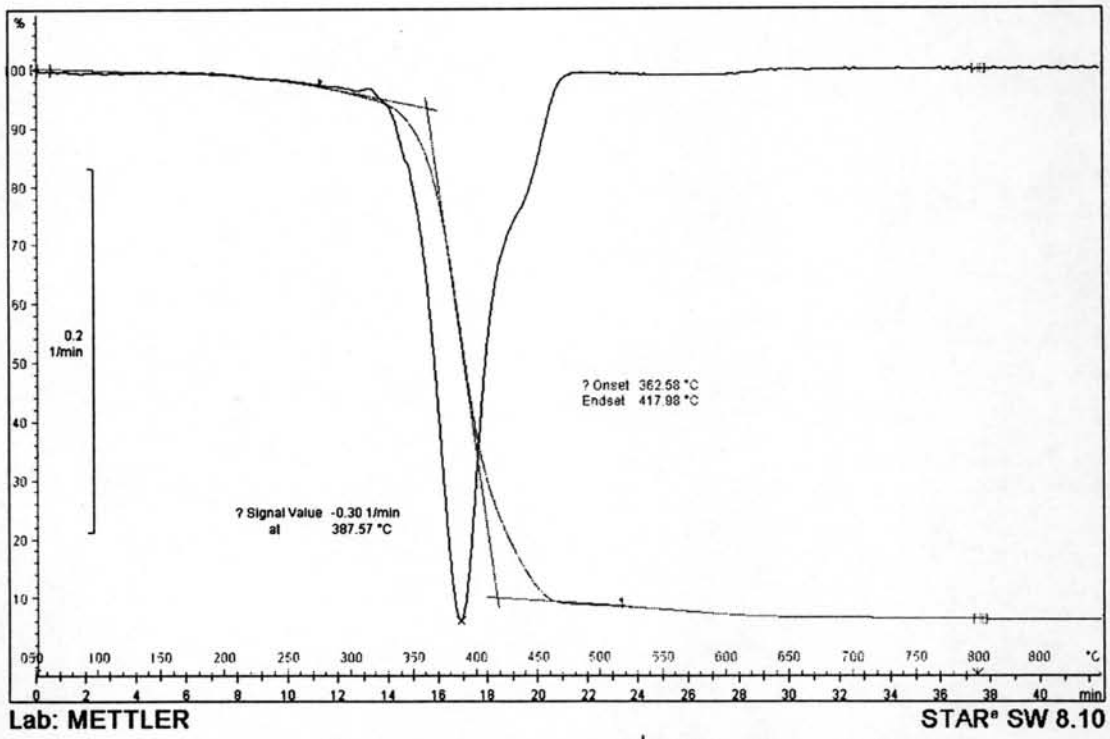
TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเป็นสารตัวเติม

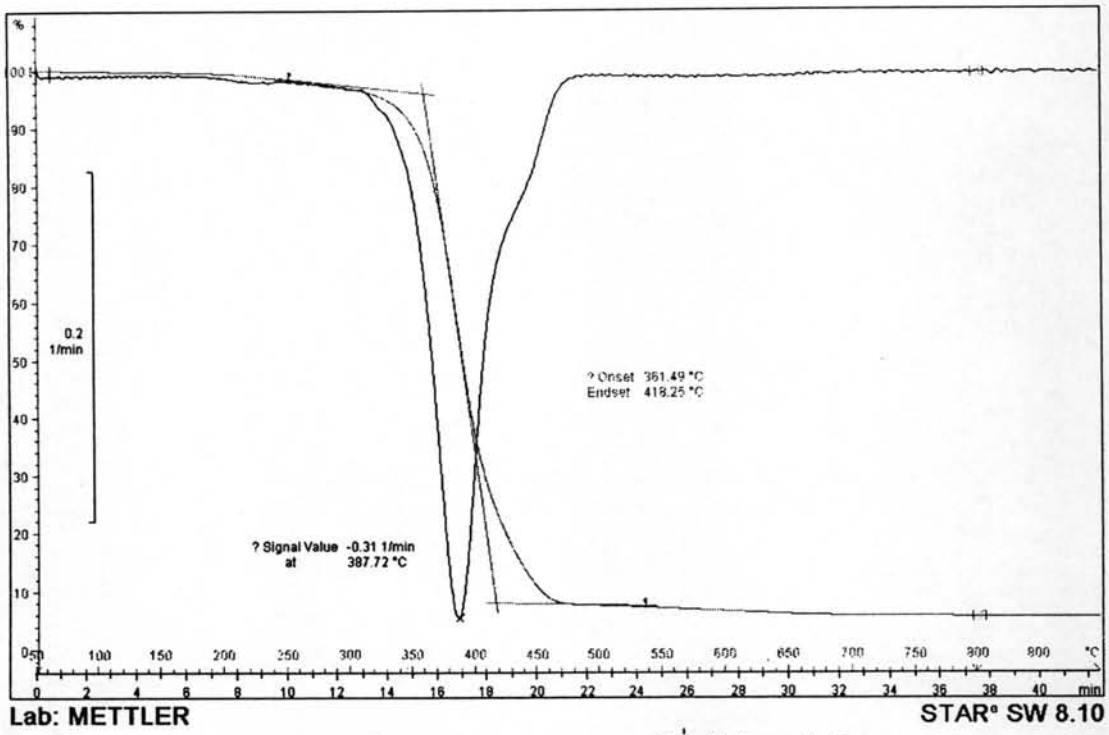


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติม

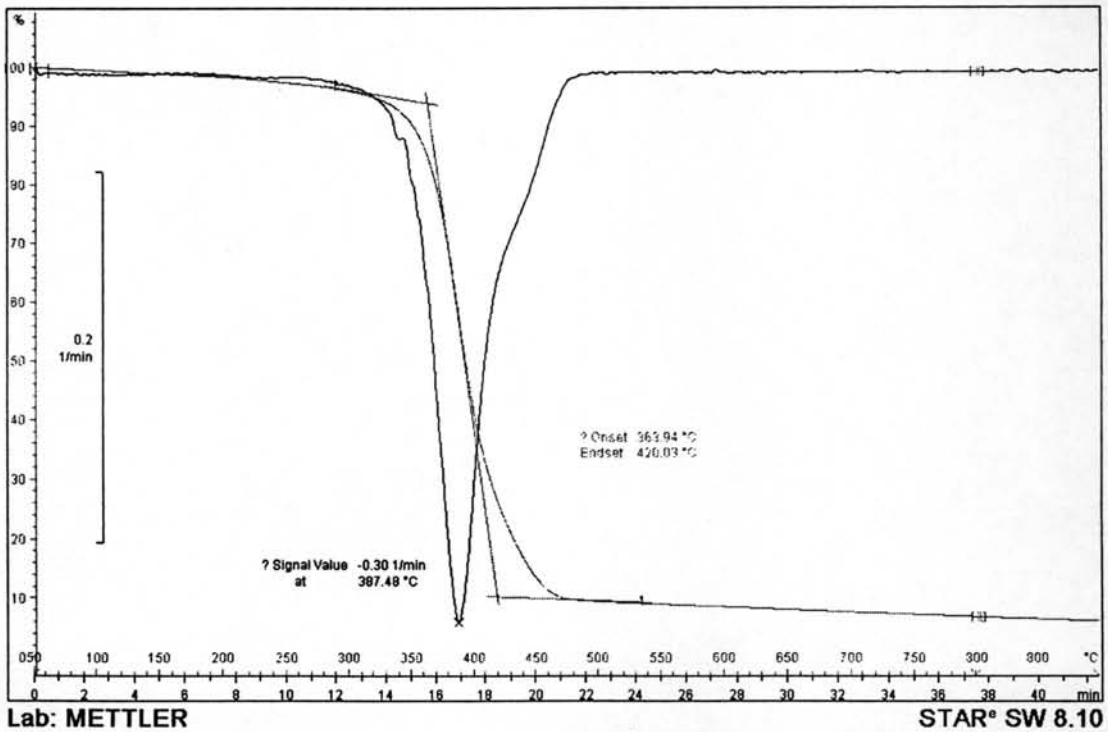


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

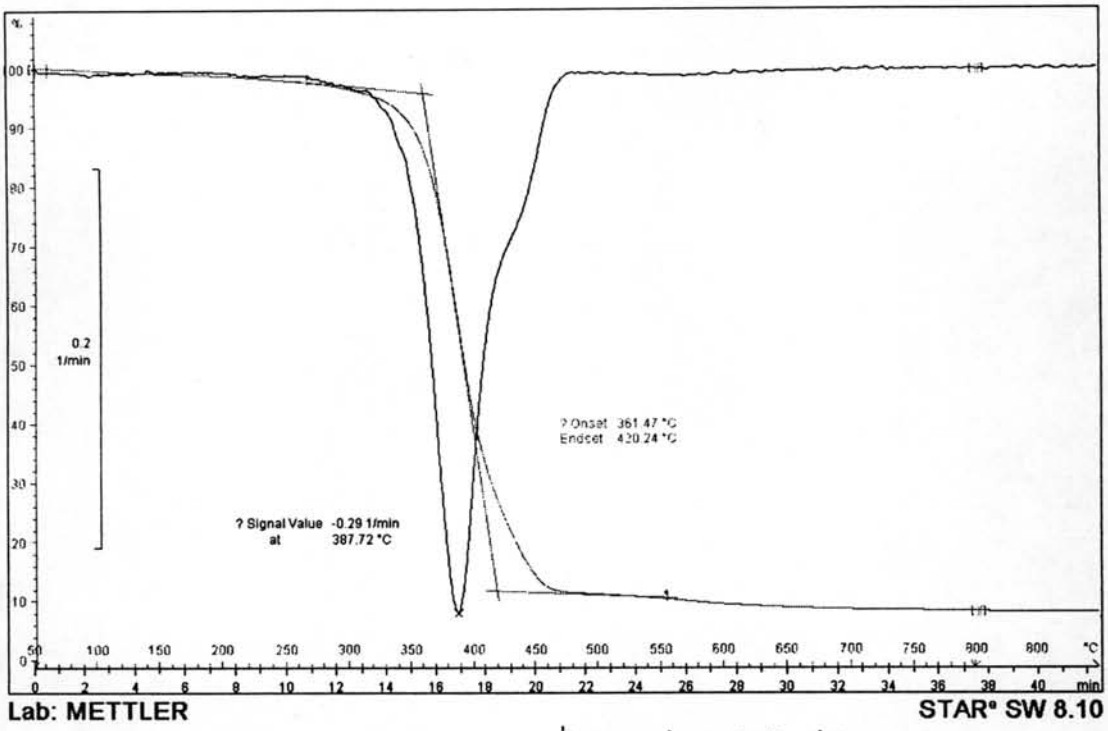
ค.2.3 กลุ่มที่มีซิงก์บอเรต 3 phr เป็นองค์ประกอบ



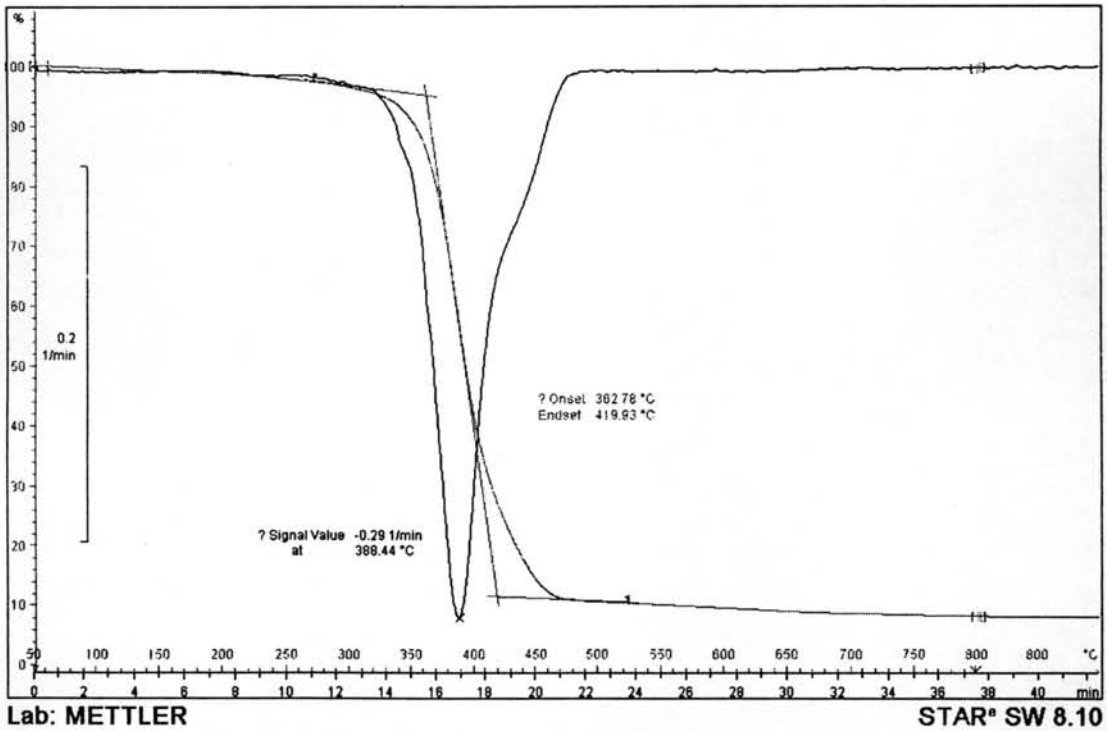
TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเป็นสารตัวเติม

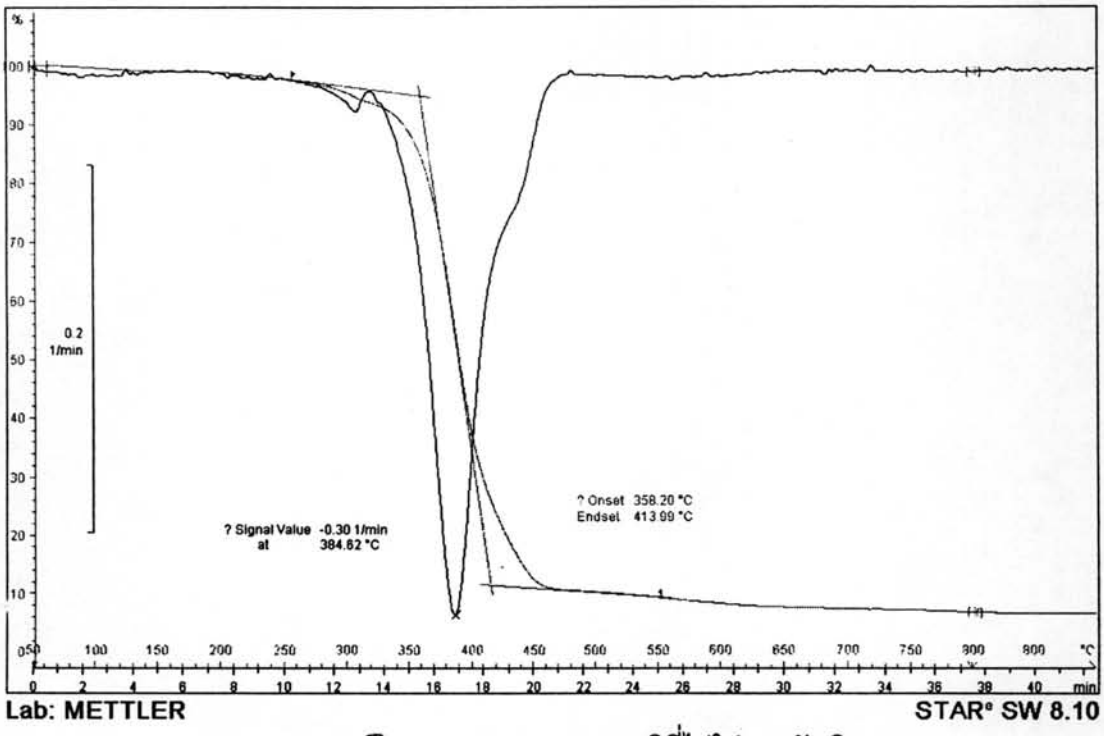


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติม

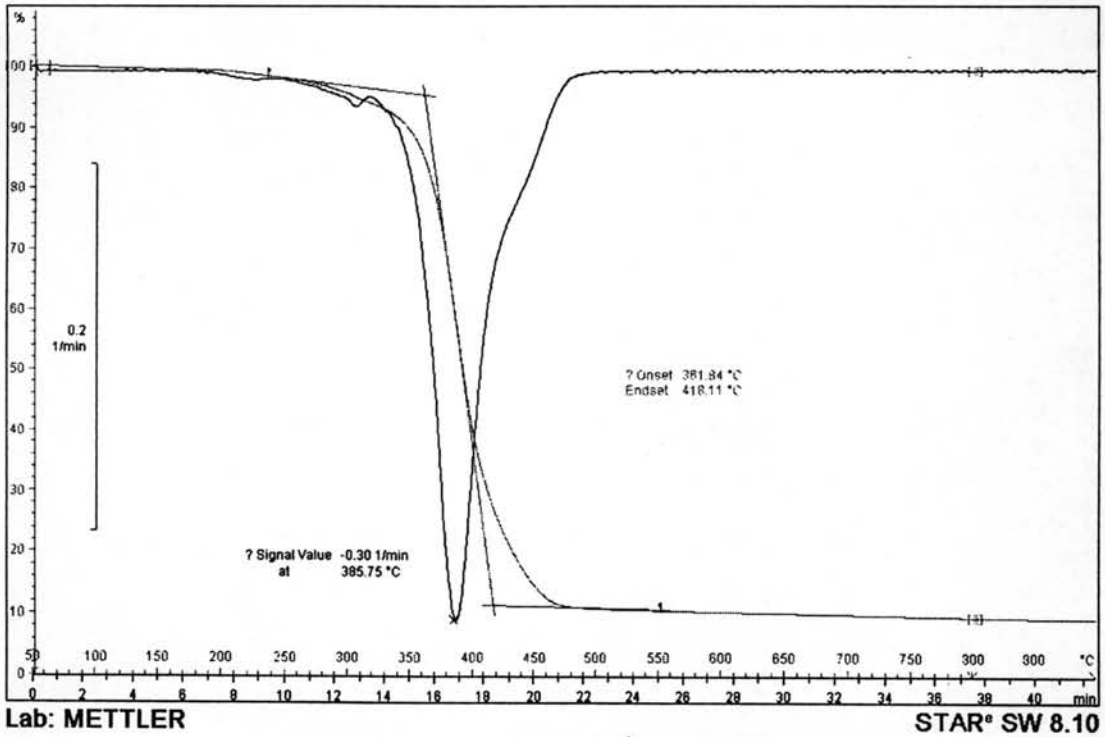


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

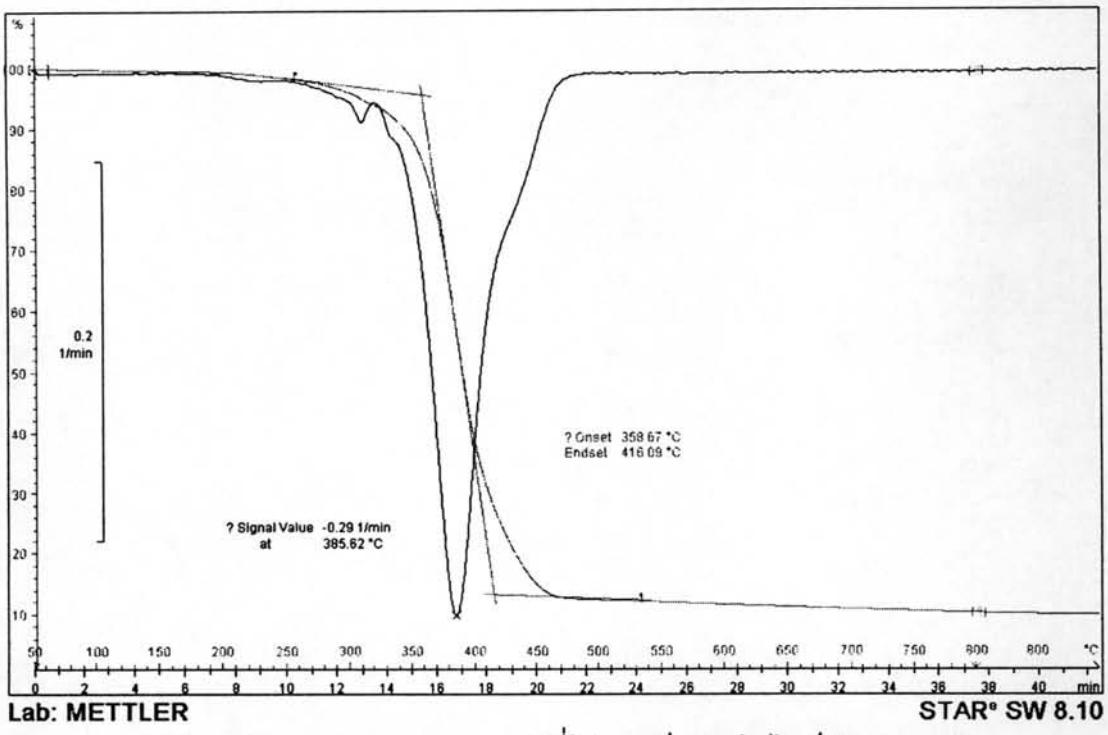
ค.2.4 กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr เป็นองค์ประกอบ



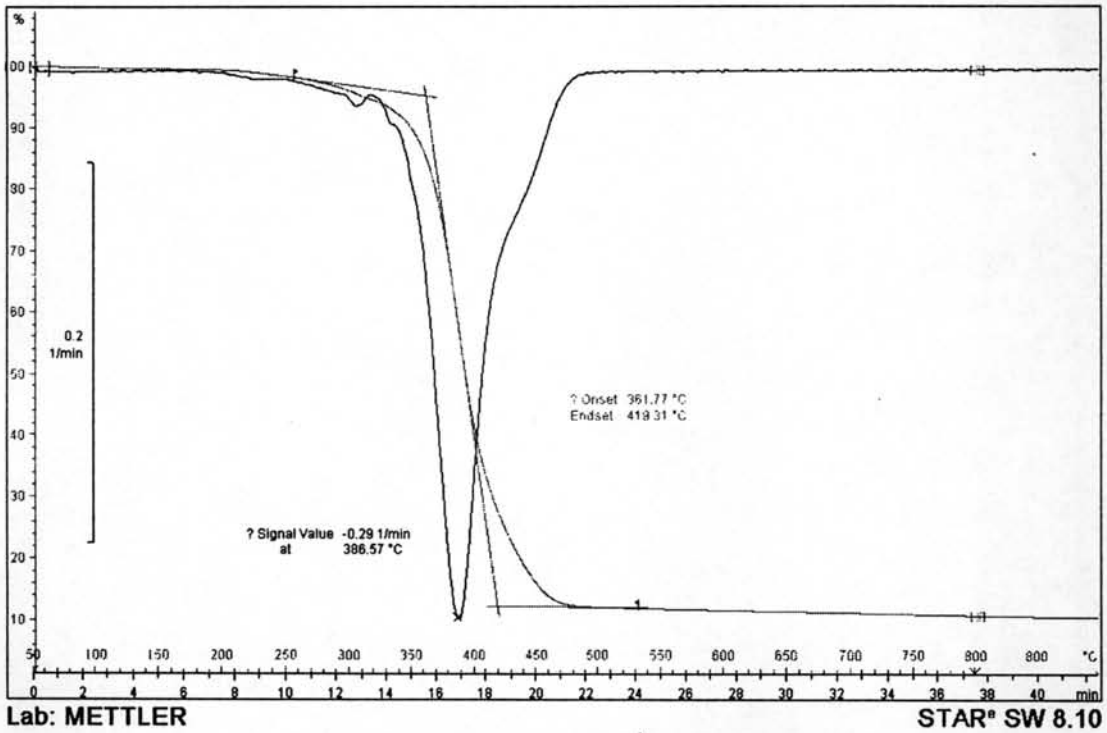
TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเป็นสารตัวเติม

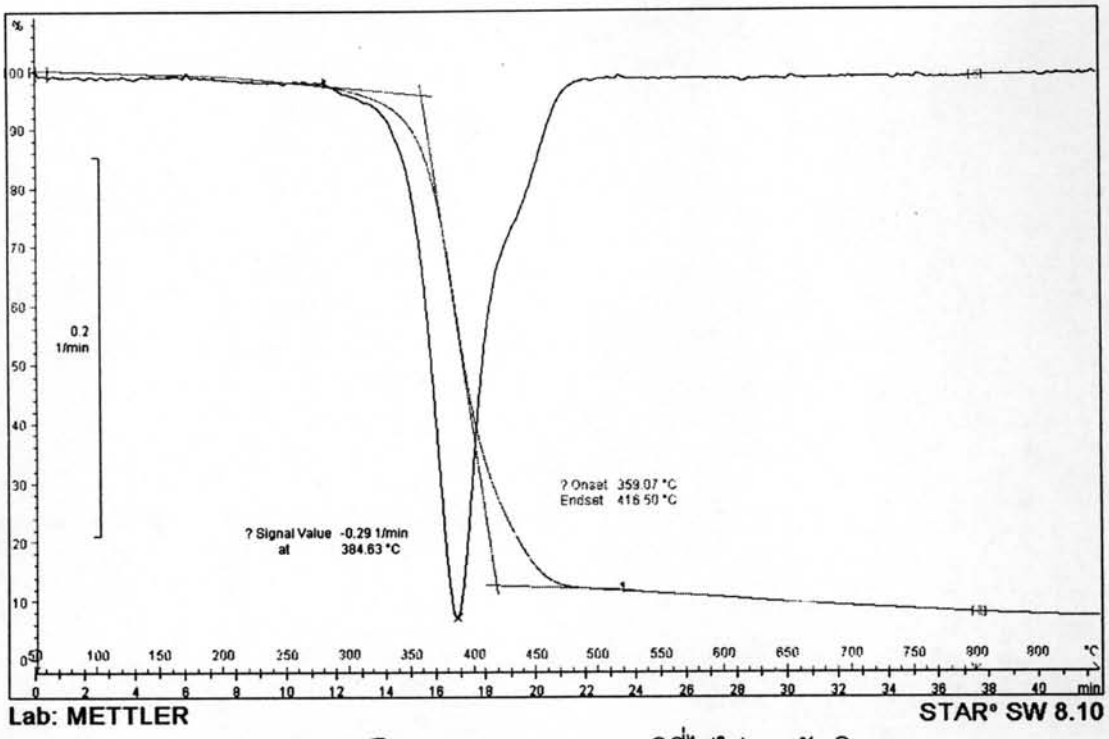


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติม

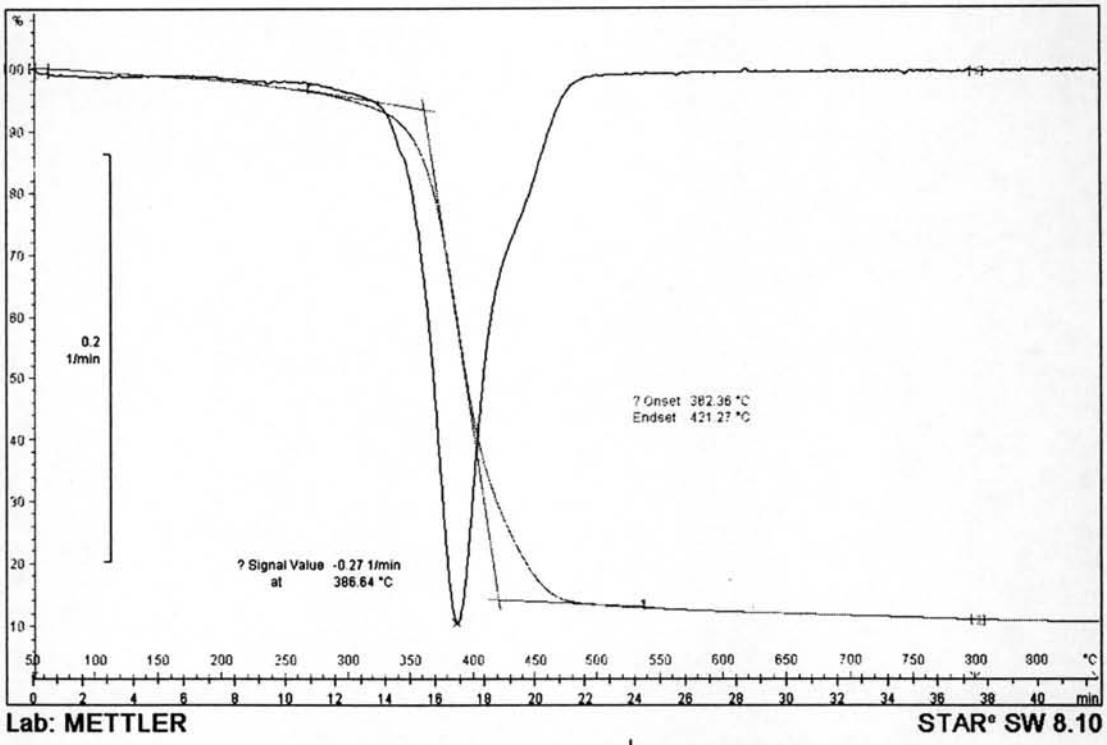


TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

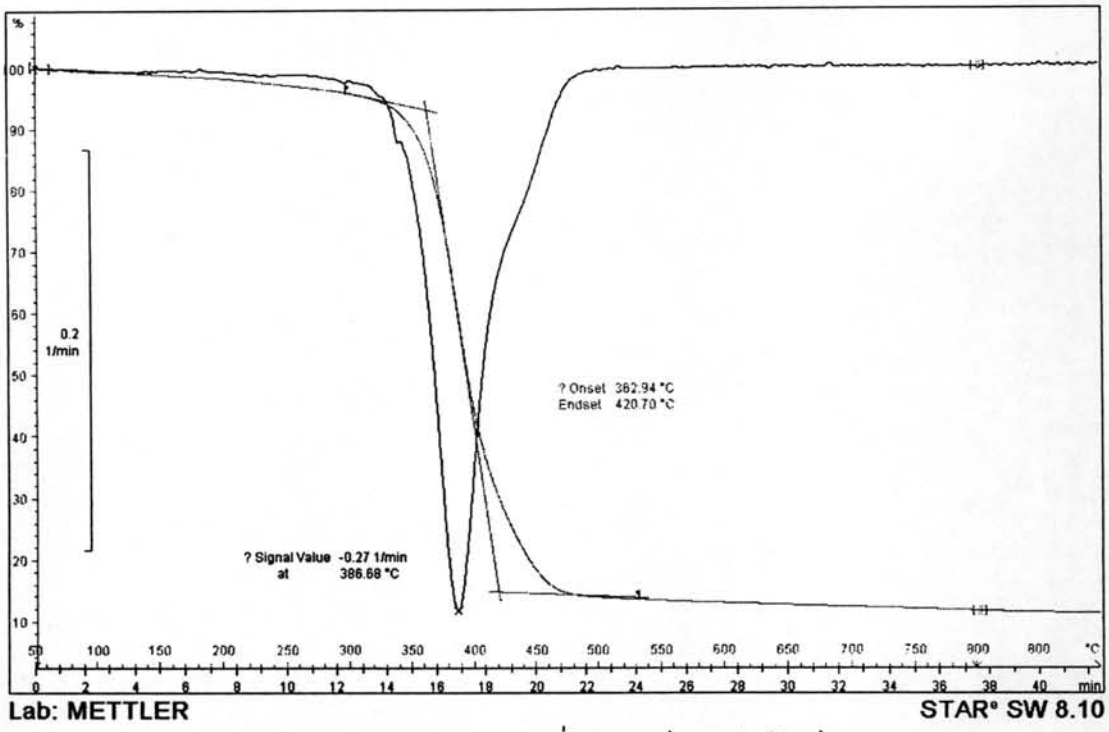
ค.2.5 กลุ่มที่มีซิงก์บอเรต 7 phr เป็นองค์ประกอบ



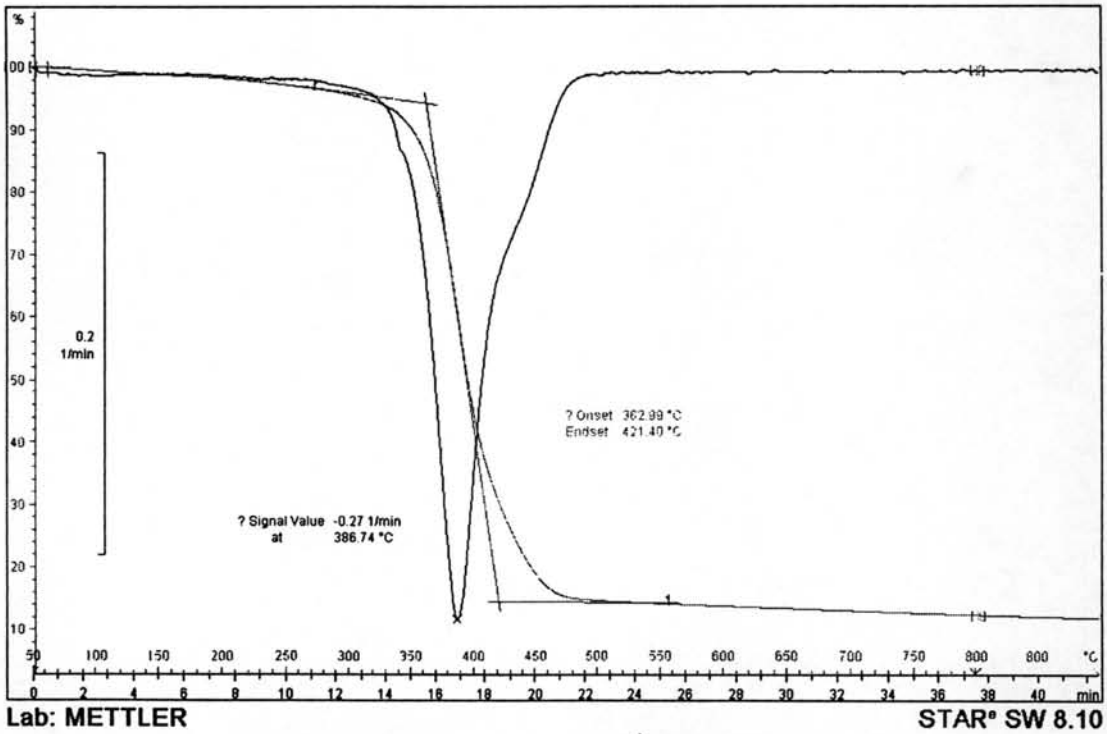
TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเป็นสารตัวเติม



TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติม



TGA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

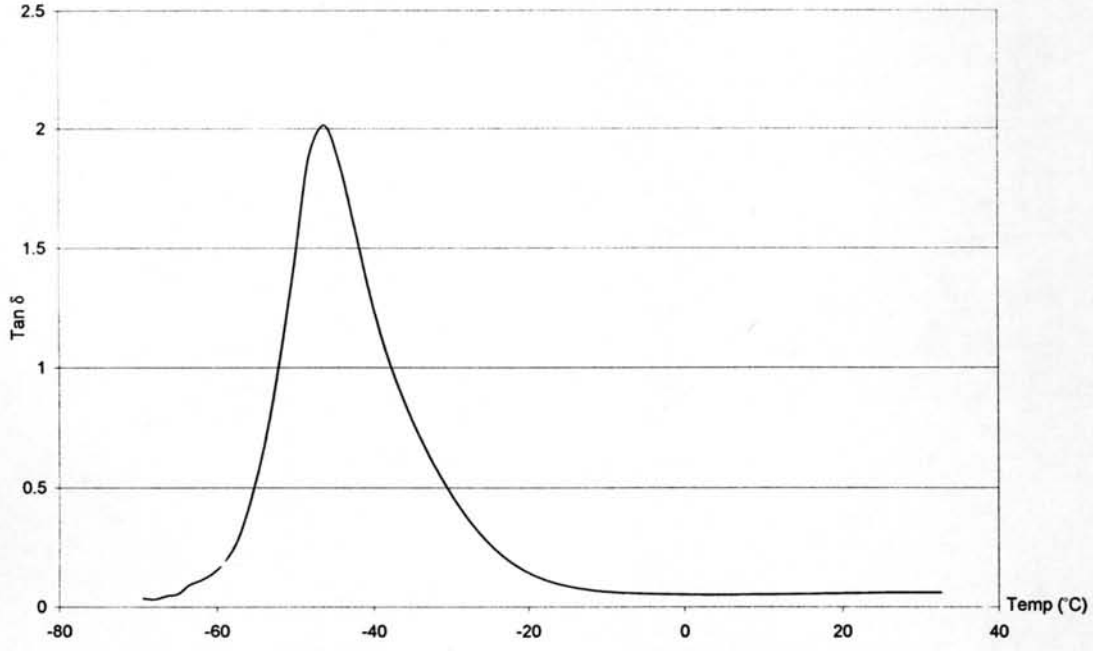
ภาคผนวก ง

ง.1 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้และใช้สารเติมแต่งหน่วงไฟ

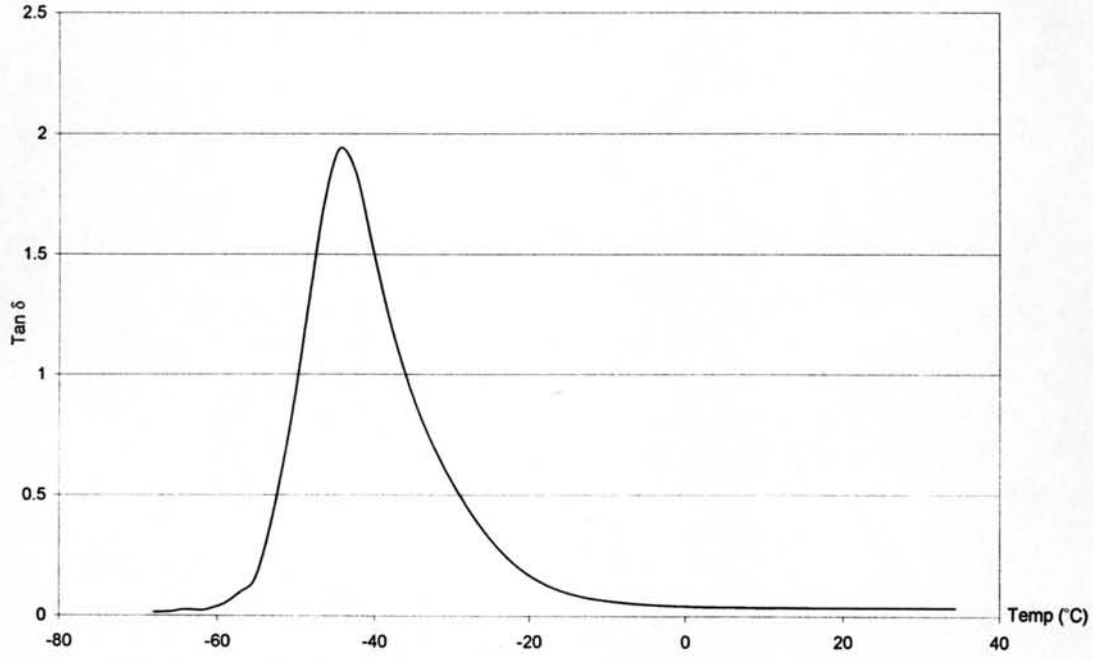
สูตร	Tg (°C)	
	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง
B	-46.39	-45.56
A3	-44.53	-42.43
Z3	-43.12	-42.09
C	-44.44	-43.87
M	-44.99	-43.40
S	-44.01	-43.67
A7	-43.19	-42.30
Z7	-43.45	-42.22
A3C	-44.07	-42.81
A3M	-43.30	-42.64
A3S	-43.78	-43.53
A7C	-44.52	-42.49
A7M	-43.73	-42.76
A7S	-44.30	-42.34
Z3C	-43.57	-43.24
Z3M	-43.42	-43.15
Z3S	-43.19	-43.10
Z7C	-43.91	-42.86
Z7M	-43.85	-42.05
Z7S	-44.19	-42.09

ง.2 กราฟแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง

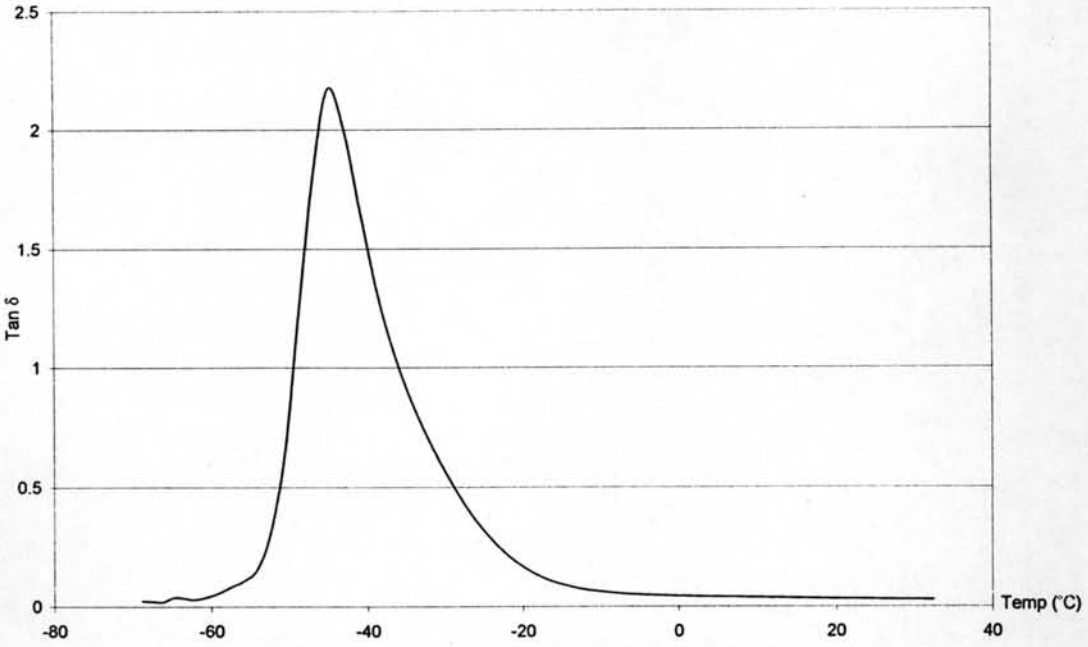
ง.2.1 กลุ่มไม่มีสารหน่วงไฟ



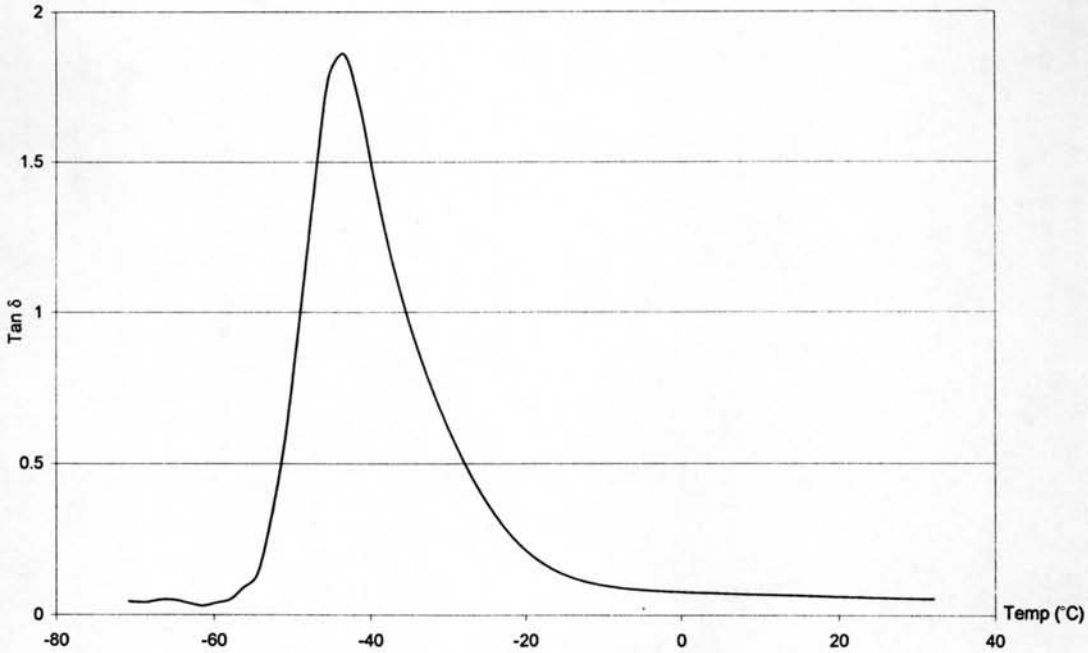
DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเพียงอย่างเดียว

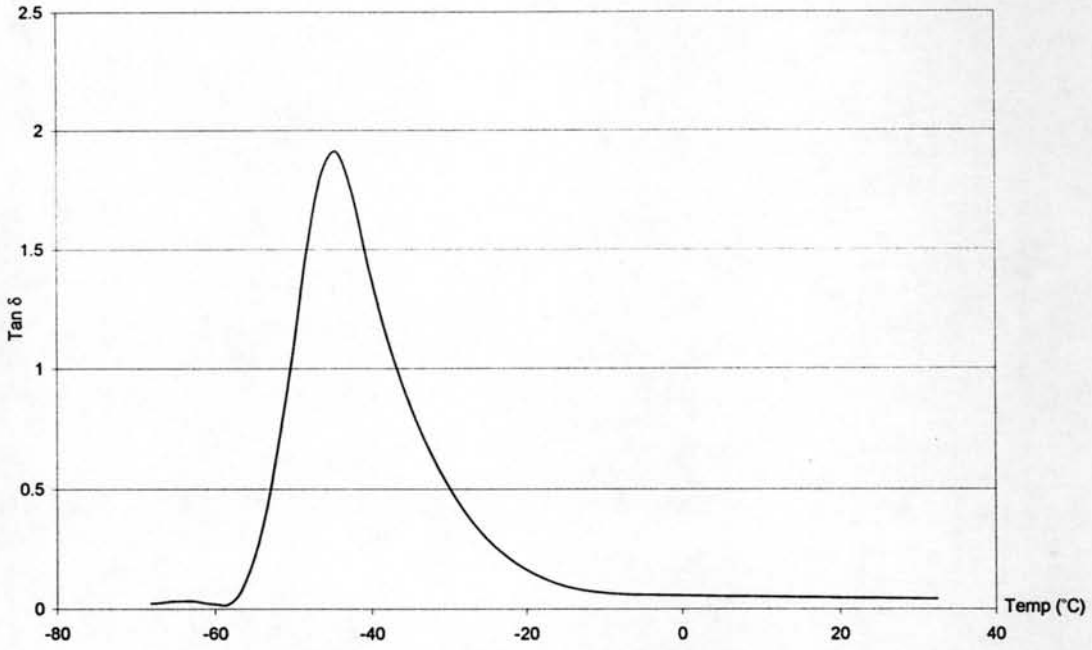


DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียว

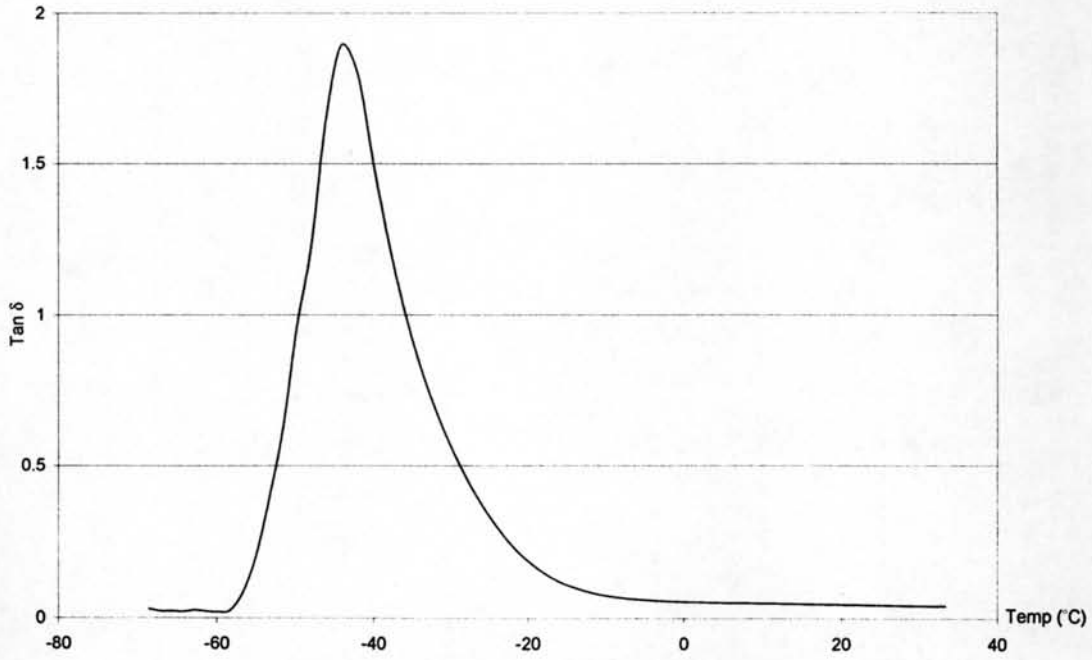


DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเพียงอย่างเดียว

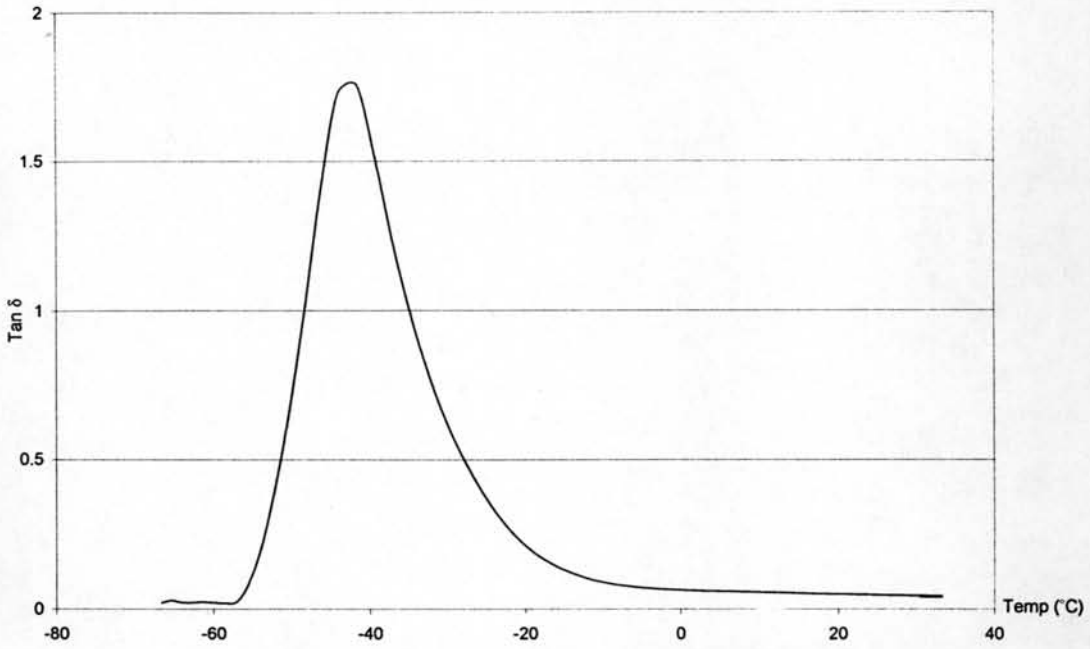
ง.2.2 กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 3 phr เป็นองค์ประกอบ



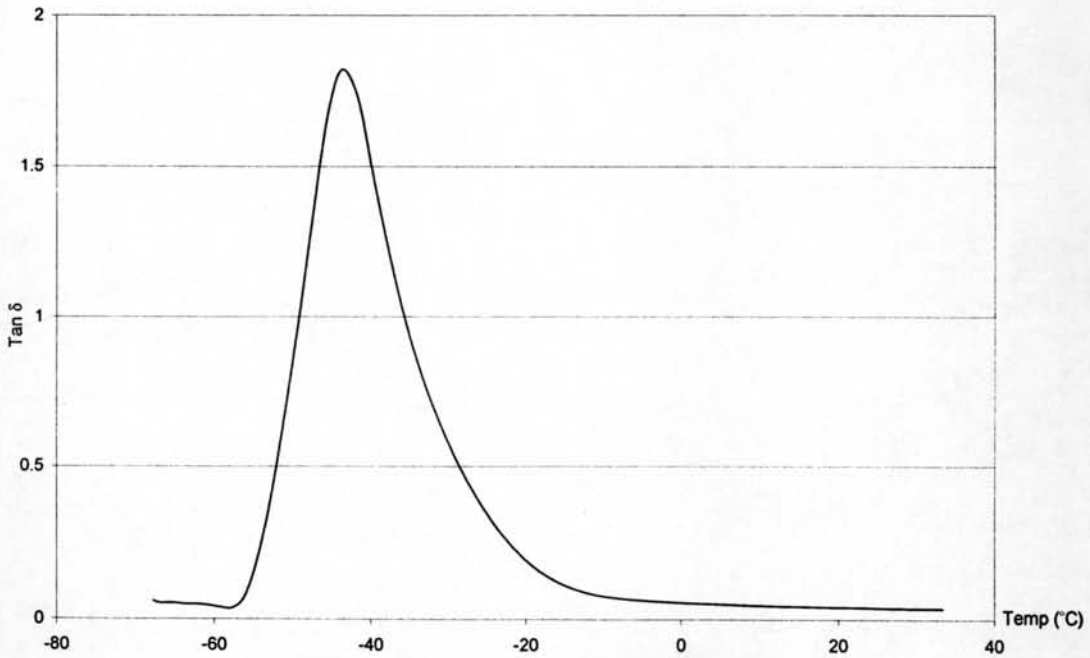
DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเป็นสารตัวเติม

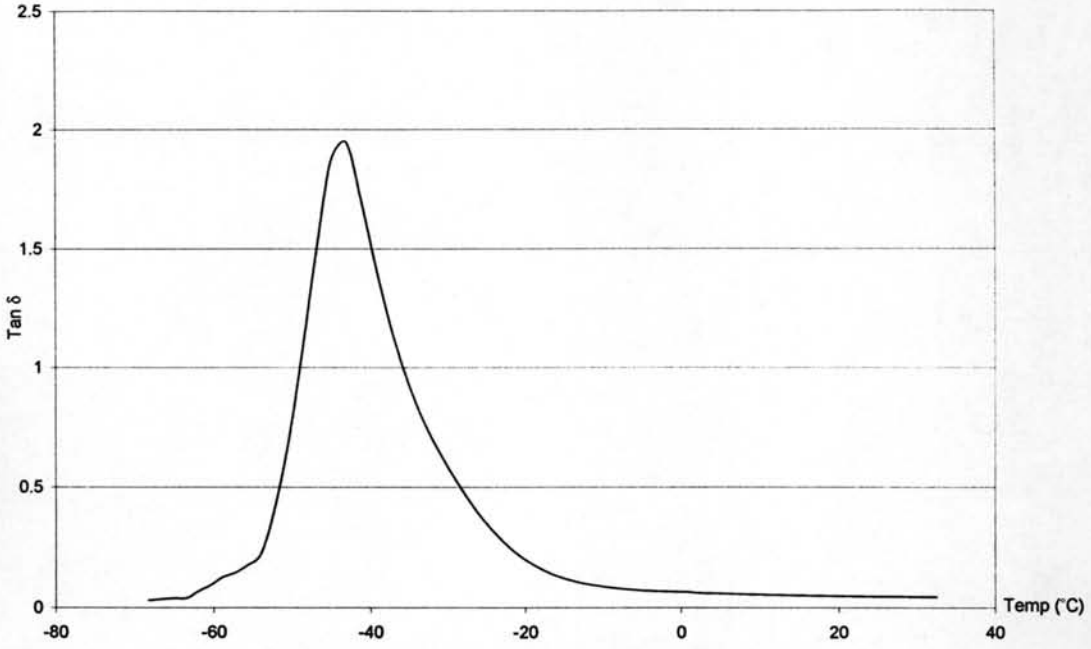


DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติม

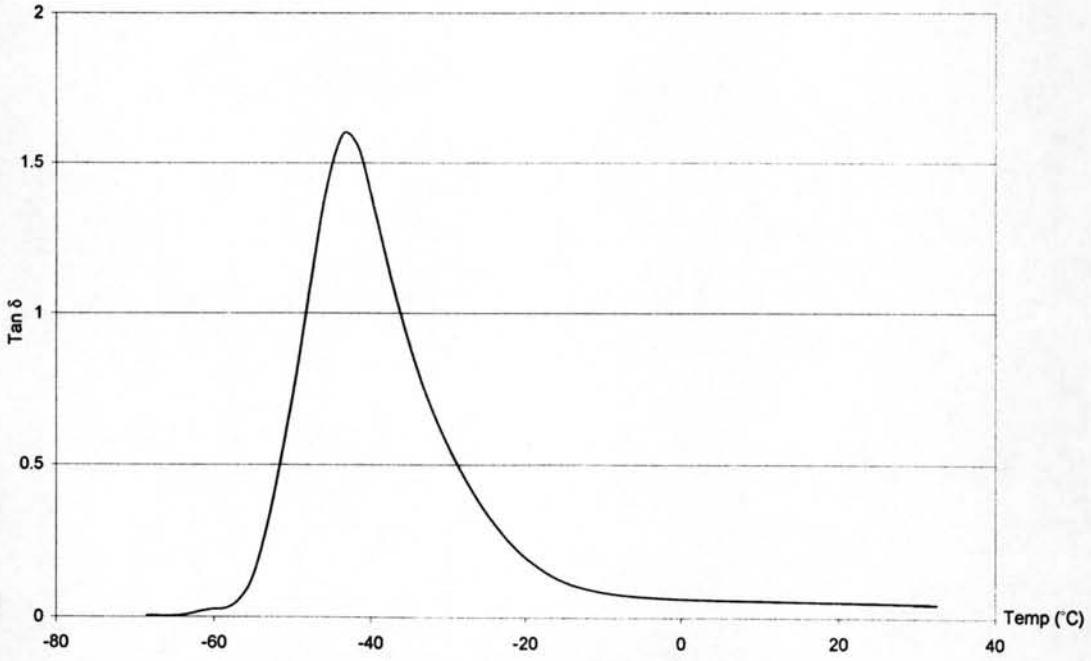


DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

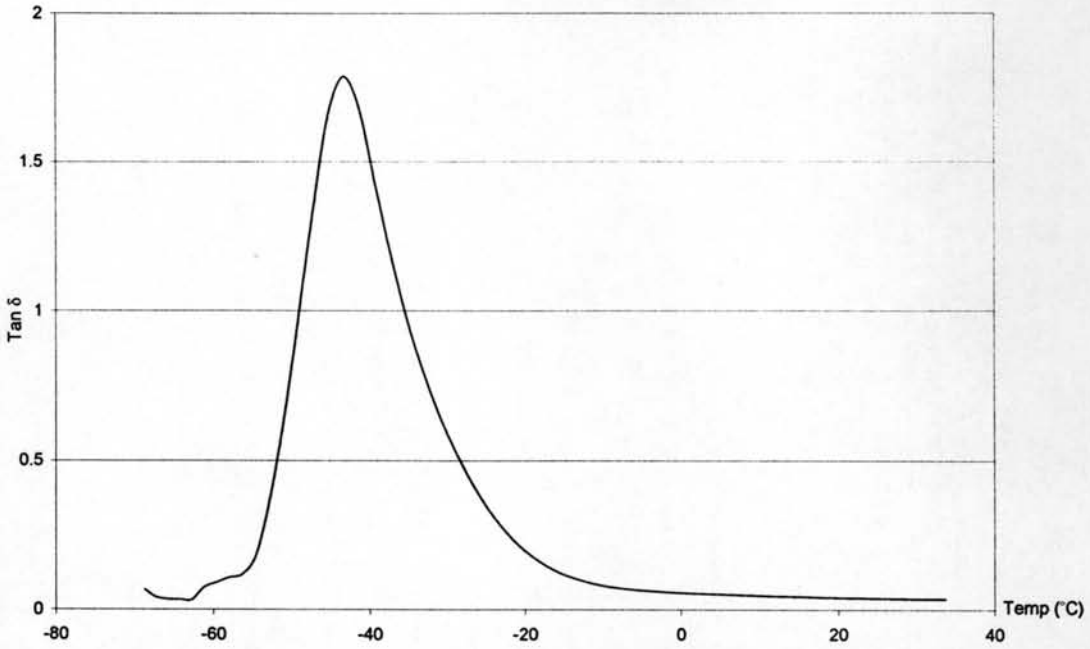
ง.2.3 กลุ่มที่มีซิงก์บอเรต 3 phr เป็นองค์ประกอบ



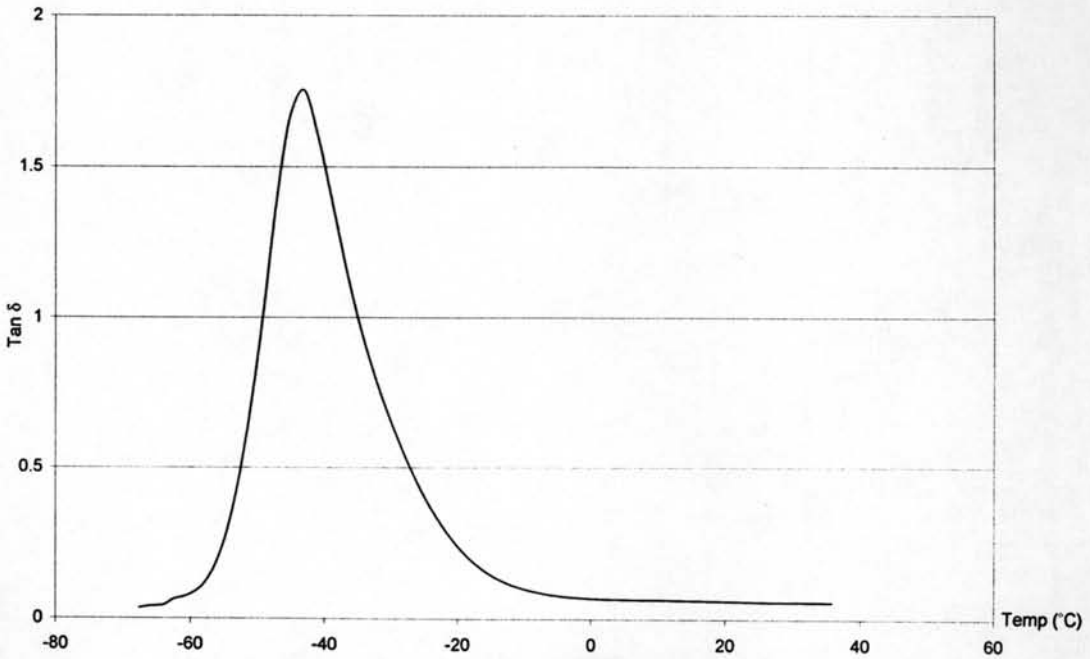
DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเป็นสารตัวเติม

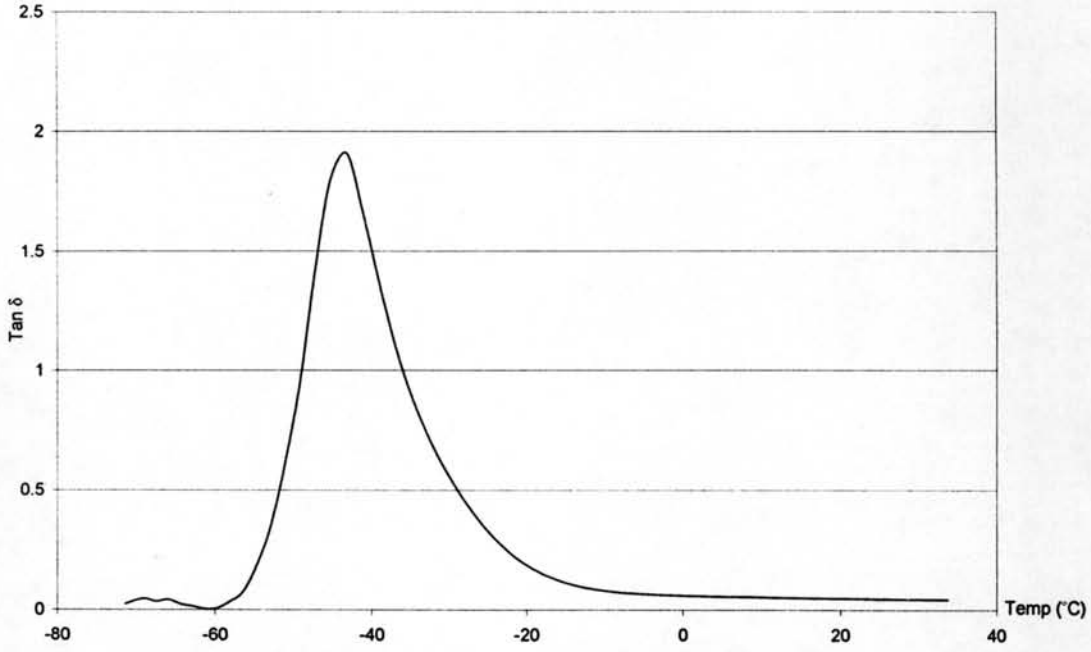


DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติม

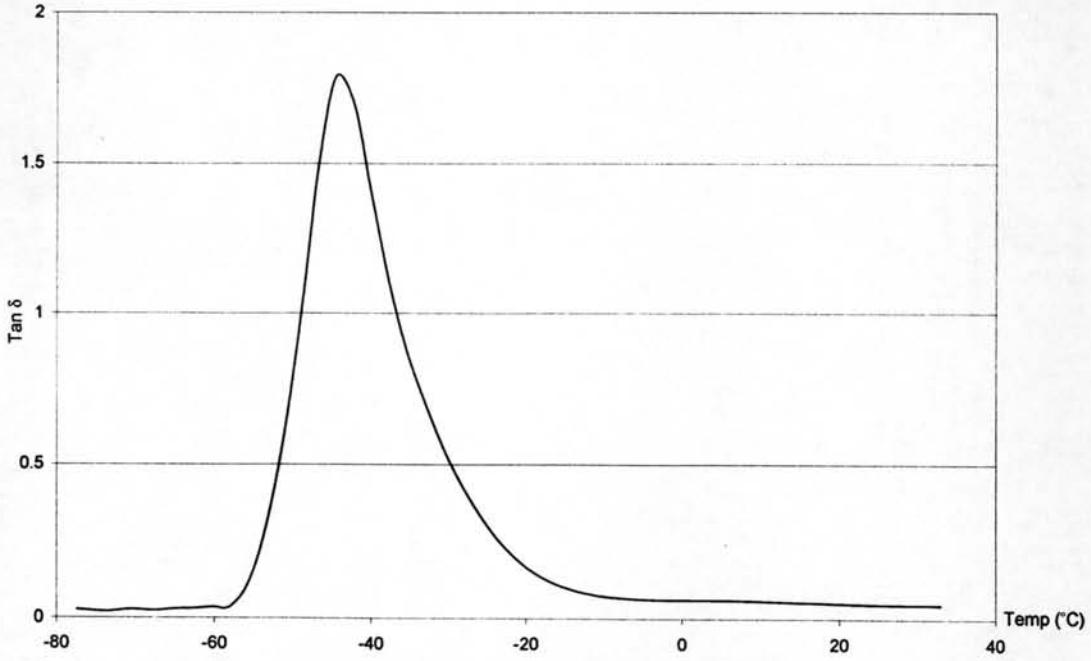


DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

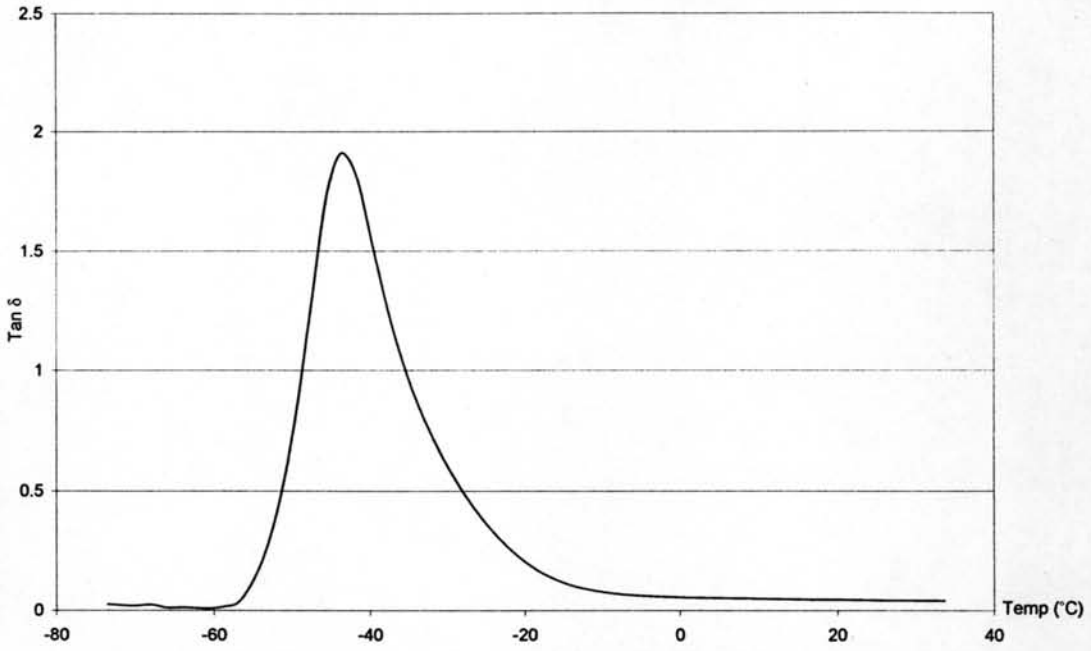
ง.2.4 กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 7 phr เป็นองค์ประกอบ



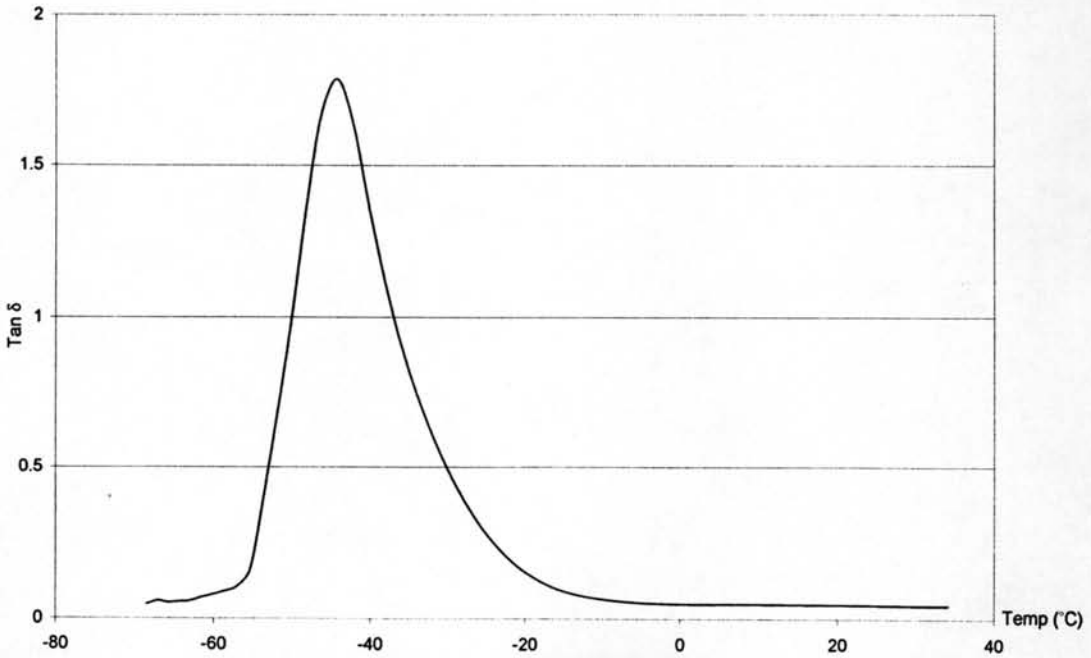
DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเป็นสารตัวเติม

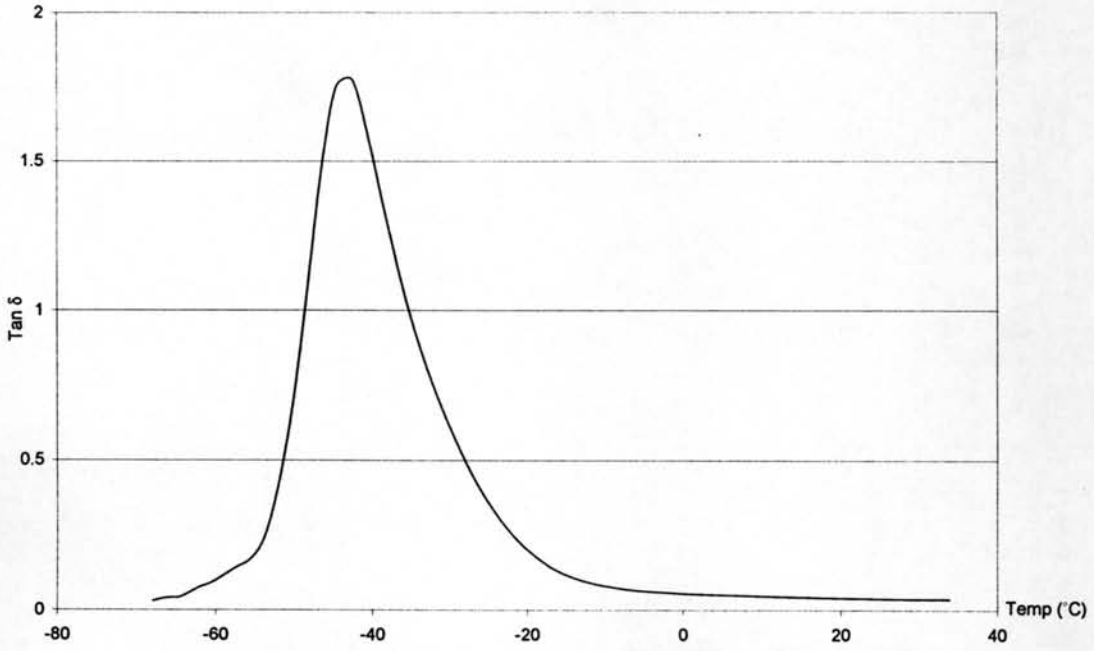


DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติม

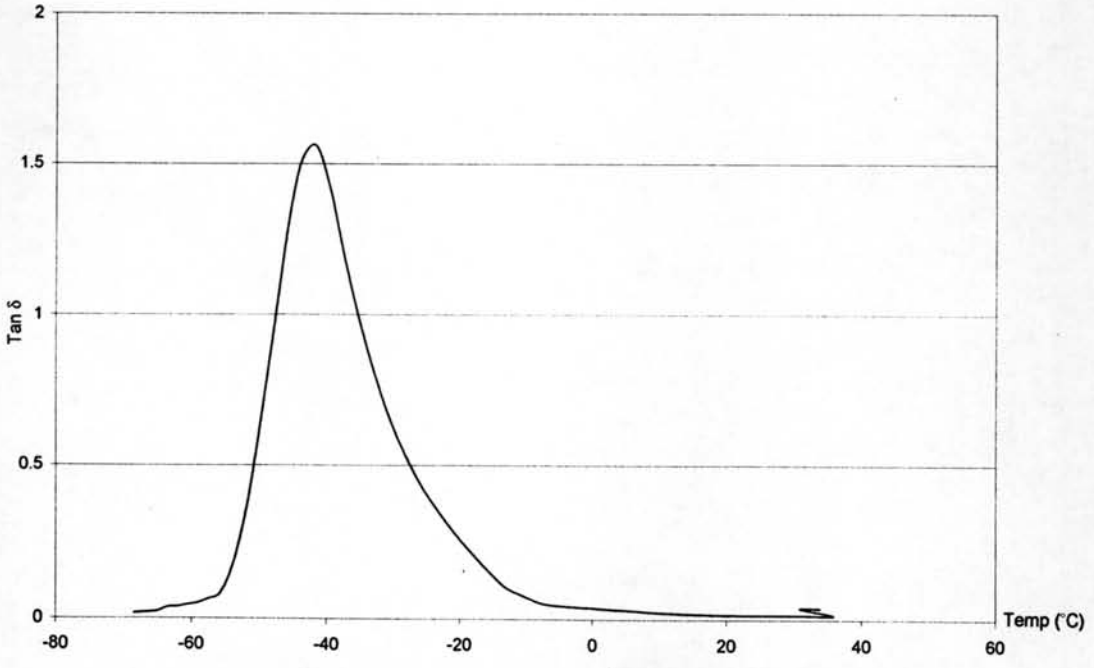


DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

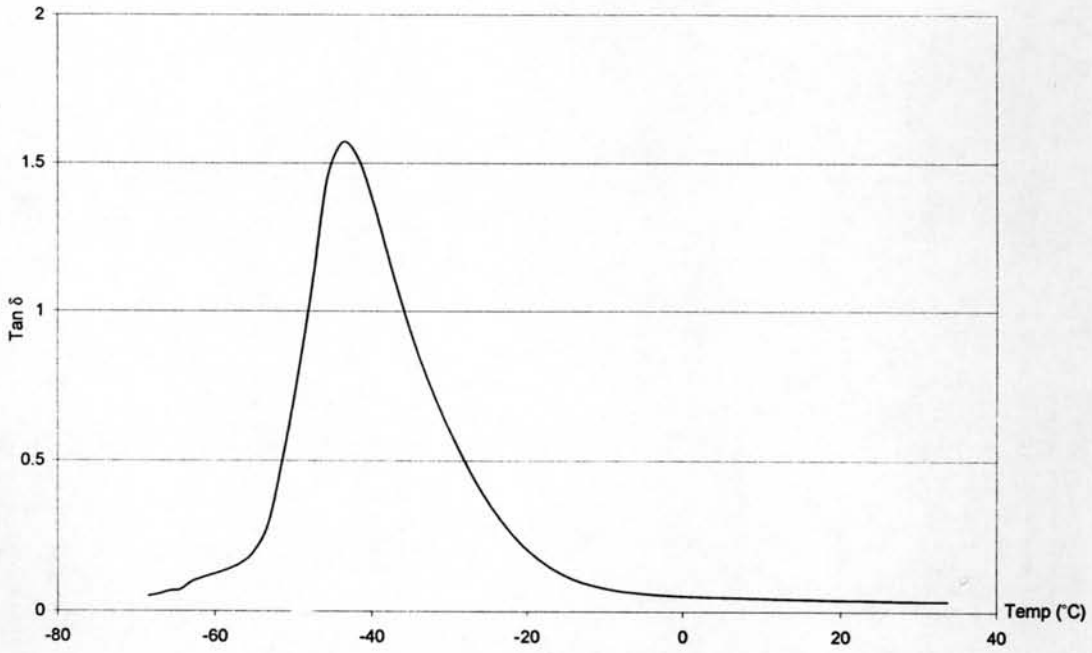
ง.2.5 กลุ่มที่มีซิงก์บอเรต 7 phr เป็นองค์ประกอบ



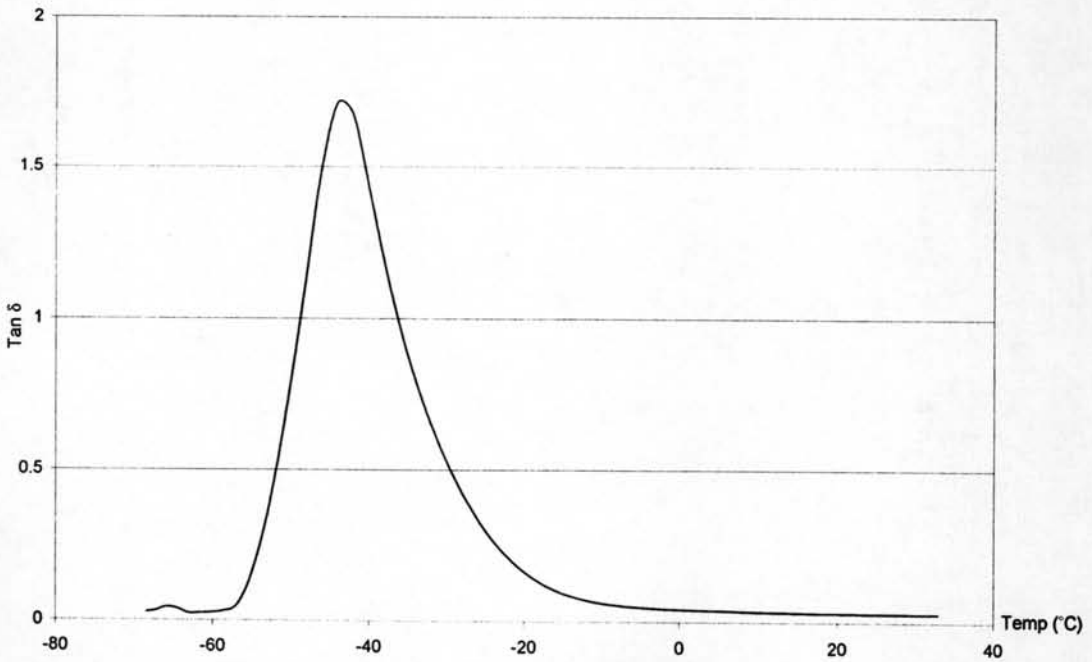
DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเป็นสารตัวเติม



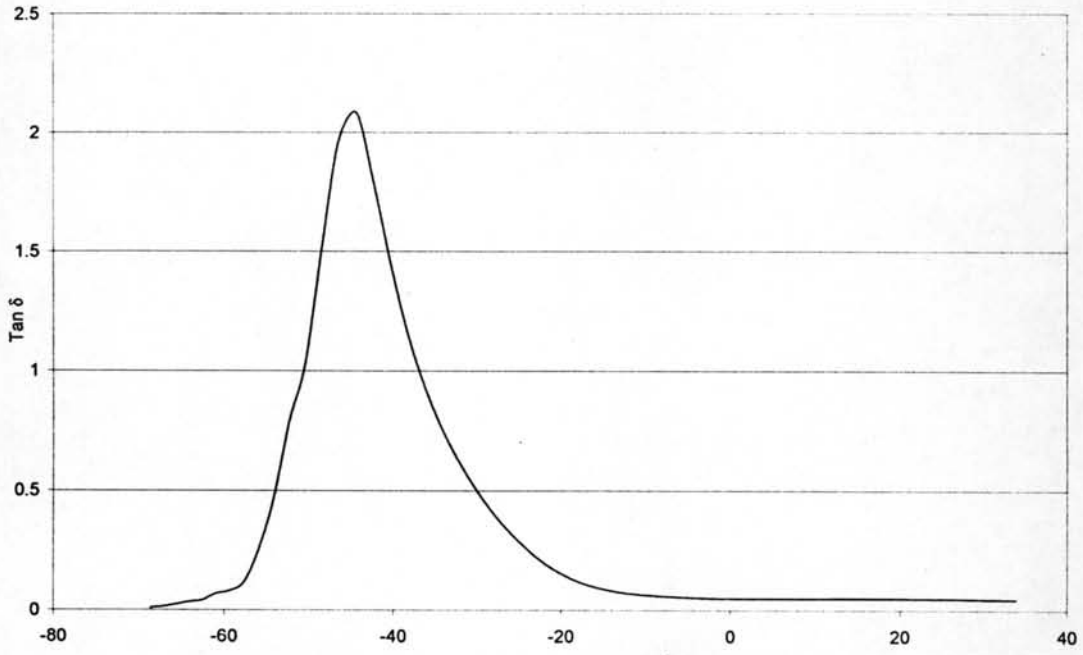
DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติม



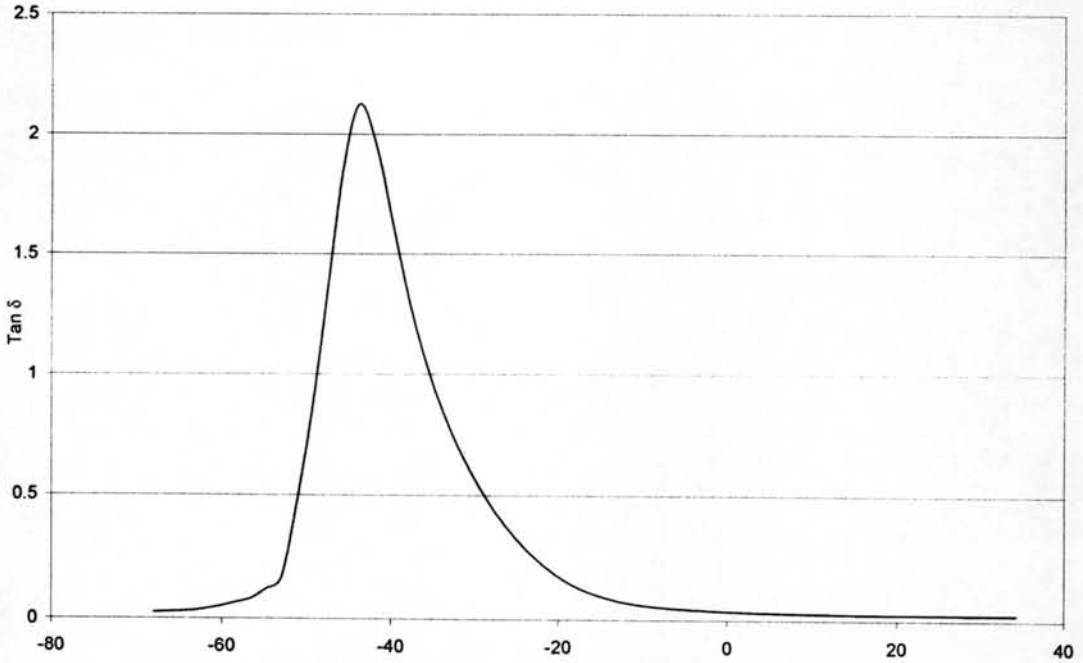
DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

ง.3 กราฟแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง

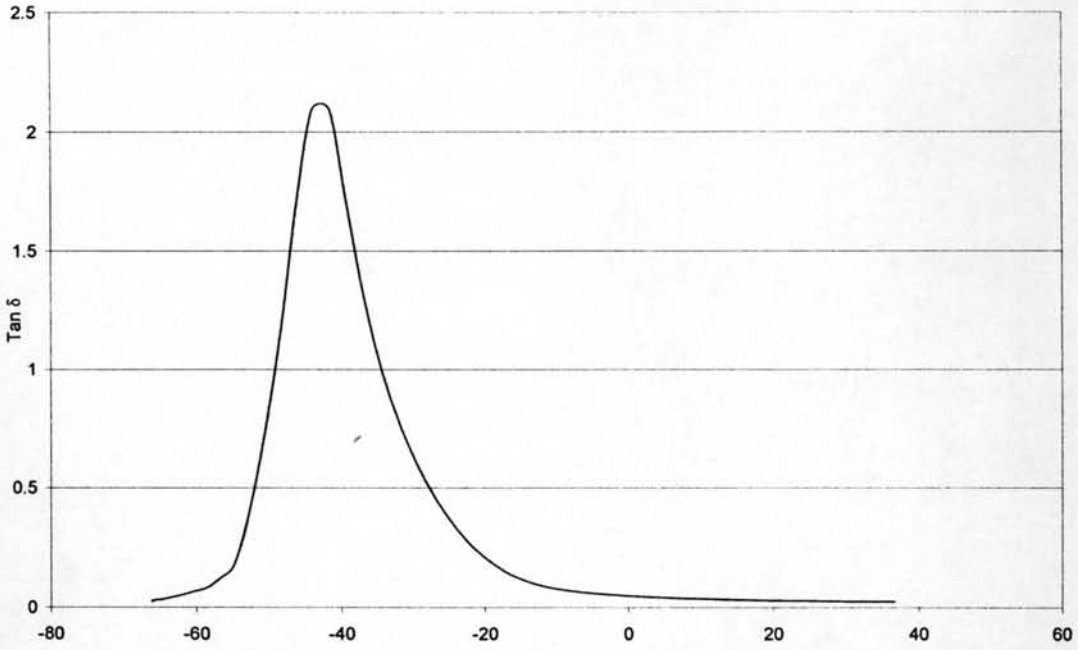
ง.3.1 กลุ่มไม่มีสารหน่วงไฟ



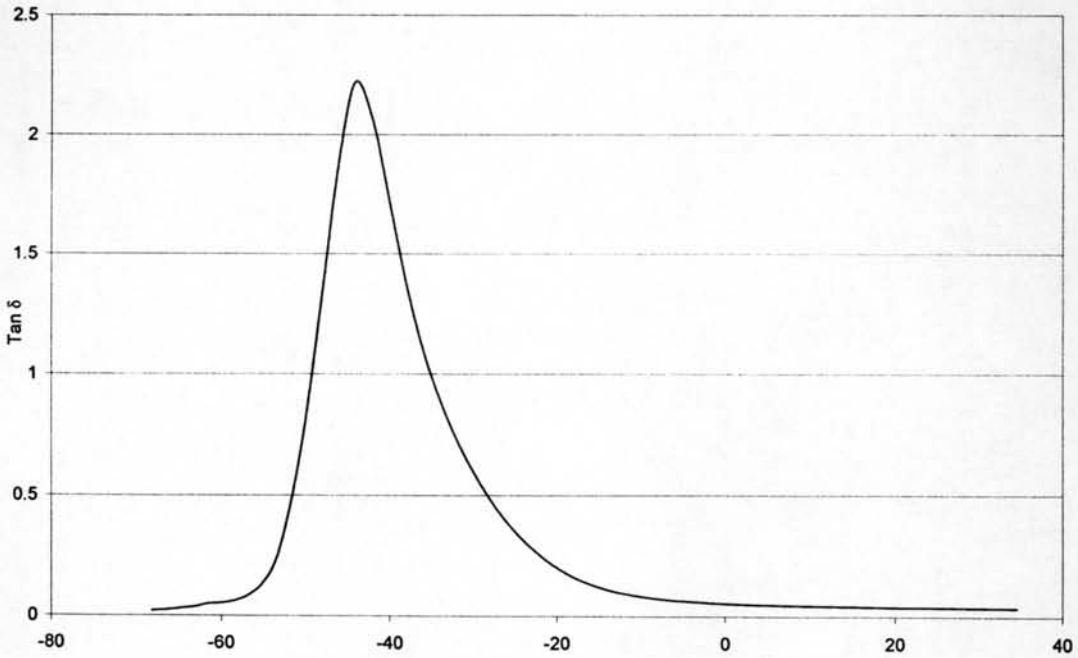
DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม



DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่เขม่าดำเพียงอย่างเดียว



DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียว



DMA เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกาเพียงอย่างเดียว