



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญา

วิศวกรรมวัสดุ

วิศวกรรมวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง อิทธิพลของสารตัวเติมดินขาวและอลูมินาในยางฟองที่ทำจากยางธรรมชาติ  
เพื่อประยุกต์ใช้เป็นฉนวนความร้อน

Influence of Kaolin and Alumina on Cellular Rubber from Natural  
Rubber for Thermal Insulation Applications

นามผู้วิจัย นายสุรฤทธิ สมรรถไธ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์นุชนภา ตั้งบริบูรณ์, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเจตน์ พิชรพันธ์, Dr.-Ing. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา อีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของสารตัวเติมดินขาวและอลูมินาในยางฟองที่ทำจากยางธรรมชาติเพื่อประยุกต์ใช้เป็น  
ฉนวนความร้อน

Influence of Kaolin and Alumina on Cellular Rubber from Natural Rubber for Thermal  
Insulation Applications

โดย

นายสุรฤทธิ์ สมรรถโท

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุรฤทธิ สมรรถโท 2557: อิทธิพลของสารตัวเติมดินขาวและอลูมินาในยางฟองที่ทำจากยางธรรมชาติเพื่อประยุกต์ใช้เป็นฉนวนความร้อน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์นุชนภา ตั้งบริบูรณ์, Ph.D. 83 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของดินขาวและอลูมินา 20 ถึง 50 phr ในการเป็นสารตัวเติมของยางฟองจากยางธรรมชาติ STR ชนิด 5L ใช้เวลาการบดนี้ยางธรรมชาติเป็นเวลา 40 นาที โดยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง การบดผสมยางคอมพาวนด์ใช้เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง อุณหภูมิในการบดผสม 70 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาปัจจัยจากยางคอมพาวนด์ ได้แก่ ความหนืดของยางคอมพาวนด์ เวลาการคงรูป ที่ 150 องศาเซลเซียส จากผลการวิจัยพบว่า ปริมาณสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดส่งผลต่อความหนืดที่เพิ่มโดยมีลักษณะแบบแปรตามกัน ระยะเวลาการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่ผสมดินขาวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณดินขาวสูงขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่ผสมอลูมินาต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณอลูมินา การขึ้นรูปยางฟองใช้วิธีการอัดขึ้นรูป ยางที่ได้จากการอัดขึ้นรูปถูกวิเคราะห์หาความพรุนตัวโดย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและโปรแกรมอิมเมจโปรพลัส จากผลการวิจัยพบว่ารูพรุนของยางฟองมีขนาดเล็กลงเมื่อสารตัวเติมเพิ่มขึ้น โดยรูพรุนของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินามีขนาดเล็กกว่า ยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว การลามไฟของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาวและอลูมินามีค่าลดลงเมื่อเติมสารตัวเติมในปริมาณ 40 ถึง 50 phr

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Surarit Samattai 2014: Influence of Kaolin and Alumina on Cellular Rubber from Natural Rubber for Thermal Insulation Applications. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Nuchnapa Tangboriboon, Ph.D. 83 pages.

The objective of this work was to study the influences of kaolin and alumina on natural cellular rubber type 5L. It was masticated on a two-roll mill at room temperature for 40 minutes. Natural rubber was compounded with chemicals by a two-roll mill at 70 degree Celcius. The optimum cure time of compounds was characterized at 150 degree Celcius. The results indicated that increasing of kaolin affected the optimum cure time to increase. On the other hand the optimum cure time of cellular rubber decreased when the amount of alumina was increased. The mooney viscosity increased when the amount of fillers was increased. The morphologies of cellular rubbers were analyzed by scanning electron microscope and program imagepro plus. It was found that the pore sizes were decreased when amount of fillers was increased. The pore sizes of cellular rubber filled with alumina were smaller than pore sizes of cellular rubber filled with kaolin. The cellular rubber with filled 40-50 phr fillers influenced flammability as it was decreased.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จไม่ได้หากขาดคำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดีตลอดมาจากอาจารย์และผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ซึ่งให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆอย่างดีตลอดมา ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดวงฤดี ฉายสุวรรณ และ อาจารย์นุชนาฏ ญ ระนอง ในความเมตตาและกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆอันเป็นอรรถประโยชน์สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ตลอดจนการดูแลการทำวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาตลอดจนอบรมสั่งสอนทั้งความรู้และจริยธรรมอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ข้าพเจ้าขอขอบคุณสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนนักวิจัยของสถาบันซึ่งให้ความรู้ทางการปฏิบัติอย่างดีตลอดมา

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และ เพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่านสำหรับการให้กำลังใจ การให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน ข้าพเจ้าซาบซึ้งและปิติเป็นอย่างมากสำหรับสิ่งที่ทุกท่านให้กำลังใจข้าพเจ้าจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา สำหรับความรักอย่างไม่มีเงื่อนไขที่ท่านมอบให้ข้าพเจ้าตลอดมา อีกทั้งรวมถึงการอบรมสั่งสอนและให้กำลังใจผู้วิจัยมาโดยตลอด ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นประโยชน์แก่ผู้ใดก็ตาม ข้าพเจ้าขอยกความดีให้เป็นกตเวทิตาแต่บิดา มารดา ครอบครัวของข้าพเจ้า ตลอดจนคณะอาจารย์ผู้มีพระคุณทุกท่าน รวมทั้งผู้เขียนหนังสือ และบทความต่างๆ ที่ให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

สุรฤทธิ สมรรถไธ

กรกฎาคม 2557

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	22
อุปกรณ์	22
วิธีการ	23
ผลและวิจารณ์	32
สรุปและข้อเสนอแนะ	47
สรุป	47
ข้อเสนอแนะ	48
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	49
ภาคผนวก	52
ภาคผนวก ก ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	53
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ XRF โหมด mapping	62
ภาคผนวก ค วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสาร	64
ภาคผนวก ง ภาพการวิเคราะห์น้ำหนักการเปลี่ยนไปของสารเทียบกับอุณหภูมิ	66
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์รูพรุนด้วยโปรแกรมอิมเมจโปร	68
ภาคผนวก ฉ ข้อมูล JCPDF	71
ภาคผนวก ช งานประชุมวิชาการ	78
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	83

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตัวอย่างโครงสร้างสารตัวเร่งปฏิกิริยา	8
2	ตารางแสดงองค์ประกอบทางเคมีของดินขาว	12
3	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการผสมยางคอมพาวนด์	26
4	ตารางแสดงขนาดรูพรุนยางฟองไม่ผสมสารตัวเติม ยางฟองผสมสาร หน่วงไฟ CPE และยางฟองผสมสารตัวเติมอลูมินา	34
5	ตารางแสดงขนาดรูพรุนยางฟองผสมสารตัวเติมดินขาว	35
6	ตารางแสดงขนาดรูพรุนและความพรุนตัวของยางฟอง	39
7	ตารางแสดงค่าคงที่การนำความร้อน ขนาดรูพรุน และ ความพรุนตัว	46

## สารบัญภาพ

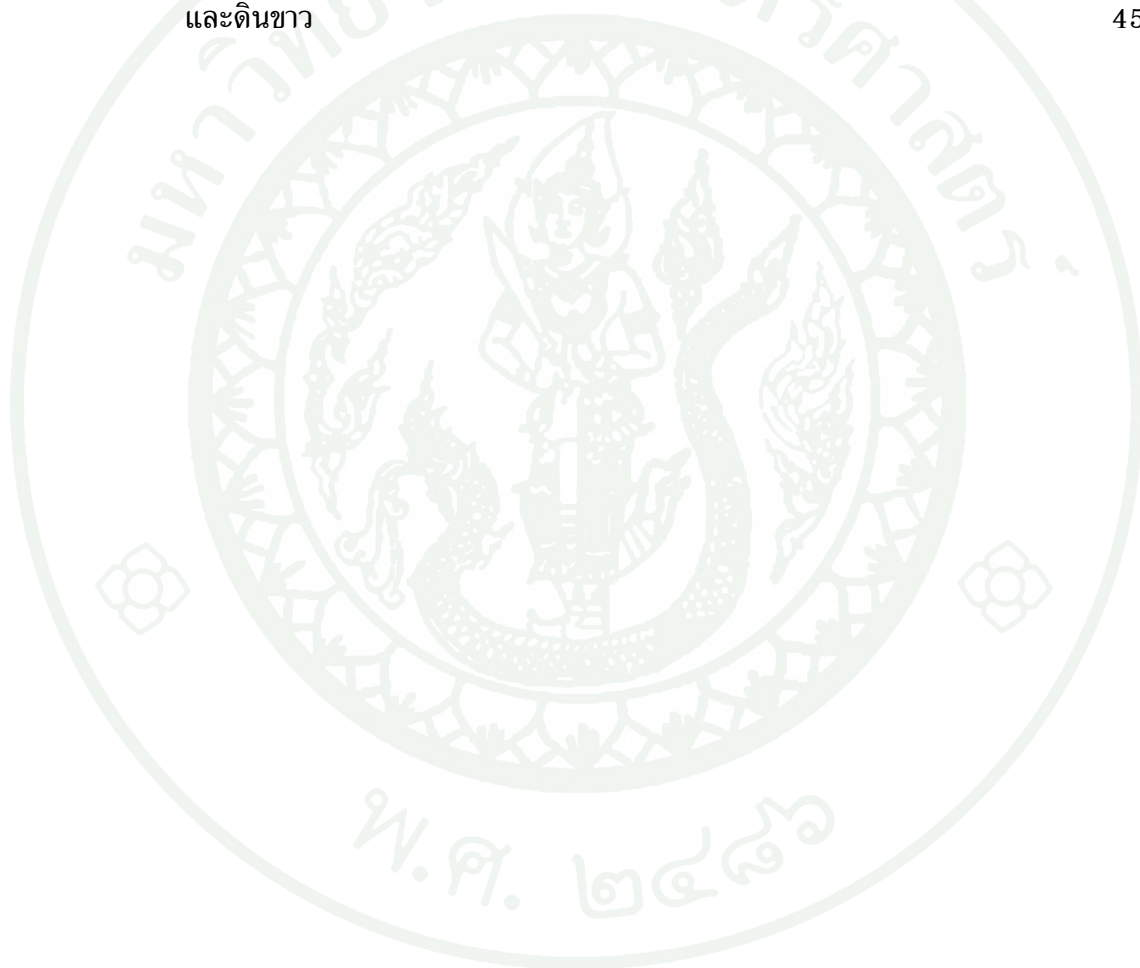
ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างซิส-1,4-ไอโซพรีน	5
2	โครงสร้างการเชื่อมขวาง	7
3	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาควบรูปด้วยกำมะถันและสารกระตุ้น	10
4	ประสิทธิภาพในการบดย่อยยวเทียบกับอุณหภูมิ	14
5	เครื่องบดผสมยวระบบปิดและระบบเปิด	15
6	ส่วนประกอบของเครื่องมินนี	16
7	ตัวอย่างกราฟที่อ่านได้จากเครื่องวัดความหนืดมินนีของยว	17
8	การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของยว	19
9	จนวนความร้อนชนิดชั้นอากาศ	20
10	จนวนความร้อนแบบเส้นใย	20
11	จนวนความร้อนแบบเซลล์	20
12	จนวนความร้อนแบบเกล็ด	20
13	ยวแห่งมาตรฐานเกรด STR 5L	24
14	การบดนิ่มยวด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง	24
15	การผสมสารเคมีลงในยวด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง	25
16	เครื่องวัดความหนืดมินนีและเครื่องทดสอบการควบรูปของยว	25
17	เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารทำให้เกิดฟองด้วยเครื่อง DSC	27
18	เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของยวฟองด้วยเครื่อง SEM	28
19	วิภูภาคผลึกของสารตัวเติมถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD	28
20	เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน	29
21	เครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของสารตัวเติมด้วยเครื่อง XRF	30
22	เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค	30
23	เครื่องวิเคราะห์อัตราการลามไฟ	31
24	ภาพการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต	32

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	ความหนืดมูนิของยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาและสาร หน่วงไฟคลอไลเนทเต็ดพอลิเอทิลีน	33
26	ความหนืดมูนิของยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมดินขาวและสาร หน่วงไฟคลอไลเนทเต็ดพอลิเอทิลีน	35
27	เวลาการคงรูปยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาและดินขาว	36
28	ภาพตัดขวางของยางฟองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราดกำลังขยาย 50 เท่า ยางฟองไม่ผสมสารตัวเติมและยางฟองที่ผสม สารหน่วงไฟคลอไลเนทเต็ดพอลิเอทิลีน	37
29	ภาพตัดขวางของยางฟองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราดกำลังขยาย 50 เท่า ยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 20 phr และยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 30 phr	37
30	ภาพตัดขวางของยางฟองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราดกำลังขยาย 50 เท่า ยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 20 phr และยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 30 phr	38
31	ภาพตัดขวางของยางฟองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราดกำลังขยาย 50 เท่า ยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 20 phr และ ยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 30 phr	38
32	ภาพตัดขวางของยางฟองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราดกำลังขยาย 50 เท่า ยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 40 phr และ ยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 50 phr	38
33	ผลการวิเคราะห์ XRD ของสารตัวเติมอลูมินา	39
34	ผลการวิเคราะห์ XRD ของยางฟองผสมสารตัวเติมอลูมินา	40
35	ผลการวิเคราะห์ XRD ของสารตัวเติมดินขาว	41
36	ผลการวิเคราะห์ XRD ของยางฟองผสมสารตัวเติมดินขาว	41
37	ภาพอัตราการลามไฟของยางฟองไม่ผสมสารตัวเติมและยางฟองผสม สารหน่วงไฟคลอไลเนทเต็ดพอลิเอทิลีน	42
38	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารหน่วงไฟคลอไลเนทเต็ดพอลิเอทิลีน เทียบกับอุณหภูมิ	43
39	ภาพอัตราการลามไฟของยางฟองผสมสารตัวเติมอลูมินา	53

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวเติมอลูมินาเทียบกับอุณหภูมิ	44
41	ภาพอัตราการลามไฟของยางพองผสมสารตัวเติมดินขาว	44
42	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวเติมดินขาวเทียบกับอุณหภูมิ	45
43	การเปรียบเทียบอัตราการลามไฟระหว่างยางที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาและดินขาว	45



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า และ 100 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 20 phr	53
ก2 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า และ 5000 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 20 phr	53
ก3 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า และ 100 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 30 phr	54
ก4 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า และ 5000 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 30 phr	54
ก5 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า และ 100 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 40 phr	55
ก6 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า และ 5000 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 40 phr	55
ก7 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า และ 100 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 50 phr	56
ก8 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า และ 5000 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 50 phr	56
ก9 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า และ 100 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 20 phr	57
ก10 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า และ 5000 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 20 phr	57
ก11 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า และ 100 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 30 phr	58
ก12 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า และ 5000 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 30 phr	58

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก13 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า และ 100 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 40 phr	59
ก14 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า และ 5000 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 40 phr	59
ก15 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า และ 5000 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 50 phr	60
ก16 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า และ 5000 เท่าของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 40 phr	60
ข1 ภาพการกระจายตัวของอลูมินาในยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา	62
ข2 ภาพการกระจายตัวของอลูมินาในยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว	62
ค1 ภาพการสลายตัวของ $\text{NaHCO}_3$	64
ค2 ภาพการสลายตัวของ CPE	64
ง1 ภาพการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของอลูมินาเทียบกับอุณหภูมิ	66
ง2 ภาพการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของดินขาวเทียบกับอุณหภูมิ	66
จ1 ภาพการเคราะห์รูปพรุนของของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 20, 30, 40, และ 50 phr	68
จ2 ภาพการเคราะห์รูปพรุนของของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 20, 30, 40, และ 50 phr	69

### คำอธิบายและสัญลักษณ์ย่อ

ASTM	=	American society for testing and materials
CPE	=	Chlorinated polyethylene
ISO	=	International Organization for Standardization
K	=	kelvin
m	=	meter
min	=	minute
mm	=	millimeter
NR	=	Natural Rubber
NaHCO <sub>3</sub>	=	Sodium Hydrogen Carbonate
ODR	=	Oscillation Disc Rheometer
S	=	sulfur
s	=	second
SEM	=	Scanning Electron Microscope
TiO <sub>2</sub>	=	Titanium Dioxide
UL	=	Underwriters Laboratories
W	=	Watt
XRD	=	X-Ray Diffraction
XRF	=	X-Ray Fluorescence
ZnO	=	zinc oxide

## อิทธิพลของสารตัวเติมดินขาวและอลูมินาในยางฟองที่ทำจากยางธรรมชาติเพื่อ ประยุกต์ใช้เป็นฉนวนความร้อน

### Influence of Kaolin and Alumina on Cellular Rubber from Natural Rubber for Thermal Insulation Applications

#### คำนำ

โฟมพอลิเมอร์ มีการคิดค้นตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่ 2 เนื่องจากในขณะนั้น อุตสาหกรรมพอลิเมอร์เติบโตอย่างรวดเร็ว จึงทำให้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักเบาและมีการประหยัดวัสดุ ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อป้องกันความร้อน กันการกระแทก และคิดค้นเพื่อตอบสนองเทคโนโลยีใหม่ๆ โฟมพอลิเมอร์นั้นสามารถขึ้นรูปได้จากพอลิเมอร์หลายชนิด เช่น พอลิสไตรีน พอลิยูรีเทน พอลิเอทิลีน และยางธรรมชาติ เนื่องจากสมบัติที่แตกต่าง ๆ ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติสามารถผลิตขึ้นได้เองในประเทศไทยนั้น ทำให้ยางธรรมชาติเป็นที่น่าสนใจต่อการศึกษาความเป็นไปได้ในการต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ในที่นี้อาจหมายถึง วัสดุฉนวนความร้อน เพราะยางธรรมชาตินั้นมีค่าการนำความร้อนต่ำ ยิ่งเป็นยางที่มีรูพรุนภายในด้วยแล้ว จะทำให้สภาพการนำความร้อนของยางนั้นต่ำลง

ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาปัจจัยเบื้องต้นของการเป็นฉนวนความร้อน โดยศึกษาถึงโครงสร้างทางจุลภาคของยางฟอง (รูพรุนภายใน) ถึงแม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีแล้วแต่การเติมสารตัวเติมเข้าไปในยางธรรมชาติเป็นที่นิยมเพราะเหตุผลหลายประการ เช่น เพิ่มสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง เพิ่มสมบัติความแข็งแรง เพิ่มสมบัติความต้านทานต่อการช้ำ และเพิ่มเนื้อของผลิตภัณฑ์เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วสารตัวเติมแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (reinforcing fillers) และสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (non-reinforcing filler) สารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมคือสารตัวเติมเขม่าดำ (carbon black) เนื่องจากเป็นสารในกลุ่มเสริมแรงที่ดีเป็นอันดับต้น ๆ แต่คาร์บอนแบล็กนั้นเมื่อผสมรวมกับยางแล้วจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีดำจึงไม่เหมาะในการเป็นผลิตภัณฑ์ในบางชนิด ซิลิกา (silica) จึงถูกนำมาใช้หากต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงและไม่เป็นสีดำ แต่ซิลิกานั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งทำให้ซิลิกานั้นดูดซับสารกระตุ้นและสารตัวเร่งในยางทำให้เกิดปฏิกิริยาการคงรูปที่ช้าและถึงแม้ว่าจะมีการแก้ไขโดยการเติมสารกลุ่มเอซิลินไกลคอล แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่ ทั้งนี้ซิลิกายังเกาะกลุ่มกันเมื่อเติมในปริมาณที่สูงส่งผลให้ความหนืดเพิ่มสูงขึ้นมากจึงไม่เหมาะแก่ทำเป็นผลิตภัณฑ์ยางฟอง นอกจากสารเสริมแรงที่กล่าวมาข้างต้นแล้วยังมี สารตัวเติมประเภทไม่

เสริมแรงที่นิยมใช้กันมากคือ ดินขาว (kaolin) เพราะมีราคาถูก สามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีสีได้

ดินขาวนั้นมีแหล่งผลิตในประเทศไทยหลายแหล่งได้แก่ จังหวัด ลำปาง อุตรดิตถ์ ปราจีนบุรี ระนอง นครศรีธรรมราช และสุราษฎร์ธานี เป็นต้น ทั้งนี้แหล่งที่กล่าวมานี้ไม่ได้พบดินขาวในลักษณะบริสุทธิ์แต่จะสินแร่คาโอลินไนท์ (kaolinite) นอกจากสินแร่คาโอลินไนท์แล้วสินแร่อีกประเภทหนึ่งที่พบมากในประเทศไทยคือสินแร่คอร์รันดัม (corundum) ซึ่งมีส่วนประกอบของอลูมินา ซึ่งมีสีขาวราคาถูก ดังนั้นอลูมินาและดินขาวจึงถูกใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมสี และ อุตสาหกรรมยาง ดังนั้นอลูมินาและดินขาวจึงเป็นที่สนใจในการเป็นสารตัวเติมในยางพองเพื่อศึกษาสมบัติของยางพองที่ผสมสารตัวเติมดินขาวและอลูมินา รวมไปถึงการลดต้นทุนการผลิต ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยสามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานของการทำยางพองได้ต่อไป

## วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมอลูมินาและดินขาวในปริมาณที่ต่างกันที่มีผลต่อเวลาการคงรูปและความเหนียวของยางพอง
2. ศึกษาโครงสร้างสร้างทางจุลภาคที่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความเป็นฉนวนความร้อนของยางพอง
3. ศึกษาปัจจัยของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติการลามไฟของยางพอง

## การตรวจเอกสาร

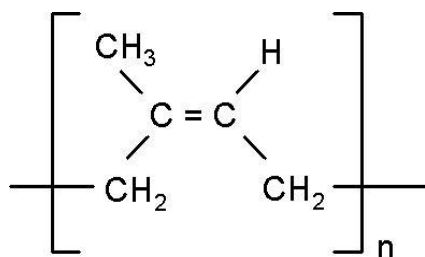
### 1. ยางธรรมชาติ (natural rubber)

น้ำยางธรรมชาติสามารถได้มาจากพืชต่างๆที่มีอยู่ในธรรมชาติ โดยพืชที่ให้น้ำยางในธรรมชาตินั้นมีมากมายถึง 400 ถึง 500 ชนิด แต่พืชที่มีความโดดเด่นที่สุดในการแปรรูปน้ำยางไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ ต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis*) ซึ่งมีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้ โดยน้ำยางธรรมชาติในรูปวัตถุดิบนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ น้ำยางข้น (concentrated latex) และ ยางแห้ง (dry rubber)

น้ำยางข้นนั้น หมายถึง น้ำยางที่แปรรูปโดยนำน้ำยางสดจากเปลือกไม้ของต้นยางพาราผ่านการเติมสารเคมีต่างๆเพื่อช่วยรักษาสภาพและเพิ่มความเข้มข้น ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการขนส่งโดยน้ำยางข้นนั้นสามารถเพิ่มปริมาณเนื้อยางจากร้อยละ 25 ถึง 30 ในน้ำยางสดเป็น 55 ถึง 65 ในน้ำยางข้น

ยางแห้ง หมายถึง ยางที่ได้จากการจับตัวกันของน้ำยางโดยกระบวนการทางเคมีและผ่านกระบวนการอื่นๆ พร้อมทั้งทำให้แห้งก่อนนำไปใช้งาน ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air Dried Sheet, ADS) ยางสกิม (skim rubber) และยางแห้งมาตรฐาน (Technically Specified Rubber, TSR) โดยยางแห้งมาตรฐานของไทย (Standard Thai Rubber, STR) ยางแห้งมาตรฐานนั้นมีสมบัติใกล้เคียงกับยางแผ่นแต่มีความสม่ำเสมอของสมบัติมากกว่าเพราะผ่านการคัดแยกเกรดตามหลักการทางวิทยาศาสตร์โดยอ้างอิงสิ่งเจือปนเป็นสิ่งสำคัญ โดยมีการกำหนดยางเป็น 8 เกรด ได้แก่ 1) STR5L 2) STR 5 3) STR 10 4) STR 20 5) STR XL 6) STR 5CV 7) STR 10CV 8) STR 20CV (วารสาร, 2552)

ยางธรรมชาติจัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบเคมีหลัก โดยทั่วไปมี ซิส-1,4-ไอโซพรีน (cis-1,4-isoprene) ดังแสดงในภาพที่ 1 เป็นมอนอเมอร์ต่อกันเป็นสายโซ่ยาว มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยกว้าง น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางธรรมชาติอยู่ที่ 200,000 ถึง 500,000 กรัมต่อหนึ่งโมล โครงสร้างโดยทั่วไปเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะสามารถเกิดเป็นผลึกบางส่วนของสายโซ่โมเลกุลได้ยกตัวอย่างเช่น การเกิดผลึกเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) แต่สามารถกลับมาเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐานได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Morton, 1959 ; Fred, 1993)



ภาพที่ 1 โครงสร้างซิส-1,4-ไอโซพรีน

ทั้งนี้การเกิดผลึกของสายโซ่โมเลกุลยางนั้นสามารถเกิดจากการรับแรงดึง (strain induced crystallization) การดึงจะทำให้สายโซ่โมเลกุลยางมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น จึงส่งผลต่อสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ คือ ยางจะมีสภาพเปลี่ยนไปจากสภาพโปร่งแสง (transparent) เป็น สภาพทึบแสง (opaque) สมบัติทางกล การที่สายโซ่มีความเป็นระเบียบมากขึ้นหรือมีผลึกมากขึ้นนั้นส่งผลให้สมบัติทางกลต่างๆดีขึ้น เช่น สมบัติการรับแรงดึง (tensile strength) การทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และทนทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) โดยสมบัติทางกลที่เพิ่มขึ้นนั้นจะขึ้นกับปัจจัยของชนิดปริมาณสารตัวเติมและอัตรา การดึงยึดเป็นต้น (พงษ์ธร, 2548) นอกจากนั้นแล้วยางธรรมชาติยังมีข้อดีอีกหลายประการเช่น ความยืดหยุ่น (elasticity) ความเป็นฉนวน (insulation) และความเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็น สมบัติสำคัญในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์

## 2. ยางโฟม (cellular rubber)

โฟมพอลิเมอร์ คือ พอลิเมอร์ที่มีอากาศหรือแก๊สบรรจุอยู่ภายในทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กในโครงสร้าง จึงทำให้พอลิเมอร์เป็นฉนวนความร้อนได้ดี ที่มีน้ำหนักเบา สามารถใช้เป็นเบาะรอง วัสดุกันกระแทก และมีการประหยัดวัสดุลง โฟมพอลิเมอร์นั้นสามารถขึ้นรูปได้จากพอลิเมอร์หลายชนิด เช่น พอลิสไตรีน พอลิยูรีเทน พอลิเอทิลีน และยางธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีข้อดีแตกต่างกันไป ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติ มีสมบัติความทนทานที่ดี ไม่มีความเป็นพิษต่อผู้ใช้งานและไม่ปลดปล่อยสารพิษในขณะที่ขึ้นงานเกิดการลุกไหม้ ทั้งยังสามารถผลิตได้ในประเทศอีกด้วย

โดยกลไกการเกิดฟองของยางโฟมนั้นเกิดขึ้นจากอากาศหรือแก๊สต่างๆ ขณะเกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยความร้อนและสารเคมี ทั้งนี้ยางโฟมแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ประเภทแรกคือยาง foam rubber ประเภทที่สอง คือ ยาง sponge rubber และประเภทสุดท้าย คือ ยาง expanded rubber โดยสองประเภทหลังนั้น คือผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากยางแห้ง โดยความแตกต่างของ sponge rubber และ expanded rubber คือ โครงสร้างของรูพรุน โครงสร้าง sponge

rubber จะเป็นโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด แต่โครงสร้างของ expanded rubber จะเป็นแบบโครงสร้างปิด

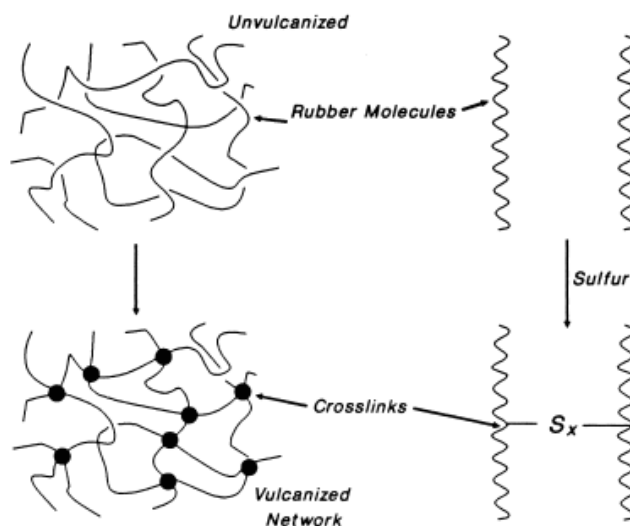
### 3. สารเคมียาง (rubber chemicals)

#### 3.1 สารช่วยในการคงรูป (vulcanizing or curing agents)

การคงรูปยางหรือ กระบวนการวัลคาไนเซชัน (vulcanization) เป็นกระบวนการในการทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติที่คงที่มากขึ้นและดีขึ้น สมบัติที่กล่าวถึงได้แก่ สมบัติด้านเชิงกล สมบัติความยืดหยุ่น ความต้านทานต่อสารเคมี และความทนทานต่ออนุมูลอิสระที่เปลี่ยนไป โดยเกิดจากกระบวนการคงรูปที่มีการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ของยางเป็นโครงสร้างตาข่าย กระบวนการคงรูปนี้ส่วนใหญ่แล้วจะประกอบไปด้วยสารเคมีในการคงรูปเป็นสำคัญ ยกตัวอย่าง เช่น สารเร่งปฏิกิริยา (accelerator) สารกระตุ้น (activator) สารคงรูปยาง (vulcanizing agents) และ สารตัวเติม (filler) เป็นต้น วัสดุที่ผ่านการบดผสมกับสารเคมีเหล่านี้จะถูกเรียกว่า ยางคอมพาวนด์ (compound) หลังจากยางคอมพาวนด์ถูกขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ

การคงรูปโดยใช้กำมะถันนั้นเป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะเหตุว่า การคงรูปโดยใช้กำมะถันนั้นมีต้นทุนที่ต่ำ เกิดการคงรูปได้อย่างรวดเร็ว (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนสารตัวเร่งปฏิกิริยาและกำมะถัน) ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลที่ดี ด้วยเหตุผลหลายประการที่กล่าวมา ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันจึงเป็นที่นิยมใช้ในยางเกือบทุกประเภทที่มีพันธะคู่ประกอบอยู่ในโมเลกุล เช่น ยางสังเคราะห์ SBR IR BR และ NBR และ ยางธรรมชาติ เป็นต้น โดยกำมะถันนั้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของสายโซ่โพลิเมอร์ของยาง ดังปรากฏในภาพที่ 2 เนื่องจากกำมะถันเข้าทำปฏิกิริยาบริเวณพันธะคู่ ดังนั้น อัตราเร็วของการคงรูปด้วยกำมะถันจึงแปรผันตรงกับปริมาณพันธะคู่ที่มีอยู่ในสายโซ่โพลิเมอร์ของยาง ในระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน การเชื่อมโยงพันธะอาจเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ เช่น การเชื่อมโยงผ่านพันธะมอนอซัลไฟดิค (monosulfidic) ไดซัลไฟดิค (disulfidic) หรือพอลิซัลไฟดิค (polysulfidic) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารตัวเร่งและกำมะถันที่ใช้ โดยการเชื่อมโยงแบบปริมาณกำมะถันต่อสารตัวเร่งสูงนั้น จะทำให้การเชื่อมโยงส่วนใหญ่ เกิดเป็นพันธะพอลิซัลไฟดิค ยางคงรูปจะมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความยืดหยุ่น เป็นต้น ระบบนี้ถูกเรียกว่า การคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional Vulcanization, CV) หากปริมาณกำมะถันมีน้อย หรืออัตราส่วนกำมะถันต่อสารตัวเร่งต่ำ กระบวนการแบบนี้จะเกิดพันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบมอนอซัลไฟดิค หรือไดซัลไฟดิค ระบบการคงรูปแบบนี้เรียกว่า ระบบคงรูปแบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanization, EV) โดยบางครั้ง กำมะถันอาจไม่จำเป็นต้องเติมลงไปในระบบนี้ก็ได้ แต่จะใช้สารตัวเร่งที่สามารถปลดปล่อยกำมะถันออกมาระหว่างกระบวนการคงรูป (sulfur donor accelerator) โดยสมบัติ

เซิงกลและพลวัตอาจไม่ดีเท่ากับระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม แต่จะมีการทนต่อความร้อนและการเสีรูปร่างหลังการกดอัด (compression set) ดีกว่า จากที่กล่าวมาข้างต้น ในบางครั้งอาจมีการเลือกการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-Efficient Vulcanization, Semi-EV) ซึ่งมีอัตราส่วนกำมะถันต่อสารตัวเร่งอยู่ระหว่างสองระบบ



ภาพที่ 2 โครงสร้างการเชื่อมขวาง

ที่มา: Mark et al. (2005)

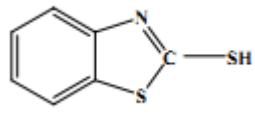
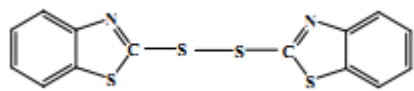
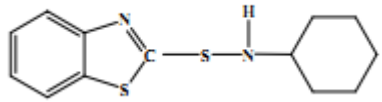
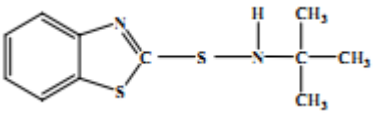
กำมะถันที่ใช้ในการคงรูปยางคอมพาวนด์ แบ่งออกเป็นสองชนิด ได้แก่ กำมะถันรอมบิก (rhombic) และกำมะถันอสัณฐาน (amorphous) โดยกำมะถันอสัณฐานนั้นจะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายพอลิเมอร์ มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งไม่ละลายในตัวทำละลาย ส่วนกำมะถันรอมบิกมีลักษณะโครงสร้างกำมะถันเป็นวงแหวนที่มีกำมะถันอยู่แปดอะตอม ( $S_8$ ) โดยทั่วไปแล้วกำมะถันจะถูกใช้ในการคงรูปอยู่ที่ 1 ถึง 3 phr สำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

ทั้งนี้นอกจากระบบการคงรูปโดยใช้กำมะถันแล้ว ยังมีระบบการคงรูปโดยใช้เพอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นระบบการคงรูปที่เหมาะสมสำหรับยางที่มีความอึดตัว หรือไม่มีพันธะคู่ประกอบอยู่ในสายโซ่โมเลกุล ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความทนทานต่อความร้อนสูง เนื่องจากพันธะเชื่อมขวางเป็นพันธะระหว่างคาร์บอนและคาร์บอน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแล้ว มีความแข็งแรงมากกว่า กำมะถันและคาร์บอนมาก นอกจากระบบการคงรูปด้วยกำมะถันและเพอร์ออกไซด์แล้ว ยังสามารถคงรูปได้ด้วยสารเคมีอื่นๆ อีกเช่น ยูรีเทน (urethane) และโลหะออกไซด์ เป็นต้น

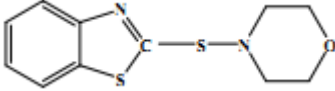
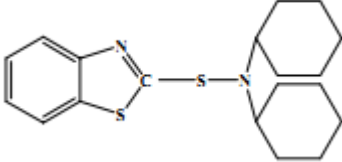
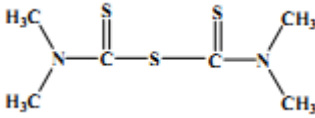
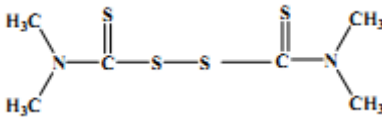
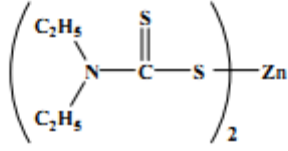
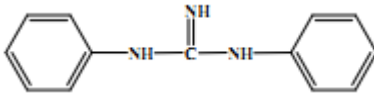
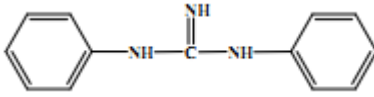
### 3.2 สารเร่งปฏิกิริยาในการคงรูป (accelerators)

การคงรูปด้วยซัลเฟอร์นั้นหากปราศจากสารเร่งปฏิกิริยาในการคงรูป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดได้ช้า ดังนั้นสารเร่งปฏิกิริยาคงรูปจึงมีบทบาทสำคัญ ในการช่วยลดเวลาการคงรูปยาง โดยสารเร่งปฏิกิริยาจะช่วยทำให้ปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันกับพันธะคู่ของยางเกิดได้เร็วขึ้น ทั้งนี้ แบ่งสารเร่งปฏิกิริยาตามการใช้งานได้เป็นสองประเภทคือ การใช้สารเร่งเพียงชนิดเดียว (primary accelerator) และการใช้สารเร่งปฏิกิริยาสองชนิดร่วมกัน ตัวอย่างเช่น การใช้ไดไทโอ - บิสเบนโซไทอาโซล (2-2'-Dithiobisbenzothiazole, MBTS) และเททระเมทิลไทูรัมโมโนซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram Monosulfide, TMTM) เป็นต้น ตัวอย่างสารเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างโครงสร้างสารตัวเร่งปฏิกิริยา

สารเคมี	ตัวย่อ	โครงสร้าง
<b>Benzothiazoles</b>		
2-Mercaptobenzothiazole	MBT	
2-2'-Dithiobisbenzothiazole	MBTS	
<b>Benzothiazolesulfenamides</b>		
N-Cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide	CBS	
N-t-Butylbenzothiazole-2-sulfenamide	TBBS	

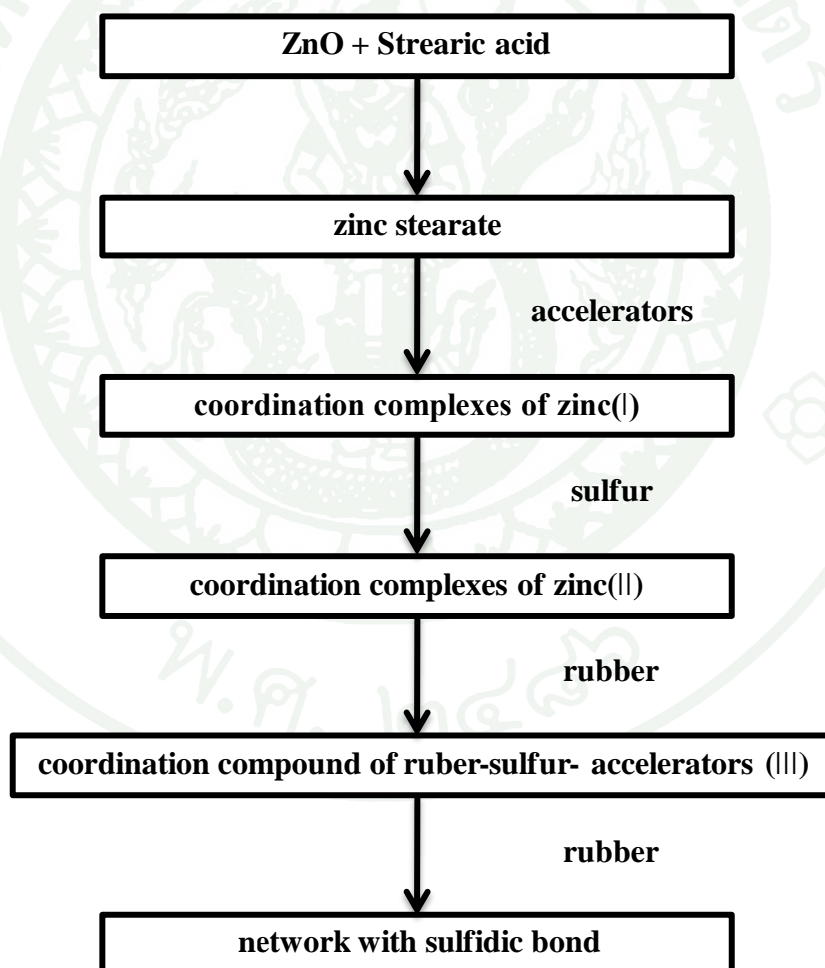
## ตารางที่ 1 (ต่อ)

สารเคมี	ตัวย่อ	โครงสร้าง
2-Morpholinothiobenzothiazole	MBS	
N-Dicyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide	DCBS	
<b>Dithiocarbamates</b>		
Tetramethylthiuram monosulfide	TMTM	
Tetramethylthiuram disulfide	TMTD	
Zinc diethyldithiocarbamate	ZDEC	
<b>Amines</b>		
Diphenylguanidine	DPG	
Di-o-tolylguanidine	DOTG	

ที่มา: Jame *et al.* (1994)

### 3.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาในการคงรูปยาง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ซึ่งได้แก่ สารอินทรีย์ (organic) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic) และสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นต่าง โดยสารอนินทรีย์ที่นิยมใช้เป็นสารกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นสารออกไซด์ของโลหะโดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) โดยซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยาร่วมกับกรดไขมัน (fatty acid) เช่น กรดสเตียริก (stearic acid) ทำให้เกิดเป็นซิงค์สเตียเรตซึ่งละลายในยางได้ดี หลังจากนั้นซิงค์สเตียเรตจะทำปฏิกิริยากับสารตัวเร่งเช่น MBTS และ TMTM เป็นต้น ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์ (I) จะเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถัน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์ (II) ในตำแหน่งพันธะคู่และตำแหน่งอัลฟาเมที่ - สีน ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างยางกำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคงรูปด้วยกำมะถันและสารกระตุ้น

### 3.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants)

ยางธรรมชาตินั้น มีองค์ประกอบที่ไม่อิ่มตัว กล่าวคือ มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่โมเลกุลมาก จึงทำให้เกิดการเสื่อมสภาพโดยออกซิเจน โอโซน และอื่นๆ อีกมากมาย ดังนั้นการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ จึงช่วยเพิ่มความคงทนและป้องกันสมบัติต่างๆ ไม่ให้เปลี่ยนแปลงไป

### 3.5 สารตัวเติม (fillers)

สารตัวเติมเป็นสารที่เติมลงไปเพื่อจุดประสงค์บางประการเช่น เพิ่มสมบัติทางกลและลดต้นทุน เป็นต้น โดยสารตัวเติมแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ ตามประสิทธิภาพการใช้งาน ได้แก่ สารตัวเติมประเภทเสริมแรง (reinforcing filler) เช่น เขม่าดำ (carbon black) ซิลิกา (silica) เป็นต้น สารตัวเติมในกลุ่มที่สอง เป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง (non reinforcing filler) ยกตัวอย่างเช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) ดินขาว (kaolin) และอลูมินา (alumina) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้สารตัวเติมคือ ดินขาวและอลูมินา ซึ่งสารตัวเติมแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกันดังนี้

ดินขาว เป็นหนึ่งในสารตัวเติมสีอ่อนหรือไม่มีสี ที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง มีสูตรโครงสร้างโดยส่วนใหญ่เป็น  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  และมีสิ่งเจือปนอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 สามารถเติมลงไปเพื่อลดเนื้อยาง จึงทำให้ลดต้นทุนในการผลิต นอกจากนี้ ดินขาวที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ยังสามารถช่วยเสริมแรงได้อีกด้วย ทั้งนี้ราคาของดินขาวนั้น มีราคาต่ำ เนื่องจากสามารถพบได้โดยทั่วไปในพื้นที่ๆ มีลักษณะเป็นภูเขา หรือที่ราบเดิม ที่เป็นแหล่งของหินฟันม้า โดยหินฟันม้านั้นจะเกิดการผุพังโดยบรรยากาศ ผลลัพธ์ที่ได้จะเหลือดินขาวและสิ่งเจือปนซิลิกาอยู่เป็นจำนวนหนึ่ง นอกจากนี้แหล่งที่กล่าวมาข้างต้น ยังสามารถพบเจอดินขาวได้ในบริเวณที่ถูกระแสน้ำพัดพาไปสะสมในบริเวณที่ราบลุ่ม โดยประเทศไทยนั้น มีแหล่งดินขาวอยู่ในหลายจังหวัดด้วยกัน เช่น ลำปาง อุตรดิตถ์ ปราจีนบุรี ระนอง นครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี เป็นต้น (ปรีดา, 2539)

ตารางที่ 2 ตารางแสดงองค์ประกอบทางเคมีของดินขาว

ผลการวิเคราะห์ทาง เคมีของดินขาว	ดินขาว บริสุทธิ์ (เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก)	องค์ประกอบดินขาว (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)			
		อังกฤษ	ลำปาง	ระนอง	นราธิวาส
SiO <sub>2</sub>	46	46-47	59.70	48.75	47.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39	37-39	27.60	34.58	35.72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.4-1	0.84	0.71	0.38
TiO <sub>2</sub>	-	1	0.07	0.02	0.20
CaO	-	-	0.13	0.07	0.11
MgO	-	-	0.25	0.34	1.01
K <sub>2</sub> O	-	1.0-2.0	5.85	2.52	1.76
NaO	-	-	0.15	0.40	0.39
น้ำหนักที่หายไป หลังการเผาอินทรีย์ สาร น้ำและแก๊ส (LOI)	14	12.5	5.39	10.66	12.99

ที่มา: เลิศชายและอภิชาติ (2553)

อลูมินา เป็นองค์ประกอบของวัตถุดิบทางธรรมชาติ เช่น ดิน แร่หินฟันม้า เป็นต้น ผลิตได้จากการเผาอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส อลูมินามีชื่อทางเคมีว่า อลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) พบตามธรรมชาติ ในรูปแบบของคอร์ันดัม (corundum) โดยทั่วไปไม่มีสีขาวหรือไม่มีสี แต่หากมีสิ่งเจือปน อาจทำให้เห็นสีบ้างเล็กน้อย โครงสร้างของอลูมินาประกอบด้วยพันธะระหว่างอลูมิเนียมกับออกซิเจน เป็นพันธะไอออนิกที่มีความแข็งแรงมาก การทำลายพันธะดังกล่าว ต้องใช้พลังงานสูง จึงทำให้อลูมินาเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง โดยมีเพียงเพชรเท่านั้นที่มีความแข็งแรงกว่าอลูมินา นอกจากนี้อลูมินา ยังทนความร้อนและการกัดกร่อนต่อสารเคมีได้อย่างดีเยี่ยม ทั้งยังมีสมบัติ ความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีอีกด้วย ประโยชน์ของอลูมินาส่วนใหญ่จะใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เซรามิก เพื่อให้ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ ยังสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์ได้หลายชนิดเช่น วัสดุทนไฟในเตาเผา และเตาหลอม วัสดุขัดถู ลูกบิด และผนังหม้ออบของหม้ออบในอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น ในส่วนของอุตสาหกรรมยางนั้น อลูมินาอาจยังไม่เป็นที่แพร่หลายในการใช้มากนัก โดยส่วนใหญ่การใช้อลูมินานั้น ใช้เพื่อลดเวลาการคงรูปและเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลต่าง ๆ

### 3.6 สารทำให้เกิดฟอง (blowing agents)

สารที่ทำให้เกิดฟองคือ สารที่สลายตัวในอุณหภูมิสูงแต่มีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำ โดยอุณหภูมิการสลายตัวนั้นจะต้องอยู่ในช่วงอุณหภูมิการวัลคาไนเซชัน หรือการคงรูปของยาง ทำให้ยางมีลักษณะเป็นรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป หรืออาจเรียกว่ายางฟองน้ำ ทั้งนี้คุณสมบัติที่ดีของสารทำให้เกิดฟอง ได้แก่

1. ปริมาณแก๊สที่ปลดปล่อยมีจำนวนมาก
2. ไม่มีความเป็นพิษ
3. ไม่มีกลิ่น เกิดขึ้นจากสารเคมีที่สลายตัว
4. สมบัติทางกายภาพของยางไม่เปลี่ยนไป
5. กระจายตัวในยางได้ดี
6. ไม่มีผลต่อเวลาการคงรูปและการเสื่อมสภาพของยาง
7. อุณหภูมิการสลายตัวอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

สารทำให้เกิดฟองนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ สารอินทรีย์ และ สารอนินทรีย์ โดยสารอินทรีย์นั้นสามารถกระจายตัวได้ดีในเนื้อยาง ส่วนใหญ่แล้วจะสลายตัวให้แก๊สไนโตรเจน และเกิดฟองเป็นจำนวนมาก สารเคมีในกลุ่มนี้ได้แก่ สารประกอบเอโซ (azo compounds) อนุพันธ์ของไฮดราซีน (hydrazine derivatives) และสารประกอบไนโตรโซ (N-nitroso compounds) ถึงแม้ว่าสารอินทรีย์จะสามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อยางและให้ปริมาณฟองแก๊สที่มาก แต่แก๊สที่ออกมาเป็นแก๊สไนโตรเจน ซึ่งหากเกิดการทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบไนโตรเจนแล้ว จะทำให้เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ (เป็นสารก่อมะเร็งได้) ขณะที่สารอนินทรีย์ เช่น โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) ถึงแม้ว่าการกระจายตัวในเนื้อยางอาจไม่ดีเท่าสารอินทรีย์ แต่ฟองแก๊สไม่มีความเป็นพิษ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้  $\text{NaHCO}_3$  เป็นสารทำให้เกิดฟอง

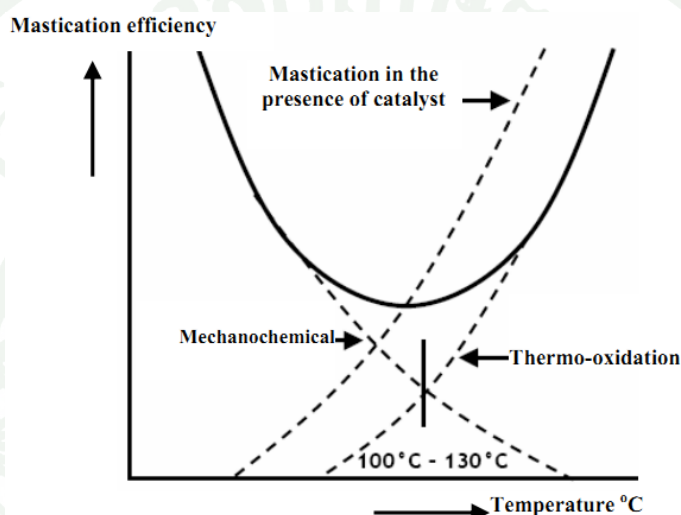
## 4. ทฤษฎีการบดผสมยาง (theory of mixing)

### 4.1 การบดย่อยยาง (mastication)

สารเคมีและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ ในการคงรูปยางนั้น ไม่สามารถย่อยบดผสมรวมกับเนื้อยางซึ่งอยู่ในสภาวะของแข็งและความหนืดที่สูงอย่างมาก ดังนั้นขั้นตอนการบดย่อยจึงมีความสำคัญเพื่อช่วยให้ยางนั้น สามารถผสมรวมเข้ากับสารเคมีต่าง ๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงอย่างยางธรรมชาติ การบดย่อยนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า มาสติเคชัน

(mastication) ทั้งนี้ขั้นตอนนี้อาจไม่มีความจำเป็นต่ออย่างสังเคราะห์มากนัก เพราะเหตุว่า ยางสังเคราะห์นั้นสามารถเจาะจงความหนืดที่ผู้ต้องการได้มีเกรดให้เลือกหลากหลาย ทั้งยังมีความหนืดเริ่มต้นที่ไม่สูงมากนัก (พงษ์ธร, 2550)

การบดย่อยยางนั้นสายโซ่โมเลกุลของยางจะถูกตัดขาดด้วยแรงเชิงกล แรงเฉือน (shear force) ประสิทธิภาพของการลดลงของความยาวสายโซ่โมเลกุลยาง ขึ้นกับอุณหภูมิขณะเกิดการบดย่อยยางดังแสดงในภาพที่ 4



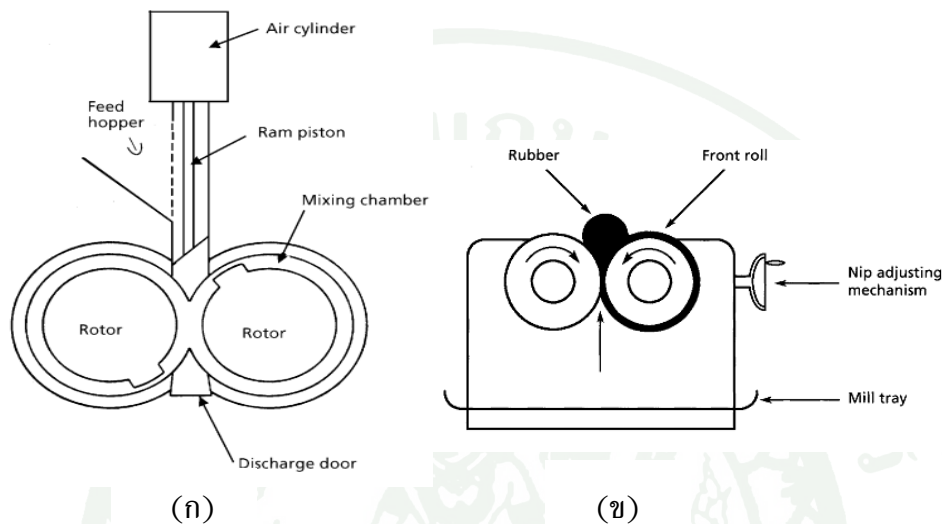
ภาพที่ 4 ประสิทธิภาพในการบดย่อยยางเทียบกับอุณหภูมิ

ที่มา: Baarle (1997)

#### 4.2 การบดผสมยาง (mixing)

การบดผสมยางเป็นกระบวนการหลังจากการบดนิ่ม เพื่อผสมสารเคมีเข้ากับยาง โดยขั้นตอนการบดผสมสารเคมีนั้น จะเรียงลำดับจากสารเคมีที่มีอนุภาคใหญ่ บดผสมเข้ากับเนื้อยางได้ยาก เติมเป็นลำดับแรก และสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปควรเติมเป็นลำดับท้าย ๆ เพื่อป้องกันยางคงรูปก่อนเวลา ทั้งนี้หากสารตัวเติมมีปริมาณมากบดผสมเข้ากับยางได้ยาก อาจมีการเติมสารช่วยในกระบวนการผลิต (processing aids) เพื่อช่วยให้ยางสามารถบดผสมเข้ากับสารตัวเติมได้ ยางที่บดผสมสารเคมีแล้ว ควรเก็บไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง การบดผสมสารเคมีนั้นสามารถบดโดยเครื่องผสมสองระบบดังนี้คือ เครื่องบดผสมระบบปิด (internal mixer) ดังแสดงในภาพที่ 5 (ก) และเครื่องบดผสมระบบเปิด (two-roll mill) ดังแสดงในภาพที่ 5(ข) เครื่องบดผสมระบบปิดนั้น มักใช้กับการบดผสมยางในปริมาณที่มาก ควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการบดผสม และการ

ฟุ้งกระจายของสารเคมีได้ดีกว่า ส่วนเครื่องบดผสมแบบปิดนั้น นิยมใช้ในอุตสาหกรรมขนาดกลาง และขนาดเล็ก เนื่องจากราคาที่แพง แต่การบดผสมแบบสองลูกกลิ้งนั้น ต้องใช้ทักษะความชำนาญของผู้บดรวมถึงการควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ และการฟุ้งกระจายของสารเคมี เป็นต้น



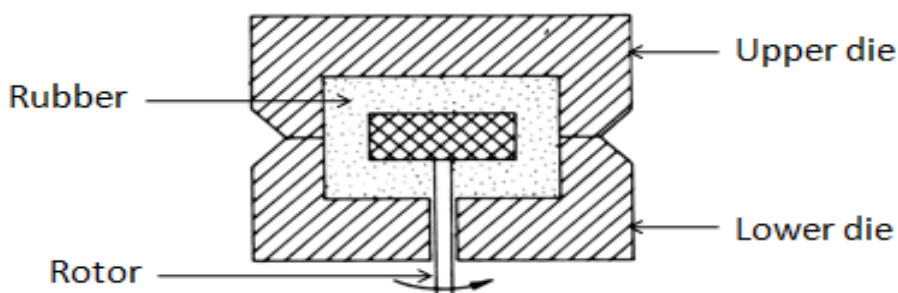
ภาพที่ 5 เครื่องบดผสมยาง (ก) ระบบปิด และ (ข) ระบบเปิด

ที่มา: Funt (2009)

## 5. การทดสอบสมบัติยางคอมพาวนด์

### 5.1 เครื่องมือวัดความหนืดมูนนี่ของยาง (Mooney viscometer)

ความหนืดมูนนี่ เป็นสมบัติพื้นฐานที่ใช้ทดสอบคุณภาพของยางคอมพาวนด์ก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปต่างๆ การวัดความหนืดนี้อาศัยค่าจากแรงบิด (torque) ระหว่างจานหมุนกับยางในห้องใส่ยาง (chamber) ภายใต้อุณหภูมิและความดัน โดยทั่วไปแล้วจะทำการวัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แต่ในบางกรณีอาจทำการวัดที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ (125 องศาเซลเซียส) ความหนืดของยางจะสัมพันธ์โดยตรงกับแรงที่ใช้หมุนโรเตอร์ ดังแสดงในภาพ 6 โดยมีหน่วยเป็นมูนนี่ (Mooney unit) ตามมาตรฐาน ASTM D1646

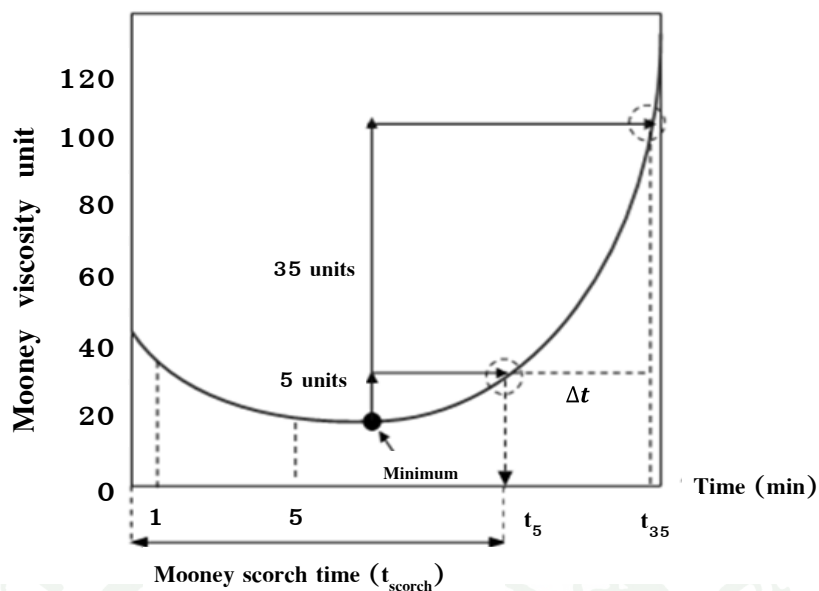


ภาพที่ 6 ส่วนประกอบของเครื่องมุนนี่

ที่มา: Mark *et al.* (2005)

ขั้นตอนการวัดความหนืดมุนนี่คือ จะมีการกำหนดสภาวะทดสอบโดย กำหนดความเร็วหมุนของโรเตอร์เท่ากับ  $2\pm 0.02$  รอบต่อนาที อุณหภูมิของการทดสอบส่วนใหญ่เท่ากับ  $100^{\circ}\text{C}$  ช่วงให้ความร้อนของยาง (preheat time) ใช้เวลา 1 นาที นิยมอ่านค่าความหนืดของยางหลังจากการหมุน หมุนไปได้ 4 นาที กำหนดให้แรงบิดขนาด  $8.30\pm 0.02$  นิวตัน-เมตร (N·m) เทียบเท่ากับค่าความหนืด 100 มุนนี่ โดยการรายงานผลการทดสอบแสดงดังตัวอย่างเช่น 40 ML 1+4(100°C) ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยที่

- 40 M = ค่าความหนืดมุนนี่ของยาง (มุนนี่)
- L = จานหมุนโลหะขนาดใหญ่ (ถ้าใช้จานหมุนโลหะขนาดเล็กจะใช้อักษร S)
- 1 = ระยะเวลาในหน่วยนาทีที่ใช้ในการอุ่นยางก่อนการทดสอบ
- 4 = ระยะเวลาในหน่วยนาทีที่ใช้ในการอ่านค่าทดสอบความหนืด
- $100^{\circ}\text{C}$  = อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ (องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 7 ตัวอย่างกราฟที่อ่านได้จากเครื่องวัดความหนืดมูนีของยาง

กราฟความหนืดมูนีสามารถใช้หาค่าความหนืดมูนีและเวลาที่ยางสามารถไหลได้ (scorch time,  $t_{scorch}$ ) รวมทั้งสมบัติในการคงรูป เช่น ดัชนีการคงรูป (cure index) ตั้งสมการที่ 1 ถึง 3 ตามลำดับ

$$t_{scorch}(t_5) = \text{minimum} + 5 \text{ units} \tag{1}$$

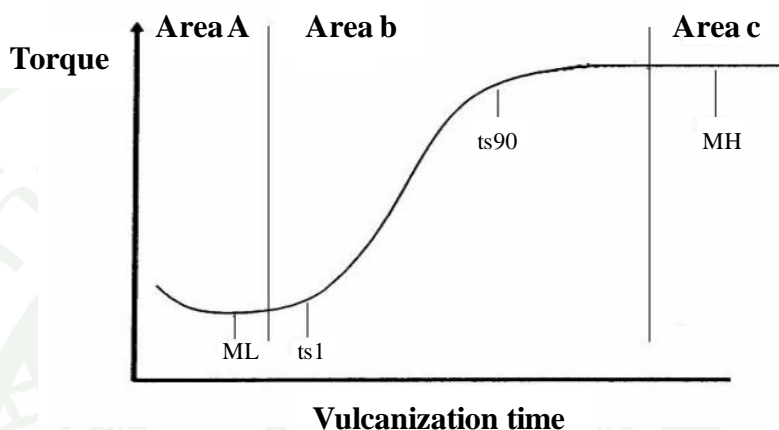
$$t_{35} = \text{minimum} + 35 \text{ units} \tag{2}$$

$$\text{cure index } (\Delta t) = t_{35} - t_5 = t_{30} \tag{3}$$

- $t_5$  = ระยะเวลาที่ทำให้ยางมีค่าความหนืดสูงกว่าจุดต่ำสุด 5 หน่วย หรือเวลาในการเริ่มคงรูปของยาง (เวลาที่ยางสามารถไหลตัวได้ในขณะผลิต)
- $t_{35}$  = ระยะเวลาที่ทำให้ยางมีค่าความหนืดสูงกว่าจุดต่ำสุด 35 หน่วย
- $\Delta t$  = ค่าดัชนีการคงรูปของยาง

## 5.2 เครื่องทดสอบหาเวลาในการคงรูปของยาง (cure characteristics)

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของยางนั้น แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรก คือ ขั้นตอนเริ่มต้น (induction period) ขั้นที่สอง คือ ขั้นตอนเกิดพันธะการเชื่อมขวาง (curing) และ ขั้นที่สาม คือ ขั้นตอนการผ่านจุดที่ยางคงรูปเต็มที่ (reversion or overcure stage) ดังแสดงในภาพ 8



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของยาง

โดย  $ML$  = ค่าแรงบิดต่ำสุด (minimum torque) แสดงถึง ค่าความหนืดก่อนการเชื่อมขวางของยางคอมพาวนด์

$MH$  = ค่าแรงบิดสูงสุด (maximum torque)

$ts1$  = เวลาที่ค่าของแรงบิดเพิ่มขึ้น 1  $dn \cdot m$  (0.1 N) แสดงถึง scorch time

$ts90$  = เวลาที่ค่าของแรงบิดเพิ่มขึ้นถึง  $ML + 0.9(MH - ML)$

## 6. ฉนวนกันความร้อน (thermal insulation)

ฉนวนกันความร้อนคือวัสดุที่สามารถป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง ทั้งนี้การถ่ายเทความร้อนเกิดจากความแตกต่างทางอุณหภูมิของสองด้าน โดยการถ่ายเทความร้อนนั้น แบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ ประเภทแรกคือ การนำความร้อน (heat conduction) เกิดจากเฟสของแข็งที่สามารถนำความร้อนโดยการเคลื่อนที่ของอะตอมและอิเล็กตรอนอิสระ คล้ายกับการทำหน้าที่การนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอน ประเภทที่สองคือ การพาความร้อน (heat convection) มักเกิดในสภาวะของเหลว หรือแก๊ส (ของไหล) โดยการสั่นระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อน และประเภทสุดท้าย คือ การแผ่รังสี

(thermal radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อน โดยไม่อาศัยตัวกลาง ยกตัวอย่างเช่น การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ เป็นต้น

โดยกลไกสำคัญที่เกิดขึ้นในฉนวนความร้อนคือ การยับยั้งการนำและการพาความร้อน ซึ่งการนำความร้อนนั้นสามารถยับยั้งได้โดย การเลือกวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ส่วนการพาความร้อนนั้นสามารถป้องกันได้โดย การทำให้อากาศไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (ทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กภายใน) ซึ่งการทำอากาศไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ นั้น จะทำให้สภาพการนำความร้อนต่ำลง

### 6.1 ชนิดของฉนวนความร้อน

ฉนวนความร้อนแบ่งออกเป็น 6 ชนิด โดยแบ่งตามองค์ประกอบของฉนวนความร้อน ได้ดังนี้

#### 6.1.1 ฉนวนชนิดชั้นอากาศหรือฟิล์มอากาศ

เป็นฉนวนที่ถูกประกอบอย่างง่าย ๆ โดยมีพื้นผิวเดียว หรืออาจมีหลายพื้นผิว แต่จะต้องมีอากาศคั่นอยู่ระหว่างชั้นของพื้นผิว และชั้นของอากาศเพื่อป้องกันการนำความร้อนและการพาความร้อน เพื่อให้สภาพการต้านทานความร้อนลดลง



ภาพที่ 9 ฉนวนความร้อนชนิดชั้นอากาศ

#### 6.1.2 ฉนวนแบบเซลล์

ประกอบไปด้วยเซลล์เล็กๆ ที่ติดกับเซลล์อื่นๆ ฉนวนชนิดนี้ อาจผลิตมาจากยาง พลาสติก หรือแก้ว อาจมีรูพรุนประกอบอยู่เป็นจำนวนมากโดยรูพรุนนั้นเกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูป พลาสติกและยาง ปัจจุบัน ฉนวนแบบเซลล์ที่เป็นที่รู้จักในปัจจุบันคือ แอโรเจล (Aerogel) ที่บรรจุรูพรุนอยู่เป็นจำนวนมากและมีรูพรุนที่มีขนาดเล็ก



ภาพที่ 10 ฉนวนความร้อนแบบเซลล์

### 6.1.3 ฉนวนแบบเส้นใย

เป็นฉนวนที่ประกอบด้วย เส้นใยต่างๆ อาทิ เส้นใยแก้ว ใยหิน ใยโลหะ หรือแม้กระทั่งสารอินทรีย์ อย่างเส้นผมและใยพืชต่างๆ ก็ได้ โดยฉนวนชนิดนี้ จะประกอบไปด้วย เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กๆ เป็นจำนวนมาก ประกอบกับวัสดุเนื้อพื้นเช่น พลาสติก หรือ ยางธรรมชาติ



ภาพที่ 11 ฉนวนความร้อนแบบเส้นใย

### 6.1.4 ฉนวนแบบเกล็ด

ฉนวนแบบเกล็ด เป็นฉนวนที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก เข้าไปแทนที่ ช่องว่างอากาศ เช่น เพอร์ไลต์(Perlite) และเวอร์มิคูไลต์(Vermiculite)



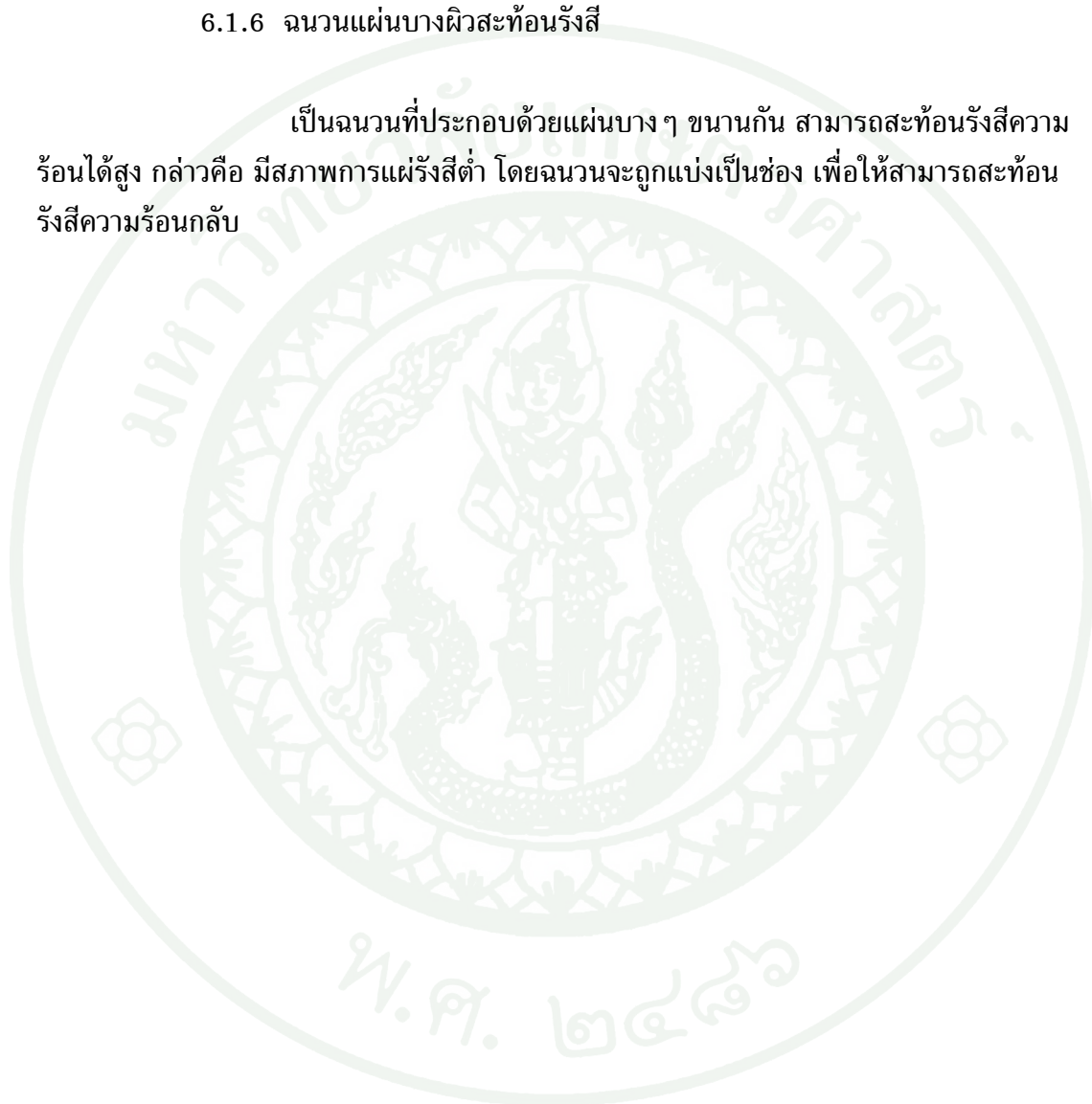
ภาพที่ 12 ฉนวนความร้อนแบบเกล็ด

#### 6.1.5 ฉนวนแบบแกรนูล่า

เกิดจากอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งเป็นโพรงทำให้ช่องว่างสามารถถ่ายเทอากาศซึ่งกันและกันได้ จึงทำให้แตกต่างจากฉนวนแบบเซลล์ ยกตัวอย่างเช่น ฉนวนแคลเซียมซิลิเกต

#### 6.1.6 ฉนวนแผ่นบางผิวสะท้อนรังสี

เป็นฉนวนที่ประกอบด้วยแผ่นบาง ๆ ขนานกัน สามารถสะท้อนรังสีความร้อนได้สูง กล่าวคือ มีสภาพการแผ่รังสีต่ำ โดยฉนวนจะถูกแบ่งเป็นช่อง เพื่อให้สามารถสะท้อนรังสีความร้อนกลับ



## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย
  - 1.1 ยางแท่งมาตรฐานเกรด STR 5L (Standard Thai Rubber 5L)
  - 1.2 ดินขาว (Kaolin,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) บริษัท Compound clay
  - 1.3 อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) บริษัท Ajax Finechem  
ความบริสุทธิ์ 95%
  - 1.4 ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) บริษัท Thai-Lysaght ความบริสุทธิ์  
99.5%
  - 1.5 กรดสเตียริก (Stearic acid,  $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ ) บริษัท GSP Product
  - 1.6 ซัลเฟอร์ (Sulfur, S) บริษัท GSP Product ความบริสุทธิ์ 99.9%
  - 1.7 ไดไทโอบิสเบนโซไทอาโซล (2-2 dithiobisbenzothiazole, MBTS)
  - 1.8 เทตระเมธิลีนไทยูเรมโมโนซัลไฟด์ (tetramethylene thiuram monosulphide,  
TMTM)
  - 1.9 ริงสแตย์แอล (wingstay L, WSL)
  - 1.10 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide,  $\text{TiO}_2$ ) บริษัท Ajax Finechem  
ความบริสุทธิ์ 99.0%
  - 1.11 คลอรีเนตเต็ดพอลิเอทิลีน (Chlorinated Polyethylene, CPE)
  - 1.12 โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Sodium Hydrogen Carbonate,  $\text{NaHCO}_3$ )  
บริษัท Ajax Finechem ความบริสุทธิ์ 99.7%
2. เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย
  - 2.1 เครื่องชั่งน้ำหนักของ METLER-TOLEDO รุ่น PM 30000-Kn
  - 2.2 เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (two roll mill mixer) ของ  
Kodaira seisakusho รุ่น R11-3FF
  - 2.3 เครื่องอัดขึ้นรูปยาง (compression molding) ของ Chaijareem รุ่น 20535
  - 2.4 เตาอบลมร้อน (hot air oven) ของ ESPEC OVEN รุ่น PH-101
  - 2.5 แม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับการคงรูปยาง
  - 2.6 สเปรย์หล่อลื่นแม่พิมพ์
  - 2.7 บีกเกอร์

## 2.8 ตู้เย็น

### 3. เครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ในงานวิจัย

- 3.1 เครื่องทดสอบการคงรูปของยาง (Oscillating Disc Rheometer, ODR) ของ Techpro-rhoe TECH รุ่น 121105
- 3.2 เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) ของ Techpro visTech รุ่น 123103
- 3.3 เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (Laser particle size distribution analyzer) Malvern รุ่น Mastersizer-s
- 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-5410LV
- 3.5 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสาร (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ของ Metler Toledo
- 3.6 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) ของ Metler Toledo
- 3.7 เครื่องวิเคราะห์หัตถุภาคโครงสร้างผลึก (X-Ray Diffractometer, XRD) ของ Philips X'pert
- 3.8 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence, XRF) ของ HORIBA รุ่น XGT-2000W

## วิธีการ

### 1. การเตรียมบดผสมยางคอมพาวนด์

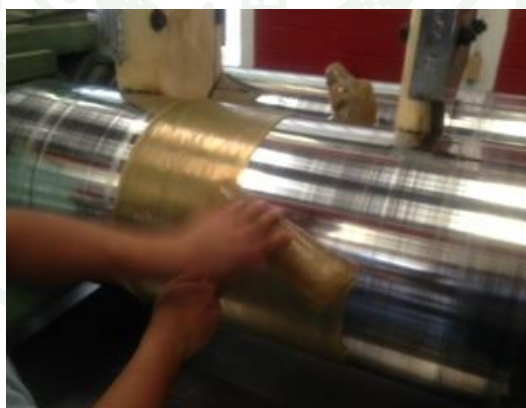
การเตรียมปริมาณสารเคมีที่ใช้สำหรับการบดผสมยางคอมพาวนด์นั้นสามารถเตรียมปริมาณสารเคมีได้ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยการชั่งสารเคมีด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลควรรชั่งด้วยความระมัดระวังเพื่อป้องกันสารเคมีเกิดการฟุ้งกระจาย

การเตรียมยางคอมพาวนด์ เริ่มจากการนำยางแท่งมาตรฐานเกรด STR 5L ดังแสดงในภาพที่ 13 ตัดด้วยเครื่องตัดแรงดันสูงให้มีขนาดเล็กเพื่อป้องกันการสึกกร่อนของเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง และถ่ายต่อการชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำยางที่ชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้วไปบดนึ่ง (mastication) เป็นเวลา 40 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในภาพที่ 14 จากนั้นนำยางที่บดนึ่งเรียบร้อยแล้วผสมสารเคมีชนิดต่างๆ ในปริมาณสารเคมีดังแสดงในตารางที่ 3 โดยเริ่มจาก

การเติมซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก สารเคมีทั้งสองชนิดนี้ ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา (activator) บดผสมเป็นเวลาประมาณ 3 นาที หลังจากนั้นเติมสารตัวเติม (fillers) ซึ่งได้แก่ดินขาว และอลูมินา บดผสมเป็นเวลา 4 นาที จากนั้นเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารให้สี (pigment) บดผสมเป็นเวลา 1 นาที และเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพคือ วิงสเตย์แอล บดผสมเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมไดไทโอ비스เบนโซโทอาโซลทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) บดผสมเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมเทอร์เมทิลไทยูแรมโมโนซิลไฟด์ บดผสมเป็นเวลา 1 นาที โดยทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นเดียวกัน จากนั้นเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต บดผสมเป็นเวลา 1 นาที ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารทำให้เกิดฟอง และซิลเฟอร์บดผสมเป็นเวลา 1 นาที เป็นลำดับสุดท้าย ดังแสดงในภาพที่ 15 ซึ่งยางคอมพาวนด์ที่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน โดยยางคอมพาวนด์ที่บดผสมเสร็จแล้วนั้นจำเป็นต้องวางทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อป้องกันความเค้นตกค้างหลังจากการบดผสมซึ่งมีผลต่อการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ



ภาพที่ 13 ยางแท่งมาตรฐานเกรด STR 5L



ภาพที่ 14 การบดนึ่งยางด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง



ภาพที่ 15 การผสมสารเคมีลงในยางด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง

## 2. การคงรูปยางคอมพาวนด์

ยางคอมพาวนด์ที่ได้จากการบดผสมยางนั้นถูกนำไปวัดความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ และวัดระยะเวลาการคงรูปด้วยเครื่องทดสอบการคงรูปของยาง ดังแสดงในภาพที่ 16 เพื่อหาเวลาในการคงรูปที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งระยะเวลาการคงรูปที่ได้นั้นเป็นตัวกำหนดระยะเวลาการคงรูปของยางคอมพาวนด์ในแต่ละสูตร แต่ในทางปฏิบัตินั้นการคงรูปยางอาจมีระยะเวลาที่ยาวนานกว่าระยะเวลาการคงรูปจากเครื่องทดสอบการคงรูปของยาง เนื่องจากความหนาของผลิตภัณฑ์ยางทำให้ยางเกิดการสุกตัวช้ากว่าปกติ



ภาพที่ 16 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (ซ้าย) และเครื่องทดสอบการคงรูปของยาง (ขวา)

ตารางที่ 3 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการผสมยางคอมพาวนด์

Components	Formulae (phr)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NR STR 5L	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Zinc oxide	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Sulfur	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
MBTS	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
TMTM	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
WSL	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TiO <sub>2</sub>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
CPE	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaHCO <sub>3</sub>	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Kaolin	-	20	30	40	50	-	-	-	-	-
Alumina	-	-	-	-	-	20	30	40	50	-
Total	139.45	139.45	149.45	159.45	169.45	139.45	149.45	159.45	169.45	119.45

### 3. การวิเคราะห์และทดสอบ

#### 3.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารทำให้เกิดฟองด้วยเครื่อง DSC

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารทำให้เกิดฟองคือโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตด้วยเครื่อง DSC ดังแสดงในภาพที่ 17 โดยชั่งโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตน้ำหนัก 8-12 มิลลิกรัม ใส่ลงในอลูมิเนียมเนียมแพน (aluminium sample pan) ซึ่งเทียบอ้างอิงกับอลูมิเนียมเนียมแพน (aluminium reference pan) พร้อมทั้งปิดผนึก ในช่วงอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถึง 500 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิในการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต



ภาพที่ 17 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารทำให้เกิดฟองด้วยเครื่อง DSC

#### 3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของยางฟองด้วยเครื่อง SEM

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของยางฟองด้วยเครื่อง SEM ดังแสดงในภาพที่ 18 โดยตัดยางฟองขนาดความกว้าง 3 มิลลิเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร และความสูง 3 มิลลิเมตร ซึ่งยางฟองถูกทำให้แห้งด้วยตู้อบความชื้นเพื่อความสะดวกในการเคลือบทองลงบนผิวชิ้นงาน จากนั้นวิเคราะห์ยางฟองขนาดกำลังขยาย 50 เท่า ถึง 5000 เท่า ซึ่งขนาดกำลังขยาย 50 และ 100 เท่า ใช้สำหรับวิเคราะห์ขนาดรูพรุนโดยภาพรวม และขนาดกำลังขยาย 1000 ถึง 5000 เท่า ใช้สำหรับวิเคราะห์การกระจายตัวของสารตัวเติมในยางฟอง โดยภาพที่ได้เป็น

ภาพถ่ายพื้นผิว และภาพตัดขวางซึ่งภาพตัดขวางนั้นสามารถนำมาวิเคราะห์ขนาดของรูพรุน และ ปริมาณของรูพรุนโดยอาศัยโปรแกรม Image Pro Plus 4.5.0.29



ภาพที่ 18 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของยางพองด้วยเครื่อง SEM

### 3.3 การวิเคราะห์วัฏภาคโครงสร้างผลึกของสารตัวเติมในยางพองด้วยเครื่อง XRD

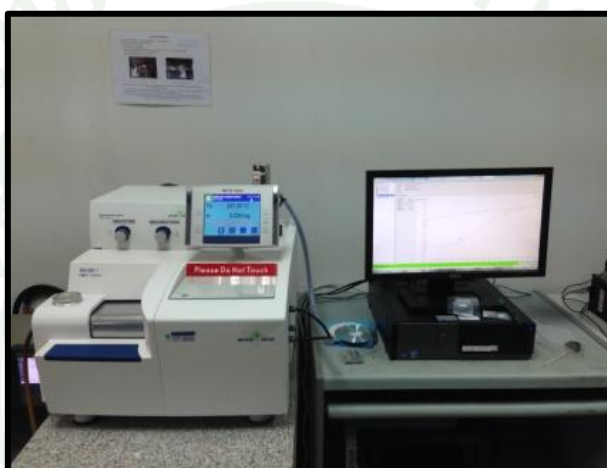
การวิเคราะห์ วัฏภาคโครงสร้างผลึกของสารตัวเติมด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในภาพ ที่ 19 ซึ่งช่วงองศาที่ใช้ในการวิเคราะห์ (  $2\theta$  ) คือ 5 ถึง 80 โดยวิเคราะห์ยางพองที่ไม่เติมสารตัว เติม และยางพองที่เติมสารตัวเติมคือดินขาว และอลูมินา ในปริมาณการเติมสารตัวเติม 50 phr ซึ่งการวิเคราะห์วัฏภาค โครงสร้าง ผลึกนั้นวิเคราะห์จากการเปรียบเทียบกับ ฐานข้อมูลมาตรฐาน รูปแบบการเลี้ยวเบนของแต่ละองค์ประกอบ (JCPDS)



ภาพที่ 19 วัฏภาคผลึกของสารตัวเติมถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

### 3.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวเติมด้วยเครื่อง TGA

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวเติมด้วยเครื่อง TGA ดังแสดงในภาพที่ 20 โดยชั่งสารตัวเติมคือดินขาว และอลูมินาน้ำหนัก 20 มิลลิกรัม ใส่ลงในอลูมิเนียมแพน ซึ่งเทียบอ้างอิงกับอลูมิเนียมแพน จากนั้นนำอลูมิเนียมแพนทั้งสองใส่ลงใน chamber โดยวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถึง 1000 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที ภายใต้บรรยากาศปกติ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับอุณหภูมิ ซึ่งส่งผลต่อการลามไฟดังจะกล่าวในบทถัดไป



ภาพที่ 20 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน

### 3.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวของสารตัวเติมในยางพองด้วยเครื่อง XRF

การวิเคราะห์การกระจายตัวของสารตัวเติมในยางพองด้วยเครื่อง XRF โหมด XRF mapping ดังแสดงในภาพที่ 21 โดยวิเคราะห์สารตัวเติมคือ ดินขาวและอลูมินา ในปริมาณสารตัวเติม 50 phr และผ่านการคงรูปที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส วิเคราะห์การกระจายตัวของสารตัวเติมในยางพองเพื่อหาตำแหน่งของสารตัวเติมที่อยู่ในยางพอง



ภาพที่ 21 เครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของสารตัวเติมด้วยเครื่อง XRF

### 3.6 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมในยางพองด้วยเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของ สารตัวเติมคือ ดินขาวและอลูมินา วัดได้โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของคลื่นแสง (laser diffraction) ดังแสดงในภาพที่ 22 โดยอนุภาคของสารตัวเติมถูกทำให้กระจายตัว โดยอาศัยตัวกลางคือ น้ำ ซึ่งขนาดอนุภาคเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มของแสงที่เกิดการเลี้ยวเบน และขนาดมุมเลี้ยวเบน โดยแปรผกผันกับขนาดอนุภาค ซึ่งอ้างอิงมาจากสมมติฐานของเฟราน์โฮเฟอร์ (fraunhofer approximation)



ภาพที่ 22 เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

### 3.7 การวิเคราะห์การลามไฟของยางฟองด้วย Flammability Tester

การวิเคราะห์การลามไฟของยางฟองโดยวัดอัตราการลามไฟ ตามมาตรฐาน UL 94



ภาพที่ 23 เครื่องวิเคราะห์อัตราการลามไฟ

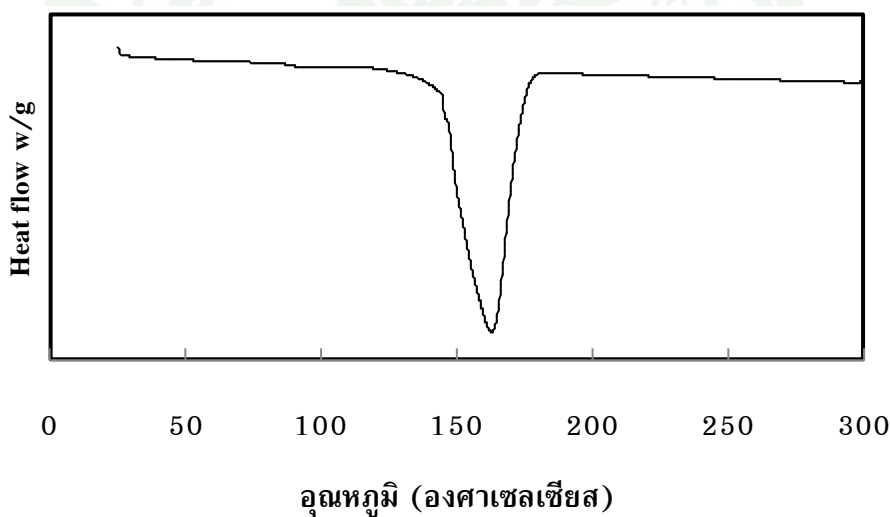
### 3.8 การวิเคราะห์ความเป็นฉนวนความร้อนของยางฟองด้วย Hot Disk Thermal Constant Analyser

การวิเคราะห์ความเป็นฉนวนความร้อนของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมคือ ดินขาว  
อลูมินา ตามมาตรฐาน ISO 22007-2-2008

## ผลและวิจารณ์

### 1. การวิเคราะห์การสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต( $\text{NaHCO}_3$ )

การวิเคราะห์การสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตสามารถวิเคราะห์ได้โดยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสาร (DSC) พบว่าอุณหภูมิการเกิดฟองของสารทำให้เกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต อยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส ถึง 170 องศาเซลเซียส โดยสังเกตได้จากปฏิกิริยาการดูดความร้อน (endothermic reaction) ดังแสดงในภาพที่ 24 ซึ่งช่วงอุณหภูมิการสลายตัวนั้นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Hartman et al., 2013; Patil et al., 2011; Dei et al., 1997) โดยมีกลไกการสลายตัวดังสมการ



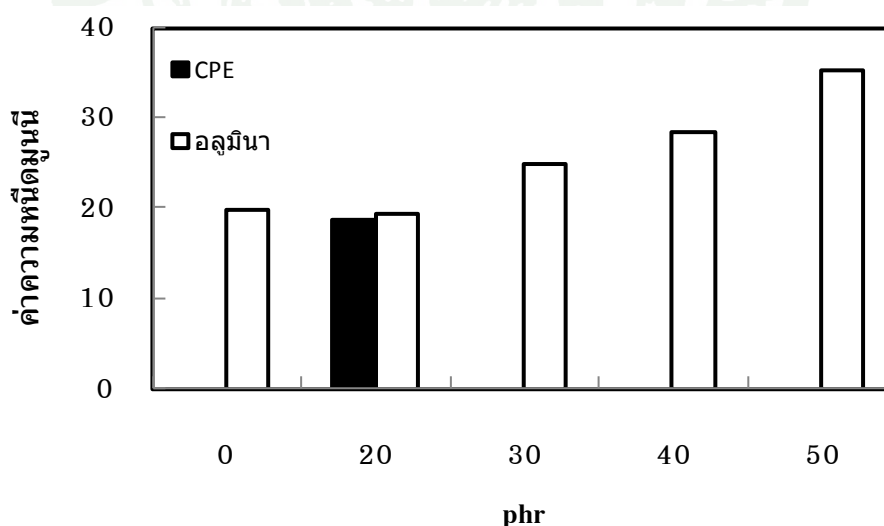
ภาพที่ 24 ภาพลักษณะการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต

ทั้งนี้ปัจจัยการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ยังสามารถเกิดจากการทำปฏิกิริยากับสารเคมีอื่นๆ ได้เช่นเดียวกัน เช่น การทำปฏิกิริยากับน้ำหรือกรดอ่อน กรดอ่อนในที่นี้อาจหมายถึง กรดสเตียริก (stearic acid) และ กรดไขมัน (fatty acid) ที่ประกอบอยู่ในยางคอมพาวนด์ (พงษ์ธร, 2548) ทำให้การสลายตัวของ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต มีความเหมาะสมในช่วงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส (Najib et al., 2009)

## 2. การวิเคราะห์ความเหนียว

ยางคอมพาวนด์ที่ผสมคลอริเนตเต็ดพอลิเอทิลีนในปริมาณ 20 ส่วนในยาง 100 ส่วน โดยน้ำหนักนั้น วิเคราะห์โดยเครื่องวัดความเหนียว (Mooney viscometer) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่า ความเหนียวของยางคอมพาวนด์ที่ผสมคลอริเนตเต็ดพอลิเอทิลีนมีค่าลดลงดังแสดงในภาพ 25 เนื่องจากความเป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) ของคลอริเนตเต็ดพอลิเอทิลีน (Hatthapanit et al., 2009) ทั้งนี้การลดลงของความเหนียวของยางคอมพาวนด์นั้นส่งผลทำให้ขนาดรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยดังแสดงในตารางที่ 4

ยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาในปริมาณ 20 ถึง 50 ส่วนในยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนักนั้น วิเคราะห์โดยเครื่องวัดความเหนียว ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพ 25 พบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมลงในยางคอมพาวนด์มีอิทธิพลต่อความเหนียว (Morton, 1973) แรงบิดสูงสุด (maximum torque, MH) และค่าแรงบิดต่ำสุด (minimum torque, ML) ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความแข็งแรงของอลูมินา อันตรกิริยา (interaction) กับเนื้อยาง (Mohamad et al., 2008) ส่งผลให้ความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างสารตัวเติมและเนื้อยางเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เป็นเช่นเดียวกับสารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตทั่วไป (Varghese et al., 2003) ซึ่งส่งผลต่อสมบัติการไหลและความเหนียวของยางคอมพาวนด์



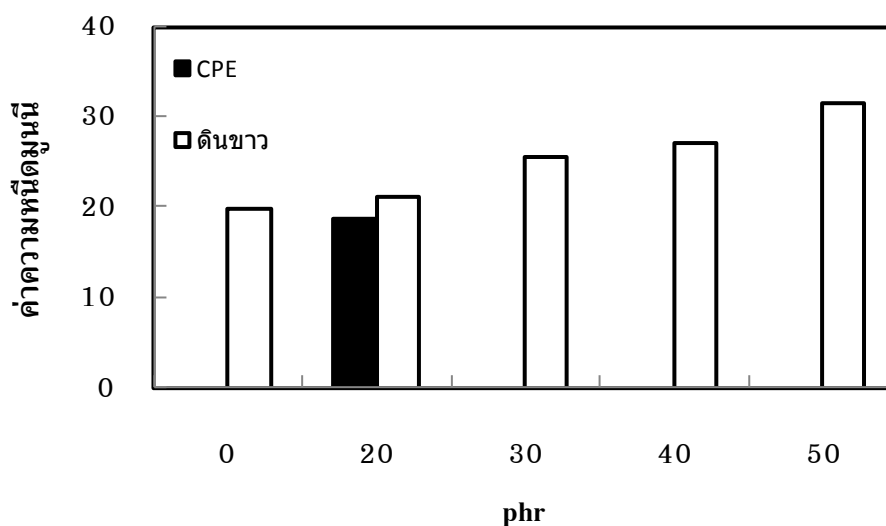
ภาพที่ 25 ความเหนียวของยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาและสารหน่วงไฟคลอริเนตเต็ดพอลิเอทิลีน

ความเหนียวของคอมพาวนด์ที่ผสมสารหน่วงไฟคลอลิเนทเต็ดพอลิเอทิลีนในปริมาณ 20 ส่วนในยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนักและค่าความเหนียวของยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาในปริมาณ 20 ถึง 50 ส่วนในยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนักนั้น ยังส่งผลต่อขนาดรูพรุน โดยค่าความเหนียวของยางคอมพาวนด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง (Zhang *et al.*, 2010) ในกรณีของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาในปริมาณ 20 ถึง 50 ส่วนในยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนักมีขนาดรูพรุน อยู่ในช่วง 0.0293 ถึง 0.0663 ตารางมิลลิเมตรและขนาดรูพรุนของยางฟองที่ผสมสารหน่วงไฟคลอลิเนทเต็ดพอลิเอทิลีนในปริมาณ 20 ส่วนในยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก มีขนาด 0.0848 ตารางมิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตารางแสดงขนาดรูพรุนยางฟองไม่ผสมสารตัวเติม ยางฟองผสมสารหน่วงไฟ CPE และยางฟองผสมสารตัวเติมอลูมินา

ตัวอย่าง	ขนาดรูพรุน mm <sup>2</sup>
Non-filled	0.0663
CPE 20 phr	0.0848
อลูมินา 20 phr	0.0627
อลูมินา 30 phr	0.0380
อลูมินา 40 phr	0.0326
อลูมินา 50 phr	0.0293

ยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมดินขาวในปริมาณ 20-50 ส่วนในยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนักนั้น วิเคราะห์โดยเครื่องวัดความเหนียวที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพ 26 พบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมลงในยางคอมพาวนด์มีอิทธิพลต่อความเหนียว (Morton, 1973) แรงบิดสูงสุด (maximum torque, MH) และค่าแรงบิดต่ำสุด (minimum torque, ML) ที่เพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงของความเหนียว ค่าแรงบิดสูงสุด และค่าแรงบิดต่ำสุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมอลูมินานั้นยังน้อยกว่ายางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา เพราะเหตุว่าดินขาวจัดอยู่ในกลุ่มสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง (non-reinforcing filler) มีอันตรกิริยา (interaction) กับเนื้อยางน้อย แต่จะช่วยเพิ่มเนื้อของผลิตภัณฑ์ ลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มความแข็งแรงได้



ภาพที่ 26 ความหนืดมูลนึ่งของยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมดินขาวและสารหน่วงไฟ คลอไลเนทเต็ดพอลิเอทิลีน

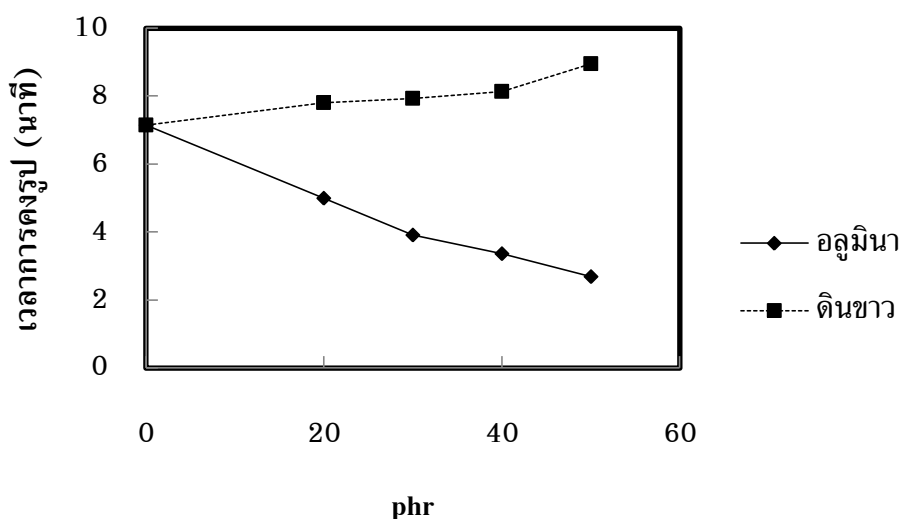
ค่าความหนืด มูลนึ่งของ ยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมดินขาวในปริมาณ 20 ถึง 50 ส่วนในยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนักนั้น ยังส่งผลต่อขนาดรูพรุนเช่นเดียวกับสารตัวเติมอลูมินา โดยค่าความหนืดมูลนึ่งของยางคอมพาวนด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงอยู่ในช่วง 0.0340 ถึง 0.0649 ตารางมิลลิเมตร (Zhang *et al.*, 2010) ดังแสดงในตารางที่ 5 แต่ขนาดของรูพรุนของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาวมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของยางที่ผสมอลูมินาซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 5 ตารางแสดงขนาดรูพรุนยางฟองผสมสารตัวเติมดินขาว

ตัวอย่าง	ขนาดรูพรุน mm <sup>2</sup>
ดินขาว 20 phr	0.0649
ดินขาว 30 phr	0.0531
ดินขาว 40 phr	0.0550
ดินขาว 50 phr	0.0340

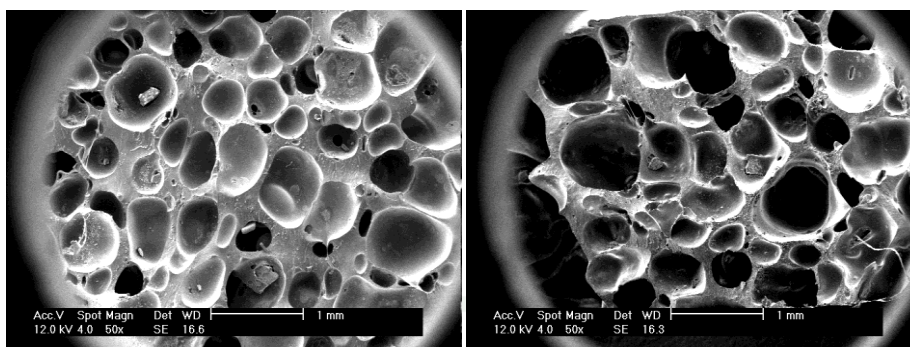
### 3. การวิเคราะห์เวลาการคงรูป

ระยะเวลาในการคงรูปของยางที่ผสมสารตัวเติมอลูมินานั้น วิเคราะห์โดย เครื่องทดสอบ การคงรูปของยางเพื่อหาเวลาการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา ยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมอลูมินามีระยะเวลาการคงรูปที่สั้นลงโดยแปรผกผันกับปริมาณการเติมสารตัวเติมอลูมินา โดยระยะเวลาการคงรูปนั้นอยู่ในช่วง 2.69 ถึง 7.15 นาที ซึ่งสอดคล้องกับค่าการนำความร้อนของอลูมินามีค่าสูงทำให้การแพร่กระจายของความร้อนในยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาเกิดขึ้นได้ดี (Zhang et al., 2010) ซึ่งแตกต่างจากยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมดินขาว โดยยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมดินขาวมีระยะเวลาการคงรูปที่ช้าลงแปรผันโดยตรงกับปริมาณการเติมสารตัวเติมดินขาวทั้งนี้เพราะเหตุว่าดินขาวนั้นมีองค์ประกอบของซิลิกา (silica) อยู่ในโครงสร้างมากถึงร้อยละ 48.75 ซึ่งหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ของซิลิกาคือ หมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) หมู่ไฮดรอกซิลนั้นจะไปจับกับสารกระตุ้น (activator) ทำให้เวลาการคงรูปยาวนานขึ้นอยู่ในช่วง 7.15 ถึง 8.95 นาที (Leblanc, 2002) ดังแสดงในภาพที่ 27

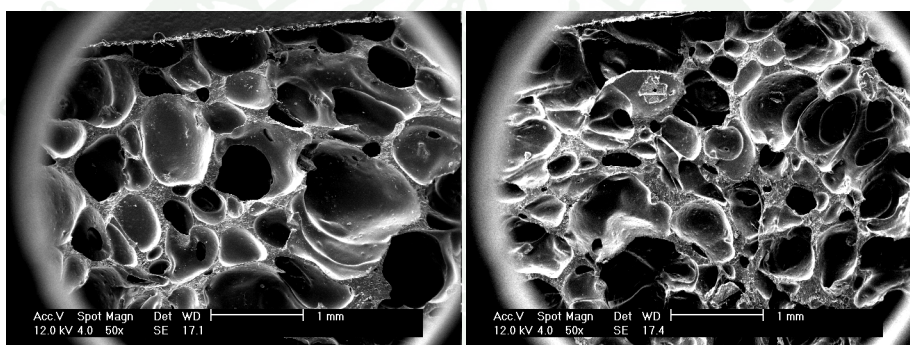


ภาพที่ 27 เวลาการคงรูปยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาและดินขาว

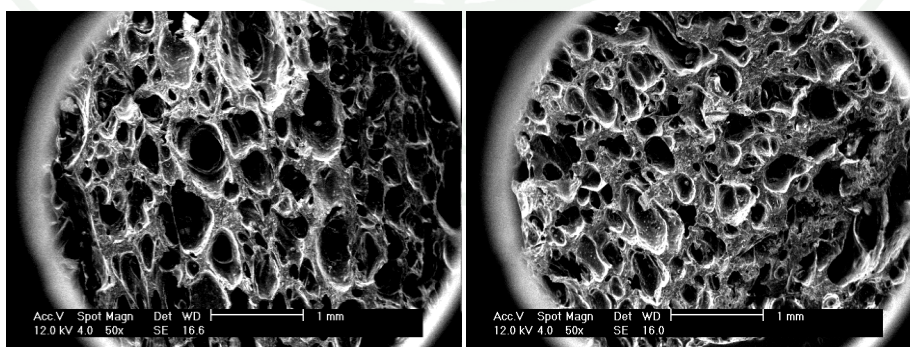
ทั้งนี้จากผลในหัวข้อที่ 2 และ 3 ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นพบว่า ขนาดของรูพรุนของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินานั้นมีขนาดที่เล็กกว่ายางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาวทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าความหนืดมูนีและค่าเวลาการคงรูป ทั้งนี้รูพรุนที่วิเคราะห์นั้นได้มาจากภาพถ่าย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 50 เท่า ดังแสดงในภาพ 28 ถึง 32 และตารางที่ 6



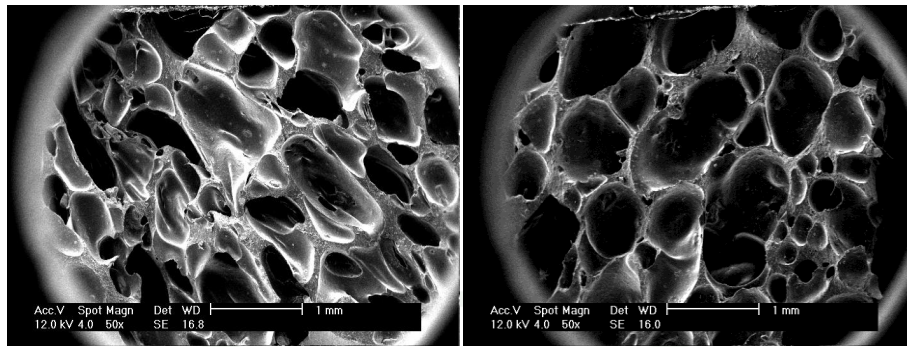
**ภาพที่ 28** ภาพตัดขวางของยางฟองจากกลีอง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า ยางฟองไม่ผสมสารตัวเติม (ซ้าย) และยางฟองที่ผสมสารท่อนวไฟ คอลลีเนตเต็ดพอลิเอทิลีน (ขวา)



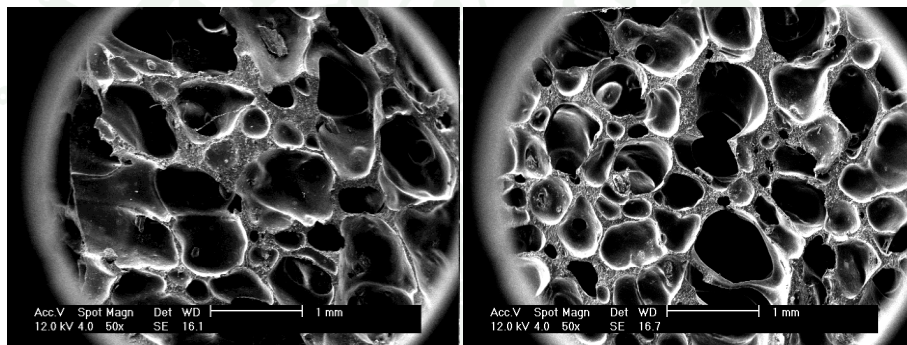
**ภาพที่ 29** ภาพตัดขวางของยางฟองจากกลีอง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า ยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 20 phr (ซ้าย) และยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 30 phr (ขวา)



**ภาพที่ 30** ภาพตัดขวางของยางฟองจากกลีอง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า ยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 40 phr (ซ้าย) และยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 50 phr (ขวา)



ภาพที่ 31 ภาพตัดขวางของยางฟองจากกลีง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า ยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 20 phr (ซ้าย) และยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 30 phr (ขวา)



ภาพที่ 32 ภาพตัดขวางของยางฟองจากกลีง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 50 เท่า ยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 40 phr (ซ้าย) และยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 50 phr (ขวา)

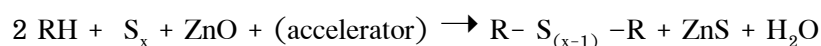
ตารางที่ 6 ตารางแสดงขนาดรูพรุนและความพรุนตัวของยางฟอง

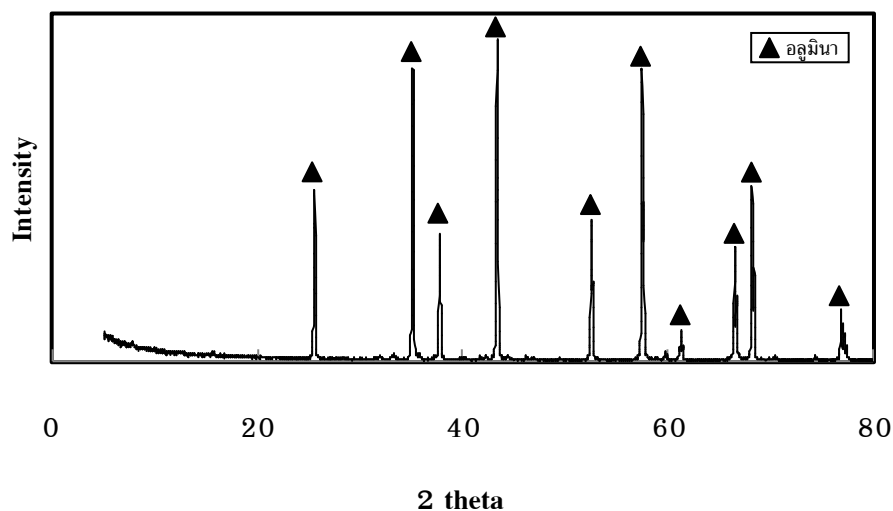
ตัวอย่าง	ขนาดรูพรุน mm <sup>2</sup>	%รูพรุน
Non-filled	0.0663	70.467
CPE 20 phr	0.0848	70.605
อลูมินา 20 phr	0.0627	65.217
อลูมินา 30 phr	0.0380	65.671
อลูมินา 40 phr	0.0326	64.760
อลูมินา 50 phr	0.0293	61.698
ดินขาว 20 phr	0.0649	68.360
ดินขาว 30 phr	0.0531	71.308
ดินขาว 40 phr	0.0550	70.033
ดินขาว 50 phr	0.0340	64.867

#### 4. การวิเคราะห์วัฏภาคผลึกของสารตัวเติม

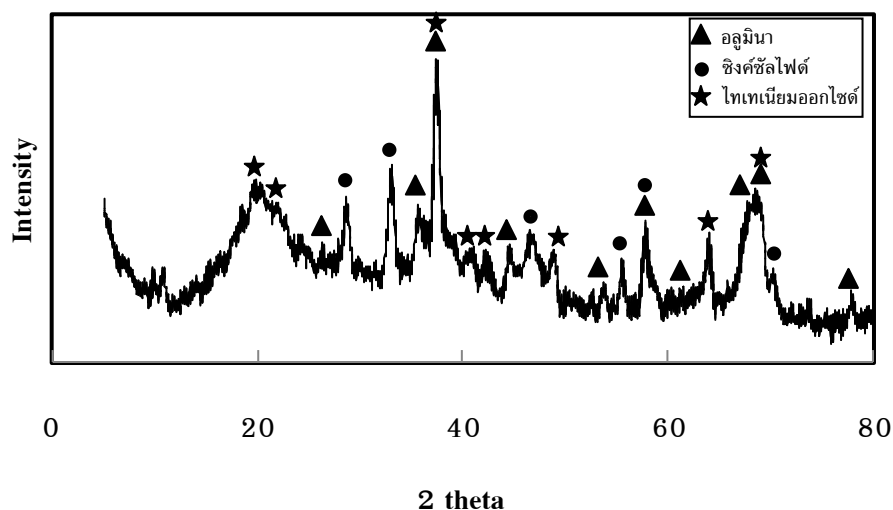
##### 4.1 การวิเคราะห์วัฏภาคผลึกของสารตัวเติมอลูมินา

วัฏภาคผลึกของสารตัวเติมอลูมินาวิเคราะห์โดย เครื่องวิเคราะห์วัฏภาคโครงสร้างผลึก(XRD) ตั้งแต่ 5 องศาจนถึง 80 องศาเพื่อดูโครงสร้างผลึกของสารตัวเติมอลูมินาบริสุทธิ์ (ก่อนการขึ้นรูปยางฟอง) และ สารตัวเติมอลูมินาหลังการขึ้นรูปยางฟอง ดังแสดงในภาพที่ 33 และภาพที่ 34 พบว่าพีคที่ได้ตรงกับเลข JCPDF 88-0826 ทั้งพีคของสารตัวเติมอลูมินาบริสุทธิ์ และสารตัวเติม อลูมินาหลังการขึ้นรูปยางฟอง แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารตัวเติมอะลูมินา นอกจากนั้นในยางฟองยังพบพีคของไทเทเนียมออกไซด์และซิงค์ซัลไฟด์ โดยซิงค์ซัลไฟด์เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ Mold fouling ที่เกิดขึ้นจากแม่พิมพ์การอัดขึ้นรูป ซึ่งจะเกิดได้ตั้งสมการ





ภาพที่ 33 ผลการวิเคราะห์ XRD ของสารตัวเติมอลูมินา

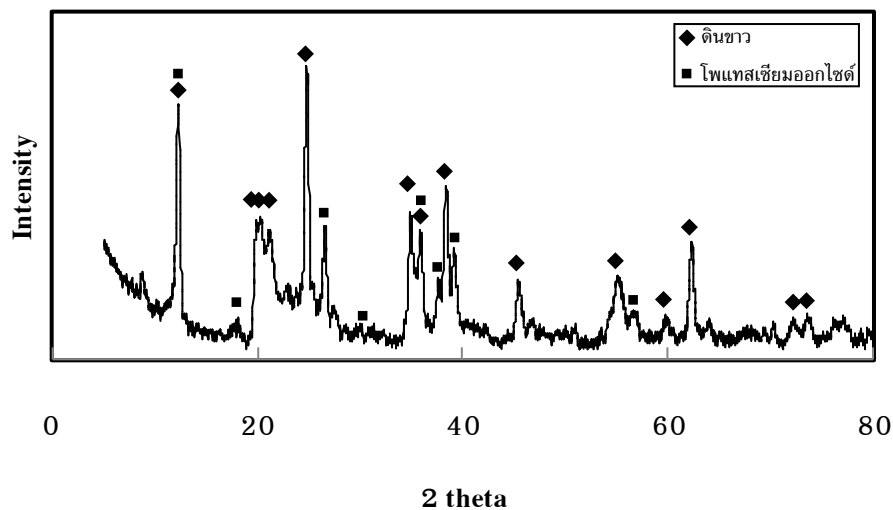


ภาพที่ 34 ผลการวิเคราะห์ XRD ของยางพองผสมสารตัวเติมอลูมินา

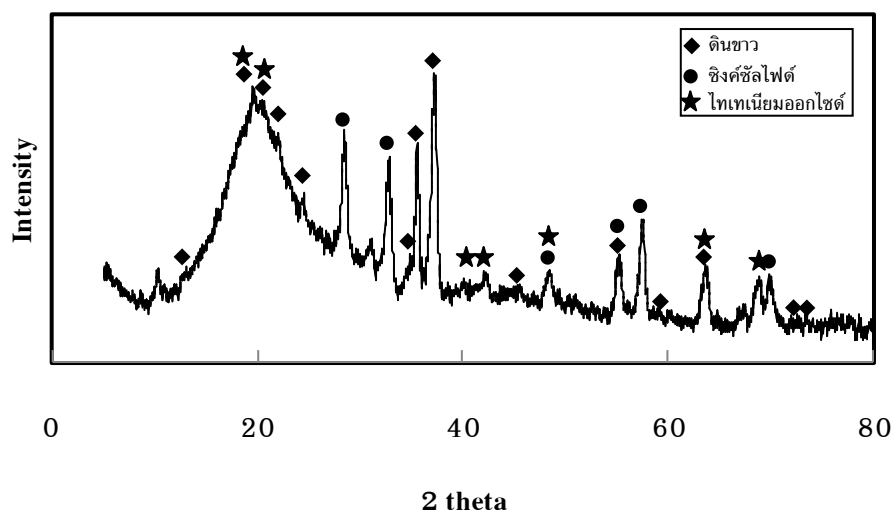
#### 4.2 การวิเคราะห์วัฏภาคผลึกของสารตัวเติมดินขาว

วัฏภาคผลึกของสารตัวเติมดินขาววิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์วัฏภาคโครงสร้างผลึก (XRD) ตั้งแต่ 5 องศาจนถึง 80 องศาเพื่อดูโครงสร้างผลึกของสารตัวเติมดินขาวบริสุทธิ์ (ก่อนการขึ้นรูปยางพอง) และ สารตัวเติมดินขาวหลังการขึ้นรูปยางพอง ดังแสดงในภาพที่ 35 และภาพที่ 36 พบว่าพีคที่ได้ตรงกับเลข JCPDF 01-0527 ทั้งพีคของสารตัวเติมดินขาวและสาร

ตัวเต็มดินขาวหลังการขึ้นรูปยางฟอง แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารตัวเต็มดินขาว โดยพีคของสารตัวเต็มดินขาวนั้น พบว่ามีส่วนประกอบของโพแทสเซียมออกไซด์ด้วย นอกจากนี้ในยางฟองยังพบพีคของไทเทเนียมออกไซด์และซิงค์ซัลไฟด์ดังกล่าวในข้อ 4.1



ภาพที่ 35 ผลการวิเคราะห์ XRD ของสารตัวเต็มดินขาว

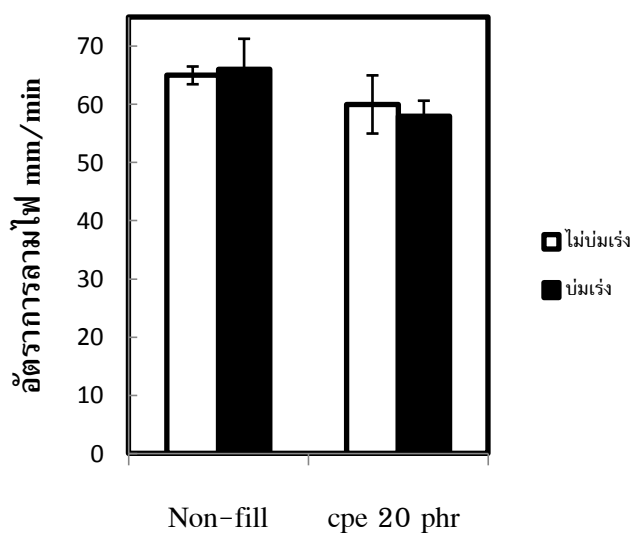


ภาพที่ 36 ผลการวิเคราะห์ XRD ของยางฟองผสมสารตัวเต็มอลูมินา

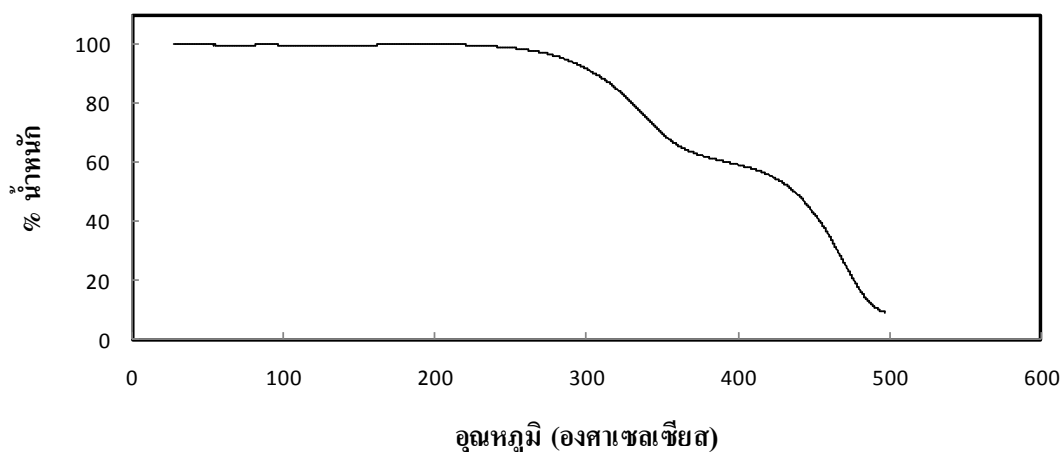
## 5. การวิเคราะห์การลามไฟ

### 5.1 การวิเคราะห์การลามไฟของยางพองไม่ผสมสารตัวเติมและยางพองผสมสารหน่วงไฟคลอไลเนทเต็ดพอลิเอทิลีน

การวิเคราะห์การลามไฟของยางพองไม่ผสมสารตัวเติมและยางพองผสมสารหน่วงไฟคลอไลเนทเต็ดพอลิเอทิลีน วิเคราะห์โดยมาตรฐาน UL 94 เพื่อหาค่าอัตราการลามไฟของยางพองก่อนและหลังการบ่มแรง พบว่า การลามไฟก่อนและหลังการบ่มแรงของยางพองไม่ผสมสารตัวเติมและยางพองผสมสารหน่วงไฟคลอไลเนทเต็ดพอลิเอทิลีน มีค่าไม่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 37 ผลของยางผสมสารหน่วงไฟคลอไลเนทเต็ดพอลิเอทิลีนมีการลามไฟที่น้อยกว่ายางพองไม่ผสมสารตัวเติม ทั้งนี้เนื่องมาจากการสลายตัวของคลอไลเนทเต็ดพอลิเอทิลีนที่ 300 องศาเซลเซียส จากกราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 38 ทำให้เกิดแก๊สซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าอากาศทำให้สามารถปกคลุมทำให้ไฟลามน้อยลงได้ (พงษ์ธร, 2548)



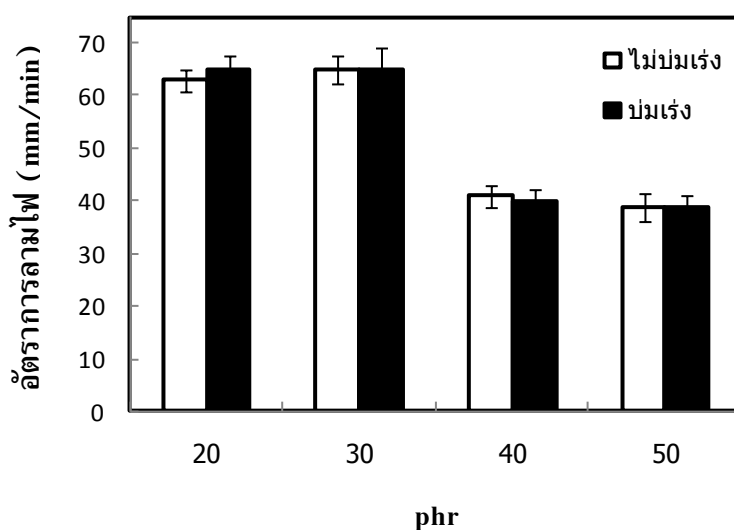
ภาพที่ 37 อัตราการลามไฟของยางพองไม่ผสมสารตัวเติมและยางพองผสมสารหน่วงไฟคลอไลเนทเต็ดพอลิเอทิลีน



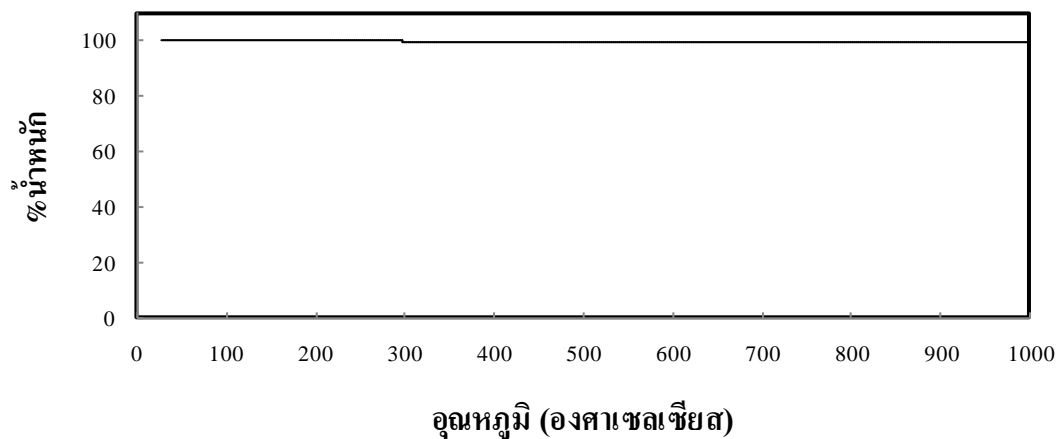
ภาพที่ 38 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารแห้งไฟคลอลิเนทเต็ดพอลิเอทิลีนเทียบกับอุณหภูมิจาก

## 5.2 การวิเคราะห์การลามไฟของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา

อัตราการการลามไฟของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินามีค่าลดลงเมื่อมีการเติมสารตัวเติมอลูมินา 40 ถึง 50 phr ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมอลูมินานั้นสามารถทนความร้อนได้ดีมีจุดหลอมเหลวที่สูง (จิตติ, 2551) จึงทำให้ไม่สลายไปกับเพลิงไหม้ที่เกิดขึ้นดังจะเห็นได้จากรูปการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเทียบกับอุณหภูมิจาก ทั้งนี้การลามไฟของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาทั้งบ่มเร่งและไม่บ่มเร่งมีค่าไม่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 39



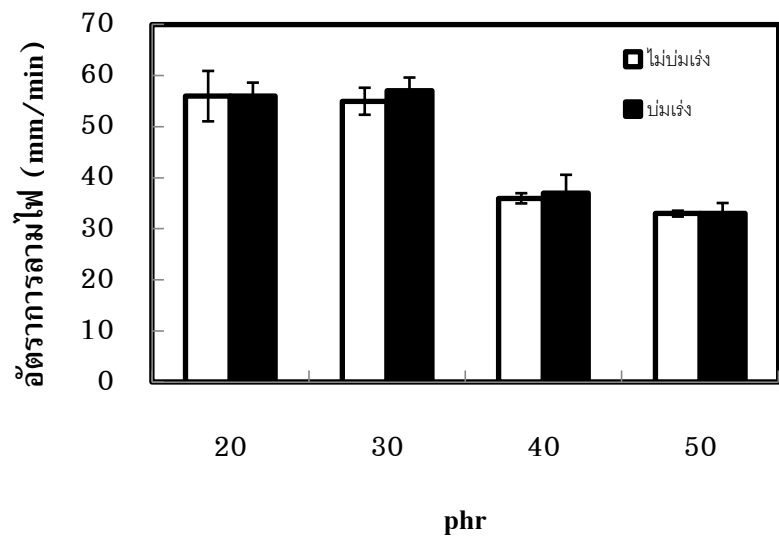
ภาพที่ 39 อัตราการลามไฟของยางฟองผสมอลูมินา



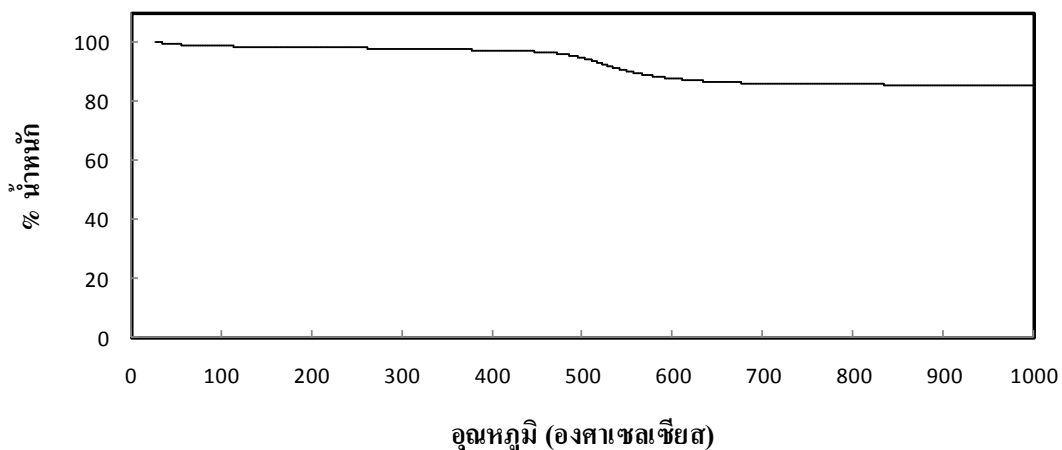
ภาพที่ 40 ผลการวิเคราะห์ TGA ของอลูมินา

### 5.3 การวิเคราะห์การลามไฟของยางพองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว

อัตราการการลามไฟของยางพองที่ผสมสารตัวเติมดินขาวมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมสารตัวเติมอลูมินา 40 ถึง 50 phr เช่นเดียวกับสารตัวเติมอลูมินา ทั้งนี้เนื่องมาจากสารตัวเติมดินขาวนั้นสามารถทนความร้อนได้ดีมีจุดหลอมเหลวที่สูงและ 40 -50 phr นั้นมีสารตัวเติมที่มากจึงเกิดโครงสร้างเครือข่ายของสารตัวเติมได้ง่าย จึงทำให้สามารถลดการลามไฟได้ ทั้งนี้ได้แสดงรูปการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเทียบกับอุณหภูมิ และการลามไฟของยางพองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว ดังแสดงในภาพที่ 41

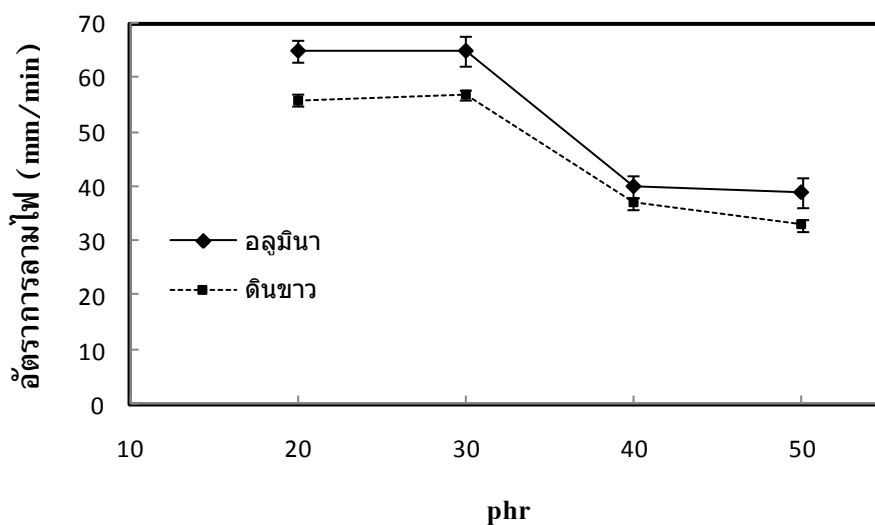


ภาพที่ 41 ภาพอัตราการลามไฟของยางพองผสมสารตัวเติมดินขาว



ภาพที่ 42 ผลการวิเคราะห์ TGA ของดินขาว

จากผลการวิเคราะห์การลามไฟของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาและดินขาวนั้นพบว่า ค่าการลามไฟของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาวนั้นจะมีค่าต่ำกว่าทั้งนี้เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวเติมดินขาวเทียบกับอุณหภูมิ จะเห็นได้ว่าดินขาวนั้นมีการสลายตัวที่ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้น้ำในโครงสร้างดินขาวหลุดออกมา (Demir et al., 2005) จึงช่วยให้การลามไฟของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาวที่ค่าต่ำกว่ายางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา ดังแสดงในภาพที่ 43



ภาพที่ 43 การเปรียบเทียบอัตราการลามไฟระหว่างยางฟองที่ผสมอลูมินาและดินขาว

## 6. ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่การนำความร้อน

จากผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมพบว่ายางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาและดินขาว 50 phr นั้น มีขนาดรูพรุนที่เล็กที่สุด ซึ่งขนาดรูพรุนที่เล็กนั้นทำให้สภาพการนำความร้อนต่ำลง (Lee and Ramesh, 2004) ทั้งยังมีการลามไฟที่ต่ำ ดังนั้น ยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาและดินขาว 50 phr จึงน่าสนใจในการศึกษาเพื่อหาค่าคงที่การนำความร้อน ดังแสดงค่าในตารางที่ 7 ค่าคงที่การนำความร้อนที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า 0.16 W/mK ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุที่มีความเป็นฉนวน

ตารางที่ 7 ตารางแสดงค่าคงที่การนำความร้อน ขนาดรูพรุน และ ความพรุนตัว

ตัวอย่าง	ขนาดรูพรุน		ค่าคงที่การนำ ความร้อน (W/mK)
	(mm <sup>2</sup> )	%รูพรุน	
อลูมินา 50 phr	0.0293	61.698	0.137
ดินขาว 50 phr	0.0340	64.876	0.136

## สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยในการเป็นฉนวนความร้อนของยางพองจากยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาและดินขาวที่ปริมาณสารตัวเติม 20 ถึง 50 ส่วนในยางธรรมชาติ 100 ส่วน โดยวิธีการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ศึกษาถึงปัจจัยของสารตัวเติมต่อความหนืด ระยะเวลาการคงรูป โครงสร้างทางจุลภาค และ ผลการทดสอบการลามไฟ ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมต่อความหนืดมูนิของยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติม พบว่า ปริมาณสารตัวเติมอลูมินาและดินขาวแปรตามความหนืดของชิ้นงานเนื่องมาจากปริมาณสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของอลูมินานั้นสามารถทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับเนื้อยางได้จึงทำให้ความหนืดเพื่อสูงขึ้นมากกว่าสารตัวเติมดินขาว

2. ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมต่อระยะเวลาการคงรูป พบว่ายางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมดินขาวมีระยะเวลาการคงรูปที่สูงขึ้นเมื่อมีปริมาณสารตัวเติมที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากดินขาวมีองค์ประกอบของซิลิกาซึ่งจะดูดซับสารกระตุ้นและสารตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ทำให้การคงรูปใช้เวลานานขึ้น ตรงข้ามกับยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาที่มีผลให้เวลาการคงรูปของยางลดลง เนื่องมาจากสมบัติการนำความร้อนของอลูมินาส่งผลการแพร่ความร้อนในเนื้อยางคอมพาวนด์เกิดได้ดีขึ้น จึงทำให้สามารถลดเวลาการคงรูปได้

3. ผลของอิทธิพลของความหนืดมูนิต่อโครงสร้างทางจุลภาค ปริมาณสารตัวเติมที่เติมเข้าไปนั้นส่งผลต่อค่าความหนืดมูนิโดยตรง ซึ่งปริมาณการเติมสารตัวเติมนั้นแปรผันตรงกับความหนืดมูนิของยางคอมพาวนด์ ไม่เพียงเท่านั้นยังส่งผลต่อขนาดรูพรุนด้วย โดยค่าความหนืดที่มากจะให้ขนาดของรูพรุนเล็กลง ทั้งนี้เนื่องจากรูพรุนขยายตัวเป็นรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นได้ยากขึ้น จึงไม่สามารถเติบโตเป็นรูพรุนใหญ่ได้

4. ผลของการศึกษาเวลาการคงรูปยางต่อโครงสร้างทางจุลภาคนั้น พบว่า ยางพองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาส่งผลให้เวลาการคงรูปลดลง ไม่เพียงเท่านั้นยังส่งผลต่อขนาดของรูพรุนที่เล็กลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเวลาการเติบโตของแก๊สจากสารทำให้เกิดฟองน้อยลงทำให้ฟองที่ได้มีขนาดเล็กกว่า ยางพองที่ผสมสารตัวเติมดินขาวที่มีเวลาการคงรูปที่นานกว่า

5. ผลของการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีผลต่ออัตราการลามไฟ พบว่า ยางพองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินาและยางพองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว ที่ปริมาณ 40 ถึง 50 phr สามารถ

ลดอัตราการลามไฟได้เนื่องจากเครือข่ายของสารตัวเติมมีมากขึ้น ในส่วนของยางพองที่ผสมสารตัวเติมดินขาวนั้นสามารถลดอัตราการลามไฟได้มากกว่า ทั้งนี้เป็นผลมาจากน้ำในโครงสร้างผลึกของดินขาวหลุดออกมาเมื่อเกิดการลุกไหม้จึงช่วยลดอัตราการลามไฟได้

#### ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาค่าความแข็งของชิ้นงานและค่าการคืนตัวของชิ้นงานเพื่อให้สามารถทราบถึงลักษณะการใช้งานว่าสามารถรับแรงได้หรือไม่

ควรใช้วัสดุที่สามารถป้องกันการแผ่รังสีความร้อนได้ เช่น อลูมิเนียมฟอยล์มาประกบยางพองเพื่อเพิ่มเติมประสิทธิภาพของยางพองในการป้องกันการแผ่รังสี

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- จิตติ รินเสนา . 2551. การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น .  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2539. เซรามิก สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- พงษ์ธร แซ่ฮ้อย . 2548. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน . ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ  
แห่งชาติ, ปทุมธานี.
- พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2550. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี.
- เลิศชาย สติตย์พนาวงศ์ และ อภิชาติ กระจำงเฝ้า. 2553. การพัฒนาอิฐทนไฟ จากดินบางปะ  
หัน ดินขาว ทรายและขี้เถ้า เพื่อใช้ทำเตาเผา 1,300 องศาเซลเซียส. รายงาน  
ประชุม 2553 มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา.
- วราภรณ์ ขจรไชยกุล. 2552. ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี. สำนักงาน  
กองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรุงเทพฯ.
- Baarle, B.V. 1997. Processing Aids. *Natuural rubber* 9: 9–10.
- Dei, L. and G.G.T. Guarini. 1997. The Thermal Decomposition of  $\text{NaHCO}_3$  Renewed  
studies by DSC, SEM and FT-IR. *Thermal Analysis* 50: 773–783.
- Demir, H., E. Arkis, D. Balkose and S. Ulku. 2005. Synergistic effect of natural zeolites  
on flame retardant additives. *Polymer Degradation and Stability* 89: 478–483.
- Fred, W.B. 1993. Rubber Compounding: Principles, Material, and  
Techniques. Compounds. 2<sup>nd</sup> ed. Marcel Dekker, New York.

- Hartman, M., K. voboda, M. Pohorely and M. Syc. 2013. Thermal Decomposition of Sodium Hydrogen Carbonate and Textural Features of Its Calcines. **Industrial and Engineering Chemistry** 52(31): 10619–10626.
- Hatthapanit, K., T. Wantana and P. Sae-oui. 2009. Influence of Chlorinated Paraffin on Properties of Silica-Filled CR/NR Blend. **SWU Science Journal** 24(2): 49–64.
- Jame, E. M., B. Erman and R. E. Frederick. 1994. **Science and Technology of Rubber**. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press.
- Keener, T.C. 1983. Thermal Decomposition of Sodium Bicarbonate. **Chemical Engineering Communications** 33: 93–105.
- Leblanc, J.L. 2002. Rubber-filler Interactions and Rheological Properties in Filled Compounds. **Progress in Polymer Science** 27(4): 627–687.
- Mark, J. E., B. Erman and F. R. Eirich. 2005. **Science and Technology of Rubber**. 3<sup>rd</sup> ed. Elsevier Inc., Burlington.
- Mohamad, N., A. Muchtar, M.J. Ghazali, D.Hj. Mohd and C.H. Azhari. 2008. The Effect of Filler on Epoxidised Natural Rubber-Alumina Nanoparticles Composites. **European Journal of Scientific Research** 24(4): 538–547.
- Morton, M. 1973. **Introduction to Rubber Technology**. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Reinhold Publishing.
- Najib, N.N., Z.M. Ariff, N.A. Manan, A.A. Bakar, C.S. Sipaut. 2009. Effect of Blowing Agent Concentration on Cell Morphology and Impact Properties of Natural Rubber Foam. **Physical Science** 20(1): 13–25.

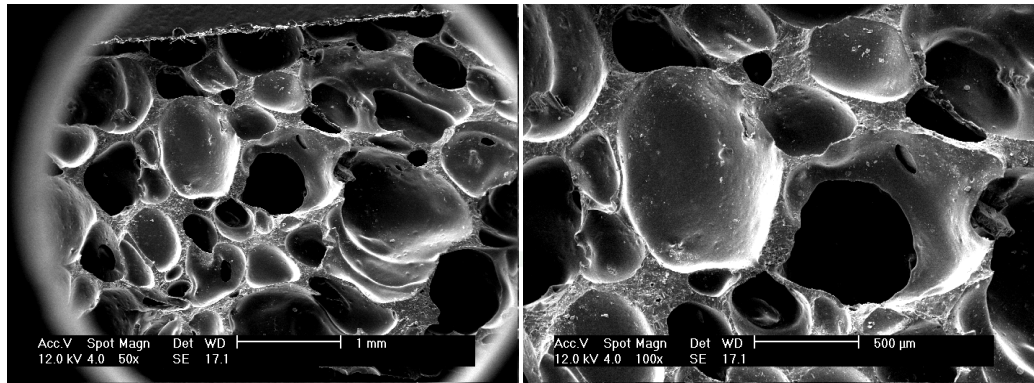
- Patil, M., R. Keny, S. Mandlik, D. Saindane, D. Gaikwad, T. Khade, B. Gavitre, V. Kulkarni, K. Bobe and U. Gaikwad. 2011. Characterization and formulation of solid dispersion of Telmisartan using  $\text{NaHCO}_3$  by Hot Melt method. **Pharmaceutics and Cosmetology** 1(3): 20–33.
- Varghese, S., J. Karger–Kocsis and K.G. Gatos. 2003. Melt compounded Epoxidized Natural Rubber/Layered Silicate Nanocomposites: Structure–Properties Relationships. **Polymer** 44(14): 3977–3983.
- Zhang, B.S., X.F. Lv, Z.X. Zhang, Y. Liu, J.K. Kim and Z.X. Kim. 2010. Effect of carbon black content on microcellular structure and physical properties of chlorinated polyethylene rubber foams. **Materials and Design** 31: 3106–3110.



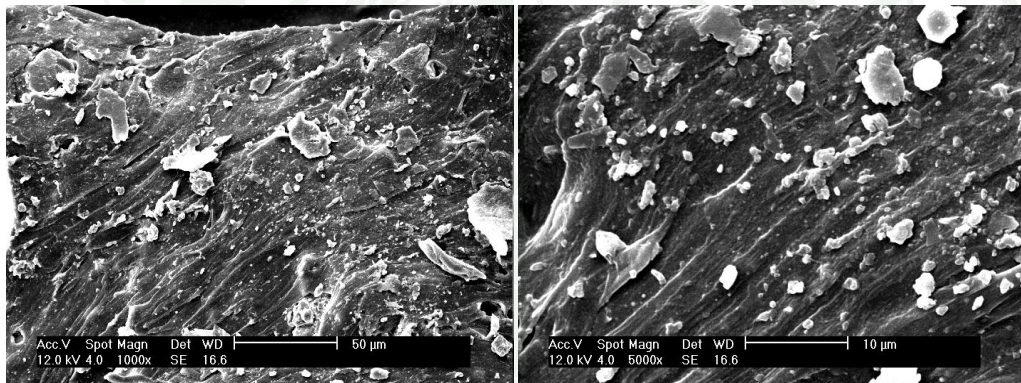
ภาคผนวก



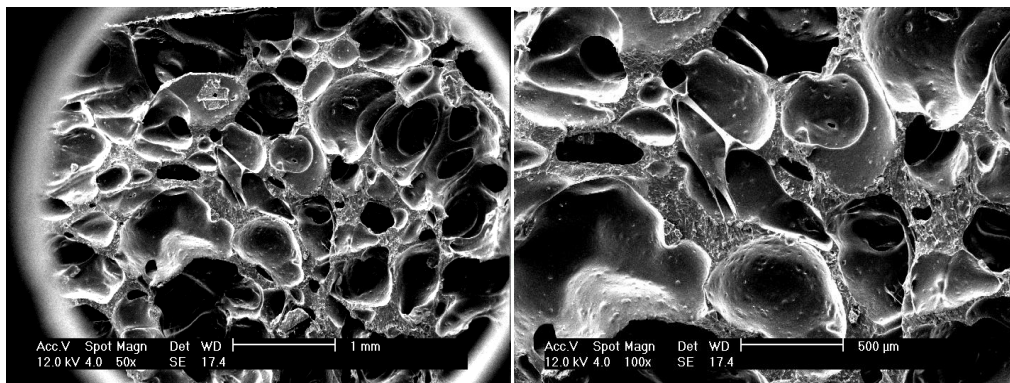
ภาคผนวก ก  
ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



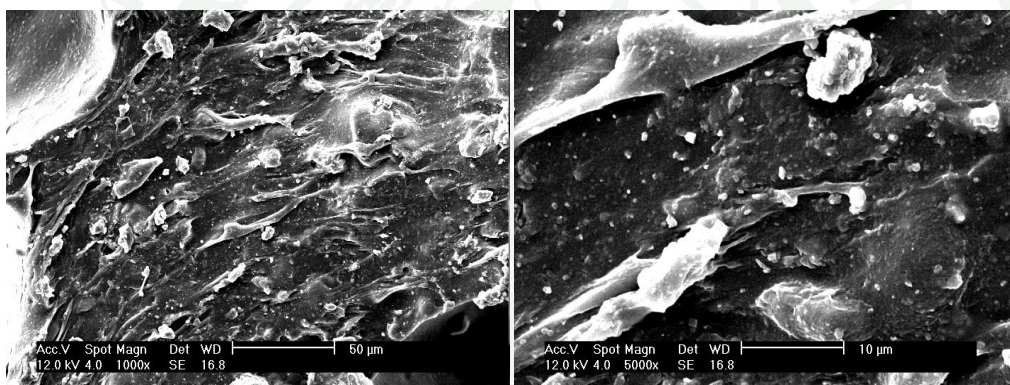
ภาพผนวกที่ ก1 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า (ซ้าย) และ 100 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 20 phr



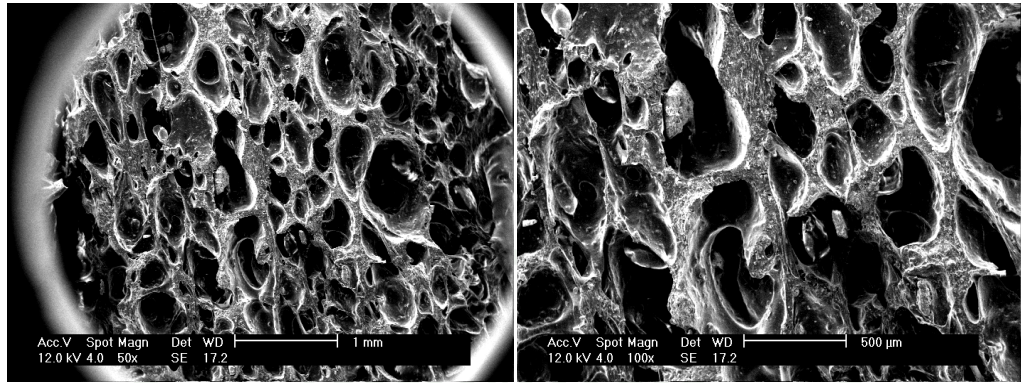
ภาพผนวกที่ ก2 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า (ซ้าย) และ 5000 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 20 phr



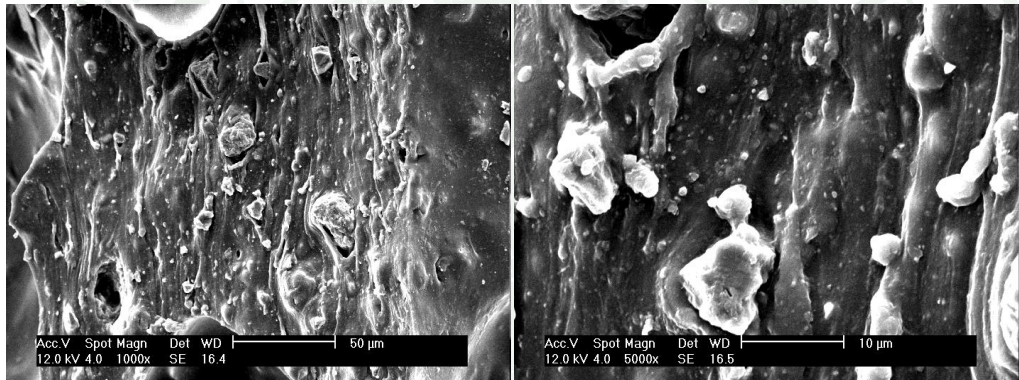
ภาพผนวกที่ ก3 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า (ซ้าย) และ 100 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 30 phr



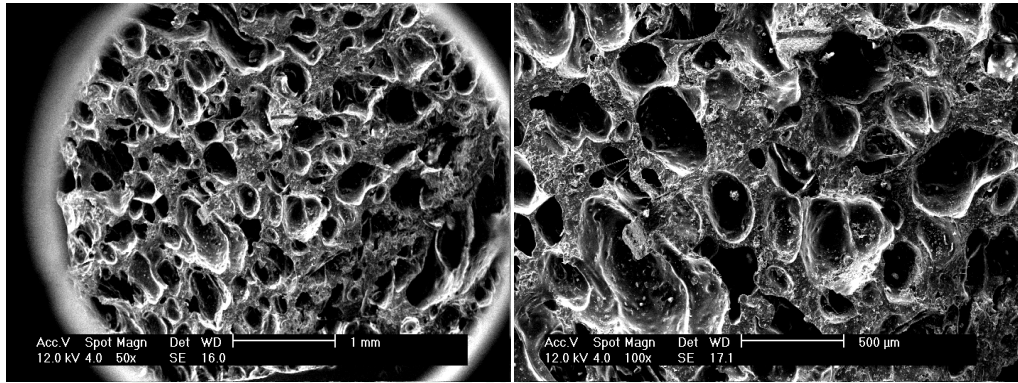
ภาพผนวกที่ ก4 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า (ซ้าย) และ 5000 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 30 phr



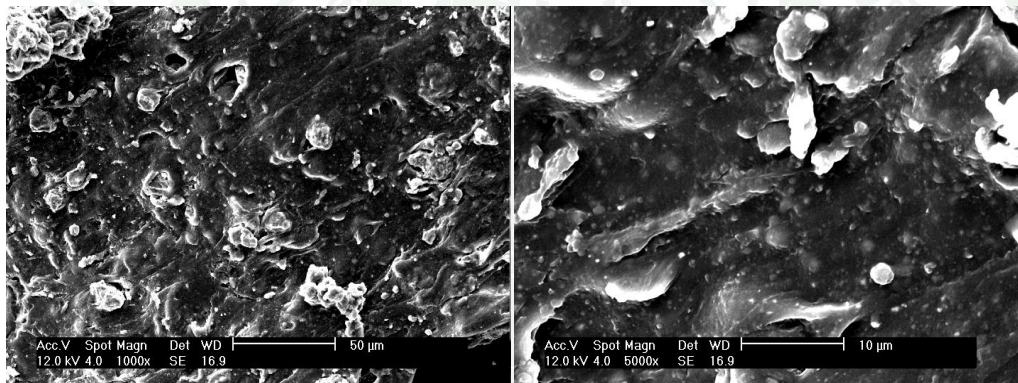
ภาพผนวกที่ ก5 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า (ซ้าย) และ 100 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 40 phr



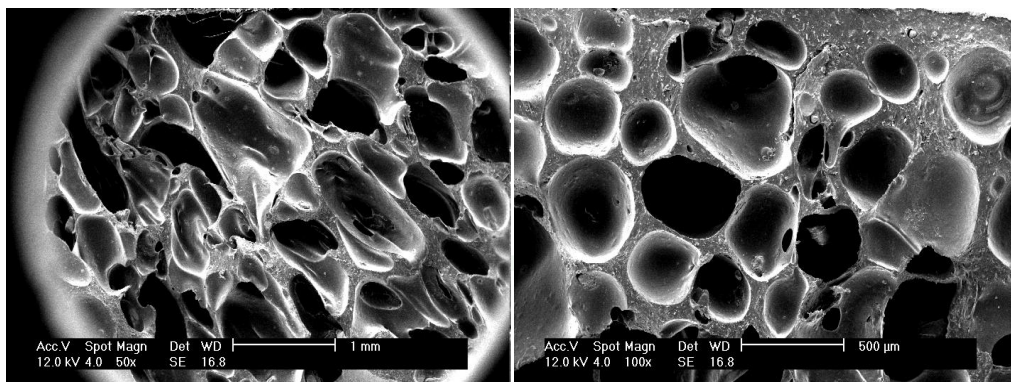
ภาพผนวกที่ ก6 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า (ซ้าย) และ 5000 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 40 phr



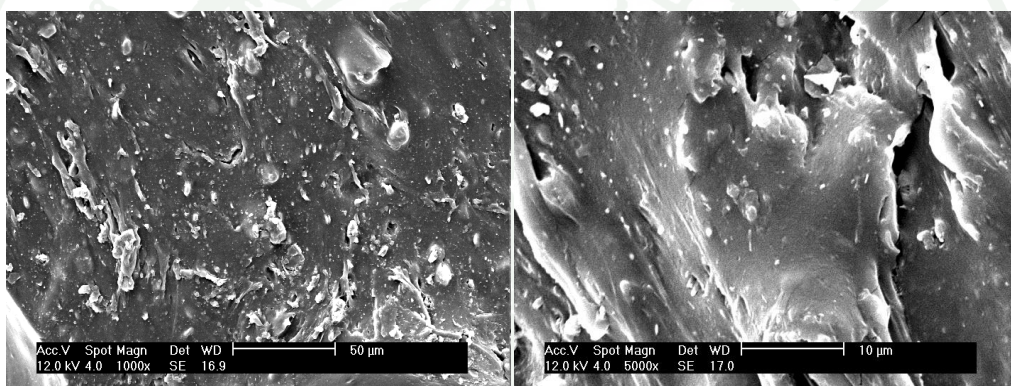
ภาพผนวกที่ ก7 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า (ซ้าย) และ 100 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 50 phr



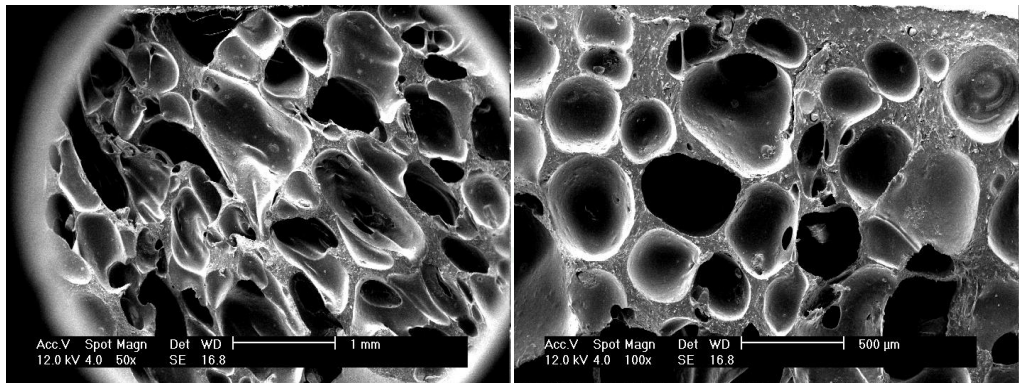
ภาพผนวกที่ ก8 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า (ซ้าย) และ 5000 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา 50 phr



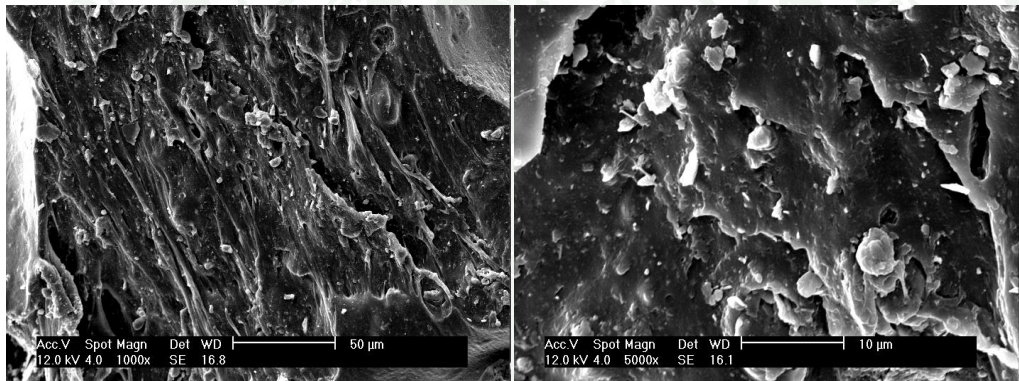
ภาพผนวกที่ ก9 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า (ซ้าย) และ 100 เท่า (ขวา) ของยางพองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 20 phr



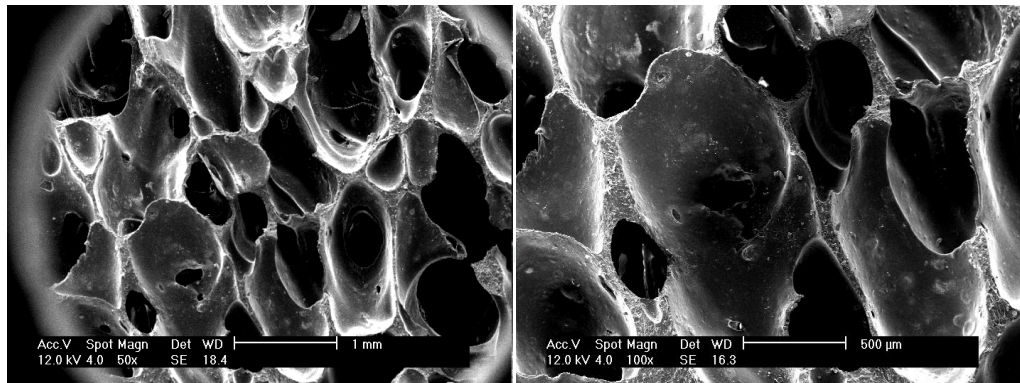
ภาพผนวกที่ ก10 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า(ซ้าย) และ 5000 เท่า(ขวา) ของยางพองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 20 phr



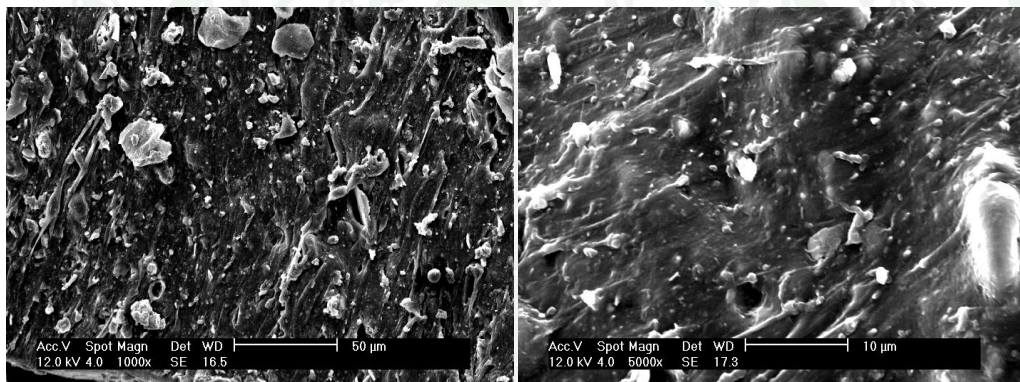
ภาพผนวกที่ ก11 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า (ซ้าย) และ 100 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 30 phr



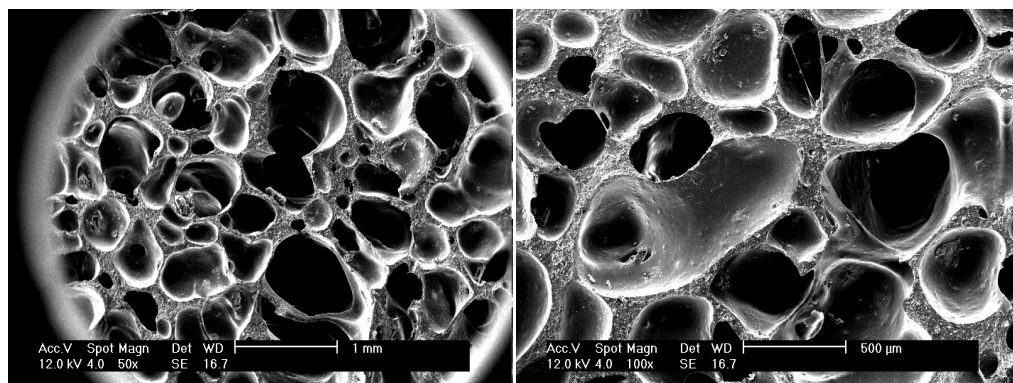
ภาพผนวกที่ ก12 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า (ซ้าย) และ 5000 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 30 phr



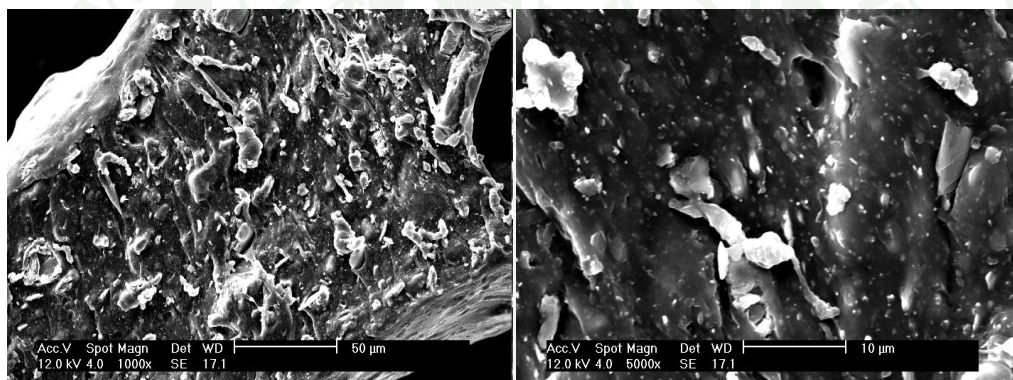
ภาพผนวกที่ ก13 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า (ซ้าย) และ 100 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 40 phr



ภาพผนวกที่ ก14 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า (ซ้าย) และ 5000 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 40 phr



ภาพผนวกที่ ก15 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50 เท่า (ซ้าย) และ 100 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 50 phr



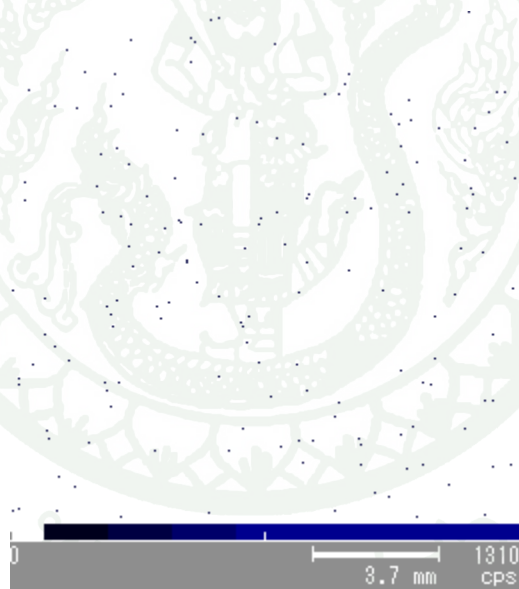
ภาพผนวกที่ ก16 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 1000 เท่า (ซ้าย) และ 5000 เท่า (ขวา) ของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว 50 phr



ภาคผนวก ข  
การวิเคราะห์ XRF โหมด mapping



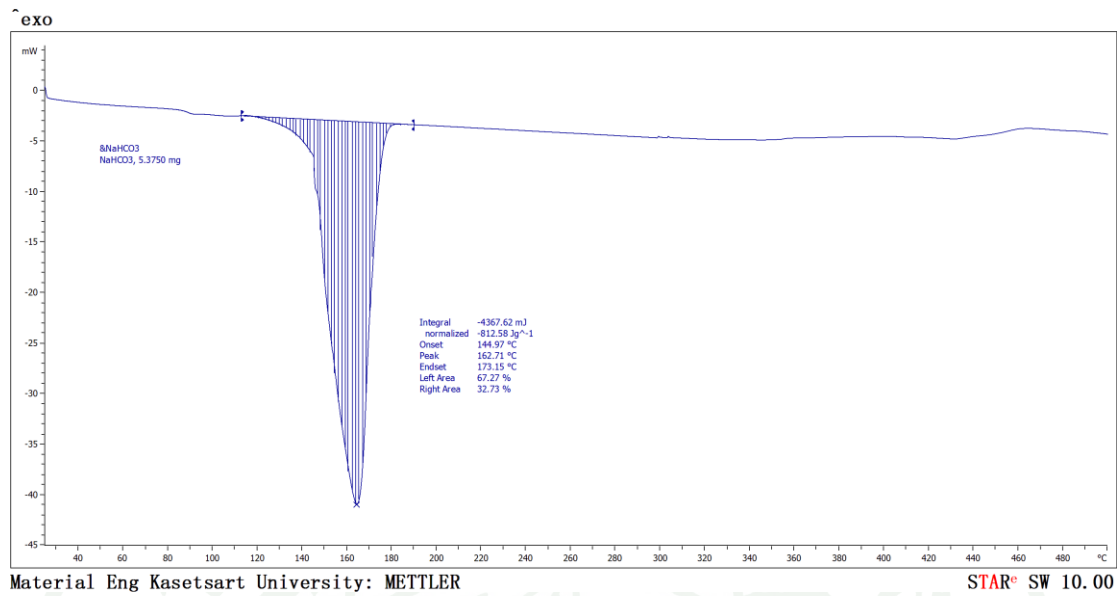
ภาพผนวกที่ ข1 ภาพการกระจายตัวของอลูมินาในยางฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา



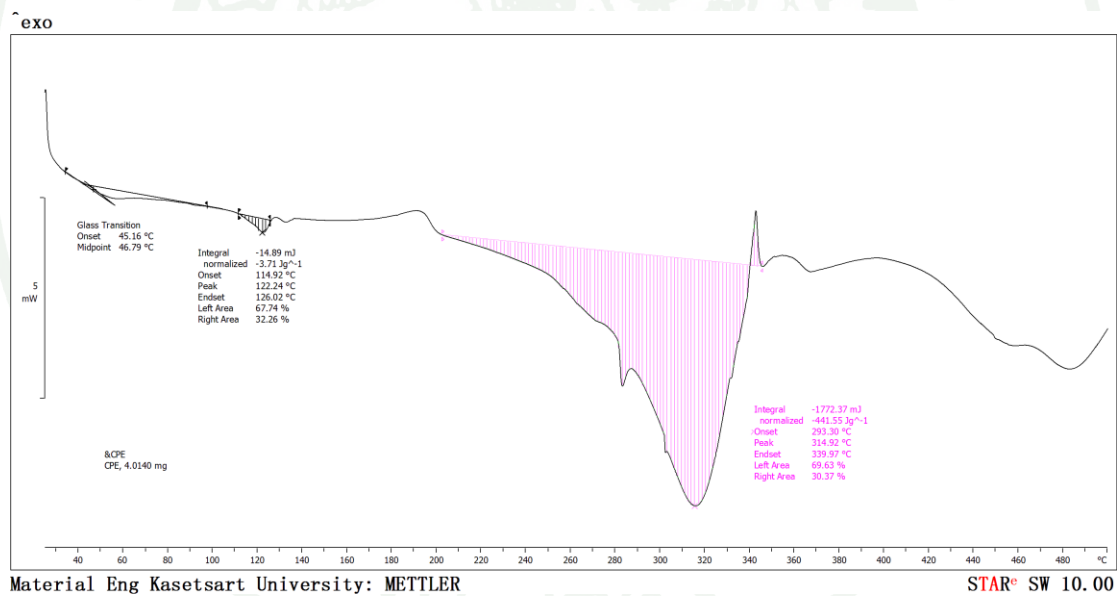
ภาพผนวกที่ ข2 ภาพการกระจายตัวของดินขาวในยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว



ภาคผนวก ค  
วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสาร



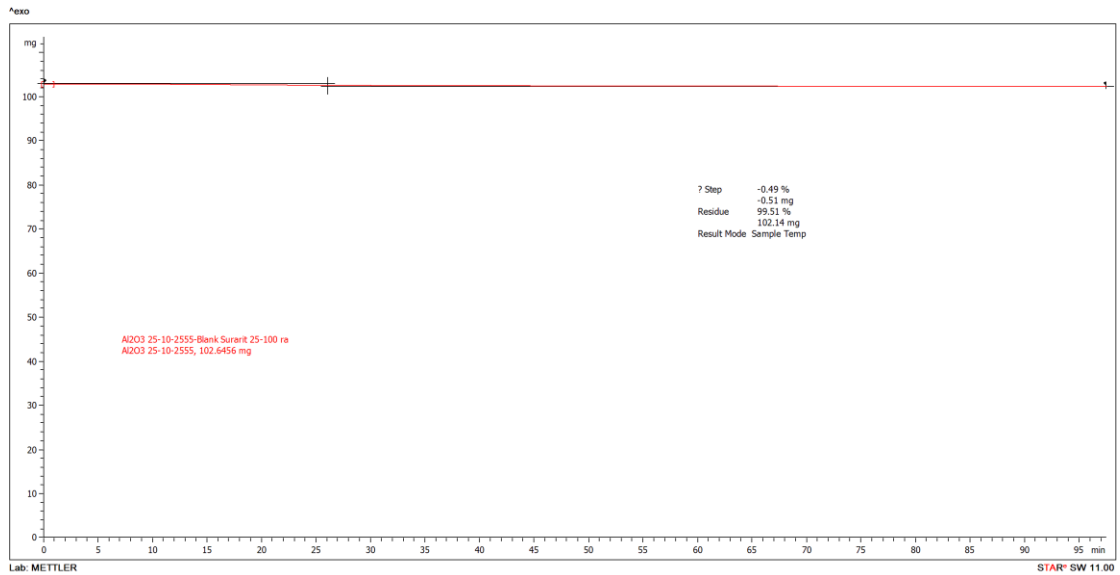
ภาพผนวกที่ ค1 ภาพการสลายตัวของ NaHCO<sub>3</sub>



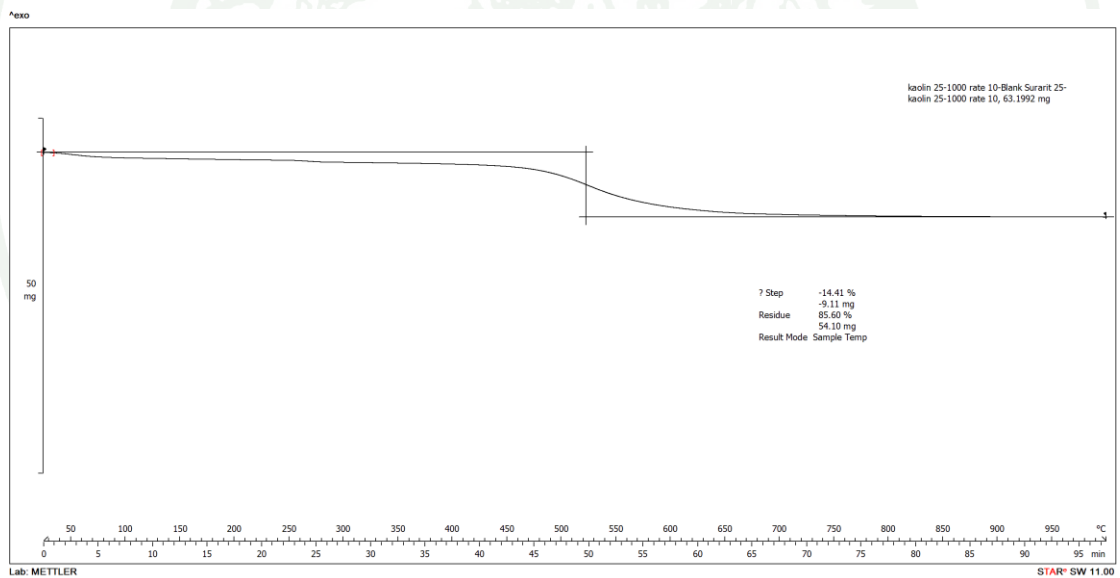
ภาพผนวกที่ ค2 ภาพการสลายตัวของ CPE



ภาคผนวก ง  
ภาพการวิเคราะห์น้ำหนักการเปลี่ยนไปของสารเทียบกับอุณหภูมิ



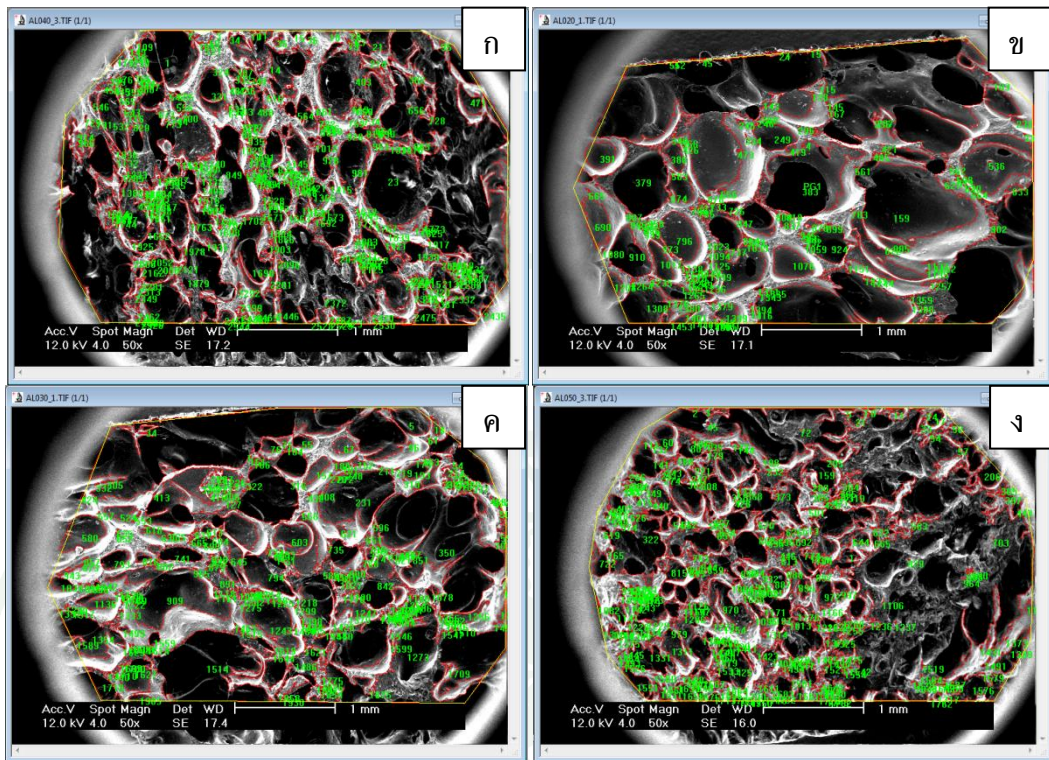
ภาพผนวกที่ 1 ภาพการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของอลูมินาเทียบกับอุณหภูมิ



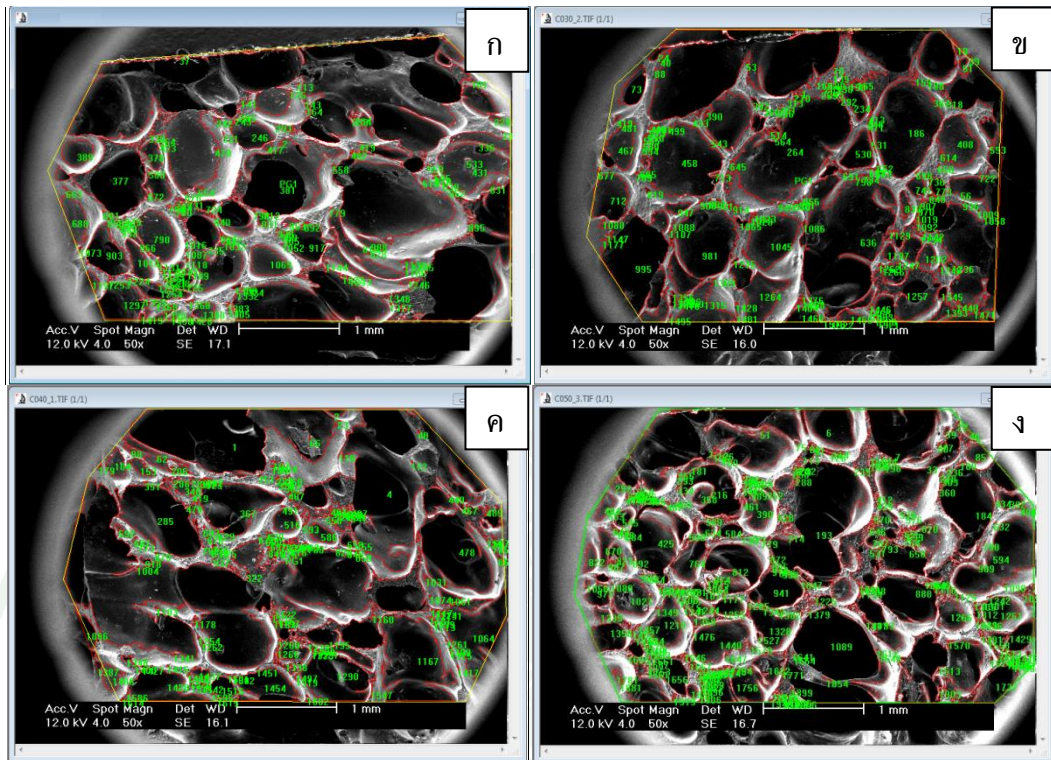
ภาพผนวกที่ 2 ภาพการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของดินขาวเทียบกับอุณหภูมิ



ภาคผนวก จ  
การวิเคราะห์รูปพจนด้วยโปรแกรมอิมเมจโปร



ภาพผนวกที่ ๑1 ภาพการวิเคราะห์รูพรุนของของขงยงฟองที่ผสมสารตัวเติมอลูมินา  
20(ก) 30(ข) 40(ค) และ 50 (ง) phr



ภาพผนวกที่ จ1 ภาพการเคราะห์รูพรุนของของยางฟองที่ผสมสารตัวเติมดินขาว  
20(ก) 30(ข) 40(ค) และ 50 (ง) phr



**Name and formula**

Reference code: 01-088-0826  
 ICSD name: Aluminum Oxide  
 Empirical formula:  $Al_2O_3$   
 Chemical formula:  $Al_2O_3$

**Peak list**

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	2	3.48136	25.567	74.2
2	1	0	4	2.55198	35.137	100.0
3	1	1	0	2.38035	37.763	45.4
4	0	0	6	2.16617	41.661	0.5
5	1	1	3	2.08620	43.337	93.9
6	2	0	2	1.96495	46.161	1.3
7	0	2	4	1.74068	52.531	42.3
8	1	1	6	1.60209	57.477	79.1
9	2	1	1	1.54722	59.717	2.1
10	1	2	2	1.51535	61.105	2.7
11	0	1	8	1.51151	61.277	6.9
12	2	1	4	1.40507	66.491	27.5
13	3	0	0	1.37430	68.181	41.4
14	1	2	5	1.33654	70.387	0.9
15	2	0	8	1.27599	74.269	0.9
16	1	0	10	1.23957	76.841	10.6
17	1	1	9	1.23466	77.202	6.4
18	2	1	7	1.19362	80.384	0.6
19	2	2	0	1.19017	80.664	3.9
20	0	3	6	1.16045	83.180	0.3
21	2	2	3	1.14766	84.318	3.1
22	1	3	1	1.13908	85.102	0.2
23	3	1	2	1.12618	86.313	2.3
24	1	2	8	1.12460	86.464	1.7
25	0	2	10	1.09943	88.956	3.9

**Crystallographic parameters**

Crystal system: Rhombohedral  
 Space group:  $R\bar{3}c$   
 Space group number: 167

a (?): 4.7607  
 b (?): 4.7607  
 c (?): 12.9970  
 Alpha (?): 90.0000  
 Beta (?): 90.0000  
 Gamma (?): 120.0000

Calculated density (g/cm<sup>3</sup>): 3.98  
 Volume of cell (10<sup>6</sup> pm<sup>3</sup>): 255.10  
 Z: 6.00

RIR: 0.87

**Subfiles and Quality**

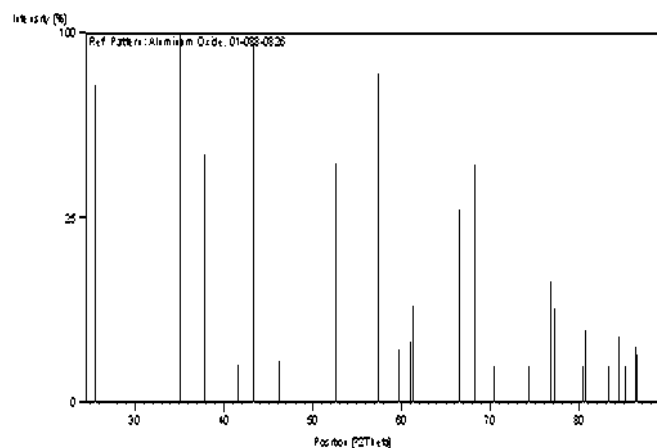
Subfiles: Inorganic  
 Alloy, metal or intermetallic  
 Corrosion  
 ICSD Pattern  
 Quality: Calculated (C)

**Comments**

Additional pattern: See PDF 81-1667.  
 ICSD collection code: 085137

**References**

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*  
 Structure: Liu, R.S., Shi, W.C., Cheng, Y.C., Huang, C.Y., *Mod. Phys. Lett. B*, **11**, 1169, (1997)

**Stick Pattern**

**Name and formula**

Reference code: 00-001-0527  
 Mineral name: Kaolinite  
 PDF index name: Aluminum Silicate Hydrate  
 Empirical formula:  $\text{Al}_2\text{H}_4\text{O}_9\text{Si}_2$   
 Chemical formula:  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$

**Peak list**

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	0	1	7.20000	12.283	80.0
2	0	2	0	4.45000	19.936	80.0
3	1	1	0	4.30000	20.639	64.0
4	-1	-1	1	4.20000	21.136	48.0
5	-1	1	1	4.04000	21.984	32.0
6	0	0	2	3.59000	24.780	100.0
7	-1	3	0	2.56000	35.023	48.0
8	-1	3	1	2.50000	35.892	48.0
9	1	-3	1	2.34000	38.439	80.0
10	1	-3	2	1.99000	45.547	32.0
11	2	3	0	1.90000	47.835	8.0
12	-2	-3	2	1.85000	49.212	8.0
13	-2	2	3	1.80000	50.674	8.0
14	1	4	2	1.67000	54.937	40.0
15	-1	3	4	1.54000	60.026	16.0
16	1	-5	2	1.49000	62.260	56.0
17	3	2	2	1.31000	72.033	8.0
18	1	0	5	1.29000	73.330	16.0
19	2	-6	1	1.24000	76.809	16.0

**Crystallographic parameters**

Crystal system: Anorthic  
 a (?): 5.1400  
 b (?): 8.9300  
 c (?): 7.3700  
 Alpha (?): 91.8000  
 Beta (?): 104.5000  
 Gamma (?): 90.0000

Measured density (g/cm<sup>3</sup>): 2.58  
 Volume of cell (10<sup>6</sup> pm<sup>3</sup>): 327.34

RIR: -

**Status, subfiles and quality**

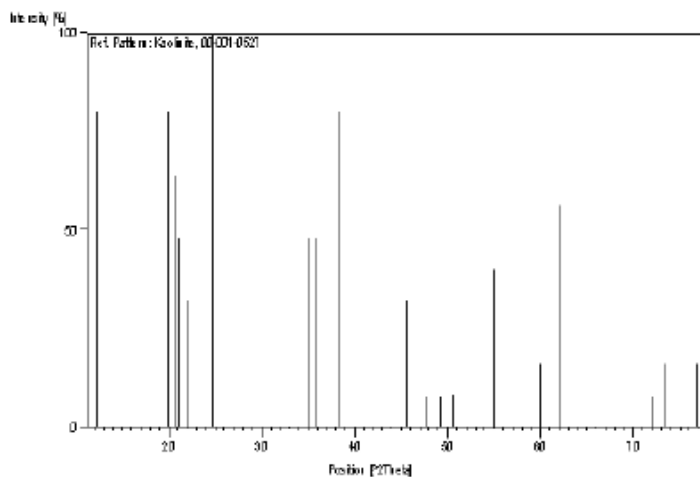
Status: Marked as deleted by ICDD  
 Subfiles: Inorganic  
 Mineral  
 Quality: Blank (B)

**Comments**

Deleted by: Deleted by 5-143, see 6-221, replaced by 14-164, 12-447.  
 Color: Colorless  
 Optical data: A=1.561, B=1.565, Q=1.566, Sign=-, 2V=36g

**References**

Primary reference: Hanawalt, et al., *Anal. Chem.*, **10**, 475, (1938)  
 Optical data: Ross, Kerr., *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 185, (1930)  
 Unit cell: Brindley, Robinson., *Mineral. Mag.*, **27**, 42, (1946)

**Stick Pattern**

**Name and formula**

Reference code: 00-005-0566

Mineral name: Sphalerite, syn  
 Common name: blende  
 PDF index name: Zinc Sulfide

Empirical formula: S<sub>2</sub>Zn  
 Chemical formula: ZnS

**Crystallographic parameters**

Crystal system: Cubic  
 Space group: F-43m  
 Space group number: 216

a (?): 5.4060  
 b (?): 5.4060  
 c (?): 5.4060  
 Alpha (?): 90.0000  
 Beta (?): 90.0000  
 Gamma (?): 90.0000

Calculated density (g/cm<sup>3</sup>): 4.10  
 Measured density (g/cm<sup>3</sup>): 3.90  
 Volume of cell (10<sup>6</sup> pm<sup>3</sup>): 157.99  
 Z: 4.00

**Peak list**

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	1	3.12300	28.559	100.0
2	2	0	0	2.70500	33.090	10.0
3	2	2	0	1.91200	47.516	51.0
4	3	1	1	1.63300	56.291	30.0
5	2	2	2	1.56100	59.137	2.0
6	4	0	0	1.35100	69.524	6.0
7	3	3	1	1.24000	76.809	9.0
8	4	2	0	1.20900	79.157	2.0
9	4	2	2	1.10340	88.552	9.0
10	5	1	1	1.04030	95.541	5.0
11	4	4	0	0.95570	107.415	3.0
12	5	3	1	0.91380	114.909	5.0
13	6	2	0	0.85480	128.618	3.0
14	5	3	3	0.82440	138.255	2.0

RIR: 3.90

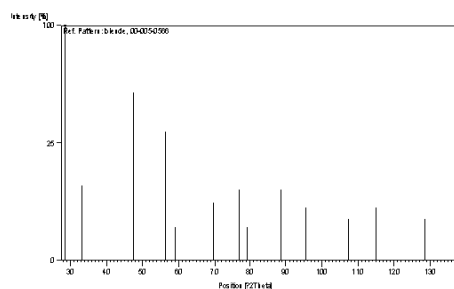
**Subfiles and Quality**

Subfiles: Inorganic  
 Mineral  
 Alloy, metal or intermetallic  
 Corrosion  
 Common Phase  
 Educational pattern  
 Forensic  
 NBS pattern

Quality: Indexed (I)

**Comments**

Color: White, yellow white  
 General comments: Opaque mineral optical data on specimen from Snailsbeach, Minsterly, Shropshire, England:  $RR_2R_g=16.7$ , Disp.=16,  $VHN_{100}=218-227$ , Color values: .302, .309, 16.8, Ref.: IMA Commission on Ore Microscopy QDF.  
 Measured density and color from Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., 1211.  
 Prepared at 940 C by RCA Laboratory.  
 Analysis: Spectroscopic analysis: <0.1% Cu; <0.01% B, Fe, Mg, Si; <0.001% Al, Ca.  
 Additional pattern: See 24-1137 for cadmium substitution.  
 Temperature: Pattern taken at 26 C.

**References****Stick Pattern**

**Name and formula**

Reference code: 03-065-6711  
 ICSD name: Titanium Oxide  
 Empirical formula:  $O_3Ti_{2.5}$   
 Chemical formula:  $Ti_{2.5}O_3$

**Crystallographic parameters**

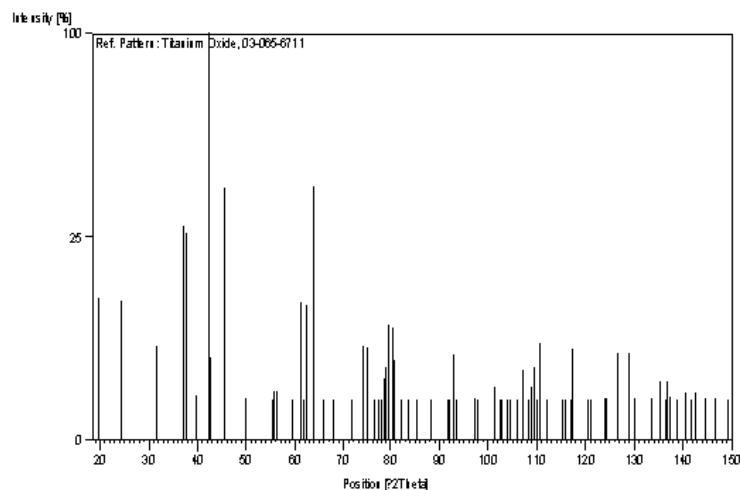
Crystal system: Orthorhombic  
 Space group: Immm  
 Space group number: 71  
 a (?): 2.9810  
 b (?): 9.0860  
 c (?): 3.9860  
 Alpha (?): 90.0000  
 Beta (?): 90.0000  
 Gamma (?): 90.0000  
 Volume of cell ( $10^6 \text{ pm}^3$ ): 107.96  
 Z: 2.00  
 RIR: 2.71

**Subfiles and Quality**

Subfiles: Inorganic  
 Alloy, metal or intermetallic  
 NIST Pattern  
 Quality: Calculated (C)

**Comments****References**

Primary reference: *Calculated from NIST using POWD-1.2++*  
 Structure: Hilti, E., *Naturwissenschaften*, **55**, 130, (1968)

**Stick Pattern**

**Peak list**

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	2	0	4.54300	19.524	12.0
2	0	1	1	3.65020	24.365	11.6
3	1	1	0	2.83245	31.561	5.3
4	0	3	1	2.41151	37.256	27.9
5	1	0	1	2.38724	37.649	26.0
6	0	4	0	2.27150	39.646	1.2
7	1	3	0	2.12454	42.517	100.0
8	1	2	1	2.11324	42.755	4.1
9	0	0	2	1.99300	45.474	38.5
10	0	2	2	1.82510	49.929	1.1
11	0	5	1	1.65348	55.533	0.8
12	1	4	1	1.64559	55.822	1.4
13	1	1	2	1.62994	56.406	1.4
14	1	5	0	1.55163	59.530	0.6
15	0	6	0	1.51433	61.151	11.4
16	0	4	2	1.49811	61.885	0.4
17	2	0	0	1.49050	62.237	10.9
18	1	3	2	1.45354	64.004	38.7
19	2	2	0	1.41623	65.900	0.4
20	2	1	1	1.37989	67.867	0.7
21	0	1	3	1.31468	71.736	0.3
22	1	6	1	1.27875	74.082	5.3
23	2	3	1	1.26787	74.826	5.1
24	2	4	0	1.24617	76.360	0.2
25	0	7	1	1.23421	77.236	0.2
26	1	5	2	1.22433	77.976	0.4
27	0	3	3	1.21673	78.557	2.2
28	1	0	3	1.21358	78.800	3.2
29	0	6	2	1.20576	79.412	7.8
30	2	0	2	1.19362	80.384	7.5
31	1	7	0	1.19008	80.672	3.8
32	1	2	3	1.17247	82.141	0.3
33	2	2	2	1.15444	83.710	0.3
34	0	8	0	1.13575	85.411	0.1
35	2	5	1	1.10709	88.180	0.3
36	0	5	3	1.07255	91.811	0.1
37	1	4	3	1.07039	92.050	0.2
38	2	6	0	1.06227	92.962	4.4
39	2	4	2	1.05662	93.609	0.2
40	1	8	1	1.02560	97.367	0.2
41	1	7	2	1.02178	97.855	0.2
42	0	0	4	0.99650	101.249	1.7
43	3	1	0	0.98778	102.490	0.1
44	2	1	3	0.98595	102.755	0.2
45	0	9	1	0.97865	103.831	0.9
46	0	2	4	0.97336	104.630	0.1
47	3	0	1	0.96416	106.057	0.9
48	1	9	0	0.95621	107.332	2.9
49	2	7	1	0.95061	108.255	0.1
50	1	6	3	0.94700	108.861	1.7
51	3	3	0	0.94415	109.346	3.1
52	3	2	1	0.94256	109.620	1.8
53	1	1	4	0.94002	110.059	0.9
54	2	6	2	0.93743	110.514	5.6
55	0	7	3	0.92848	112.123	0.1
56	0	4	4	0.91255	115.155	0.1
57	0	10	0	0.90860	115.944	0.1
58	2	8	0	0.90337	117.012	0.1
59	1	3	4	0.90219	117.258	5.1
60	3	4	1	0.88752	120.437	0.1
61	3	1	2	0.88504	121.000	0.2
62	3	5	0	0.87184	124.144	0.1
63	2	5	3	0.87058	124.456	0.1
64	1	9	2	0.86212	126.632	4.5
65	3	3	2	0.85325	129.053	4.5
66	1	10	1	0.84917	130.220	0.1
67	1	5	4	0.83847	133.471	0.1
68	0	6	4	0.83244	135.444	2.1
69	1	8	3	0.82925	136.533	0.1
70	2	0	4	0.82841	136.824	2.1
71	0	10	2	0.82674	137.414	1.1
72	2	8	2	0.82279	138.846	0.1
73	2	9	1	0.81807	140.645	1.4
74	2	2	4	0.81497	141.883	0.1

**Name and formula**

Reference code: 00-026-1327  
 PDF index name: Potassium Oxide  
 Empirical formula:  $K_2O$   
 Chemical formula:  $K_2O$

**Peak list**

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	0	3	7.06000	12.528	40.0
2	2	2	0	4.48000	19.801	20.0
3	3	1	2	3.98000	22.319	20.0
4	2	2	3	3.78000	23.517	20.0
5	4	0	2	3.63000	24.503	1.0
6	0	0	6	3.53500	25.172	20.0
7	1	1	6	3.29000	27.081	10.0
8	2	2	5	3.09000	28.871	100.0
9	4	1	3	3.05400	29.219	1.0
10	0	0	7	3.02300	29.525	10.0
11	3	2	4	2.95500	30.220	10.0
12	1	1	7	2.87000	31.138	80.0
13	2	0	7	2.82000	31.704	60.0
14	3	3	3	2.75000	32.533	20.0
15	1	0	8	2.61000	34.331	20.0
16	3	3	5	2.44500	36.728	40.0
17	6	1	1	2.36500	38.017	40.0
18	6	1	2	2.31500	38.871	40.0
19	5	3	0	2.22000	40.606	20.0
20	6	2	2	2.11500	42.718	40.0
21	6	1	5	2.07000	43.694	40.0
22	4	0	9	2.01000	45.068	20.0
23	6	1	7	1.86700	48.735	10.0
24	4	4	8	1.71200	53.480	1.0
25	6	2	9	1.59000	57.955	20.0
26	2	0	14	1.48500	62.493	10.0

**Crystallographic parameters**

Crystal system: Hexagonal  
 Space group: P 6  
 a (?): 17.9640  
 b (?): 17.9640  
 c (?): 21.1650  
 Alpha (?): 90.0000  
 Beta (?): 90.0000  
 Gamma (?): 120.0000

Volume of cell ( $10^6 \text{ pm}^3$ ): 5915.00

Z: 38.00

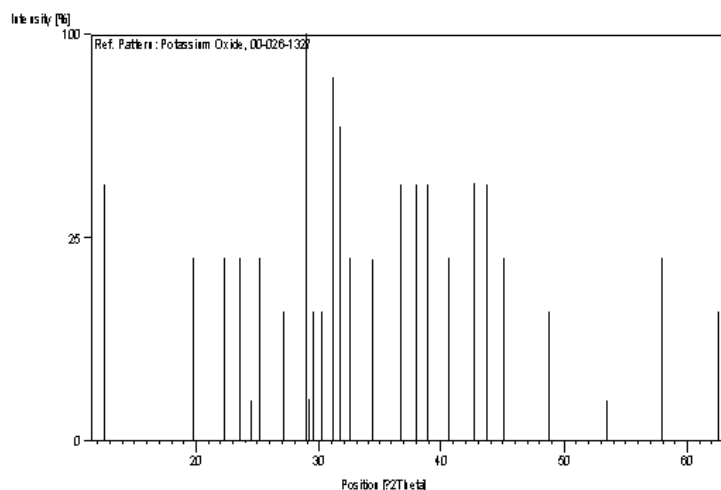
RIR: -

**Subfiles and Quality**

Subfiles: Inorganic  
 Alloy, metal or intermetallic  
 Quality: Indexed (!)

**Comments****References**

Primary reference: Touzaint et al., *Can. J. Chem.* **48**, 3358, (1970)  
 Unit cell: *Ibid.*, *Can. J. Chem.*

**Stick Pattern**





กรมราชบัณฑิต กระทรวงศึกษาธิการ  
*กรมราชบัณฑิต กระทรวงศึกษาธิการ*



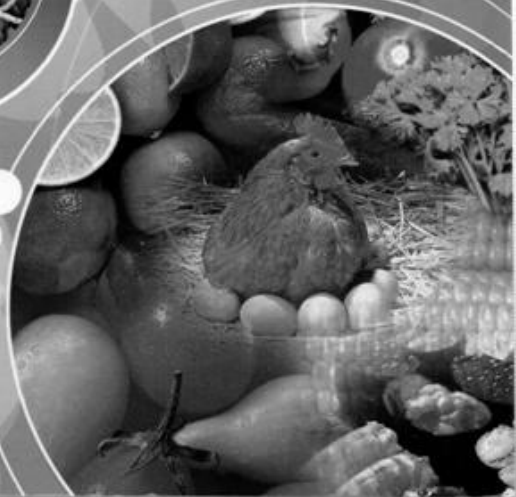
# การประชุมวิชาการแห่งชาติ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

The 9th KU-KPS Conference

ครั้งที่ 9

6-7 ธันวาคม 2555



**บทคัดย่อ**  
**Abstract**

RCA จากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต .....	225
พฤติกรรมทางกลของผนังดินซีเมนต์บดอัดภายใต้แรงดัด .....	227
การวิเคราะห์ต้นทุนด้านการขนส่งสินค้า กรณีศึกษา : กิจการค้ำน้ำดื่ม เค แอนด์ เค .....	229
การพัฒนาประสิทธิภาพของเตาชีวมวลโดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ .....	231
อิทธิพลของสารตัวเติมดินขาวและอลูมินาที่มีผลต่อการขึ้นรูป และสมบัติของยางพองจากยางธรรมชาติ .....	233
การศึกษากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมัน .....	235
การศึกษาอิทธิพลกระบวนการอบคืนตัวของรอยเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ของเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) ด้วยกระบวนการเชื่อมได้ฟลักซ์ .....	237
การพัฒนาเทคโนโลยีตู้พ่นสีอัตโนมัติสำหรับเฟอร์นิเจอร์เหล็ก .....	239
เครื่องจ่ายข้าวสารสามหัวจ่ายแบบหยอดเหรียญ .....	241
การพัฒนาระบบเฝ้าระวังคุณภาพของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ .....	243

### สาขาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

การศึกษาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของดินบางประการกับความหลากหลายชนิด ของพรรณไม้ในพื้นที่ดินเค็มมาก ในพื้นที่ลุ่มน้ำชี .....	247
การศึกษาศักยภาพในการสร้างสารชีวภาพของยีสต์ทะเล .....	249
การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียลีเซอร์รอด .....	251
การสำรวจการผลิตปุ๋ยหมักชีวภาพของเกษตรกรในพื้นที่จังหวัดพัทลุง .....	253
ผลของขนาดกองและการกลับกองต่อการเกิดก๊าซเรือนกระจกในกองปุ๋ยหมัก .....	255
การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ ที่เคลือบด้วยวิธีดีซีอีซีวี อันบัลลันซ์แมกนีตรอนสเปคโตรริง .....	257
ผลของความต่างศักย์ไบแอสต่อโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธี รีเอกทีฟสเปคโตรริงและการเกิดไฮดรอกซีอะปาทาไทท์ .....	259
การศึกษาฟิล์มพลาสติกชีวภาพพีบีเอสผสมแป้งดัดแปรที่เตรียมจากเทคนิคอัดรีดด้วยสลิทตาย .....	261
การปรับปรุงสมบัติการต้านการขูดถูของยางธรรมชาติด้วยการผสมพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น : ผลของสารช่วยผสม .....	263
กัมมันตภาพจำเพาะและแผนภาพทางรังสีของ $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ และ $^{232}\text{Th}$ ในตัวอย่างดิน บริเวณจังหวัดยะลา ประเทศไทย .....	265
การประเมินค่ากัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในดินผิวน้ำบริเวณจังหวัดชุมพร ประเทศไทย .....	267
การกำจัดกลีเซอรินออกจากไบโอดีเซลที่เตรียมจากน้ำมันประกอบอาหารที่ใช้แล้ว โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย .....	269
ดูดซับกลีเซอรินจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้ว บนเบนโทไนต์กัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยเบส .....	271
ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ Escherichia coli บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว .....	273
การเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียไนโตรเจน	

สาขาวิศวกรรมศาสตร์  
(ภาคโปสเตอร์)

การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9

**อิทธิพลของสารตัวเติมดินขาวและอลูมินาที่มีผลต่อการขึ้นรูปและสมบัติของยางฟองจากยางธรรมชาติ**

**Influence of kaolin and alumina on preparation and properties of cellular rubber from natural rubber**

**สุรฤทธิ์ สมรรถโท<sup>1</sup> นุชนภา ตั้งบริบูรณ์<sup>2</sup>**  
**Surarit Samattai<sup>1</sup> Nuchnapa Tangboriboon<sup>2</sup>**

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของดินขาวและอลูมินา (kaolin and alumina) ที่มีผลต่อการผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง (two roll mill) เนื่องจากแรงบิด (torque) ระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปด้วยความร้อน (optimum cure time) อุณหภูมิการคงรูป 150 องศาเซลเซียส และศึกษาผลของการกระจายตัวของสารตัวเติมดินขาวและอลูมินาที่ 50 phr (parts per hundred of rubber) ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) ผลการทดลองพบการเพิ่มขึ้นของดินขาวและอลูมินาส่งผลกระทบต่อทำให้แรงบิดสูงสุดและต่ำสุดที่ใช้มีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งสามารถทำนายได้จากสมการเส้นตรง ระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปด้วยความร้อนของดินขาวมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณดินขาว ซึ่งตรงข้ามกับสารตัวเติมอลูมินาที่ส่งผลทำให้ระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปด้วยความร้อนลดต่ำลง การกระจายตัวของสารตัวเติมทั้งสองชนิดในยางมีกระจายตัวได้ดีจากการตรวจสอบด้วย เทคนิค XRF mapping

<sup>1</sup> นิสิตปริญญาโท และ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900  
<sup>2</sup> Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasertsart University, Chatuchak, Bangkok, 10900

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล นายสุรฤทธิ สมรรถไธ  
เกิดวันที่ 24 ธันวาคม 2531  
สถานที่เกิด เขตปทุมวัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร  
ประวัติการศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) ภาควิชาวิศวกรรม  
วัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

