

การปรับปรุงการซึมผ่านของก๊าซและการลดความร้อนสะสมของยางมาสเตอร์แบทช์ด้วยเคลย์และเถ้าแกลบ

นาย บุญฤทธิ์ ยิ่งฮก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE IMPROVEMENT IN GAS PERMEABILITY AND HEAT BUILD UP OF RUBBER MASTER BATCH
WITH CLAY AND RICE HUSK ASH

Mr. Boonrit Hunghok

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงการซึมผ่านของก๊าซและการลดความร้อนสะสมของ
	ยางมาสเตอร์แบทช์ด้วยเคลย์และแก้วกลม
โดย	นาย บุญฤทธิ์ ช้างฮก
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แคทลียา ปัทมพรหม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แคทลียา ปัทมพรหม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริวรรณ ศรีสรค์ตร์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สิริจุฑาวัฒน์ โคควาวิสารัช)

..... กรรมการ
(ดร. สรินทร ลิ้มปนาท)

นายบุญฤทธิ์ ยิ่งฮัก : การปรับปรุงการซึมผ่านของก๊าซและการลดความร้อนสะสมของยางมาสเตอร์-
แบทช์ด้วยเคลย์และเถ้าแกลบ. (THE IMPROVEMENT IN GAS PERMEABILITY AND HEAT
BUILD UP OF RUBBER MASTER BATCH WITH CLAY AND RICE HUSK ASH). อ. ที่ปรึกษา :
อ.ดร. ณัฐพร โทณานนท์, อ.ที่ปรึกษาร่วม: ผศ.ดร. แคทลียา ปัทมพรหม, 94 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของยางมาสเตอร์แบทช์เพื่อลดปริมาณการซึมผ่านของก๊าซ และการลดความร้อนสะสมของยาง โดยใช้ตัวเติมชนิดต่างๆ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางล้อรถยนต์ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการคอมโพสิตยางมาสเตอร์แบทช์ด้วยสารตัวเติม จำนวน 3 ชนิด คือ เคลย์ เถ้าแกลบและซิลิกา โดยใช้ไซเลนเป็นสารประสานคู่ควบเพื่อช่วยในการยึดเกาะกันระหว่างยางมาสเตอร์แบทช์และสารตัวเติมทำให้วัสดุทั้งสองเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น โดยยางคอมโพสิตดังกล่าวสามารถเตรียมได้โดยการบดวัสดุทั้งสองให้เข้ากันและนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน จากการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล สมบัติความร้อนสะสม สมบัติการซึมผ่านของก๊าซ และการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของยางคอมโพสิตดังกล่าว พบว่าปริมาณของตัวเติมทั้งสามชนิดไม่มีผลต่อการวัลคาไนซ์ของยางคอมโพสิต และไม่ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ ในทางตรงกันข้ามปริมาณของสารตัวเติมที่ไม่เกิน 10 phr จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกล โดยการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมจะทำให้ยางคอมโพสิตมีค่าการทนต่อแรงดึงและค่าระยะยืดเมื่อขาดลดลง แต่จะมีค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติของยางคอมโพสิตจะขึ้นกับชนิดของสารตัวเติม ซึ่งเคลย์จะช่วยปรับปรุงการลดปริมาณการซึมผ่านของก๊าซ เมื่อเพิ่มปริมาณเคลย์จะทำให้ปริมาณการซึมผ่านของก๊าซลดลง ซึ่งปริมาณที่เหมาะสมที่สุดของเคลย์ คือ 3 phr ส่วนเถ้าแกลบก็จะช่วยปรับปรุงสมบัติการลดความร้อนสะสมของยาง ซึ่งปริมาณที่เหมาะสมที่สุดของเถ้าแกลบคือ 5 phr และเมื่อทำการศึกษาหาปริมาณอัตราส่วนเคลย์และเถ้าแกลบรวมกันในปริมาณ 10 phr ที่เหมาะสมสำหรับยางคอมโพสิตเพื่อให้มีสมบัติเด่นทั้งการลดความร้อนสะสมและลดการซึมผ่านของก๊าซ พบว่าปริมาณที่เหมาะสมสำหรับสารตัวเติมทั้งสองชนิดในยางคอมโพสิตคือ เคลย์ 5 phr และเถ้าแกลบ 5 phr

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2550.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

#4970410021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD : CLAY / RICE HUSK ASH / HEAT BUILD UP / GAS PERMEABILITY

BOONRIT HUNGHOK : THE IMPROVEMENT IN GAS PERMEABILITY AND HEAT BUILD UP OF RUBBER MASTER BATCH WITH CLAY AND RICE HUSK ASH. THESIS ADVISOR : NATTAPORN TONANON, D.Eng., THESIS CO-ADVISOR : ASST.PROF. CATTALEEYA PATTAMAPROM, Ph.D., 94 pp.

This research aims to establish the relationship between the rubber and three types of fillers including clay, rice husk ash and silica on the vulcanization characteristic, physical properties, mechanical properties, heat build up, gas permeability and morphology of the rubber composites. The rubber composites were compatibilized by silane coupling agent and prepared by two-roll mill and Banbury close-cycle mixer. The experimental results show that the amount of fillers below 10 phr did not have significant effect on the degree of rubber vulcanization and the vulcanized time. When the amount of filler was increased, the tensile strength and elongation at break were decreased. But the modulus of elasticity and stiffness were increased. Moreover, the increment in the amount of clay led to the reduction of gas permeability, where the suitable amount of clay was 3 phr. The optimal rice husk ash of 5 phr showed the drastic decrease in the heat build up of the rubber composites. For hybrid system of clay and rice husk ash, the clay : rice husk ash ratio of 5:5 was found to significantly decrease heat build up and the gas permeability.

Department	Chemical Engineering	Student's signature.....
Field of study	Chemical Engineering	Advisor's signature.....
Academic year	2007	Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจากหลายๆฝ่าย ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อ.ดร. ณัฐพร โทณานนท์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร. แคทลียา ปัทมพรหม เป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในทุกสิ่ง ตลอดจนเป็นกำลังใจให้ผู้เขียน จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ธวัชชัย ชรินพาทิซกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรค์ตร์ อ.ดร. สิริจุฑารัตน์ โควาวิสารัช และ ดร.สรินทร ลิมปนาท ที่ได้กรุณาเป็นกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำและแก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือในการวิเคราะห์ จากศูนย์เครื่องวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนุภาค สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร และเจ้าหน้าที่วิจัยทุกท่าน ที่ให้โอกาสผู้เขียนได้ใช้เครื่องมือที่ทันสมัยและส่งเสริมการวิจัยของผู้เขียนให้ออกมาได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด ป.สยามอุตสาหกรรมยางสำหรับความช่วยเหลือในการอนุเคราะห์ยางมาสเตอร์แบทช์กับสารเคมี และขอขอบคุณบริษัทชันนี่เวิลด์ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ ซิลิกาและไซเลน ที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์ ครูช่าง เจ้าหน้าที่ธุรการ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือต่างๆสำหรับใช้ในการวิจัย และมีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความเร็วเรียบร้อย

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่สนับสนุนทั้งกำลังใจและกำลังใจทรัพย์ ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคน ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือมาตลอด รวมทั้งขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ด้วย สำหรับคุณความดีอันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber).....	4
2.2 ยางบิวทิล (Butyl Rubber or Isobutylene Isoprene Rubber: IIR)	7
2.3 สารเติมแต่งสำหรับยาง.....	9
2.3.1 สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizer).....	9
2.3.2 สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators).....	10
2.3.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators).....	10
2.3.4 สารหน่วง (Retarders).....	11
2.4 สารตัวเติม (Fillers).....	12
2.4.1 แร่ดินเหนียว (Clay Minerals).....	12
2.4.2 ซิลิกา (Silica).....	15
2.4.3 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash).....	16
2.5 สารปรับสภาพผิวของสารตัวเติม (Silane Coupling Agent).....	17
2.6 การกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง.....	18
2.7 การบดผสม (Melt Mixing).....	19
2.7.1 การบดผสมโดยเครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง.....	19
2.7.2 การบดผสมยางโดยเครื่องบดระบบปิด.....	20

บทที่	หน้า
2.8 การทดสอบ.....	20
2.8.1 การทดสอบลักษณะการทำให้ยางคงรูป (Cure Characteristics).....	20
2.8.2 การคำนวณเวลาที่เหมาะสมในการทำให้ยางคงรูป (Cure Time).....	21
2.8.3 การหาเวลาที่ยางเริ่มคงรูปที่อุณหภูมินั้นๆ (Scorch Time).....	22
2.8.4 การหาค่าแรงบิดสูงสุดที่ย่างเกิดการคงรูปอย่างสมบูรณ์ (T_{100}).....	22
2.8.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties).....	22
2.8.6 การทดสอบการเสื่อมสภาพ (Aging Test).....	22
2.8.7 การทดสอบความร้อนสะสม (Heat build up Test).....	23
2.8.8 การซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability).....	23
2.8.9 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction; XRD).....	24
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	30
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.3 ขั้นตอนและการวิจัย.....	32
3.4 การวิเคราะห์สารตัวเติม.....	32
3.5 วิธีการทดลอง.....	34
3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงพลวัต และการกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเติมในเนื้อยางคอมโพสิต.....	37
3.6.1 การทดสอบสมบัติการดึง (Tensile Test).....	37
3.6.2 การทดสอบความแข็ง.....	39
3.6.3 การทดสอบการกดอัด (Compression set).....	40
3.6.4 การทดสอบความร้อนสะสม (Heat build up).....	41
3.6.5 การซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability).....	41
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	42
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตัวเติม.....	42
4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวเติมและยางคอมโพสิตด้วย (XRD).....	44
4.3 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์.....	51
4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	53
4.4.1 การทดสอบสมบัติการดึง.....	53
4.4.2 การทดสอบความแข็ง.....	59

บทที่	หน้า
4.4.3 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด.....	60
4.4.4 การทดสอบการทนทานต่อการเสื่อมสภาพ.....	62
4.5 การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต ความร้อนสะสม (Heat build up).....	65
4.6 การทดสอบสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability).....	67
4.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองแบบซ์เล็กกับแบบซ์ใหญ่ (โรงงานอุตสาหกรรม ยางล้อรถ).....	68
4.7.1 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางคอมโพสิต (XRD) ระหว่างแบบซ์เล็กกับแบบซ์ใหญ่.....	68
4.7.2 การเปรียบเทียบการทดสอบลักษณะการวัดค่าไนซีในแบบซ์เล็กกับ แบบซ์ใหญ่.....	71
4.7.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลในแบบซ์เล็กกับแบบซ์ ใหญ่	77
4.7.4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบความร้อนสะสม (Heat build up) ใน แบบซ์เล็กกับแบบซ์ใหญ่	76
4.7.5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) ในแบบซ์เล็กกับแบบซ์ใหญ่.....	77
5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	78
5.1 สรุปผลการทดลอง	78
5.2 ข้อเสนอแนะ	79
รายการอ้างอิง	80
ภาคผนวก	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	94

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานยางแท่งของไทย (Standard Thai Rubber, STR).....	6
ตารางที่ 2.2 สรุปความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
ตารางที่ 3.1 สูตรผสมของยางที่ใช้ในงานวิจัย.....	34
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนต่างๆของชิ้นงานดัมเบลล์.....	37
ตารางที่ 4.1 ปริมาณองค์ประกอบธาตุของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด.....	43
ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด.....	43
ตารางที่ 4.3 สมบัติการคงรูปของยางคอมพอสิตของปริมาณสารตัวเติมที่ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 30 นาที.....	52
ตารางที่ 4.4 ผลของปริมาณเคลย์ต่อการซึมผ่านของก๊าซ.....	67
ตารางที่ 4.5 สมบัติการคงรูปของยางคอมพอสิตในแบทช์เล็กและแบทช์ใหญ่ ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 30 นาที	71
ตารางที่ ก1. ปริมาณยางและสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย.....	84
ตารางที่ ข1. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล.....	85
ตารางที่ ข2. ผลการทดสอบความแข็งและความร้อนสะสม.....	87
ตารางที่ ข3. ผลการทดสอบความทนทานต่อแรงอัด.....	88

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ.....	4
รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของยาง IIR	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแร่ดินเหนียว Kaolinite.....	13
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของดินเหนียวชนิด Montmorillonite.....	14
รูปที่ 2.5 หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลบนพื้นผิวซิลิกา (a) Isolated silanol group (b) Vicinal silanol group (c) Germinal silanol group.....	16
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ Bis(3–triethoxysilylpropyl)–tetrasulfane (Silane-69).....	17
รูปที่ 2.7 ปฏิกริยา Hydrolysis ของ Silane Coupling Agent.....	17
รูปที่ 2.8 ลักษณะการกระจายตัวของโพลีเมอร์คอมโพสิต.....	18
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการคงรูปของยางที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา.....	21
รูปที่ 2.10 แสดงทิศทางการกระจายของรังสีเอกซ์จากระนาบของอะตอม 3 ระนาบซึ่งให้ความเข้มไม่เป็นศูนย์เนื่องจากเกิด การแทรกสอดแบบเสริมสร้างกัน.....	24
รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของ CBS.....	30
รูปที่ 3.2 ลักษณะโครงสร้างของ PVI.....	30
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	33
รูปที่ 3.4 ลำดับการบดการผสมยางโดยเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง.....	36
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนทดสอบแบบดัมเบล ASTM D412 (Die C).....	37
รูปที่ 3.6 เครื่องตัดตัวอย่างยางแบบใช้กำลังลม.....	38
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	38
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็ง.....	39
รูปที่ 3.9 การทดสอบ Compression set ตามมาตรฐาน ASTM D395 Method B.....	40
รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ทดสอบการกดอัด.....	40
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความร้อนสะสม.....	41
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ.....	41
รูปที่ 4.1 ผลของ XRD pattern ของ Clay.....	44
รูปที่ 4.2 XRD pattern ของแร่ดินเหนียว Illite.....	45
รูปที่ 4.3 XRD pattern ของแร่ดินเหนียว Kaolinite.....	45
รูปที่ 4.4 ผลของ XRD pattern ของ Rice Husk Ash (RHA).....	46
รูปที่ 4.5 ผลของ XRD pattern ของ Silica.....	47

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบของ XRD pattern ของ Clay และยางคอมโพสิตเมื่อเติม Clay ในปริมาณต่างๆ.....	48
รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบของ XRD pattern ของแก้วแกลบ และยางคอมโพสิตเมื่อเติมแก้วแกลบในปริมาณต่างๆ.....	49
รูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบของ XRD pattern ของซิลิกา และยางคอมโพสิตเมื่อเติมซิลิกาในปริมาณต่างๆ.....	50
รูปที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบของ XRD pattern ของยางคอมโพสิตเมื่อเติมสารตัวเติมระหว่างเคลย์กับแก้วแกลบรวมกันในปริมาณ 10 phr ในอัตราส่วนที่ต่างกัน.....	50
รูปที่ 4.10 ผลการทดลองลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง.....	53
รูปที่ 4.11 ผลของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อความทนทานต่อแรงดึง...	54
รูปที่ 4.12 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อความทนทานต่อแรงดึง.....	55
รูปที่ 4.13 ผลของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อระยะยืดเมื่อขาด.....	56
รูปที่ 4.14 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อระยะยืดเมื่อขาด.....	56
รูปที่ 4.15 ผลของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อมอดูลัสที่ระยะยืด 100%.....	57
รูปที่ 4.16 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อมอดูลัสที่ระยะยืด 100%.....	58
รูปที่ 4.17 ปฏิกริยาระหว่างสารคู่ควบไซเลนกับสารตัวเติม (บริเวณพื้นผิว) และยาง.....	58
รูปที่ 4.18 ผลของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อความแข็ง.....	59
รูปที่ 4.19 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อความแข็ง.....	60
รูปที่ 4.20 ผลของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อแรงอัด.....	61
รูปที่ 4.21 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อแรงอัด.....	61
รูปที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบสารคู่ควบไซเลนกับเคลย์ที่มีผลต่อความทนทานต่อแรงดึง (กรณีก่อนอบและหลังอบ).....	62
รูปที่ 4.23 ผลการเปรียบเทียบสารคู่ควบไซเลนกับแก้วแกลบที่มีผลต่อความทนทานต่อแรงดึง (กรณีก่อนอบและหลังอบ).....	63
รูปที่ 4.24 ผลการเปรียบเทียบสารคู่ควบไซเลนกับซิลิกาที่มีผลต่อความทนทานต่อแรงดึง (กรณีก่อนอบและหลังอบ).....	63

	หน้า
ภาพประกอบ	
รูปที่ 4.25 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อความทนทานต่อแรงดึง (กรณีก่อนอบและหลังอบ).....	64
รูปที่ 4.26 ผลของปริมาณสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดต่อความร้อนสะสมของยางคอมโพลีต.....	65
รูปที่ 4.27 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อความร้อนสะสมของยางคอมโพลีต.....	66
รูปที่ 4.28 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อการซึมผ่านของก๊าซของยางคอมโพลีต.....	68
รูปที่ 4.29 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ด้วย XRD pattern ในกรณีที่ไม่ใส่สารตัวเติม.....	69
รูปที่ 4.30 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ด้วย XRD pattern ของเคลย์ 3 phr.....	69
รูปที่ 4.31 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ด้วย XRD pattern ของแก้วกลบ 5 phr.....	70
รูปที่ 4.32 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ด้วย XRD pattern ในการผสมเคลย์ 5 phr กับแก้วกลบ 5 phr รวมกัน.....	70
รูปที่ 4.33 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ต่อความแข็งแรงดึง.....	73
รูปที่ 4.34 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ต่อระยะยืดเมื่อขาด.....	73
รูปที่ 4.35 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ที่มีผลต่อมอดูลัสที่ระยะยืด 100%.....	74
รูปที่ 4.36 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ที่มีผลต่อค่าความแข็ง...	74
รูปที่ 4.37 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ที่มีผลต่อแรงฉด.....	75
รูปที่ 4.38 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ในด้านความร้อนสะสม..	76
รูปที่ 4.39 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ด้านการซึมผ่านของก๊าซ	77
รูปที่ ค1. เครื่อง XRF.....	90
รูปที่ ค2. เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD).....	91
รูปที่ ค3. เครื่องวัดขนาดอนุภาค.....	92
รูปที่ ค4. เครื่องวัดพื้นที่ผิวอนุภาค.....	92
รูปที่ ค5. เครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง.....	92
รูปที่ ค6. เครื่อง Rheometer.....	93
รูปที่ ค7. เครื่องขึ้นรูปยาง.....	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันนี้ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกยางพาราเป็นอันดับหนึ่งของโลก จึงทำให้มีการลงทุนเกี่ยวกับอุตสาหกรรมการผลิตภัณฑ์ยางหลายผลิตภัณฑ์ด้วยกัน เช่น ยางรองคอกสะพาน ยางกันรั่ว ยางเป่าลม และยางรถยนต์ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ยางมากที่สุด เป็นต้น ยางธรรมชาติจัดเป็นโพลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่มีชื่อว่า โพลิไอโซพรีน (Polyisoprene) ถึงแม้ว่ายางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง แต่ไม่สามารถทนต่อน้ำมัน ความร้อนและสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซต่ำ จึงมีความพยายามในการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อใช้แทนยางธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้วยางบิวทิลซึ่งเป็นยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซได้ดีกว่ายางธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามยางบิวทิลยังคงต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศทำให้มีราคาแพง ในขณะที่ยางธรรมชาติสามารถผลิตได้ภายในประเทศและมีราคาที่ถูกลงกว่า จึงมีความพยายามในการปรับปรุงสมบัติต่างๆของยางธรรมชาติเพื่อเพิ่มศักยภาพของการผลิตยางรถยนต์ให้มากยิ่งขึ้น โดยมีสารตัวเติมที่ใช้กลุ่มแรกคือ เคลย์ (Clay) มีลักษณะเป็นแผ่นบางจะกระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่เป็นยางธรรมชาติและยางบิวทิล ซึ่งโมเลกุลของก๊าซไม่สามารถซึมผ่านอนุภาคของเคลย์ได้ ดังนั้นโมเลกุลของก๊าซจะต้องเคลื่อนที่อ้อมแผ่นเคลย์เพื่อไปยังด้านที่มีแรงดันต่ำกว่า ทำให้ระยะทางของโมเลกุลต้องมีการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น จึงสามารถช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซได้ดี[1] สารตัวเติมกลุ่มที่สองได้แก่ ซิลิกาและถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์เป็นของเหลือที่ได้จากการเผาถ่านของโรงสีข้าวหรือจากการเผาถ่านอัดแท่ง เนื่องจากในถ่านกัมมันต์จะมีซิลิกาอยู่เป็นจำนวนมากและมีเขม่าดำเป็นส่วนประกอบด้วยซึ่งจะเรียกกันว่า Carbonaceous siliceous material โดยปริมาณของซิลิกาและเขม่าดำจะมากน้อยนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการเผาไหม้ ซึ่งซิลิกาจำนวนมากที่อยู่ในถ่านกัมมันต์จะสามารถช่วยเสริมแรงได้ดีและลดความร้อนสะสม (Heat build up) [2] ของยางล้อรถที่เกิดขึ้นขณะการใช้งาน ซึ่งสารตัวเติมทั้งสองชนิดนี้มีความละเอียดสูง โดยมากใช้ทดแทนซิลิกาบางส่วนหรือทั้งหมดเพื่อประหยัดสารตัวเติม โดยที่ยังคงความแข็งแรงไว้ได้ ในอดีตการผสมสารตัวเติมกับโพลิเมอร์อยู่ในลักษณะของไมโครคอมโพสิต (Microcomposite) สามารถเพิ่มสมบัติต่างๆได้ แต่ต้องใช้สารตัวเติมในปริมาณสูง จึงทำให้มีการพัฒนาวัสดุนาโนคอมโพสิต (Nanocomposite) ขึ้นกับสารตัวเติมให้มีขนาดเล็กถึงในระดับนาโน ซึ่ง

เป็นการทำให้เกิดการกระจายตัวของสารตัวเติมที่มีขนาดระดับนาโนเมตรไปทั่วเมทริกซ์อย่างไม่เป็นระเบียบซึ่งทำให้เกิดการเสริมแรงในทุกทิศทาง

งานวิจัยนี้เราศึกษาการใช้สารตัวเติม 3 ชนิด คือ เคลย์ เถ้าแกลบ และซิลิกาเพื่อเพิ่มสมบัติให้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ (Butyl Rubber) โดยสารตัวเติมแต่ละชนิดจะต้องผ่านกระบวนการปรับสภาพผิวด้วยไฮดรอกไซด์โดยวิธี Melt mixing ก่อน แล้วจึงค่อยนำไปผสมกับยางมาสเตอร์แบทช์ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งในแบทช์เล็กและเครื่องบดผสมระบบปิดแบบนบุรีแล้วตามด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งในแบทช์ใหญ่ เพื่อที่จะศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ โดยเน้นการศึกษาการซึมผ่านของก๊าซเมื่อเติมเคลย์ และเน้นการศึกษาการลดความร้อนสะสมของยางเมื่อเติมเถ้าแกลบ โดยจะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างเถ้าแกลบกับซิลิกา เพื่อหาปริมาณสารตัวเติมที่สามารถเพิ่มสมบัติต่างๆให้กับยางได้ดีที่สุด จากผลการทดลองในแบทช์เล็กที่ดีและเหมาะสมที่สุด จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับแบทช์ใหญ่ในโรงงาน ซึ่งข้อมูลและผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการสามารถช่วยลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์และในการปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของก๊าซและลดความร้อนสะสมของยางคอมโพสิตอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณเคลย์ซึ่งปรับสภาพผิวด้วย silane-69 ที่มีผลต่อการซึมผ่านของก๊าซ สมบัติเชิงกลและการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางมาสเตอร์แบทช์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณเถ้าแกลบซึ่งปรับสภาพผิวด้วย silane-69 ที่มีผลต่อความร้อนสะสมในยางมาสเตอร์แบทช์
- 1.2.3 ศึกษาเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากแบทช์เล็กในปริมาณ 500 กรัม กับแบทช์ใหญ่ในปริมาณ 50 กิโลกรัมของโรงงานอุตสาหกรรมยางล้อรถ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ใช้เคลือบซึ่งถูกปรับสภาพด้วย silane-69 เป็นสารตัวเติมระดับไมโครเมตรเพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลให้กับยางมาสเตอร์แบทช์
- 1.3.2 ใช้ถ้ำแกลบซึ่งถูกปรับสภาพด้วย silane-69 เป็นสารตัวเติมระดับไมโครเมตรเพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลให้กับยางมาสเตอร์แบทช์
- 1.3.3 ผสมยางในแบทช์เล็กปริมาณ 500 กรัมด้วยเครื่องบดผสมภายนอก (Two roll mill) และในแบทช์ใหญ่ปริมาณ 50 กิโลกรัมของโรงงานอุตสาหกรรมยางล้อรถด้วยเครื่องบดผสมภายใน (Banbury Mixer) แล้วตามด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง
- 1.3.4 สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ที่ทดสอบ ได้แก่
 - 1.3.4.1 สมบัติความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength)
 - 1.3.4.2 สมบัติความแข็ง (Hardness)
 - 1.3.4.3 สมบัติความทนทานเนื่องจากแรงกด (Compression set)
 - 1.3.4.4 สมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging properties)
- 1.3.5 ทดสอบสมบัติความร้อนสะสม (Heat build up)
- 1.3.6 ทดสอบสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability)
- 1.3.7 ตรวจสอบโครงสร้างของยางคอมโพสิตด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

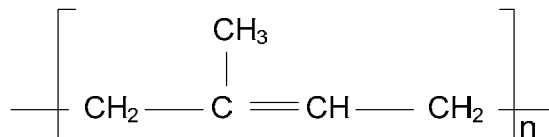
- 1.4.1 สามารถใช้เคลือบเป็นตัวช่วยป้องกันการซึมผ่านของก๊าซในอุตสาหกรรมยางล้อรถ เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ของยางธรรมชาติและลดปริมาณการใช้ยางสังเคราะห์ (Butyl Rubber)
- 1.4.2 สามารถใช้ถ้ำแกลบแทนซิลิกาช่วยลดความร้อนสะสมและลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตยางล้อรถ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้จากต้นยางพาราสายพันธุ์ *Hevea Brazilliensis* ซึ่งเป็นไม้ป่าที่มีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอะเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ ต่อมาได้มีผู้นำมาปลูกที่ทวีปยุโรปและเอเชีย เนื่องจากต้นยางพาราชอบอากาศร้อน ชื้น ดินทราย ร่วน ระบายน้ำดี จึงนิยมปลูกมากแถวเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมทั้งภาคใต้ และภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยในประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางทั้งสิ้นประมาณ 12 ล้านไร่ กระจายอยู่ในพื้นที่ 18 จังหวัด ซึ่งถือเป็นผู้ผลิตยางพารารายใหญ่ที่สุดของโลก น้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นและมีสัดส่วนของเนื้อยาง (Dry Rubber Content, DRC) ประมาณ 30% โดยน้ำหนัก แขนงลอยอยู่ในน้ำ ปริมาณของเนื้อยางขึ้นกับชนิดของพันธุ์ อายุ และฤดูกาลที่กรี๊ดยาง ยางธรรมชาติเป็นโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างทางเคมีคือ 1,4-Polyisoprene ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก T_g (Glass Transition Temperature) เท่ากับ $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

โดยทั่วไปยางธรรมชาติยังสามารถแบ่งออกตามสถานะได้ดังนี้

2.1.1 น้ำยาง (Latex)

น้ำยางที่ได้จากการกรี๊ดต้นยางพารา จะต้องนำไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) เนื่องจากมีปริมาณน้ำมากเกินไป จนได้น้ำยางขุ่นที่มีปริมาณยางแห้งประมาณ 60% โดยน้ำหนัก และในน้ำยางมีสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยเชื้อจุลินทรีย์และเชื้อแบคทีเรีย จึงต้องเติมแอมโมเนียเพื่อป้องกันน้ำยางบูดเน่า น้ำยางที่เติมปริมาณแอมโมเนียเข้มข้นถึง 0.7% เรียกว่า High Ammonia Latex (HA Latex) และน้ำยางที่เติมปริมาณแอมโมเนียเข้มข้นเพียง 0.2%

จะเรียกว่า Low Ammonia (LA Latex) อีกทั้งจำเป็นต้องใส่สารเคมีอื่นเพิ่มด้วย เช่น ZnO/TMTD 0.02% หรือใช้กรดบอริก 0.2% เป็นต้น

2.1.2 ยางแห้ง

ยางแห้งเตรียมได้จากการนำน้ำยางสดมาเติมน้ำเพื่อเจือจางให้มีปริมาณเนื้อยางเหลือเพียง 12-18% แล้วจึงเติมกรด โดยส่วนใหญ่ใช้กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก หรือกรดซัลฟูริก เพื่อให้ยางจับตัวกันและแยกตัวออกจากน้ำ ซึ่งความเป็นกรดต่าง (pH) ที่ทำให้อนุภาคของน้ำยางเริ่มจับตัวกันและแยกตัวออกจากน้ำอยู่ในช่วง 4.8-5.1 ขึ้นถัดไปคือการไล่ความชื้นออกจากเนื้อยางเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเชื้อรา โดยยางแห้งมีรูปแบบต่างๆ ดังนี้

- ยางแผ่น เป็นการนำยางแห้งที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด แล้วทำให้แห้งโดยการนำไปตากแดดหรือผึ่งในอากาศร้อนเพื่อไล่ความชื้น โดยเรียกยางที่ได้จากกระบวนการนี้ว่า ยางแผ่นไม่รมควัน (Air Dried Sheet, ADS) หรือหากนำยางแผ่นที่ได้ไปอบรมควันต่อที่อุณหภูมิ 60-70°C จะเรียกว่า ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS)
- ยางเครฟ เป็นยางที่ได้จากการนำเศษยางไปรีดในเครื่องเครฟ (Creping Machine) พร้อมกับทำความสะอาดด้วยน้ำเพื่อเอาสิ่งสกปรกออกจากยางในระหว่างการรีด จากนั้นจึงนำไปผึ่งลมให้แห้ง
- ยางแท่ง ได้จากการนำยางมาทำเป็นก้อนเล็กๆและอบให้แห้งด้วยอากาศร้อน และนำไปอัดเป็นแท่ง ยางแท่งจะมีคุณภาพสม่ำเสมอกว่ายางแผ่นและยางเครฟ เนื่องจากผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ ซึ่งพิจารณาจากปริมาณสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในยาง โดยประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานยางแท่งซึ่งเรียกว่า Standard Thai Rubber (STR) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานยางแท่งของไทย (Standard Thai Rubber, STR) [3]

ข้อกำหนด	STR XL	STR 5L	STR 5	STR 5CV	STR 10	STR 10CV	STR 20	STR 20CV
ปริมาณสิ่งสกปรกที่เหลืออยู่บนช่อง ขนาด 44 ไมครอน (max %wt)	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
ปริมาณเถ้า (max %wt)	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.80	0.80
ปริมาณไนโตรเจน (max %wt)	0.50	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
ปริมาณสารระเหยได้ (max %wt)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ค่า Plasticity เริ่มต้น (P_0) (min.)	35	35	30	-	30	-	30	-
ค่า Plasticity Retention Index (PRI) (min.)	60	60	60	60	50	50	40	40
สี (Lovibond scale) (max.)	4.0	6.0	-	-	-	-	-	-
ความหนืดมูนี ML 1+4@100°C	-	-	-	*	-	**	-	***
สีของเครื่องหมาย	น้ำเงิน บนพื้น ขาว	เขียว อ่อน	เขียว อ่อน	ขาวบน พื้น เขียว อ่อน	น้ำตาลบน พื้นขาว	ขาวบน พื้น น้ำตาล	แดงบน พื้นขาว	ขาวบน พื้นแดง
สีของแผ่นฟิล์มโพลิเอทิลีน (LDPE) ที่ใช้ห่อยาง	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส
สีของแถบโพลิเอทิลีน	ขาวใส	ขาวใส	ขาวทึบ	ขาวใส	ขาวทึบ	ขาวทึบ	ขาวทึบ	ขาวทึบ

หมายเหตุ * 70 (+7, -5), 60 (+7, -5) และ 50 (+7, -5)

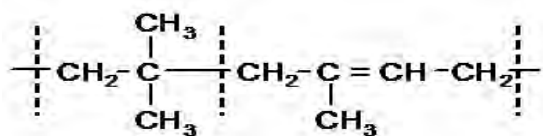
** 60 (+7, -5) *** 65 (+7, -5)

เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้เช่น ออกซิเจน โอโซน ทำให้ยางเสื่อมสภาพหรืออาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน หรือคลอรีน หรือไฮโดรเจน คลอไรด์ เป็นต้น เนื่องจากยางยังคงอ่อนตัวและเหนียวยืดเมื่อร้อน แต่จะแข็งและเปราะที่อุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางกับสารเคมีต่างๆ ที่พันธะคู่จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วย เป็นเหตุให้ต้องใส่สารเคมีอื่นๆ เพื่อให้ยางคงรูปอยู่ได้ เช่น กำมะถัน สารตัวเติม และสารเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น จะได้ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (Rubber compound) แล้วนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการคงรูปยาง (Vulcanization) ซึ่งเป็น

ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลของยาง เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ทำให้ยางคงรูปและมีสมบัติความยืดหยุ่นสูงขึ้น ส่วนยางที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวจะเรียกว่ายางสุกหรือยางคงรูป (Vulcanizate) ซึ่งมีสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากเหมือนยางธรรมชาติ

2.2 ยางบิวทิล (Butyl Rubber or Isobutylene Isoprene Rubber: IIR) [1, 4]

ยาง IIR เป็นยางสังเคราะห์ที่ได้จาก โคโพลิเมอร์ระหว่าง isobutylene กับ isoprene มีสมบัติทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องจากสารเคมี ความร้อน แสงแดด ได้เป็นอย่างดี มีค่าการกระเดื่องกระดอนต่ำที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยางชนิดนี้ยังมีสมบัติเด่น คือ มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้ในการผลิตยางในรถยนต์ หรือเคลือบผนังด้านในของยางเรเดียล ใช้ทำถุงยางลมสำหรับบอบยางล้อให้คงรูปในอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น และเนื่องการมีค่าการกระเดื่องกระดอนต่ำที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ดูดซับพลังงานกลและการสั่นสะเทือนได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง จึงเหมาะที่จะผลิตเป็นยางกันสะเทือนด้วย



Isobutylene unit

Isoprene unit

รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของยาง IIR

ยางบิวทิลสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาโคโพลิเมอร์เซชันร่วมแบบสารละลายผ่านประจุบวก (Cation solution copolymerization) ของมอนอเมอร์ไอโซบิวทิลีน (97-99%) และไอโซพรีน (1-3%) ในเมทิลคลอไรด์ (ตัวทำละลาย) โดยใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ ($-100\text{ }^{\circ}C$) อย่างรวดเร็ว

ยางสังเคราะห์ของยางบิวทิลจะเห็นว่าโครงสร้างหลัก (97-99%) เป็นสายโซ่เดี่ยวที่มีความไม่อิ่มตัว (Unsaturation) ต่ำ ทำให้ยางบิวทิลมีสมบัติเด่นดังนี้

- ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) ต่ำมาก
- มีความสามารถในการต้านทานของโอโซน (Ozone resistance) และดินฟ้าอากาศ (Weathering resistance) ดี
- มีความสามารถในการรับแรงสั่นสะเทือน (Vibration damping) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Frictional coefficient) สูงและทนทานต่อการพับงอ (Flex resistance)
- มีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)
- ทนสารเคมี (Chemical resistance) และไอน้ำ (Moisture resistance)

จากโครงสร้างทางเคมีที่อิมิตัวของยางบิวทิลเป็นผลให้สายโซ่โมเลกุลยางทนทานต่อการออกซิไดซ์ จะถูกตัดหรือขาดยากเมื่อได้รับแรงเฉือนและอุณหภูมิสูงขณะขึ้นรูป การปรับปรุงสมบัติของยางสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง (300-350 °F) การผสมสูตรยางบิวทิลสามารถทำได้เช่นเดียวกับยางชนิดอื่น แต่ไม่ต้องทำการบดย่อยยาง (Mastication) เพื่อตัดสายโซ่ลดน้ำหนักโมเลกุลของยางก่อนการผสมเมื่อในกรณีของยางธรรมชาติ แต่อาจผสมบดยางทำให้อุณหภูมิของยางสูงขึ้น (Prewarming) เพื่อลดเวลาในการผสมยาง

2.2.1 ยางฮาโลจีเนตบิวทิลหรือยางฮาโลบิวทิล (Halogenated Butyl Rubbers)

ยางฮาโลจีเนตบิวทิลหรือยางฮาโลบิวทิล (Halobutyl) คือทำให้ยางบิวทิลมีหมู่ฮาโลเจน (Halogens) เช่นคลอรีน (Cl) หรือโบรมีน (Br) โดยการทำให้ปฏิกิริยาฮาโลจีเนชัน (Halogenation) ที่ตำแหน่งพันธะคู่ของไอโซพรีนในโครงสร้างโมเลกุลของยางบิวทิล โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของอะตอมฮาโลเจนต่อพันธะคู่ประมาณ 1:1 หรือมีฮาโลเจนประมาณ 1- 2% โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ยางบิวทิลชนิดปรับปรุงที่มีสมบัติต่างไป ยางฮาโลบิวทิลที่สำคัญมี 2 ชนิดคือ

2.2.1.1 ยางครอโรบิวทิล (Chlorobutyl or Chlorinated rubber , CIIR) การทำให้มีอะตอมของคลอรีน (Chlorine ,Cl) โดยการทำให้ปฏิกิริยาคลอรีเนชัน (Chlorination)

2.2.1.2 ยางโบรมบิวทิล (Bromobutyl or Brominated butyl rubber, BIIR) การทำให้มีอะตอมของโบรมีน (Bromine , Br) โดยการทำให้ปฏิกิริยาโบรมิเนชัน (Bromination) ยางชนิดนี้มีเสถียรภาพต่ำกว่า แต่ช่วงไวต่อปฏิกิริยามากกว่า ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้เร็วกว่า ใช้ปริมาณสารเชื่อมโยงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับยาง CIIR

ยางฮาโลบิวทิลมีสมบัติเด่นหลายประการคือ

- มีสมบัติเหมือนกับยางบิวทิลทุกประการ เช่นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำต่ำ ทนทานต่อโอโซนและออกซิเจน ด้านทานต่อการพับงอ (Flex fatigue) ฮีสเตอรีซิส (Hysteresis) สูง นอกจากนี้ยังมีสมบัติบางประการสูงกว่ายางบิวทิล เช่น การทนความร้อน (Heat resistance) และสารเคมี (Chemical resistance)
- เนื่องจากมีอะตอมของฮาโลเจน ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงร่วม (Covulcanization) กับยางทั่วไปที่มีพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวสูง(เช่นยางธรรมชาติ ยางปีอาร์ ยางเอสปีอาร์ ฯลฯ) เพิ่มสมบัติการเชื่อมโยงและการประยุกต์การใช้งานลักษณะโพลีเมอร์ผสม (Blends)
- เพิ่มสมบัติการยึดติด (Adhesion) กับยางชนิดอื่นหรือวัสดุอื่น ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการใช้งานเป็นยางชั้นในรถยนต์ (Inner liner)

เนื่องจากโครงสร้างของยางฮาโลบิวทิลมีพันธะคู่ที่ไม่อิ่มตัว (โครงสร้างไฮโซพรีน) และอะตอมคลอรีน(หรือโบรมีน) ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้สามารถเชื่อมโยงยางฮาโลบิวทิลได้หลากหลายวิธี ทั้งวิธีเชื่อมโยงยางทั่วไปโดยใช้กำมะถัน การใช้ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) หรือใช้ไดเอมีน (Diamine) เป็นสารเชื่อมโยงผ่านปฏิกิริยา Bis-alkylation

2.3 สารเติมแต่งสำหรับยาง

2.3.1 สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizer)

โดยส่วนใหญ่จะใช้กำมะถัน (Sulfur) เป็นสารทำให้ยางคงรูป (Crosslinking agent) โดยทำให้โมเลกุลของยางมาเชื่อมต่อกัน เรียกว่า การทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing) ซึ่งทำให้โครงสร้างของยางแข็งแรงขึ้น ตามปริมาณของกำมะถันที่ใส่ และการเชื่อมโยงร่างแหที่เกิดขึ้น นอกจากกำมะถันแล้ว ยังมีการใช้สารที่สลายตัวให้กำมะถัน (Sulfur Donor) ในการทำให้ยางคงรูปด้วย อาทิเช่น Thioplasts (TM), dipentamethylene thiuram tetrasulphide (DPTS) หรือ benzothiazyl-2-N-dithiomorpholide (MBS) [5] เป็นต้น ถึงแม้ว่าสารให้กำมะถันจะให้ปริมาณกำมะถันออกมาไม่มากนัก แต่กำมะถันเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงร่างแหมาก และให้ผลดีสูงกว่าการใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียวในปริมาณเดียวกัน

2.3.2 สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาเป็นสารช่วยให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์เร็วขึ้น ในระยะแรกสารเร่งปฏิกิริยาจะจัดหมวดหมู่ตามความเร็วในการเร่งให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ แต่เมื่อมียางสังเคราะห์เพิ่มขึ้น สารเร่งปฏิกิริยาที่เคยจัดเป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่เร็วสำหรับยางธรรมชาติ อาจกลายเป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่ช้าสำหรับยางสังเคราะห์นั้นๆ ได้ จึงมีการแบ่งสารปฏิกิริยาตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารเร่งปฏิกิริยานั้นๆ การจัดหมวดหมู่สารเร่งปฏิกิริยาตามวิธีนี้จะแบ่งออกเป็นหมู่ต่างๆ ดังนี้

- ไดไธโอคาร์บาเนต (Dithiocarbamate)
- แซนแทท (Xantahtes)
- ไธยูแรม (Thiurams)
- ไธอาโซล (Thiazole)
- ซัลฟีนามาไมด์ (Sulphenamide)
- กัวนิดีน (Guanidine)

ซึ่งในงานวิจัยเลือกใช้สารเร่งในหมู่ ซัลฟีนามาไมด์ (Sulphenamide) คือ CBS หรือ MOR ซัลฟีนามาไมด์ประกอบด้วยส่วนที่เป็นไธอาโซลและส่วนที่เป็นอะมีน ซัลฟีนามาไมด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่ delay action หรือ scorch time ยาวกว่าพวกไธอาโซลเสียอีกเพราะเมื่อซัลฟีนามาไมด์ได้รับความร้อนก็จะแตกตัวออกให้ MBT และเบสออกมา ระยะเวลาก่อนที่จะแตกตัวออกมานี้ก่อให้เกิด delay action MTB ที่แตกตัวออกมาก่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ และเบสจะเป็นตัวกระตุ้นให้สารเร่งปฏิกิริยาทำงานเร็วขึ้นมอดูลัสสูงขึ้นเนื่องจากว่าซัลฟีนามาไมด์ให้ delay action ทำให้การวัลคาไนซ์ในเบ้าพิมพ์ดีเพราะมีเวลาพอให้ยางไหลได้เต็มพิมพ์ ซัลฟีนามาไมด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้ยางมีมอดูลัสสูงมาก และมีสมบัติเชิงกลดี ซัลฟีนามาไมด์ส่วนใหญ่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องรับแรงเค้นสูงๆ เช่น ยางรถยนต์ ยางกันชน และสายพานลำเลียง ซัลฟีนามาไมด์ใช้ได้ทั้งยางธรรมชาติ ยางบิวทิล ยางไนไตรล์ และยางเอสปีอาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ได้แก่ N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide(CBS) และ N-tert-butyl-2-benzothiazyl sulphenamide (TBBS) [4]

2.3.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือ สารที่ช่วยเสริมให้สารเร่งปฏิกิริยาทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยาอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ สารอนินทรีย์ที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่สำคัญนิยมใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ ส่วนสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่เป็นสารอินทรีย์ที่สำคัญ คือ พวกกรดไขมัน เช่น

กรดสเตียริก กรดปาล์มมิติก และกรดลอริก เป็นต้น สารกระตุ้นปฏิกิริยามีคุณสมบัติที่สำคัญคือ เมื่อใส่เข้าไปในยางปริมาณเล็กน้อยจะทำให้ยางมีมอดูลัสสูงขึ้น และบางครั้งถ้าไม่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยาก็ จะไม่มีการวัลคาไนซ์เกิดขึ้น ซึ่งซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ในการทำให้ยางวัลคาไนซ์ได้สมบูรณ์ ซิงค์ออกไซด์มีความจำเป็นมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารเร่งปฏิกิริยาประเภทไฮโอโซล โดยทั่วไปนิยมใช้ ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาในปริมาณตั้งแต่ 3-5 phr (part per hundred rubber) แต่ถ้า ซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็กก็สามารถลดปริมาณการใช้เหลือเพียง 1 phr ได้ ปริมาณซิงค์ออกไซด์มี ผลต่อสมบัติเชิงกลของยางคือ มอดูลัส ความต้านทานต่อแรงฉีกขาด ความแข็งแรงดึง และความ กระด้างตัวของยางจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิงค์ออกไซด์ จนกระทั่งปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มเป็น 2.5 phr แล้วก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

2.3.4 สารหน่วง (Retarders)

สารหน่วง (Retarders) คือ สารเคมีที่ผสมในยางเพื่อป้องกันปฏิกิริยาเชื่อมโยงก่อนกำหนด (Premature vulcanization หรือ Scorch) ในสภาวะต่างๆของขบวนการผลิต การกำหนดสูตร ผิดพลาดหรือสภาวะการผลิตที่ไม่ถูกต้อง เช่นการใช้อุณหภูมิยางที่สูง อาจทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยง ก่อนขบวนการขึ้นรูป โครงสร้างยางเปลี่ยนเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติไม่สามารถขึ้นรูปเป็น ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ การใส่สารหน่วงช่วยป้องกันการเชื่อมโยงขณะผสม (Compound) ยาง อย่างไรก็ดีสารหน่วงจะทำให้อัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate) ลดลง สารหน่วงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

สารหน่วงชนิดกรด (Acidic retarders) ดังที่ได้กล่าวแล้วว่า สารจำพวกต่างช่วยเร่งปฏิกิริยา เชื่อมโยง ในขณะที่สารจำพวกกรดจะหน่วงปฏิกิริยาเชื่อมโยง กรดจะเกิดปฏิกิริยากับสารเจือปนใน ยางที่เป็นต่างที่จะช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงทำให้การเชื่อมโยงเกิดช้าลง ตัวอย่างกรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) กรดเบนโซอิก (Benzoic acid) กรดมาลลิก (Maleic acid) และพทาสิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydride) สารหน่วงชนิดกรดใช้ได้กับสารเร่งจำพวกไทเอโซล (Thiazole) แต่ไม่มี ประสิทธิภาพกับสารเร่งซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamide) นิยมใช้ในปริมาณไม่เกิน 2 phr

สารไซโคลเฮกซิลไทโอพทาสิไมด์ (Cyclohexylthiophthalimide, CTP) ชื่อที่รู้จักดีคือ “พีวีไอ” (Prevulcanization inhibitor, PVI) ผลิตโดยบริษัทมอนซานโต (Monsanto) ปัจจุบันเป็นที่นิยม เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ใช้ได้ดีกับยางหลายชนิด รวมทั้งสารเร่งและสารเติมแต่งต่างๆ โดยไม่เกิด การเปื้อนสี (Staining) หรือเกิดฟองก๊าซ มีความสมดุลของอัตราเร็วการเชื่อมโยง สมบัติของยางที่ได้ และความปลอดภัยในการใช้ปกติใช้ในปริมาณน้อยคือ 0.1-0.3 phr อย่างไรก็ตาม CTP ใช้ไม่ได้กับระบบ

เชื่อมโยงยางด้วยเรซินหรือออกไซด์ของโลหะ การเลือกใช้สารหน่วงขึ้นอยู่กับชนิดของยาง ระบบการเชื่อมโยง ชนิดของสารเร่ง อุณหภูมิ รวมทั้งระยะเวลาของขบวนการผลิต

2.4 สารตัวเติม (Filler)

2.4.1 แร่ดินเหนียว (Clay minerals) [4]

แร่ดินเหนียวเกิดจากการผุพังของหิน โดยมีขนาดอนุภาคระดับไมครอน มีธาตุอะลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก โครงสร้างของแร่ดินเหนียว หรือสารประกอบแอนไฮดรัสอะลูมิโนซิลิเกต (anhydrous aluminosilicate) มีลักษณะเป็นแผ่น เกิดจากการเรียงซ้อนกันของชั้นอะลูมินา (alumina) และ ซิลิกา (silica) โดยระหว่างชั้นมีไอออนบวกของโลหะ เช่น โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) หรือเหล็ก (Fe) เป็นต้น แทรกอยู่ จากการมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน อาจแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างของผลึก ได้แก่

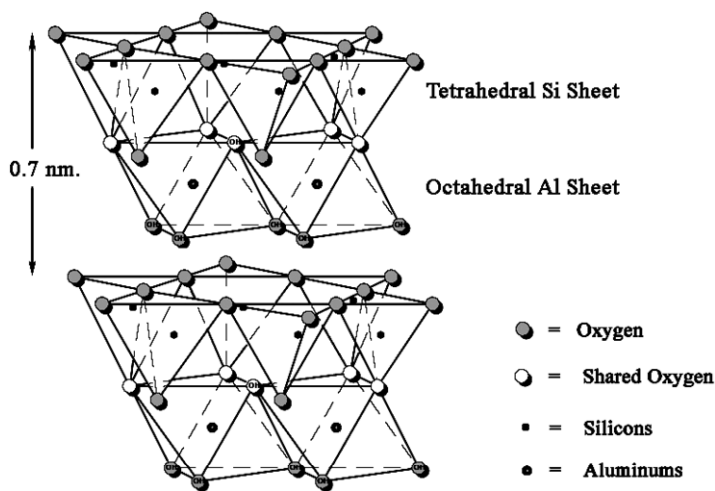
1. กลุ่ม kaolinite
2. กลุ่ม montmorillonite
3. กลุ่ม illite

2.4.1.1 กลุ่มเคโอลิไนท์ (Kaolinite) เป็นกลุ่มที่พบอยู่ในดินมากที่สุด จึงจัดได้ว่ามีความสำคัญมากกว่าแร่ดินเหนียวชนิดอื่นๆ แร่ดินเหนียวในกลุ่มนี้ที่สำคัญได้แก่ kaolinite, halloysite นอกจากนี้ยังมีชนิดอื่นๆ อีกแต่ยังไม่พบอย่างแพร่หลายอยู่ในดิน ในกลุ่มนี้ kaolinite จะเป็นแร่ธาตุที่พบมากที่สุด โครงสร้างในกลุ่มนี้เหมือนกันทุกประการคือ มีสูตรทางเคมีดังนี้ $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ จะแตกต่างกันที่การเรียงซ้อนกับหน่วยของผลึก (crystal unit) เช่น อาจจะซ้อนกันเป็นแนวตั้งหรือเอียงไปทางซ้ายหรือเอียงไปทางข้างหน้า ซึ่งในการเรียงตัวแต่ละแบบนี้จะทำให้มีชื่อเรียกต่างกันไป

โครงสร้างของ kaolinite จะประกอบด้วยแผ่นซิลิกาหนึ่งแผ่นประกบกับแผ่นอะลูมิเนียมอีกหนึ่งแผ่น โดยที่ Si และ Al จะร่วมเกาะออกซิเจนตัวเดียวกันในด้านที่ประกบเข้าหากัน ทำให้แผ่นทั้งสองเชื่อมกันแน่น รวมเข้ากันเป็นผลึกของแร่ kaolinite โครงสร้างแบบนี้จึงเรียกได้อีกอย่างว่าเป็นโครงสร้างผลึกประเภท 1:1 ของแผ่นผลึก kaolinite นี้เป็นรูปหกเหลี่ยมมีขอบชัดเจน ซึ่งในธรรมชาติผลึกนี้จะเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ คล้ายๆ แผ่นแร่ mica ชั้นต่างๆนี้จะยึดกันแน่นไว้ด้วยแรงไฮโดรเจนบอนด์ (hydrogen bond) ดังนั้นช่องว่างระหว่างชั้นนั้นจะมีระยะห่างคงที่ ไม่สามารถขยายให้กว้างขึ้นหรือหด

ให้แคบลงได้ ช่องว่างระหว่างชั้นนี้อาจเรียกว่า หลืบ ระหว่างแผ่นผลึก(inter layer) ระยะทางที่วัดจากขอบบนของผลึกแผ่นบนจนถึงขอบบนของผลึกแผ่นล่างถัดลงมา ซึ่งรวมทั้งระยะกว้างของหลืบนั้น เรียกว่า basal spacing ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะผลึกของแต่ละชนิด สำหรับแร่ kaolinite นั้นมีค่า basal spacing เท่ากับ 7\AA หรือแองสตรอม (angstrom)

ไฮโดรเจนบอนด์ที่ยึดชั้นผลึกของแร่ kaolinite ไว้นั้น เกิดขึ้นระหว่างอะตอม O ของแผ่นซิลิกา กับ อะตอม H ของแผ่นอะลูมินาไม่มี H มีแต่ O ซึ่งตัวนี้จะถูกแทนที่ OH (ไฮดรอกซิล-hydroxyl) แรงยึดไฮโดรเจนบอนด์นี้ค่อนข้างเหนียวแน่นมาก จึงทำหลืบระหว่างแผ่นผลึกนั้นแคบและขยายออกไม่ได้ และทำให้โมเลกุลของน้ำและ cation ต่างๆ ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในหลืบนั้นได้ จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลึกของแร่ kaolinite นี้ไม่ขยายหรือหดตัวเมื่อเปียกน้ำและแห้ง ส่วนพื้นที่ผิวภายในหลืบ (internal surface) ก็ไม่มีประโยชน์ในการดูดซับน้ำหรือไอออนอื่นๆ ดังนั้นจึงถือได้ว่า แร่ kaolinite ไม่มี internal surface และมีแต่ external surface เท่านั้น คุณสมบัติทั่วไปของดินที่มีแร่ kaolinite มาก คือเมื่อดินเปียกน้ำจะมีความเหนียวน้อยแต่จะร่วนมาก เนื่องจากผลึกของ kaolinite มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมีการตัวกันแน่น อนุภาคของ clay จึงแตกร้าวและหักพังยาก ขนาดอนุภาคของ kaolinite จะโตกว่าแร่ดินเหนียวชนิดอื่นๆ กล่าวคือ ส่วนใหญ่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.2 ถึง 2 ไมครอน

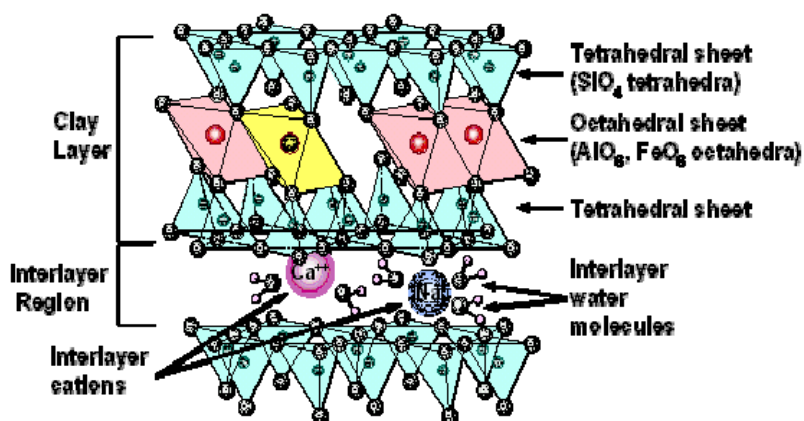


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแร่ดินเหนียว Kaolinite [6]

2.4.1.2 กลุ่มมอนมอริลโลไนท์ (montmorillonite) แร่ซิลิเกตที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ที่สำคัญได้แก่ montmorillonite, beidellite, nontronite, mica และ saponite ซึ่งแร่ montmorillonite จัดว่าสำคัญที่สุดเพราะพบมากในดินทั่วไป

โครงสร้างของแร่กลุ่มนี้ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่น และแผ่นอะลูมินา 1 แผ่น ซึ่งอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นซิลิกาทั้งสอง อะตอม Si และ Al ในแผ่นเหล่านั้นต่างก็เกาะยึด (share) อะตอม O ร่วมกัน ประกอบกันเป็นผลึกของแร่ montmorillonite เนื่องจากโครงสร้างของแร่กลุ่มนี้ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่น และแผ่นอะลูมินา 1 แผ่นจึงมักเรียกว่าเป็นโครงสร้างประเภท 2:1 ผลึกของแร่ นี้จะซ้อนกันเป็นชั้นๆ เช่นเดียวกับแร่ kaolinite แต่ต่างกันตรงที่หีบระหว่างชั้นผลึกอาจขยายกว้างหรือหดแคบลงได้ จึงทำให้แร่นี้มี basal spacing ไม่คงที่แน่นอน ตั้งแต่ 9-21 angstrom การที่หีบนี้มีระยะกว้างไม่คงที่ก็เนื่องมาจากไม่มีไฮโดรเจนบอนด์ระหว่างชั้นผลึกที่ซ้อนทับกันอยู่ เพราะทั้งด้านบนและด้านล่างของหีบนี้ (คือชั้นนอกสุดของซิลิกา) ต่างก็มีอะตอม O ของแผ่นซิลิกา จึงไม่เกิดไฮโดรเจนบอนด์ แต่จะเกิดแรงยึดเกาะระหว่างอะตอม O ด้วยกันแทน ซึ่งเป็นแรงยึดเกาะที่อ่อนมากจึงไม่สามารถยึดหีบระหว่างชั้นผลึกให้มีระยะคงที่ได้ คุณสมบัติของแร่ซิลิเกตกลุ่มนี้คือ เมื่อเปียกน้ำจะเหนียว โครงสร้างของผลึกไม่แข็งแรง จะแตกสลายได้ง่ายมาก ขอบผลึกจะฉีกง่ายจนไม่อาจเห็นขอบผลึกที่ชัดเจน อนุภาคแร่กลุ่มนี้มีขนาดเล็กมากระหว่าง 0.01-1 ไมครอน

แร่ซิลิเกตในกลุ่ม montmorillonite นี้จะมีสูตรโครงสร้างทางทฤษฎีเหมือนกันคือ $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ แต่จะต่างกันที่ปริมาณการถูกไลของอะตอม Si หรือ Al ในโครงสร้างของผลึกด้วยธาตุอื่นๆ ซึ่งเรียกการแทนที่แบบนี้ว่า isomorphous substitution



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของดินเหนียวชนิด Montmorillonite [6]

2.4.1.3 **กลุ่มอิลไลต์ (Illite)** แร่กลุ่มนี้มีโครงสร้างของผลึกคล้ายกับกลุ่ม montmorillonite โครงสร้างของแร่ Illite เป็นโครงสร้างประเภท 2:1 มี basal spacing ที่มีระยะคงที่คือ 10 แองสตรอม หลักระหว่างชั้นผลึกที่ซ้อนทับกันอยู่นี้มีระยะคงที่ไม่สามารถยืดเข้าออกได้ บางครั้งจึงเรียกแร่กลุ่มนี้ว่าเป็นประเภท non-expanding lattice (lattice หมายถึงชั้น) โครงสร้างแร่ Illite นั้นคล้ายกับแร่ mica มาก จะแตกต่างกันตรงที่ปริมาณการแทนที่ของ Si ด้วย Al ในแผ่นซิลิกานั้นมีน้อยกว่าของแร่ mica ดังนั้นจะมีผลทำให้ปริมาณประจุลบที่ตกค้างมีอยู่น้อยกว่าและมีปริมาณ K ที่เข้ามาทำให้ประจุสมดุลยนั้นน้อยกว่าด้วยสูตรโครงสร้างของ Illite คือ $K_{1.33}(Si_{6.68}Al_{1.33})Al_4O_{20}(OH)_4$ คุณสมบัติทั่วไปของ Illite จะอยู่ระหว่างคุณสมบัติของแร่กลุ่ม kaolinite และกลุ่ม montmorillonite

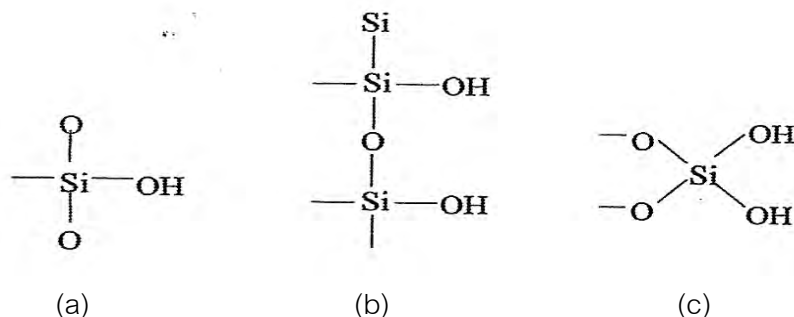
2.4.2 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำอื่นๆ โดยเฉพาะซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ซิลิกามีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ข้อดีของซิลิกาคือช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยางเช่น เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ลดความร้อนสะสม (Heat build up) เพิ่มความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance) และเพิ่มการยึดเกาะ (Adhesion) กับองค์ประกอบอื่นในยาง เป็นต้นในการใช้งานซิลิกานิยมใช้สารคู่ควบ (Coupling agents) เช่นสารประเภทไซเลน (Silane coupling agent) เคลือบผิวอนุภาคซิลิกาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัฏภาค ทำให้สมบัติของยางดีขึ้น

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ได้จากทั้งทางธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ สมบัติของซิลิกาขึ้นกับหลายปัจจัยได้แก่

- ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิว
- ปริมาณน้ำในโครงสร้าง (Extent of hydration)
- สมบัติทางกายภาพ เช่น pH, องค์ประกอบทางเคมี, การดูดซับน้ำมัน (Oil absorption) ฯลฯ

เนื่องจากซิลิกาประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจนจึงมีหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol groups, -Si-OH) ชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 2.5 บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำที่สามารถเกาะติดบนพื้นผิว และยังมีผลต่อความเป็นกรดบนพื้นผิวของซิลิกาอีกด้วย จากความมีขั้วหรือความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของซิลิกาทำให้สารตัวเติมชนิดนี้สามารถเสริมแรงได้ดีในยางที่มีขั้วเช่น ยางไนไตรล์ (NBR) หรือยางคลอโรพรีน (CR) มากกว่ายางที่ไม่มีขั้วเช่น ยางธรรมชาติ (NR) และยางเอสบีอาร์ (SBR) [4]



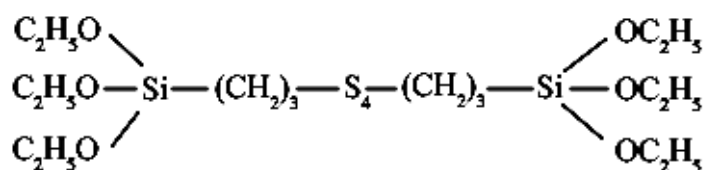
รูปที่ 2.5 หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลบนพื้นผิวซิลิกา (a) Isolated silanol group (b) Vicinal silanol group (c) Geminal silanol group

2.4.3 ถ้ำแกลบ (Rice husk ash)

ถ้ำแกลบเป็นของเหลือที่ได้จากการเผาของแกลบที่ได้จากโรงสีข้าวหรือจากการเผาแกลบอัดแท่ง โดยส่วนมากแกลบจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า และถ้ำที่ได้จากการเผาก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกมากมาย เนื่องมาจากในถ้ำของแกลบจะมีซิลิกาอยู่เป็นจำนวนมากและมีเขม่าดำเป็นส่วนประกอบด้วยซึ่งจะเรียกกันว่า Carbonaceous siliceous material โดยปริมาณของซิลิกาและเขม่าดำจะมากน้อยนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการเผาไหม้ นอกจากซิลิกาและเขม่าดำแล้วนั้น ในตัวของถ้ำแกลบยังมีสารอนินทรีย์ (Inorganic) จำนวนเล็กน้อยที่ไม่ระเหยจำพวกออกไซด์ของสารประกอบอัลคาไล (เช่นโพแทสเซียม, แมกนีเซียม, โซเดียม และแคลเซียม) โดยทั่วไปแล้วถ้ำแกลบจะมีซิลิกาอยู่ประมาณ 49-98% ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่เกาะอยู่ในโครงสร้างของซิลิกามีการวิจัยต่างๆมากมายที่พยายามนำถ้ำแกลบมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ [2] โดยนำถ้ำแกลบที่เป็นถ้ำจากการเผาไหม้แกลบในโรงไฟฟ้า 2 ลักษณะ คือ ปริมาณคาร์บอนมากและน้อย นำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นเช่น ทัลคัม (Talcum), ไชนาเคลย์ (China clay), แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซิลิกา และเขม่าดำ รวมทั้งศึกษาผลกระทบต่อตัวประสาน (Silane-69) ที่มีผลต่อคุณสมบัติของถ้ำแกลบที่เติมลงไป ในยางที่คงรูป ซึ่งจากการศึกษาพบว่าถ้ำแกลบทั้ง 2 ชนิด เมื่อใช้ในปริมาณสูงขึ้นจะช่วยลดเวลาที่ยางเริ่มคงรูป (Scorch time) และเวลาในการขึ้นรูป เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกล พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงในแนวขวาง (Tear strength) และค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) ใกล้เคียงกับแคลเซียมคาร์บอเนตและทัลคัม ในทางกลับกันถ้ำแกลบทั้ง 2 ชนิดจะมีค่าความต้านทานแรงดึงในแนวขวางและความแข็งที่ผิวต่ำกว่า ซิลิกา และเขม่าดำมาก

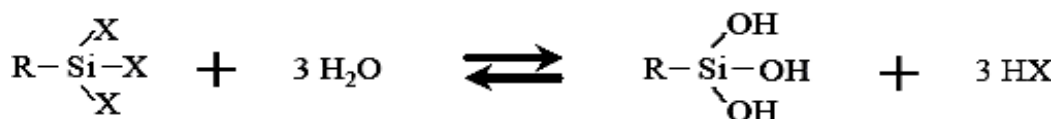
2.5 สารปรับสภาพผิวของสารตัวเติม (Silanes Coupling Agent)

ในส่วนของการศึกษาการปรับสภาพพื้นผิวของสารตัวเติม เราประยุกต์ใช้งานวิจัยจากการปรับสภาพผิวของเคลย์ [17] ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวจะเป็นการศึกษาถึงการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมโดยใช้ตัวประสาน silane coupling agent (Silane-69) ลงไปบดผสมกับสารตัวเติมหรือที่เรียกว่า Melt Mixing และการปรับสภาพผิวทางเคมีด้วย silane coupling agent บนผิวของ layered-silicate clays ซึ่งพบว่า วิธีการปรับสภาพผิวทางเคมีด้วย Silane-69 บนผิวของเคลย์ สามารถเสริมแรงให้กับยางได้ดีกว่าวิธีการนำ Silane-69 มาบดผสมกับแร่ดินเหนียว (Melt Mixing) โครงสร้างของตัวประสาน Silane-69 เป็นดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ Bis(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfane (Silane-69)

ตัวประสาน (Coupling agent) เป็นสารที่ช่วยปรับสภาพผิวให้เคลย์หรือซิลิกา ซึ่งมีสมบัติความมีขี้้ว (Hydrophilic) สามารถกระจายตัวได้ในพอลิเมอร์ที่มีสมบัติออร์แกโนฟิลิก (Organophilic) ตัวประสานที่นิยมใช้กับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) คือตัวประสานจำพวก Silane Coupling Agent โดยการเกิดปฏิกิริยาของ silane coupling agent แสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมี เป็น $\text{R}-\text{SiX}_3$ โดย R คือ กลุ่มของ Organofunction และ X คือ กลุ่มของ Hydrolyze ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นกลุ่มไฮดรอกซิล (Silanols) ในกระบวนการไฮโดไลซิส (Hydrolysis) ได้ โดย silane สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ที่บริเวณพื้นผิวของซิลิกาได้ดี ซึ่งในงานวิจัยนี้เราใช้ Silane 69 เป็นตัวประสาน



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยา Hydrolysis ของ Silane Coupling Agent

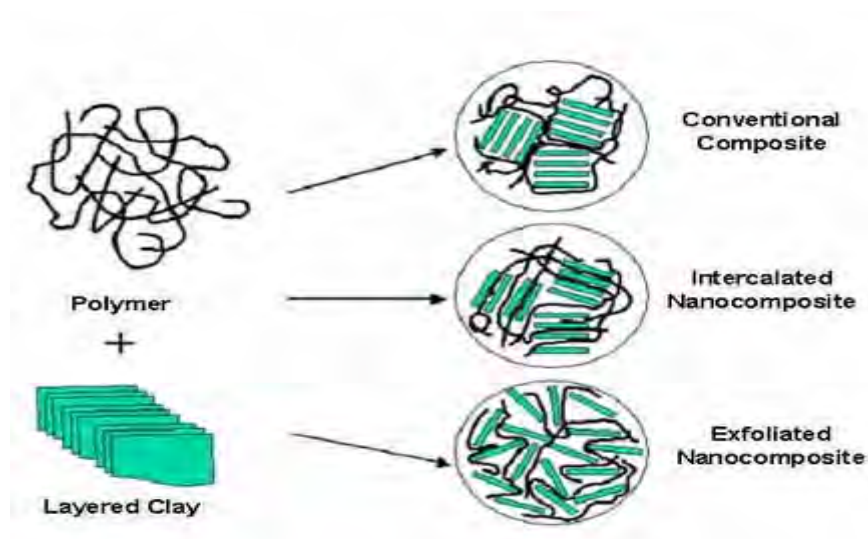
2.6 การกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง

ลักษณะการจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของสารตัวเติมที่มีขนาดระดับนาโนเมตร(10^{-9} m) เข้าไปในโพลิเมอร์หรือวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุมากกว่าสองชนิดขึ้นไป (Composite) อาจเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ ดังนี้

2.6.1 Conventional Composite คือการผสมของคอมโพสิตกับสารตัวเติมในระดับไมโครเมตรขึ้นไป

2.6.2 Nanocomposite ซึ่งเป็นการผสมที่ดีที่สุด ในขณะที่ โดยการผสมจะเกิดขึ้นในระดับนาโนเมตร ซึ่งสามารถแบ่งแยกได้ตามลักษณะการวางตัวของสารตัวเติม ดังนี้

- Intercalated Nanocomposite คือการวางตัวของสารตัวเติมเป็นชั้นในเมทริกซ์เหมือนตอนแรกเริ่มของการผสม แต่จะมีอนุภาคของคอมโพสิตแทรกอยู่ระหว่างชั้นของสารตัวเติมโดยที่ไม่ทำให้ชั้นของสารตัวเติมเกิดการแตกตัว
- Exfoliated Nanocomposite เป็นการผสมที่ทำให้เกิดการเพิ่มของคุณสมบัติต่างๆของคอมโพสิตดีมาก หรือเกิดการกระจายตัวสูงสุดของสารตัวเติมโดยสารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ จะเกิดการแตกตัวออกเพราะอนุภาคของคอมโพสิตที่เข้าไปแทรกระหว่างชั้น ทำให้เกิดการกระจายตัวของสารตัวเติมที่มีขนาดระดับนาโนเมตรไปทั่วเมทริกซ์อย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งทำให้เกิดการเสริมแรงในทุกทิศทาง



รูปที่ 2.8 ลักษณะการกระจายตัวของโพลิเมอร์คอมโพสิต

2.7 การบดผสม(Mixing)

เครื่องที่ใช้บดยางโดยทั่วไปมี 2 ระบบ คือ เครื่องบดระบบเปิด (open mill) หรือที่เรียกตามลักษณะของเครื่องว่า two roll mill หรือเครื่องบด 2 ลูกกิ้ง และเครื่องบดระบบปิด (internal mixer) ซึ่งมักเรียกตามชื่อยี่ห้อเครื่อง เช่น เครื่อง Banbury, Shaw intermix และ Kneader เป็นต้น [8]

2.7.1 การบดผสมโดยเครื่องบดแบบ 2 ลูกกิ้ง

ก่อนลงมือใส่ยางลงบด จะต้องปรับความกว้างของช่องระหว่างลูกกิ้ง (nip gap) ให้พอเหมาะกับปริมาณยาง และข้อสำคัญจะต้องปรับช่องระหว่างลูกกิ้งให้กว้างสม่ำเสมอทั้ง 2 ข้าง ผ่านยางลงในช่องระหว่างลูกกิ้ง ในตอนแรกอาจจะยังจับเป็นแผ่นจะมีลักษณะร่วนหล่นลงบนภาชนะที่รองอยู่ใต้ลูกกิ้ง (การร่วนมากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของยาง) เมื่อบดต่อไปยางจะเริ่มอ่อนนิ่มลงพอที่จะจับให้พันรอบลูกกิ้งได้ ความยากง่ายในการพันรอบลูกกิ้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของยาง สำหรับกรณีการบดยางธรรมชาติถ้าไม่ได้ผ่านการบดยางให้นิ่มมาก่อน (โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับยางธรรมชาติเกรดดี ๆ เช่น ยางแผ่นรมควันชั้น 1 ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางแท่ง STR5L เป็นต้น) ยางพันรอบลูกกิ้งยากมาก จำเป็นต้องบดให้นิ่มเสียก่อนจึงจะสามารถจับพันรอบลูกกิ้งได้ เมื่อยางเกาะพันรอบลูกกิ้งตอนแรก ๆ จะมีลักษณะไม่เรียบทั่วผิวลูกกิ้ง คือ จะมีช่วงขาดเป็นรูใหญ่ ๆ เมื่อบดต่อไปยางที่พันลูกกิ้งจะเริ่มเต็มผิวหน้าลูกกิ้ง และผิวเริ่มเรียบมากขึ้น ซึ่งขณะนี้จะเติมสารต่างๆ ลงบนกองยาง (bank) ที่อยู่เหนือช่องระหว่างลูกกิ้งได้ ระยะเวลาบดยางให้นิ่มก่อนที่จะเติมสารเคมี (กรณีการบดยางธรรมชาติ) นั้นขึ้นอยู่กับเกรดของยาง อุณหภูมิการบด

ขณะที่เติมสารเคมีลงผสมกับยาง จะมีส่วนสารเคมีลงบนภาชนะใต้ลูกกิ้งบด จะต้องคอยกวาดสารเคมีและใส่ลงบดผสมจนกระทั่งยางดูดสารเคมีเข้าไปผสมหมด ขณะการบดผสมช่วงเติมสารเคมีจะต้องใช้มีดตัดยาง (mill knife) กดลงข้างใดข้างหนึ่งของลูกกิ้งลูกหน้า และค่อยๆ เลื่อนการกดมีดมาตามแนวยาวของหน้าลูกกิ้งขณะที่กำลังหมุนอยู่ ม้วนยางที่ถูกตัดให้ยางที่ม้วนคงอยู่บนหน้าลูกกิ้ง สังเกตกองยางบนช่องระหว่างลูกกิ้ง เมื่อกองยางหมดไปจึงใส่ม้วนยางกลับคืนเข้าบดในลักษณะใส่หัวหรือท้ายของม้วนยาง ตัดยางด้วยวิธีดังกล่าวสลับซ้าย-ขวา ของลูกกิ้งลูกหน้าจนสังเกตว่าสารเคมีทั้งหมดได้ผสมคลุกเคล้าทั่วถึงในเนื้อยาง นำด้านหัวหรือท้ายของม้วนยางใส่ช่องระหว่างลูกกิ้งที่ตั้งไว้แคบจำนวนประมาณ 6 ครั้ง เพื่อให้สารเคมีต่างๆ เข้ากับเนื้อยางได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ จากนั้นจึงปรับช่องระหว่างลูกกิ้งให้กว้างออกตามความต้องการที่จะรีดยางขั้นสุดท้ายออกให้มีความหนาเท่าใด

2.7.2 การบดผสมยางโดยเครื่องบดระบบปิด

การบดผสมยางในเครื่องระบบปิดเป็นกระบวนการบดผสมแบบ Melt mixing ซึ่งเป็นกระบวนการบดที่ใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรม โดยทั่วไปจะใส่ยางลงไปบดก่อน โดยเฉพาะการใช้ยางธรรมชาติ จำเป็นต้องบดยางให้หิมก่อน แล้วจึงเติมสารเคมีต่างๆ ควรใส่สารพวกกระตุ้น สารตัวเติม สารทำให้ยางนิ่ม สารกันยางเสื่อม และสารตัวเร่ง ตามลำดับ ไม่ควรเติมสารตัวเติมพร้อมๆ กับสารพวกน้ำมัน เพราะจะทำให้ยางลื่น ทำให้การผสมคลุกเคล้ากับสารตัวเติมไม่ดี การบดผสมยางในเครื่องบดระบบปิดใช้เวลา 5-10 นาที ขึ้นอยู่กับเทคนิคการบดผสมและปริมาณสารตัวเติม นิยมเติมซัลเฟอร์ภายหลังการต้มฟุ้งยางผสมออกจากเครื่องบดระบบปิด โดยบดผสมซัลเฟอร์บนเครื่อง 2 ลูกกลิ้ง ทั้งเพื่อป้องกันยางตาย (scorch) และจะรีดยางให้ยางเป็นแผ่นขนาดที่เหมาะสมกับงานขึ้นรูปในขั้นต่อไปโดยใช้เครื่อง 2 ลูกกลิ้ง

2.8 การทดสอบ

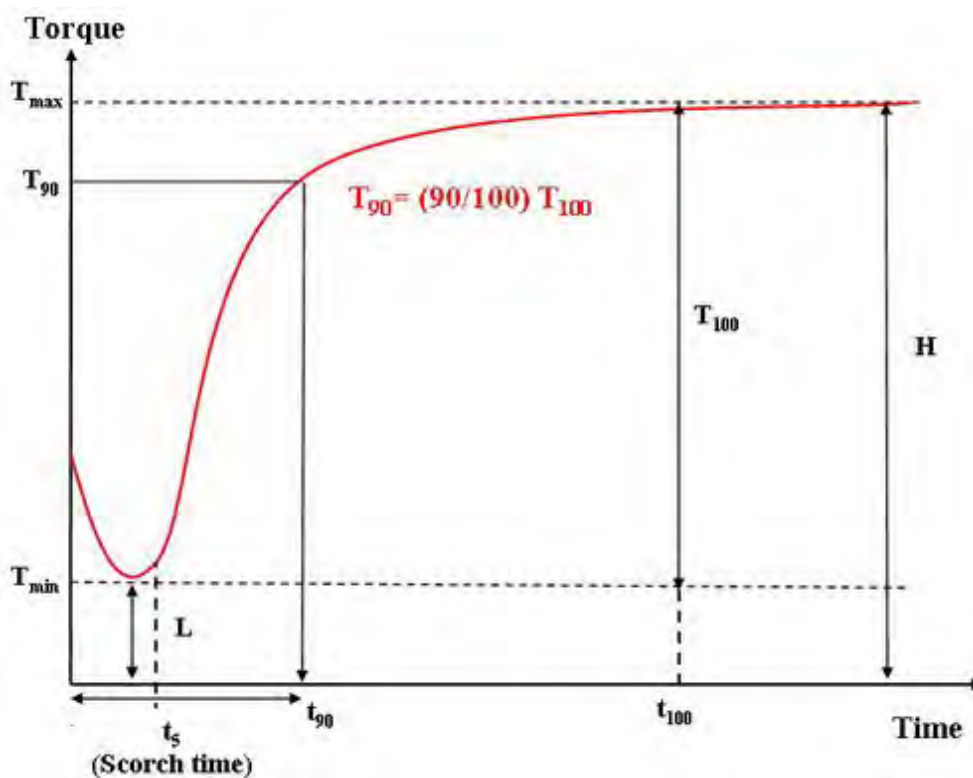
2.8.1 การทดสอบลักษณะการทำให้ยางคงรูป (Cure characteristics)

เมื่อสารเคมีทำปฏิกิริยากับยาง ยางก็จะแข็งขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสารเคมีทำปฏิกิริยากับยางจนสมบูรณ์ หมายถึง ยางเกิดวัลคาไนเซชัน 100% และเวลาที่ใช้ไปในการนี้เรียกว่า 100% vulcanization time หรือ 100% cure time แต่ในการปฏิบัติจริง พบว่า 100% cure time นานเกินไป และอาจทำให้สมบัติทางกายภาพบางอย่างของยางด้อยลงไป โดยเฉพาะในสูตรยางที่มีปริมาณซัลเฟอร์สูง ดังนั้นการทำให้ยางคงรูปจึงมักกระทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้นไปเพียง 90%, 95%, หรือ 98% ของความแข็งแรงสูงสุด ระยะเวลาดังกล่าวถึงถือเป็น 90%, 95%, หรือ 98% cure time ตามลำดับ และจะถือว่าเป็นระยะเวลาที่เหมาะสม (Optimum cure time) ในการทำให้ยางคงรูป การเลือกใช้เปอร์เซ็นต์การคงรูปและขนาดของชิ้นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เป็นปัจจัยในการพิจารณา ยางที่ได้รับความร้อนในระยะเวลาที่ต่ำกว่าเวลาที่เหมาะสม จะมีสมบัติทางกายภาพไม่ดี ความสามารถในการรักษารูปร่างน้อยเมื่อมีแรงมากระทำ แต่ถ้าหากยางได้รับความร้อนเกินเวลาที่เหมาะสมในระบบวัลคาไนเซชัน โดยเฉพาะระบบปกติ (Conventional) ยางอาจจะเริ่มสลายตัว ทำให้ยางเริ่มเสื่อมสภาพได้ง่าย

ในปัจจุบันเครื่องมือที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาลักษณะการคงรูปของยาง ได้แก่ เครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer) เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการวัดแรงต้านต่อการบิดของโรเตอร์ (Rotor) ที่มียางที่ผสมสูตรแล้วห่อหุ้มอยู่ ในตอนแรกเมื่อยางได้รับความร้อนยางจะเริ่มอ่อนตัว แรงที่ใช้การแกว่งของโรเตอร์มีน้อย แต่เมื่อยางเริ่มเกิดปฏิกิริยา โมเลกุลของยางมีการเชื่อมโยงเกิดขึ้น ความ

แข็งแรงมีเพิ่มขึ้น ทำให้แรงที่ใช้เพิ่มขึ้นตามลำดับ งามที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจะแสดงลักษณะอิลาสติซิตี (Elasticity) เพิ่มขึ้นด้วย ลักษณะการคงรูปของยางที่ได้มีประโยชน์ในการศึกษาสมบัติยางในเบื้องต้น ดังนี้

2.8.2 การคำนวณเวลาที่เหมาะสมในการทำให้ยางคงรูปที่อุณหภูมิที่กำหนด (Cure time)



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการคงรูปของยางที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา [9]

โดย T_{100} = ผลต่างของแรงบิดสูงสุด (T_{max}) และแรงบิดต่ำสุด (T_{min})

t_{100} = เวลาในการขึ้นรูปที่แรงบิดมีค่าสูงสุด (T_{max})

t_{90} = เวลาในการขึ้นรูปที่ผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดและค่าแรงบิดต่ำสุด (T_{min}) มีค่าเป็น 90% ของ T_{100}

t_5 = เวลาในการขึ้นรูปที่แรงบิดสูงกว่าแรงบิดต่ำสุด (T_{min}) 5% (Scorch time)

2.8.3 การหาเวลาที่ยางเริ่มคงรูปที่อุณหภูมินั้น ๆ (Scorch time)

โดยภาวะที่ยางเริ่มคงรูป เรียกว่า Scorch หรือคือ การที่ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน การทดสอบภาวะนี้จะเป็นแนวทางในการพิจารณาว่า ยางที่ผสมสารเคมีแล้วจะสามารถอยู่ในอุณหภูมิที่ดำเนินการผลิตได้นานเพียงใดโดยที่ยางจะไม่เกิดการเริ่มวัลคาไนส์ ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป (Shaping) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ยางที่ผสมสารเคมี ตัวเร่งและตัวกระตุ้นปฏิกิริยาจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาขึ้น ซึ่งจะใช้เวลาหนึ่ง อาจจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของตัวเร่งที่ใช้ ในขณะเดียวกันเมื่อยางได้รับความร้อน ตอนแรกยางจะมีการอ่อนตัวเล็กน้อย เมื่อผ่านเวลานี้ไปแล้ว สารเคมีจะเริ่มทำปฏิกิริยากับยาง เกิดพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้ยางเริ่มแข็งขึ้น เครื่องมือจะบันทึกผลของความแข็งแรง (Stiffness) ของยางที่เพิ่มขึ้น เวลาที่ยางเริ่มแข็งตัวอย่างเห็นได้ชัดเรียกว่า เวลายางเริ่มคงรูป (Scorch time) ซึ่งยางจะไหลยากขึ้น เมื่อปฏิกิริยาดำเนินต่อไป ยางจะแข็งขึ้นตามลำดับ

2.8.4 การหาค่าแรงบิดสูงสุดที่ยางเกิดการคงรูปอย่างสมบูรณ์ (T_{100})

ค่าแรงที่ยางเกิดการคงรูปสมบูรณ์ (T_{100}) ที่มีค่าสูงอาจมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของโครงสร้างร่างตาข่ายที่มากขึ้นหรือมีปริมาณของสารตัวเติมในชิ้นงานสูงขึ้นโดยอาจไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ที่อุณหภูมิห้อง

2.8.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

การทดสอบเชิงกล นิยมทดสอบกับยางที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแรง ความเค้น ความเครียด ความแข็ง การทนต่อการขีดถู การทนต่อการบีบอัด เป็นต้น ซึ่งวิธีทดสอบสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่จะทำตามมาตรฐาน ASTM (The American Society for Testing and Materials) ซึ่งเป็นที่นิยมและใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงอย่างแพร่หลาย

2.8.6 การทดสอบการเสื่อมสภาพ (Aging test)

ยางส่วนใหญ่จะเสื่อมสภาพในระหว่างการเก็บไว้หรือระหว่างการใช้งาน สาเหตุของการเสื่อมสภาพมีมากมายขึ้นกับชนิดของยางและสภาวะแวดล้อม การทำ Aging test ในการทดลองนี้ จะให้ความร้อนแก่ชิ้นยางที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 8

ชั่วคราว หลังจากนั้นจึงนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลของยางต่อไป เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของยางก่อนอบและหลังอบ

2.8.7 การทดสอบความร้อนสะสม (Heat build up test)

เมื่อยางได้รับแรงกระทำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและในขณะเดียวกัน ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปพลังงานด้วย พลังงานบางส่วน เปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อนเก็บสะสมไว้ในตัวยาง เรียกว่า ความร้อนสะสม ซึ่งจะส่งผลให้ยางมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่จะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของยางที่ผสมสารเคมี สถานะของการวัลคาไนซ์และลักษณะการทำให้ยางเปลี่ยนแปลงรูปร่างไป สมบัตินี้จำเป็นสำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทยางล้อ (type) สายพาน และยางพื้นลูกล้อ เป็นต้น เครื่องมือที่ใช้วัดความร้อนสะสมในยางที่นิยมใช้ คือเครื่อง Flexometer ซึ่งจะทำงานในลักษณะการใช้แรงกด แรงเฉือน หรือรวมทั้ง 2 อย่าง กระทำต่อชิ้นทดสอบ โดยใช้แรงในลักษณะ static และ dynamic [8]

2.8.8 การซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability) [1, 10]

สภาพการซึมผ่านของก๊าซ โดยเฉพาะอากาศผ่านยาง มีความสำคัญในกรณีที่ต้องการให้ยางเก็บก๊าซไว้ภายใต้ความดัน ไม่ว่าจะเป็นครูทหรือที่อุณหภูมิสูงก็ตาม ยางบิวทิลมีอัตราเร็วของการซึมผ่านก๊าซ (Permeability rate) ต่ำที่สุด ในบรรดายางทั้งหลาย และอุณหภูมิห้อง ยางซิลิโคนจะมีสภาพการซึมผ่านของก๊าซได้มากกว่ายางบิวทิลถึง 1,000 เท่า

วิธีมาตรฐานสำหรับวัดสภาพการซึมผ่านของก๊าซผ่านแผ่นยางบางๆ มี 3 วิธี คือ

วิธีที่ 1 ใช้ก๊าซที่มีความดันสูงและคงที่อยู่ทางด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบ และใช้ก๊าซชนิดเดียวกันที่มีปริมาตรเล็กๆ คงที่ ณ ความดันบรรยากาศอยู่อีกด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบ การซึมผ่านของก๊าซจะไปเพิ่มความดันของด้านนี้ (ISO 1399 ; BS 903 , Part A17)

วิธีที่ 2 ทำการทดสอบเช่นเดียวกับวิธีที่ 1 แต่ก๊าซทางด้านที่สองจะถูกเก็บรักษาให้ความดันคงที่ ดังนั้น ปริมาตรของก๊าซจะเพิ่มขึ้น (ISO 2782 ; BS 903 , Part A30)

วิธีที่ 3 ใช้ก๊าซทดสอบ (เช่น H_2) ทางด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบ และก๊าซอื่นเช่น (เช่น อากาศ) อยู่อีกด้านหนึ่ง ณ ความดันบรรยากาศทั้ง 2 ด้าน ความเข้มข้นของก๊าซทดสอบซึ่งซึมผ่านเข้าไปในอีกก๊าซจะถูกวัดไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง

สภาพการซึมผ่านของก๊าซคำนวณจาก steady state rate ของความดันซึ่งเพิ่มขึ้นในวิธีที่ 1 หรือของปริมาตรซึ่งเพิ่มขึ้นในวิธีที่ 2 หรือการเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซทดสอบในวิธีที่ 3 นอกจากนี้ยัง

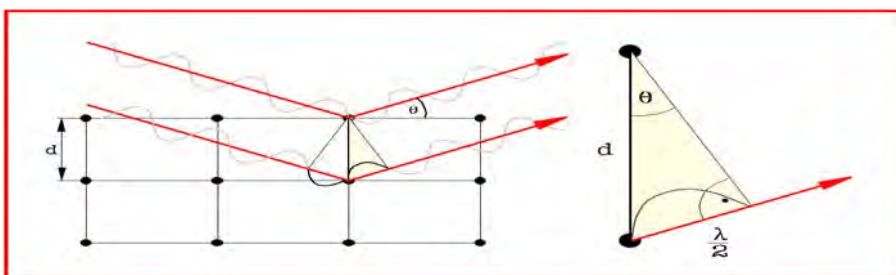
สามารถใช้ gas chromatography หรือ mass spectrometer ในการตรวจสอบ ซึ่งนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะที่ ต้องการความละเอียดสูง หรือต้องการความไวสูง เมื่อมีความแตกต่างของความดันไม่มากนัก วิธีนี้ยังสามารถใช้กับไอน้ำได้ด้วย

2.8.9 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD) [6]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงาน ตัวอย่าง โดยอาศัยปรากฏการณ์ X-ray diffraction (ปรากฏการณ์ที่รังสีเอกซ์เลี้ยวเบนจากวัตถุใดๆ) นักฟิสิกส์ได้ทำการทดลองผ่านรังสีเอกซ์เข้าไปในผลึก และพบว่า จะเกิด diffraction pattern ขึ้นหากใช้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับระยะห่างของอะตอมภายในผลึก

เมื่อนำรังสีเอกซ์มาฉายลงบนผลึกที่ต้องการศึกษา ลำรังสีส่วนใหญ่ผ่านผลึกไปโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง บางส่วนสะท้อนและกระจายออกไปในหลายทิศทางและเป็นรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่อง มุมของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนออกมาจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับขนาด รูปร่าง และสมมาตรของหน่วยเซลล์ และเมื่อผลึกถูกหมุนรูปแบบดิฟแฟรคชันจะเปลี่ยนไป นั่นคือการหมุนผลึกจะทำให้ได้ข้อมูลจากการดิฟแฟรคชันเพิ่มขึ้น โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg

รังสีเอกซ์จะทำอันตรกิริยากับกลุ่มของอิเล็กตรอนของอะตอมบนระนาบและกระเจิงออกไป แบรกก์พิสูจน์ได้ว่าความเข้มของรังสีที่กระเจิงออกไปจะไม่เป็นศูนย์เมื่อ ทิศที่รังสีกระเจิงออกไปทำมุม θ กับระนาบของอะตอมนั้น ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงทิศการกระเจิงของรังสีเอกซ์จากระนาบของอะตอม 3 ระนาบซึ่งให้ความเข้มไม่เป็นศูนย์เนื่องจากการแทรกสอดแบบเสริมสร้างกัน

$$\text{จะได้ความสัมพันธ์} \quad 2d \sin\theta = n\lambda \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ d คือระยะห่างระหว่างระนาบ

θ คือมุมสะท้อนจากระนาบของอะตอมซึ่งเท่ากับมุมตกกระทบ

λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่ากระบวนการนี้คล้ายกับการสะท้อนของแสงบนกระจกเงาระนาบ โดยรังสีเอกซ์จะเปลี่ยนทิศทางไปเป็นมุม 2θ

แบรกก์ ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไว้ว่า “รังสีเอกซ์ที่สะท้อนออกจากระนาบชุดหนึ่งๆ จะแทรกสอดแบบเสริมสร้างกัน เมื่อระยะทางที่แต่ละลำรังสีที่ตกกระทบบนต่างระนาบกันนั้นมีความแตกต่างกันเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์”

จากสมการของแบรกก์จะเห็นว่าค่าความยาวคลื่นมีผลต่อทิศทางการสะท้อน ดังนั้นการเลือกใช้ความยาวคลื่นที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็น สำหรับงานด้านการศึกษาโครงสร้างของผลึกนิยมใช้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่น 1.542 อังสตรอม ($\text{CuK}\alpha$) และ ($\text{MoK}\alpha$)

เมื่อได้ค่า θ จะทำให้สามารถคำนวณหาค่า d ได้ตามสมการของแบรกก์และจะสามารถบอกชนิดของสารประกอบที่ทำการทดสอบได้โดยการนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Power Diffraction Standard)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Magaraphan และคณะ (2003) [11] ได้ศึกษาการปรับปรุงสภาพผิวของแร่ดินเหนียวประเภท montmorillonite ด้วย primary amine และ quaternary amine ซึ่งมีความยาวของโซ่คาร์บอน 12 ถึง 18 ตัว และสามารถทำให้เกิดนาโนคอมโพสิตแบบ exfoliated ได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใส่แร่ดินเหนียว montmorillonite ในปริมาณต่ำกว่า 10 phr โดย primary amine สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวของแร่ดินเหนียวได้ดีกว่า quaternary amine และเมื่อความยาวของโซ่คาร์บอนเพิ่มขึ้นจะทำให้การกระจายตัวของแร่ดินเหนียวดีขึ้น ซึ่งการกระจายตัวที่ดีขึ้นทำให้คุณสมบัติเชิงกลดีขึ้นด้วย

Arroyo และคณะ (2003) [12] ศึกษาผลของการใช้ octadecylamine ในการปรับปรุงสภาพผิวของ แร่ดินเหนียว Montmorillonite ต่อคุณสมบัติของยางธรรมชาติ พบว่าเมื่อใช้แร่ดินเหนียว Montmorillonite ที่ปรับปรุงแล้ว(organoclay) ในปริมาณ 10 ส่วนในยาง 100 ส่วน (10 part per hundred of rubber –phr.) ทำให้ความแข็งแรง (Tensile Strength) ของยางดีกว่ายางที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คปริมาณ 40 phr

Teh และคณะ (2004) [13] พบว่าการการเติมยางธรรมชาติแบบ epoxidized (ซึ่งทำให้ยางมีขี้วมมากขึ้น) ลงไปบดผสมรวมกับยางแท่งจะช่วยให้เกิดการกระจายตัวของ organoclay ได้ดียิ่งขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติแบบ epoxidized จะทำให้ organoclay มีการกระจายตัวแบบ epoxidized และจะทำให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นมาก

Sae-oui และคณะ (2002) [2] ได้นำเอาแก้ว 2 ลักษณะ คือ ปริมาณ Carbon มากและน้อย นำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสารเติมแต่งชนิดอื่นเช่น talcum, china clay, แคลเซียม คาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ศึกษาผลกระทบของตัวประสาน (Si-69) ที่มีผลต่อคุณสมบัติของแก้วที่เติมลงไปใยางที่คงรูป ซึ่งจากการศึกษาพบว่าแก้วทั้งสองทั้ง 2 ชนิด เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกลแล้วมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับสารตัวเติมจำพวกซิลิกาและเขม่าดำ แต่อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ก็ยังไม่ดีเท่าสารตัวเติมทั้งสองชนิดนี้ แต่คุณสมบัติเชิงกลของยางที่มีแก้วเป็นสารตัวเติมมีคุณสมบัติที่ดีกว่าสารตัวอื่น ๆ ที่นำมาทดสอบ โดยในส่วนของตัวประสานถือว่ามีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อแก้วที่เติมลงไปซึ่งดูเหมือนว่าอาจจะเกิดจากการที่ขาดหมู่ silanol ที่ผิวของแก้ว

Da Costa และคณะ (2002) [14] ศึกษาสมบัติของยางที่ใช้แก้วเป็นสารตัวเติม เนื่องจากแก้วมีองค์ประกอบหลักคือซิลิกา ซึ่งใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน การใช้แก้วเป็นสารตัวเติมจะทำให้ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและระยะเวลาในการวัลคาไนซ์สั้นลง ความแข็งแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการสึกหรอมีค่าลดลง แต่มอดูลัสและความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณแก้วเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเติมสารคู่ควบไซเลนจะช่วยให้ความแข็งแรงดึง มอดูลัส และความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

Soo-Jin และ Ki-Sook (2003) [15] การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ไม่ใช่สีดำที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุด ซิลิกามีขนาดเล็กพื้นที่ผิวมาก การผสมกับยางทำได้ไม่่ง่ายนัก การผสมจะใช้เวลานานกว่าปกติ ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการแตกตัวได้ ทำให้คุณสมบัติของยางตกลง ดังนั้นการผสมยางกับ ซิลิกาจึงใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer) ผิวของซิลิกามีพันธะไฮโดรเจน จะเกิดการดูดสารตัวเร่งที่ผิวของซิลิกาได้ทำให้ยางวัลคาไนซ์ช้าลง โดยทั่วไปแล้วซิลิกาจะมีขนาดเล็ก จึงทำให้ความแข็งแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาดมีค่าใกล้เคียงกับคาร์บอนแบล็ค แต่ความทนการสึกหรอและมอดูลัสต่ำกว่าที่ใช้คาร์บอนแบล็ค เพราะซิลิกามีผิวเป็นสารอินทรีย์มาก ทำให้มีแรงยึดกับยางไม่แน่น จึงได้เติมสารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) จะช่วยให้การยึดกันระหว่างสารตัวเติมกับยางดีขึ้น ทำให้

สมบัติเชิงกลดีขึ้นด้วย วิธีใช้สารคู่ควบไซเลนทำได้โดยผสมสารตัวเติมกับสารคู่ควบไซเลนแล้วจึงค่อยผสมกับยาง หรืออาจเอาสารคู่ควบไซเลนใส่เข้าไปในยางขณะผสมกับสารตัวเติมก็ได้

Liang และคณะ (2005) [16] ศึกษาการปรับปรุงยางบิวทิลโดยใช้เคลย์ในการคอมโพสิต ถูกเตรียมด้วยวิธีทำเป็นสารละลายหรือวิธีการบดผสม และการกระจายตัวของชั้นเคลย์ ซึ่งโครงสร้างยางนาโนคอมโพสิตที่ผลิตได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย (TEM) และ XRD จากภาพถ่ายTEM จะจำแนกประเภทของยางคอมโพสิตว่าเป็นแบบ Intercalate หรือ Exfoliate และขนาดของชั้นเคลย์ในการคอมโพสิตด้วยวิธีแบบสารละลายจะใหญ่กว่าแบบบดผสม การวิเคราะห์ XRD หา d-spacing ของชั้นเคลย์ จะเพิ่มจาก 2.2 เป็น 4.2 nm เมื่อมีการคอมโพสิต แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวได้ดีในชั้นเคลย์ โดยเปรียบเทียบยางไมโครคอมโพสิต และการวัลคาไนซ์ของยางบิวทิล การเตรียมยางนาโนคอมโพสิต แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติเชิงกล และการป้องกันในการซึมผ่านของก๊าซได้ดี ซึ่งเป็นเหตุมาจากมีการกระจายตัวในระดับนาโนเมตร และสัดส่วนที่สูงของชั้นเคลย์ นอกจากนี้คุณสมบัติของยางนาโนคอมโพสิตที่เตรียมโดยวิธีทำเป็นสารละลายมีการกระจายตัวได้ดีกว่าแบบบดผสม

Netrupkana และ Pattamaprom (2005) [17] ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติโดยวิธีนาโนเทคโนโลยี ด้วยการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมโดยใช้ตัวประสาน (Silane-69) ลงไปบดผสมกับสารตัวเติม หรือที่เรียกว่า Melt Mixing และการปรับสภาพผิวทางเคมีด้วย silane บนผิวของ layered-silicate clays ซึ่งพบว่าวิธีการปรับสภาพผิวทางเคมีด้วย silane บนผิวของ clay สามารถเสริมแรงให้กับยางได้ดีกว่าวิธีการนำ silane มาบดผสมกับแร่ดินเหนียว (Melt Mixing)

Wang และคณะ (2005) [18] ศึกษาถึงการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในงานในทางวิศวกรรมบางประเภท นอกจากจะต้องพิจารณาถึงสมบัติเชิงกลแล้ว ยังต้องคำนึงถึงสมบัติเชิงพลวัตอีกด้วย โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานภายใต้สภาวะที่มีแรงกระทำหรือเกิดการเปลี่ยนรูปร่างเป็นรอบ ๆ ที่ความถี่ต่าง ๆ ซึ่งผลิตภัณฑ์ยางดังกล่าวได้แก่ ยางรถยนต์ ยางรถ forklift และยางกันสะเทือนต่าง ๆ เป็นต้น สมบัติเชิงพลวัตของยางคือสมบัติของยางเมื่อได้รับความเค้นหรือความเครียดที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เนื่องจากยางมีสมบัติเป็น viscoelastic ดังนั้นสมบัติเชิงพลวัตของยางจึงประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนที่เป็น elastic เช่น elastic modulus และส่วนที่เป็น viscous ซึ่งจะวัดในรูปของ loss modulus และ tan δ องค์ประกอบส่วนหลังนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์ เพราะถ้ายางมีความเป็น viscous สูงก็จะทำให้เกิดความร้อนขณะใช้งานสูงเช่นกัน ส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางได้ง่าย ซึ่งจะเห็นได้ชัดในผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ เช่นยางรถ Forklift เป็นต้น ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะศึกษาผลของ silane coupling agent และระบบการวัลคาไนซ์ 3 ระบบ (ระบบ conventional vulcanisation(CV) ระบบ semi-efficient vulcanisation (semi-EV) และ

ระบบ efficient vulcanisation(EV)) ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัตของยางธรรมชาติ (NR) ที่ได้รับการเสริมแรงด้วยซิลิกา นอกจากนี้ยังศึกษาผลของขนาดของความเครียดและความถี่ต่อสมบัติเชิงพลวัตของยาง ดังกล่าวอีกด้วย โดยหวังไว้ว่าผลการทดลองอาจจะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สามารถใช้ในการปรับปรุงสมบัติบางประการของยางรถยนต์หรือยางรถ Forklift ได้ เช่น การลดความร้อนที่เกิดขึ้นขณะใช้งานหรือการลดค่าความต้านทานต่อการหมุน เป็นต้น

Amornsakchai (2007) [19] ศึกษาถึงโพลีเมอร์กลุ่มหนึ่งที่มีความจำเป็นมากสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง มีความอ่อนตัว หรือนุ่ม ให้การสัมผัสที่ดี ไม่กระด้าง โดยทั่วไปแล้วยางธรรมชาติมีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สต่ำกว่ายางบิวทิลมาก ดังนั้นหากสามารถเพิ่มความสามารถในการกักเก็บแก๊สของยางธรรมชาติให้สูงขึ้นกว่าเดิม หรือสูงขึ้นจนถึงระดับที่เทียบเท่ากับบิวทิลก็จะทำให้มีการประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติในงานตามที่กล่าวข้างต้นมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ จะศึกษาการพัฒนาของยางธรรมชาติที่มีการซึมผ่านของแก๊สต่ำ โดยใช้เคลย์ ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ให้กระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่เป็นยางธรรมชาติ โดยหลักการ โมเลกุลของแก๊สไม่สามารถซึมผ่านอนุภาคของเคลย์ได้ ดังนั้นโมเลกุลของแก๊สจะต้องเคลื่อนที่อ้อมแผ่นเคลย์ เพื่อไปยังด้านที่มีแรงดันต่ำกว่า ระยะทางที่โมเลกุลต้องเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นนี้ เปรียบเสมือนว่า โมเลกุลต้องเคลื่อนที่ผ่านผนังที่มีความหนาเพิ่มมากขึ้น จึงสามารถกักเก็บแก๊สได้นานมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การที่จะนำเคลย์มาใช้ประโยชน์ในลักษณะนี้นั้น จะต้องกระจายเคลย์ออกให้มีลักษณะเป็นแผ่น (exfoliated structure) มากที่สุด และจะต้องทำให้แผ่นเคลย์เรียงตัวอยู่ในแนวขนานกับพื้นผิวมากที่สุด จึงจะสามารถป้องกันการซึมผ่านได้ดีที่สุด การทำให้อนุภาคเคลย์มีลักษณะดังกล่าวนี้ ถือเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของโครงการ โดยจะเลือกใช้น้ำยางธรรมชาติ และใช้เคลย์เกรดการค้า เพื่อให้ได้ยางธรรมชาติ-เคลย์นาโนคอมโพสิตที่มีค่าการซึมผ่านของแก๊สอย่างน้อยครึ่งหนึ่งของยางธรรมชาติปกติ จนถึงระดับที่มีค่าการซึมผ่านของแก๊สใกล้เคียง หรือเทียบเท่ากับยางบิวทิลสังเคราะห์ ยางธรรมชาติ-เคลย์นาโนคอมโพสิตที่ได้นี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์กีฬาประเภทลูกบอลต่าง ๆ ยางในสำหรับล้อจักรยานยนต์ หรือจักรยาน เป็นต้น

Rattanasom และคณะ (2007) [20] ได้ศึกษาการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยซิลิกาและคาร์บอนแบล็ค โดยใช้ซิลิกาและคาร์บอนแบล็คเป็นสารตัวเติมช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติสมบัติไดนามิกส์ของยางธรรมชาติ ซึ่งจะเปรียบเทียบอัตราส่วนของซิลิกากับคาร์บอนแบล็คให้เห็นถึงคุณสมบัติต่างๆที่เหมาะสมอย่างเห็นได้ชัด ในงานวิจัยนี้การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยซิลิกาและคาร์บอนแบล็คที่อัตราส่วนต่างๆ ซึ่งจะศึกษาปริมาณซิลิกากับคาร์บอนแบล็คที่เหมาะสมที่สุดในปริมาณของสารตัวเติมที่ใช้ทั้งหมดแบบร้อยละ 50 phr โดยคุณสมบัติเชิงกลแสดงให้เห็นถึงการเสริมแรง

ธรรมชาติ เช่น ในด้านการทนทานต่อแรงดึง การฉีกขาด การขีดถู การแตกหัก และการลดความสะสมของยาง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการวัลคาไนซ์ของยางในอัตราส่วน 20:30 และ 30:20 ของซิลิกาและคาร์บอนแบล็คจะมีคุณสมบัติเชิงกลดีกว่ากรณีอื่นๆทั้งหมด ในทางกลับกันพบว่าการผสมยางคอมโพสิตที่ 20 phr ของซิลิกาจะเหมาะสมกว่าที่ 30 phr ของซิลิกา เนื่องจากปริมาณคาร์บอนแบล็คที่สูงกว่าจะทำให้เข้ากับยางธรรมชาติได้ง่ายกว่าซิลิกา

ตารางที่ 2.2 สรุปความแตกต่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

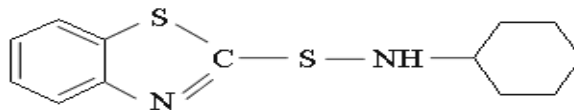
ผู้วิจัย	โพลีเมอร์	สารตัวเติม	Coupling agent	วิธีผสม	คุณสมบัติเด่น
Magaraphan และคณะ (2003)	น้ำยางธรรมชาติ	clay	primary amine และ quaternary amine	วิธีทำเป็นสารละลาย (Solvent)	primary amine กระจายตัวได้ดีกว่า quaternary amine
Arroyo และคณะ (2003)	ยางแท่งธรรมชาติ	clay และ คาร์บอนแบล็ค(CB)	ใช้Octadecylamine ปรับสภาพผิวให้เป็น organoclay	Melt mixing	การทนต่อแรงดึงเมื่อเติม organoclay 10 phr ดีกว่า CB 40 phr
Teh และคณะ (2004)	ยางแท่งธรรมชาติ	organoclay	-	Melt mixing	ใส่ organoclay ทำให้สมบัติเชิงกลดี
Sae-oui และคณะ(2002)	ยางแท่งธรรมชาติ	เถ้าแกลบ ซิลิกาและ คาร์บอนแบล็ค(CB)	ปรับสภาพผิวเถ้าแกลบ ด้วย Silane-69	Melt mixing	เมื่อเติมเถ้าแกลบมีผลใกล้เคียงกับซิลิกาและ CB
Soo-Jin และ Ki-Sook (2003)	ยางแท่งธรรมชาติ	ซิลิกา	silane	Melt mixing	สมบัติเชิงกลดีกว่าเมื่อเติมCB
Liang และคณะ (2005)	ยางบิวทิล	clay	-	Solvent และ Melt mixing	วิธี Solvent ลดการซึมผ่านก๊าซดีกว่าวิธี Melt mixing
Netrpukana และ Pattamaprom (2005)	ยางแท่งธรรมชาติ	clay	Silane-69	silylation และ Melt mixing	วิธี silylation สมบัติเชิงกลดีกว่าวิธี Melt mixing
Wang และคณะ (2005)	ยางแท่งธรรมชาติ	ซิลิกา	Silane	Melt mixing	เมื่อเติมซิลิกาเพิ่มขึ้น ความร้อนสะสมของยางลดลง
Amornsakchai (2007)	ยางแท่งธรรมชาติ	organoclay	-	Melt mixing	ยางใส่ organoclay การซึมผ่านของก๊าซใกล้เคียงยางบิวทิล

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

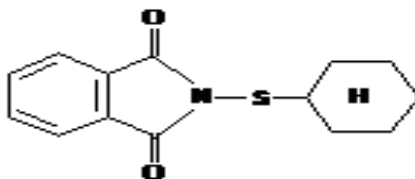
3.1 วัสดุและสารเคมี

- 3.1.1 ยางมาสเตอร์แบทช์ ได้รับความอนุเคราะห์จากห้างหุ้นส่วนจำกัด ป. สยาม-อุตสาหกรรมยาง
- 3.1.2 แร่ดินเหนียว (Clay) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ลัคกี้ ยูเนียน จำกัด
- 3.1.3 แก้วเกลบ ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงไฟฟ้าอ้อยบางปะกง จ.ฉะเชิงเทรา
- 3.1.4 ซิลิกา(CN-180) และ Bis(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfane (Silane - 69) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ซันนี่ เวิลด์ จำกัด
- 3.1.5 ซิงค์ออกไซด์ และกำมะถัน (Sulfur) ได้รับความอนุเคราะห์จากห้างหุ้นส่วนจำกัด ป. สยามอุตสาหกรรมยาง
- 3.1.6 N-oxydiethylene-2-benzothiazyl sulfonamide (MOR หรือ CBS) ได้รับความอนุเคราะห์จากห้างหุ้นส่วนจำกัด ป. สยามอุตสาหกรรมยาง ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังนี้



รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของ CBS

- 3.1.7 N-(Cyclohexylthio)phthalimide (PVI) ได้รับความอนุเคราะห์จากห้างหุ้นส่วนจำกัด ป. สยามอุตสาหกรรมยาง ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังนี้



รูปที่ 3.2 ลักษณะโครงสร้างของ PVI

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องบดผสมยาง ชนิดลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) ขนาด 8x20 นิ้ว รุ่น R11-3FF โดยบริษัท Kodiara Seisakusho CO,LTD, Tokyo, Japan
- 3.2.2 เครื่องอัดขึ้นรูปยาง (Vulcanising press) ชนิดเครื่อง 500 รหัส 20 535 โดยโรงงานชัยเจริญการช่าง
- 3.2.3 เครื่อง Oscillating Disc Rheometers (ODR) ยี่ห้อ rheoTECH บริษัท Techpro, Inc. ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D-2084
- 3.2.4 เครื่องตัดตัวอย่างยางแบบใช้กำลังลม โดยบริษัท Intro enterprise CO, LTD.
- 3.2.5 เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Instron รุ่น 1011 ตามมาตรฐาน ISO 37
- 3.2.6 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer transducer type A รุ่น PN 71500 โดยบริษัท Shore instrument & FMG. CO., New York, USA ตามมาตรฐาน ASTM D2240
- 3.2.7 อุปกรณ์ทดสอบการกดอัด (Compression set) ตามมาตรฐาน ASTM D395 (B)
- 3.2.8 เครื่องทดสอบความร้อนสะสม Goodrich FlexometerตามมาตรฐานASTMD623 (A)
- 3.2.9 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ Illinois 8000 ตามมาตรฐาน ASTM D3985-02
- 3.2.10 ตะแกรง (sieve) ขนาด 75 ไมครอน
- 3.2.11 เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Mastersizer MS2000) รุ่น APA2000
- 3.2.12 เครื่องวัดพื้นที่ผิวอนุภาค โดยบริษัท BEL Japan, Inc.
- 3.2.13 เครื่องทดสอบปริมาณองค์ประกอบธาตุ XRF ยี่ห้อ Philips PW2404
- 3.2.14 เครื่องวิเคราะห์ความเป็นผลึก X-RAY Diffractometer ยี่ห้อ JEOL – JDX 3530

3.3 ขั้นตอนและการวิจัย

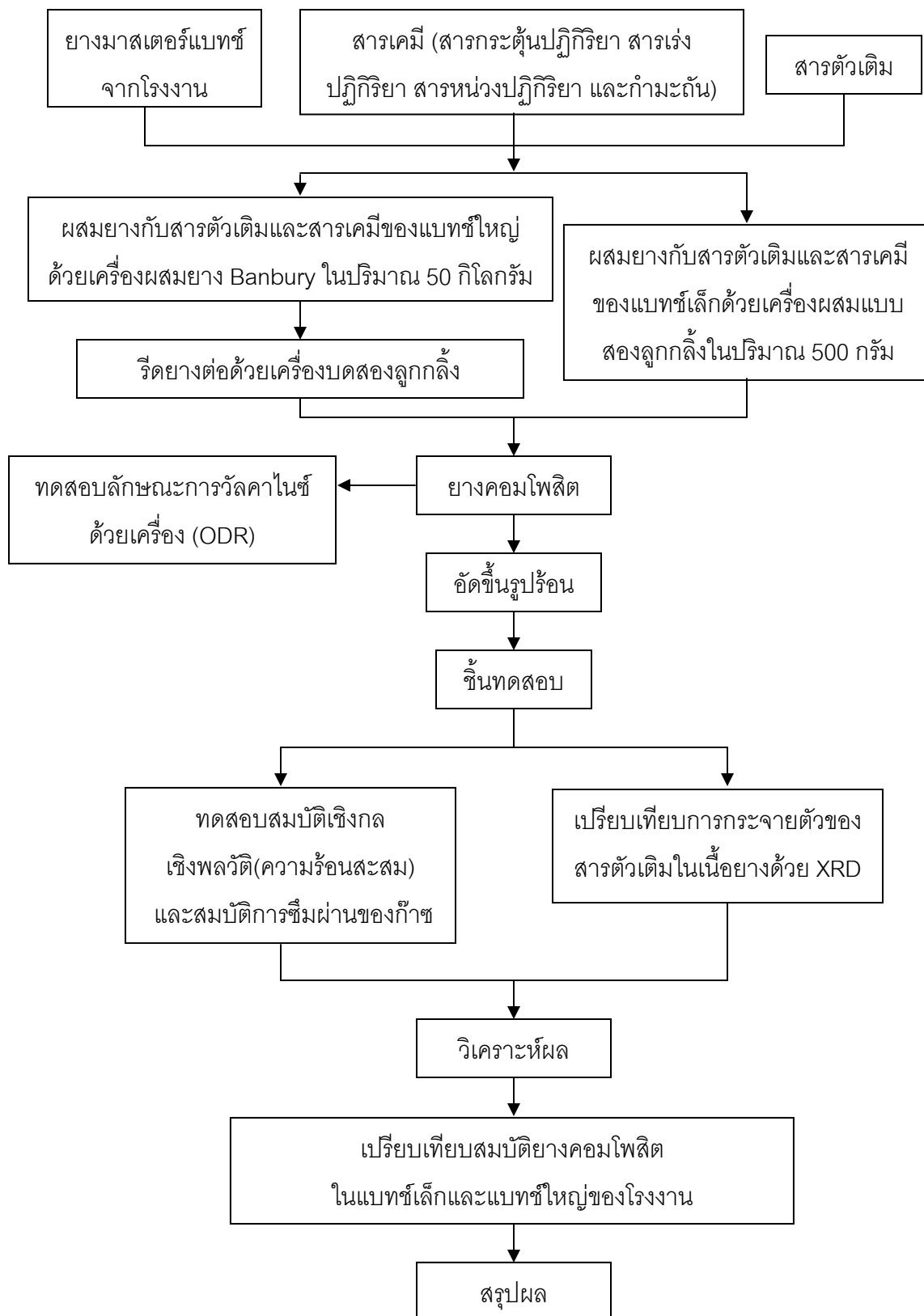
งานวิจัยเรื่องการปรับปรุงการซึมผ่านของก๊าซและการลดความร้อนสะสมของยางมาสเตอร์แบทช์ ด้วยเคลย์และเถ้าแกลบสำหรับอุตสาหกรรมยางล้อรถ ประกอบด้วย 2 กิจกรรมหลักคือ

กิจกรรมที่ 1 การเตรียมยางคอมพอสิตจากยางมาสเตอร์แบทช์และสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดคือเคลย์ เถ้าแกลบ และซิลิกาในปริมาณ 3 5 7 และ 10 phr และผสมเคลย์กับเถ้าแกลบรวมกันในปริมาณ 10 phr ที่อัตราส่วน 0:10 3:7 5:5 7:3 และ 10:0 โดยนำยางมาผสมกับสารตัวเติมแต่ละชนิดในปริมาณ อัตราส่วนที่ต่าง ๆ กันกับสารเคมีด้วยเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้ง และอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ร้อน

กิจกรรมที่ 2 การศึกษาและวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเกี่ยวกับลักษณะการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงพลวัต (ความร้อนสะสม) สมบัติการซึมผ่านของก๊าซ และความสม่ำเสมอของเนื้อยางคอมพอสิตที่เตรียมจากกิจกรรมที่ 1 เพื่อศึกษายางคอมพอสิตที่มีสูตรคุณสมบัติที่ดีที่สุด โดยจะเน้นสมบัติลด การซึมผ่านของก๊าซและลดความร้อนสะสมของยางคอมพอสิตเป็นหลัก แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผล การทดลองที่บดผสมในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงอยู่ในรูปที่ 3.3

3.4 การวิเคราะห์สารตัวเติม

สารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ เคลย์ ซิลิกา และเถ้าแกลบ แต่จะต้อง นำเถ้าแกลบไปกรองด้วยตะแกรง (sieve) ขนาด 75 ไมครอน เพื่อให้ได้อนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบ ใกล้เคียงกัน จากนั้นนำสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดไปทดสอบหาสมบัติต่างๆ ได้แก่ องค์ประกอบในรูปของ ออกไซด์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) วัดขนาดอนุภาคเฉลี่ยด้วยเครื่องวัด ขนาดอนุภาค (Laser particle size analyzer) ทดสอบความเป็นผลึกของสารตัวเติมด้วยเครื่อง X-RAY Diffractometer (XRD) และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของสารตัวเติมแต่ละชนิดด้วยเครื่องวัด BET แสดงอยู่ในภาคผนวกดังรูปที่ ค1-ค4



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 เตรียมสารที่จะใช้ในการบดยาง ซึ่งมีปริมาณสาร ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สูตรผสมของยางที่ใช้ในงานวิจัย

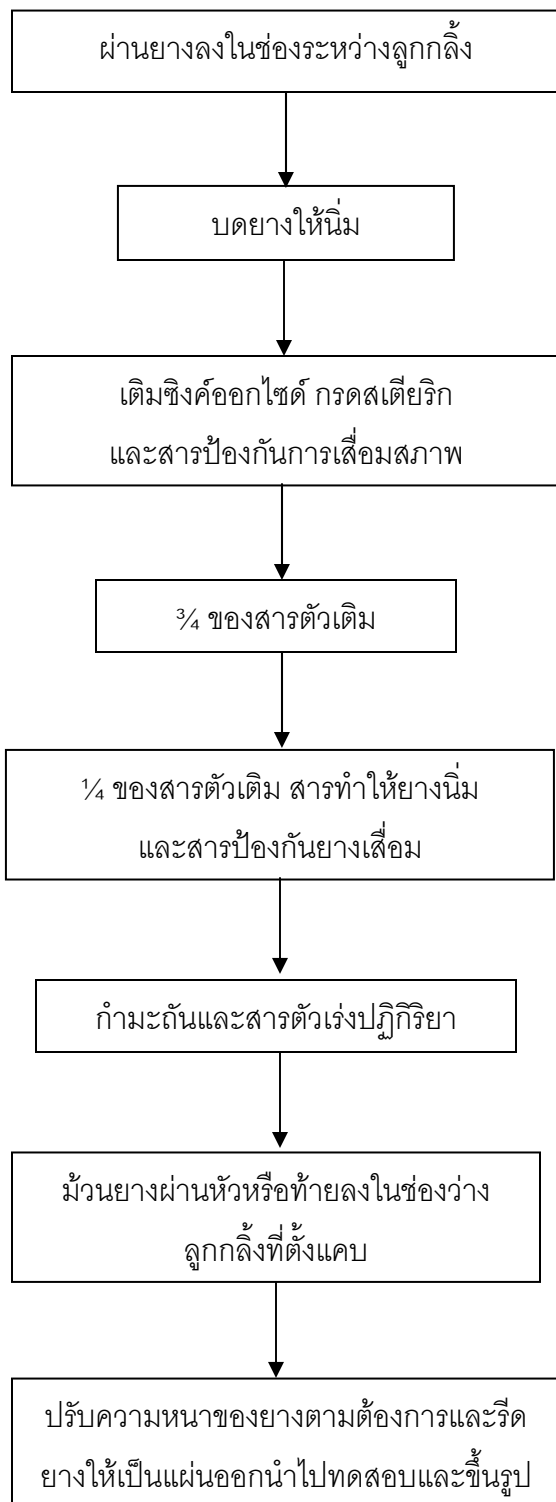
ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยางมาสเตอร์แบทช์	100
เคลย์ เถ้าแกลบ และซิลิกา	0, 3, 5, 7, 10
ซิงค์ออกไซด์	4.98
MOR	0.84
PVI	0.04
กำมะถัน	2.09
Silane-69	8% โดยน้ำหนักของสารตัวเติม

หมายเหตุ phr (parts per hundred rubber)

3.5.2 นำสารมาผสมด้วยเครื่องบดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two rolls mill) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน โดยขั้นตอนในการบดเป็นดังภาคผนวกรูปที่ ค5

- ปรับความร้อนของลูกกลิ้งให้มีอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส
- เติมายางมาสเตอร์แบทช์ลงไปและบดจนยางอ่อนตัวลงและมีลักษณะเรียบ (ใช้เวลาประมาณ 2-3 นาที)
- เติมซิงค์ออกไซด์ ลงไปในยางที่บดอยู่ อย่างช้าๆ โดยกรีดยาง และพับยางไปมา เพื่อให้ซิงค์ออกไซด์ กระจายตัวเข้าไปในยางจนทั่วเป็นเนื้อเดียวกัน(ใช้เวลาประมาณ 2 นาที)
- เติมสารตัวเติมลงไปอย่างช้าๆ โดยกรีดยาง และพับยาง จนกระจายตัวเข้าไปในเนื้อยางจนทั่ว เป็นเนื้อเดียวกัน(ใช้เวลาประมาณ 1-2 นาที)
- กรีดยางและพับยางให้เป็นชั้นหนาขึ้น รวมทั้งม้วนยางเป็นก้อน ขณะบดเพื่อให้สารต่างๆในยาง กระจายตัวอย่างทั่วถึง ทำซ้ำประมาณ 6-8 รอบ
- เติม MOR และ PVI ลงไปอย่างช้าๆ ทำการกรีดยาง พับยาง รวมทั้งม้วนยางเป็นก้อน เหมือนขั้นตอนก่อนหน้านี้ จน MOR และ PVI กระจายตัวทั่ว ซึ่งเนื้อยางจะเรียบ เป็นเนื้อเดียวกัน(ใช้เวลาประมาณ 3 นาที)

- เดิมกำมะถันลงไปอย่างช้าๆ กรีด พับยาง และม้วนยางเป็นก้อน จนกำมะถันกระจายตัวทั่วเนื้อยาง ซึ่งจะดูได้จากสีเหลืองของกำมะถัน ที่กระจายในเนื้อยาง(ใช้เวลาประมาณ 2 นาที)
- 3.5.3 นำยางส่วนหนึ่งไปทดสอบหาเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป (Cure time) ด้วยเครื่อง Oscillating Disc Rheometers (ODR) ดังภาคผนวกรูปที่ ๑๖ ซึ่งมีอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งเครื่องจะหมุนไปกลับเป็นมุม 3 องศา (ไป 1.5 องศา และกลับ 1.5 องศา จากนั้นจึงนำค่า TC90 ที่ได้จากการทดลอง มาเป็นเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปยาง
- 3.5.4 นำยางไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบ โดยนำยางที่บดเสร็จ ซึ่งทิ้งไว้ครบ 16 ชั่วโมง มาขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปยาง ดังภาคผนวกรูปที่ ๑๗ ที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตามที่ได้ทดสอบในข้อ 2.5.3 โดยการขึ้นรูปสำหรับการทดสอบแต่ละชนิด
- 3.5.5 นำชิ้นตัวอย่างบางส่วนไปอบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ก่อนนำไปทำการทดสอบ
- 3.5.6 การทดสอบ สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัตของยางคอมพอสิต
- สมบัติความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)
 - สมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging Properties)
 - สมบัติความทนทานต่อแรงกด (Compression set)
 - สมบัติการซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability)
 - สมบัติความร้อนสะสม (Heat build up)
- 3.5.7 ตรวจสอบโครงสร้างการกระจายตัวของสารตัวเติมของยางคอมพอสิตด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction
- 3.5.8 วิเคราะห์ผลการทดสอบในแบทช์เล็กปริมาณ 500 กรัม และเลือกสูตรยางคอมพอสิตที่มีสมบัติเด่นในด้านการซึมผ่านของก๊าซ และลดความร้อนสะสมของยางคอมพอสิต แล้วนำสูตรยางคอมพอสิตที่ดีที่สุดไปบดต่อในแบทช์ใหญ่ปริมาณ 50 กิโลกรัม เพื่อจะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองในแบทช์เล็กกับแบทช์ใหญ่ของโรงงานอุตสาหกรรมยางล้อรถยนต์



** ยางธรรมชาติใช้เวลาานประมาณ 3-7 นาที
ยางสังเคราะห์บางชนิดใช้ประมาณ 30 วินาที

** ถ้าบดยาง NBR ก็เติมกัมมะถันในขั้นตอนนี้
เพราะกัมมะถันละลายและกระจายตัวในยาง
NBR ได้ยาก

** การแบ่งใส่สารตัวเติมเสริมแรง 2 ช่วง
ดังกล่าวนิยมใช้ในกรณีที่ต้องเติมสารตัวเติม
เสริมแรงในปริมาณมาก แต่ถ้าต้องการเติม
สารตัวเติมเสริมแรงในปริมาณที่ไม่สูงมากนัก
(< 30 phr) ก็สามารถเติมสารตัวเติมทั้งหมด

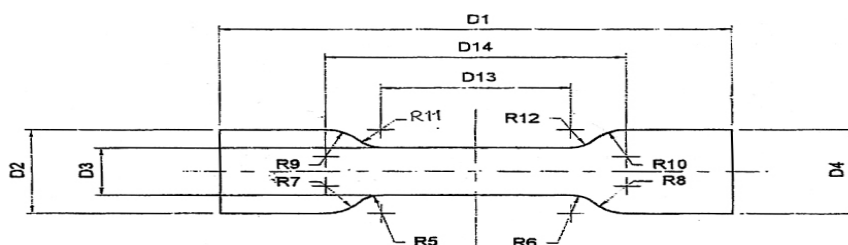
** ต้องควบคุมไม่ให้อุณหภูมิของการผสมสูง
เกินไป (ไม่ควรเกิน 80 องศาเซลเซียส)

รูปที่ 3.4 ลำดับการบดการผสมยางโดยเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง

3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงพลวัต และการกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเติมในเนื้อยางคอมโพสิต

3.6.1 การทดสอบสมบัติการดึง (Tensile test)

การทดสอบการดึง เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ISO37 ชิ้นทดสอบจะมีรูปทรงแบบดัมเบล (Dumbbell specimen) โดยมีรูปร่างและขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.5 ชิ้นทดสอบจะได้รับการนำยางคอมโพสิตที่อัดเป็นแผ่นมาตัดชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึงในรูปที่ 3.6 จากนั้นทำการวัดความหนา 3 ตำแหน่งด้วยกันคือ บริเวณตรงกลางและบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทั้งสองด้านของชิ้นทดสอบ โดยใช้ค่ากลาง (median) เป็นค่าความหนาในการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ จำนวนชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบคือ 6 ชิ้น ชิ้นทดสอบจะถูกทดสอบสมบัติการดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine, UTM) ดังในรูปที่ 3.7 ใช้ load cell ขนาด 1000 N อัตราการดึงคงที่ 500 mm/min



รูปที่ 3.5 ชิ้นทดสอบแบบดัมเบล ASTM D412 (Die C)

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนต่างๆของชิ้นงานดัมเบลล์

Line	Size (mm.)	Line	Size (mm.)
D1	115.56	R8	25.00
D2	25.04	R9	25.00
D3	6.13	R10	25.00
D4	25.05	R11	14.00
R5	14.00	R12	14.00
R6	14.00	D13	33.00
R7	25.00	D14	83.90



รูปที่ 3.6 เครื่องตัดตัวอย่างยางแบบใช้กำลังลม



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบแรงดึง

สมบัติที่ทำการศึกษา ได้แก่

- ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) หมายถึง ความเค้นดึงสูงสุด หรือ ความเค้นดึงเมื่อขาด
- ระยะเวลายืดเมื่อขาด (Elongation at break) หมายถึง ความยืดเมื่อขาด หรือความยืดสูงสุด
- มอดุลัส (Modulus) หมายถึง อัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดที่ระยะยืดที่กำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษามอดุลัสที่ระยะยืด 100%
- ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging Properties) หมายถึง การทดสอบการเสื่อมสภาพของเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน โดยทดสอบในสภาวะเร่ง โดยอบยางคอมโพสิทที่อุณหภูมิ 100 C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ก่อนการวัดค่าแรงดึง เพื่อพิจารณาความสามารถในการทนต่อความร้อนของยางคอมโพสิท

3.6.2 การทดสอบความแข็ง

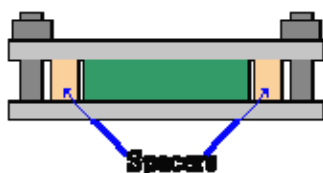
การทดสอบความแข็งจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240-81 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer Shore A) ดังรูป 3.8 ในการทดสอบจะใช้ขั้นตอนทดสอบของการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง ก่อนการทำทดสอบจะต้องปรับเทียบ (calibrate) เครื่องมือด้วยชุดทดสอบมาตรฐาน ASTM D2240 ทุกครั้ง จากนั้นทำการวัดความแข็งของยางที่ตำแหน่งต่างๆ กัน 5 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็ง

3.6.3 การทดสอบการกดอัด (Compression set)

เป็นการวัดความสามารถของสารประกอบยางหรือยางทั่วไปที่จะคงสภาพยืดหยุ่นไว้ภายใต้ความเค้นอัด (Compression stress) เป็นเวลาช่วงหนึ่งภายใต้สภาวะที่กำหนดไว้ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งการใช้น้ำหนักกดคงที่ และแบบความหนาที่ถูกอัดคงที่ ซึ่งในการทดลองได้ใช้วิธีการ “ความหนาถูกอัดคงที่” ซึ่งจะกดขึ้นทดสอบเป็นระยะ 25% ของความหนาเดิม เครื่องทดสอบจะประกอบด้วยแผ่นเหล็ก 2 แผ่นหรือมากกว่า โดยขึ้นทดสอบซึ่งวัดความหนาเรียบร้อยแล้วจะถูกอัดอยู่ระหว่างแผ่นเหล็กเหล่านี้ จนได้ความหนาตามต้องการ ภายใต้อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด และเมื่อการทดสอบสิ้นสุดลง ให้นำชิ้นทดสอบออกมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง แล้ววัดความหนาของชิ้นทดสอบอีกครั้ง จึงนำไปหาค่า Compression set ต่อไป



รูปที่ 3.9 การทดสอบ Compression set ตามมาตรฐาน ASTM D395 Method B

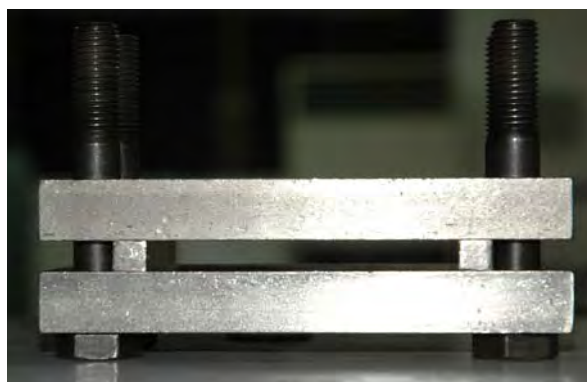
การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การยุบตัวถาวร (C_B) หาได้จากสูตร

$$C_B = \frac{t_0 - t_i}{t_0 - t_n} \times 100\% \dots\dots\dots(3.1)$$

เมื่อ t_0 คือระยะของยางก่อนทำการบีบอัด

t_i คือระยะของยางหลังการบีบอัดและคลายตัว

t_n คือระยะที่ใช้บีบอัดยาง (Spacer bar height)



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ทดสอบการกดอัด

3.6.4 การทดสอบความร้อนสะสม (heat build up)

วัดความร้อนสะสมของยางด้วยเครื่อง Goodrich flexometer ตามมาตรฐาน ASTM D623 (A) ขึ้นรูปชิ้นทดสอบเป็นรูปทรงระบอบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.8 มิลลิเมตร สูง 25 มิลลิเมตร วางไว้ในระหว่างตัวจับบนและล่าง มอเตอร์ของเครื่องหมุน 1 รอบจะเป็นการกดแรงและคลายแรงที่ชิ้นทดสอบสลับกันด้วยความเร็ว 1,800 รอบต่อนาที Stroke 4.45 มิลลิเมตร เป็นเวลานาน 25 นาที จดบันทึกอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการทดสอบ อุณหภูมิเริ่มต้นของการทดสอบ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความร้อนสะสม

3.6.5 การซึมผ่านของก๊าซ (gas permeability)

วัดสภาพการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านแผ่นยางบางๆ ด้วยเครื่อง Oxygen permeation tester; Illinois 8000 ตามมาตรฐาน ASTM D3985-02 ใช้ก๊าซที่มีความดันสูงและคงที่ อยู่ทางด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบ และให้ก๊าซชนิดเดียวกันที่มีปริมาตรเล็กๆ คงที่ ณ ความดันบรรยากาศ อยู่อีกด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบ การซึมผ่านของก๊าซจะไปเพิ่มความดันของด้านนี้



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตัวเติม

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารตัวเติมต่างชนิดกันที่มีต่อสมบัติเชิงกล และเชิงพลวัตของยางคอมพोजิต ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมสารตัวเติม 3 ชนิด ได้แก่ เคลย์ เถ้าแกลบ และซิลิกา ก่อนทำการวิจัยได้นำสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดไปทดสอบหาองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ได้ผลดังตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบในรูปของออกไซด์ของสารตัวเติม 3 ชนิด พบว่าองค์ประกอบหลักของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด เป็น SiO_2 เช่นเดียวกัน แต่มีส่วนประกอบย่อยที่แตกต่างกันเล็กน้อย โดยเคลย์มีปริมาณของ Al_2O_3 มากกว่า อย่างไรก็ตาม การที่เคลย์มีปริมาณของ Na^+ และ Ca^{2+} น้อยมาก แต่มี K^+ อยู่บริเวณระหว่างชั้น (Interlayer) ของเคลย์ในปริมาณสูงพอควร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเคลย์ชนิดนี้มีลักษณะเฉพาะของ illite เป็นส่วนใหญ่[21] ถ้าเปรียบเทียบกับเถ้าแกลบกับซิลิกาจะมีปริมาณ SiO_2 ใกล้เคียงกัน เนื่องจากในเถ้าแกลบจะมีโครงสร้างซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเถ้าแกลบและซิลิกาจะมีความแตกต่างกันคือ เถ้าแกลบจะมีปริมาณของ K^+ สูง ซิลิกาก็จะมีปริมาณของ Na^+ ที่สูง ส่วนธาตุองค์ประกอบอื่นๆจะมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อนำสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด มาหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Laser Particle Size Analyzer) และหาพื้นที่ผิวของสารตัวเติมได้ผลดังตารางที่ 4.2 ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเคลย์ที่วัดได้จะเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคเฉลี่ยของซิลิกาและเถ้าแกลบ แต่พื้นที่ผิวของซิลิกา กลับมากกว่าเคลย์เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษของซิลิกามีโครงสร้างเป็นรูพรุนมาก จึงทำให้ซิลิกามีพื้นที่ผิวมากกว่า เคลย์และเถ้าแกลบ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณองค์ประกอบธาตุของสารตัวเต็มทั้ง 3 ชนิด

สารประกอบ	ปริมาณองค์ประกอบธาตุของสารตัวเต็ม (% by weight)		
	เคลย์ (Clay)	เถ้าแกลบ (RHA)	ซิลิกา (Silica)
SiO ₂	66.00	82.43	97.79
Al ₂ O ₃	18.50	0.27	0.65
Fe ₂ O ₃	1.60	0.12	0.06
K ₂ O	4.00	2.08	0.01
Na ₂ O	2.00	0.06	1.00
MgO	1.25	0.34	0.00
CaO	0.15	0.71	0.03
TiO ₂	0.10	0.00	0.06
SO ₃	0.00	0.15	0.39
P ₂ O ₅	0.00	0.55	0.00
MnO	0.00	0.20	0.00
Cl	0.00	0.08	0.00
LOI	6.40	13.01	0.00

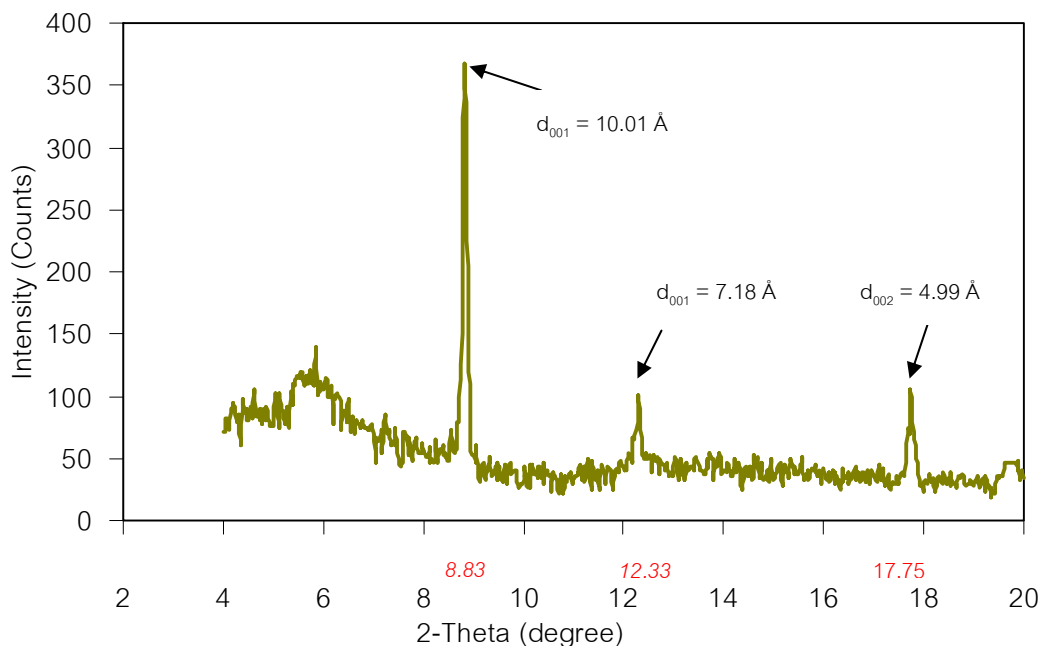
ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสารตัวเต็มทั้ง 3 ชนิด

	เคลย์	เถ้าแกลบ	ซิลิกา
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	6.29	75.00	45.90
ช่วงของขนาดอนุภาค (μm)	2.10 – 17.77	34.74 – 148.07	16.79 – 218.24
พื้นที่ผิวของอนุภาค (m ² /g)	5.05	20.39	180.00

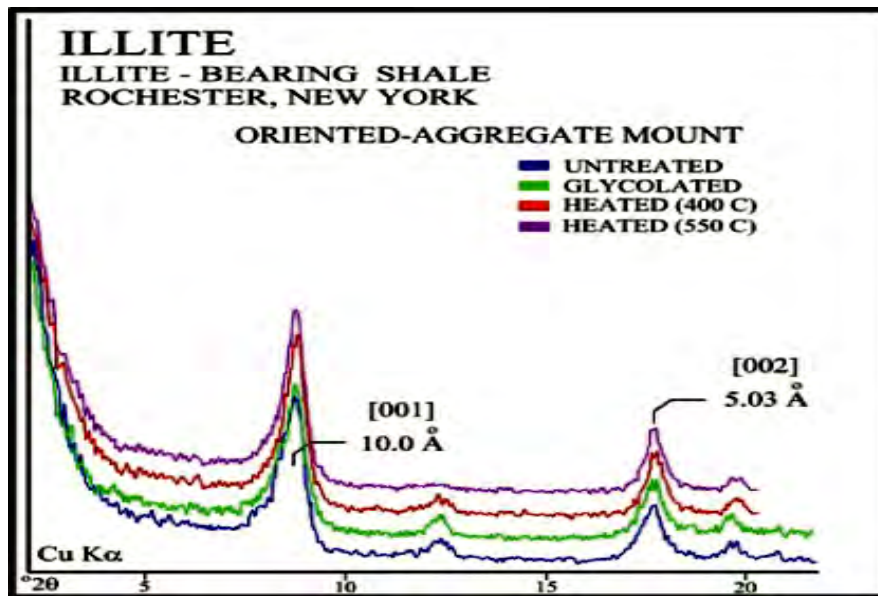
4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวเต็มและยางคอมโพสิตด้วย (XRD)

4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวเต็มทั้ง 3 ชนิดด้วย (XRD)

ผลของ diffraction pattern ของเคลย์ โดยใช้เครื่อง XRD ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ด้วยการวัดค่ามุมตกกระทบ (2θ) บนชั้นของเคลย์ตั้งแต่ $4 - 20^\circ$ พบ diffraction peak ที่ $2\theta = 8.827^\circ$ ($d_{001} = 10.01 \text{ \AA}$) และมี peak เล็กๆ ที่ $2\theta = 12.325^\circ$ ($d_{001} = 7.18 \text{ \AA}$) กับที่ $2\theta = 17.752^\circ$ ($d_{002} = 4.99 \text{ \AA}$) ซึ่งค่า d -spacing นี้จะแสดงถึงระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์ด้วยการคำนวณจากค่ามุม 2θ โดยใช้ Bragg's Law (ดังที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ค) ในการคำนวณหาค่า d -spacing เมื่อเปรียบเทียบ XRD pattern ที่ได้ของเคลย์แล้วพบว่า มีลักษณะ pattern เป็นของผสมของเคลย์อย่างน้อย 2 ชนิด คือ แร่ดินเหนียว kaolinite และ illite โดย peak ที่ $2\theta = 12.325^\circ$ ($d_{001} = 7.18 \text{ \AA}$) เป็นลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียว kaolinite และที่ $2\theta = 8.827^\circ$ ($d_{001} = 10.01 \text{ \AA}$) กับที่ $2\theta = 17.752^\circ$ ($d_{002} = 4.99 \text{ \AA}$) เป็นลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียว illite ดังที่แสดงตามรูปที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งมีความสอดคล้องกับลักษณะของเคลย์สองประเภทนี้ และจาก d_{001} peak ของแร่ดินเหนียว illite ที่สูงกว่าของ kaolinite แสดงว่าเคลย์ชนิดนี้มีส่วนประกอบของ illite เป็นส่วนใหญ่

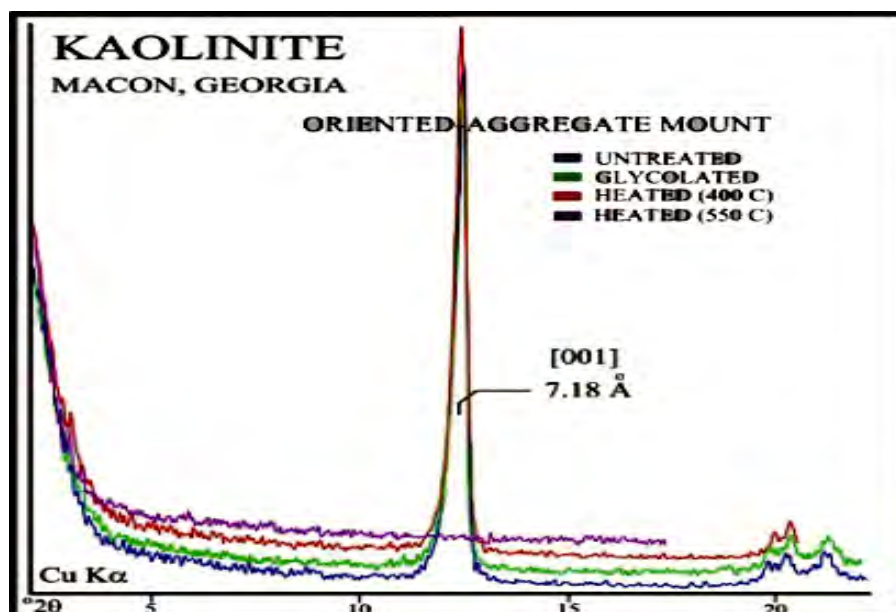


รูปที่ 4.1 ผลของ XRD pattern ของ Clay



รูปที่ 4.2 XRD pattern ของแร่ดินเหนียว Illite

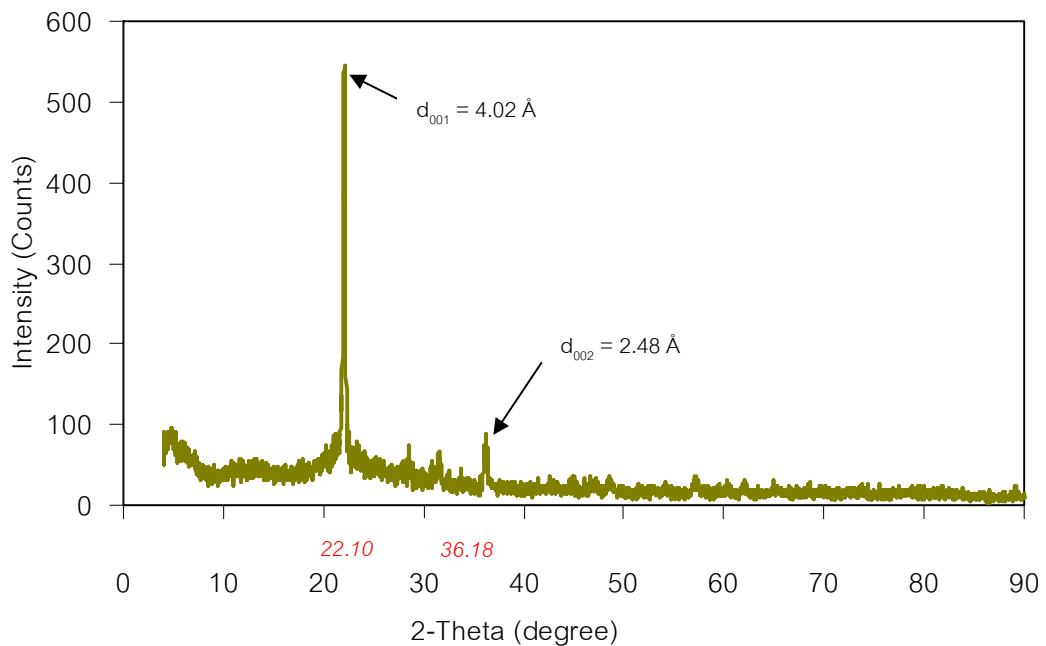
*ที่มา: <http://pubs.usgs.gov/openfile/of01-041/index.htm>



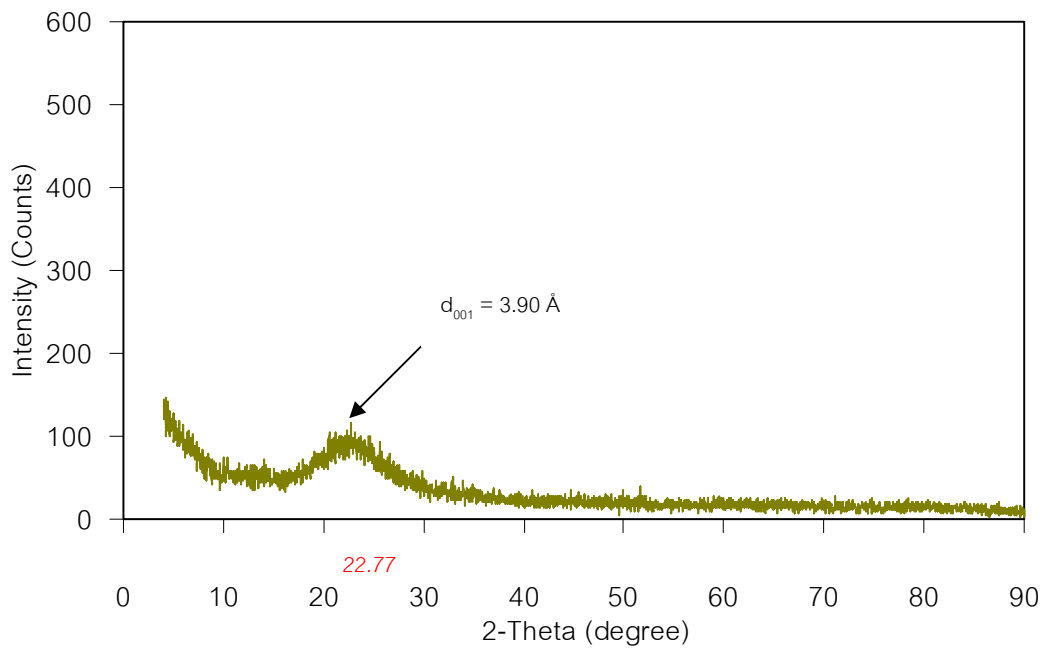
รูปที่ 4.3 XRD pattern ของแร่ดินเหนียว Kaolinite

*ที่มา : <http://pubs.usgs.gov/openfile/of01-041/index.htm>

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 ผลของ diffraction pattern ของเถ้าแกลบและซิลิกา โดยวัดค่ามุมตกกระทบ (2θ) บนชั้นของเถ้าแกลบและซิลิกา ตั้งแต่ $4 - 90^\circ$ พิจารณากราฟของเถ้าแกลบ พบ diffraction peak ที่เห็นได้ชัด ซึ่งแสดงถึงค่า d-spacing ที่ $2\theta = 22.10^\circ$ ($d_{001} = 4.02 \text{ \AA}$) และมี peak เล็กๆ ที่ $2\theta = 36.18^\circ$ ($d_{002} = 2.48 \text{ \AA}$) ส่วนซิลิกาจะมีค่า d-spacing ที่ $2\theta = 22.77^\circ$ ($d_{001} = 3.90 \text{ \AA}$) เมื่อเปรียบเทียบ XRD pattern ที่ได้ของเถ้าแกลบโครงสร้างของจะเป็นแบบ crystalline เพราะ peak ที่เกิดขึ้นจะค่อนข้างสูงและแคบ ส่วนซิลิกาจะมีพื้นที่กราฟใต้ของ peak มากจึงโครงสร้างจะเป็นแบบ amorphous โดยจะพบว่า peak หลักๆ ที่เกิดของเถ้าแกลบจะมีลักษณะเดียวกับกับ peak ของซิลิกา เนื่องจากในเถ้าแกลบจะมีองค์ประกอบของซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ peak ที่เกิดขึ้นระหว่างเถ้าแกลบกับซิลิกามีลักษณะใกล้เคียงกัน ส่วน peak ของเถ้าแกลบที่แตกต่างกันเกิดจากการเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิสูง



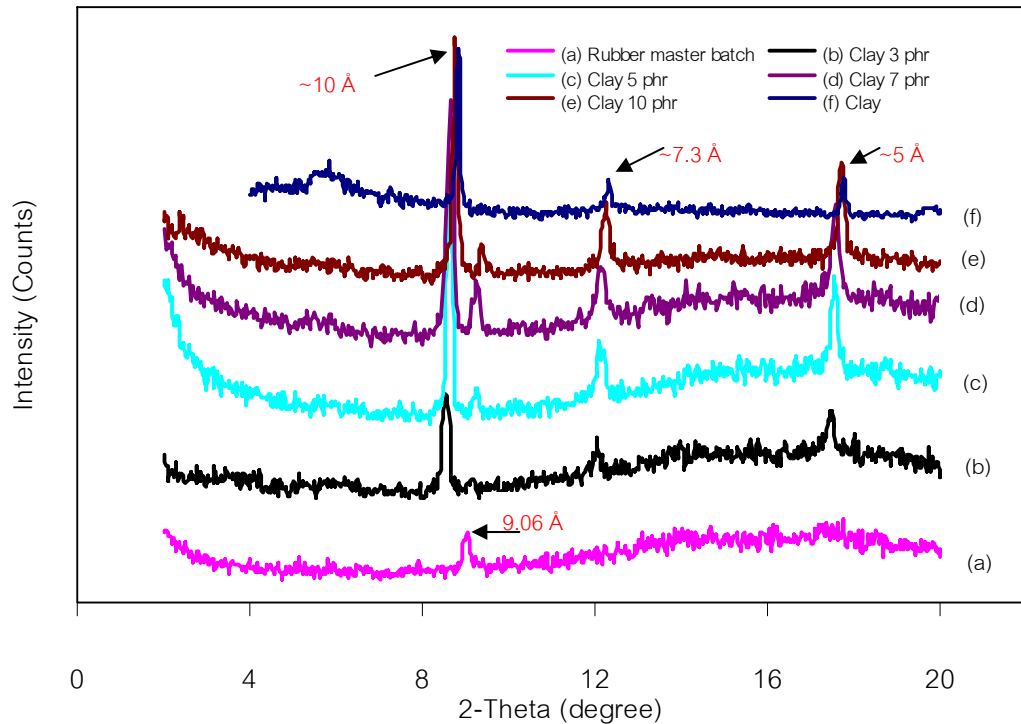
รูปที่ 4.4 ผลของ XRD pattern ของ Rice husk ash (RHA)



รูปที่ 4.5 ผลของ XRD pattern ของ Silica

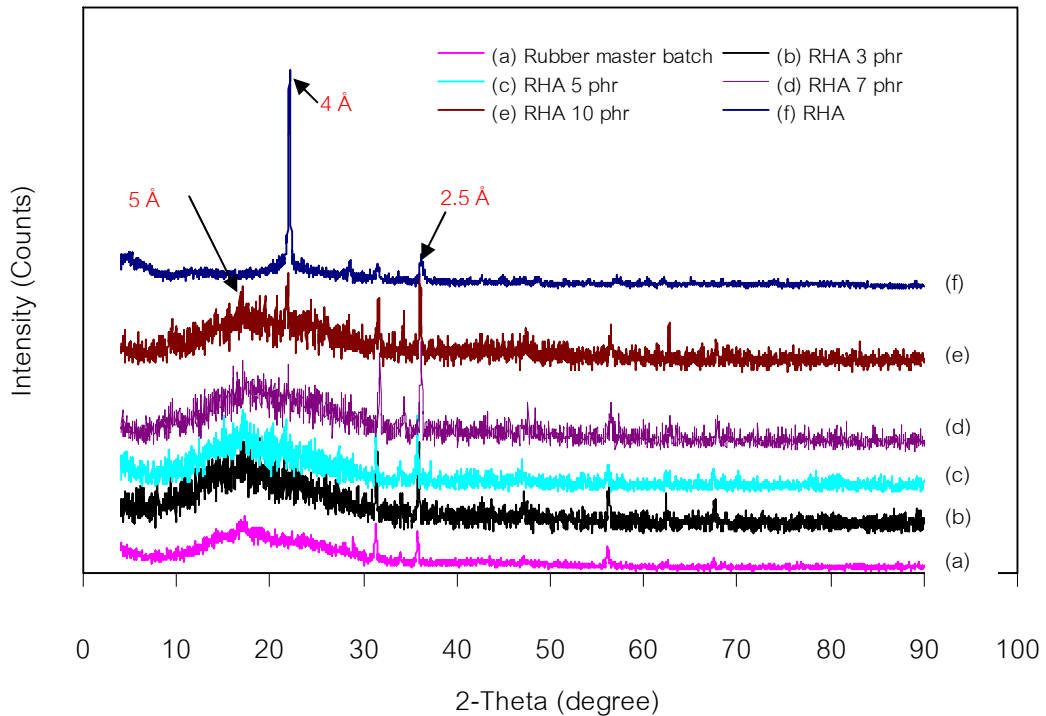
4.2.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวของสารตัวเติมในยางคอมโพสิตด้วย (XRD)

จากรูปที่ 4.6 พบว่า ค่า d - spacing ของเมื่อเติมเคลย์ในยางคอมโพสิตนั้นมีค่าที่แทบไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงว่าไม่มีการแลกเปลี่ยนประจุกันที่บริเวณ interlayer ของเคลย์ และส่งผลให้ระยะของ interlayer ของ clay ไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามข้อสังเกตที่พบได้จาก XRD pattern คือ peak ของเคลย์ในช่วง d - spacing ประมาณ 10.01 \AA และ 4.99 \AA ซึ่งเป็น d_{001} และ d_{002} ของ illite และ peak ในช่วงของ d - spacing = 7.18 \AA ซึ่งเป็น d_{001} ของ kaolinite ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อนำเคลย์ดังกล่าวทั้งหมดไปผสมกับยางในปริมาณมากขึ้น พบว่า peak ของทั้งแร่ดินเหนียว illite และ kaolinite ในยางยังสูงอยู่ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณเคลย์ที่ใส่ลงไปยาง และความคมของ peak รวมทั้ง peak ของสารเคมีในยางมีอยู่น้อยมาก โดยแสดงถึงการกระจายตัวที่ดี เนื่องจากการบดผสม จึงสรุปผลของ XRD เมื่อเติมเคลย์ปริมาณเพิ่มขึ้นในยางคอมโพสิต พบว่า peak ของสารเคมีแทบจะไม่มีเลย ซึ่งเกิดจากการบดผสมยางที่ดี ส่วน peak ของเคลย์นั้นยังมีอยู่เนื่องจากเคลย์ประเภท Kaolinite และ illite มีพันธะไฮโดรเจนยึดระหว่างชั้นเคลย์ และจะถูกห่อหุ้มชั้นเคลย์ด้วย Couling agent (Silane) จึงทำใหยางไม่สามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ในชั้นเคลย์ได้ โดยไซเลนจะเป็นตัวช่วยให้เคลย์เข้ากับยางได้ดีและมีการกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบของ XRD pattern ของเคลย์และยางคอมโพสิตเมื่อเติมเคลย์ในปริมาณต่างๆ

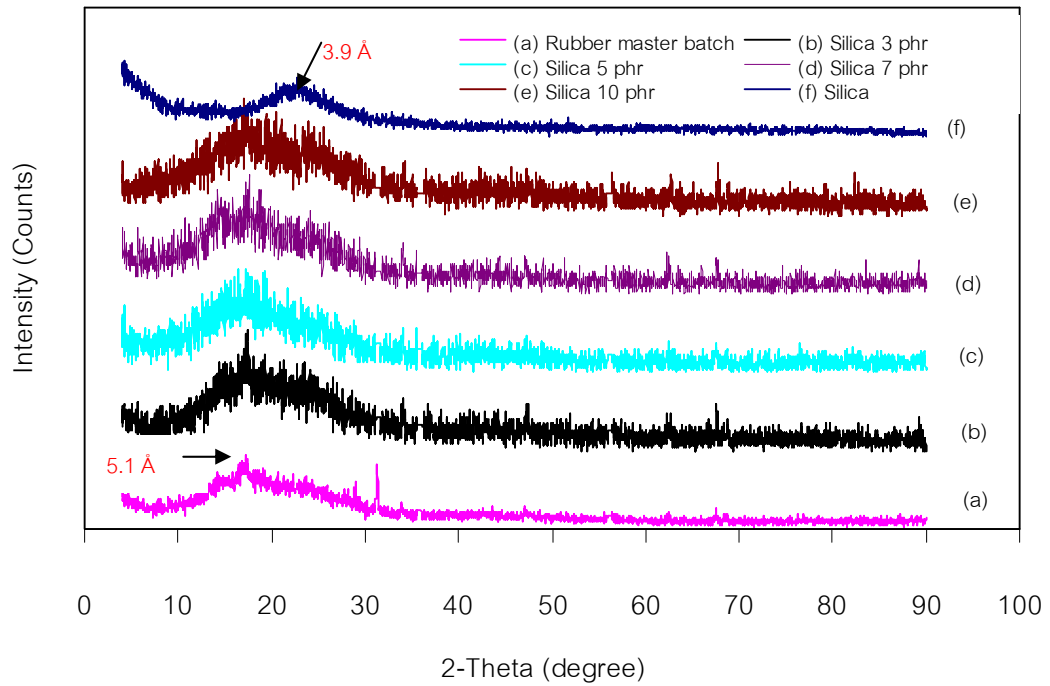
เมื่อนำยางมาสเตอร์แบทช์ผสมกับเถ้าแกลบในปริมาณที่ต่างกัน แล้วทดสอบด้วยเครื่อง XRD ดังรูปที่ 4.7 พบว่า peak ของยางคอมโพสิตทุกแบทช์เมื่อเปรียบเทียบกับ peak ของเถ้าแกลบ จะมีค่ามุมตกกระทบ (2θ) และค่า d - spacing ต่ำลง ซึ่ง peak ของเถ้าแกลบจะลดต่ำลง แต่ peak ของสารเคมีในยางยังคงมีอยู่ แสดงถึงการเข้ากันได้ดีของยางกับเถ้าแกลบได้ดี เนื่องจากสารคู่ควบไฮเลนจะเป็นตัวช่วยทำปฏิกิริยาให้เกิดหมู่ Silanol group บนผิวของเถ้าแกลบกับ Organosilane จึงทำให้เถ้าแกลบสามารถเข้ากับยางได้ดี [17]



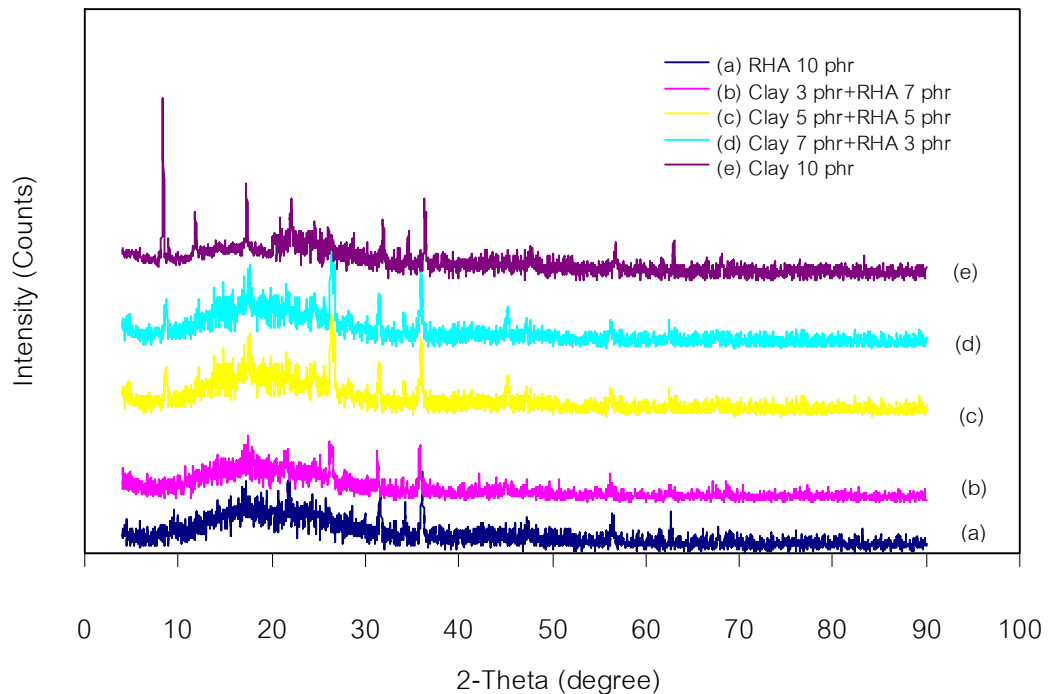
รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบของ XRD pattern ของแก้วเคลือบ และยางคอมโพสิตเมื่อเติมแก้วเคลือบในปริมาณต่างๆ

เมื่อนำยางมาสเตอร์แบทช์ผสมกับซิลิกาในปริมาณที่ต่างกัน แล้วทดสอบด้วยเครื่อง XRD ดังรูปที่ 4.8 พบว่า peak ของยางคอมโพสิตทุกแบทช์เมื่อเปรียบเทียบกับ peak ของซิลิกา จะมีค่ามุมตกกระทบ (2θ) และค่า d - spacing ต่าง ซึ่ง peak ของซิลิกาแทบจะไม่ปรากฏอยู่เลย แต่ peak ของสารเคมีในยางยังคงมีอยู่ แสดงถึงการเข้ากันได้ดีของยางกับซิลิกาได้ดี เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนจะเป็นตัวช่วยทำปฏิกิริยาให้เกิดหมู่ Silanol บนผิวของซิลิกา กับ Organosilane จึงทำให้สามารถเข้ากันได้ดี [17]

เมื่อนำยางมาสเตอร์แบทช์ผสมสารตัวเติมระหว่างเคลือบกับแก้วเคลือบรวมกันในปริมาณ 10 phr ในอัตราส่วนที่ต่างกัน แล้วทดสอบด้วยเครื่อง XRD ดังรูปที่ 4.9 พบว่า peak ของยางคอมโพสิตทุกแบทช์เมื่อเปรียบเทียบกับ peak ที่เกิดขึ้น จะมีค่ามุมตกกระทบ (2θ) และค่า d - spacing จะมีลักษณะเดียวกันหมด คือ peak ของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดที่ผสมกัน และ peak ของสารเคมีในยางยังคงมีอยู่ ซึ่งแสดงถึงการเข้ากันได้ไม่ดีของยางกับสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด เมื่อนำมารวมกัน



รูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบของ XRD pattern ของซิลิกา และยางคอมพอสิตเมื่อเติมซิลิกาในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบของ XRD pattern ของยางคอมพอสิตเมื่อเติมสารตัวเติมระหว่างเคลย์กับแก้วแกลบรวมกันในปริมาณ 10 phr ในอัตราส่วนที่ต่างกัน

4.3 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติม 3 ชนิด ได้แก่ เคลย์ เถ้าแกลบ และ ซิลิกา ที่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ คือ ระยะเวลาที่ย่างเริ่มเกิดการคงรูป (scorch time) และ ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time) โดยใช้สารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดในการศึกษา ซึ่งผลการทดสอบดังรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าทั้งระยะเวลาที่ย่างเริ่มเกิดคงรูป และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ ของยางคอมพอสิตค่อนข้างคงที่เมื่อปริมาณสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้น โดยผลการทดลอง สอดคล้องกับการศึกษาการเติมซิลิกา เคลย์ เถ้าแกลบและสารตัวเติมอื่นๆในยางธรรมชาติ[3] ซึ่งทำการศึกษาถึงผลของปริมาณซิลิกา เคลย์ เถ้าแกลบต่อระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ แรงบิดต่ำสุด และแรงบิดสูงสุดของยาง จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น[22] แต่ในกรณีเคลย์และเถ้าแกลบ ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์มีค่าค่อนข้างคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาที่ย่างเริ่มเกิดการคงรูปและระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเคลย์ และเถ้าแกลบค่อนข้างคงที่ ส่วนเมื่อเติมซิลิกาจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารเร่งปฏิกิริยาจะถูกดูดซับไว้ที่บริเวณผิวของ SiO_2 ทำให้ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น แต่โลหะออกไซด์ที่มีอยู่มากในเคลย์และเถ้าแกลบดังในตารางที่ 4.1 เช่น Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นต้น จะทำหน้าที่เป็นเหมือนสารเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยา ในกระบวนการวัลคาไนซ์ ทำให้ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ลดลง ดังนั้นทั้งระยะเวลาที่ย่างเริ่มเกิดการคงรูปและระยะเวลาในการวัลคาไนซ์จึงค่อนข้างคงที่

จากตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดผลต่างของแรงบิดที่มากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะ crosslink ของยางที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงการกระจายตัวได้ดีของสารตัวเติมและชนิด เมื่อใส่ปริมาณของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดในปริมาณที่เท่ากัน การเกิด crosslink ของยางคอมพอสิตจะมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าชนิดของสารตัวเติมไม่ส่งผลต่อการ crosslink มากนัก แต่ปริมาณของสารตัวเติมจะมีผลต่อการ crosslink ของยางคอมพอสิตมากกว่า

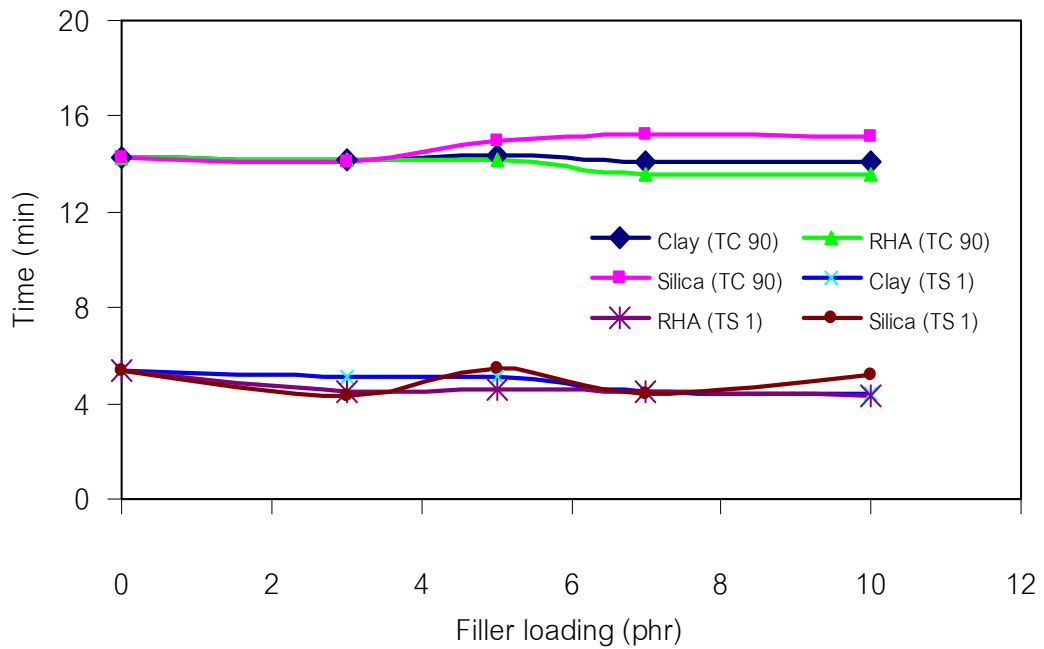
ตารางที่ 4.3 สมบัติการคงรูปของยางคอมโพสิตของปริมาณสารตัวเติมที่ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 30 นาที

ปริมาณสารตัวเติม (phr)	TS1 (Min :sec)	TC90 (Min :sec)	ΔT (dNm)
ไม่ใส่สารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด	5.39	14.26	12.28
Clay 3 phr	5.07	14.16	11.61
Clay 5 phr	5.08	14.39	12.33
Clay 7 phr	4.46	14.12	12.45
Clay 10 phr	4.37	14.10	13.04
RHA 3 phr	4.50	14.16	12.00
RHA 5 phr	4.57	14.15	12.69
RHA 7 phr	4.46	13.54	13.23
RHA 10 phr	4.35	13.55	14.10
Silica 3 phr	4.34	14.13	12.11
Silica 5 phr	5.49	15.02	12.94
Silica 7 phr	4.40	15.20	13.41
Silica 10 phr	5.21	15.18	14.56
Clay 3 phr+RHA 7 phr	4.01	13.10	12.99
Clay 5 phr+RHA 5 phr	4.32	13.58	12.54
Clay 7 phr+RHA 3 phr	4.24	13.59	12.78

หมายเหตุ TS1 คือ ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดคงรูปหรือเวลาเริ่มเกิดการเชื่อมโยงพันธะ

TC90 คือ ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์หรือระยะเวลาในการเชื่อมโยงพันธะ

ΔT คือ ผลต่างระหว่างแรงบิดสูงสุด (T_{max}) และแรงบิดน้อยสุด (T_{min})



รูปที่ 4.10 ผลการทดลองลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง

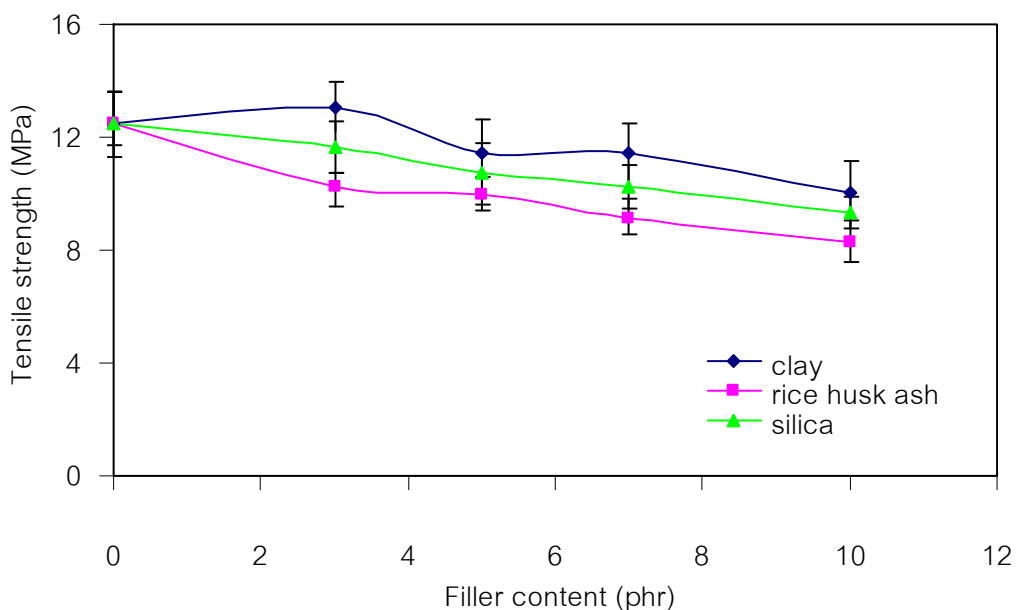
4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

4.4.1 การทดสอบสมบัติการดึง

รูปที่ 4.11 แสดงผลของปริมาณสารตัวเติมที่มีผลต่อการทนต่อแรงดึงของยางคอมพอสิต จากผลการทดสอบพบว่า การทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น โดยการทนต่อแรงดึงของยางคอมพอสิตที่เติม เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม การทนต่อแรงดึงของยางคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น เนื่องจากอันตรกิริยาหรือแรงกระทำระหว่างอนุภาคสารตัวเติมและยางมีความแข็งแรงต่ำ และขาดหมู่ฟังก์ชันที่ทำปฏิกิริยาบริเวณผิวของอนุภาคสารตัวเติม เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) [2, 22] นอกจากนี้การเติมสารตัวเติมไปในปริมาณมากๆ ทำให้ยางมีความต่อเนื่องของเฟสยาง (rubber phase) น้อยลง และอาจเกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของสารตัวเติม การทนแรงดึงของยางในส่วนดังกล่าวก็จะลดลง ดังนั้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น การทนต่อแรงดึงของยางคอมพอสิตจะมีค่าลดลง [14] แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ที่ 3 phr เคลย์มีสมบัติทนต่อแรงดึงได้ดีที่สุด เนื่องจากเคลย์มีอนุภาคเฉลี่ยค่อนข้างเล็กมาก ดังนั้นการคอมพอสิตของยางกับเคลย์สามารถช่วยเพิ่มในสมบัติทนต่อแรงดึงได้ดี อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาผลของชนิดและขนาดอนุภาคสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดต่อการทนต่อแรงดึง พบว่าในกรณีที่ใช้เคลย์ ถั่วแกลบ และซิลิกา การทนต่อแรงดึงมีค่าไม่แตกต่างกันนักเมื่อเติมในปริมาณน้อยๆ แต่ในกรณีเคลย์ที่ 3 phr จะมีค่าสูงกว่าสารตัวเติมอื่นๆ

โดยการทนต่อแรงดึงของยางคอมพอสิตที่เติมเคลย์ในปริมาณ 3 5 7 และ 10 phr จะมีค่าลดลงเรื่อยๆตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใส่สารตัวเติม และมีค่าสูงกว่ากรณีที่เติมด้วยซิลิกา และถ้าแก่ลบตามลำดับ ยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเคลย์มีการทนต่อแรงดึงสูงกว่ากรณีที่เติมด้วยซิลิกา และถ้าแก่ลบ เนื่องจากอนุภาคเคลย์ที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ทำให้พื้นที่ที่เกิดแรงกระทำระหว่างสารตัวเติมกับยางมากกว่า การถ่ายเทแรงจากเฟสยางไปสู่สารตัวเติมจะถ่ายเทได้มากขึ้น การทนต่อแรงดึงจึงมีค่าสูงกว่า

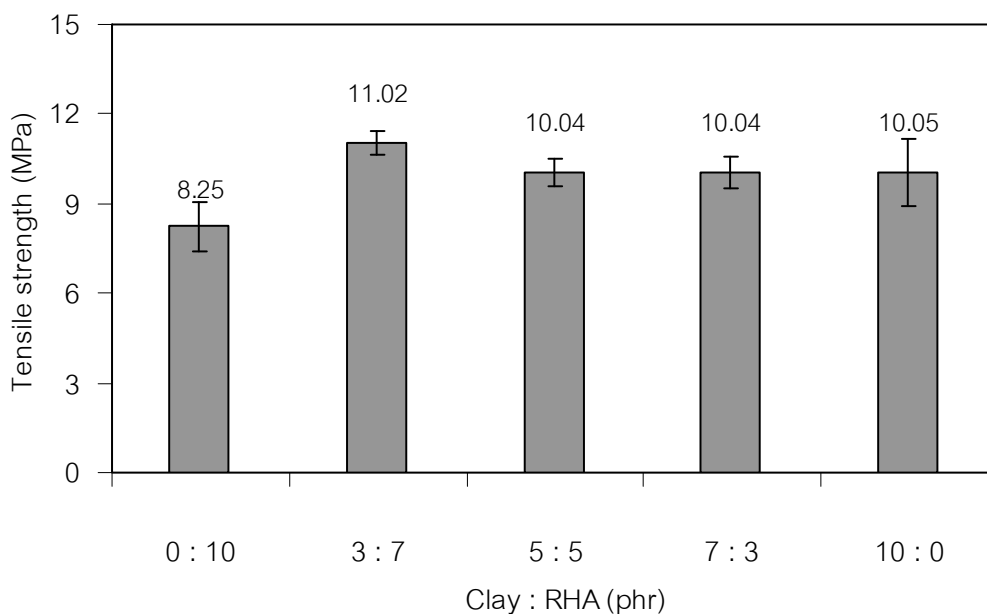
ผลของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ต่อการทนต่อแรงดึงของยางคอมพอสิต โดยรูปที่ 4.11 ผลของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดกับสารคู่ควบไซเลน จากการทดสอบพบว่า ในกรณีของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเคลย์ สารคู่ควบไซเลนทำให้การทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเคลย์มีหมู่ฟังก์ชันเคมีอินทรีย์ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอยู่บนพื้นผิวน้อย ทำให้เคลย์มีความเป็นขั้วสูง ทำให้เคลย์เข้ากับยางที่ไม่มีขั้วได้ยาก สารคู่ควบไซเลนจะเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมให้แข็งแรงขึ้น และช่วยให้สารตัวเติมกระจายตัวได้ดีในเนื้อยาง การถ่ายเทแรงจากเฟสยางไปสู่สารตัวเติมก็จะดีขึ้น การทนต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น [23, 24]



รูปที่ 4.11 ผลของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อการทนต่อแรงดึง

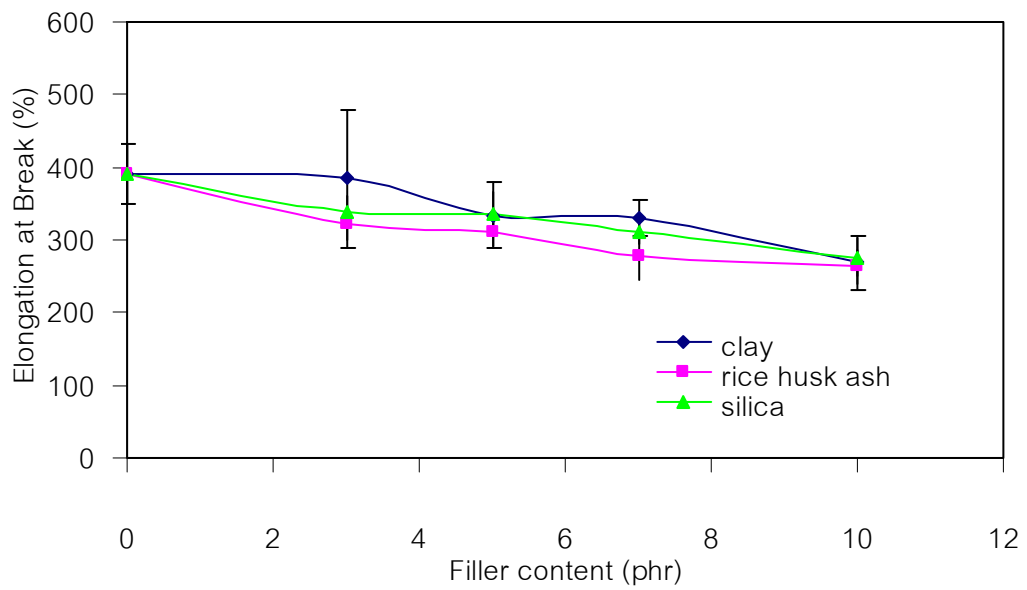
รูปที่ 4.12 แสดงผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกันกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อการทนต่อแรงดึง เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของเคลย์และถ้าแก่ลบที่ใช้ในการคอมพอสิต พบว่าอัตราส่วนของเคลย์ 3 phr กับ ถ้าแก่ลบ 7 phr มีคุณสมบัติทนต่อแรงดึงมากที่สุด แต่เมื่อเทียบกับในกรณีอื่นๆก็ไม่ได้ต่างกันมากนัก เนื่องจากปริมาณของสารตัวเติมที่ใช้ใน

ปริมาณเท่ากันคือ 10 phr ทำให้สมบัติทนต่อแรงดึงของยางคอมพอสิตมีค่าใกล้เคียงกัน อีกทั้งผลต่างของแรงบิดมีค่าที่สูงใกล้เคียงกัน จึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะของยางใกล้เคียงกัน

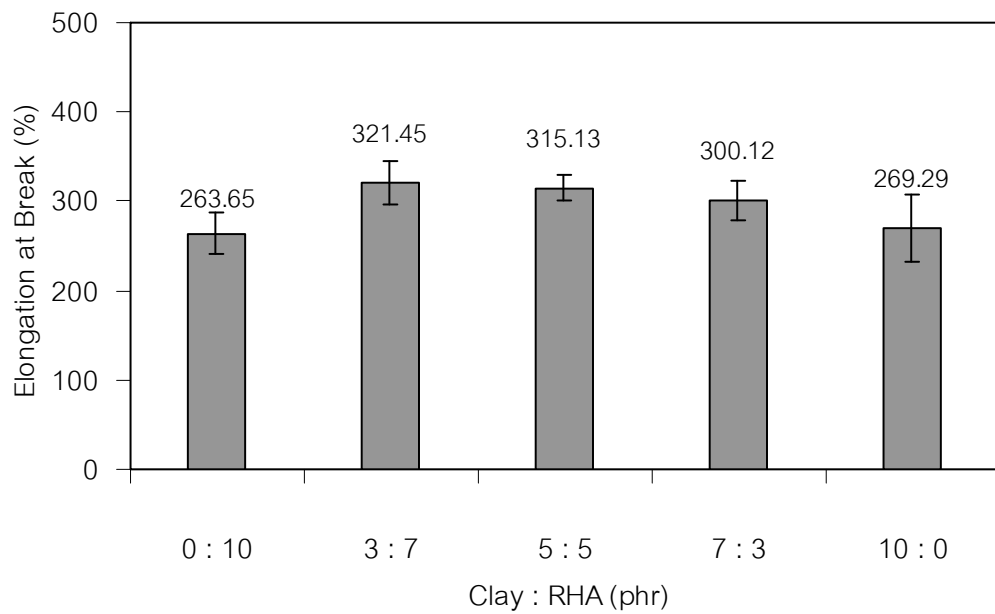


รูปที่ 4.12 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อการทนต่อแรงดึง

รูปที่ 4.13-4.14 แสดงผลของปริมาณสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด และปริมาณของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนต่างที่มีผลต่อระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมพอสิต จากการทดสอบพบว่า ระยะยืดเมื่อขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกรณีของสารตัวเติมในปริมาณที่เท่ากันทั้ง 3 ชนิด พบว่าระยะเมื่อขาดของเคลย์ แก้วแกลบ และซิลิกา มีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากอนุภาคของสารตัวเติมจะไปกีดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลยาง ทำให้ยางมีความแข็งแรงตึง (stiffness) และความเปราะ (brittleness) เพิ่มขึ้น เมื่อเติมลงไปปริมาณที่มากขึ้นก็จะทำให้ความต่อเนื่องของเฟสยางลดลงด้วย ระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมพอสิตจึงลดลง [25, 26] ในการศึกษาผลของสารตัวเติมต่อระยะยืดเมื่อขาดพบว่า ในช่วงที่เติมสารตัวเติมลงไปไม่เกิน 10 phr ยางคอมพอสิตที่เติมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดและการผสมเคลย์และแก้วแกลบรวมกันจะมีค่าระยะยืดเมื่อขาดต่างกันน้อยมาก (ไม่เกิน 10%) อีกทั้งสารคู่ควบไซเลนจะทำให้ระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมพอสิตมีค่าลดลง เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนจะช่วยปรับปรุงพันธะระหว่างยางกับสารตัวเติม ทำให้ยางคอมพอสิตมีค่าแข็งแรง (Rigidity) มากขึ้น และความเหนียว (Ductility) ลดลง ดังนั้นยางคอมพอสิตจึงขาดที่ระยะยืดที่น้อยลง [24]

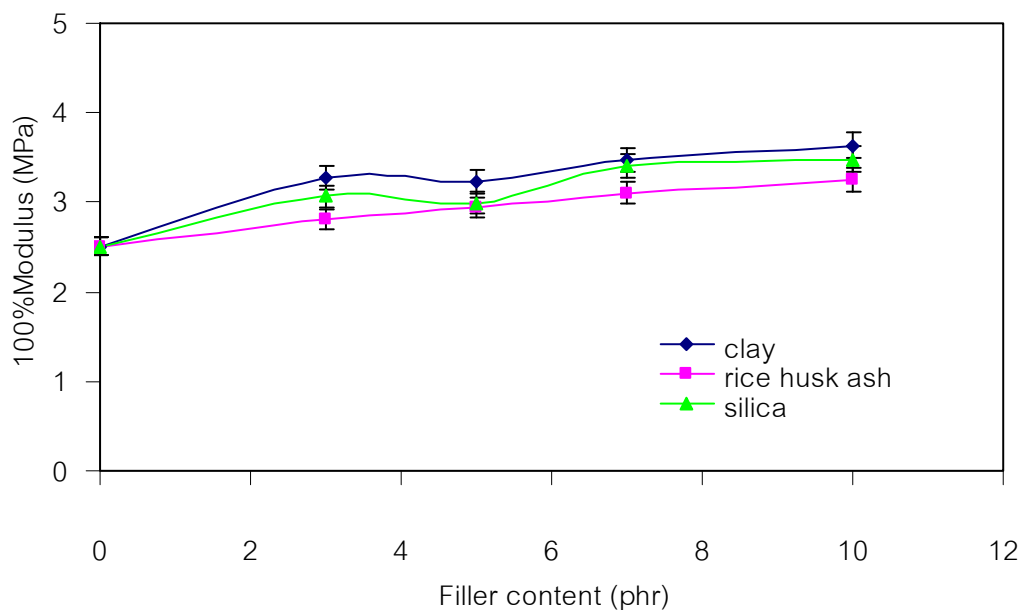


รูปที่ 4.13 ผลของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อระยะยืดเมื่อขาด

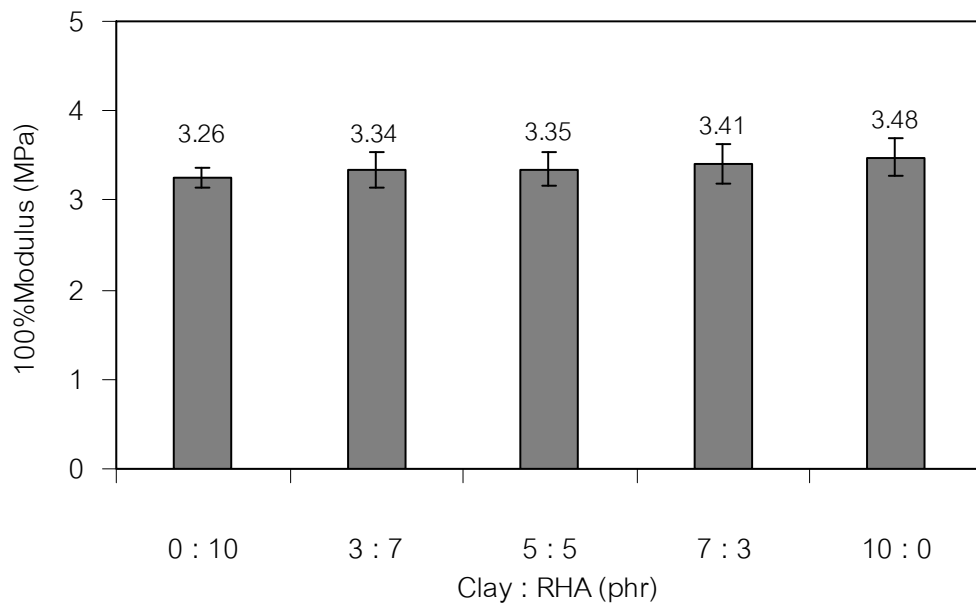


รูปที่ 4.14 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกันกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อระยะยืดเมื่อขาด

รูปที่ 4.15 แสดงผลของปริมาณสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด คือ เคลย์ เถ้าแกลบ ซิลิกา ที่มีผลต่อมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 100% ของยางคอมโพสิต จากการทดสอบพบว่า มอดูลัสยืดหยุ่นของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด จะมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น จากการเปรียบเทียบสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาณสารตัวเติมเท่ากันพบว่า เคลย์จะมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกาและเถ้าแกลบ จากการเติมสารตัวเติมซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีอนุภาคแข็งลงไปในยางจะช่วยทำให้มอดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของยางจะเกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น เพราะจะถูกกำจัดการเคลื่อนที่ได้ด้วยอนุภาคของสารตัวเติม รูปที่ 4.16 แสดงผลปริมาณการผสมเคลย์และเถ้าแกลบรวมกัน พบว่าจะมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากเป็นสารตัวเติมระหว่างเคลย์และเถ้าแกลบที่มีอนุภาคที่แข็งลงไปในยาง อีกทั้งยังใช้ปริมาณสารตัวเติมระหว่างเคลย์และเถ้าแกลบรวมกันในปริมาณเท่ากันทุกกรณี จึงทำให้ทุกกรณีมีผลของมอดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกัน

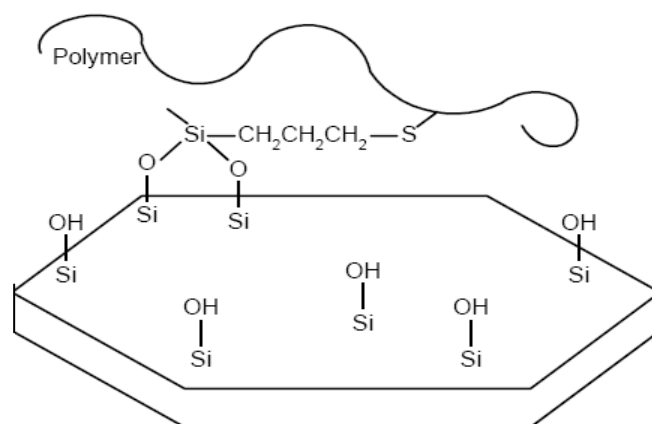


รูปที่ 4.15 ผลของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อมอดูลัสที่ระยะยืด 100%



รูปที่ 4.16 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อมอดูลัสที่ระยะยืด 100%

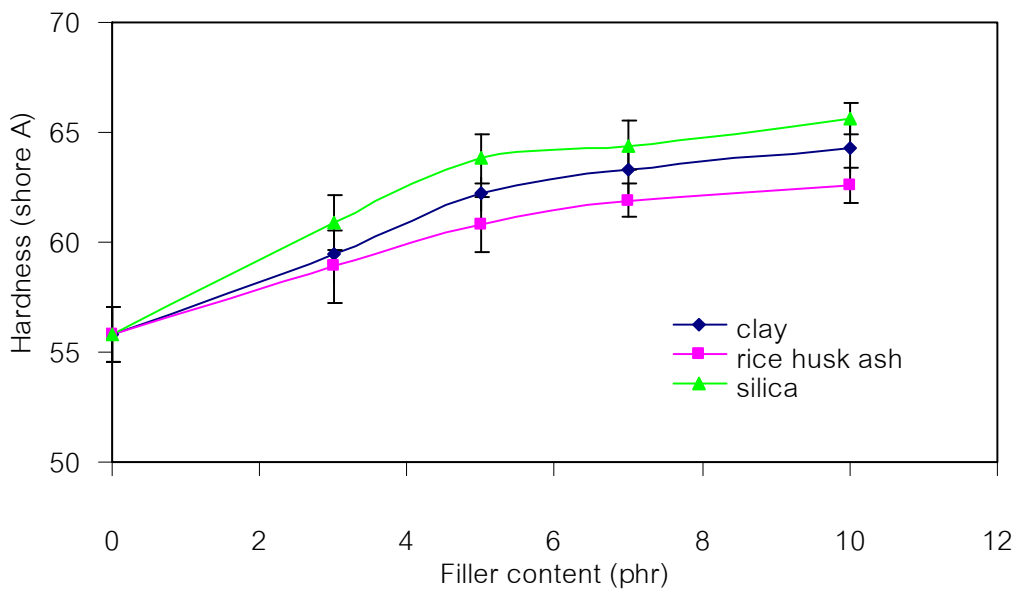
การเติมสารคู่ควบไซเลนช่วยให้มอดูลัสยืดหยุ่นของยางคอมโพสิตเพิ่มขึ้น และการเข้ากันได้ดีของยาง [24, 27] เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนจะช่วยปรับปรุงพันธะระหว่างยางกับสารตัวเติมให้มีความแข็งแรงมากขึ้น และช่วยให้ยางมีความต่อเนื่องของเฟสดีขึ้น การถ่ายเทแรงจากเฟสยางไปสู่สารตัวเติมได้ดีขึ้น ทำให้มอดูลัสยืดหยุ่นของยางคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบไซเลนกับสารตัวเติม และปฏิกิริยาระหว่างสารตัวเติมที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้วกับยางได้แสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบไซเลนกับสารตัวเติม (บริเวณพื้นผิว) และยาง [28]

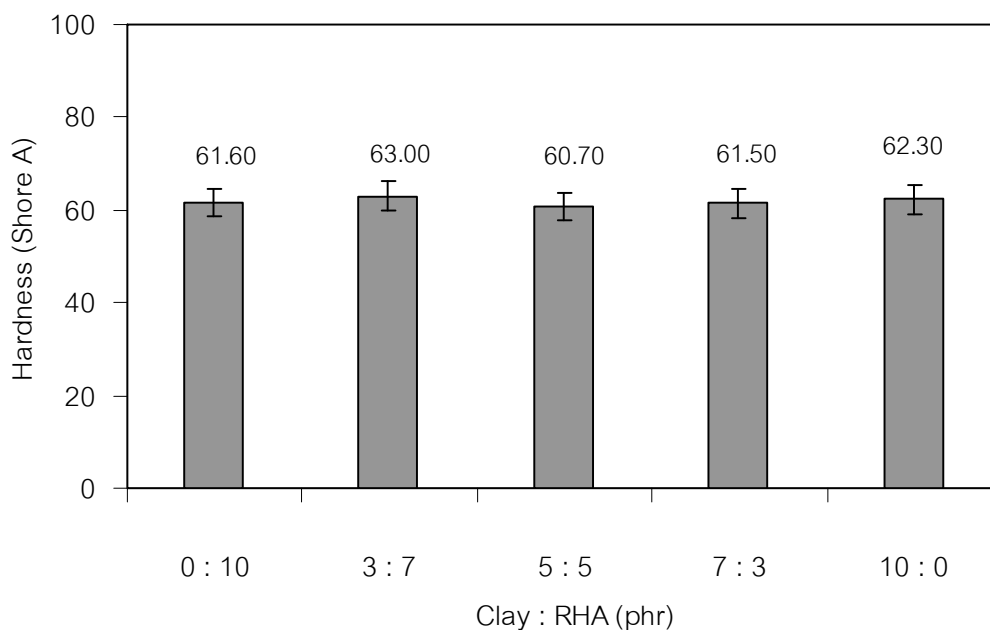
4.4.2 การทดสอบความแข็ง

รูปที่ 4.18 แสดงผลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ที่มีต่อความแข็งของยางคอมพอสิต จากการทดสอบพบว่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของสารตัวเติมแต่ละชนิดไปกีดขวางการเคลื่อนที่ของโซ่โมเลกุลยาง เมื่อปริมาณสารตัวเติมแต่ละชนิดเพิ่มขึ้น ความยืดหยุ่นของยางก็จะน้อยลง ทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น [27] โดยความแข็งของยางที่เติมซิลิกา เคลย์ และถั่วแกลบในปริมาณ 3 5 7 และ 10 phr จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใส่สารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ด้านผลของชนิดและขนาดอนุภาคสารตัวเติมต่อความแข็งของยางคอมพอสิตพบว่าความแข็งมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากขนาดอนุภาคของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดมีขนาดที่แตกต่างกัน โดยความแข็งของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยซิลิกามีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่เติมด้วยสารตัวเติมชนิดอื่นๆ เนื่องจากซิลิกาจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าเคลย์และถั่วแกลบ



รูปที่ 4.18 ผลของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อความแข็ง

รูปที่ 4.19 แสดงผลของชนิดและปริมาณระหว่างเคลย์และถั่วแกลบที่มีต่อความแข็งของยางคอมพอสิต จากการทดสอบความแข็งของยางคอมพอสิตเมื่อเติมเคลย์และถั่วแกลบปริมาณ 10 phr ในอัตราส่วนที่ต่างกัน พบว่าความแข็งของยางคอมพอสิตจะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเคลย์และถั่วแกลบเป็นอนุภาคที่แข็งลงไปนยางในปริมาณเท่ากันทุกกรณี

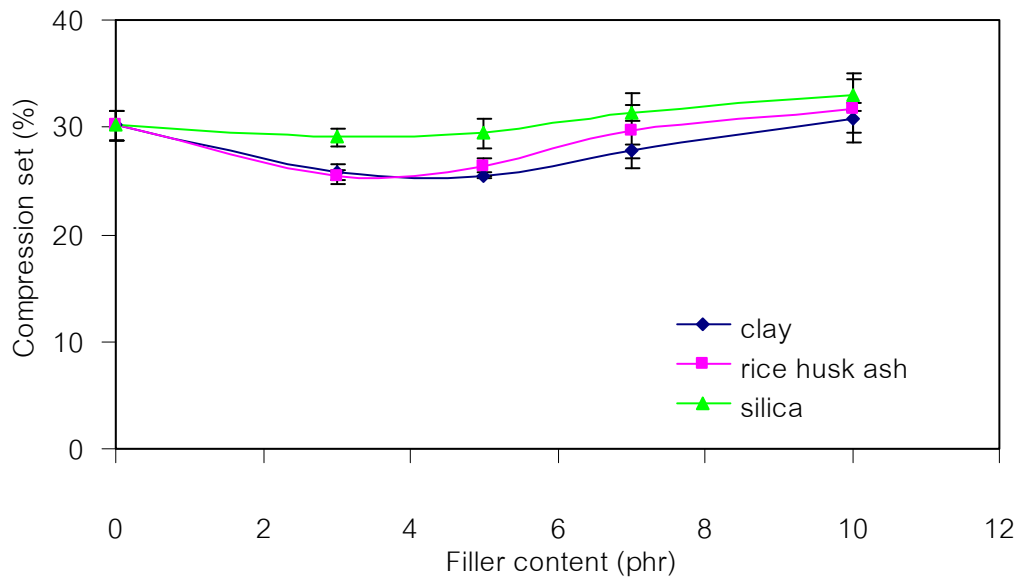


รูปที่ 4.19 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อความแข็ง

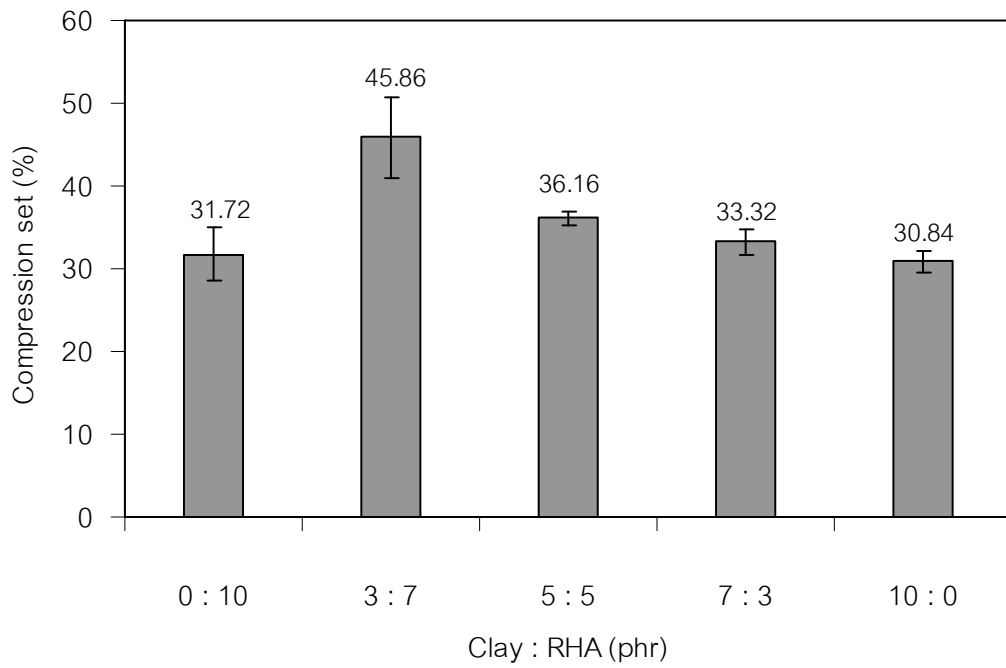
4.4.3 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด

จากรูปที่ 4.20 พบว่ายางคอมโพลีตที่มีการเติมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดจะมีเปอร์เซ็นต์การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่ใส่สารตัวเติม เมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ซิลิกา มีเปอร์เซ็นต์การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดสูงที่สุด โดยการทดลองจะทำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 22 ชั่วโมง จึงทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพขึ้น โดยยางที่ผสมซิลิกาจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าเคลย์และเถ้าแกลบจึงส่งผลให้ยางเมื่อเติมซิลิกาค้นตัวได้น้อยลง เนื่องจากการบีบอัดทำให้ซิลิกาและยางบีบตัวอัดกันอย่างหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการแข็งกระด้างมากขึ้น ค้นตัวได้ยากขึ้น พบว่ากรณีของยางผสมซิลิกามีแนวโน้มที่จะค้นตัวได้น้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม อาจเป็นเพราะซิลิกามีพื้นที่ผิวมากทำให้มีการค้นตัวได้ยากกว่าเคลย์และเถ้าแกลบ จากการทดลองโดยรวมการเติมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดในปริมาณต่างๆ พบว่าการทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.21 ผลของเคลย์และเถ้าแกลบรวมกันปริมาณ 10 phr ในอัตราส่วนที่ต่างกันต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางคอมโพลีต พบว่าเมื่อเติมเคลย์ 3 phr รวมกับเถ้าแกลบ 7 phr จะเกิดการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดมากที่สุด



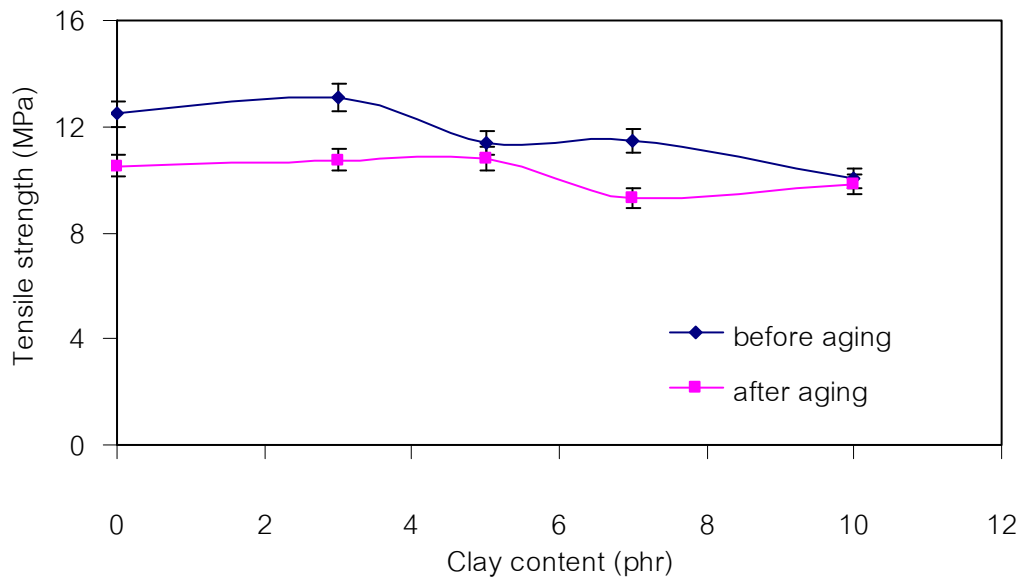
รูปที่ 4.20 ผลของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อแรงอัด



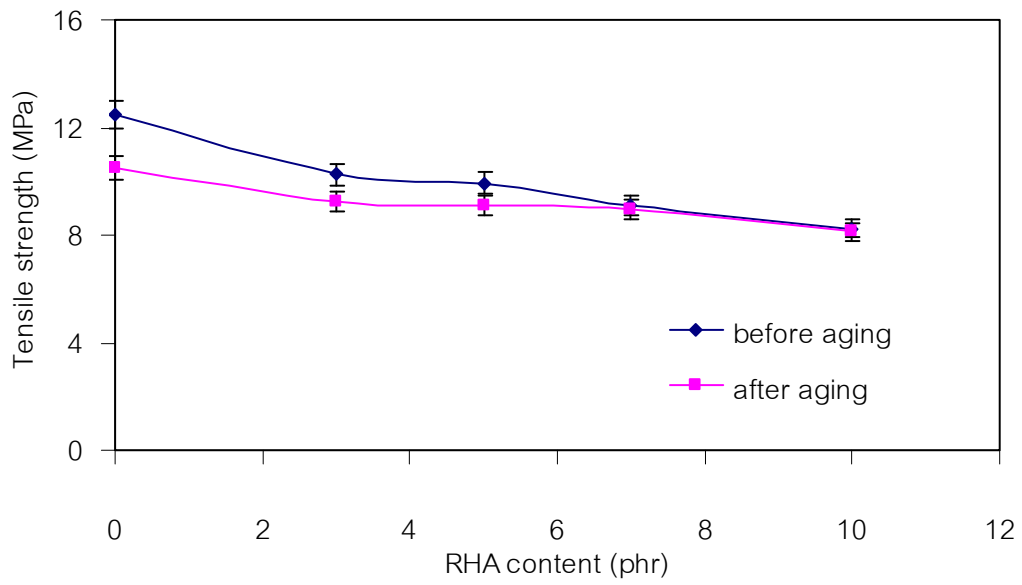
รูปที่ 4.21 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกันกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อแรงอัด

4.4.4 การทดสอบการทนทานต่อการเสื่อมสภาพ

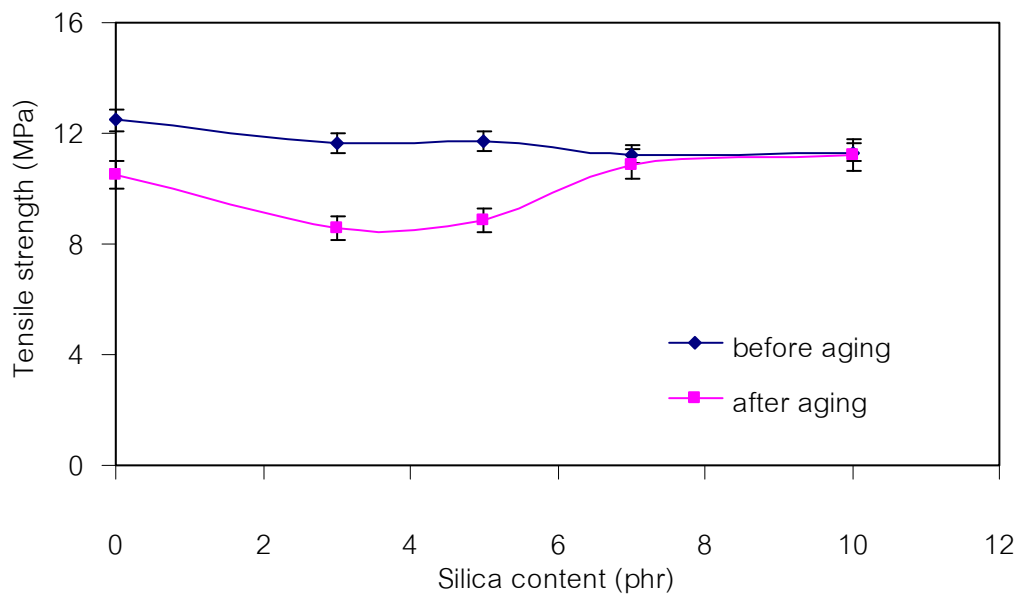
ผลการเปรียบเทียบสารคู่ควบโซลีนกับสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง (กรณีก่อนอบและหลังอบ) พบว่ากรณีหลังอบ เมื่อเติมเคลย์ เถ้าแกลบและ ซิลิกาในปริมาณที่เท่ากัน จะมีคุณสมบัติความแข็งแรงดึงต่ำกว่ากรณีก่อนอบ เนื่องจากขณะอบยางต้องสัมผัสความร้อน ซึ่งความร้อนจะเข้าทำปฏิกิริยากับยางได้เร็วยิ่งขึ้น ทำให้ยางคอมโพสิตที่เติมสารตัวเติมแต่ละชนิดนั้นเสื่อมสภาพได้เร็ว เลยส่งผลต่อความแข็งแรงดึงในกรณีหลังอบลดต่ำลง จากรูปที่ 4.22 เมื่อเติมเคลย์ที่ 5 7 และ 10 phr ในกรณีหลังอบจะไม่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของยาง และรูปที่ 4.23 - 4.24 เมื่อเติมเถ้าแกลบและซิลิกาที่ 7 และ 10 phr เมื่อนำยางไปอบด้วยร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง พบว่าการให้ความร้อนไม่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของยางคอมโพสิต



รูปที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบสารคู่ควบโซลีนกับเคลย์ที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง (กรณีก่อนอบและหลังอบ)

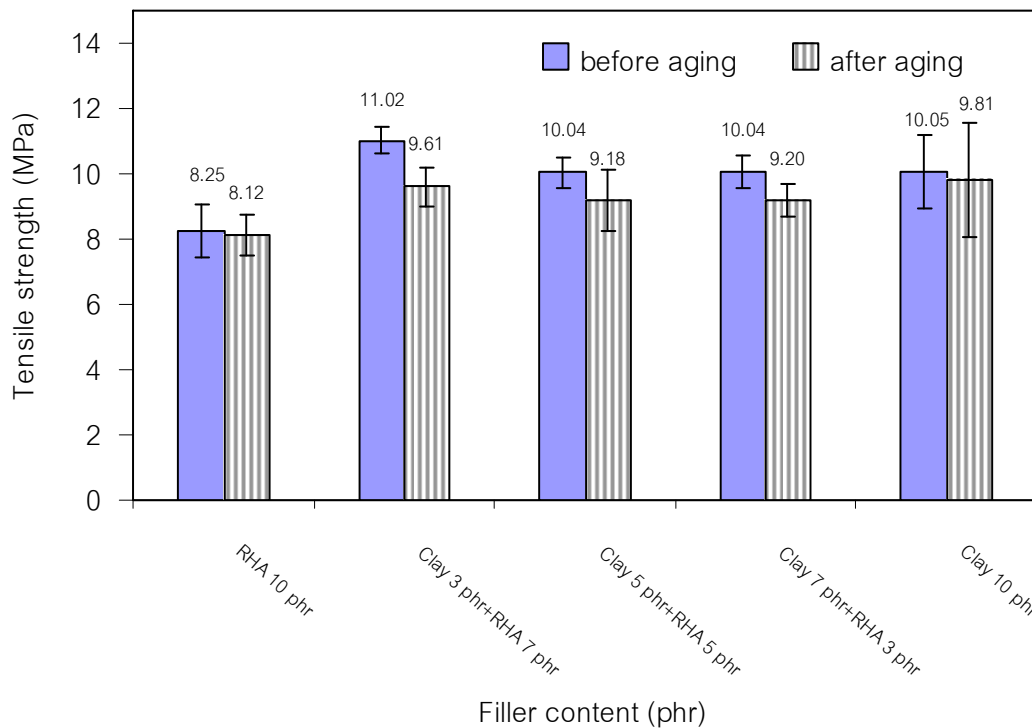


รูปที่ 4.23 ผลการเปรียบเทียบสารคู่ควบไซเลนกับแก้วเคลบที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง (กรณีก่อนอบและหลังอบ)



รูปที่ 4.24 ผลการเปรียบเทียบสารคู่ควบไซเลนกับซิลิกาที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง (กรณีก่อนอบและหลังอบ)

จากรูปที่ 4.25 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดในปริมาณ 10 phr รวมกันของอัตราส่วนที่ต่างกันที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง (กรณีก่อนอบและหลังอบ) พบว่ากรณีหลังอบ เมื่อเติมเคลย์รวมกับเถ้าแกลบนในปริมาณอัตราส่วนที่ต่าง ๆ กัน จะมีคุณสมบัติความแข็งแรงดึงต่ำกว่ากรณีก่อนอบ เนื่องจากชั้นทดสอบจะถูกอบหรือถูกบ่มแรงที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศปกติและภายในระยะเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของยางก่อนทำการอบ ขณะอบยางต้องสัมผัสความร้อน ซึ่งความร้อนจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยากับยางได้เร็วยิ่งขึ้น ทำให้ยางคอมพอสิตที่เติมสารตัวเติมแต่ละชนิดนั้นเสื่อมสภาพได้เร็ว ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงในกรณีหลังอบลดต่ำลงทุกกรณีของสารตัวเติม

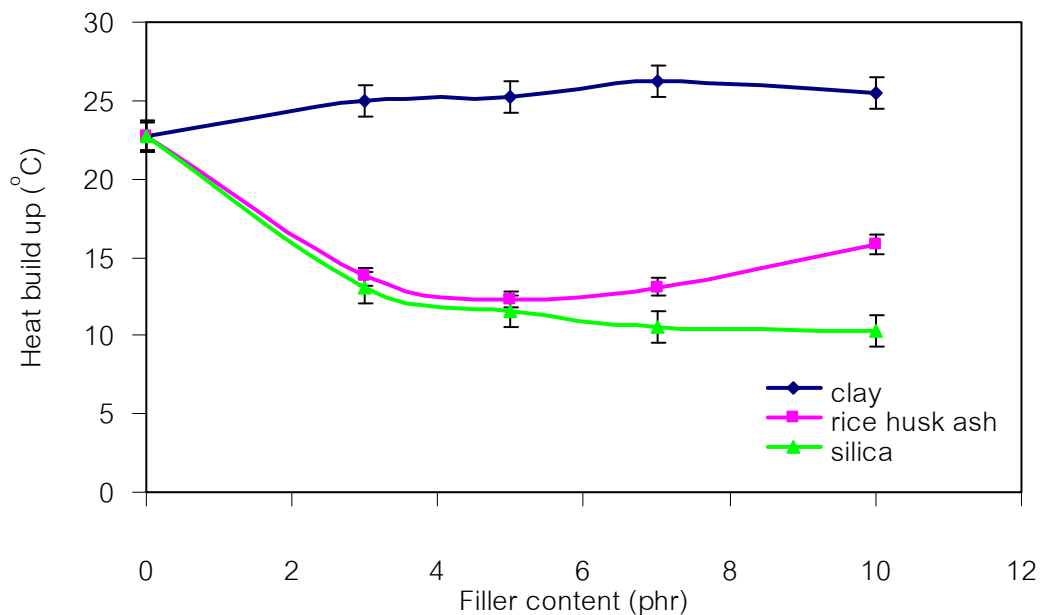


รูปที่ 4.25 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง (กรณีก่อนอบและหลังอบ)

4.5 การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต

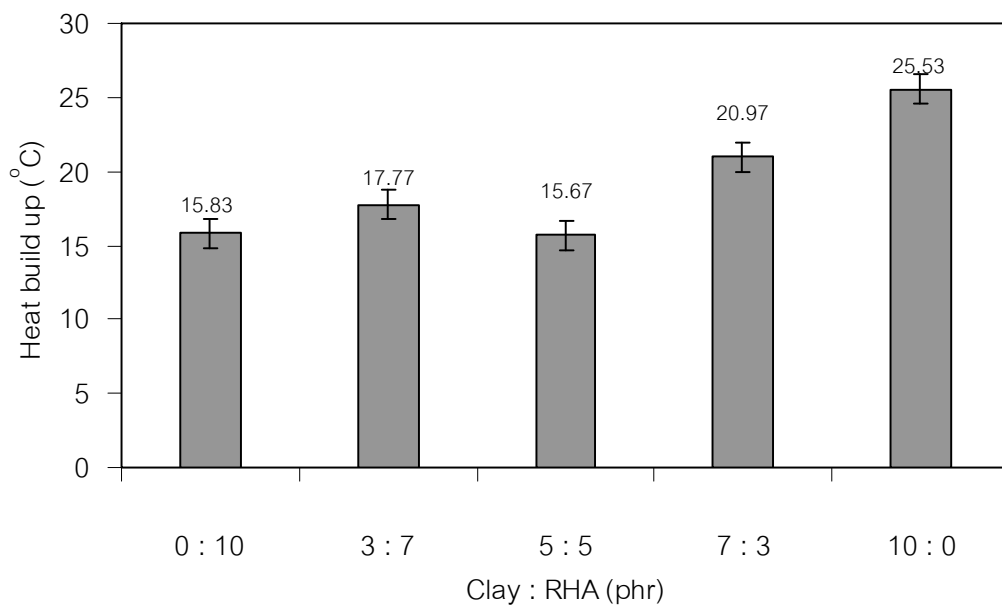
การทดสอบความร้อนสะสม (Heat build up)

ความร้อนสะสมของยางคอมพโอสิต เมื่อเติมสารตัวเติมเพิ่มขึ้นเคลย์จะมีแนวโน้มคงที่ แต่ซิลิกาจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากซิลิกาประกอบด้วยอะตอมซิลิกาและออกซิเจน จึงมีหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol groups, -Si-OH) บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำที่สามารถเกาะติดบนพื้นผิว และยังมีผลต่อความเป็นกรดบนพื้นผิวของซิลิกาอีกด้วย จากความมีขั้วหรือความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของซิลิกาทำให้สารตัวเติมชนิดนี้ลดความร้อนสะสมได้ดี[4] ส่วนเถ้าแกลบจะมีผลใกล้เคียงกับซิลิกาเพราะเถ้าแกลบจะมีองค์ประกอบของซิลิกาส่วนใหญ่เป็นหลัก พบว่าอุณหภูมิสะสมในยางมีค่าลดลงมากที่สุดที่ 5 phr ตามรูปที่ 4.26 โดยความร้อนสะสมในยางเมื่อเติมเถ้าแกลบที่ 5 phr สามารถลดความร้อนสะสมในยางได้ดีที่สุด แต่เมื่อเติมเถ้าแกลบมากกว่า 5 phr ความร้อนสะสมของยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าแกลบมีปริมาณของ LOI (ซี้เถ้า) ที่มากเกินไปจึงไปเพิ่มเนื้อยางให้มากขึ้น ทำให้ยางถูกกำจัดการเคลื่อนด้วยอนุภาคของเถ้าแกลบเลยส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของยาง อีกทั้งยังอาจมีความเป็น viscous สูงก็จะทำให้เกิดความร้อนขณะใช้งานสูงเช่นกัน ส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางได้ง่าย ในทางตรงกันข้ามเมื่อเติมเคลย์ไม่สามารถช่วยลดความร้อนสะสมของยาง เนื่องจากเคลย์มีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่น้อย จึงทำให้ไม่สามารถระบายความร้อนของยางได้ดี



รูปที่ 4.26 ผลของปริมาณสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดต่อความร้อนสะสมของยางคอมพโอสิต

ความร้อนสะสมของยางคอมโพสิตเมื่อเติมสารตัวเติมระหว่างเคลย์และเถ้าแกลบรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับสารคู่ควบไซเลน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนของเถ้าแกลบมากกว่าเคลย์ จะทำให้ความร้อนสะสมของยางมีค่าลดลง เนื่องจากในเถ้าแกลบจะมีปริมาณซิลิกาอยู่ค่อนข้างสูงและมีหมู่ไซเลนอลบนพื้นผิวมากกว่าเคลย์ จึงทำให้ความร้อนสะสมของยางลดลง ดังรูปที่ 4.27 จากการเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมอัตราส่วนเคลย์ต่อเถ้าแกลบในอัตราส่วน 0:10 3:7 และ 5:5 ความร้อนสะสมของยางมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งอัตราส่วนของเคลย์ 5 phr กับเถ้าแกลบ 5 phr สามารถลดความร้อนสะสมในยางได้ดีที่สุด เนื่องจากต้องการปริมาณซิลิกาในเถ้าแกลบให้มากเพื่อลดองค์ประกอบอื่นๆในสารตัวเติม จึงเลือกอัตราส่วนนี้นำไปทดลองเปรียบเทียบกับเบตซีใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมล้อรถยนต์



รูปที่ 4.27 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อความร้อนสะสมของยางคอมโพสิต

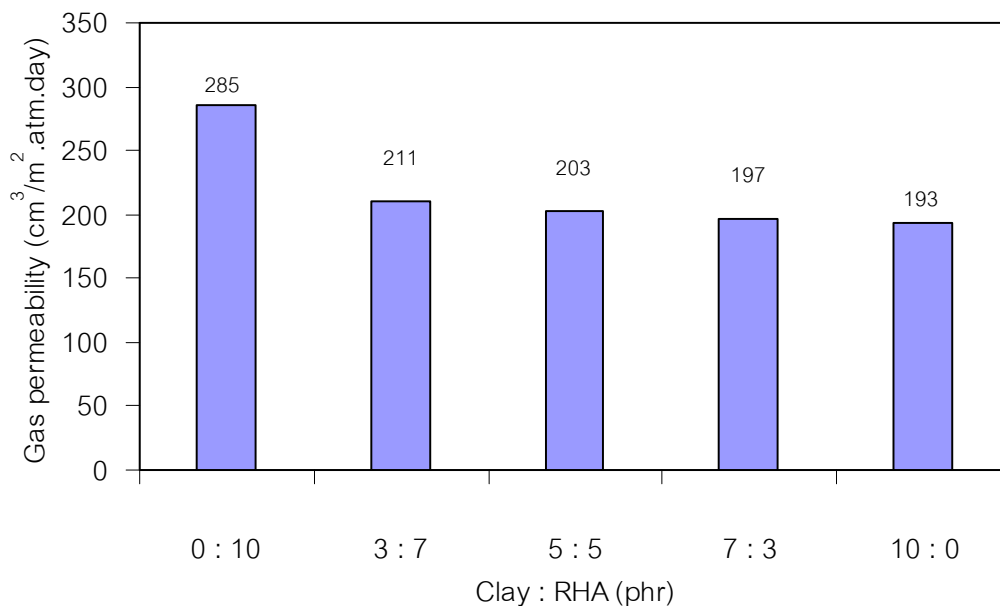
4.6 การทดสอบสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability)

การซึมผ่านของก๊าซ เมื่อปริมาณเคลือบเพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มจะลดลงตามลำดับ ดังตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมเคลือบที่ 3 phr มีปริมาณการซึมผ่านของก๊าซต่ำกว่ากรณีไม่ใส่เคลือบถึง 25 % เนื่องจากเคลือบมีลักษณะเป็นแผ่นบางจะกระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่เป็นยางคอมพโอสิต ซึ่งโมเลกุลของก๊าซไม่สามารถซึมผ่านอนุภาคของเคลือบได้ ดังนั้นโมเลกุลของก๊าซจะต้องเคลื่อนที่อ้อมแผ่นเคลือบ เพื่อไปยังด้านที่มีแรงดันต่ำกว่าทำให้ระยะทางของโมเลกุลต้องมีการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้มีปริมาณการซึมผ่านของก๊าซได้น้อยลง [19, 28] ซึ่งจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติเชิงกลเมื่อเติมเคลือบมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ในด้านการซึมผ่านของก๊าซเมื่อเติมเคลือบมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 4.4 ผลของปริมาณเคลือบต่อการซึมผ่านของก๊าซ

ปริมาณเคลือบ (phr)	การซึมผ่านของก๊าซ($\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{day}$)
0	285
3	215
5	208
7	195
10	193

การซึมผ่านของก๊าซของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดคือเคลือบกับแก้วกลบรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกันกับสารคู่ควบไซเลนเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนเคลือบเพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มจะลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมเคลือบในอัตราส่วนมากขึ้น มีการซึมผ่านของก๊าซน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมเคลือบ

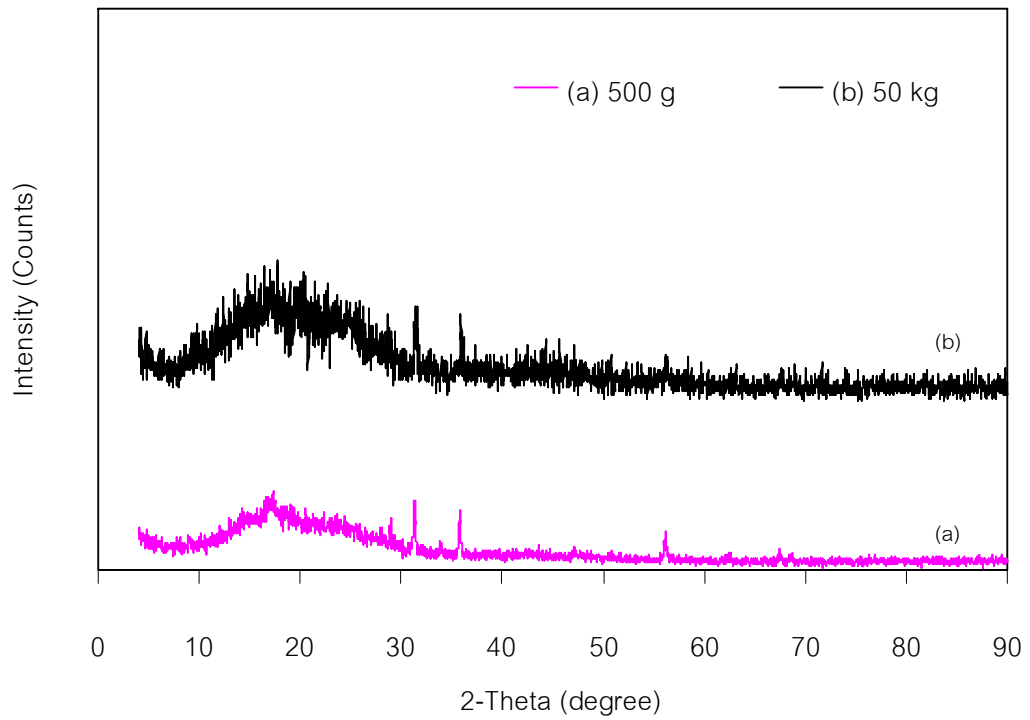


รูปที่ 4.28 ผลของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดรวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกับกับสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อการซึมผ่านของก๊าซของยางคอมโพสิต

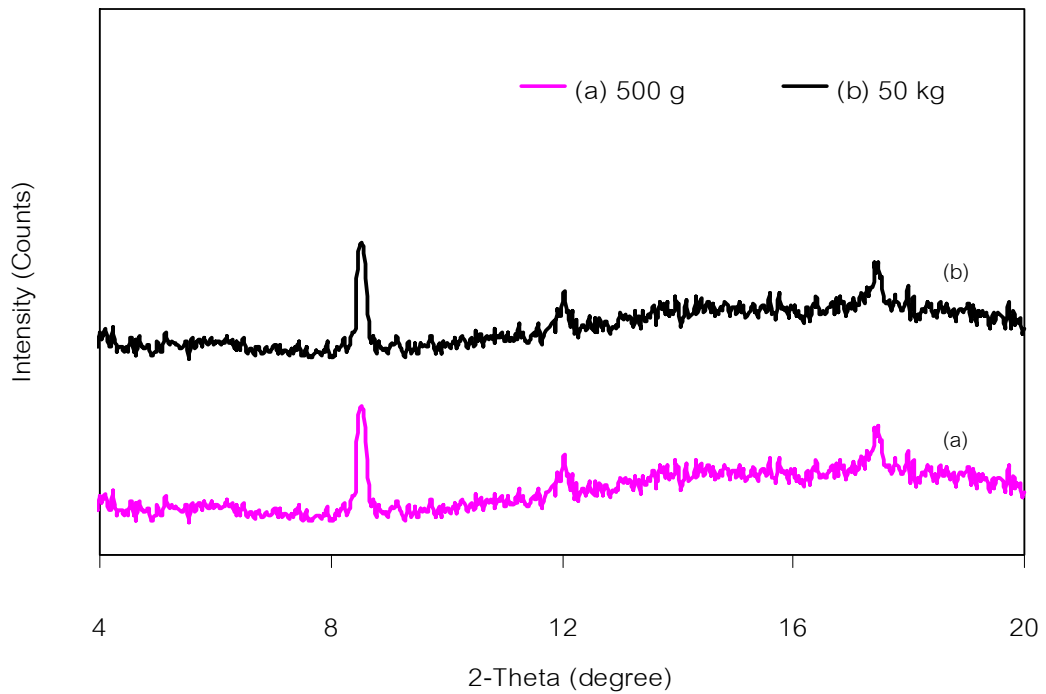
4.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็ก (500g) กับแบทซ์ใหญ่ (50kg, n=1)

4.7.1 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางคอมโพสิต (XRD) ระหว่างแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่

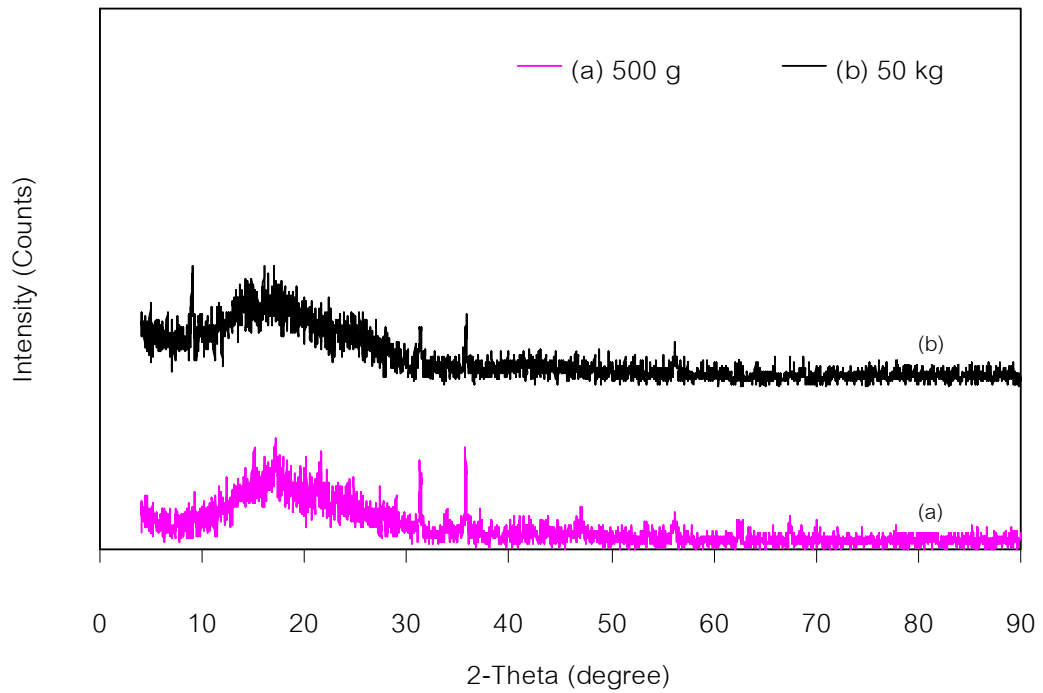
จากรูปที่ 4.29-4.32 จากการเปรียบเทียบการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางคอมโพสิต (XRD) ระหว่างแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ซึ่งเป็นแบทซ์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ในกรณีเมื่อเติมเคลย์ 3 phr เถ้าแกลบ 5 phr ผสมเคลย์และเถ้าแกลบรวมกันอย่างละ 5 phr และกรณีที่ไม่ใส่สารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด พบว่าวิธีการบดผสมของเครื่องจักรที่แตกต่างกันซึ่งทำให้ peak ที่เกิดขึ้นแตกต่างกันบ้าง อาจเกิดจากการบดของแบทซ์ใหญ่ในปริมาณที่มากทำให้แรงเฉือนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในขณะบดน้อย ซึ่งต่างจากแบทซ์เล็กบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งในปริมาณน้อยๆจึงทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างการบดมาก อีกทั้งการหมุนเวียนไปมาของยางจะช่วยทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดียิ่งขึ้น โดยการบดผสมแต่ละครั้งมีคุณภาพค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ในการบดผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดบานบุรีจะเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ยาก เนื่องจากเป็นการบดผสมภายใน จึงทำให้อุณหภูมิของยางในระหว่างการผสมสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว [10]



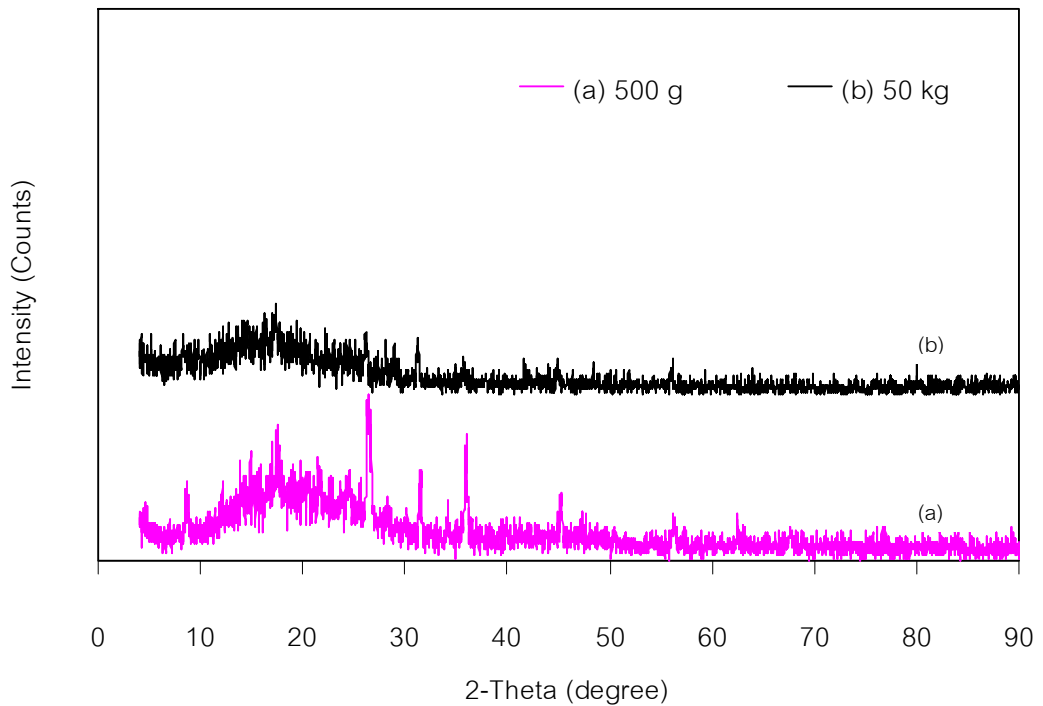
รูปที่ 4.29 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ด้วย XRD pattern ในกรณีที่ไม่ใส่สารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 4.30 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ด้วย XRD pattern ของเคลย์ 3 phr



รูปที่ 4.31 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ด้วย XRD pattern ของเถ้าแกลบ 5 phr



รูปที่ 4.32 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทซ์เล็กกับแบทซ์ใหญ่ด้วย XRD pattern ในการผสมเคลย์ 5 phr กับเถ้าแกลบ 5 phr รวมกัน

4.7.2 การเปรียบเทียบการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ในแบทช์เล็กกับแบทช์ใหญ่

จากตารางที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติการคงรูปของยางคอมพโอสิตในแบทช์เล็กและแบทช์ใหญ่ ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมและดีที่สุดในการคั่วของแบทช์เล็ก โดยเลือกมาเปรียบเทียบกัน 4 กรณี คือ กรณีไม่ใส่สารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด เติมเคลย์ 3 phr เถ้าแกลบ 5 phr และเคลย์กับเถ้าแกลบรวมกันอย่างละ 5 phr เมื่อนำทั้ง 4 กรณีไปทดสอบในแบทช์ใหญ่ พบว่าระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (scorch time) และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time) ของแบทช์ใหญ่ช้ากว่าแบทช์เล็ก จากผลต่างของแรงบิดทั้ง 2 แบทช์ที่ต่างกัน คือแบทช์เล็กจะมีผลต่างแรงบิดสูงจึงเกิดการเชื่อมโยงพันธะ (crosslink) สูงกว่าแบทช์ใหญ่ จึงส่งผลให้การทดลองของคุณสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งและค่ามอดุลัสของยางคอมพโอสิตในแบทช์เล็กดีกว่าแบทช์ใหญ่

ตารางที่ 4.5 สมบัติการคงรูปของยางคอมพโอสิตในแบทช์เล็กและแบทช์ใหญ่ของปริมาณสารตัวเติมได้เลือกจากแบทช์เล็กที่ดีที่สุด โดยใช้อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 30 นาที

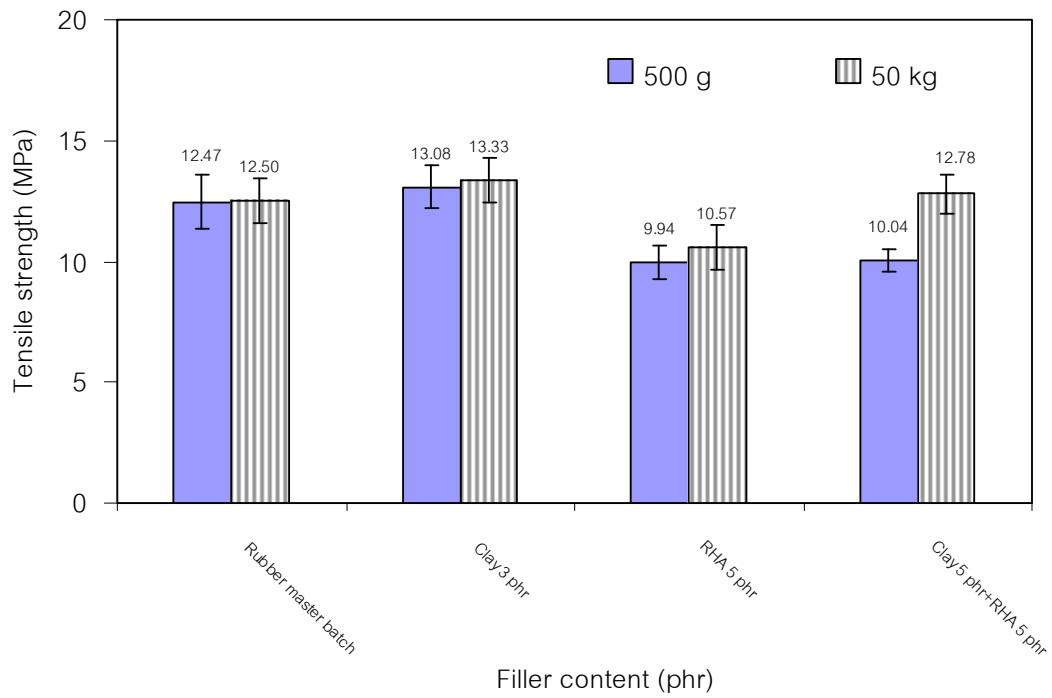
ปริมาณสารตัวเติม (phr)		TS1 (Min :sec)	TC90 (Min :sec)	ΔT (dNm)
ไม่ใส่สารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด	แบทช์เล็ก	5.39	14.26	12.28
	แบทช์ใหญ่	5.43	15.17	7.91
Clay 3 phr	แบทช์เล็ก	5.07	14.16	11.61
	แบทช์ใหญ่	5.58	15.48	8.20
RHA 5 phr	แบทช์เล็ก	4.57	14.15	12.69
	แบทช์ใหญ่	5.43	15.47	8.45
Clay 5 phr+RHA 5 phr	แบทช์เล็ก	4.32	13.58	12.54
	แบทช์ใหญ่	5.46	16.27	8.50

หมายเหตุ TS1 คือ ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปหรือเวลาเริ่มเกิดการเชื่อมโยงพันธะ
 TC90 คือ ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์หรือระยะเวลาในการเชื่อมโยงพันธะ
 ΔT คือ ผลต่างระหว่างแรงบิดสูงสุด (T_{max}) และแรงบิดน้อยสุด (T_{min})

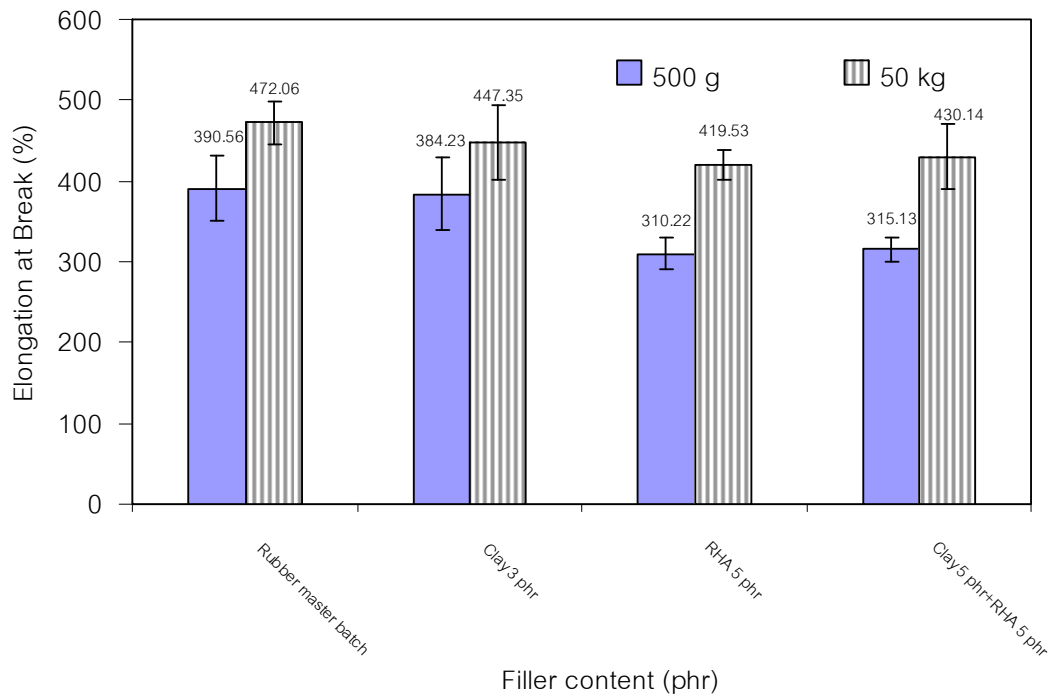
4.7.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลในแบทช์เล็กกับแบทช์ใหญ่

จากคุณสมบัติเชิงกล เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองแบทช์เล็ก (500 g) กับแบทช์ใหญ่ (50 kg, n=1) ที่มีผลต่อการทนทานต่อแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งแรง และการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ดังรูปที่ 4.33- 4.37 พบว่าการทนต่อแรงดึง และระยะยืดเมื่อขาดในแบทช์ใหญ่จะให้ผลดีกว่าแบทช์เล็ก ส่วนค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดและความแข็งแรงในแบทช์เล็กจะให้ผลดีกว่าแบทช์ใหญ่ แต่เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองโดยรวมในแบทช์เล็กกับแบทช์ใหญ่จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก แทบจะไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งอาจมีสาเหตุที่ทำให้แบทช์เล็กและแบทช์ใหญ่มีความแตกต่างกันบ้าง เนื่องจากในแบทช์เล็กใช้เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งคือแรงเฉือนที่เกิดขึ้นตรงช่วงว่างระหว่างลูกกลิ้งมีค่าค่อนข้างสูง ทำให้องค์ประกอบต่างๆ ผสมเข้าไปในยางได้ดีและทำให้สารตัวเติมเกิดการแตกตัวที่ดี นอกจากนี้ ในระหว่างการผสมนั้น ยางจะมีพื้นที่สัมผัสกับอากาศสูงมาก ดังนั้นการระบายความร้อนจึงเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ยางมีความหนืดสูงในระหว่างการผสมยาง ซึ่งข้อเสียในการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งจะควบคุมความสม่ำเสมอในการบดผสมยางของแต่ละครั้งได้ยาก เมื่อเปรียบเทียบกับแบทช์ใหญ่ด้วยเครื่องผสมระบบปิดบานบุรี แรงเฉือนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่างปีกของโรเตอร์กับผนังของห้องผสม ส่วนพื้นที่ที่เหลือในห้องผสมนั้นมิใช่เพื่อยางและองค์ประกอบอื่นๆ ไหลหมุนเวียนไปมาได้สะดวก ซึ่งในการหมุนเวียนไปมาของยางจะช่วยให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดียิ่งขึ้น โดยการบดผสมแต่ละครั้งมีคุณภาพค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ในการบดผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดบานบุรีจะเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ยาก จึงทำให้อุณหภูมิของยางในระหว่างการผสมสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

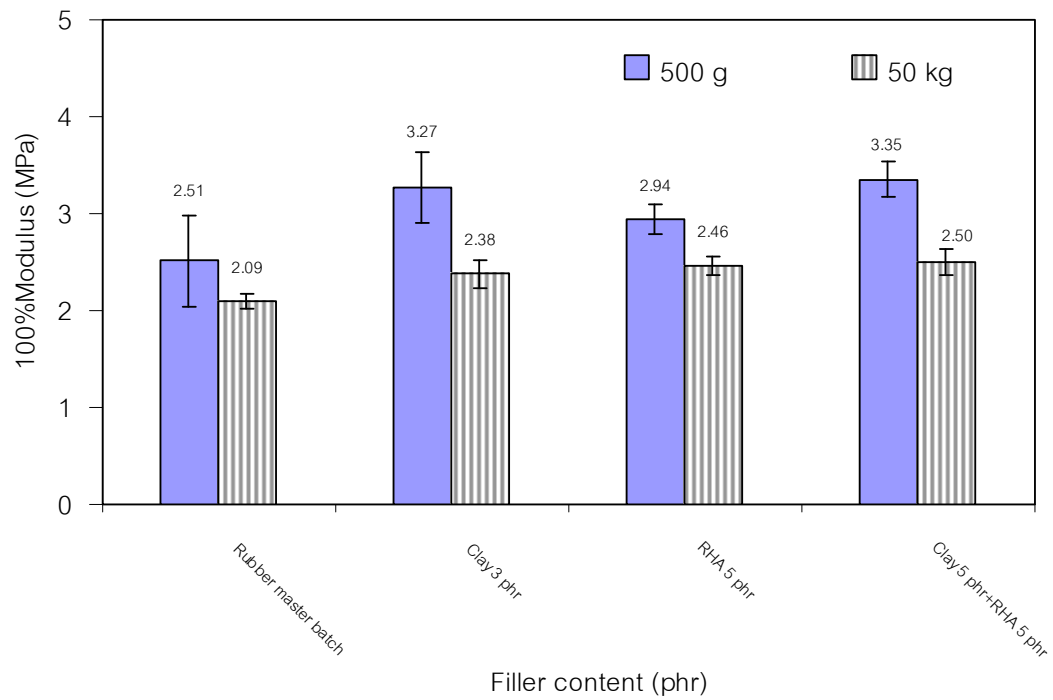
จากการทดลองเปรียบเทียบผลการทดลองแบทช์เล็ก (500 g) กับแบทช์ใหญ่ (50 kg, n=1) แต่ละคุณสมบัติมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองทั้ง 4 กรณี คือกรณีที่ไม่มีสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด เคลย์ 3 phr แก้วกลบ 5 phr และเคลย์กับแก้วกลบรวมกันอย่างละ 5 phr ซึ่งในแต่ละกรณีของแบทช์ก็ยังมีค่าใกล้เคียงกัน



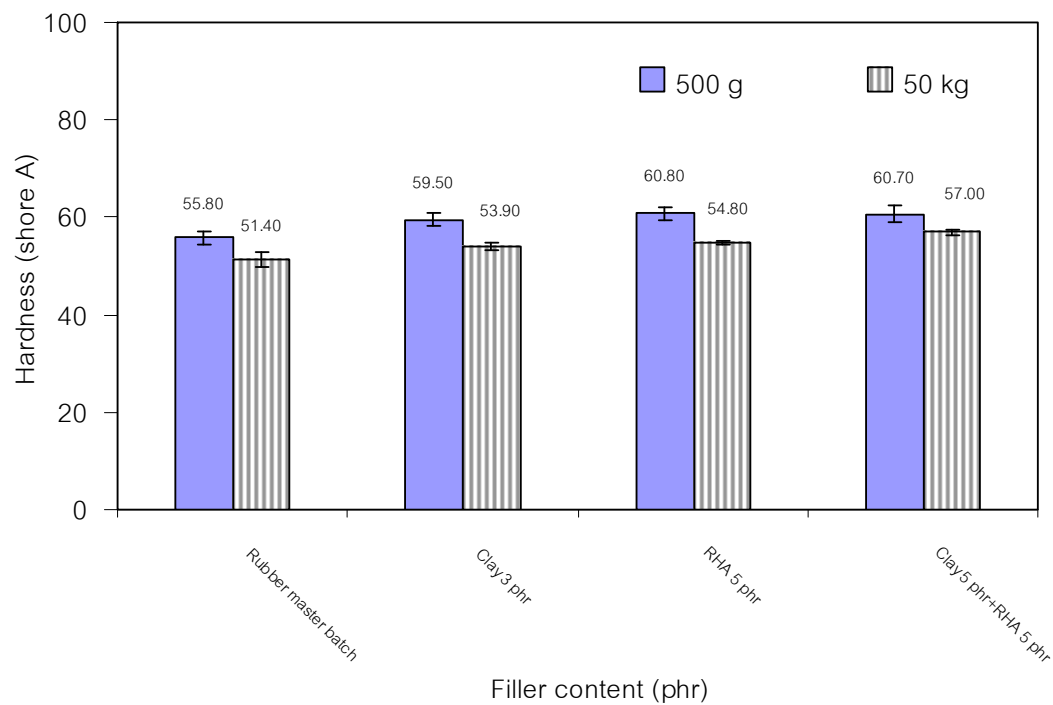
รูปที่ 4.33 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทช์เล็กกับแบทช์ใหญ่ที่มีผลการทนต่อแรงดึง



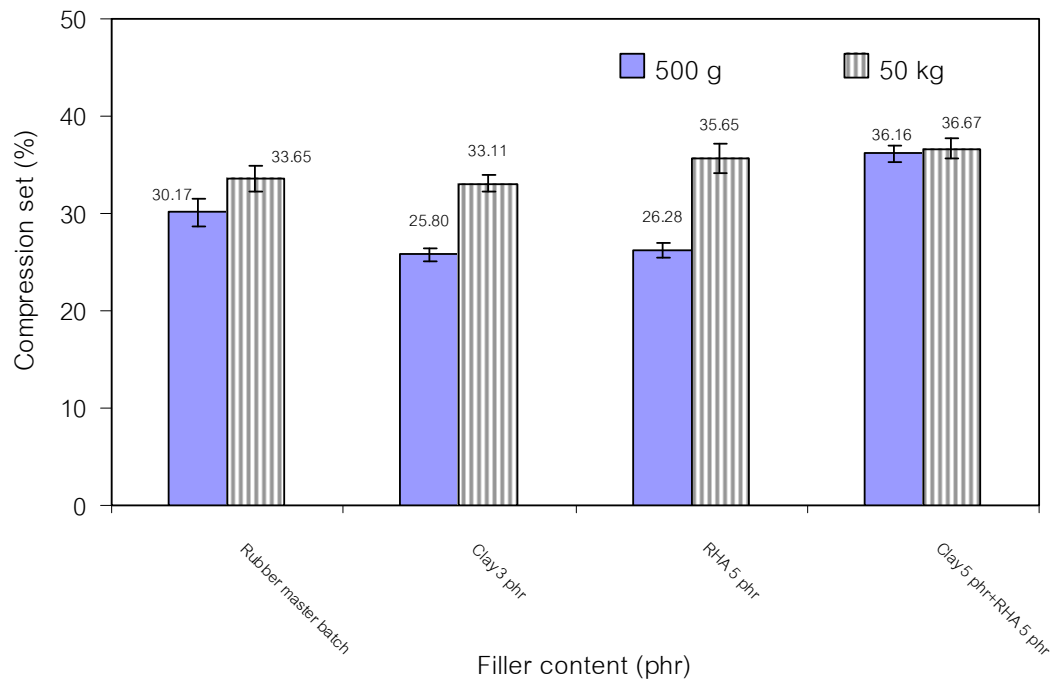
รูปที่ 4.34 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทช์เล็กกับแบทช์ใหญ่ที่มีผลต่อระยะยืดเมื่อขาด



รูปที่ 4.35 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทช์เล็กกับแบทช์ใหญ่ที่มีผลต่อมอดุลัสที่ระยะยัด 100%



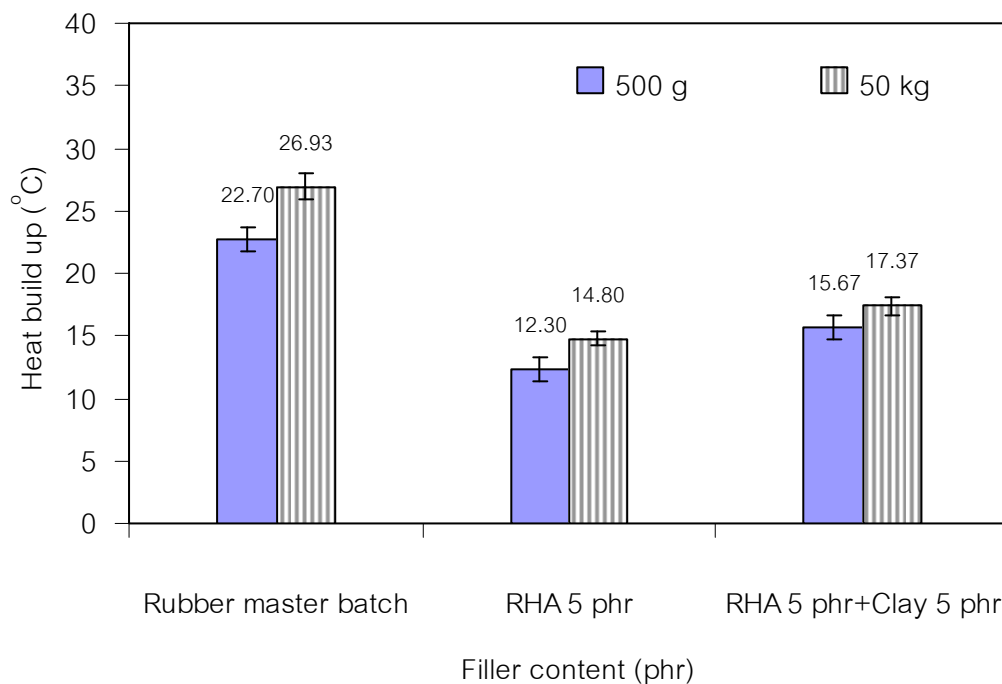
รูปที่ 4.36 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทช์เล็กกับแบทช์ใหญ่ที่มีผลต่อค่าความแข็ง



รูปที่ 4.37 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทช์เล็กกับแบทช์ใหญ่ที่มีผลต่อแรงอัด

4.7.4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบความร้อนสะสม (Heat build up) ในแบทช์เล็กกับแบทช์ใหญ่

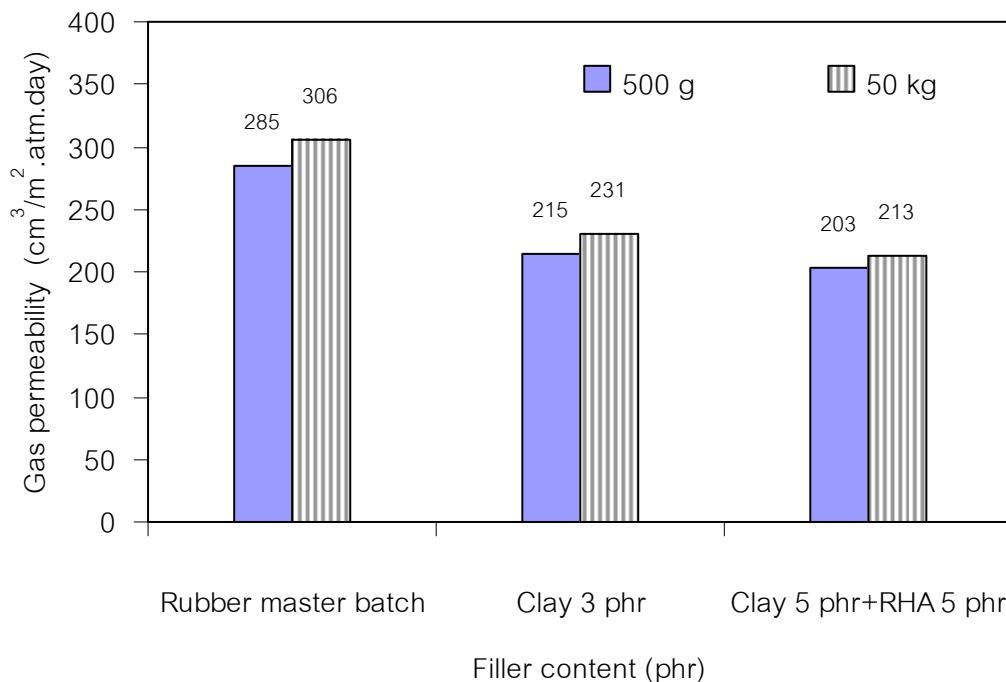
จากรูปที่ 4.38 เปรียบเทียบความร้อนสะสมของยางคอมพอสิตใน 3 กรณี คือกรณีที่ไม่มีใส่สารตัวเติม กรณีที่ใส่เคลย์ 3 phr และกรณีที่ใส่เคลย์ 5 phr กับเถ้าแกลบ 5 phr พบว่ากรณีเมื่อใส่เถ้าแกลบ 5 phr สามารถลดความร้อนสะสมของยางได้ดีที่สุด เนื่องจากในเถ้าแกลบจะมีซิลิกาเป็นส่วนมากซึ่งสามารถลดความร้อนของยางได้ดี อีกทั้งปริมาณสารตัวเติมที่เหมาะสมทำให้เถ้าแกลบไม่จับตัวเป็นก้อนในเนื้อยาง และจากการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทช์เล็ก (500 g) กับแบทช์ใหญ่ (50 kg) ทั้ง 3 กรณี พบว่าการผสมในแบทช์เล็กสามารถลดความร้อนสะสมของยางได้มากกว่าการผสมในแบทช์ใหญ่ และมีความแตกต่างของความร้อนสะสมระหว่างการผสมในแบทช์ใหญ่และแบทช์เล็กในแต่ละกรณีอยู่ประมาณ 15 %



รูปที่ 4.38 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบทช์เล็กกับแบทช์ใหญ่ในด้านความร้อนสะสม

4.7.5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) ในแบบที่เล็กกับแบบที่ใหญ่

การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ จากรูปที่ 4.39 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณสารตัวเติมที่เหมาะสมทั้ง 3 กรณี คือ กรณีที่ไม่ใส่สารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด กรณีที่ใส่เคลย์ 3 phr และกรณีที่ใส่เคลย์กับเถ้าแกบลอย่างละ 5 phr พบว่าเมื่อใส่เคลย์และเถ้าแกบลอย่างละ 5 phr สามารถลดปริมาณการซึมก๊าซได้ดีที่สุด เนื่องจากปริมาณเคลย์และเถ้าแกบลมีลักษณะการกระจายตัวอยู่ทั่วเมทริกซ์ในยางคอมโพสิต ซึ่งโมเลกุลของก๊าซจะซึมผ่านอนุภาคของสารตัวเติมได้ยาก จึงทำให้มีปริมาณการซึมผ่านของก๊าซได้น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบในกรณีอื่นๆ และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองในแบบที่เล็ก (500 g) กับแบบที่ใหญ่ (50 kg) ทั้ง 3 กรณี พบว่าการผสมในแบบที่เล็กสามารถกันการซึมผ่านของก๊าซได้มากกว่าการผสมในแบบที่ใหญ่ และมีความแตกต่างของการซึมผ่านของก๊าซระหว่างการผสมในแบบที่ใหญ่และแบบที่เล็กในแต่ละกรณีอยู่ประมาณ 7 %



รูปที่ 4.39 ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองแบบที่เล็กกับแบบที่ใหญ่ในด้านการซึมผ่านของก๊าซ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของของปริมาณสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เคลย์ เถ้าแกลบ และซิลิกา ที่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมโพสิต โดยทำการศึกษาระยะเวลาที่ยางเริ่มคงรูป (scorch time) และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time) พบว่าปริมาณสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ไม่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมโพสิต

5.1.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิต ในกรณีผลของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด

การคอมโพสิตเมื่อเติมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่เคลย์ เถ้าแกลบ ซิลิกา จากการศึกษาความแข็งแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด มอดูลัส ความแข็ง และความทนทานต่อแรงอัด พบว่าเมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด พบว่าเคลย์จะให้คุณสมบัติเชิงกลดีกว่าซิลิกาและเถ้าแกลบตามลำดับ การเติมสารควบไซเลนลงไปในยางคอมโพสิต จะช่วยปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับยาง จึงทำให้สมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิต โดยเฉพาะค่ามอดูลัส และความแข็งแรงมีค่าสูงขึ้น แต่ความแข็งแรงดึงและระยะยืดเมื่อขาดมีค่าลดลง เนื่องจากยางมีความแข็งเกร็งมากขึ้น ยางคอมโพสิตจึงขาดที่ระยะขาดน้อยลง

5.1.2 คุณสมบัติเชิงพลวัต (ความร้อนสะสม)

ความร้อนสะสมของยางคอมโพสิต เมื่อเปรียบเทียบเติมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด พบว่าเมื่อเติมสารตัวเติมแต่ละชนิด ซิลิกาสามารถลดความร้อนสะสมของยางได้ดีกว่าเถ้าแกลบและเคลย์ ซึ่งผลการทดลองของซิลิกาและเถ้าแกลบจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ถ้าเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ของการค้ำทุ่น เถ้าแกลบเป็นวัสดุที่เหลือใช้ทางเกษตรกรรม โดยเถ้าแกลบที่ 5 phr สามารถลดความร้อนสะสมของยางได้ดีที่สุด เมื่อนำสารตัวเติมเคลย์และเถ้าแกลบมารวมกันในอัตราส่วนที่ต่างกัน ปริมาณไม่เกิน 10 phr พบว่าเมื่อเติมเคลย์ 5 phr รวมกับเถ้าแกลบ 5 phr สามารถลดความร้อนสะสมของยางได้ดีที่สุด

5.1.3 คุณสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ

การเปรียบเทียบปริมาณอัตราส่วนของเคลย์ที่เพิ่มขึ้นในคุณสมบัติการซึมผ่านของก๊าซพบว่าปริมาณเคลย์เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณการซึมผ่านของก๊าซลดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบในด้านการนำไปใช้งานจากการเติมปริมาณเคลย์ 3 5 7 และ 10 phr มีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงเลือกปริมาณที่ 3 phr ไปทดลองแบบทรีใหญ่ในโรงงานเพื่อจะปรับปรุงการซึมผ่านก๊าซที่ดีขึ้นต่อประสิทธิภาพการใช้งานได้จริงและสามารถลดต้นทุนได้อีกทาง

5.1.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆในแบบทรีเล็ก (500 g) กับแบบทรีใหญ่ (50 kg, n=1)

ผลการทดลองการผสมในแบบทรีเล็กทุกคุณสมบัติมีผลใกล้เคียงกับแบบทรีใหญ่มาก ในปริมาณที่ได้เลือกเปรียบเทียบได้แก่ เคลย์ 3 phr เถ้าแกลบ 5 phr และเคลย์กับเถ้าแกลบรวมกันอย่างละ 5 phr พบว่ากรณีเมื่อเติมเคลย์กับเถ้าแกลบรวมกันอย่างละ 5 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด ที่จะขยายไปสู่ในโรงงานอุตสาหกรรมยางล้อรถด้วยวิธีการผสมแบบ Melt mixing เพราะสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทั้ง 2 ด้าน คือ ความร้อนสะสมและการซึมผ่านของก๊าซ อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของยางคอมโพสิตด้วยการถ่ายภาพโดยเครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM) เพื่อวิเคราะห์ให้เห็นการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจทำให้พบความแตกต่างของโครงสร้างของยางคอมโพสิตและสามารถอธิบายผลการทดลองในคุณสมบัติต่างๆของยางคอมโพสิตได้เด่นชัดยิ่งขึ้น

ในส่วนของแบบทรีใหญ่ (50 kg, n=1) หากต้องการขยายไปสู่อุตสาหกรรม ควรมีการทดลองซ้ำอย่างน้อย 20 ครั้ง เพื่อยืนยันผลในการทดลองก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตจริง

รายการอ้างอิง

1. เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร์. เทคโนโลยีของยาง. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
2. Sae-oui, P., Rakdee, C. and Thanmathorn, P. Use of Rice Husk Ash as Filler in Natural Rubber Vulcanizates: In Comparison with Other Commercial Fillers. Journal of Applied Polymer Sciences 83 (2002): 2485-2493.
3. พงษ์ธร แซ่อูย. ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2547.
4. อธิพิล แจ้งชัด. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537.
5. พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. บัณฑิตานี้ : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2528.
6. Kornmann, X. Synthesis and Characterisation of Thermoset-clay nanocomposite. Dissertation. Division of Polymer Engineering. Lulea University of Technology, Sweden. 1999.
7. Ishida, H., Campbell, S., and Blackwell, J. General Approach to Nanocomposite Preparation. Chem. Mater. (2000): 1260.
8. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. เทคโนโลยียาง. กรุงเทพมหานคร : ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2541.
9. นุชนาฏ ณ ระนอง. คู่มือเทคโนโลยียาง. กรุงเทพมหานคร : ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2545.
10. พงษ์ธร แซ่อูย และ ชาคริต สิริสิงห. กระบวนการผลิต และการทดสอบ. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550.
11. Magaraphan, R., Thaijaroen, W., and Lim-Ochakun, R. Structure and properties of natural rubber and modified montmorillonite nanocomposites. Polymer Chem Tech. 76 (2003): 406-418.
12. Arroyo, M., Lopez-Manchado, M.A., and Herrero, B. Organo-montmorillonite as substitute of carbon black in natural rubber compounds. Polymer 44 (2003): 2447-2453.

13. Teh, P.L., Ishak, Z.A.M., A.S., Karger-Kocsis, J. and Ishiaku, U.S. Effect of epoxidized natural rubber as a compatibilizer in melt compounded natural rubber-organoclay nanocomposites. European Polymer Journal 40 (2004): 2513-2521.
14. Da Costa, H.M., Visconte L.L.Y., Nunes, R.C.R. and Furtado, C.R.G. Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Rice Husk Ash-Filled Natural Rubber Compounds. Journal of Applied Polymer Science 83 (2002): 2331-2346.
15. Soo-Jin, P. and Ki-Sook, C. Filler-elastomer interactions: influence of silane coupling agent on crosslink density and thermal stability of silica/rubber composites. Journal of Colloid and interface Science 267 (2003): 86-91.
16. Liang, Y., Wang, Y., Wua, Y., Lub, Y., Zhanga, H., Zhang, L. Preparation and properties of isobutylene–isoprene rubber (IIR)/clay nanocomposites. Polymer Testing 24 (2005): 12–17.
17. Netrpukana, S. and Pattamaprom, C. The effect of compatibilizing agents on mechanical properties of natural rubber-nanocomposite. Chiang Mai Journal of Science Sept, (2005).
18. Wang, C. A study of the dynamic mechanical properties of swollen elastomers under the static strain. Polymer (2005).
19. Amornsakchai, T. The developed of natural rubber-clay nanocomposite : natural rubber with low gas permeability. Polymer (2007).
20. Rattanasom, N., Saowapark, T. and Deeprasertkul, C. Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler. Polymer Testing 26 (2007): 369-377.
21. Bandyopadhyay, S. Dynamic mechanical spectroscopic studies on the miscibility of polychloroprene-epoxidized natural rubber blend in presence of carbon black filler. Polymer 36 (1995): 1979-1984.
22. Sombatsompop, N. Fly Ash Particles and Precipitated Silica as Filler in Rubbers. I. Untreated Fillers in Natural Rubber and Styrene-Butadiene Rubber Compounds. Journal of Applied Polymer Science 93 (2004): 2119-2130.

23. Ismail, H. , Nasuruddin, M.N. and Ishiaku, U.S. White rice husk ash filled natural rubber compounds : the effect of multifunctional additive and silane coupling agents. Polymer Testing 18 (1999): 287-298.
24. Ismail, H., Mega, L. and Abdul Khalil, H.P.S. Effect of a silane coupling agent on the properties of white rice husk ash-polypropylene/natural rubber composites. Polymer Testing 21 (2001): 139-144.
25. Ismail, H. and Jaffri, R.M. Physico-mechanical properties of oil wood filled natural rubber composites. Polymer International 50 (1999): 606-611.
26. Ismail, H., Shuhelmy, S. and Edyham, M.R. The effects of a silane coupling agent on curing characteristics and mechanical properties of bamboo fibre filled natural rubber composites. European Polymer Journal 38 (2002): 39-47.
27. Nabil A. N., Hundiwale, D.G. and Kapadi U.R. Effect of coupling Agent on the Mechanical Properties of Fly Ash-Filled Polybutadiene Rubber. Journal of Applied Polymer Science 91 (2004): 1322-1328.
28. Arunvisut, S., Phummanee, S. and Somwangthanaroj, A. Effect of Clay on Mechanical and Gas Barrier Properties of Blown Film LDPE/Clay Nanocomposites. Journal of Applied Polymer Science 106 (2007): 2210–2217.
29. Wichianbut, Y. Properties of Natural Rubber Filled with Lignite Fly Ash. Master's Degree in Engineering Mechanical Engineering Prince of Songkla University, 2006.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การคำนวณหาปริมาณของยางและสารเคมีต่างๆ ที่ใช้กับยาง

ตารางที่ ก1. ปริมาณยางและสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)	น้ำหนัก (กรัม)
ยางมาสเตอร์แบทช์	100	423.91
สารตัวเติม (ยกตัวอย่าง)	10	42.39
ซิงค์ออกไซด์	4.98	21.11
MOR	0.84	3.56
PVI	0.04	0.17
กำมะถัน	2.09	8.86
	117.95	500.00
	4.24	

Silane-69 8% โดยน้ำหนักของสารตัวเติม

- รวมค่า phr. ทั้งหมด
 $100+10+4.98+0.84+0.04+2.09 = 117.95 \text{ phr}$
- กำหนดปริมาณยางคอมพอสิต สำหรับงานวิจัยนี้ที่ใช้ในแบทช์เล็กด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง ซึ่งสามารถใส่ยาง และสารเคมีต่างๆ รวมแล้วได้ 500 กรัม จะได้สัดส่วนในการคำนวณเป็นจำนวนกรัม ดังนี้

$$\frac{\text{Total weight (g)}}{\text{Total (phr)}} = \frac{500 \text{ g}}{117.95 \text{ phr}} = 4.24 \text{ g/phr}$$

- นำสัดส่วนดังกล่าวคูณปริมาณ phr. ของสารแต่ละตัว ได้ปริมาณยาง และสารเคมีเป็นจำนวนกรัม ดังแสดงในตารางที่ ก1.
- ปริมาณสารคู่ควบไซเลน จะใช้ 8% โดยน้ำหนักของสารตัวเติม
- เมื่อทำแบทช์ใหญ่ในโรงงาน เปลี่ยนน้ำหนักรวมจาก 50 g เป็น 50 kg

ภาคผนวก ข ตารางผลการทดสอบ

ตารางที่ ข1. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

Fillers		Content (phr)	Tensile strength (MPa)	100%Modulus (MPa)	Elongation at Break (%)
Clay	before aging	0	12.47	2.51	390.56
		3	13.08	3.27	384.23
		5	11.41	3.23	334.01
		7	11.46	3.47	330.73
		10	10.05	3.63	269.29
	after aging	0	10.51	3.16	241.75
		3	10.74	3.94	264.57
		5	10.79	5.05	227.44
		7	9.29	5.07	190.16
		10	9.81	4.26	233.66
RHA	before aging	0	12.47	2.51	390.56
		3	10.25	2.81	322.58
		5	9.94	2.94	310.22
		7	9.13	3.10	278.17
		10	8.25	3.26	263.65
	after aging	0	10.51	3.16	241.75
		3	9.22	3.55	230.91
		5	9.09	3.86	220.05
		7	8.97	3.88	219.76
		10	8.12	3.88	215.59

Fillers		Content (phr)	Tensile strength (MPa)	100%Modulus (MPa)	Elongation at Break (%)
Silica	before aging	0	12.47	2.51	390.56
		3	11.67	3.07	339.73
		5	10.71	2.99	336.91
		7	10.24	3.40	310.80
		10	9.31	3.48	276.46
	after aging	0	10.51	3.16	241.75
		3	8.59	3.62	197.79
		5	8.84	4.49	230.06
		7	10.87	5.60	233.36
		10	11.20	4.24	251.08
Clay : RHA	before aging	0 : 10	8.25	3.26	263.65
		3 : 7	11.02	3.34	321.45
		5 : 5	10.04	3.35	315.13
		7 : 3	10.04	3.41	300.12
		10 : 0	10.05	3.48	269.29
	after aging	0 : 10	8.12	3.88	215.59
		3 : 7	9.61	5.34	187.95
		5 : 5	9.18	4.91	195.64
		7 : 3	9.20	4.58	230.16
		10 : 0	9.81	4.26	233.66

ตารางที่ ๒. ผลการทดสอบความแข็งและความร้อนสะสม

Fillers	Content (phr)	Heat build up $\Delta H(^{\circ}C)$	Hardness (shore A)	
			before aging	after aging
Clay	0	22.70	55.80	60.30
	3	25.00	59.50	63.50
	5	25.27	62.20	65.20
	7	26.27	63.30	64.50
	10	25.53	64.30	66.50
RHA	0	22.70	55.80	60.30
	3	13.77	58.90	61.40
	5	12.30	60.80	64.50
	7	13.10	61.90	64.50
	10	15.83	62.60	66.70
Silica	0	22.70	55.80	60.30
	3	13.00	60.90	64.50
	5	11.50	63.80	66.60
	7	10.55	64.40	66.50
	10	10.27	65.60	69.10
Clay : RHA	0 : 10	15.83	61.60	66.70
	3 : 7	17.77	63.00	65.70
	5 : 5	15.67	60.70	65.30
	7 : 3	20.97	61.50	64.90
	10 : 0	25.53	62.30	64.50

ตารางที่ ๑3. ผลการทดสอบความทนทานต่อแรงอัด

sample no	Fillers content	thickness (mm)			$C_B = (t_0 - t_1) / (t_0 - t_n) * 100 \%$
		originnal, t_0	final, t_1	spacer bar, t_n	
1	Unfilled	12.45	11.56	9.50	30.17
2		12.58	11.71	9.50	28.25
3		12.53	11.59	9.50	31.02
					30.17
1	Clay 3 phr	12.58	11.81	9.50	25.00
2		12.61	11.79	9.50	26.37
3		12.64	11.83	9.50	25.80
					25.80
1	Clay 5 phr	12.69	11.89	9.50	25.08
2		12.69	11.87	9.50	25.71
3		12.60	11.81	9.50	25.48
					25.48
1	Clay 7 phr	12.56	11.71	9.50	27.78
2		12.58	11.75	9.50	26.95
3		12.65	11.76	9.50	28.25
					27.78
1	Clay 10 phr	12.61	11.58	9.50	33.12
2		12.71	11.72	9.50	30.84
3		12.61	11.66	9.50	30.55
					30.84
1	RHA 3 phr	12.51	11.74	9.50	25.58
2		12.65	11.85	9.50	25.40
3		12.57	11.82	9.50	24.43
					25.40
1	RHA 5 phr	12.67	11.52	9.50	36.28
2		12.60	11.49	9.50	35.81
3		12.58	11.43	9.50	37.34
					36.28

sample no	Fillers content	thickness (mm)			$C_B = (t_0 - t_1)/(t_0 - t_n) * 100 \%$
		original, t_0	final, t_1	spacer bar, t_n	
1	RHA 7 phr	12.53	11.63	9.50	29.70
2		12.62	11.57	9.50	33.65
3		12.49	11.69	9.50	26.76
					29.70
1	RHA 10 phr	12.68	11.51	9.50	36.79
2		12.59	11.61	9.50	31.72
3		12.52	11.59	9.50	30.79
					31.72
1	Silica 3 phr	12.69	11.74	9.50	29.78
2		12.77	11.85	9.50	28.13
3		12.77	11.82	9.50	29.05
					29.05
1	Silica 5 phr	12.61	11.52	9.50	35.05
2		12.63	11.49	9.50	36.42
3		12.60	11.43	9.50	37.74
					36.42
1	Silica 7 phr	12.59	11.63	9.50	31.07
2		12.56	11.57	9.50	32.35
3		12.69	11.69	9.50	31.35
					31.35
1	Silica 10 phr	12.58	11.51	9.50	34.74
2		12.59	11.61	9.50	31.72
3		12.62	11.59	9.50	33.01
					33.01

ภาคผนวก ค เครื่องมือการทดสอบ

ค1. X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

หลักการของเทคนิค XRF คือ เมื่อรังสี X ที่มีพลังงานสูง ไปกระทบชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานปล่อย photon ออกมา (fluoresced) โดย photon ที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดกันในชิ้นงาน จะมีความยาวคลื่นและพลังงานต่างกัน และปริมาณของ photon ที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารนั้นๆ ด้วย XRF จึงใช้วัดปริมาณแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบคร่าวๆ ของสารตัวเดิมทั้ง 3 ชนิด ก็คือ เคลย์ แก้วแกลบ และซิลิกา โดยใช้เครื่อง XRF ยี่ห้อ Philips PW2404 (wavelength dispersive) ทดสอบที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ดังแสดงตามรูปที่ ค1.



รูปที่ ค1. เครื่อง XRF

ค2. X-Ray Diffractometer (XRD)

เครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ ค2. เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาความเป็นผลึก หรือความเป็นระเบียบของโครงสร้าง (Crystallinity) ของวัสดุ และตรวจสอบระยะห่างระหว่างชั้นภายในของแร่ดินเหนียวและสารตัวเดิม โดยวัดจากความกว้างของ d - spacing ด้วยการคำนวณด้วย Bragg's Law ดังนี้ [6]

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta \dots\dots\dots(ค1)$$

- เมื่อ n = ลำดับของการตกกระทบ
 λ = ความยาวคลื่นของ X – rays
 d = Lattice Spacing (d – Spacing)
 θ = มุมที่ใช้ในการตกกระทบ

โดย d-Spacing ที่ได้จาก การวัดข้างต้นเป็นระยะที่ได้จากการสะท้อนของรังสีในระนาบ d_{001} ซึ่งกำหนดตาม Miller Index [<http://www.uiowa.edu>] โดยการแสดงระนาบต่างๆ ของ miller index นั้นแสดงด้วยสัญลักษณ์ $(h\ k\ l)$ โดยใช้หลักการคล้ายคลึงกับการใช้สัญลักษณ์ของแกน xyz นั้นเอง และ peak ที่ได้จากเครื่อง XRD ที่ตำแหน่งต่างๆ จะแสดงถึงระยะที่ได้จากการสะท้อนของรังสีในระนาบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ ค2.

เครื่อง XRD ที่ใช้ชื่อ JEOL – JDX 3530 ซึ่งใช้ $\text{CuK}\alpha$ ในการแผ่รังสี โดยใช้ช่วงการวัดตั้งแต่ $2\theta = 4 - 20^\circ$ และ $4 - 90^\circ$ โดย Step size เป็น 0.03 ซึ่งทดสอบที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และสำหรับการวัด 2θ ตั้งแต่ $10 - 90^\circ$ โดยมี Step size เป็น 0.03 เช่นเดียวกัน ทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



รูปที่ ค2. เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)



รูปที่ ค3. เครื่องวัดขนาดอนุภาค



รูปที่ ค4. เครื่องวัดพื้นที่ผิวอนุภาค



รูปที่ ค5. เครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง



รูปที่ ค6. เครื่อง Rheometer



รูปที่ ค7. เครื่องขึ้นรูปยาง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายบุญฤทธิ์ อึ้งฮก เกิดเมื่อวันที่ 20 เมษายน พ.ศ. 2526 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนจุฬารัตนราชวิทยาลัย ตรัง จังหวัดตรัง จากนั้นศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทำโครงการเรื่องการสร้างและการทดสอบไฮโดรไซโคลนสำหรับการแยกเซลล์ยีสต์ในอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์ สำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2548 และได้ทำการศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2549 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2550 ในหัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่องการปรับปรุงการซึมผ่านของก๊าซและการลดความร้อนสะสมของยางมาสเตอร์แบตช์ด้วยเคลย์และเถ้าแกลบ