

กรรมวิธีผลิตวัสดุเชิงประกอบระหว่างกรวดและยางธรรมชาติ



นายไทรภพ ทรัพย์สถาผล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ภาควิชา เคมีเทคนิค

คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1167-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FABRICATION OF NATURAL RUBBER/GRAVEL COMPOSITES



Mr. Tripop Subsathaphol

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1167-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์      กรรมวิธีผลิตวัสดุเชิงประกอบระหว่างกรวดและยางธรรมชาติ  
โดย                              นายไทรภพ ทรัพย์สภาพล  
สาขาวิชา                      เคมีเทคนิค  
อาจารย์ที่ปรึกษา              อาจารย์ ดร. เพียรพรรค ทศคร

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธาราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. เพียรพรรค ทศคร)

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปตี)

ไทรภพ ทรัพย์สถาผล : กรรมวิธีผลิตวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติ  
(FABRICATION OF NATURAL RUBBER/GRAVEL COMPOSITES)

อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.เพ็ชรพรค ทศกร 109 หน้า. ISBN 974-53-1167-7

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากรรมวิธีผลิตวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและน้ำยางธรรมชาติ อีกทั้งยังศึกษาการยึดเกาะระหว่างหินและยางธรรมชาติโดยใช้กาวแก้ว (water glass) เป็นตัวประสานในการยึดเกาะ และเป็นสารเสริมแรง โดยจะใช้สารประสานคู่ควบ (coupling agent) ในการเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะของสารตัวเติม ทำให้สามารถนำวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและน้ำยางธรรมชาติ ไปใช้งานที่ไม่ต้องการจะรับน้ำหนักมากได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์หา ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าเสถียรภาพ และสมบัติทางกายภาพของยางที่ใช้ในวัสดุเชิงประกอบ เช่น ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็ง เป็นต้น จากการวิจัยพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ได้แก่ ซัลเฟอร์ โดยที่ปริมาณซัลเฟอร์ 2 phr จะมีค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุด ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความแข็ง ได้แก่ กาวแก้ว โดยที่ปริมาณ กาวแก้ว 150 phr ให้ค่าความแข็งสูงที่สุด, ตัวแปรที่มีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ได้แก่ ซัลเฟอร์ กาวแก้ว และอัตราส่วนระหว่างน้ำยางธรรมชาติต่อหิน ในส่วนของการหาปัจจัยที่มีผลต่อแรงยึดเกาะระหว่างหินและยางธรรมชาติ โดยใช้วิธีทดสอบ Marshall's test กับน้ำยาง 2 ชนิด คือ น้ำยางชั้น 60 %DRC และน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพ คือ ปริมาณของกาวแก้ว จากนั้นได้หาค่าคงที่ของการเสื่อมสภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC พบว่ามีค่าพลังงานการกระตุ้น (Ea) เท่ากับ 53.98 kJ/mol ทำให้ชีวิตการใช้งานของวัสดุมีค่า 12.3 ปีที่อุณหภูมิ 35<sup>0</sup>C ปริมาณไซเลนไม่มีผลต่อสมบัติของที่วัสดุเชิงประกอบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิติ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

## 4572304223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : COMPOSITES/ NATURAL RUBBER/ NATURAL RUBBER AND GRAVEL/

TRIPOP SUBSATHAPHOL : FABRICATION OF NATURAL RUBBER/GRAVEL

COMPOSITES. THESIS ADVISOR : PIENPAK TASKORN, Ph.D., 109 pp.

ISBN 974-53-1167-7.

The fabrication of natural rubber/gravel composites and the adhesion between gravel and rubber were investigated. Water glass was used as binder and reinforcement. A coupling agent was also used to increase adhesion between sulfur and gravel. The composite can be used as a construction material where high strength is not critical such as in driveways or in road construction.

These properties tested were the mechanical properties of composites i.e. tensile strength, hardness, modulus of elasticity, stability and the physical properties of rubber itself. The results showed that a parameter that affected the tensile strength was sulfur which gave the maximum tensile strength at 2 phr. For hardness, water glass gave a maximum value at 150 phr. The modulus of elasticity was influenced by sulfur, water glass and rubber/gravel ratio. Stability was affected by adhesion between gravel and rubber using Marshall's test with 2 types of rubber latex; 60 %DRC and modified latex 45 %DRC. It was found that water glass had a certain effect on stability. The calculated aging test of composite material with 60 %DRC latex was investigated. It was found the activation energy was 53.98 kJ/mol resulting in a half-life of 12.3 years for a composite when used at 35 °C. Silane had no effect on the composites.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Chemical Technology

Student's signature.....

Field of study Chemical Technology

Advisor's signature.....

Academic year 2004

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.เพียรพรรค ทศกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความเห็น ความรู้ และคำแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่เอื้อเฟื้อทุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.พลภัทร พฤษยานานนท์ และบริษัท คลินแอนด์ยูนิค อินเตอร์เนชันแนล จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย และบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในกลุ่มงานวิจัยทางธรรมชาติ และชาวไซเบอร์เนติกส์ ทุกท่านสำหรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่อง

ขอขอบคุณ นางสาวนิตาพร นาประดิษฐ์ และเพื่อนที่ร่วมเล่นบาสด้วยกัน ที่เป็นกำลังใจ และที่พักผ่อนยามเหนื่อยทั้งกายและใจ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่อบรมเลี้ยงดู ให้การสนับสนุน ญาติ พี่น้อง ที่ให้กำลังใจ ความช่วยเหลือ คำปรึกษาและให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ฐ
<b>บทที่</b>	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
1.4 ขอบเขตและวิธีดำเนินงานวิจัย .....	2
1.5 สมมติฐานงานวิจัย .....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ยาง .....	4
2.2 น้ำยางธรรมชาติ .....	5
2.3 น้ำยางข้น .....	11
2.4 สารเคมีที่ใช้ในน้ำยาง .....	16
2.5 การเตรียมสารเคมีที่ใช้กับน้ำยาง .....	23
2.6 น้ำยางคงรูปหรือน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ .....	31
2.7 สารตัวเติม .....	37
2.8 การออกแบบถนนคอนกรีต .....	39
2.9 ค่าเสถียรภาพ .....	39
2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง .....	43
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	43
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	46

บทที่	หน้า
3.3 การดำเนินงานวิจัย .....	47
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	53
4.1 ผลของการผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อแบบ.....	53
- ผลของค่าความแข็ง.....	53
- ผลของความต้านทานแรงดึง.....	55
- ผลของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น.....	57
- ผลของการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเชิงประกอบกับยางวัลคาไนซ์.....	60
4.2 ผลของการผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการตอกอัด	63
- เวลาในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ.....	63
- การออกแบบการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบ....	65
4.3 ผลการหาค่าครึ่งชีวิตของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC.....	79
4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของน้ำยางชั้น 60 %DRC และน้ำยางปรับปรุง คุณภาพชนิด 45 %DRC.....	82
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 ผลของการผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อแบบ.....	87
5.2 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการตอกอัด.....	88
5.3 ผลของการหาค่าคงที่ของการเสื่อมสภาพของวัสดุเชิงประกอบ.....	89
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	89
รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	93
ภาคผนวก ค.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	109



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ.....	5
2.2 แสดงส่วนประกอบของอิมัลชัน.....	24
2.3 แสดงการเตรียมดิสเพอร์ชัน.....	26
3.1 แสดงวัตถุดิบ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	46
3.2 สูตรการเตรียมดิสเพอร์ชัน.....	47
3.3 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของน้ำยางชั้น 60 %DRC.....	50
3.4 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC.....	50
3.5 ภาวะ การทดลองของน้ำยางชั้น 60 %DRC.....	50
3.6 ภาวะ การทดลองของน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC.....	50
3.7 ตารางแสดงช่วงเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง.....	52
4.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของน้ำยางชั้น 60 %DRC.....	65
4.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC.....	65
4.3 ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC.....	66
4.4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรสำหรับค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC (ANOVA Table).....	68
4.5 ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC....	72
4.6 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรสำหรับค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC (ANOVA Table).....	74
4.7 ขนาดอนุภาคของน้ำยางทั้งสองชนิด.....	84
4.8 ปริมาณแก้วของน้ำยางทั้งสองชนิด.....	84
4.9 การเปรียบเทียบค่าของวัสดุเชิงประกอบกับแอสฟัลต์คอนกรีตจากการทดสอบของมาร์แชลล์.....	85
4.10 การเปรียบเทียบสมบัติของน้ำยางที่ใช้ในงานวิจัย.....	86
ก แสดงปริมาณหินที่ใช้ในการทดสอบของมาร์แชลล์.....	92
ข.1 ตัวอย่างผลการทดลอง.....	94
ข.2 ค่าคงที่การเสื่อมสภาพของวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิต่างๆ.....	96

ตารางที่	ญ หน้า
ค.1 สมบัติทางกายภาพด้านความแข็งที่ปริมาณกาวแก้วต่างๆ กัน ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phrและปริมาณ ไซเลน 1 phr.....	97
ค.2 สมบัติทางกายภาพด้านความแข็งที่ปริมาณซัลเฟอร์ต่าง ๆ กัน ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณไซเลน 1 phr.....	97
ค.3 สมบัติทางกายภาพด้านความแข็งที่ปริมาณ ไซเลนต่าง ๆ กัน ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr.....	98
ค.4 สมบัติทางกายภาพด้านความต้านทานแรงดึงที่ปริมาณกาวแก้วต่าง ๆ กัน ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1 phr.....	98
ค.5 สมบัติทางกายภาพด้านความต้านทานแรงดึงที่ปริมาณซัลเฟอร์ต่าง ๆ กัน ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณไซเลน 1 phr.....	98
ค.6 สมบัติทางกายภาพด้านความต้านทานแรงดึงที่ปริมาณไซเลนต่าง ๆ กัน ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr.....	99
ค.7 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบเมื่อปริมาณกาวแก้วเพิ่มขึ้น ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1 phr.....	99
ค.8 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบเมื่อปริมาณซัลเฟอร์เพิ่มขึ้น ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณไซเลน 1 phr.....	100
ค.9 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบเมื่อปริมาณ ไซเลนเพิ่มขึ้น ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr.....	100
ค.10 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อหินเท่ากับ 1:2 ที่ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1 phr.....	101
ค.11 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อหินเท่ากับ 1:3 ที่ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1 phr.....	101
ค.12 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเมื่อค่าความแข็งเพิ่มขึ้น.....	102
ค.13 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างยางวัลคาไนซ์กับวัสดุเชิงประกอบ.....	102
ค.14 ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความแข็ง ที่ปริมาณกาวแก้ว ต่าง ๆ.....	102
ค.15 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุชนิดต่างๆ.....	103
ค.16 ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC (ซัลเฟอร์ 5 phr) และน้ำยางปรับปรุงคุณภาพ 45 %DRC ที่ปริมาณกาวแก้ว 150 phr .....	103
ค.17 ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบ.....	105

ตารางที่	ฉ หน้า
ค.18 ค่าความหนืดของน้ำยางชนิดต่างๆ.....	107
ค.19 ค่าเสถียรสภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชนิดต่างๆ ที่ปริมาณกาวแก้ว 150 phr และตั้งไว้ในสภาพแวดล้อม.....	108



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 สถิติการใช้ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ของโลก.....	4
2.2 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	5
2.3 สารแขวนลอยของน้ำยางสด.....	6
2.4 น้ำยางเสียดภาพจับเป็นก้อนยาง.....	7
2.5 การเชื่อมโยงกันระหว่าง โมเลกุล และภายใน โมเลกุลเดียวกัน.....	17
2.6 โครงสร้างโมเลกุลของไทยเรมพอลิซัลไฟด์.....	18
2.7 โครงสร้างโมเลกุลสารกลุ่มไดไฮโอคาร์บาเมต.....	19
2.8 ลักษณะของเครื่องบอลมิล.....	28
2.9 ลักษณะภายในเครื่องคอลลอยด์มิล.....	29
2.10 ลักษณะของเครื่องแอทริชันมิล.....	30
2.11 ลักษณะของเครื่องอูลตราโซนิคมิล.....	30
3.1 ชุดอุปกรณ์ทดสอบมาร์แชลล์.....	44
3.2 เครื่องตอกอัด และเครื่องดันก้อนตัวอย่าง.....	44
3.3 เครื่องวัดค่าความหนืด.....	45
3.4 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการโค้งงอ.....	45
3.5 เครื่อง Universal testing machine LLOYD LR 5K.....	45
3.6 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบแบบแอสลป (slab).....	49
4.1 ค่าความแข็งที่ปริมาณกาวยางต่างๆ กันที่ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1 phr.....	53
4.2 ค่าความแข็งที่ปริมาณซัลเฟอร์ต่างๆ กัน ที่ปริมาณกาวยาง 120 phr และปริมาณไซเลน 1 phr.....	54
4.3 ค่าความแข็งที่ปริมาณไซเลนต่างๆ กัน ที่ปริมาณกาวยาง 120 phr และปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr.....	54
4.4 ความต้านทานแรงดึงที่ปริมาณกาวยางต่างๆ กันที่ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1 phr.....	55
4.5 ความต้านทานแรงดึงที่ปริมาณซัลเฟอร์ต่างๆ กันที่ปริมาณกาวยาง 120 phr และปริมาณไซเลน 1 phr.....	56

รูปที่		
4.6	ความต้านทานแรงดึงที่ปริมาณไซเลนต่างๆ กันที่ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr.....	56
4.7	โมดูลัสยืดหยุ่นที่ปริมาณกาวแก้ว ต่างๆ กันที่ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1 phr.....	57
4.8	โมดูลัสยืดหยุ่นที่ปริมาณซัลเฟอร์ต่างๆ กันที่ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณไซเลน 1 phr.....	58
4.9	โมดูลัสยืดหยุ่น ที่ปริมาณไซเลนต่างๆ กันที่ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr.....	58
4.10	โมดูลัสยืดหยุ่น ที่สัดส่วนระหว่างน้ำยางต่อหินต่างๆ กัน ที่ปริมาณกาวแก้ว 120 phr ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1phr.....	59
4.11	โมดูลัสยืดหยุ่นที่ค่าความแข็งต่างๆ.....	60
4.12	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างยางวัลคาไนซ์กับวัสดุเชิงประกอบ.....	60
4.13	ค่าความต้านทานแรงดึงระหว่างยางวัลคาไนซ์กับยางผสมกาวแก้ว.....	61
4.14	ค่าความแข็งระหว่างยางวัลคาไนซ์กับยางผสมกาวแก้ว.....	62
4.15	แสดงถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุชนิดต่างๆ.....	62
4.16	กราฟแสดงค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ผสมกาวแก้ว 150 phr และปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr กับเวลาที่ใช้ในการอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 70 °C.....	63
4.17	กราฟแสดงค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ผสมกาวแก้ว 150 phr และปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr กับเวลาที่ทิ้งไว้ในสภาพแวดล้อม.....	64
4.18	กราฟ normal probability plot กับค่า effect estimate.....	67
4.19	Normal Probability Plot ของค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบ ที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC.....	69
4.20	กราฟแสดงผลตอบสนองที่มาจาก การคำนวณทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง.....	70
4.21	กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงค่าของปริมาณกาวแก้วที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบ.....	71
4.22	กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงค่าของปริมาณไซเลนที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบ.....	71
4.23	กราฟ normal probability plot กับค่า effect estimate.....	73

รูปที่	๓ หน้า	
4.24	Normal Probability Plot ของค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบ ที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC.....	75
4.25	กราฟแสดงผลตอบสนองที่มาจากปริมาณทางคณิตศาสตร์เทียบกับ ค่าที่ได้จากการทดลอง.....	76
4.26	กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงค่าของปริมาณแก้วที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพ ของวัสดุเชิงประกอบ.....	77
4.27	กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงค่าของปริมาณไซเลนที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพ ของวัสดุเชิงประกอบ.....	77
4.28	ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบ.....	78
4.29	กราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้น.....	80
4.30	ค่าครึ่งชีวิตของวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิต่างๆ.....	81
4.31	ค่าความหนืดของน้ำยางชนิดต่างๆ.....	82
4.32	ขนาดอนุภาคของน้ำยางชั้น 60 %DRC.....	83
4.33	ขนาดอนุภาคของน้ำยางปรับปรุงคุณภาพ 45 %DRC.....	83
4.34	แสดงปริมาณเถ้าหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 850 °C (ก) น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC (ข) น้ำยางชั้น 60 %DRC.....	85
ก.1	แสดงการกระจายของขนาดหินเบอร์ 1.....	92
ข.1	การโค้งงอของคาน.....	93
ข.2	กราฟหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น.....	95
ค.1	กราฟแสดงค่าคงที่การเสื่อมสภาพของค่าเสถียรภาพที่อุณหภูมิ 70 °C.....	105
ค.2	กราฟแสดงค่าคงที่การเสื่อมสภาพของค่าเสถียรภาพที่อุณหภูมิ 150 °C.....	106
ค.3	กราฟแสดงค่าคงที่การเสื่อมสภาพของค่าเสถียรภาพที่อุณหภูมิ 200 °C.....	106
ค.4	กราฟแสดงค่าคงที่การเสื่อมสภาพของค่าเสถียรภาพที่อุณหภูมิ 300 °C.....	107

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางธรรมชาติจัดว่าเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยที่สำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มากมายเช่น พื้นรองเท้า ยางรถยนต์ ถู่มือยาง และชิ้นส่วนต่างๆ ของรถยนต์ อีกทั้งยางธรรมชาตินั้นสามารถหาได้ง่าย มีราคาถูก และที่สำคัญคือ เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง แต่อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติดังกล่าวยังมีข้อด้อยบางประการ เช่น ความคงทนต่อการสึกหรอ ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ และการขึ้นรูป จึงได้มีการศึกษา และค้นคว้าเพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพของยางธรรมชาติเพื่อให้ยางนั้นมีสมบัติต่างๆ ตามที่ต้องการ เช่น การเติมสารตัวเติมต่างๆ การนำยางมาทำเป็นวัสดุเชิงประกอบ (composite material) ทำให้ยางที่ได้สามารถนำมาใช้งานในด้านต่างๆ ได้ การนำยางธรรมชาติมาทำเป็นวัสดุเชิงประกอบนั้นทำให้ได้วัสดุที่แข็งแรง มีความทนทานต่อการสึกหรอ และสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

คอนกรีตเป็นหนึ่งในวัสดุก่อสร้าง โดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติหลักของคอนกรีตคือ ความแข็งแรง และสามารถรับแรงกดอัดได้สูง แต่ก็มีข้อเสียคือ ไม่สามารถทนแรงสั่นสะเทือนได้เมื่อเกิดแผ่นดินไหว สามารถถูกกัดกร่อนได้โดยซัลเฟต มีปัญหาการแตกทรุดไม่มีความยืดหยุ่นของโครงสร้าง และที่สำคัญคือ คอนกรีตนั้นเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป จึงต้องมีการหาวัสดุใหม่ๆ ที่จะนำมาใช้ทดแทน เพื่อเป็นการอนุรักษ์คอนกรีตไว้ไม่ให้ถูกใช้หมดไปอย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของการหาวัสดุที่จะนำมาทดแทน หรือแบ่งเบาปริมาณการใช้คอนกรีตได้ เนื่องจากยางธรรมชาติมีอยู่มากภายในประเทศ อีกทั้งยางยังมีคุณสมบัติที่สามารถยืดหยุ่นได้ และยังสามารถทำให้มีความแข็งแรงได้โดยการเติมสารตัวเติมต่างๆ ลงไปในยางธรรมชาติ เช่น เขม่าดำ กาวแก้ว ซึ่งสารตัวเติมเหล่านี้มีหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับยางธรรมชาติ ทำให้สามารถนำยางที่เติมสารตัวเติมเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้ เช่น ยางกันสะเทือน เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงกรรมวิธีในการผลิตวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติ อีกทั้งยังจะศึกษาถึงการยึดเกาะระหว่างหินและยางธรรมชาติโดยใช้กาวแก้วเป็นตัวประสานในการยึดเกาะ และเป็นสารเสริมแรง โดยจะใช้สารประสานคู่ควบ (coupling agent) ในการเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะของสารตัวเติม ทำให้สามารถนำวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติ ไปใช้งานที่ไม่ต้องการจะรับน้ำหนักมากได้ เช่น ทางเดินระหว่างตึก และยังเป็นแนว

ทางในการพัฒนาไม้หอมรองรางรถไฟที่ทำมาจากยางธรรมชาติ ถนนที่ทำมาจากยางธรรมชาติ เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

(1) หาสูตรผสมระหว่างน้ำยางและสารเติมแต่งที่เหมาะสม

เพื่อที่จะหาสูตรน้ำยางที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติ โดยจะศึกษาถึงปริมาณสารในกระบวนการวัลคาไนซ์ ปริมาณกาวแก้วและปริมาณไซเลนที่เติมลงไปให้น้ำยาง

(2) ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อแรงยึดเกาะระหว่างหินและยางธรรมชาติ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อแรงยึดเกาะระหว่างหินและยางธรรมชาติ โดยปัจจัยที่ศึกษา คือ ปริมาณของกาวแก้ว และปริมาณของไซเลน

(3) กำหนดกรรมวิธีการทำวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติ

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) ได้วิธีการสร้างแรงยึดเกาะระหว่างหินกับยางธรรมชาติ โดยใช้กาวแก้วเป็นตัวสร้างแรงยึดเกาะระหว่างหินกับยางธรรมชาติ ทำให้สามารถผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบได้

(2) สามารถนำไปประยุกต์ใช้หรือเป็นแนวทางในการพัฒนาถนนที่ทำมาจากยางธรรมชาติได้ เพราะเนื่องจากยางธรรมชาตินั้นมีสมบัติยืดหยุ่นและสามารถทำให้แข็งแรงได้โดยการใส่สารตัวเติม จึงมีความเหมาะสมในการนำมาปรับปรุงสมบัติเพื่อที่จะนำไปใช้ในการงานการทำผิวจราจรได้

## 1.4 ขอบเขตและวิธีดำเนินงานวิจัย

(1) ค้นคว้าทฤษฎีและการทดลองต่างๆที่เกี่ยวข้อง

(2) ออกแบบการทดลอง จัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย



- (3) ศึกษาหาสูตรน้ำยาที่ใช้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติ เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดี
- (4) ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงยึดเกาะระหว่างหินกับยางธรรมชาติ โดยมีตัวแปรที่ต้องการศึกษาอยู่ 2 ปัจจัยด้วยกัน คือ ปริมาณกาวแก้ว และปริมาณ ไซเลน
- (5) ศึกษาหาค่าครึ่งชีวิตของวัสดุเชิงประกอบ ที่ให้ค่าแรงยึดเกาะที่ดีที่สุดจากข้อ 4
- (6) วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 สมมติฐานงานวิจัย

- (1) สามารถนำหินมาผสมกับน้ำยางธรรมชาติเพื่อผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบได้
- (2) สามารถเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างหินและยางธรรมชาติโดยใช้กาวแก้ว และสารประสานคู่ควบได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

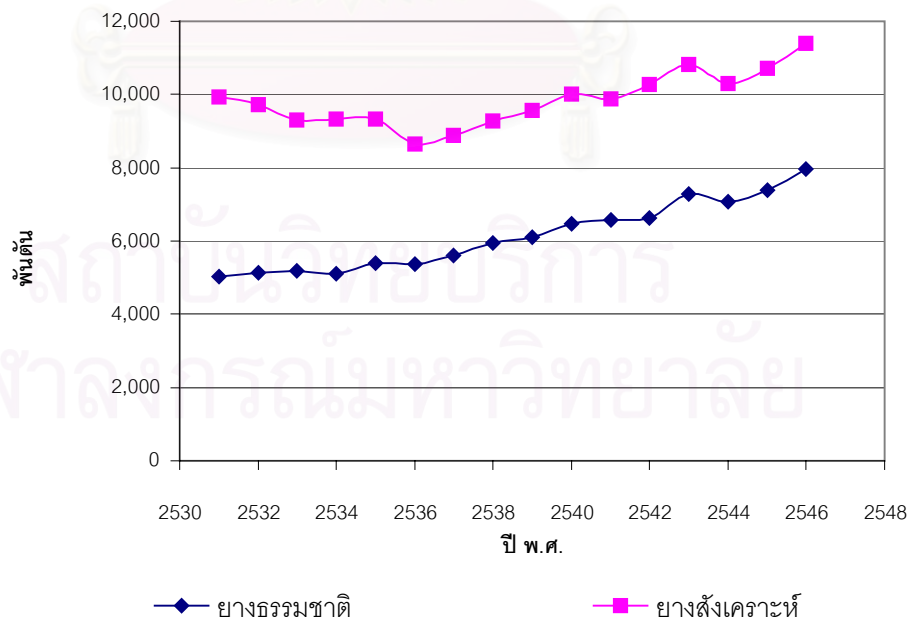
## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ยาง

ยาง เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เรียกว่าสารประกอบพวก พอลิเมอร์ มีสมบัติพิเศษ คือ มีความยืดหยุ่นได้ (elasticity) ในอดีตก่อนสงครามโลกครั้งที่ 1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์จากยาง มีเพียงยางจากต้นพืช ที่พบครั้งแรกบริเวณตอนใต้ของอเมริกา แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นมามากมาย เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยาง ส่วนด้านยางธรรมชาติเอง ได้มีการพัฒนารูปแบบ ชนิด และกรรมวิธีการผลิตขึ้นอย่างกว้างขวาง

ในโลกนี้มีพืชที่สามารถให้ยางได้นั้นมีอยู่ประมาณ 2000 ชนิด แต่จะมีเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่สามารถให้ยางซึ่งนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงการค้าได้ พืชที่สำคัญเหล่านี้ ได้แก่ ยางพารา และยางวายุยูเล่ พืชทั้งสองชนิดนี้ให้ยางที่มีโครงสร้างทางเคมีเช่นเดียวกัน สามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางได้เหมือนกัน จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า ไม่ว่าจะเป็ยางสังเคราะห์ หรือยางธรรมชาติ ต่างก็มีแนวโน้มในการใช้เพิ่มมากขึ้นทุกๆปี จึงมีความจำเป็นที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ เพื่อที่จะเป็นการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติ



รูปที่ 2.1 สถิติการใช้ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ของโลก [1]

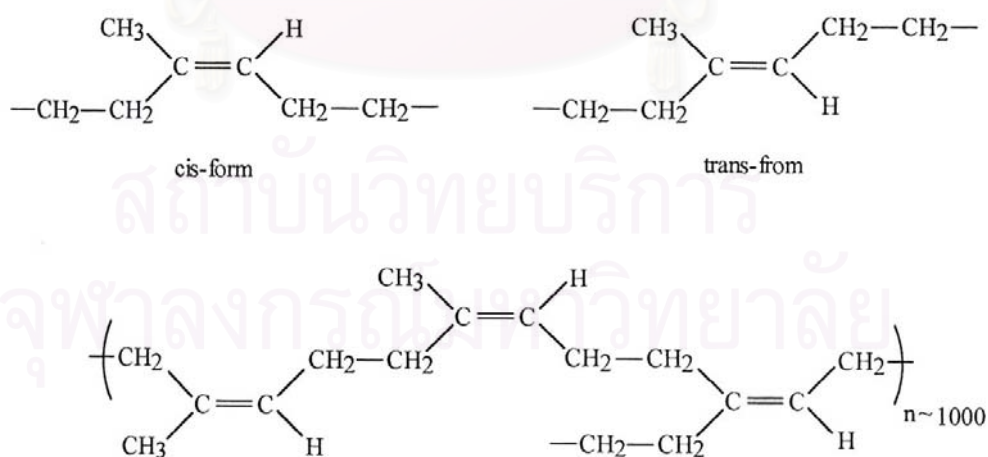
## 2.2 นํ้ายางธรรมชาติ

### 2.2.1 สมบัติและส่วนประกอบของนํ้ายาง

นํ้ายางสดจากต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวหรือสีครีม ในทางเคมีจัดเป็น สารแขวนลอย มีความหนาแน่น 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มี pH ประมาณ 6.5-7.0 ความหนืด ไม่แน่นอน มีส่วนประกอบของสารขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุต้นยาง การกรีด และฤดูกาล เป็นต้น ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของนํ้ายางธรรมชาติ [1]

ส่วนประกอบ	ร้อยละ
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC)	36
นํ้ายางแห้ง (Dry Rubber Content, %DRC)	33
สารพวกโปรตีน	1-1.5
เถ้า	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
นํ้าในปริมาณที่รวมกับสารอื่นๆ แล้วเป็น	100



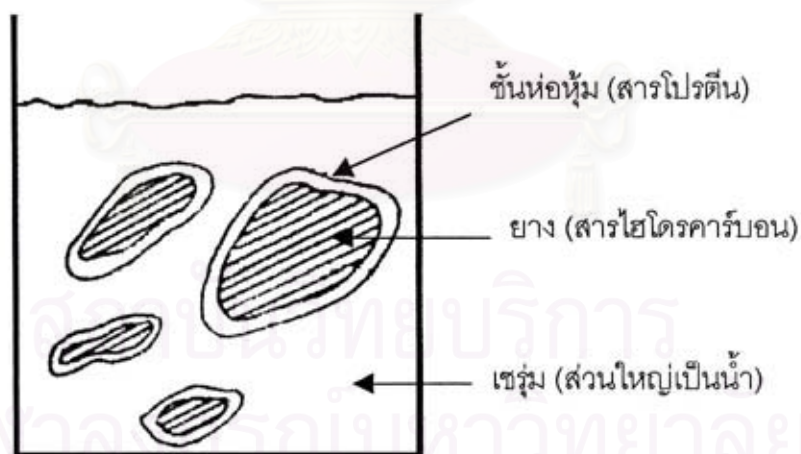
รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ [3]

ยางธรรมชาติ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เขียนเป็นสูตรเคมี คือ  $(C_5H_8)_n$  เรียกชื่อทางเคมีว่า ไอโซพรีน (isoprene) โครงสร้างของโมเลกุลยางเป็นแบบ cis-configuration ดังรูปที่ 2.2 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1 ล้าน รูปร่างของอนุภาคยางมีลักษณะเป็นอนุภาคกลม หรือมีลักษณะคล้ายลูกแพร์ มีขนาด 0.05-5 ไมโครเมตร

ยางมีสมบัติที่สามารถยืดหยุ่นได้ เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่ของยางแต่ละโมเลกุลเป็นขดของสายโมเลกุลที่เกิดจากหน่วยย่อยของไอโซพรีนต่อกัน ยางชิ้นหนึ่งๆ จะประกอบด้วยขดของสายโมเลกุลที่พันกันอย่างยุ่งเหยิง สายโมเลกุลเหล่านี้มีสมบัติ ถูกหักงอ หรือยืดได้ (flexible) การดึงหรือยืดชิ้นยาง ก็เท่ากับยืดสายโมเลกุลของยางให้คลายออก แต่เมื่อปล่อยคืนให้ความเป็นอิสระกับชิ้นยาง สายโมเลกุลยางก็จะพยายามหดตัวกลับมายังอยู่ในสภาพเดิม

### 2.2.2 การรักษาสภาพน้ำยาง

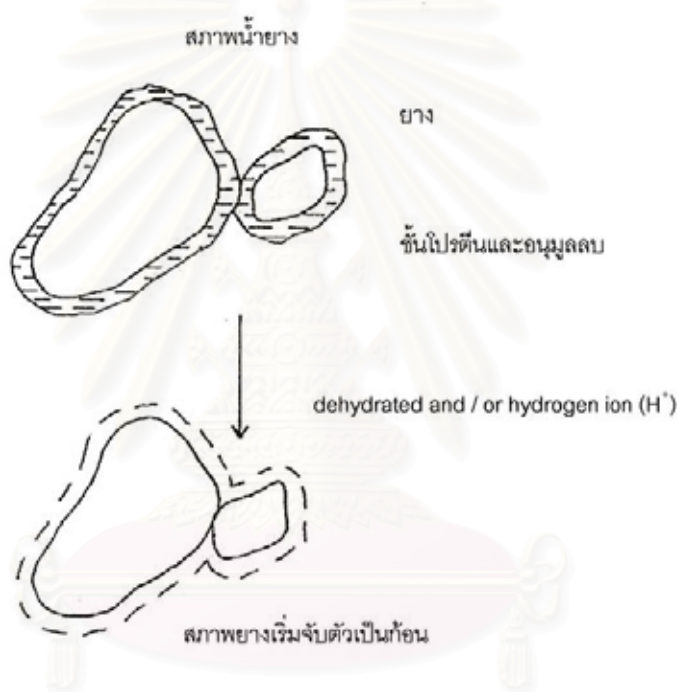
น้ำยางสดเป็นสารแขวนลอยที่มีส่วนของอนุภาคยาง แขนวนลอยกระจัดกระจายอยู่ในตัวกลางที่เรียกว่า เซรัม (serum) ในน้ำยางมีส่วนของสารที่เป็นโปรตีนอยู่ (ตารางที่ 2.1) ส่วนหนึ่งของสารโปรตีนนี้ จะเคลือบอยู่รอบผิวของอนุภาคยางเป็นเปลือก ห่อหุ้มอนุภาคไว้ (รูปที่ 2.3) ชั้นห่อหุ้มนี้มีความสำคัญต่อสถานะความคงตัว เพราะชั้นโปรตีนป้องกันไม่ให้อนุภาคยางมารวมตัวกัน



รูปที่ 2.3 สารแขวนลอยของน้ำยางสด [1]

นอกจากนั้นโปรตีนจะห่อหุ้มทำหน้าที่รักษาสภาพการเป็นของเหลวให้น้ำยางแล้ว ในชั้นโปรตีนยังมีอนุโมลของคาร์บอกซิเลต (carboxylate  $\text{RCOO}^-$ ) ซึ่งก่อให้เกิดการผลักกันระหว่างอนุภาคยาง นั่นคือ น้ำยางสามารถคงสภาพเป็นของเหลวอยู่ได้ด้วยปัจจัยสำคัญ 2 ประการคือ ชั้นโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยาง และอนุโมลของคาร์บอกซิเลต

การเสียดสภาพจากการเป็นของเหลวของน้ำยาง จะเกิดขึ้นเมื่อมีการทำลายปัจจัยสำคัญดังที่กล่าวมาในข้างต้น เช่น การสูญเสียน้ำ (dehydrated) ในชั้นของโปรตีน การทำลายอนุโมลของคาร์บอกซิเลต สภาพน้ำยางที่ถูกกระทบกระเทือนดังกล่าวนี้ จะทำให้อนุภาคยางเกิดการรวมตัวกันจับกันเป็นก้อนยาง เรียกว่า โคแอกกูลัม (coagulum) แยกจากส่วนของเซรุ่ม (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 น้ำยางเสียดสภาพจับเป็นก้อนยาง [1]

### 2.2.3 การเสียดสภาพของน้ำยาง (destability) [3]

น้ำยางเมื่อเกิดการเสียดสภาพจะทำให้เกิดการจับตัว และแยกตัวออกจากน้ำ ลักษณะของการเสียดสภาพของน้ำยางที่เกิดขึ้นแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

1. เกิดการรวมตัวของอนุภาคของยางอย่างรวดเร็วแล้วแยกตัวออกจากน้ำที่เป็นเซรุ่มที่มีลักษณะใส ซึ่งเรียกว่า โคแอกกูแลชัน (coagulation) ตัวอย่างเช่น การจับตัวของน้ำยางด้วยกรดแก่ของการทำยางแผ่นจากน้ำยางธรรมชาติ

2. การเกิดการจับตัวของน้ำยางในลักษณะที่น้ำยางเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของแข็งอย่างช้าๆ และได้ของแข็งที่มีปริมาตรเท่าเดิม ลักษณะของยางที่เป็นแบบเจล (gel) ซึ่งเรียกว่า เจลเลชัน (gelation) ปรากฏการณ์ที่ตามมาหลังจากการจับตัวด้วยวิธีนี้คือ การหดตัวของยางที่บีบเอาเซรุ่มออกจากยาง ซึ่งเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า ซิเนอร์ซิส (syneresis) ทำให้งางที่ได้หดตัวลงได้ ตัวอย่างการเกิดการจับตัวแบบนี้คือ กระบวนการทำฟองน้ำแบบเจล ซึ่งการทำผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม (dipping) ซึ่งพอจะเห็นว่าฟองน้ำที่ได้มีขนาดเล็กลงกว่าเบ้าพิมพ์เสมอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของน้ำที่อยู่ในยาง

3. การเกิดการจับตัวของอนุภาคยางที่เป็นเม็ดเล็กๆ ที่ยังกระจายอยู่ในน้ำเซรุ่มที่จุ่มแบบ milky solution ซึ่งเราเรียกการจับตัวของยางแบบนี้ว่า ฟลอคคูเลชัน (flocculation) เนื่องจากการจับตัวแบบนี้จะทำให้ได้ยางที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ดังนั้นบางครั้งอาจเรียกการจับตัวแบบนี้ว่า micro coagulation

สาเหตุที่ทำให้ยางเกิดการเสถียรภาพของน้ำยางเกิดขึ้นได้ 2 สาเหตุใหญ่

1. เกิดขึ้นเนื่องจากผลทางกายภาพ ซึ่งสาเหตุนี้อาจเกิดเนื่องจาก

(1) สภาพอากาศ

ก. ความเย็น ปกติความเย็นจะไม่มีผลต่อเสถียรภาพของน้ำยางจนกระทั่งถึงจุดเยือกแข็งของน้ำ เช่น ในกรณีอากาศเย็นมากๆ (สาเหตุนี้ในเมืองไทยไม่มี) อย่างใน เขตอบอุ่น เมื่อน้ำยางถูกเก็บไว้ในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำจะทำให้ยางจับตัวเป็นน้ำแข็ง แยกตัวออกจากอนุภาคของยาง ทำให้อนุภาคของยางถูกผลักให้รวมตัวกระจายอยู่ในปริมาณของน้ำที่น้อยลง จนทำให้การกระทบกันของอนุภาคยางมีมากขึ้น เป็นผลให้งางรวมตัวเป็นก้อนได้

ข. ความร้อน ความร้อนทำให้อุณหภูมิของยางสูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิของยางสูงขึ้นไม่ใช่ว่าเป็นผลต่อเสถียรภาพของน้ำยาง จนกระทั่งถึงจุดเดือดของน้ำ หรือในกรณีที่มีสารพวก non-ionic stabilizer ซึ่งเมื่ออุณหภูมิถึงจุด cloud point จะทำให้น้ำยางเสถียรภาพได้

(2) ผลจากการกระทบกันทางกล

การเกิดแรงเฉือน (shear stress) รวมทั้งการปั่นป่วน เป็นผลทำให้เกิดการกระทบกันของอนุภาคยาง เมื่อบ่อยๆ เข้าจะทำให้แรงในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นในอนุภาคยางเรื่อยๆ จนทำให้เกิดการเสถียรภาพขึ้น

(3) การระเหยน้ำ

การระเหยน้ำออกไม่ได้เป็นผลทำให้อนุภาคของยางเสถียรภาพโดยตรง แต่การระเหยน้ำออกมากจนทำให้อนุภาคของยางถูกอัดอยู่ในน้ำที่มีปริมาณน้อย ระยะห่างระหว่างอนุภาคของยางมีน้อยมากจนทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคยางขึ้น แยกแผ่นหรือชั้นของยางออกจากน้ำ

## (4) อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้า

เนื่องจากอนุภาคของยางมีประจุลบ อยู่รอบตัวของมันถ้าเอาขั้วบวกใส่เข้าไปในน้ำยาง อนุภาคยางจะวิ่งเข้าไปหาขั้วไฟฟ้าบวก ถ้าประจุให้แล้วตัวเองเป็นกลางทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคยางได้

## 2. สาเหตุจากสารเคมี

สารเคมีที่ทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคยาง ทำให้น้ำยางจับตัวแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ คือ

## (1) สารเคมีที่ทำให้น้ำยางจับตัวอย่างรวดเร็ว

ซึ่งเกิดจากสารเคมีทำปฏิกิริยาโดยตรงกับอิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆอนุภาคยาง เช่น การเติมสารเคมีชนิดที่เป็นกรดลงในน้ำยาง สารเคมีกลุ่มนี้แบ่งได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆดังนี้

ก. กรดแก่ ได้แก่สารใดๆ ที่แตกตัวให้อนุมูลไฮโดรเจน ซึ่งอนุมูลนี้จะทำปฏิกิริยากับอนุภาครubberที่มีอยู่รอบๆน้ำยาง มีผลทำให้เกิดเป็นกรดไขมัน ซึ่งไม่ละลายน้ำเป็นผลทำให้ชั้นของอนุภาคประจุที่อยู่รอบๆ อนุภาคยางแฟบลง เกิดการจับตัวของอนุภาคของยางเป็นก้อนอย่างรวดเร็ว



ในกรณีของน้ำยางที่มีประจุบวก การเติมกรดลงไปเป็นการเสริมสภาพของเสถียรภาพให้กับน้ำยาง ในกรณีจะใช้เติมสารพวกที่เป็นด่างลงในน้ำยางช่วยในการจับตัวของน้ำยาง เช่น กรณีการจับตัวของน้ำยางด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำยางสังเคราะห์

ข. อนุมูลโลหะ อนุมูลโลหะมักจะทำให้น้ำยางที่มีประจุลบเสียเสถียรภาพได้ อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา 2 แบบ คือ หนึ่งเกิดจากอนุมูลโลหะกับอนุภาครubberที่มีประจุลบ ทำให้เกิดเป็นสบู่ของโลหะ (metallic soaps) ไม่ละลายน้ำ และไม่เกิดไอออน (ionize) ซึ่งได้โลหะไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ และอาจเกิดตะกอนในน้ำได้



ทั้ง 2 ปฏิกิริยามีผลทำให้น้ำยางเสียเสถียรภาพได้ ปฏิกิริยาแรกมีผลทำให้ชั้นของประจุรอบๆ อนุภาคยางเสียไป อีกปฏิกิริยาหนึ่งคือเอาสารรักษาเสถียรภาพของน้ำยาง (stabilizer) ตกตะกอนลงมา และยังทำให้เกิดการตกตะกอนร่วมกันของอนุภาคยางกับโลหะได้อีกด้วย

## (2) สารเคมีที่ทำให้น้ำยางจับตัวที่ไวต่อความร้อน

สารเคมีที่ทำให้น้ำยางจับตัวเมื่อถูกความร้อน เป็นสารที่ไม่มีผลต่อเสถียรภาพของยางที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้น้ำยางจับตัวอย่างรวดเร็ว ในกรณีที่อุณหภูมิเริ่มถึงจุดที่น้ำยางจับตัว สารเคมีในกลุ่มนี้จะมีผลทำให้น้ำยางจับตัวแบบเจล (gelation) เพราะว่าการรวมตัวกระจายออกไปอย่างสม่ำเสมอ ทว่าทั้งหมดของน้ำยาง และการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปทีละน้อย

## (3) สารเคมีที่ทำให้น้ำยางจับตัวอย่างช้าๆ

สารเคมีนี้เป็นสารที่เมื่อเติมลงไปใต้น้ำยางแล้วจะค่อยๆ เกิดปฏิกิริยาและมีผลทำให้น้ำยางเสถียรภาพไปอย่างช้าๆ และรวมตัวกันเป็นแบบเจล สารเคมีที่นิยมใช้ในระบบนี้มี

- เกลือของกรดไฮโดรฟลูออโรซิลิกแอซิด (salts of hydrofluorosilicic acid)
- เกลือของกรดฟลูออโรอื่น ๆ (salts of fluoro acids)
- และสารอื่นๆ ที่เกิดปฏิกิริยาช้าๆ ได้

## 3. สารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง (preservatives)

เนื่องจากในน้ำยางสด มีส่วนประกอบหลายชนิด ที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ ได้แก่ พวกน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส จุลินทรีย์ในอากาศจะลงปะปนในน้ำยาง มีปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงที่ทำให้เกิดกรด กรดทำลายชั้นห่อหุ้มอนุภาคยางทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อน เรียกรวมการจับตัวเป็นก้อนนี้ว่าการจับตัวที่เกิดเองตามธรรมชาติ (natural or spontaneous coagulation) การเกิดจะช้าเร็วเพียงใดขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความคงตัวของน้ำยาง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อป้องกันน้ำยางจับตัวเป็นก้อนก่อนเวลาที่ต้องการ หรือเพื่อให้ น้ำยางอยู่ในสภาพของเหลวตามต้องการ จึงจำเป็นต้องเติมสารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง

## (1) สมบัติของสารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง

สารเคมีที่จะใช้รักษาสภาพน้ำยางควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- มีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์
- ควรมีสภาพเป็นด่างเพื่อส่งเสริมสถานะแขวนลอยให้น้ำยาง
- ทำให้อนุมูลโลหะไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เพราะอนุมูลเหล่านี้จะส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์
- สามารถระงับการทำงานของเอนไซม์ ที่ช่วยการเจริญของจุลินทรีย์
- ไม่เป็นพิษต่อคน และต่อคุณภาพของยางอีกทั้งยังสามารถจัดออกได้สะดวก

## (2) ชนิดของสารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง

สารเคมีชนิดแรกที่พบว่ามีประสิทธิภาพในการรักษาสภาพน้ำยางได้ ก็คือ แอมโมเนีย และจนปัจจุบัน แอมโมเนียก็ยังคงเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในการรักษาสภาพน้ำยางนอกจากแอมโมเนีย สารอื่นที่ใช้รักษาสภาพน้ำยาง ได้แก่ ฟอรัมาดีไฮด์ โซเดียมซัลไฟด์ เป็นต้น



เนื่องจากปัจจุบันได้มีการค้นคว้าวิจัยชนิดของสารเคมี ที่จะใช้รักษาสภาพน้ำยาง และพบว่า มีหลายชนิด ในการเลือกใช้สารเคมีเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ วัตถุประสงค์ของการรักษาสภาพ เช่น จะรักษาสภาพน้ำยางสด เพื่อนำไปแปรรูปเป็นยางดิบชนิดใดๆ ก็จะต้องเลือกชนิดสารเคมี รักษาสภาพให้เหมาะสม หรือจะเก็บรักษาน้ำยางขึ้นไว้ใช้นานๆ ก็จะต้องเลือกชนิดสารเคมีให้ถูกต้อง เป็นต้น

## 2.3 น้ำยางขึ้น

น้ำยางสามารถนำไปแปรรูปเป็น ยางวัลดูดิบขึ้นต้น (crude rubber) ได้หลายชนิด ขึ้นอยู่กับว่าจะต้องการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายประเภทใด น้ำยางขึ้นก็จัดว่าเป็นยางวัลดูดิบขึ้นต้นชนิดหนึ่ง นอกจากน้ำยางขึ้นแล้วยังมียางประเภทอื่นๆอีก เช่น ยางแผ่น ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นฟุ้งแห้ง ยางเครพ และยางแท่ง เป็นต้น

แต่ไม่ว่าการนำน้ำยางมาแปรสภาพให้เป็นอะไรต่อไปก็ตาม จะต้องทำการกรองน้ำยางเพื่อที่จะนำเอาฝุ่นผง และสิ่งสกปรกออกจากน้ำยางเสียก่อน มิฉะนั้นสิ่งที่ได้จากการแปรสภาพไปนั้น จะไม่อยู่ในมาตรฐาน แม้ว่าจะยังจำหน่ายได้ก็ตาม แต่เมื่อมีสิ่งสกปรกเจือปนแล้ว ย่อมถือกันว่าเป็นสินค้าชั้นเลว ราคาจะต่ำลง

### 2.3.1 วิธีผลิตน้ำยางขึ้น

น้ำยางขึ้น หมายถึง น้ำยางที่ผ่านการไล่น้ำออกไปบางส่วนเพื่อให้มีเนื้อยางแห้งเพิ่มเป็นร้อยละ 60 ของน้ำหนักน้ำยางทั้งหมด ปัจจุบันความต้องการน้ำยางขึ้นเพิ่มมากขึ้น จึงได้ปรับปรุงวิธีผลิตน้ำยางขึ้นให้มีสมบัติที่ดีขึ้น ผลิตภัณฑ์ซึ่งใช้น้ำยางขึ้นเป็นวัลดูดิบได้แก่ ผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม (dipping) แบบหล่อ (casting) แบบพ่น (spraying) แบบใช้แม่แบบ (molding) และแบบทา (spreading) เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำยางขึ้นได้แก่ ตุ๊กตาที่กลวง กาว สีทา ถูมือ ลูกโป่ง ยางฟองน้ำ (latex foam rubber) และที่นอน เป็นต้น ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติของน้ำยางขึ้นจึงมีความสำคัญมาก

น้ำยางสดจากสวนไม่สามารถนำไปใช้งานอุตสาหกรรมได้โดยตรง เนื่องจากมีปริมาณเนื้อยางต่ำ ดังนั้นจึงมีวิธีผลิตน้ำยางขึ้นเพื่อแยกส่วนที่ไม่ใช่น้ำยางออกไป ทำให้อายุของเนื้อยางสูงขึ้นและง่ายต่อการเก็บรักษา ซึ่งการผลิตน้ำยางขึ้นในทางการค้าแบ่งออกเป็น 4 วิธีด้วยกัน คือ

### (1) วิธีทำให้เกิดครีม

น้ำยางธรรมชาติไม่ว่าอยู่ในสถานะสด (fresh latex) หรือสถานะที่มีการใส่สารเคมีรักษาสภาพน้ำยางแล้ว (preserve latex) ประกอบด้วยระบบของสารละลายคอลลอยด์แบบอิมัลชันของอนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เรียกว่า เซรุ่ม อนุภาคเล็กๆของยางที่แขวนลอยอยู่ในเซรุ่ม แสดงการเคลื่อนไหวแบบ Brownian (เคลื่อนไหวในทุกทิศทางอย่างไม่เป็นระเบียบ) และการเคลื่อนไหวของอนุภาคยางในน้ำยางสดจะรวดเร็วกว่าน้ำยางที่ใส่สารเคมีรักษาสภาพ และเนื่องจากอนุภาคยางเบากว่าเซรุ่มดังนั้นอนุภาคยางเหล่านี้มีแนวโน้มลอยตัวสูงขึ้นบนผิวของน้ำยางได้ ดังนั้นการแยกตัวของอนุภาคยางเกิดเป็นลักษณะครีมอยู่ผิวหน้าน้ำยางจะรวดเร็วจน ถ้าอนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสามารถทำให้อนุภาคยางใหญ่ขึ้นได้โดยเติมสารพวกคอลลอยด์ที่ไปพอกหรือเคลือบอนุภาคยาง สารนี้จึงเรียกว่าเป็นตัวการทำให้เกิดครีม (creaming agent) ตัวอย่างของสารพวกนี้ได้แก่ sodium alginate, locust bean gum, gum Karaya, gum tragacanth เป็นต้น อนึ่งการผลิตน้ำยางชั้นโดยวิธีการทำให้เกิดครีมในปัจจุบันไม่เป็นที่นิยมผลิตกันเพราะยุ่งยาก และสิ้นเปลืองเวลา แต่เป็นที่น่าสนใจเกี่ยวกับวิธีการนี้ คือ สามารถทำให้น้ำยางชั้นมีความบริสุทธิ์สูง และมีโปรตีนน้อยลงเมื่อผ่านกรรมวิธีทำให้เกิดครีมซ้ำหลายๆครั้ง

### (2) วิธีการระเหยน้ำ

น้ำยางสดจากสวนก่อนทำให้ข้น โดยวิธีการระเหยน้ำจะต้องเติมสารที่ทำให้ยางคงตัว (stabilizers) เช่น potassium soap เสียก่อนการระเหยน้ำออกจากน้ำยางจะเกิดขึ้นภายในถัง หรือภาชนะที่หมุนได้รอบๆ แกนตามแนวนอน และถังนี้ถูกให้ความร้อนรอบๆถัง โดยวิธีการระเหยน้ำจากน้ำยาง จะทำให้ได้น้ำยางชั้นซึ่งมีส่วนประกอบโดยประมาณ คือ ส่วนของแข็งทั้งหมด 75 % ปริมาณเนื้อยาง 60 % caustic potash 1.5 % และสารอื่นๆ อีก 13.5 % น้ำยางชั้นที่ได้จากวิธีนี้มีความคงสภาพเป็นน้ำยางที่ดีมาก จึงเหมาะสำหรับการขนส่งทางไกลและเหมาะกับการนำไปผลิตวัตถุติดสำเร็จรูปประเภทที่ต้องใส่พวกสารเติม (filler) จำนวนมาก ตัวอย่างเช่น การผลิตกาว (latex-cement) น้ำยางนี้เหมาะหรือใช้ได้ผลดีในกรณีที่ต้องการนำไปทำกาวประเภทที่สารอื่นๆที่อยู่ในน้ำยางและคุณสมบัติคงตัวของน้ำยางเป็นข้อได้เปรียบกับการทำกาวอื่นๆ

### (3) วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า

จากการที่ในสถานะของน้ำยางสด อนุภาคของยางที่แขวนลอยในเซรุ่มต่างถูกห่อหุ้มด้วยอนุมูล (carboxylate ion) ที่มีประจุลบ ดังนั้นจึงสามารถที่จะอาศัยไฟฟ้า เข้ามาช่วยในการแยกส่วนของเนื้อยางจากส่วนของเซรุ่มได้ โดยวิธีการจุ่มขั้วไฟฟ้าที่เป็นบวก ลงในน้ำยางที่ได้เติมสารเคมีที่จะช่วยทำให้น้ำยางคงรูปไว้แล้ว อนุภาคยางซึ่งมีประจุลบ จะค่อยๆเคลื่อนไปรวมอยู่ทางขั้วบวก และลอยตัวสูงขึ้นสู่ผิวหน้าน้ำยางในที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคยาง

ต่ำกว่าความหนาแน่นของเซรุ่ม อย่างไรก็ตามวิธีการทำน้ำยางข้นโดยใช้ไฟฟ้านี้เป็นวิธีที่ยุงยากและมีค่าใช้จ่ายสูง จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้กัน

#### (4) วิธีการปั่น

เครื่องปั่นน้ำยางข้นมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ แต่แบบที่นิยมใช้กัน คือ แบบ de Laval หลักการสำคัญของเครื่องประกอบด้วย การปั่นแยกน้ำยางโดยอาศัยเครื่องปั่นความเร็วสูงประมาณ 6,000 รอบต่อนาที และภายในของเครื่องปั่นประกอบด้วยชุดจานแยก (separator discs) วางซ้อนกันจำนวนหลายชั้น น้ำยางสดซึ่งใส่แอมโมเนียมาแล้วจะถูกป้อนเข้าเครื่องผ่านที่จ่ายน้ำยาง (distributor) ลงสู่ก้นถังปั่น และจากนี้ น้ำยางจะไหลผ่านชุดของจานแยกซึ่งมีรูให้น้ำยางไหลเข้าสู่ภายในของถังปั่น ด้วยการปั่นความเร็วสูงทำให้น้ำยางถูกแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งเป็นส่วนของเนื้อยาง ซึ่งจะไหลเข้าหาศูนย์กลางของเครื่องปั่น และลอยตัวไหลออกตามทางออกด้านบนสู่ถังเก็บน้ำยางข้น อีกส่วนหนึ่งของน้ำยางที่ถูกแยกจะเป็นส่วนของหางน้ำยาง (skim latex) ไหลออกจากศูนย์กลางเครื่องปั่นสู่ทางออกของหางน้ำยางและลงสู่ที่เก็บหางน้ำยาง

ปกติ น้ำยางข้นที่ได้จากเครื่องปั่นจะมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 60 ของเนื้อยางแห้ง อีกทางหนึ่งเป็นน้ำยางที่มียางแห้งปนอยู่ราวร้อยละ 3-5 เครื่องปั่นน้ำยางขนาดเล็กๆ สามารถผลิตน้ำยางข้นได้วันละ 200-250 แกลลอน และเครื่องขนาดใหญ่อาจจะผลิตน้ำยางข้นได้ถึงวันละ 450 แกลลอน และปกติการเดินเครื่องปั่นจะทำติดต่อกันได้อย่างมากเพียงครั้งละ 6 ชั่วโมง เพราะจำเป็นต้องหยุดเครื่องเพื่อทำความสะอาดเครื่องปั่น ถังพวกตม (sludge) ที่ติดเครื่องปั่น และเนื่องจากส่วนประกอบของเครื่องหมุนเหวี่ยงจะสัมผัสกับน้ำยางโดยตรง จึงจำเป็นที่จะต้องมีความต้านทานการกัดกร่อนของแอมโมเนีย ควรทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ไม่ควรใช้โลหะทองแดง ทองเหลือง ทองสัมฤทธิ์และแมงกานีส เพราะมีผลทำให้น้ำยางเสื่อมคุณภาพเร็วขึ้น เนื่องจากแอมโมเนียจะกัดกร่อนโลหะเหล่านี้ได้ [4]

ในด้านคุณภาพของน้ำยางข้น ค่า volatile fatty acid (VFA) เป็นดัชนีสำคัญของคุณภาพเนื่องจากปริมาณ VFA ในน้ำยางข้นมีสาเหตุมาจากแอมโมเนีย ทำให้เกิดการไฮโดรไลซิสของไขมัน ได้แก่ neutral lipids, glycolipids และ phospholipids ด้วย นอกจากนั้นในระหว่างการเก็บอาจจะมีจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายสารที่ไม่ใช่ยางที่เป็นอาหารโดยกระบวนการหมัก แล้วปลดปล่อยกรดอินทรีย์ทำให้น้ำยางเป็นกรดเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้อนุภาคยางจับตัวเป็นก้อนและสูญเสียสภาพได้ง่าย น้ำยางข้นจะเกิดการบูดและมีกลิ่นเหม็นขึ้น

### 2.3.2 การรักษาสภาพน้ำยางข้น [5,6]

น้ำยางข้นที่ผลิตได้จะต้องเติม หรือปรับแอมโมเนียรักษาสภาพน้ำยาง ปกติมีวิธีการรักษาน้ำยางข้น 2 วิธี คือ

- (1) รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียมาก ประมาณ 0.7 % ต่อน้ำหนักยาง เรียกว่าน้ำยางชนิดนี้ว่า HA (high ammonia)
- (2) รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียน้อย ประมาณ 0.2 % ต่อน้ำหนักยาง และมีสารช่วยบางชนิด เช่น TMTD/ZnO เรียกว่าน้ำยางชนิดนี้ว่า LA (Low ammonia)

### 2.3.3 สมบัติและการทดสอบน้ำยางข้น

สมบัติที่ใช้ในการตรวจสอบน้ำยางขนนั้น มีดังต่อไปนี้

#### (1) ปริมาณสารของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC)

ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยาง หมายถึง ปริมาณของส่วนที่เป็นเนื้อยางทั้งหมด รวมกับส่วนของแข็งที่ไม่ใช่เนื้อยาง หลักการหาปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยาง โดยวิธีการ ชั่งน้ำยางประมาณ 1.5-2.5 กรัม และอ่านน้ำหนักละเอียดภายใน 1 มิลลิกรัม เติมน้ำยางนี้ลงบนแผ่นกระจกอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C จนน้ำหนักคงที่ แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของปริมาณของแข็งทั้งหมด

#### (2) ปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, %DRC)

ปริมาณเนื้อยางแห้ง หมายถึง ปริมาณของส่วนที่เป็นเนื้อยางทั้งหมดในน้ำยางที่ได้จากการจับตัวน้ำยางโดยกรดอะซิติกภายใต้การควบคุมสภาพที่แน่นอน หลักการหาปริมาณเนื้อยางแห้งโดย ชั่งน้ำหนักประมาณ 5 กรัม และอ่านน้ำหนักละเอียดภายใน 5 มิลลิกรัม ทำให้น้ำยางเจือจางโดยใช้น้ำ 20 cm<sup>3</sup> แล้วเติมกรดอะซิติก 2 % ลงในน้ำยางอย่างช้าๆ นำก้อนยางที่จับตัวแยกออกจากซีรัมไปรีดเป็นแผ่นบาง นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C จนได้น้ำหนักคงที่

#### (3) ความเป็นเบส (Alkalinity, %NH<sub>3</sub>)

ความเป็นเบสของน้ำยาง หมายถึง ปริมาณเบสในน้ำยางทั้งหมดซึ่งมักแสดงเป็นจำนวนแอมโมเนียที่เติมลงในน้ำยาง หรือแสดงเป็นสารอื่นสำหรับกรณีที่น้ำยางนั้นรักษาโดยสารอื่นนอกเหนือจากแอมโมเนีย หลักการที่ใช้ทดสอบหาความเป็นเบส คือ ชั่งน้ำยางประมาณ 10 กรัม และอ่านน้ำหนักละเอียดภายใน 10 มิลลิกรัม เจือจางด้วยน้ำประมาณ 200 cm<sup>3</sup> และผสมสารช่วยความคงตัวพวก non-ionic ไตเตรตน้ำยากับกรดซัลฟูริก 0.1 N. ใช้ pH-meter ตรวจสอบจุด end-point ซึ่ง

จะอยู่ที่ pH 6.0 หรือใช้ methyl red indicator หยดลงในน้ำยางดูการเปลี่ยนแปลงสี คำนวณความเป็นเบสในรูปของปริมาณกรัมของแอมโมเนียต่อ 100 กรัมของน้ำยาง

#### (4) เวลาความคงตัวต่อเครื่องกล (Mechanical Stability Time, MST)

เวลาความคงตัวต่อเครื่องกลเป็นสมบัติที่ใช้วัดความคงตัวของน้ำยาง ซึ่งมีนิยามจำกัดว่า “ เป็นเวลา (วินาที) ที่ปั่นกวนน้ำยางภายใต้สถานะที่ควบคุม จนอนุภาคยางเริ่มเกาะหรือจับตัวเป็นเม็ดละเอียด ” หลักการทดสอบประกอบด้วย การทำให้น้ำยางข้นมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเจือจางเป็น 55 % ด้วยสารละลายแอมโมเนีย แล้วนำน้ำยางนี้ 80 กรัม อุณหภูมิร้อน 35 °C และปั่นด้วยเครื่องปั่น klaxon machine ใช้ความเร็ว 14,000 รอบ/นาที ตรวจสอบการจับตัวของอนุภาคยางด้วยการใช้แท่งแก้วจุ่มน้ำยางแล้วหยดลงในน้ำ เวลาที่จะบันทึกเป็นเวลาความคงตัวต่อเครื่องกล คือ เวลาที่น้ำยางเริ่มจับเป็นเม็ดเล็กๆ เมื่อทดลองหยดน้ำยางลงในน้ำ

#### (5) จำนวนกรดไขมันระเหยได้ (Volatile Fatty Acid Number, VFA no.)

ปริมาณของกรดไขมันระเหยได้ในน้ำยางแสดงเป็นจำนวนกรดไขมันระเหยได้ ซึ่งหมายถึง “จำนวนของโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้กรดไขมันระเหยได้ในน้ำยาง ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 100 กรัม เป็นกลาง” หลักการทดสอบหาจำนวนกรดไขมันระเหยได้ประกอบด้วย การทำให้น้ำยาง 50 กรัม จับตัวด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต แล้วบีบคั้นเอาซีรัมออกจากก้อนยางที่จับตัว นำซีรัมจำนวน 25 cm<sup>3</sup> ไปทำให้เป็นกรดด้วยกรดซัลฟูริก แล้วนำซีรัมที่มีความเป็นกรดนี้ไปกลั่นด้วยไอน้ำ นำของเหลวที่ได้จากการกลั่นไปใส่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไตเตรตกับแบเรียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ phenolphthalein indicator เป็นสารสำหรับการเปลี่ยนสี

#### (6) จำนวนโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide Number, KOH no.)

จำนวนโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ของน้ำยาง หมายถึง “จำนวนกรัมของโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่สมมูลย์พอดีกับเรดิเคิลของกรดทั้งหมดที่รวมกับแอมโมเนียในน้ำยาง ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 100 กรัม” หลักการทดสอบ คือ เติมสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ ลงในน้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 50 กรัม เพื่อลดแอมโมเนียที่มากเกินไป เพื่อที่จะสามารถหา end-point ได้แล้วเติมน้ำเพื่อลดปริมาณของแข็งทั้งหมดเป็น 30 % ก่อนการไตเตรตกับสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์มาตรฐานที่ปราศจากคาร์บอนเนต เนื่องจากไม่มี indicator ใดๆ ที่จะใช้ตรวจ end-point ได้ นอกจากการใช้ pH-meter โดยการเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์มาตรฐานครั้งละ 1 cm<sup>3</sup>(V.) แล้ววัดหา pH จดบันทึกค่า pH ไว้ทุกครั้งของการเติมสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์มาตรฐาน เขียนกราฟระหว่างค่า pH ต่อ ปริมาตร V เมื่อ V คือปริมาตรของโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ที่จุด end-point โดยให้ดูที่จุดเส้นกราฟตรง

#### (7) ปริมาณก้อนยางจับตัว (Coagulum Content)

ปริมาณก้อนยางจับตัว หมายถึง ปริมาณของสารที่ค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 85 หรือ 80 เมช. สารเหล่านี้เป็นพวกสารเจือปนในยางและเนือยาง หลักการทดสอบหาปริมาณก้อนยางจับตัว คือ เติมสารละลายโปแตสเซียมโอสเตท 5 % จำนวน 200 cm<sup>3</sup> ลงในน้ำยาง 200 กรัม แล้วกรองส่วนผสมนี้ผ่านตะแกรงล้าง และอบตะแกรงที่มีสารตกค้างอยู่ที่อุณหภูมิ 70 °C จนแห้งแล้วจึงทำการชั่งน้ำหนัก

#### (8) ปริมาณตม (Sludge Content)

ตมในน้ำยาง หมายถึง สิ่งเจือปนต่างๆ ซึ่งมักตกตะกอนลงก้นภาชนะเมื่อมีการปั่นกวนน้ำยาง สิ่งเจือปนดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นพวก ฝุ่น ทราย เปลือกไม้ และเมกนีเซียมแอมโมเนียฟอสเฟต หลักการทดสอบหาปริมาณตม คือ ปั่นยางที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนด้วยความเร็ว 2,300 รอบ/นาที แยกส่วนเนือยางออก ล้างส่วนที่ตกค้างอยู่ด้วยส่วนผสมของ เอทานอล/น้ำแอมโมเนีย แล้วอบส่วนตกค้างนี้ให้แห้งจนน้ำหนักคงที่

#### (9) กลิ่น (Aroma)

กลิ่นของน้ำยางจะแสดงการบูดเน่าของน้ำยาง หลักการตรวจสอบโดยการ เติมกรดบอริก ลงในน้ำยางเพื่อทำให้แอมโมเนียเป็นกลาง แล้วตรวจกลิ่นก๊าซที่ออกจากน้ำยาง น้ำยางที่มีคุณภาพดีจะไม่มกลิ่นบูดเน่า

#### (10) สี (Colour)

น้ำยางที่เจือปนสิ่งสกปรก หรือน้ำยางที่เสียดสีรภาพแล้วจะมีสีเทาหรือสีฟ้า สามารถตรวจสอบโดยการ ใช้สายตาพิจารณาเปรียบเทียบกับสิ่งของที่เป็นสีขาว

### 2.4 สารเคมีที่ใช้ในน้ำยาง [7]

สารเคมีที่ใช้กับน้ำยาง และผลิตภัณฑ์น้ำยางมีหลายชนิดซึ่งใช้ในหน้าที่ต่าง ๆ กัน ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะสารเคมีที่จำเป็นในการทดลอง และสารเคมีที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ซึ่งพอจะแบ่งเป็นข้อได้ดังนี้ คือ

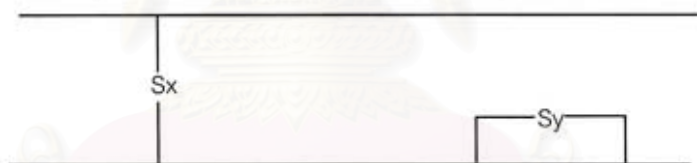
### 2.4.1 สารคงรูป หรือตัวกระทำคงรูป

#### (1) กำมะถัน (sulphur)

สารตัวแรกที่สำคัญในการทำผลิตภัณฑ์ยาง คือ กำมะถัน ซึ่งใช้เป็นตัวกระทำคงรูป การทำยางคงรูป หรือวัลคาไนซ์หมายถึง การเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางจากการมีสมบัติของสภาพพลาสติกสูงไปเป็นยางที่มีสมบัติสภาพยืดหยุ่นสูงขึ้น ด้วยการเชื่อมต่อของโมเลกุลยางเป็นลักษณะ 3 มิติ ด้วยสารเคมีที่เหมาะสม

ปกติโมเลกุลของยางจะมีลักษณะเป็นสายตรง ไม่มีกิ่ง มีสมบัติเปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามอุณหภูมิ และแรงกระทำจึงไม่เหมาะในการนำไปประยุกต์ใช้ เมื่อผ่านการคงรูปแล้วจะทำให้โมเลกุลของยางเชื่อมติดกันเป็นร่างแหใน 3 มิติ ทำให้ยางเปลี่ยนรูปร่างได้ยาก มีสมบัติยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น คือ เมื่อยืดออกด้วยแรง ยางจะยืดตามแรงกระทำ แต่เมื่อหยุดแรง (ปล่อย) ยางจะหดกลับสู่สภาพเดิม ซึ่งเป็นลักษณะเด่นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

ลักษณะการเชื่อมโยงของโมเลกุลจะเป็นพันธะ C – C หรือพันธะ C – S – C ก็ได้ ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ และอาจจะเชื่อมโยงกันระหว่างโมเลกุล หรือภายในโมเลกุลเดียวกัน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเชื่อมโยงกันระหว่างโมเลกุล และภายใน โมเลกุลเดียวกัน

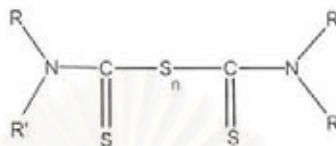
กำมะถันเป็นสารเคมีที่ใช้ในการคงรูปสามารถใช้ได้ทั้งกับยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ เช่น พอลิไอโซพรีน สไตรีนบิวทาไดอีน ปริมาณที่ใช้ในน้ำยางประมาณ 0.5 – 2 ส่วนต่อเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน (phr, part per hundred rubber) กำมะถันที่ใช้ในน้ำยางจะเป็นกำมะถันที่บดละเอียดมากหรือใช้ในรูป กำมะถันคอลลอยด์

ในสภาพคอลลอยด์โมเลกุลของกำมะถันมีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอ แต่กำมะถันเป็นสารเคมีที่ทำให้เป็นคอลลอยด์ได้ยาก ในปี 1961 มีการค้นพบสารเคมีที่ได้จากการเผากำมะถันกับเอทานอลอะมีน ด้านเคมีที่ละลายน้ำได้สามารถใช้แทนกำมะถันได้ดี การเผากำมะถันกับเอทานอลอะมีนที่ 100 องศาเซลเซียส จะให้สารละลายที่มีกำมะถันกระจายตัวอยู่ประมาณร้อยละ 7-9 อนุกรมพอลิซัลไฟด์ และสารละลายเกลือของซิงค์อะมีน พบว่าสารละลายเกลือของซิงค์อะ

มีนเหมาะสมจะเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาแทนซิงค์ออกไซด์ เพราะมีอัตราการกระตุ้นปฏิกิริยาเท่ากัน แต่สารละลายเกลือของซิงค์อะมีนสามารถช่วยรักษาสภาพน้ำยางได้

## (2) ไทยูเรมพอลิซัลไฟด์

ไทยูเรมพอลิซัลไฟด์ เป็นสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของไทยูเรมพอลิซัลไฟด์

อาจจะใช้เป็นสารคงรูปโดยไม่ต้องใช้กำมะถันก็ได้ วิธีนี้ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน หรือในกรณีที่ต้องการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากทองแดง (cooper catalysed oxidation)

การใช้ไทยูเรมพอลิซัลไฟด์ และซิงค์ออกไซด์เป็นการทำยางคงรูปโดยไม่ต้องใช้กำมะถันมักจะใช้เฉพาะกรณีอุณหภูมิสูงถึง 140 องศาเซลเซียส เท่านั้น ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าขนาด 100 องศาเซลเซียส จะให้ปฏิกิริยาช้ามากไม่เป็นที่น่าสนใจ ยกเว้นในกรณีที่ใช้ไทโอยูเรีย ช่วยกระตุ้นปฏิกิริยา จึงจะทำให้การคงรูปของน้ำยางเร็วขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพที่ 100 องศาเซลเซียส

สมบัติการต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยางที่ทำให้คงรูปด้วยสารเคมีไทยูเรมที่มีไทโอยูเรีย เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยายังคงให้สมบัติต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และการเก็บแล้ว ยังมีข้อดียิ่งขึ้นเมื่อใช้ป้องกันการเสื่อมสภาพ หรือเติมสารพวกไดโซโคคาร์บาเมตด้วย และยางที่ได้ยังคงสภาพการป้องกันการถูกออกซิไดซ์ด้วยทองแดงอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีสารบิวทิลแซนโทโรเจนไดซัลไฟด์ ที่ใช้ร่วมกับ ไดโซโคคาร์บาเมตในการทำยางคงรูปที่ไม่ต้องใช้กำมะถัน

## (3) สารอื่นๆ

นอกจากทั้งสองกลุ่มที่กล่าวมาแล้วยังมีสารอื่นๆที่ทำให้ยางคงรูป เช่น เปอร์ออกไซด์ ชนิดที่เป็นอินทรีย์สาร และไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะไม่กล่าวในที่นี้



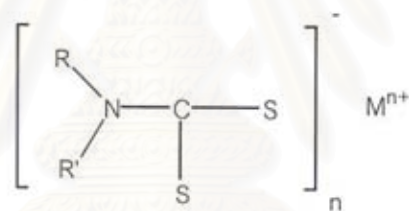
## 2.4.2 สารเร่งปฏิกิริยาของยาง (accelerator)

การทำให้ยางคงรูปโดยใช้กำมะถันเพียงตัวเดียวพบว่าต้องใช้ปริมาณของกำมะถันสูง และลดประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงได้ใช้สารเคมีช่วยเร่งปฏิกิริยาการคงรูป สารเคมีที่เร่งปฏิกิริยาการทำยางคงรูปมีหลายชนิดด้วยกัน ในที่นี้จะอธิบายตามกลุ่มของสารเคมีบางกลุ่มเท่านั้น

### (1) ไดโซโอคาร์บาเมต

ไดโซโอคาร์บาเมตเป็นสารเคมีที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 สารเคมีในกลุ่มนี้มีหลายตัวด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้น้ำยางอย่างกว้างมีซิงค์ไดเอทิลไดโซโอคาร์บาเมต (ZDEC) และซิงค์ไดบิวทิลไดโซโอคาร์บาเมต (ZBDC)

ชื่อเสียของกลุ่มนี้คือว่าในสารนี้มีซิงค์ (Zn) อยู่ ดังนั้นสารนี้จึงทำให้น้ำยางหนืดขึ้นได้ในกรณีของเกลือของโซเดียม เช่น NaBDC มีสมบัติทำให้ยางคงรูปที่อุณหภูมิต่ำ และคงรูปเร็ว เช่น การทำยางคงรูปในอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลสารกลุ่มไดโซโอคาร์บาเมต

สัดส่วนการใช้สารไดโซโอคาร์บาเมต ต่อเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน

ซิงค์ออกไซด์ 0.5 ถึง 5.0

กำมะถัน 1.0 ถึง 1.5

ไดโซโอคาร์บาเมต 0.5 ถึง 1.5

ปริมาณการเพิ่มของสารหนึ่งสารใด จะเพิ่มอัตรา และสถานะในการคงรูปยาง แต่ไม่มีผลต่อความทนแรงดึงของยางมากนัก ในน้ำยางที่ใช้สารไดโซโอคาร์บาเมต เป็นสารเร่งปฏิกิริยาอาจไม่ต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ก็ได้ แต่ถ้าใช้ซิงค์ออกไซด์ช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาจะทำให้ยางมีความทนแรงดึง ความสามารถยืดได้เพิ่มขึ้น และยังให้ผลไม่ทำให้แรงดึงจนขาดลดลงอันเกิดจากการใช้เวลาทำยางคงรูปมากเกินไป (over vulcanized) อีกด้วย ปริมาณซิงค์ออกไซด์ทำให้น้ำยางหนืดขึ้น ดังนั้นเพื่อลดความหนืดของน้ำยางอาจใช้ซิงค์สเตริยเรตหรือ ซิงค์คาร์บอเนตแทนซิงค์

ออกไซด์ แต่การเตรียมซิงค์สเตริยเรต หรือ ซิงค์คาร์บอเนต กระจายในน้ำทำได้ยากกว่าซิงค์ออกไซด์ ซิงค์คาร์บอเนตที่มีอนุภาคเล็กยังให้ยางที่ได้มีลักษณะโปร่งใสดีกว่าซิงค์ออกไซด์ธรรมดา

ปัญหาอีกข้อหนึ่งของสารไดโซโอคาร์บาเมต คือ ผลึกภัณฑ์ที่ได้มักจะมีตำหนิอันเนื่องมาจากสารทองแดงได้ง่าย แม้ว่าในน้ำยางจะมีทองแดงเพียงเล็กน้อยก็ตาม จะทำให้ผลึกภัณฑ์เป็นสีน้ำตาลได้ แม้แต่แผ่นยางที่ยังไม่แห้ง เมื่อถูกกับทองแดงจะทำให้เปลี่ยนสีได้เช่นกัน

สารเคมีที่นิยมใช้มากมี 2 ชนิดคือ

ZDC เป็นสารสีขาวไม่กลืนไม่ละลายน้ำ เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่เร็วมาก (ultra fast accelerator) ในอุณหภูมิที่ใช้ 120-135 องศาเซลเซียส เร่งปฏิกิริยาด้วยไทอะโซล และซิงค์ออกไซด์ แม้จะไม่มีซิงค์ออกไซด์ก็ทำให้ยางคงรูปได้ แต่ถ้ามีซิงค์ออกไซด์จะให้สมบัติทางกายภาพที่ดีกว่า ผลึกภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากการเก็บได้ดี สีไม่ตก ไม่เปลี่ยนสีของยาง ปริมาณการใช้ร้อยละ 0.5 – 0.75 ร่วมกับกำมะถันร้อยละ 0.25 – 1 ถ้าใช้ร่วมกับสารเร่งตัวที่ 2 เช่น กลุ่มไทอะโซลร้อยละ 0 – 0.5

ZBDC เป็นผงสีเหลืองอ่อนไม่ละลายน้ำ ให้สมบัติการคงรูปของยางที่ช้ากว่า และปลอดภัยกว่า ZDC อุณหภูมิคงรูปที่ 95 – 110 องศาเซลเซียส ต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ และกำมะถันเช่นเดียวกับ ZDC อาจไม่ใช้ซิงค์ออกไซด์ แต่ถ้าจะสมบัติจะดีกว่า และสามารถเร่งปฏิกิริยาด้วยกลุ่มไทอะโซล ปริมาณการใช้ร้อยละ 0.5 – 1.5 ในกำมะถันร้อยละ 0.25 – 1 อาจใช้ร่วมกับไทอะโซลร้อยละ 1 – 1.5

## (2) ไทอะโซล

สารในกลุ่มไทอะโซลนี้มักจะใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาควบคู่กับสารปฏิกิริยาตัวอื่นๆ เช่น ร่วมกับไดโซโอคาร์บาเมต ทำให้ผลึกภัณฑ์ที่ได้มีโมดูลัสดีขึ้น สารในตระกูลนี้ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมน้ำยางชั้น ได้แก่ ซิงค์เมอร์แคปโทเบนซไธไทอะโซล (ZMBT) มักใช้ควบคู่กับ ZDC ในปริมาณ ZDC 1 ส่วนต่อ ZMBT 0.25 – 0.5 ส่วน ในเนื้อยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก ผลของการใช้ ZMBT ร่วมกับ ZDC ทำให้สมบัติโมดูลัสของยางดีขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการคงรูปยังคงเท่าเดิม ความทนแรงดึงที่ได้ของ ZDC เพียงอย่างเดียวจะไม่มีผลต่อสมบัติความทนแรงดึงของยาง แม้ว่าจะอบยางให้คงรูปนานเกินไป (over cure) กรณีของการใช้ ZMBT ร่วมกับ ZDC ในอัตรา 0.25 ต่อ 0.75 ก็ให้สมบัติการคงรูปเช่นเดียวกัน

ในกรณีที่ใช้ ZMBT ร่วมกับ ZDC ในอัตรา 0.5 ต่อ 0.5 ทำให้ค่าแรงดึงสูงมากกว่า ZDC อย่างเดียวมากที่จุดคงรูปพอดี แต่เมื่อยางถูกคงรูปมากขึ้นจะทำให้ค่าตกลงมามาก ส่วนค่าโมดูลัสที่ใช้ ZDC อย่างเดียว 1 ส่วน ต่อเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน จะให้ผลโมดูลัสต่ำกว่าที่ใช้ควบคู่กับ ZMBT มาก

### (3) ไทยูเรม

ในระบบกำมะถัน สารไทยูเรมเป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่ตัวมันเองไม่ไวต่อปฏิกิริยา แต่เมื่อใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาไดโซโอคาร์บามาตได้ สมบัติความทนแรงดึงของยางธรรมชาติที่ได้จากการใช้ปฏิกิริยา เตตระเมทิลไทยูเรมไดซัลไฟด์ (TMTD) เปรียบเทียบกับ ZDC ZMDC และ ZBDC จะเห็นได้ว่า TMTD ให้สมบัติความทนแรงดึงดีน้อยกว่าสารในตระกูลไดโซโอคาร์บามาต แต่ข้อดีของสารในตระกูลไทยูเรม คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคงรูปด้วยสารเร่งปฏิกิริยาในตระกูลนี้ ให้สมบัติทนต่อการเสื่อมสภาพได้ดีกว่า และไม่เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากทองแดง (copper strain) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อของไดโซโอคาร์บามาต

ปัจจุบันได้ใช้สารไทยูเรมร่วมกับสารไทโอยูเรีย ซึ่งให้สมบัติในการคงรูปดีขึ้น แต่ใช้ในอุณหภูมิต่ำประมาณ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำมาก บางครั้งก็ใช้ประโยชน์ได้ไม่มากนัก การกระตุ้นปฏิกิริยาไทอะโซลเช่น กรณีการใช้เบนซ์ไทอะซิลไดซัลไฟด์ (MBTS) กับไซโคเฮกซิลเบนซิทะซิลซัลไฟนาไมด์ (CBS) ด้วยไทโอยูเรีย ทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปไวขึ้น ปฏิกิริยานี้ทำได้ที่ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นที่น่าสนใจในการพัฒนาสูตรส่วนผสมน้ำยางกับสารเคมีเพื่อให้แผ่นฟิล์มยางที่ได้ไม่เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากทองแดงได้เพราะ สารเคมีเหล่านี้ไม่มีไดโซโอคาร์บามาต การเร่งปฏิกิริยาการคงรูปได้จากไดโซโอเมตที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของสารประกอบไทยูเรมและพอลิซัลไฟด์ สารเคมีที่นิยมใช้ในตระกูลไทยูเรมก็มี TMTD กับเตตระเมทิลไทยูเรมโมโนซัลไฟด์ (TMTM)

สาร TMTD มีลักษณะเป็นผงสีขาวไม่มีกลิ่น ไม่ละลายน้ำ ในน้ำยางธรรมชาติใช้ร้อยละ 0.5 – 1.5 ร่วมกับกำมะถันร้อยละ 0.5 – 2 แผ่นยางที่ได้จะมีลักษณะใส ส่วนสาร TMTM มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อนๆ ไม่ละลายน้ำ ให้ปฏิกิริยาที่เริ่มต้นช้า แต่เร็วในยางธรรมชาติ ต้องใช้ร่วมกับซิงค์ออกไซด์ อาจใช้ปริมาณของกำมะถันน้อยได้ ปริมาณใช้ในยางธรรมชาติถ้าเป็นสารเร่งตัวแรกจะใช้ร้อยละ 0.15 – 0.3 ร่วมกับกำมะถัน สำหรับให้ผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อการเสื่อมสภาพใช้ TMTM ร้อยละ 2 – 3 ร่วมกับกำมะถัน กรณีใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 จะใช้ร้อยละ 0.1 – 0.25 กับเมอร์แคปโตเบนซ์ไทอะโซล หรือ ไดเบนซ์ไทอะโซลไดซัลไฟด์ และกำมะถันร้อยละ 2 – 5

### (4) สารเคมีเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ

นอกจากสารเคมีดังกล่าวข้างต้นแล้วยังมีสารเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ ที่ใช้ในปฏิกิริยาอื่นๆ ที่ใช้ในปฏิกิริยาการคงรูป เช่น ไคฟีนิลควอนิดีน หรือสารในตระกูลควอนิดีน สามารถใช้ในปฏิกิริยาน้ำยางได้ ทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปไม่มีค่าเสื่อมลงเมื่อเกิดการคงรูปนานขึ้น ผลของแรงต้านทานแรงดึงมีไม่มากนักแต่นิยมใช้ในยางแห้งที่เป็นผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่มากกว่า ส่วนอีกตระกูลหนึ่ง คือ แซนเทต ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เร็วมาก และใช้ในอุณหภูมิต่ำไม่เหมาะกับน้ำยางแบบจุ่ม

### 2.4.3 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ

สารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ใช้กับยางมี 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ ชนิดที่เป็นเอมีน และฟีนอล เป็นสารที่ใส่ลงไปในผลิตภัณฑ์ยางเพื่อป้องกันการถูกออกซิไดส์ของโมเลกุลของยางที่นิยมใช้ใน ผลิตภัณฑ์ถุงมือยางจะเป็นพวกฟีนอล สารในตระกูลนี้ส่วนใหญ่ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสี หรือสี ตก แต่การป้องกันสู่ตระกูลเอมีนไม่ได้ สารในตระกูลนี้มีมากมาย ที่จะกล่าวนี้เป็นพวกที่อยู่ในกลุ่ม อนุพันธ์ของฟีนอล ที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม

2 - 2' - เมทิลีน - บิส - (4 - เมทิล - 6 - เทอ - บิวทิลฟีนอล) เป็นผลิตภัณฑ์ขาวมีจุด หลอมเหลวที่ 125 - 133 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 1.04 ไม่มีผลต่อการคงรูป ไม่เกิดการบวม (หมายถึง การที่สารเคมีเคลื่อนย้ายจากภายในออกมายังผิวนอกผลิตภัณฑ์ และตกผลึกบนผิวของ ผลิตภัณฑ์นั้นๆ) สารตัวนี้ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์สีตก แต่จะให้ยางที่มีสีขาว เปลี่ยนสีเล็กน้อย เมื่อถูก แสง ปริมาณการใช้ร้อยละ 0.24 - 1.5 นอกจากสารเคมีนี้แล้วยังมี 2,2' - เมทิลีน - บิส - (4 - เอทิล - 6 - เทอ - บิวทิลฟีนอล) และ 4,4' - บิวทิลดีน - บิส - (6 - เทอ - บิวทิล - เอ็ม - ลีโซล)

นอกจากนี้ยังมีสารเคมีที่ผลิตโดย อิมพีเรียล เคมีคัล อินดัสเตียล จำกัด ในการค้าชื่อว่า Nonox WSL ซึ่งไม่เปลี่ยนสีผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของสารอัลคิลเลตฟีนอล ซึ่งมีสมบัติการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และแสงอย่างกลางๆ เป็นของเหลวสี เหลืองไม่มีปัญหาเรื่องการทำให้กระจายในน้ำในลักษณะอิมัลชัน ใช้ในรูปอิมัลชันกับน้ำยาง และ หยดสารเคมีที่กระจายในน้ำจะแทรกเข้าไปในน้ำยางอย่างรวดเร็วเมื่อยางถูกทำให้แข็ง ปริมาณการใช้ ร้อยละ 0.5 - 1

### 2.4.4 สารเพิ่ม และสี

จุดประสงค์ในการใช้สารเพิ่มในผลิตภัณฑ์จากน้ำยางเพื่อลดต้นทุนการผลิตอย่างเดียว ไม่ช่วยให้เพิ่มสมบัติทางกายภาพ เช่นเดียวกับการใช้คาร์บอนแบลคในยางแข็ง อาจใช้ดินขาว (kaolinite clay) เพื่อเพิ่มความแข็งเท่านั้น กรณีถุงมือทางการแพทย์จะไม่ใช้สารเพิ่มเลย แต่อาจใช้ ในการผลิตถุงมือใช้งานบ้านได้

สี ที่ใช้ในน้ำยางเลือกได้ตามต้องการทั้งชนิดที่เป็นอินทรีย์สาร และอนินทรีย์สาร นอกจาก นี้สารเพิ่มชนิดต่างๆ ยังสามารถใช้เป็นสีได้ เช่น สีขาวใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ ไลโทโปน ซิงค์ออกไซด์ ส่วนสีดำใช้คาร์บอนแบลค สำหรับผลิตภัณฑ์ถุงมือทางการแพทย์จะไม่ใส่สี

#### 2.4.5 สารเสถียร และสารช่วยการผลิต

สารเสถียร เป็นสารเคมีตัวแรกที่ใส่ลงในน้ำยางผสมสารเคมีเพื่อเพิ่มความเสถียรภาพของน้ำยางก่อนที่จะเติมสารเคมีอื่นๆ เพื่อป้องกันการจับตัวของน้ำยาง สารเคมีในกลุ่มนี้มีหลายชนิดด้วยกัน บางครั้งสารตัวเดียวกันอาจทำหน้าที่หลายอย่าง เช่น เป็นสารที่ช่วยให้เกิดการกระจายของสารเคมี หรืออนุภาคของยางในน้ำให้ดีขึ้น ทำหน้าที่สารเสถียร และยังทำหน้าที่เป็นสารลดแรงดึงผิวของน้ำกับสารเคมี หรือสารทำให้เปียก เป็นสารที่ทำให้เกิดฟอง การจำแนกสารนี้ตามหน้าที่จึงทำได้ยาก เช่น สารที่มีชื่อการค้าว่า Vulcastab LW จะมีสมบัติเป็นทั้งสารอิมัลชัน สารเสถียร และสารทำให้เปียก สารเคมีในกลุ่มนี้มีทั้งที่เป็นอนุโมล การใช้สารต้องเลือกให้ถูกกับน้ำยาง ในกรณีน้ำยางธรรมชาติซึ่งมีอนุโมลเป็นลบ จะต้องเลือกให้เหมาะกับน้ำยางด้วย

นอกจากนี้ยังมีสารช่วยในการผลิตอื่นๆ คือ น้ำมันแร่ และเอสเทอร์ที่ไม่ระเหย ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดความนุ่มในผลิตภัณฑ์ และปิโตรเลียมเฮลลิ ใช้ในส่วนประกอบของน้ำยางผสมสารเคมีเพื่อให้ผิวของผลิตภัณฑ์เรียบตามต้องการ และยังสามารถช่วยลดฟองที่เกิดขึ้นด้วย

### 2.5 การเตรียมสารเคมีที่ใช้กับน้ำยาง [5,6,8,9,10]

สารเคมีต่างๆ ที่จะผสมลงในน้ำยางเพื่อการผลิตวัตถุสำเร็จรูปนั้น จำเป็นต้องเตรียมให้อยู่ในสถานะของเหลวเสียก่อน เพราะถ้าหากนำสารเคมีแห้งๆ ใส่ลงไปลงในน้ำยางโดยตรง จะไม่ได้ของผสมที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ สารเคมีจะตกตะกอน หรืออาจจะเกิดเป็นก้อนขึ้นในน้ำยาง และน้ำยางจะเกิดการจับตัวขึ้นในไม่ช้า จึงต้องเตรียมสารเคมีนั้นเป็นสารละลาย เตรียมเป็นดิสเพอร์ชัน หรืออิมัลชัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารนั้นๆ ว่าจะสามารถเตรียมเป็นสถานะใดได้ สารเพิ่มความคงตัวหรือสารพวกช่วยความเสถียรส่วนใหญ่ละลายน้ำ จึงเหมาะจะเตรียมเป็นสารละลาย และเติมในสถานะสารละลายเจือจางลงในน้ำยาง สารพวกน้ำมันหรือของเหลวที่ไม่สามารถละลายน้ำ ก็จะต้องเตรียมเป็นอิมัลชัน ส่วนสารพวกของแข็งทั้งหลายที่ไม่ละลายน้ำ จะต้องเตรียมเป็นดิสเพอร์ชัน

#### 2.5.1 หลักการสำคัญในการพิจารณาเติมสารละลาย อิมัลชัน หรือดิสเพอร์ชันลงในน้ำยาง

(1) ขนาดของอนุภาคของสารที่กระจายในดิสเพอร์ชัน และขนาดของ ของเหลวในอิมัลชันจะต้องเล็กพอๆกับขนาดของอนุภาคยางที่ใช้ แต่หลักการพิจารณาข้อนี้ ขึ้นอยู่กับการแปร

รูปน้ำยางเป็นผลิตภัณฑ์ ว่าต้องการผลิตอะไร เช่น การผลิตยางฟองน้ำ ใช้อุณหภูมิการที่มีขนาดใหญ่กว่ากรณีการผลิต ผลิตภัณฑ์ประเภทจุ่ม

(2) ระบบความคงตัวของคิสเพอร์ชันและของอิมัลชัน ควรเหมือนกับระบบความคงตัวของน้ำยางที่ใช้ เพราะไม่เช่นนั้นอาจจะเกิดปัญหาที่มีปฏิกิริยาที่ทำให้น้ำยางจับตัวกันได้

(3) ควรปรับระดับความเป็น กรด-เบส ของสารละลาย สารคิสเพอร์ชัน และสารอิมัลชันให้เท่ากับระดับความเป็นกรด-เบสของน้ำยางที่ใช้

## 2.5.2 การเตรียมสารละลาย

### (1) การเตรียมสารละลาย

สารเคมีที่ใช้กันในสูตรการผสมน้ำยางและสามารถเตรียมเป็นสารละลายได้ จะเป็นพวกสารต่างๆ ดังนี้ คือ

- เบส เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สารละลายแอมโมเนีย
- สารละลายเคซีน (Casein)
- สารละลายของพวกซัลเฟต (sulfate) และซัลโฟเนต (Sulphonate)
- สารเร่งชนิดละลายน้ำได้ เช่น โซเดียมไดบิวทิลไดไทโอคาร์บาเมท

### (2) การเตรียมอิมัลชัน

สารเคมีที่มีสถานะเป็นของเหลวบางชนิดไม่ละลายน้ำ ได้แก่ สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ และสารป้องกันการเสื่อมเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันบางชนิด สารเหล่านี้ต้องเตรียมเป็นอิมัลชัน โดยวิธีการและอุปกรณ์ที่เหมาะสม เช่น ใช้เครื่องผสม (Homogenizer) ที่สามารถปั่นและเกิดแรงเฉือนอย่างสูง ในตารางที่ 2.2 จะแสดงถึงส่วนประกอบของการเตรียม 50% อิมัลชัน

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของอิมัลชัน

ส่วนประกอบ	น้ำหนัก
สารของเหลว	50
สารละลาย 20% โพแทสเซียมโอเลียด	7.5
น้ำ	42.5

ให้ทำการผสมของเหลวกับน้ำโดยใช้สาร Surface Active Solution แล้วผ่านเข้าไปในเครื่องปั่นที่มีความเร็วสูง เช่น เครื่อง Silverson Homogenizer หรือ Colloid Mill ด้วยแรงเฉือนของเครื่องจะทำให้สารละลายกระจายในน้ำและมีขนาดเล็ก (5-20 นาโนเมตร) ถ้าในกรณีที่สารมีความหนืดสูงมาก ควรอุ่นให้สารมีอุณหภูมิประมาณ 60-70 °C ก่อนการปั่น

### (3) การเตรียมดิสเพอร์ชัน

สารเคมีจำพวกของแข็งมีความจำเป็นที่จะต้องเตรียมเป็นดิสเพอร์ชัน ก่อนเติมลงไปใต้น้ำยาง โดยทั่วไปวิธีการเตรียมดิสเพอร์ชันสำหรับใช้งานน้ำยาง ขั้นแรก คือ การผสมสารที่เป็นผงกับน้ำ และใส่สารช่วยการกระจายหรือทำให้เกิดดิสเพอร์ชัน (Dispersing Agent) ตัวอย่างเช่น Dervan No. 1 หรือวัลตามอล (Vultamol) จากนั้นจึงบดของผสมนี้ด้วยเครื่องมือบดย่อยสารเพื่อบดย่อยสารให้เล็กลง

ในการเตรียมดิสเพอร์ชัน นอกจากสารหลักดังกล่าวแล้ว ยังมีสารอื่นๆที่ใช้เฉพาะในกรณีที่มีการเตรียมดิสเพอร์ชันมีปัญหา ได้แก่

ก. สารปรับสภาพความเป็นกรด-เบส ใช้ในกรณีที่สารเคมีบางตัวเป็นกรดจะต้องทำให้มีฤทธิ์เป็นเบสเหมือนน้ำยางก่อนที่จะเติมลงในน้ำยาง เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางยางเกิดการจับตัว ได้แก่ โปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนีย

ข. สารเพิ่มความคงตัว ใส่เพื่อให้สารเคมีมีสภาพผิวคล้ายกับน้ำยาง ทำให้เข้ากับน้ำยางได้ดี ได้แก่ เคซีน ซึ่งใส่อยู่ในรูปของสารละลายแอมโมเนีย และในบางครั้งใช้สารเคมีที่เป็นกลาง ได้แก่ วัลคาสแทป แอล ดับบลิว (Vulcastad L W)

ค. สารเพิ่มความหนืด ใส่เพื่อให้สารผสมมีความหนืดสูงขึ้น ได้แก่ เมทิลเซลลูโลส (Methyl Cellulose) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxy Methyl Cellulose)

ง. สารป้องกันการเกิดฟอง ใส่เพื่อลดการเป็นฟองในการบดจะทำให้การบดมีประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ ซิลิโคน อิมัลชัน (Silicone Emulsion)

จ. สารป้องกันการตกตะกอนแข็ง ใส่เพื่อป้องกันการเกิดเป็นตะกอนแข็งของสารเคมี ได้แก่ เบนโทไนท์ เคลย์ (Bentonite Clay)

ฉ. การเตรียมดิสเพอร์ชันของสารเคมี สักส่วนโดยน้ำหนักของสารหลักที่ต้องการเตรียมควรเป็นส่วนธรรมดาๆ เพื่อความสะดวกในการคำนวณ และมักจะใส่สารเพิ่มความหนืดหรือป้องกันการตกตะกอนแข็งลงไปด้วย ซึ่งสูตรการผสม 50% ดิสเพอร์ชันแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

### ตารางที่ 2.3 แสดงการเตรียมคิสเพอร์ชัน

สารต่างๆ	น้ำหนัก(กรัม)
สารเคมี (Ingredient)	50.0
สารช่วยการกระจาย (Dispersing Agent)	1.0
เบนโทไนท์ เคลย์ (Bentonite Clay)	1.0
น้ำ	48.0

ในการเตรียมสารคิสเพอร์ชันนั้นมีข้อจำกัดในการเตรียมอยู่หลายข้อซึ่งหลักการสำคัญในการเตรียมคิสเพอร์ชันมีดังต่อไปนี้

ก. สัดส่วนโดยน้ำหนักของสารหลักที่ต้องการควรเป็นสัดส่วนธรรมดาต่างๆ เช่น 2/3, 1/2, 1/3, 1/4 ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการคำนวณเปลี่ยนน้ำหนักของสารหลักให้เป็นน้ำหนักของคิสเพอร์ชันที่ได้

ข. วิธีการโดยทั่วไป ในการเตรียมสารผสม (Dispersion Slurry) เพื่อจะรวมสารละลายของตัวกลางทำให้เกิดคิสเพอร์ชัน ((Dispersing Agents) และสารช่วยความคงตัว (Stabilizers) กับน้ำเข้าด้วยกันก่อนแล้วจึงเติมลงในสารที่เป็นผงแห้งแล้วทำการกวนด้วยความเร็วสูง

ค. ในการเตรียมซัลเฟอร์คิสเพอร์ชัน มักมีปัญหาเกี่ยวกับความยุ่งยากที่จะทำให้ซัลเฟอร์แตกกระจาย เพราะซัลเฟอร์มักจะรวมตัวกันและตกตะกอนอย่างรวดเร็วหลังจากที่ได้ทำคิสเพอร์ชันไปแล้ว ดังนั้นในการเตรียมซัลเฟอร์คิสเพอร์ชัน ควรใช้สารตัวกลางทำให้เกิดคิสเพอร์ชัน ปริมาณค่อนข้างมากคือ 2 ถึง 2.5 ส่วนต่อ 100 ส่วนของซัลเฟอร์ และควรใช้สารช่วยความคงตัวอ่อนๆ 1 ส่วน สารช่วยความคงตัวอาจจะใช้พวกเคซีน ความจำเป็นอีกประการหนึ่งในการเตรียมซัลเฟอร์คิสเพอร์ชัน คือการเติม “Thickener” เพื่อช่วยลดหรือชะลอการตกตะกอนโดยแนะนำให้ใช้เบนโทไนท์เคลย์ การเติม “Thickener” แนะนำให้เติมภายหลังการเสร็จสิ้นการบดทำคิสเพอร์ชัน

ง. การเตรียมสารคิสเพอร์ชันของสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์อาจเตรียมให้เข้มข้นได้ถึง 50 % แต่ยกเว้นกรณีการเตรียมสารกลุ่ม ไดไทโอคาบาเมต หากเข้มข้นระดับนี้มักเกิดการรวมตัว และตกตะกอนได้ อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกมักเตรียมคิสเพอร์ชันของสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ เข้มข้น 33 % และใช้สารพวกไฮโดรคอลลอยด์ เช่น 1 % ของเมทิลเซลลูโลสช่วยเสริมความคงตัวของคิสเพอร์ชันและเพื่อช่วยป้องกันการตกตะกอน

จ. การเตรียม ZnO คิสเพอร์ชัน อาจเตรียมโดยใช้บอรัมมิล หรือคอลลอยด์มิล หรืออูลตราโซนิคมิลก็ได้ มักเตรียมให้ได้คิสเพอร์ชันที่ละเอียดมาก โดยวิธีการของบอรัมมิลเมื่อต้องการใช้งานพวกจุ่มแบบพิมพ์หรือผลิตพวกยางยืด และใช้สบู่ของแอมโมเนียมเป็นตัวการให้เกิด



ดิสเพอร์ชัน อย่างไรก็ตามควรต้องระวังการเกิด ZnO รวมตัวอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาอนุมูลของซิงค์ แอมโมเนียมกับอนุมูลของสบู่

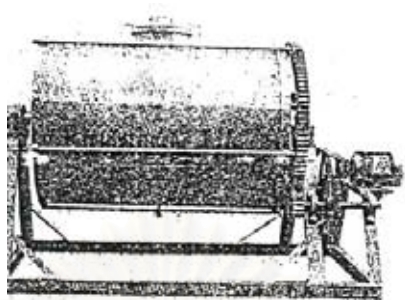
ฉ. การทำดิสเพอร์ชันของสารป้องกันการเสื่อม เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันมักมีปัญหายุ่งยากอันเนื่องด้วยสถานะการเป็นพวกเรซินของสารนี้ จึงได้มีการคิดค้นหาวิธีการต่างๆ เพื่อแก้ปัญหาต่างๆ นั้น การใช้สารที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาเป็นตัวพา (Carrier) ซึ่งในบรรดาสารที่เป็นตัวนำพาดังกล่าว เคลโอโนเคลย์เป็นสารที่ใช้ได้ผลดีที่สุด โดยใช้เคลโอโนเคลย์ปริมาณเท่ากับปริมาณสารป้องกันการเสื่อมเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือใช้ถึง 50 % และยังใช้สารตัวกลางทำให้เกิดดิสเพอร์ชันและใช้สารช่วยความคงตัวในปริมาณค่อนข้างสูงกว่าปกติ การเกิดดิสเพอร์ชันของสารป้องกันการเสื่อมเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นไปได้ดังนี้ คือเมื่อสารป้องกันการเสื่อมเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดการแตกกระจายออก อนุภาคละเอียดของเคลย์จะฉาบรอบๆ อนุภาคสารป้องกันการเสื่อมเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งการฉาบดังกล่าวทำให้ไม่มีการรวมตัวระหว่างอนุภาคสารป้องกันการเสื่อมเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ได้แล้วแตกกระจายต่อไปอีก

ซ. การเตรียมดิสเพอร์ชันของสารเพิ่ม เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต และเคลโอโนเคลย์ มักเตรียมเข้มข้น 67 % และในบางกรณีอาจจะเตรียมเข้มข้นถึง 75 % ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค และการกระจายของอนุภาคของสารเพิ่ม เนื่องด้วยงานในผลิตภัณฑ์บางชนิดต้องการใช้ปริมาณสารเพิ่มมากขึ้น จึงแนะนำให้เตรียมดิสเพอร์ชัน โดยใช้ส่วนผสมเพียงเล็กน้อย อนึ่งสารเพิ่มทั่วไป มักมีขนาดอนุภาคละเอียด ซึ่งจะจับเป็นก้อนได้ง่าย จึงจำเป็นต้องเตรียมเป็นดิสเพอร์ชัน

#### 4. เครื่องมือที่ใช้บดขยอยอนุภาคของสาร แบ่งได้ดังนี้

**บอลมิล (ball mill)** เป็นเครื่องบดขยอยสารที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในงานนี้มีส่วนสำคัญของเครื่องประกอบด้วย ลูกกลิ้งยาวเรียงขนานคู่กัน 1 คู่ ลูกกลิ้งลูกหนึ่งจะต่อกับมอเตอร์ ซึ่งจะจุดให้ลูกกลิ้งหมุนขณะใช้งาน และหม้อบรรจุสารที่ต้องการทำดิสเพอร์ชัน (ball mill pot) จะวางนอนอยู่บนระหว่างคู่ลูกกลิ้งข้าง หม้อดังกล่าวซึ่งมีลักษณะเป็นหม้อทรงกระบอก อาจทำด้วยสแตนเลสหรือทำด้วยกระเบื้อง ภายในบรรจุลูกหินบดหรือสารที่เป็นตัวบด (grinding material) ซึ่งทำจากเหล็ก (steel ball) หรือจากกระเบื้อง (porcelain ball) โดยทั่วไปจะใส่ลูกบดในปริมาณ 45-50 % ของปริมาตรทั้งหมด และใส่สารเคมีที่จะบดกับน้ำให้พอท่วมลูกหินบด หรือให้ปริมาตรของลูกหินบด สารเคมี และน้ำรวมกันประมาณสามในสี่ของปริมาตรของหม้อ โดยให้มีเนื้อที่ว่าง เพื่อที่จะได้บดสารอย่างมีประสิทธิภาพหม้อบรรจุสารจะหมุนรอบอย่างช้าๆ โดยการทำงานของมอเตอร์ที่จุดให้ลูกกลิ้งข้างซึ่งหม้อวางอยู่หมุน เมื่อหม้อหมุนรอบ ลูกบดภายในหม้อก็จะเคลื่อนหมุนไปด้วย แต่จะหมุนตามหม้อไปเพียงช่วงสั้นๆ แล้วก็ตกกลับลง ซึ่งจะทำให้อนุภาคของสารภายในหม้อถูกลูกหินบดตกกระทบและเกิดการแตก การหมุนของหม้อต้องไม่เร็วจนเกินไป เพราะการหมุนเร็ว

เกินไปเป็นผลให้ลูกหินบดถูกเหวี่ยงไปติดอยู่ข้างหม้อ ซึ่งจะไม่เกิดการตกของลูกหินบดลงกระทบบนภาคนล่างที่ต้องการให้แตก ลักษณะของเครื่องบอลมิลแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะของเครื่องบอลมิล [10]

ประสิทธิภาพของบอลมิล ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ คือ ขนาดของหม้อบด ความเร็วที่ใช้ในการบด ชนิดของสารที่ใช้ทำลูกหินบด ขนาดของลูกหินบด ปริมาณลูกหินบดที่บรรจุในหม้อ ปริมาณสารผสม และความหนืดของสารผสม

ก. ความเร็วที่ใช้ในการบด การหมุนหม้อบรรจุสารเร็วขึ้นจะทำให้อัตราเร็วของการบดเพิ่มมากขึ้น จนถึงจุดเต็มที่สุดหนึ่ง ซึ่งหากยังเพิ่มความเร็วของการหมุนของหม้อให้เร็วยิ่งขึ้นไปอีก จะเป็นผลให้ลดประสิทธิภาพการบดสาร เพราะลูกหินบดจะถูกเหวี่ยงไปติดอยู่ข้างหม้อ และไม่เกิดการตกกระทบบนภาคนล่างให้แตกกระจาย

ข. ขนาดลูกหินบด ลูกหินบดขนาดเล็กบดสารได้เร็วกว่าลูกหินบดขนาดใหญ่ เพราะจำนวนลูกหินบดที่ตกกระทบบนภาคนล่างให้แตกมีมาก แต่ลูกหินบดขนาดเล็กมีข้อเสียบางประการ คือ มีปัญหายุ่งยากเกี่ยวกับการเทคิสเพอร์ชันออกจากหม้อ และการแยกลูกหินบดออกจากคิสเพอร์ชัน ตลอดจนปัญหาเกี่ยวกับการเกิดความร้อน การสึกกร่อนของลูกหินบด และความไม่บริสุทธิ์ของคิสเพอร์ชันที่ได้รับ โดยทั่วไปมักนิยมใช้ลูกหินบดขนาดต่างๆ กัน มากกว่าการใช้ลูกหินบดขนาดเท่ากันเพียงขนาดเดียว

ค. ชนิดของลูกหินบด ลูกหินบดสามารถทำมาจากสารต่างๆ กัน และลูกหินบดที่ทำจากเหล็กจะบดได้เร็วกว่าลูกหินบดที่ทำมาจากกระเบื้อง หรือหินที่มีขนาดเท่าๆ กัน เพราะลูกหินบดเหล็กมีความหนาแน่นมากกว่า

ง. ประสิทธิภาพของลูกหินบดสัมพันธ์โดยตรงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของบอลมิล ซึ่ง Fischer พบว่าความเร็วจะสัมพันธ์กับขนาดของหม้อบด ดังสมการ

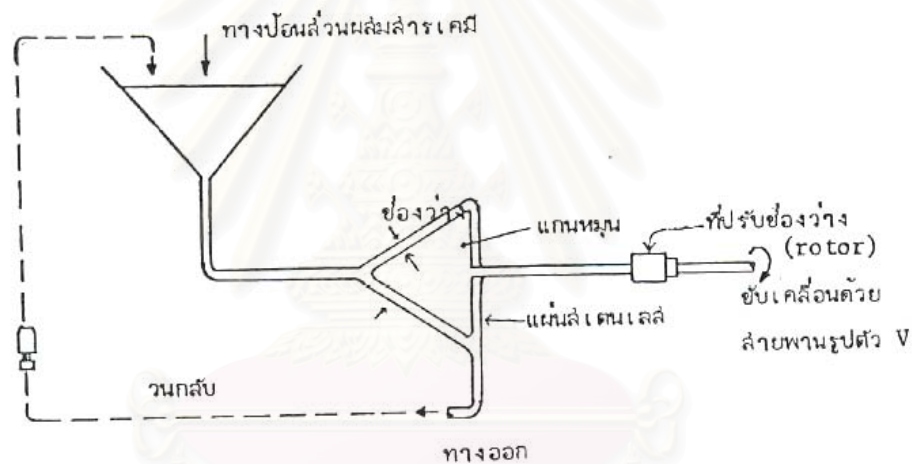
$$V = 54.2 / R^{1/2}$$

V = ความเร็วที่ใช้ในการบด, รอบ/นาที

R = รัศมีของหม้อบด, ft

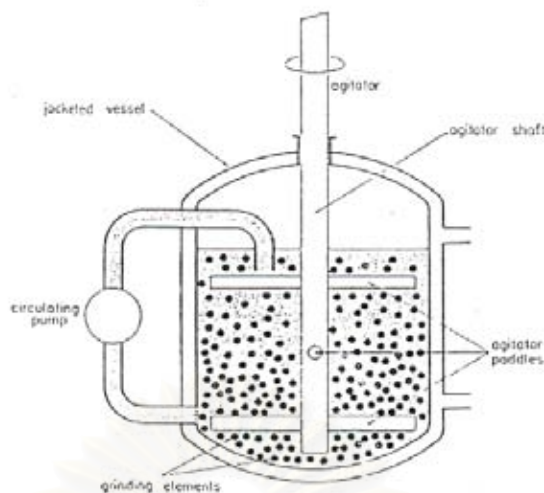
จ. ความหนืดของสารผสม ถ้าสารผสมที่ต้องการทำดิสเพอร์ชันมีความหนืดค่อนข้างมาก จะทำให้การบดไม่เป็นผล ต้องทำการปรับความหนืดของสารให้พอเหมาะการเตรียมดิสเพอร์ชันโดยใช้บอลมิลด์ ใช้เวลาค่อนข้างนาน คือ อาจใช้เวลาตั้งแต่ 1-3 วัน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดิสเพอร์ชันที่ต้องการจะเตรียม

**คอลลอยด์มิลล์ (colloid mill)** ใช้เตรียมสารดิสเพอร์ชันของสารพวก ZnO คาลิโอไนท์เคลย์ เป็นต้น เครื่องประเภทนี้อาศัยหลักการบดย่อยสารด้วยแรงเฉือนความเร็วสูงมาก เครื่องประกอบด้วยแผ่นหิน 2 แผ่นที่วางชิดกัน แผ่นหนึ่งอยู่กับที่ ส่วนอีกแผ่นหนึ่งหมุนด้วยความเร็วสูง สารที่ถูกบดจะถูกส่งผ่านลอดระยะห่างระหว่างแผ่นหินทั้งสองนี้ จะทำให้สารที่เกาะกันอยู่แตกจากกัน ระยะห่างระหว่างแผ่นหินทั้งสอง เป็นตัวควบคุมประสิทธิภาพในการบด เครื่องมือประเภทนี้ให้ผลผลิตเร็วมาก แต่ต้องให้สารผ่านเครื่องบดนี้หลายครั้ง จึงจะบดได้ละเอียดตามต้องการ ลักษณะของเครื่องคอลลอยด์มิลล์แสดงในรูปที่ 2.9



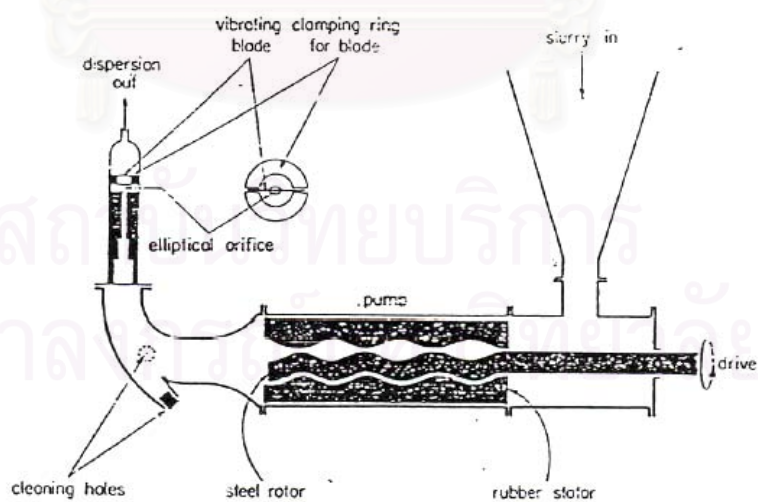
รูปที่ 2.9 ลักษณะภายในเครื่องคอลลอยด์มิลล์ [10]

**แอททริชันมิลล์ (attrition mill)** มีหลักการบด โดยสารผสมที่ต้องการบดทำดิสเพอร์ชัน และสารที่ใช้เป็นตัวบดจะถูกกวานอย่างแรงด้วยแท่งกวาน หรืออื่นๆ กันก็จะมีการสูบของผสมให้ไหลวน สารที่ใช้เป็นตัวบดนิยมใช้เป็นลูกหิน และภาชนะบรรจุสารนิยมทำจากพวกกระเบื้องหรือพวกแสดนเลส ข้อได้เปรียบของเครื่องบดชนิดนี้ คือ สามารถใช้เตรียมดิสเพอร์ชันที่มีริขณาละเอียดมากๆ มีความเข้มข้นสูงได้ภายในเวลารวดเร็ว อย่างไรก็ตามเครื่องแอททริชันมิลล์จะมีราคาแพงกว่าบอลมิลล์มาก ลักษณะของเครื่องแอททริชันมิลล์จะแสดงดังในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะของเครื่องเอทริชันมิล [10]

**อุลตราโซนิกมิล (ultrasonic mill)** หลักการของเครื่องชนิดนี้ ใช้หลักการสั่นสะเทือนด้วยความเร็วสูงมาก สารผสมที่ต้องการจะเตรียมเป็นคิสเปอร์ชัน จะถูกป้อนเข้าเครื่องด้วยความเร็วสูง และไปกระทบกับแผ่นสแตนเลส จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และเกิดช่องว่างขึ้นที่แผ่นสแตนเลส ความดันที่เกิดขึ้นทำให้อนุภาคของสารแตกกระจายออก เครื่องชนิดนี้ทำงานได้รวดเร็วมาก แต่ไม่สามารถเตรียมคิสเปอร์ชันจากสารผสมที่มีอนุภาคค่อนข้างหยาบ ลักษณะของเครื่องอุลตราโซนิกมิลดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะของเครื่องอุลตราโซนิกมิล [10]

## 2.6 น้ำยางคงรูปหรือน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ [3]

น้ำยางคงรูปหรือน้ำยางพรีวัลคาไนซ์เป็นน้ำยางที่โมเลกุลยางได้เกิดพันธะเคมีอันเนื่องมาจากทำให้ความร้อนกับน้ำยางที่ได้ผสมสารเคมีที่จำเป็นไว้แล้ว และส่วนใหญ่จะมีสารเคมีช่วยเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Accelerator) โดยปกติจะทำการผสมสารเคมีกับน้ำยางแล้วบ่มหรือเก็บไว้ (Maturation) ก่อนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เนื่องด้วยน้ำยางผสมสารเคมีส่วนใหญ่จะผสมสารช่วยเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ไว้ด้วย ดังนั้นขณะการบ่ม หรือเก็บน้ำยางอาจเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงขึ้นได้ ซึ่งการเกิดการคงรูปของน้ำยางจะมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นกับภาวการณ์เก็บน้ำยาง และความว่องไวของสารช่วยเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ สำหรับการทำน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ อาจจะพิจารณาว่าเป็นวิธีการพิเศษวิธีหนึ่งของกรบ่มน้ำยางผสมสารเคมี

### 2.6.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีสำหรับการเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์

วิธีการเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ ประกอบด้วยการนำน้ำยางข้น หรือน้ำยางสดมาผสมกับสารเคมีในระบบทำให้ยางคงรูป (vulcanizing system) ซึ่งประกอบด้วยซิงค์ออกไซด์ สารเร่งปฏิกิริยา เช่น zinc diethyl dithiocarbamate (ZDC) และซัลเฟอร์ พร้อมทั้งสารระบบช่วยความคงตัว

(1) น้ำยางข้น (concentrated latex) ความนิยมใช้น้ำยางข้น 60% %DRC (dry rubber content) ที่ผลิตโดยวิธีการหมุนเหวี่ยง (centrifuging) มีมากกว่าน้ำยางข้นที่ผลิตโดยวิธีทำให้เกิดครีม (creaming) หรือโดยวิธีระเหยน้ำ (evaporating) เพราะน้ำยางข้น 2 ชนิดหลังหาซื้อได้ยาก มีราคาแพงและไม่มีข้อได้เปรียบไปกว่าน้ำยางข้นจากการเหวี่ยงแยก น้ำยางที่ใช้ในวานวิจัยนี้เป็นน้ำยางที่ทำให้คงรูปแล้ว (pre-vulcanized latex) ข้อดีของน้ำยางคงรูป คือ มีความสะดวกที่จะทำให้น้ำยางปริมาณหนึ่งๆ คงรูปมากกว่าที่จะทำให้แผ่นยางแบบพิมพ์แต่ละอันคงรูปและไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีอื่นๆ ยกเว้นยกเว้นอาจจะต้องใส่สารป้องกันยางเสื่อม อย่างไรก็ตามแผ่นยางที่ได้จากน้ำยางคงรูปจะมีความแข็งแรงต่อการดึงยางจนขาด (tensile strength) ความยาวที่ดึงยางจนขาด (elongation at break) ต่ำกว่ายางที่ทำให้คงรูปภายหลังที่เป็นแผ่นแล้ว (post-vulcanized rubber) จุดอ่อนดังกล่าวของน้ำยางคงรูปเนื่องมาจากขาดการเชื่อมอย่างสมบูรณ์ระหว่างต่างอนุภาคยางเพราะโมเลกุลยางในแต่ละอนุภาคจะเกิดพันธะเคมีกันก่อนแล้ว ดังนั้นในการเลือกที่จะใช้น้ำยางคงรูปควรจะพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการลดค่าใช้จ่ายและความสะดวกกับสมบัติบางประการของยางที่ได้

ชนิดของน้ำยางที่ใช้ สามารถใช้ได้ทั้ง 2 ชนิด คือชนิดรักษาด้วยแอมโมเนียมาก (HA, high ammonia) และชนิดที่รักษาด้วยแอมโมเนียน้อยร่วมกับสารช่วย (LA, low ammonia) สำหรับชนิดแรกต้องใส่แอมโมเนียให้เหลือประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักของน้ำยาง) ก่อนการใช้ ส่วนน้ำยางที่รักษาด้วยแอมโมเนียน้อยอาจจะไม่จำเป็นต้องลดแอมโมเนียและน้ำยางชนิดหลังที่นิยมใช้คือ ชนิด LA-TZ (low ammonia-tetramethyl thiuram disulphide/zinc oxide) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ น้ำยางชนิดแอมโมเนียน้อย

(2) สารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) สารเพิ่มความคงตัวที่ใช้โดยทั่วไปเป็นด่างและสบู่ของกรดไขมัน โดยใช้ด่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเหมาะสมกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์เพราะอนุมูล โพแทสเซียมมีผลต่อการลดค่าความคงตัวของน้ำยางน้อยกว่าอนุมูลโซเดียม ปริมาณการใช้ด่างอยู่ระหว่าง 0.2-0.5 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่เพิ่มความคงตัวให้น้ำยางโดยการช่วยรักษาความเป็นด่างของน้ำยางเพราะแอมโมเนียอาจจะหายไปบ้าง นอกจากนี้ยังช่วยลดการเกิดคริมที่ผิวหน้ายางอีกด้วย ส่วนสารพวกสบู่ของกรดไขมันจะใช้ชนิดที่โมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน 8-12 อะตอม เช่น โพแทสเซียมแคปริเลต (potassium caprylate,  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOK}$ ) และโพแทสเซียมลอเรต (potassium laurate,  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOK}$ ) สบู่ของกรดไขมันจะช่วยให้ยางมีความคงตัวต่อเครื่องมือกล (mechanical stability) ดีขึ้นแต่ไม่ควรใส่สารนี้มากเกินไปเพราะจะทำให้เกิดฟองได้ โดยทั่วไปใช้ประมาณ 0.2-0.4 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน

(3) สารในระบบการคงรูป (vulcanizing system) ใช้ในระบบการคงรูปที่ประกอบด้วยซัลเฟอร์เป็นสารทำใหยางคงรูป (vulcanizing agent) ซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) เป็นสารกระตุ้น (activator) และใช้สารเร่งปฏิกิริยาของคงรูป (accelerator) ชนิดเดียวหรือสองชนิดขึ้นไปสามารถจะใช้สารเร่งชนิดไวต่อปฏิกิริยา (ultra accelerator) เช่นกลุ่ม dithiocarbamate ได้โดยไม่ต้องกังวลเรื่องปัญหาของเกิดคงรูปก่อนกำหนด เช่นที่เกิดในกรณีใช้กับยางแห้ง

ปริมาณการใช้ซัลเฟอร์อยู่ระหว่าง 0.3-1.5 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน แปรตามอัตราความเร็วที่จะเกิดการคงรูป และโมดูลัส (modulus) ของยางที่ต้องการ และขึ้นกับปริมาณสารอื่นๆ ที่เติมลงในน้ำยางด้วย หากต้องการให้ยางทนความร้อนได้ดีที่สุดต้องใช้ซัลเฟอร์ในปริมาณต่ำที่สุด ซึ่งปริมาณที่ใช้จะต้องสอดคล้องกับโมดูลัสที่ต้องการด้วย ในการใช้ซัลเฟอร์ปริมาณต่ำต้องใช้ร่วมกับสารเร่งชนิดไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เพื่อให้มีอัตราเร็วของการเกิดยางคงรูป (rate of vulcanization) เพียงพอ

ปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นอยู่ระหว่าง 0.1-2.0 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในช่วง 0.1-2.0 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน ทำใหยางมี

โมลต์สูงขึ้น ปกติถ้าต้องการให้ยางมีความโปร่งแสงต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณต่ำประมาณ 0.25 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน

สารเร่งปฏิกิริยาขงรูปที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc diethyl dithiocarbamate, ZDEC or ZDC) ปริมาณการใช้อยู่ระหว่าง 0.3-1.5 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน ZDEC จะเพิ่มอัตราเร็วของการขงรูปขึ้นอย่างเด่นชัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียสโดยที่ ZDEC จะไม่ทำให้น้ำยางเกิดการขงรูปก่อน (pre-vulcanization) ถ้าเก็บน้ำยางที่ผสม ZDEC ไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า ดังนั้นจึงทำให้สามารถใช้ น้ำยางที่ผสม ZDEC ในกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันได้ การใช้ ZDEC ในยางที่ไม่เติมสารตัวเติม (filler) จะได้อย่างที่มีสมบัติความต้านทานแรงดึงจนขาดและความยาวที่ยางยืดจนขาดดีเยี่ยม โมลต์สปานกลาง

หากต้องการยางที่มีโมลต์สูงขึ้นให้ใช้ ZDEC ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาขงรูปกลุ่มไทอาโซล (thiazole) เช่น ซิงค์เมอแคปโทเบนซไทอาโซล (zinc-mercaptobanzthiazole, ZMBT) การใช้ ZDEC ร่วมกับ ZMBT นอกจากจะทำให้โมลต์สูงขึ้นแล้ว ยังมีผลในการเสริมประสิทธิภาพการขงรูปให้เร็วขึ้นมากกว่าการใช้แต่ละตัวตามลำพัง

สารกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมตตัวอื่นๆ ซึ่งนำมาใช้แทน ZDEC เพื่อให้ได้สมบัติบางอย่าง เช่น ซิงค์ไดบิวทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc dibutyl dithiocarbamate, ZBDC) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาขงรูปที่มีปฏิกิริยาเร็วกว่า ZDEC จึงง่ายต่อการที่ยางจะเกิดการขงรูปขึ้นก่อนอย่างช้าๆ ขณะบ่มน้ำยางผสมสารเคมีไว้ที่อุณหภูมิห้อง

สารป้องกันยางเสื่อมเนื่องจากการออกซิเดชัน (antioxidant) สารที่ใช้ป้องกันยางเสื่อมเพื่อยืดอายุการใช้งานหรือการเก็บรักษามี 2 กลุ่มคือ เอมีน/อนุพันธ์ของเอมีน (amine/ amine derivative) และฟีนอล/อนุพันธ์ของฟีนอล (phenol/ phenol derivative) กลุ่มแรกมีข้อเสียคือ ทำให้ยางเปลี่ยนสี (staining) ส่วนกลุ่มที่สองไม่ทำใหยางเปลี่ยนสี (non-staining) แต่จะมีประสิทธิภาพด้อยกว่ากลุ่มแรก ความนิยมในการผลิตขงมีเอมีนใช้สารกลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอลมากกว่า ปริมาณการใช้ประมาณ 1 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน

สารทุกกลุ่มดังกล่าวข้างต้นเมื่อจะใช้ผสมกับน้ำยางจะต้องเตรียมให้อยู่ในสถานะของเหลว เช่น สารละลาย สารแขวนลอย หรืออิมัลชันเสียก่อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารที่จะใช้ว่าจะสามารถเตรียมให้อยู่ในสถานะใดได้

## 2.6.2 การผสมสารเคมีกับน้ำยาง

ข้อที่ควรพิจารณามาพิจารณาในการผสมสารเคมีต่างๆ กับน้ำยางคือ ควรตรวจสอบสถานะของน้ำยางและสารเคมีก่อนการผสมและหลังผสมเสร็จแล้ว (latex compounded) นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องเรียงลำดับการผสมสารกลุ่มต่างๆ ได้อย่างถูกต้องอีกด้วย ข้อมูลเหล่านี้จะเป็นประโยชน์มากในการควบคุมกระบวนการผลิตตลอดจนคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับ

สารเคมีที่ได้เตรียมให้อยู่ในสถานะต่างๆ คือ สารละลาย หรือสารแขวนลอย หรืออิมัลชันแล้วนั้น ควรต้องมีการตรวจสอบความเข้มข้น คือ ตรวจสอบว่ามีปริมาณของเนื้อสารเคมีถูกต้องหรือไม่ และขนาดของอนุภาคมีความละเอียดเพียงพอหรือไม่ (ปกติควรจะมีขนาดละเอียดต่ำกว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคยาง คือต่ำกว่า 5 ไมโครเมตร) ตลอดจนต้องตรวจสอบความเป็นกรดค้างของสารเหล่านั้น เพื่อจะช่วยควบคุมเกี่ยวกับสถานะความคงตัวของน้ำยางเมื่อเติมสารเหล่านี้ลงไป หลักพิจารณาพื้นฐาน คือสถานะความเป็นกรดจะมีแนวโน้มทำให้น้ำยางเสียสภาพ จับตัวกันง่าย และสถานะเป็นด่างมากเกินไปน้ำยางจะมีความคงตัวมากไปก็จะมีปัญหา คือน้ำยางจะไม่ฟอร์มยางเกาะแบบพิมพ์ในขณะที่ถึงขั้นตอนที่ต้องการให้ยางจับแม่พิมพ์ เป็นต้น

ลำดับการเติมสารเคมีผสมกับน้ำยางข้อแนะนำลำดับการเติมสารเคมี คือ

- เติมน้ำให้ได้ความเข้มข้นของเนื้อยางที่ต้องการ
- เติมสารกลุ่มช่วยให้ยางคงตัว (stabilizer)
- เติมสารกลุ่มทำหน้าที่ให้ยางคงรูป (vulcanizing system)
- เติมสารป้องกันยางเสื่อม
- เติมสารสี (pigment) (ถ้าต้องการ)

\* ควรเติม ZnO หลังสุดเพื่อกันน้ำยางหนืด (zinc oxide thickening)

แต่ละกลุ่มหรือแต่ละอย่างของสารที่เติมลงไปใต้น้ำยางจะต้องผสมเข้ากับน้ำยางเป็นอย่างดีก่อนจึงเติมสารตัวต่อไปลงไป ในการกวนผสมน้ำยางจะใช้เครื่องกวนตีใบกวนใหญ่ ความเร็วของการกวนประมาณ 5-60 รอบ/นาที

## 2.6.3 ภาชนะบรรจุน้ำยางผสม

ภาชนะที่จะใช้บรรจุน้ำยางผสมควรทำด้วยสเตนเลส หรือ epoxy-lined mild steel หรือ glass-fiber reinforced plastics เป็นต้น ไม่แนะนำให้ใช้ภาชนะที่ทำด้วยอะลูมิเนียม และไม่ควรใช้ทองเหลืองในส่วนใดๆของภาชนะ ขนาดของภาชนะนั้นขึ้นอยู่กับขนาดการผลิต และความถี่ของการผสมน้ำยาง รูปร่างของภาชนะควรเป็นทรงกระบอกอ้วน คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่าความลึกหนึ่งเพื่อความสะดวกในการล้างทำความสะอาดภาชนะ และมีฝาปิดได้สนิท



## 2.6.4 การกวนและระยะเวลากวนน้ำยางผสม

ภาชนะบรรจุน้ำยางควรมีอุปกรณ์ที่ใช้กวนน้ำยางซึ่งควบคุมควบคุมความเร็วในการกวนได้ในช่วง 5-60 รอบต่อนาที ใบพัดกวนควรมีขนาดใหญ่ (เช่น  $0.75 \times$  เส้นผ่าศูนย์กลางของภาชนะ) เพื่อให้ได้การกวนในช่วงความเร็วต่ำอย่างมีประสิทธิภาพ แกนของใบพัดควรเป็นส่วนที่ จะต้องสัมผัสกับน้ำยาง ต้องทำจากสเตนเลส ถ้าหากภาชนะมีความลึก ควรมีใบพัดมากกว่า 1 ชุด เพื่อให้กวนน้ำยางได้สม่ำเสมอ

ระยะเวลาที่จะทำการกวนน้ำยางผสมกับสารเคมีขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบกวน และปริมาณของน้ำยางผสม อย่างไรก็ตามควรกวนน้ำยางให้น้อยที่สุด แต่ขณะเดียวกันการกวนต้องพอเพียงที่จะทำให้ น้ำยางมีความสม่ำเสมออย่างทั่วถึง ระยะเวลาการผสมอาจประมาณ 30-60 นาที ถ้าจะเก็บน้ำยางผสมไว้เพื่อการบ่ม หรือเพื่อการทำให้เกิดปฏิกิริยาในซีกที่ควรกวนน้ำยางต่อไปซึ่ง อาจกวนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วต่ำ (5-10 รอบต่อนาที) หรือกวนเป็นครั้งคราวด้วยความเร็วสูงเล็กน้อย (20-30รอบต่อนาที) ทั้งนี้เพื่อป้องกันสารเคมีต่างๆ ตกตะกอนลงกับภาชนะ จุดประสงค์ของการกวนน้ำยางด้วยความเร็วต่ำและจำกัดระยะเวลานั้น ก็เพื่อป้องกันปัญหาการเกิดน้ำยางผสม เสื่อมความคงตัว

## 2.6.5 การกำจัดฟองอากาศ

ในขณะที่กวนผสมน้ำยางหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะมีฟองอากาศเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟองอากาศจะยิ่งเกิดมากถ้ากวนน้ำยางด้วยความเร็วสูง การเติมสบู่ของกรดไขมันในปริมาณมากก็จะก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กๆ ซึ่งยากแก่การกำจัดออกจากน้ำยาง อย่างไรก็ตามเมื่อนำน้ำยางไปใช้งานจะต้องกำจัดฟองอากาศออกเสียก่อน โดยปกติแล้วฟองอากาศมักจะลอยสู่ผิวหน้าเมื่อตั้งทิ้งไว้ การกวนน้ำยางเบาๆ ขณะเก็บน้ำยางจะช่วยเร่งการลอยของฟองอากาศสู่ผิวหน้าน้ำยาง แต่ถ้าการกวนเร็วและมากเกินไปก็จะกลับทำให้ฟองอากาศลอยสู่ผิวหน้าช้าลง นอกจากนี้อัตราการเคลื่อนที่ของฟองอากาศสู่ผิวหน้ายังขึ้นอยู่กับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ และความหนืดของน้ำยาง ถ้าฟองอากาศมีขนาดเล็กมากหรือถ้า น้ำยางมีความหนืดสูง อาจต้องกำจัดฟองอากาศโดยใช้ระบบสูญญากาศ โดยวิธีการลดความดันบรรยากาศที่เหนือผิวหน้า น้ำยางลงเหลือประมาณ 200 มิลลิเมตรปรอท จะช่วยกำจัดฟองอากาศออกได้ภายในเวลา 12-16 ชั่วโมง การลดความดันดังกล่าว มีผลในการเพิ่มขนาดของฟองอากาศลอยสู่ผิวหน้าได้เร็วขึ้น

## 2.6.6 วิธีทดสอบน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ [11]

เนื่องจากน้ำยางที่วัลคาไนซ์แล้ว มีลักษณะที่มองด้วยสายตาไม่ค่อยแตกต่างไปจากน้ำยางชั้นธรรมดา ดังนั้นวิธีที่จะตรวจสอบว่าน้ำยางเป็นน้ำยางวัลคาไนซ์หรือไม่นั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีทดสอบในห้องปฏิบัติการ และวิธีที่จะกล่าวดังต่อไปนี้ยังสามารถตรวจสอบระดับสถานะของการคงรูป (Degree of Vulcanization) ของน้ำยางผสมเคมีได้อีกด้วย

(1) ทดสอบโดยใช้คลอโรฟอร์ม (Chloroform Test) หลักการของวิธีนี้ คือ ทำให้น้ำยางจำนวนเล็กน้อยจับตัวด้วยการหยดคลอโรฟอร์ม หรือคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbontetrachloride) ปริมาณที่เท่ากับปริมาณน้ำยาง ลักษณะก้อนยางที่จับตัวจะบ่งแสดงสถานะของการคงรูป นั่นคือ น้ำยางที่ยังไม่คงรูปจะให้ก้อนยางจับตัวมีลักษณะจับเป็นก้อนอ่อน และยืดได้ (มีลักษณะคล้ายเต้าหู้อ่อน เช่นเดียวกับก้อนยางที่ได้จากการทำน้ำยางสดจับตัวด้วยกระบวนการทำยางแผ่น) น้ำยางที่คงรูปอย่างสมบูรณ์แล้วจะให้ก้อนยางจับตัวที่มีลักษณะร่วนเป็นผงหรือเป็นเม็ดๆ และถ้าน้ำยางอยู่ในสถานะคงรูปบ้าง แต่ยังไม่สมบูรณ์ก็จะได้ก้อนยางจับตัวที่มีลักษณะก้ำกึ่งระหว่าง 2 ลักษณะที่กล่าวมา

(2) ทดสอบการบวมของยาง (Equilibrium Swelling) วิธีนี้จะทำการทดสอบโดยทำให้น้ำยางผสมที่ทำให้แห้งเป็นฟิล์มบางๆ แล้วแช่อยู่ในตัวทำละลายยาง เช่น เบนซีน (Benzene), โทลูอีน (Toluene) หรือน้ำมันเชื้อเพลิง น้ำยางที่มีการคงรูปอย่างสมบูรณ์จะบวมในตัวทำละลายเล็กน้อย ในทางตรงกันข้ามกับน้ำยางที่มีการคงรูปเพียงเล็กน้อยก็จะบวมมาก และในกรณีของยางที่ไม่คงรูปเลยจะละลายในตัวทำละลาย อนึ่งวิธีนี้จะต้องใช้เวลามาก เพราะต้องเสียเวลาทำแผ่นฟิล์มแห้ง และเสียเวลาในการสังเกตการบวมของแผ่นฟิล์มในตัวทำละลาย

(3) ทดสอบโดยใช้เครื่องดึงยาง (Tensile Test) วิธีนี้จะทำการทดสอบโดยทำแผ่นฟิล์มแห้งจากน้ำยางคงรูปแล้วนำไปทดสอบการดึง หรือยืดตามความยาวกำหนด (Modulus) หรือดึงยางจนขาด (Tensile Strength) จากผลของค่าเหล่านี้จะทำให้สามารถประเมินหาระดับการคงตัวได้ อย่างไรก็ตามการทดสอบโดยหาแรงที่ดึงออกยาว 100% ของความยาวเดิมเป็นเวลานาน 1 นาที (หรือเท่ากับ MR 100) เป็นวิธีที่ให้ผลในการตรวจสอบการคงรูปของยางที่น่าเชื่อถือมาก

(4) ทดสอบโดยวิธี PRM (Prevulcanizate Relaxed Modulus) วิธีนี้ MRPRA เป็นผู้กำหนดขึ้น โดยวิธีการนี้จะใช้พื้นฐานจากวิธีทดสอบ MR 100 แต่มีวิธีเตรียมขึ้นทดสอบภายในเวลาอันสั้น คือ ประมาณ 10 นาที ในขณะที่วิธีการทดสอบหา MR 100 ต้องใช้เวลาเตรียมขึ้นทดสอบนานประมาณ 24 ชั่วโมง

## 2.7 สารตัวเติม

สารตัวเติม หมายถึง สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น เชม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกาเป็นต้น

สารตัวเติมที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ดังนี้

- เพื่อลดต้นทุน
- เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง
- เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต
- ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน
- เพิ่มอายุการใช้งานของยาง

### 2.7.1 การแบ่งชนิดของสารตัวเติม

สามารถแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามการผลิต และตามลักษณะ คือ

(1) สารตัวเติมที่มีตามธรรมชาติ หรือจากผลพลอยได้จากธรรมชาติ แล้วนำมาบดให้ละเอียด เช่น

- แคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูน เปลือกหอย และชอล์ก
- แคลเซียมและแมกนีเซียมซิลิเกตจากแป้งทัลคัม
- ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica)

(2) สารตัวเติมตามธรรมชาติที่ร่อนแยกความละเอียด เช่น คาโอลิน เป็นต้น

(3) สารตัวเติมที่ได้จากวิธีการตกตะกอน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไฮเดรตซิลิกา โหเตียมอะลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และไฮเดรตอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นต้น

(4) สารตัวเติมที่อยู่ในรูปของเชม่าหรือผงฝุ่น เช่น เชม่าดำ ซิงค์ออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์

(5) สารตัวเติมประเภทที่ทำปฏิกิริยาที่ผิว (Surface Modified Products) เป็นผลิตภัณฑ์ที่นำสารตัวเติมมาทำปฏิกิริยาที่ผิว เพื่อให้สารตัวเติมนั้นเกาะติดแน่นกับยาง ซึ่งทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลคัม เป็นต้น

### 2.7.2 โซเดียมซิลิเกต

เป็นสารตัวเติมที่อยู่ในรูปของคอลลอยด์ โดยมีส่วนประกอบดังนี้ คือ  $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$  ในสัดส่วนต่างๆ กันขึ้นอยู่กับชนิดของโซเดียมซิลิเกต ซึ่งเวลานำโซเดียมซิลิเกตมาใช้งานนิยมที่จะตกตะกอนด้วยกรดซัลฟูริก เพื่อให้ได้ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ )

### 2.7.3 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกามีชื่อทางเคมีว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide) และอาจจะมีน้ำอยู่ในผลึกด้วย ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ไม่ใช่สีดำ (Nonblack Filler) ที่ดีที่สุดและนิยมใช้กันมาก เพราะเป็นสารตัวเติมชนิดที่เสริมความแข็งแรงให้กับยาง มักใช้กับผลิตภัณฑ์ยางพวกที่มีสีขาว หรือสีต่างๆ สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

(1) ซิลิกาบด เป็นแร่ซิลิกาบด หรือทรายบดละเอียด มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 200 เมช ( $75,000 \text{ \AA}$ ) ซึ่งเป็นขนาดที่หยาบ ไม่ช่วยเสริมแรงให้กับยาง แต่มีราคาถูก จึงนิยมใช้เป็นสารตัวเติมในยางทนความร้อน

(2) ซิลิกาที่ได้จากการตกตะกอน โดยการนำทรายมาละลายในด่างให้กลายเป็นสารประกอบซิลิเกต จากนั้นจึงตกตะกอนเอาซิลิกาออกมาล้างและทำให้แห้งจะได้ซิลิกาผง ซึ่งมีน้ำอยู่ในอนุภาค ซิลิกาที่ได้มีขนาดตั้งแต่  $100 - 400 \text{ \AA}$

(3) ซิลิกาที่เตรียมได้จากการเผาไหม้ ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{SiCl}_4$  กับไอน้ำในเปลวไฟของไฮโดรเจน และออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 400 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวให้ซิลิกาออกมา ซึ่งซิลิกาที่ได้จะมีขนาดเล็กมาก จึงสามารถนำมาใช้เสริมความแข็งแรงได้ดี

## 2.8 การออกแบบถนนคอนกรีต [12,20]

การออกแบบและก่อสร้างถนนคอนกรีตในปัจจุบันนี้แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

### 2.8.1 ถนนคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก (unreinforced concrete pavement)

ถนนคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก เป็นถนนคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริมกันร้าว และเหล็กถ้าย น้ำหนักตรงรอยต่อตามขวางเพื่อช่วยถ้ายน้ำหนักระหว่างแผ่นคอนกรีต แต่มีเหล็กยึดตรงรอยต่อ ความยาวช่วยป้องกันการแยกตัวของแผ่นคอนกรีต ถนนคอนกรีตชนิดนี้ต้องการรอยต่อเพื่อการหดตัว (contraction joint) ตามขวางค่อนข้างถี่ บางครั้งต้องออกแบบให้วางอยู่ในลักษณะขวางเฉียง และอาจมีเหล็กถ้ายน้ำหนักตรงรอยต่อเพื่อการหดตัวตามขวางในถนนที่มีปริมาณการจราจรสูง

### 2.8.2 ถนนคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่อง (continuously reinforced concrete pavement)

ถนนคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่อง เป็นถนนคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมกันร้าวในแผ่นคอนกรีต และมีเหล็กถ้ายน้ำหนัก เพราะแผ่นคอนกรีตยาวทำให้รอยต่อกว้างกว่าถนนคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก

### 2.8.3 ถนนคอนกรีตเสริมเหล็กมากแบบต่อเนื่อง (continuously highly reinforced concrete pavement)

ถนนคอนกรีตเสริมเหล็กมากแบบต่อเนื่อง เป็นถนนคอนกรีตที่มีปริมาณเหล็กเสริมค่อนข้างสูง (ประมาณ 0.6 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่าของพื้นที่หน้าตัดตามขวาง) นอกจากรอยต่อตามยาวแล้วจะมีรอยต่อเพื่อการก่อสร้าง และรอยต่อเพื่อการขยายตัวตามขวางเท่านั้น

## 2.9 ค่าเสถียรภาพ [13]

ค่าเสถียรภาพ (Stability) เสถียรภาพของชั้นโครงสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับกำลังของแอสฟัลต์คอนกรีต เสถียรภาพแอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง ความสามารถต้านทานต่อการอ่อนตัวเสียรูปของแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อมีน้ำหนักจากการจราจรกระทำ ในแง่ของกำลังของวัสดุอาจกล่าวได้ว่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดจากความฝืด

(friction) หรือการขัดกัน (interlocking) ของมวลรวมคละ และแรงยึดเหนี่ยว (cohesion) ของแอสฟัลต์

เสถียรภาพจะมีค่าสูงสุดได้เมื่อมวลรวมคละมีแ่งเหลี่ยมมุม และมีผิวขรุขระ การเรียงตัวของขนาดคละจะต้องแน่น (โดยจะต้องใกล้เคียงกับ Fuller's curve) สำหรับแอสฟัลต์ซึ่งเป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคของมวลรวมคละจะต้องมีความแข็งที่เหมาะสม และมีปริมาณแอสฟัลต์มากพอที่จะเคลือบหินเพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวมคละ

น้ำหนักบรรทุกและปริมาณการจราจรที่ผ่านไปมาบนผิวทางจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตเสียดปร่า ภายใต้น้ำหนักบรรทุกและปริมาณการจราจรจะทำให้เกิดการบดอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากล้อรถซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของแอสฟัลต์คอนกรีตเพิ่มขึ้น การบดอัดที่เพิ่มขึ้นอาจจะทำให้ปริมาณช่องว่างอากาศเปลี่ยนแปลงในทางลดลง ซึ่งไม่ควรลดลงให้ต่ำกว่าร้อยละ 1 ของปริมาณทั้งหมดถ้าปริมาณช่องว่างอากาศลดลงต่ำกว่าร้อยละ 1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต จะต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน (interconnected) ทำให้ช่องว่างหรือโพรงอากาศภายในส่วนผสมเหลือน้อยมาก เมื่อแอสฟัลต์ในส่วนผสมเกิดการขยายตัว เนื่องจากอุณหภูมิภายนอกสูงขึ้น และเกิดความเค้นภายในส่วนผสมเนื่องจากน้ำหนักล้อรถที่กระทำ เมื่อภายในส่วนผสมไม่มีช่องว่างอากาศ หรือรูพรุนพอเพียงแอสฟัลต์ที่ขยายตัวนี้แทรกตัวเข้าไปได้ จึงเป็นผลทำให้เกิดการทะลัก (bleeding) ขึ้นด้านบนผิวทางได้ส่วนการเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในลักษณะเป็นร่องล้อ เป็นคลื่นตามขวางเนื่องจากการหยุดรถ หรือการทะลักออกทางด้านข้างจะไม่เกิดขึ้น ถ้าแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นมีค่าเสถียรภาพที่สูงเพียงพอ

## 2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปิยวรรณ สุรัญชานาจิรสกุล [14]: ได้ศึกษาถึงการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมของแป้งมันสำปะหลังกับน้ำ และแป้งมันสำปะหลังกับยางธรรมชาติเป็นโม่โดยใช้วิธีการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ พบว่าโม่จากพอลิเมอร์ผสมของแป้งมันสำปะหลัง และยางธรรมชาติมีความแข็งแรงต่อแรงอัดและค่ามอดูลัสมากกว่าโม่จากแป้งเพียงอย่างเดียว และเมื่อมีการเติมสารเบนโซอิลเพอร์ออกไซด์ปริมาณร้อยละ 2-5 โดยน้ำหนักของน้ำยางเข้าไปในของผสม จะทำให้ได้โม่ที่มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของการเติมสารแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 5-30 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลังลงไปของผสม พบว่าโม่ที่ได้มีความแข็งแรงต่อแรงอัด และค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมเข้าไป

Yea-Yang Su, Shemenski M. Robert [15]: ได้ทำการศึกษาดังถึงบทบาทของชั้นออกไซด์บนเส้นลวดทองแดงที่มีผลต่อแรงยึดเกาะระหว่างยางกับเส้นลวดทองแดงพบว่า ชั้นของออกไซด์บนเส้นลวดทองแดงที่เกิดขึ้นนั้นมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ คิวพรีสออกไซด์ และคิวพรีคออกไซด์ โดยที่ค่าของแรงยึดเกาะจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างคิวพรีคออกไซด์ต่อคิวพรีสออกไซด์นั้นมีค่าน้อยลงและ จากการศึกษพบว่าชั้นของออกไซด์ที่มีผลต่อแรงยึดเกาะระหว่างยางกับเส้นลวดทองแดงนั้นคือชั้นของคิวพรีคออกไซด์ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นเป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซัลเฟอร์ภายในยางกับชั้นของคิวพรีคออกไซด์ทำให้ได้สารใหม่ คือ คอปเปอร์ซัลไฟด์

Brinke J.W.ten.et.al [16]: ได้ทำการศึกษาดังถึงบทบาทของสารเชื่อมต่อกายในยางที่มีซิลิกาเป็นสารเสริมแรงโดยใช้สารเชื่อมต่อ ในการศึกษาทั้งหมด 7 ชนิด โดยสารเชื่อมต่อแต่ละชนิดนั้นจะมีจำนวนซัลเฟอร์ภายในโครงสร้างต่างกัน จากการศึกษาพบว่าสารเชื่อมต่อ TESPT นั้นจะทำให้ยางที่มีซิลิกาเป็นสารเสริมแรงนั้นมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด เนื่องมาจากว่า TESPT นั้นมีจำนวนซัลเฟอร์อยู่ในโครงสร้างมากที่สุด โดยซัลเฟอร์ภายในสารเชื่อมต่อจะทำหน้าที่ไปสร้างพันธะกับสายไฮโดรคาร์บอนของยาง และที่ปลายอีกข้างจะจับอยู่กับซิลิกา ทำให้ได้แรงยึดเกาะระหว่างยางกับซิลิกามากขึ้น

Segre N., Joekes I. [17]: ได้ทำการศึกษาดังถึงการเติมเศษยางรถยนต์ลงไปนในซีเมนต์ โดยใช้เศษยางที่มีขนาดประมาณ 2-16 มิลลิเมตร ทำการปรับปรุงพื้นผิวของเศษยางโดยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นาน 20 นาที แล้วจึงนำมาผสมกับซีเมนต์ ทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆได้แก่ การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น ค่าความแข็งแรง และค่าความต้านทานในการสึกกร่อน จากการศึกษาพบว่า ซีเมนต์ที่ผสมเศษยางรถยนต์ที่ทำการปรับปรุงผิวด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้น จะให้ค่าความแข็งแรงที่มากกว่า และลดรูพรุนภายในเนื้อซีเมนต์ได้ดีกว่าซีเมนต์ที่ผสมเศษยางที่ไม่ได้แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และจากการทดสอบค่าความต้านทานการสึกกร่อนพบว่า เศษยางรถยนต์ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้วนั้นจะให้แรงยึดเกาะที่ดีกว่าเศษยางรถยนต์ที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว

นิสาชล ชินพันธ์ [18]: เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่เสริมแรง ซิลิกาจะได้รับการปรับสภาพผิวเพื่อให้เกิด co-polymer บนผิวของซิลิกา ในงานวิจัยนี้ซิลิกาได้รับการปรับสภาพผิวด้วยพอลิเมอร์ styrene-isoprene การเปรียบเทียบการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยซิลิกาที่ได้รับการปรับสภาพผิวชนิดต่างๆ โดยการทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางที่เสริมด้วยซิลิกา 5 ชนิดที่มีปริมาณของพอลิเมอร์ styrene-isoprene บนผิวของซิลิกาต่างกัน ปรากฏผลอย่างเด่นชัดว่า ปริมาณของพอลิเมอร์ที่ใช้ปรับสภาพผิวมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของยาง ซิลิกา

ที่ได้การปรับสภาพผิวโดยใช้จำนวนพอลิเมอร์ 20 กรัมต่อซิลิกา 1 กิโลกรัมจะให้ผลในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของยางเช่น สมบัติด้าน tensile, ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength), การกระดอน (resilience), การลดการอยู่ตัวเมื่อถูกอัด (compression set), ความต้านทานต่อการสึก (abrasion loss), และอัตราเร็วในการสุกของยาง (cure time) ได้ดีกว่าซิลิกาที่ได้รับการปรับสภาพผิวชนิดอื่นๆ จากนั้น ทำการศึกษาผลของปริมาณซิลิกาที่ได้รับการปรับสภาพผิวในยางต่อสมบัติทางกายภาพของยาง โดยทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางที่เสริมแรงด้วยซิลิกาที่มีจำนวนแตกต่างกัน เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาที่ได้รับการปรับสภาพผิวในยางสมบัติทางกายภาพของยางบางชนิด เช่น การกระดอนจะลดลงในขณะที่สมบัติทางด้านโมดูลัส, ความต้านทานต่อการฉีกขาด, ความแข็ง (hardness), และการลดการอยู่ตัวเมื่อถูกอัดจะเพิ่มขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์

1. แม่แบบสี่เหลี่ยมขนาด 45 x 10 x 5 เซนติเมตร
2. แบบหล่อสำหรับบดอัดขึ้นรูป (Compaction Mold) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10.16 เซนติเมตร และสูงประมาณ 7.5 เซนติเมตร
3. ค้อนบดอัด (Compaction Hammer) และ แท่นรองสำหรับบดอัด (Compaction pedestal)
4. เครื่องดันก้อนตัวอย่าง (Marshall Sample Ejector)
5. ชุดควนใบพัดเทปลอนปรับอัตราเร็วรอบได้
6. ตู้อบ

##### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำดิสเพอร์ชัน

1. หม้อบดสแตนเลสทรงกระบอก โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร
2. ลูกหินบดซึ่งทำมาจากกระเบื้อง มีขนาดที่แตกต่างกัน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 – 3 เซนติเมตร
3. รางสำหรับวางหม้อบดต่อกับมอเตอร์เพื่อช่วยให้รางหมุนเมื่อนำหม้อบดวางไว้ โดยมีความเร็วในการหมุน 53 รอบ/นาที

##### 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติต่างๆ

1. เครื่องมือทดสอบค่าความแข็ง (Hardness shore A)
2. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace)
3. เครื่องมือทดสอบของมาร์แชลล์ (Marshall testing machine) ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2

4. เครื่องวัดค่าความหนืด (Viscometer) บริษัท BRAIVE Instrument ดังรูปที่ 3.3
5. ชุดอุปกรณ์ทดสอบการโค้งงอ (Bending Test) ดังรูปที่ 3.4
6. เครื่องทดสอบการดึงยาง (Tensile Tester) รุ่น LR50K บริษัท LLOYD ดังรูปที่ 3.5



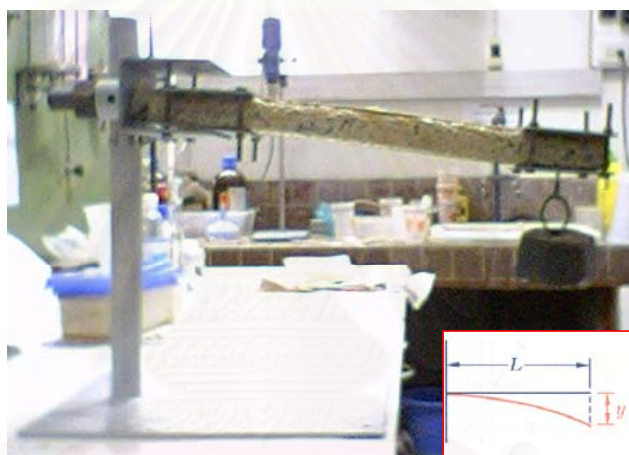
รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ทดสอบมาร์แชลล์



รูปที่ 3.2 เครื่องตอกอัด และเครื่องดันท่อนตัวอย่าง



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดค่าความหนืด



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการโค้งงอ



รูปที่ 3.5 เครื่อง Universal testing machine LLOYD LR 5K

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แสดงวัตถุดิบ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	คุณสมบัติ	หน้าที่	ที่มา
1. น้ำยารวมชาติเข้มข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ	มีเนื้อยางแห้ง 60 %	เป็นวัตถุดิบหลักในงานวิจัย	บริษัท ไทยรับเบอร์เอนด์ลาเท็กซ์จำกัด (องค์ประกอบแสดงใน ภาคผนวก ก)
2. น้ำยาปรับปรุงคุณภาพ (NRM)	มีเนื้อยางแห้ง 45 %	เป็นวัตถุดิบหลักในงานวิจัย	บริษัท คลีน แอนด์ ยูนิค อินเตอร์เนชันแนล จำกัด
3. ซัลเฟอร์	ผงสีเหลือง	สารวัลคาไนซ์	บริษัท เบน ไมเออร์ จำกัด
4. ซิงค์ไดออกไซด์ไดไทโอคาร์บาเมท (ZDEC)	ผงสีขาว	ตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไรไนซ์	บริษัท เบน ไมเออร์ จำกัด
5. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	ผงสีขาว	ตัวกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไรไนซ์	บริษัท เบน ไมเออร์ จำกัด
6. ซอฟเท็กซ์เอ	เกล็ดสีส้มอ่อน	ช่วยในการกระจายตัว	บริษัท กิมฮวด จำกัด
7. เบนโตไนต์	ผงสีน้ำตาลอ่อน	ช่วยในการกระจายตัว	บริษัท เบน ไมเออร์ จำกัด
8. กาวแก้ว	ความเข้มข้น 40% $\text{Na}_2\text{O}$ : $\text{Si}_2\text{O}$ , 1 : 3	ช่วยในการยึดเกาะกับหิน	บริษัท ไลออน จำกัด
9. TESPT (Bis- [3 – (triethoxysilyl) propyl] – tetrasulfide)	สีเหลืองเข้ม	เป็นสารประสานกู่ควบไซเลน	บริษัท เบน ไมเออร์ จำกัด

### 3.3 การดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 วิธีการเตรียมคิสเพอร์ชัน

สารเคมีที่สำหรับผสมกับน้ำยางนั้น เป็นสารเคมีที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ ซึ่งต้องใช้ในรูปแบบของสารคิสเพอร์ชัน ได้แก่ ซัลเฟอร์, ซิงค์ไดออกไซด์ ไทโอคาร์บาเมทและซิงค์ออกไซด์ โดยมีสูตรในการเตรียมสารเคมีดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สูตรการเตรียมคิสเพอร์ชัน

ชนิดของสาร	น้ำหนักแห้ง
สารเคมี (ingredient)	50
Bentonite clay	1
Softex A	1
น้ำ	48
รวม	100

ให้นำสารทั้งหมดมาบดขยี้ในหม้อบดเพื่อให้มีขนาดอนุภาคเล็กเพียงพอให้เกิดการวัลคาไนซ์ โดยในงานวิจัยนี้สารที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนซ์ ได้แก่ ซัลเฟอร์, ZDEC และ ZnO จะใช้ในอัตราส่วน 0.7 : 0.8 : 0.7 ตามลำดับ

#### 3.3.2 การผลิตวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติ

ศึกษาถึงส่วนผสมระหว่างน้ำยาง สารตัวเติมและอัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อหิน ที่สามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบได้ และทำการศึกษาถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ โดยจะทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1. ทำการเปลี่ยนค่าปริมาณของซัลเฟอร์ที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 phr โดยให้ปริมาณสารตัวเติมอื่นๆ คงที่ ซึ่งมีสัดส่วนดังนี้

กาวแก้ว	120 phr
ไซเลน	1 phr
อัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อหินที่	1:2.5

2. ทำการเปลี่ยนค่าปริมาณของไซเลนที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 phr โดยให้ปริมาณสารตัวเติมอื่นๆ คงที่ ซึ่งมีสัดส่วนดังนี้

กาวแก้ว	120 phr
ซัลเฟอร์	5 phr
อัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อหินที่	1:2.5

3. ทำการเปลี่ยนค่าปริมาณของกาวแก้วที่ 110, 120, 130, 140 และ 150 phr โดยให้ปริมาณสารตัวเติมอื่นๆ คงที่ ซึ่งมีสัดส่วนดังนี้

ซัลเฟอร์	5 phr
ไซเลน	1 phr
อัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อหินที่	1:2.5

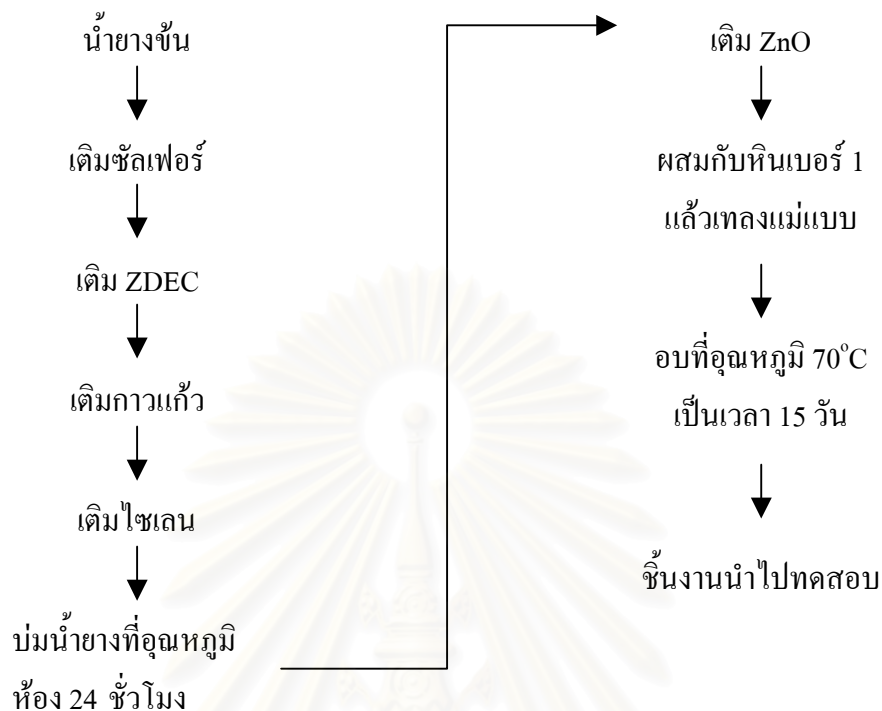
4. ทำการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อหินที่ 1:2, 1:2.5 และ 1:3 โดยใช้สารตัวเติมต่างๆ คงที่ ซึ่งมีสัดส่วนดังนี้

กาวแก้ว	120 phr
ซัลเฟอร์	5 phr
ไซเลน	1 phr

5. ทำการทดสอบค่า Modulus of Elasticity ของวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติโดยใช้การทดสอบแบบ Bending test

6. นำยางผสมสารตัวเติมต่างๆ ที่ใช้ทำวัสดุเชิงประกอบมาทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และค่าความแข็ง (Hardness)

### 3.3.3 ขั้นตอนการผลิตวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติ



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบแบบแผ่น (slab)

ขั้นตอนการเติมสารเคมีนั้น จะต้องทำการปั่นผสมสารเคมีให้เข้ากับน้ำยางเสียก่อน โดยปั่นไว้ 10 นาที แล้วจึงเติมสารเคมีตัวต่อไป และการบ่มน้ำยางทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงนั้น เพื่อให้ น้ำยางเกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงกับโมเลกุลของยางบ้างบางส่วน จากนั้นจึงนำไปคลุกกับหิน แล้วจึงเทลงแบบเพื่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 3.6

### 3.3.3 การศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงยึดเกาะระหว่างหินและยางธรรมชาติ

ทำการศึกษาดังตัวแปรที่มีผลต่อการยึดเกาะระหว่างหินและยางธรรมชาติ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ นั้นจะถูกนำไปทดสอบค่าเสถียรภาพ ทั้งนี้จะศึกษาจากน้ำยาง 2 ชนิดได้แก่ น้ำยางข้น 60 %DRC และ น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC ตัวแปร 2 ตัวคือ ปริมาณของกากแก้ว และปริมาณของไซเลน ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยสถิติ โดยจะทำการแบ่งค่าแต่ละตัวแปรเป็น 2 ระดับ ระดับของตัวแปรแสดงดังตารางที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาน้ำยางชั้น 60 %DRC

สัญลักษณ์	ตัวแปร	ต่ำ(-)	สูง(+)
A	ปริมาณกาบแก้ว (phr)	110	150
B	ปริมาณไซเลน (phr)	0	1

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC

สัญลักษณ์	ตัวแปร	ต่ำ(-)	สูง(+)
A	ปริมาณกาบแก้ว (phr)	0	150
B	ปริมาณไซเลน (phr)	0	1

ดังนั้นต้องทำการทดลอง  $2^2$  ภาวะ การทดลอง ณ. ที่นี้ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และใช้น้ำยาง 2 ชนิด คือน้ำยางชั้น 60 %DRC และน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC จึงรวมเป็น 24 การทดลอง โดยภาวะ การทดลองแสดงดังตารางที่ 3.5 และ 3.6

ตารางที่ 3.5 ภาวะ การทดลองของน้ำยางชั้น 60 %DRC

การทดลองที่	ปริมาณกาบแก้ว (phr)	ปริมาณไซเลน (phr)
1	110	0
2	150	0
3	110	2
4	150	2

ตารางที่ 3.6 ภาวะ การทดลองของน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC

การทดลองที่	ปริมาณกาบแก้ว (phr)	ปริมาณไซเลน (phr)
1	0	0
2	150	0
3	0	2
4	150	2



โดยจะใช้ค่าเสถียรภาพ (stability) จากการทดสอบของเครื่องมาร์แชลล์ (Marshall testing machine) เป็นค่าตอบสนองในการนำข้อมูลมาวิเคราะห์เชิงสถิติ เพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพ ซึ่งขั้นตอนการทดสอบมีดังต่อไปนี้

1. ทำการชั่งหินขนาดต่างๆตามสัดส่วนในภาคผนวกที่ ก
2. ผสมหินกับน้ำยางและสารเคมีตามภาวะ การทดลองที่กำหนดไว้ข้างต้น(โดยใช้น้ำยางผสมสารเคมีทั้งหมดรวมกันคิดเป็น 10% ของน้ำหนักหิน) แล้วคลุกผสมน้ำยางกับหินจนกระทั่งน้ำยางเคลือบผิวหินอย่างทั่วถึง
3. เตรียมแบบหล่อ และค้อนบดอัด แบบหล่อตัวอย่างทดสอบและผิวของค้อนบดอัดจะต้องสะอาด ให้วางแผ่นพลาสติก หรือกระดาษไขที่ตัดได้ขนาดลงที่ก้นแบบหล่อ
4. เทส่วนผสมทั้งหมดลงในแบบหล่อ ใช้พายหรือเกรียง ขูดแฉะส่วนผสมอย่างรวดเร็ว 15 ครั้ง รอบๆบริเวณขอบของแบบหล่อ และตรงกลางภายในอีก 10 ครั้ง
5. นำแบบหล่อไปวางลงบนแท่นรองการบดอัด ทำการบดอัดด้วยค้อนบดอัดที่มีน้ำหนัก 4,536 กรัม ระยะตกกระทบ 457.2 มิลลิเมตร ทำการบดอัดด้านละ 75 ครั้ง นำตัวอย่างที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน
6. ถอดตัวอย่างทดสอบออกจากแบบหล่ออย่างระมัดระวังโดยใช้เครื่องดันก้อนตัวอย่าง ปล่อยให้ตัวอย่างเย็นที่อุณหภูมิห้อง
7. นำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-40 นาที ก่อนนำตัวอย่างไปทดสอบ
8. ทำความสะอาดผิวด้านในของหัวทดสอบให้ทั่ว วางตัวอย่างทดสอบอันล่าง (Lower Testing Head) จากนั้น เลื่อนหัวทดสอบอันบนลงมาประกบกันให้สมบูรณ์เป็นชุดเครื่องมือที่ให้แรงกระทำ
9. ให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ โดยควบคุมอัตราการยุบตัวของตัวอย่างคงที่เท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) ต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างวิบัติที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะเป็นค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ ทำการจดบันทึกค่า

### 3.3.4 การหาค่าครึ่งชีวิต

ทำการทดลองโดยการนำสภาวะที่ให้ค่าเสถียรภาพที่ดีที่สุดจากข้อ 3.3.3 มาทำการหาค่าชีวิต โดยมีลำดับการทดลองดังนี้

1. หลังจากการเตรียมตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการอบตัวอย่างในช่วงเวลา และอุณหภูมิต่างๆดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงช่วงเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)
70	48
	96
	168
	336
150	6
	24
	72
	168
200	1
	6
	24
	72
300	0.25
	0.5
	1
	3

2. ทำการทดสอบค่าเสถียรภาพของตัวอย่าง จดบันทึกค่า

3. ทำการหาอัตราการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิต่างๆ นำมาเขียนกราฟตามวิธีของ

Arrhenius [22] เพื่อใช้คำนวณค่าครึ่งชีวิตต่อไป

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

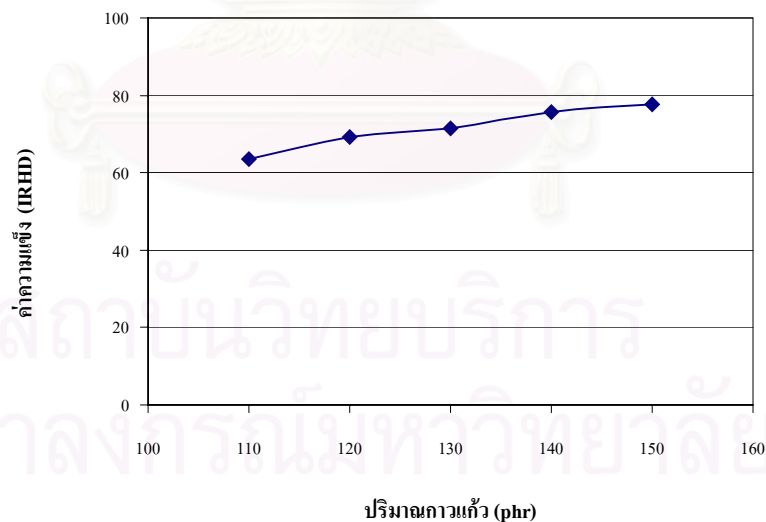
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงกรรมวิธีการผลิตวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติ โดยจะศึกษาถึงสมบัติ ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็ง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าเสถียรภาพ และการหาค่าครึ่งชีวิตของวัสดุเชิงประกอบ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ด้วยกัน คือ การผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อแบบ และการผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการตอกอัด โดยการผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อแบบได้ศึกษาถึงส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ และการผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการตอกอัดได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อแรงยึดเกาะระหว่างหินและยางธรรมชาติ

#### 4.1 ผลของการผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อแบบ

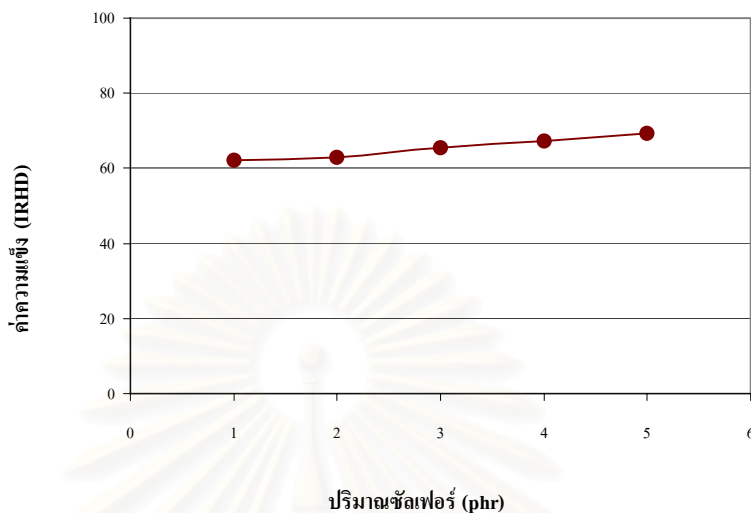
##### 4.1.1 ผลของค่าความแข็ง



รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งที่ปริมาณแก้วต่างๆ กันที่ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1 phr

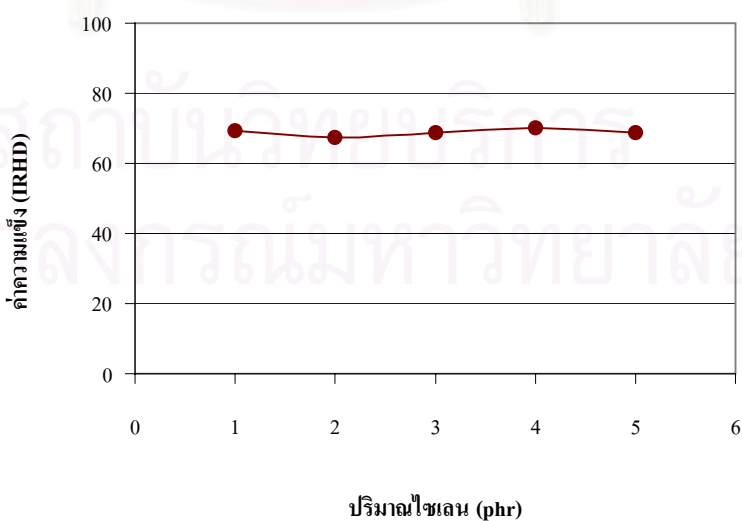
จากรูปที่ 4.1 พบว่าปริมาณของแก้วเพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งจะสูงขึ้น โดยที่ปริมาณแก้ว 150 phr ค่าความแข็งจะมากที่สุด ซึ่งมีค่าสูงถึง 78 IRHD ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจาก

กาวแก้ว จะให้อนุภาคซิลิเกต ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่ช่วยในการเสริมแรง ส่งผลให้ค่าความแข็งมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งที่ปริมาณซิลเฟอร์ต่างๆ กัน ที่ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณไซเลน 1 phr

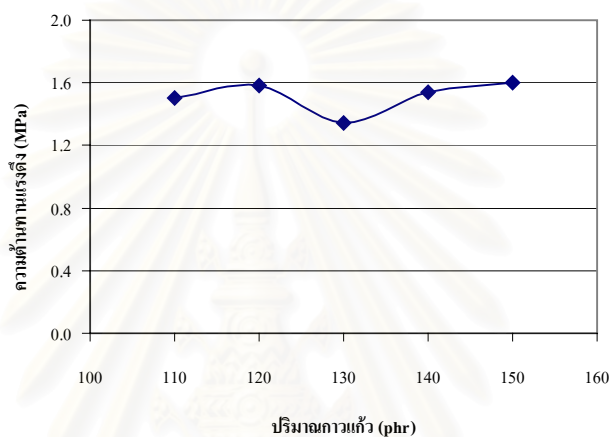
จากรูปที่ 4.2 พบว่าปริมาณของซิลเฟอร์เพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งจะสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยที่ปริมาณซิลเฟอร์ 5 phr ค่าความแข็งจะมากที่สุด ซึ่งมีค่าสูงถึง 69 IRHD ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากซิลเฟอร์เป็นสารที่ใช้ในเชื่อมโยง ดังนั้นจึงไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างเด่นชัด จึงทำให้ค่าความแข็งเมื่อปริมาณของซิลเฟอร์เพิ่มมากขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.3 ค่าความแข็งที่ปริมาณไซเลนต่างๆ กัน ที่ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณซิลเฟอร์ 5 phr

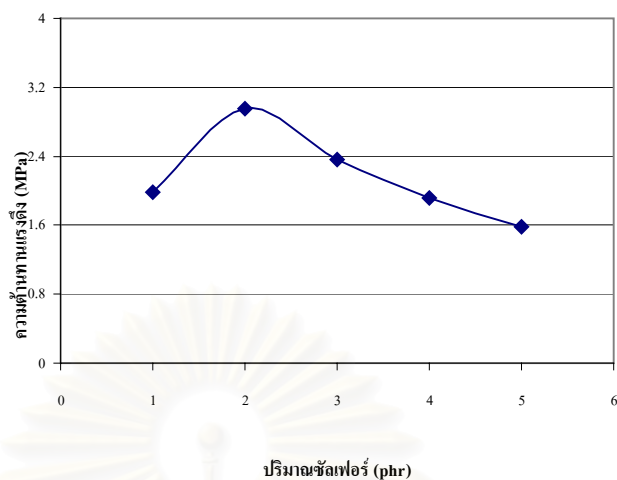
จากรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณของไซเลนเพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งมีค่าคงที่ โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 69 IRHD เนื่องจากไซเลนเป็นสารประสานคู่ควบ ที่ทำหน้าที่ในการช่วยให้ อนุภาคซิลิเกตสามารถจับกับอนุภาคของยางได้ดียิ่งขึ้น แต่เนื่องจากปริมาณอนุภาคซิลิเกตคงที่ ดังนั้นปริมาณไซเลนจึงไม่ส่งผลต่อค่าความแข็ง จึงทำให้ค่าความแข็งเมื่อปริมาณของไซเลนเพิ่มมากขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกัน

#### 4.1.2 ผลของความต้านทานแรงดึง



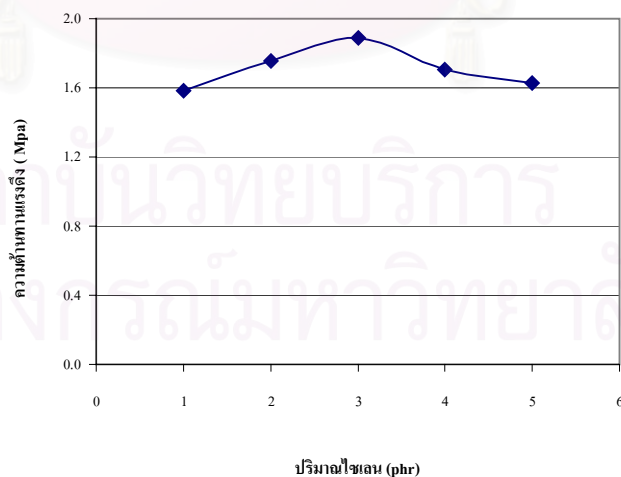
รูปที่ 4.4 ความต้านทานแรงดึงที่ปริมาณกาวแก้ว ต่างๆ กันที่ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1 phr

จากรูปที่ 4.4 พบว่าปริมาณของกาวแก้วเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มคงที่ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.35 – 1.58 MPa เนื่องจากกาวแก้วไม่ได้สร้างพันธะกับ โมเลกุลของยาง จึงไม่ได้มีส่วนในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึง ดังนั้นจึงไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง จึงทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเมื่อปริมาณของกาวแก้วเพิ่มมากขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างเด่นชัด



รูปที่ 4.5 ความต้านทานแรงดึงที่ปริมาณซัลเฟอร์ต่างๆ กันที่ปริมาณกากแก้ว 120 phr และปริมาณไซเลน 1 phr

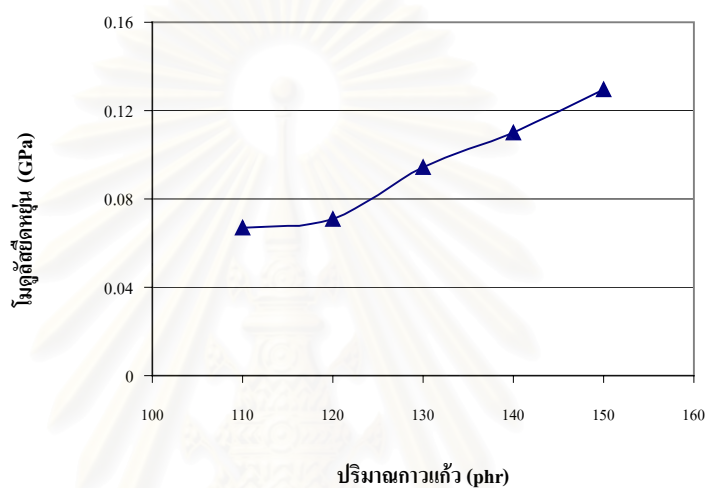
จากรูปที่ 4.5 พบว่าปริมาณของซัลเฟอร์ที่ 2 phr ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.96 MPa หลังจากนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์มากขึ้น พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มีค่าลดลงเนื่องจากเมื่อปริมาณซัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้น โมเลกุลของซัลเฟอร์จะเกาะกันเองเป็นสายโซ่ยาวทำให้ขาดความแข็งแรงจึงเป็นสาเหตุให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง



รูปที่ 4.6 ความต้านทานแรงดึงที่ปริมาณไซเลนต่างๆ กันที่ปริมาณกากแก้ว 120 phr และปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr

จากรูปที่ 4.6 พบว่าปริมาณของไซเลนเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มคงที่ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.58 – 1.89 MPa เนื่องจากไซเลนเป็นสารประสานคู่ควบไม่ได้สร้างพันธะกับโมเลกุลของยาง จึงไม่ได้มีส่วนในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึง ดังนั้นจึงไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง จึงทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเมื่อปริมาณของไซเลนเพิ่มมากขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างเด่นชัด

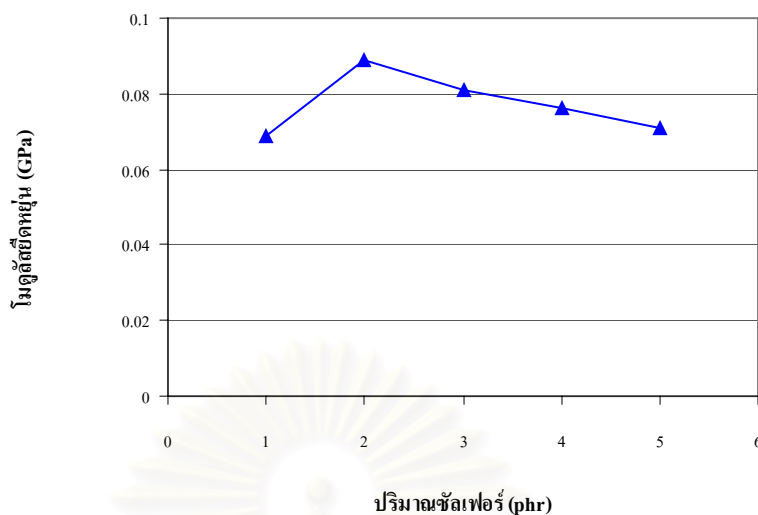
#### 4.1.3 ผลของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น



รูปที่ 4.7 โมดูลัสยืดหยุ่นที่ปริมาณกาวแก้ว ต่างๆ กันที่ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1 phr

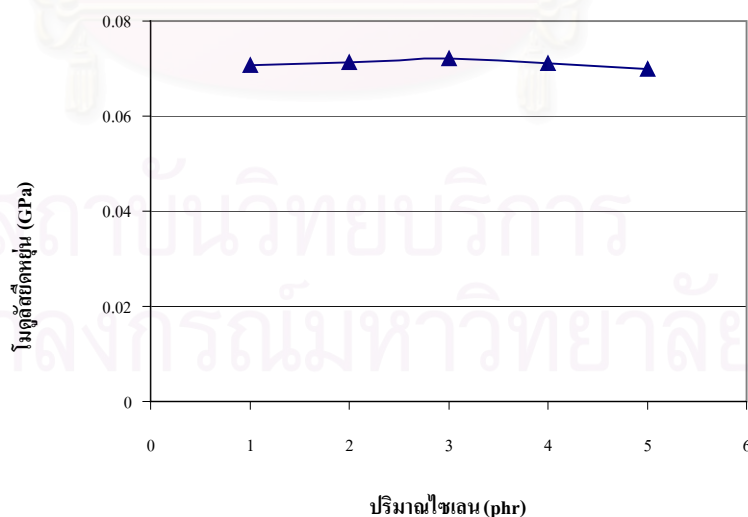
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณกาวแก้วเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกาวแก้วนั้นเป็นสารเสริมความแข็งแรง และช่วยในการยึดเกาะระหว่างหินและยางธรรมชาติ เมื่อปริมาณกาวแก้วเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลในด้านเสริมความแข็งแรงและช่วยให้สามารถยึดเกาะได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 โมดูลัสยึดหยุ่นที่ปริมาณซัลเฟอร์ต่างๆ กันที่ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณไซเลน 1 phr

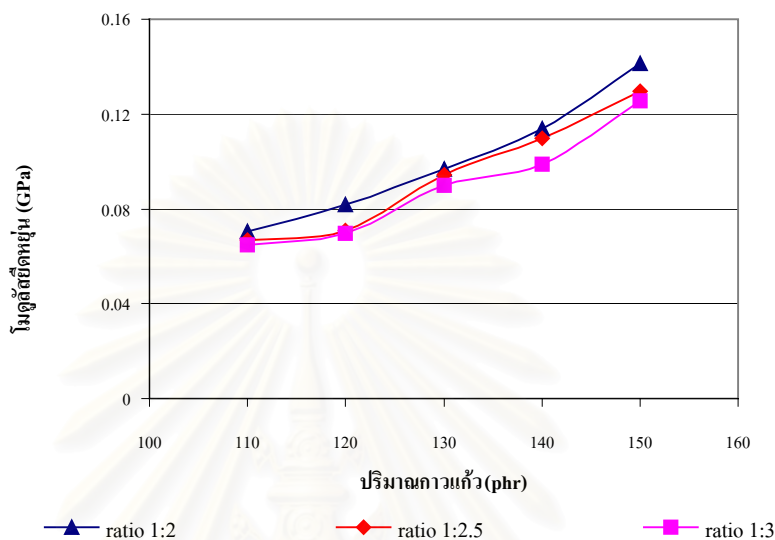
จากรูปที่ 4.8 พบว่าปริมาณของซัลเฟอร์ที่ 2 phr โมดูลัสยึดหยุ่นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.089 GPa หลังจากนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์มากขึ้น พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มีค่าลดลงเนื่องมาจากเมื่อปริมาณซัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้น โมเลกุลของซัลเฟอร์จะเกาะกันเองเป็นสายโซ่ยาวไม่สร้างการเชื่อมโยงกับพันธะคู่ของโมเลกุลของยางทำให้ขาดความแข็งแรงจึงเป็นสาเหตุให้โมดูลัสยึดหยุ่นมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าความต้านทานแรงดึง (รูปที่ 4.5)



รูปที่ 4.9 โมดูลัสยึดหยุ่น ที่ปริมาณไซเลนต่างๆ กันที่ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr



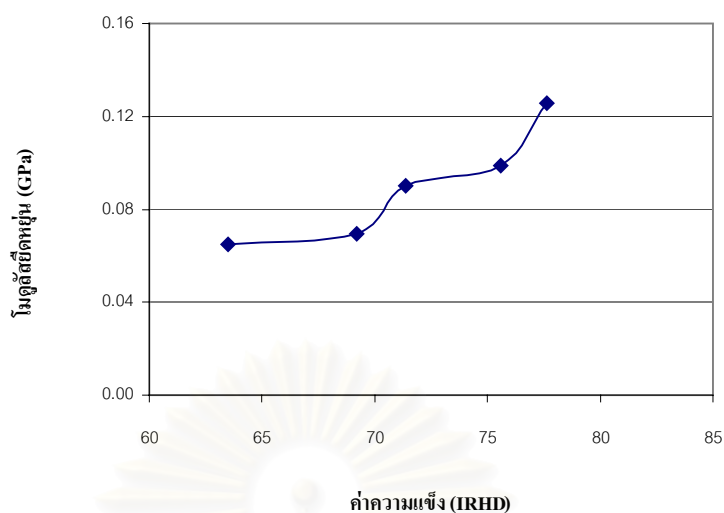
จากรูปที่ 4.9 พบว่าปริมาณของไซเลนเพิ่มมากขึ้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากไซเลนไม่เกิดการสร้างพันธะกับอนุภาคของซิลิเกต และโมเลกุลของยางดังนั้นจึงไม่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น จึงทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเมื่อปริมาณของไซเลนเพิ่มมากขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างเด่นชัด



รูปที่ 4.10 โมดูลัสยืดหยุ่น ที่สัดส่วนระหว่างน้ำยางต่อหินต่างๆ กัน ที่ปริมาณกาวยาง 120 phr ปริมาณซิลเฟออร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1phr

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อหินเท่ากับ 1 ต่อ 2 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุด เนื่องจากที่ภาวะนี้ วัสดุเชิงประกอบมีส่วนผสมที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน(ยาง) เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อหินน้อยลง

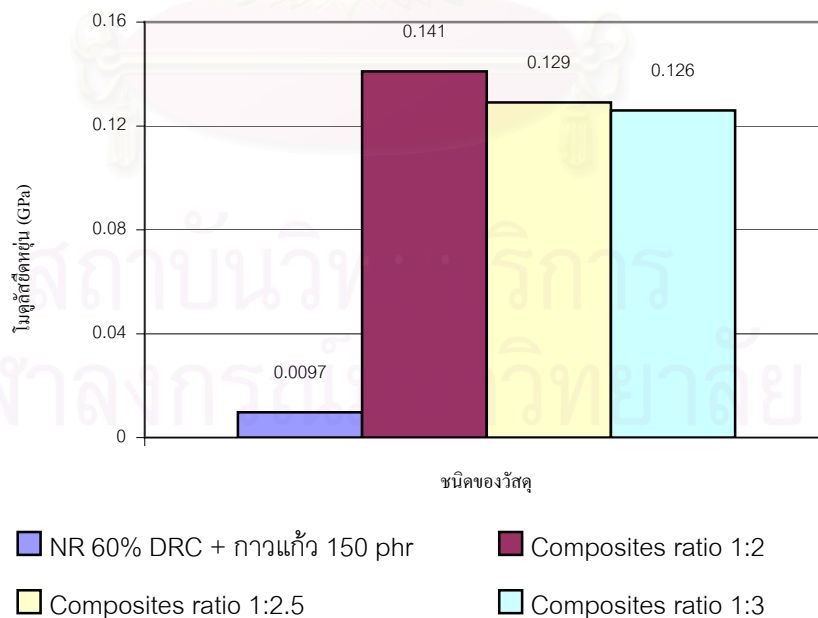
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 โมดูลัสยืดหยุ่นที่ค่าความแข็งต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อวัสดุเชิงประกอบมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจะสามารถทนแรงที่กดลงมาได้มากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้นด้วย

#### 4.1.4 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเชิงประกอบกับยางวัลคาไนซ์

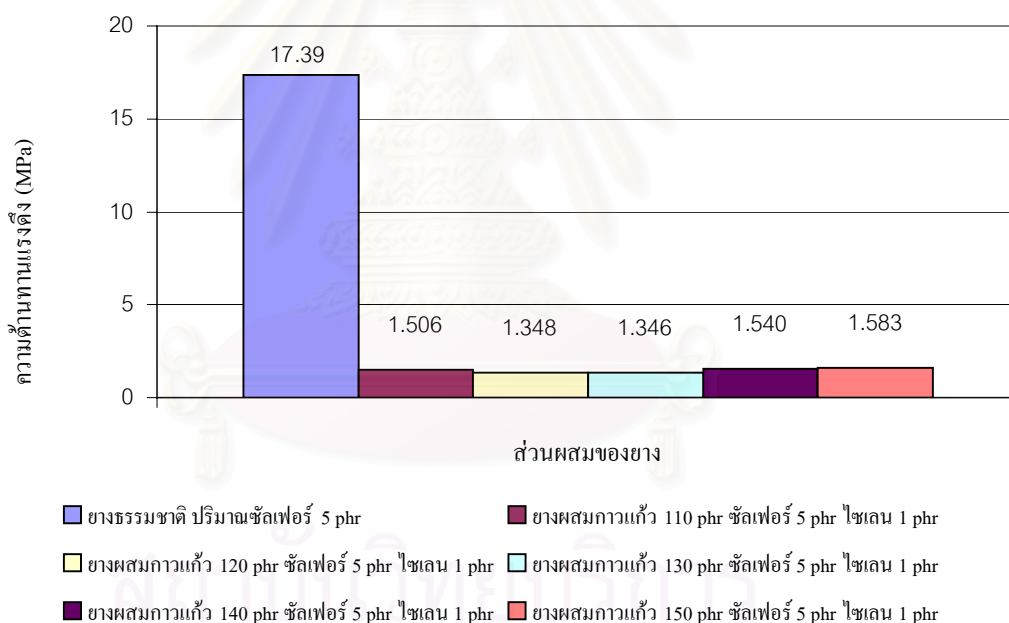


รูปที่ 4.12 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างยางวัลคาไนซ์กับวัสดุเชิงประกอบ

โดยที่ - NR 60 %DRC + กาวแก้ว 150 phr คือ ยางธรรมชาติ 60 %DRC ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และ ปริมาณกาวแก้ว 150 phr ปริมาณไซเลน 1 phr

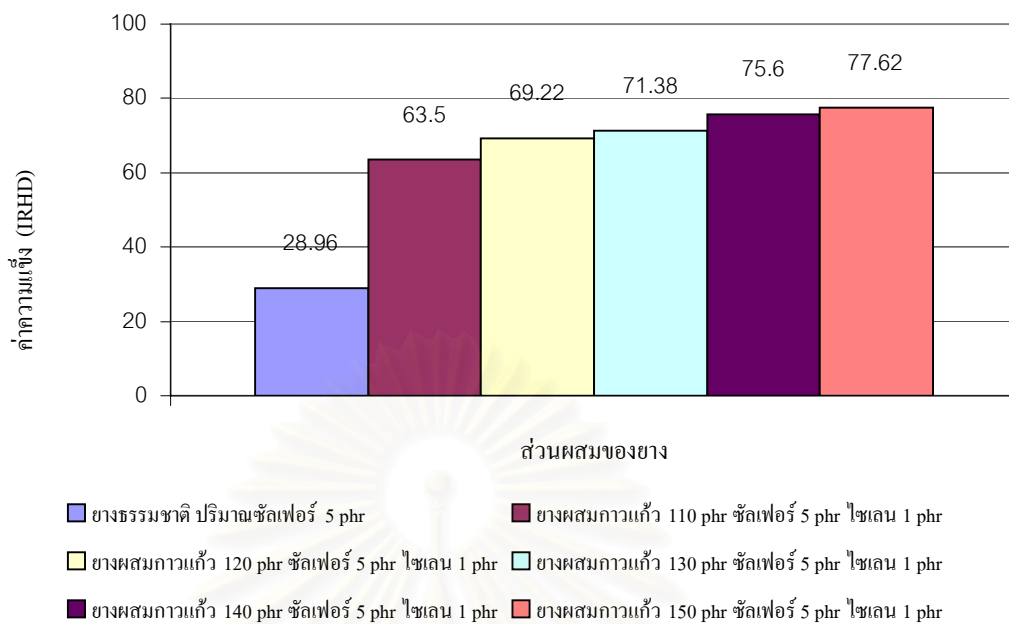
- Composites ratio 1:2 คือ วัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติที่อัตราส่วนระหว่างยางต่อหิน 1:2
- Composites ratio 1:2.5 คือ วัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติที่อัตราส่วนระหว่างยางต่อหิน 1:2.5
- Composites ratio 1:3 คือ วัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติที่อัตราส่วนระหว่างยางต่อหิน 1:3

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของยางวัลคาไนซ์นั้นมีค่าต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบ เพราะหินในวัสดุเชิงประกอบจะเกิดการขัดกันเองในขณะที่วัสดุเชิงประกอบเอนตัวลงมาในขณะที่มีน้ำหนักรีด ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่ายางวัลคาไนซ์



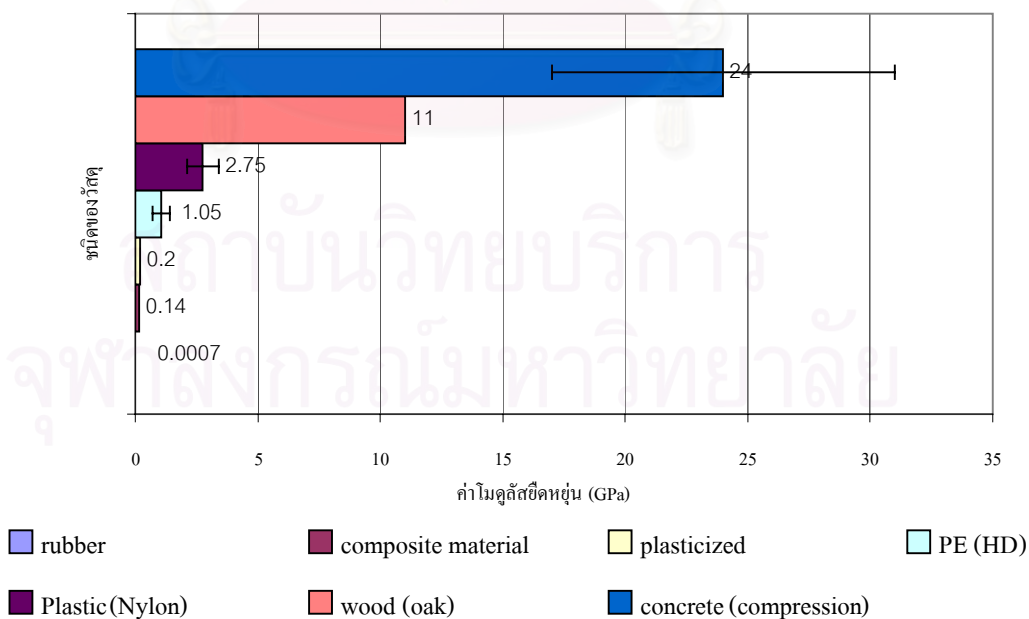
รูปที่ 4.13 ค่าความต้านทานแรงดึงระหว่างยางวัลคาไนซ์กับยางผสมกาวแก้ว

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่ายางวัลคาไนซ์มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่ายางที่ผสมกาวแก้ว เนื่องจากอนุภาคซิลิกาเกิดไปขัดขวางการเชื่อมโยงของซัลเฟอร์กับโมเลกุลยาง จึงเป็นเหตุให้ค่าความต้านทานแรงดึงของยางที่ผสมกาวแก้วมีค่าต่ำกว่ายางวัลคาไนซ์ที่ไม่ผสมกาวแก้ว



รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งระหว่างยางวัลคาไนซ์กับยางผสมกากแก้ว

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่ายางวัลคาไนซ์มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่ายางที่ผสมกากแก้วเนื่องจากกากแก้วเป็นสารตัวเติมที่ช่วยในการเสริมแรงส่งผลให้ค่าความแข็งมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นค่าความแข็งของยางที่ผสมกากแก้วมีค่าสูงกว่ายางวัลคาไนซ์ที่ไม่ผสมกากแก้ว



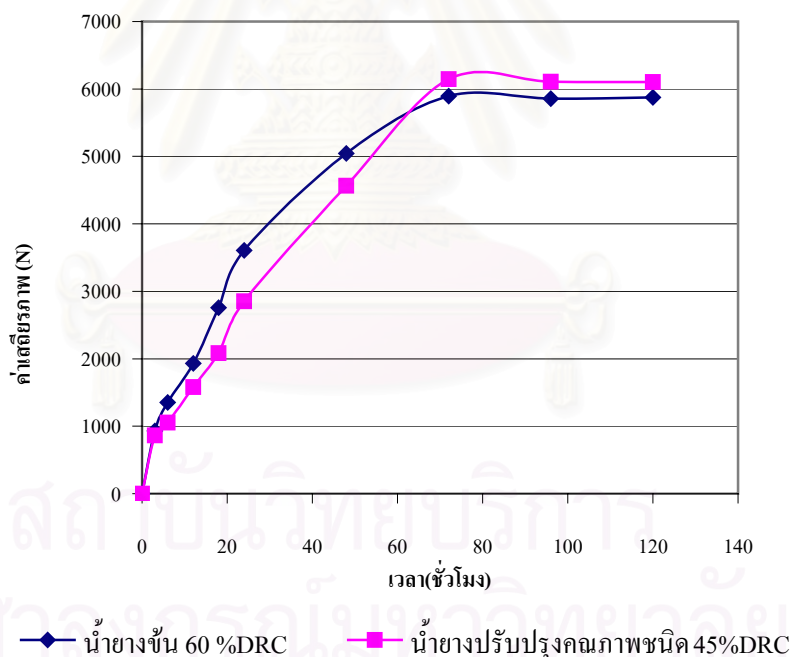
รูปที่ 4.15 แสดงถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุชนิดต่างๆ

โดยที่ composite material คือ วัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติในงานวิจัย จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบมีค่าเท่ากับ 0.14 GPa แต่ยังมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ

## 4.2 ผลของการผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการตอกอัด

### 4.2.1 เวลาในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ

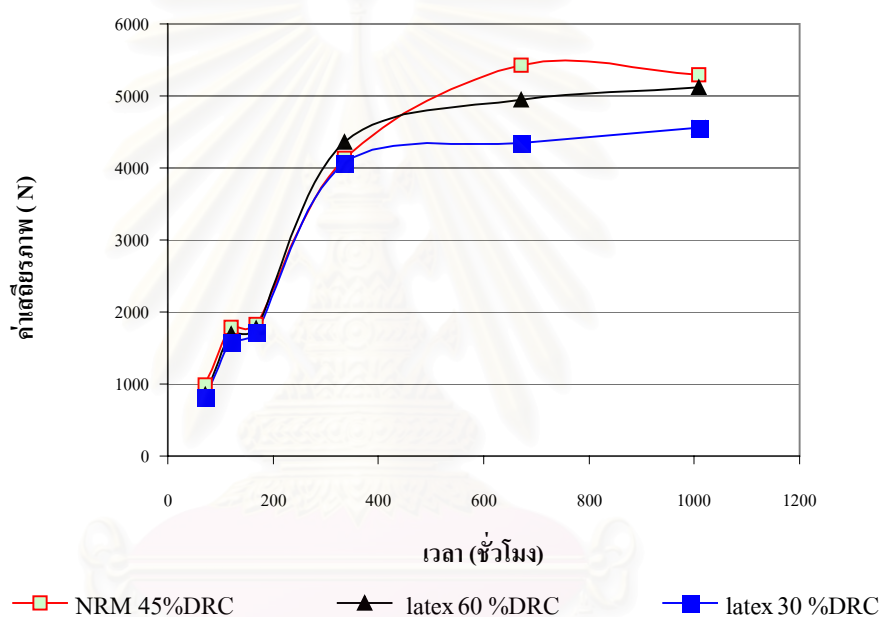
เนื่องจากการผลิตวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางนั้น เวลาในการทำให้ตัวอย่างแห้งเป็นสิ่งสำคัญ จึงได้ทำการศึกษาเวลาในการทำให้ตัวอย่างแห้งเพื่อหาค่าเวลายมาตรฐานในการอบตัวอย่างให้แห้ง โดยทำการอบตัวอย่างหลังจากการตอกอัดที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  ที่เวลาต่างๆ หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาทำการทดสอบค่าเสถียรภาพ เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพกับเวลาที่ใช้ในการอบตัวอย่าง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ผสมกาวแก้ว 150 phr และปริมาณซิลเฟอร์ 5 phr กับเวลาที่ใช้ในการอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$

เมื่อพิจารณาผลของค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบกับเวลาที่ใช้ในการอบตัวอย่าง พบว่าเมื่อใช้เวลาในการอบตัวอย่างเพิ่มขึ้น ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ทดสอบได้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำที่อยู่ในตัวอย่งนั้นได้ระเหยออก จึงทำให้เกิดการสร้างแรงยึดเกาะระหว่างยางและ

หินได้ดีขึ้น จนค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบเข้าสู่ภาวะคงตัวที่เวลาที่ใช้ในการอบตัวอย่างที่ 72 ชั่วโมงเนื่องจากน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างนั้นได้ระเหยออกจากตัวอย่างหมดแล้ว จึงทำให้ได้ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบคงที่ ดังรูปที่ 4.13 และจากกราฟจะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ในการอบตัวอย่างจนได้ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบคงที่ของน้ำยางทั้งสองชนิด มีค่าไม่แตกต่างกันจากนั้นได้ทำการศึกษาค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบเมื่อถูกตั้งทิ้งไว้ในสภาพแวดล้อม โดยนำไปตั้งทิ้งไว้ในสภาพแวดล้อมทันทีหลังจากการตอกอัด เพื่อหาค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ได้นั้นมีค่าแตกต่างจากวัสดุเชิงประกอบที่ถูกทำให้เกิดแรงยึดเกาะโดยการอบที่  $70^{\circ}\text{C}$  หรือไม่ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ผสมกาวแก้ว 150 phr และปริมาณซิลเฟอร์ 5 phr กับเวลาที่ทิ้งไว้ในสภาพแวดล้อม

เมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ตั้งทิ้งไว้ในสภาพแวดล้อมจะเห็นได้ว่า ในช่วงเวลาสัปดาห์แรกค่าเสถียรภาพที่ได้มีค่าต่ำกว่าการนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  มาก ในช่วงสัปดาห์ที่ 2 – 6 นั้นค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบมีค่าสูงขึ้นแต่ยังมีค่าต่ำกว่าการนำตัวอย่างไปอบที่  $70^{\circ}\text{C}$  เพียงเล็กน้อย เนื่องจากไม่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้นในอากาศ, อุณหภูมิ และยางไม่สามารถที่จะเกิดการวัลคาไนซ์อย่างสมบูรณ์ได้ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าเสถียรภาพที่ได้มีค่าต่ำกว่าการนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$

#### 4.2.2 การออกแบบการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบ

ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย คือ ปริมาณของกาวแก้วและปริมาณของไซเลน โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม และผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติ โดยทำการออกแบบการทดลอง (Experimental Design) โดยเลือกตัวแปรที่นำมาทำการออกแบบการทดลอง 2 ตัวแปรด้วยกันคือ ปริมาณของกาวแก้ว และปริมาณของไซเลน เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติ ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบการทดลองเป็นการทดลองแบบแฟกทอเรียล เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมของการทดลอง ปริมาณของกาวแก้ว และปริมาณของไซเลน ให้ได้ค่าเสถียรภาพสูงที่สุด และนำค่าที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษา และพัฒนาส่วนผสมในการผลิตและกระบวนการผลิตต่อไป

โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเป็นการออกแบบการทดลองที่ต้องการศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าการตอบสนองของข้อมูล ซึ่งในการทดลองนี้ค่าการตอบสนองของข้อมูล คือ ค่าเสถียรภาพ ซึ่งในการทดลองใช้น้ำยาง 2 ชนิด ได้แก่ น้ำยางชั้น 60 %DRC และ น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC โดยกำหนดค่าตัวแปรดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของน้ำยางชั้น 60 %DRC

สัญลักษณ์	ตัวแปร	ต่ำ(-)	สูง(+)
A	ปริมาณกาวแก้ว (phr)	110	150
B	ปริมาณไซเลน(phr)	0	1

ตารางที่ 4.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC

สัญลักษณ์	ตัวแปร	ต่ำ(-)	สูง(+)
A	ปริมาณกาวแก้ว (phr)	0	150
B	ปริมาณไซเลน(phr)	0	1

ดังนั้นต้องทำการทดลอง  $2^2$  แฟกทอเรียล ภาวะ การทดลอง ณ. ที่นี้ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และใช้น้ำยาง 2 ชนิด คือน้ำยางชั้น 60 %DRC และน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC จึงรวมเป็น 24 การทดลอง นอกจากนี้ได้ทำการทดลองที่ค่ากลาง (0) ของตัวแปร (A = 130 phr, B = 1

phr สำหรับน้ำยางชั้น 60 %DRC และ A = 75 phr, B = 1 phr สำหรับน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC) เพื่อยืนยันสมมติฐานที่กำหนดว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรกับผลการทดลองในช่วงที่กำหนดว่าเป็นเส้นตรงในช่วงระดับต่ำสุดถึงสูงสุดหรือไม่ จึงต้องทำการทดลองทั้งหมด 30 การทดลอง

#### 4.2.2.1 ตัวแปรที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC

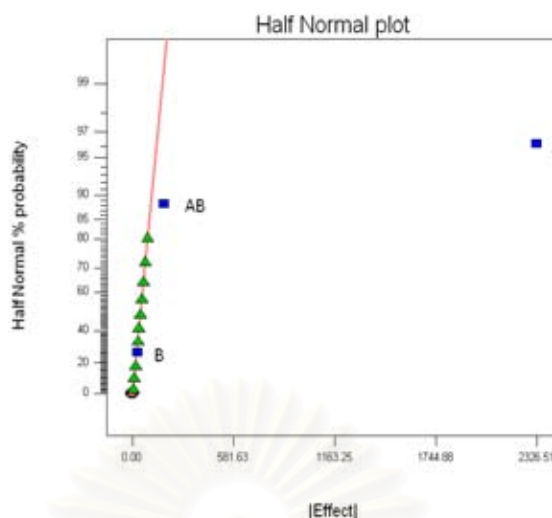
ทำการทดสอบค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC ตามการทดลองที่ได้วางรูปแบบไว้ คือ  $2^2$  แฟกทอเรียล และทำการทดสอบที่ค่ากลาง โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC

ลำดับที่	การทดลอง	A	B	ค่าเสถียรภาพ (N)
1	[1]	-1	-1	3779
				3674
				3660
2	a	1	-1	5899
				5736
				5912
3	b	-1	1	3501
				3482
				3495
4	ab	1	1	5851
				5901
				6252
5	ค่ากลาง	0	0	4690
				4673
				4805

ทำการวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC ด้วยการสร้างกราฟ Normal Probability ดังรูปที่ 4.18





รูปที่ 4.18 กราฟ normal probability plot กับค่า effect estimate

เมื่อพิจารณา Normal Probability Plot ของตัวแปรที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC (รูปที่ 4.18) พบว่าตัวแปรหลักที่คาดว่ามีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC คือ ปริมาณของกาวแก้วและอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของกาวแก้วกับปริมาณไซเลน เนื่องจากค่า Effect Estimate ของตัวแปรได้เบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรง จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรที่เป็นอิทธิพลหลักด้วยค่า F-Test ได้ดังแสดงดังตารางที่ 4.4 ในการทดสอบสมมติฐาน โดยค่า F-Test จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์โดยจะใช้ค่า F วิฤตเป็นตัวเปรียบเทียบกับค่า  $F_0$  ของตัวแปรต่างๆ ถ้าค่า  $F_0$  ของตัวแปรต่าง ๆ นั้นมีค่ามากกว่าค่า F วิฤต ก็จะถือว่าตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อค่าตอบสนอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรสำหรับค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC (ANOVA Table)

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F <sub>0</sub>
A	16,237,903	1	16,237,903	1,213.61
B	2,627	1	2,627	0.20
AB	99,168	1	99,168	7.41
Quadratic	3,628	1	3,628	0.27
Error	133,799	10	13,380	
Total	16,477,125	14		

ค่า F วิกฤตที่  $F_{0.05,1,10}$  มีค่าเท่ากับ 4.96 จากความแปรปรวนของตัวแปรจะเห็นได้ว่าค่า F<sub>0</sub> ของปริมาณกาวแก้ว (A) มีค่าเท่ากับ 1,213.61 และค่า F<sub>0</sub> ของจากอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของกาวแก้วกับปริมาณของไซเลน (AB) มีค่าเท่ากับ 7.41 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า F วิกฤตผล จึงกล่าวได้ว่าปริมาณกาวแก้ว และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของกาวแก้วกับปริมาณของไซเลนเป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC ที่ภาวะกึ่งกลาง ได้ค่า F<sub>0</sub> ของ Pure Quadratic เท่ากับ 0.27 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า F วิกฤตจึงกล่าวได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC เป็นเส้นตรง

4.2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The Regression Model) ของค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC

จากข้อสรุปเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC จึงสามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The Regression Model) โดยนำมาจัดในเทอมของสมการเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y_{\text{Est}} = \beta_0 + \beta_A A + \beta_{AB} AB \quad (4.1)$$

ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4.2

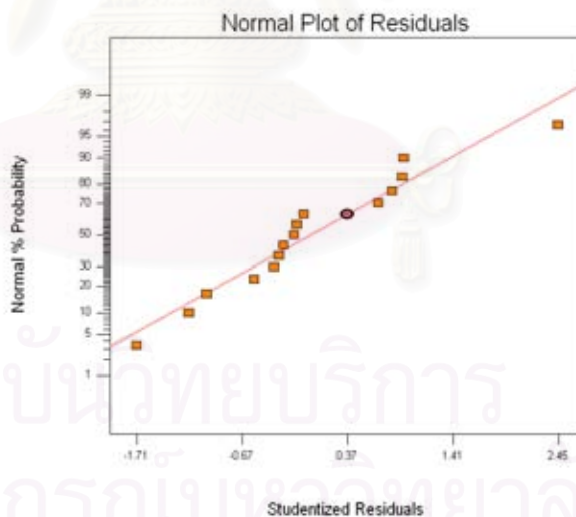
$$y_{\text{Est}} = 4761.76 + 1163.25A + 90.91AB \quad (4.2)$$

โดย  $y_{\text{Est}}$  คือ ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยารุ่น 60 %DRC

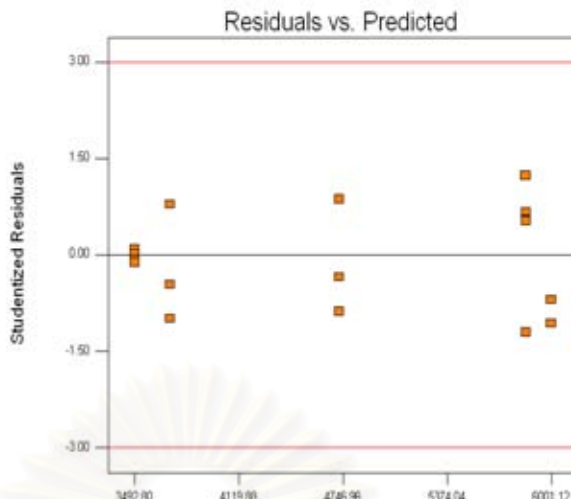
$\beta_0$  คือ ค่าของผลตอบสนองเนื่องจากตัวแปรที่ไม่ได้ทำการทดลองซึ่งสามารถคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของข้อมูลทั้งหมด

$\beta_1$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีผลในการทดลองซึ่งคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของตัวแปรนั้น ๆ

จากสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้นำไปเขียนกราฟศึกษาการกระจายตัว และค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน ดังแสดงในรูป 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ โดยจากรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นถึงการแจกแจงมีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อย และไม่ได้แสดงความไม่เป็นปกติแต่อย่างใดจึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวแบบอิสระ ความแปรปรวนมีค่าคงที่ และค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแปรปรวนเป็นศูนย์



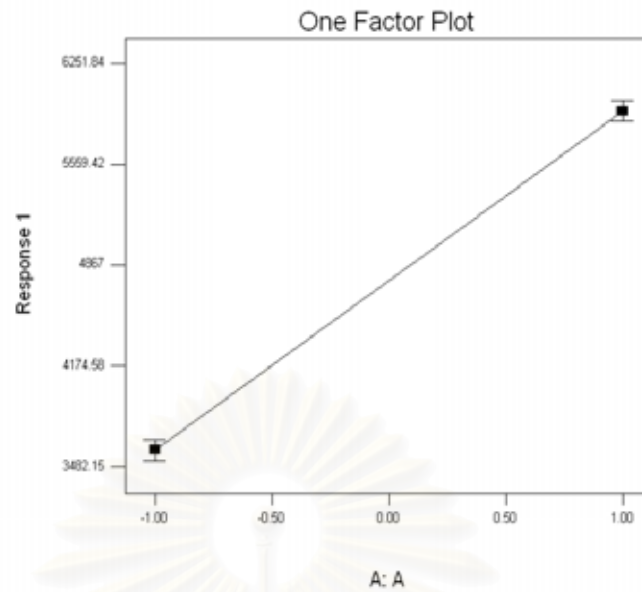
รูปที่ 4.19 Normal Probability Plot ของค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยารุ่น 60 %DRC



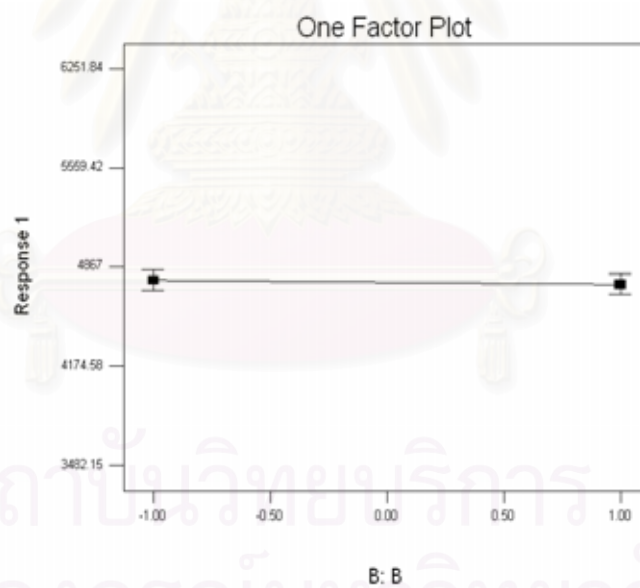
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลตอบสนองที่มาจากกรคำนวณทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

ซึ่งการกระจายตัวในรูปที่ 4.20 ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนดังนั้นแสดงว่าความแปรปรวนของข้อมูลเป็นแบบสุ่ม และมีการกระจายตัวแบบปกติ สรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สมมติขึ้นสามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง กล่าวคือ ในการทดลองจริงตัวแปรที่มีบทบาททำให้ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน คือ ปริมาณกาวแก้ว (A) และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของกาวแก้วกับปริมาณของไซเลน (AB) จากสมการที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่า เมื่อต้องการเพิ่มค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC ควรเพิ่มปริมาณกาวแก้ว และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของกาวแก้ว กับปริมาณของไซเลน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.21 และ 4.22 ซึ่งเป็นกราฟปัจจัยในระดับสูงต่ำที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพจะพบว่าเมื่อปริมาณของกาวแก้ว เพิ่มขึ้นค่าเสถียรภาพจะเพิ่มขึ้นโดยพิจารณาจากความชันของกราฟในรูป 4.21 พบว่าความชันของกราฟนั้นมีค่าบวก และ ปริมาณของไซเลนเพิ่มขึ้นค่าเสถียรภาพจะมีค่าคงที่โดยพิจารณาจากกราฟในรูป 4.22 จะได้ความชันของกราฟเป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของปริมาณกาวแก้วที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของปริมาณไซเลนที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบ

ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับสมการถดถอย(สมการที่ 4.2) ที่ได้สร้างขึ้นจะให้ผลที่สอดคล้องกันโดย  $\beta_A$  มีค่าเท่ากับ 4761.76 และ  $\beta_B$  นั้นไม่ได้มีอยู่ในสมการถดถอย ซึ่งแสดงถึงว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกาวแก้ว ค่าเสถียรภาพจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณไซเลนจะไม่มีผลต่อค่าเสถียรภาพ

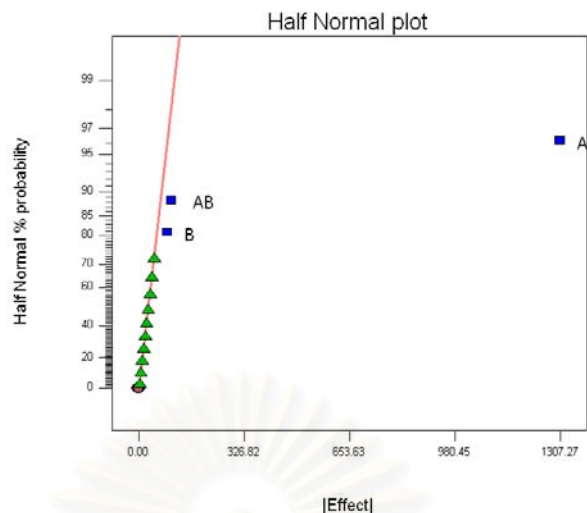
4.2.2.3 ตัวแปรที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC

ทำการทดสอบค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC ตามการทดลองที่ได้วางรูปแบบไว้ คือ  $2^2$  แฟกทอเรียล และทำการทดสอบที่ค่ากลาง โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC

ลำดับที่	การทดลอง	A	B	ค่าเสถียรภาพ (N)
1	[1]	-1	-1	4881
				4793
				4861
2	a	1	-1	6315
				6288
				6159
3	b	-1	1	4963
				5083
				5058
4	ab	1	1	6330
				6193
				6198
5	ค่ากลาง	0	0	5412
				5591
				5541

ทำการวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC ด้วยการสร้างกราฟ Normal Probability ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 กราฟ normal probability plot กับค่า effect estimate

เมื่อพิจารณา Normal Probability Plot ของตัวแปรที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC (รูปที่ 4.23) พบว่าตัวแปรหลักที่คาดว่ามีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC คือ ปริมาณของกาวแก้วและอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของกาวแก้ว กับปริมาณไซเลน เนื่องจากค่า Effect Estimate ของตัวแปรได้เบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรง จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรที่เป็นอิทธิพลหลักด้วยค่า F-Test ได้ดังแสดงดังตารางที่ 4.6 ในการทดสอบสมมติฐานโดยค่า F-Test จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์โดยจะใช้ค่า F วิกฤตเป็นตัวเปรียบเทียบกับค่า  $F_0$  ของตัวแปรต่างๆ ถ้าค่า  $F_0$  ของตัวแปรต่าง ๆ นั้นมีค่ามากกว่าค่า F วิกฤต ก็ถือว่าตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อค่าตอบสนอง

ตารางที่ 4.6 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรสำหรับค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC (ANOVA Table)

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F <sub>0</sub>
A	5,126,830	1	5,126,830	929.14
B	23,181	1	23,182	4.20
AB	30,716	1	30,716	5.57
Quadratic	14,850	1	14,850	2.69
Error	55,178	10	5,518	
Total	5,250,756	14		

ค่า F วิกฤตที่  $F_{0.05,1,10}$  มีค่าเท่ากับ 4.96 จากความแปรปรวนของตัวแปรจะเห็นได้ว่าค่า F<sub>0</sub> ของปริมาณกาวแก้ว (A) มีค่าเท่ากับ 929.14 และค่า F<sub>0</sub> ของจากอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของกาวแก้ว กับปริมาณของไซเลน (AB) มีค่าเท่ากับ 5.57 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า F วิกฤตผล จึงกล่าวได้ว่าปริมาณกาวแก้ว และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของกาวแก้วกับปริมาณของไซเลนเป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC ที่ภาวะกึ่งกลาง ได้ค่า F<sub>0</sub> ของ Pure Quadratic เท่ากับ 2.69 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า F วิกฤตจึงกล่าวได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC เป็นเส้นตรง

4.2.2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The Regression Model) ของค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC

จากข้อสรุปเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC จึงสามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The Regression Model) โดยนำมาจัดในเทอมของสมการเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y_{\text{Est}} = \beta_0 + \beta_A A + \beta_{AB} AB \quad (4.3)$$



ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4.4

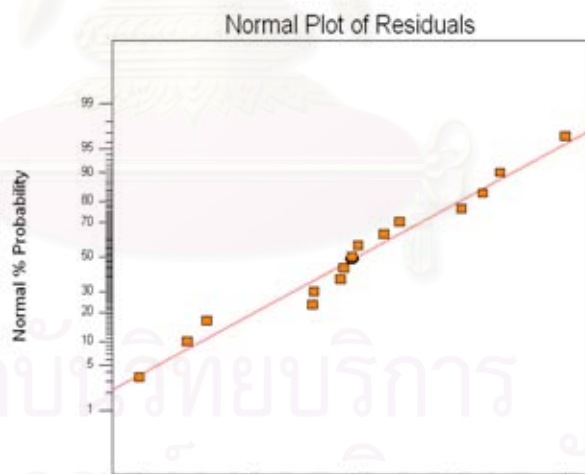
$$y_{\text{Est}} = 5593.62 + 653.63A - 50.59AB \quad (4.4)$$

โดย  $y_{\text{Est}}$  คือ ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC

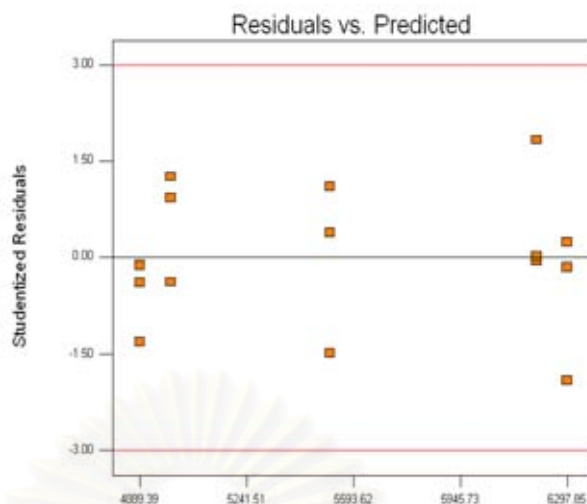
$\beta_0$  คือ ค่าของผลตอบสนองเนื่องจากตัวแปรที่ไม่ได้ทำการทดลองซึ่งสามารถคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของข้อมูลทั้งหมด

$\beta_1$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีผลในการทดลองซึ่งคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของตัวแปรนั้น ๆ

จากสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้นำไปเขียนกราฟศึกษาการกระจายตัว และค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน ดังแสดงในรูป 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ โดยจากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นถึงการแจกแจงมีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อย และไม่ได้แสดงความไม่เป็นปกติแต่อย่างใดจึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวแบบอิสระ ความแปรปรวนมีค่าคงที่ และไม่มีค่าเฉลี่ยของข้อมูล



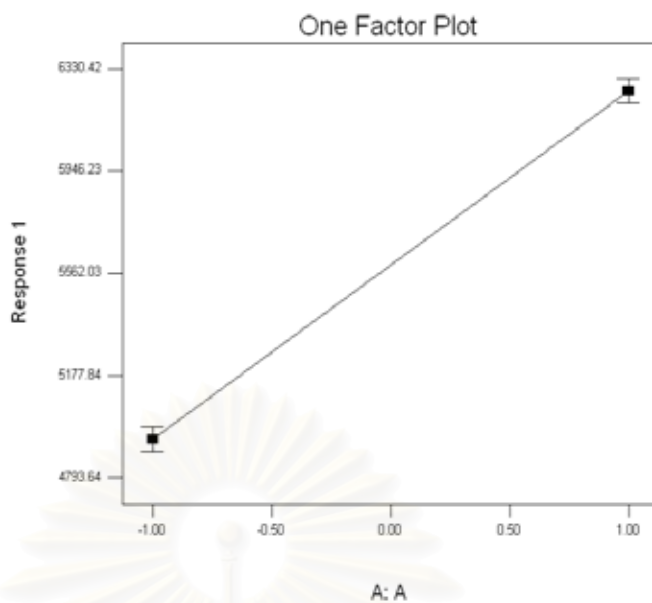
รูปที่ 4.24 Normal Probability Plot ของค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC



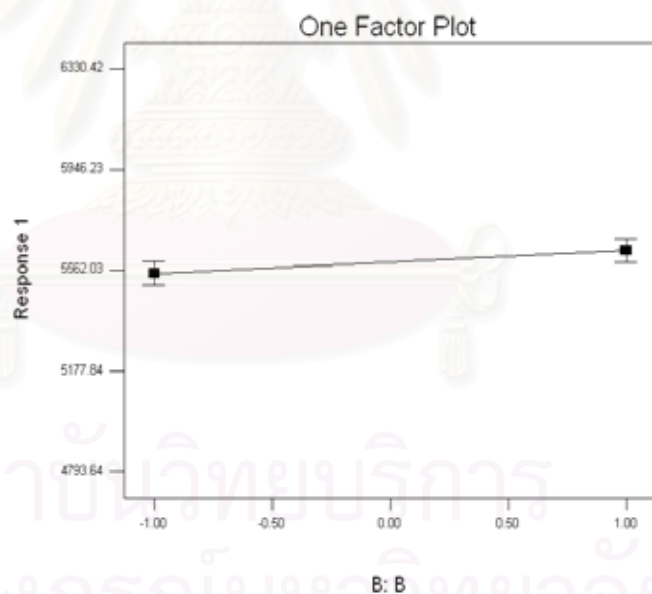
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงผลตอบสนองที่มาจาก การคำนวณทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

ซึ่งการกระจายตัวในรูปที่ 4.25 ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนดังนั้นแสดงว่าความแปรปรวนของข้อมูลเป็นแบบสุ่ม และมีการกระจายตัวแบบปกติ สรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สมมติขึ้นสามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง กล่าวคือ ในการทดลองจริงตัวแปรที่มีบทบาททำให้ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC เบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน คือ ปริมาณกาวแก้ว (A) และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของกาวแก้ว กับปริมาณของไซเลน (AB) จากสมการที่ 4.4 สามารถสรุปได้ว่า เมื่อต้องการเพิ่มค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC ควรเพิ่มปริมาณกาวแก้ว และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของกาวแก้ว กับปริมาณของไซเลน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.26 และ 4.27 ซึ่งเป็นกราฟปัจจัยในระดับสูงต่ำที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพจะพบว่าเมื่อปริมาณของกาวแก้ว เพิ่มขึ้นค่าเสถียรภาพจะเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากความชันของกราฟในรูป 4.26 พบว่าความชันของกราฟนั้นมีค่าเป็นบวก และปริมาณของไซเลนเพิ่มขึ้นค่าเสถียรภาพจะมีค่าคงที่ โดยพิจารณาจากกราฟในรูป 4.27 จะได้ความชันของกราฟที่เกือบเป็นเส้นตรง

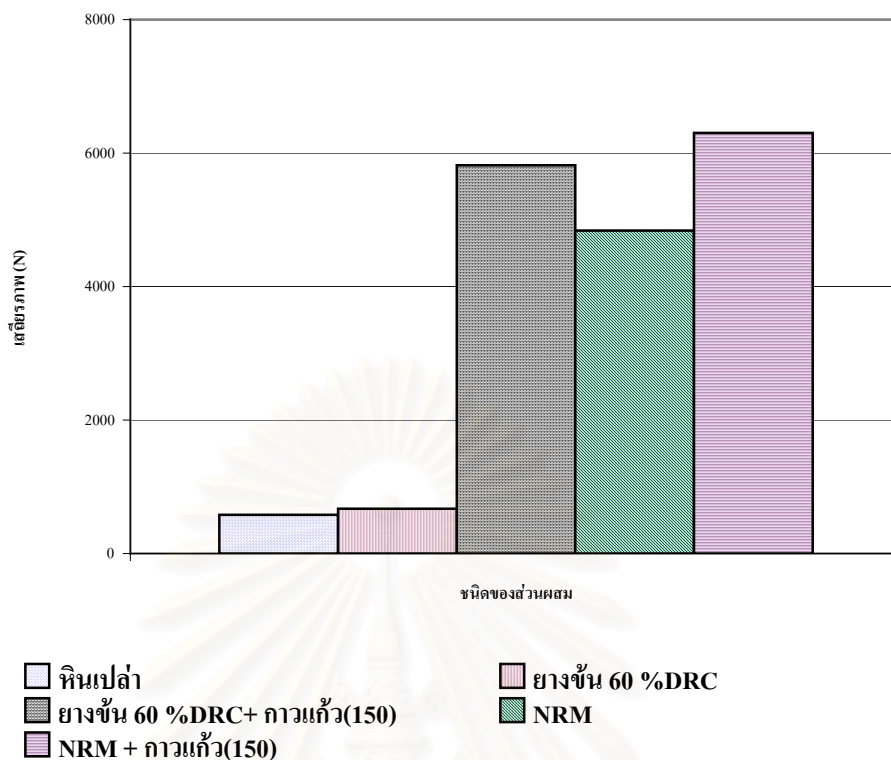


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของปริมาณกาวแก้วที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพ  
ของวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของปริมาณไซเลนที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพ  
ของวัสดุเชิงประกอบ

ซึ่งเมื่อพิจารณาพร้อมกับสมการถดถอย(สมการที่ 4.4) ที่ได้สร้างขึ้นจะให้ผลที่สอดคล้องกันโดย  $\beta_A$  มีค่าเท่ากับ 653.63 และ  $\beta_B$  นั้นไม่ได้มีอยู่ในสมการถดถอย ซึ่งแสดงถึงว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกาวแก้ว ค่าเสถียรภาพจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณไซเลนจะไม่มีผลต่อค่าเสถียรภาพ



รูปที่ 4.28 ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบ

จากรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าค่าเสถียรภาพของหินเปล่ามีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากไม่มีส่วนที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน (ยาง) และค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของกาวแก้วมีค่ามากกว่า วัสดุเชิงประกอบที่ไม่ได้ผสมกาวแก้ว เนื่องจากกาวแก้วนั้นทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างหินและยาง ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของกาวแก้ว จึงมีค่าเสถียรภาพมากกว่าวัสดุที่ไม่มีส่วนผสมของกาวแก้ว

#### 4.3 ผลการหาค่าครึ่งชีวิตของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC

สำหรับการศึกษาหาค่าครึ่งชีวิตของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC ได้เลือกศึกษาที่ภาวะที่ให้ค่าเสถียรภาพที่ดีที่สุด คือ ที่ปริมาณกาวแก้ว 150 phr และ ที่ปริมาณไซเลน 2 phr (AB) แต่เนื่องจากไซเลนนั้นมีราคาแพง และจากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC พบว่าที่ปริมาณกาวแก้ว 150 phr และ ที่ปริมาณไซเลน 2 phr (AB) นั้นมีค่าเสถียรภาพใกล้เคียงกับที่ปริมาณกาวแก้ว 150 phr (A) จึงได้เลือกใช้ภาวะนี้ในการทดสอบหาค่าครึ่งชีวิต โดยใช้ข้อสมมติฐานที่ว่าอัตราการเสื่อมสภาพของวัสดุเชิงประกอบเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ซึ่งมีสมการ คือ

$$-dS/dt = -r_s = kS \quad [22] \quad (4.5)$$

โดย  $-r_s$  คือ อัตราการเสื่อมสภาพของวัสดุเชิงประกอบ

$k$  คือ ค่าคงที่ของการเสื่อมสภาพของวัสดุเชิงประกอบ

$S$  คือ ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบ

ในการหาค่าคงที่ของการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบนั้น สามารถหาได้จาก การนำสมการที่ 4.5 มาทำการปริพันธ์ (integration) โดยกำหนดขอบเขตที่  $S_i = S_{i0}$  ที่เวลา (t) มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ 4.6

$$\ln (S_{i0}/S_i) = Kt \quad (4.6)$$

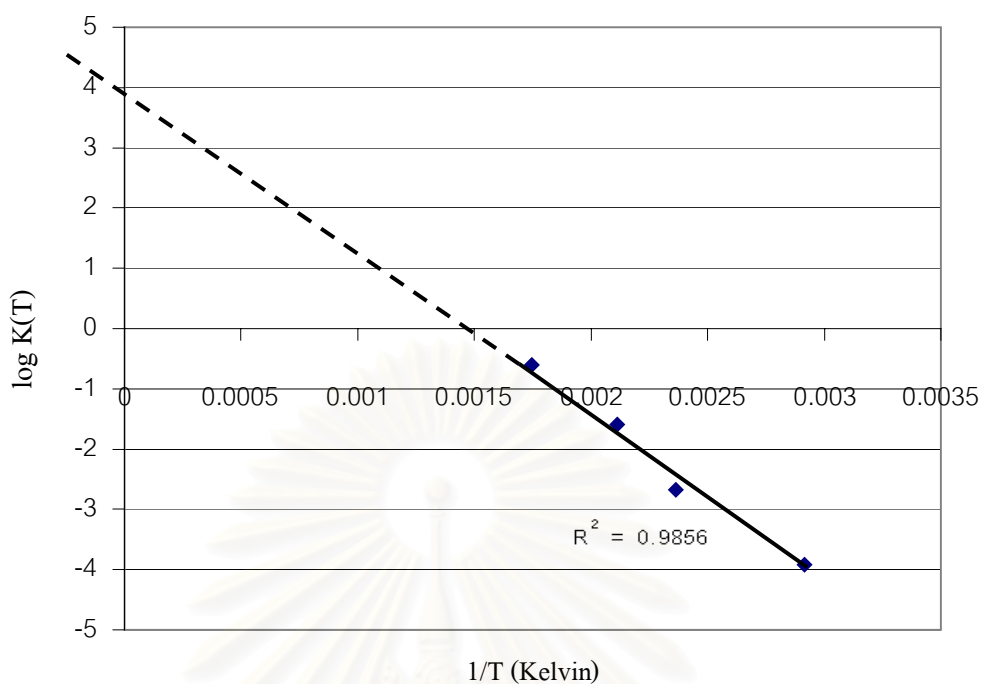
โดยค่าคงที่ของการเสื่อมสภาพ ( $K$ ) นั้นสามารถหาได้จากความชันของการพลอตกราฟระหว่างค่า  $\ln (S_{i0}/S_i)$  กับเวลา จากนั้นนำค่าคงที่ของการเสื่อมสภาพ  $k(T)$  ที่อุณหภูมิต่างๆ มาหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ดังสมการที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

$$K(T) = k_0 e^{-E_a/RT} \quad (4.7)$$

$$\log K = \log k_0 - \frac{E_a}{2.3R} \times \frac{1}{T} \quad (4.8)$$

ทำการพลอตกราฟระหว่างค่า  $\log K$  กับ  $1/T$  โดยค่าความชันที่ได้จากกราฟจะมีค่าเท่ากับ  $-E_a/2.3R$  และค่า  $\log k_0$  สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ดังรูปที่ 4.29

สถาบันนวัตกรรมการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

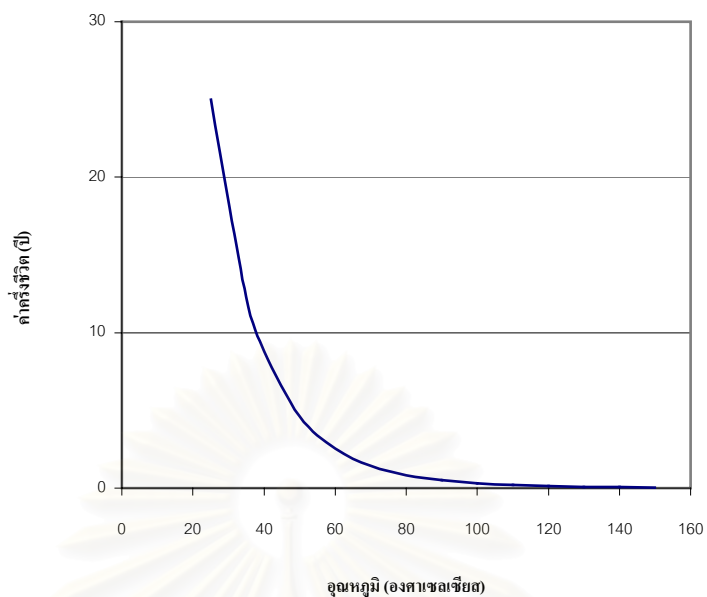


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้น

ซึ่งจากกราฟจะได้ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 53.98 kJ/mol และค่า  $k_0$  เท่ากับ 9550 และเมื่อนำค่าที่ได้แทนในสมการที่ 4.7 จะทำให้ได้สมการทั่วไปดังสมการที่ 4.9

$$K(T) = 9550 e^{-53980/RT} \quad (4.9)$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

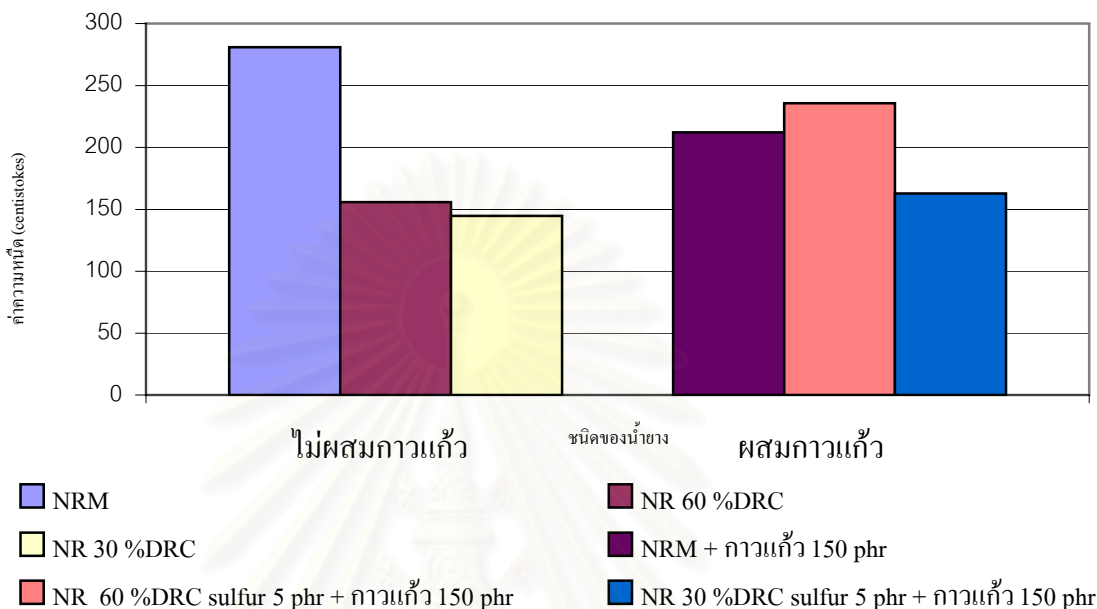


รูปที่ 4.30 ค่าครั้งชีวิตของวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นค่าครั้งชีวิตที่ได้จะมีค่าลดลง ที่อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  จะมีค่าครั้งชีวิตเท่ากับ 12.30 ปี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของน้ำยางชั้น 60 %DRC และน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC

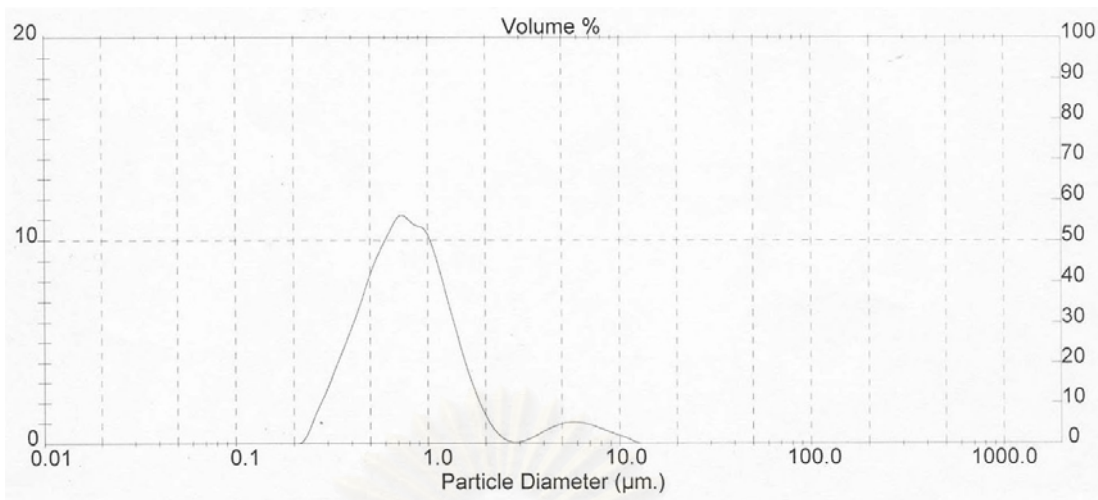


รูปที่ 4.31 ค่าความหนืดของน้ำยางชนิดต่างๆ

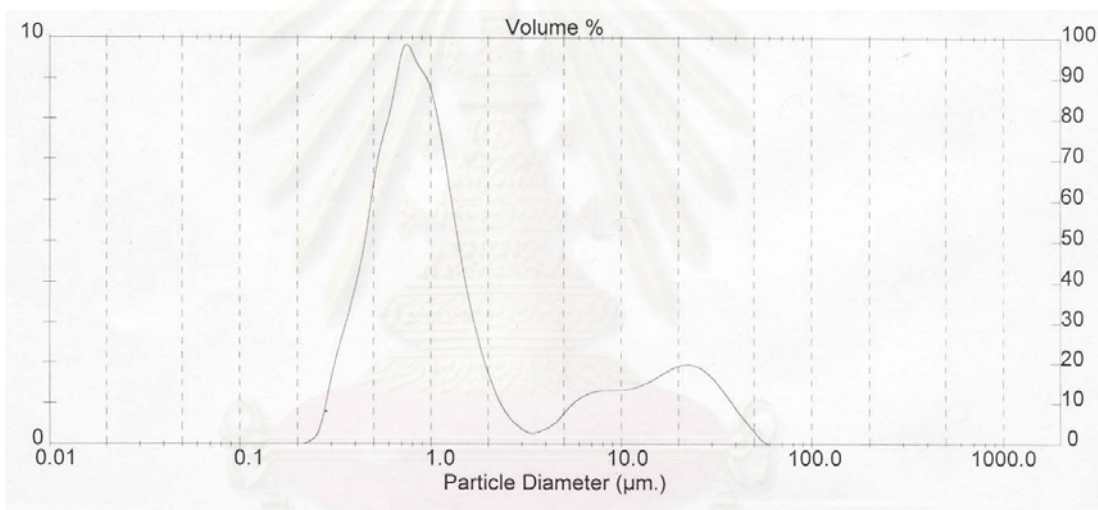
- โดยที่
- NRM คือ น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC
  - NR 60 %DRC คือ น้ำยางชั้น 60 %DRC
  - NR 30 %DRC คือ น้ำยางชั้น 30 %DRC
  - NRM + กาวแก้ว 150 phr คือ น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC ผสมกาวแก้ว 150 phr
  - NR 60 %DRC sulfur 5 phr + กาวแก้ว 150 phr คือ น้ำยางชั้น 60 %DRC ผสม ซัลเฟอร์ 5 phr ผสมกาวแก้ว 150 phr
  - NR 30 %DRC sulfur 5 phr + กาวแก้ว 150 phr คือ น้ำยางชั้น 30 %DRC ผสม ซัลเฟอร์ 5 phr ผสมกาวแก้ว 150 phr

รูปที่ 4.30 แสดงถึงค่าความหนืดของน้ำยางชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่าน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC ก่อนทำการผสมกาวแก้ว จะมีค่าความหนืดที่สูง (280.8 centistokes) แต่หลังจากผสม กาวแก้วแล้ว ค่าความหนืดจะมีค่าลดลง (212.22 centistokes) ส่วนของน้ำยางชั้น 30 และ 60 %DRC เมื่อทำการผสมกาวแก้วแล้วจะมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น





รูปที่ 4.32 ขนาดอนุภาคของน้ำยางชั้น 60%DRC



รูปที่ 4.33 ขนาดอนุภาคของน้ำยางปรับปรุงคุณภาพ 45%DRC

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ขนาดอนุภาคของน้ำยางทั้งสองชนิด

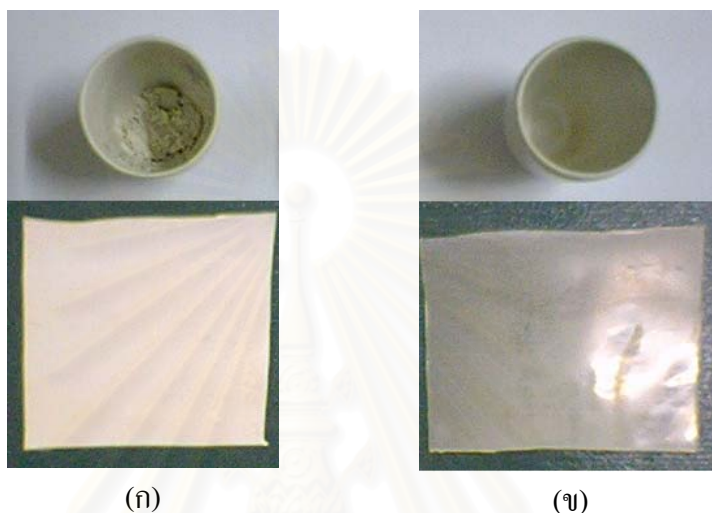
ชนิดของน้ำยาง	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	ขนาดอนุภาคที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ ( $\mu\text{m}$ )		
		10	50	90
น้ำยางชั้น 60 %DRC	1.15	0.4	0.78	1.63
	1.12	0.4	0.78	1.61
	1.11	0.39	0.77	1.59
ค่าเฉลี่ย	1.13	0.40	0.78	1.61
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.02	0.01	0.01	0.02
น้ำยางปรับปรุง คุณภาพชนิด 45 %DRC	4.68	0.46	0.95	17.46
	5.14	0.46	0.96	18.95
	4.96	0.46	0.96	17.86
ค่าเฉลี่ย	4.93	0.46	0.96	18.09
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.23	0.00	0.01	0.77

จากรูปที่ 4.31, 4.32 และตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของน้ำยางชั้น (1.13  $\mu\text{m}$ ) มีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC (4.93  $\mu\text{m}$ ) เนื่องจากน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC มีสารตัวเติมอยู่จึงทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่ามากกว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของน้ำยางชั้น 60 %DRC

ตารางที่ 4.8 ปริมาณเถ้าของน้ำยางทั้งสองชนิด

ชนิดน้ำยาง	ตัวอย่าง	ปริมาณเถ้า (%)	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
น้ำยางปรับปรุง คุณภาพ ชนิด 45 %DRC	1	31.40	31.35	0.59
	2	31.90		
	3	30.74		
น้ำยางชั้น 60 %DRC	1	0.21	0.21	0.07
	2	0.15		
	3	0.28		

ซึ่งจากตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณเถ้าของน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC มีปริมาณเถ้าสูงถึง 31.35 % เมื่อเทียบกับน้ำยางชั้น 60 %DRC ซึ่งมีปริมาณเถ้าอยู่เพียง 0.21 % โดยปริมาณเถ้านี้เป็นสารอนินทรีย์ที่เผาไหม้ไม่ได้ จึงเป็นข้อยืนยันได้ว่าน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC มีสารตัวเติมอยู่ จึงทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC มีขนาดใหญ่กว่าน้ำยางชั้น 60 %DRC



รูปที่ 4.34 แสดงปริมาณเถ้าหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 850 °C  
(ก) น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC (ข) น้ำยางชั้น 60 %DRC

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าของวัสดุเชิงประกอบกับแอสฟัลต์คอนกรีตจากการทดสอบของมาร์แชลล์

การทดสอบ	แอสฟัลต์คอนกรีต	วัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC	วัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC
การตอกอัด, ครั้ง/ด้าน	75	75	75
ค่าเสถียรภาพ, N (lb)	8006 (1800)	3482 – 6251 (783 – 1405)	4793 – 6330 (1077 – 1423)
ค่าการไหล, 0.25mm	8-14	12 - 19	7 - 20
ความหนาแน่น, g/cm <sup>3</sup>	2.60	2.12	2.12
ช่องว่าง, %	2.1	1.82	1.82

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบสมบัติของน้ำยางที่ใช้ในงานวิจัย

การทดสอบ	น้ำยางชั้น 60 %DRC + กาวแก้ว 150 phr + ซัลเฟอร์ 5 phr	น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC + กาวแก้ว 150 phr
Penetration	2.2 หน่วย	11.8 หน่วย
Ductility	0.57 cm	0.49 cm
ค่าความต้านทานแรงดึง (ไม่ ผสม water glass)	25.37 MPa	5.72 MPa
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเมื่อนำมาทำ เป็นวัสดุเชิงประกอบ (มีเนื้อ ยาง 5%)	0.009 GPa	0.008 GPa

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหากรรมวิธีในการผลิตวัสดุเชิงประกอบระหว่างหินและยางธรรมชาติ โดยหาส่วนผสมระหว่างน้ำยางกับสารเคมีที่เหมาะสมในการนำไปผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบ และศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อแรงยึดเกาะระหว่างหินและยางธรรมชาติ เพื่อให้ได้ค่าเสถียรภาพ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ และทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ความต้านทานแรงดึง ยาง ค่าความแข็ง เป็นต้น จากนั้นนำไปหาค่าครึ่งชีวิตของวัสดุเชิงประกอบเพื่อประมาณระยะเวลาในการเสื่อมสภาพของวัสดุเชิงประกอบ

#### 5.1 ผลของการผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อแบบ

##### 5.1.1 ค่าความแข็ง

1. เมื่อเพิ่มปริมาณกาวแก้วจะทำให้ยางมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากกาวแก้วจะให้อนุภาคซิลิกาเกิด ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่ช่วยในการเสริมแรง ส่งผลให้ค่าความแข็งมีค่าสูงขึ้น
2. เมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์ ค่าความแข็งที่ได้มีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากซัลเฟอร์เป็นสารที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ ดังนั้นจึงไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างเด่นชัด
3. เมื่อเพิ่มปริมาณไซเลน ค่าความแข็งมีค่าคงที่เนื่องจากไซเลนเป็นสารประสานคู่ควบที่ทำหน้าที่ในการช่วยให้ อนุภาคซิลิกาเกิดสามารถจับกับอนุภาคของยางได้ดียิ่งขึ้น

##### 5.1.2 ค่าความต้านทานแรงดึง

1. เมื่อเพิ่มปริมาณกาวแก้ว ค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มีแนวโน้มคงที่เนื่องจากอนุภาคซิลิกาเกิดไม่ได้สร้างพันธะกับโมเลกุลของยาง จึงไม่ได้มีส่วนในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึง
2. ปริมาณของซัลเฟอร์ที่ 2 phr ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.96 MPa หลังจากนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์ พบว่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มีค่าลดลงเนื่องจากเมื่อปริมาณซัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้น โมเลกุลของซัลเฟอร์จะเกาะกันเองเป็นสายโซ่ยาวทำให้ขาดความแข็งแรงจึงเป็นสาเหตุให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง
3. เมื่อทำการเพิ่มปริมาณไซเลน ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากไซเลนเป็นสารประสานคู่ควบไม่ได้สร้างพันธะกับโมเลกุลของยาง จึงไม่ได้มีส่วนในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึง

### 5.1.3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

1. เมื่อเพิ่มปริมาณกาวแก้ว ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากกาวแก้วเป็นสารเสริมความแข็งแรง และช่วยในการยึดเกาะระหว่างหินและยางธรรมชาติ เมื่อปริมาณกาวแก้วเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลในด้านเสริมความแข็งแรงและช่วยให้สามารถยึดเกาะได้ดีขึ้น

2. ที่ปริมาณของซัลเฟอร์ 2 phr ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.089 GPa หลังจากนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์มากขึ้น พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มีค่าลดลงเนื่องมาจากเมื่อปริมาณซัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้น โมเลกุลของซัลเฟอร์จะเกาะกันเองเป็นสายโซ่ยาวไม่สร้างการเชื่อมโยงกับพันธะคู่ของโมเลกุลของยางทำให้ขาดความแข็งแรงจึงเป็นสาเหตุให้โมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลง

3. เมื่อเพิ่มปริมาณไซเลน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าคงที่ เนื่องจากไซเลนไม่เกิดการสร้างพันธะกับอนุภาคของซิลิกา และ โมเลกุลของยางดังนั้นจึงไม่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

4. ที่อัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อหินเท่ากับ 1 ต่อ 2 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุด คือ 0.141 Gpa เนื่องจากที่ภาวะนี้ วัสดุเชิงประกอบมีส่วนผสมที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน(ยาง) เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อกรวดน้อยลง

5. เมื่อค่าความแข็งของยางเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อวัสดุเชิงประกอบมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจะสามารถทนแรงที่กดลงมาได้มากขึ้น

## 5.2 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการตอกอัด

5.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 % DRC และน้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 % DRC

1. เมื่อเพิ่มปริมาณกาวแก้วจะได้ค่าเสถียรภาพเพิ่มขึ้น เพราะว่ากาวแก้ว ที่ผสมลงไป ในวัสดุเชิงประกอบทำหน้าที่ในการเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างกรวดกับยางธรรมชาติและ กาวแก้วจะให้อนุภาคของซิลิกาซึ่งเป็นสารตัวเติมที่ช่วยในการเสริมแรงจึงทำให้ค่าเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณกาวแก้ว

2. ปริมาณของไซเลน ไม่มีผลต่อค่าเสถียรภาพ เนื่องจากไซเลนไม่เกิดการสร้างพันธะกับอนุภาคของซิลิกา และ โมเลกุลของยาง จึงไม่ส่งผลในการสร้างแรงยึดเกาะระหว่างกรวดและยาง

### 5.3 ผลของการหาค่าคงที่ของการเสื่อมสภาพของวัสดุเชิงประกอบ

จากการทดลองการหาค่าคงที่ของการเสื่อมสภาพสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 5.1 โดยที่ อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  จะมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 12.30 ปี

$$K(T) = 9550 e^{-53980/RT} \quad (5.1)$$

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

- 5.4.1 สารเคมีต่างๆที่เติมในน้ำยางขึ้น ควรอยู่ในรูปสารละลาย หรือดีสเพอร์ชันเท่านั้น
- 5.4.2 ควรศึกษาหากรรมวิธีในการทำให้ยางมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น
- 5.4.3 ควรศึกษาหาสารประสานคู่ควบที่สามารถทำหน้าที่ในการยึดเกาะอนุภาคซิลิกาเข้ากับ โมเลกุลของยางที่มีประสิทธิภาพดีกว่าไซเลน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. การผลิตยางธรรมชาติ. เอกสารทางวิชาการ เลขที่ 92 (กุมภาพันธ์). ศูนย์วิจัยการยางสงขลา อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา, 2524.
2. Bryson, J.A. Rubber Chemistry. London: Applied Science Publishers, 1978.
3. น้ำยาง. ภาควิชาเทคโนโลยีการยาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2531.
4. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. เทคโนโลยีของยาง. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
5. วราภรณ์ ขจรไชยกูล, พลชิต บัวแก้ว, ภัทรา กานตศิลป์. น้ำยางข้นและการผลิตถุงมือยาง. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง ฉบับที่ 3, เมษายน 2533.
6. พลชิต บัวแก้ว. สารเคมีผสมน้ำยาง. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตยาง ศูนย์วิจัยยางสงขลา กรมวิชาการเกษตร, 2531.
7. อภินันท์ รินเที่ยง. กระบวนการใหม่สำหรับผลิตยางแผ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
8. วิภา เสวตถนิษฐ์. การเตรียมสารละลายของสารเคมีที่ใช้กับน้ำยาง. เอกสารประกอบการบรรยายในการฝึกอบรมหลักสูตรเทคโนโลยีน้ำยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2537.
9. Wong Niap Poh. Preparation of Solution Dispersion and Emulsion. Rubber Research of Malaysia. 24 – 30, 1988.
10. ชมพูนุท สัจจร. ผลของขนาดอนุภาคคิสเปอร์ชันที่มีต่อกระบวนการผลิตและคุณภาพของถุงมือยางทางการแพทย์ที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
11. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรกระบวนการผลิตภัณฑ์ยาง สาขาเทคโนโลยียาง เล่มที่ 1 ระหว่างวันที่ 20-25 มิถุนายน 2531 ณ ศูนย์วิจัยสงขลา, 2531.
12. วัชรินทร์ วิทกุล. วัสดุการทาง. กรุงเทพมหานคร: ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2537.
13. ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, มีฤกษ์ พัสระ. การศึกษากำลังของผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตเก่าปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์. กรุงเทพมหานคร: กรมทางหลวง, 2543.
14. ปิยวรรณ สุรัญชานาจิรสกุล. พอลิเมอร์ผสมของแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติเพื่อเป็นโฟมกันกระแทก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยา



ศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

15. Yea-Yang Su, Shemensi M. Robert. The role of oxide structure on copper wire to the rubber adhesion. Applied Surface Science 161(2000): 355-364.
16. Brinke J.W.ten. et.al., Mechanistic aspects of the role of coupling agents in silica-rubber composites, Composites Science and Technology 63 (2003): 1165-1174.
17. Segre N., Joekes I., Use of tire rubber particles as addition to cement paste, Cement and Concrete Research 30 (9): 1421-1425.
18. นิสาชล ชินพันธ์. เปรียบเทียบผลการปรับสภาพผิวซิลิกาชนิดต่างๆ ที่มีต่อสมบัติของยาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีปิโตรเคมี วิทยาลัยปิโตรเลียม และปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
19. Donald R., Askeland. The Science and Engineering Material. 3<sup>rd</sup> ed. Champman&Hall.
20. เผ่าพงศ์ นิจจันทร์พันธ์ศรี. วิศวกรรมกรรมทาง. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2540.
21. Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, JR. Mechanics of Materials. 2<sup>nd</sup> ed. Singapore : McGRAW – HILL, 1992.
22. H. Scott Fogler. Elements of Chemical Reaction Engineering. 3<sup>rd</sup> ed. USA. : Prentice Hall, 1999.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

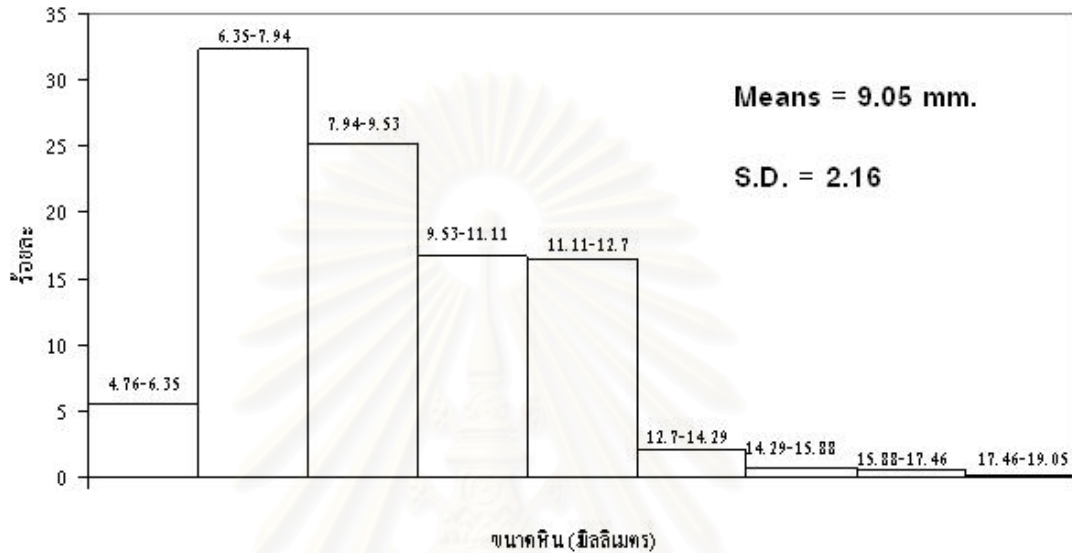


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ลักษณะของหินที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก.1 แสดงการกระจายของขนาดหินเบอร์ 1

ตารางที่ ก แสดงปริมาณหินที่ใช้ในการทดสอบของมาร์แชลล์

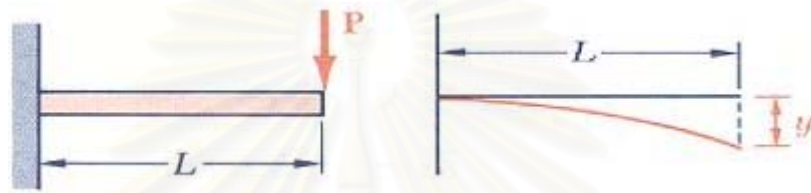
ขนาด (มม.)	13	10	2.36	0.6	0.3	0.15	PAN
น้ำหนัก (กรัม)	217.6	218.5	252.6	146	123.6	49.6	4.5
น้ำหนักรวม (กรัม)	217.6	436.1	688.7	834.7	958.3	1007.9	1012.4

## ภาคผนวก ข

## ตัวอย่างการคำนวณ

## 1. ตัวอย่างการคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่น [21]

## สูตรการคำนวณ



รูปที่ ข.1 การโค้งงอของคาน

$$E = -\frac{PL^3}{3yI}$$

โดยที่ E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

P คือ น้ำหนักที่กดลงที่ปลายคาน

L คือ ความยาวของคาน

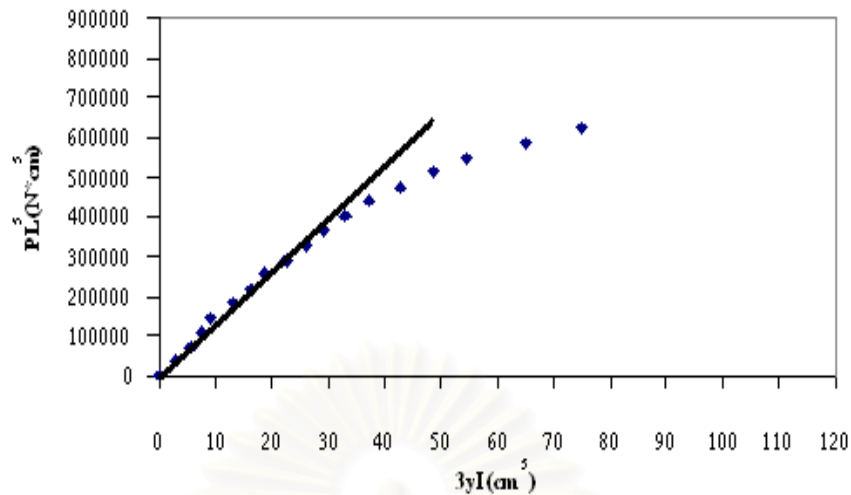
y คือ การยุบตัว

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia)

ตัวอย่างการคำนวณ ที่ปริมาณ water glass 150 phr ปริมาณซิลเฟอร์ 5 phr ปริมาณไซเลน 1 phr อัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อกรดที่ 1:2.5 ทำการเขียนกราฟระหว่าง ค่า  $PL^3$  กับ  $3yI$  ตามตารางที่ ก1 ซึ่งจะได้กราฟดังรูปที่ ก2 จากนั้นทำการหาค่าความชันจากกราฟ จากกราฟค่าความชัน คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.13 GPa

ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างผลการทดลอง

น้ำหนัก(N)	"y"ค่าการยุบตัว(cm)	PL <sup>3</sup> (N*cm <sup>3</sup> )	3yI(cm <sup>5</sup> )
0	0.00	0.00	0.00
1.5	0.08	36583.50	2.98
3	0.15	73167.00	5.58
4.5	0.20	109750.50	7.45
6	0.25	146334.00	9.31
7.5	0.35	182917.50	13.03
9	0.44	219501.00	16.38
10.5	0.50	256084.50	18.61
12	0.61	292668.00	22.71
13.5	0.70	329251.50	26.06
15	0.78	365835.00	29.04
16.5	0.89	402418.50	33.13
18	1.00	439002.00	37.23
19.5	1.15	475585.50	42.81
21	1.31	512169.00	48.77
22.5	1.47	548752.50	54.72
24	1.75	585336.00	65.15
25.5	2.01	621919.50	74.83



รูปที่ ข.2 กราฟหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

## 2. การคำนวณค่าคงที่ของการเสื่อมสภาพ [22]

### สูตรการคำนวณ

$$\ln (S_{i0}/S_i) = Kt$$

$$K(T) = k_0 e^{-E_a/RT}$$

$$\log K = \log k_0 - \frac{E_a}{2.3R} \times \frac{1}{T}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ใช้วัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC ปริมาณ water glass 150 phr ทำการอบที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 0.25, 0.5, 1 และ 3 ชั่วโมง จากรูปที่ ค.4 ค่าความชื้นที่ได้ คือ ค่าคงที่การเสื่อมที่อุณหภูมิ 300 °C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.243 ชั่วโมง<sup>-1</sup>

ตารางที่ ข.2 ค่าคงที่การเสื่อมสภาพของวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิต่างๆ

Temp(T)kelvin	1/T	k(ที่Tempต่างๆ)	log K(T)
573	0.00175	0.24390	-0.61278
473	0.00211	0.02521	-1.59843
423	0.00236	0.00208	-2.68124
343	0.00292	0.00012	-3.91645

นำค่าที่ได้จากตาราง ข2 มาเขียนกราฟการหาค่าพลังงานการกระตุ้น ซึ่งจะได้รูปที่ 4.29 โดยที่จุดตัดแกน y คือค่า  $\log k_0$  มีค่าเท่ากับ 3.98 ซึ่งจะได้ค่า  $k_0$  เท่ากับ 9550 และค่าความชัน คือค่า  $-E_a/2.3R$  มีค่าเท่ากับ  $-2823.04$  ซึ่งจะได้ค่า  $E_a$  เท่ากับ 53.98 kJ/mol

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

## ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 สมบัติทางกายภาพด้านความแข็งที่ปริมาณกาวแก้วต่างๆ กัน ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1 phr

ปริมาณกาวแก้ว (phr)	ค่าความแข็ง (IRHD)
110	63.5
120	69.22
130	71.38
140	75.6
150	77.62

ตารางที่ ค.2 สมบัติทางกายภาพด้านความแข็งที่ปริมาณซัลเฟอร์ต่าง ๆ กัน ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณไซเลน 1 phr

ปริมาณซัลเฟอร์ (phr)	ค่าความแข็ง (IRHD)
1	62.08
2	63
3	65.38
4	67.14
5	69.22



ตารางที่ ค.3 สมบัติทางกายภาพด้านความแข็งที่ปริมาณไซเลนต่าง ๆ กัน ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr

ปริมาณไซเลน (phr)	ค่าความแข็ง (IRHD)
1	69.22
2	67.5
3	68.9
4	70.06
5	68.86

ตารางที่ ค.4 สมบัติทางกายภาพด้านความต้านทานแรงดึงที่ปริมาณกาวแก้วต่าง ๆ กัน ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1 phr

ปริมาณกาวแก้ว (phr)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
110	1.506	0.016
120	1.348	0.014
130	1.346	0.014
140	1.540	0.016
150	1.583	0.017

ตารางที่ ค.5 สมบัติทางกายภาพด้านความต้านทานแรงดึงที่ปริมาณซัลเฟอร์ต่าง ๆ กัน ปริมาณกาวแก้ว 120 phr และปริมาณไซเลน 1 phr

ปริมาณซัลเฟอร์ (phr)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	1.987	0.021
2	2.956	0.031
3	2.363	0.025
4	1.916	0.020
5	1.583	0.016

ตารางที่ ค.6 สมบัติกายภาพด้านความต้านทานแรงดึงที่ปริมาณไซเลนต่าง ๆ กัน ปริมาณ  
 กาวแก้ว 120 phr และปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr

ปริมาณไซเลน (phr)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	1.583	0.016
2	1.756	0.018
3	1.887	0.020
4	1.703	0.018
5	1.627	0.017

ตารางที่ ค.7 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบเมื่อปริมาณกาวแก้วเพิ่มขึ้นปริมาณ  
 ซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณไซเลน 1 phr

กาวแก้ว (phr)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น			
	N/cm <sup>2</sup>	MPa	GPa	ค่าเฉลี่ย
110	6609.925	66.099	0.066	0.067
	6742.124	67.421	0.067	
120	7178.120	71.781	0.072	0.071
	7013.023	70.130	0.070	
130	9326.795	93.268	0.093	0.095
	9578.618	95.786	0.096	
140	10776.515	107.765	0.108	0.110
	11207.576	112.076	0.112	
150	13030.170	130.302	0.130	0.129
	12868.596	128.686	0.129	

ตารางที่ ค.8 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบเมื่อปริมาณซัลเฟอร์เพิ่มขึ้น ปริมาณ  
 กาวแก้ว 120 phr และปริมาณไซเลน 1 phr

ซัลเฟอร์ (phr)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น			
	N/cm <sup>2</sup>	MPa	GPa	ค่าเฉลี่ย
1	6962.776	69.628	0.070	0.069
	6823.52	68.235	0.068	
2	8860.455	88.605	0.089	0.089
	8904.76	89.048	0.089	
3	8039.494	80.395	0.080	0.081
	8127.929	81.279	0.081	
4	7659.71	76.597	0.077	0.076
	7583.113	75.831	0.076	
5	7178.12	71.781	0.072	0.071
	6962.776	69.628	0.070	

ตารางที่ ค.9 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบเมื่อปริมาณไซเลนเพิ่มขึ้นปริมาณ  
 กาวแก้ว 120 phr และปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr

ไซเลน (phr)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น			
	N/cm <sup>2</sup>	MPa	GPa	ค่าเฉลี่ย
1	7178.12	71.781	0.072	0.071
	6962.776	69.628	0.070	
2	7033.17	70.332	0.070	0.071
	7244.17	72.442	0.072	
3	7249.90	72.499	0.072	0.072
	7177.40	71.774	0.072	
4	7032.40	70.324	0.070	0.071
	7173.05	71.731	0.072	
5	6907.83	69.078	0.069	0.070
	7080.52	70.805	0.071	

ตารางที่ ค.10 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อหินเท่ากับ 1:2  
ที่ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณ ไซเลน 1 phr

กาวแก้ว (phr)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น			
	N/cm <sup>2</sup>	MPa	GPa	ค่าเฉลี่ย
110	7124.56	71.246	0.071	0.071
	6982.07	69.821	0.070	
120	8154.725	81.547	0.082	0.082
	8195.50	81.955	0.082	
130	9561.254	95.613	0.096	0.097
	9819.408	98.194	0.098	
140	11425.12	114.251	0.114	0.114
	11310.87	113.109	0.113	
150	13978.14	139.781	0.140	0.141
	14257.703	142.577	0.143	

ตารางที่ ค.11 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนระหว่างน้ำยางต่อหินเท่ากับ 1:3  
ที่ปริมาณซัลเฟอร์ 5 phr และปริมาณ ไซเลน 1 phr

กาวแก้ว (phr)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น			
	N/cm <sup>2</sup>	MPa	GPa	ค่าเฉลี่ย
110	6412.3	64.123	0.064	0.065
	6585.432	65.854	0.066	
120	6987.21	69.872	0.070	0.070
	6917.34	69.173	0.069	
130	9054.72	90.547	0.091	0.090
	8942.441	89.424	0.089	
140	9957.25	99.573	0.100	0.099
	9807.891	98.079	0.098	
150	12512.42	125.124	0.125	0.126
	12600.01	126.000	0.126	

ตารางที่ ค.12 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเมื่อค่าความแข็งเพิ่มขึ้น

ค่าความแข็ง (IRHD)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)
63.5	0.065
69.22	0.070
71.38	0.090
75.6	0.099
77.62	0.126

ตารางที่ ค.13 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างยางวัลคาไนซ์กับวัสดุเชิงประกอบ

ชนิด	โมดูลัสยืดหยุ่น (Gpa)
NR 60 %DRC + water glass 150 phr	0.0097
Composites ratio 1:2.5	0.129
Composites ratio 1:3	0.126
Composites ratio 1:2	0.141

ตารางที่ ค.14 ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความแข็ง ที่ปริมาณกาวแก้ว ต่าง ๆ

ปริมาณกาวแก้ว (phr)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	ค่าความแข็ง (IRHD)
0	17.39	28.96
110	1.506	63.5
120	1.348	69.22
130	1.346	71.38
140	1.540	75.6
150	1.583	77.62

ตารางที่ ค.15 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุชนิดต่างๆ

ชนิด	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)
rubber	0.0007 - 0.004
composite material	0.14
plasticized	0.2
PE (HD)	0.7 - 1.4
Plastic (Nylon)	2.1 - 3.4
wood (oak)	11
concrete (compression)	17 - 31

โดยที่ composite material คือ วัสดุเชิงประกอบระหว่างกรวดและยางธรรมชาติในงานวิจัย

ตารางที่ ค.16 ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้น้ำยางชั้น 60 %DRC (ซัลเฟอร์ 5 phr)และ  
น้ำยางปรับปรุงคุณภาพ 45 %DRC ที่ปริมาณกาวแก้ว 150 phr อบที่อุณหภูมิ 70 °C

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำยางชั้น 60 %DRC		น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC	
	ค่าเสถียรภาพ (N)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเสถียรภาพ (N)	ค่าเฉลี่ย
3	872.84	931.71	807.47	864.28
	984.78		890.10	
	937.53		895.27	
6	1323.36	1354.36	997.81	1051.91
	1318.52		1045.08	
	1421.21		1112.85	
12	1914.22	1932.78	1486.66	1580.09
	1949.38		1597.64	
	1934.73		1655.96	
18	2750.53	2759.55	1974.46	2082.00
	2653.26		2119.20	
	2874.86		2152.33	
24	3570.19	3606.71	2821.18	2853.54
	3657.98		2949.98	
	3591.97		2789.47	

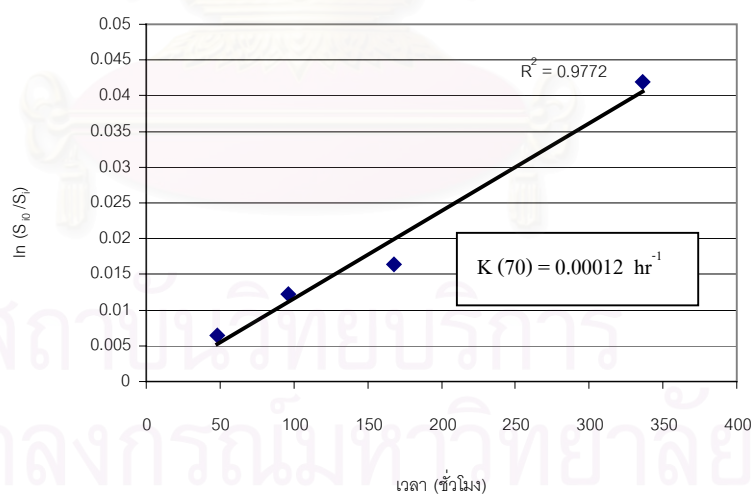
ตารางที่ ค.16 (ต่อ) ค่าเสถียรสภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ น้ำยางชั้น 60 %DRC (ซัลเฟอร์ 5 phr) และน้ำยางปรับปรุงคุณภาพ 45 %DRC ที่ปริมาณกาวแก้ว 150 phr อบที่อุณหภูมิ 70 °C

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำยางชั้น 60 %DRC		น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC	
	ค่าเสถียรภาพ (N)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเสถียรภาพ (N)	ค่าเฉลี่ย
24	3570.19		2821.18	
	3657.98	3606.71	2949.98	2853.54
	3591.97		2789.47	
48	5148.60		4516.78	
	4952.36	5046.81	4565.16	4564.29
	5039.48		4610.92	
72	5995.16		6276.50	
	5734.58	5895.84	5962.41	6145.95
	5957.77		6198.95	
96	5970.21		6320.07	
	5885.65	5857.47	6007.51	6105.66
	5716.55		5989.39	
120	5900.57		6224.59	
	5965.23	5874.70	6004.70	6104.84
	5758.28		6085.22	

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

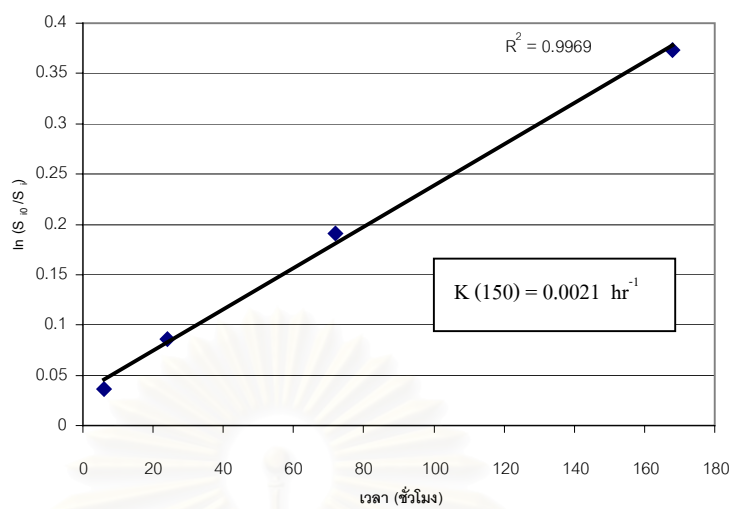
ตารางที่ ค.17 ค่าเสถียรภาพของวัสดุเชิงประกอบ

ส่วนผสม	ค่าเสถียรภาพ (N)	ค่าเฉลี่ย
หินเปล่า	612.65	581.89
	551.13	
น้ำยางชั้น 60 %DRC	607.20	672.38
	737.55	
น้ำยางชั้น 60 %DRC และกาวแก้ว 150 phr	5899.00	5817.35
	5735.70	
น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC	4803.72	4837.38
	4871.04	
น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC และกาวแก้ว 150 phr	6315.36	6301.50
	6287.64	

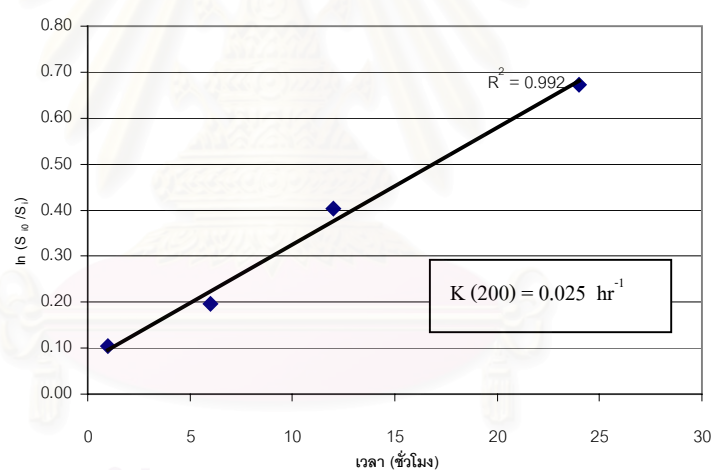


รูปที่ ค.1 กราฟแสดงค่าคงที่การเสื่อมสภาพของค่าเสถียรภาพที่อุณหภูมิ 70 °C

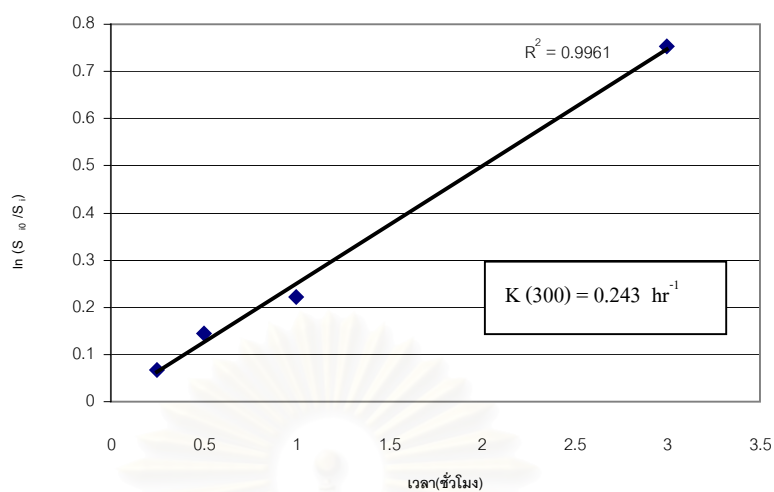




รูปที่ ค.2 กราฟแสดงค่าคงที่การเสื่อมสภาพของค่าเสถียรภาพที่อุณหภูมิ 150 °C



รูปที่ ค.3 กราฟแสดงค่าคงที่การเสื่อมสภาพของค่าเสถียรภาพที่อุณหภูมิ 200 °C



รูปที่ ค.4 กราฟแสดงค่าคงที่การเสื่อมสภาพของค่าเสถียรภาพที่อุณหภูมิ 300 °C

ตารางที่ ค.18 ค่าความหนืดของน้ำยางชนิดต่างๆ

ชนิดของยาง	ค่าความหนืด (centistokes)
น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC	280.80
น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC ผสมกาวแก้ว 150 phr	212.22
น้ำยางชั้น 30 %DRC	144.65
น้ำยางชั้น 30 %DRC ซัลเฟอร์ 5 phr ผสมกาวแก้ว 150 phr	144.42
น้ำยางชั้น 60 %DRC	155.93
น้ำยางชั้น 60 %DRC ซัลเฟอร์ 5 phr ผสมกาวแก้ว 150 phr	235.61

ตารางที่ ค.19 ค่าเสถียรสภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ในน้ำยางชนิดต่างๆ ที่ปริมาณกาวแก้ว 150 phr และตั้งไว้ในสภาพแวดล้อม

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำยางชั้น 30 %DRC		น้ำยางชั้น 60 %DRC		น้ำยางปรับปรุงคุณภาพชนิด 45 %DRC	
	ค่าเสถียรภาพ (N)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเสถียรภาพ (N)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเสถียรภาพ (N)	ค่าเฉลี่ย
72	855.46	819.69	882.20	847.69	981.67	990.37
	783.92		813.19		999.08	
120	1600.71	1592.71	1665.46	1691.85	1715.47	1788.41
	1584.71		1718.24		1861.36	
168	1686.41	1714.21	1747.01	1777.92	1884.74	1828.43
	1742.01		1808.84		1772.11	
336	4122.24	4069.87	4373.05	4356.32	4054.12	4138.98
	4017.50		4339.59		4223.84	
672	4461.61	4341.76	4810.10	4941.28	5463.26	5424.84
	4221.91		5072.47		5386.43	
1008	4376.10	4564.81	5009.63	5118.45	5479.84	5294.80
	4753.51		5227.27		5109.77	

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายไตรภพ ทรัพย์สถาผล เกิดวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2524 เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเทพศิรินทร์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อ พ.ศ. 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย