อภินันทนาการจาก
15 ก.ค. 2561

รายงานการวิจัย

การใช้ฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยไซเลนในผลิตภัณฑ์โฟมยางที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ

Using of Silane Treated Fume-Silica in Rubber Foam Product Made from Natural Rubber Latex

เอกฤกษ์ พุ่มนก
รัฐพงษ์ หนูหมาด
วรรณฤดี หมื่นพล
อัสมา ศิรคาร
อะตีฟ๊ะ บุตรา

สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

รายงานวิจัยฉบับนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณกองทุนวิจัย
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
พ.ศ. 2559

ชื่องานวิจัย การใช้ฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยไซเลนในผลิตภัณฑ์โฟมยางที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ

ผู้วิจัย เอกฤกษ์ พุ่มนก และคณะ

คณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปี 2559

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา สภาวะการปรับสภาพผิวของฟูมซิลิกาด้วยสารคู่ควบไซเลน (Si69) ผลของปริมาณ Si69 และปริมาณของซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69 (Si69) ที่มีต่อการแปรรูปและสมบัติของโฟมยาง โดยพบว่าปริมาณของซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ทำให้ดิสเพอร์สชันซิลิกา มีปริมาณของแข็งทั้งหมด และความหนืดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่น และค่า pH ลดลงปริมาณแอมโมเนียในดิสเพอร์สชันซิลิกาที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมด ความหนาแน่น pH แต่ความหนืดลดลง ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมคือปริมาณ SiO_2 และแอมโมเนีย คือร้อยละ 25 และ10 ตามลำดับ โดยใช้วัลทามอลร้อยละ 1 และน้ำกลั่นร้อยละ 64 บอลมิลเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ในการเตรียมฟูมซิลิกาปรับสภาพผิวด้วยไซเลน Si69 ที่นำไปใช้ในโฟมยางและให้สมบัติที่ดี สภาวะที่เหมาะสม คืออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และปริมาณ Si69 ร้อยละ 5 พบว่าที่อุณหภูมิปฏิกิริยาสูง ปริมาณ Si69 ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อการดึงยืด และความสามารถในการยืดจนขาดเพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานต่อแรงกด และค่าการจัดตัวเนื่องจากการอัดลดลง ในทางกลับกัน ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำ เมื่อปริมาณของไซเลนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกด และค่าการจัดตัวเนื่องจากการอัดมีค่าสูงขึ้น แต่ความต้านทานต่อการดึงยืดและความสามารถในการยืดจนขาดลดลง การใช้ Si69-t-SiO_2 ในโฟมยาง ในปริมาณน้อย (0.8-2.5 phr) ไม่มีผลต่อการแปรรูปของโฟมยาง ขนาดของเซลล์โฟมยาง การจัดตัวเนื่องจากการการอัด และความต้านทานต่อการดึงยืด แต่ทำให้ความแข็ง และความสามารถในการยืดจนขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งปริมาณ Si69-t-SiO_2 ที่เหมาะสมของ คือ 2.5 phr

เลข Bib# 1146994
วันที่ - 6 ก.ย. 2564
เลขเรียกหนังสือ 678.4 ก27

Research Title Using of Silane Treated Fume-Silica in Rubber Foam Product Made From Natural Rubber Latex

Researcher Ekaroek Phumnok et al.

Faculty Science and Technology

Year 2017

Abstract

In this research, the preparation of fume silica displacement, the surface treatment conditions of silica fume with silane coupling agent (Si69) and the effect of coupling silane (Si69) content and Si69 treated fume silica (Si69-t-SiO_2) on processing and mechanical properties of foam rubber were studied. It was found that the increased amount of silica made the total solids content and viscosity increase, while the density and pH decrease. The increased ammonia content resulted in the total solid content, the pH and density increased, but the viscosity decreased. The optimum conditions for the fume silica dispersion preparation were 25% and 10% of the SiO_2 and ammonia respectively, with 1% valtamol and 64% distilled water for 72 hours ball mill time. The best Si69-t-SiO_2 preparation conditions, it was a reaction temperature of 60 ° C and a Si69 content of 5%. It was found that at high reaction temperature, the increased Si69 content resulted increase the tensile strength and the elongation at break, but compression strength and the compression set decreased. On the other hand, at the low reaction temperature, the increased amount of silane made the compression set and compressive strength increased but the tensile strength decreased. The use of Si69-t-SiO_2 in the foam rubber in small quantities (0.8-2.5 phr) had no effect on the processing properties of the foam rubber, size of the rubber foam cells, compression set tensile strength, but the hardness and elongation at break slightly increased. The optimal Si69-t-SiO_2 content of 2.5 phr showed the best properties of rubber foam.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้า นายเอกฤกษ์ พุ่มนก และคณะ ต้องขอขอบพระคุณ โปรมแกรมวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ให้ความสะดวกเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำการทดลองวิจัย และขอขอบพระคุณขอบคุณ กองทุนวิจัย สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยตลอดโครงการ

นายเอกฤกษ์ พุ่มนก และคณะ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
15 สิงหาคม 2559

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฌ
สารบัญตาราง	ฏ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
2 ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	4
2.2 น้ำยาง	4
2.3 น้ำยางข้น (concentrated natural rubber latex , NRL)	5
2.3.1 ประเภทของน้ำยางข้นตามวิถีการผลิต	5
2.3.2 ประเภทของน้ำยางข้นแบ่งตามวิธีการเก็บรักษา	6
2.4 สารเคมีสำหรับยาง	7
2.4.1 สารกระตุ้น (activator)	7
2.4.2 สารตัวเร่ง (accelerator)	7
2.4.3 สารทำให้คงรูป (vulcanizing agent)	9
2.4.4 สารตัวเติม (filler)	9
2.5 ปัญหาของการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม	10
2.6 ฟูมซิลิกา	11
2.7 บทบาทของสารคู่ควบไซเลน (silane)	11
2.8 สมบัติของยางวัลคาไนซ์	14

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.1 การจัดตัวถาวรเนื่องจากแรงกด (compression set)	14
2.8.2 ความต้านทานต่อการดึง (tensile strength)	14
2.8.3 ความสามารถในการยืด (elongation at break)	14
2.8.4 ความแข็ง (hardness)	15
2.9 การตีโฟม	15
2.10 การเทลงเบ้าและการจับตัว	15
2.11 การล้าง	15
2.12 การทำให้โฟมยางแห้ง	16
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
3 สารเคมี อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 น้ำยางและสารเคมี	19
3.1.1 น้ำยางข้น	19
3.1.2 กำมะถัน (sulphur, S)	19
3.1.3 ซิงค์ไดเอธิลไดไธโอคาร์บาเมต (zinc diethyl dithiocarbamate, ZDEC)	19
3.1.4 ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไธอะโซล (zinc mercaptobenzothiazole, ZMBT)	19
3.1.5 ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO)	19
3.1.6 โพแทสเซียมโอลิเอต (potassium oleate)	19
3.1.7 ไดฟีนิลกัวนิดีน (diphenyl guanidine, DPG)	20
3.1.8 โซเดียม ซิลิโคฟลูออไรด์ (sodium silicofluoride, SSF)	20
3.1.9 ฟูมซิลิกา (fumed silica, SiO_2)	20
3.1.10 เบนโทไนท์ (bentonite)	20
3.1.11 วัลทามอล (vultamol)	20
3.1.12 แอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide, NH_4OH)	20
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	21
3.2.1 เครื่องบด (ball mill)	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 เครื่องชั่งไฟฟ้า (electrical balance)	21
3.2.3 เครื่องผสมอาหารแบบมือจับ	21
3.2.4 หม้อนึ่งไอน้ำ	22
3.2.5 แก๊สหุงต้ม	22
3.2.6 ตู้อบอากาศร้อน (hot air oven)	23
3.2.7 แบบพิมพ์ทรงกระบอกอลูมิเนียม	23
3.2.8 กล้องถ่ายรูปมือถือ	23
3.2.9 กล้องส่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM)	24
3.2.10 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (universal testing machine)	24
3.2.11 เครื่องทดสอบความแข็ง (hardness tester)	25
3.2.12 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงกด (compressive tester)	25
3.2.13 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)	25
3/2/14 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield viscometer)	26
3.2.15 เครื่องทดสอบการบ่มเร่ง (Gear ageing oven)	26
3.2.16 เวอร์เนียร์มิเตอร์	27
3.2.17 เครื่องวัดความหนา (micrometer thickness tester)	27
3.2.18 กระบอกฉีดยา	27
3.2.19 แบบพิมพ์	28
3.2.20 เครื่องแก้ววิทยาศาสตร์/อุปกรณ์ที่ใช้	29
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง	31
3.3.1 การเตรียมสารเคมี	31
3.3.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาและแอมโมเนียที่มีผลต่อการขึ้นรูปและสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ	32
3.3.3 ศึกษาผลของสารคู่ควบไซเลน และอุณหภูมิในการเตรียม Si69-t-SiO_2 ที่มีผลต่อการขึ้นรูปและสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ	32
3.3.3.1 ศึกษาการเตรียมฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3.2 ศึกษาการเตรียมโฟมยางธรรมชาติที่ใช้ฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69 เป็นสารตัวเติ 33

3.3.4 ศึกษาและเปรียบเทียบของปริมาณ SiO_2 กับ Si69-t-SiO_2 ที่มีต่อสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ 35

3.3.5 การทดสอบ 35

3.3.5.1 การทดสอบสารเคมี 35

1) การทดสอบปริมาณของทั้งหมด (total solid content, TSC %) 35

2) การทดสอบค่า pH 36

3) การทดสอบสมบัติของดิสเพอร์ชันฟูมซิลิกา 37

(1) การทดสอบปริมาณของทั้งหมดในสารเคมี(total solid content, TSC) 37

(2) การทดสอบ pH 38

(3) การทดสอบความหนืด (viscosity) 38

3.3.5.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties) 38

1) การทดสอบหาการยุบตัวถาวรเนื่องจากแรงอัด (compression set) 39

2) การทดสอบสมบัติด้านการดึง 39

3) การทดสอบความแข็ง 39

3.3.5.3 การทดสอบโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของโฟมยาง 39

4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของเวลาในการบด ปริมาณฟูมซิลิกา และแอมโมเนียที่มีต่อสมบัติของ ดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา 40

4.1.1 ผลการทดสอบค่าการทดสอบปริมาณของแข็งทั้งหมดในสารเคมี 40

4.1.2 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น (density) 43

4.1.3 ผลการทดสอบค่าความเป็นกรด - เบส (potential of hydrogen ion, pH) 46

4.1.4 ผลการทดสอบค่าความหนืด (viscosity) 49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 ผลของสารคู่ควบไซเลน และอุณหภูมิในการเตรียม Si69-t-SiO_2 ที่มีต่อสมบัติของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชั่นการขึ้นรูป และสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ 53

4.2.1 ผลการทดสอบความเป็น กรด-เบส ของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชัน 53

4.2.2 ผลการทดสอบความหนืดของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชัน 55

4.2.3 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงกดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม 57

4.2.4 ผลการทดสอบการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม 59

4.2.5 ผลการทดสอบความสามารถในการยืดจนขาดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม 61

4.2.6 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม 63

4.3 เปรียบเทียบผลของปริมาณ Si69-t-SiO_2 ที่มีต่อสมบัติของโฟมยาง 65

4.3.1 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีผลต่อสมบัติด้านการยุบตัวของโฟมยาง 65

4.3.2 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีต่อสมบัติด้านการดึง 66

4.3.2.1 ความสามารถในการยืดจนขาด (elongation at break) 66

4.3.2.2 ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) 67

4.3.3 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งของโฟมยาง 68

4.3.4 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิการ ที่มีต่อสมบัติทางสัณฐานวิทยาของโฟมยาง 69

5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง 71

5.2 ข้อเสนอแนะ 71

บรรณานุกรม 73

ภาคผนวก 78

ภาคผนวก ก 79

ภาคผนวก ข 82

ภาคผนวก ค 86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง 96

ภาคผนวก จ 103

ภาคผนวก ฉ 107

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

สารบัญภาพ

หน้า

บทที่ 2

รูปที่ 2.1 น้ำยางธรรมชาติจากต้นยางพารา 4

รูปที่ 2.2 fumed silica 9

รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน Si69 12

รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการปรับปรุงผิวของซิลิกาด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 13

รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 กับยางธรรมชาติ 13

บทที่ 3

รูปที่ 3.1 เครื่องบด (ball mill) 21

รูปที่ 3.2 เครื่องชั่งไฟฟ้า (electrical balance) 21

รูปที่ 3.3 เครื่องผสมอาหารแบบมือจับ 22

รูปที่ 3.4 หม้อนึ่งไอน้ำ 22

รูปที่ 3.5 แก๊สหุงต้ม 22

รูปที่ 3.6 ตู้อบอากาศร้อน (hot air oven) 23

รูปที่ 3.7 แบบพิมพ์ทรงกระบอกอลูมิเนียม 23

รูปที่ 3.8 กล้องถ่ายรูปมือถือ 23

รูปที่ 3.9 กล้องส่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด 24

รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง 24

รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็ง 25

รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงกด (compression set tester) 25

รูปที่ 3.13 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) 26

รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบความหนืด (Brookfield viscometer) 26

รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบการบ่มเร่ง (Geer aging oven) 26

รูปที่ 3.16 เวอร์เนียดิจิตอล 27

รูปที่ 3.17 เครื่องวัดความหนา (micrometer thickness gauge) 27

รูปที่ 3.18 กระบอกเข็มฉีดยา 28

รูปที่ 3.18 กระบอกเข็มฉีดยา 28

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.20 แบบพิมพ์ทดสอบการจัดตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set) 28

รูปที่ 3.21 บีกเกอร์ 29

รูปที่ 3.22 แท่งแก้วคน 29

รูปที่ 3.23 ไม้กวนแป้งขนม 29

รูปที่ 3.24 มีดคัตเตอร์ 30

รูปที่ 3.25 กรรไกร 30

บทที่ 4

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา 43

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา 46

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อค่าความเป็นกรด-เบสของดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา 49

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อความหนืดของ ดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา 52

รูปที่ 4.5 การปรับสภาพผิวของฟูมซิลิกา 53

รูปที่ 4.6 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อ pH ของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชัน 54

รูปที่ 4.7 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความหนืดของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชัน 56

รูปที่ 4.8 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงกดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม 58

รูปที่ 4.9 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม 60

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.10 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความสามารถใน การยืดจนขาดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม 62

รูปที่ 4.11 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม 64

รูปที่ 4.12 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาต่อการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr 65

รูปที่ 4.13 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาต่อความความสามารถในการยืดของโฟมยางที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr 66

รูปที่ 4.14 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาต่อความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยางที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr 67

รูปที่ 4.15 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาต่อความแข็งของโฟมยางที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr 68

รูปที่ 4.16 ภาพขยายของโฟมยาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่มีกำลังขยาย 20x 50x และ 100x โดยการแปรปริมาณ SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr 69

รูปที่ 4.17 ภาพขยายของโฟมยาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่มีกำลังขยาย 20x 50x และ 100x โดยการแปรปริมาณ Si69-t-SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr 71

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 การเตรียมสารเคมีดิสเพอร์ชันสำหรับตีโฟมยางธรรมชาติ 31

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของการเตรียมโพแทสเซียมโอลิเอต 32

ตารางที่ 3.3 สูตรที่ใช้ในการเตรียมดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา 32

ตารางที่ 3.4 สูตรการผสม Si69-t-SiO_2 ที่แปรปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 33

ตารางที่ 3.5 น้ำหนักน้ำยางและสารเคมีที่ใช้เตรียมโฟมยางผสมฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวฯ 34

ตารางที่ 3.6 น้ำหนักน้ำยางและสารเคมีที่ใช้เตรียมโฟมยาง 35

ตารางที่ 4.1 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในสารเคมี (total solid content, TSC) ของดิสเพอร์สชัน 40

ตารางที่ 4.2 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC) 41

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธ์ของปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC) 42

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าความหนาแน่น (Density) ของดิสเพอร์สชัน 43

ตารางที่ 4.5 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความหนาแน่น (Density) 44

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธ์ของปริมาณของความหนาแน่น (Density) 45

ตารางที่ 4.7 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าความเป็นกรด-เบส (potential of hydrogen ion, pH) ของดิสเพอร์สชัน 46

ตารางที่ 4.8 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความเป็นกรด-เบส (potential of hydrogen ion, pH) 46

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธ์ของปริมาณของความเป็นกรด-เบส (potential of hydrogen ion, pH) 47

ตารางที่ 4.10 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าความหนืด (Viscosity) ของดิสเพอร์สชัน 49

ตารางที่ 4.11 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความหนืด (Viscosity) 49

ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธ์ของปริมาณของความเป็นกรด-เบส (potential of hydrogen ion, pH) 50

ตารางที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่า pH 53

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความหนืด	54
ตารางที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความต้านทานต่อแรงกดของโฟมยาง	56
ตารางที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยาง	58
ตารางที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความสามารถในการยืดออกจนขาดของโฟมยาง	60
ตารางที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยาง	62

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีส่งออกในรูปของวัตถุดิบยางธรรมชาติมากเป็นอันดับหนึ่ง ซึ่งจากข้อมูลของสถาบันวิจัยยางในปีพ.ศ. 2558 พบว่า ปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศ มีเพียงประมาณร้อยละ 15 เท่านั้น ที่เหลือส่งออกในรูปของวัตถุดิบในรูปแบบของน้ำยางข้นและยางดิบ ทำให้ราคายางดิบภายในประเทศมีความผันผวนตามปริมาณความต้องการของต่างประเทศ ซึ่งขึ้นกับเศรษฐกิจโลก แม้เป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติรายใหญ่ ประเทศไทยยังต้องนำเข้าผลิตภัณฑ์ยางสูงถึง 41,609 ล้านบาทในปีพ.ศ. 2558 (สถาบันวิจัยยาง, 2558) ในปัจจุบันรัฐบาลจึงสนับสนุนให้เกิดการแปรรูปยางจากวัตถุดิบเป็นผลิตภัณฑ์ เพื่อเพิ่มมูลค่า และการใช้งานในประเทศของยาง ซึ่งจะส่งผลให้ราคายางมีเสถียรภาพมากขึ้น ดังนั้นการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ด้านเทคโนโลยียางจึงมีความสำคัญมาก เพราะเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางรูปแบบใหม่ที่มีสมบัติที่ดี เทียบได้จากที่นำเข้า หรือมีจำหน่ายอยู่แล้วตลาดโลก

โฟมยางเป็นผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากน้ำยางข้น ฟองยางประกอบด้วยเซลล์ของอากาศที่ต่อเนื่องติดกันไป ทำให้การถ่ายเทอากาศจากฟองยางเป็นไปอย่างรวดเร็ว เป็นเหตุให้โฟมยางได้ถูกนำมาใช้เป็นเบาะและที่นอน ซึ่งมีความต้องการที่จะให้มีสมบัติที่นุ่มและสบาย เป็นผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากน้ำยางธรรมชาติที่น่าสนใจและมีศักยภาพในการแข่งขันสูง ในตลาดเครื่องนอน หรือผลิตภัณฑ์รับแรงกระแทกต่างๆ มูลค่าเพิ่มจากการแปรรูปสูงมาก ตัวอย่างเช่น โดยปกติน้ำยาง 1.5 กิโลกรัม สามารถแปรรูปเป็นหมอนโฟมยางได้ 1 ใบ ผู้ผลิตสามารถขายได้ใบละประมาณ 350 บาท เมื่อขายในห้างสรรพสินค้าราคาจะสูงถึง 900 บาทขึ้นไป แต่โฟมยางยังมีปัญหาบางอย่าง เช่น การปรับความแข็ง ความนิ่ม ตามความต้องการของลูกค้า ความทนทานต่อการฉีกขาด และน้ำหนักมาก

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมในยางที่นิยมใช้เพื่อเสริมประสิทธิภาพของยางให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เป็นสารตัวเติมที่มีสีขาวจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในฟองยาง เพื่อให้สามารถปรับความแข็ง ความนิ่ม ได้ตามความต้องการ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มสมบัติทางฟิสิกส์ของยางให้ดีขึ้น ประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกาขึ้นกับขนาดอนุภาคของซิลิกา ในบรรดาซิลิกาต่างๆ ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ฟูมซิลิกาเป็นซิลิกาที่น่าสนใจ ในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในโฟมยาง เพราะฟูมซิลิกา มีขนาดอนุภาคเล็กมาก โดยมีขนาดอนุภาคปฐมตั้งแต่ 5-50 นาโนเมตร เสริมสมบัติทางฟิสิกส์ของยางได้ดีแม้ใช้ในปริมาณน้อย ซึ่งเหมาะกับโฟมยาง ในบางการประยุกต์ใช้งาน เช่น ที่นอน หมอน เป็นต้น แต่ ฟูมซิลิกา ยังมีปัญหาที่สำคัญคือ สภาพผิวมีของไซเลนประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซีจำนวน

มาก ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนดึงดูดกัน จนอนุภาคปฐมขนาดเล็กประกอบเป็นอนุภาคใหญ่ การเกิดอันตรกิริยาระหว่าง สารตัวเติม-สารตัวเติมสูง การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติม-ยางต่ำ จึงมีการพัฒนานำอัลคอกซีไซเลน (alkoxy silane) มาเป็นสารเป็นตัวกลางในการสร้างอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยางมากขึ้น ส่งผลให้มีอันทำให้มีสมบัติทางฟิสิกส์ที่ดีขึ้นมาก

การทำวิจัยในครั้งนี้ จึงนำฟูมซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคปฐมในระดับนาโน มาเตรียมให้อยู่ในรูปของดิสเพอร์สชัน และปรับสภาพผิวด้วยอัลคอกซีไซเลน นำมาเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์โฟมยาง เช่น หมอน ที่นอนโฟมยาง เป็นต้น เพื่อให้สามารถใช้ในปริมาณน้อยแต่เสริมสมบัติทางฟิสิกส์ของยางให้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟูมซิลิกาดิสเพอร์สชัน ด้วยเครื่องบอลมิล
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพผิวของฟูมซิลิกาด้วยไซเลน
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณของไซเลนที่มีต่อการปรับสภาพผิวของฟูมซิลิกา
4. เพื่อศึกษาผลของฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยไซเลนต่อการขึ้นรูปและสมบัติของฟองยางธรรมชาติ

1.3 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถผลิตฟองยางจากน้ำยางข้นที่มีสมบัติต่างๆ ที่ดีได้โดยมีฟูมซิลิกาและฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยอัลคอกซีไซเลนเป็นสารตัวเติม
2. สามารถทราบผลของอิทธิพลของการแปรปริมาณฟูมซิลิกาและฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยอัลคอกซีไซเลนที่มีผลต่อโครงสร้างผลิตภัณฑ์โฟมยาง
3. สามารถทราบผลของอิทธิพลของการแปรปริมาณฟูมซิลิกาและฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยอัลคอกซีไซเลนที่มีผลต่อสมบัติทางสัณฐานวิทยา
4. สามารถทราบผลของอิทธิพลของการแปรปริมาณฟูมซิลิกาและฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยอัลคอกซีไซเลนที่มีผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในการวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟูมซิลิกาดิสเพอร์สชันด้วยเครื่องบอลมิล ศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ในการปรับสภาพผิวของฟูมซิลิกาด้วยไซเลน ชนิด Alkoxy silane และอิทธิพลของปริมาณไซเลน ที่มีต่อการปรับสภาพผิวของฟูมซิลิ

กาดังกล่าว จากนั้นนำฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยไซเลนที่ได้จากการวิจัย มาประยุกต์ใช้เป็นสารตัวเติมในฟองยางจากน้ำยางธรรมชาติ โดยศึกษาผลของปริมาณฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยไซเลนที่มีต่อความสามารถการขึ้นรูป และสมบัติของฟองยาง เช่น ลักษณะและขนาดของรูพรุนฟองยาง ความหนาแน่น สมบัติด้านการทนต่อแรงดึง การทนต่อการฉีกขาด การยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกด เป็นต้น

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยเป็นพื้นที่ในการปลูกยางพาราเป็นจำนวนมาก มักปลูกอยู่ในพื้นที่ทางภาคใต้ ภาคตะวันออก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จากข้อมูลสถิติยางพาราของสมาคมยางพาราไทย ได้ระบุว่า ในปี 2555 ที่ผ่านมาประเทศไทยมีปริมาณการผลิตยางพาราสูงถึง 3,778,010 ตัน ซึ่งกว่า 3,121,332 ตันของผลิตยางพาราได้ถูกส่งออกไปขายต่างประเทศอีกทั้งยังทำให้เห็นได้ว่า ในแต่ละปีนั้นปริมาณของผลผลิตยางพาราในประเทศมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความต้องการของตลาดที่เพิ่มมากขึ้นและมีอุตสาหกรรมการผลิตยางธรรมชาติและการใช้น้ำยางข้นภายในประเทศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว มีการใช้น้ำยางในการผลิต เช่น ผลิตภัณฑ์ถุงยางอนามัย ถุงมือยาง เป็นต้น นอกจากนี้โฟมยางซึ่งผลิตจากน้ำยางธรรมชาติที่สามารถทำให้เป็นรูปทรงต่างๆ และมีสมบัติทนต่อการกดหรือบิด เนื่องจากโฟมยางมีโครงสร้างที่เป็น รูพรุนสามารถระบายอากาศได้ดี ดังนั้นจึงนิยมใช้เป็นวัสดุประเภทที่ต้องการความอ่อนนุ่ม เช่น เบาะรองนั่ง หมอน และที่นอน เป็นต้น

2.2 น้ำยาง

น้ำยาง (latex) คือ วัสดุพอลิเมอร์ที่มีต้นกำเนิดจากของเหลวของพืชบางชนิดซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำนม มีสมบัติเป็นคอลลอยด์ อนุภาคเล็ก มีตัวกลางเป็นน้ำ

รูปที่ 2.1 น้ำยางธรรมชาติจากต้นยางพารา

(ที่มา: http://www.springnews.co.th/view/71511)

น้ำยางมาจากต้นไม้ยืนต้นมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งคือ ยางพารามีถิ่นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำอเมซอน ประเทศบราซิล และเปรู ทวีปอเมริกาใต้ ซึ่งชาวมายาในอเมริกากลางได้รู้จักการนำยางพารามาใช้ก่อนปี พ.ศ. 2000 โดยการจุ่มเท้าลงในน้ำยางดิบเพื่อทำเป็นรองเท้า ส่วนเผ่าอื่นๆ นำยางไปใช้ประโยชน์ในการทำผ้ากันฝน ทำขวดใส่น้ำ และทำลูกบอลยางเล่นเกมส์ต่างๆ เป็นต้น จนกระทั่งคริสโตเฟอร์ โคลัมบัส ได้เดินทางมาสำรวจทวีปอเมริกาใต้ ในระหว่างปี พ.ศ. 2036-2039 และได้พบกับชาวพื้นเมืองเกาะไฮติสที่กำลังเล่นลูกบอลยาง ซึ่งสามารถกระดอนได้ ทำให้คณะผู้เดินทางสำรวจประหลาดใจจึงเรียกว่า "ลูกบอลผีสิง" ต่อมาในปี พ.ศ. 2279 นักวิทยาศาสตร์ ชาวฝรั่งเศสชื่อชาลส์ มารี เดอลา คองตามีน์ (charles merie dela condamine) ได้ให้ชื่อเรียกยางตามคำพื้นเมืองของชาวไมกาว่า "คาโอชู" (caoutchouc) ซึ่งแปลว่าต้นไม้ร้องไห้ และให้ชื่อเรียกของเหลวที่มีลักษณะขุ่นขาวคล้ายน้ำนมซึ่งไหลออกมาจากต้นยางเมื่อกรีดเป็นรอยแผลว่า ลาเท็กซ์ และใน พ.ศ. 2369 ไมเคิลฟาราเดย์ (faraday) ได้รายงานว่าน้ำยางเป็นสารที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนมีสูตรเอมไพริเคิล คือ C_5H_8 หลังจากนั้นจึงได้มีการปรับปรุงสมบัติของยางพาราเพื่อให้ใช้งานได้กว้างขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ (สารานุกรมเสรี, 2558)

2.3 น้ำยางข้น (concentrated natural rubber latex, NRL) (วราภรณ์, **2555)**

น้ำยางสดโดยปกติจะมีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณร้อยละ 25-45 มีส่วนที่ไม่ใช่ยางประมาณร้อยละ 3 นอกจากนั้นจะเป็นน้ำ และวิธีการนำมาแปรรูปเป็นวัตถุดิบจะต้องการให้น้ำยางมีความเข้มข้นเป็นร้อยละ 60 เนื้อยางแห้งหรือที่เรียกว่า น้ำยางข้น

2.3.1 ประเภทของน้ำยางข้นตามวิธีการผลิต

น้ำยางข้นที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางปัจจุบัน แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต (processing system) ได้ 3 ประเภท

2.2.1.1 น้ำยางจากการระเหยน้ำ (evaporation latex) เป็นการระเหยหรือการแยกน้ำออกจากน้ำยางเพียงเดียวแต่สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่น้ำยังคงอยู่ในน้ำยางเหมือนเดิมโดยใช้ความร้อนในสภาพที่มีความดันต่ำเข้าช่วยดังนั้น จึงทำให้น้ำยางข้นมีความบริสุทธิ์ต่ำ

2.3.1.2 น้ำยางข้นจากการทำให้เกิดครีม (creaming latex) เป็นน้ำยางข้นที่ได้จากการทำให้เป็นครีมเติมตัวทำให้เกิดครีมลงไป น้ำยางชนิดนี้จะมีความบริสุทธิ์สูงกว่าแต่จะมีองค์ประกอบที่สำคัญบางอย่างลดลง

2.3.1.3 น้ำยางข้นจากการปั่น (centrifuging latex) เป็นน้ำยางข้นที่ได้จากการผลิตโดยวิธีปั่นด้วยเครื่องแยกที่หมุนด้วยความเร็วสูง ประมาณ 7,000-8,000 รอบต่อนาที เป็นการแยกเอาส่วนที่มีความถ่วงจำเพาะไม่เท่ากัน ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำยางออกจากกัน โดยอาศัยแรงเหวี่ยงน้ำยางข้นที่ได้จากการปั่นจะมีความบริสุทธิ์สูงแต่จะขาดองค์ประกอบที่ไม่ใช่ยางที่สำคัญ

2.3.2 ประเภทของน้ำยางข้นแบ่งตามวิธีการเก็บรักษา

น้ำยางแบ่งตามวิธีการถนอม (preservation system) ได้ 2 ประเภทใหญ่คือ น้ำยางข้น ที่มีแอมโมเนียสูง (high ammoniated latex-HA latex) และน้ำยางข้นที่มีแอมโมเนียต่ำ (low ammoniated latex-LA latex) น้ำยางข้นที่มีแอมโมเนียสูง ได้แก่ น้ำยางข้นที่ถนอมด้วยฟอร์มาดีไฮด์ (formaldehyde) กับแอมโมเนีย หรือถนอมด้วยแอมโมเนียอย่างเดียว ส่วนน้ำยางข้นที่มีแอมโมเนียต่ำ ได้แก่ น้ำยางข้นที่ถนอมด้วยแอมโมเนียปริมาณน้อยประมาณร้อยละ 0.2 แล้วใช้ร่วมกับทีเอ็มทีดีร้อยละ 0.01 ซิงก์ออกไซด์ ร้อยละ 0.01 และกรดลอริก ร้อยละ 0.04

น้ำยางเป็นสารผสมที่ประกอบด้วยอย่างน้อยสองส่วนคือ ส่วนของสารแขวนลอยกระจัดกระจาย (disperse phase) อยู่ในส่วนที่เป็นตัวกลาง (disperse medium) ปกติน้ำยาง มีลักษณะสีขาวคล้ายน้ำนม ความเป็นของเหลวมาจากสถานะของตัวกลาง ซึ่งโดยทั่วไปเป็นน้ำ ยกเว้นเป็นสารอินทรีย์ในกรณีของน้ำยางที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง (non-aqueous lattices) อนึ่งโอกาสจะใช้คำว่า "เซรุ่ม" (serum) แทนส่วนของตัวกลาง กรณีของน้ำยางประเภทมีน้ำเป็นตัวกลาง (aqueous latices) ทั้งนี้ถ้าใช้คำว่า "เซรุ่ม" กับน้ำยางที่มีน้ำเป็นตัวกลาง "เซรุ่ม" ก็จะหมายถึง ของเหลว (aqueous fluid) ที่แยกออกขณะที่เกิดการแยกของสารแขวนลอยเมื่อน้ำยางสูญเสียความเสถียรส่วนของสารแขวนลอยที่กระจัดกระจายในตัวกลาง ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมแยกกัน โมเลกุลที่ประกอบด้วยอนุภาค โดยหน่วยย่อยๆ ทางเคมี (chemical repeat unit)

น้ำยางส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารแขวนลอยในตัวกลาง โดยไม่มีการละลาย (lyophobic sols) แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะน้ำยางที่มีน้ำเป็นตัวกลาง (aqueous lattices) จัดเป็นกลุ่มของสารผสมที่มีน้ำเป็นตัวกลาง (hydrophobic sols) ลักษณะที่บ่งบอกความแตกต่างของน้ำยางจากสารผสมชนิดของผสมที่ไม่ชอบตัวกลางอื่น ๆ คือ ธรรมชาติของส่วนทีกระจายซึ่งไม่ละลายเข้ากับตัวกลางที่เป็นของเหลวที่มันแขวนลอยอยู่ จึงทำให้น้ำยางในสถานะของของผสมที่ไม่ชอบตัวกลาง มากกว่าของผสมที่ชอบตัวกลาง (philic) แม้ว่าในทางวิทยาศาสตร์คอลลอยด์คลาสสิค (classical colloidal science) น้ำยางจะมีสมบัติที่ก้ำกึ่งระหว่างสารผสมที่ชอบหรือไม่ชอบสารตัวกลาง แต่โดยปกติลักษณะของ

ความไม่ชอบสารตัวกลางจะเด่นกว่านั่นคือ สิ่งจำเป็นที่หลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับน้ำยางคือ สถานะของสารแขวนลอยต้องมีความเสถียรในสภาวะปกติตลอดระยะเวลาเป็นเดือนหรือปี

น้ำยางธรรมชาติ มีสมบัติที่เด่นที่สุด คือ ความแข็งแรงของเจลยางเปียกสูง (high wet gel strength) ซึ่งเป็นความพิเศษได้เปรียบในการการใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ใช้เทคนิค การจุ่มหรือการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีวัสดุอื่นเสริมความแข็งแรง

2.4 สารเคมีสำหรับน้ำยาง (บุญธรรม, 2532)

การนำน้ำยางมาใช้งานจำเป็นต้องผสมสารเคมีลงในน้ำยาง เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ แต่สารที่จะผสมลงในน้ำยางได้นั้น ต้องเตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลาย (solution) ดิสเพอร์สชัน (dispersion) หรืออีมัลชัน (emulsion) ซึ่งเรียก น้ำยางที่ผสมสารเคมีแล้วว่าน้ำยางคอมเปานด์ (compound latex) หากนำสารเคมีผสมลงไปในน้ำยางโดยตรงได้น้ำยางคอมเปานด์ที่ไม่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ เนื่องจากสารเคมีจะตกตะกอนได้ นอกจากนั้นยังอาจทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อนได้ สารเคมีที่ผสมลงในน้ำยางต้องมีการเตรียมให้ผิวของสารเคมีนั้นเล็กลง เพื่อป้องกันไม่ให้สารเคมีนั้นตกตะกอนและต้องมีการปรับสภาพความเป็น กรด-ด่าง ของสารเคมีนั้นด้วย สารเคมีที่สามารถละลายในน้ำได้ต้องมีการเตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลายสำหรับสารเคมีที่เป็นของแข็งที่ละลายน้ำได้น้อยมากหรือไม่ละลายน้ำเลย ต้องเตรียมให้อยู่ในรูปของดิสเพอร์สชันและถ้าสารเคมีที่เป็นของเหลวที่ละลายน้ำได้น้อยหรือไม่ละลายน้ำต้องมีการเตรียมให้อยู่ในรูปของอีมัลชัน

2.4.1 สารกระตุ้น (activators)

สารกระตุ้นจะทำหน้าที่ช่วยให้สารตัวเร่งทำงานได้ดีขึ้น สารที่ใช้เป็นสารกระตุ้นได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ และออกไซด์ของโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม แต่นิยมใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ สารกระตุ้นในน้ำยางต่างจากสารกระตุ้นที่ใช้ในยางแห้งตรงที่ไม่ใช้กรดไขมัน เพราะในน้ำยางข้นที่ใช้ผลิตภัณฑ์ ไม่ได้ผ่านการชะล้างเอากรดไขมันแห้งปกติ ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ใช้มีค่าประมาณ 3-5 phr แต่กรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่โปร่งใสควรใช้ซิงค์ออกไซด์เล็กน้อยประมาณ 0.5 phr และถ้าต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีโมดูลัสสูง และทนทานอาจใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณมากได้

2.4.2 สารตัวเร่ง (accelerator)

สารตัวเร่งเป็นสารเคมีที่เร่งให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เร็วขึ้นหรือช่วยให้กำมะถันทำปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น สารเคมีพวกนี้ นอกจากจะช่วยเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวแล้ว ยังช่วยลดปริมาณกำมะถันที่ต้องใช้ลงได้ด้วยโดยปกติการวัลคาไนซ์ในน้ำยาง ไม่มีปัญหาของยางสุกก่อนกำหนด

(scorch) ดังนั้นสามารถใช้สารตัวเร่งชนิดเร่งให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็ว สารตัวเร่งถ้าบ่งบอกตามความสามารถในการบ่มเร่งให้เกิดการคงรูป จะแบ่งได้เป็น 4 พวก

2.4.2.1 แซนเทต (xanthate) เป็นสารตัวเร่งใช้สำหรับน้ำยางโดยเฉพาะสาร ตัวเร่งพวกนี้เร่งปฏิกิริยาได้เร็วกว่าไดไธโอคาบาเมต การทำผลิตภัณฑ์จากน้ำยางโซเดียมแซนแทตทำปฏิกิริยาเร็วกว่าซิงค์แซนแทต และถ้าผสมโซเดียมแซนเทตกับซิงค์แซนแทตเข้าด้วยกันสามารถเร่งการวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่าเมื่อใช้เดี่ยว เนื่องจากสารตัวเร่งชนิดนี้เร่งการคงรูปได้เร็วมาก ฉะนั้นอุณหภูมิในการวัลคไนซ์ควรต่ำประมาณ 80-110 องศาเซลเซียส และต้องใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นสารตัวเร่งพวกนี้ ได้แก่ โซเดียมไอโซโพรพิลแซนเธท(sodium isopropyl xanthate, SIX), ซิงค์ไอโซโพพิลแซนเธท (zinc isopropyl xanthate, ZIX), ซิงค์บิวทิลแซนเธท (zinc butyl xavthat, ZBX)

2.4.2.2 ไดไธโอคาบาเมต (dithiocarbamates) เป็นสารตัวเร่งที่เร่งปฏิกิริยาได้เร็วรองจากแซนแทต สารตัวเร่งชนิดนี้ที่ใช้นิยมใช้มากที่สุดคือ ซิงค์ไดเอธิลไดไธโอคาบาเมต (zinc diethylndithi ocarbamate, ZDC) การใช้สารนี้ไม่ต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ได้แต่การใช้ ซิงค์ออกไซด์ช่วยเพิ่มโมดูลัส และความต้านทานต่อแรงดึง ข้อเสียของสารตัวเร่งพวกไดไธโอคาบาเมต คือ ถ้าในน้ำยางมีสารประกอบทองแดงจะเกิดปฏิกิริยาให้ คอปเปอร์ ไดไธโอคาบาเมต (copper dithiocamate) มีสีน้ำตาลแดงทำให้ผลิตภัณฑ์มีตำหนิ

2.4.2.3 ไธยูแรม (thiurams) เป็นสารตัวเร่งที่นิยมใช้เป็นตัวช่วยสารเร่งพวกไดไธโอคาบาเมต สารตัวเร่งพวกไม่มีรส ไม่มีกลิ่น ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์โปร่งใส หรืออุปกรณ์ที่สัมผัสกับอาหารได้ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ไธยูแรมเป็นสารตัวเร่ง เช่น ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เภสัชกรรม อุปกรณ์ว่ายน้ำ เป็นต้น สารตัวเร่งพวกนี้ได้แก่ เตตระเมทธิลไทยูแรม โมโนซัลไฟด์ (tetramethyl thiuram monosulphide, TMTM), เตตระเมทธิลไทยูแรม ไดซัลไฟด์ (tetramethyl thiuram disulphide, TMTD), เตตระไดเมทธิล ไทยูแรม ไดซัลไฟด์ (tetradimethyl thiuram disulphide, TDTD)

2.4.2.4 ไธอาโซล (thiazole) เป็นสารตัวเร่งที่ใช้เป็นตัวช่วยสารตัวเร่งพวกไดไธโอคาบาเมตเช่นกันจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มี modulus สูงการใช้ไธอาโซลในน้ำยางต้องระมัดระวัง เพราะอาจทำให้น้ำยางเป็นก้อนหรือครีมได้สารตัวเร่งพวกนี้ได้แก่ เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (2-mercaptobenzothiazole, MBT), ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (zinc mercaptoben thiazole, ZMBT)

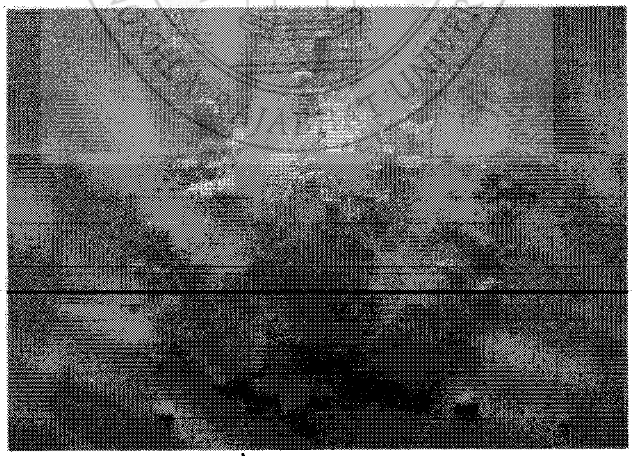
2.4.3 สารทำให้คงรูป (vulcanizing agent)

สารทำให้คงรูปเป็นสารเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ หรือทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางเป็นแบบตาข่ายในโมเลกุล ทำให้ยางมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เช่น อุณหภูมิสูงยางไม่เหลวเยิ้ม หรืออุณหภูมิต่ำยางไม่แข็งเปราะ

สารทำให้ยางคงรูป ที่นิยมใช้ในน้ำยาง ได้แก่ กำมะถัน สารประกอบของกำมะถันสารพวกเปอร์ออกไซด์ กำมะถัน เป็นสารทำให้ยางคงรูป ที่นิยมใช้มากที่สุด ทั้งในยางแห้งและในน้ำยางแต่กำมะถันที่ใช้ในน้ำยาง จะต้องเป็นชนิดที่มีขนาดอนุภาคที่เล็ก ปริมาณที่ใช้น้อยกว่าในยางแห้ง เพราะการนำน้ำยางมาแปรรูปไม่ต้องผ่านการบด (mastication) ให้โมเลกุลเล็กลง ซึ่งต้องการกำมะถันมาทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางใหม่ นอกจากนั้นผลิตภัณฑ์จากน้ำยางมักต้องการโมดูลัสต่ำไม่จำเป็นต้องใช้กำมะถันมาก ดังนั้นปริมาณกำมะถันที่ใช้มีค่าประมาณ 0.5-2.5 phr

2.4.4 สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติมเป็นสารที่เติมเข้าไปในกระบวนการทำผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง เพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น ลดต้นทุนในกระบวนการผลิต ทำให้เกิดสี เพิ่มความแข็งแรง เช่น ฟูมซิลิกา (fumed silica) มีผลมากต่อความแข็งแรง มีขนาดอนุภาค 5-50 นาโนเมตร จะไม่มีรูพรุน และมีพื้นที่ผิว 50-600 m^2/g มีความหนาแน่น 160–190 kg/m^3



รูปที่ 2.2 fumed silica

(ที่มา: http://vietnamese.paintflatteningagent.com)

2.4.4.1 การเตรียม เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่าง $SiCl_4$ กับไอน้ำในเปลวไฟของไฮโรเจน และออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง 1,400 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวให้ซิลิกาออกมาซิลิ

กานี้มีหมู่ไฮดรอกไซด์ที่ผิวน้อยกว่าซิลิกาชนิดตกตะกอน และมีเนื้อซิลิกาถึง 99.8 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำปนอยู่ไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ มีฤทธิ์เป็นกรด มีขนาดอนุภาคเล็กมากราคาแพง แม้ใช้เป็นสารตัวเติมในยางปริมาณน้อย ก็สามารถเสริมประสิทธิภาพช่วยให้สมบัติทางฟิสิกส์ของยางดีขึ้นมาก

2.4.4.2 การใช้งานในผงฟูมซิลิกา ทั่วไปมีสารที่ทำให้เกิดความแข็งและมีสารที่ไม่ทำให้เกิดกลุ่มก้อนราวกับซิลิกาเจล ทำหน้าที่เป็นสารดูดซับความชื้น ซึ่งมักจะถูกใช้ในเครื่องสำอางที่ให้คุณสมบัติของแสงที่ฟุ้งกระจาย จะถูกใช้เป็นแสงที่มีฤทธิ์กัดกร่อนในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ยาสีฟัน การใช้งานด้านอื่นๆ ได้แก่ สารตัวเติมในยางซิลิโคนและการปรับความหนืดในสีเคลือบ หมึกพิมพ์ กาว และเรซิน สังเคราะห์แบบไม่อิ่มตัว นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุหลักในการผลิตแผงฉนวนสุญญากาศ

2.5 ปัญหาของการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม (เชาวน์, 2553)

บนผิวซิลิกามีหมู่ไซลานอลในปริมาณมาก ซึ่งหมู่ไซลานอลทำให้อนุภาคของซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกัน (filler-filler interaction) สูง ทำให้ซิลิกาอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่เพราะมีแรงดึงดูดที่ยึดของซิลิกาเข้าด้วยกันคือจะมีพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีความแข็งแรงค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้ ซิลิกาจึงแตกตัว และกระจายตัว ในยางได้ยากกว่าสารตัวเติมบางชนิด การใช้ซิลิกาจำนวนมากเป็นสารตัวเติมในยาง ทำให้กลุ่มซิลิกาอยู่ชิดกันมากขึ้นจนทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างกลุ่มก้อนซิลิกากับ ซิลิกาด้วยเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายที่เรียกว่า “โครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติม (filler-filler network)” ซึ่งทำให้ยางคอมเปานด์มีความหนืดสูงขึ้น ทำให้กระบวนการแปรรูปทำได้ค่อนข้างยาก และทำให้สิ้นเปลืองพลังและระยะเวลามากยิ่งขึ้น

การเติมสารเติมแต่งบางชนิดที่สามารถเข้าไปจับกับหมู่ไซลานอลได้ง่ายลงไปจะช่วยทำให้กลุ่มก้อนของซิลิกาแตกตัวออกได้ง่ายยิ่งขึ้น และความหนืดของยางคอมเปานด์ลดลง ตัวอย่างของสารเติมแต่งดังกล่าวได้แก่ ซิงค์ออกโตเอต (zincoctoate) หรือ เฮกซะเมทธิลีนเตตรามีน (Hexamethylenetetramine, HEXA) รวมถึงสารตัวเร่งปฏิกิริยาคงรูปในกลุ่มกัวนิดีน เช่น ไดฟีนิลกัวนิดีน (diphenyl guanidine, DPG) เป็นต้น

ปัญหาสำคัญเมื่อใช้ซิลิกา เป็นสารตัวเติม คือเรื่องการคงรูป เพราะบนผิวซิลิกามีหมู่ไซลานอลที่สามารถดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาคงรูปที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น ไดฟีนิลกัวนิดีน (diphenyl guanidine, DPG) รวมถึงสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสี (Zinc complex) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน การดูดซับดังกล่าวทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีมีปริมาณลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีระดับของการคงรูปลดลงด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปผู้ผสมเคมียางสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้โดยการเติมสารประกอบในกลุ่มไกลคอล หรือกลุ่มเอมีนลงไป เพราะสารประกอบเหล่านี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิ

กา ทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีที่ถูกดูดซับโดยหมู่ไซลานอลมีปริมาณลดลง ทำให้ปฏิกิริยาคงรูปเกิดได้เร็วขึ้น ตัวอย่างที่สำคัญของสารประกอบเหล่านี้ได้แก่ ไดฟีนิ กัวนดีน (diphenyl guanidine, DPG) พอลิเอทธิลีนไกลคอล (poly ethylene glycol, PEG) ไตรเอทธาโนลามีน และเฮกซะเมทธิลีนเตตรามีน (Hexamethylenetetramine, HEXA) เป็นต้น นอกจากการเติมสารประกอบดังกล่าวแล้ว การปรับลำดับการเติมสารเคมีลงไปในเครื่องผสม เช่น การเติม ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ลงไปในช่วงท้ายของการผสมซึ่งช่วยลดปัญหาการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีได้เช่นกัน แต่ซิงค์ออกไซด์กระจายตัวได้ยากในยาง การผสมในลำดับหลังๆ ไม่ควรกระทำ เพราะอาจส่งผลต่อสมบัติของยางได้

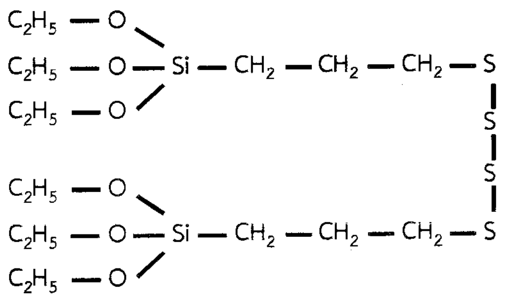
การเติมสารประกอบในกลุ่มดังกล่าว นอกจากจะช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปแล้ว สารประกอบเหล่านี้ยังช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาอีกด้วย ช่วยให้โครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกาถูกทำลายได้ง่ายขึ้น ทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวได้ง่ายขึ้น ความหนืดของยางคอมเปานด์ ลดลง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น ปริมาณของสารเคมีที่แนะนำให้ใช้นั้นโดยตรงกับปริมาณของซิลิกา เช่น ใช้พอลิเอทธิลีนไกลคอล (poly ethylene glycol, PEG) ประมาณ 8-10 ส่วนโดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับปริมาณของซิลิกา

2.6 ฟูมซิลิกา (เชาวน์, 2553)

ฟูมซิลิกา หรือซิลิกาที่ได้จากการระเหยเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ประกอบด้วยน้ำน้อยกว่า 2% สามารถเตรียมได้จากการเผาสารประกอบซิลิกอนจนระเหยเป็นไอและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคที่เล็กมาก ฟูมซิลิกาเป็นสารเติมแต่งที่ช่วยในการเสริมแรงได้ดี ซึ่งให้ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการขัดถูดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยางซิลิโคนฟูมซิลิกาเป็นตัวหน่วงทำให้ยางใช้เวลาในการขึ้นรูปนานขึ้น ซึ่งทำให้ต้องเพิ่มปริมาณของสารตัวเร่ง หรือเอมีนมากขึ้น ในกระบวนการขึ้นรูปควรใช้พวกแวกซ์ พอลิเอทิลีน หรือสารหล่อลื่นเพื่อหลีกเลี่ยงการเกาะกับลูกกลิ้ง หรือการยึดติดกับแม่พิมพ์หลังจากที่ยางสุกแล้ว

2.7 บทบาทของสารคู่ควบไซเลน (silane) (เชาวน์, 2553)

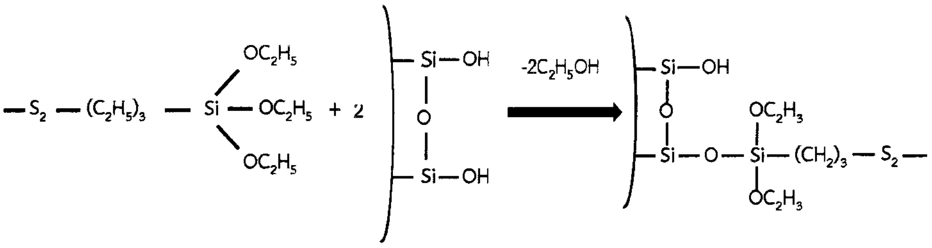
การเติมสารควบคู่ไซเลนลงไปทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกาสูงขึ้น เพราะสารคู่ควบไซเลนประกอบด้วย หมู่ฟังก์ชันเคมี 2 หมู่ที่แตกต่างกัน คือ หมู่อัลคอกซี่ (alkoxy group) เช่น หมู่เมท ธอกซี่ ($-OCH_3$) หรือหมู่เอทธอกซี่ ($-OC_2H_5$) และหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ (organo-functionol group) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



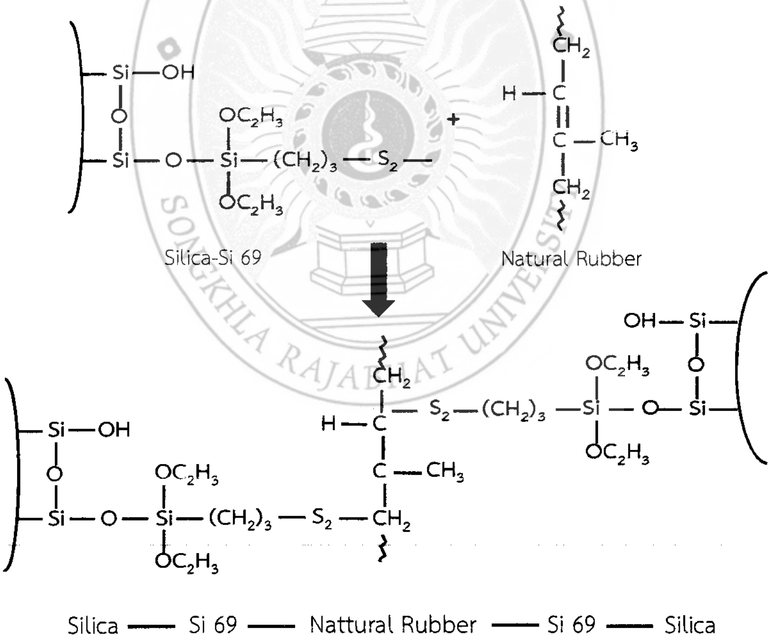
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน Si69
(ที่มา: เชาวน์, 2553)

เมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงไป หมู่อัลคอกซีซึ่งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของโมเลกุลจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกาในระหว่างกระบวนการผสมเกิดเป็นพันธะไซลอกเซนที่มีความเสถียรและมีการปล่อยแอลกอฮอล์ออกมา ทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกันลดลงเนื่องจากปริมาณหมู่ไซลานอลที่ลดลงจากการเกิดปฏิกิริยากับสารคู่ควบไซเลนทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาค ซิลิกานั้นมีกำลังอ่อนลง ดังในกลไกปฏิกิริยาของภาพที่ 2.4 และ 2.5 ซิลิกาจึงสามารถแตกตัว และกระจายตัวในยางได้ง่ายขึ้น ยางคอมเปานด์ที่ได้ก็มีความหนืดลดลง สามารถไหลและขึ้นรูปได้ง่าย ส่วนหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งช่วยทำให้ซิลิกาเข้ากับยางได้ง่ายในระหว่างกระบวนการผสมเพราะหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์นี้มีความเป็นขั้วต่ำจึงเข้ากับยางได้ง่าย นอกจากนี้ หมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ของสารคู่ควบไซเลนส่วนใหญ่ยังมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบซึ่งในระหว่างการอบคงรูป กำมะถันในสารคู่ควบไซเลนจะเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน (sulfur vulcanization reaction) เกิดเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น ทำให้สารคู่ควบไซเลนทำหน้าที่เปรียบเสมือนสะพานเชื่อมระหว่างซิลิกากับยาง ทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาจึงสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ การเติมสารควบไซเลนลงไปจึงส่งผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้นโดยเฉพาะค่าโมดูลัสความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขัดถู เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วการเติมสารควบคู่ไซเลนลงไปในปริมาณเล็กน้อยช่วยทำให้ยางคงคงรูปมีความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตก (cut growth resistance) สูงสุด แต่ในกรณีที่ต้องการยางคงรูปที่มีความต้านทานต่อการขัดถูสูงสุดจำเป็นต้องเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณมากขึ้น นอกจากสมบัติเชิงกลแล้วสารคู่ควบไซเลนยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ของยางคงรูปอีกด้วยโดยเฉพาะการลดความร้อนสะสม (heat build up) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน ตัวอย่างของสารคู่ควบไซ

เลนที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ ไตรเอทธอกซี่ไซลิลโพรพิลเตตราซัลไฟด์ (bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide, Si-69) เมอร์แคพโตโพรพิลไตรเอทอกซี่ไซเลน (3-thiocyanato-propyl-triethoxysilane, Si-264) เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการปรับปรุงผิวของซิลิกาด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69
(ที่มา: เชาวน์, 2553)



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 แล้ว กับยางธรรมชาติ
(ที่มา: เชาวน์, 2553)

2.8 สมบัติของยางวัลคาไนซ์ (ชินรัตน์, 2558)

2.8.1 การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)

ยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม เมื่อถูกกดไว้นานๆ โมเลกุลของยางเกิด การไหลไปตามการกดนั้น พันธะเชื่อมโยงที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางเป็นตัวที่ดึงยางให้คืนรูปกลับมาเมื่อได้เอาแรงกดนั้นออกไป การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดคือค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการรักษาสมบัติความยืดหยุ่นของยาง หลังจากได้รับแรงกดระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งคำนวนเป็น %

2.8.2 ความต้านทานต่อการดึง (tensile strength)

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบของไอโซพรีนที่ต่อเนื่องกันอย่างเป็นระเบียบ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ก่อนใช้งานต้องมีการบด (masticate) เสียก่อน เนื่องจากโมเลกุล ของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูง ทำให้ยางธรรมชาติตกผลึก ได้ง่ายเมื่อดึง หรือยืดผลึกที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวเสริมความแข็งแรงของยาง ทำให้ยางธรรมชาติแข็งแรงโดยตัวของมันเอง โดยการออกสูตรยางไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ (reinforcing filler) เช่น เขม่าดำ หรือถ้าใส่ก็จะเลือกสารโดยไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์ ที่มีความยืดหยุ่นสูง และทนทานการออกสูตรยางธรรมชาติโดยไม่ใส่สารตัวเติม ทำให้ยางมีความสามารถในการยืดได้สูง และมีมอดูลัสต่ำความสามารถในการยืดสูง ประมาณ 700-800 เปอร์เซ็นต์ และความต้านทานต่อการดึง 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สมบัตินี้ของยางธรรมชาติเหนือกว่ายางอื่นๆ เช่น ยางสไตรีน ยางไนไตรล์ เป็นต้น ซึ่งไม่สามารถ ใช้งานได้ ถ้าไม่ใช้สารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพ เช่น เขม่าดำหรือ ซิลิกา เป็นต้น

2.8.3 ความสามารถในการยืด (elongation at break)

ยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติมสามารถยืดได้ถึงประมาณ 1,000 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่านั้น ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติจะลดลงตามปริมาณของสารตัวเติม ที่เพิ่มขึ้นและตามปริมาณของพันธะวัลคาไนซ์ สมบัติการยืดได้สูงนี้ทำให้ยางธรรมชาติสามารถ ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง เช่น สายยางยืด ยางรัดของของ และลูกโป่ง เป็นต้น

2.8.4 ความแข็ง (hardness)

ยางธรรมชาติสามารถวัลคาไนซ์ให้มีความแข็งต่างๆ กันได้ง่ายตั้งแต่นิ่มมาก เช่น (**30-50** IRHD) ไปจนถึงความแข็งของอีโบไนต์ (98 IRHD) การปรับความแข็งของยางทำได้ โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติมหรือโดยการเปลี่ยนปริมาณกำมะถัน ในช่วงของ การใช้กำมะถัน ปริมาณ ≥ 20 phr จะทำให้ยางมีความแข็งแรงคล้ายหนัง (leather–like) (พรพรรณ, 2528)

2.9 การตีโฟม

นำน้ำยางเทลงในเครื่องตีโฟม หลังจากนั้นเติมสารแค่มีเข้าไป ได้แก่ โพแทสเซียมโอลิเอต ปรับความเร็วช้าสุดปั่นเป็นเวลา 7 นาที เติม กำมะถัน ซิงค์ไดเอธิลไดไธโอคาบาเมต ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไธอะโซล ปั่นด้วยความเร็วเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ยางฟูได้ปริมาตรความสูง 3-4 เท่าเติม ซิงค์ออกไซด์ สารคู่ควบไซเลน ปั่นด้วยความเร็วช้าสุดเป็นเวลา 3 นาที เติม ไดฟีนิลกัวนิดีน ปั่นเป็นเวลา 3 นาที และโซเดียมซิลิฟลูออไรด์ ปั่นเป็นเวลา 1 นาที การปรับความช้า เร็วของเครื่องตีโฟมมีผลต่อการขึ้นรูปและความเนียนละเอียดของโฟมยาง

2.10 การเทเข้าเบ้าและการจับตัว

เบ้าที่ใช้สำหรับโฟมยางเป็นเบ้าอะลูมิเนียม เนื่องจากเบ้าเป็นตัวนำความร้อนได้ดีหลังจากที่ได้เติมโซเดียมซิลิฟลูออไรด์ (**sodium silifluoride, SSF**) ลงในน้ำยางแล้ว ก็ให้เทลงในเบ้าที่จัดเตรียมไว้ และปิดฝาเบ้าจะเกิดการจับตัวของฟองยางในเบ้านั้น ปฏิกิริยาการจับตัวมีดังนี้

$$Na_2SiF_6 \longrightarrow 2Na^{-} + SiF_6^{2-} \quad (1)$$

$$SiF_6^{2-} + 4H_2O \longrightarrow Si(OH)_4 + 4H^{-} + 6F^{-} \quad (2)$$

โปรตอนที่เกิดขึ้นในสมการที่ 2 ทำให้น้ำยางมี pH ลดลงพร้อมกับการเกิด $Si(OH)_4$ ซึ่งอาจดูดพวกสบู่จากอนุภาคของน้ำยาง ทำให้โฟมยางเกิดการจับตัวขึ้นโดยทั่วไปจับตัวภายในระยะเวลา 5–10 นาที ซึ่งพิจารณาได้จากโฟมยางที่ไหลล้นจากเบ้าในขณะที่เท

2.11 การล้าง

ภายหลังการวัลคาไนซ์จะเอาโฟมยางออกจากเบ้า แล้วนำไปล้างด้วยน้ำ อาจทำโดยการนำโฟมยาง ผ่านชุดของระบบน้ำฉีดล้างและผ่านลูกกลิ้งที่บีบน้ำออก หรืออาจใช้ เครื่องเซนตริฟิวจ์ (hydro–extractor) ซึ่งในกรณีนี้การใช้เครื่อง เซนตริฟิวจ์ต้องสลับการหมุนเอา น้ำออกจากโฟมยาง

และปล่อยให้น้ำไหลลงไปล้างโฟมยาง การล้างโฟมยางเป็น การล้างเอาสิ่งเจือปนที่สามารถละลายน้ำได้ออกไป ทำให้อายุการใช้งานของโฟมยางนานขึ้นและจะมีกลิ่นดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าหากล้างน้ำนานเกินไปจะทำให้ Antioxidant ที่มีอยู่ตามธรรมชาติหรือที่ใส่เข้าไปถูกสกัดออกไปหมดได้ ทำให้ยางเสื่อมเร็วได้

2.12 การทำให้โฟมยางแห้ง

ภายหลังจากการล้างน้ำแล้ว ให้นำโฟมยางไปตากในเตาอบที่มีอากาศหมุนวนและควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส ระหว่างการตากแห้งนี้ต้องวางผลิตภัณฑ์อย่างระมัดระวัง เพื่อป้องกันการเสียรูปของโฟมยาง การวางโฟมยางห้ามวางซ้อนกัน เพราะเมื่อยางแห้งแล้วจะแยกออกจากกันได้ยาก

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Alzoubi, Tanbour, &Al-Waked, 2011 การทดสอบแรงอัดที่อุณหภูมิ และอัตรา ความเครียดที่แตกต่างกันของตัวอย่างทดสอบ polyurethane (PU) ที่มีความหนาแน่นต่างกันการทดสอบการบีบอัดทำได้โดยใช้เครื่องมือ Lloyd LR5K Plus ที่อัตราความเครียดตั้งแต่ 0.033-0.267 s^{-1} การทดสอบได้ดำเนินการในตู้ที่มีการกำหนดอุณหภูมิและความชื้น เพื่อให้มีการเปรียบเทียบที่ถูกต้องในการบีบอัด ตัวอย่างโฟม PU ทั้งหมดได้รับการคัดเลือกจากบล็อกโฟมเดียวกัน แต่มีความหนาแน่นของตำแหน่งต่างกัน นอกจากนี้ตัวอย่างโฟมทั้งหมดได้ผ่านการทดสอบตามทิศทางการขึ้นรูปโฟม (ความหนา) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการตอบสนองของตัวอย่างโฟม PU ภายใต้การทดสอบการบีบอัดจะมีความนิ่มในอุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อดำเนินการในอัตราความเครียดคงที่ ที่อุณหภูมิคงที่ตัวอย่างของโฟม PU จะมีอัตราการลื่นที่สูงขึ้น พบว่าทั้งพลังงานเก็บ และการกระจายตัวขึ้นอยู่ กับความหนาแน่นของโฟมอุณหภูมิและอัตราความเครียด

Kapgate & Das, 2014 ศึกษาผลกระทบของการปรับสภาพผิวของฟิลเลอร์-ฟิลเลอร์ และอันตรกิริยาของยาง-ฟิลเลอร์ในยางไนไตรล์ที่ประกอบด้วยซิลิกา จากการศึกษาทางสัณฐานวิทยาแสดงการกระจายตัวของสารตัวเติมที่ดีขึ้นในวัสดุผสมที่มีซิลิกา การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ และการวิเคราะห์แบบไดนามิกพบว่าซิลิกาที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวมีอันตรกิริยาของฟิลเลอร์-ฟิลเลอร์ (silica agglomerates) แต่กลับกันพบว่าซิลิกาที่มีการปรับสภาพผิวมีอันตรกิริยาของยาง-ฟิลเลอร์ที่ดีขึ้นสำหรับคอมโพสิตที่เติม organosilane แบบ bifunctional

Sae-Oui, Thepsuwan, &Hatthapanit, 2004 การศึกษาในครั้งนี้ได้เลือกชนิดของสารคู่ควบอัลคอกซี่ไซเลนซึ่ง ได้แก่ bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfane (Si-69) และ 3-thiocyanatopropyl triethoxy silane (Si-264) เพื่อเปรียบเทียบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพต่ำ (CV), การวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-EV) และ การวัลคาไนซ์ที่มีประสิทธิภาพ (EV) ผลการทดลองพบว่าการเติมสารคู่ควบอัลคอกซี่ไซเลนไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความสามารถในกระบวนการผลิตเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลของยางวัลคาไนซ์ ผลของชนิดสารคู่ควบไซเลนต่อกระบวนการแปรรูปพบว่าไม่ขึ้นกับระบบการวัลคาไนซ์ เมื่อเทียบ Si-69 Si-กับ 264 สามารถทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวซิลิกาได้ง่ายขึ้นเนื่องจากโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่และความหนืดต่ำ Si-264 สามารถลดอันตรกิริยาของฟิลเลอร์-ฟิลเลอร์ได้มากกว่า Si-69 ซึ่งจะได้ผลที่ดีกว่า ผลของประเภทของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของการวัลคาไนซ์ขึ้นอยู่กับระบบการวัลคาร์ไนซ์ CV และ semi-EV Si-264 มีการเสริมแรงมากกว่า Si-69 อาจเป็นผลมาจากการเข้ากันระหว่างยาง–ฟิลเลอร์ที่ดีขึ้น การกระจายตัวที่ดีขึ้น และสถานะการวัลคาไนซ์ที่สูงขึ้นเมื่อ Si-69 ถูกแทนที่ด้วย Si-264 นั่นคือ Si-69 ให้การเสริมแรงที่ดีกว่า Si-264 ผลกของ Si-69 มีอิทธิพลเฉพาะในระบบ EV เท่านั้น

Julie Chandra, Bipinbal, & Sunil, 2017 การศึกษาสมบัติเชิงกลแบบไดนามิกของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและซิลิกาด้วยอุณหภูมิต่างกัน (40 °C, 70 °C และ 100 °C) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เชิงกลแบบไดนามิกและ rotorless rheometer, RPA ได้ศึกษาวัสดุที่มีปริมาณซิลิกาถึง 40 phr พบว่าค่าโมดูลัสแบบไดนามิกต่อความถี่ที่ได้จากเครื่องมือทั้งสองมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลแบบไดนามิกของยางประกอบสามารถกำหนดได้แม้ในระหว่างการวัลคาไนซ์ ความสัมพันธ์อาจเกิดขึ้นระหว่างชุดข้อมูลทั้งสองทำให้สามารถคาดการณ์ชุดชุดหนึ่งได้จากที่รู้อีกชุดหนึ่ง ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวสารคู่ควบไซแลน (bis-3-triethoxysilylpropyl tetrasulphide, TESPT) ต่อความหนืด (viscoelasticity) สมบัติทางกลดีขึ้นเมื่อมี TESPT นอกจากนี้ยังพบความเสถียรทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อมี TESPT การสแกนอิเล็กตรอน micrographs พบว่ามีการกระจายตัวของสารตัวเติมที่ดีขึ้นในกรณีของซิลิกาคอมโพสิตซิลิเนต

Katueangngan, Tulyapitak, Saetung, Soontaranon,& Nithi-uthai, 2016 ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดแทนยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และไฮโดรเจนเอสเทอร์ไลต์ต่ำ (HTNR) โดยการควบคุมอีพอกไซด์ และความแตกต่างของยางธรรมชาติตามด้วยการลดปฏิกิริยาของยางธรรมชาติคาร์บอนิลเทเลเทคที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเพื่อปรับปรุง อันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติม

ซิลิกาด้วยปริมาณซิลิกาคงที่ 30 phr เมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกาที่ไม่มีตัวทำปฏิกิริยากับตัวประสาน silane ระยะเวลาในการเผาไหม้ และการบ่มที่สั้นลงทำให้ได้ผลของเพย์นที่ต่ำลง และความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยางธรรมชาติที่เติมด้วยซิลิกาด้วยการมีตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องที่ 2.4 (phr) นี่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของกลุ่มไซโลแลนที่มีการปรับตัว และความเข้ากันได้ระหว่างตัวสารตัวเติมที่มีการปรับสภาพผิวกับยางธรรมชาติ สำหรับสารประกอบ HTNR เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีควรผสมให้มีอุณหภูมิเริ่มต้น 300 °C เวลาในการผสม 12 นาที และความเร็วโรเตอร์ 60 รอบ/นาที อย่างไรก็ตาม TESPT มีประสิทธิภาพมากกว่า HTNR

Yamazaki R., Fujii S., Nakamura Y., & NagataK., 2014 ศึกษาการตกตะกอนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย สารประกอบ 3-aminopropyltriethoxysilane (A) และ 3-merkaptopropyltrimethoxysilane (B) ความต้านทานการฉีกขาด และการยืดตัวของวัสดุผสมมีค่าสูงกว่าวัสดุที่เคลือบด้วยอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วย A หรือ B โดยการเติมส่วนผสม A และ B โดยใช้วิธีผสม และการปรับสภาพผิวด้วยส่วนผสมของ A และ B ที่มีโครงสร้าง dialkoxy อย่างไรก็ตามการตรวจสอบเหล่านี้ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลทั้งหมดสามข้อดังกล่าวได้อย่างสมบูรณ์ ในกรณีของชั้นที่ผ่านการบำบัดด้วยสารคู่ควบไซเลนซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวพบว่ามีส่วนประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเครียดสูงในแนวเดียวกันความเครียดการฉีกขาด และการยืดตัวสูงเมื่อฉีกขาด

Akadasi, Hidawale, & Kapadi, 2004 ในงานวิจัยนี้เถ้าลอยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยตัวประสานคู่ควบไซแลน (Si69) ถูกนำมาใช้เป็นสารตัวเติมยาง polybutadiene (PBR) การเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุผสมที่มีเถ้าลอยที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้วและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวพบว่าวัสดุผสมที่มีเถ้าลอยที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้วมีคุณสมบัติเสริมแรงดีขึ้น

บทที่ 3
สารเคมี อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 น้ำยางและสารเคมี

3.1.1 น้ำยางข้น ร้อยละ 60 ชนิดแอมโมเนียสูง (concentrated latex 60% HA, NR latex) มีลักษณะสีขาว ทำหน้าที่เป็นน้ำยาง ผลิตโดยบริษัทจะนะน้ำยางข้น จำกัด อ.จะนะ จังหวัดสงขลา ประเทศไทย

3.1.2 กำมะถัน (sulphur, S) มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ผลิตโดยบริษัท กรุงเทพเคมีอุตสาหกรรม จำกัด อ.เมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ ประเทศไทย

3.1.3 ซิงค์ไดเอธิลไดไธโอคาร์บาเมต (zinc diethyl dithiocarbamate, ZDEC) มีลักษณะเป็นผงสีขาวครีม ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง (accelerator) ในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เป็น สารตัวเร่งใน กลุ่มไดไธโอคาร์บาเมต ผลิตโดยบริษัท ไชน่า เนชั่นแนล เคมิคอล คอนสตรักชัน (China National Chemical Construction Corp.) ประเทศจีน

3.1.4 ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไธอะโซล (zinc mercaptobenzothiazole, ZMBT) มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองละเอียด ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง (accelerator) ที่ใช้ในการทำโฟมยาง ผลิตโดยบริษัท ไชน่า เนชั่นแนล เคมิคอล คอนสตรักชัน (China National Chemical Construction Corp.) ประเทศจีน

3.1.5 ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด ชนิดไวท์ซีล (white seal) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (activator) เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของตัวเร่ง ให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น ผลิตโดยบริษัท อุทิศอุตสาหกรรมเคมี จำกัด แขวงบุคคโล เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

3.1.6 โพแทสเซียมโอลิเอต (potassium oleate) มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีเหลืองทองคล้ายน้ำมัน ทำหน้าเป็นสารที่ใช้ในการทำให้น้ำยางเป็นฟองในโฟม ทำให้น้ำยางเสถียร ไม่ให้น้ำ

ยางจับเป็นเม็ดหรือเป็นก้อน ช่วยลดแรงตึงผิวของยาง ผลิตโดยบริษัท ดรากอน อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ประเทศไทย

3.1.7 ไดฟีนิลกัวนิดีน (diphenyl guanidine, DPG) มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด ทำหน้าที่ให้ฟองยางเสถียร ช่วยในการคงสภาพของโฟมให้นานขึ้น ทำให้ผิวของโฟมเนียนสวย ผลิตโดยบริษัท อุทิศอุตสาหกรรมเคมี จำกัด แขวงบุคคโล เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

3.1.8 โซเดียม ซิลิโคฟลูออไรด์ (sodium silicofluoride, SSF) มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด ทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้น้ำยางจับตัวในกระบวนการทำโฟมยาง ทำให้เกิดการเจล และคงสภาพโฟม ผลิตโดยบริษัท เหอเป่ย โดเมย์โด จำกัด (Hebei Domydo Co., Ltd.) ประเทศจีน

3.1.9 ฟูมซิลิกา (fumed silica, SiO_2) มีลักษณะเป็นผงสีขาว น้ำหนักเบา เป็นสารตัวเติม ที่ดีที่สุดในบรรดาสารตัวเติมที่ไม่ใช่สีดำ ช่วยเสริมแรงให้กับโฟมยาง ผลิตโดย บริษัท เวคเกอ เคมิคอล ฟูมซิลิกา จำกัด (Wacker Chemical Fumed Silica (Zhangjiagang) Co.Ltd.) ประเทศจีน

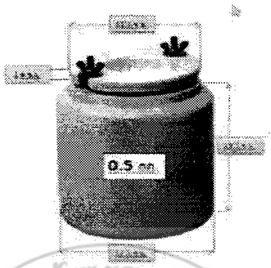
3.1.10 เบนโทไนท์ (bentonite) มีลักษณะเป็นผงสีเทา เป็นสารป้องกันการตกตะกอนของสารเคมี ช่วยในการกระจายของสารเคมีขณะบดและการดูดซับน้ำได้ดี ผลิตโดย บริษัท เทพเกษตร อุตสาหกรรม จำกัด แขวงทุ่งครุ เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

3.1.11 วัลทามอล (vultamol) มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาล ใช้เป็นสารช่วยให้สารที่บดอยู่ในรูปของดิสเพอร์ชัน ผลิตโดยบริษัทเทพเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด แขวงทุ่งครุ เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

3.1.12 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide, NH_4OH) มีลักษณะเป็นของเหลวไม่มีสี สารละลายแอมโมเนีย ร้อยละ 25 ผลิตโดยบริษัท ควอลิตี รีเอเจนต์ เคมิคอล จำกัด (Quality Reagent Chemical Co., Ltd.) ประเทศนิวซีแลนด์

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

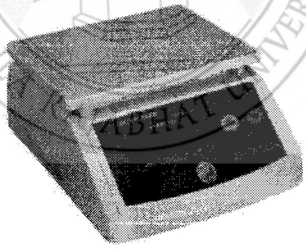
3.2.1 เครื่องบด (ball mill) มีลักษณะเป็นถังกลมรูปกระบอกสีขาว ภายในมีตัวบดเซรามิค สำหรับบดสารเคมีให้อยู่ในรูปดิสเพอร์สชัน ใช้มอเตอร์ขับเครื่องให้หมุนในแนวนอนผลิตโดย ห้างหุ้นส่วน ลิ้มการช่าง ประเทศไทย



รูปที่ 3.1 เครื่องบด (ball mill)

(ที่มา: https://www.cerawan.com)

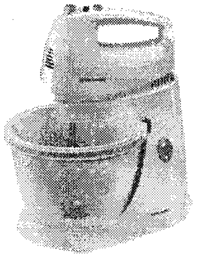
3.2.2 เครื่องชั่งไฟฟ้า (electrical balance) สำหรับชั่งสารเคมี ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น ML 3002 ชั่งได้ละเอียด 0.01 กรัม สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 3100 กรัม ผลิตโดย บริษัท เมทเลอร์โตเลโด จำกัด (Mettler Toledo Co., Ltd.) ประเทศสวิสเซอร์แลนด์



รูปที่ 3.2 เครื่องชั่งไฟฟ้า (electrical balance)

(ที่มา: http://www.merittech.co.th)

3.2.3 เครื่องผสมอาหารแบบมือจับ สำหรับทำโฟมยาง ยี่ห้อ Electrolux รุ่น EHSM2000 แรงดันไฟฟ้า 220 – 240 โวลต์ 50/60 เฮิรตซ์ อัตราการใช้ไฟฟ้า 300 วัตต์ น้ำหนัก 2.4 กิโลกรัม ผลิตโดยบริษัทพีอาร์ซี (P.R.C) ประเทศไทย



รูปที่ 3.3 เครื่องผสมอาหารแบบมือจับ

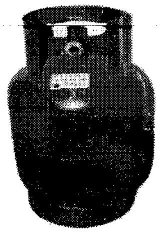
(ที่มา: http://www.unionaudiosale.com)

3.2.4 หม้อนึ่งไอน้ำ ขนาด 32 x 23 เซนติเมตร สำหรับนึ่งโฟมยาง ผลิตโดย บริษัท ทักษิณเอนเตอร์ไพรส (ไทย) จำกัด ต.บางเขน อ.เมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี ประเทศไทย

รูปที่ 3.4 หม้อนึ่งไอน้ำ

(ที่มา: https://www.pinterest.se)

3.2.5 แก๊สหุงต้ม ขนาดน้ำหนักสุทธิ 4 กิโลกรัม เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนแก่หม้อนึ่งไอน้ำ ผลิตโดยบริษัท สยามแก๊ส แอนด์ ปิโตรเคมีคัลส์ จำกัด ประเทศไทย



รูปที่ 3.5 แก๊สหุงต้ม

(ที่มา:http://homegas.blogspot.com)

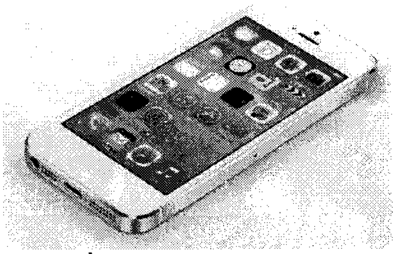
3.2.6 ตู้อบอากาศร้อน (hot air oven) สำหรับในการอบชิ้นทดสอบ เป็นตู้อบอากาศร้อนแบบดิจิตอลสามารถปรับอุณหภูมิสูงสุด ได้ 300 องศาเซลเซียส ยี่ห้อ WTB Binner ผลิตโดยบริษัท ทรูดลินจิน (Tuttlingin) ประเทศเยอรมัน

รูปที่ 3.6 ตู้อบอากาศร้อน (hot air oven)

3.2.7 แบบพิมพ์ทรงกระบอกอลูมิเนียม ขนาด 10 x 5 เซนติเมตร สำหรับใส่โฟมยางเมื่อปั่นเสร็จแล้ว ผลิตโดยบริษัท ศรีไทยไพศาลโลหะการ จำกัด แขวงบางบอน เขตบางบอน กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

รูปที่ 3.7 แบบพิมพ์ทรงกระบอกอลูมิเนียม

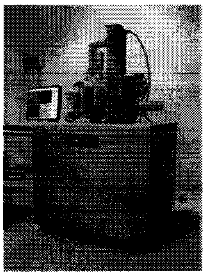
3.2.8 กล้องถ่ายรูปมือถือ ยี่ห้อ Iphone รุ่น 5s สำหรับถ่ายรูปชิ้นทดสอบ ผลิตโดยบริษัทแอปเปิล ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3.8 กล้องถ่ายรูปมือถือ

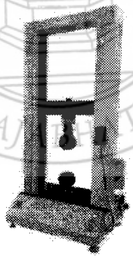
(ที่มา: https://specphone.com)

3.2.9 กล้องส่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 400 ใช้กำลังขยาย 20x 50x และ100x ผลิตโดยบริษัทอ็อกฟอร์ด อินสทรูเม้นท์ โปรวิท แอสเท็ก (Oxford Instruments provides Aztec) ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3.9 กล้องส่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.2.10 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (universal testing machine) สำหรับ ใช้งานทุกรูปแบบการทดสอบ ทั้งทางด้านแรงดึง แรงกด การดัดโค้ง แรงเฉือนการหลุดลอก การทดสอบแบบเป็นรอบ (cycle) และการทดสอบแบบขั้นบันได (step test) เป็นต้น ยี่ห้อ Narin รุ่น NRI-TS500-30B 20kN (ASTM D3574) ผลิตโดยบริษัท นรินทร์ อินสทรูเม้นท์ จำกัด (Narin Instruments Co., Ltd) ประเทศไทย



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

(ที่มา: http://chanamachine.blogspot.com)

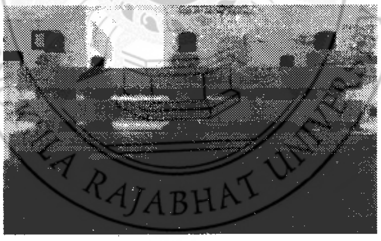
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

3.2.11 เครื่องทดสอบความแข็ง (hardness tester) สำหรับใช้วัดความแข็งของวัสดุจำพวกยางและพลาสติกชนิดความแข็งน้อย โดยใช้วิธีการเจาะแทงหัวเข็มเข้าเนื้อชิ้นงาน ชนิด Shore OO ยี่ห้อ bareiss germany รุ่น 9028-01 D-K-51206-01-00 2016-01 (ASTM D2240) ผลิตโดย บริษัท บาเลียส (Bareiss (Heinrich Bareiss Prüfgerätebau GmbH)) ประเทศเยอรมนี

รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็ง

3.2.12 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงกด (compression set tester) สำหรับ การทดสอบการวัดสมบัติของการบีบอัดของวัสดุ ยี่ห้อ Yasuda รุ่น JIS-A5756 (ASTM D 395) ผลิตโดยบริษัท ยาซูดะ ไซกิ ไซกากูซรูด (Yasuda Seiki Seisakusho, LTD) ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงกด (compression set tester)

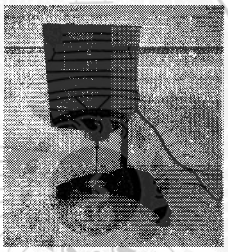
3.2.13 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) สำหรับวัดความเป็นกรด-ด่างของฟูมซิลิกา ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น SG2-FK SevenGo Portable pH Meter ผลิตโดยบริษัท เมทเลอร์ โตเลโด จำกัด (Mettler Toledo Co., Ltd.) ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

678.4
ก27
- 6 ก.ย. 2564

รูปที่ 3.13 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)

(ที่มา: http://pnpscience.weloveshopping.com)

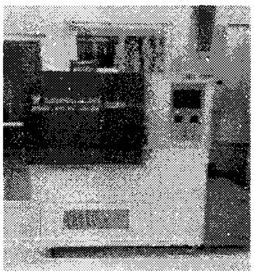
3.2.14 เครื่องทดสอบความหนืด (Brookfield viscometer) สำหรับหาความหนืดของฟูมซิลิกา (fume silica) รุ่น Model DV-II ผลิตโดยบริษัท บรูกฟิลด์ เอนจิเนียริ่ง แลบบอราทอรี จำกัด (Brookfield Engineering Laboratories Co., Ltd) ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบความหนืด (Brookfield viscometer)

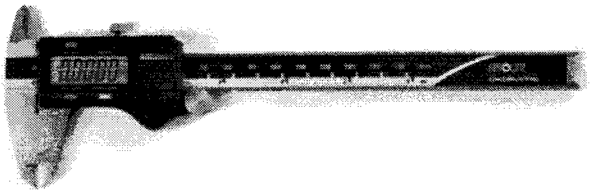
(ที่มา: http://taradlab.tarad.com)

3.2.15 เครื่องทดสอบการบ่มเร่ง (Gear aging oven) เป็นตู้ควบคุมอุณหภูมิ สำหรับทดสอบความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูงของวัสดุตัวอย่างประเภทยางและพลาสติก การทดสอบตัวอย่างเป็นแบบเคลื่อนที่หมุนตัวอย่างทดสอบและควบคุมอัตราการถ่ายเทของอากาศเข้าออกตู้ อุณหภูมิสูงสุด 300 องศาเซลเซียส ความเร็วในการหมุน 5-10 รอบต่อนาที ยี่ห้อ Yasuda รุ่น JIS-A5756 ผลิตโดย บริษัทยาซูดะ ไซกิ ไซกากูซรูด (Yasuda Seiki Seisakusho, LTD) ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบการบ่มเร่ง (Geer aging oven)

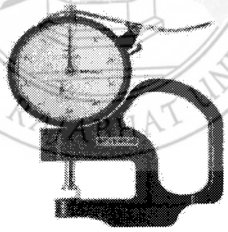
3.2.16 เวอร์เนียดิจิตอล (mitutoyo) สำหรับวัดความหนาของชิ้นทดสอบ ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น 500-197-30 ผลิตโดยบริษัทมิตูโตโย จำกัด (Mitutoyo Co., Ltd) ประเทศญี่ปุ่น ทดสอบสามารถวัดละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น 7301 Standard series ผลิตโดยบริษัทมิตูโตโย จำกัด (Mitutoyo Co., Ltd) ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3.16 เวอร์เนียดิจิตอล (mitutoyo)

(ที่มา: http://www.bbntool.co.th)

3.2.17 เครื่องวัดความหนา (micrometer thickness gauge) สำหรับวัดความหนาของชิ้นทดสอบสามารถวัดละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น 7301 Standard series ผลิตโดยบริษัทมิตูโตโย จำกัด (Mitutoyo Co., Ltd) ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3.17 เครื่องวัดความหนา (micrometer thickness gauge)

(ที่มา: http://www.bbntool.co.th)

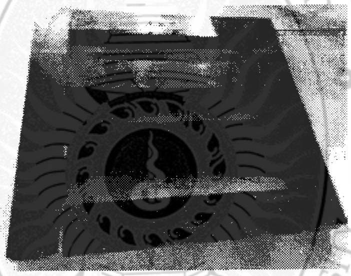
3.2.18 กระบอกเข็มฉีดยา ยี่ห้อ nipro ขนาด 10 มิลลิลิตร และ 20 มิลลิลิตร สำหรับป้อนสารเคมีที่เป็นของเหลว ผลิตโดยบริษัท ที ไอ เอส เอฟ จำกัด อำเภอเมืองลำพูน จังหวัดลำพูน

รูปที่ 3.18 กระบอกเข็มฉีดยา

(ที่มา: http://essixthai.weloveshopping.com)

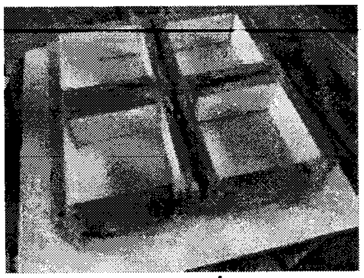
3.2.19 แบบพิมพ์

- แบบพิมพ์ทดสอบสมบัติด้านการดึงยืด (Tensile)
  ขนาด 25.4 มิลลิเมตร × 139.7 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.19 แบบพิมพ์ทดสอบสมบัติด้านการดึงยืด (Tensile)

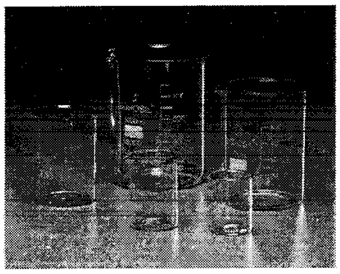
- แบบพิมพ์ทดสอบการจัดตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set)
  ขนาด 50 มิลลิเมตร × 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.20 แบบพิมพ์ทดสอบการจัดตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set)

3.2.20 เครื่องแก้ววิทยาศาสตร์/อุปกรณ์ที่ใช้

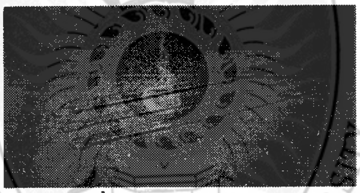
- บีกเกอร์ ขนาด 20 มิลลิลิตร 100 มิลลิลิตร และ 500 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.21 บีกเกอร์

(ที่มา: http://guru.sanook.com)

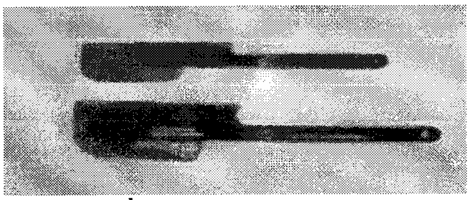
- แท่งแก้วคน



รูปที่ 3.22 แท่งแก้วคน

(ที่มา: http://sciplus.lnwshop.com)

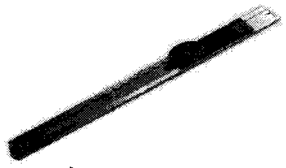
- ไม้กวนแป้งขนม



รูปที่ 3.23 ไม้กวนแป้งขนม

(ที่มา: http://ibakedhomemadebakery.blogspot.com)

- มีดคัตเตอร์



รูปที่ 3.24 มีดคัตเตอร์

(ที่มา: http://www.officemate.co.th)

- กรรไกร

รูปที่ 3.25 กรรไกร

(ที่มา: http://www.officemate.co.th)

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารเคมี

สารเคมีที่ใช้เป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ และแตกตัวกระจายในน้ำยางได้ยากเนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่ต่างกัน จึงต้องเตรียมสารเคมีให้เป็นของเหลวที่อยู่ในรูปของดิสเพอร์ชันเพื่อลดอนุภาคของสารเคมีให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกับน้ำยาง ทำด้วยโดยการบอลมิล (ball mill) เป็นการบดวัตถุโดยใช้หลักการหมุนของหม้อบด โดยมีลูกบดและสารเคมีที่ช่วยในการลดอนุภาคอยู่ภายใน

ตารางที่ 3.1 การเตรียมสารเคมีดิสเพอร์ชันสำหรับตีโฟมยางธรรมชาติ

สารเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก					
	sulphur 50%	ZMBT 50%	ZDC 50%	ZnO 50%	DPG 20%	SFF 20%
sulphur	50	-	-	-	-	-
ZMBT	-	50	-	-	-	-
ZDC	-	-	50	-	-	-
ZnO	-	-	-	50	-	-
DPG	-	-	-	-	20	-
SSF	-	-	-	-	-	20
SiO_2	-	-	-	-	-	-
Ammonia	-	-	-	-	-	-
vultamol	1	1	1	1	1	1
bentonite	1	1	1	1	1	1
น้ำกลั่น	48	48	48	48	78	78
เวลาในการบด	72	48	48	48	48	48

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

โพแทสเซียมโอลิเอต (potassium oleate) เตรียมอยู่ในรูป 20 เปอร์เซ็นต์โดยการใช้กรดโอลิเอต ผสมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำตามสูตรดังนี้

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของการเตรียมโพแทสเซียมโอลิเอต

ส่วนที่ 1	ชนิดของสารเคมี	ส่วนโดยน้ำหนัก
1	กรดโอลิอิค	100
	น้ำ	402
2	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	23.3
	น้ำ	43

*นำส่วนที่ 1 ไปอุ่นที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส แล้วเติมส่วนที่ 2 ลงไปในส่วนที่ 1 ด้วยความเร็วสูง

3.3.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกา และแอมโมเนียที่มีต่อสมบัติของ ดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา

เตรียมดิสเพอร์สชันของฟูมซิลิกาโดยใช้สูตรตามตารางที่ 3.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของฟูมซิลิกา และแอมโมเนียที่มีต่อสมบัติของดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา โดยบดด้วยเครื่องบอลมิลเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.3 สูตรที่ใช้ในการเตรียมดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา

ชนิดของสารเคมี	1	2	3	4
ฟูมซิลิกา	25	10	10	25
แอมโมเนีย	1	1	10	10
วัลทามอล	1	1	1	1
เบนโทไนท์	1	1	1	1
น้ำกลั่น	72	87	78	63
เวลาที่ใช้ในการบด	72	72	72	72

3.3.3 ศึกษาผลของสารคู่ควบไซเลน และอุณหภูมิในการเตรียม Si69-t-SiO_2 ที่มีผลต่อการขึ้นรูปและสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ

3.3.3.1 ศึกษาการเตรียมฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69

นำดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกาได้จากการทดลอง 3.3.2 (เลือกสภาวะที่ได้ดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกาที่เหมาะสม) มาแปรปริมาณของ Si69 และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69

ตามลำดับการผสมที่คำนวณได้จากเทคนิค RSM เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม ดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69 โดยทดสอบหาสภาวะที่ เหมาะสมของการตีโฟมต่อไป

ตารางที่ 3.4 สูตรการผสม Si69-t-SiO_2 ที่แปรปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

การทดลองที่	ร้อยละของ Si69	อุณหภูมิ (°C)
1	5.00	54.0
2	8.54	65.3
3	5.00	54.0
4	1.46	65.3
5	10.00	54.0
6	5.00	54.0
7	5.00	70.0
8	8.54	42.69
9	5.00	38.0
10	5.00	54.0
11	1.46	42.7
12	5.00	54.0
13	0.00	54.0

ชั่งฟูมซิลิกาดิสเพอร์สชันที่มีความหนืดที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2 และสารคู่ควบไซเลนตามลำดับการผสมดัง ตารางที่ 3.4 นำดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา และสารคู่ควบไซเลนมาผสมเพื่อปรับสภาพผิวของฟูมซิลิกาโดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นตัวปรับอุณหภูมิตามปริมาณสารคู่ควบไซเลนดังตารางที่ 3.4 เป็นเวลา 20 นาที และตั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกาปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบ ไซเลนมาทดสอบ pH และความหนืด

3.3.3.2 ศึกษาการเตรียมโฟมยางธรรมชาติที่ใช้ฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69 เป็นสารตัวเติม

นำดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (Si69-t-SiO_2) ที่เตรียมได้ทั้ง 13 การทดลอง จากการทดลองที่ 3.3.3.1 นำมาผสมลงในโฟมยาง เพื่อที่จะศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ที่เหมาะสมสำหรับการตีโฟมของผลิตภัณฑ์โฟมยาง

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ตารางที่ 3.5 น้ำหนักน้ำยางและสารเคมีที่ใช้เตรียมโฟมยางผสมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69

Chemicals	weight (phr)
NRL	100
Sulphur	3.35
ZMBT	1.67
ZDC	1.67
ZnO	6.71
Si69-t-SiO_2	1.67
potassium oleate	5.03
DPG	2.01
SSF	1.34

ทำการชั่งสารเคมีตาม ตารางที่ 3.5 โดยชั่ง NRL และ potassium oleate และนำมาเทรวมลงในหม้อของเครื่องตีฟอง เดินเครื่องด้วยความเร็วช้าสุดเป็นเวลา 7 นาที เพื่อไล่แอมโมเนียในน้ำยางออกไป เติมสารเคมี Sulphur, ZDC และZMBT ตามสูตรเทลงในหม้อของเครื่องตีฟอง เดินเครื่องด้วยความเร็วช้าสุดเป็นเวลา 5 นาที ลดความเร็วช้าสุด 1 นาที และสลับความเร็วปานกลาง 2 นาที ตีฟองให้ได้ความสูง 3-4 เท่า จากนั้นเดินเครื่องด้วยความเร็วช้าเติม ZnO และ Si69-t-SiO_2 เป็น เวลา 3 นาที และเติม DPG ลงไปเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ฟองละเอียดเล็กลง ไปอีก เมื่อครบกำหนดเวลาขณะที่เครื่องยังเดินอยู่ให้เติมโซเดียม SSF ลงไปเป็นเวลา 1 นาที หยุดเครื่องแล้วเทโฟมยางลงในเบ้าพิมพ์ที่เตรียมไว้ จับเวลาการเจลของโฟมยาง โดยการเทโฟมยางลงในกระจกนาฬิกา จากนั้นนำโฟมยางที่ได้ใส่ในกล่องที่ลมไม่สามารถพัดผ่านได้แต่สามารถยื่นมือเข้าไปจับการเจลของโฟมยาง จากนั้นสังเกตการเจลของโฟมยาง และหยุดเวลาเมื่อโฟมยางเจลแล้ว นำโฟมยางที่ได้ไปให้ความร้อนในหม้อนึ่งไอน้ำเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ และนำโฟมยางที่ได้ไปล้างน้ำแล้วบีบน้ำออก ทำเช่นนี้ หลายๆ ครั้งเพื่อขจัด สารเคมีที่ตกค้างอยู่ในโฟมยางออกมา นำโฟมยางที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนแห้ง เมื่อโฟมยางแห้งแล้วก็นำมาทดสอบการทดสอบ การยุบตัวของโฟมยาง การทดสอบแรงที่ทำให้ความหนาของโฟมยางลดลง 25% และการทดสอบสมบัติด้านการดึง

3.3.4 ศึกษาและเปรียบเทียบของปริมาณ SiO_2 กับ Si69-t-SiO_2 ที่มีต่อสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ

นำดิสเพอร์สชัน จากสูตรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์โฟมยางมาศึกษาการแปรปริมาณของ Si69-t-SiO_2 และเปรียบเทียบกับโฟมยางที่ใช้ SiO_2 อย่างเดียวโดยการแปรปริมาณดังนี้ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr ตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 น้ำหนักน้ำยางและสารเคมีที่ใช้เตรียมโฟมยาง

น้ำยางและสารเคมี	น้ำหนัก (phr)						
	A	B	C	D	E	F	G
NRL	100	100	100	100	100	100	100
Sulphur	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35
ZMBT	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67
ZDC	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67
ZnO	6.71	6.71	6.71	6.71	6.71	6.71	6.71
Fum Silica	0	0.83	1.67	2.51	-	-	-
Si69-t-SiO_2	-	-	-	-	0.83	1.67	2.51
potassium oleate	5.03	5.03	5.03	5.03	5.03	5.03	5.03
DPG	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01
SSF	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.3.2 โดยใช้น้ำหนักน้ำยางและสารเคมีตามสูตรในตารางที่ 3.6

3.3.5 การทดสอบ

3.3.5.1 การทดสอบสารเคมี

1) การทดสอบปริมาณของทั้งหมด (total solid content, TSC %)

1. ชั่งน้ำหนักของจานแก้วให้ละเอียดถูกต้องถึง 0.0001 มิลลิกรัม บันทึกน้ำหนักของจานแก้ว

2. เทฟูมซิลิกาตัวอย่างลงไปประมาณ 2.5 ± 0.5 กรัม บันทึกน้ำหนักของฟูมซิลิกาตัวอย่าง
3. เอียงจานไป-มาเพื่อให้ฟูมซิลิกากระจายทั่วจานแก้ว
4. นำจานแก้วไปอบแห้งที่ตั้งอุณหภูมิไว้แล้วที่ 100 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. เอาออกจากตู้อบแห้ง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
6. ชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักหลังการอบแห้งครั้งที่ 1
7. นำไปอบซ้ำอีกเป็นเวลา 15 นาที ทำให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักหลังจากการอบแห้งครั้งที่ 2 บันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้ ผลต่างของน้ำหนักหลังการอบครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ควร จะแตกต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม (ถ้าแตกต่างเกิน 1 มิลลิกรัม ต้องนำไปอบแห้ง ทำให้เย็นและ ชั่งซ้ำอีกจนกระทั่งผลต่างของน้ำหนักแตกต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม)
8. คำนวณ TSC ดังนี้

$$\text{TSC, \%} = (C-A) / (B-A) \times 100$$

โดย

A = น้ำหนักของจานแก้ว (กรัม)

B = น้ำหนักของจานแก้วกับฟูมซิลิกาตัวอย่าง (กรัม)

C = น้ำหนักของจานแก้วกับฟูมซิลิกาที่แห้งแล้ว (กรัม)

ให้ทำการทดลอง 2 ตัวอย่างต่อฟูมซิลิกาตัวอย่าง 1 ชุด และผลต่างของข้อมูลในฟูมซิลิกาตัวอย่าง ชุดเดียวกันไม่ควรเกิน 0.15% รายงานผลการทดลองโดยใช้ค่ากลาง

2) การทดสอบค่า pH

การทดสอบค่า pH โดยใช้เครื่องวัดค่า pH จะทำการทดสอบ 3 ครั้ง ต่อตัวอย่าง โดยจะรายงานผลด้วยค่ากลาง

3) การทดสอบสมบัติของดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา

นำฟูมซิลิกาที่เตรียมได้จากการแปรปริมาณของฟูมซิลิกาตามตารางที่ 3.9 มาทดสอบสมบัติทางกายภาพ ดังนี้

(1) การทดสอบปริมาณของทั้งหมดในสารเคมี(total solid content,TSC)

- ชั่งน้ำหนักของจานแก้วให้ละเอียดถูกต้องถึง 0.0001 มิลลิกรัม บันทึกน้ำหนักของจานแก้ว
- เทฟูมซิลิกาตัวอย่างลงไปประมาณ 2.5 ± 0.5 กรัม บันทึกน้ำหนักของฟูมซิลิกาตัวอย่าง
- เอียงจานไป-มาเพื่อให้ฟูมซิลิกากระจายทั่วจานแก้ว
- นำจานแก้วไปอบแห้งที่ตั้งอุณหภูมิไว้แล้วที่ 100 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- เอาออกจากตู้อบแห้ง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
- ชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักหลังการอบแห้งครั้งที่ 1
- นำไปอบซ้ำอีกเป็นเวลา 15 นาที ทำให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักหลังจากการอบแห้งครั้งที่ 2 บันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้ ผลต่างของน้ำหนักหลังการอบครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ควรจะแตกต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม (ถ้าแตกต่างเกิน 1 มิลลิกรัม ต้องนำไปอบแห้งทำให้เย็นและชั่งซ้ำอีกจนกระทั่งผลต่างของน้ำหนักแตกต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม)
- คำนวณ TSC ดังนี้

$$TSC, \% = (C-A) / (B-A) \times 100$$

โดยที่ A = น้ำหนักของจานแก้ว (กรัม)

B = น้ำหนักของจานแก้วกับฟูมซิลิกาตัวอย่าง (กรัม)

C = น้ำหนักของจานแก้วกับฟูมซิลิกาที่แห้งแล้ว (กรัม)

ให้ทำการทดลอง 2 ตัวอย่างต่อฟูมซิลิกาตัวอย่าง 1 ชุด และผลต่างของข้อมูลในฟูมซิลิกาตัวอย่าง ชุดเดียวกันไม่ควรเกิน 0.15 เปอร์เซ็นต์ รายงานผลการทดลองโดยใช้ค่ากลาง

(2) การทดสอบ pH

การทดสอบ pH โดยใช้เครื่องวัดค่า pH จะทำการทดสอบ 3 ครั้ง ต่อตัวอย่าง รายงานผลด้วยค่ากลาง

(3) การทดสอบความหนืด (viscosity)

โดยใช้เครื่อง Brookfield viscometerในการทดสอบ โดยการเลือกแกนหมุน (Spindle) ที่ต้องการมาต่อเข้ากับแกนกลางของเครื่องโดยให้แกนหมุน (Spindle) จุ่มลงในของเหลว จนระดับของเหลวอยู่ตรงคอคอดของแกนหมุน (Spindle) พอดีปรับให้เครื่องอยู่ในแนวระดับโดยดูที่ลูกน้ำ ปรับเลือกระดับความเร็วที่ต้องการ แล้วเปิดสวิตส์เดินมอเตอร์เครื่อง ทดสอบความหนืด 5 ครั้ง บันทึกค่าความหนืดได้ รายงานผลการทดลองโดยใช้ค่าเฉลี่ย

3.3.5.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties)

1) การทดสอบหาการยุบตัวถาวรเนื่องจากแรงอัด (compression set)

การทดสอบหาการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดทำได้โดยนำชิ้นทดสอบขนาดยาว (50±1) มิลลิเมตร กว้าง (50±1) มิลลิเมตร และหนา (25±1) มิลลิเมตร มากดด้วยเครื่องกดอัดให้มีความหนาลดลง 50% ของความหนาเดิม แล้วนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ (70±1) องศาเซลเซียสเป็นเวลา 22 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบแกะชิ้นทดสอบออกจากเครื่องกดอัด วางทิ้งไว้ 30 นาที แล้วจึงวัดความหนาของชิ้นทดสอบ

คำนวณหาการยุบตัวคิดเป็นร้อยละของความหนาเดิม

$$C_n = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \times 100$$

โดยที่ C_h คือ ความหนาที่ลดลงจากความหนาเดิมหลังจากผ่านแรงอัดแล้ว (เปอร์เซ็นต์)

t_o คือ ความหนาเดิมของชิ้นทดสอบ (มิลลิเมตร)

t_1 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังจากผ่านแรงอัดแล้ว (มิลลิเมตร)

2) การทดสอบสมบัติด้านการดึง

ทดสอบสมบัติด้านการดึงตามมาตรฐาน ASTM D3574 โดยการนำแผ่นโฟมยางมาตรฐานที่มีขนาด 25.4 มิลลิเมตร × 139.7 มิลลิเมตร วัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 จุด ให้ใช้

ค่ากลางเป็นค่าความหนาของชิ้นทดสอบ แล้วทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการดึง ใช้อัตราเร็วในการดึงชิ้นทดสอบ 500 นิวตัน วัดแรงดึงและระยะยืดแล้วนำไปคำนวณสมบัติต่างๆดังนี้

- การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength, TS)

การคำนวณความต้านทานต่อแรงดึงดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{tensile strength (N/mm}^2\text{)} = \frac{F}{A}$$

เมื่อ F = แรงที่ใช้ดึงทดสอบจนขาด (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบก่อนการดึง (ตารางมิลลิเมตร)

- การทดสอบความสามารถในการยืด (elongation at break, EB)

การคำนวณความสามารถในการยืดดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{elongation at break (\%)} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

เมื่อ L คือ ระยะห่างของรอยขีดบนชิ้นทดสอบขณะชิ้นทดสอบ (เซนติเมตร)

L_0 คือ ระยะห่างของรอยขีดบนชิ้นทดสอบก่อนการดึง (เซนติเมตร)

3) การทดสอบความแข็ง

นำชิ้นทดสอบโฟมยางที่เตรียมไว้ มาทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง ชนิด Shore OO ตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยใช้ชิ้นทดสอบ 1 ชิ้นต่อตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ทดสอบวัดความแข็ง 5 จุด รายงานผลโดยค่ากลาง

3.3.5.3 การทดสอบโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของโฟมยาง

ทำการทดสอบส่องกล้องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) โดยนำชิ้นทดสอบมาตัดให้เป็นชิ้นเล็กและบาง เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบนำชิ้นทดสอบตัดตรงรอยขาดของชิ้นทดสอบที่ได้จากการดึงติดบนแท่งโลหะจากนั้นนำยางไปเคลือบผิวด้วยทองโดย sputtering technique ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM)

บทที่ 4
ผลและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของเวลาในการบด ปริมาณฟูมซิลิกา และแอมโมเนียที่มีต่อสมบัติของ ดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกา ปริมาณแอมโนเนีย และเวลาในการบดด้วยบอลมิล โดยออกแบบการทดลองโดยใช้หลักสถิติแบบแฟคทอเรียล โดยใช้กราฟพื้นผิวตอบสนองได้ผลดังนี้

4.1.1 ผลการทดสอบค่าการทดสอบปริมาณของแข็งทั้งหมดในสารเคมี (total solid content, TSC)

ตารางที่ 4.1 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในสารเคมี (total solid content, TSC) ของดิสเพอร์สชัน

Term	Effect	Coefficient	Standard Error Coefficient	T	P
Constant	-	19.6043	0.007833	2502.85	0.000
X_1	14.8224	7.4112	0.007833	946.18	0.000
X_2	1.0282	0.5141	0.007833	65.64	0.000
$X_1 * X_2$	0.3124	0.1562	0.007833	19.94	0.000

หมายเหตุ X_1 = ฟูมซิลิกา

X_2 = แอมโมเนีย

ตารางที่ 4.2 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC)

Source	Degree of freedom	Sequence Sum of Square	Adjust Sum of Square	Adjust Mean of Square	F	P
Main Effects	2	662.284	662.284	331.142	449780.64	0.000
X_1	1	659.112	659.112	659.112	895252.99	0.000
X_2	1	3.172	3.172	3.172	4308.29	0.000
2-Way Interactions	1	0.293	0.293	0.293	397.72	0.000
$X_1 * X_2$	1	0.293	0.293	0.293	397.72	0.000
Residual Error	8	0.006	0.006	0.001		
Pure Error	8	0.006	0.006	0.001		
Total	11	662.583				

หมายเหตุ X_1 = ฟูมซิลิกา

X_2 = แอมโมเนีย

ตางรางที่ 4.1 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์สำหรับค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC) ของดิสเพอร์สชัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์จากการวิเคราะห์แบบโค๊ด (code) ได้ใน ดังตารางที่ 4.1 สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟูมซิลิกากับแอมโมเนียได้ว่า

$$Y = 19.6043+7.4112*X_1+0.5141*X_2+0.1562*X_1*X_2 \quad \text{.........................(1)}$$

$X_1 = 7.4112$

$X_2 = 0.5141$

$Y = 19.6043$

แต่เนื่องจากการใช้สมการที่ได้จากข้อมูลแบบโค๊ด (code) จะทำให้เขียนกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง ไม่สอดคล้องกับค่าจริงของตัวแปรดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลจริงของตัวแปร ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 4.3 และสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 2

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC)

Term	Coefficient
Constant	2.12855
X_1	0.962705
X_2	0.0332531
$X_1 * X_2$	0.00462840

หมายเหตุ X_1 = ฟูมซิลิกา

X_2 = แอมโมเนีย

$$Y = 2.12855 + 0.962705*X_1 + 0.0332531*X_2 + 0.00462840*X_1*X_2 \quad \ldots\ldots(2)$$

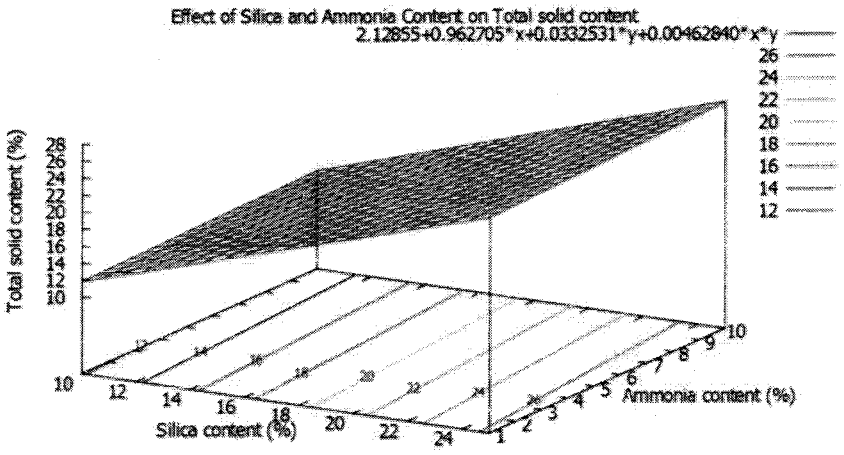
$X_1 = 0.962705$

$X_2 = 0.0332531$

$Y = 2.12855$

ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่า ค่า R-Square มีค่า 100 % และ R-Square (adjust) มีค่า 100 % แสดงถึงสมการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ทำนายผลได้อย่างแม่นยำ

จากค่า p-Value ในตารางที่ 4.3 พบว่าค่า p-Value ของฟูมซิลิกากับแอมโมเนียมีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองคือฟูมซิลิกากับแอมโมเนีย ตลอดจนอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรทั้งสองมีผลต่อค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC) อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อปริมาณของฟูมซิลิกาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟูมซิลิกาเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด เพราะเป็นสารเคมีตัวเดียวที่มีปริมาณมากที่สุดในดิสเพอร์สชัน และไม่ระเหยไปเมื่อได้รับความร้อน ทำให้ปริมาณฟูมซิลิกามากขึ้น ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดจึงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับผลของแอมโมเนียพบว่ามีผลเล็กน้อย ซึ่งอาจมาจากการระเหยไม่สมบูรณ์ของมัน เนื่องจากผิวของฟูมซิลิกาที่มีหมู่ไซลานอลยึดเกาะไว้ (พรพรรณ, 2528) เมื่อพิจารณาถึงอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรทั้งสองพบว่ามีเล็กน้อยเช่นกันทั้งนี้สืบเนื่องจากการที่มีการดูดซับของแอมโมเนียบนผิวของฟูมซิลิกา (บุญธรรม, 2532)

4.1.2 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น (density)

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าความหนาแน่น (Density) ของดิสเพอร์สชัน

Term	Effect	Coefficient	Standard Error Coefficient	T	P
Constant	-	0.98361	0.007862	125.12	0.000
SiO_2	-0.16588	-0.08294	0.007862	-10.55	0.000
NH_3	0.24472	0.12236	0.007862	15.56	0.000
X_1*X_2	0.23815	0.11907	0.007862	15.15	0.000

หมายเหตุ $X_1 = SiO_2$

$X_2 = NH_3$

ตารางที่ 4.5 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความหนาแน่น (Density)

Source	Degree of freedom	Sequence Sum of Square	Adjust Sum of Square	Adjust Mean of Square	F	P
Main Effects	2	0.262211	0.262211	0.131105	176.77	0.000
SiO_2	1	0.082552	0.082552	0.082552	111.31	0.000
NH_3	1	0.179659	0.179659	0.179659	242.24	0.000
2-Way Interactions	1	0.170146	0.170146	0.170146	229.41	0.000
X_1*X_2	1	0.170146	0.170146	0.170146	229.41	0.000
Residual Error	8	0.005933	0.005933	0.000742		
Pure Error	8	0.005933	0.005933	0.000742		
Total	11	0.438290				

หมายเหตุ $X_1 = SiO_2$

$X_2 = NH_3$

ตางรางที่ 4.4 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์สำหรับค่าความหนาแน่น (density) ของดิสเพอร์สชัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์จากการวิเคราะห์แบบโค๊ด (code) ได้ในดังตารางที่ 4.4 สามารถเขียนเป็นสมการเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟูมซิลิกากับแอมโมเนียได้ว่า

$$Y = 0.98361 - 0.08294*X_1 + 0.12236*X_2 + 0.11907*X_1*X_2 \qquad (3)$$

$X_1 = - 0.08294$

$X_2 = 0.12236$

$Y = 0.98361$

แต่เนื่องจากการใช้สมการที่ได้จากข้อมูลแบบโค๊ด (code) จะทำให้เขียนกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง ไม่สอดคล้องกับค่าจริงของตัวแปรดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลจริงของตัวแปร ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 4.6 และสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 4

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของปริมาณของความหนาแน่น (Density)

Term	Coefficient
Constant	1.36717
X_1	-0.0304637
X_2	-0.0345519
$X_1 * X_2$	0.00352815

หมายเหตุ X_1 = ฟูมซิลิกา

X_2 = แอมโมเนีย

$$Y = 1.36717 - 0.0304637*X_1 - 0.0345519*X_2 + 0.00352815*X_1*X_2 \quad (4)$$

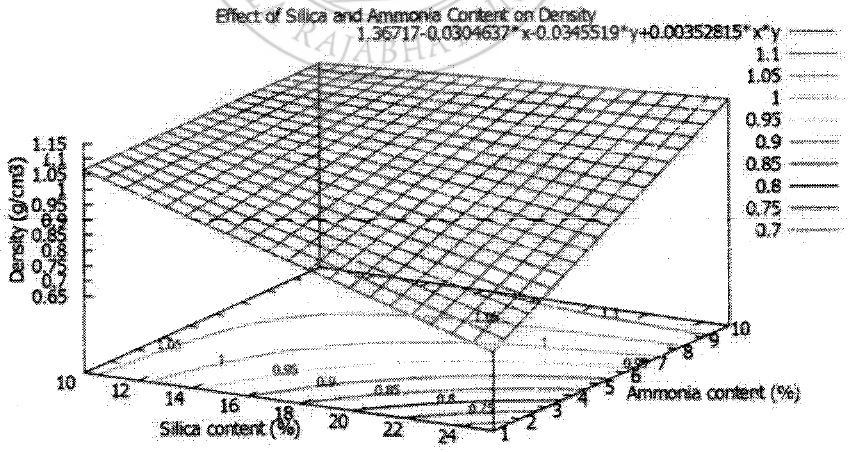
$X_1 = -0.0304637$

$X_2 = -0.0345519$

$Y = 1.36717$

ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่า ค่า R-Square มีค่า 98.65 % และ R-Square (adjust) มีค่า 98.14 % แสดงถึงสมการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ทำนายผลได้แม่นยำ

จากค่า p-Value ในตารางที่ 4.6 พบว่าค่า p-Value ของฟูมซิลิกากับแอมโมเนีย มีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองคือฟูมซิลิกากับแอมโมเนีย ตลอดจนอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรทั้งสองมีผลต่อค่าความหนาแน่น (density) อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา

จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อปริมาณของฟูมซิลิกาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เพราะฟูมซิลิกามีความหนาแน่นต่ำ (0.16-0.19 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) ดังนั้นเมื่อปริมาณของฟูมซิลิกาเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นของดิสเพอร์สชันลดลง ในขณะเดียวกันปริมาณแอมโมเนียเพิ่มมากขึ้น พบว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (พงษ์ธร, 2548) ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นของแอมโมเนียมีค่าสูงกว่าฟูมซิลิกา (0.91 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) จึงทำให้เมื่อปริมาณของฟูมซิลิกาเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นจึงเพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์ถึงผลของอันตรกิริยาระหว่างฟูมซิลิกากับแอมโมเนียต่อความหนาแน่น พบว่าตัวแปรดังกล่าวมีผลต่อความหนาแน่นเช่นเดียวกัน (พรพรรณ, 2528)

4.1.3 ผลการทดสอบค่าความเป็นกรด - เบส (potential of hydrogen ion, pH)

ตารางที่ 4.7 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าความเป็นกรด-เบส (potential of hydrogen ion, pH) ของดิสเพอร์สชัน

Term	Effect	Coefficient	Standard Error Coefficient	T	P
Constant	-	10.0742	0.01652	609.81	0.000
X_1	-0.7950	-0.3975	0.01652	-24.06	0.000
X_2	1.1217	0.5608	0.01652	33.95	0.000
X_1*X_2	-0.0017	-0.0008	0.01652	-0.05	0.961

ตารางที่ 4.8 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความเป็นกรด-เบส (potential of hydrogen ion, pH)

Source	Degree of freedom	Sequence Sum of Square	Adjust Sum of Square	Adjust Mean of Square	F	P
Main Effects	2	5.67048	5.67048	2.83524	865.72	0.000
X_1	1	1.89608	1.89608	1.89608	578.95	0.000
X_2	1	3.77441	3.77441	3.77441	1152.49	0.000
2-Way Interactions	1	0.00001	0.00001	0.00001	0.00	0.961
X_1*X_2	1	0.00001	0.00001	0.00001	0.00	0.961
Residual Error	8	0.02620	0.02620	0.00328		
Pure Error	8	0.02620	0.02620	0.00327		
Total	11	5.69669				

หมายเหตุ $X_1 = SiO_2$

$X_2 = NH_3$

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ตางรางที่ 4.8 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์สำหรับค่าความเป็นกรด (potential of hydrogen ion, pH) ของดิสเพอร์สชัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์จากการวิเคราะห์แบบโค๊ด (code) ได้ในดังตารางที่ 4.8 สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟูมซิลิกากับแอมโมเนียได้ว่า

$$Y = 10.3138 - 0.3975*X_1 + 0.5608*X_2 - 0.0008*X_1*X_2 \quad \text{.........................(5)}$$

$X_1 = -0.3975$

$X_2 = 0.5608$

$Y = 10.3138$

แต่เนื่องจากการใช้สมการที่ได้จากข้อมูลแบบโค๊ด (code) จะทำให้เขียนกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง ไม่สอดคล้องกับค่าจริงของตัวแปรดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลจริงของตัวแปรทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 4.10 และสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 6

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธ์ของปริมาณของความเป็นกรด-เบส (potential of hydrogen ion, pH)

Term	Coefficient
Constant	10.3138
X_1	-0.0528642
X_2	-0.125062
$X_1 * X_2$	-2.46914E-05

หมายเหตุ X_1 = ฟูมซิลิกา

X_2 = แอมโมเนีย

$$Y = 10.3138 - 0.0528642*X_1 + 0.125062*X_2 - 2.46914E\text{-}05*X_1*X_2 \quad \text{.............(6)}$$

$X_1 = -0.0528642$

$X_2 = 0.125062$

$Y = 10.3138$

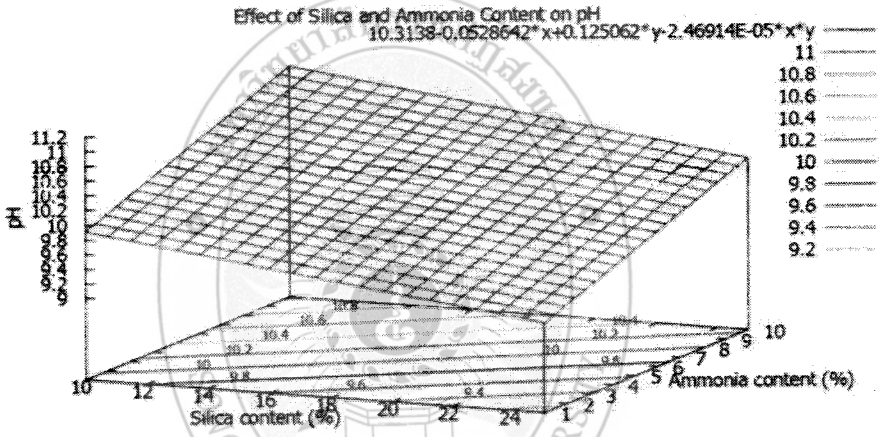
ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่า ค่า R-Square มีค่า 99.54 % และ R-Square (adjust) มีค่า 99.37 % แสดงถึงสมการดังกล่าวสามารถนำไปทำนายผลได้แม่นยำ

จากค่า p-Value ในตารางที่ 4.9 พบว่าค่า p-Value ของฟูมซิลิกากับแอมโมเนีย มีค่าเท่ากับ 0.961 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองคือฟูมซิลิกากับแอมโมเนีย ตลอดจนอันตรกิริยา

ระหว่างตัวแปรทั้งสองมีผลต่อค่าความเป็นกรด-เบส (potential of hydrogen ion, pH) อย่างมีนัยสำคัญ

$$Y = 10.3138 - 0.0528642*X_1 + 0.125062*X_2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(7)$$

แต่เนื่องจากการใช้สมการที่วิเคราะห์จากข้อมูลโค๊ด เมื่อนำไปใช้ทำนายจริงมีความยุ่งยาก ในการแทนค่าดังนั้นจึงนำข้อมูลจริง (uncode) มาวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์ใหม่ ได้ดังสมการที่ (7) และสามารถเขียนกราฟพื้นผิวตอบสนองดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อค่าความเป็นกรด-เบสของดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อปริมาณของฟูมซิลิกาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-เบส ลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากขนาดของซิลิกามีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวมาก ผิวของซิลิกาเป็น สารอนินทรีย์ที่มี pH เป็นกรด (พรพรรณ, 2528) ทำให้ดิสเพอร์สชันของซิลิกามีค่า pH ต่ำลงและ เมื่อปริมาณของแอมโมเนีย เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้น เนื่องจากแอมโนเนีย มีสมบัติเป็นเบส เมื่อปริมาณมากขึ้น จึงทำให้ค่า pH สูงขึ้น การเป็นกรดของดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา ลดลง (Dove and Rimstidt, 1994)

4.1.4 ผลการทดสอบค่าความหนืด (viscosity)

ตารางที่ 4.10 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าความหนืด (Viscosity) ของดิสเพอร์สชัน

Term	Effect	Coefficient	Standard Error Coefficient	T	P
Constant	-	445.2	8.541	52.12	0.000
X_1	-111.0	-55.5	8.541	-6.50	0.000
X_2	480.3	240.2	8.541	28.12	0.000
X_1*X_2	-220.3	-110.2	8.541	-12.90	0.000

หมายเหตุ X_1 = ฟูมซิลิกา

X_2 = แอมโมเนีย

ตารางที่ 4.11 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความหนืด (Viscosity)

Source	Degree of freedom	Sequence Sum of Square	Adjust Sum of Square	Adjust Mean of Square	F	P
Main Effects	2	729129	729129	364565	416.43	0.000
X_1	1	36964	36964	36964	42.22	0.000
X_2	1	692165	692165	692165	790.63	0.000
2-Way Interactions	1	145638	145638	145638	166.36	0.000
X_1*X_2	1	145638	145638	145638	166.36	0.961
Residual Error	8	7004	7004	875		
Pure Error	8	7004	7004	875		
Total	11	881771				

หมายเหตุ X_1 = ฟูมซิลิกา

X_2 = แอมโมเนีย

ตางรางที่ 4.11 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์สำหรับค่าความหนืด (Viscosity) ของดิสเพอร์สชัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ จากการวิเคราะห์แบบโค๊ด (code) ได้ในดังตารางที่ 4.11 สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟูมซิลิกากับแอมโมเนียได้ว่า

$$Y = 445.2 - 55.5*X_1 + 240.2*X_2 - 110.2*X_1*X_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(8)$$

$X_1 = 55.5$

$X_2 = 240.2$

$Y = 445.2$

แต่เนื่องจากการใช้สมการที่ได้จากข้อมูลแบบโค๊ด (code) จะทำให้เขียนกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง ไม่สอดคล้องกับค่าจริงของตัวแปรดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลจริงของตัวแปรทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 4.13 และสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 9

ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืด (Viscosity)

Term	Coefficient
Constant	-33.0469
X_1	110.494
X_2	10.5528
$X_1 * X_2$	-3.26417

หมายเหตุ X_1 = ฟูมซิลิกา

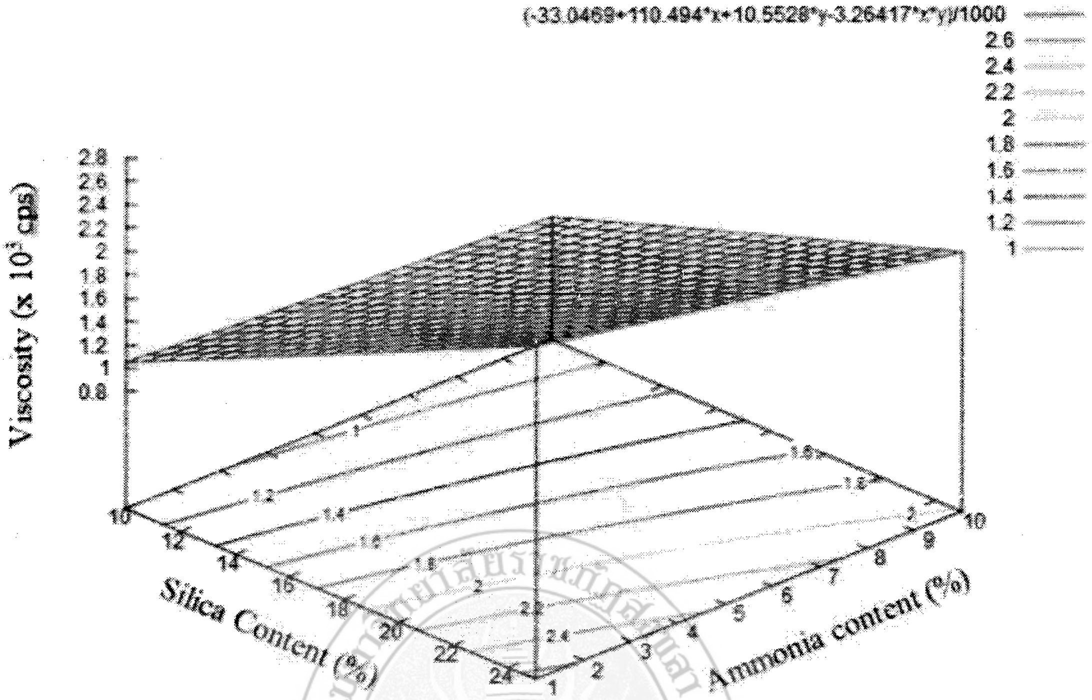
X_2 = แอมโมเนีย

$$Y = -33.0469 + 110.494*X_1 + 10.5528*X_2 - 3.26417*X_1*X_2 \quad \text{.........................(9)}$$

ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่า ค่า R-Square มีค่า 99.21 % และ R-Square (adjust) มีค่า 98.91 % แสดงถึงสมการดังกล่าวสามารถนำไปทำนายผลได้แม่นยำ

จากค่า p-Value ในตารางที่ 4.12 พบว่า ค่า p-Value ของฟูมซิลิกากับแอมโมเนีย มีค่าเท่ากับ 0.961 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองคือฟูมซิลิกากับอมโมเนีย ตลอดจนอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรทั้งสองมีผลต่อค่าความหนืด (Viscosity) อย่างมีนัยสำคัญ

แต่เนื่องจากการใช้สมการที่วิเคราะห์จากข้อมูลโค๊ด เมื่อนำไปใช้ทำนายจริง มีความยุ่งยากในการแทนค่าดังนั้นจึงนำข้อมูลจริง (uncode) มาวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์ใหม่ได้ดังสมการที่ (10) และสามารถเขียนกราฟพื้นผิวตอบสนองดังรูปที่ 4.4

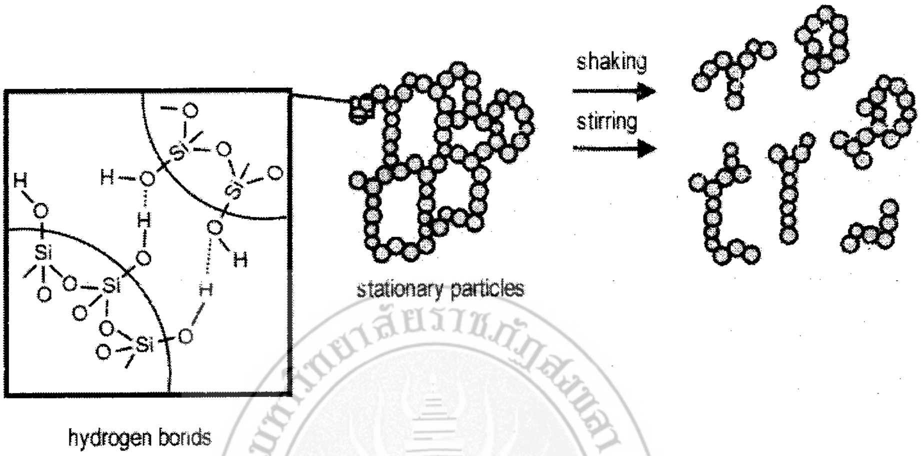


39รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อความหนืดของ
ดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อปริมาณของฟูมซิลิกาเพิ่มขึ้นส่งผลค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟูมซิลิกามีอนุภาคขนาดเล็ก (พรพรรณ, 2528) มีน้ำอยู่รอบอนุภาคเป็นจำนวนมาก น้ำดังกล่าวเกิดจากพันธะไฮโดรเจนแทรกระหว่างอนุภาคของฟูมซิลิกาดังรูปที่ 4.5 ดังนั้นเมื่อใช้ฟูมซิลิกาปริมาณเพิ่มขึ้นน้ำจะถูกผิวของซิลิกาดูดซับไว้ ทำให้ดิสเพอร์สชันมีค่าความหนืดสูงขึ้นตามปริมาณของซิลิกาที่เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ซิลิกาในรูปดิสเพอร์สชันมากเกินไป พบว่า ความหนืดสูงมากจนทำให้ไม่สามารถวัดความหนืดได้ อาจขึ้นจากปฏิกิริยาการละลาย (dissolution) ระหว่างฟูมซิลิกากับน้ำ

ดังสมการที่ 11 เกิดเป็น Orthosilicic acid (H_4SiO_4) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรด (Dove and Rimstidt, 1994) ทำให้ความเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์ในดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกาลดลง ส่งผลให้ความหนืดของดิสเพอร์สชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับผลของแอมโนเนีย พบว่าเมื่อปริมาณแอมโมเนียเพิ่มขึ้น ความหนืดของดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกาลดลง อาจเป็นเพราะแอมโมเนียมีฤทธิ์เป็นเบส ทำให้ลดการเกิด orthosilicic acid (H_4SiO_4) ลดลง ส่งผลให้ความหนืดของดิสเพอร์สชันซิลิกาลดลง

$$SiO_{2\,(s)} + 2H_2O_{\,(l)} \rightleftharpoons H_4SiO_{4\,(aq)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(11)$$



รูปที่ 4.5 การปรับสภาพผิวของฟูมซิลิกา

(ที่มา: http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de)

4.2 ผลของสารคู่ควบไซเลน และอุณหภูมิในการเตรียม Si69-t-SiO_2 ที่มีต่อสมบัติของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชั่นการขึ้นรูป และสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ

การศึกษาการเตรียมฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 (ตามสูตรในตารางที่ 3.2) เพื่อศึกษาปริมาณการใช้สารคู่ควบไซเลน และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69 จากนั้นนำมาเปรียบเทียบผลที่ได้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตีโฟมยาง ดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการทดสอบความเป็น กรด-เบส ของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชัน

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69-t-SiO_2 ที่มีต่อสมบัติของค่า pH ของ Si69-t-SiO_2 และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM ได้ผลดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่า pH

Source	Estimate	Standard Error	t value	P value
Intercept	9.37199	0.03245	288.9	1.157×10^{-15}
X	0.06704	0.02565	2.613	0.03474
Y	-0.09502	0.02565	-3.704	0.00761
x^2	0.08277	0.02751	3.008	0.01971
y^2	0.05526	0.02751	2.009	0.08454
Xy	0.0625	0.03628	1.723	0.12857

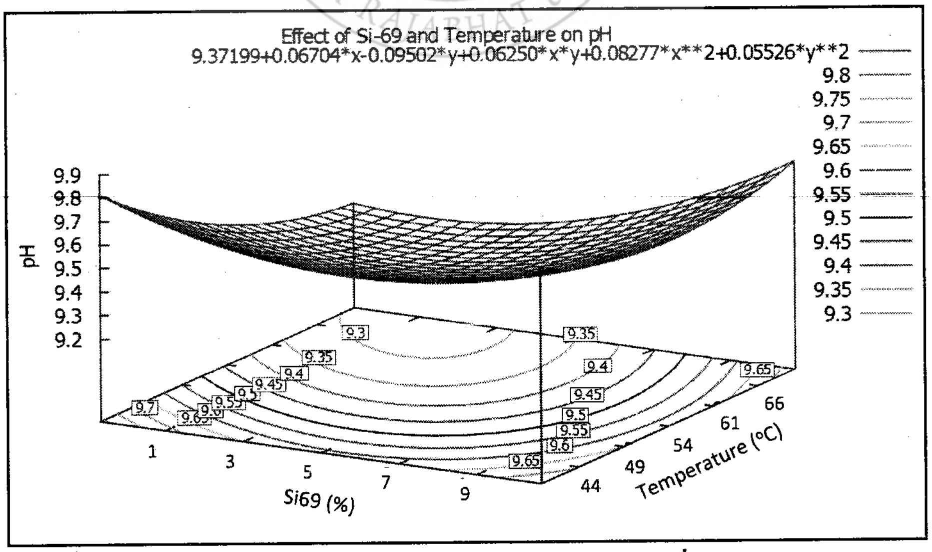
หมายเหตุ : x คือ Si69

Y คือ Temperature

จากตารางที่ 4.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของ Si69-t-SiO_2 เป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.1)

$$pH = 9.37199 + 0.06704x + 0.09502y + 0.0625xy + 0.08277x^2 + 0.05526y^2 \qquad (4.1)$$

จากสมการข้างต้นได้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-เบส ของ Si69-t-SiO_2 โดยการใช้กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อ pH ของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชัน

จากรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อปริมาณของสารคู่ควบไซเลน Si69 มีผลต่อค่า pH น้อย เนื่องจากเมื่อมีปริมาณของ Si69-t-SiO_2 ลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากผิวของฟูมซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์ที่มี pH เป็นกรด (พรพรรณ, 2528) ทำให้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันมีค่า pH ต่ำลง และเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ความร้อนทำให้ค่า pH ต่ำลง เนื่องจากหมู่ไซลานอลทำให้ผิวฟูมซิลิกามีความเป็นกรด และมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และมีการปลดปล่อย NH_3 ที่มีความเป็นเบสออกมา (เชาวน์, 2553) ทำให้ปริมาณของหมู่ไซลานอลบนผิวฟูมซิลิกาน้อยลงค่า pH ของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันจึงลดต่ำลง เพราะ Si69-t-SiO_2 ที่เพิ่มขึ้นเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแอมโมเนีย ไว้ทำให้แอมโมเนียไม่ให้ระเหยออกไปได้ง่าย แต่เมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างซิลิกาและแอมโมเนียระเหยออกไป เมื่อพิจารณาจากค่า p-value ในตาราง ที่ 4.14 พบว่าสอดคล้องกันนั้น คือ ปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 มีค่า p-value เข้าใกล้ 0 และ p-value ของสารคู่ควบไซเลน Si69 มากกว่าเล็กน้อย ในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาพบว่ามีค่า p-value เข้าใกล้ 0 ไม่มากแต่ชี้ให้เห็นว่ามีผลต่อค่า pH ซึ่งสอดคล้องกับกราฟพื้นผิวตอบสนองในรูปที่ 4.1 ที่ค่า pH จะต่ำที่สุดเมื่อปริมาณของสารคู่ควบไซเลน Si69 ต่ำสุด และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุด

4.2.2 ผลการทดสอบความหนืดของ **Si69-t-SiO_2** ดิสเพอร์สชัน

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69-t-SiO_2 ที่มีต่อสมบัติของค่าความหนืดของ Si69-t-SiO_2 และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM ได้ผลดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความหนืด

Source	Estimate	Standard Error	t-value	p-value
Intercept	2192.05	214.51	10.22	1.85×10^{-5}
X	50.36	169.6	0.297	0.7751
Y	170.72	169.6	1.007	0.3476
x^2	202.68	181.9	1.114	0.302
y^2	-622.07	181.9	-3.42	0.0111
Xy	370	239.83	239.8	0.1668

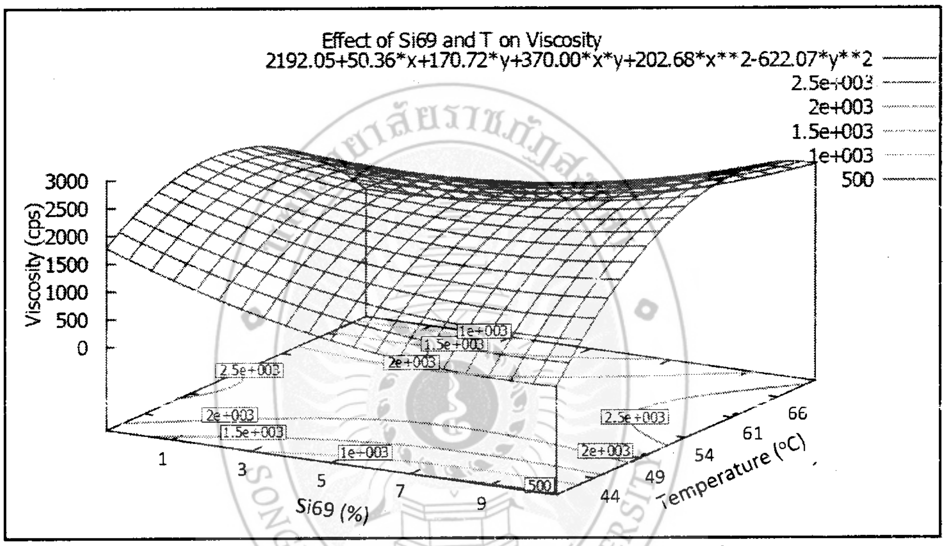
หมายเหตุ : x คือ Si69

Y คือ Temperature

จากตารางที่ 4.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความหนืดของ Si69-t-SiO_2 เป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.2)

$$viscosity = 2192.05 + 50.36x + 170.72y + 370xy + 202.68x^2 - 622.07y^2 \quad (4.2)$$

จากสมการข้างต้นได้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความหนืดของ Si69-t-SiO_2 โดยการใช้กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความหนืดของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชัน

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารคู่ไซเลน Si69 มากขึ้นส่งผลทำให้ค่าความหนืดของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันลดลง เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนที่เติมเข้าไปในดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา จะลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาด้วยกันเอง และการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาที่ดี (Kapgate & Das, 2014; เชาวน์, 2553) ในขณะเดียวกันหากเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้สูงขึ้น ส่งผลทำให้ความหนืดของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่สูงขึ้นหมู่ไซลานอลบนผิวซิลิกาทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารคู่ควบไซเลน (เชาวน์, 2553) และของเหลวที่ผสมอยู่ ในดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกาอย่างเช่น น้ำ และแอมโมเนีย ระเหยออกไปบางส่วน จึงมีปริมาณของส่วนที่เป็นฟูมซิลิกามากขึ้น ปริมาณของเหลวลดลง ทำให้อนุภาคของฟูมซิลิกาที่กระจายตัวอยู่ใน Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันมีความหนาแน่นมากขึ้นจน Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันสูญเสียความเสถียรของสภาวะการเป็นคอลลอยด์ จึงทำให้มีความหนืดสูงมากขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณา ค่า p-value จาก

ตารางที่ 4.2 พบว่าค่า p-value ของอุณหภูมิเข้าใกล้เข้าใกล้ 0 มากว่า p-value ของสารคู่ควบไซเลน Si69 นั่นแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลมากกว่าปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 ซึ่งสอดคล้องกับกราฟพื้นผิวตอบสนองในรูปที่ 4.2 มีค่าความหนืดสูงสุดเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณ 49-61 °C และปริมาณของสารคู่ควบไซเลน Si69 ประมาณ 1-9% ของฟูมซิลิกา

4.2.3 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงกดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันที่มีต่อสมบัติของค่าความต้านทานต่อแรงกดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM ได้ผลดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความต้านทานต่อแรงกดของโฟมยาง

Source	Estimate	Standard Error	t-value	p-value
Intercept	56.491	4.497	12.651	0.00000468
X	2.401	3.556	0.675	0.521
Y	-1.04	3.556	-0.293	0.778
x^2	-5.309	3.814	-1.392	0.206
y^2	6.222	3.814	1.631	0.147
Xy	7.167	5.028	-1.425	0.197

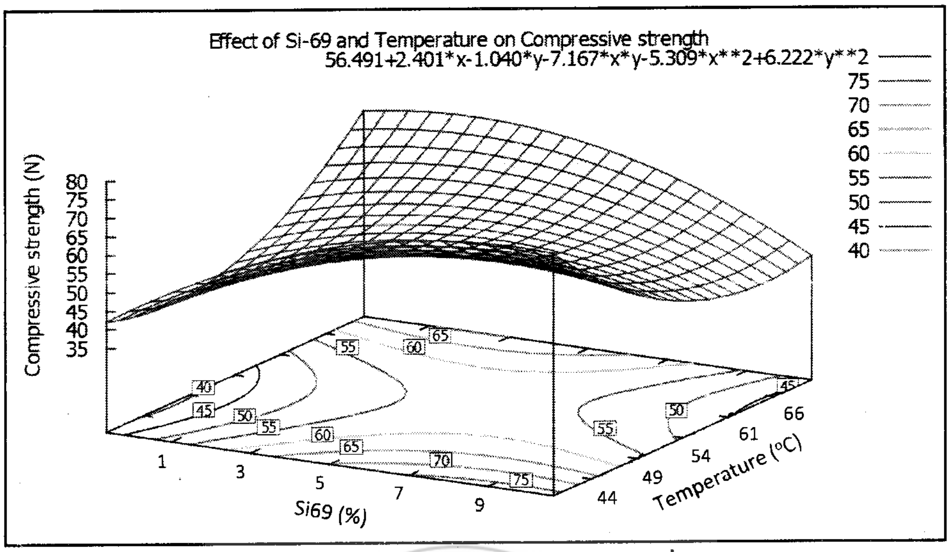
หมายเหตุ : x คือ Si69

Y คือ Temperature

จากตารางที่ 4.16 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความต้านทานต่อแรงกดของโฟม ยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม เป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.3)

$$\text{compresive strength} = 56.491 + 2.401x - 1.040y + 7.167xy - 5309x^2 + 7.167y^2 \quad (4.3)$$

จากสมการข้างต้นได้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อแรงกดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม โดยการใช้กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความต้านทาน ต่อแรงกดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม

จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 มากขึ้นส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกดมีค่าสูงขึ้นเพราะสารคู่ควบไซเลนเป็นตัวกลางที่ช่วยประสานระหว่างยางกับฟูมซิลิกาทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับฟูมซิลิกาสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของฟูมซิลิกาจึงสูงขึ้นด้วย และกระจายอยู่ในโฟมยางได้ดี (Sae-Oui et al., 2004) จึงรับแรงกดได้มากขึ้น ในขณะเดียวกันเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ส่งผลให้โฟมยางมีความนิ่มขึ้น มีความต้านทานต่อแรงกดน้อยลง เนื่องจากหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกามีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (เชาวน์, 2553) หมู่ไซลานอลที่ทำปฏิกิริยากับหมู่อัลคอกซี่ของสารคู่ควบไซเลนมีการ ปลดปล่อยแอลกอฮอล์ออกมาดังรูปที่ 2.4 ทำให้อันตรกิริยาระหว่างฟูมซิลิกาด้วยกันเองลดลง ส่งผลให้เมื่อเติมลง Si69-t-SiO_2 ในโฟมยาง เกิดการกระจายตัวได้ดี และเข้ากันได้ดีขึ้นกับยาง ดังนั้นเมื่อ พิจารณาตัวแปรอุณหภูมิและปริมาณสารคู่ควบไซเลนจากกราฟพื้นผิวตอบสนองในรูปที่ 4.3 พบว่ามีช่วงที่ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมดีที่ขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 49-66 °C ขึ้นไป และมีปริมาณสารคู่ควบไซเลนอยู่ในช่วง 5-8% ของฟูมซิลิกา

4.2.4 ผลการทดสอบการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็น สารตัวเติม

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันที่มีต่อสมบัติของค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM ได้ผลดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยาง

Source	Estimate	Standard Error	t-value	p-value
Intercept	41.0892	9.4351	4.355	0.00333
X	15.7408	7.4597	2.11	0.07278
Y	9.4167	7.4597	1.262	0.24725
x^2	0.3404	8.0008	-0.043	0.96725
y^2	5.3263	8.0008	0.666	0.52691
Xy	-17.59	10.5488	-1.667	0.13935

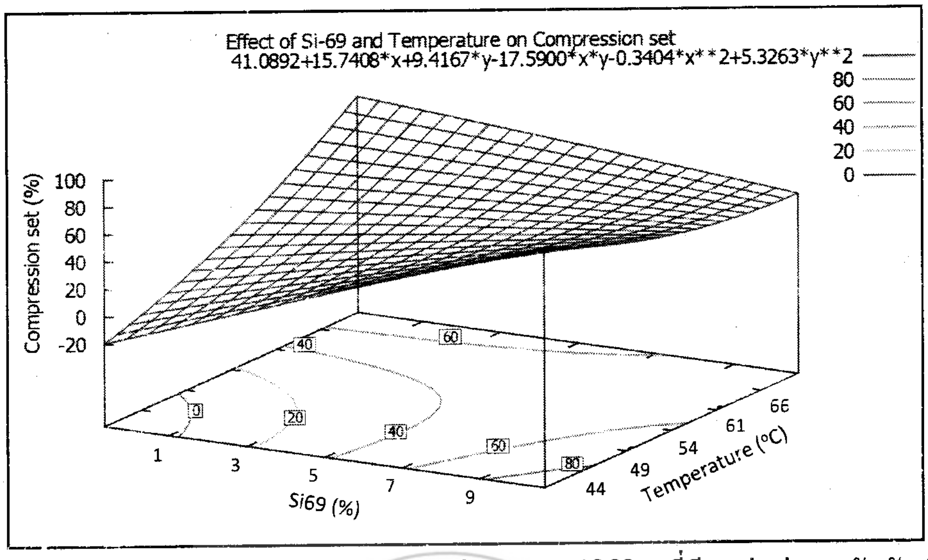
หมายเหตุ : x คือ Si69

Y คือ Temperature

จากตารางที่ 4.17 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม เป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.4)

$$\text{compersion set} = 41.089 + 15.741x + 9.417y - 17.590xy + 0.340x^2 + 5.326y^2 \qquad (4.4)$$

จากสมการข้างต้นได้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม โดยการใช้กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของสารคู่ควบไซเลน Si69 มากขึ้นส่งผลให้ค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมมีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ (เชาวน์, 2553) จึงทำให้โฟมยางที่คงรูปแล้วนำไปอัดที่ อุณหภูมิ 70 °C มีการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นทำให้โฟมยางคงรูปในขณะที่โดนอัดอยู่เพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดการคืนตัวได้น้อยลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่ปกติ ในขณะเดียวกันอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นส่งผลให้ ค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณของหมู่ไซลานอลลดลง (เชาวน์, 2553) เมื่อเติมในโฟมยางจึงทำให้โฟมยาง จึงไม่มีการดูดซับสารตัวเร่งเกิดการวัลคาไนซ์ได้ดี เมื่อนำโฟมยางที่คงรูปแล้วไปอัดที่อุณหภูมิ 70 °C จึงไม่สามารถวัลคาไนซ์ต่อได้อีก ดังนั้นเมื่อพิจารณาตัวแปรอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 จากกราฟพื้นผิวตอบสนองในรูปที่ 4.4 พบว่ามีช่วงที่ทำให้ค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมดีที่สุดเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 61 °C ขึ้นไป และมีปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 อยู่ในช่วง 5-7% ของฟูมซิลิกา

4.2.5 ผลการทดสอบความสามารถในการยืดจนขาดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันที่มีต่อสมบัติของค่าความสามารถในการยืดออกจนขาดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM ได้ผลดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความสามารถในการยืดออกจนขาดของโฟมยาง

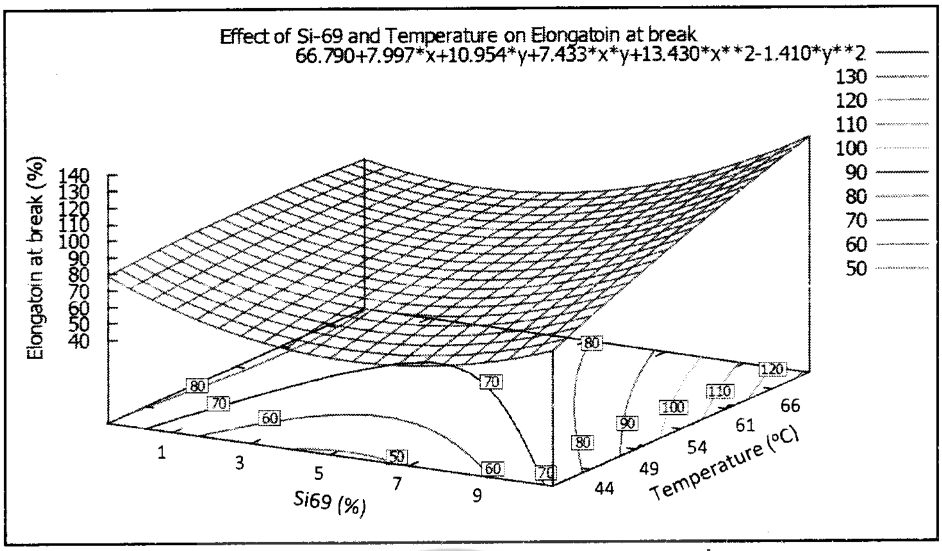
Source	Estimate	Standard Error	t-value	p-value
Intercept	66.79	18.655	3.58	0.00897
X	7.997	14.749	0.58	0.60452
Y	10.954	14.749	0.743	0.48182
x^2	13.43	15.819	0.849	0.42397
y^2	-1.41	15.819	-0.849	0.93148
Xy	7.433	20.857	0.356	0.73207

หมายเหตุ : x คือ Si69 , y คือ Temperature

จากตารางที่ 4.18 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม เป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.5)

$$\text{elongation at break} = 66.790 + 7.997x - 10.954y + 7.433xy + 13.410x^2 - 1.410y^2 \quad (4.5)$$

จากสมการข้างต้นได้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม โดยการใช้กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความสามารถในการยืดจนขาดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม

จากรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 ส่งผลให้สมบัติด้านความสามารถในการยืดจนขาดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมดีขึ้นเพียงเล็กน้อย เพราะสารคู่ควบไซเลนที่ทำหน้าที่เป็นกลางทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับฟูมซิลิกาสูงขึ้น (Kapgate & Das, 2014; เชาวน์, 2553) จึงทำให้โฟมยางยืดออกได้มากขึ้นเมื่อโดนดึง (Julie Chandra, Bipinbal, & Sunil, 2017) แต่เมื่อใช้กับโฟมยางจึงไม่เห็นผลมากนักเนื่องจากเซลล์ของฟองอากาศมีจำนวนมากเมื่อยืดโฟมยางออกจึงทำให้เซลล์ของของอากาศที่บางเกิดการฉีกขาดได้ง่าย ในขณะเดียวกันเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นทำให้ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมสูงขึ้นด้วยเพราะอุณหภูมิยิ่งสูงขึ้นปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นปริมาณของหมู่ ไซลานอลบนพื้นผิวของฟูมซิลิกามีปริมาณลดลง (เชาวน์, 2553) เมื่อเติมในโฟมยางจึงทำให้โฟมยาง จึงไม่มีการดูดซับสารตัวเร่งเกิดการวัลคาไนซ์ได้ดีสามารถเสริมแรงทำให้โครงสร้างของโฟมยางดีขึ้น จึงทนต่อการฉีกขาดได้ดีขึ้น เมื่อพิจารณาตัวแปรอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และปริมาณสารคู่ควบ ไซเลน Si69 จากกราฟพื้นผิวตอบสนองในรูปที่ 4.10 ความสามารถในการยืดจนขาดดีที่สุด เมื่อใช้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 61 °C ขึ้นไป และปริมาณของสารคู่ควบไซเลนสูงขึ้น

4.2.6 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันที่มีต่อสมบัติของค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM ได้ผลดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยาง

Source	Estimate	Standard Error	t-value	p-value
Intercept	0.120005	0.018929	6.34	0.000389
X	0.002413	0.014966	0.161	0.876468
Y	0.006251	0.014966	0.418	0.688688
x^2	0.00225	0.016051	0.156	0.880729
y^2	-0.015008	0.016051	-0.935	0.380918
Xy	0.0075	0.021163	0.354	0.733479

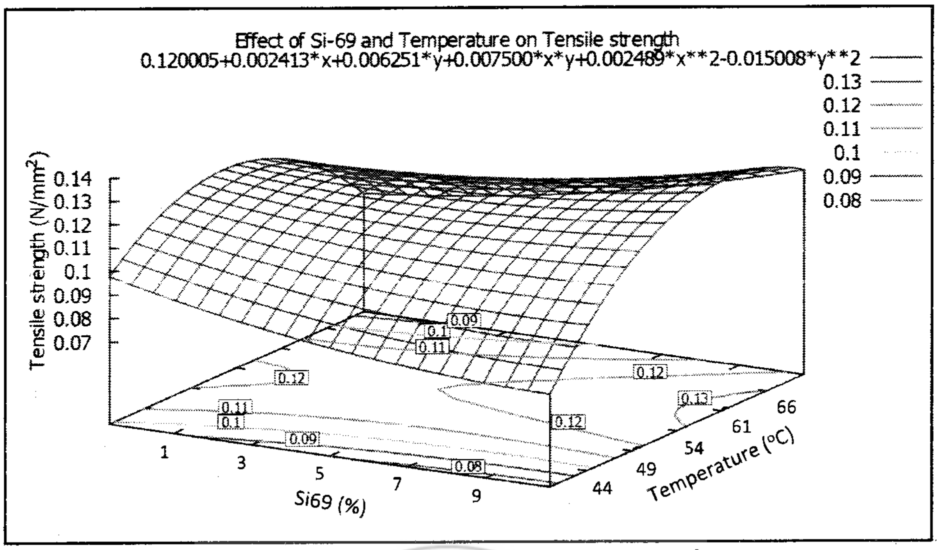
หมายเหตุ : x คือ Si69

Y คือ Temperature

จากตารางที่ 4.6 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม เป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.6)

$$\text{tensile strength} = 0.1200 + 0.0024x + 0.0063y + 0.0075xy + 0.0023x^2 - 0.0150y^2 \quad (4.6)$$

จากสมการข้างต้นได้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม โดยการใช้กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติได้ดังต่อไปนี้



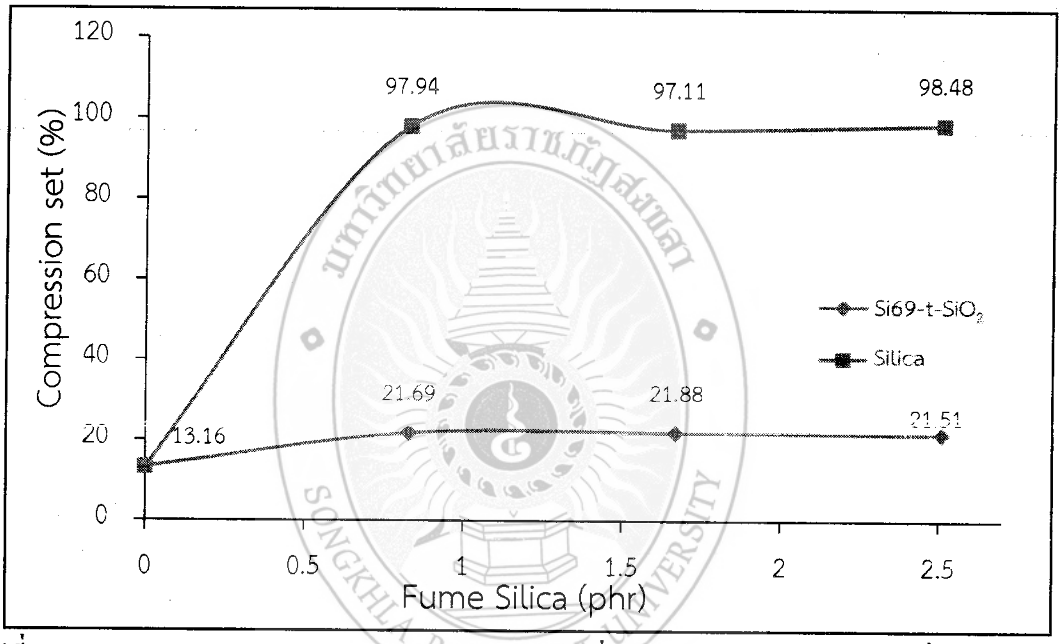
รูปที่ 4.11 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม

จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 ส่งผลให้สมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมลดลง เพราะสารคู่ควบไซเลนที่ทำหน้าที่เป็นกลางทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับฟูมซิลิกาสูงขึ้นจึงทำให้โฟมยางยืดออกได้มากขึ้นเมื่อโดนดึง (Julie Chandra et al., 2017) แต่เมื่อใช้กับโฟมยางจึงส่งผลให้เซลล์ของฟองอากาศมีจำนวนมาก และมีความบางมาก เมื่อยืดโฟมยางออกจึงทำให้เซลล์ของของอากาศที่บางเกิดการฉีกขาดได้ง่าย ในขณะเดียวกันเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นทำให้ค่าของความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO_2 ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมสูงขึ้นด้วยเพราะอุณหภูมิยิ่งสูงขึ้น ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นปริมาณของหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของฟูมซิลิกามีปริมาณลดลง เมื่อเติมในโฟมยางจึงทำให้โฟมยาง จึงไม่มีการดูดซับสารตัวเร่งเกิดการวัลคาไนซ์ได้ดีสามารถเสริมแรงทำให้โครงสร้างของโฟมยางดีขึ้น จึงมีความทานทานต่อแรงดึงสูงขึ้นเช่นเดียวกับรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาตัวแปรอุณหภูมิและปริมาณสารคู่ควบไซเลนจากกราฟพื้นผิวตอบสนองในรูปที่ 4.12 ความสามารถในการยืดจนขาดสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 49-61 °C และปริมาณของสารคู่ควบไซเลนอยู่ในช่วง 3-5% ของฟูมซิลิกา

4.3 ผลการศึกษาและเปรียบเทียบของปริมาณ SiO2 กับ Si69-t-SiO2 ที่มีต่อสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ

4.3.1 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีผลต่อสมบัติด้านการยุบตัวของโฟมยาง

ทำการศึกษาผลของโฟมยางในการแปรปริมาณฟูมซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ โดยนำไปทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยาง เพื่อหาค่าการยุบตัวของโฟมยาง โดยใช้เครื่องการยุบตัวถาวรเนื่องจากแรงอัด และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D395



รูปที่ 4.12 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาต่อการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่แปรปริมาณ $Si69\text{-}t\text{-}SiO_2$ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

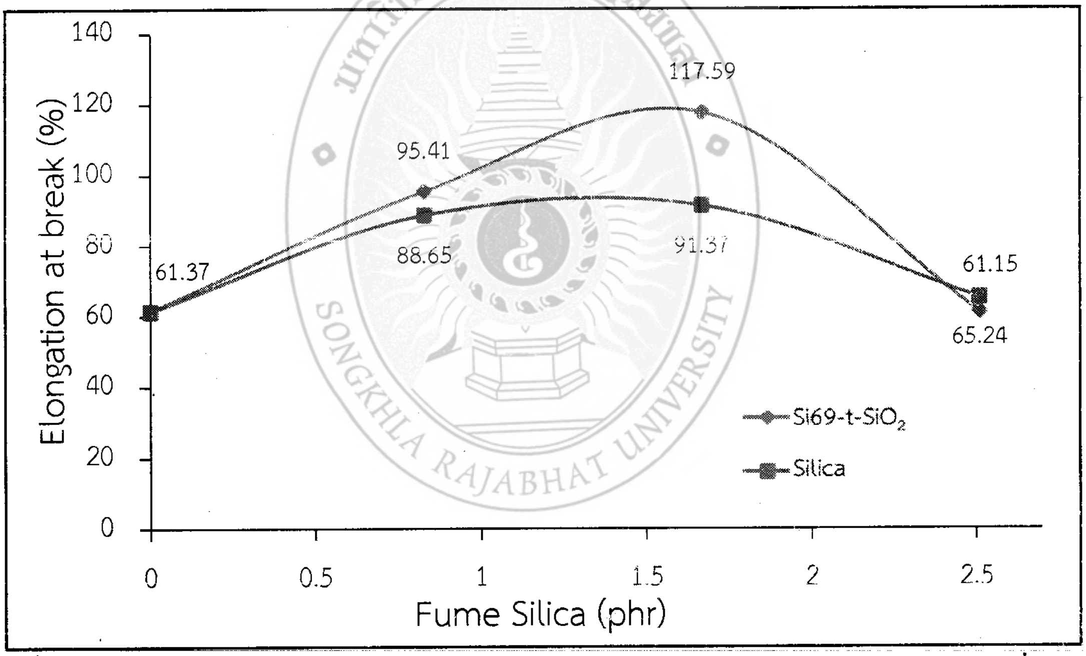
เมื่อปริมาณของ SiO_2 ที่ยังไม่ปรับสภาพผิวเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางสูงขึ้น ในขณะที่การใช้ Si69 -t-SiO_2 ทำให้ค่าจัดตัวเนื่องจากแรงอัดไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องจากบริเวณผิวของซิลิกามีหมู่ไซลานอล (silanol groups) สูง ทำให้มีอันตรกิริยาระหว่างอุนภาคซิลิกามีประสิทธิภาพสูง ซึ่งนำไป สู่การรวมตัว และการเกาะตัวของอนุภาคซิลิกาด้วยกันเอง เกิดเป็นก้อนอนุภาคฟูมซิลิกาขนาดใหญ่ แต่เมื่อทำการปรับสภาพผิวของฟูมซิลิกาด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 ทำให้อนุภาคปฐมของฟูมซิลิกามีความหนาแน่นที่เกาะกันแตกออก และกลับเข้ามารวมเป็นก้อนขนาดใหญ่ได้ยากขึ้น เมื่อนำไปผสมกับยาง สารคู่ควบไซเลน จะทำหน้าที่เป็นตัวกลาง เชื่อมโยงระหว่างสารตัวเติมกับยาง ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยาง-สารตัวเติมมาก

ขึ้น (Kapgate & Das, 2014; Katueangngan et al., 2016; เชาวน์, 2553) ส่งผลให้การจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ Si69 -t-SiO_2 มีค่าต่ำกว่าโฟมยางที่ใช้ SiO_2 ที่ยังไม่ปรับสภาพผิว

4.3.2 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีต่อสมบัติต้านการดึง

ทำการศึกษาผลของโฟมยางในการแปรปริมาณฟูมซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ โดยนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและค่าระยะยืดเมื่อยางขาด เพื่อหาค่าความต้านทานต่อ แรงดึงและระยะเมื่อยางขาดของโฟมยาง โดยใช้เครื่อง NRI Universal Testing Machine และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3574

4.3.2.1 ความสามารถในการยืดจนขาด (elongation at break)

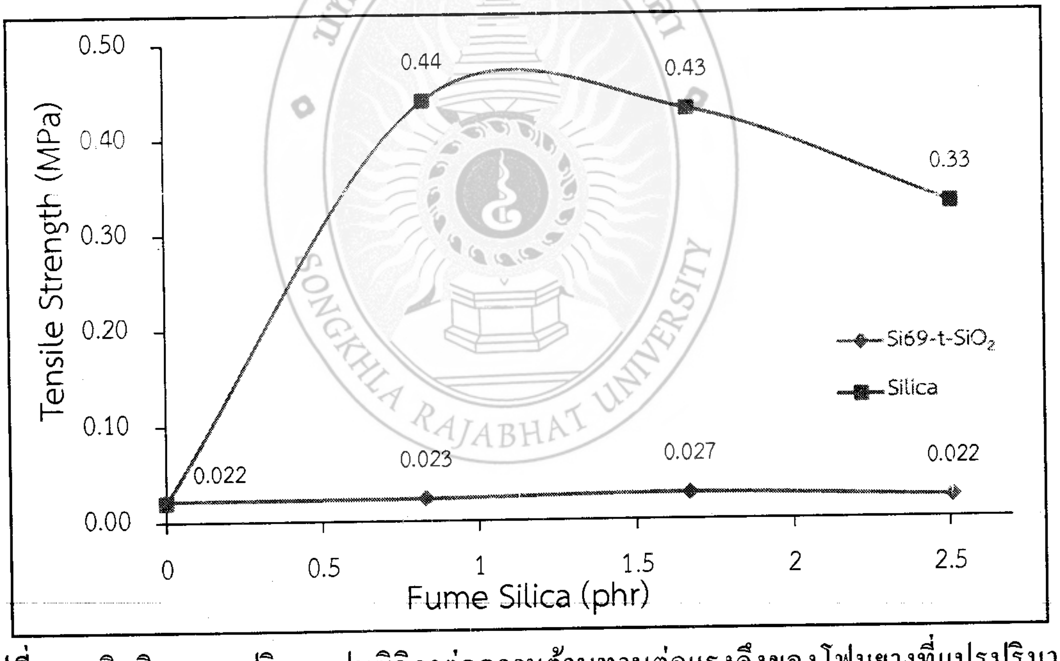


รูปที่ 4.13 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาต่อความความสามารถในการยืดจนขาดของโฟมยางที่ แปรปริมาณ Si69-t-SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

การเพิ่ม Si69-t-SiO_2 เข้าไปในผลิตภัณฑ์โฟมยางมีผลทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดของโฟมยางมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณลดลงเมื่อมี Si69-t-SiO_2 มากกว่า 1.67 phr เนื่องโฟมยางมีลักษณะที่เป็นฟองอากาศจึงมีความเป็นรูพรุนเมื่อเติมสารตัวเติมในปริมาณที่สูงทำให้โฟมยางขาดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้พบว่าที่ปริมาณการใช้ฟูมซิลิกา 1.67 phr .ให้ความสามารถในการยืดจนขาดของโฟมยางสูงที่สุดคือ 1.67 phr หากพิจารณาจากสัณฐานวิทยาของโฟมยางที่ผสม SiO_2 ที่ยัง

ไม่ปรับสภาพผิว (รูปที่ 4.16) ปริมาณของ SiO_2 ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โฟมยางมีขนาดเซลล์ฟองเล็กลง และเมื่อเปรียบเทียบกับที่โฟมยางที่ผสม Si69-t-SiO_2 (รูปที่ 4.17) พบว่ามีขนาดเล็กกว่า ซึ่งขนาดของเซลล์ฟองอาจส่งผลให้โฟมยางที่ใส่ฟูมซิลิกายืดได้ยากกว่า นอกจากนี้ การใช้สารคู่ควบไซเลน Si69 ปรับสภาพผิวฟูมซิลิกา ทำให้มีอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติม-สารตัวเติมลดลง (Kapgate & Das, 2014; เชาวน์, 2553) ส่งผลให้อนุภาคที่เกิดจาก การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคปฐมฟูมซิลิกาแตกออกได้ง่ายขึ้นเมื่อทำเป็นดิสเพอร์สชัน และมีจุดอ่อนในโฟมยางน้อยกว่า จึงทำให้โฟมยางที่ผสม Si69-t-SiO_2 สามารถยืดได้มาก และเมื่อเพิ่มปริมาณของ ดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกาเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการยืดสูงขึ้นกว่าโฟมยางที่ใช้ดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกาปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

4.3.2.2 ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength)



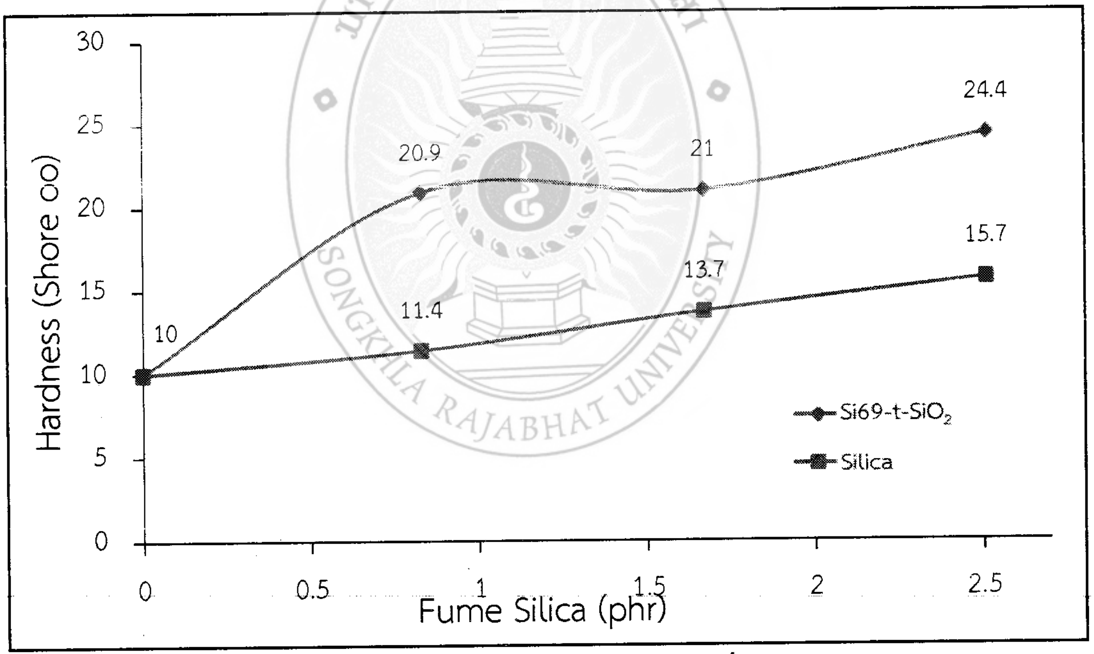
รูปที่ 4.14 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาต่อความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยางที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

การใช้ SiO_2 ที่ยังไม่ปรับสภาพผิว ทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ปริมาณ SiO_2 เท่ากับ 0.83 phr จากนั้นค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะลดลง แต่ในขณะที่การใช้ Si69-t-SiO_2 เป็นสารตัวเติมในโฟมยางไม่มีผลต่อความต้านทานต่อแรงดึง ซึ่ง หากพิจารณาจากสัณฐานวิทยาของโฟมยางที่ผสม SiO_2 ที่ยังไม่ปรับสภาพผิว (รูปที่ 4.16) ปริมาณของ SiO_2 ที่เพิ่มขึ้นส่งผล

ให้โฟมยางมีขนาดเซลล์ฟองเล็กลงและเมื่อเปรียบเทียบกับที่โฟมยางที่ผสม Si69-t-SiO_2 (รูปที่ 4.17) พบว่ามีขนาดเล็กกว่า ซึ่งขนาดของเซลล์ฟองอาจส่งผลให้โฟมยางที่ใส่ SiO_2 ที่ยังไม่ปรับสภาพผิว มีความต้านทานต่อแรงดึงสูง แต่เมื่อปริมาณเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการมีปริมาณ SiO_2 ที่ยังไม่ปรับสภาพผิวสูงขึ้น ส่งผลให้มีจุดอ่อนในยางมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดต่อลง

4.3.3 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งของโฟมยาง

ทำการศึกษาผลของโฟมยางในการแปรปริมาณฟูมซิลิกาที่ยังไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวด้วย Si69 ปริมาณต่างๆ โดยทดสอบสมบัติด้านความแข็ง เพื่อทดสอบความแข็งของโฟมยาง โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งหัวกด แบบ (Shore OO) และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240



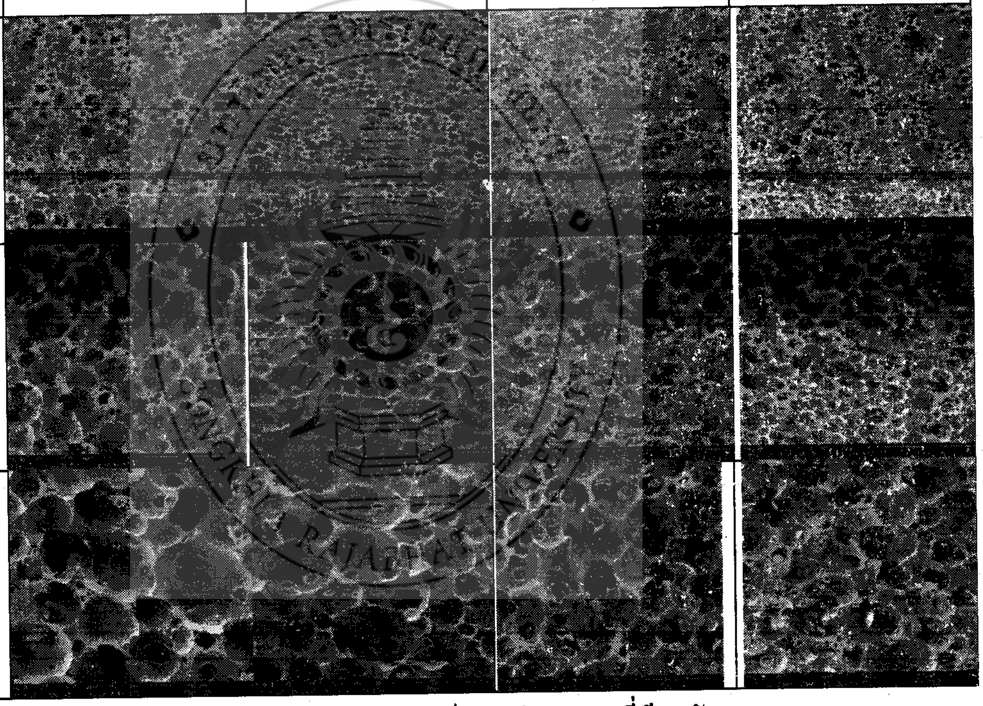
รูปที่ 4.15 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาต่อความแข็งของโฟมยางที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

การใช้ฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 ทำให้ความแข็งต่ำกว่าการใช้ดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกาที่ไม่ปรับสภาพผิว และเมื่อเพิ่มปริมาณของดิสเพอร์สชันค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟูมซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ (Alzoubi et al., 2011) ซึ่งศึกษาการใช้สารคู่ควบไซเลน ปรับสภาพผิวของเถ้าลอย เพื่อนำมาเป็นสารตัวเติมในยางบิวตะไดอีน

นอกจากนี้ยังมี (เชาวน์, 2553) ที่รายงานถึงความแข็งของยางที่ใช้ซิลิกาปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน มีค่ามากกว่าการใช้ซิลิกาที่ไม่ปรับสภาพผิว

4.3.4 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิการ ที่มีต่อสมบัติทางสัณฐานวิทยาของโฟมยาง

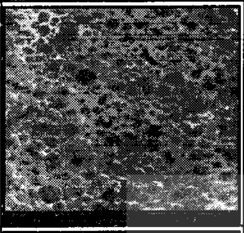
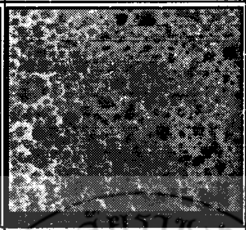
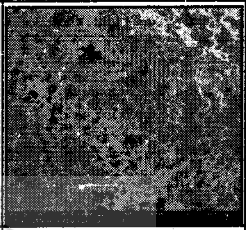
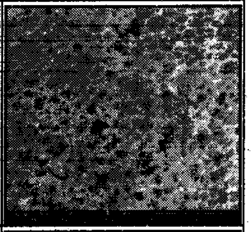
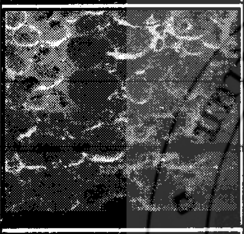
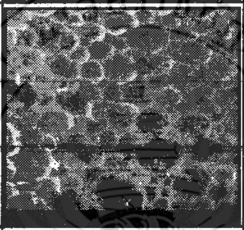
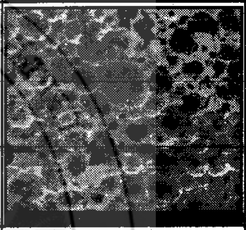
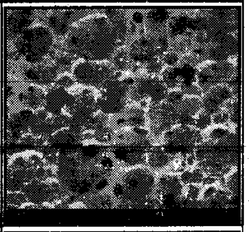
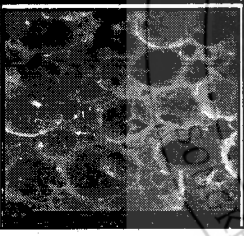
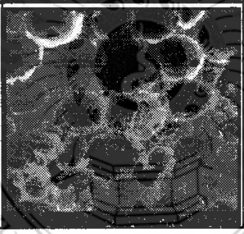
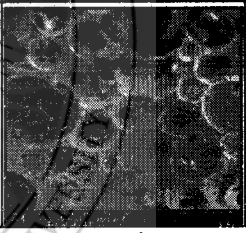
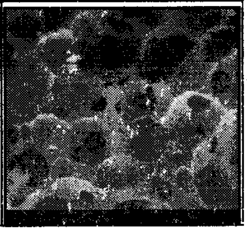
โฟมยางเตรียมได้จากน้ำยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งสัณฐานวิทยาของโฟมยางมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่างของฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในโฟมยาง อธิบายได้ ดังภาพต่อไปนี้

กำลังขยาย	ปริมาณ SiO_2 ที่ยังไม่ปรับสภาพผิว (phr)			
	0	0.83	1.67	2.51
20x				
50x				
100x				

รูปที่ 4.16 ภาพขยายของโฟมยาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่มีกำลังขยาย 20x 50x และ 100x โดยการแปรปริมาณ SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

จากรูปที่ 4.16 พบว่าที่ปริมาณของฟูมซิลิกาเพิ่มขึ้น ขนาดของฟองอากาศในโฟมยางจะเล็กลงและมีปริมาณมากขึ้น เนื่องจากฟูมซิลิกามีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิที่เล็กมาก แต่สามารถเสริมแรงให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น (พรพรรณ, 2528) ส่งผลให้ฟองอากาศใน โฟมยางขยายตัวได้ยากขณะตีฟอง จึงทำให้ขนาดของฟองเล็กลง

จากการเปรียบเทียบผลของปริมาณฟูมซิลิกาจากภาพขยายโฟมยางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกับการยุบตัวถาวรเนื่องจากแรงอัดของโฟมยาง พบว่าเมื่อปริมาณของฟูมซิลิกาเพิ่มขึ้น ขนาดของฟองอากาศโฟมยางเล็กลง มีปริมาณมากขึ้น

กำลังขยาย	ปริมาณ Si69-t-SiO_2 (phr)			
	0	0.83	1.67	2.51
20x				
50x				
100x				

รูปที่ 4.17 ภาพขยายของโฟมยาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่มีกำลังขยาย 20x 50x และ 100x โดยการแปรปริมาณ Si69-t-SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

จากรูปที่ 4.17 พบว่าการที่ปริมาณของ Si69-t-SiO_2 เพิ่มขึ้น ขนาดของฟองอากาศในโฟมยางจะเล็กลง และมีความเป็นระเบียบมากขึ้น เนื่องจากฟูมซิลิกามีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิที่เล็กมาก แต่สามารถเสริมแรงให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น ประกอบกับการปรับสภาพผิวฟูมซิลิกาด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 ทำให้ฟูมซิลิกาสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างยาง-สารตัวเติมได้ดีขึ้น (Alkadasi et al., 2004; Kapgate & Das, 2014; Yamazaki et al.; เชาวน์, 2553) ส่งผลให้ฟองอากาศในโฟมยางขยายตัวได้ยากขณะตีโฟมจึงทำให้ขนาดของฟองเล็กลง

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการเตรียมดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา พบว่าปริมาณของซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ทำให้ดิสเพอร์สชันซิลิกา มีปริมาณของแข็งทั้งหมด และความหนืดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่น และค่า pH ลดลง ปริมาณแอมโมเนียในดิสเพอร์สชันซิลิกาที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมด ความหนาแน่น pH แต่ความหนืดลดลง โดยพบว่าในการเตรียมดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา สภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณ SiO_2 และแอมโมเนีย คือร้อยละ 25 และ10 ตามลำดับ โดยใช้วัลทามอลร้อยละ 1 และน้ำกลั่นร้อยละ 64 บอลมิลเป็นเวลา 72 ชั่วโมง สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟูมซิลิกาปรับสภาพผิวด้วยไซเลน Si69 ที่นำไปใช้ในโฟมยางและให้สมบัติที่ดี คืออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และปริมาณ Si69 ร้อยละ 5 โดยพบว่าที่อุณหภูมิปฏิกิริยาสูง ปริมาณ Si69 ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อการดึงยืด และความสามารถในการยืดจนขาดเพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานต่อแรงกด และค่าการจัดตัวเนื่องจากการอัดลดลง ในทางกลับกัน ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำ เมื่อปริมาณของไซเลนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกด และค่าการจัดตัวเนื่องจากการอัดมีค่าสูงขึ้น แต่ความต้านทานต่อการดึงยืด และความสามารถในการยืดจนขาดลดลง ค่ามีผลต่อการปรับสภาพผิวของซิลิกาเล็กน้อยดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ของโฟมยางที่ดีขึ้นเล็กน้อยในทุกสมบัติ แต่ค่าความหนืดของดิสเพอร์สชันซิลิกาสูงขึ้น เมื่อปริมาณของดิสเพอร์สชันฟูมซิลิกาเพิ่มขึ้นและแอมโมเนียลดลงโดยดิสเพอร์สชันที่มีปริมาณฟูมซิลิกาต่ำที่สุด (ร้อยละ 20 โดยประมาณ) มีค่าความหนืดต่ำที่สุด ในขณะที่ดิสเพอร์สชันที่มีปริมาณฟูมซิลิกา สูงเกินไป (ร้อยละ 28 โดยประมาณ) พบว่าความหนืดสูงเกินไปจนไม่สามารถวัดความหนืดได้ทำให้ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้เลือกใช้ดิสเพอร์สชันที่มีปริมาณฟูมซิลิกา ร้อยละ 26 โดยประมาณ เพราะ มีความหนืดและปริมาณฟูมซิลิกาเหมาะสมในการนำไปใช้ในการผสมกับน้ำยางธรรมชาติเพื่อผลิตเป็นโฟมยาง จากการทดลองพบว่าปริมาณฟูมซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งและการจัดตัวถาวรเนื่องจากการอัดเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดต่ำ และขนาดของฟองอากาศจะเล็กลงและมีปริมาณมากขึ้น การใช้ Si69-t-SiO_2 ในโฟมยาง ในปริมาณน้อย (0.8-2.5 phr) ไม่มีผลต่อการแปรรูปของโฟมยาง ขนาดของเซลล์โฟมยาง การจัดตัวเนื่องจากการการอัดและความต้านทานต่อการดึงยืด แต่ทำให้ความแข็ง และความสามารถในการยืดจนขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งปริมาณ Si69-t-SiO_2 ที่เหมาะสมของ คือ 2.5 phr

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาอิทธิพลปริมาณของฟูมซิลิกาเพื่อปรับระดับความแข็งของโฟมยาง เพื่อผลิตโฟมยางให้ได้ความแข็งตามที่ต้องการ เป็นการพัฒนาโฟมยางจากน้ำจากธรรมชาติโดยใช้ฟูมซิลิกาให้ดีขึ้นกว่าเดิม

2. เปลี่ยนชนิดสารตัวเติมจากซิลิกาเป็นสารตัวอื่น เช่น แคลเซียมคาบอเนตหรือสารจำพวกแป้งเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางเชิงกล และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของโฟมยาง เพื่อเพิ่มทางเลือกให้แก่อุตสหกรรมการผลิตโฟมยาง

บรรณานุกรม

ชินรัตน์ ลาภพูลธนะอนันต์. (2558). *เทคโนโลยีการผลิตและทดสอบโฟมยางจากน้ำยางธรรมชาติ.* เครือข่ายพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพารา. https://www.shorturl.at/bmzAW

เชาวน์ ศรีเพชรดี. (2553) *การศึกษาการใช้ซิลิกาเจลขนาดนาโนชนิดมีรูพรุน ที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบ เพื่อเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยกระบวนการโซลเจล.* มหาวิทยาลัยศิลปากร. นครปฐม. DOI : https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_DOI=

ชาลินี ปรีชา และฐิติกาญจน์ ชาติชินเชาวน์. (2558). *การเตรียมและสมบัติของโฟมยางธรรมชาติที่แปรปริมาณ SSF และ DPG.* วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, โปรแกรมวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา. สงขลา.

น้ำยาง. (2015, มีนาคม 6). *วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี.* สืบค้นเมื่อ 18:00, มีนาคม 6, 2015 จาก //th.wikipedia.org/w/index.php?title=%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87&oldid=5824294

บุญธรรม นิธิอุทัย. (2532). *ปฏิบัติการเทคโนโลยีน้ำยาง.* คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. ปัตตานี.

พัชรินทร์ วรธนกุล. (2010). Sol-gel เทคโนโลยีสังเคราะห์ซิลิกาจากชานอ้อย. *วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี, 36*(209), 39–43.

พรพรรณ นิธิอุทัย. (2528). *สารเคมีสำหรับยาง.* คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. ปัตตานี.

พงษ์ธร แซ่อุย. (2548). *สารเคมียาง.* ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปทุมธานี.

วีรเดช พิณเสนาะ, ศิริพงษ์ จันทร์พูนทรัพย์, สมเจตน์ พัชรพันธ์ และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. (2546). อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต และสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติของยางโฟมธรรมชาติ. ใน *เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41: สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์* (น. 517-524). กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

บรรณานุกรม (ต่อ)

วราภรณ์ ขจรไชยกูล. (2555). *เทคโนโลยีน้ำยาง.* กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

สถิติยางไทย. (2557). สถาบันวิจัยยาง. สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2559, จาก http://www.rubberthai.com/statistic/stat_index.htm

Alkadasi, N., Hundiwale, D., & Kapadi, U. (2004). Studies on the effect of silane coupling agent (2.0 per cent) on the mechanical properties of flyash filled polybutadiene rubber. *Journal of Scientific & Industrial Research*, *63*, 603–609.

Alzoubi, M., Al-Waked, R., & Tanbour, E. (2011). Compression and Hysteresis Curves of Nonlinear Polyurethane Foams Under Different Densities, Strain Rates and Different Environmental Conditions. *Journal of Mechanical Engineering*, *Volume 9*, 101–109. https://doi.org/10.1115/IMECE2011-62290

Brown, R. (2006). *Physical Testing of Rubber.* Springer Science & Business Media.

Dove, P.M. and Rimstidt, J.D. (1994). *Silica Water Interactions.* In Silica Reviews in Mineralogy. Mineral Society of America. 29, 259-307.

Wikipedia contributors. (2021, March 31). *Fumed silica.* In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 03:19, June 1, 2021, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fumed_silica&oldid=1015271283

Blomfield, G. A., & Little, L. H. (1973). Chemisorption of Ammonia on Silica. *Canadian Journal of Chemistry*, *51*(11), 1771–1781. https://doi.org/10.1139/v73-265

Hosseini, S. M., & Razzaghi-Kashani, M. (2014). Vulcanization kinetics of nano-silica filled styrene butadiene rubber. *Polymer*, *55*(24), 6426–6434. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.09.073

Hofmann, W. (1996). *Rubber technology handbook.* Munich: Hanser.

Julie Chandra, C. S., Bipinbal, P. K., & Sunil, K. N. (2017). Viscoelastic behaviour of silica filled natural rubber composites–Correlation of shear with elongational testing. *Polymer Testing*, *60*, 187–197.

Kapgate, B. P., & Das, C. (2014). Filler–filler and rubber–filler interactions in nitrile rubber/silica composites. *Emerging Materials Research, 3*(1), 46–51.

บรรณานุกรม (ต่อ)

Katueangngan, K., Tulyapitak, T., Saetung, A., Soontaranon, S., & Nithi-uthai, N. (2016). Renewable Interfacial Modifier for Silica Filled Natural Rubber Compound. *Procedia Chemistry, 19*, 447–454.

Liu X., Zhao S., Zhang X., Li X. and Bai Y. (2014). Preparation, structure, and properties of solution-polymerized styrene-butadiene rubber with functionalized end-groups and its silica-filled composites. *Polymer, 55*(8), 1964–1976.

Prasertsri S. and Rattanasom N. (2012). Fumed and precipitated silica reinforced natural rubber composites prepared from latex system: Mechanical and dynamic properties. *Polymer Testing, 31*(5), 593–605.

Sarkawi S. S., Dierkes W. K. and Noordermeer J. W. M. (2013). The influence of non-rubber constituents on performance of silica reinforced natural rubber compounds. *European Polymer Journal, 49*(10), 3199–3209.

Sae-Oui, P., Thepsuwan, U., & Hatthapanit, K. (2004). Effect of curing system on reinforcing efficiency of silane coupling agent. *Polymer Testing*, *23*(4), 397–403.

Bhagat, V. J. (2001). Behaviour of Expandable Graphite as a Flame Retardamt in Flexible Polyurethane Foam. *Polyurethane Foam Association*, 1-17.

Yamazaki R., Fujii S., Nakamura Y., & Nagata K. (2014). Mechanical Properties of Isoprene Rubber Filled with Surface Treated Carcium Carbonate with The Mixture of Two Silane Coupling Agents. *Journal of The Adhesion Society of Japan*, *50*(4), 131–136. https://doi.org/10.11618/adhesion.50.131

Ziraki, S., Zebarjad, S. M., & Hadianfard, M. J. (2016). A study on the tensile properties of silicone rubber/polypropylene fibers/silica hybrid nanocomposites. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *57*, 289–296. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.01.019

Zhang, Z.-X., Gao, C., Xin, Z. X., & Kim, J. K. (2012). Effects of extruder parameters and silica on physico-mechanical and foaming properties of PP/wood-fiber composites. *Composites Part B: Engineering*, *43*(4), 2047–2057. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.047

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การเผยแพร่ผลงาน

ภาคผนวก ข วิธีการทดสอบสมบัติของ SiO_2 และ Si69-t-SiO_2 และโฟมยาง

ภาคผนวก ค สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดลองการเตรียม Si69-t-SiO_2

ภาคผนวก จ ข้อมูลการทดลองสมของโฟมยางที่แปรปริมาณสารตัวเติม

ภาคผนวก ฉ ประวัติผู้ปฏิบัติการวิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
การเผยแพร่ผลงาน

บทความวิชาการ

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
"พัฒนางานวิจัย สร้างสรรค์อุดมศึกษาไทย ก้าวไกลสู่ Thailand 4.0"
วันที่ 28 – 29 กันยายน 2560
ณ ห้องประชุมปิ่นเกลียว อาคารศูนย์ภาษาและศูนย์คอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม

ชื่อบทความ การใช้ฟูมซิลิกาในผลิตภัณฑ์โฟมยางที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ
ผู้เขียน อัสมา ศึกะคาร อาตีฟะ บุตรา เอกฤกษ์ พุ่มนก และรัฐพงษ์ หนูหมาด

การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัย ครั้งที่ 1
"นักคิด นักสร้างสรรค์ พัฒนานวัตกรรมสู่สังคม"
วันที่ 12-13 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561
ณ ห้องโถง อาคาร 19 ชั้น 1
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช อำเภอเมืองนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช

ชื่อบทความ การใช้ฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยไซเลนใน
ผลิตภัณฑ์ โฟมยางที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ
ผู้เขียน เจษฎา ดำสิโก จิรายุ ทองเชื้อ และเอกฤกษ์ พุ่มนก

วันที่ 28 – 29 กันยายน 2560

ณ ห้องประชุมปิ่นเกลียว อาคารศูนย์ภาษาและศูนย์คอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม

ชื่อบทความ การใช้ฟูมซิลิกาในผลิตภัณฑ์โฟมยางที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ

ผู้เขียน อัสมา ศิกะคาร อาตีฟ๊ะ บุตรา เอกฤกษ์ พุ่มนก และรัฐพงษ์ หนูหมาด

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

การประชุมวิชาการระดับชาติ
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
The 9th NPRU National Academic Conference
"Achieving Thailand 4.0 through Research Development in Higher Education"
ครั้งที่ 9
"พัฒนางานวิจัย สร้างสรรค์อุดมศึกษาไทย ก้าวไกลสู่ Thailand 4.0"
28-29 กันยายน 2560
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม
AI

ภาคผนวก ข
วิธีการทดสอบสมบัติของ SiO_2 และ Si69-t-SiO_2 และโฟมยาง

ข.1 การทดสอบปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content)

ทำได้โดยชั่งน้ำหนักของจานแก้วให้ละเอียดถูกต้องถึง 0.0001 มิลลิกรัม น้ำหนักของจานแก้วเทฟูมซิลิกาตัวอย่างลงไปประมาณ 2.5 ± 0.5 กรัม และบันทึกน้ำหนักของดิสเพอร์ชันฟูมซิลิกาตัวอย่าง เอียงจานไป-มาเพื่อให้ฟูมซิลิกากระจายทั่วจานแก้ว และนำจานแก้วไปอบแห้งที่ตั้งอุณหภูมิไว้แล้วที่ 100 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบแล้วเอาออกจากตู้อบแห้ง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นลงในโถดูดความชื้นจนถึงอุณหภูมิห้องจากนั้นชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักหลังการอบแห้งครั้งที่ 1 และทำซ้ำอีก 2 รอบ ผลต่างของน้ำหนักหลังการอบแต่ละครั้ง ควรจะแตกต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม (ถ้าแตกต่างเช่นเดิมเกิน 1 มิลลิกรัม นำไปอบแห้ง ทำให้เย็นและชั่งซ้ำอีก จนกระทั่งผลต่างของน้ำหนักแตกต่างกันไม่ เกิน 1 มิลลิกรัม) นำผลที่ได้มาคำนวณ ดังนี้

$$\text{การทดสอบปริมาณของแข็งทั้งหมด} = \frac{(C-A)}{(B-A)} \times 100$$

โดย A = น้ำหนักของจานแก้ว (กรัม)

B = น้ำหนักของจานแก้วกับฟูมซิลิกาตัวอย่าง (g)

C = น้ำหนักของจานแก้วกับฟูมซิลิกาที่แห้งแล้ว (g)

ข.2 การทดสอบค่า pH ฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69

การทดสอบค่า pH โดยการนำตัวอย่างมาทดสอบด้วยใช้เครื่องวัดค่า pH จะทำการทดสอบ 3 ครั้ง ต่อตัวอย่างโดยจะรายงานผลด้วยค่ากลาง

ข.3 การทดสอบความหนืด viscosity ฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69

โดยใช้เครื่อง (brookfield) ในการทดสอบโดยการเลือกแกนหมุน (spindle) ที่ต้องการมาต่อเข้ากับแกนกลางของเครื่องโดยใช้แกนหมุน (spindle) จุ่มลงในของเหลวจนระดับของเหลวอยู่ตรงคอคอดของแกนหมุนพอดีปรับให้เครื่องอยู่ในระดับโดยดูที่ถูกน้ำ ปรับเลือกระดับความเร็วที่

ต้องการแล้วเปิดสวิตส์ เดินมอเตอร์เครื่อง ทดสอบความหนืด 3 ครั้ง บันทึกค่าความหนืดได้ รายงานผลการทดลองโดยใช้ค่ากลาง (ใช้ในภาคผนวก)

ข.4 การทดสอบการยุบตัวของโฟมยางที่เติมฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69

การทดสอบหาการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) การทดสอบหาการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ทำได้โดยนำชิ้นทดสอบ ขนาดยาว (50±1) มิลลิเมตร กว้าง (50±1) มิลลิเมตร และหนา (25±1) มิลลิเมตร มากดด้วยเครื่อง กดอัดให้มีความหนาลดลง 50% ของความหนาเดิม แล้วนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ (70±1) °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ แกะชิ้นทดสอบออกจากเครื่องกดอัด วางทิ้งไว้ 30 นาที แล้วจึงวัดความ หนาของชิ้นทดสอบ คำนวณหาการยุบตัวคิดเป็นร้อยละของความหนาเดิม

$$\text{การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด} = \frac{t_0 - t_1}{t_0 - t_s} \times 100$$

โดยที่ C_d คือ ระยะยุบตัวที่เปลี่ยนไปจากระยะยุบตัวเดิม (ครึ่งหนึ่งของ

ความหนาเดิม) หลังจากผ่านแรงอัดแล้ว (%)

t_0 คือ ความหนาเดิมของชิ้นทดสอบ (mm)

t_1 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบที่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านแรงอัดแล้ว (mm)

t_s คือ ความสูงของแท่งเหล็กกล้า (mm)

ข.5 การทดสอบแรงที่ทำให้ความหนาของโฟมยางที่เติมฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69

เป็นการวัดแรงกดทั้งหมดที่ทำให้ความหนาของโฟมยางลดลงจากความหนาเดิม 25% ทำได้โดยนำชิ้นทดสอบขนาดไม่น้อยกว่า 100x50 มิลลิเมตร และมีความหนา (40±1) มิลลิเมตร มาวางบนฐานรองรับของเครื่องทดสอบ จากนั้นเลื่อนแผ่นกด (indentor foot) ที่มีลักษณะกลมแบน มีพื้นที่ขนาด 50 ตารางนิ้ว) แตะบนชิ้นทดสอบ แล้วใช้แรง (preload) 400 นิวตัน กดลงบนชิ้นทดสอบ วัดความหนาเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ จากนั้นเพิ่มแรงกดต่อไปจนความหนาลดลงจากความหนาเดิม 25% บันทึกแรงกดทั้งหมดเป็นหน่วยนิวตัน (ซึ่งรวมทั้งแรงกดเดิม 400 นิวตัน) รายงานผลด้วยค่ากลาง

ข.6 การทดสอบสมบัติด้านการดึงของโฟมยางที่เติมฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69

ทดสอบสมบัติด้านการดึงตามมาตรฐาน ASTM D3574 โดยการ นำแผ่นโฟมยางมาตรฐานที่มีขนาด 25.4×139.7 มิลลิเมตร วัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 จุดให้ใช้ค่ากลางเป็นค่าความหนาของชิ้นทดสอบ แล้วทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการดึง ใช้อัตราเร็วในการดึงชิ้นทดสอบ 500 นิวตัน วัดแรงดึงและระยะยืดแล้วนำไปคำนวณสมบัติต่างๆดังนี้

1) การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength, TS) การคำนวณความต้านทานต่อแรงดึงดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความต้านทานต่อแรงดึง} = \frac{F}{A}$$

เมื่อ F = แรงที่ใช้ดึงทดสอบจนขาด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบก่อนการดึง (mm^2)

2) การทดสอบความสามารถในการยืด (elongation at break, EB) การคำนวณความสามารถในการยืดดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความสามารถในการยืดจนขาด} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

เมื่อ L คือ ระยะห่างของรอยขีดบนชิ้นทดสอบขณะชิ้นทดสอบ (cm)

L_0 คือ ระยะห่างของรอยขีดบนชิ้นทดสอบก่อนการดึง (cm)

ข.7 การทดสอบความแข็ง (hardness, HD) ของโฟมยาง

โดยการนำชิ้นทดสอบโฟมยางที่เตรียม ไว้มาทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยใช้ชิ้นทดสอบ 1 ชิ้นต่อตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ทดสอบวัดความแข็ง 5 จุด รายงานผลโดยค่ากลาง

ข.8 การทดสอบโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของโฟมยาง

การทดสอบส่องกล้องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) นำชิ้นทดสอบมาตัดให้เป็นชิ้นเล็กและบาง เพื่อศึกษาลักษณะทาง สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบ น้าชิ้นทดสอบตัดตรงรอยขาดของชิ้นทดสอบที่ได้จาก การดึงติดบนแท่งโลหะจากนั้นนำยางไปเคลือบผิวด้วยทองโดย sputteringtechnique ก่อนที่จะ นำไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM)

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ภาคผนวก ค
สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ค. 1 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของดิสเพอร์สชันของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมโฟมยาง (total solid content, TSC%)

chemicals	no.	%TSC	median
Sulphur	1	52.67	52.51
	2	52.51	
	3	52.30	
ZMBT	1	52.83	52.83
	2	53.91	
	3	16.91	
DPG	1	21.08	21.13
	2	21.13	
	3	21.05	
ZnO	1	51.39	52.54
	2	52.94	
	3	52.54	
ZDC	1	54.05	54.94
	2	54.94	
	3	62.15	
SSF	1	21.19	21.19
	2	20.08	
	3	25.61	

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ตารางที่ ค.1 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของดิสเพอร์สชันของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมโฟมยาง (total solid content, TSC%) (ต่อ)

chemicals	no.	%TSC	median
Silica	1	26.38	27.60
	2	27.69	
	3	27.60	

ตารางที่ ค.2 ความเป็นกรด – เบส ทั้งหมดของสารเคมี

สารเคมี	ครั้งที่	ค่าpH	ค่ากลาง
ZMBT	1	7.64	7.75
	2	7.75	
	3	7.81	
ZDC	1	7.85	7.94
	2	7.94	
	3	7.99	
DPG	1	10.33	10.39
	2	10.42	
	3	10.39	
SSF	1	4.86	4.77
	2	4.77	
	3	4.63	
ZnO	1	9.24	9.25
	2	9.25	
	3	9.33	
Sulphur	1	8.70	8.77
	2	8.83	
	3	8.77	

ตารางที่ ค.2 ความเป็นกรด – เบส ทั้งหมดของสารเคมี (ต่อ)

สารเคมี	ครั้งที่	ค่าpH	ค่ากลาง
potassium oleate	1	12.68	12.56
	2	12.53	
	3	12.56	

ตารางที่ ค.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของฟูมซิลิกาดิสเพอร์สชันที่ทำการแปรปริมาณของฟูมซิลิกาที่ 10-25 phr และแอมโมเนียที่ 1-10 phr

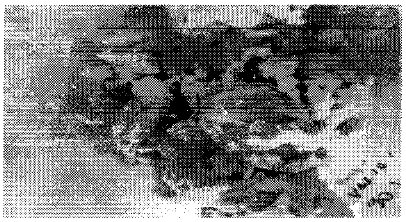
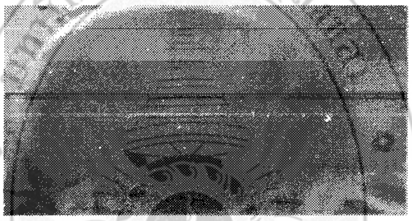
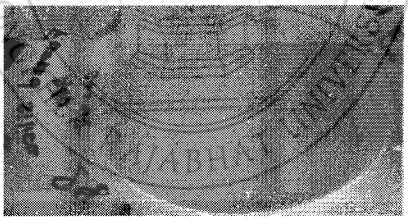
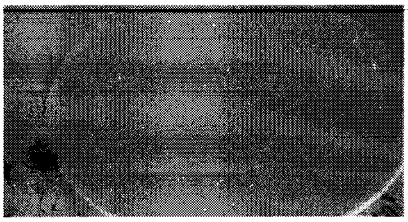
สารเคมี	ครั้งที่	ค่าTSC (%)	ค่าเฉลี่ย (%)
ฟูมซิลิกา 25 phr	1	26.3144	26.3451
	2	26.3759	
ฟูมซิลิกา 10 phr	1	12.5184	12.5510
	2	12.5835	
ฟูมซิลิกา 10 phr	1	11.8087	11.8351
	2	11.8616	
ฟูมซิลิกา 25 phr	1	27.6703	27.6858
	2	27.7013	

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ตารางที่ ค.4 ความเป็น กรด – เบส ของฟูมซิลิกาดิสเพอร์สชันที่ทำการแปรปริมาณของฟูมซิลิกา ที่ 10-25 phr และแอมโมเนียที่ 1-10 phr

สารเคมี	**ครั้งที่**	**ค่าpH**	**ค่ากลาง**
ฟูมซิลิกา 25 phr แอมโมเนีย 1 phr	1	8.24	8.24
	2	8.32	
	3	8.15	
ฟูมซิลิกา 10 phr แอมโมเนีย 1 phr	1	9.93	9.92
	2	9.92	
	3	9.88	
ฟูมซิลิกา 10 phr แอมโมเนีย 10 phr	1	11.00	11.04
	2	11.04	
	3	11.06	
ฟูมซิลิกา 25 phr แอมโมเนีย 10 phr	1	9.38	9.40
	2	9.44	
	3	9.4	

ตารางที่ ค.5 ความหนืดของฟูมซิลิกาดิสเพอร์สชันที่ทำการแปรปริมาณของฟูมซิลิกาที่ 10-25 phr และแอมโมเนียที่ 1-10 phr

สารเคมี	รูปภาพ	การเปรียบเทียบ
ฟูมซิลิกา 25 แอมโมเนีย 1		มีลักษณะเป็นเหนียวหนืด และไม่เป็นสารละลาย หาความหนืดได้ โดยใช้วิธีเจือจางสารละลาย ความหนืด = 2.65×10^{3} cps
ฟูมซิลิกา 25 แอมโมเนีย 10		มีลักษณะเป็นเหนียวหนืด ไม่มีการแยกชั้น ความหนืด = 2.02×10^{3} cps
ฟูมซิลิกา 10 แอมโมเนีย 1		มีลักษณะเป็นเหนียวหนืด และสารกับน้ำยังไม่แยกชั้น กัน จึงหาความหนืดได้โดย ความหนืด = 1.05×10^{3} cps
ฟูมซิลิกา 10 แอมโมเนีย 10		มีลักษณะเป็นเหนียวหนืด และสารกับน้ำยังไม่แยกชั้น กัน จึงหาความหนืดได้โดย ความหนืด = 851 cps

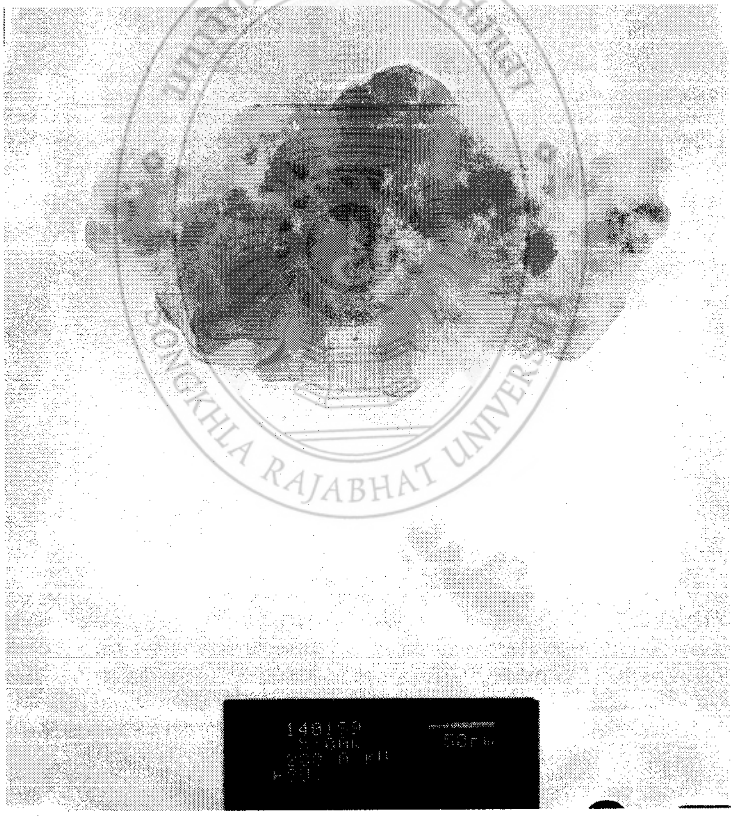
ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดลองการเตรียม Si69-t-SiO_2

ตารางที่ ง.1 ขนาดอนุภาคของ Si69-t-SiO_2 วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Zeta-potential

ตัวอย่างที่	ขนาดอนุภาค
1	200
2	210
เฉลี่ย	205

รูปที่ ง.1 ภาพ TEM ของ Si69-t-SiO_2



SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ตารางที่ ง.2 การทดสอบหาค่า pH ของ Si69-t-SiO_2

Si69/T %/°C	pH			
	1	2	3	median
5/54	9.43	9.40	9.74	9.43
8.54/65	9.59	9.60	9.63	9.60
5/54	9.22	9.27	9.28	9.27
1.46/65	9.36	9.32	9.31	9.32
10/54	9.60	9.55	9.58	9.58
5/54	9.38	9.40	9.37	9.38
5/70	9.30	9.33	9.3	9.30
8.54/43	9.62	9.65	9.69	9.65
5/38	9.59	9.54	9.61	9.59
5/54	9.39	9.48	9.46	9.46
1.46/43	9.66	9.62	9.57	9.62
5/54	9.32	9.34	9.29	9.32
0/54	9.36	9.42	9.48	9.42

ตารางที่ ง.3 การทดสอบหาค่า viscosity ของ Si69-t-SiO_2

Si69/T %/°C	viscosity (cps)			
	1	2	3	median
5/54	$3.11x10^3$	$3.06x10^3$	$3.21x10^3$	$3.11x10^3$
8.54/65	$2.10x10^3$	$2.04x10^3$	$1.95x10^3$	$2.10x10^3$
5/54	$2.40x10^3$	$2.35x10^3$	$2.15x10^3$	$2.35x10^3$
1.46/65	$1.30x10^3$	$1.29x10^3$	$1.32x10^3$	$1.30x10^3$
10/54	$2.91x10^3$	$2.90x10^3$	$2.87x10^3$	$2.90x10^3$
5/54	$1.95x10^3$	$1.90x10^3$	$1.85x10^3$	$1.90x10^3$
5/70	$1.50x10^3$	$1.45x10^3$	$1.30x10^3$	$1.45x10^3$
8.54/43	$1.15x10^3$	$1.05x10^3$	$1.10x10^3$	$1.10x10^3$
5/38	852	798	852	852
5/54	$1.75x10^3$	$1.80x10^3$	$1.70x10^3$	$1.75x10^3$
1.46/43	$1.66x10^3$	$1.80x10^3$	$1.78x10^3$	$1.78x10^3$
5/54	$1.90x10^3$	$1.75x10^3$	$1.85x10^3$	$1.85x10^3$
0/54	$2.65x10^3$	$2.70x10^3$	$2.96x10^3$	$2.70x10^3$

ตารางที่ ง.4 ผลการทดสอบ compressive strength ของ Si69-t-SiO_2

Si-69/T %/°C	Compressive strength (N)			
	1	2	3	median
5/54	54.43	57.28	56.17	56.17
8.54/65.31	48.77	50.7	46.49	48.77
5/54	47.09	53.56	40.16	47.09
1.46/65.31	74.54	65.96	53.37	65.96
10/54	47.04	58.53	51.09	51.09
5/54	56.92	51.68	64.83	56.92
5/70	65.95	69.13	67.53	67.53
8.54/42.69	70.37	89.94	62.29	70.37
5/38	63.14	81.23	53.43	63.14
5/54	66.37	73.42	77.15	73.42
1.46/42.69	61.21	58.89	48.02	58.89
5/54	49.78	48.86	42.26	48.86
0/54	33.47	35.09	32.84	33.47

ตารางที่ ง.5 ผลการทดสอบ compression set ของ Si69-t-SiO_2

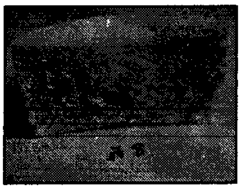
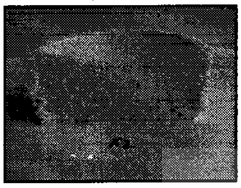
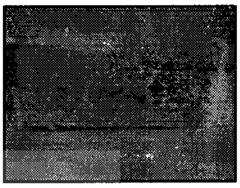
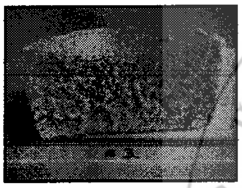
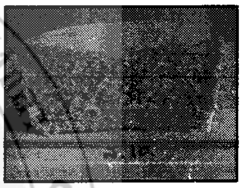
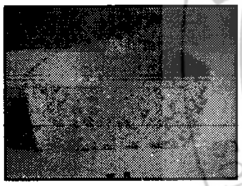
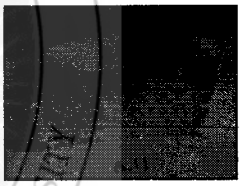
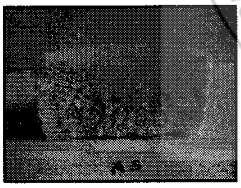
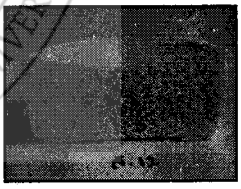
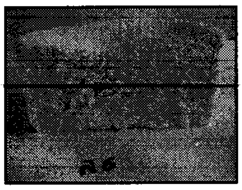
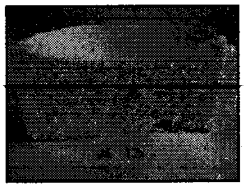
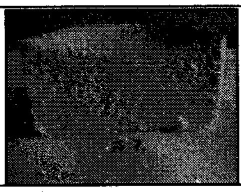
Si-69/T %/°C	thickness after (mm)			thickness before (mm)			compression set (%)			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	median
5/54	20.68	21.78	20.9	17.66	18.5	18	27.01	26.71	25.44	26.71
8.54/65.31	20.7	20.9	21.1	16.5	16.8	16.8	37.50	37.07	37.07	37.07
5/54	20.6	20.46	20	15.3	17.4	15.45	47.75	27.92	43.33	43.33
1.46/65.31	20.7	20.2	20.14	14.39	14.4	13.2	56.34	54.21	65.23	56.34
10/54	19.32	21.8	21.12	10.98	12.58	12	84.93	74.96	78.49	78.49
5/54	20.46	20.8	20.2	17.86	17.52	17.2	23.72	29.03	28.04	28.04
5/70	20.9	19.92	19.7	12.36	11.7	12	74.91	78.89	75.49	75.49
8.54/42.69	18.56	19.4	18.1	13	13.3	13	61.37	61.62	59.30	61.37
5/38	18.44	19.58	19.02	14.5	16	15.44	44.07	35.52	37.61	37.61
5/54	21.41	20.25	21.26	11.82	11.3	11.6	80.52	83.26	82.14	82.14
1.46/42.69	20.2	21.26	20.2	18.9	20.4	19.1	12.15	7.31	10.28	10.28
5/54	21	21	20.62	18.1	18.58	17.8	25.22	21.04	25.36	25.22
0/54	19.58	19.54	19.88	18	18.4	18.64	15.67	11.35	11.95	11.95

ตารางที่ ง.6 ผลการทดสอบ tensile strength และ elongation at break ของ Si69-t-SiO_2

Si69/T %/°C	No	thickness (mm)	F (N)	TS (N/mm^2)	EB (%)	Si69/T %/°C	No	thickness (mm)	F (N)	TS (N/mm^2)	EB (%)
5/54	1	8.31	25.28	0.12	85.85	8.54/43	1	8.09	19.54	0.10	69.16
	2	8.35	25.26	0.12	85.86		2	7.60	18.00	0.09	56.05
	3	8.27	28.12	0.14	93.15		3	7.91	18.65	0.09	57.96
8.54/65	1	8.52	28.22	0.13	91.33	5/38	1	7.56	20.37	0.11	63.63
	2	8.79	29.66	0.13	100.75		2	7.70	19.50	0.10	70.85
	3	8.30	30.67	0.15	104.73		3	7.37	21.05	0.11	72.66
5/54	1	7.40	14.96	0.08	0.00	5/54	1	9.98	35.21	0.14	48.73
	2	7.77	11.83	0.06	0.00		2	10.25	33.50	0.13	46.70
	3	7.44	12.18	0.07	0.00		3	9.98	35.63	0.14	50.45
1.46/65	1	7.99	13.55	0.07	48.58	1.46/43	1	8.27	11.35	0.05	31.92
	2	7.63	14.01	0.07	48.58		2	7.76	14.73	0.08	46.89
	3	7.66	13.68	0.07	50.40		3	7.53	11.25	0.06	35.52
10/54	1	7.72	23.01	0.12	107.99	5/54	1	7.76	32.54	0.17	124.79
	2	6.91	24.00	0.14	121.12		2	7.65	30.09	0.16	110.02
	3	7.41	20.08	0.11	87.60		3	7.54	32.06	0.17	147.22
5/54	1	8.02	19.79	0.10	74.55	0/54	1	7.62	31.11	0.16	113.72
	2	8.10	21.99	0.11	76.43		2	7.88	35.51	0.18	121.51
	3	7.76	18.94	0.10	70.81		3	7.85	32.8	0.17	115.52
5/70	1	7.68	21.16	0.11	87.79						
	2	7.67	21.01	0.11	93.32						
	3	7.82	22.97	0.12	100.67						

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ตารางที่ ง.7 ลักษณะตัวอย่างชิ้นทดสอบของโฟมยางที่เติม Si69-t-SiO_2

Si69/T %/°C	form	nature	Si69/T %/°C	form	nature
5/54		เกิดการยุบและกลวงด้านใน ฟองมีขนาดเล็ก	8.54/43		เกิดการยุบและกลวงด้านใน ฟองมีขนาดเล็ก
8.54/65		เกิดการยุบและฟองมีขนาดเล็กละเอียด	5/38		เกิดการยุบและกลวงด้านใน ฟองมีขนาดเล็ก
5/54		เกิดการยุบและกลวงด้านในเล็กน้อย ฟองมีลักษณะหยาบ	5/54		เกิดการยุบและกลวงด้านในเล็กน้อย ฟองมีขนาดเล็ก
1.46/65		เกิดการยุบและกลวงด้านในเล็กน้อย ฟองมีขนาดเล็ก	1.46/43		เกิดการยุบและกลวงด้านในเล็กน้อย ฟองมีขนาดเล็ก
10/54		เกิดการยุบและกลวงด้านใน ฟองมีขนาดเล็ก	5/54		เกิดการยุบและฟองมีขนาดเล็กละเอียด
5/54		เกิดการยุบและกลวงด้านใน ฟองมีขนาดเล็ก	0/54		เกิดการยุบและกลวงด้านใน ฟองมีขนาดไม่สม่ำเสมอกัน
5/70		เกิดการยุบและฟองมีขนาดเล็กละเอียด			

ภาคผนวก จ
ข้อมูลการทดลองสมบัติของโฟมยางที่แปรปริมาณสารตัวเติม

ตารางที่ จ.1 การเปรียบเทียบผลของปริมาณ SiO_2 และ Si69-t-SiO_2 ต่อสมบัติ Compression set

volume (phr)	no.	thickness after (mm)		thickness before (mm)		compression set (%)	
		SiO_2	Si69-t-SiO_2	SiO_2	Si69-t-SiO_2	SiO_2	Si69-t-SiO_2
0	1	17.10	17.10	16.10	16.10	13.16	13.16
	2	16.90	16.90	15.00	15.00	25.68	25.68
	3	17.10	17.10	16.20	16.20	11.84	11.84
0.83	1	26.52	19.88	10.07	17.80	96.65	20.04
	2	26.06	19.42	9.75	17.20	98.49	22.38
	3	25.99	19.78	9.84	17.55	97.94	21.69
1.67	1	24.81	20.84	9.61	18.20	99.28	23.28
	2	23.71	18.00	9.91	16.14	97.11	21.88
	3	23.99	20.40	10.06	18.58	96.14	16.70
2.51	1	22.98	19.60	10.20	17.6	94.81	19.80
	2	23.35	18.52	9.71	16.58	98.48	21.51
	3	23.58	19.46	9.63	16.38	99.08	30.92

ตารางที่ จ.2 ผลการทดสอบค่า Median ของสมบัติ compression set ที่แปรปริมาณ SiO_2 และ Si69-t-SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

volume (phr)	compression set (%)	
	SiO_2	Si69-t-SiO_2
0	13.16	13.16
0.83	97.94	21.69
1.67	97.11	21.88
2.51	98.48	21.51

ตารางที่ จ.3 การเปรียบเทียบผลของปริมาณ SiO_2 และ Si69-t-SiO_2 ต่อสมบัติ tensile strength และ elongation at break

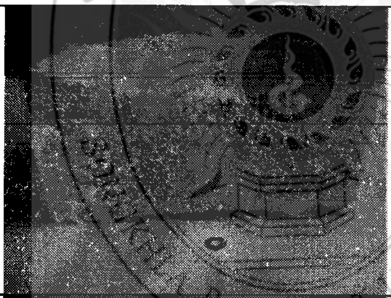
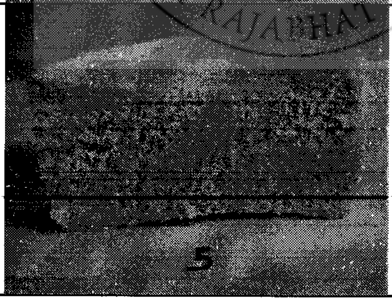
volume (phr)	tensile strength (N/mm^2)		tlongation at break (%)	
	SiO_2	Si69-t-SiO_2	SiO_2	Si69-t-SiO_2
0	0.022	0.022	74.760	74.760
0.83	0.445	0.023	92.54	95.410
1.67	0.446	0.027	96.29	117.590
2.51	0.341	0.022	67.87	61.150

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

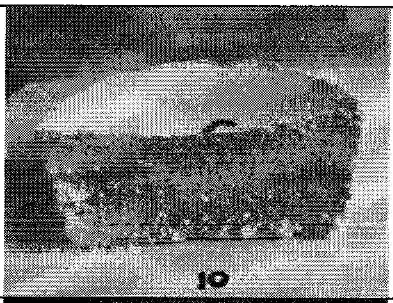
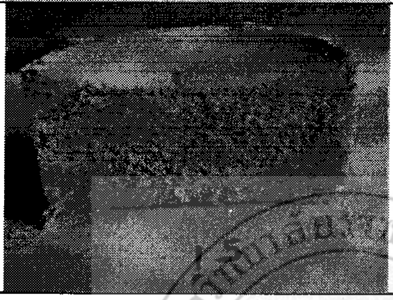
ตารางที่ จ.4 ผลการทดสอบค่า hardness (Shore OO) ของโฟมยางที่มีการแปรปริมาณ SiO_2 และ Si69-t-SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

volume (phr)	hardness (Shore OO)	
	SiO_2	Si69-t-SiO_2
0	10.0	10.0
0.83	11.4	20.9
1.67	13.7	21.0
2.51	15.7	24.4

ตารางที่ จ.5 ลักษณะตัวอย่างชิ้นทดสอบที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

volume (phr)	form	nature
0		เกิดการยุบและ ฟองมีความหยาบ
0.83		เกิดการยุบ ฟองมีขนาดเล็ก

ตารางที่ จ.6 ลักษณะเนื้อโฟมยางที่ผสม Si69-t-SiO_2 ในปริมาณ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr (ต่อ)

1.67		เกิดการยุบ ฟองมีขนาดเล็ก
2.51		เกิดการยุบ ฟองมีขนาดเล็กละเอียด

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ภาคผนวก ฉ
ประวัติผู้ปฏิบัติการวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นาย เอกฤกษ์ พุ่มนก
2. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr, Ekaroek Phumnok
3. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3909900210111
4. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

   หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

   คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ถ.กาญจนวณิช ต.เขารูปช้าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000 โทรศัพท์ 074-336949 E-mail ekaroek.ph@skru.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

   วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

   เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

   หัวหน้าโครงการวิจัย :

   1. ชื่อโครงการวิจัย "ปัจจัยในการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เขม่าดำจากสภาวะน้ำยางโดยใช้น้ำยางสด"
   2. ชื่อโครงการวิจัย "การเตรียมมาสเตอร์แบทช์เขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตจากสภาวะน้ำยางโดยใช้น้ำยางสด"

ผู้ร่วมวิจัย 1

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายรัฐพงษ์ หนูหมาด
2. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr, Rattapong Numard
3. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 1910600004287
4. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

5. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
6. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ถ.กาญจนวณิช ต.เขารูปช้าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000 โทรศัพท์ 074-336949 E-mail rattapong.nu@skru.ac.th
7. ประวัติการศึกษา
8. วุฒิการศึกษา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
9. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
10. เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์
11. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

    หัวหน้าโครงการวิจัย :

    1. งานวิจัยที่เสร็จสิ้นแล้ว: ชื่อโครงการวิจัย "การศึกษาน้ำมันปาล์มดัดแปรเป็นสารเสริมประสิทธิภาพพลาสติกใน PVC"
    2. งานวิจัยที่กำลังทำ: "การเตรียมและสมบัติเชิงกลของไม้เชิงประกอบจากขวดน้ำที่ใช้แล้ว กับผงไม้ยางพารา ทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา และสถานภาพในการทำวิจัย งานที่ได้ดำเนินการเสร็จสิ้นแล้ว ประมาณร้อยละ 80 ของงานทั้งหมด

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ผู้ร่วมวิจัย 2

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางวรรณฤดี หมื่นพล
2. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mrs, Wanrudee Munchpol
3. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3940700337039
4. ตำแหน่งปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์
5. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
6. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ถ.กาญจนวณิช ต.เขารูปช้าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000 โทรศัพท์ 074-336949 E-mail wanrudee.me@skru.ac.th
7. ประวัติการศึกษา
8. วุฒิการศึกษา วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

9. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
10. เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์
11. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

ผู้ร่วมวิจัย

1. งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อโครงการวิจัย "การเตรียมและสมบัติเชิงกลของไม้เชิงประกอบจากขวดน้ำที่ใช้แล้ว กับผงไม้ยางพารา ทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา และสถานภาพในการทำวิจัย งานที่ได้ดำเนินการเสร็จสิ้นแล้ว ประมาณร้อยละ 80 ของงานทั้งหมด

ผู้ช่วยวิจัย 1

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวอัสมา ศิกะคาร
2. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Ms. Asma Sigakarn
3. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน ๑๙๑๙๘00๙๒๗๖0๓
4. ตำแหน่งปัจจุบัน นักศึกษา
5. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
6. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ถ.กาญจนวณิช ต.เขารูปช้าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000 โทรศัพท์ 074-336949 E-mail -
7. ประวัติการศึกษา
8. วุฒิการศึกษา วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์
9. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
   - เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

ผู้ช่วยวิจัย 2

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวอาตีฟ๊ะ บุตรา
2. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Ms, Atifa Sigakarn
3. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน ๑๙๑๙๘00๙๒๗๖0๓

4. ตำแหน่งปัจจุบัน นักศึกษา
5. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
6. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ถ.กาญจนวณิช ต.เขารูปช้าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000 โทรศัพท์ 074-336949 E-mail -
7. ประวัติการศึกษา
8. วุฒิการศึกษา วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์
9. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
   - เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY