



รายงานการวิจัย

การใช้ฟุ้งซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยไซเลนในผลิตภัณฑ์โฟมยางที่ผลิตจาก
น้ำยางธรรมชาติ

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

เอกฤกษ์ ฟูมก
รัฐพงษ์ หนูหมาด
วรรณฤดี หมั่นพล
อัสมา ศิริการ
อะตีฟ้า บุตรา



สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

รายงานวิจัยฉบับนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณกองทุนวิจัย
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

พ.ศ. 2559

ชื่องานวิจัย การใช้ฟุ่มซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยไซเลนในผลิตภัณฑ์โฟมยางที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ
ผู้วิจัย เอกฤกษ์ พุ่มนก และคณะ
คณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ปี 2559

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมดิสเพอร์สชันฟุ่มซิลิกา สภาวะการปรับสภาพผิวของฟุ่มซิลิกาด้วยสารคู่ควบไซเลน (Si69) ผลของปริมาณ Si69 และปริมาณของซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69 (Si69) ที่มีต่อการแปรรูปและสมบัติของโฟมยาง โดยพบว่าปริมาณของซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ทำให้ดิสเพอร์สชันซิลิกา มีปริมาณของแข็งทั้งหมด และความหนืดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่น และค่า pH ลดลงปริมาณแอมโมเนียในดิสเพอร์สชันซิลิกาที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมด ความหนาแน่น pH แต่ความหนืดลดลง ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมคือปริมาณ SiO_2 และแอมโมเนีย คือร้อยละ 25 และ 10 ตามลำดับ โดยใช้วัฏหามอลร้อยละ 1 และน้ำกลั่นร้อยละ 64 บอลมิลเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ในการเตรียมฟุ่มซิลิกาปรับสภาพผิวด้วยไซเลน Si69 ที่นำไปใช้ในโฟมยางและให้สมบัติที่ดี สภาวะที่เหมาะสม คืออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และปริมาณ Si69 ร้อยละ 5 พบว่าที่อุณหภูมิปฏิกิริยาสูง ปริมาณ Si69 ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อการดึงยืด และความสามารถในการยืดจนขาดเพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานต่อแรงกด และค่าการจัดตัวเนื่องจากการอัดลดลง ในทางกลับกัน ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาดำ เมื่อปริมาณของไซเลนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกด และค่าการจัดตัวเนื่องจากการอัดมีค่าสูงขึ้น แต่ความต้านทานต่อการดึงยืด และความสามารถในการยืดจนขาดลดลง การใช้ Si69-t-SiO₂ ในโฟมยาง ในปริมาณน้อย (0.8-2.5 phr) ไม่มีผลต่อการแปรรูปของโฟมยาง ขนาดของเซลล์โฟมยาง การจัดตัวเนื่องจากการการอัด และความต้านทานต่อการดึงยืด แต่ทำให้ความแข็ง และความสามารถในการยืดจนขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งปริมาณ Si69-t-SiO₂ ที่เหมาะสมของ คือ 2.5 phr

เลข Bib#	1146994
วันที่	- 6 ก.ย. 2564
เลขประจำหนังสือ	678.4
	127

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-SiO₂) 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 SiO₂ and ammonia respectively, with 1% valtamol and 64% distilled water for 72 hours ball mill time. The best Si69-t-SiO₂ 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-SiO₂ 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-SiO₂ content of 2.5 phr showed the best properties of rubber foam.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้า นายเอกฤกษ์ พุ่มนก และคณะ
ต้องขอขอบพระคุณ โปรมแกรมวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ให้ความสะดวกเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำการ
ทดลองวิจัย และขอขอบพระคุณขอขอบคุณ กองทุนวิจัย สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏ
สงขลา ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยตลอดโครงการ



นายเอกฤกษ์ พุ่มนก และคณะ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

15 สิงหาคม 2559

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
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 ประเภทของน้ำยางข้นตามวิธีการผลิต	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 ฟุ่มซิลิกา	11
2.7 บทบาทของสารคู่ควบไซเลน (silane)	11
2.8 สมบัติของยางวัลคาไนซ์	14

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 การตีโพน	15
2.10 การเทลงเบ้าและการจับตัว	15
2.11 การล้าง	15
2.12 การทำให้โพนยางแห้ง	16
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
3 สารเคมี อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 นํ้ายางและสารเคมี	19
3.1.1 นํ้ายางชั้น	19
3.1.2 กำมะถัน (sulphur, S)	19
3.1.3 ซิงค์ไดเอธิลไดไธโอคาร์บาเมต (zinc diethyl dithiocarbamate, ZDEC)	19
3.1.4 ซิงค์เมอร์แคปโทเบนโซไทอาโซล (zinc mercaptobenzothiazole, ZMBT)	19
3.1.5 ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO)	19
3.1.6 โพแทสเซียม โอลิเอต (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 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide, NH ₄ OH)	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 กล้องถ่ายภาพมือถือ	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 กระจกน็อค	27
3.2.19 แบบพิมพ์	28
3.2.20 เครื่องแก้ววิทยาศาสตร์/อุปกรณ์ที่ใช้	29
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง	31
3.3.1 การเตรียมสารเคมี	31
3.3.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณฟุ่มซิลิกาและแอมโมเนียมที่มีผลต่อการขึ้นรูปและสมบัติของโพลีเมอร์ธรรมชาติ	32
3.3.3 ศึกษาผลของสารคู่ควบไซเลน และอุณหภูมิในการเตรียม Si69-t-SiO ₂ ที่มีผลต่อการขึ้นรูปและสมบัติของโพลีเมอร์ธรรมชาติ	32
3.3.3.1 ศึกษาการเตรียมฟุ่มซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3.2 ศึกษาการเตรียม โฟมยางธรรมชาติที่ใช้ฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69 เป็นสารตัวเติม	33
3.3.4 ศึกษาและเปรียบเทียบของปริมาณ SiO ₂ กับ Si69-t-SiO ₂ ที่มีต่อสมบัติของ โฟมยางธรรมชาติ	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 ดิสเพอร์ชันฟูมซิลิกา	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 ผลของสารคู่ควบ ไซเลน และอนุภูมิในการเตรียม Si69-t-SiO ₂ ที่มีต่อสมบัติของ Si69-t-SiO ₂ คิสเพอร์สชั้นการขึ้นรูป และสมบัติของโพลีเมอร์ผสม	53
4.2.1 ผลการทดสอบความเป็น กรด-เบส ของ Si69-t-SiO ₂ คิสเพอร์สชั้น	53
4.2.2 ผลการทดสอบความหนืดของ Si69-t-SiO ₂ คิสเพอร์สชั้น	55
4.2.3 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงกดของโพลีเมอร์ที่ใช้ Si69-t-SiO ₂ คิสเพอร์สชั้นเป็นสารตัวเติม	57
4.2.4 ผลการทดสอบการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโพลีเมอร์ที่ใช้ Si69-t-SiO ₂ คิสเพอร์สชั้นเป็นสารตัวเติม	59
4.2.5 ผลการทดสอบความสามารถในการยืดจนขาดของโพลีเมอร์ที่ใช้ Si69-t-SiO ₂ คิสเพอร์สชั้นเป็นสารตัวเติม	61
4.2.6 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโพลีเมอร์ที่ใช้ Si69-t-SiO ₂ คิสเพอร์สชั้นเป็นสารตัวเติม	63
4.3 เปรียบเทียบผลของปริมาณ Si69-t-SiO ₂ ที่มีต่อสมบัติของโพลีเมอร์	65
4.3.1 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีผลต่อสมบัติด้านการยุบตัวของโพลีเมอร์	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 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งของโพลีเมอร์	68
4.3.4 อิทธิพลของปริมาณฟูมซิลิกาที่มีต่อสมบัติทางกลพื้นฐานวิทยาของโพลีเมอร์	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



สารบัญญภาพ

	หน้า
บทที่ 2	
รูปที่ 2.1 น้ํายางธรรมชาติจากต้นยางพารา	4
รูปที่ 2.2 fumed silica	9
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน Si69	12
รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาการปรับปรุงผิวของซิลิกาด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69	13
รูปที่ 2.5 ปฏิกริยาระหว่างซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 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 หม้อนึ่งไอน้ํ	22
รูปที่ 3.5 แก๊สหุงต้ม	22
รูปที่ 3.6 ตู้อบอากาศร้อน (hot air oven)	23
รูปที่ 3.7 แบบพิมพ์ทรงกระบอกกลมูนิเนียม	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 เวอร์เนียคิจิตอล	27
รูปที่ 3.17 เครื่องวัดความหนา (micrometer thickness gauge)	27
รูปที่ 3.18 ครอบอกเข็มฉีดยา	28
รูปที่ 3.18 ครอบอกเข็มฉีดยา	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.20 แบบพิมพ์ทดสอบการจับตัวเนื่องจากแรงกด (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 (%) ที่มีต่อค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของคิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา	43
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของคิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา	46
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อค่าความเป็นกรด-เบสของคิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา	49
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อค่าความหนืดของ คิสเพอร์สชันฟูมซิลิกา	52
รูปที่ 4.5 การปรับสภาพผิวของฟูมซิลิกา	53
รูปที่ 4.6 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อ pH ของ Si69-t-SiO ₂ คิสเพอร์สชัน	54
รูปที่ 4.7 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความหนืดของ Si69-t-SiO ₂ คิสเพอร์สชัน	56
รูปที่ 4.8 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงกดของโฟมที่ใช้ Si69-t-SiO ₂ คิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม	58
รูปที่ 4.9 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าการจับตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมที่ใช้ Si69-t-SiO ₂ คิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความสามารถในการยึดจนขาดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO ₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม	62
รูปที่ 4.11 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO ₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม	64
รูปที่ 4.12 อิทธิพลของปริมาณฟุ่มซิติกต่อการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของ โฟมยางที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO ₂ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr	65
รูปที่ 4.13 อิทธิพลของปริมาณฟุ่มซิติกต่อความสามารถในการยึดของ โฟมยางที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO ₂ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr	66
รูปที่ 4.14 อิทธิพลของปริมาณฟุ่มซิติกต่อความต้านทานต่อแรงดึงของ โฟมยางที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO ₂ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr	67
รูปที่ 4.15 อิทธิพลของปริมาณฟุ่มซิติกต่อความแข็งของ โฟมยางที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO ₂ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr	68
รูปที่ 4.16 ภาพขยายของ โฟมยาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่มีกำลังขยาย 20x 50x และ 100x โดยการแปรปริมาณ SiO ₂ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr	69
รูปที่ 4.17 ภาพขยายของ โฟมยาง 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 การเตรียมสารเคมีดิสเพอร์ชันสำหรับดีโฝมยางธรรมชาติ	31
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของการเตรียมโพแทสเซียมโอเลียด	32
ตารางที่ 3.3 สูตรที่ใช้ในการเตรียมดิสเพอร์ชันฟุ้งซิลิกา	32
ตารางที่ 3.4 สูตรการผสม Si69-t-SiO ₂ ที่แปรปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 และอนุหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา	33
ตารางที่ 3.5 น้ำหนักน้ำยางและสารเคมีที่ใช้เตรียมโฝมยางผสมฟุ้งซิลิกาที่ปรับสภาพผิวฯ	34
ตารางที่ 3.6 น้ำหนักน้ำยางและสารเคมีที่ใช้เตรียมโฝมยาง	35
ตารางที่ 4.1 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในสารเคมี (total solid content, TSC) ของดิสเพอร์ชัน	40
ตารางที่ 4.2 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC)	41
ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC)	42
ตารางที่ 4.4 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าความหนาแน่น (Density) ของดิสเพอร์ชัน	43
ตารางที่ 4.5 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความหนาแน่น (Density)	44
ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของปริมาณของความหนาแน่น (Density)	45
ตารางที่ 4.7 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าความเป็นกรด-เบส (potential of hydrogen ion, pH) ของดิสเพอร์ชัน	46
ตารางที่ 4.8 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความเป็นกรด-เบส (potential of hydrogen ion, pH)	46
ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์ของปริมาณของความเป็นกรด-เบส (potential of hydrogen ion, pH)	47
ตารางที่ 4.10 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าความหนืด (Viscosity) ของดิสเพอร์ชัน	49
ตารางที่ 4.11 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความหนืด (Viscosity)	49
ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์ของปริมาณของความเป็นกรด-เบส (potential of hydrogen ion, pH)	50
ตารางที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิว ตอบสนองของค่า pH	53

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิว ตอบสนองของค่าความหนืด	54
ตารางที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิว ตอบสนองของค่าความต้านทานต่อแรงกดของโฟมยาง	56
ตารางที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิว ตอบสนองของค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยาง	58
ตารางที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิว ตอบสนองของค่าความสามารถในการยืดออกจนขาดของโฟมยาง	60
ตารางที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิว ตอบสนองของค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยาง	62



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

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

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

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมในยางที่นิยมใช้เพื่อเสริมประสิทธิภาพของยางให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เป็นสารตัวเติมที่มีสีขาวจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในฟองยาง เพื่อให้สามารถปรับความแข็ง ความนุ่ม ได้ตามความต้องการ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มสมบัติทางฟิสิกส์ของยางให้ดีขึ้น ประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกาขึ้นกับขนาดอนุภาคของซิลิกา ในบรรดาซิลิกาต่างๆ ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ฟุ่มซิลิกาเป็นซิลิกาที่น่าสนใจ ในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในโฟมยาง เพราะ ฟุ่มซิลิกา มีขนาดอนุภาคเล็กมาก โดยมีขนาดอนุภาคปฐมตั้งแต่ 5-50 นาโนเมตร เสริมสมบัติทางฟิสิกส์ของยางได้ดี แม้ใช้ในปริมาณน้อย ซึ่งเหมาะกับโฟมยาง ในบางการประยุกต์ใช้งาน เช่น ที่นอน หมอน เป็นต้น แต่ ฟุ่มซิลิกา ยังมีปัญหาที่สำคัญคือ สภาพผิวมีของไฮดรอกซิลประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก

มาก ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนดึงดูดกัน จนอนุภาคปฐมขนาดเล็กรวมกันเป็นอนุภาคใหญ่ การเกิดอันตรกิริยาระหว่าง สารตัวเติม-สารตัวเติมสูง การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติม-ยางต่ำ จึงมีการพัฒนานำอัลคอกซีไซเลน (alkoxy silane) มาเป็นสารเป็นตัวกลางในการสร้างอันตรกิริยาระหว่างซิลิกาที่ยางมากขึ้น ส่งผลให้มีอันทำให้มีสมบัติทางฟิสิกส์ที่ดีขึ้นมาก

การทำวิจัยในครั้งนี้ จึงนำฟุ้งซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคปฐมในระดับนาโน มาเตรียมให้อยู่ในรูปของดิสเพอร์สชัน และปรับสภาพผิวด้วยอัลคอกซีไซเลน นำมาเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์โฟมยาง เช่น หมอน ที่นอนโฟมยาง เป็นต้น เพื่อให้สามารถใช้ในปริมาณน้อยแต่เสริมสมบัติทางฟิสิกส์ของยางให้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟุ้งซิลิกาดีสเพอร์สชัน ด้วยเครื่องบอลมิล
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพผิวของฟุ้งซิลิกาด้วยไซเลน
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณของไซเลนที่มีต่อการปรับสภาพผิวของฟุ้งซิลิกา
4. เพื่อศึกษาผลของฟุ้งซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยไซเลนต่อการขึ้นรูปและสมบัติของฟองยางธรรมชาติ

1.3 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถผลิตฟองยางจากน้ำยางชั้นที่มีสมบัติต่างๆ ที่ได้โดยมีฟุ้งซิลิกาและฟุ้งซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยอัลคอกซีไซเลนเป็นสารตัวเติม
2. สามารถทราบผลของอิทธิพลของการแปรปริมาณฟุ้งซิลิกาและฟุ้งซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยอัลคอกซีไซเลนที่มีผลต่อโครงสร้างผลิตภัณฑ์โฟมยาง
3. สามารถทราบผลของอิทธิพลของการแปรปริมาณฟุ้งซิลิกาและฟุ้งซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยอัลคอกซีไซเลนที่มีผลต่อสมบัติทางสัณฐานวิทยา
4. สามารถทราบผลของอิทธิพลของการแปรปริมาณฟุ้งซิลิกาและฟุ้งซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยอัลคอกซีไซเลนที่มีผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในการวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟุ้งซิลิกาดีสเพอร์สชัน ด้วยเครื่องบอลมิล ศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ในการปรับสภาพผิวของฟุ้งซิลิกาด้วยไซเลน ชนิด Alkoxy silane และอิทธิพลของปริมาณไซเลน ที่มีต่อการปรับสภาพผิวของฟุ้งซิลิกา

กาดังกล่าว จากนั้นนำฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮเลนที่ได้จากการวิจัย มาประยุกต์ใช้เป็นสารตัวเติมในฟองยางจากน้ำยางธรรมชาติ โดยศึกษาผลของปริมาณฟูมซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮเลนที่มีต่อความสามารถการขึ้นรูป และสมบัติของฟองยาง เช่น ลักษณะและขนาดของรูพรุนฟองยาง ความหนาแน่น สมบัติด้านการทนต่อแรงดึง การทนต่อการนึ่งกขาด การยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกด เป็นต้น



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยเป็นพื้นที่ในการปลูกยางพาราเป็นจำนวนมาก มักปลูกอยู่ในพื้นที่ทางภาคใต้ ภาคตะวันออก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จากข้อมูลสถิติยางพาราของสมาคมยางพาราไทย ได้ระบุว่า ในปี 2555 ที่ผ่านมามีประเทศไทยมีปริมาณการผลิตยางพาราสูงถึง 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>)

น้ำยางมาจากต้นไม้อื่นต้นมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งคือ ยางพารามีถิ่นกำเนิดบริเวณกลุ่มน้ำอเมซอน ประเทศบราซิล และเปรู ทวีปอเมริกาใต้ ซึ่งชาวมายาในอเมริกากลางได้รู้จักการนำยางพารามาใช้ ก่อนปี พ.ศ. 2000 โดยการจุ่มเท้าลงในน้ำยางดิบเพื่อทำเป็นรองเท้า ส่วนเผ่าอื่นๆ นำยางไปใช้ประโยชน์ในการทำผ้ากันฝน ทำขวดใส่น้ำ และทำลูกบอลขย่งเล่นเกมส์ต่างๆ เป็นต้น จนกระทั่ง คริสโตเฟอร์ โคลัมบัส ได้เดินทางมาสำรวจทวีปอเมริกาใต้ ในระหว่างปี พ.ศ. 2036-2039 และได้พบกับชาวพื้นเมืองเกาะไฮติสที่กำลังเล่นลูกบอลขย่ง ซึ่งสามารถกระดอนได้ ทำให้คณะผู้เดินทางสำรวจประหลาดใจจึงเรียกว่า "ลูกบอลผีสิง" ต่อมาในปี พ.ศ. 2279 นักวิทยาศาสตร์ ชาวฝรั่งเศส ชื่อชาลส์ มารี เดอลา คองตามีน (charles merie dela condamine) ได้ให้ชื่อเรียกยางตามคำพื้นเมืองของชาวไมกาว่า "คาโอชู" (caoutchouc) ซึ่งแปลว่าต้นไม้อ่อนให้ และให้ชื่อเรียกของเหลวที่มีลักษณะข้นขาวคล้ายน้ำมันซึ่งไหลออกมาจากต้นยางเมื่อกรีดเป็นรอยแผลว่า ลาเท็กซ์ และใน พ.ศ. 2369 ไมเคิลฟาราเดย์ (faraday) ได้รายงานว่าน้ำยางเป็นสารที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนมีสูตรเคมีปริเคิล คือ C_5H_8 หลังจากนั้นจึงได้มีการปรับปรุงสมบัติของยางพาราเพื่อให้ใช้งานได้กว้างขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ (สารานุกรมเสรี, 2558)

2.3 น้ำยางข้น (concentrated natural rubber latex, NRL) (วรภรณ์, 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 ที่ไม่ใช่น้ำยังคงอยู่ในน้ำยางเหมือนเดิมโดยใช้ความร้อนในสภาพที่มีความดันต่ำช่วยคั้งนั้น จึงทำให้น้ำยางข้นมีความบริสุทธิ์ต่ำ

2.3.1.2 น้ำยางข้นจากการทำให้เกิดครีม (creaming latex) เป็นน้ำยางข้นที่ได้จากการทำให้เป็นครีมเต็มตัวทำให้เกิดครีมลงไป 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 น้ำยางข้นที่มีแอมโมเนียสูง (high ammoniated latex-HA latex) และน้ำยางข้นที่มีแอมโมเนียต่ำ (low ammoniated latex-LA latex) น้ำยางข้นที่มีแอมโมเนียสูง ได้แก่ น้ำยางข้นที่ถนอมด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) กับแอมโมเนีย หรือถนอมด้วยแอมโมเนียอย่างเดียว ส่วนน้ำยางข้นที่มีแอมโมเนียต่ำ ได้แก่ น้ำยางข้นที่ถนอมด้วยแอมโมเนียปริมาณน้อยประมาณร้อยละ 0.2 แล้วใช้ร่วมกับทีเอ็มทีดี ร้อยละ 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) หนึ่งโอกาสจะใช้คำว่า “เซรัม” (serum) แทนส่วนของตัวกลาง กรณีของน้ำยางประเภทมีน้ำเป็นตัวกลาง (aqueous lattices) ทั้งนี้ถ้าใช้คำว่า “เซรัม” กับน้ำยางที่มีน้ำเป็นตัวกลาง “เซรัม” 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 ธรรมชาติของส่วนที่กระจายซึ่งไม่ละลายเข้ากับตัวกลางที่เป็นของเหลวที่มันแขวนลอยอยู่ จึงทำให้น้ำยางในสถานะของของผสมที่ไม่ชอบตัวกลาง มากกว่าของผสมที่ชอบตัวกลาง (philic) แม้ว่าในทางวิทยาศาสตร์คอลลอยด์คลาสสิก (classical colloidal science) น้ำยางจะมีสมบัติที่ก้ำกึ่งระหว่างสารผสมที่ชอบหรือไม่ชอบสารตัวกลาง แต่โดยปกติลักษณะของ

ความไม่ชอบสารตัวกลางจะเด่นกว่านั้นคือ สิ่งจำเป็นที่หลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับน้ำยางคือ สถานะของ สารแขวนลอยต้องมีความเสถียรในสภาวะปกติตลอดระยะเวลาเป็นเดือนหรือปี

น้ำยางธรรมชาติ มีสมบัติที่เด่นที่สุด คือ ความแข็งแรงของเจลยางเปียกสูง (high wet gel strength) ซึ่งเป็นความพิเศษได้เปรียบในการการใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ใช้เทคนิค การจุ่ม หรือการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีวัสดุอื่นเสริมความแข็งแรง

2.4 สารเคมีสำหรับน้ำยาง (บุญธรรม, 2532)

การนำน้ำยางมาใช้งานจำเป็นต้องผสมสารเคมีลงในน้ำยาง เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ แต่สารที่จะผสมลงในน้ำยางได้นั้น ต้องเตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลาย (solution) ดิสเพอร์สชัน (dispersion) หรืออิมัลชัน (emulsion) ซึ่งเรียก น้ำยางที่ผสมสารเคมีแล้วว่าน้ำยางคอมพอนด์ (compound latex) หากนำสารเคมีผสมลงไปในน้ำยางโดยตรงได้น้ำยางคอมพอนด์ที่ไม่เหมาะสม ในการทำผลิตภัณฑ์ เนื่องจากสารเคมีจะตกตะกอนได้ นอกจากนั้นยังอาจทำให้น้ำยางจับตัวเป็น ก้อนได้ สารเคมีที่ผสมลงในน้ำยางต้องมีการเตรียมให้ผิวของสารเคมีนั้นเกลี้ยง เพื่อป้องกันไม่ให้ สารเคมีนั้นตกตะกอนและต้องมีการปรับสภาพความเป็น กรด-ด่าง ของสารเคมีนั้นด้วย สารเคมีที่ สามารถละลายในน้ำได้ต้องมีการเตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลายสำหรับสารเคมีที่เป็นของแข็งที่ ละลายน้ำได้น้อยมากหรือไม่ละลายน้ำเลย ต้องเตรียมให้อยู่ในรูปของดิสเพอร์สชันและถ้าสารเคมีที่ เป็นของเหลวที่ละลายน้ำได้น้อยหรือไม่ละลายน้ำต้องมีการเตรียมให้อยู่ในรูปของอิมัลชัน

2.4.1 สารกระตุ้น (activators)

สารกระตุ้นจะทำหน้าที่ช่วยให้สารตัวเร่งทำงานได้ดีขึ้น สารที่ใช้เป็นสารกระตุ้น ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ และออกไซด์ของโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม แต่นิยมใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ สารกระตุ้นในน้ำยางต่างจากสารกระตุ้นที่ใช้ในยางแห้งตรงที่ไม่ใช้กรดไขมัน เพราะในน้ำยางชั้นที่ ใช้ผลิตภัณฑ์ ไม่ได้ผ่านการชะล้างเอากรดไขมันแห้งปกติ ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ใช้มีค่าประมาณ 3-5 phr แต่กรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่โปร่งใสควรใช้ซิงค์ออกไซด์เล็กน้อยประมาณ 0.5 phr และถ้า ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีโมดูลัสสูง และทนทานอาจใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณมากได้

2.4.2 สารตัวเร่ง (accelerator)

สารตัวเร่งเป็นสารเคมีที่เร่งให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เร็วขึ้นหรือช่วยให้กำมะถันทำ ปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น สารเคมีพวกนี้ นอกจากจะช่วยเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวแล้ว ยังช่วยลดปริมาณ กำมะถันที่ต้องใช้ลงได้ด้วยโดยปกติการวัลคาไนซ์ในน้ำยาง ไม่มีปัญหาของยางสุกก่อนกำหนด

(scorch) ดังนั้นสามารถใช้สารตัวเร่งชนิดเร่งให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็ว สารตัวเร่งถ้าบ่งบอกตามความสามารถในการบ่มเร่งให้เกิดการคงรูป จะแบ่งได้เป็น 4 พวก

2.4.2.1 แชนเทต (xanthate) เป็นสารตัวเร่งใช้สำหรับน้ำยางโดยเฉพาะสาร ตัวเร่งพวกนี้เร่งปฏิกิริยาได้เร็วกว่าไดโซโอคาบาเมต การทำผลิตภัณฑ์จากน้ำยางโซเดียมแชนเทตทำปฏิกิริยาเร็วกว่าซิงค์แชนเทต และถ้าผสมโซเดียมแชนเทตกับซิงค์แชนเทตเข้าด้วยกันสามารถเร่งการวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่าเมื่อใช้เดี่ยว เนื่องจากสารตัวเร่งชนิดนี้เร่งการคงรูปได้เร็วมาก ฉะนั้นอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ควรต่ำประมาณ 80-110 องศาเซลเซียส และต้องใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นสารตัวเร่งพวกนี้ ได้แก่ โซเดียมไอโซโพรพิลแชนเทต(sodium isopropyl xanthate, SIX), ซิงค์ไอโซโพรพิลแชนเทต (zinc isopropyl xanthate, ZIX), ซิงค์บิวทิลแชนเทต (zinc butyl xavthat, ZBX)

2.4.2.2 ไดโซโอคาบาเมต (dithiocarbamates) เป็นสารตัวเร่งที่เร่งปฏิกิริยาได้เร็วกว่าแชนเทต สารตัวเร่งชนิดนี้ที่ใช้นิยมใช้มากที่สุดคือ ซิงค์ไดเอธิลไดโซโอคาบาเมต (zinc diethylndithi ocarbamate, ZDC) การใช้สารนี้ไม่ต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ได้แต่การใช้ซิงค์ออกไซด์ช่วยเพิ่มโมดูลัส และความต้านทานต่อแรงดึง ข้อเสียของสารตัวเร่งพวกไดโซโอคาบาเมต คือ ถ้าน้ำยางมีสารประกอบทองแดงจะเกิดปฏิกิริยาให้ คอปเปอร์ ไดโซโอคาบาเมต (copper dithiocamate) มีสีน้ำตาลแดงทำให้ผลิตภัณฑ์มีตำหนิ

2.4.2.3 ไธยูเรม (thiurams) เป็นสารตัวเร่งที่นิยมใช้เป็นตัวช่วยสารเร่งพวกไดโซโอคาบาเมต สารตัวเร่งพวกนี้ไม่มีรส ไม่มีกลิ่น ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์โปร่งใส หรืออุปกรณ์ที่สัมผัสกับอาหารได้ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ไธยูเรมเป็นสารตัวเร่ง เช่น ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เกสซกรรม อุปกรณ์ว่ายน้ำ เป็นต้น สารตัวเร่งพวกนี้ ได้แก่ เตตระเมทิลไทยูเรม โมโนซัลไฟด์ (tetramethyl thiuram monosulphide, TMTM), เตตระเมทิลไทยูเรม ไดซัลไฟด์ (tetramethyl thiuram disulphide, TMTD), เตตระไดเมทิลไทยูเรม ไดซัลไฟด์ (tetradimethyl thiuram disulphide, TDTD)

2.4.2.4 ไธอาโซล (thiazole) เป็นสารตัวเร่งที่ใช้เป็นตัวช่วยสารตัวเร่งพวกไดโซโอคาบาเมตเช่นกันจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มี modulus สูงการใช้ไธอาโซลในน้ำยางต้องระมัดระวัง เพราะอาจทำให้น้ำยางเป็นก้อนหรือคริมได้สารตัวเร่งพวกนี้ ได้แก่ เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (2-mercaptobenzothiazole, MBT), ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (zinc mercaptoben thiazole, ZMBT)

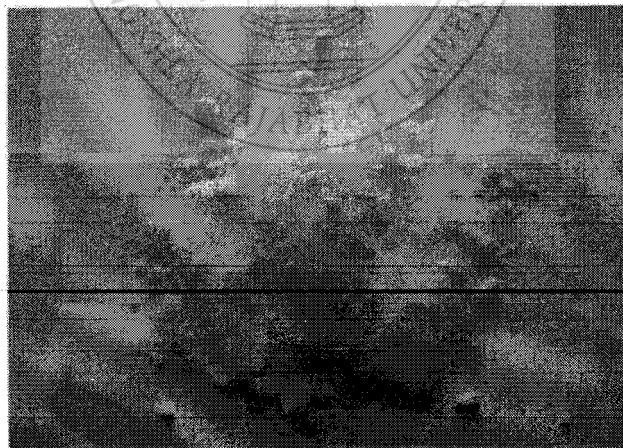
2.4.3 สารทำให้คงรูป (vulcanizing agent)

สารทำให้คงรูปเป็นสารเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ หรือทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางเป็นแบบตาข่ายในโมเลกุล ทำให้ยางมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เช่น อุดหนุมิสูงยางไม่เหลวเยิ้ม หรืออุดหนุมิต่ำยางไม่แข็งเปราะ

สารทำให้ยางคงรูป ที่นิยมใช้ในน้ำยาง ได้แก่ กำมะถัน สารประกอบของกำมะถัน สารพวกเปอร์ออกไซด์ กำมะถัน เป็นสารทำให้ยางคงรูป ที่นิยมใช้มากที่สุด ทั้งในยางแห้งและในน้ำยาง แต่กำมะถันที่ใช้ในน้ำยาง จะต้องเป็นชนิดที่มีขนาดอนุภาคที่เล็ก ปริมาณที่ใช้น้อยกว่าในยางแห้ง เพราะการนำน้ำยางมาแปรรูปไม่ต้องผ่านการบด (mastication) ให้โมเลกุลแตกลง ซึ่งต้องการกำมะถันมาทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางใหม่ นอกจากนั้นผลิตภัณฑ์จากน้ำยางมักต้องการโมลกุลส์ต่ำไม่จำเป็นต้องใช้กำมะถันมาก 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 m²/g มีความหนาแน่น 160-190 kg/m³



รูปที่ 2.2 fumed silica

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

2.4.4.1 การเตรียม เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่าง SiCl₄ กับไอน้ำในเปลวไฟของไฮโดรเจน และออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง 1,400 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวให้ซิลิกาออกมาซิลิ

กานี้มีหมู่ไฮดรอกไซด์ที่ผิวน้อยกว่าซิลิกาชนิดตกตะกอน และมีเนื้อซิลิกาถึง 99.8 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำปนอยู่ไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ มีฤทธิ์เป็นกรด มีขนาดอนุภาคเล็กมากราคาแพง แม้ใช้เป็นสารตัวเติมในยางปริมาณน้อย ก็สามารถเสริมประสิทธิภาพช่วยให้สมบัติทางฟิสิกส์ของยางดีขึ้นมาก

2.4.4.2 การใช้งานในผงฟูซิลิกา ทั่วไปมีสารที่ทำให้เกิดความแข็งและมีสารที่ไม่ทำให้เกิดกลุ่มก้อนราวกับซิลิกาเจล ทำหน้าที่เป็นสารดูดซับความชื้น ซึ่งมักจะถูกใช้ในเครื่องสำอางที่ทำให้คุณสมบัติของแสงที่ฟุ้งกระจาย จะถูกใช้เป็นแสงที่มีฤทธิ์กัดกร่อนในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ยาสีฟัน การใช้งานด้านอื่นๆ ได้แก่ สารตัวเติมในยางซิลิโคนและการปรับความหนืดในสีเคลือบ หมึกพิมพ์ กาว และเรซิน สังกะสีแบบไม่อิ่มตัว นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุหลักในการผลิตผงฉนวนสุญญากาศ

2.5 ปัญหาของการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม (เขาวน, 2553)

บนผิวซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากทำให้อนุภาคของซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกัน (filler-filler interaction) สูง ทำให้ซิลิกาอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่เพราะมีแรงดึงดูดที่ขี้ดของซิลิกาเข้าด้วยกันคือจะมีพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีความแข็งแรงค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้ ซิลิกาจึงแตกตัว และกระจายตัว ในยางได้ยากกว่าสารตัวเติมบางชนิด การใช้ซิลิกาจำนวนมากเป็นสารตัวเติมในยาง ทำให้กลุ่มซิลิกาอยู่ชิดกันมากขึ้นจนทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างกลุ่มก้อนซิลิกากับ ซิลิกาด้วยเกิดเป็น โครงสร้างตาข่ายที่เรียกว่า “โครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติม (filler-filler network)” ซึ่งทำให้ยางคอมปอนด์มีความหนืดสูงขึ้น ทำให้กระบวนการแปรรูปทำได้ค่อนข้างยาก และทำให้สิ้นเปลืองพลังและระยะเวลามากยิ่งขึ้น

การเติมสารเติมแต่งบางชนิดที่สามารถเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลได้ง่ายลงไปจะช่วยทำให้กลุ่มก้อนของซิลิกาแตกตัวออกได้ง่ายยิ่งขึ้น และความหนืดของยางคอมปอนด์ลดลง ตัวอย่างของสารเติมแต่งดังกล่าวได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (zincoctoate) หรือ เฮกซะเมทริลีนเตตรามิน (Hexamethylenetetramine, HEXA) รวมถึงสารตัวเร่งปฏิกิริยารูปในกลุ่มกวินิดีน เช่น ไดฟีนิลกวินิดีน (diphenyl guanidine, DPG) เป็นต้น

ปัญหาสำคัญเมื่อใช้ซิลิกา เป็นสารตัวเติม คือเรื่องการคงรูป เพราะบนผิวซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยารูปที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น ไดฟีนิลกวินิดีน (diphenyl guanidine, DPG) รวมถึงสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสี (Zinc complex) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมันต์ การดูดซับดังกล่าวทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีมีปริมาณลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีระดับของการคงรูปลดลงด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปผู้ผสมเคมียางสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้โดยการเติมสารประกอบในกลุ่มไกลคอลลหรือกลุ่มเอมีนลงไป เพราะสารประกอบเหล่านี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกา

กา ทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีที่ถูกดูดซับโดยหมู่ไฮดรอกซิลมี ปริมาณลดลง ทำให้ปฏิกิริยาของรูปเกิดได้เร็วขึ้น ตัวอย่างที่สำคัญของสารประกอบเหล่านี้ได้แก่ ได ฟีนี กัวนดินีน (diphenyl guanidine, DPG) พอลิเอทิลีนไกลคอล (poly ethylene glycol, PEG) ไตรเอทธานอลามีน และเฮกซะเมทิลีนเตตรามีน (Hexamethylenetetramine, HEXA) เป็นต้น นอกจากการเติมสารประกอบดังกล่าวแล้ว การปรับลำดับการเติมสารเคมีลงไปในเรื่องผสม เช่น การเติม ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ลงไปในช่วงท้ายของการผสมซึ่งช่วยลดปัญหาการดูดซับ สารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีได้เช่นกัน แต่ซิงค์ออกไซด์กระจายตัวได้ยากในยาง การผสมใน ลำดับหลังๆ ไม่ควรกระทำ เพราะอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติของยางได้

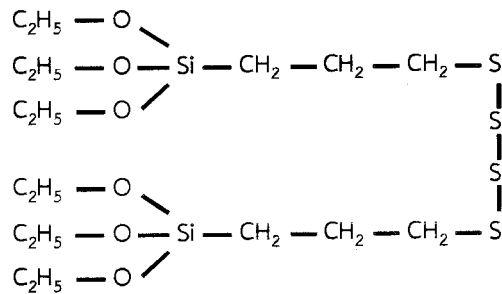
การเติมสารประกอบในกลุ่มดังกล่าว นอกจากจะช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของรูป แล้ว สารประกอบเหล่านี้ยังช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาอีกด้วย ช่วยให้โครงสร้าง พหุติภูมิของซิลิกาถูกทำลายได้ง่ายขึ้น ทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวได้ง่ายขึ้น ความหนืดของ ยางคอมพอนันต์ ลดลง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างยิ่งขึ้น ปริมาณของสารเคมีที่แนะนำให้ ใช้ นั้น โดยตรงกับปริมาณของซิลิกา เช่น ใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (poly ethylene glycol, PEG) ประมาณ 8-10 ส่วนโดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับปริมาณของซิลิกา

2.6 ฟุ่มซิลิกา (เขาวน, 2553)

ฟุ่มซิลิกา หรือซิลิกาที่ได้จากการระเหยเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ประกอบด้วยน้ำน้อยกว่า 2% สามารถเตรียมได้จากการเผาสารประกอบซิลิกอนจนระเหยเป็นไอและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคที่เล็กมาก ฟุ่มซิลิกาเป็นสารเติมแต่งที่ช่วยในการเสริมแรงได้ดี ซึ่งให้ความต้านทาน ต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการขูดขีด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง ซิลิโคนฟุ่มซิลิกาเป็นตัวหน่วงทำให้ยางใช้เวลาในการขึ้นรูปนานขึ้น ซึ่งทำให้ต้องเพิ่มปริมาณของ สารตัวเร่ง หรือเอมีนมากขึ้น ในกระบวนการขึ้นรูปควรใช้พวกแว็กซ์ พอลิเอทิลีน หรือสารหล่อลื่น เพื่อหลีกเลี่ยงการเกาะกับลูกกลิ้ง หรือการยึดติดกับแม่พิมพ์หลังจากที่ยางสุกแล้ว

2.7 บทบาทของสารคู่ควบไฮเลน (silane) (เขาวน, 2553)

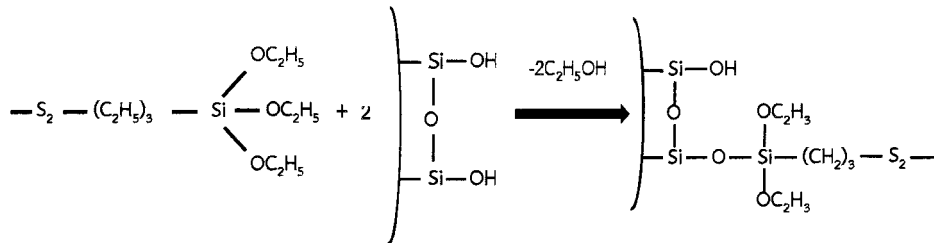
การเติมสารควบคู่ไฮเลนลงไปทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกาสูงขึ้น เพราะสารคู่ควบ ไฮเลนประกอบด้วย หมู่ฟังก์ชันเคมี 2 หมู่ที่แตกต่างกัน คือ หมู่อัลคอกซ์ (alkoxy group) เช่น หมู่ เมท รอกซ์ (-OCH₃) หรือหมู่เอทรอกซ์ (-OC₂H₅) และหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ (organo-functionol group) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



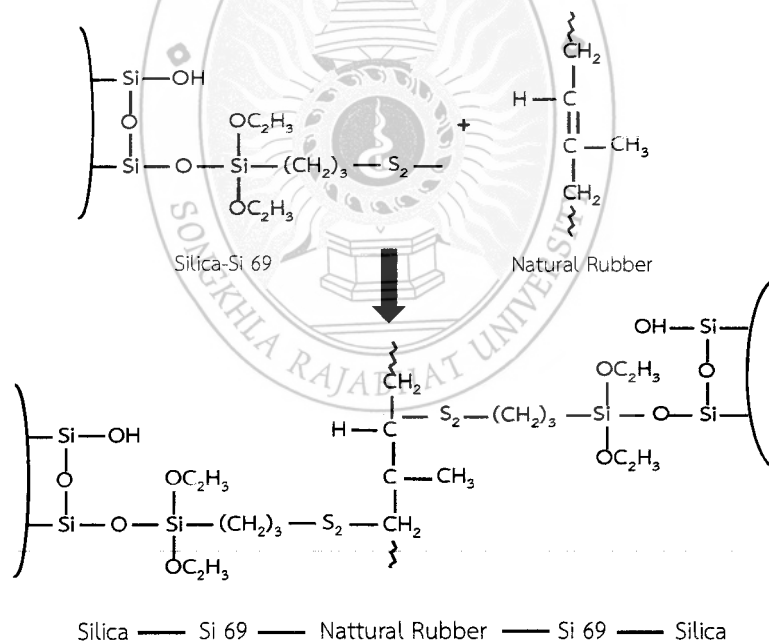
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน Si69
(ที่มา: เซวาร์, 2553)

เมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงไป หมู่อัตถกอกซึ่งซึ่งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของโมเลกุลจะเข้าทำปฏิกิริยากับ หมูไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกาในระหว่างกระบวนการผสมเกิดเป็นพันธะไซลอคเซนที่มีความเสถียรและมีการปล่อยแอลกอฮอล์ออกมา ทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกันลดลงเนื่องจากปริมาณหมูไซลานอลที่ลดลงจากการเกิดปฏิกิริยากับสารคู่ควบไซเลนทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาค ซิลิกานั้นมีกำลังอ่อนลง ดังในกลไกปฏิกิริยาของภาพที่ 2.4 และ 2.5 ซิลิกาจึงสามารถแตกตัว และกระจายตัวในยางได้ง่ายขึ้น ยางคอมปานด์ที่ได้ก็มีความหนืดลดลง สามารถไหลและขึ้นรูปได้ง่าย ส่วนหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งช่วยทำให้ซิลิกาเข้ากับยางได้ง่ายในระหว่างกระบวนการผสมเพราะหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์นี้มีความเป็นขั้วต่ำจึงเข้ากับยางได้ง่าย นอกจากนี้ หมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ของสารคู่ควบไซเลนส่วนใหญ่ยังมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งในระหว่างการผลิตยาง กำมะถันในสารคู่ควบไซเลนจะเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน (sulfur vulcanization reaction) เกิดเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น ทำให้สารคู่ควบไซเลนทำหน้าที่เปรียบเสมือนสะพานเชื่อมระหว่างซิลิกากับยาง ทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาจึงสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ การเติมสารควบไซเลนลงไปจึงส่งผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น โดยเฉพาะค่าโมดูลัสความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขัดถู เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วการเติมสารควบคู่ไซเลนลงไปปริมาณเล็กน้อยช่วยให้ยางคงรูปมีความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตก (cut growth resistance) สูงสุด แต่ในกรณีที่ต้องการยางคงรูปที่มีความต้านทานต่อการขัดถูสูงสุดจำเป็นต้องเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปปริมาณมากขึ้น นอกจากสมบัติเชิงกลแล้วสารคู่ควบไซเลนยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ของยางคงรูปอีกด้วย โดยเฉพาะการลดความร้อนสะสม (heat build up) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน ตัวอย่างของสารคู่ควบไซ

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



รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาการปรับปรุงผิวของซิลิกาด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 (ที่มา: เขาวน, 2553)



รูปที่ 2.5 ปฏิกริยาระหว่างซิลิกาที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 แล้ว กับยางธรรมชาติ (ที่มา: เขาวน, 2553)

2.8 สมบัติของยางวัลคาไนซ์ (ซินธ์, 2558)

2.8.1 การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)

ยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม เมื่อถูกกดไว้นานๆ โมเลกุลของยางเกิดการไหลไปตามการกดนั้น พันธะเชื่อมโยงที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางเป็นตัวที่ดึงยางให้คืนรูปกลับมาเมื่อได้เอาแรงกดนั้นออกไป การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดคือค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการรักษาสมบัติความยืดหยุ่นของยาง หลังจากได้รับแรงกดระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งคำนวณเป็น %

2.8.2 ความต้านทานต่อการดึง (tensile strength)

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบของไอโซพรีนที่ต่อเนื่องกันอย่างเป็นระเบียบ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ก่อนใช้งานต้องมีการบด (masticate) เสียก่อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูง ทำให้ยางธรรมชาติแตกหักได้ง่ายเมื่อดึง หรือยึดผลึกที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวเสริมความแข็งแรงของยาง ทำให้ยางธรรมชาติแข็งแรงโดยตัวของมันเอง โดยการออกสูตรยางไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ (reinforcing filler) เช่น เขม่าดำ หรือถ้าใส่ก็จะเลือกสารโดยไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพเพียงเล็กน้อยก็ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความยืดหยุ่นสูง และทนทานการออกสูตรยางธรรมชาติโดยไม่ใส่สารตัวเติม ทำให้ยางมีความสามารถในการยืดได้สูง และมีมอดูลัสค่าความสามารถในการยืดสูง ประมาณ 700-800 เปอร์เซ็นต์ และความต้านทานต่อการดึง 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สมบัตินี้ของยางธรรมชาติเหนือกว่ายางอื่นๆ เช่น ยางสไตรีน ยางไนไตรล์ เป็นต้น ซึ่งไม่สามารถใช้งานได้ ถ้าไม่ใช้สารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพ เช่น เขม่าดำหรือ ซิลิกา เป็นต้น

2.8.3 ความสามารถในการยืด (elongation at break)

ยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติมสามารถยืดได้ถึงประมาณ 1,000 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่านั้น ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติจะลดลงตามปริมาณของสารตัวเติม ที่เพิ่มขึ้น และตามปริมาณของพันธะวัลคาไนซ์ สมบัติการยืดได้สูงนี้ทำให้ยางธรรมชาติสามารถ ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง เช่น สายยางยึด ยางรัดของของ และลูกโป่ง เป็นต้น

2.8.4 ความแข็ง (hardness)

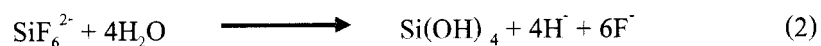
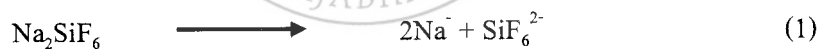
ยางธรรมชาติสามารถวัดค่าในซีให้มีความแข็งต่างๆ กันได้ง่ายตั้งแต่นุ่มมาก เช่น (30-50 IRHD) ไปจนถึงความแข็งของอีโบนินต์ (98 IRHD) การปรับความแข็งของยางทำได้ โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติมหรือโดยการเปลี่ยนปริมาณกำมะถัน ในช่วงของ การใช้กำมะถัน ปริมาณ ≥ 20 phr จะทำให้ยางมีความแข็งแรงคล้ายหนัง (leather-like) (พรพรรณ, 2528)

2.9 การตีโฟม

นำน้ำยางเทลงในเครื่องตีโฟม หลังจากนั้นเติมสารเคมีเข้าไป ได้แก่ โพแทสเซียมโอเลียด ปรับความเร็วเข้าสู่สุดปั่นเป็นเวลา 7 นาที เติม กำมะถัน ซิงค์ไดเอทิลไดโซโอคาบาเมต ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซโซะโซล ปั่นด้วยความเร็วเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ยางฟูได้ปริมาตรความสูง 3-4 เท่าเติม ซิงค์ออกไซด์ สารคู่ควบโซเลน ปั่นด้วยความเร็วเข้าสู่สุดปั่นเป็นเวลา 3 นาที เติม ไดฟีนิลกัวนิติน ปั่นเป็นเวลา 3 นาที และโซเดียมซิลิฟลูออไรด์ ปั่นเป็นเวลา 1 นาที การปรับความช้า เร็วของเครื่องตีโฟมมีผลต่อการขึ้นรูปและความเนียนละเอียดของโฟมยาง

2.10 การทะเข้าบ้ำและการจับตัว

บ้ำที่ใช้สำหรับโฟมยางเป็นบ้ำอะลูมิเนียม เนื่องจากบ้ำเป็นตัวนำความร้อนได้ดีหลังจากที่ได้เติม โซเดียมซิลิฟลูออไรด์ (sodium silifluoride, SSF) ลงในน้ำยางแล้ว ก็ให้เทลงในบ้ำที่จัดเตรียมไว้ และปิดฝาบ้ำจะเกิดการจับตัวของฟองยางในบ้ำนั้น ปฏิกริยาการจับตัวมีดังนี้



โปรตอนที่เกิดขึ้นในสมการที่ 2 ทำให้น้ำยางมี pH ลดลงพร้อมกับการเกิด Si(OH)_4 ซึ่งอาจดูดพวกสบู่จากอนุภาคของน้ำยาง ทำให้โฟมยางเกิดการจับตัวขึ้นโดยทั่วไปจับตัวภายในระยะเวลา 5-10 นาที ซึ่งพิจารณาได้จากโฟมยางที่ไหลล้นจากบ้ำในขณะที่เท

2.11 การล้าง

ภายหลังการวัดค่าในซีจะเอาโฟมยางออกจากบ้ำ แล้วนำไปล้างด้วยน้ำ อาจทำได้โดยการนำโฟมยาง ผ่านชุดของระบบน้ำฉีดล้างและผ่านลูกกลิ้งที่บีบน้ำออก หรืออาจใช้ เครื่องเซนตริฟิวจ์ (hydro-extractor) ซึ่งในกรณีนี้การใช้เครื่อง เซนตริฟิวจ์ต้องสลับการหมุนเอา น้ำออกจากโฟมยาง

และปล่อยให้ น้ำไหลลงไปยังโฟมยาง การล้างโฟมยางเป็น การล้างเอาสิ่งเจือปนที่สามารถละลายน้ำได้ออกไป ทำให้อายุการใช้งานของโฟมยางนานขึ้นและจะมีกลิ่นดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าหากล้างน้ำนานเกินไปจะทำให้ Antioxidant ที่มีอยู่ตามธรรมชาติหรือที่ใส่เข้าไปถูกสกัดออกไปหมดได้ ทำให้ยางเสื่อมเร็วได้

2.12 การทำให้โฟมยางแห้ง

ภายหลังจากการล้างน้ำแล้ว ให้นำโฟมยาง ไปตากในเตาอบที่มีอากาศหมุนวนและควบคุมอุณหภูมิที่ 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 ภายใต้อการทดสอบการบีบอัดจะมีความนุ่มในอุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อดำเนินการในอัตราความเครียดคงที่ ที่อุณหภูมิคงที่ตัวอย่างของโฟม PU จะมีอัตราการคืนที่สูงขึ้น พบว่าทั้งพลังงานเก็บ และการกระจายตัวขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของโฟมอุณหภูมิและอัตราความเครียด

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

Sae-Oui, Thepsuwan, & Hatthapanit, 2004 การศึกษาในครั้งนี้ได้เลือกชนิดของสารคู่ควบอัลคอกซีไซเลนซึ่ง ได้แก่ bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfane (Si-69) และ 3-thiocyanatopropyl triethoxy silane (Si-264) เพื่อเปรียบเทียบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพต่ำ (CV), การวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-EV) และ การวัลคาไนซ์ที่มีประสิทธิภาพ (EV) ผลการทดลองพบว่าการเติมสารคู่ควบอัลคอกซีไซเลนไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความสามารถในกระบวนการผลิตเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลของยางวัลคาไนซ์ ผลของชนิดสารคู่ควบไซเลนต่อกระบวนการแปรรูปพบว่าไม่ขึ้นกับระบบการวัลคาไนซ์ เมื่อเทียบ Si-69 Si-กับ 264 สามารถทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวซิลิกาได้ง่ายขึ้นเนื่องจากโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่และความหนืดต่ำ Si-264 สามารถลดอันตรกิริยาของฟิลเลอร์-ฟิลเลอร์ได้มากกว่า Si-69 ซึ่งจะได้ผลที่ดีกว่า ผลของประเภทของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของการวัลคาไนซ์ขึ้นอยู่กับระบบการวัลคาไนซ์ CV และ semi-EV Si-264 มีการเสริมแรงมากกว่า Si-69 อาจเป็นผลมาจากการเข้ากันระหว่างยาง-ฟิลเลอร์ที่ดีขึ้น การกระจายตัวที่ดีขึ้น และสถานะการวัลคาไนซ์ที่สูงขึ้นเมื่อ Si-69 ถูกแทนที่ด้วย Si-264 นั่นคือ Si-69 ให้การเสริมแรงที่ดีกว่า Si-264 ผลของ 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 ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวสารคู่ควบไซเลน (bis-3-triethoxysilylpropyl tetrasulphide, TESPT) ต่อความหนืด (viscoelasticity) สมบัติทางกลดีขึ้นเมื่อมี TESPT นอกจากนี้ยังพบความเสถียรทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อมี TESPT การสแกนอิเล็กตรอน micrographs พบว่าการกระจายตัวของสารตัวเติมที่ดีขึ้นในกรณีของซิลิกาคอมโพสิตซิลิเนด

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

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

Yamazaki R., Fujii S., Nakamura Y., & Nagata K., 2014 ศึกษาการตกตะกอนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย สารประกอบ 3-aminopropyltriethoxysilane (A) และ 3-mercaptopropyltrimethoxysilane (B) ความต้านทานการฉีกขาด และการยึดตัวของวัสดุผสมมีค่าสูงกว่าวัสดุที่เคลือบด้วยอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วย A หรือ B โดยการเติมส่วนผสม A และ B โดยใช้วิธีผสม และการปรับสภาพผิวด้วยส่วนผสมของ A และ B ที่มีโครงสร้าง dialkoxo อย่างไรก็ตามการตรวจสอบเหล่านี้ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลทั้งหมดสามข้อดังกล่าวได้อย่างสมบูรณ์ ในกรณีของชั้นที่ผ่านการบำบัดด้วยสารคู่ควบไซเลนซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวพบว่ามีส่วนประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเครียดสูงในแนวเดียวกันความเครียดการฉีกขาด และการยึดตัวสูงเมื่อฉีกขาด

Akadasi, Hidawale, & Kapadi, 2004 ในงานวิจัยนี้ถ้ำลอยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยตัวประสานคู่ควบไซเลน (Si69) ถูกนำมาใช้เป็นสารตัวเติมยาง polybutadiene (PBR) การเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุผสมที่มีถ้ำลอยที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้วและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวพบว่าวัสดุผสมที่มีถ้ำลอยที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้วมีคุณสมบัติเสริมแรงดีขึ้น

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 นํ้ายางและสารเคมี

3.1.1 นํ้ายางข้น ร้อยละ 60 ชนิดแอมโมเนียสูง (concentrated latex 60% HA, NR latex) มีลักษณะสีขาว ทำหน้าที่เป็นนํ้ายาง ผลิตโดยบริษัทจะนะนํ้ายางข้น จำกัด อ.จะนะ จังหวัดสงขลา ประเทศไทย

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

3.1.3 ซิงค์ไดเอธิลไดไธโอคาร์บาเมต (zinc diethyl dithiocarbamate, ZDEC) มีลักษณะเป็นผงสีขาวครีม ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง (accelerator) ในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เป็น สารตัวเร่งใน กลุ่มไดไธโอคาร์บาเมต ผลิตโดยบริษัทไชน่า เนชั่นแนล เคมีคอล คอนสตรัคชัน (China National Chemical Construction Corp.) ประเทศจีน

3.1.4 ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (zinc mercaptobenzothiazole, ZMBT) มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองละเอียด ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง (accelerator) ที่ใช้ในการทำโฟมยาง ผลิตโดยบริษัทไชน่า เนชั่นแนล เคมีคอล คอนสตรัคชัน (China National Chemical Construction Corp.) ประเทศจีน

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

3.1.6 โพแทสเซียมโอเลต (potassium oleate) มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีเหลืองทอง คล้ายนํ้ามัน ทำหน้าที่เป็นสารที่ใช้ในการทำนํ้ายางเป็นฟองในโฟม ทำให้นํ้ายางเสถียร ไม่นํ้า

ยางจับเป็นเม็ดหรือเป็นก้อน ช่วยลดแรงตึงผิวของยาง ผลิตโดยบริษัท ดราคอน อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ประเทศไทย

3.1.7 ไดฟีนิลกัวนิดีน (diphenyl guanidine, DPG) มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด ทำหน้าที่ให้ฟองยางเสถียร ช่วยในการคงสภาพของโฟมให้นานขึ้น ทำให้ผิวของโฟมเนียนสวย ผลิตโดยบริษัท อุกิอุตสาหกรรมเคมี จำกัด แขวงบुकคโล 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, SiO₂) มีลักษณะเป็นผงสีขาว น้ำหนักเบา เป็นสารตัวเติม ที่ดีที่สุดในบรรดาสารตัวเติมที่ไม่ใช่สีดำ ช่วยเสริมแรงให้กับโฟมยาง ผลิตโดย บริษัท เวคเคอ เคมีคอล ฟูมซิลิกา จำกัด (Wacker Chemical Fumed Silica (Zhangjiagang) Co.Ltd.) ประเทศจีน

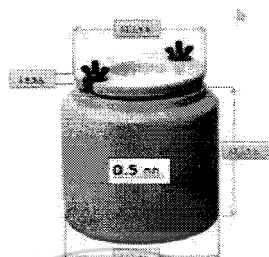
3.1.10 เบนโทไนท์ (bentonite) มีลักษณะเป็นผงสีเทา เป็นสารป้องกันการตกตะกอนของสารเคมี ช่วยในการกระจายของสารเคมีขณะบดและการดูดซับน้ำได้ดี ผลิตโดย บริษัท เทพเกษตร อุตสาหกรรม จำกัด แขวงทุ่งครุ เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

3.1.11 วัลทามอล (vultamol) มีลักษณะเป็นผงสีขาว ใช้เป็นสารช่วยให้สารที่บดอยู่ในรูปของคิสเปอร์ชัน ผลิตโดยบริษัท เทพเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด แขวงทุ่งครุ เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

3.1.12 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide, NH₄OH) มีลักษณะเป็นของเหลวไม่มีสี สารละลายแอมโมเนีย ร้อยละ 25 ผลิตโดยบริษัท ควอลิตี้ รีเอเจนต์ เคมีคอล จำกัด (Quality Reagent Chemical Co., Ltd.) ประเทศนิวซีแลนด์

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

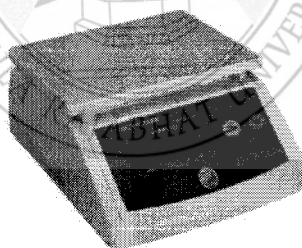
3.2.1 เครื่องบด (ball mill) มีลักษณะเป็นถังกลมรูปกระบอกสีขาว ภายในมีตัวบดเซรามิค สำหรับบดสารเคมีให้อยู่ในรูปคิสเพอร์สชัน ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนให้หมุนในแนวอนผลิตโดย ห้างหุ้นส่วน ลีมีการช่าง ประเทศไทย



รูปที่ 3.1 เครื่องบด (ball mill)

(ที่มา: <https://www.cerawan.com>)

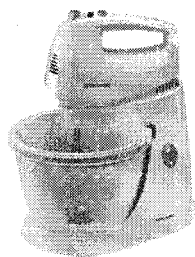
3.2.2 เครื่องชั่งไฟฟ้า (electrical balance) สำหรับชั่งสารเคมี ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น ML 3002 ชั่งได้ละเอียด 0.01 กรัม สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 3100 กรัม ผลิตโดย บริษัท เมทเลอร์โตเลโด จำกัด (Mettler Toledo Co., Ltd.) ประเทศสวิสเซอร์แลนด์



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 เฮิร์ตซ์ 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 สำหรับนึ่งโพนียง ผลิตโดย บริษัท
ทักษิณเอนเตอร์ไพรส์ (ไทย) จำกัด ต.บางเขน อ.เมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี ประเทศไทย



รูปที่ 3.4 หม้อนึ่งไอน้ำ
(ที่มา: <https://www.pinterest.se>)

3.2.5 แก๊สหุงต้ม ขนาดน้ำหนักสุทธิ 4 กิโลกรัม เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนแก่
หม้อนึ่งไอน้ำ ผลิตโดยบริษัท สยามแก๊ส แอนด์ ปีโตรเคมีคัลส์ จำกัด ประเทศไทย



รูปที่ 3.5 แก๊สหุงต้ม
(ที่มา: <http://homegas.blogspot.com>)

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



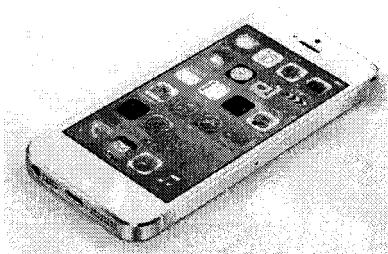
รูปที่ 3.6 ตู้อบอากาศร้อน (hot air oven)

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



รูปที่ 3.7 แบบพิมพ์ทรงกระบอกอลูมิเนียม

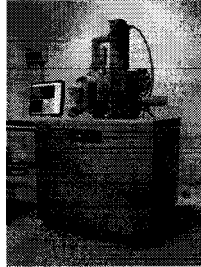
3.2.8 กล้องถ่ายรูปมือถือ ยี่ห้อ Iphone รุ่น 5s สำหรับถ่ายรูปชิ้นทดสอบ ผลิตโดยบริษัทแอปเปิล ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3.8 กล้องถ่ายรูปมือถือ

(ที่มา: <https://specphone.com>)

3.2.9 กล้องส่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 400 ใช้กำลังขยาย 20x 50x และ 100x ผลิตโดยบริษัทอีคฟอร์ด อินสตรูเมนต์ โปรวิท แอสเท็ก (Oxford Instruments provides Aztec) ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3.9 กล้องส่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

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

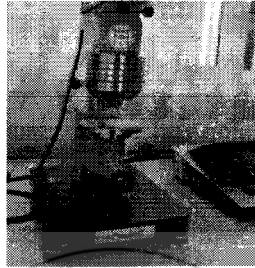


รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

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

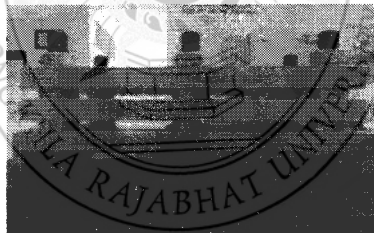


3.2.11 เครื่องทดสอบความแข็ง (hardness tester) สำหรับใช้วัดความแข็งของวัสดุจำพวกยางและพลาสติกชนิดความแข็งน้อย โดยใช้วิธีการเจาะแทงหัวเข็มเข้าเนื้อชิ้นงาน ชนิด Shore OO ยี่ห้อ bareiss germany รุ่น 9028-01 D-K-51206-01-00 2016-01 (ASTM D2240) ผลิตโดย บริษัท บาเรียส (Bareiss (Heinrich Bareiss Prüfgerätebau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



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็ง

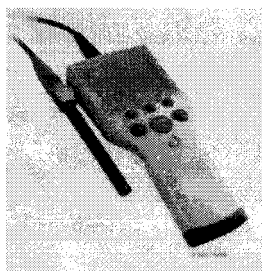
3.2.12 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงกด (compression set tester) สำหรับ การทดสอบการวัดสมบัติของการบีบอัดของวัสดุ ยี่ห้อ Yasuda รุ่น JIS-A5756 (ASTM D 395) ผลิตโดยบริษัท ยาซูดะ เซกิ ไชกาคุซุรุ (Yasuda Seiki Seisakusho, LTD) ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงกด (compression set tester)

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

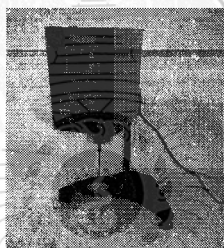
678.4
A27



รูปที่ 3.13 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)

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

3.2.14 เครื่องทดสอบความหนืด (Brookfield viscometer) สำหรับหาความหนืดของ ฟุ้งซิลิกา (fume silica) รุ่น Model DV-II ผลิตโดยบริษัท บรุกฟิลด์ เอนจิเนียริง แลบบอราทอรี จำกัด (Brookfield Engineering Laboratories Co., Ltd) ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบความหนืด (Brookfield viscometer)

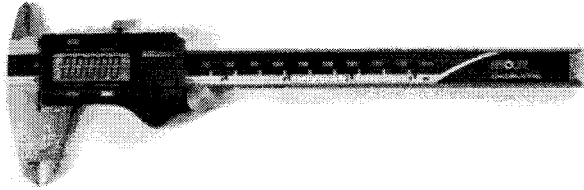
(ที่มา: <http://taradlab.tarad.com>)

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



รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบการบ่มเร่ง (Gear aging oven)

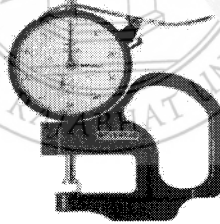
3.2.16 เวอร์เนียดิจิตอล (mitutoyo) สำหรับวัดความหนาของชิ้นทดสอบ ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น 500-197-30 ผลิตโดยบริษัทมิตูดิโอ จำกัด (Mitutoyo Co., Ltd) ประเทศญี่ปุ่น ทดสอบสามารถวัดละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น 7301 Standard series ผลิตโดยบริษัทมิตูดิโอ จำกัด (Mitutoyo Co., Ltd) ประเทศญี่ปุ่น



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 ผลิตโดยบริษัทมิตูดิโอ 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 กระบอกรับเมล็ดชา

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

3.2.19 แบบพิมพ์

- แบบพิมพ์ทดสอบสมบัติด้านการดึงยืด (Tensile)

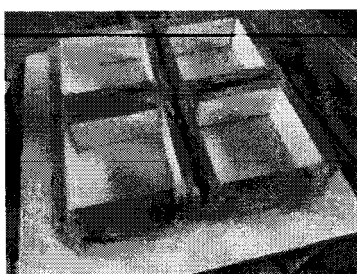
ขนาด 25.4 มิลลิเมตร × 139.7 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.19 แบบพิมพ์ทดสอบสมบัติด้านการดึงยืด (Tensile)

- แบบพิมพ์ทดสอบการจับตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set)

ขนาด 50 มิลลิเมตร × 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.20 แบบพิมพ์ทดสอบการจับตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set)

3.2.20 เครื่องแก้ววิทยาศาสตร์/อุปกรณ์ที่ใช้

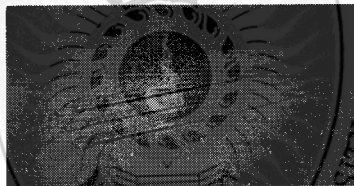
- ปีกเกอร์ ขนาด 20 มิลลิลิตร 100 มิลลิลิตร และ 500 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.21 ปีกเกอร์

(ที่มา: <http://guru.sanook.com>)

- แท่งแก้วคน



รูปที่ 3.22 แท่งแก้วคน

(ที่มา: <http://sciplus.lnwshop.com>)

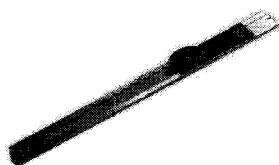
- ไม้กวนแป้งขนม



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 จึงต้องเตรียมสารเคมีให้เป็นของเหลวที่อยู่ในรูปของคิสเพอร์ชันเพื่อลดอนุภาคของสารเคมีให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกับน้ำยาง ทำด้วยโดยการบดลमित (ball mill) เป็นการบดวัตถุโดยใช้หลักการหมุนของหม้อบด โดยมีลูกบดและสารเคมีที่ช่วยในการลดอนุภาคอยู่ภายใน

ตารางที่ 3.1 การเตรียมสารเคมีคิสเพอร์ชันสำหรับตีโฟมยางธรรมชาติ

สารเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก					
	sulphur	ZMBT	ZDC	ZnO	DPG	SFF
	50%	50%	50%	50%	20%	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

โพแทสเซียมโอเลต (potassium oleate) เตรียมอยู่ในรูป 20 เปอร์เซ็นต์โดยการใช้กรดโอเลต ผสมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำตามสูตรดังนี้

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของการเตรียมโพแทสเซียมโอเลต

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

*นำส่วนที่ 1 ไปอุ่นที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส แล้วเติมส่วนที่ 2 ลงไปในส่วนที่ 1 ด้วยความเร็วสูง

3.3.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณฟุ่มซิลิกา และแอมโมเนียที่มีต่อสมบัติของ ดิสเพอร์สชัน ฟุ่มซิลิกา

เตรียมดิสเพอร์สชันของฟุ่มซิลิกา โดยใช้สูตรตามตารางที่ 3.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของ ฟุ่มซิลิกา และแอมโมเนียที่มีต่อสมบัติของดิสเพอร์สชันฟุ่มซิลิกา โดยบดด้วยเครื่องบอลมิลเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.3 สูตรที่ใช้ในการเตรียมดิสเพอร์สชันฟุ่มซิลิกา

ชนิดของสารเคมี	1	2	3	4
ฟุ่มซิลิกา	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 ศึกษาผลของสารก่อกวนไขเลน และอุณหภูมิในการเตรียม Si69-t-SiO₂ ที่มีผลต่อการ ขึ้นรูปและสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ

3.3.3.1 ศึกษาการเตรียมฟุ่มซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยสารก่อกวนไขเลน Si69

นำดิสเพอร์สชันฟุ่มซิลิกาได้จากการทดลอง 3.3.2 (เลือกสภาวะที่ได้ดิสเพอร์สชันฟุ่มซิลิกาที่เหมาะสม) มาแปรปริมาณของ Si69 และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69

ตามลำดับการผสมที่คำนวณได้จากเทคนิค RSM เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม ดิสเพอร์สชันฟุ้งซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69 โดยทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมของการตีโม่ต่อไป

ตารางที่ 3.4 สูตรการผสม Si69-t-SiO₂ 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

ซึ่งฟุ้งซิลิกาดีสเพอร์สชันที่มีความหนืดที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2 และสารคู่ควบไซเลนตามลำดับการผสมดัง ตารางที่ 3.4 นำดีสเพอร์สชันฟุ้งซิลิกา และสารคู่ควบไซเลนมาผสมเพื่อปรับสภาพผิวของฟุ้งซิลิกาโดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นตัวปรับอุณหภูมิตามปริมาณสารคู่ควบไซเลนดังตารางที่ 3.4 เป็นเวลา 20 นาที และตั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำดีสเพอร์สชันฟุ้งซิลิกาปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมาทดสอบ pH และความหนืด

3.3.3.2 ศึกษาการเตรียมโม่ยางธรรมชาติที่ใช้ฟุ้งซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69 เป็นสารตัวเติม

นำดีสเพอร์สชันฟุ้งซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (Si69-t-SiO₂) ที่เตรียมได้ทั้ง 13 การทดลอง จากการทดลองที่ 3.3.3.1 นำมาผสมลงในโม่ยาง เพื่อที่จะศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ที่เหมาะสมสำหรับการตีโม่ของผลิตภัณฑ์โม่ยาง

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 และ ZMBT ตามสูตรเทลงในหม้อของเครื่องตีฟอง เดินเครื่องด้วยความเร็วช้าสุดเป็นเวลา 5 นาที ลดความเร็วช้าสุด 1 นาที และสลับความเร็วปานกลาง 2 นาที ตีฟองให้ได้ความสูง 3-4 เท่า จากนั้นเดินเครื่องด้วยความเร็วช้าเติม ZnO และ Si69-t-SiO₂ เป็น เวลา 3 นาที และเติม DPG ลงไปเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ฟองละเอียดถี่กลง ไปอีก เมื่อครบกำหนดเวลาขณะเครื่องยังเดินอยู่ให้เติมโซเดียม 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 ที่มีต่อสมบัติของโพลียเอทิลีน

นำดีสเพอร์ชัน จากสูตรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์โพลียเอทิลีนมาศึกษาการแปรปริมาณของ Si69-t-SiO_2 และเปรียบเทียบกับโพลียเอทิลีนที่ใช้ SiO_2 อย่างเดียว โดยการแปรปริมาณดังนี้ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr ตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 น้ำหนักน้ำยางและสารเคมีที่ใช้เตรียมโพลียเอทิลีน

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 โดยใช้ น้ำหนักน้ำยางและสารเคมีตามสูตรในตารางที่ 3.6

3.3.5 การทดสอบ

3.3.5.1 การทดสอบสารเคมี

1) การทดสอบปริมาณของทั้งหมด (total solid content, TSC %)

1. ชั่งน้ำหนักของงานแก้วให้ละเอียดถูกต้องถึง 0.0001 มิลลิกรัม บันทึกน้ำหนักของงานแก้ว

2. เทฟุมซิติกาตัวอย่างลงไปประมาณ 2.5 ± 0.5 กรัม บันทึกน้ำหนักของฟุมซิติกาตัวอย่าง
3. เติงงานไป-มาเพื่อให้ฟุมซิติกากระจายทั่วงานแก้ว
4. นำงานแก้วไปอบแห้งที่ตั้งอุณหภูมิไว้แล้วที่ 100 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. เอาออกจากตู้อบแห้ง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
6. ชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักหลังการอบแห้งครั้งที่ 1
7. นำไปอบซ้ำอีกเป็นเวลา 15 นาที ทำให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักหลังการอบแห้งครั้งที่ 2 บันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้ ผลต่างของน้ำหนักหลังการอบครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ควร จะแตกต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม (ถ้าแตกต่างกัน 1 มิลลิกรัม ต้องนำไปอบแห้ง ทำให้เย็นและ ชั่งซ้ำอีกจนกระทั่งผลต่างของน้ำหนักแตกต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม)
8. คำนวณ TSC ดังนี้

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

โดย

A = น้ำหนักของงานแก้ว (กรัม)

B = น้ำหนักของงานแก้วกับฟุมซิติกาตัวอย่าง (กรัม)

C = น้ำหนักของงานแก้วกับฟุมซิติกาที่แห้งแล้ว (กรัม)

ให้ทำการทดลอง 2 ตัวอย่างต่อฟุมซิติกาตัวอย่าง 1 ชุด และผลต่างของข้อมูลในฟุมซิติกาตัวอย่าง ชุดเดียวกันไม่ควรเกิน 0.15% รายงานผลการทดลองโดยใช้ค่ากลาง

2) การทดสอบค่า pH

การทดสอบค่า pH โดยใช้เครื่องวัดค่า pH จะทำการทดสอบ 3 ครั้ง ต่อตัวอย่าง โดยจะรายงานผลด้วยค่ากลาง

3) การทดสอบสมบัติของคิสเพอร์สชันฟุ้งซิลิกา

นำฟุ้งซิลิกาที่เตรียมได้จากการแปรปริมาณของฟุ้งซิลิกาตามตารางที่ 3.9 มาทดสอบสมบัติทางกายภาพ ดังนี้

(1) การทดสอบปริมาณของทั้งหมดในสารเคมี (total solid content, TSC)

- ชั่งน้ำหนักของจานแก้วให้ละเอียดถูกต้องถึง 0.0001 มิลลิกรัม บันทึกน้ำหนักของจานแก้ว
- เทฟุ้งซิลิกาตัวอย่างลงไปประมาณ 2.5 ± 0.5 กรัม บันทึกน้ำหนักของฟุ้งซิลิกาตัวอย่าง
- เอียงจานไป-มาเพื่อให้ฟุ้งซิลิกากระจายทั่วจานแก้ว
- นำจานแก้วไปอบแห้งที่ตั้งอุณหภูมิไว้แล้วที่ 100 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- เอาออกจากตู้อบแห้ง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
- ชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักหลังการอบแห้งครั้งที่ 1
- นำไปอบซ้ำอีกเป็นเวลา 15 นาที ทำให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักหลังการอบแห้งครั้งที่ 2 บันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้ ผลต่างของน้ำหนักหลังการอบครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ควรจะแตกต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม (ถ้าแตกต่างกัน 1 มิลลิกรัม ต้องนำไปอบแห้งทำให้เย็นและชั่งซ้ำอีกจนกระทั่งผลต่างของน้ำหนักแตกต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม)
- คำนวณ TSC ดังนี้

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

โดยที่

A = น้ำหนักของจานแก้ว (กรัม)

B = น้ำหนักของจานแก้วกับฟุ้งซิลิกาตัวอย่าง (กรัม)

C = น้ำหนักของจานแก้วกับฟุ้งซิลิกาที่แห้งแล้ว (กรัม)

ให้ทำการทดลอง 2 ตัวอย่างต่อฟุ้งซิลิกาตัวอย่าง 1 ชุด และผลต่างของข้อมูลในฟุ้งซิลิกาตัวอย่าง ชุดเดียวกัน ไม่ควรเกิน 0.15 เปอร์เซ็นต์ รายงานผลการทดลองโดยใช้ค่ากลาง

(2) การทดสอบ pH

การทดสอบ pH โดยใช้เครื่องวัดค่า pH จะทำการทดสอบ 3 ครั้ง ต่อตัวอย่าง รายงานผลด้วยค่ากลาง

(3) การทดสอบความหนืด (viscosity)

โดยใช้เครื่อง Brookfield viscometer ในการทดสอบ โดยการเลือกแกนหมุน (Spindle) ที่ต้องการมาต่อเข้ากับแกนกลางของเครื่อง โดยให้แกนหมุน (Spindle) จุ่มลงในของเหลว จนระดับของเหลวอยู่ตรงคอคอดของแกนหมุน (Spindle) พอดีปรับให้เครื่องอยู่ในแนวระดับโดยดูที่ลูกน้ำ ปรับเลือกกระดับความเร็วที่ต้องการ แล้วเปิดสวิทซ์เดินมอเตอร์เครื่อง 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 มากดด้วยเครื่องกดอัดให้มี ความหนาลดลง 50% ของความหนาเดิม แล้วนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ (70±1) องศาเซลเซียสเป็นเวลา 22 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบและชิ้นทดสอบออกจากเครื่องกดอัด วางทิ้งไว้ 30 นาที แล้วจึงวัด ความหนาของชิ้นทดสอบ

คำนวณหาการยุบตัวคิดเป็นร้อยละของความหนาเดิม

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

โดยที่ C_n คือ ความหนาที่ลดลงจากความหนาเดิมหลังจากผ่านแรงอัดแล้ว (เปอร์เซ็นต์)

t_0 คือ ความหนาเดิมของชิ้นทดสอบ (มิลลิเมตร)

t_1 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังจากผ่านแรงอัดแล้ว (มิลลิเมตร)

2) การทดสอบสมบัติด้านการดึง

ทดสอบสมบัติด้านการดึงตามมาตรฐาน ASTM D3574 โดยการนำแผ่นโฟม ยางมาตรฐานที่มีขนาด 25.4 มิลลิเมตร × 139.7 มิลลิเมตร วัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 จุด ให้ใช้

ค่ากลางเป็นค่าความหนาของชิ้นทดสอบ แล้วทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการดึง ใช้อัตราเร็วในการดึงชิ้นทดสอบ 500 นิวตัน วัดแรงดึงและระยะยืดแล้วนำไปคำนวณสมบัติต่างๆดังนี้

- การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength, TS)

การคำนวณความต้านทานต่อแรงดึงคงสูตรต่อไปนี้

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

เมื่อ F = แรงที่ใช้ดึงทดสอบจนขาด (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบก่อนการดึง (ตารางมิลลิเมตร)

- การทดสอบความสามารถในการยืด (elongation at break, EB)

การคำนวณความสามารถในการยืดคงสูตรต่อไปนี้

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

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

ผลและอิทธิพลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของเวลาในการบด ปริมาณฟุ้งซิลิกา และแอมโมเนียที่มีต่อสมบัติของ คิสเพอร์สชันฟุ้งซิลิกา

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณฟุ้งซิลิกา ปริมาณแอมโมเนีย และเวลาในการบดด้วยบอลมิล โดยออกแบบการทดลองโดยใช้หลักสถิติแบบแฟคทอเรียล โดยใช้กราฟพื้นผิวตอบสนองได้ผลดังนี้

4.1.1 ผลการทดสอบค่าการทดสอบปริมาณของแข็งทั้งหมดในสารเคมี (total solid content, TSC)

ตารางที่ 4.1 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในสารเคมี (total solid content, TSC) ของคิสเพอร์สชัน

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 X₁ = ฟุ้งซิลิกา

X₂ = 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 X₁ = ฟุ่มซิลิกา

X₂ = แอมโมเนีย

ตารางที่ 4.1 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์สำหรับค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC) ของคิสเพอร์สชัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์จากการวิเคราะห์แบบโค้ด (code) ได้ใน ตารางที่ 4.1 สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟุ่มซิลิกากับแอมโมเนีย ได้ว่า

$$Y = 19.6043 + 7.4112 * X_1 + 0.5141 * X_2 + 0.1562 * X_1 * X_2 \dots\dots\dots(1)$$

$$X_1 = 7.4112$$

$$X_2 = 0.5141$$

$$Y = 19.6043$$

แต่เนื่องจากการใช้สมการที่ได้จากข้อมูลแบบโค้ด (code) จะทำให้เขียนกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง ไม่สอดคล้องกับค่าจริงของตัวแปรดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลจริงของตัวแปร ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 4.3 และสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 2

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 = ฟุ่มซิลิกา

X_2 = แอมโมเนีย

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

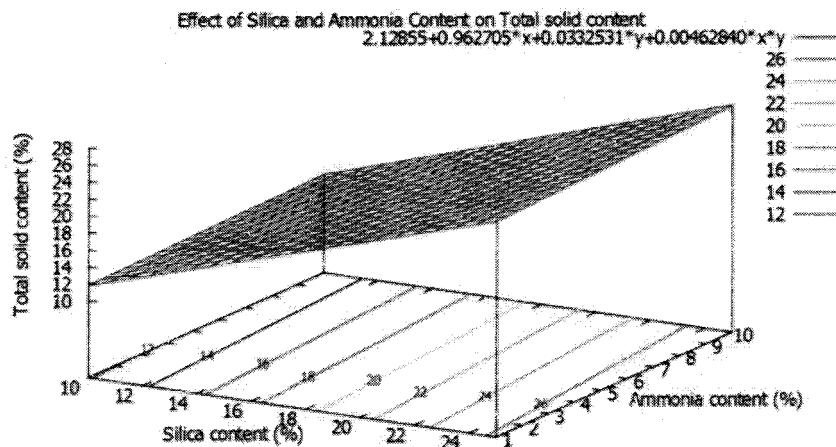
$$X_1 = 0.962705$$

$$X_2 = 0.0332531$$

$$Y = 2.12855$$

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

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



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของคิสเพอร์สชันฟลูมซิลิกา

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อปริมาณของฟลูมซิลิกาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟลูมซิลิกาเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด เพราะเป็นสารเคมีตัวเดียวที่มีปริมาณมากที่สุดในคิสเพอร์สชัน และไม่ระเหยไปเมื่อได้รับความร้อน ทำให้ปริมาณฟลูมซิลิกามากขึ้น ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดจึงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับผลของแอมโมเนียพบว่า มีผลเล็กน้อย ซึ่งอาจมาจากการระเหยไม่สมบูรณ์ของมัน เนื่องจากผิวของฟลูมซิลิกาที่มีหมู่ไฮดรอกซิลยึดเกาะไว้ (พรพรรณ, 2528) เมื่อพิจารณาถึงอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรทั้งสองพบว่า มีเล็กน้อยเช่นกัน ทั้งนี้สืบเนื่องจากการที่มีการดูดซับของแอมโมเนียบนผิวของฟลูมซิลิกา (บุญธรรม, 2532)

4.1.2 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น (density)

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์ค่าความหนาแน่น (Density) ของคิสเพอร์สชัน

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 X₁ = SiO₂

X₂ = NH₃

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 X₁ = SiO₂

X₂ = NH₃

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์สำหรับค่าความหนาแน่น (density) ของคิสเพอร์สชัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์จากการวิเคราะห์แบบโค้ด (code) ได้ในตารางที่ 4.4 สามารถเขียนเป็นสมการเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างพุ่มซิลิกา กับแอมโมเนียได้ว่า

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

$$X_1 = - 0.08294$$

$$X_2 = 0.12236$$

$$Y = 0.98361$$

แต่เนื่องจากการใช้สมการที่ได้จากข้อมูลแบบโค้ด (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
$X_1 \cdot X_2$	0.00352815

หมายเหตุ X_1 = ฟุ่มซิลิกา

X_2 = แอมโมเนีย

$$Y = 1.36717 - 0.0304637 \cdot X_1 - 0.0345519 \cdot X_2 + 0.00352815 \cdot X_1 \cdot X_2 \dots\dots\dots(4)$$

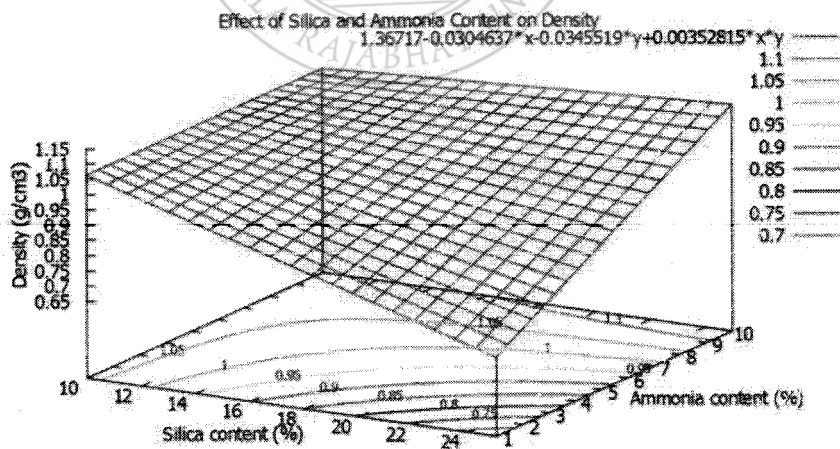
$$X_1 = -0.0304637$$

$$X_2 = -0.0345519$$

$$Y = 1.36717$$

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 ของฟุ่มซิลิกากับแอมโมเนีย มีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองคือฟุ่มซิลิกากับแอมโมเนีย ตลอดจนอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรทั้งสองมีผลต่อค่าความหนาแน่น (density) อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟุ่มซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของคิสเปอร์สชันฟุ่มซิลิกา

จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อปริมาณของฟุ่มซิลิกาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เพราะฟุ่มซิลิกามีความหนาแน่นต่ำ (0.16-0.19 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) ดังนั้นเมื่อปริมาณของฟุ่มซิลิกาเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นของคิสเพอร์สชันลดลง ในขณะที่เดียวกันปริมาณแอมโมเนียเพิ่มมากขึ้น พบว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (พงษ์ธร, 2548) ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นของแอมโมเนียมีค่าสูงกว่าฟุ่มซิลิกา (0.91 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) จึงทำให้เมื่อปริมาณของฟุ่มซิลิกาเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นจึงเพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์ถึงผลของอันตรกิริยาระหว่างฟุ่มซิลิกากับแอมโมเนียต่อความหนาแน่น พบว่าตัวแปรดังกล่าวมีผลต่อความหนาแน่นเช่นเดียวกัน (พรพรรณ, 2528)

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

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

ของคิสเพอร์สชัน

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 X₁ = SiO₂

X₂ = NH₃

ตารางที่ 4.8 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์สำหรับค่าความเป็นกรด (potential of hydrogen ion, pH) ของคิสเพอร์สชัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์จากการวิเคราะห์แบบโค๊ด (code) ได้ในดังตารางที่ 4.8 สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟุ่มซิติกากับแอมโมเนียได้ว่า

$$Y = 10.3138 - 0.3975 * X_1 + 0.5608 * X_2 - 0.0008 * X_1 * X_2 \dots\dots\dots(5)$$

$$X_1 = -0.3975$$

$$X_2 = 0.5608$$

$$Y = 10.3138$$

แต่เนื่องจากการใช้สมการที่ได้จากข้อมูลแบบโค๊ด (code) จะทำให้เขียนกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง ไม่สอดคล้องกับค่าจริงของตัวแปรดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลจริงของตัวแปรทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 4.10 และสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 6

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์ของปริมาณของความเป็นกรด-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 = ฟุ่มซิติกา

X_2 = แอมโมเนีย

$$Y = 10.3138 - 0.0528642 * X_1 + 0.125062 * X_2 - 2.46914E-05 * X_1 * X_2 \dots\dots\dots(6)$$

$$X_1 = -0.0528642$$

$$X_2 = 0.125062$$

$$Y = 10.3138$$

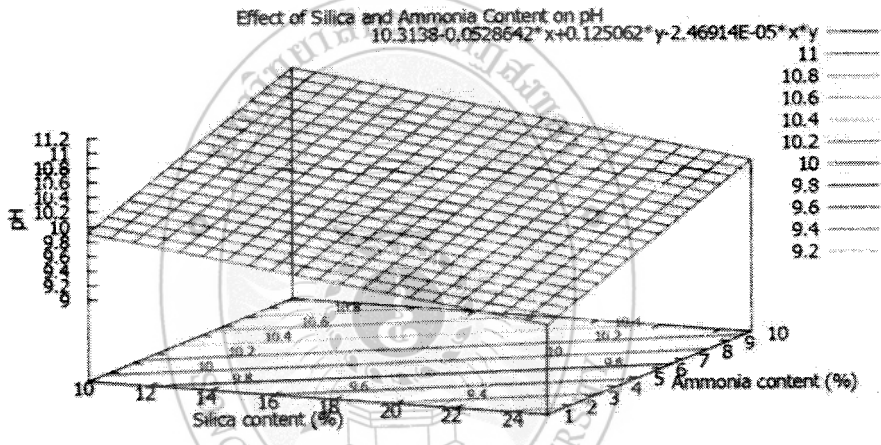
ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่า ค่า R-Square มีค่า 99.54 % และ R-Square (adjust) มีค่า 99.37 % แสดงถึงสมการดังกล่าวสามารถนำไปทำนายผลได้แม่นยำ

จากค่า p-Value ในตารางที่ 4.9 พบว่าค่า p-Value ของฟุ่มซิติกากับแอมโมเนีย มีค่าเท่ากับ 0.961 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองคือฟุ่มซิติกากับแอมโมเนีย ตลอดจนอันตรกิริยา

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

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

แต่เนื่องจากการใช้สมการที่วิเคราะห์จากข้อมูลโค้ด เมื่อนำไปใช้ทำนายจริงมีความยุ่งยาก ในการแทนค่าดังนั้นจึงนำข้อมูลจริง (uncode) มาวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์ใหม่ ได้ตั้งสมการที่ (7) และสามารถเขียนกราฟพื้นผิวตอบสนองดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อค่าความเป็นกรด-เบสของคิสเพอร์สชันฟลูมซิลิกา

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อปริมาณของฟลูมซิลิกาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-เบส ลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากขนาดของซิลิกามีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวมาก ผิวของซิลิกาเป็น สารอนินทรีย์ที่มี pH เป็นกรด (พรพรรณ, 2528) ทำให้คิสเพอร์สชันของซิลิกามีค่า pH ต่ำลงและ เมื่อปริมาณของแอมโมเนีย เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้น เนื่องจากแอมโมเนีย มีสมบัติเป็นเบส เมื่อปริมาณมากขึ้น จึงทำให้ค่า pH สูงขึ้น การเป็นกรดของคิสเพอร์สชันฟลูมซิลิกา 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 = ฟุ่มซิลิกา

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 = ฟุ่มซิลิกา

X_2 = แอมโมเนีย

ตารางที่ 4.11 อิทธิพลและสัมประสิทธิ์สำหรับค่าความหนืด (Viscosity) ของดิสเพอร์สชันพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ จากการวิเคราะห์แบบโค้ด (code) ได้ในตารางที่ 4.11 สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟุ่มซิลิกากับแอมโมเนียได้ว่า

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

$$X_1 = 55.5$$

$$X_2 = 240.2$$

$$Y = 445.2$$

แต่เนื่องจากการใช้สมการที่ได้จากข้อมูลแบบโค้ด (code) จะทำให้เขียนกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง ไม่สอดคล้องกับค่าจริงของตัวแปรดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลจริงของตัวแปร ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 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 X₁ = พุ่มชิลิกา

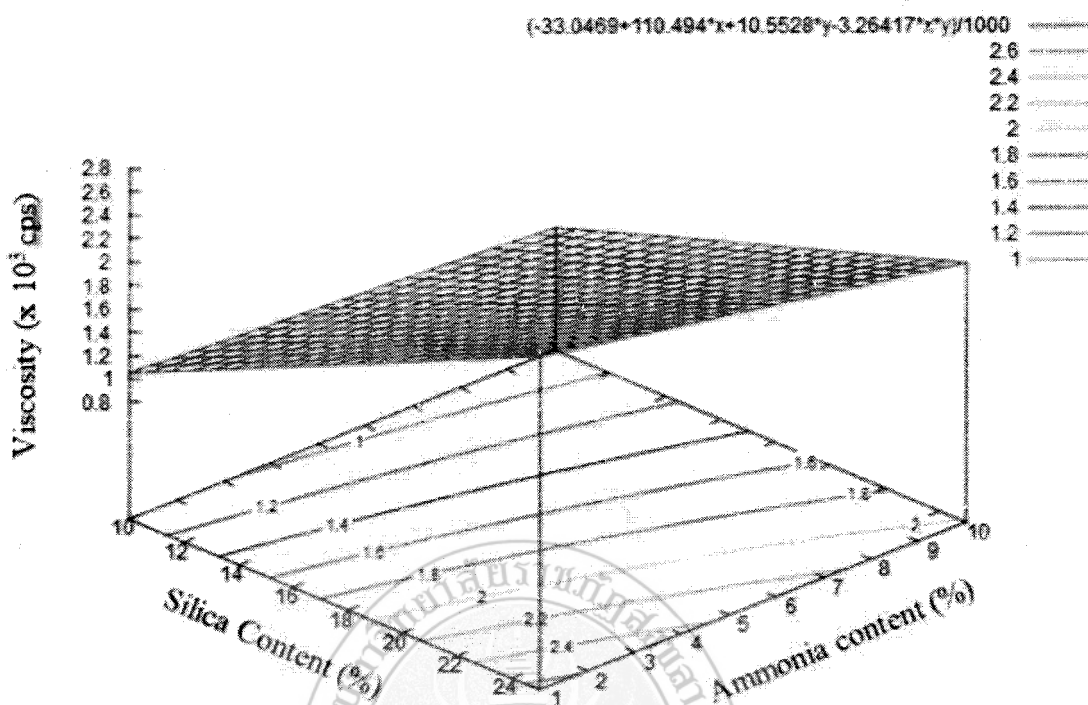
X₂ = แอมโมเนีย

$$Y = -33.0469 + 110.494 * X_1 + 10.5528 * X_2 - 3.26417 * X_1 * X_2 \dots\dots\dots(9)$$

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 ของพุ่มชิลิกากับแอมโมเนีย มีค่าเท่ากับ 0.961 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองคือพุ่มชิลิกากับแอมโมเนีย ตลอดจนอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรทั้งสองมีผลต่อค่าความหนืด (Viscosity) อย่างมีนัยสำคัญ

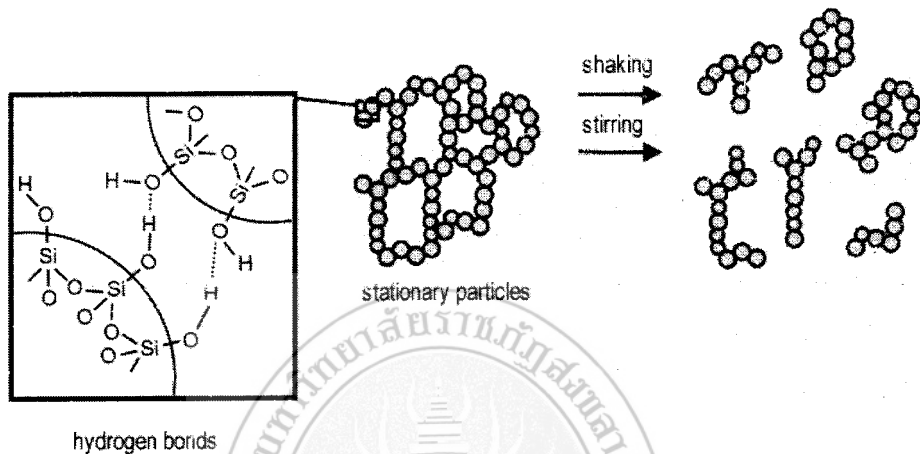
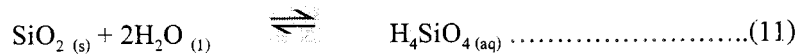
แต่เนื่องจากการใช้สมการที่วิเคราะห์จากข้อมูลโค้ด เมื่อนำไปใช้ทำนายจริง มีความยุ่งยากในการแทนค่าดังนั้นจึงนำข้อมูลจริง (uncode) มาวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์ใหม่ได้ดังสมการที่ (10) และสามารถเขียนกราฟพื้นที่ผิวตอบสนองดังรูปที่ 4.4



39รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูมซิลิกา (%) กับแอมโมเนีย (%) ที่มีต่อความหนืดของ ดิสเพอร์สชันฟลูมซิลิกา

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อปริมาณของฟลูมซิลิกาเพิ่มขึ้นส่งผลค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟลูมซิลิกามีอนุภาคขนาดเล็ก (พรวรรณ, 2528) มีน้ำอยู่รอบอนุภาคเป็นจำนวนมาก น้ำดังกล่าวเกิดจากพันธะไฮโดรเจนแทรกกระหว่างอนุภาคของฟลูมซิลิกา ดังรูปที่ 4.5 ดังนั้นเมื่อใช้ฟลูมซิลิกาปริมาณเพิ่มขึ้นน้ำจะถูกผิวของซิลิกาดูดซับไว้ ทำให้ดิสเพอร์สชันมีค่าความหนืดสูงขึ้นตามปริมาณของซิลิกาที่เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ซิลิกาในรูปดิสเพอร์สชันมากเกินไป พบว่า ความหนืดสูงมากจนทำให้ไม่สามารถวัดความหนืดได้ อาจขึ้นจากปฏิกิริยาการละลาย (dissolution) ระหว่างฟลูมซิลิกากับน้ำ

ดังสมการที่ 11 เกิดเป็น Orthosilicic acid (H_4SiO_4) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรด (Dove and Rimstidt, 1994) ทำให้ความเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์ในดิสเพอร์สชันฟลูมซิลิกาตกลง ส่งผลให้ความหนืดของดิสเพอร์สชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับผลของแอมโมเนีย พบว่าเมื่อปริมาณแอมโมเนียเพิ่มขึ้น ความหนืดของดิสเพอร์สชันฟลูมซิลิกาตกลง อาจเป็นเพราะแอมโมเนียมีฤทธิ์เป็นเบส ทำให้ลดการเกิด orthosilicic acid (H_4SiO_4) ลดลง ส่งผลให้ความหนืดของดิสเพอร์สชันซิลิกาตกลง



รูปที่ 4.5 การปรับสภาพผิวของฟุ้งซิลิกา

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

4.2 ผลของสารคู่ควบไขมัน และอุณหภูมิในการเตรียม Si69-t-SiO₂ ที่มีต่อสมบัติของ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์ชันการขึ้นรูป และสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ

การศึกษาการเตรียมฟุ้งซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไขมัน Si69 (ตามสูตรในตารางที่ 3.2) เพื่อศึกษาปริมาณการใช้สารคู่ควบไขมัน และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69 จากนั้นนำมาเปรียบเทียบผลที่ได้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตีโฟมยาง ดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการทดสอบความเป็น กรด-เบส ของ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์ชัน

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารคู่ควบไขมัน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69-t-SiO₂ ที่มีต่อสมบัติของค่า pH ของ Si69-t-SiO₂ 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

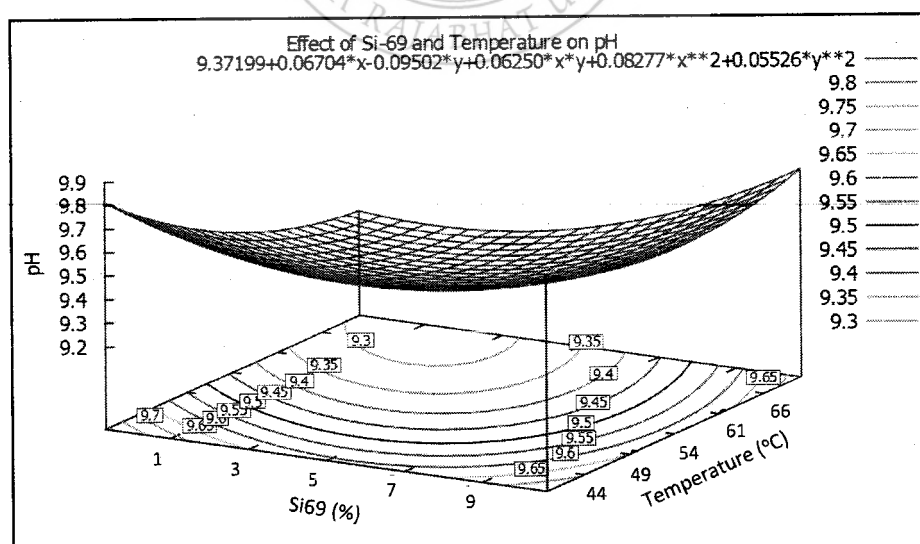
หมายเหตุ : x คือ Si69

Y คือ Temperature

จากตารางที่ 4.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของ Si69-t-SiO₂ เป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.1)

$$\text{pH} = 9.37199 + 0.06704x + 0.09502y + 0.0625xy + 0.08277x^2 + 0.05526y^2 \quad (4.1)$$

จากสมการข้างต้นได้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-เบส ของ Si69-t-SiO₂ โดยการใช้กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อ pH ของ Si69-t-SiO₂ คิสเพอร์สชัน

จากรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อปริมาณของสารคู่ควบไซเลน Si69 มีผลต่อค่า pH น้อย เนื่องจากเมื่อมีปริมาณของ Si69-t-SiO₂ ลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากผิวของฟุ้งซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์ที่มี pH เป็นกรด (พรพรรณ, 2528) ทำให้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันมีค่า pH ต่ำลง และเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ความร้อนทำให้ค่า pH ต่ำลง เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวฟุ้งซิลิกาที่มีความเป็นกรด และมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และมีการปลดปล่อย NH₃ ที่มีความเป็นเบสออกมา (เชาวน์, 2553) ทำให้ปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวฟุ้งซิลิกาน้อยลงค่า pH ของ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันจึงลดต่ำลง เพราะ Si69-t-SiO₂ ที่เพิ่มขึ้นเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแอมโมเนีย ไข่ทำให้แอมโมเนียไม่ให้ระเหยออกไปได้ง่าย แต่เมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างซิลิกาและแอมโมเนียระเหยออกไป เมื่อพิจารณาจากค่า p-value ในตารางที่ 4.14 พบว่าสอดคล้องกันนั้น คือ ปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 มีค่า p-value เข้าใกล้ 0 และ p-value ของสารคู่ควบไซเลน Si69 มากกว่าเล็กน้อย ในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาพบว่า มีค่า p-value เข้าใกล้ 0 ไม่มากแต่ชี้ให้เห็นว่ามีผลต่อค่า pH ซึ่งสอดคล้องกับกราฟพื้นผิวดอบสนองในรูปที่ 4.1 ที่ค่า pH จะต่ำที่สุดเมื่อปริมาณของสารคู่ควบไซเลน Si69 ต่ำสุด และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุด

4.2.2 ผลการทดสอบความหนืดของ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชัน

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69-t-SiO₂ ที่มีต่อสมบัติของค่าความหนืดของ Si69-t-SiO₂ และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM ได้ผลดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวดอบสนองของค่าความหนืด

Source	Estimate	Standard Error	t-value	p-value
Intercept	2192.05	214.51	10.22	1.85 x 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

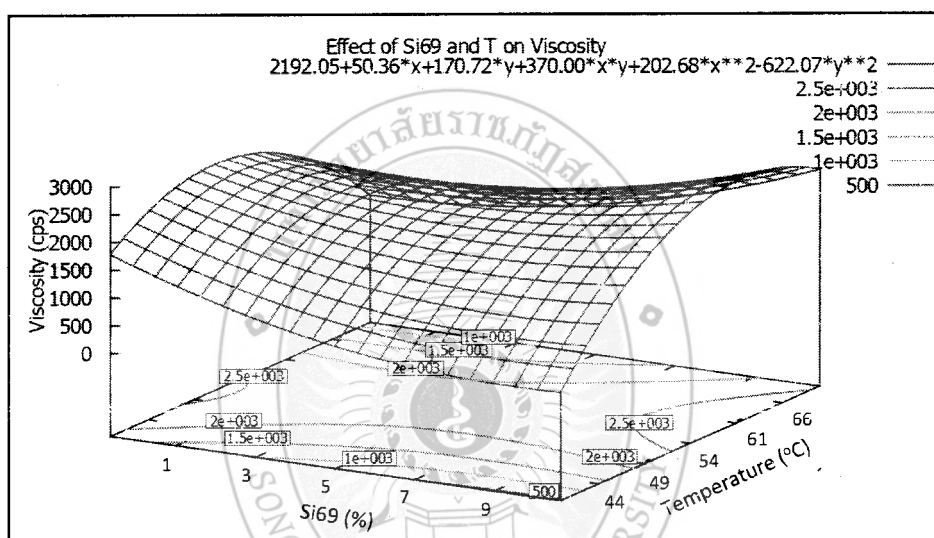
หมายเหตุ : x คือ Si69

Y คือ Temperature

จากตารางที่ 4.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความหนืดของ Si69-t-SiO₂ เป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.2)

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

จากสมการข้างต้นได้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความหนืดของ Si69-t-SiO₂ โดยการใช้กราฟพื้นผิวดอบนองแบบสามมิติได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความหนืดของ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชัน

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารคู่ไซเลน Si69 มากขึ้นส่งผลทำให้ค่าความหนืดของ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันลดลง เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนที่เติมเข้าไปในดิสเพอร์สชันพุ่มซิลิกา จะลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาด้วยกันเอง และการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาที่ดี (Kapgate & Das, 2014; เชาวน์, 2553) ในขณะเดียวกันหากเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้สูงขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความหนืดของ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่สูงขึ้น หมู่ไซลานอลบนผิวซิลิกาทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารคู่ควบไซเลน (เชาวน์, 2553) และของเหลวที่ผสมอยู่ในดิสเพอร์สชันพุ่มซิลิกาอย่างเช่น น้ำ และแอมโมเนีย ระเหยออกไปบางส่วน จึงมีปริมาณของส่วนที่เป็นพุ่มซิลิกามากขึ้น ปริมาณของเหลวลดลง ทำให้อนุภาคของพุ่มซิลิกาที่กระจายตัวอยู่ใน Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันมีความหนาแน่นมากขึ้นจน Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันสูญเสียความเสถียรของสภาวะการเป็นคอลลอยด์ จึงทำให้มีความหนืดสูงมากขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณา ค่า p-value จาก

ตารางที่ 4.2 พบว่าค่า p-value ของอุณหภูมิเข้าใกล้เข้าใกล้ 0 มากกว่า p-value ของสารคู่ควบไซเลน Si69 นั้นแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลมากกว่าปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 ซึ่งสอดคล้องกับกราฟพื้นผิวตอบสนองในรูปที่ 4.2 มีค่าความหนืดสูงสุดเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณ 49-61 °C และปริมาณของสารคู่ควบไซเลน Si69 ประมาณ 1-9% ของพุ่มซิลิกา

4.2.3 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงกดของโพลียเมอริกที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันที่มีต่อสมบัติของค่าความต้านทานต่อแรงกดของโพลียเมอริกที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM ได้ผลดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความต้านทานต่อแรงกดของโพลียเมอริก

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

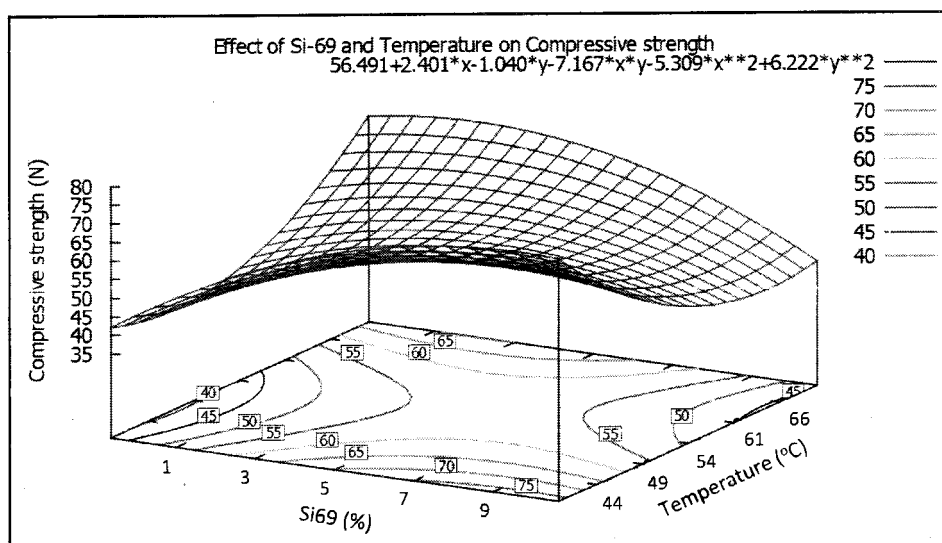
หมายเหตุ : x คือ Si69

Y คือ Temperature

จากตารางที่ 4.16 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความต้านทานต่อแรงกดของโพลียเมอริกที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม เป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.3)

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

จากสมการข้างต้นได้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อแรงกดของโพลียเมอริกที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม โดยการใช้กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความต้านทาน ต่อแรงกดของโพลียเมอริกที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม

จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมซิลิกอน Si69 มากขึ้นส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกดมีค่าสูงขึ้นเพราะสารตัวเติมซิลิกอนเป็นตัวกลางที่ช่วยประสานระหว่างยางกับฟลูมซิลิกาทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับฟลูมซิลิกาสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของฟลูมซิลิกาจึงสูงขึ้นด้วย และกระจายอยู่ในโพลียเมอริกได้ดี (Sae-Oui et al., 2004) จึงรับแรงกดได้มากขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ส่งผลให้โพลียเมอริกมีความนิ่มขึ้น มีความต้านทานต่อแรงกดน้อยลง เนื่องจากหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของซิลิกามีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (เขาวน, 2553) หมู่ซิลานอลที่ทำปฏิกิริยากับหมู่อัลคอกซีของสารตัวเติมซิลิกอน มีการปลดปล่อยแอลกอฮอล์ออกมาดังรูปที่ 2.4 ทำให้อันตรกิริยาระหว่างฟลูมซิลิกาดังกล่าวลดลง ส่งผลให้เมื่อเติมลง Si69-t-SiO₂ ในโพลียเมอริกเกิดการกระจายตัวได้ดี และเข้ากันได้ดีขึ้นกับยาง ดังนั้นเมื่อพิจารณาตัวแปรอุณหภูมิและปริมาณสารตัวเติมซิลิกอนจากกราฟพื้นผิวตอบสนองในรูปที่ 4.3 พบว่ามีช่วงที่ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกดของโพลียเมอริกที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมที่ดีขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 49-66 °C ขึ้นไป และมีปริมาณสารตัวเติมซิลิกอนอยู่ในช่วง 5-8% ของฟลูมซิลิกา

4.2.4 ผลการทดสอบการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโพลีเมียงที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชัน เป็น สารตัวเติม

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันที่มีต่อสมบัติของค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโพลีเมียงที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM ได้ผลดังตารางที่ 4 17

ตารางที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนอง ของค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโพลีเมียง

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

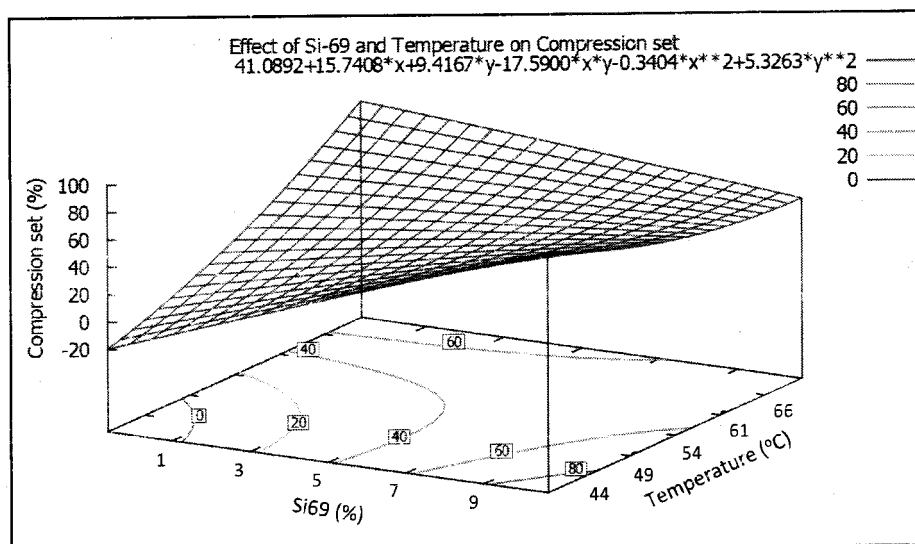
หมายเหตุ : x คือ Si69

Y คือ Temperature

จากตารางที่ 4.17 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของ โพลีเมียงที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม เป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.4)

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

จากสมการข้างต้นได้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโพลีเมียงที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม โดยการใส่กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของสารควบไซเลน Si69 มากขึ้นส่งผลให้ค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมมีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจากสารควบไซเลนมีกัมมันต์เป็นองค์ประกอบ (เขาวน, 2553) จึงทำให้โฟมยางที่คงรูปแล้วนำไปอัดที่ อุณหภูมิ 70 °C มีการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นทำให้โฟมยางคงรูปในขณะที่โดนอัดอยู่เพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดการคืนตัวได้น้อยลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่ปกติ ในขณะที่เดียวกันอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นส่งผลให้ ค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณของหมู่ไซลานอลลดลง (เขาวน, 2553) เมื่อเติมในโฟมยางจึงทำให้โฟมยาง จึงไม่มีการดูดซับสารตัวเร่งเกิดการวัลคาไนซ์ได้ดี เมื่อนำโฟมยางที่คงรูปแล้วไปอัดที่อุณหภูมิ 70 °C จึงไม่สามารถวัลคาไนซ์ต่อได้อีก ดังนั้นเมื่อพิจารณาตัวแปรอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และปริมาณสารควบไซเลน Si69 จากกราฟพื้นผิวตอบสนองในรูปที่ 4.4 พบว่ามีช่วงที่ทำให้ค่าการจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมดีที่สุดที่สุดเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 61 °C ขึ้นไป และมีปริมาณสารควบไซเลน Si69 อยู่ในช่วง 5-7% ของพุ่มชิลิกา

4.2.5 ผลการทดสอบความสามารถในการยืดจนขาดของโพลียเอทิลีนที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมซิลิโคน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันที่มีต่อสมบัติของค่าความสามารถในการยืดออกจนขาดของโพลียเอทิลีนที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM ได้ผลดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความสามารถในการยืดออกจนขาดของโพลียเอทิลีน

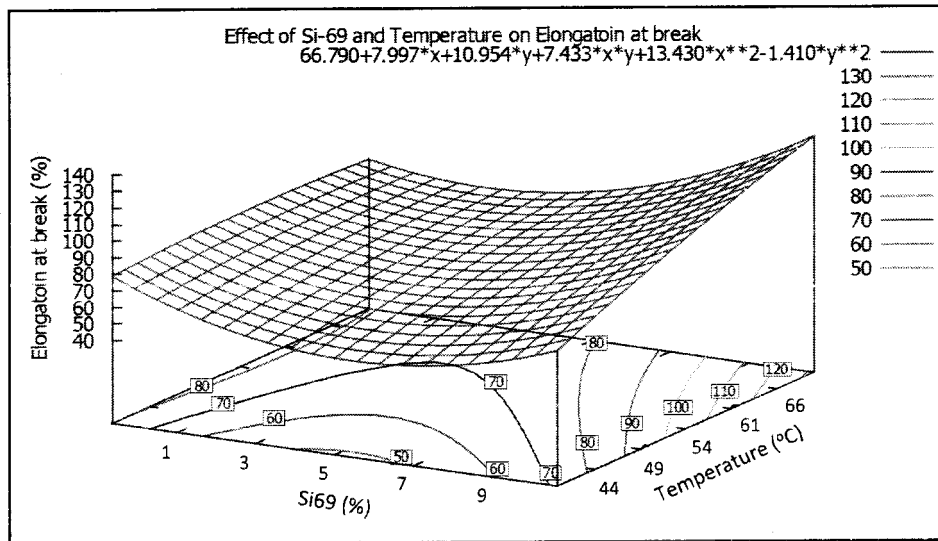
Source	Estimate	Standard Error	t-value	p-value
Intercept	66.79	18.655	3.58	0.00897
X	7.997	14.749	0.58	0.60452
Y	10.954	14.749	0.743	0.48182
x ²	13.43	15.819	0.849	0.42397
y ²	-1.41	15.819	-0.849	0.93148
Xy	7.433	20.857	0.356	0.73207

หมายเหตุ : x คือ Si69 , y คือ Temperature

จากตารางที่ 4.18 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของโพลียเอทิลีนที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม เป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.5)

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

จากสมการข้างต้นได้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของโพลียเอทิลีนที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม โดยการใช้กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความสามารถในการยืดจนขาดของโพลียเอทิลีนที่ใช้ Si69-t-SiO₂ คิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม

จากรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมซิลิกอน Si69 ส่งผลให้สมบัติด้านความสามารถในการยืดจนขาดของโพลียเอทิลีนที่ใช้ Si69-t-SiO₂ คิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมดีขึ้นเพียงเล็กน้อย เพราะสารตัวเติมซิลิกอนที่ทำหน้าที่เป็นกลางทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างสายกับพุ่มซิลิกาสูงขึ้น (Kapgat & Das, 2014; เชาวน์, 2553) จึงทำให้โพลียเอทิลีนยืดออกได้มากขึ้นเมื่อโดนดึง (Julie Chandra, Bipinbal, & Sunil, 2017) แต่เมื่อใช้กับโพลียเอทิลีนจึงไม่เห็นผลมากนักเนื่องจากเซลล์ของฟองอากาศมีจำนวนมากเมื่อยืดโพลียเอทิลีนออกจึงทำให้เซลล์ของฟองอากาศที่บางเกิดการฉีกขาดได้ง่าย ในขณะที่เดียวกันเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นทำให้ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของโพลียเอทิลีนที่ใช้ Si69-t-SiO₂ คิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมสูงขึ้นด้วยเพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นปริมาณของพุ่มซิลิกอนบนพื้นผิวของพุ่มซิลิกามีปริมาณลดลง (เชาวน์, 2553) เมื่อเติมในโพลียเอทิลีนจึงทำให้โพลียเอทิลีน จึงไม่มีการดูดซับสารตัวเร่งเกิดการวัลคาไนซ์ได้ก็สามารถเสริมแรงทำให้โครงสร้างของโพลียเอทิลีน จึงทนต่อการฉีกขาดได้ดีขึ้น เมื่อพิจารณาตัวแปรอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และปริมาณสารตัวเติมซิลิกอน Si69 จากกราฟพื้นผิวดอบนองในรูปที่ 4.10 ความสามารถในการยืดจนขาดดีที่สุดเมื่อใช้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 61 °C ขึ้นไป และปริมาณของสารตัวเติมซิลิกอนสูงขึ้น

4.2.6 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโพลีเมอร์ที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชัน เป็นสารตัวเติม

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันที่มีต่อสมบัติของค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโพลีเมอร์ที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM ได้ผลดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดพลาดมาตรฐานค่า t และค่า p ของสมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโพลีเมอร์

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

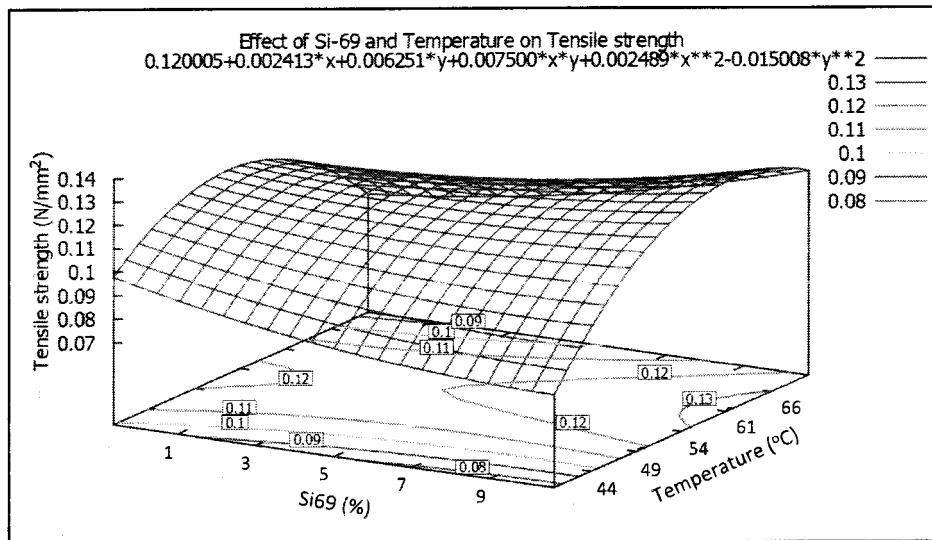
หมายเหตุ : x คือ Si69

Y คือ Temperature

จากตารางที่ 4.6 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโพลีเมอร์ที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม เป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.6)

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

จากสมการข้างต้นได้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโพลีเมอร์ที่ใช้ Si69-t-SiO₂ ดิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม โดยการใส่กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติได้ดังต่อไปนี้



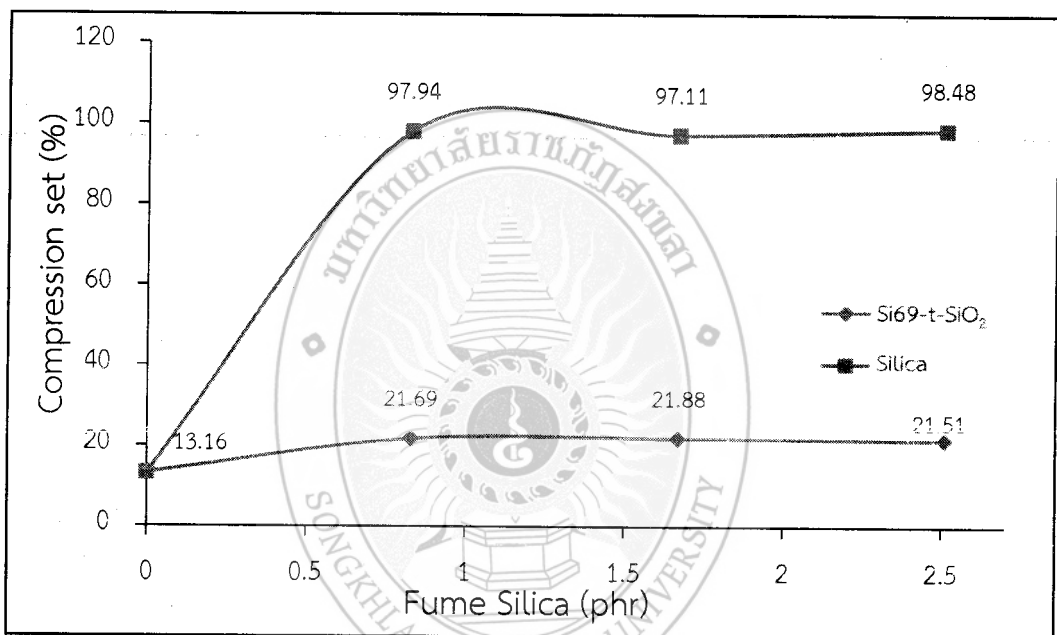
รูปที่ 4.11 อิทธิพลของปริมาณ Si69 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโพลีเมอร์ที่ใช้ Si69-t-SiO₂ คิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติม

จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารควบไซเลน Si69 ส่งผลให้สมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงของโพลีเมอร์ที่ใช้ Si69-t-SiO₂ คิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมลดลง เพราะสารควบไซเลนที่ทำหน้าที่เป็นกลางทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับฟุ้งซิลิกาสูงขึ้นจึงทำให้โพลีเมอร์ยืดออกได้มากขึ้นเมื่อโดนดึง (Julie Chandra et al., 2017) แต่เมื่อใช้กับโพลีเมอร์จึงส่งผลให้เซลล์ของฟองอากาศมีจำนวนมาก และมีความบางมากเมื่อยืดโพลีเมอร์ออกจึงทำให้เซลล์ของอากาศที่บางเกิดการฉีกขาดได้ง่าย ในขณะที่เดียวกันเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นทำให้ค่าของความต้านทานต่อแรงดึงของโพลีเมอร์ที่ใช้ Si69-t-SiO₂ คิสเพอร์สชันเป็นสารตัวเติมสูงขึ้นด้วยเพราะอุณหภูมิยิ่งสูงขึ้น ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นปริมาณของหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของฟุ้งซิลิกามีปริมาณลดลง เมื่อเติมในโพลีเมอร์จึงทำให้โพลีเมอร์ จึงไม่มีการดูดซับสารตัวเร่งเกิดการวัลคาไนซ์ได้ดีสามารถเสริมแรงทำให้โครงสร้างของโพลีเมอร์ดีขึ้น จึงมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นเช่นเดียวกับรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาตัวแปรอุณหภูมิและปริมาณสารควบไซเลนจากกราฟพื้นผิวดอบนองในรูปที่ 4.12 ความสามารถในการยืดจนขาดสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 49-61 °C และปริมาณของสารควบไซเลนอยู่ในช่วง 3-5% ของฟุ้งซิลิกา

4.3 ผลการศึกษาและเปรียบเทียบของปริมาณ SiO_2 กับ Si69-t-SiO_2 ที่มีต่อสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ

4.3.1 อิทธิพลของปริมาณฟุ้งซิลิกาที่มีผลต่อสมบัติด้านการยุบตัวของโฟมยาง

ทำการศึกษาผลของโฟมยางในการแปรปริมาณฟุ้งซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ โดยนำไปทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยาง เพื่อหาค่าการยุบตัวของโฟมยาง โดยใช้เครื่องการยุบตัวถาวรเนื่องจากแรงอัด และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D395



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

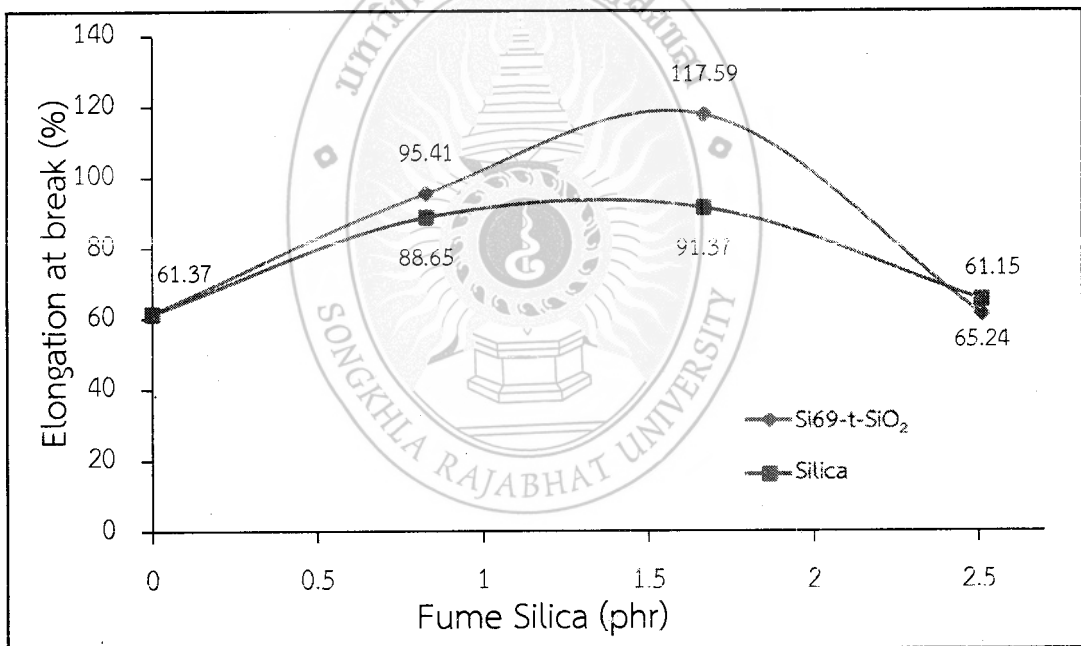
เมื่อปริมาณของ SiO_2 ที่ยังไม่ปรับสภาพผิวเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการจัดตัวของโฟมยางสูงขึ้น ในขณะที่การใช้ Si69-t-SiO_2 ทำให้ค่าจัดตัวของโฟมยางไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (silanol groups) สูง ทำให้มีอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซิลิกาที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งนำไปสู่การรวมตัวและการเกาะตัวของอนุภาคซิลิกาด้วยตัวเอง เกิดเป็นก้อนอนุภาคฟุ้งซิลิกาขนาดใหญ่ แต่เมื่อทำการปรับสภาพผิวของฟุ้งซิลิกาด้วยสารคู่ควบไฮดรอกซิล Si69 ทำให้อนุภาคปฐมของฟุ้งซิลิกามีความหนาแน่นที่เกาะกันแตกออก และกลับเข้ามารวมเป็นก้อนขนาดใหญ่ได้ยากขึ้น เมื่อนำไปผสมกับยาง สารคู่ควบไฮดรอกซิล จะทำหน้าที่เป็นตัวกลาง เชื่อมโยงระหว่างสารตัวเติมกับยาง ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยาง-สารตัวเติมมาก

ขึ้น (Kapgate & Das, 2014; Katueangngan et al., 2016; เซาว์น, 2553) ส่งผลให้การจัดตัวเนื่องจากแรงอัดของโพลียเมอริกที่ Si69-t-SiO₂ มีค่าต่ำกว่าโพลียเมอริกที่ใช้ SiO₂ ที่ยังไม่ปรับสภาพผิว

4.3.2 อิทธิพลของปริมาณฟุ้งซิลิกาที่มีต่อสมบัติด้านการดึง

ทำการศึกษาผลของโพลียเมอริกในการแปรปริมาณฟุ้งซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ โดยนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและค่าระยะยืดเมื่อขยายขนาด เพื่อหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระยะเมื่อขยายขนาดของโพลียเมอริก โดยใช้เครื่อง NRI Universal Testing Machine และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3574

4.3.2.1 ความสามารถในการยืดจนขาด (elongation at break)

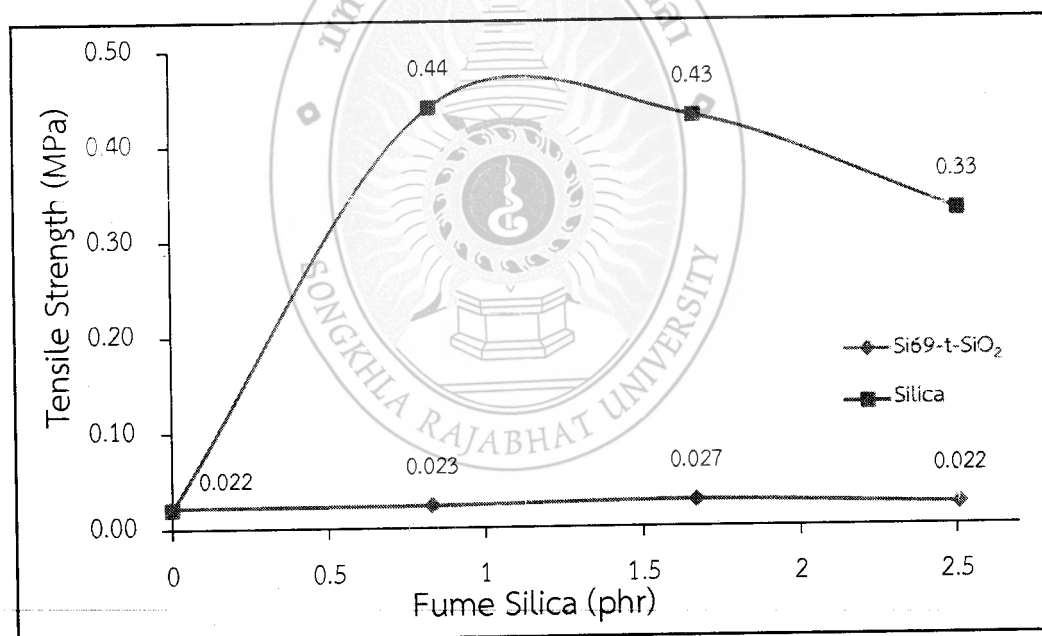


รูปที่ 4.13 อิทธิพลของปริมาณฟุ้งซิลิกาต่อความสามารถในการยืดจนขาดของโพลียเมอริกที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO₂ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

การเพิ่ม Si69-t-SiO₂ เข้าไปในผลิตภัณฑ์โพลียเมอริกมีผลทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดของโพลียเมอริกมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณลดลงเมื่อมี Si69-t-SiO₂ มากกว่า 1.67 phr เนื่องจากโพลียเมอริกมีลักษณะที่เป็นฟองอากาศจึงมีความเป็นรูพรุนเมื่อเติมสารตัวเติมในปริมาณที่สูงทำให้โพลียเมอริกได้งายขึ้น นอกจากนี้พบว่าที่ปริมาณการใช้ฟุ้งซิลิกา 1.67 phr. ให้ความสามารถในการยืดจนขาดของโพลียเมอริกสูงที่สุดคือ 1.67 phr หากพิจารณาจากลักษณะพื้นฐานวิทยาของโพลียเมอริกที่ผสม SiO₂ ที่ยัง

ไม่ปรับสภาพผิว (รูปที่ 4.16) ปริมาณของ SiO_2 ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โพลียเมอร์มีขนาดเซลล์ฟองเล็กลง และเมื่อเปรียบเทียบกับที่โพลียเมอร์ผสม Si69-t-SiO_2 (รูปที่ 4.17) พบว่ามีขนาดเล็กกว่า ซึ่งขนาดของเซลล์ฟองอาจส่งผลให้โพลียเมอร์ที่ใส่ฟุ้งซิลิกาได้ดียากกว่า นอกจากนี้ การใช้สารคู่ควบไซเลน Si69 ปรับสภาพผิวฟุ้งซิลิกา ทำให้มีอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติม-สารตัวเติมลดลง (Kapgat & Das, 2014; เชาวน์, 2553) ส่งผลให้อนุภาคที่เกิดจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคฟุ้งซิลิกาแตกออกได้ง่ายขึ้นเมื่อทำเป็นดิสเพอร์สชัน และมีจุดอ่อนในโพลียเมอร์น้อยกว่า จึงทำให้โพลียเมอร์ผสม Si69-t-SiO_2 สามารถยึดได้มาก และเมื่อเพิ่มปริมาณของ ดิสเพอร์สชันฟุ้งซิลิกาเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการยึดสูงขึ้นกว่าโพลียเมอร์ที่ใส่ดิสเพอร์สชันฟุ้งซิลิกาปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

4.3.2.2 ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength)



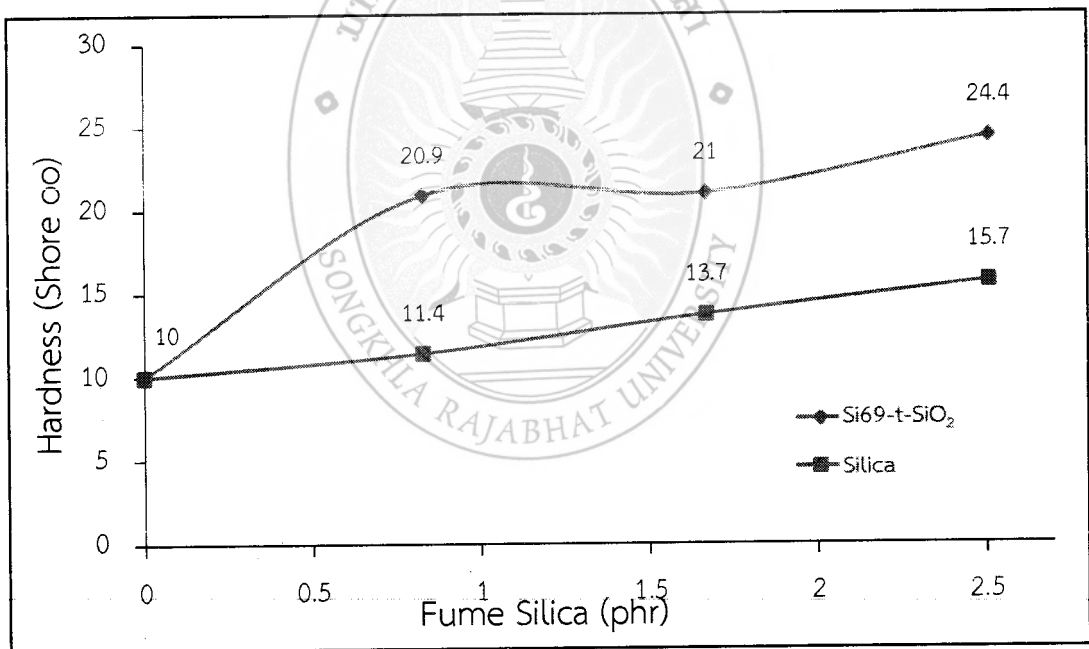
รูปที่ 4.14 อิทธิพลของปริมาณฟุ้งซิลิกาต่อความต้านทานต่อแรงดึงของโพลียเมอร์ที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO_2 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

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

ให้โพลียเมอร์ขนาดเซลล์ฟองเล็กกลงและเมื่อเปรียบเทียบกับที่โพลียเมอร์ที่ผสม Si69-t-SiO₂ (รูปที่ 4.17) พบว่ามีขนาดเล็กกว่า ซึ่งขนาดของเซลล์ฟองอาจส่งผลให้โพลียเมอร์ที่ใส่ SiO₂ ที่ยังไม่ปรับสภาพผิว มีความต้านทานต่อแรงดึงสูง แต่เมื่อปริมาณเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการมีปริมาณ SiO₂ ที่ยังไม่ปรับสภาพผิวสูงขึ้น ส่งผลให้มีจุดอ่อนในยางมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดต่ำลง

4.3.3 อิทธิพลของปริมาณฟุ้งซิลิกาที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งของโพลียเมอร์

ทำการศึกษาผลของโพลียเมอร์ในการแปรปริมาณฟุ้งซิลิกาที่ยังไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวด้วย Si69 ปริมาณต่างๆ โดยทดสอบสมบัติด้านความแข็ง เพื่อทดสอบความแข็งของโพลียเมอร์ โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งหั่วกด แบบ (Shore OO) และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240



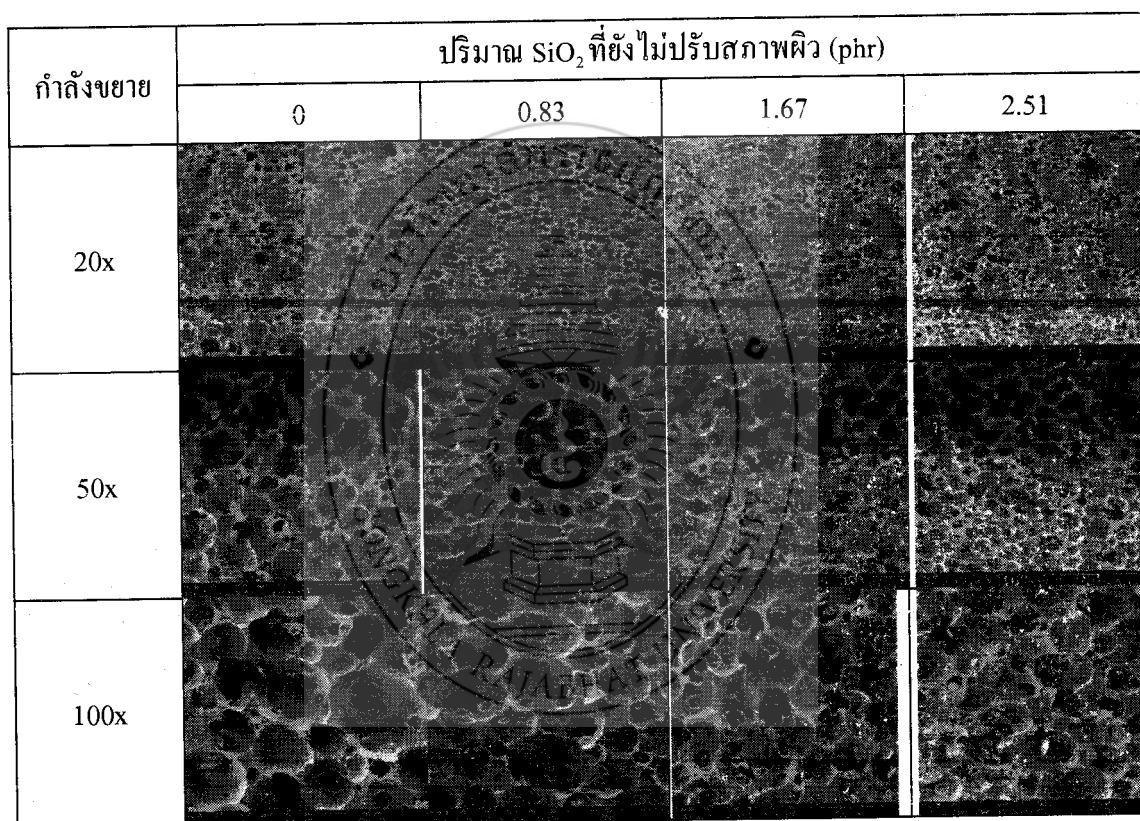
รูปที่ 4.15 อิทธิพลของปริมาณฟุ้งซิลิกาต่อความแข็งของโพลียเมอร์ที่แปรปริมาณ Si69-t-SiO₂ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

การใช้ฟุ้งซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 ทำให้ความแข็งต่ำกว่าการใช้คิสเพอร์สชันฟุ้งซิลิกาที่ไม่ปรับสภาพผิว และเมื่อเพิ่มปริมาณของคิสเพอร์สชันค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟุ้งซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ (Alzoubi et al., 2011) ซึ่งศึกษาการใช้สารคู่ควบไซเลน ปรับสภาพผิวของถั่วลันเตา เพื่อนำมาเป็นสารตัวเติมในยางบิวตะไดอิน

นอกจากนี้ยังมี (เขาวาน์, 2553) ที่รายงานถึงความแข็งของยางที่ใช้ซิลิกาปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน มีค่ามากกว่าการใช้ซิลิกาที่ไม่ปรับสภาพผิว

4.3.4 อิทธิพลของปริมาณฟุ่มซิลิกา ที่มีต่อสมบัติทางกลฐานวิทยาของโฟมยาง

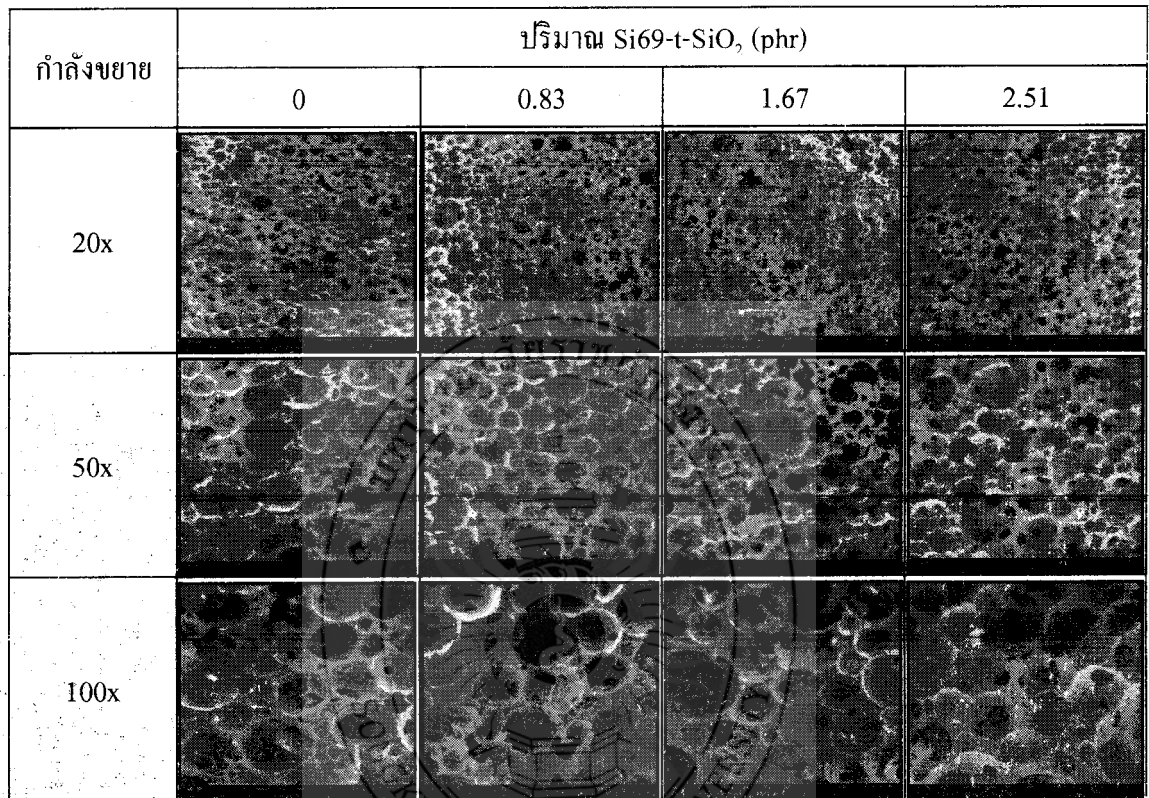
โฟมยางเตรียมได้จากน้ำยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งลักษณะทางวิทยาของโฟมยางมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่างของฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในโฟมยาง อธิบายได้ ดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 4.16 ภาพขยายของโฟมยาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่มีกำลังขยาย 20x 50x และ 100x โดยการแปรปริมาณ SiO₂ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

จากรูปที่ 4.16 พบว่าที่ปริมาณของฟุ่มซิลิกาเพิ่มขึ้น ขนาดของฟองอากาศในโฟมยางจะเล็กลงและมีปริมาณมากขึ้น เนื่องจากฟุ่มซิลิกามีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิที่เล็กมาก แต่สามารถเสริมแรงให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น (พรพรรณ, 2528) ส่งผลให้ฟองอากาศในโฟมยางขยายตัวได้ยากขณะตีฟอง จึงทำให้ขนาดของฟองเล็กลง

จากการเปรียบเทียบผลของปริมาณฟุนซิติกจากภาพขยายโคมยางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกับการยุบตัวถาวรเนื่องจากแรงอัดของโคมยาง พบว่าเมื่อปริมาณของฟุนซิติกเพิ่มขึ้น ขนาดของฟองอากาศโคมยางเล็กกลง มีปริมาณมากขึ้น



รูปที่ 4.17 ภาพขยายของโคมยาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่มีกำลังขยาย 20x 50x และ 100x โดยการแปรปริมาณ Si69-t-SiO₂ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr

จากรูปที่ 4.17 พบว่าการที่ปริมาณของ Si69-t-SiO₂ เพิ่มขึ้น ขนาดของฟองอากาศในโคมยางจะเล็กกลง และมีความเป็นระเบียบมากขึ้น เนื่องจากฟุนซิติกามีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิที่เล็กมาก แต่สามารถเสริมแรงให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น ประกอบกับการปรับสภาพผิวฟุนซิติกด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 ทำให้ฟุนซิติกสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างยาง-สารตัวเติมได้ดีขึ้น (Alkadasi et al., 2004; Kapgata & Das, 2014; Yamazaki et al.; เซาว์น, 2553) ส่งผลให้ฟองอากาศในโคมยางขยายตัวได้ยากขณะตีโคมจึงทำให้ขนาดของฟองเล็กกลง

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการเตรียมดิสเพอร์สชันฟุ้งซิลิกา พบว่าปริมาณของซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ทำให้ดิสเพอร์สชันซิลิกา มีปริมาณของแข็งทั้งหมด และความหนืดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่น และค่า pH ลดลง ปริมาณแอมโมเนียในดิสเพอร์สชันซิลิกาที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมด ความหนาแน่น pH แต่ความหนืดลดลง โดยพบว่าในการเตรียมดิสเพอร์สชันฟุ้งซิลิกา สภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณ SiO_2 และแอมโมเนีย คือร้อยละ 25 และ 10 ตามลำดับ โดยใช้วัตทามอลร้อยละ 1 และน้ำ กลั่นร้อยละ 64 บอลมิลเป็นเวลา 72 ชั่วโมง สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟุ้งซิลิกาปรับสภาพผิว ด้วยไซเลน Si69 ที่นำไปใช้ในโฝมายางและให้สมบัติที่ดี คืออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และปริมาณ Si69 ร้อยละ 5 โดยพบว่าที่อุณหภูมิปฏิกิริยาสูง ปริมาณ Si69 ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อการดึงยืด และความสามารถในการยึดจนขาดเพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานต่อแรงกด และค่าการจัดตัวเนื่องจากการอัดลดลง ในทางกลับกัน ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำ เมื่อปริมาณของไซเลนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกด และค่าการจัดตัวเนื่องจากการอัดมีค่าสูงขึ้น แต่ความต้านทานต่อการดึงยืด และความสามารถในการยึดจนขาดลดลง ค่ามีผลต่อการปรับสภาพผิวของซิลิกาเล็กน้อยดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ของโฝมายางที่ดีขึ้นเล็กน้อยในทุกสมบัติ แต่ค่าความหนืดของดิสเพอร์สชันซิลิกาสูงขึ้น เมื่อปริมาณของดิสเพอร์สชันฟุ้งซิลิกาเพิ่มขึ้นและแอมโมเนียลดลง โดยดิสเพอร์สชันที่มีปริมาณฟุ้งซิลิกาค่าที่สุด (ร้อยละ 20 โดยประมาณ) มีค่าความหนืดค่าที่สุด ในขณะที่ดิสเพอร์สชันที่มีปริมาณฟุ้งซิลิกา สูงเกินไป (ร้อยละ 28 โดยประมาณ) พบว่าความหนืดสูงเกินไปจนไม่สามารถวัดความหนืดได้ทำให้ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้เลือกใช้ดิสเพอร์สชันที่มีปริมาณฟุ้งซิลิกา ร้อยละ 26 โดยประมาณ เพราะ มีความหนืดและปริมาณฟุ้งซิลิกาเหมาะสมในการนำไปใช้ในการผสมกับน้ำยางธรรมชาติเพื่อผลิตเป็นโฝมายางจากการทดลองพบว่าปริมาณฟุ้งซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงและการจัดตัวถาวรเนื่องจากการอัดเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยึดจนขาดต่ำ และขนาดของฟองอากาศจะเล็กลงและมีปริมาณมากขึ้น การใช้ Si69-t-SiO_2 ในโฝมายาง ในปริมาณน้อย (0.8-2.5 phr) ไม่มีผลต่อการแปรรูปของโฝมายาง ขนาดของเซลล์โฝมายาง การจัดตัวเนื่องจากการการอัดและความต้านทานต่อการดึงยืด แต่ทำให้ความแข็งแรง และความสามารถในการยึดจนขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งปริมาณ Si69-t-SiO_2 ที่เหมาะสมของ คือ 2.5 phr

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาอิทธิพลปริมาณของฟุ่มซิติก้าเพื่อปรับระดับความแข็งของโฟมยาง เพื่อผลิตโฟมยางให้ได้ความแข็งตามที่ต้องการ เป็นการพัฒนาโฟมยางจากน้ำจากธรรมชาติโดยใช้ฟุ่มซิติก้าให้ดีขึ้นกว่าเดิม

2. เปลี่ยนชนิดสารตัวเติมจากซิติก้าเป็นสารตัวอื่น เช่น แคลเซียมคาบอเนตหรือสารจำพวกแข็งเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางเชิงกล และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของโฟมยาง เพื่อเพิ่มทางเลือกให้แก่อุตสาหกรรมการผลิตโฟมยาง



บรรณานุกรม

- ชินรัตน์ ลากุลธนะอนันต์. (2558). เทคโนโลยีการผลิตและทดสอบโฟมยางจากน้ำยางธรรมชาติ. เครื่องช่วยพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพารา.
<https://www.shorturl.at/bmzAW>
- เขาวาน์ ศรีเพชรดี. (2553) การศึกษาการใช้ซิลิกาเจลขนาดนาโนชนิดมีรูพรุน ที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบ เพื่อเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยกระบวนการโซลเจล. มหาวิทยาลัยศิลปากร. นครปฐม. DOI : https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_Doi=
- ชาลินี ปรีชา และฐิติกาญจน์ ชาติชินเขาวาน์. (2558). การเตรียมและสมบัติของโฟมยางธรรมชาติที่แปรปริมาณ SSF และ DPG. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, โปรแกรมวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา. สงขลา.
- น้ำยาง. (2015, มีนาคม 6). วิกีพีเดีย 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](http://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 วรรณกุล. (2010). Sol-gel เทคโนโลยีสังเคราะห์ซิลิกาจากขานอ้อย. วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี, 36(209), 39-43.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. (2528). สารเคมีสำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. ปัตตานี.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. (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. สกิตติยางไทย. (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)

- Katueangnan, 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 Retardant 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 Calcium 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 และ โฟมยาง
ภาคผนวก ค	สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
ภาคผนวก ง	ข้อมูลการทดลองการเตรียม Si69-t-SiO_2
ภาคผนวก จ	ข้อมูลการทดลองสมของโฟมยางที่แปรปริมาณสารตัวเติม
ภาคผนวก ฉ	ประวัติผู้ปฏิบัติการวิจัย



ภาคผนวก ก
การเผยแพร่ผลงาน

บทความวิชาการ

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
“พัฒนางานวิจัย สร้างสรรค์อุดมศึกษาไทย ก้าวไกลสู่ Thailand 4.0”
วันที่ 28 – 29 กันยายน 2560

ณ ห้องประชุมปิ่นเกล้าียว อาคารศูนย์ภาษาและศูนย์คอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม

ชื่อบทความ การใช้ฟุ่มซิติกาในผลิตภัณฑ์โฟมยางที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ
ผู้เขียน อัสมา ศีกะคาร อาตีพะ บุตรา เอกฤกษ์ พุ่มนง 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 การใช้ฟุ่มซิติกาที่ปรับสภาพผิวด้วยไซเลนใน
ผลิตภัณฑ์ โฟมยางที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ
ผู้เขียน เจษฎา คำสีโก จิรายุ ทองเชื้อ และเอกฤกษ์ พุ่มนง

วันที่ 28 – 29 กันยายน 2560

ณ ห้องประชุมปิ่นเกล้าวิว อาคารศูนย์ภาษาและศูนย์คอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม

ชื่อบทความ การใช้ฟุ่มซิติกาในผลิตภัณฑ์โฟมยางที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ

ผู้เขียน อัสมา ศิกะการ อาตีพีระ บุตรา เอกฤกษ์ พุ่มนง และรัฐพงษ์ หนูหมาด

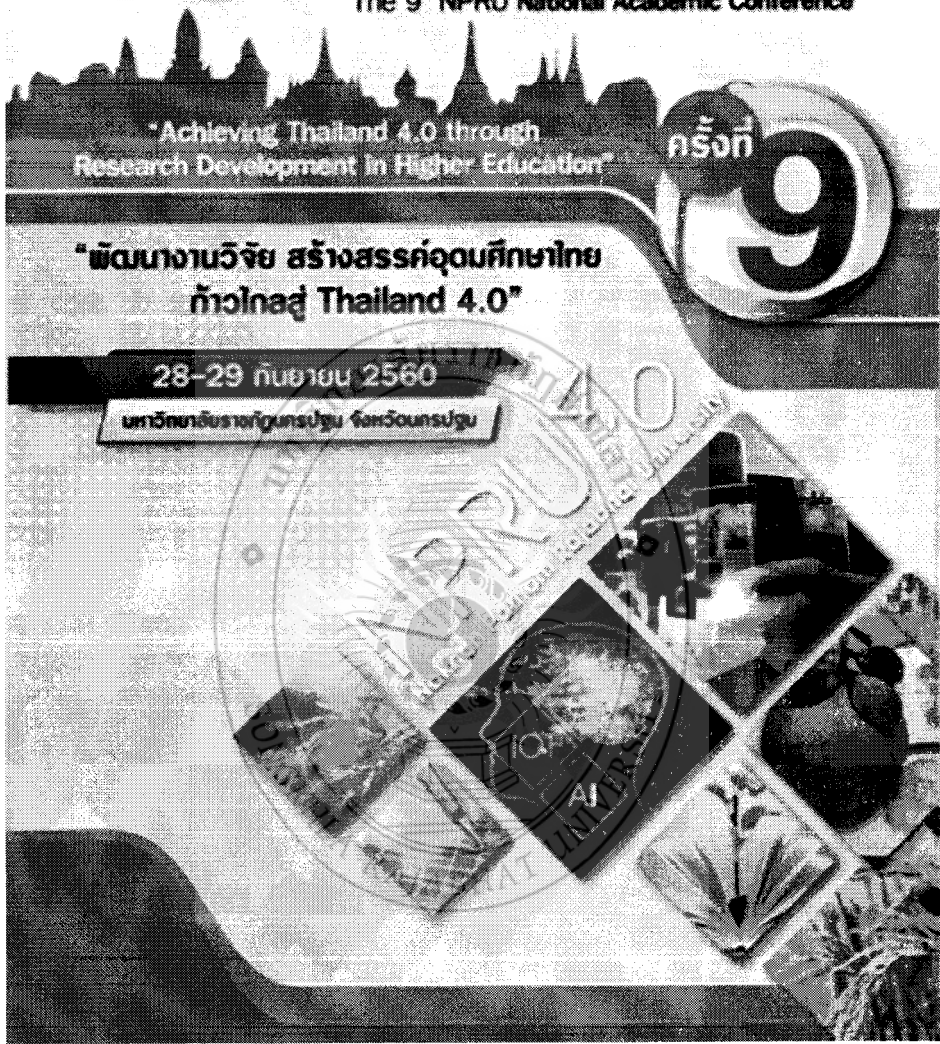


การประชุมวิชาการระดับชาติ



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 จิตรลวดนครปฐม

ภาคผนวก ข

วิธีการทดสอบสมบัติของ SiO_2 และ Si69-t-SiO_2 และโพลียาง

ข.1 การทดสอบปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content)

ทำได้โดยชั่งน้ำหนักของงานแก้วให้ละเอียดถูกต้องถึง 0.0001 มิลลิกรัม น้ำหนักของงานแก้ว เทพูมซิลิกาตัวอย่างลงไปประมาณ 2.5 ± 0.5 กรัม และบันทึกน้ำหนักของคิสเพอร์ชันพุ่มซิลิกาตัวอย่าง เอียงงานไป-มาเพื่อให้พุ่มซิลิกากระจายทั่วงานแก้ว และนำงานแก้วไปอบแห้งที่ตั้งอุณหภูมิไว้แล้วที่ 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 = น้ำหนักของงานแก้ว (กรัม)
 B = น้ำหนักของงานแก้วกับพุ่มซิลิกาตัวอย่าง (g)
 C = น้ำหนักของงานแก้วกับพุ่มซิลิกาที่แห้งแล้ว (g)

ข.2 การทดสอบค่า pH พุ่มซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69

การทดสอบค่า pH โดยการนำตัวอย่างมาทดสอบด้วยใช้เครื่องวัดค่า pH จะทำการทดสอบ 3 ครั้ง ต่อตัวอย่างโดยจะรายงานผลด้วยค่ากลาง

ข.3 การทดสอบความหนืด viscosity พุ่มซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69

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

ต้องการแล้วเปิดสวิตช์ เคนมอเตอร์เครื่อง ทดสอบความหนืด 3 ครั้ง บันทึกค่าความหนืดได้ รายงานผลการทดลองโดยใช้ค่ากลาง (ใช้ในภาคผนวก)

ข.4 การทดสอบการยุบตัวของโฟมยางที่เติมฟูลซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย 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 และชิ้นทดสอบออกจากเครื่องกดอัด 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

t_0 คือ ความหนาเดิมของชิ้นทดสอบ (mm)

t_1 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบที่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านแรงอัดแล้ว (mm)

t_s คือ ความสูงของแท่งเหล็กกล้า (mm)

ความหนาเดิม) หลังจากผ่านแรงอัดแล้ว (%)

ข.5 การทดสอบแรงที่ทำให้ความหนาของโฟมยางที่เติมฟูลซิลิกาที่ปรับสภาพผิวด้วย Si69

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

ข.6 การทดสอบสมบัติด้านการดึงของโพลียเอทิลีนที่ปรับปรุงสภาพผิวด้วย Si69

ทดสอบสมบัติด้านการดึงตามมาตรฐาน ASTM D3574 โดยการ นำแผ่นโพลียเอทิลีนมาตรฐานที่มีขนาด 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 (mm²)

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) ของโพลียเอทิลีน

โดยการนำชิ้นทดสอบโพลียเอทิลีนที่เตรียมไว้มาทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยใช้ชิ้นทดสอบ 1 ชิ้นต่อตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ทดสอบวัดความแข็ง 5 จุด รายงานผลโดยค่ากลาง

ข.8 การทดสอบโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของโฟมยาง

การทดสอบส่องกล้องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) นำชิ้นทดสอบมาตัดให้เป็นชิ้นเล็กและบาง เพื่อศึกษาลักษณะทาง สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบ นำชิ้นทดสอบตัดตรงรอยขาดของชิ้นทดสอบที่ได้จาก การดึงติดบนแท่งโลหะจากนั้นนำยาง ไปเคลือบผิวด้วยทองโดย sputtering technique ก่อนที่จะ นำไปวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM)



ภาคผนวก ค

สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ค. 1 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของดิสเพอร์ชันของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมโพลียาง (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	

ตารางที่ ค.1 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของดิสเพอร์ชันของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมโพลียาง (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	ค่า pH	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	ค่า pH	ค่ากลาง
potassium.oleate	1	12.68	12.56
	2	12.53	
	3	12.56	

ตารางที่ ค.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของฟุ่มซิลิกาดีสเพอร์ชันที่ทำการแปรปริมาณของฟุ่มซิลิกา
ที่ 10-25 phr และแอมโมเนียที่ 1-10 phr

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

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

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

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

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

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดลองการเตรียม Si69-t-SiO₂ตารางที่ ง.1 ขนาดอนุภาคของ Si69-t-SiO₂ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Zeta-potential

ตัวอย่างที่	ขนาดอนุภาค
1	200
2	210
เฉลี่ย	205

รูปที่ ง.1 ภาพ TEM ของ Si69-t-SiO₂

ตารางที่ 3.2 การทดสอบหาค่า pH ของ Si69-t-SiO₂

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 3.3 การทดสอบหาค่า viscosity ของ Si69-t-SiO₂

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 3.4 ผลการทดสอบ compressive strength ของ Si69-t-SiO₂

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


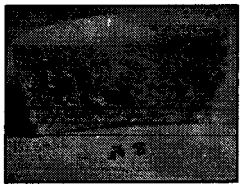
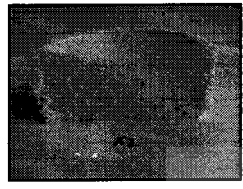


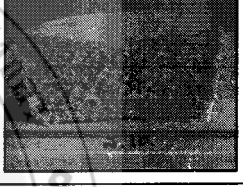

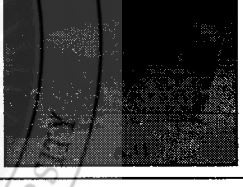

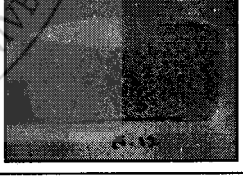
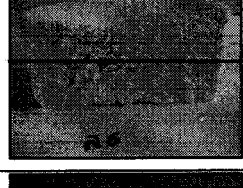
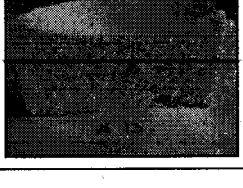

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบ compression set ของ Si69-t-SiO₂

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 3.6 ผลการทดสอบ tensile strength และ elongation at break ของ Si69-t-SiO₂

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	0.06	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						

ตารางที่ ง.7 ลักษณะตัวอย่างขึ้นทดสอบของโม่ยางที่เติม Si69-t-SiO₂

Si69/T %/°C	form	nature	Si69/T %/°C	form	nature
5/54		เกิดการขูดและ กลวงด้านใน ฟองมีขนาด เล็ก	8.54/43		เกิดการขูดและ กลวงด้านใน ฟองมีขนาด เล็ก
8.54/65		เกิดการขูดและ ฟองมีขนาด เล็กละเอียด	5/38		เกิดการขูดและ กลวงด้านใน ฟองมีขนาด เล็ก
5/54		เกิดการขูดและ กลวงด้านใน เล็กน้อย ฟองมี ลักษณะหยาบ	5/54		เกิดการขูดและ กลวงด้านใน เล็กน้อย ฟองมี ขนาดเล็ก
1.46/65		เกิดการขูดและ กลวงด้านใน เล็กน้อย ฟองมี ขนาดเล็ก	1.46/43		เกิดการขูดและ กลวงด้านใน เล็กน้อย ฟองมี ขนาดเล็ก
10/54		เกิดการขูดและ กลวงด้านใน ฟองมีขนาด เล็ก	5/54		เกิดการขูดและ ฟองมีขนาด เล็กละเอียด
5/54		เกิดการขูดและ กลวงด้านใน ฟองมีขนาด เล็ก	0/54		เกิดการขูดและ กลวงด้านใน ฟองมีขนาดไม่ สม่ำเสมอ
5/70		เกิดการขูดและ ฟองมีขนาด เล็กละเอียด			

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดลองสมบัติของโฟมยางที่แปรปริมาณสารตัวเติม

ตารางที่ จ.1 การเปรียบเทียบผลของปริมาณ SiO₂ และ Si69-t-SiO₂ 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 SiO₂ และ Si69-t-SiO₂ 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

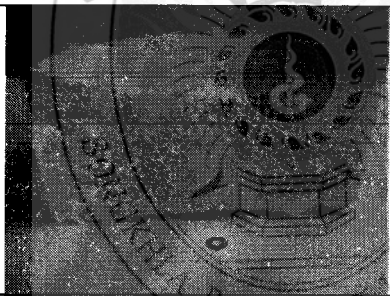

ตารางที่ จ.3 การเปรียบเทียบผลของปริมาณ SiO₂ และ Si69-t-SiO₂ ต่อสมบัติ tensile strength และ elongation at break

volume (phr)	tensile strength (N/mm ²)		elongation 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



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

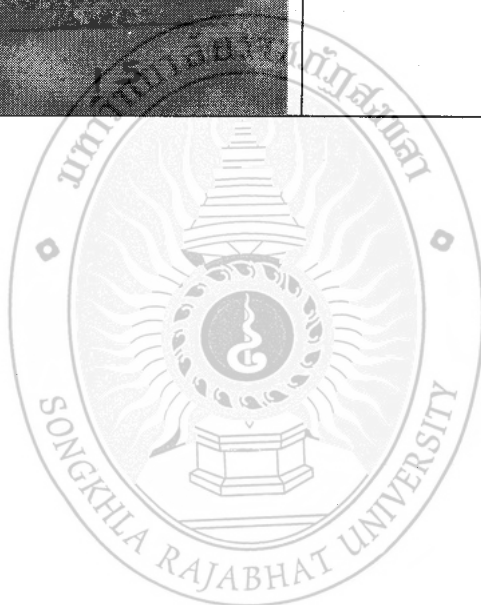
volume (phr)	hardness (Shore OO)	
	SiO_2	Si69-t-SiO_2
0	10.0	10.0
0.83	11.4	20.9
1.67	13.7	21.0
2.51	15.7	24.4

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 ลักษณะเนื้อโพลีเมอร์ผสม Si69-t-SiO₂ ในปริมาณ 0, 0.83, 1.67 และ 2.51 phr (ต่อ)

1.67	 <p>10</p>	เกิดการยุบ ฟองมีขนาดเล็ก
2.51		เกิดการยุบ ฟองมีขนาดเล็กละเอียด



ภาคผนวก จ
ประวัติผู้ปฏิบัติการวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

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

หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์
อิเล็กทรอนิกส์ (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

วุฒิกการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิกการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุ
สถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัย
ในแต่ละผลงานวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย :

1. ชื่อโครงการวิจัย “ปัจจัยในการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เขม่าดำจากสถานะน้ำยางโดยใช้
น้ำยางสด”
2. ชื่อโครงการวิจัย “การเตรียมมาสเตอร์แบทช์เขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตจาก
สถานะน้ำยางโดยใช้น้ำยางสด”

ผู้ร่วมวิจัย 1

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายรัฐพงษ์ หนูหมวด
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 “การศึกษาน้ำมันปาล์มคัดแปรเป็นสารเสริมประสิทธิภาพพลาสติกใน PVC”
2. งานวิจัยที่กำลังทำ: “การเตรียมและสมบัติเชิงกลของไม้เชิงประกอบจากขี้เถ้าที่ใช้แล้ว กับผงไม้อย่างพารา ทนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา และสถานภาพในการทำวิจัย งานที่ได้ดำเนินการเสร็จสิ้นแล้ว ประมาณร้อยละ 80 ของงานทั้งหมด

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 “การเตรียมและสมบัติเชิงกลของไม้เชิงประกอบจากขี้เฒ่าที่ไ้แล้ว กับผงไม้ยางพารา ทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา และสถานภาพในการทำวิจัย งานที่ได้ดำเนินการเสร็จสิ้นแล้ว ประมาณร้อยละ 80 ของงานทั้งหมด

ผู้ช่วยวิจัย 1

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวอัสมา ศิกะการ
2. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Ms. Asma Sigakarn
3. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน ๑๕๑๕๘๐๐๕๒๗๖๐๓
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 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์
9. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
 - เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

ผู้ช่วยวิจัย 2

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวอาติฟา บุศรา
2. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Ms. Atifa Sigakarn
3. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน ๑๕๑๕๘๐๐๕๒๗๖๐๓

4. ตำแหน่งปัจจุบัน นักศึกษา
5. หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
6. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ถ.กาญจนวนิช ต.เขารูปช้าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000 โทรศัพท์ 074-336949 E-mail -
7. ประวัติการศึกษา
8. วุฒิกการศึกษา วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์
9. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิกการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
 - เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

