

การผลิตผลงานทางวัฒนธรรมชาติโดยเครื่องฟั่นแห้ง



นายธิปพงศ์ ใจเฟื้อแผ่

ศูนย์วิทยพัทพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRODUCTION OF POWDERY NATURAL RUBBER BY SPRAY DRYER



Mr. Tippapong Jaiphuephae

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตผงยางธรรมชาติโดยเครื่องพ่นแห้ง

โดย

นายธิพงษ์ ใจเผื่อแผ่

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

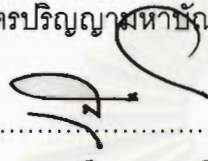
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.คุณากร ภูจินดา

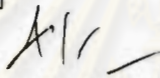
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

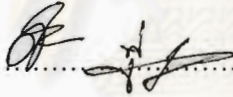
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)

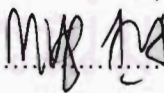
..... คุณากร ภูจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.คุณากร ภูจินดา)



..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎา สุชีวะ)

ธิพงษ์ ใจเผื่อแผ่ : การผลิตผงยางธรรมชาติโดยเครื่องพ่นแห้ง. (PRODUCTION OF POWDERY NATURAL RUBBER BY SPRAY DRYER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. คุณากร ภูจินดา, 100 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติแบบผงจากน้ำยางธรรมชาติโดยการพ่นแห้ง โดยขั้นตอนของการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางผงโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k โดยตัวแปรที่ใช้ศึกษาประกอบไปด้วย อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 130-170 องศาเซลเซียส, อัตราการป้อนน้ำยาง 3-6 มิลลิลิตรต่อนาที, อัตราการไหลของอากาศ 600-800 ลิตรต่อชั่วโมง, ร้อยละของเนื้อยางแห้งในน้ำยาง 10-40 % และปริมาณของสารลดแรงตึงผิวชนิดโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต 10-20 phr พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางผงโดยพิจารณาจากการให้ร้อยละผลได้ของยางแห้งสูงสุดคือ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า ที่ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำยาง ที่ 3 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของลม 600 ลิตรต่อชั่วโมง ร้อยละของเนื้อยางแห้งในน้ำยาง 15% และปริมาณของสารลดแรงตึงผิวชนิดโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต 12 phr ร้อยละผลได้ของยางแห้งทั้งหมดคือ 98.7 % ปริมาณความชื้น 0.92% ยางผงที่ได้มีลักษณะรูปร่างกลมมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 8 ไมโครเมตร เมื่อได้ภาวะการเตรียมยางผงที่เหมาะสมแล้ว ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางผงที่ผ่านการวัลคาไนซ์ทั้งที่ไม่เติมสารเสริมแรงและเติมสารเสริมแรงชนิดซิลิกาเปรียบเทียบกับยางแห้งที่ผ่านการวัลคาไนซ์ ยางผงที่ผ่านการวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลทางด้าน ความทนแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และความแข็ง เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางแห้งที่ผ่านการวัลคาไนซ์ ในขณะที่ยางผงที่เติมซิลิกาที่ผ่านการวัลคาไนซ์ให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุด ระยะยืดที่จุดขาด โมดูลัส ความแข็ง และความต้านทานความฉีกขาดสูงชันกว่ายางแห้งที่เติมซิลิกา นอกจากนี้ยังพบว่าการนำน้ำยางผสมกับซิลิกาแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้งให้สมบัติเชิงกลด้านโมดูลัสและความแข็ง สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางแห้งที่เติมซิลิกาและยางแห้งที่เติมซิลิกา ข้อมูลทางสัณฐานวิทยาที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าการใช้น้ำยางผสมซิลิกาแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้งให้การกระจายตัวของซิลิกาในวัฏภาคของยางได้ดีกว่ายางแห้งที่เติมซิลิกา

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ..... ธิพงษ์ ใจเผื่อแผ่.....
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....คุณากร ภูจินดา.....

5072306323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : SPRAY DRY/ RUBBER POWDER/ NATURAL RUBBER/ EXPERIMENTAL DESIGN

TIPPAPONG JAIPHUEPHAE: PRODUCTION OF POWDERY NATURAL RUBBER BY SPRAY DRYER. ADVISOR: ASST.PROF.SIRILUX POOMPRADUB, Ph.D., CO-ADVISOR: KUNAKORN POOCHINDA, Ph.D., 100 pp.

This research has been studied the preparation of natural rubber (NR) powder from NR latex by spray drying. The experiment was consisted of two parts. Firstly, it is to find the optimum condition for preparation of NR powder using 2^k experimental design. The effects of various parameters: inlet air temperature at 130-170 °C, feed rate at 3-6 ml/min, nozzle flow rate at 600-800 Lh⁻¹, %DRC at 10-40 % and sodium dodecyl sulfate content at 10-20 phr on yield of dried rubber were investigated. The optimum condition for spray drying was found to be at the inlet air temperature of 130 °C, feed rate of 3 ml/min, nozzle flow rate of 600 Lh⁻¹, 15%DRC and 12 phr of SDS content. The total recovery of dried rubber showed 98.7% yield and 0.92% moisture content. In the second part, the mechanical properties of NR powder (unfilled and filled silica) were studied and used to compare with commercial block rubber. The tensile strength, modulus and hardness of the NR powder vulcanizate were improved compared with those block rubber vulcanizate. By comparing with those of the block rubber filled silica (STR/Si), the mechanical properties, such as tensile strength, elongation at break, modulus, hardness and tear strength of the NR powder filled silica (NRP/Si) were improved. Furthermore, the mechanical properties (modulus and hardness) of silica reinforced natural rubber composites obtained by spray drying of natural rubber latex mixed with silica (P(NR/Si)) showed higher mechanical properties than NRP/Si and STR/Si. The morphology of NR filled silica by using scanning electron microscope analysis showed that silica particles were dispersed more uniformly in P(NR/Si) than in STR/Si.

Department :.....Chemical Technology.....Student's SignatureTippapong Jaiphuephae
 Field of Study :...Chemical Technology....Advisor's SignatureSirilux P.
 Academic Year :.....2010.....Co-advisor's SignatureK. Pochinda

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และดร.คุณากร ภูจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณามอบความรู้ แนวคิด และข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้มอบคำแนะนำและความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการ ADB และบริษัท Chemical Innovation Ltd. ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญรณ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎา สุชีวะ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บริษัท Chemical Innovation Ltd. และคุณ อริสรา ชะนะมา ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีและการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ รวมไปถึงให้ความรู้และคำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่คอยดูแล ช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดี และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบความดีทั้งหมดของงานวิจัยนี้ให้แก่ทุกท่านที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และที่ยังไม่ได้เอ่ยนามมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย.....	5
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางธรรมชาติ.....	8
2.3 การแปรรูปยางธรรมชาติ.....	12
2.4 กระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากยางแห้ง.....	16
2.5 สารเคมีที่ใช้ผสมกับน้ำยาง.....	19
2.6 ซิลิกา.....	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
3. วิธีดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.3 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	33
3.4 การศึกษาสมบัติของยางคอมปาวด์และเชิงกล.....	39
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	43

บทที่	หน้า
4.1 การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^5	43
4.2 การทดลองแบบ 2^3 แฟคทอเรียล.....	50
4.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผง.....	58
4.4 สมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์.....	64
4.5 การศึกษาร้อยละการบวมตัว.....	69
4.6 สมบัติเชิงกลของยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์.....	71
4.7 การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของซิลิกาในยาง.....	79
5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก.....	89
ภาคผนวก ข.....	92
ภาคผนวก ค.....	96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	99

สารบัญตาราง

ณ

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบน้ำยางสด.....	9
2.2 สารเคมีที่ใช้ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากยางแห้ง.....	18
2.3 สูตรการผลิตผลิตภัณฑ์ยางเบื้องต้น.....	19
3.1 ภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล.....	36
3.2 สูตรการเตรียมยางคอมปาวด์.....	37
4.1 สัญลักษณ์แทนตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง.....	44
4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของยางแห้ง.....	44
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนร้อยละความชื้นของยางแห้ง.....	51
4.4 ภาวะการทดลองและผลที่ได้จากวิธีการปั่นด้วยทางที่ชันที่สุด.....	51
4.5 ตัวแปรและค่าที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3	52
4.6 ภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล.....	52
4.7 วิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ยางแห้งจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3	53
4.8 สัญลักษณ์แทนตัวแปรและค่าที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ CCD.....	55
4.9 วิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของยางแห้งจากการออกแบบการทดลองแบบ CCD.....	55
4.10 ค่าสมบัติการคงรูปต่างๆที่ได้จากกราฟเชื่อมขวาง.....	68
ข1 ร้อยละผลได้และร้อยละความชื้นของยางแห้งจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^5	92
ข2 ร้อยละผลได้ของยางแห้งจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3	93
ข3 ร้อยละผลได้ของยางแห้งจากการทดลองแบบ CCD.....	94
ข4 ผลการทดลองตัวแปรเดียวของปริมาณ SDS ต่อร้อยละผลได้ยางแห้ง.....	94
ข5 ผลการทดลองตัวแปรเดียวของร้อยละเนื้อยางแห้งต่อร้อยละผลได้ยางแห้ง.....	95
ค1 ผลการทดสอบความทนแรงดึงสูงสุด.....	96
ค2 ผลการทดสอบระยะยืดที่จุดขาด.....	97
ค3 ผลการทดสอบค่าโมดูลัส.....	97
ค4 ผลการทดสอบความแข็งและความต้านทานการฉีกขาด.....	98

สารบัญภาพ

๗

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยและกลไกการทำงาน.....	4
2.2 หัวฉีดของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย.....	5
2.3 แสดงการไหลของของเหลวกับอากาศภายในห้องอบแห้ง.....	6
2.4 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ.....	10
2.5 ผังการแปรรูปขึ้นต้นจากผลผลิตของต้นยางพารา.....	13
2.6 กระบวนการผลิตยางแผ่น.....	15
2.7 กระบวนการผลิตยางแท่ง.....	17
2.8 กระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากยางแห้ง.....	18
2.9 การเชื่อมโยงของหมู่ซัลฟินอลด้วยพันธะไฮโดรเจน.....	28
3.1 ขั้นตอนการหาภาวะที่เหมาะสมของการเตรียมยางแห้ง.....	35
3.2 กระบวนการผสมยางธรรมชาติกับสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.3 ชิ้นงานเตรียมทดสอบร้อยละการบวมตัว.....	39
3.4 ชิ้นทดสอบแบบดัมเบล ASTM D412 (Die C).....	41
3.5 ชิ้นทดสอบแบบมูม ASTM D624.....	42
4.1 ผลของร้อยละเนื้อยางแห้งและปริมาณ SDS ต่อร้อยละผลได้ยางแห้ง.....	45
4.2 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ยางแห้ง.....	46
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากสมการกับส่วนตกค้าง.....	47
4.4 การแจกแจงส่วนตกค้างที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการ.....	47
4.5 ผิวนิเวศของของร้อยละผลได้ยางแห้งเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสองตัวแปร.....	48
4.6 แสดงผลของอุณหภูมิมีผลรบกวนเข้าต่อร้อยละความชื้นของยางแห้ง.....	50
4.7 ผลของอัตราเร็วในการปั่นสารต่อร้อยละความชื้นของยางแห้ง.....	50
4.8 ผลการเปลี่ยนแปลงระดับของตัวแปรต่อร้อยละผลได้ของยางแห้ง.....	54
4.9 พื้นผิวนิเวศของสำหรับร้อยละผลได้ของยางแห้ง.....	56
4.10 ผลการทดลองตัวแปรเดี่ยวของปริมาณ SDS ต่อร้อยละผลได้ยางแห้ง.....	57
4.11 ผลการทดลองตัวแปรเดี่ยวของร้อยละเนื้อยางแห้งต่อร้อยละผลได้ยางแห้ง.....	57
4.12 ลักษณะยางแห้งและ SDS.....	59
4.13 ลักษณะอนุภาคยางผงที่มีการใช้ปริมาณ SDS ที่ต่างกัน.....	60

ภาพประกอบที่	หน้า
4.14 กลไกการดูดซับของ SDS บนอนุภาคยางธรรมชาติ.....	60
4.15 ลักษณะอนุภาคยางผงที่มีการใช้ %DRC ของน้ำยางธรรมชาติที่ต่างกัน.....	62
4.16 ยางผงที่อัตราการไหลของอากาศ.....	63
4.17 แบบจำลองแสดงผลของอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อขนาดอนุภาค.....	64
4.18 กราฟเชื่อมขวางของยางคอมปาวด์ ที่อุณหภูมิ 155°C.....	67
4.19 กลไกการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิวในโมเลกุลของ.....	68
4.20 ร้อยละการบวมตัวของยางคงรูปในตัวทำละลาย.....	70
4.21 สมบัติเชิงกลของยางผงและยางแท่งที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์.....	70
4.22 สมบัติเชิงกลของยางแท่ง (STR) ยางแท่งผสม SDS (STRs) และยางผง (NRP) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์	73
4.23 ค่าความแข็งของยางแท่ง (STR) ยางแท่งผสม SDS (STRs) และยางผง (NRP) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์.....	74
4.24 ความต้านทานการฉีกขาดของยางแท่ง (STR) ยางแท่งผสม SDS (STRs) และยางผง (NRP) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์.....	74
4.25 สมบัติเชิงกลของยางผสมซีลิกา (25 phr) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์.....	77
4.26 ค่าความแข็งของยางผสมซีลิกา (25 phr) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์.....	78
4.27 ค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางผสมซีลิกา (25 phr) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์.....	78
4.28 SEM แสดงการกระจายตัวของซีลิกา (25 phr) ในยางคงรูป	80
ค1 กราฟเชื่อมขวางของยางที่มีการผสมในลักษณะที่ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 155°C.....	96

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมและผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติเป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศ เนื่องจากประเทศไทยผลิตยางธรรมชาติได้มากเป็นอันดับต้นๆ ของโลกและยังสามารถสร้างรายได้จากการส่งออกในรูปแบบผลิตภัณฑ์ยางมากที่สุดในโลก โดยทั่วไปยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางในรูปของน้ำยาง ถูกนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ กลุ่มของน้ำยางข้น จะใช้ในการผลิตถุงมือ รองเท้า หมอน พุก กาว อีกประเภทหนึ่งคือกลุ่มของยางแห้ง ได้แก่ ยางแท่ง ยางแผ่นและยางประเภทอื่นๆ จะใช้ในการผลิตยางที่เป็นล้อรถยนต์ ยางขอบประตู ยางขอบหน้าต่าง ยางรองคอสะพาน ซึ่งกระบวนการแปรรูปจากน้ำยางธรรมชาติเป็นยางแท่งเพื่อเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมนั้นต้องผ่านขั้นตอนหลายขั้น คือการทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อน การรีดเป็นแผ่น การอบยางให้แห้ง การตัดยางแท่งเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนี้ต้องใช้สารเคมีสิ้นเปลืองพลังงานและใช้พลังงานมาก ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตยางแท่งมีราคาสูง

อีกทั้งยางธรรมชาติในรูปยางแท่งเมื่อต้องการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยาง ต้องมีการผสมยางแท่งกับสารเคมีเพื่อให้มีสมบัติตามความต้องการในการใช้งาน เช่น สารทำให้ยางคงรูป สารเร่งให้ยางคงรูป สารกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยา สารตัวเติม เป็นต้น ซึ่งการผสมยางกับสารเคมีดังกล่าวจะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากการบดผสมยางซึ่งมีความหนืดสูงกับสารเคมีต่างๆ ที่มีปริมาณน้อยให้ผสมกัน เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลามากและต้องใช้พลังงานอย่างมากในการกด ดึงและเข็นเพื่อทำให้ยางอ่อนตัวและฉีกขาดเป็นส่วนย่อย ๆ เพื่อให้สายโซ่โมเลกุลของยางสั้นลง และง่ายต่อการผสมสารเคมีได้อย่างทั่วถึง ซึ่งการผสมยางตามกระบวนการนี้อาจทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพลดลงอีกด้วย

จากปัญหาดังกล่าวจะเห็นว่าการเพิ่มมูลค่ายางธรรมชาติโดยการแปรรูปเป็นยางแท่งต้องใช้เวลา พลังงาน และค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง การลดขั้นตอนในการผลิตยางแท่งให้มีความยุ่งยากซับซ้อนลดลงจึงเป็นปัจจัยสำคัญ ดังนั้น งานวิจัยนี้ศึกษาการแปรรูปน้ำยางธรรมชาติให้อยู่ในรูปของยางผงโดยใช้เครื่องพ่นแห้ง โดยศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของเครื่องพ่นแห้งสำหรับการทำยางผง แล้วนำยางผงที่ผ่านกระบวนการคงรูปมาศึกษาสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับยางแท่งที่ใช้ในอุตสาหกรรม นอกจากนี้การปรับปรุงสมบัติเชิงกลหรือเชิงความร้อนยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งในอุตสาหกรรมยางจำเป็นต้องคำนึงถึง โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสารตัวเติม (ซิลิกา) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยางแท่งแบบผง เปรียบเทียบกับยางแท่งผสมซิลิกา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมที่ให้ร้อยละผลได้ยางแห้งสูงสุดสำหรับการทำยางแห้งแบบผงโดยเครื่องพ่นแห้ง
- 1.2.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผงที่เตรียมได้จากเครื่องพ่นแห้งเปรียบเทียบกับยางแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ทำการผลิตยางแห้งแบบผงจากน้ำยางธรรมชาติโดยใช้เครื่องพ่นแห้ง โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า (Inlet air temperature) อัตราเร็วการป้อนสารตัวอย่าง (Feed rate) อัตราการไหลของอากาศ (Nozzle flow rate) เปอร์เซนต์เนื้อยางแห้งของน้ำยาง (Dry rubber content) และปริมาณสารลดแรงตึงผิว (Sodium dodecyl sulfate, SDS)
- 1.3.2 ศึกษาและหาภาวะที่เหมาะสมที่ให้ร้อยละผลได้ของยางแห้งแบบผงสูงสุดโดยใช้วิธีออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k โดยศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า อัตราเร็วการป้อนสารตัวอย่าง อัตราการไหลของอากาศ เปอร์เซนต์เนื้อยางแห้ง และปริมาณสารลดแรงตึงผิว
- 1.3.3 ศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy) และสมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) ระยะยืดที่จุดขาด (Elongation at break) โมดูลัส (Modulus) ความแข็ง (Hardness) และความต้านทานต่อให้ฉีกขาด (Tear strength) ของยางแห้งแบบผงเมื่อผ่านกระบวนการคงรูปและเปรียบเทียบกับยางแห้งเชิงพาณิชย์หลังผ่านกระบวนการคงรูป
- 1.3.4 ศึกษาผลของสารตัวเติม (ซิลิกา) ต่อสมบัติเชิงกล ของยางแห้งแบบผงผสมสารตัวเติมชนิดซิลิกาหลังผ่านกระบวนการคงรูปเปรียบเทียบกับยางแห้งเชิงพาณิชย์ผสมซิลิกาที่ผ่านกระบวนการคงรูป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเตรียมยางธรรมชาติแห้งแบบผงได้โดยใช้เทคนิคพ่นแห้งเพื่อลดขั้นตอนการผลิตพลังงาน และค่าใช้จ่ายในการเตรียมยางแห้งและสามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการเตรียมยางแห้งในอุตสาหกรรมยางต่อไปได้

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

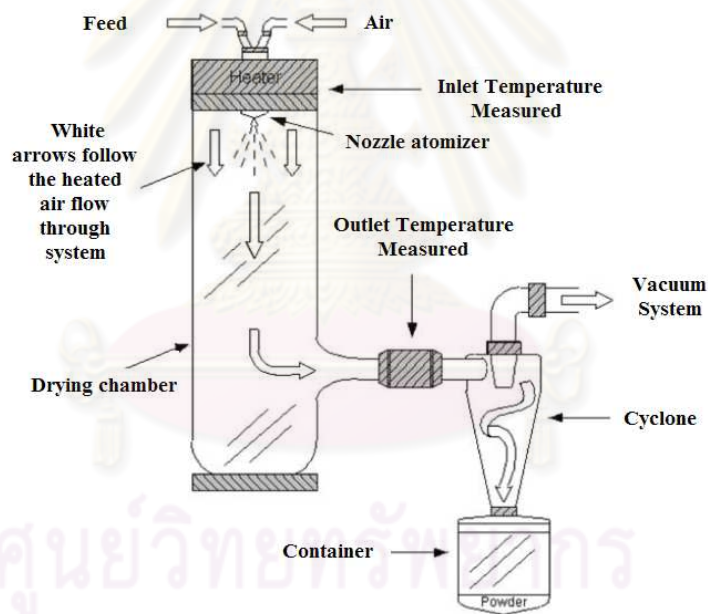
- 1.5.1 ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ศึกษาขั้นตอน วิธีการดำเนินงานวิจัย และเครื่องมือรวมทั้งสารเคมีที่ต้องใช้ใน งานวิจัย
- 1.5.3 ตั้งสมมติฐานและกำหนดตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย
- 1.5.4 หาภาวะที่เหมาะสมของเครื่องพ่นแห้งเพื่อใช้ในการเตรียมยางแห้งแบบผง
- 1.5.5 ศึกษาลักษณะพื้นผิวของยางแห้งแบบผงที่เตรียมได้ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.5.6 เตรียมยางคอมพาวด์โดยใช้เครื่องผสมภายใน (Internal mixer) ประกอบไปด้วย ยางแห้งแบบผง ยางแท่งเชิงพาณิชย์ ยางแห้งแบบผงผสมซิลิกา ยางแท่งเชิงพาณิชย์ผสมซิลิกาและยางผสมซิลิกาที่เตรียมจากเครื่องพ่นแห้ง
- 1.5.7 ตรวจสอบดูลักษณะการคงรูปของยางคอมพาวด์โดยใช้เครื่องทดสอบหาเวลา และลักษณะการคงรูปของยางผสมโดยเครื่อง Rheometer rotorless cure meter
- 1.5.8 ทำการขึ้นรูปและคงรูปของยางคอมพาวด์ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression moulding) ที่อุณหภูมิ 155 °C
- 1.5.9 ทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรงดึง ระยะยืดตัวที่จุดขาด และโมดูลัส ตามมาตรฐาน ASTM D412 ความแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM D2240 และความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D624 ของยางที่ผ่าน กระบวนการคงรูป
- 1.5.10 วิเคราะห์ สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) [1]

การทำของเหลวให้แห้งโดยวิธีพ่นฝอยเป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อระเหยน้ำออกจากของเหลวอย่างรวดเร็วโดยอากาศร้อน ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยและกลไกการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยการพ่นของเหลว (Feed) ผ่านหัวฉีด (Nozzle atomizer) ออกมาเป็นละอองขนาดเล็ก เข้าผสมกับอากาศร้อนที่ไหลผ่านอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำที่อยู่ในละอองของเหลวระเหยไปทั้งหมด และได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของผงแห้ง สำหรับตัวอย่างของเหลวที่นำมาทำแห้งนั้นสามารถใช้ได้ ทั้งที่เป็นตัวทำละลาย สารประเภท อิมัลชัน (Emulsion) หรือสารแขวนลอยก็ได้



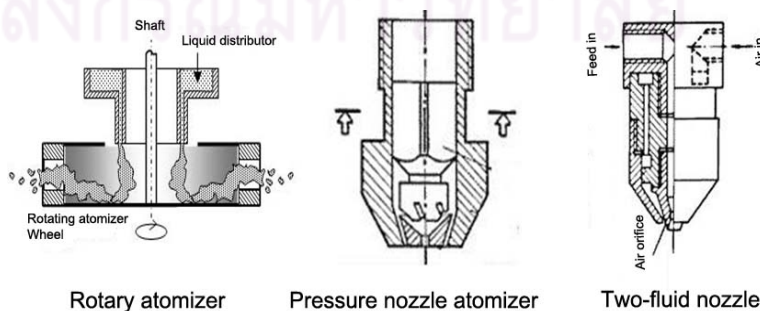
รูปที่ 2.1 ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยและกลไกการทำงาน [2]

การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย เริ่มจากอากาศจะถูกดูดผ่านตัวกรองและผ่านตัวให้ความร้อน จากนั้นจึงเข้าสู่ห้องอบแห้ง (Drying chamber) ส่วนตัวอย่างจะถูกดูดโดยปั๊มผ่านเข้าสู่หัวฉีดซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดละอองฝอยภายในห้องอบ เมื่อละอองสัมผัสกับอากาศร้อน จะทำให้เกิดการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็ว จากนั้นผงของผลิตภัณฑ์จะถูกแยกโดยไซโคลน (Cyclone) และตกลงสู่ภาชนะจัดเก็บ (Container) กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

1. การทำให้ของเหลวกระจายตัวเป็นละออง (Atomization of feed)

กระบวนการนี้เป็นการทำให้ของเหลวกระจายตัวกลายเป็นละออง โดยใช้หัวฉีดซึ่งถือว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของเครื่อง โดยของเหลวจะไหลผ่านช่องของหัวฉีดภายใต้ความดันสูง ทำให้ของเหลวที่ออกมาจากหัวฉีดกระจายเป็นละอองฝอยได้โดยไม่ต้องใช้อากาศ อนุภาคที่ได้จะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 120-250 ไมครอน โดยขนาดอนุภาคจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของของเหลวและความหนืด แต่จะแปรผกผันกับความดัน โดยหัวฉีดของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมี 3 ชนิด (แสดงดังรูปที่ 2.2) คือ

- หัวฉีดแบบหมุน (Rotary atomizer) หัวฉีดชนิดนี้ ของเหลวจะไหลลงบนจานหมุน ใกล้กับจุดศูนย์กลาง โดยจานหมุนจะมีความเร็วรอบประมาณ 5,000-10,000 รอบต่อ นาที ของเหลวที่ตกลงบนจานหมุนจะถูกเหวี่ยงออกด้านข้างกระจายเป็นละอองขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 30-120 ไมครอน ซึ่งขนาดเฉลี่ยนี้จะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของของเหลวและความหนืด แต่จะแปรผกผันกับอัตราการหมุนและเส้นผ่าศูนย์กลางของจานหมุน
- หัวฉีดแบบแรงดัน (Pressure nozzles atomizer) หัวฉีดชนิดนี้ ของเหลวจะไหลผ่านช่องของหัวฉีดภายใต้ความดันสูง ทำให้ของเหลวที่ออกมาจากหัวฉีดกระจายเป็นละอองฝอยได้โดยไม่ต้องใช้อากาศ อนุภาคที่ได้จะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 120-250 ไมครอน โดยขนาดอนุภาคจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของของเหลวและความหนืด แต่จะแปรผกผันกับความดัน
- หัวฉีดแบบสองของไหล (Two-fluid nozzle) หัวฉีดชนิดนี้ ของเหลวและอากาศจะไหลผ่านหัวฉีด ซึ่งจะทำให้ของเหลวแตกเป็นละอองฝอยเนื่องจากการไหลผ่านของอากาศด้วยความเร็วสูงภายในหัวฉีด การปรับอัตราการไหลของอากาศจะช่วยในการกระจายเป็นละอองของของเหลว วิธีนี้นิยมใช้กับของเหลวที่มีความหนืดสูงอย่างไรก็ตามวิธีนี้ มีค่าดำเนินการที่สูงและให้ผลผลิตที่ต่ำ

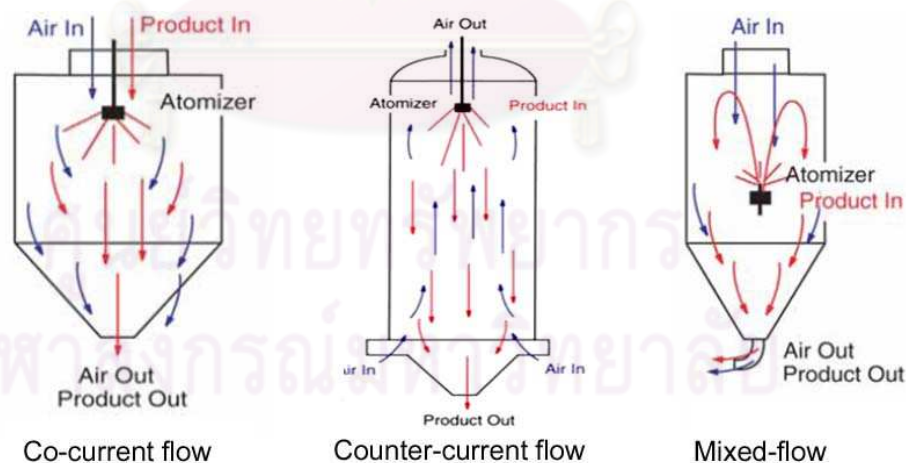


รูปที่ 2.2 หัวฉีดของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย [3]

2. การสัมผัสของละอองฝอยกับอากาศ

ขั้นตอนนี้ละอองของของเหลวที่ถูกฉีดออกมาจะสัมผัสหรือเข้าผสมกับอากาศร้อน และเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งของหัวฉีดกับอากาศแห้งๆ จะสามารถแบ่งรูปแบบของการสัมผัสกับอากาศร้อนได้เป็น 3 รูปแบบ (ดังรูปที่ 2.3) ประกอบไปด้วย

- การไหลผ่านทางเดียวกัน (Co-current flow) ทิศทางการฉีดของเหลว เป็นทิศทางเดียวกับกับการไหลของอากาศร้อน ละอองของเหลว จะสัมผัสและผสมเข้ากับกับอากาศร้อนขณะที่ยังมีความชื้นสูงหรือมีน้ำภายในอนุภาคมากอยู่ จากนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกทำให้ระเหยทันทีจนกลายเป็นผง วิธีนี้เป็นวิธีการทำแห้งของเครื่องพ่นแห้งโดยทั่วไป
- การไหลผ่านสวนทางกัน (Counter-current flow) ทิศทางการฉีดของเหลว เป็นทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลของอากาศร้อน โดยของเหลวจะถูกฉีดลงมาจากด้านบนในขณะที่อากาศร้อนจะไหลขึ้นจากด้านล่าง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความร้อนสูงมาก วิธีนี้จึงเหมาะเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่เสถียรต่อความร้อนสูงเท่านั้น
- การไหลผ่านแบบผสม (Mixed flow) การไหลของของเหลวจะเคลื่อนที่ผ่านทั้งแบบการไหลผ่านทางเดียวกัน และ การไหลผ่านสวนทางกัน วิธีนี้เหมาะสำหรับทำแห้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นผงหยาบ และทนความร้อนได้สูงมาก



รูปที่ 2.3 แสดงการไหลของของเหลวกับอากาศภายในห้องอบแห้ง [3]

3. การระเหยของละอองฝอย

เมื่อละอองฝอยสัมผัสกับอากาศร้อนจะเกิดการระเหยในชั้นไอน้ำอิ่มตัวบริเวณผิวของละอองอย่างรวดเร็ว โดยจะมีอุณหภูมิที่ผิวของละอองอยู่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอุณหภูมิ

อากาศแห้ง และจะแพร่เข้าสู่ชั้นผิวหนังในซึ่งอยู่ในภาวะอิมมิตัว ช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่อัตราการระเหยคงที่ จนกระทั่งความชื้นอยู่ในระดับต่ำและไม่มีการแพร่เข้าสู่ผิวหนังในแล้ว ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นชั้นแห้งหนาขึ้นตามเวลา และมีอัตราการระเหยลดลง

4. ขั้นตอนการแยกผลิตภัณฑ์แห้งจากอากาศ

การแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอากาศนั้นโดยทั่วไปนิยมใช้ไซโคลนเป็นตัวแยกผลิตภัณฑ์ให้ตกลงสู่ภาชนะจัดเก็บ ส่วนอากาศที่ออกจากด้านบนของไซโคลนจะผ่านไปยังตัวเก็บขั้นสุดท้าย ซึ่งอาจเป็นเครื่องกรองสารซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณผงที่มี สำหรับการปรับเปลี่ยนตัวแปรทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ โดยตัวแปรเหล่านั้น คือ

- ความหนืด ถ้าของเหลวมีความหนืดสูง (หรือผลจากการลดลงของอุณหภูมิของของเหลว) ทำให้ได้ละอองที่มีขนาดใหญ่ขึ้นที่ภาวะของการพ่นจากหัวฉีดเดียวกัน ถ้ามีความหนืดมากจะทำให้มีลักษณะคล้ายเส้นด้าย ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ของเหลวที่มีความหนืดสูงเกินไป
- อัตราการไหลของของเหลว โดยที่ถ้าอัตราการไหลของของเหลวสูงขึ้นทำให้ได้ละอองที่หยาบขึ้น เพราะใช้เวลาสัมผัสกับอากาศน้อยเกินไป จึงควรควบคุมอัตราการไหลของของเหลวให้เหมาะสม
- อัตราไหลการของอากาศที่ลดลงทำให้เวลาที่ละอองอยู่ในห้องอบนานขึ้น ซึ่งจะสัมผัสกับอากาศร้อนนานขึ้น และเป็นผลให้ลดความชื้นได้ดีขึ้น แต่หากอัตราการไหลของของเหลวสูง และอัตราการไหลของอากาศต่ำเกินไป และมีอุณหภูมิไม่สูงเพียงพอ ก็อาจทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นสูง และเกาะติดอยู่กับผนังของห้องอบได้
- อุณหภูมิอากาศขาเข้า การเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการระเหย และทำให้ความหนาแน่นจำเพาะ (Bulk density) ลดลง เนื่องจากเกิดความร้อนและมีการแตกหักของผลิตภัณฑ์
- อุณหภูมิอากาศขาออก การปรับอัตราไหลของของเหลวมีผลต่ออุณหภูมิขาออก ถ้าอัตราการไหลของของเหลวสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิลดลง และจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเกาะอยู่บริเวณผนังของห้องอบได้

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับน้ำยางธรรมชาติ

2.2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด [4]

น้ำยางสด หมายถึง น้ำยางธรรมชาติที่กรี๊ดได้จากต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis*) มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายนม มีความหนาแน่นระหว่าง 0.975-0.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความเป็นกรด-เบส (pH) 6.5-7 ของเหลวนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบที่เป็นอนุภาคกลมเล็ก ๆ ของพอลิเมอร์ยาง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-5 ไมครอน) จะเป็น Dispersion phase แขนงลอยกระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ (Dispersion medium) อาจเรียกตัวกลางที่เป็นน้ำว่า ซีรัม (Serum)

น้ำยางจัดอยู่ในระบบคอลลอยด์ประเภท Hydrosol คืออนุภาคยางที่อยู่ใน Dispersion phase เป็นของแข็ง ตัวกลางหรือตัวทำละลายที่เป็นของเหลวเป็นน้ำ น้ำยางอยู่ในระบบคอลลอยด์ที่ค่อนข้างซับซ้อน น้ำยางสดธรรมชาติที่ได้จากการกรี๊ดต้นยางพารา มีองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วนคือ

- ส่วนที่เป็นยางล้วน (Rubber phase) เป็นส่วนที่เบาที่สุด อยู่ส่วนบนสุดของ ส่วนอื่นๆ เป็นครีมของอนุภาคยาง มีสีขาว
- ส่วนที่เป็นน้ำ (Serum) มีความหนาแน่น ประมาณ 1.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ประกอบด้วยสารพวกคาร์โบไฮเดรต และกรดอะมิโน
- อนุภาค ฟรี วิสลิ้ง (Frey wyssling) เป็นสารที่ไม่ใช่ยางมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า ยาง แต่ความหนาแน่นน้อยกว่า ประกอบด้วยสารเม็ดสีพวกคาโรทีนอยด์ ซึ่งทำให้ยางมีสีเหลืองเข้ม
- ส่วนล่างสุด (Bottom fraction) เป็นส่วนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าส่วนอื่น ๆ ทั้งหมดมีสีขาวออกเหลือง มีลักษณะเป็นของแข็ง

เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบของน้ำยางที่มีทั้งยาง และสารที่ไม่ใช่ยางมากมายหลายชนิด องค์ประกอบของน้ำยางนั้นจะมีความแปรปรวนอย่างกว้างขวาง และมีสาเหตุกระทบหลายประการด้วยกันเช่น พันธุ์ยาง อายุยาง ฤดูกาลกรี๊ดยาง อาจแบ่งส่วนประกอบของน้ำยางอย่างกว้าง ๆ ได้ 2 ส่วนคือ

1. ส่วนที่เป็นยาง (Dry Rubber Content, DRC) เป็นส่วนของสารพวกไฮโดรคาร์บอนอันเป็นหน่วยของไอโซพรีน ที่เชื่อมต่อกันประมาณ 2,000-5,000 หน่วยต่อ 1 ไมเลกุล
2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non Rubber Content, NRC) ส่วนนี้เป็นส่วนประกอบอื่น ๆ ทั้งหมดที่ไม่ใช่ยาง มีส่วนประกอบต่างๆหลายชนิด เช่น น้ำตาล โปรตีน ไขมัน คาโรทีนอยด์ กลีเซอรอล เอนไซม์ และสารประกอบไนโตรเจน เป็นต้น โปรตีน และไขมันส่วนใหญ่จะดูดซับอยู่บนผิวอนุภาค

ยาง ทำหน้าที่ห่อหุ้มอนุภาคยางไว้ ช่วยรักษาสภาพความคงตัวของน้ำยางขณะที่อยู่ในท่อน้ำยาง ให้อยู่ในสภาพแขวนลอยและบางส่วนละลายอยู่ในน้ำ

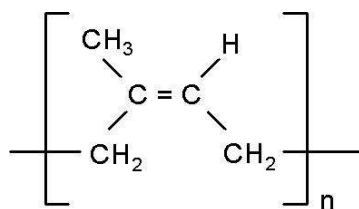
ปริมาณเนื้อยางของน้ำยางธรรมชาติอาจแปรปรวนตั้งแต่ 25-45% ความแตกต่างระหว่าง ปริมาณที่เป็นของแข็งทั้งหมดในน้ำยางกับปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 3% แต่ถ้าในกรณีน้ำยาง ที่ปั่นทำให้ชื้นแล้ว ความแตกต่างดังกล่าวลดเหลือประมาณ 1.5% เท่านั้น ส่วนประกอบของน้ำ ยางสดแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบน้ำยางสด

ส่วนประกอบ	ร้อยละ
ของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC)	36
เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC)	33
โปรตีน	1-1.5
เรซิน	1.25
เถ้า	1
น้ำตาล	1
น้ำ (ในปริมาณที่รวมแล้วเป็น)	100

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของยางธรรมชาติ [5]

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีว่า พอลิไอโซพรีน (Polyisoprene) มีโครงสร้างดังรูป 2.4 ซึ่งได้จากหน่วยของไอโซพรีนต่อกันแบบหัวต่อหาง (Head to tail) โครงสร้างหลักของยาง ธรรมชาติประกอบไปด้วยหมู่ ทรานไอโซพรีน 2 หมู่ และที่เหลือเป็นซิสไอโซพรีน เนื่องจาก ส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำ ละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัว ของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัว ค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด ยางธรรมชาติจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำขึ้น ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืด ตัว (Strain induced crystallization) ทำให้งางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อ แรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) และความทนทานต่อการ ขัดสี (Abrasion resistance) สูง เป็นต้น



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ [5]

2.2.3 เคมีของอนุภาคยางธรรมชาติ [6]

อนุภาคยางในน้ำยางธรรมชาติ มีพื้นผิวเป็นประจุลบ มาจาก 2 แหล่ง

1. แหล่งโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยาง โปรตีนประกอบด้วยหน่วยโครงสร้างที่เล็กที่สุดคือกรดอะมิโนมาเรียงต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ โครงสร้างของกรดอะมิโนประกอบด้วย 3 ส่วนคือหมู่อะมิโน (amino group, NH_2) หมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic group, COOH) หมู่ R หรือโซ่ข้างซึ่งหมู่ทั้งสองมีส่วนทำให้โปรตีนมีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริก (Amphoteric) คือ เป็นได้ทั้งบวกหรือลบ โดยขึ้นอยู่กับสภาพของตัวกลาง กล่าวคือ โปรตีนจะแสดงประจุเป็นบวกในสภาพที่ตัวกลางเป็นกรด โปรตีนจะแสดงประจุเป็นลบในสภาพที่ตัวกลางเป็นด่าง และในสภาพที่ตัวกลางเป็นกลาง ประจุบวกกับลบของโปรตีนไม่แตกต่างกัน ซึ่งเรียกว่าจุดไอโซอิเล็กตริกโปรตีนที่อนุภาคยางส่วนใหญ่เป็นชนิดอัลฟา-กลูบูลิน (α -globulin) มีจุดไอโซอิเล็กตริกที่ค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 4.8 ในขณะที่น้ำยางธรรมชาติมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 6.5-7.0 ดังนั้น α -globulin จึงอยู่ในสภาพที่ตัวกลางเป็นด่าง ส่งผลให้อนุภาคยางแสดงประจุเป็นลบ

2. ไขมันส่วนใหญ่เป็นสารพวกฟอสโฟไลปิด (Phospholipids) ชนิด α -Lecithin เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นด่าง ฟอสโฟไลปิดจะถูกไฮโดรไลซ์ ทำให้เกิดอนุมูลลบของกรดไขมัน (Fatty acid anion) จากเหตุผลทั้ง 2 ข้างบนนี้ ส่งผลให้อนุภาคยางที่กระจายตัวในน้ำแสดงประจุเป็นลบ

2.2.4 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ [7]

2.2.4.1 ความยืดหยุ่น (Elasticity) สมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นประการหนึ่งของยางธรรมชาติ คือ ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับสู่รูปร่างและขนาดเดิมได้อย่างรวดเร็ว

2.2.4.2 ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติ มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่นยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

2.2.4.3 ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) โมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถแตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยางดั่งนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยที่ไม่ต้องใส่สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งสมบัตินี้จะแตกต่างจากยางสังเคราะห์ ส่วนใหญ่ที่มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงดูต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้ในทางวิศวกรรมได้นอกจากจะมีการเติมสาร ตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วยเท่านั้น

2.2.4.4 ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถแตกผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูงการเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

2.2.4.5 สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic Properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี เนื่องจากยางธรรมชาติมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งานและยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (Fatigue Resistance) ที่สูงมาก

2.2.4.6 ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion Resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังคงน้อยกว่ายางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene butadiene rubber ; SBR) เล็กน้อย

2.2.4.7 ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ยางธรรมชาติมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific receptivity) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} ohm·cm

2.2.4.8 ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and Chemical Resistance) องค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังสามารถทนทานต่อการกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อการกรดไนตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

2.2.4.9 การกระเดิงกระดอน (Rebound Resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระเดิงกระดอนสูง ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย จึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้ในเชิงพลวัตยางชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่มาก เช่น ยางรถบรรทุกหรือยางเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงอาจทำให้เกิดการระเบิดได้ง่าย

2.2.4.10 อุณหภูมิของการใช้งาน (Service Temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55 จนถึง 70 องศาเซลเซียส หากเก็บยางไว้ในอุณหภูมิที่นานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะต้องลดลงเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ

2.3 การแปรรูปยางธรรมชาติ

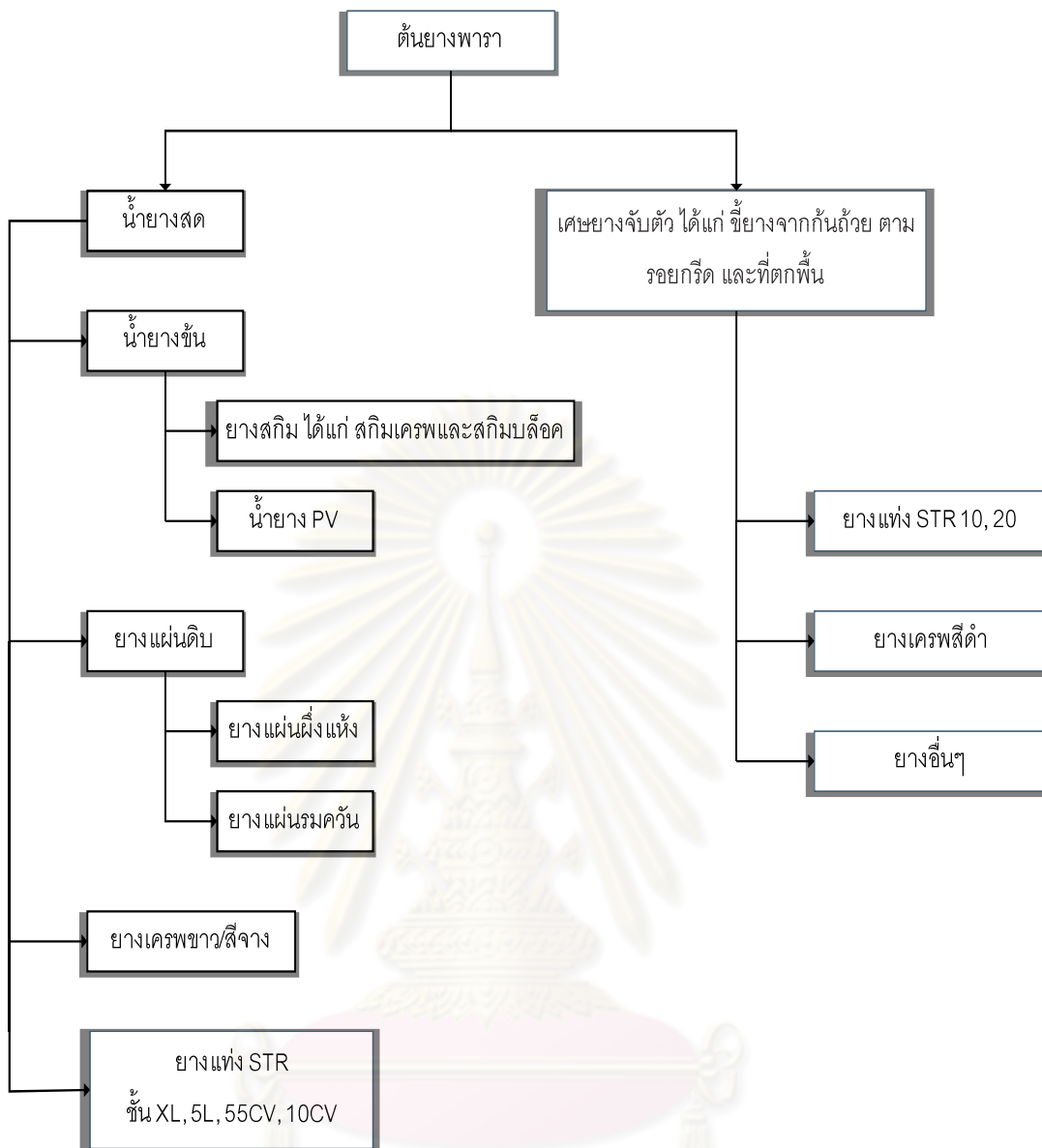
ยางธรรมชาติที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันเป็นวัตถุดิบที่ได้จากการแปรรูปชั้นต้นของน้ำยางสดจากต้นยางพาราซึ่งอาจจำแนกได้ 2 ประเภทหลัก คือ ประเภทยางแข็ง (Solid form or Dry rubber) และประเภทของเหลว คือ น้ำยางข้น (Concentrated latex) ผลผลิตยางพาราจะถูกนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นพื้นฐานหลักๆ ที่สำคัญ ได้แก่ น้ำยางข้น ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง และยางอื่นๆ ก่อนส่งออกไปยังตลาดต่างประเทศ หรือส่งต่อไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ รูปที่ 2.5 แสดงผังการแปรรูปชั้นต้นจากผลผลิตของต้นยางพารา

2.3.1 การผลิตน้ำยางข้น [8]

การผลิตน้ำยางข้นได้จากการนำน้ำยางสดที่รักษาสภาพด้วยสารละลายแอมโมเนีย (Ammonia) หรือสารละลายโซเดียมซัลไฟท์ (Sodium sulfite) แล้วนำมาปั่นแยกด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูง เพื่อแยกน้ำและสารอื่นๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำออกไปบางส่วน จะได้น้ำยางแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. น้ำยางข้น 60% (Concentrated latex) รักษาสภาพด้วย 0.7% สารละลายแอมโมเนียชนิดเข้มข้น หรือ 0.2% สารละลายแอมโมเนียชนิดเจือจาง ร่วมกับสารช่วยรักษาสภาพน้ำยาง

2. หางน้ำยาง (Skim latex) นำมาใส่แอมโมเนียแล้วเติมกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) แล้วผ่านกระบวนการรีดเคิร์ฟหรือตัดย่อย เพื่อผลิตเป็นสกีมเคิร์ฟหรือสกีมบล็อก



รูปที่ 2.5 ผังการแปรรูปขั้นต้นจากผลผลิตของต้นยางพารา [9]

2.3.2 การผลิตยางแผ่น [9]

ยางแผ่นดิบเป็นยางที่ได้จากการนำน้ำยางมาจับตัวเป็นแผ่นโดยสารเคมีที่ใช้จะต้องตามเกณฑ์ที่กำหนด เช่น โซเดียมไบซัลไฟต์ (Sodium bisulphite) ในการฟอกสี และใช้ พาราไนโตรฟินอล (p-Nitrophenol) เป็นสารป้องกันเชื้อรา เป็นต้น ยางแผ่นจะดีหรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต การทำยางแผ่นขั้นต้นนั้นมียุทธศาสตร์อยู่ง่าย ๆ คือ ทำยางให้สะอาด รีดแผ่นยางให้บาง สีของแผ่นยางสม่ำเสมอมีขนาดมาตรฐาน ใช้น้ำและน้ำกรดถูกส่วน ซึ่งมีวิธีขั้นตอนดังภาพที่ 2.6 และมีรายละเอียดการทำดังต่อไปนี้

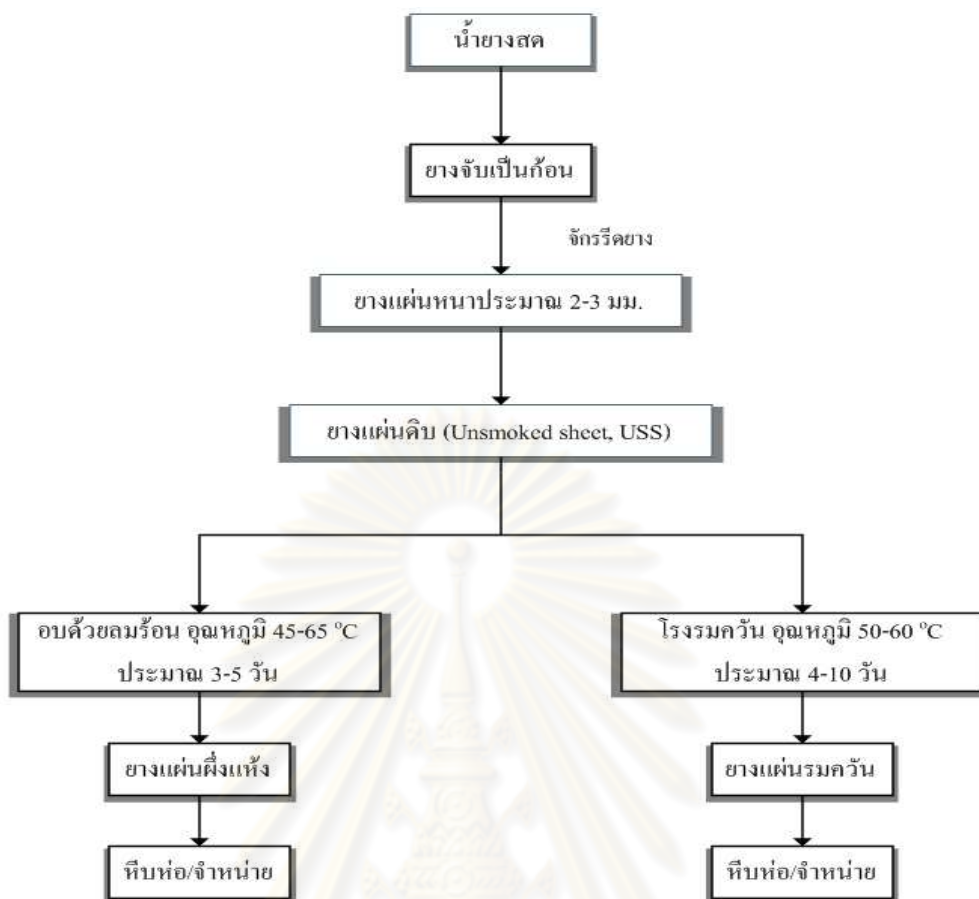
1. กรองน้ำยาง นำน้ำยางสดเทลงสู่บ่อรับน้ำยางสดผ่านตะแกรงกรองขนาด 40 – 60 (mesh) เพื่อกรองแยกสิ่งสกปรกออกน้ำยางสด

2. การทำยางให้เป็นแผ่น ในการผลิตยางแผ่นรมควัน จะต้องมีการเจือจางน้ำยางสด เพื่อให้ได้เนื้อยางแห้งประมาณ 15 – 18% โดยทำการเจือจางน้ำยางสดด้วยน้ำ ซึ่งจะต้องมีการคำนวณปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมเจือจาง ในอัตราส่วนผสมน้ำยางสดกับน้ำ คือ 3:2 ซึ่งอัตราส่วนผสมเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับขึ้นอยู่กับปริมาณเนื้อยางแห้ง และเติมกรดฟอร์มิกความเข้มข้น 2% ในอัตราส่วน 0.4 - 0.6 ของเนื้อยางแห้ง เพื่อให้ยางจับตัวกันเป็นก้อน ทำการกวนผสมให้เข้ากันซึ่งในการกวนจะมีฟองเกิดขึ้นซึ่งต้องทำการตักฟองออกให้หมด เพราะยางแผ่นที่ได้จะมีรอยจุดฟองอากาศทำใหยางแผ่นรมควันที่ได้มีคุณภาพต่ำ จากนั้นทิ้งไว้ 2 – 3 ชั่วโมง เพื่อให้ยางแข็งตัว เมื่อยางแข็งตัวแล้วนำแผ่นยางที่ได้ไปล้างในรางล้างยาง

3. การรีดยาง นำยางแผ่นที่ผ่านการล้างแล้วมารีดด้วยเครื่องรีดยางซึ่งประกอบด้วยลูกกลิ้งผิวเรียบ 4 – 5 คู่ และลูกกลิ้งลายดอกอีก 1 คู่สุดท้ายเพื่อรีดใหยางมีความหนา ประมาณ 2 – 3 มิลลิเมตร ในกระบวนการนี้มีการสเปรย์น้ำ เพื่อหล่อลื่นในขณะรีดยาง จากนั้นล้างน้ำอีกครั้งและนำไปผึ่งลมเป็นเวลา 1 วัน จะได้ยางแผ่นดิบ (Unsmoked sheet, USS) แล้วจึงนำเข้าห้องรมควันเพื่ออบแห้งเป็นยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheets, RSS) หรือทำการอบแห้งกรณีทำยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air dried sheets, RDS)

4. การรมควันยาง นำยางแผ่นดิบไปอบรมควันในห้องอบที่มีอุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส โดยความร้อนและควันที่ใช้ในการรมยางให้แห้งได้จากการเผาไม้พื้นในเตาเผา ซึ่งสามารถควบคุมการลุกไหม้ของไม้พื้นเพื่อให้ได้ความร้อนตามต้องการโดยการเปิดหรือปิดช่องให้อากาศเข้าทางประตูใส่พื้น โดยความร้อนและควันจากเตาเผาจะถูกส่งมาตามท่อซีเมนต์ปล่อยควันสู่ห้องอบ โดยทั่วไปใช้ระยะเวลาในการรมควันประมาณ 4-12 วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพและความชื้นของยางแผ่นดิบจนแผ่นยาง สุกได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า ยางแผ่นรมควัน

5. การคัดเกรดยาง การคัดแยกเกรดยางแผ่นรมควันไม่มีมาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพยางที่แน่นอน การกำหนดชั้นยางชนิดต่างๆกระทำโดยใช้สายตาในการพิจารณา ซึ่งต้องอาศัยความชำนาญและประสบการณ์



รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตยางแผ่น [9]

2.3.3 การผลิตยางแท่ง [9]

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางแท่งใช้ได้ทั้งน้ำยางสดที่ต้องทำให้จับตัวเป็นก้อนก่อน และยางแห้งที่จับตัวแล้ว เช่น ยางแผ่นดิบ เศษยางกันถ้วย การผลิตยางแท่งทำได้ง่ายและเร็วกว่าการทำยางแผ่นรมควันหรือยางเครพมาก โดยมีขั้นตอนการผลิตดังภาพที่ 2.7 และมีรายละเอียดดังนี้

1. เมื่อได้น้ำยางสดมาจากสวนและกรองให้สะอาดแล้ว จะใส่น้ำกรดฟอร์มิคเพื่อให้ยางแข็งตัว การทำยางแข็งตัวอาจจะลดน้ำกรดและใช้น้ำตาล 0.04% ของเนื้อยางแห้งช่วยด้วย หรือใช้น้ำตาลอย่างเดียว 0.05% ของเนื้อยางแห้งก็ได้ เพื่อให้ยางจับตัวเป็นก้อนไม่แน่นเกินไปจะมีรูเล็กๆพูนอยู่ทั่วไป ซึ่งจะช่วยให้ยางแห้งเร็วขึ้นเมื่ออบความร้อน

2. ยางจะแข็งตัวภายในเวลา 2 - 3 ชั่วโมง นำเข้าเครื่องย่อยเพื่อฉีกหรือตัดยางออกเป็นชิ้นเล็กๆ แบบๆ ชิ้นหนึ่งจะมีขนาดประมาณปลายนิ้วก้อย เครื่องย่อยดังกล่าวนี้มีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน เช่น กรานูเลเตอร์ (Granulator) หรือ โรตารีคัตเตอร์ (Rotary cutter) หรือใช้ย่อยยางที่แข็งตัวมานานแล้ว ซึ่งมีความเหนียวมากกว่ายางที่แข็งตัวใหม่ๆ ยางที่แข็งตัวมานานแล้ว ใช้ทำ

ยางแท่งได้ทำนองเดียวกับยางที่ได้มาจากสวนใหม่ ๆ โดยใช้เครื่องย่อยที่ทำงานหนัก เช่น เครื่องย่อยที่เรียกว่า แฮมเมอร์มิลล์ (Hammermill) ก็ได้ หรือถ้าย่อยโดยผ่านเครื่องย่อยดังกล่าวข้างต้นแล้ว เช่น ผ่านเครื่องใดเครื่องหนึ่งในสองเครื่องแรกแล้ว ต้องการย่อยให้เล็กลงอีก ขนาดเม็ดเท่าหัวไม้ขีดไฟ จะผ่านเครื่องย่อยที่เรียกว่า เพลลิตีเซอร์ (Pelletiser) อีกครั้งหนึ่งก็ได้

3. ยางที่ถูกย่อยเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนี้จะไหลลงกระบะขอบสูง ๆ คล้ายกล่องทำด้วยโลหะ หรือจะปล่อยลงในน้ำเพื่อล้างอีกครั้งหนึ่ง แล้วจึงกอบใส่กระบะก็ได้ กระบะหนึ่งๆ ใส่ยางย่อยไม่เกินครึ่งกระบะ มีน้ำหนักยางกระบะละประมาณ 34 – 35 กิโลกรัม แล้วจึงนำกระบะดังกล่าวนี้เข้าอบความร้อนในเตาอบ ซึ่งมีรูปร่างคล้ายอุโมงค์ กว้างประมาณ 2 เมตร สูง 1 เมตร และยาวประมาณ 8 – 9 เมตร มีประตูปิดเปิดได้ทั้งทางหัวทางท้ายของความยาว ทุก ๆ กระบะจะเข้าทางต้นทางแล้วจะออกอีกทางหนึ่ง จะอยู่ในเตาอบซึ่งมีความร้อนระหว่าง 100 – 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 – 4 ชั่วโมง ยางที่สุกแล้วจะเห็นเนื้อยางใสและมีสีน้ำตาลอ่อนๆ ไม่ขาวเหมือนเมื่อตอนจะเอาเข้าอบ

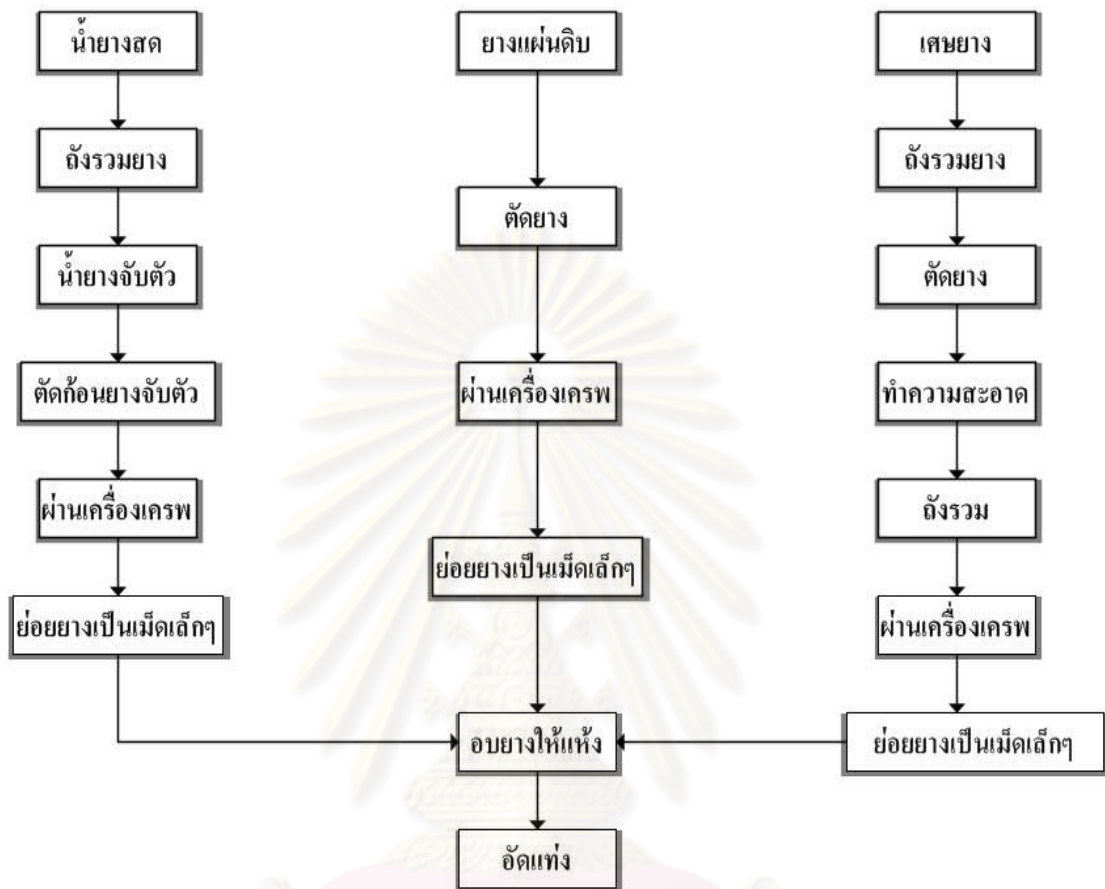
4. เมื่อยางสุกแล้ว จะปล่อยให้เย็นลงเหลือประมาณ 50 – 60 องศาเซลเซียส จากนั้นยกมาซึ่งให้ได้ประมาณ 34 กิโลกรัมหรือ 75 ปอนด์ แล้วนำเข้าอัดเป็นแท่ง เป็นเวลา 1 นาทีในเครื่องอัดซึ่งมีแรงอัด 100 ตัน ยางย่อยจะถูกอัดเป็นแท่งคล้ายแผ่นอิฐขนาด $35.5 \times 70 \times 16.5$ เซนติเมตร แล้วจึงห่อด้วยถุงพลาสติกขนาดบาง 0.04 มิลลิเมตร ถ้าส่งต่างประเทศ จะบรรจุในลังไม้โปร่ง ขนาดวัดภายนอกได้ประมาณ $122 \times 102 \times 112$ เซนติเมตร จะบรรจุได้ 30 แท่ง เป็นจำนวนน้ำหนักประมาณ 1 ตัน

2.4 กระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากยางแท่ง [10]

ยางดิบมีสมบัติที่ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง ดังนั้นจำเป็นต้องมีการผสมยางดิบกับสารเคมีต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ได้ตามความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ และนำยางคอมปาวด์ที่ผสมได้ไปผ่านกระบวนการคงรูป (Vulcanization) ทำให้ยางมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ (3-Dimensional network) หรือที่เรียกว่าการเกิดเชื่อมโยงหรือครอสลิงค์ (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลของยางโดยทั่วไป กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางพอสรุปได้ดังภาพที่ 2.8

การออกสูตรยาง (Compounding design) เป็นสิ่งสำคัญมากต่อคุณภาพและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การออกสูตรยางจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับสมบัติของยาง หน้าที่และความจำเป็นของการใช้สารเคมีผสมยาง รวมทั้งต้องพิจารณาถึงราคาของสารเคมีที่จะใช้ว่าเหมาะสมหรือคุ้มกับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ เพราะต้นทุนการผลิตก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรก

สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง พื้นฐานของส่วนผสมของสูตร ประกอบด้วยสารกลุ่ม ต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตยางแท่ง [9]

การออกสูตรยางจะกำหนดปริมาณสารต่าง ๆ ในสัดส่วนต่อยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก และเรียกเป็น phr (Part per hundred of rubber) ดังนั้นการออกสูตรยางที่ถูกต้องเหมาะสมนั้น จำเป็นต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในสมบัติ หน้าที่และปริมาณของทั้งยางและสารเคมีต่างๆ เป็นอย่างดี โดยสูตรการผลิตผลิตภัณฑ์ยางเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.8 กระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากยางแห้ง [10]

ตารางที่ 2.2 สารเคมีที่ใช้ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากยางแห้ง [11]

ชนิดของสาร	หน้าที่	ตัวอย่างชื่อสารเคมี
สารเร่งให้คงรูป (Accelerator)	ทำให้ยางอยู่ในสถานะที่ยืดหยุ่นได้สูง หรืออาจใช้คำว่าคงรูปหรือ ยางสุก	TMTD ¹ MBT ²
สารป้องกันยางเสื่อม (Antidegradant)	ป้องกันการเสื่อมสภาพเพื่อยืดอายุการ ใช้งานของผลิตภัณฑ์	IPPD ³ TMQ ⁴
สารตัวเติม (Filler)	เพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิตหรือช่วย เสริมแรง	คาร์บอนแบลค ดินขาว
สารช่วยในกระบวนการผลิต (Plasticizer, Peptizer)	ทำหน้าที่เฉพาะตัวต่างๆ เช่นช่วยให้ยาง นิ่มในระหว่างบดผสม	น้ำมัน Pepton 22
สารกลุ่มอื่นๆ	ต้องการให้ยางมีสมบัติพิเศษบาง ประการ เช่นการชะลอการคงรูป	กรดเบนโซอิก โซเดียมไบคาร์บอเนต

¹ Tetramethyl Thiuramdisulfide ² 2-mercaptobenzothiazole ³ Isopropylparaphenylenediamine

⁴ 2,2,4-Trimethyl-1,2-Dihydroquinoline

ตารางที่ 2.3 สูตรการผสมผลิตภัณฑ์ยางเบื้องต้น [11]

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยาง (ชนิดเดียว หรือ 2 ชนิดขึ้นไป) (rubber)	100
กำมะถัน (sulphur)	2.5 – 3.5
สารกระตุ้น (activator)	1 – 5
สารเร่งให้ยางคงรูป (ชนิดเดียว หรือ 2 ชนิดขึ้นไป) (accelerator)	0.5 – 2.0
สารตัวเติม (filler)	ตามที่ต้องการ
สารทำให้ยางนิ่ม (plasticizer, peptizer)	5 – 10
สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (antidegradant)	1 – 2

เมื่อได้สูตรที่เหมาะสมแล้วขั้นตอนต่อไปคือ การบดผสมสารเคมีต่างๆ ให้เข้ากับเนื้อยาง สมบัติของยางที่สำคัญสำหรับการบดผสมคือความหนืด (Viscosity) ถ้ายางมีความหนืดสูงจะทำให้การบดผสมเป็นไปได้ยาก เนื่องจากสารเคมีจะเข้าผสมกับยางได้ยากและจะใช้พลังงานในการบดผสมสูง ด้วยเหตุนี้ก่อนการใส่สารเคมีลงไปจึงต้องมีการลดความหนืดโดยการบดยางให้นิ่ม (Mastication) ซึ่งภาษาชาวบ้านเรียกว่า การตียาง ในบางกรณีอาจมีการเติมสารช่วยย่อยโมเลกุล (Peptiser) เพื่อให้ยางนิ่มเร็วขึ้น โดยทั่วไปการบดยางจะกระทำในเครื่องบดซึ่งอาจใช้เครื่องบดระบบปิด (Internal mixer) หรือเครื่องบดระบบเปิด (Two-roll mill) ขั้นตอนนี้อย่างถูกทำให้ให้นิ่มโดยโมเลกุลของยางถูกทำให้ฉีกขาด เพราะแรงเฉือนจากเครื่องบดและจะใช้ระยะเวลาในการบดนานเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความหนืดเริ่มต้นของยาง โดยเฉพาะยางธรรมชาติซึ่งมีความหนืดสูงมากก็ต้องบดนานขึ้น อุณหภูมิของการบดควรจะต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันยางเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ซึ่งค่าความหนืดของยางสามารถวัดค่าได้โดยใช้เครื่อง Mooney viscometer ใช้หลักการหมุน (Rotate) ยางด้วยแกนหมุนโรเตอร์ (Rotor) ของเครื่องภายใต้การควบคุมอุณหภูมิของชั้นทดสอบ

2.5 สารเคมีที่ใช้ผสมกับน้ำยาง [12]

สารเคมีที่ใช้กับน้ำยาง และผลิตภัณฑ์น้ำยางมีหลายชนิด ซึ่งใช้ในหน้าที่ต่าง ๆ กันในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะสารเคมีที่มีความจำเป็นในการทดลอง และสารเคมีที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามหน้าที่ของสารเคมี ดังนี้

2.5.1 สารเพิ่มความคงตัว (Stabilizer)

เป็นสารที่รักษาความคงตัวของน้ำยาง ช่วยให้เติมสารอื่นๆ และดำเนินการกระบวนการผลิตได้ ความคงตัวของน้ำยางขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชั้นของน้ำยางที่ห่อหุ้มอนุภาคยาง และประจุไฟฟ้าบนอนุภาคยาง ในน้ำยางธรรมชาติจะใช้ แอมโมเนียม โปแตสเซียม ไฮดรอกไซด์ เป็นสารรักษาประจุไฟฟ้าบนอนุภาคยาง สารเพิ่มความคงตัวสามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท ดังนี้

1. ประเภทมีประจุไฟฟ้าลบ

สารพวกนี้จะช่วยเพิ่มประจุไฟฟ้าลบ ช่วยผลัดประจุ และพลังงานระหว่างอนุภาคยางกับส่วนที่เป็นน้ำ สารที่เพิ่มประจุลบบนอนุภาคยาง ได้แก่ พวกสบู่ของกรดไขมัน เช่น โปแตสเซียมโอเลต (Potassium oleate) แอมโมเนียมลอเรต (Ammonium laurate) นอกจากนี้ยังมีพวกซัลเฟต และซัลโฟเนตของสารอินทรีย์ โดยโปแตสเซียมโอเลตจะแตกตัวให้ทั้งประจุไฟฟ้าบวก และประจุไฟฟ้าลบ แต่เนื่องจากอนุมูล โอเลตเป็นสารไฮโดรคาร์บอนจะชอบอนุภาคยางซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนด้วยกัน ดังนั้น จะเกิดการรวมตัวกับอนุภาคยาง ทำให้มีประจุลบมากขึ้น

2. ประเภทมีประจุไฟฟ้าบวก

สารพวกนี้จะช่วยเพิ่มประจุไฟฟ้าบวก ซึ่งส่วนใหญ่ได้จากอนุมูลของแอมโมเนียม สารพวกนี้จะไม่ค่อยได้รับผลกระทบเนื่องจากอนุมูลของโลหะหนัก บางครั้งเมื่อใช้กับน้ำยางธรรมชาติจะเป็นสารลดความคงตัว ทั้งนี้ เนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำยางมีความคงตัวมากเกินไป

3. ประเภทที่ไม่มีประจุไฟฟ้า

เป็นสารที่ช่วยห่อหุ้มอนุภาคของน้ำยาง โดยทั่วไปจะมีสภาพเป็นกลางการทำหน้าที่ไม่ขึ้นกับความเป็นกรด-เบสของน้ำยาง ดังนั้น แม้ว่า pH ของน้ำยางจะเปลี่ยนแปลงแต่น้ำยางจะคงตัวเสมอ

4. ประเภทที่มีทั้งประจุบวก และประจุลบ

เป็นสารที่อาจจะแสดงอนุภาคบวก หรือ ลบก็ได้ ขึ้นอยู่กับสถานะของความเป็นกรด-เบส ของตัวกลาง สำหรับน้ำยางธรรมชาติ ได้แก่ พวกโปรตีน ที่นิยมใช้มาก ได้แก่ พวก Caseine Ammonium Casenate เป็นต้น

2.5.2 สารในระบบวัลคาไนซ์ (Vulcanizing System)

การทำให้ยางคงรูปหรือทำให้ยางสุกคือ การทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโมเลกุลหรือที่เรียกกันว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน เกิดเป็นโครงสร้าข่ายตาข่าย 3 มิติ ส่งผลให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพจากค่อนข้างอ่อนซึ่งมีความเป็นพลาสติกสูง ไปเป็นยางที่มีความ

ยืดหยุ่นดีและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียรและไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากนัก และทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงแดดได้ดียิ่งขึ้น จึงสามารถนำยางไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง ปฏิกริยาวัลคาไนเซชันเซชันต้องอาศัยสารเคมีกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing or curing agents) และความร้อนเพื่อทำให้สารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ สามารถแบ่งสารเคมีที่ทำให้ยางคงรูปได้เป็น

1. สารที่ไม่มีกำมะถัน (Sulphur donor vulcanization system)

ตัวอย่างเช่นการใช้โลหะออกไซด์เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา คงรูปของยางนีโอพรีน โดยนิยมใช้ร่วมกับแมกนีเซียออกไซด์ (MgO) เพื่อเป็นตัวจับอะตอมคลอรีนที่เกิดขึ้นการใช้สารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ (Difunctional group compound) เช่น ใช้อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) ในยางไนไตรล์ ใช้ควินินไดออกไซด์ (Quinine dioximes) ในยางบิวทิล และใช้ไดเอมีน (Diamines) ในยางฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (Fluoroelastomer) เป็นต้น การใช้สารประกอบพวกเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารคงรูปที่สำคัญสำหรับยางที่มีโมเลกุลอิมิตัวหรือโมเลกุลที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อปฏิกิริยาในการสร้างพันธะเคมีเชื่อมโมเลกุลเช่น ยางเอทิลีนโพรพิลีน (Ethylene Propylene rubber :EPM) เป็นต้น ในทำนองเดียวกันเปอร์ออกไซด์ก็สามารถใช้เป็นสารคงรูปสำหรับยางที่ไม่อิมิตัวเช่น ยางธรรมชาติ ยาง SBR และยางไนไตรล์ (Nitrile rubber : NBR) ได้ และจะทำให้ยางเหล่านี้ทนต่อความร้อนได้ดี สารกลุ่มนี้ไม่ได้เข้าไปเชื่อมระหว่างโมเลกุลของยาง แต่จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดเป็นเรดิคัล (Radicals) แล้วฟอร์มพันธะเคมีแบบคาร์บอน-คาร์บอน ระหว่างสายโมเลกุลของยาง

2. สารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน (Sulphur donor vulcanization system)

สารประกอบอินทรีย์ที่สลายตัวให้กำมะถันที่อุณหภูมิการอบให้ยางคงรูปก็สามารถใช้เป็นสารคงรูปได้ สารกลุ่มนี้ได้แก่ TMTD (Tetramethyl thiuram disulphide) และอนุพันธ์ของมอร์โฟลีน (Morpholine) เช่น DTDM (Dithio dimorpholine) การใช้สารประกอบพวกนี้เป็นสารคงรูปมีข้อดี คือลดปัญหาการเกิดการบลูม (Bloom) และเนื่องจากปฏิกิริยาจะไม่เกิดจนกว่ากำมะถันจะสลายตัวออกมา ดังนั้นจึงลดปัญหาการเกิดยางตายหรือยางที่เกิดการคงรูปก่อนเวลา (Scorch) สารพวกนี้ยังก่อให้เกิดพันธะเคมีแบบโมโนซัลไฟด์ (Monosulphide) เป็นส่วนใหญ่ทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีมาก นอกจากการใช้สารเคมีดังกล่าวแล้ว การฉายรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา ก็สามารถทำให้ยางคงรูปได้เช่นกัน โดยเมื่อถูกรังสีโมเลกุลของยางจะแตกตัวให้เรดิคัล และจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบคาร์บอน-คาร์บอน ทำให้ยางที่ได้มีความเสถียรต่อความร้อน มีความบริสุทธิ์สูงเพราะไม่มีสารเคมีอื่นใดเจือปน จึงเหมาะสำหรับการผลิตอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนยางที่ใช้ทางการแพทย์

3. สารกำมะถัน (Sulphur vulcanization system)

เป็นระบบที่ใช้อย่างกว้างขวางกับยางที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลไม่อิ่มตัว ระบบนี้จำเป็นต้องมีสารตัวกระตุ้น (Activator) เช่น ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก สำหรับสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาควบคู่ไปกับการใช้กำมะถันและสารตัวเร่งมีความสำคัญ เพราะเป็นตัวกำหนดชนิดของพันธะเคมีที่เกิดขึ้น เช่น ถ้าใช้ปริมาณกำมะถันมากและใช้สารตัวเร่งน้อย เรียกว่าระบบธรรมดาหรือ Conventional vulcanization (CV system) ซึ่งจะมีพันธะเคมีแบบพอลิซัลไฟด์ (Polysulphide crosslinks) และแบบวงแหวน (Cyclic) แต่ถ้าใช้ปริมาณกำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งมากจะได้พันธะเคมีส่วนใหญ่เป็นแบบ monosulphide crosslinks เรียกกระบวนนี้ว่าระบบประสิทธิภาพหรือ Efficient vulcanization (EV system) นอกจากนี้ 2 ระบบดังกล่าวยังมีอีกกระบวนหนึ่งเรียกว่า ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV system) ซึ่งจะอยู่กึ่งกลางระหว่าง 2 ระบบข้างต้น พันธะเคมีแบบพอลิซัลไฟด์จะให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดีแต่ไม่ทนต่อความร้อน ในขณะที่ยางที่มีพันธะแบบโมโน (Mono-) หรือไดซัลไฟด์ (Disulphide) จะให้สมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่า แต่ยางจะเสถียรต่อความร้อนได้ดี

2.5.3 สารเร่งปฏิกิริยาคาไลไนซ์ (Accelerator)

สารเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่ช่วยให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์เร็วขึ้น โดยมีการแบ่งสารเร่งปฏิกิริยาตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารเร่งปฏิกิริยานั้นๆ ซึ่งจะแบ่งออกเป็นหมู่ต่างๆ ดังนี้

1. กลุ่มไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamate)

เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่เร่งให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์เร็วมาก สารเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ยังแบ่งเป็นแอมโมเนียมไดไทโอคาร์บาเมต โซเดียมไดไทโอคาร์บาเมต และซิงค์ไดไทโอคาร์บาเมต โดยที่ซิงค์ไดไทโอคาร์บาเมตเป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญและมีจำหน่ายมากที่สุดในกลุ่มนี้ และที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ซิงค์ไดเอทิล ไดไทโอคาร์บาเมต (Zinc Diethyl Dithiocarbamate, ZDEC) เป็นสารสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายน้ำปริมาณการใช้อยู่ระหว่าง 0.3-1.5 ส่วน ต่อ เนื้อยางแห้ง 100 ส่วน ZDEC จะเพิ่มอัตราเร็วของการควบคู่ขึ้นอย่างชัดเจนในอุณหภูมิที่สูงกว่า 70 องศาเซลเซียส โดยที่ ZDEC จะไม่ทำให้น้ำยางเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้นก่อน (Pre-Vulcanization) เมื่อเก็บน้ำยางที่ผสม ZDEC ไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า ดังนั้น ทำให้สามารถใช้น้ำยางที่ผสม ZDEC ในกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันได้ ข้อเสียของสารในกลุ่มนี้ คือ มีความว่องไวปฏิกิริยาต่อสารทองแดง ทำให้เมื่อผลิตภัณฑ์ยางสัมผัสกับสารที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบจะเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล

2. กลุ่มแซนเทต (Xanthate)

สารกลุ่มนี้ว่องไวต่อปฏิกิริยามากและเร็วกว่าเกลือแอมโมเนียมของไดไฮโอคาร์บาเมต จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมน้ำยางโดยเฉพาะการทำยางพองน้ำ เนื่องจากสารเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์เร็วมาก ดังนั้นอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ควรจะต่ำประมาณ 80 – 110 องศาเซลเซียส แซนเทตต้องใช้ซิงค์ออกไซด์กระตุ้นในการทำงาน ตัวอย่างสารเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ Sodium Isopropyl Xanthate (SIX) Zinc Isopropyl Xanthate (ZIX) และ Zinc Butyl Xanthate (ZBX)

3. กลุ่มไธอาโซล (Thiazole)

เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากที่สุด ยางที่ใช้ไธอาโซลเป็นสารเร่งปฏิกิริยาสามารถวัลคาไนซ์ได้ทุกรูปแบบของการวัลคาไนซ์ อย่างไรก็ตาม การที่เป็นแบบ delay action ในการวัลคาไนซ์ ทำให้เหมาะแก่การวัลคาไนซ์โดยใช้เครื่องอัดเป็นอย่างยิ่ง สารเร่งปฏิกิริยากกลุ่มนี้สามารถกระตุ้นให้เร็วขึ้นได้โดยการใส่สารเร่งปฏิกิริยาที่เป็นต่าง เช่น พวกไดไฮโอคาร์บาเมตและไธยูแรม แต่การกระตุ้นนี้ยังส่งผลให้ระยะเวลาที่ยางเริ่มจะเกิดการคงรูป (Scorch time) สั้นลงไปด้วย สารเร่งปฏิกิริยาพวกไธอาโซลจำเป็นต้องใช้ซิงค์ออกไซด์และกรดไขมันร่วมด้วย สำหรับกรดไขมันแล้วยิ่งความยาวโซ่ยาวจะทำให้ความว่องไวในปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ตัวอย่างสารกลุ่มนี้ ได้แก่ Zinc salt 2-Mercaptobenzothiazole (ZMBT) และ Cyclohexylamine salt 2-Mercaptobenzothiazole (CMBT) โดยสารกลุ่มนี้นิยมใช้พวกที่ไม่ละลายน้ำกับน้ำยาง เช่น Zinc 2-Mercaptobenzothiazole มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ ใช้รวมกันกับ ZDEC ปริมาณการใช้ คือ ZDEC 1 ส่วน ต่อ ZMBT 0.25-0.5 ส่วน ต่อ เนื้อยางแห้ง 100 ส่วน นอกจากจะทำให้ค่าโมดูลัสของยางสูงขึ้นแล้ว ยังมีผลช่วยในการเสริมประสิทธิภาพการคงรูปโดยมีผลเร็วกว่าการใช้สารตัวเดียว

4. ไธยูแรม (Thiuram)

ยางที่ใช้ไธยูแรมเป็นสารเร่งปฏิกิริยาสามารถวัลคาไนซ์ได้หลายวิธี เช่น วัลคาไนซ์โดยใช้เครื่องอัดไอน้ำและอากาศร้อน ในบางครั้งไธยูแรมอาจใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเสริมกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยาอื่น เช่น ไธอาโซลและ ซัลฟิनाไมด์ แต่สำหรับการใช้ไธยูแรมกับซัลฟิनाไมด์แล้วจะทำให้การเริ่มต้นวัลคาไนซ์ช้าลงไป แต่เวลาในการวัลคาไนซ์สมบูรณ์จะสั้นลง การใช้ไธยูแรมจะต้องมีซิงค์ออกไซด์อยู่ด้วยเพื่อประสิทธิภาพสูงสุด อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ไม่ควรเกิน 125 – 135 องศาเซลเซียส เพราะถ้าเกินกว่านี้จะทำให้ยางสุกเกินไป (Over cure) ได้ง่าย ตัวอย่างสารกลุ่มนี้ ได้แก่ Tetramethyl Thiuram Monosulfide (TMTM), Tetramethyl Thiuram Disulfide (TMTD) และ Dipentamethylene Thiuram Hexasulfide (DPTH)

2.5.4 สารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Activator)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือ สารที่ช่วยเสริมให้สารเร่งปฏิกิริยาทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยาอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ สารอนินทรีย์ที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่สำคัญและนิยมใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ ส่วนสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่เป็นสารอินทรีย์ที่สำคัญคือ พวกรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก กรดปาล์มมิติก และกรดลอริก เป็นต้น สารกระตุ้นปฏิกิริยามีสมบัติที่สำคัญคือ เมื่อใส่เข้าไปในยางปริมาณเล็กน้อยจะทำให้ยางมีโมดูลัสสูงขึ้น และบางครั้งถ้าไม่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยาก็จะไม่มีการวัลคาไนซ์เกิดขึ้น

1. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)

สำหรับน้ำยางจะใช้ ZnO เติมลงไปเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการผสมสารเคมีต่างๆ หรือ บางครั้งอาจเติมในขณะที่จะเริ่มการแปรรูปเป็นวัตถุสำเร็จรูป ทั้งนี้เนื่องจากการเติม ZnO ในน้ำยางจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น แล้วเกิดเป็นครีมแข็ง ปริมาณการใช้ จะขึ้นอยู่กับช่วงระหว่าง 0.2-2.0 ส่วน ต่อ เนื้อยางแห้ง 100 ส่วน การเพิ่มปริมาณ ZnO ในช่วง 0.1-2.0 ส่วน ต่อเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน จะทำให้ยางมีโมดูลัสสูงขึ้น ถ้าต้องการให้ยางมีความโปร่งแสง จะต้องใช้ปริมาณ ZnO ต่ำประมาณ 0.25 ส่วน ต่อ เนื้อยางแห้ง 100 ส่วน

2. กรดไขมัน (Fatty acid)

กรดไขมันเป็นสารที่จำเป็นในการใช้เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา โดยเฉพาะพวกไฮโดรไลด์ กรดไขมันที่ใช้ส่วนมากเป็นของผสมของกรดออลิฟาติกอิ่มตัวที่มีคาร์บอน 12 – 18 อะตอม ซึ่งประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นกับความยาวโมเลกุล ปริมาณการใช้กรดไขมันในการผสมเข้าไปในยางจะขึ้นอยู่กับชนิดของยาง ถ้ายางชนิดใดมีกรดไขมันอยู่แล้ว ก็ไม่จำเป็นต้องใส่หรือถ้าใส่ก็เป็นปริมาณน้อยมาก กรดไขมันที่นิยมใช้คือ กรดสเตียริก (Stearic acid)

2.5.5 สารตัวเติม (Fillers) [13]

สารตัวเติมหมายถึงสารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ เช่น เพื่อลดต้นทุน เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของยาง เพื่อช่วยในขบวนการผลิตเพื่อลดการพองตัวของยางในน้ำมัน เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า และเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง เป็นต้น สารตัวเติมสามารถแบ่งตามลักษณะได้ 3 ลักษณะคือ

1. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Particulated filler) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา ดินเหนียว และเขม่าดำ สารตัวเติมนี้ยังแบ่งออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ
 - สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ (Reinforcing filler) คือ สารตัวเติมที่ใส่เข้าไปในยางแล้วช่วยให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ความต้านทานต่อการสึกหรอสูง ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง เป็นต้น ส่วนใหญ่นุภาคจะมีขนาดเล็ก

ประมาณ 0.18 – 0.60 ไมโครเมตร เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเขม่า (Fumed product) เช่นเขม่าดำและซิลิกา เป็นต้น

- สารตัวเติมไม่เสริมประสิทธิภาพ (Diluent filler) สารตัวเติมชนิดนี้จะมีราคาถูกมีอนุภาคขนาดใหญ่ประมาณตั้งแต่ 10 ไมโครเมตร ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตและแป้งทัลคัม เป็นต้น สารตัวเติมบางตัวมีขนาดอนุภาคปานกลาง เช่น อลูมิเนียมซิลิเกตและแคลเซียมซิลิเกต จะจัดอยู่ในพวกกึ่งเสริมประสิทธิภาพ (Semi-reinforcing filler)

ปัจจุบันสารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เขม่าดำและซิลิกา เนื่องจากสามารถปรับปรุงข้อด้อยเชิงกลของยางได้ ในระยะหลังได้พยายามปรับสภาพผิวของสารตัวเติมของสารอินทรีย์บางตัว เพื่อให้ยึดติดกับโมเลกุลของยางได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยให้สมบัติของยางเหล่านี้ไม่ต่างจากการใช้เขม่าดำหรือซิลิกามากนัก

2. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous filler) เช่น ใยฝ้าย (Cotton froc) และใยไม้ (Wood froc) สารตัวเติมประเภทนี้ใส่ในยางบางชนิดเพื่อป้องกันไม่ให้ยางหดตัวเพื่อรักษารูปร่าง มักจะใช้เป็นสารตัวเติมในยางประเภทเกรดต่ำ เช่น พวกเปลือยกยางแบดเตอร์ ตุ๊กตา และพื้นรองเท้า เป็นต้น

3. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (Resinous filler) ยางที่เติมเรซินจะมีความแข็งเป็นพิเศษ ตามปกติแล้วการทำให้ยางแข็งขึ้นมักจะใช้สารตัวเติมที่เป็นผง เช่น เขม่าดำ ซิลิกา หรือดินเหนียว เป็นต้น แต่สารเคมีที่เป็นผงนี้ผสมเข้าไปในยางได้ในปริมาณที่จำกัด ถ้ามากเกินไปแล้วจะทำให้ผสมได้ยากและมีความร้อนเกิดขึ้นในขณะผสม รวมทั้งความกระด้างตัวของยางต่ำลง การใช้สารตัวเติมที่เป็นผงนี้จะทำให้ยางมีความแข็งเพียงประมาณ 70 – 75 IRHD เท่านั้น ถ้าต้องการให้ความแข็งมากกว่านั้นแล้วมักจะใช้สารพวกเรซินแทน เช่น ไฮสไตรีนเรซิน (High styrene resin) และฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Phenol formaldehyde resin)

2.5.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติไซเซอร์เป็นสารที่ใส่เข้าไปในยางเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความสามารถในการใช้งาน พลาสติไซเซอร์จะทำให้ความแข็งของยางลดลงและช่วยให้การแปรรูปได้ง่ายขึ้น ในบางครั้งพลาสติไซเซอร์จะมีชื่อเรียกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหน้าที่และปริมาณที่ใช้ เช่นถ้าใช้ในปริมาณไม่เกิน 5 phr จะเรียกว่า “Processing aid” คือช่วยในการแปรรูป ช่วยให้การผสมสารเคมีเข้าไปในยางกระทำได้ง่ายขึ้น ถ้าใช้ปริมาณ 5 – 15 phr จะเรียกว่า “Softener” คือใส่เพื่อให้ยางนิ่มลง ทั้งในขณะที่ยังไม่วัลคาไนซ์และวัลคาไนซ์แล้ว และถ้าใช้เกิน 15 phr จะเรียกว่า “Extender” กรณีนี้ใส่เพื่อลดต้นทุน จุดมุ่งหมายของการใช้พลาสติไซเซอร์ในยางมีหลายประการคือ

1. เพื่อช่วยในการแปรรูป การใส่พลาสติกไซเซอรเข้าไปจะให้ผลตรงกันข้ามกับสารตัวเติมคือ จะทำให้ยางนิ่มลง แปรรูปได้ง่ายขึ้น
2. เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง ยางที่ใส่พลาสติกไซเซอรจะทำให้ความแข็งลดลง เป็นผลให้มอดุลัสลดลง ระยะเวลาเมื่อขาดและความยืดหยุ่นสูงขึ้น
3. เพื่อลดต้นทุน
4. เพื่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ พลาสติกไซเซอรจะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำลงไปอีก และสามารถขยายขอบเขตการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำลงไปได้อีก
5. เพื่อลดพลังงานในการแปรรูปยาง พลาสติกไซเซอรจะทำให้ยางนิ่มลง พลังงานที่ใช้ในการผสมยาง แปรรูปยาง รวมทั้งอุณหภูมิในการแปรรูปยางจะลดลงได้
6. เพื่อใช้เป็นสารแทกคิไฟเออร์ พลาสติกไซเซอรบางตัวมีผลให้ยางมีความสามารถในการติดกันได้ง่ายขึ้น

2.5.7 สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant)

ตลอดอายุการใช้งานของยาง ยางจะเสื่อมทำให้ไม่สามารถจะใช้งานต่อไปได้ ปัจจัยหลักสำคัญที่ทำให้ยางเสื่อมคือ ออกซิเจนกับโอโซน ถึงแม้ว่ายางจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างช้า ๆ ก็ตาม แต่ออกซิเจนก็มีความสำคัญยิ่งต่อการเสื่อมของยางตัวอย่าง สิ่งที่กระตุ้นให้ยางเสื่อมสภาพได้เร็วได้แก่ แสง ความร้อน เกลือโลหะหนักที่เจือปนโอโซน และการหักงอไปมา เป็นต้น

ในระหว่างการเสื่อมของยาง ผิวของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง และอาจมีการเปลี่ยนแปลงในตัวยางทั้งหมดด้วย โดยเฉพาะยางบาง ๆ ซึ่งออกซิเจนสามารถทำปฏิกิริยาได้ตลอด ตัวอย่างสภาพการเสื่อมของยางที่ปรากฏได้แก่

- ผิวแตก อันเป็นผลเนื่องมาจากแสงที่มีต่อยาง จะเห็นได้ชัดในยางสี
- ผิวแข็งและสมบัติกายภาพตก ตัวอย่างเช่น กรณียางSBR ที่เสื่อมจากความร้อน

ยางสามารถป้องกันให้เสื่อมช้าลงได้โดยการใช้สารแอนติออกซิแดนท์ และสารแอนติโอโซนแนนท์ รวมไปถึงซีฟิ่งด้วย สารแอนติออกซิแดนท์ที่ใช้มีด้วยกัน 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ พวกฟีนอลิก ซึ่งใช้กับยางสีและพวกสารประกอบเอมีน ซึ่งทำให้สีของยางเปลี่ยนแปลงไปบ้าง จึงใช้กันทั่วไปในยางดำ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างแอนติออกซิแดนท์ 2 ชนิดนี้ จะพบว่า พวกสารประกอบเอมีนจะมีประสิทธิภาพมากกว่าพวกสารฟีนอลิก

ปริมาณปกติของแอนติออกซิแดนท์คือ 1 – 2 phr ปริมาณดังกล่าวถือว่าเป็นจุดสูงสุดแล้ว ถ้าใช้มากเกินไปก็จะไม่ให้เกิดผลเหนือไปกว่านี้อีก และอาจทำให้เกิดการ bloom ในผลิตภัณฑ์อีกด้วย

2.5.8 สารเคมีอื่นๆ

สารเคมีอื่น ๆ เป็นสารที่ไม่ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใช้สำหรับยางทั่วไป แต่บางครั้งใส่เข้าไปในยางโดยมีวัตถุประสงค์เพื่องานเฉพาะอย่าง เช่น

- สี เมื่อต้องการใช้ยางในรูปสีต่างๆ เพื่อความสวยงามหรือบอกลักษณะบางประการ
- สารลดการติดไฟ เมื่อต้องการให้ยางติดไฟได้ช้าลง หรือไม่ควรติดไฟลุกไหม้เอง
- สารป้องกันรังสี เมื่อต้องการให้รังสีผ่านยางได้ยากขึ้น ใช้ทำชุดพนักงานที่ทำงานเกี่ยวกับรังสีเอกซ์ หรือสารกัมมันตรังสีต่างๆ
- สารขัดสี ในการทำยางลบหมึก ยางลบจะต้องแข็งและมีสมบัติที่จะขูดกระดาษเอารอยหมึกออกได้

2.6 ซิลิกา

2.6.1 สมบัติของซิลิกา [14,15]

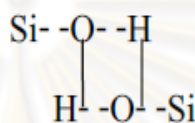
ในงานวิจัยนี้สนใจใช้สารตัวเติมประเภทซิลิกา เนื่องจากมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มการเสริมแรงและให้ความยืดหยุ่นแก่โครงสร้างยางแล้ว ซิลิกายังเป็นสารประกอบที่ไม่ให้สี ในขณะที่เขม่าดำให้สีดำซึ่งทำให้มีปัญหาในการแต่งสีของผลิตภัณฑ์

ซิลิกาที่นิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือซิลิกาธรรมชาติ และซิลิกาสังเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วย โพลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง (Crystalline form) และพอลิเมอร์ที่ไม่มีความเป็นผลึกหรืออสัณฐาน (Amorphous form) ตามลำดับ สารเติมแต่งพวกซิลิกาสังเคราะห์ที่ผลิตออกมาจะมีขนาดของอนุภาค (Particle size) และพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ตามประโยชน์การใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งจากการศึกษาพบว่ามีการใช้ ซิลิกาเป็นสารเติมแต่งที่เสริมแรงในยางโดยรวมต่อปีถึง 90% เมื่อเปรียบเทียบกับสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ สมบัติที่เป็นส่วนสำคัญ 2 ประการของซิลิกาที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้ซิลิกาในการเสริมแรงคือ ขนาดอนุภาค (particle size) และ ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ (extent of hydration) พื้นที่ผิวจำเพาะของซิลิกาสามารถเป็นองค์ประกอบที่ใช้บ่งบอกประสิทธิภาพของซิลิกาที่จะใช้เป็นสารเติมแต่งได้

สมบัติที่สำคัญของซิลิกาที่เกี่ยวข้องกับการเสริมแรงในยางคือ ขนาดอนุภาค ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กจะให้ความต้านทานต่อการดึง การฉีกและการเสียดสีที่สูง ขนาดอนุภาคที่แท้จริงต่อหน่วยการเสริมแรงไม่ใช่ขนาดของแต่ละอนุภาค แต่เป็นขนาดของการเกาะตัวกันเป็นกลุ่ม อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะให้การเกาะตัวกันเป็นกลุ่มที่เล็ก ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะให้

การเกาะตัวเป็นกลุ่มที่ใหญ่ ขนาดของอนุภาคเป็นสมบัติที่มีความจำเป็น เพื่อให้สะดวกและใช้งานได้ง่ายจึงแบ่งชนิดของซิลิกาด้วยพื้นที่ผิวซึ่งแสดงในหน่วยตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g)

ความชื้นหรือพันธะไฮดรอกซีของน้ำเป็นสมบัติที่สำคัญรองลงมาของซิลิกา เนื่องจากความชื้นจะมีผลต่อการนำซิลิกาไปใช้ในลักษณะงานต่างๆ ซึ่งความชื้นจะอยู่ในรูปของความหนาแน่นของหมู่ซิลินอลหรือช่องว่างอิสระสำหรับความชื้น (Free moisture) โดยทั่วไปซิลิกาสามารถพิจารณาเป็นพอลิเมอร์ของกรดซิลิซิก (Silicic acid) ซึ่งโครงสร้าง 3 มิติจะเป็นลักษณะการเชื่อมกันของ SiO_4 แบบเตตระฮีดรัล (Tetrahedrals) โครงสร้างบริเวณพื้นผิวจะประกอบไปด้วยหมู่ไซลอกเซน (Siloxane: $-Si-O-Si$) และหมู่ซิลินอล (Silanol: $-Si-OH$) ดังแสดงในภาพที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเชื่อมโยงของหมู่ซิลินอลด้วยพันธะไฮโดรเจน

การนำซิลิกาไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม นิยมใช้ซิลิกาในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ โดยจะใช้ใน 3 ส่วนหลักดังนี้

1. ในส่วนของยางล้อที่ถูกลนหรือยางล้อดอก เมื่อเติมซิลิกาผสมกับคาร์บอนแบลค (Carbon black) ลงไปจะสามารถปรับปรุงความต้านทานต่อการสึก และป้องกันยางจากการขาดเนื่องจากการใช้งาน
2. ในสารประกอบเส้นใยและสายเคเบิลเสริมเหล็ก เมื่อเติมซิลิการ่วมกับเรซอร์ซินอล (Resorcinol) และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ลงไปจะสามารถปรับปรุงความสามารถในการยึดเกาะระหว่างสารประกอบยางและเส้นใยหรือเหล็กที่ใช้เสริมแรง
3. เมื่อใช้ซิลิการ่วมกับสารคัปปลิงเอเจนต์ (Coupling agents) เช่น bis 3-triethoxyl silyl propyl tetrasulphide (TESPT) สามารถใช้แทนคาร์บอนแบลค จะได้อย่างล้อยารถที่สามารถเย็นตัวได้เร็วหลังจากการใช้งาน

2.6.2 กระบวนการผลิตซิลิกา [15]

มีเทคนิคการตกตะกอนมากมายที่ใช้เพื่อผลิตซิลิกา โดยทั่วไปซิลิกาที่ได้จากการตกตะกอน (Precipitated silica) จะถูกผลิตจากกระบวนการเปียก (Wet process) โดยเริ่มต้นจากสารละลาย อัลคาไลน์ซิลิเกต แต่นิยมใช้โซเดียมซิลิเกต ซึ่งซิลิกาจะถูกตกตะกอนได้โดยการเติม

กรด เมื่อเติมกรดควรจะกวนผสมอย่างรวดเร็วในถังทำปฏิกิริยา เพื่อป้องกันการเกิดบริเวณที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่ำ ซึ่งจะเป็นบริเวณที่จะเกิดเจล (Gelation) ขึ้น

อัตราการเกิดปฏิกิริยา และการเกิดอนุภาคสามารถพิจารณาจากวิถีทางการตกตะกอนในกระบวนการ เมื่อซิลิกาละลายจะเกิดเป็นซิลิกาที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 9 ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะถูกละลายอย่างต่อเนื่องในระหว่างกระบวนการ ดังนั้นขนาดของอนุภาคที่มีลักษณะเดียวกันจะยังคงอยู่ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะเกาะตัวเป็นกลุ่มผ่านโครงสร้างซิลอกเซน (Siloxane) เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายแบบ 3 มิติ ซึ่งจะต้านทานต่อแรงอัดในระหว่างการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีหลายลักษณะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสัดส่วนของสารตั้งต้น, เวลาในการทำปฏิกิริยา, อุณหภูมิและความเข้มข้น เมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องเปลี่ยนแปลงไปพื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ระหว่าง 50-700 m²/g ส่วนโครงสร้างและสมบัติทางเคมีเช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ความหนาแน่นของหมู่ซิลินอล และสมบัติที่สังเกตได้ด้วยตา เราสามารถควบคุมได้ ส่วนผลที่ขึ้นซึ่งเป็นผลจากการตกตะกอนจะถูกบีบเข้าสู่เครื่องอัดกรอง (Filter press) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นเค้ก ซึ่งมีของแข็งเป็นส่วนประกอบ 20% โดยน้ำหนัก การเกิดเกลือขึ้นในระหว่างกระบวนการจะถูกกำจัดออกไปในขั้นตอนนี้ด้วย ส่วนน้ำที่หลงเหลืออยู่จะถูกกำจัดออกไปโดยการระเหย จากนั้นทำให้แห้งโดยการส่งเข้าเครื่องสเปรย์ดรายเออร์ (Spray driers) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเป็นทรงกลมมากขึ้น และซิลิกาจับตัวกันเป็นกลุ่มหลวมๆ ในที่สุดแล้วผลิตภัณฑ์ที่แห้งแล้วจะถูกนำไปบดและร่อนด้วยตะแกรง เพื่อลดขนาดการเกาะตัวกันของซิลิกาและแยกผลิตภัณฑ์ออกจากสิ่งปนเปื้อนหลังจากการกรอง ล้างและอบแห้งแล้วผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบไปด้วย 86-88% ซิลิกอน ไดออกไซด์ (SiO₂) ซึ่งเป็นน้ำ 10-12% โดยครึ่งหนึ่งจะเป็นโครงสร้างทางเคมีของน้ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของผงแป้ง ผงอนุภาคของซิลิกาจะประกอบไปด้วยอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดการเกาะตัวเป็นกลุ่มของอนุภาคเล็ก ๆ ขนาด 50 นาโนเมตร

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Disuke และคณะ [17] เตรียมยางแห้งจากน้ำยางธรรมชาติโดยใช้เครื่องฟั่นฝอยแบบการเผาไหม้แบบพัลส์ (Pulse combustion) โดยภาวะของเครื่องที่ใช้คือ ความถี่ของเครื่อง 250 – 1200 Hz และ อุณหภูมิ 40-100 องศาเซลเซียส น้ำยางชั้นที่ใช้มี %DRC อยู่ระหว่าง 20-50% เนื่องจากถ้าใช้น้ำยางชั้นที่มากกว่า 60 %DRC จะมีปัญหาด้านการติดของยางกับห้องอบในระหว่างการฟั่นฝอย เนื่องจากยางมีความหนืดสูงเกินไป จากการผลทดลองพบว่าวิธีนี้สามารถลดขั้นตอนและเวลาการผลิตยางแห้งลง โดยสามารถทำยางแห้งจากน้ำยางชั้นปริมาตร 5 ลิตร ในเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นน้ำยางแห้งที่ได้จากวิธีนี้ไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้าน ความต้านทานแรงดึง

ระยะยืดตัวที่จุดขาด และมอดูลัสของยางแห้งแล้วนำมาเปรียบเทียบยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheets) พบว่ายางทั้ง 2 ชนิดให้สมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกัน

Masaki และคณะ [18] ได้ทำการแก้ปัญหาด้านการติดกันและจับตัวรวมเป็นก้อนของยางสไตรีนบิวตาไดอีนภายในเครื่องพ่นแห้ง ด้วยการเพิ่มค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) ของยางสไตรีนบิวตาไดอีน โดยการกราฟต์พอลิเมอร์กับยาง และลดการติดของยางในห้องอบโดยการพ่นโคพอลิเมอร์อีกชนิดที่แข็งและไม่ยืดหยุ่นเข้าร่วม ในขณะเดียวกันจะมีการเติมซิลิกาเข้ามาบริเวณผนังของเครื่องพ่นแห้งด้วย พบว่าการติดกันของยางภายในเครื่องพ่นแห้งจะน้อยลงเนื่องจากโคพอลิเมอร์ที่แข็งและไม่ยืดหยุ่นจะเข้ามาจับกับน้ำยางในขณะที่เป็นละอองอย่างรวดเร็วส่งผลให้ผิวยางแห้งที่ได้ถูกเคลือบด้วยโคพอลิเมอร์ที่แข็งและไม่ยืดหยุ่นทำให้ยางไม่เหนียวติดกันเมื่อโดนความร้อน และพบว่ายางที่ได้มีอนุภาคขนาดเล็กกว่าวิธีที่ไม่ใช้โคพอลิเมอร์ที่แข็งและไม่ยืดหยุ่นเข้าร่วม เนื่องจากโคพอลิเมอร์ที่แข็งและไม่ยืดหยุ่นจะเข้ามาเกาะแทกและจับกับยางอย่างรวดเร็วยางจึงแห้งได้เร็ว ส่งผลให้อนุภาคยางที่ได้มีขนาดเล็ก

Wang และคณะ [19] เตรียมยางคอมพอสิตแบบผงระหว่างยางธรรมชาติกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes, CNT) โดยใช้เครื่องพ่นแห้ง ซึ่งได้ยางที่มีอนุภาคเฉลี่ย $5 \mu\text{m}$ โดยยางที่ได้มีลักษณะกลม และพบว่าการแตกตัวของ CNT ในยางธรรมชาติดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การเตรียมโดยใช้วิธีทั่วไป การใช้ CNT ที่ปริมาณเหมาะสมที่สุดที่ให้สมบัติเชิงกลสูงจะอยู่ที่ 10-25 phr และเมื่อเพิ่ม CNT ถึง 30 phr การรวมตัวเป็นก้อนของ CNT จะมีมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลยางคอมพอสิตลดลง และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ปริมาณสารคงรูปเทียบกับวิธีทั่วไป การเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (ผสม CNT และ สารวัลคาไนซ์ในน้ำยาง) โดยใช้เครื่องพ่นแห้งจะใช้ปริมาณสารคงรูปมากกว่าประมาณ 1.5 เท่าเนื่องจากเมื่อใช้เครื่องพ่นแห้งการกระจายตัวของ CNT ในยางจะดีขึ้นทำให้เกิดการจับกันระหว่าง CNT กับโมเลกุลของน้ำยางมากขึ้น ส่งผลให้การ ใช้สารคงรูปมากขึ้นตามไปด้วยในขณะที่การใช้วิธีทั่วไปต้องผสม CNT กับยางแห้งทำให้การแตกตัวของ CNT ในเนื้อยางไม่ดี

Zhou และคณะ [20] เตรียมยางคอมพอสิตของยางสไตรีนบิวตาไดอีนและ CNT โดยใช้เทคนิคการพ่นแห้ง ได้ยางที่มีลักษณะกลมและมีขนาดอนุภาคประมาณ $10 \mu\text{m}$ และศึกษาสมบัติเชิงกลของยางที่ได้พบว่า การเตรียมยางสไตรีนบิวตาไดอีนคอมพอสิต โดยใช้เครื่องพ่นแห้งมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นกว่าการเตรียมยางคอมพอสิตโดยใช้วิธีดั้งเดิม ผลของ CNT ต่อสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็งและค่าทนการฉีกขาดของยางคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม CNT ลงไป และเมื่อเปรียบเทียบค่าทั้งสามระหว่างยาง SBR กับยางคอมพอสิตที่มี CNT 60 phr พบว่ายางยางสไตรีนบิวตาไดอีน-CNT คอมพอสิตมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น 73.9% ค่าความ

แข็งแรงเพิ่มขึ้น 327.7% ค่าทนการฉีกขาดเพิ่มขึ้น 191.1% ซึ่งสมบัติเหล่านี้เพิ่มขึ้นเนื่องจากการ CNT ที่ใช้ในการเสริมแรงในยางมีแตกตัวในยางดีขึ้น

สมเจตน์ และคณะ [21] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเติมแต่งผสมระหว่างซิลิกาและ แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อสมบัติการผสม สมบัติเชิงกล กายภาพ และโครงสร้างจุลภาค รวมถึง ปริมาณการดูดซับไทลูอินของยางธรรมชาติที่มีลักษณะโฟม (Cellular natural rubber) ซึ่งผ่าน กระบวนการอัดขึ้นรูปในระบบวัลคาไนเซชันแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanisation ; CV) พบว่ายางโฟมที่ผสมซิลิกาในปริมาณเท่ากับ 20 phr ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความ ต้านทานต่อการขาดสูงสุด และปริมาณการดูดซับสารละลายที่ภาวะสมดุลมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ ซิลิกาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผสมไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณ การดูดซับสารละลายที่ภาวะสมดุล เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่ายาง โฟมที่มีซิลิกาผสมในปริมาณ 20 phr ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง สมบัติความต้านทานต่อ การขาดและปริมาณการดูดซับสารละลายที่ภาวะสมดุลดีขึ้น และเริ่มลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาสูง กว่า 20 phr



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	หน้าที่	ที่มา
น้ำยาธรรมชาติชนิดเข้มข้น	เป็นวัตถุดิบหลักในงานวิจัย	สถาบันวิจัยยาง
ยางแท่ง (STR 5L)	เป็นตัวเปรียบเทียบกับยางผง	ยูเนี่ยนรับเบอร์ จำกัด
โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS)	สารลดแรงตึงผิว	Ajax Finechem LTD.
โนนิลฟีนอลเอทท็อกซาเลต (NP9)	สารลดแรงตึงผิว	Fluka CO., LTD.
ซิลิกา (Silica)	สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ	Pan Innovation LTD.
Silane coupling agent Si-69	ยึดเกาะระหว่างซิลิกากับยาง	Pan Innovation LTD.
กรดสเตียริก (Stearic acid)	สารกระตุ้นสำหรับสารตัวเร่ง	Pan Innovation LTD.
ซัลเฟอร์ (Sulphur)	สารวัลคาไรไนซ์	Pan Innovation LTD.
Polyethylene glycol (PEG 4000)	ตัวกระตุ้นสำหรับยางที่ใช้ซิลิกา	Pan Innovation LTD.
ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ชนิด white seal	ตัวกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไรไนซ์	Pan Innovation LTD.
เตตระเมทิลไทูแรมโมโนซัลไฟด์ (TMTM)	สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไรไนซ์	Pan Innovation LTD.
ไธเบนโซไรโอซิลไดซัลไฟด์ (MBTS)	สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไรไนซ์	Pan Innovation LTD.

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1. เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมยางผง

- 3.2.1.1 เครื่องพ่นแห้ง (Spray dryer) Mini spraydryer รุ่น B-191 บริษัท Buchi, ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
- 3.2.1.2 เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) บริษัท IKA Laboratory, ประเทศไทย
- 3.2.1.3 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Cooling water bath) บริษัท Scientific Promotion, ประเทศไทย

3.2.1.4 ตู้อบแบบสุญญากาศ (Vacuum oven) บริษัท Scientific Promotion
ประเทศไทย

3.2.2. เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นทดสอบ

3.2.2.1 เครื่องผสมแบบระบบปิด (Internal mixer) Brabender Plasti-Corder
รุ่น PL 2000, ประเทศเยอรมัน

3.2.2.2 เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression moulding) รุ่น LP 20 บริษัท Lab
Tech, ประเทศไทย

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.3.1 เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึงยืดดเนกประสงค์ (Universal Testing
Machine) รุ่น TS-2000 บริษัท Ektron Tek, ประเทศไทย

3.2.3.2 เครื่องทดสอบหาเวลาและลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสม
(Rotorless rheometer, MRD type) รุ่น EKT-2000 บริษัท Ektron Tek,
ประเทศไทย

3.2.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron
microscope: SEM) รุ่น JSM-6400 บริษัท JEOL, ประเทศญี่ปุ่น

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ

3.3.1 ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำยางแห้งโดยใช้เครื่องพ่นแห้ง

3.3.1.1 ทดลองหาภาวะเบื้องต้นของเครื่องพ่นแห้งที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของ
ยางแห้งและค่าความชื้นของยางแห้ง โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า
อัตราเร็วการป้อนสารตัวอย่าง และอัตราการไหลของอากาศ เพื่อนำไปใช้ออกแบบการทดลองเชิง
แฟกทอเรียลแบบ 2^k

3.3.1.2 นำข้อมูลเบื้องต้นจากข้อ 3.3.1.1 มาออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบ
หาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการทดลองที่ให้ร้อยละผลได้ของยางแห้งสูงที่สุดและค่าความชื้นของยาง
แห้งต่ำที่สุด โดยวิธีออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^5 ซึ่งระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่
ที่ "ต่ำ" และ "สูง" ปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบไปด้วย อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 130-170 องศา
เซลเซียส อัตราการป้อนสารตัวอย่าง 3-6 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 500-800

ลิตรต่อชั่วโมง ร้อยละเนื้อยางแห้ง 20-40 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณสารลดแรงตึงผิว (SDS) 5-15 phr จากการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียลได้ภาวะการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.1

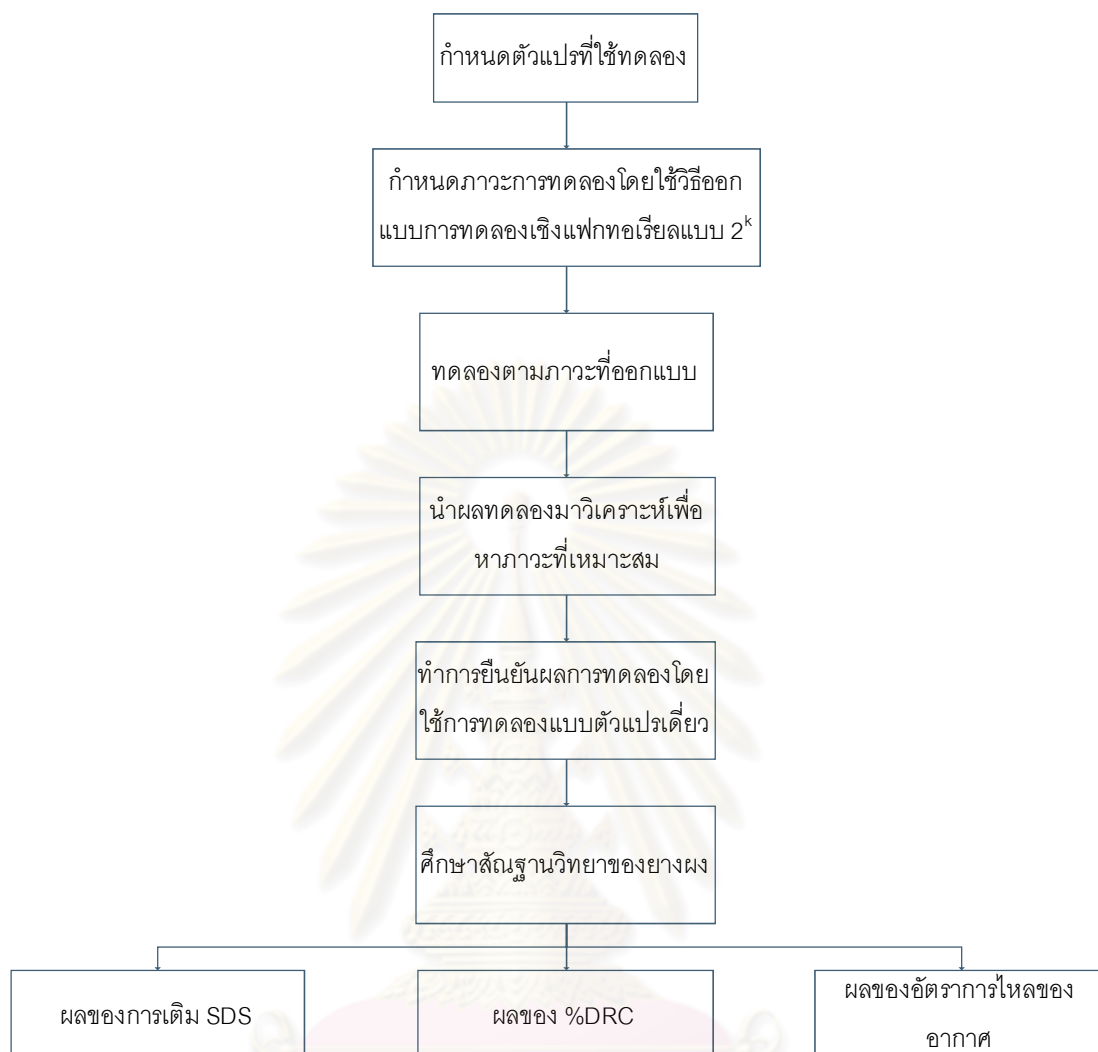
3.3.1.3 ทำการทดลองตามภาวะที่ได้จากข้อมูลตามข้อ 3.3.1.2 โดยนำ SDS ปริมาณตามภาวะที่ออกแบบการทดลองมาละลายในน้ำปราศจากไอออน กวนผสมเป็นเวลา 10 นาที จนได้สารละลายใสจากนั้นนำน้ำยางเข้มข้น 60 %DRC มาผสมในสารละลายจนได้ปริมาณ %DRC ที่ต้องการ กวนผสม 10 นาที นำน้ำยางที่ได้ไปพ่นแห้งตามภาวะที่ออกแบบการทดลอง แล้วเก็บยางแห้งจากภาชนะจัดเก็บของเครื่องพ่นแห้งมาหาร้อยละผลได้และค่าความชื้นของยางแห้งโดยวิธีวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis, ภาคผนวก ก)

3.3.1.4 ทำการประมวลผลการทดลองทางสถิติโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Design Expert 6 ในการคำนวณ เพื่อหาความสำคัญของแต่ละตัวแปรที่ศึกษา จากนั้นนำตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการทำยางแห้งมาออกแบบการทดลองอีกครั้งโดยเทคนิค CCD และทำการสร้างสมการเพื่อหาภาวะที่ดีที่สุดในการทำยางแห้งโดยใช้เครื่องพ่นแห้ง

3.3.1.5 ทดลองเพื่อยืนยันผลและหาภาวะที่เหมาะสมในการทำยางแห้งที่ถูกต้อง โดยการทำการทดลองแบบตัวแปรเดียว (Univariate experiment) ค่าที่ใช้ในการทดลองจะครอบคลุมภาวะที่ให้จุดสูงสุดในการทำยางแห้งที่ได้จากการทดลองโดยวิธีออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

3.3.1.6 นำยางแห้งที่ได้จากภาวะที่ดีที่สุดของการทดลองมาศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ของยางแห้งโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศ ต่อขนาดอนุภาคของยางแห้งโดยค่าอัตราการไหลของอากาศผ่านหัวพ่นที่ทำการศึกษาคือ 600, 700 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง แสดงขั้นตอนการหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางแห้งดังรูปที่ 3.1

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการหาภาวะที่เหมาะสมของการเตรียมยางแห้ง

3.3.2 การเตรียมยางคอมปาวด์

นำยาง จำนวน 100 กรัมมาผสมกับสารเคมีในเครื่องผสมระบบปิด (Barbender) ตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของห้องผสมเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์เท่ากับ 40 รอบต่อนาที โดยผสมสารเคมีตามลำดับ (ดังแสดงในตารางที่ 3.2) จะได้ยางคอมปาวด์ จากนั้นนำยางคอมปาวด์ไปหาเวลาในการวัลคาไนเซชันโดยใช้เครื่อง Moving die rheometer (MDR) แล้วนำไปทำการวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด ให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลศึกษาสมบัติเชิงกล สำหรับการเตรียมยางคอมปาวด์ในแต่ละสูตรแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยขั้นตอนการเตรียมยางคอมปาวด์ในแต่ละสูตรสรุปได้ดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล

ภาวะทดลองที่	ตัวแปรที่ศึกษา					ปริมาณของ SDS (phr)
	อุณหภูมิมีร่อน ขาเข้า ($^{\circ}\text{C}$)	อัตราการป้อน สาร (ml/min)	อัตราการไหลของ อากาศ (Lh^{-1})	เปอร์เซ็นต์เนื้อยาง (%)		
1	170	3	800	40	15	
2	170	6	800	20	15	
3	130	6	800	40	5	
4	130	6	500	40	5	
5	130	3	800	20	15	
6	130	3	500	20	15	
7	130	6	500	20	5	
8	150	4.5	650	30	10	
9	150	4.5	650	30	10	
10	130	3	500	20	5	
11	130	6	800	20	15	
12	170	6	500	40	5	
13	150	4.5	650	30	10	
14	130	6	500	20	15	
15	170	6	500	40	15	
16	170	3	800	20	5	
17	170	3	500	20	15	
18	170	6	500	20	15	
19	130	3	800	20	5	
20	130	6	500	40	15	
21	170	3	500	40	5	
22	130	3	500	40	5	
23	170	6	800	40	15	
24	170	3	800	40	5	
25	170	3	500	40	15	
26	130	3	500	40	15	
27	170	6	800	20	5	
28	170	3	500	20	5	
29	130	6	800	40	15	
30	130	3	800	40	15	
31	170	3	800	20	15	
32	130	3	800	40	5	
33	170	6	500	20	5	
34	170	6	800	40	5	

ตารางที่ 3.2 สูตรการเตรียมยางคอมปาวด์

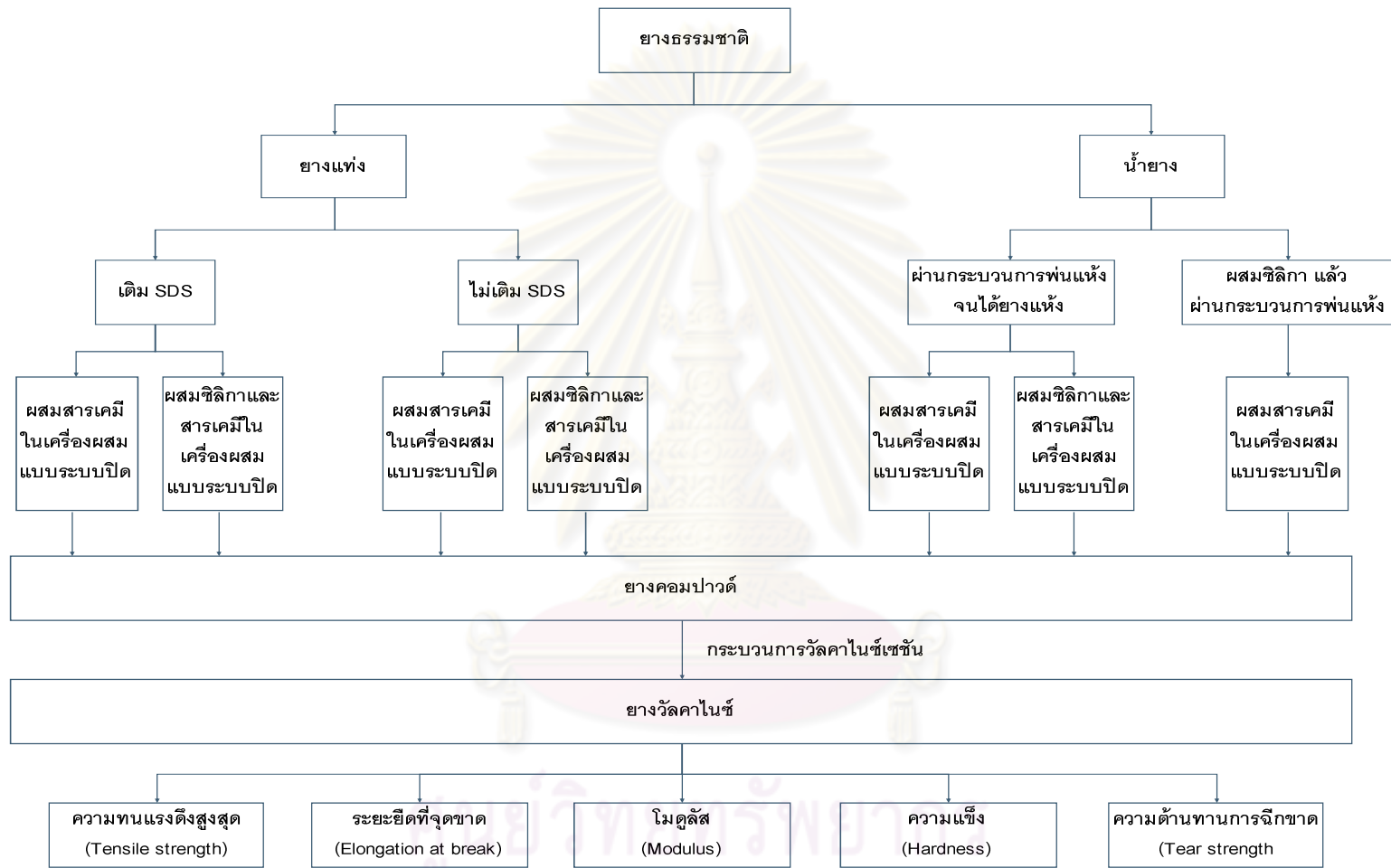
สาร	ปริมาณที่ใช้ (phr)						
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 6	สูตร 7
	STR	STRs	NRP	STR/Si	STRs/Si	NRP/Si	P(NR/Si)
ยางแท่ง	100	100	-	100	100	-	-
ยางแห้งจากเครื่องพ่นแห้ง	-	-	100	-	-	100	-
น้ำยางผสมซิลิกาผ่านเครื่องพ่นแห้ง	-	-	-	-	-	-	125
SDS ¹	-	12	12 ²	-	12	12 ²	12 ²
Silica	-	-	-	25	25	25	
Silane Si-69	-	-	-	2.0	2.0	2.0	2.0
Stearic acid	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Zinc oxide white seal	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
PEG 4000	-	-	-	2.0	2.0	2.0	2.0
TMTM ³	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
MBTS ⁴	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Sulphur	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8

¹ Sodium dodecyl sulfate,

² ผสมในน้ำยางแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้ง,

³ Tetramethylthiuram monosulfide,

⁴ Dibenzothiazole disulphide



รูปที่ 3.2 กระบวนการผสมยางธรรมชาติกับสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

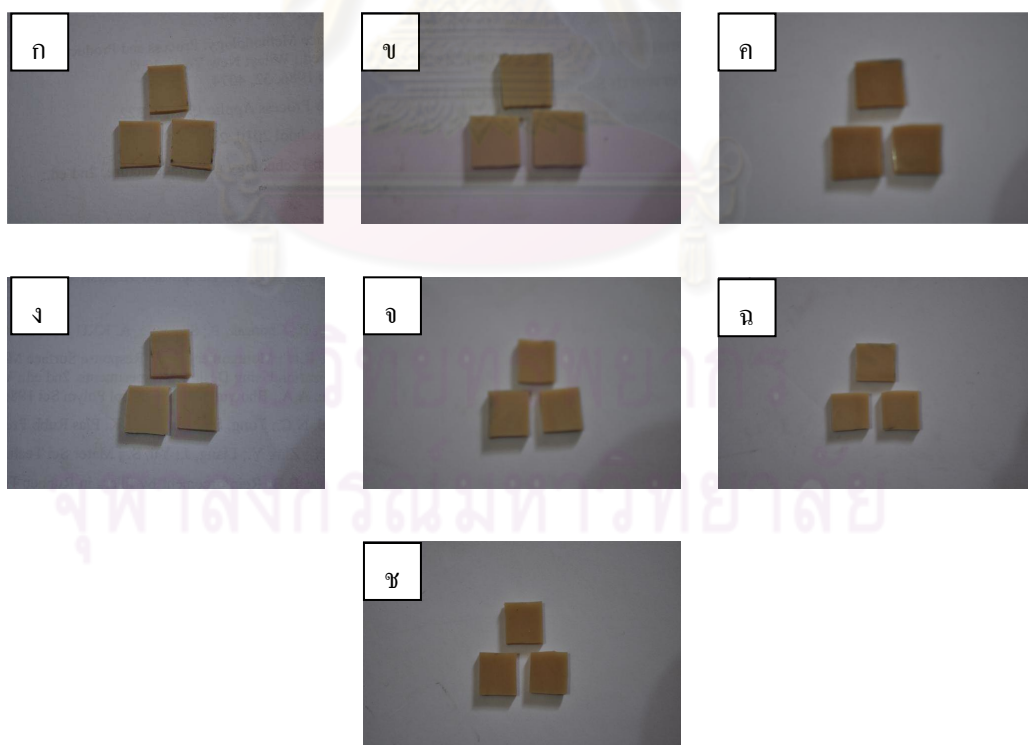
3.4 การศึกษาสมบัติของยางคอมปาวด์และสมบัติเชิงกล

3.4.1. การศึกษาคุณลักษณะการทำให้ยางคงรูป (Cure characteristics)

นำยางคอมปาวด์มาทดสอบค่า ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch time) และ ระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป (Cure time) เพื่อดูลักษณะการทำให้ยางคงรูปของยางผสม และเพื่อนำข้อมูลไปใช้ในขั้นตอนการวัลคาไนเซชัน โดยใช้เครื่อง Monsanto moving die rheometers (MDR) ในการทดสอบ โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 155 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

3.4.2. การศึกษาร้อยละการบวมตัว (% Swelling)

นำยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ที่ได้ในแต่ละสูตรมาทดสอบการบวมตัวของชิ้นงาน โดยนำยางมาตัดให้มีขนาด $1 \times 1 \times 0.2$ เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้นต่อ 1 สูตรการทดลอง (รูปที่ 3.3) แล้วนำมาซึ่งน้ำหนักหลังจากนั้นนำไปแช่ในโทลูอีนที่บรรจุในภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิด มีปริมาณโทลูอีน 30 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นนำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณร้อยละการบวมตัวดังสมการ 3.1



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานเตรียมทดสอบร้อยละการบวมตัว (ก) ยางแท่ง (ข) ยางแท่งผสม (ค) SDS ยางผง (ง) ยางแท่งผสมซีลิกา (จ) ยางแท่งผสม SDS และ ซีลิกา (ฉ) ยางผงผสมซีลิกา

(ข) ยางผสมซีลิกาผ่านกระบวนการพ่นแห้ง

$$\% \text{Swelling} = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย m_0 = น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่ (กรัม)

m_1 = น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่ (กรัม)

3.4.3. การทดสอบสมบัติการดึง (Tensile test)

การทดสอบสมบัติการดึงยึดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412 (Die C) ชิ้นทดสอบจะได้จากการนำยางที่อัดเป็นแผ่นมาตัดด้วยเครื่องขึ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึง โดยชิ้นทดสอบจะมีรูปทรงแบบดัมเบล (Dumbbell specimen) แสดงในรูปที่ 3.4 จากนั้นทำการวัดความหนาของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนา 3 ตำแหน่ง คือ บริเวณตรงกลางและบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทั้งสองด้านของชิ้นทดสอบ โดยใช้ค่ากลาง (median) เป็นค่าความหนาในการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ การทดสอบทำได้โดยนำชิ้นทดสอบไปดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) โดยใช้ load cell ขนาด 1000 N อัตราการดึงที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที จนชิ้นงานแยกขาดจากกัน สมบัติที่ทำการศึกษได้แก่ ความทนแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) ระยะเวลาที่ยืดที่จุดขาด (Elongation at break) และ โมดูลัส (Modulus) ซึ่งสมบัติต่างๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.2)-(3.4)

$$\text{ความทนแรงดึงสูงสุด} \quad TS = \frac{F_u}{A} \quad (3.2)$$

$$\text{ระยะเวลาที่ยืดที่จุดขาดร้อยละ} \quad \%EB = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{โมดูลัส} \quad M = \frac{F/A}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

เมื่อ TS (Tensile strength) คือ ความทนแรงดึงสูงสุด (MPa)

EB (Elongation at break) คือ ระยะเวลาที่ยืดที่จุดขาด (%)

M (Modulus) คือ โมดูลัส (MPa)

F_u (Force Max) คือ แรงดึงสูงสุด (N)

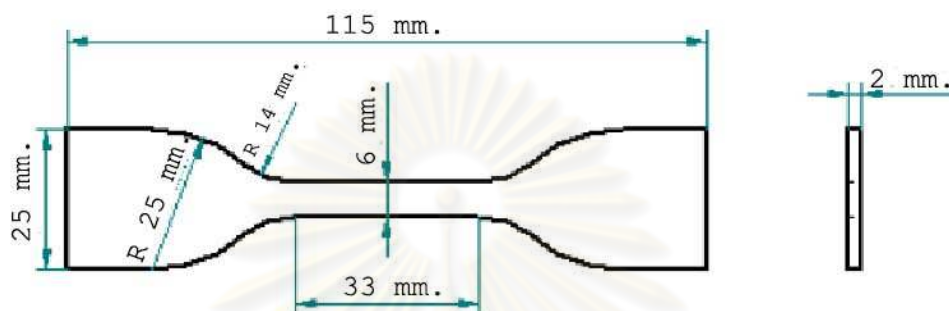
F (Force) คือ แรงที่ทำให้ยางยืดออกจนได้ระยะยืดที่กำหนด (N)

A (Area) คือ พื้นที่หน้าตัดเดิม (mm^2)

L_u (Final gauge length) คือ ความยาวเมื่อขยายขาด (mm)

L_0 (Original gauge length) คือ ความยาวเดิม (mm)

ε (Strain) คือ ความเครียด



รูปที่ 3.4 ชิ้นทดสอบแบบดัมเบล ASTM D412 (Die C)

3.4.4. การทดสอบสมบัติความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength)

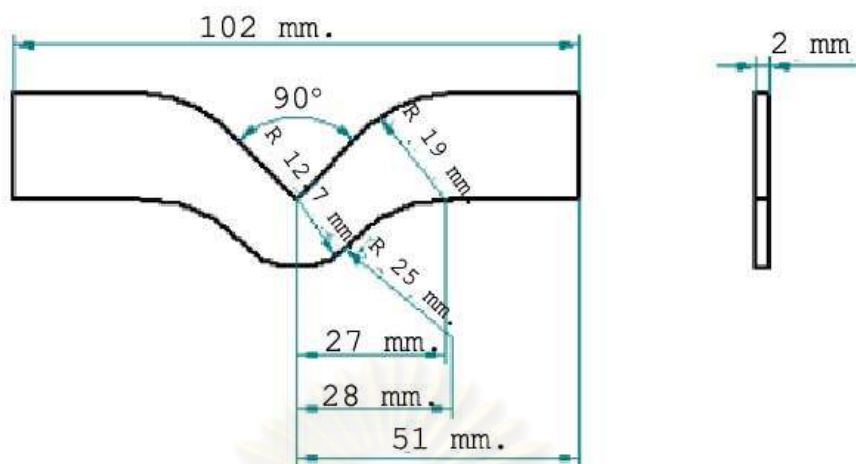
ความต้านทานการฉีกขาดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D624-81 โดยการนำยางที่อัดเป็นแผ่นมาตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานทดสอบสำหรับทดสอบความต้านทานการฉีกขาด ชิ้นทดสอบจะเป็นแบบมุม มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.5 ทำการวัดความหนา ชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่ง แล้วใช้ค่ากลาง เป็นค่าความหนาของชิ้นทดสอบเพื่อใช้ในการคำนวณหาความต้านทานการฉีกขาด โดยจะใช้อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดสอบจะอยู่ในรูปของค่าความต้านทานการฉีกขาด คำนวณได้ตามสมการที่ (3.5)

$$T_s = \frac{F}{t} \quad (3.5)$$

เมื่อ T_s คือ ความต้านทานการฉีกขาด (kN/m)

F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นงานขาด (N)

t คือ ความหนาของชิ้นงาน (mm)



รูปที่ 3.5 ชิ้นทดสอบแบบมุม ASTM D624

3.4.5. การทดสอบความแข็ง (Hardness)

การทดสอบความแข็งจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยใช้เครื่อง Durometer (Shore A) แล้วทำการวัดความแข็งของยางที่ตำแหน่งต่างๆ กัน 5 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.4.6. ศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาในเนื้อยาง

เป็นการศึกษาว่าอนุภาคซิลิกากระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อยางหรือไม่ โดยนำยางคอมปาวด์ผสมซิลิกาที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์แล้วมาทดสอบ โดยทำการหักชิ้นงานหลังจากแช่ในไนโตรเจนเหลว 2 นาที หลังจากนั้นทำการเคลือบทองบนชิ้นทดสอบ แล้วนำไปส่องดูพื้นที่บริเวณหน้าตัดเพื่อสังเกตการณ์กระจายตัวของซิลิกาในเนื้อยางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM รุ่น JSM-6400 บริษัท JEOL, ประเทศญี่ปุ่น) ภายใต้ภาวะสุญญากาศ ด้วยกระแสไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า แล้วทำการเลือกภาพบริเวณที่ต้องการ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตยางธรรมชาติแบบผงโดยใช้เครื่องพ่นแห้ง โดยศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า อัตราเร็วการป้อนสารตัวอย่าง อัตราการไหลของอากาศผ่านหัวพ่น ร้อยละเนื้อยางแห้ง และปริมาณสารลดแรงตึงผิว (SDS) โดยใช้วิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k จากนั้นจึงนำayangผงที่ได้มาศึกษาด้านสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกลของยางคงรูปที่ผสมและไม่ผสมสารตัวเติมชนิดซิลิกาทางด้าน ค่าทนแรงดึงสูงสุด ระยะยืดที่จุดขาด ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300% ความแข็ง และความทนต่อการฉีกขาด สุดท้ายนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับยางแท่งเกรด 5L (STR 5L)

4.1 การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^5

4.1.1 ผลการทดลองต่อร้อยละผลได้ของยางแห้ง

กำหนดสัญลักษณ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ผลของตัวแปรจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^5 ต่อร้อยละผลได้ยางแห้ง (ตารางภาคผนวก ข1) สามารถนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) แสดงในตารางภาคผนวก ข2 จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อกำหนดให้ข้อมูลการทดลองทั้งหมดมีการกระจายตัวแบบปกติโดยมีค่าที่ยอมรับได้ ตามสมมติฐานหลักอยู่ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% หรือมีค่า p-value เท่ากับ 0.05 โดยตัวแปรใดก็ตามที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จะถือว่าตัวแปรดังกล่าวมีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ยางแห้งอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาตัวแปรเดี่ยวและอันตรกิริยาระหว่างสองตัวแปรพบว่า ร้อยละเนื้อยางแห้ง ปริมาณ SDS อัตราการไหลของอากาศ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิลมร้อนขาเข้ากับร้อยละเนื้อยางแห้ง และ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิลมร้อนขาเข้ากับปริมาณ SDS มีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรดังกล่าวมีความสำคัญต่อระบบ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในส่วนของความโค้งกำลังสอง (Quadratic curvature) ของข้อมูลพบว่ามีค่า p-value มากกว่า 0.05 หมายความว่าความสัมพันธ์ระหว่างผลได้ผลิตภัณฑ์กับตัวแปรต่าง ๆ ไม่มีพจน์ยกกำลังสอง สามารถแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนเฉพาะตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละยางแห้งได้ดังตาราง 4.2

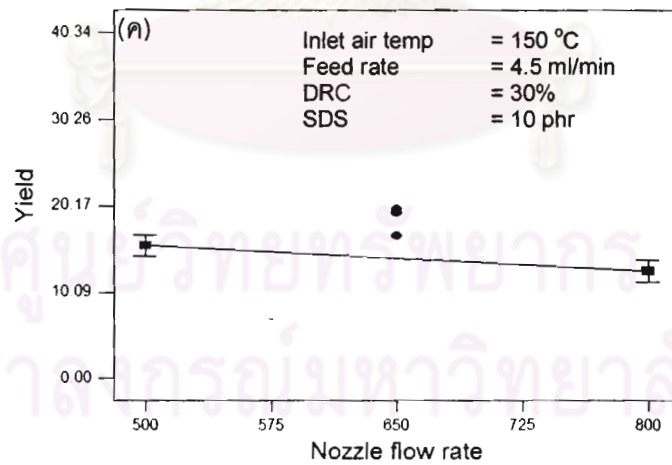
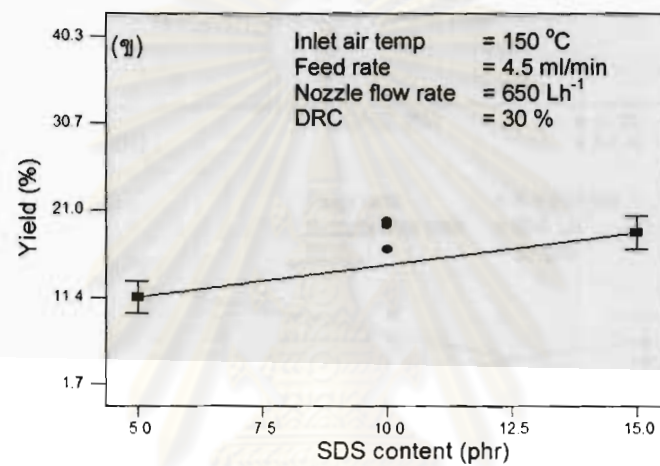
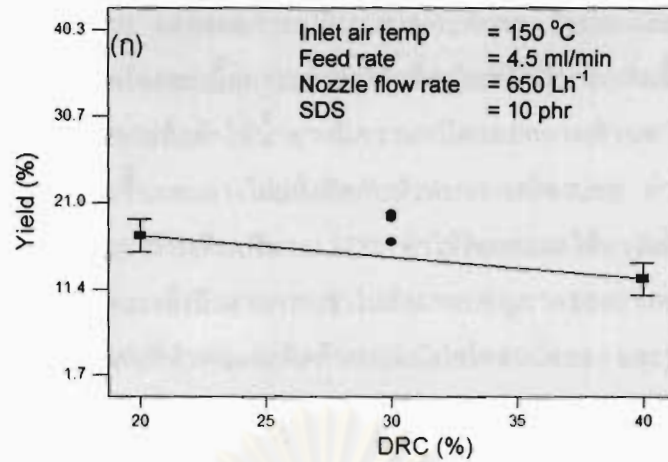
ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์แทนตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

สัญลักษณ์	ตัวแปรที่ศึกษา	ค่าที่ใช้ออกแบบการทดลอง	
		สูง	ต่ำ
A	ร้อยละเนื้อยางแห้ง (%)	20	40
B	ปริมาณ SDS (phr)	5	15
C	อุณหภูมิลมร้อนเข้า (°C)	170	130
D	อัตราการป้อนน้ำยาง (ml/min)	3	6
E	อัตราการไหลของอากาศ (Lh ⁻¹)	500	800

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของยางแห้ง

Source	Sum of Squares	DF ¹	Mean Square	F Value ²	Prob > F ³
Model	2275.036	8	284.3795	13.08371	< 0.0001
A	75.98534	1	75.98534	3.495928	0.0733
B	631.3829	1	631.3829	29.04862	< 0.0001
E	71.80846	1	71.80846	3.303758	0.0811
AC	476.5856	1	476.5856	21.92672	< 0.0001
BC	315.4409	1	315.4409	14.51278	0.0008
ACE	234.4485	1	234.4485	10.78649	0.0030
BCD	264.4457	1	264.4457	12.1666	0.0018
ABDE	204.9384	1	204.9384	9.428793	0.0051
Curvature	56.36315	1	56.36315	2.593152	0.1199
Residual	543.3846	25	21.73538		
Lack of Fit	537.6663	23	23.37679	8.176054	0.1146
Pure Error	5.718356	2	2.859178	13.08371	< 0.0001
Cor Total	2874.784	34	284.3795	3.495928	0.0733

¹ Degree of freedom, ² Test for comparing model variance with residual (error) variance, ³ probability value

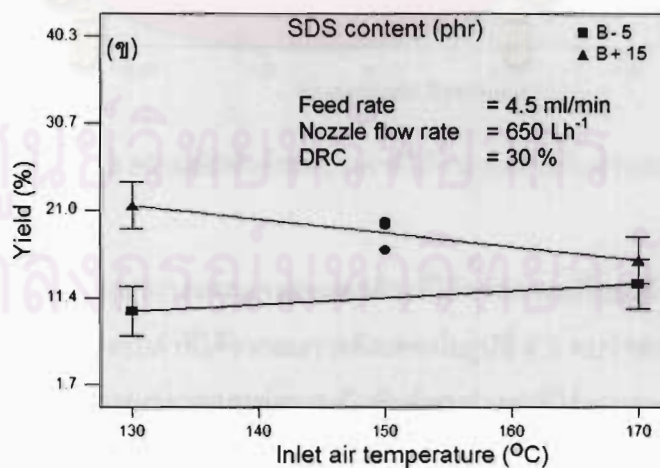
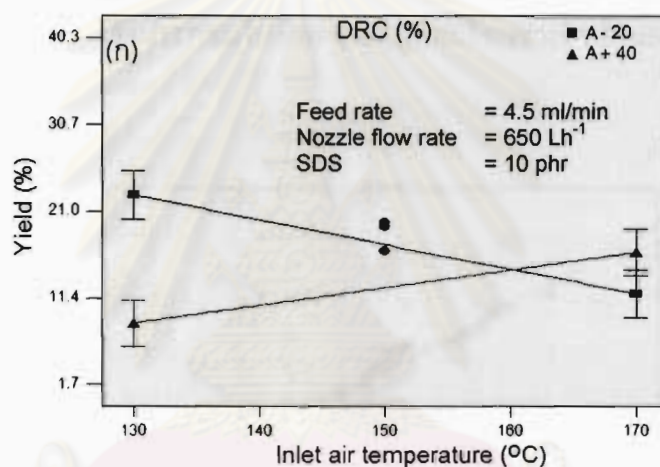


รูปที่ 4.1 (ก) ผลของร้อยละเนื้อยางแห้งต่อร้อยละผลได้อย่างแห้ง

(ข) ผลของปริมาณ SDS ต่อร้อยละผลได้อย่างแห้ง

(ค) ผลของอัตราการไหลของอากาศ ต่อร้อยละผลได้อย่างแห้ง

รูปที่ 4.1(ก) แสดงผลการเปลี่ยนแปลงระดับของ ร้อยละเนื้อมะพร้าวแห้งต่อร้อยละผลได้อย่างแห้ง พบว่าการลดร้อยละเนื้อมะพร้าวแห้งทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าการลด ร้อยละเนื้อมะพร้าวแห้งทำให้น้ำยางมีความหนืดและความต้านทานต่อการเคลื่อนที่น้อยลงส่งผลให้การพ่นง่ายขึ้นและยางไม่แห้งติดกับหัวพ่นของเครื่องพ่น ทำให้ได้ร้อยละผลได้อย่างแห้งเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.1(ข) การเพิ่มปริมาณ SDS ทำให้ร้อยละผลได้อย่างแห้งมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะ SDS ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวสามารถเข้าไปล้อมรอบอนุภาคของยางทำให้น้ำยางมีความเหนียวลดลง ทำให้น้ำยางแห้งที่หัวพ่นและติดค้างบนผนังไซโคลนน้อยลง และรูปที่ 4.1 (ค) พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศส่งผลให้ร้อยละผลได้อย่างแห้งลดลง คาดว่าการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้มีการกระจายของละอองฝอยของน้ำยางที่กว้างขึ้นทำให้น้ำยางติดที่ผนังห้องอบของตัวเครื่องพ่นแห้งได้มากขึ้นทำให้ร้อยละผลได้อย่างแห้งลดลง

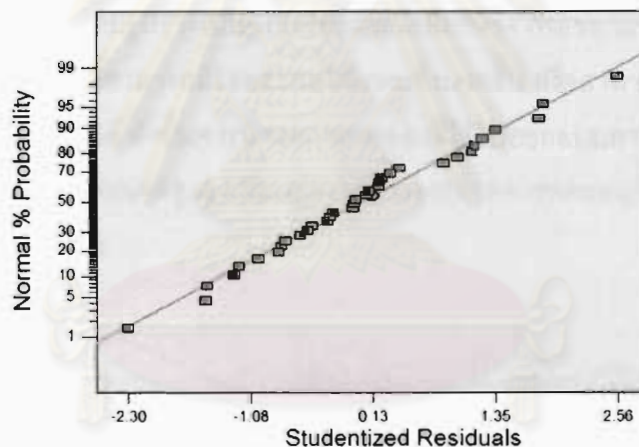


รูปที่ 4.2 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้อย่างแห้ง

(ก) อันตรกิริยาระหว่าง คุณหมุลมร้อนขาเข้ากับร้อยละเนื้อมะพร้าวแห้ง

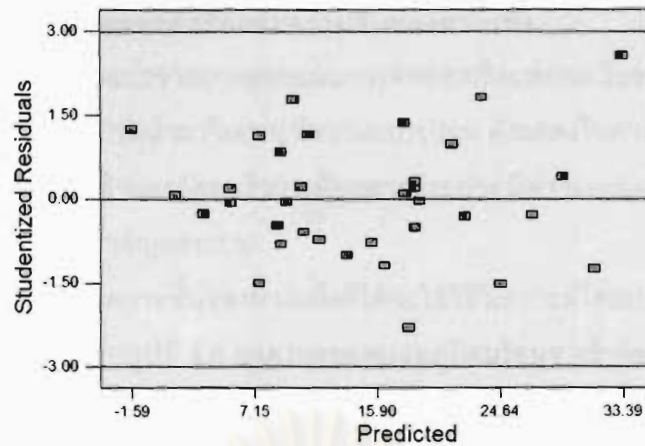
(ข) อันตรกิริยาระหว่างคุณหมุลมร้อนขาเข้ากับปริมาณ SDS

รูปที่ 4.2 แสดงผลของอันตรกิริยาที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละผลได้อย่างแข็ง พบว่าอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิหม้อน้ำเข้ากับร้อยละเนื้อยางแห้ง ให้ร้อยละผลได้สูงสุดเมื่อ ตัวแปรทั้งสองมีระดับลดลง (รูปที่ 4.2 (ก)) และอันตรกิริยาระหว่าง อุณหภูมิหม้อน้ำเข้า กับ ปริมาณ SDS (รูปที่ 4.2 (ข)) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณ SDS และการลดของอุณหภูมิหม้อน้ำเข้า ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของยางแห้งสูงขึ้น โดยทั้งสองความสัมพันธ์นี้พบว่ามีอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องกับผลของตัวแปรเดียวไม่พบว่าอุณหภูมิส่งผลต่อร้อยละผลได้อย่างแข็ง ซึ่งน่าจะมีผลมาจากตัวแปรในการทดลองที่มาก (5 ตัวแปร) อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในบางปัจจัย จึงควรนำตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้อย่างแข็งมาทำการศึกษาก่อน แต่ด้วยข้อจำกัดของเครื่องพ่นแห้งในเรื่องการปรับค่าของอัตราการไหลของอากาศได้เฉพาะในช่วงที่กว้างซึ่งเมื่อทำการปรับค่าให้ต่ำกว่า 600 ลิตรต่อชั่วโมง จะไม่สามารถทำให้น้ำยางเกิดเป็นละอองฝอยได้จึงได้เลือกจุดจากผลการทดลองที่ให้ค่าร้อยละผลได้อย่างแข็งสูงสุดมาใช้ในการทดลองคือ 600 ลิตรต่อชั่วโมง ดังนั้นตัวแปรที่นำมาศึกษาใหม่จึงประกอบไปด้วย อุณหภูมิหม้อน้ำเข้า ร้อยละเนื้อยางแห้งและ ปริมาณ SDS



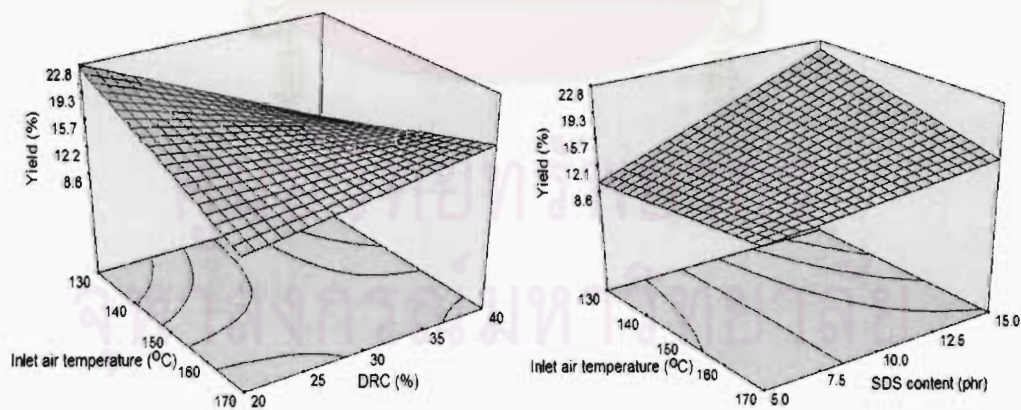
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากสมการกับส่วนตกค้าง

เมื่อพิจารณาการแจกแจงส่วนตกค้างที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าร้อยละผลได้อย่างแข็งที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และเมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากสมการกับส่วนตกค้างดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสมการดังกล่าวเป็นสมการที่อธิบายพฤติกรรมของข้อมูลการทดลองได้ดี



รูปที่ 4.4 การแจกแจงส่วนตกค้างที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการ

ผิวการตอบสนอง (Response surface) ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยจากการวิเคราะห์พบว่าภาวะที่ใช้ในการทำการทดลองยังไม่ครอบคลุมภาวะที่เหมาะสม เนื่องจากยังไม่เห็น (Project contour) ที่มีรูปร่างเป็นวงรีหรือวงกลมเต็มทั้งวง การขยายขอบเขตการทดลองออกไปอาจทำให้ได้ภาวะที่สามารถมีร้อยละผลได้สูงยิ่งมากขึ้น หรือสามารถหาภาวะที่ให้ร้อยละผลได้สูงยิ่งมากที่สุดได้ ดังนั้นควรนำผลการทดลองที่ได้ไปออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k อีกครั้งโดยให้บริเวณจุดสูงสุดเดิมอยู่ตรงกลางขอบเขตการทดลองเพื่อหาจุดที่ให้ร้อยละผลได้สูงยิ่งที่สุดที่แท้จริง



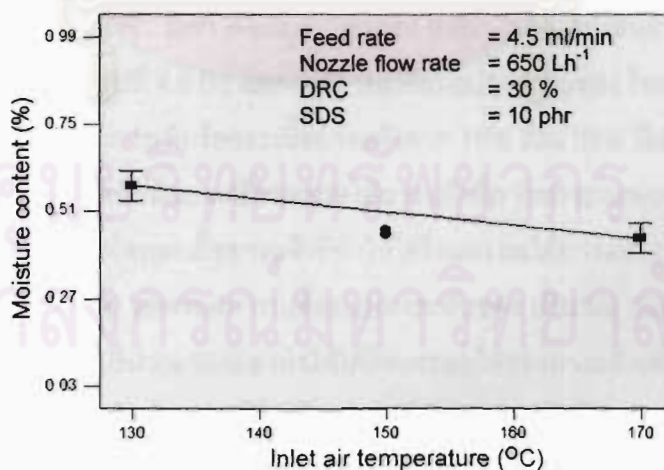
รูปที่ 4.5 ผิวการตอบสนองของร้อยละผลได้สูงยิ่งเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสองตัวแปร

4.1.2 ผลการทดลองต่อร้อยละความชื้นของยางแห้ง

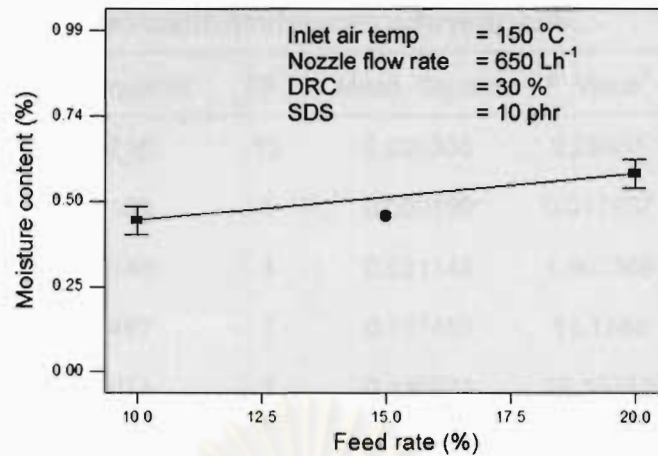
ผลของตัวแปรจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^5 ต่อร้อยละความชื้นของยางแห้ง สามารถนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากข้อมูลพบว่า คุณหมุมิลร้อนชาเข้าและอัตราเร็วการป้อนสารตัวอย่าง มีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรดังกล่าวมีความสำคัญต่อระบบ

การหาค่าความชื้นของยางแห้งที่ได้จะใช้วิธีวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis, ภาคผนวก ก) จากรูปที่ 4.6 แสดงผลของคุณหมุมิลร้อนชาเข้าต่อร้อยละความชื้นของยางแห้ง พบว่าร้อยละความชื้นของยางแห้งจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มคุณหมุมิลร้อนชาเข้า เนื่องจากการเพิ่มคุณหมุมิลร้อนชาเข้าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระเหยน้ำที่อยู่ในน้ำยาง ยางแห้งที่ได้จึงมีร้อยละความชื้นน้อยลง รูปที่ 4.7 แสดงผลของอัตราเร็วในการป้อนสารต่อร้อยละความชื้นของยางแห้งพบว่าร้อยละความชื้นมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการป้อนน้ำยางเนื่องจากน้ำยางจะเข้าไปในส่วนอบแห้งในปริมาณที่มากขึ้นและใช้เวลาอยู่ในเครื่องพ่นแห้งน้อยลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการระเหยน้ำออกจากน้ำยางลดลงทำให้ค่าร้อยละความชื้นของยางแห้งที่ได้มีค่าสูงขึ้น และยังพบว่า คุณหมุมิลร้อนชาออกมีค่าลดลง

เนื่องจากผลการทดลองที่ได้พบว่าร้อยละความชื้นของยางแห้งที่ได้จากการทดลองในทุกภาวะการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันและต่ำมากคือน้อยกว่า 1% ดังแสดงในตารางในภาคผนวก ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้และแสดงให้เห็นว่าการใช้เครื่องพ่นแห้งในการทำยางแห้งมีประสิทธิภาพในการระเหยน้ำออกได้ดี พร้อมสำหรับนำไปผสมสารเติมแต่งและขึ้นรูปต่อไป



รูปที่ 4.6 แสดงผลของคุณหมุมิลร้อนชาเข้าต่อร้อยละความชื้นของยางแห้ง



รูปที่ 4.7 ผลของอัตราเร็วในการป้อนสารต่อร้อยละความชื้นของยางแห้ง

4.2 การทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล

จากการผลการทดลองที่ได้จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 พบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญต่อร้อยละผลได้ของยางแห้งจากเครื่องพ่นแห้งประกอบไปด้วย อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า ร้อยละเนื้อยางแห้งและ ปริมาณ SDS แต่ยังไม่สามารถหาภาวะที่ดีที่สุดต่อร้อยละผลได้ของยางแห้งได้ จึงนำตัวแปรทั้ง 3 มาออกแบบการทดลองอีกครั้งโดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง และทำการทดลองที่ค่ากลางทั้งหมด 3 ครั้ง โดยกำหนดให้ภาวะที่ทดลองใหม่ครอบคลุมจุดสูงสุดของการทดลอง 2^5 ที่ผ่านมา โดยตัวแปรและจุดที่ทำการศึกษาใหม่ แสดงดังตารางที่ 4.4 และภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 แสดงดังตารางที่ 4.5

จากตารางที่ 4.6 แสดงความแปรปรวนของตัวแปรต่อร้อยละผลได้ยางแห้ง พบว่าร้อยละเนื้อยางแห้งกับปริมาณ SDS มีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรดังกล่าวมีความสำคัญต่อระบบ จากรูปที่ 4.8 (ก) แสดงผลการเปลี่ยนแปลงระดับของ ร้อยละเนื้อยางแห้งต่อร้อยละผลได้ยางแห้ง พบว่าการเพิ่มร้อยละเนื้อยางแห้งจาก 15% เป็น 25% มีผลต่อการลดลงของร้อยละผลได้ยางแห้งเพียงเล็กน้อย แต่ร้อยละผลได้ยางแห้งที่ภาวะการทดลองศูนย์กลางมีค่าสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดแสดงว่าร้อยละเนื้อยางแห้งที่ทำให้ได้ร้อยละผลได้ยางแห้งสูงสุดอาจอยู่ใกล้จุดศูนย์กลาง และรูปที่ 4.8 (ข) แสดงผลการเปลี่ยนแปลงระดับของ ปริมาณ SDS ต่อร้อยละผลได้ของยางแห้ง พบว่าการลดปริมาณ SDS ลงทำให้ได้ร้อยละผลได้ของยางแห้งเพิ่มขึ้นจากรูปจะเห็นว่า การลดปริมาณ SDS ลงเล็กน้อยจะเปลี่ยนร้อยละผลได้ของยางแห้งที่ได้อย่างรวดเร็วโดยสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีความชันมาก แสดงให้เห็นว่าปริมาณ SDS มีผลอย่างมากต่อการทำยางแห้งในช่วง 10-20 phr จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าแบบจำลองมีโค้งกำลังสองเกิดขึ้น ดังนั้นจึงใช้การออกแบบการทดลองเชิงประกอบศูนย์กลาง (Central Composite Design: CCD) เพื่อใช้ปรับหาภาวะที่เหมาะสมในการทำยางแห้งต่อไป

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนร้อยละความชื้นของยางแห้ง

Source	Sum of Squares	DF ¹	Mean Square	F Value ²	Prob > F ³
Model	0.506716	13	0.025336	2.28031	0.0724
A	0.000199	1	0.000199	0.017937	0.8957
B	0.021148	1	0.021148	1.903368	0.1929
C	0.157487	1	0.157487	14.1744	0.0027
D	0.135074	1	0.135074	12.15712	0.0045
E	0.001413	1	0.001413	0.127141	0.7276
AB	0.01033	1	0.01033	0.929745	0.354
AC	0.028363	1	0.028363	2.552794	0.1361
AE	0.002959	1	0.002959	0.266277	0.6152
BC	0.003152	1	0.003152	0.28366	0.604
BD	8.64E-05	1	8.64E-05	0.007779	0.9312
BE	0.026724	1	0.026724	2.405288	0.1469
CD	0.001049	1	0.001049	0.094443	0.7639
CE	0.004501	1	0.004501	0.405149	0.5364
Curvature	0.00881	1	0.00881	0.792927	0.3907
Pure Error	0.27	19	0.014	-	-
Cor Total	0.648854	33	-	-	-

¹ Degree of freedom, ² Test for comparing model variance with residual (error) variance, ³ probability value

ตารางที่ 4.4 ตัวแปรและค่าที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2³

สัญลักษณ์	ตัวแปรที่ศึกษา	ค่าที่ใช้ออกแบบการทดลอง	
		ต่ำ	สูง
A	ร้อยละเนื้อยางแห้ง (%)	15	25
B	ปริมาณ SDS (phr)	10	20
C	อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า (°C)	120	140

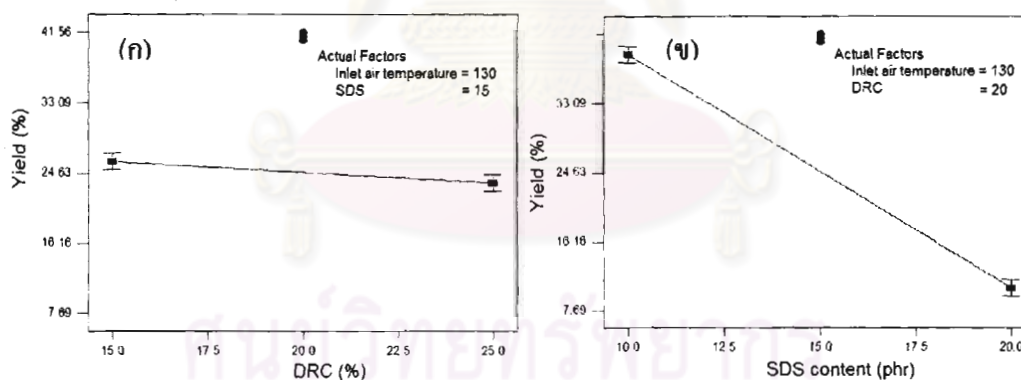
ตารางที่ 4.5 ภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ 2³ แฟกทอเรียล

ภาวะการทดลองที่	ร้อยละเนื้อยางแห้ง (%)	ตัวแปรที่ศึกษา	
		ปริมาณ SDS (phr)	อุณหภูมิผสมรีนชาเข้า (°C)
1	25	20	140
2	25	20	120
3	20	15	130
4	15	10	120
5	25	10	120
6	15	20	120
7	15	20	140
8	15	10	120
9	15	20	140
10	20	15	130
11	25	20	120
12	15	10	140
13	20	15	130
14	25	20	140
15	15	20	120
16	15	10	140
17	25	10	140
18	25	10	120
19	25	10	140

ตารางที่ 4.6 วิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของยางแห้งจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

Source	Sum of Squares	DF ¹	Mean Square	F Value ²	Prob > F ³
Model	3353.691	7	479.0987	137.7739	< 0.0001
A	26.08513	1	26.08513	7.501271	0.0209
B	3280.06	1	3280.06	943.243	< 0.0001
C	7.943789	1	7.943789	2.284386	0.1616
AB	5.647882	1	5.647882	1.624155	0.2313
AC	4.683019	1	4.683019	1.34669	0.2728
BC	2.933134	1	2.933134	0.843478	0.38
ABC	26.33829	1	26.33829	7.57407	0.0204
Curvature	671.6364	1	671.6364	193.1417	< 0.0001
Pure Error	34.77428	10	3.477428	-	-
Cor Total	4060.102	18	-	-	-

¹ Degree of freedom, ² Test for comparing model variance with residual (error) variance, ³ probability value



รูปที่ 4.8 ผลการเปลี่ยนแปลงระดับของตัวแปรต่อร้อยละผลได้ของยางแห้ง (ก) การเปลี่ยนแปลงระดับของร้อยละเนื้อยางแห้ง (ข) การเปลี่ยนแปลงระดับของ ปริมาณ SDS

4.2.1 การออกแบบเชิงประกอบศูนย์กลาง (Central Composite Design: CCD)

จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 สามารถระบุได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของยางแห้งคือ ร้อยละเนื้อยางแห้งและปริมาณ SDS และพบว่าแบบจำลองที่ได้มีความโค้งกำลังสองเกิดขึ้น แสดงว่าการทดลองอยู่ใกล้กับเคียงกับจุดที่สูงที่สุดของการทดลอง ดังนั้นจึงได้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบ CCD มาใช้เพื่อหาสัมประสิทธิ์ของพจน์กำลังสองโดยทำ

การเพิ่มการทดลองที่จุดปลายของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ดังนั้นการทดลองจะประกอบไปด้วย 5 ระดับคือ $-\alpha, -1, 0, 1, +\alpha$ ซึ่งกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษาดังตารางที่ 4.7

เมื่อนำผลของร้อยละผลได้ของยางแห้งที่ได้จากการทดลองไป วิเคราะห์ความแปรปรวน ทั้งในพจน์ของตัวแปรอันดับหนึ่ง ตัวแปรอันดับสอง และอิทธิพลร่วมระหว่างทั้งสองตัวแปร ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าร้อยละเนื้อยางแห้งและปริมาณ SDS มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของยางแห้ง เนื่องจากมีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 ทั้งตัวแปรอันดับหนึ่งและตัวแปรอันดับสอง และสามารถเขียนสมการแบบจำลองพอลิโนเมียลอันดับสองดังสมการที่ 4.1

$$\text{Yield} = 42.69 - 2.22A - 12.91B - 5.13A^2 - 10.84B^2 - 0.72AB \quad (4.1)$$

เมื่อนำสมการแบบจำลองของร้อยละผลได้ของยางแห้ง มาสร้างกราฟพื้นที่ตอบสนอง ดังแสดงในภาพที่ 4.9 พบว่าจุดที่ให้ร้อยละผลได้ของยางแห้งสูงที่สุดอยู่ในแบบจำลองที่ได้ทำการออกแบบและเมื่อแก้สมการเพื่อหาร้อยละเนื้อยางแห้งและปริมาณ SDS ที่เหมาะสมต่อการผลิตยางแห้งจากสมการ พบว่าร้อยละเนื้อยางแห้งที่เหมาะสม คือ 19.15 % และปริมาณ SDS ที่เหมาะสม คือร้อยละ 11.96 phr โดยร้อยละผลได้ของยางแห้งที่ได้คือ 47.06% แต่เมื่อนำค่าที่ได้จากสมการ 4.1 มาทำการทดลองจริงพบว่าได้ร้อยละผลได้เพียง 44.31% จึงทำการทดลองแบบตัวแปรเดียวซึ่งมีการขยายขอบเขตของตัวแปรออกจากค่าศูนย์กลางทำให้วิเคราะห์ผลกระทบได้ดียิ่งขึ้นเพื่อยืนยันผลต่อไป

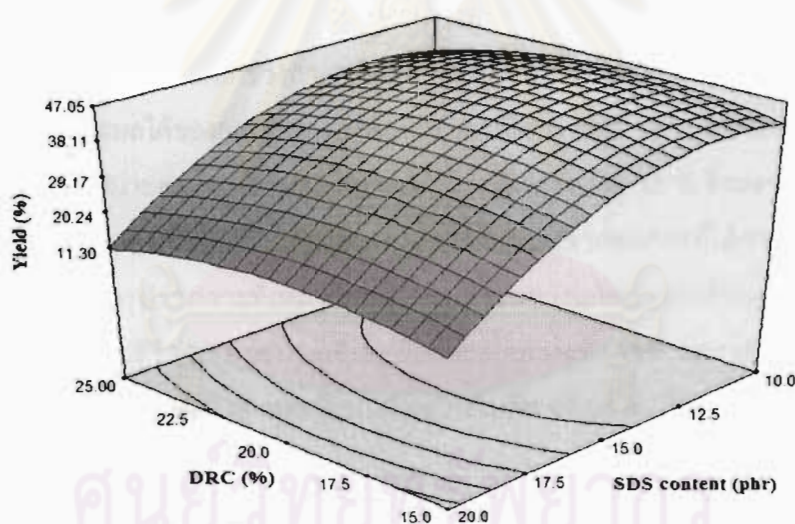
ตารางที่ 4.7 สัญลักษณ์แทนตัวแปรและค่าที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ CCD

ปัจจัย	สัญลักษณ์	รหัสของปัจจัย				
		$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
ร้อยละเนื้อยางแห้ง	A	12.93	15	20	25	27.07
ปริมาณ SDS	B	7.93	10	15	20	22.07

ตารางที่ 4.8 วิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของยางแห้งจากการออกแบบการทดลองแบบ CCD

Source	Sum of Squares	DF ¹	Mean Square	F Value ²	Prob > F ³
Model	3495.53	5	699.11	72.03	< 0.0001
A	79.04	1	79.04	8.14	0.0145
B	2667.73	1	2667.73	274.84	< 0.0001
AA	157.81	1	157.81	16.26	0.0017
BB	704.99	1	704.99	72.63	< 0.0001
AB	6.25	1	6.25	0.64	0.4379
Pure Error	116.48	12	9.71	-	-
Cor Total	3612.12	18	-	-	-

¹ Degree of freedom, ² Test for comparing model variance with residual (error) variance, ³ probability value



รูปที่ 4.9 พื้นผิวการตอบสนองสำหรับร้อยละผลได้ของยางแห้ง

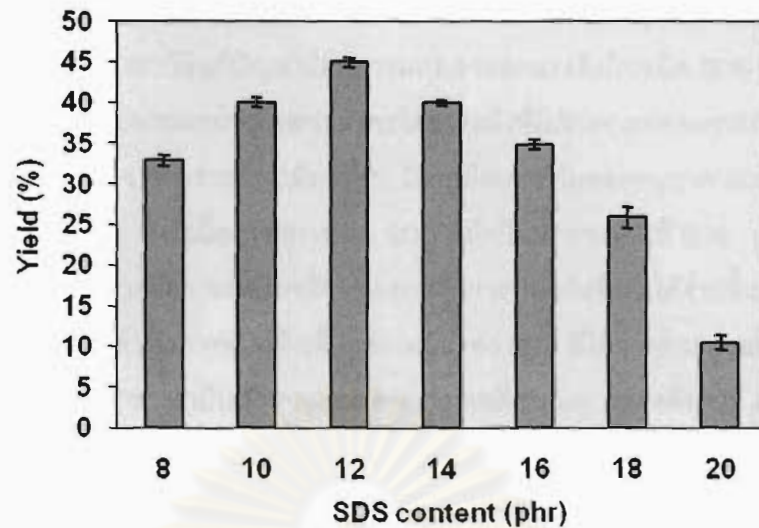
4.2.2 การทดลองแบบตัวแปรเดียว (Univariate experiment)

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากการออกแบบการทดลอง CCD แสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่มีความสำคัญต่อร้อยละผลได้ของยางแห้งคือ ร้อยละเนื้อยางแห้งและปริมาณ SDS โดยทั้งสองตัวแปรนี้ไม่มีอันตรกิริยาต่อกันแต่มีพจน์กำลังสอง จึงทำการทดลองแบบตัวแปรเดียวทั้งสองตัวแปร โดยช่วงที่ทำการศึกษาคือครอบคลุมไปถึงภาวะที่ทำการทดลองเชิงแพททอเรียล สำหรับการศึกษามลของ ปริมาณ SDS จะทำการทดลองในช่วง 8 ถึง 20 phr โดยใช้

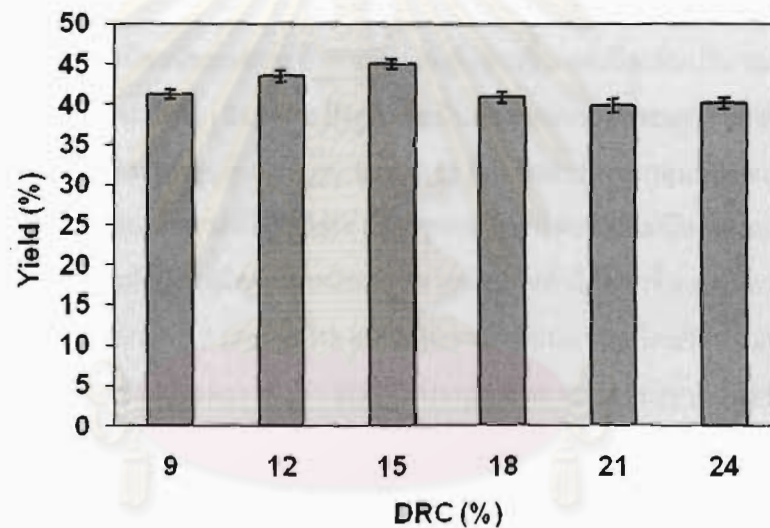
อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 130 °C และ ร้อยละเนื้อยางแห้งเท่ากับ 15 % ซึ่งทั้งสองภาวะเป็นค่าจากจุดที่ให้ร้อยละผลได้ของยางแห้งสูงสุดจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลและในส่วนการศึกษาผลของร้อยละเนื้อยางแห้ง จะทำการทดลองในช่วง 9 ถึง 24 % โดยใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 130 องศาเซลเซียส และปริมาณ SDS ระหว่าง 8 ถึง 20 phr ที่ให้ร้อยละผลได้อย่างแห้งสูงสุดจากการทดลองแบบตัวแปรเดียวเบื้องต้น

รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลองแบบตัวแปรเดียวของปริมาณ SDS พบว่าเมื่อเปลี่ยนปริมาณ SDS เล็กน้อยค่าร้อยละผลได้ของยางแห้งจะเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็วแสดงว่าปริมาณ SDS มีผลอย่างมากต่อการทดลองอธิบายได้ว่าเมื่อปริมาณ SDS ในสารละลายมากขึ้น SDS จะเริ่มจับตัวกันเองเป็นกลุ่มทำให้ SDS มีเข้าไปล้อมรอบอนุภาคยางได้น้อยลงยางจึงมีความเหนียวอยู่ 12 และพบว่าผลที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มแบบเดียวกันกับการทดลองเชิงแฟกทอเรียล โดยจุดที่ให้ร้อยละผลได้ของยางแห้งสูงสุดคือที่ ปริมาณ SDS 12 phr ได้ร้อยละผลได้อย่างแห้งเท่ากับ 44.9 % สำหรับผลของการทดลองเปลี่ยนร้อยละเนื้อยางแห้งแสดงดังรูปที่ 4.11 จะพบว่าการทดลองตัวแปรเดียวเมื่อปรับเปลี่ยนค่า ร้อยละเนื้อยางแห้งในช่วง 9-24 % ค่าที่อยู่ในช่วงการทดลองเชิงแฟกทอเรียลคือ 15-24% มีแนวโน้มเหมือนกับการทดลองแบบตัวแปรเดียวคือจะมีร้อยละผลได้ของยางแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อทำการลดร้อยละเนื้อยางแห้งลงและเมื่อทำการลดร้อยละเนื้อยางแห้งให้ออกไปนอกช่วงการทดลองเชิงแฟกทอเรียลร้อยละผลได้ของยางแห้งจะลดลง โดยจุดที่ให้ร้อยละผลได้ของยางแห้งสูงสุดคือที่ร้อยละเนื้อยางแห้ง 15 % ได้ร้อยละผลได้ 44.89% แสดงว่าภาวะที่เหมาะสมของร้อยละเนื้อยางแห้งในการทดลองคือ 15 % ซึ่งผลจากการทดลองตัวแปรเดียวทั้ง 2 ตัว ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับการคำนวณจากสมการที่ได้จากการทดลองแบบ CCD จึงสามารถสรุปว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางแห้งแบบผงด้วยเครื่องพ่นแห้ง คือที่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 130 องศาเซลเซียส, ร้อยละเนื้อยางแห้ง 15% และ ปริมาณ SDS 12 phr โดยร้อยละผลได้ของยางแห้งสูงสุดบริเวณส่วนกักเก็บคือ 44.90 % โดยร้อยละผลได้ทั้งหมดคือ 98.41 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 ผลการทดลองตัวแปรเดียวของปริมาณ SDS ต่อร้อยละผลได้ยางแห้ง



รูปที่ 4.11 ผลการทดลองตัวแปรเดียวของร้อยละเนื้อยางแห้งต่อร้อยละผลได้ยางแห้ง

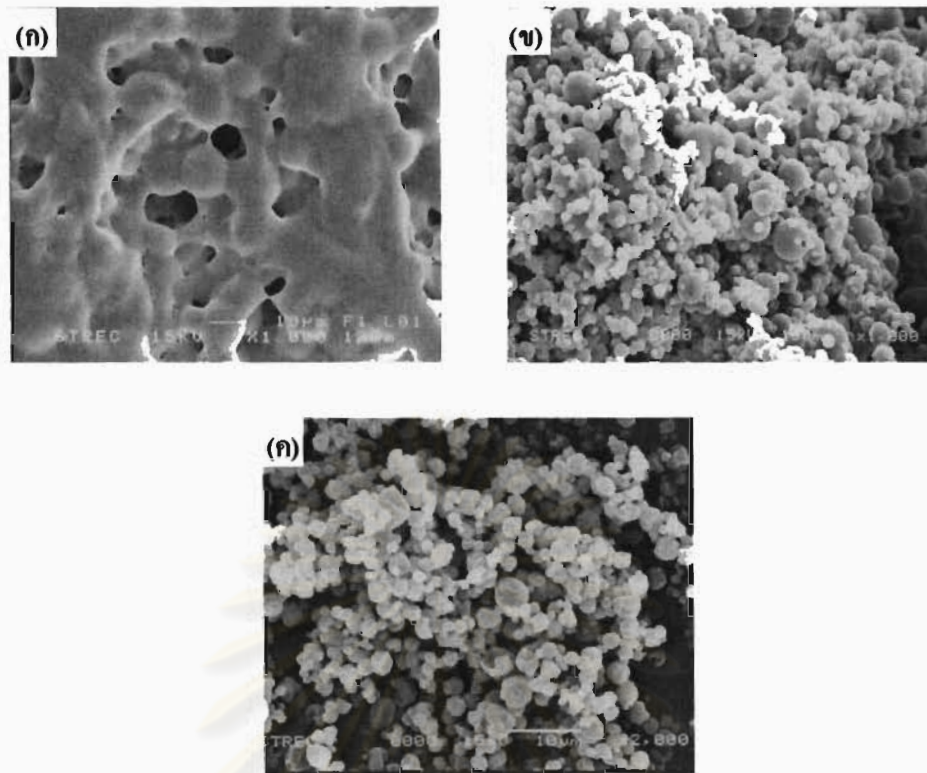
4.3 การศึกษาพื้นฐานวิทยาของยางผง

4.3.1 ผลของการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS ลงในน้ำยาง

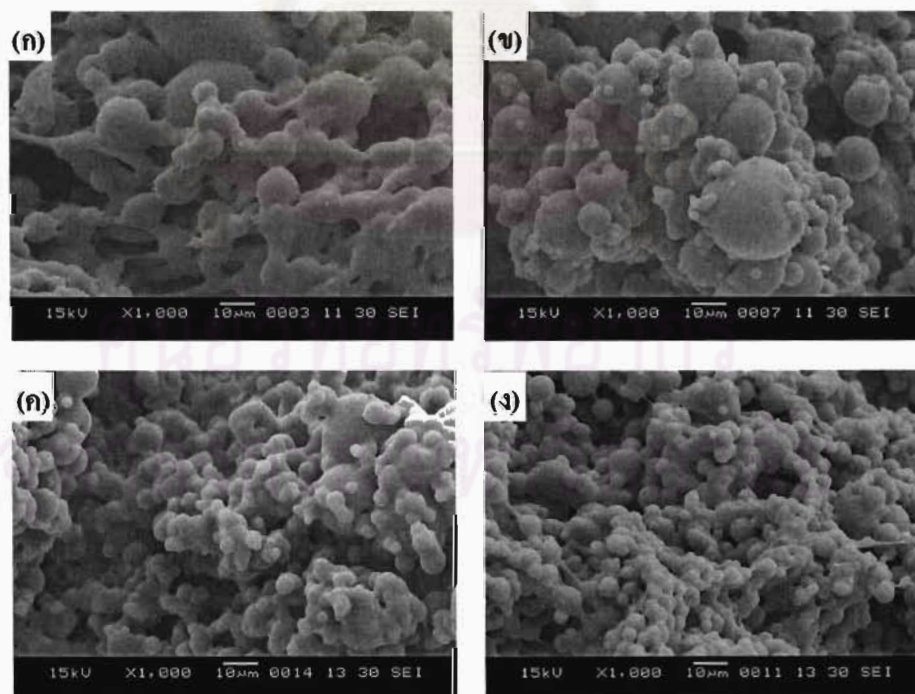
เมื่อพิจารณาผลของการเติมและไม่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS ลงในน้ำยางที่มีต่อการผลิตยางแห้งโดยใช้เครื่องพ่นแห้ง ที่ภาวะของการทดลอง อุณหภูมิลมร้อนเข้า 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำยาง 3 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 600 ลิตรต่อชั่วโมง และ ร้อยละเนื้อยางแห้ง 15 % พบว่า การพ่นน้ำยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS ลงไป ยางแห้งที่ได้มีลักษณะเหนียว (Sticky) ติดรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ (แสดงดังรูปที่ 4.12 (ก)) ซึ่งพิจารณาในส่วนที่กักเก็บตัวอย่าง (Container) ของเครื่องพ่นแห้ง นอกจากนี้

พบว่าเกิดปัญหาในการพ่นแห้งขึ้นเนื่องจากน้ำยาธรรมชาติเกิดการอุดตันที่บริเวณหัวฉีดของเครื่องพ่นแห้ง ดังนั้นจึงหาวิธีแก้ปัญหาโดยการผสมสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS ร่วมกับน้ำยาธรรมชาติ เมื่อนำสารละลายมาทำการพ่นแห้งจะได้ยางแห้งที่มีลักษณะกลมเกาะรวมตัวเป็นกลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข) พบว่ายาง (เม็ดสีเทา) มีการยึดเกาะกันของอนุภาค SDS (เม็ดสีขาว) กระจายอย่างสม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากการเติม SDS ลงไปในน้ำยาทำให้ SDS เข้าไปล้อมรอบอนุภาคของยางทำให้ยางมีความเหนียวน้อยลง การทำการพ่นแห้งจึงทำได้ง่ายขึ้น จากนั้นได้นำ SDS ไปละลายในน้ำแล้วทำการพ่นแห้งเพื่อดูลักษณะของ SDS ที่ได้จากการพ่นแห้ง พบว่า SDS ที่ได้จากการพ่นแห้งมีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดอนุภาคเฉลี่ย $3\ \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 4.12 (ค) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเม็ดสีขาวที่เกาะกับเนื้อยางในรูปที่ 4.12 (ข) เป็นอนุภาคของ SDS ที่เติมลงไป

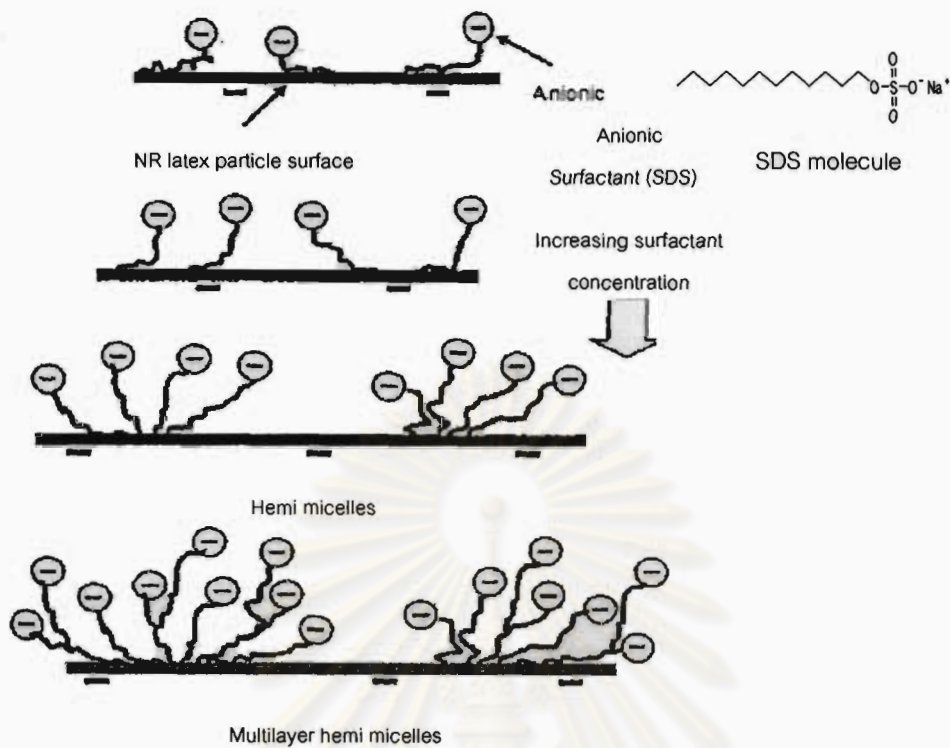
เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผงที่เตรียมได้จากกระบวนการพ่นแห้งที่ผสมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่แตกต่างกันที่ 5, 12, 20 และ 25 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าที่การใช้ปริมาณ SDS ที่ 5 phr (รูปที่ 4.13 (ก)) ยางที่ผงที่ได้จะมีลักษณะเหนียวติดกันเป็นกลุ่ม เมื่อเพิ่มปริมาณ SDS เป็น 12 phr พบว่ายางมีลักษณะกลมและมีอนุภาคของ SDS ล้อมรอบยาง (รูปที่ 4.13(ข)) ยางมีความเหนียวน้อยลงการทำการพ่นแห้งจึงง่ายขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ SDS ที่มากขึ้น (20 และ 25 phr) จะเห็นว่า SDS จะเริ่มจับตัวเป็นกลุ่มมากกว่าที่จะเกาะที่ผิวของยางทำให้ยางที่ได้มีลักษณะไม่กลม (ดังรูปที่ 4.13 (ค) และ 4.13 (ง)) ซึ่งการเกาะกลุ่มของสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS ทำให้ปริมาณเนื้อยางที่ได้น้อยลง เนื่องจากยางบางส่วนจะไม่มีสารลดแรงตึงผิว SDS ไปล้อมรอบ ทำให้ยางแห้งยังคงมีความเหนียวอยู่ การพ่นแห้งทำได้ยากขึ้น ดังนั้นการใช้ปริมาณ SDS ที่สูงเกินไป (มากกว่า 12 phr) จึงไม่เหมาะกับการเตรียมยางผงโดยวิธีพ่นแห้ง รูปที่ 4.14 แสดงกลไกการดูดซับของสารลดแรงตึงผิว SDS บนอนุภาคของยางธรรมชาติ โดยพื้นผิวอนุภาคยางธรรมชาติจะมีประจุลบเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของฟอสโฟลิพิด (Phospholipid) ที่มีอยู่ในชั้นผิวหน้าอนุภาคยางแล้วเกิดเป็นสายโซ่ของกรดไขมันดูดซับอยู่ที่บริเวณผิวอนุภาคยาง [22] โครงสร้างสารลดแรงตึงผิว SDS จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ โดยที่ส่วนหางเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (ส่วนไฮโดรคาร์บอน) และส่วนหัวเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (ประจุลบของหมู่ซัลเฟต) ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่ำ ๆ การดูดซับของสารลดแรงตึงผิว SDS บนอนุภาคยางจะมีลักษณะการดูดซับด้วยส่วนที่ไม่มีประจุ (ส่วนหางซึ่งประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอน) เพราะ SDS มีประจุเป็นลบซึ่งมีประจุที่เหมือนกับผิวของอนุภาคยาง ทำให้โมเลกุลของ SDS จะเรียงตัวกันขนานกับพื้นผิวของยาง เมื่อความเข้มข้นของ SDS เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดการผลักกันของประจุที่เหมือนกันของ SDS ทำให้การเรียงตัวของโมเลกุลตั้งฉากกับพื้นผิวอนุภาค และเมื่อปริมาณของ SDS เพิ่มมากขึ้นอีกโมเลกุลบางส่วนอาจเกิดการเกาะกันเองบนพื้นผิวของอนุภาคยาง เมื่อดูจากรูปที่ 4.13 ปริมาณ SDS ที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้ที่ทำให้ได้ยางแห้งที่มีลักษณะดีที่สุดคือ ใช้ SDS เท่ากับ 12 phr



รูปที่ 4.12 ลักษณะยางแห้งและ SDS (ก) ยางแห้งที่ไม่มีการเติม SDS
(ข) ยางแห้งที่มีการเติม SDS (ค) SDS เปล่า



รูปที่ 4.13 ลักษณะอนุภาคยางผงที่มีการใช้ปริมาณ SDS ที่ต่างกัน (ก) 5 phr (ข) 12 phr
(ค) 20 phr (ง) 25 phr



รูปที่ 4.14 กลไกการดูดซับของ SDS บนอนุภาคยางธรรมชาติ [23]

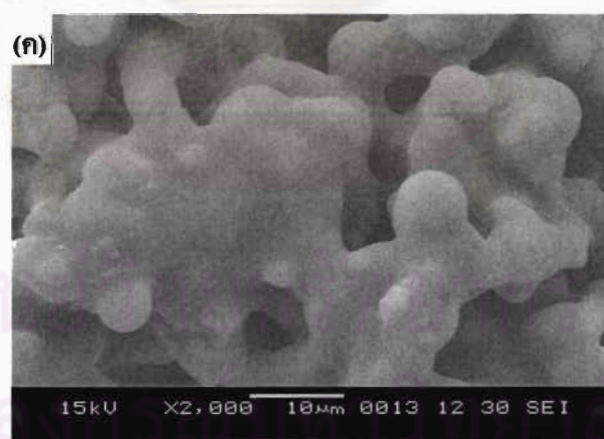
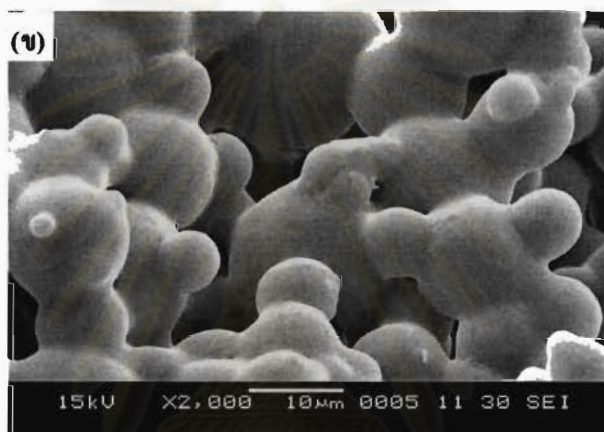
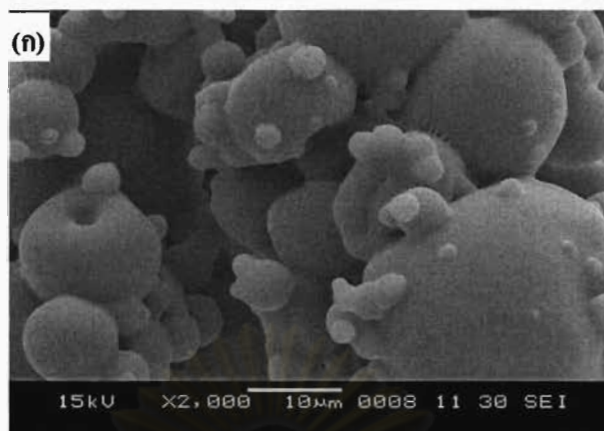
4.3.2 ผลของปริมาณ %DRC ของน้ำยาง

รูปที่ 4.15 แสดงผลของการใช้ปริมาณความเข้มข้นของเนื้อยางต่อการทำยางผง โดยใช้น้ำยางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นของเนื้อยางต่างกันคือ 15, 25 และ 40 %DRC ตามลำดับ ภาวะที่ทดลองคือ อุณหภูมิลมร้อนเข้า 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำยาง 3 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 600 ลิตรต่อชั่วโมง และ ปริมาณสารลดแรงตึงผิว SDS 12 phr พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของเนื้อยางที่ 15 %DRC (ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ก)) ยางผงจะมีอนุภาคเป็นทรงกลม มีอนุภาคสารลดแรงตึงผิว SDS ล้อมรอบอนุภาคยาง ขนาดอนุภาคยางผงที่ได้มีขนาดเฉลี่ย 8 μm และยางแห้งจะเริ่มเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนเมื่อใช้ %DRC ที่สูงขึ้น โดยที่ 25 %DRC (รูปที่ 4.15(ข)) และยางแห้งจะเริ่มรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัดโดยมีอนุภาคสารลดแรงตึงผิว SDS เกาะที่ผิวของยางน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ข) และ 4.15 (ค) เมื่อใช้ %DRC 25 และ 40% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อน้ำยางที่มี %DRC สูงขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดของน้ำยางจะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้การไหลของน้ำยางธรรมชาติผ่านหัวฉีดของเครื่องพ่นแห้งเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก และเริ่มมีการอุดตันที่หัวพ่นทำให้น้ำยางกระจายออกจากหัวฉีดในรูปละอองได้ยากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการผลิตยางแห้งลดต่ำลง เมื่อ %DRC ของน้ำยางธรรมชาติสูงขึ้นปริมาณเนื้อยางจะมีมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ SDS ที่เข้าไปเกาะที่ผิวของยางซึ่งมี

ปริมาณเท่าเดิมเข้าไปเกาะที่ผิวยางได้น้อยลงทำให้ยางยังเหนียวติดกันและรวมตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่เมื่อทำการพ่นแห้ง รวมทั้งการกระจายตัวของขนาดยางจะมีค่าเปลี่ยนไปด้วย ทำให้ยางเกิดการรวมตัวกัน จากการทดลองที่ผ่านมาเมื่อใช้ %DRC ที่ต่ำกว่า 15 %DRC พบว่ายางแห้งที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับยางแห้งที่ 15 %DRC แต่ร้อยละผลได้ของยางแห้งจะลดน้อยลง (รูปที่ 4.11) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ความเข้มข้นของเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติเท่ากับ 15 %DRC

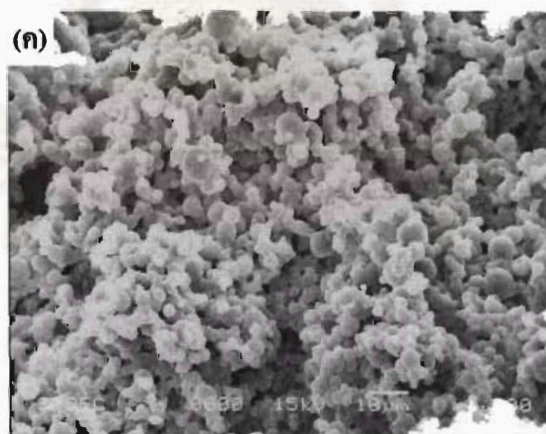
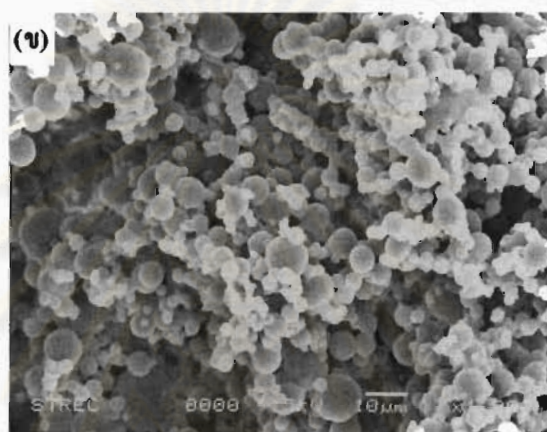
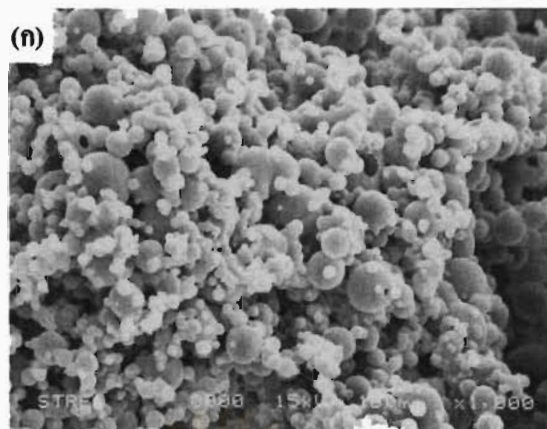
4.3.3 ผลของการปรับอัตราการไหลของอากาศต่อขนาดอนุภาค

รูปที่ 4.16 แสดงผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคยางแห้งที่ได้จากการใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราการไหลของอากาศต่างกัน คือ 600 700 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิลมร้อนเข้าเข้า 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำยาง 3 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำยางธรรมชาติ 15 %DRC และ ปริมาณสารลดแรงตึงผิว SDS 12 phr พบว่ายางแห้งที่ได้มีลักษณะคล้ายกันในทุกภาวะการทดลอง นั่นคือมีลักษณะเป็นเม็ดค่อนข้างกลม มีอนุภาคสารลดแรงตึงผิว SDS เกาะที่ผิวของยางแห้ง และอนุภาคยางมีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตามพบว่าขนาดอนุภาคของยางแห้งที่ได้มีความแตกต่างกันโดยพบว่าที่อัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดอนุภาคยางแห้งมีขนาดเล็กลง โดยที่อัตราการไหลของอากาศที่ 600 ลิตรต่อชั่วโมง (รูปที่ 4.16 (ก)) อนุภาคยางแห้งที่ได้จะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 8 μm อัตราการไหลของอากาศที่ 700 ลิตรต่อชั่วโมง (รูปที่ 4.16 (ข)) อนุภาคยางแห้งที่ได้จะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 6 μm เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นที่ 800 ลิตรต่อชั่วโมง (รูปที่ 4.16 (ค)) ยางแห้งที่ได้จะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4 μm ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ละอองของน้ำยางที่เกิดจากการอัดผ่านหัวฉีดเข้าสู่ห้องอบแห้งจะมีลักษณะเป็นฝอยที่ละเอียดมากขึ้น ทำให้ยางที่ได้จากการระเหยน้ำออกมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย แสดงกลไกของอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อขนาดอนุภาคของยางแห้งได้ดังรูปที่ 4.17 แต่อย่างไรก็ตามการที่ละอองมีความละเอียดมากขึ้น ยางแห้งที่ได้จะมีความเกาะตัวกันเป็นกลุ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นจากรูปที่ 4.16 การใช้อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมที่สุดคือ 600 ลิตรต่อชั่วโมง เนื่องจากมีการเกาะกลุ่มกันน้อยที่สุด



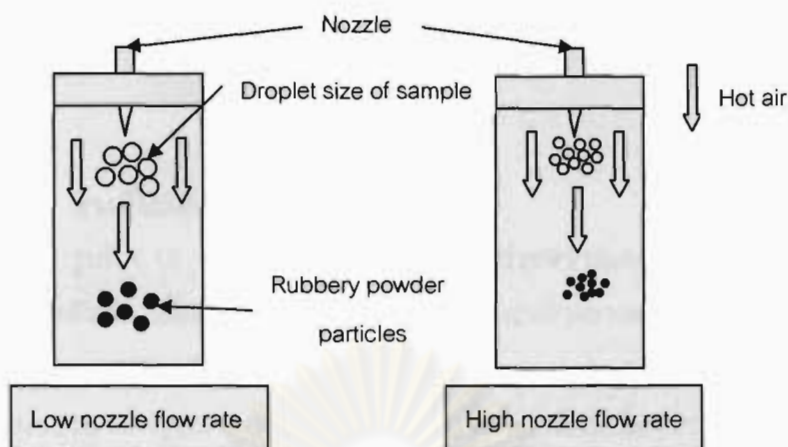
รูปที่ 4.15 ลักษณะอนุภาคยางผงที่มีการใช้ %DRC ของน้ำยางธรรมชาติที่ต่างกัน

(ก) 15%, (ข) 25%, (ค) 40%



รูปที่ 4.16 ยางผงที่อัตราการไหลของอากาศ (ก) 600 ลิตรต่อชั่วโมง

(ข) 700 ลิตรต่อชั่วโมง (ค) 800 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.17 แบบจำลองแสดงผลของอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อขนาดอนุภาค

4.4 สมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์

เมื่อนำยางคอมปาวด์มาทดสอบสมบัติการคงรูปของยางที่มีการผสมต่างกันคือ ยางแท่ง (STR), ยางแท่งผสม SDS (STRs), ยางผง (NRP), ยางแท่งที่ผสมซิลิกา (STR/Si), ยางแท่งผสม SDS และ ซิลิกา (STRs/Si), ยางผงที่ผสมซิลิกา (NRP/Si) และ ยางผสมซิลิกาที่ผ่านกระบวนการพ่นแห้ง (P(NR/Si)) โดยผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.18 ในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Torque) กับเวลา หรือเรียกว่ากราฟเชื่อมขวาง (Cure curve) ข้อมูลจากกราฟสามารถบอกระยะเวลายางเริ่มคงรูป (Scorch time) ระยะเวลายางคงรูปที่เหมาะสม (Optimum cure time) พบว่า ในช่วงแรกของกราฟจะมีค่าลดลงเนื่องจากเมื่อเริ่มให้แรงบิด ยางจะเกิดการอ่อนตัวลงเนื่องจากผลของอุณหภูมิที่ต่างกัน ระยะเวลาช่วงนี้เป็นช่วงเวลาที่ยืดหยุ่นก่อนที่สารเคมีจะเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ช่วงระยะเวลาดังกล่าว เรียกว่าเวลาเริ่มต้น (Induction time) ต่อมาสารเคมีจะเข้าทำปฏิกิริยาก่อให้เกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ทำให้แรงบิดมีค่าสูงขึ้นยางจะเริ่มแข็งขึ้น ระยะเวลาที่ยางเกิดการแข็งตัวอย่างเห็นได้ชัด เรียกว่าเวลาสก็อต (Scorch time) เมื่อยางเกิดการสก็อตแล้วแล้วยางจะเริ่มแปรรูปได้ยาก ขณะเกิดการสก็อต เรียกว่ายางเริ่มเกิดการวัลคาไนเซชัน ดังนั้นเวลาสก็อตคือระยะเวลาที่เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของยาง เมื่อสารทำปฏิกิริยากับยางต่อไป ยางก็จะแข็งขึ้นเรื่อย ๆ โดยกราฟในช่วงนี้กราฟจะเริ่มชันขึ้นเรื่อย ๆ โดยถ้าความชันกราฟมาก แสดงว่าสารเคมีเกิดปฏิกิริยากับยางอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งสารเคมีทำปฏิกิริยากับสารเคมีจนหมด ยางก็จะแข็งมากที่สุด ระยะเวลาที่ใช้เพื่อให้ยางทำปฏิกิริยากับสารเคมีจนหมดสมบูรณ์ เรียกว่า เวลาที่ยางเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สมบูรณ์ (Cure time) จากนั้นกราฟแรงบิดจะเริ่มคงที่ เมื่อพิจารณาจากรูป 4.18 (ก) และ 4.18 (ข) พบว่ายางทุกสูตรมีกราฟแรงบิดหลังจากเกิดปฏิกิริยา

วัดค่าในเซชันสมบรูณ์ที่คงที่แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางและการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน สามารถสรุปรายละเอียดต่าง ๆ ในกราฟเชื่อมขวางได้ตามตาราง 4.9

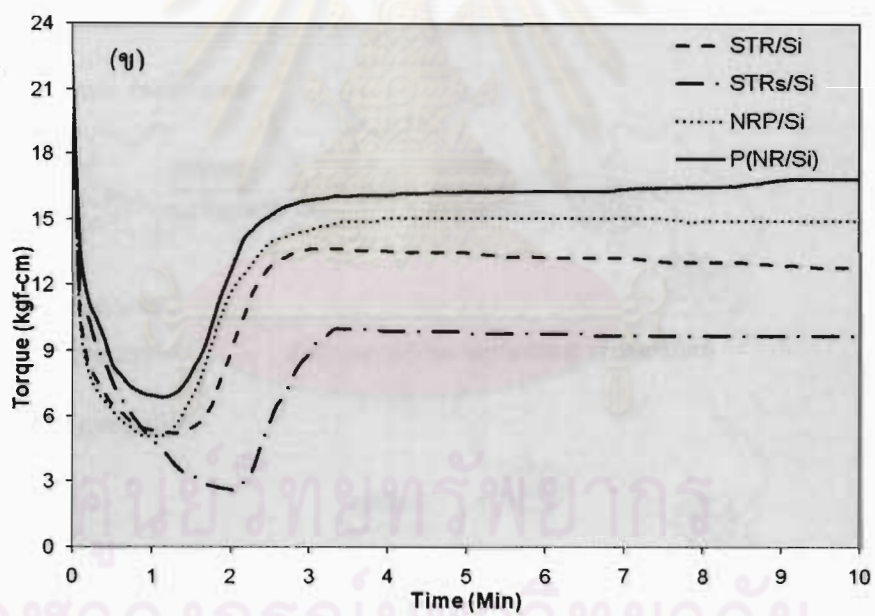
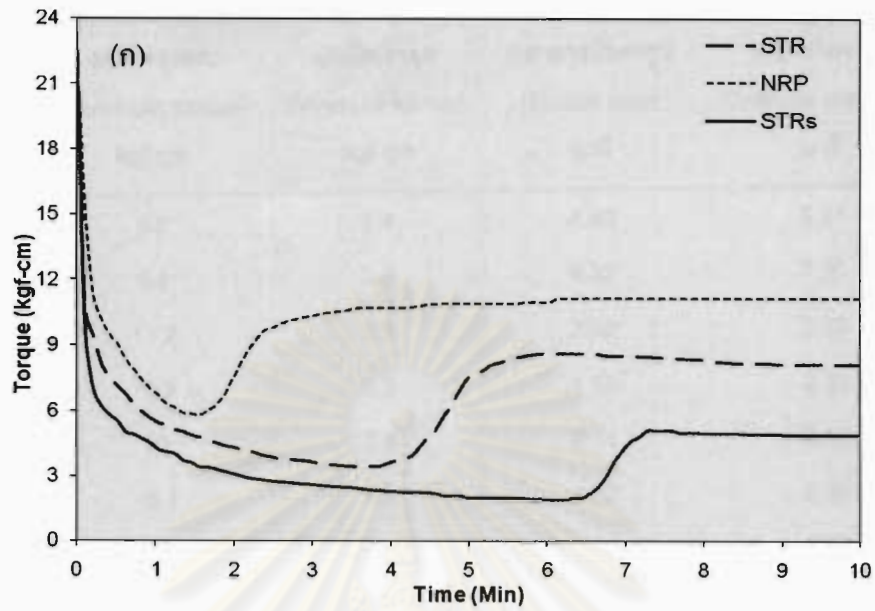
4.4.1 ยางที่ไม่เติมสารตัวเติม

รูปที่ 4.18 (ก) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Torque) กับเวลา ของยางที่ไม่เติมสารตัวเติม เมื่อเปรียบเทียบสมบัติการคงรูประหว่างยางผงกับยางแท่งที่ไม่มีการผสมซิลิกา พบว่ายางผง (NRP) มีค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque, M_p) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงค่าโมดูลัสเฉือนของยางคงรูปมากกว่ายางแท่ง (STR) คาดว่ามีผลเนื่องจากยางผงมีอนุภาคเล็กสามารถผสมเข้ากับสารคงรูปได้ดีและง่ายขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางในยางดีขึ้น ในขณะที่ระยะเวลายางเริ่มคงรูป (Scorch time) ของยางผง (NRP) มีค่าน้อยลงเมื่อดูจากกราฟแสดงว่ายางผงสามารถเริ่มเกิดปฏิกิริยากับกำมะถันได้เร็วกว่าเนื่องจากยางผงมีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ระยะเวลาการคงรูปที่เหมาะสม (Optimum cure time) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางเชื่อมขวางไปร้อยละ 90 และมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด [24] มีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางแท่ง (STR) เนื่องจากการผสมยางผงกับสารคงรูปได้ดีช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเคมีเชื่อมขวางสายโซ่โมเลกุลยาง ทำให้ช่วยลดระยะเวลาการเชื่อมขวางให้สั้นลงได้โดยสังเกตได้จากกราฟในช่วงการวัดค่าโมดูลัสที่มีความชันที่สูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับยางแท่ง (STR) และยางแท่งที่ผสม SDS (STRs) จะพบว่ายางแท่งที่ผสม SDS (STRs) จะมีค่าแรงบิดสูงสุด แรงบิดต่ำสุด มีค่าน้อยลง ในขณะที่ระยะเวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาการคงรูปที่เหมาะสม มีค่าสูงขึ้น โดยจากกราฟจะพบว่ายางแท่งที่ผสม SDS (STRs) มีช่วงสก็อตที่ยาวแสดงว่ายางเกิดการเชื่อมโยงกับสารเคมีได้ช้ามากต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนที่นานมากซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน ทั้งนี้คาดว่าเกิดมาจาก เมื่อผสม SDS ลงไปในยางในปริมาณที่มาก ส่งผลให้ SDS จะเกาะตัวเป็นกลุ่มในเนื้อของยางทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางแยกออกห่างจากกัน ทำให้สายโซ่ยางเคลื่อนไหวได้มากขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.19 ดังนั้นยางจึงมีความนิ่มขึ้น [25] และอาจมีผลจาก SDS เข้าไปรบกวนสารวัดค่าโมดูลัสทำให้การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางสายโซ่โมเลกุลยางมีประสิทธิภาพที่น้อยลง ซึ่งจะแตกต่างกับยางผงที่ผ่านการพ่นแห้งเนื่องจากมีการกระจายตัวที่ดีของ SDS ในเนื้อยางและยังช่วยทำให้ยางมีลักษณะที่เป็นเม็ดกลม ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยากับสารคงรูปได้ดีขึ้น

4.4.2 ยางที่เติมสารตัวเติม

เมื่อพิจารณาค่าแรงบิดและเวลาอย่างคงรูปที่เหมาะสมที่เกิดขึ้นของยางที่ไม่ผสมซิลิกาและผสมซิลิกาดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าเมื่อเติมซิลิกาลงในยาง ส่งผลให้ค่าแรงบิดที่วัดได้จากเครื่องมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง เมื่อกระจายอยู่ในยางทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นทำให้มีค่าแรงบิดสูงขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาอย่างเริ่มคงรูปและระยะเวลาการคงรูปที่เหมาะสมของยางผสมซิลิกาจะมีค่าน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งโดยปกติควรจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากผิวซิลิกามีพันธะไฮโดรเจนทำให้มีการดูดสารตัวเร่งที่ผิวของซิลิกาแต่เนื่องจากการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในระบบจะทำให้หมู่ไซลานอลบนพื้นผิวซิลิกาลดลง จึงช่วยลดการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป ดังนั้นยางจึงมีอัตราการคงรูปที่เร็วขึ้นเมื่อมีการเติมสารคู่ควบไซเลน [26] เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงบิดสูงสุดของยางที่ผสมซิลิกาพบว่า ยางผสมซิลิกาที่ผ่านกระบวนการพ่นแห้ง(P(NR/Si)) มีค่าแรงบิดสูงสุด รองลงมาคือ ยางผงที่ผสมซิลิกา (NRP/Si) ยางแท่งที่ผสมซิลิกา (STR/Si) และยางแท่งผสม SDS และ ซิลิกา (STRs/Si) ตามลำดับ ทั้งนี้การที่ยางผสมซิลิกาที่ผ่านกระบวนการพ่นแห้ง (P(NR/Si)) มีค่าแรงบิดสูงสุดมากที่สุดอาจเกิดจากผลของซิลิกามีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มในเนื้อยาง (Agglomerate) เนื่องจากการผสมซิลิกาลงไปในน้ำยางโดยตรงทำให้ซิลิกากระจายตัวไม่ดีทำให้อนุภาคซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกันระหว่างกัน (Filler-filler interaction) มากขึ้น [32] ยางจึงมีความแข็งขึ้น ส่วนระยะเวลาอย่างเริ่มคงรูปและระยะเวลาการคงรูปที่เหมาะสมจะมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางแท่งผสมซิลิกา (STR/Si) และยางแท่งผสม SDS และ ซิลิกา (STRs/Si) พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกับในระบบที่ไม่ผสมซิลิกา เนื่องจากการที่ SDS เกาะที่ผิวยางทำให้สายไซโมเลกุลของยางแยกออกจากกันทำให้ ซิลิกาที่เติมลงไปกระจายตัวได้น้อยลงในเนื้อยางเนื่องจากผลของความเกาะของ SDS ที่แทรกภายในสายไซโมเลกุลของยาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

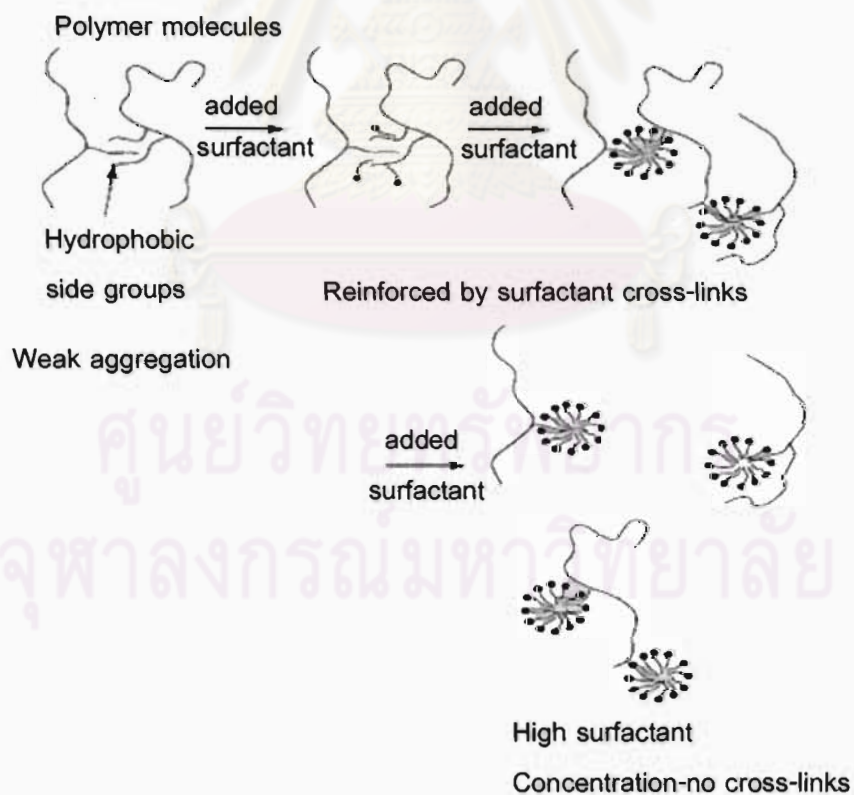


รูปที่ 4.18 กราฟเชื่อมขวางของยางคอมปาวด์ ที่อุณหภูมิ 155°C

(ก) ยางที่ไม่เติมซิลิกา (ข) ยางที่เติมซิลิกา

ตารางที่ 4.9 สมบัติการคงรูปต่าง ๆ ของยางคอมปาวด์ ที่อุณหภูมิ 155°C

ตัวอย่าง	แรงบิดสูงสุด (Maximum torque) kgf-cm	แรงบิดต่ำสุด (Minimum torque) kgf-cm	เวลายางเริ่มคงรูป (Scorch time) นาที	เวลายางคงรูป (Optimum cure time) นาที
STR	8.6	3.4	4.40	5.21
STRs	5.1	1.9	6.32	7.20
NRP	11.2	5.9	2.02	3.22
STR/Si	13.7	5.2	1.50	2.30
STRs/Si	10	2.6	2.14	3.12
NRP/Si	15.1	5.1	1.32	2.36
P(NR/Si)	16.9	6.9	1.38	2.56

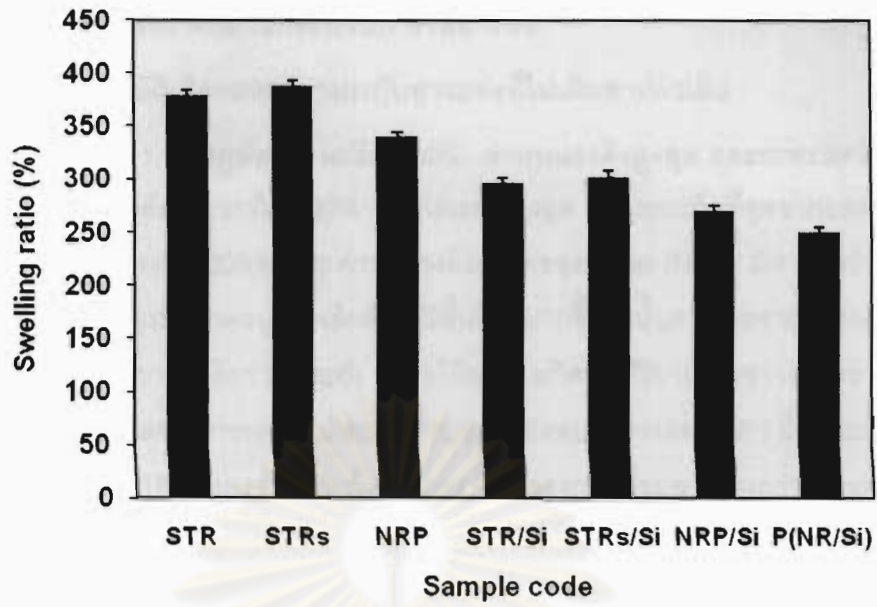


รูปที่ 4.19 กลไกการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิวในโมเลกุลของยาง [27]

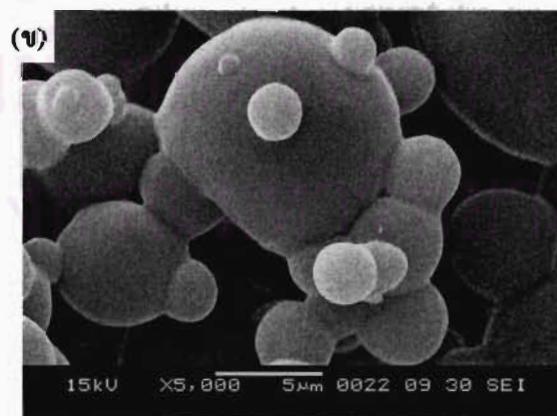
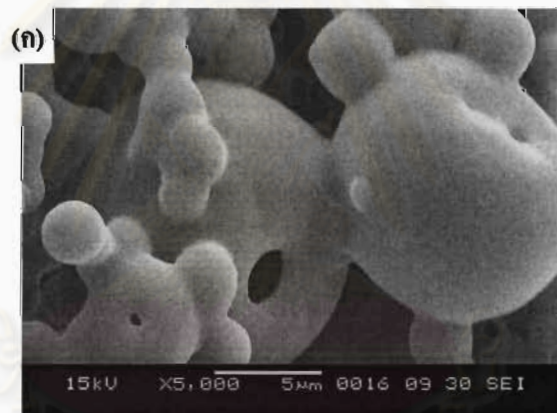
4.5 การศึกษาร้อยละการบวมตัว

รูปที่ 4.20 แสดงค่าอัตราส่วนการบวมตัว (Swelling ratio) ของยางคงรูปในตัวทำละลาย โทลูอิน โดยค่าอัตราส่วนการบวมตัวจะแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง กล่าวคือถ้ายังมีอัตราส่วนของบวมตัวในตัวทำละลายต่ำแสดงว่ายางคงรูปนั้นมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูง เมื่อพิจารณาผลของยางที่ไม่เติมซิลิกาพบว่า ยางผง (NRP) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ มีค่าอัตราส่วนการบวมตัวในตัวทำละลายต่ำกว่ายางแท่ง (STR) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ แสดงว่ายางผงที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์มีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากยางผงมีอนุภาคเล็กสามารถผสมเข้ากับสารคงรูปได้ง่ายทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางได้ขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าแรงบิดสูงสุดที่เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ยางแท่งที่ผสม SDS (STRs) มีอัตราส่วนการบวมตัวที่สูงที่สุดเนื่องจากความหนาแน่นของการเชื่อมขวางน้อยลง อันเนื่องมาจากผลของ SDS ที่เข้าไปเกาะที่สายโซ่โมเลกุลของยาง

เมื่อพิจารณายางที่มีการเติมซิลิกาพบว่ามีค่าการบวมตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่เติมซิลิกาเนื่องจากการบวมตัวจะเกิดขึ้นกับเนื้อยางเท่านั้น ไม่เกิดกับสารตัวเติม การเติมซิลิกา ลงไปจะลดปริมาณเนื้อยางลง ซึ่งซิลิกาจะทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวสายโซ่โมเลกุลของยางไว้ ส่งผลให้ โทลูอินแทรกตัวเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลของยางลดลง [28] จากรูปที่ 4.20 พบว่ายางผสมซิลิกา แล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้ง (P(NR/Si)) มีการค่าอัตราส่วนการบวมตัวในตัวทำละลายน้อยที่สุด หรือมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงสุด รองลงมาคือยางผงผสมซิลิกา (NRP/Si) ยางแท่งผสมซิลิกา (STR/Si) และยางแท่งผสม SDS และซิลิกา (STRs/Si) ตามลำดับ โดยจากการทดลอง พบว่ายางผสมซิลิกาที่ได้จากวิธีพ่นแห้ง (NRP/Si และ P(NR/Si)) ให้ร้อยละการบวมตัวในโทลูอินที่ต่ำเมื่อเทียบกับยางแท่งผสมซิลิกา (STR/Si) เนื่องจากยางที่ได้จากกระบวนการพ่นแห้งจะได้เป็นยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กสามารถผสมยางได้เป็นเนื้อเดียวกับซิลิกาได้ดีขึ้นทำให้ยางเกิดแรงกระทำกับซิลิกาได้ดีขึ้นและยางสามารถเกิดการเชื่อมขวางได้ดีด้วย ในขณะที่การกระบวนการพ่นแห้งจะมีขั้นตอนที่ทำให้น้ำยางที่มีซิลิกาแขวนลอยอยู่ ถูกพ่นกระจายเป็นละอองขนาดเล็กผ่านหัวพ่นด้วยความเร็วสูง ทำให้ซิลิกาสามารถพุ่งเข้าไปเกาะที่ผิวของเนื้อยางได้ ทำให้อนุภาคยางที่แห้งได้มีซิลิกาเกาะกันที่ผิวแล้วตกลงสู่ที่กักเก็บ (Container) สังเกตได้จากรูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างยางที่ผ่านกระบวนการพ่นแห้งที่ไม่เติมซิลิกา (รูปที่ 4.21 (ก)) และเติมซิลิกา (รูปที่ 4.21 (ข)) พบว่ายางที่ผ่านกระบวนการพ่นแห้งที่มีการเติมซิลิกาจะมีอนุภาคเล็ก ๆ สีขาวเกาะอยู่บริเวณรอบ ๆ เนื้อยางเป็นกลุ่ม ในขณะที่ยางที่ไม่เติมซิลิกาจะไม่พบอนุภาคสีขาวเกาะอยู่บริเวณรอบ ๆ เนื้อยาง นั่นแสดงว่าการใช้กระบวนการพ่นแห้งส่งผลให้ซิลิกาเข้าไปเกาะที่ผิวของเนื้อยางได้อย่างดีและขนาดอนุภาคทำให้ยางที่เล็กอาจทำให้เกิดการเชื่อมขวางได้ดีขึ้นด้วยค่าบวมตัวจึงน้อยลง



รูปที่ 4.20 ร้อยละการบวมตัวของยางคงรูปในตัวทำละลาย



รูปที่ 4.21 ลักษณะยางที่ผ่านกระบวนการพ่นแห้ง (ก) ไม่เต็มซิติกา (ข) เต็มซิติกา

4.6 สมบัติเชิงกลของยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์

4.6.1 สมบัติเชิงกลของยางผงกับยางแท่งที่ไม่เติมสารตัวเติม

4.6.1.1 โมดูลัสที่ระยะยืด 300% ค่าทนแรงดึงสูงสุด และระยะยืดที่จุดขาด โมดูลัสที่ระยะยืด 300% ค่าทนแรงดึงสูงสุด และระยะยืดที่จุดขาดแสดงดังรูปที่

4.22 พบว่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300% และ ค่าทนแรงดึงสูงสุดของยางผง (NRP) มีค่าสูงกว่ายางแท่ง (STR) เนื่องจากยางผงมีขนาดอนุภาคเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นดังนั้นการกระจายตัวของสารเคมีเข้าเป็นเนื้อเดียวกับยางจึงดีกว่ายางแท่ง ส่งผลให้ยางผงเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลได้ดีขึ้นและผลจากการทดสอบร้อยละการบวมตัวยังพบว่ายางผง (NRP) มีร้อยละการบวมตัวต่ำกว่ายางแท่ง (STR) แสดงว่ายางผงมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูงกว่ายางแท่ง (STR) การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของการเชื่อมขวางทำให้สายโซ่เคลื่อนออกจากกันได้ยากขึ้นค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300% จึงมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ความทนแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมขวางที่แข็งแรงขึ้น ในขณะที่ระยะยืดที่จุดขาดลดลง เพราะการผลของการเติม SDS ลงไปทำให้มีเนื้อยางน้อยลงส่งผลให้ยางมีความยืดหยุ่นน้อยลง [29]

เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติม SDS ลงไปในยางระหว่างยางแท่งที่ไม่เติม SDS (STR) กับยางแท่งที่เติม SDS (STRs) พบว่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300% และความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ยางแท่งที่เติม SDS มีระยะยืดที่จุดขาดลดลงอย่างเห็นได้ชัดคาดว่าอาจเกิดจาก SDS ที่เติมลงไปยางในปริมาณมากๆ อาจทำให้การกระจายตัวในเนื้อยางได้ไม่ดี ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มของ SDS ในสายโซ่โมเลกุลของยาง โดยการรวมตัวเป็นกลุ่มของ SDS บางส่วนอาจเกิดการเชื่อมโยงพันธะระหว่าง SDS กับ สายโซ่โมเลกุลของยาง ดังภาพที่ 4.19 ทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น บางส่วนเกิดการแทรกตัวอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของยางทำให้สายโซ่อยู่ห่างกันทำให้โมเลกุลของยางสามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายทำให้ยางเมื่อถูกดึงแล้วเกิดการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบยากขึ้นทำให้ตลกผลึกได้ไม่ดีทำให้ค่าระยะยืดที่จุดขาดลดลงอย่างมาก [25]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

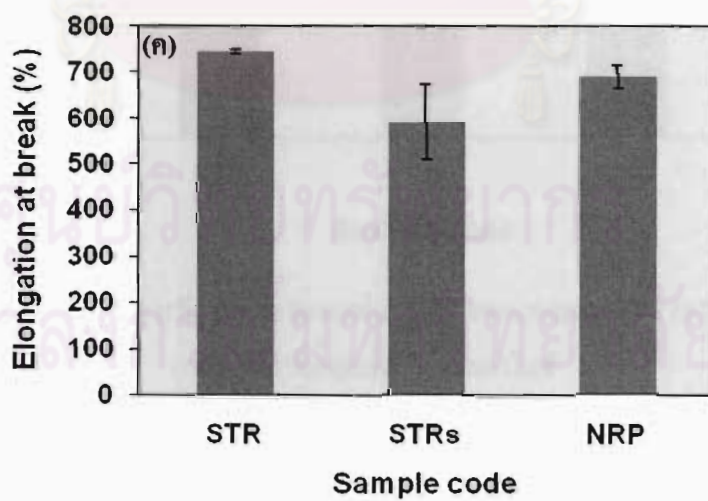
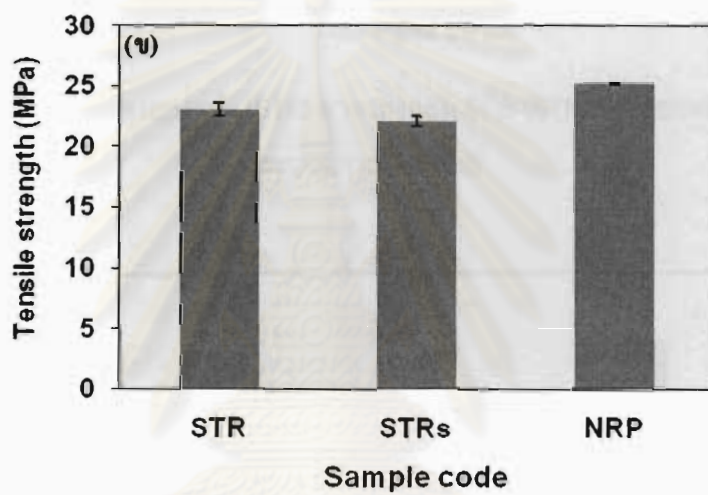
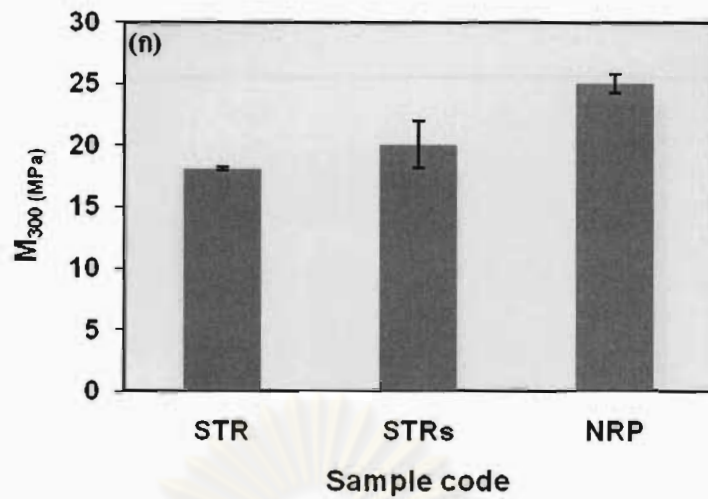
4.6.1.2 ค่าความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งของยางที่ไม่เติมสารตัวเติม แสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่ายางผง (NRP) มีค่าความแข็งสูงกว่ายางแท่ง (STR) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง เมื่อเปรียบเทียบยางแท่งผสม SDS (STRs) กับยางแท่ง (STR) พบว่ามีค่าความแข็งใกล้เคียง แสดงว่าการเติม SDS ลงไปในยางจะไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งของยาง

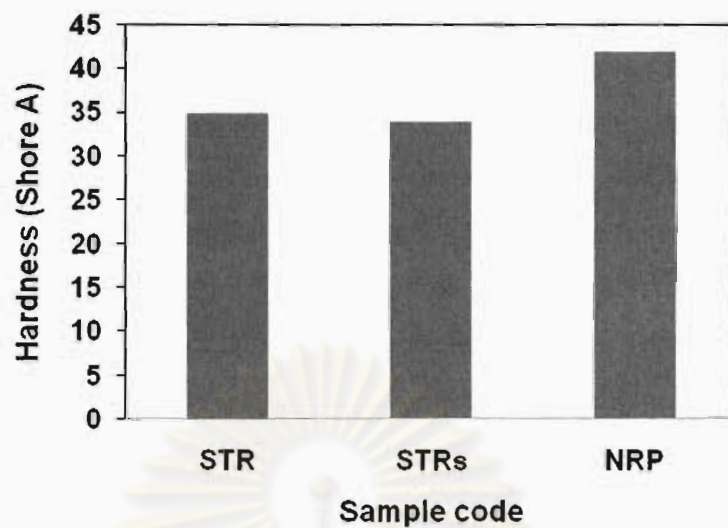
4.6.1.3 ความต้านทานการฉีกขาด

รูปที่ 4.24 แสดงผลทดสอบความต้านทานการฉีกขาดของยางที่ไม่เติมสารตัวเติม พบว่ายางผง (NRP) และยางแท่ง (STR) มีค่าความต้านทานการต่อฉีกขาดใกล้เคียงกัน ในขณะที่ยางแท่งที่ผสม SDS (STRs) มีค่าความต้านทานการฉีกขาดน้อยกว่ายางแท่ง (STR) ทั้งนี้คาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการเติม SDS ในเนื้อยาง ส่งผลให้โมเลกุลของยางเกาะกันน้อยลงดังที่อธิบายในหัวข้อ 4.6.1.1 ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบการฉีกขาด โมเลกุลของยางจึงแยกออกจากกันได้ง่ายขึ้น

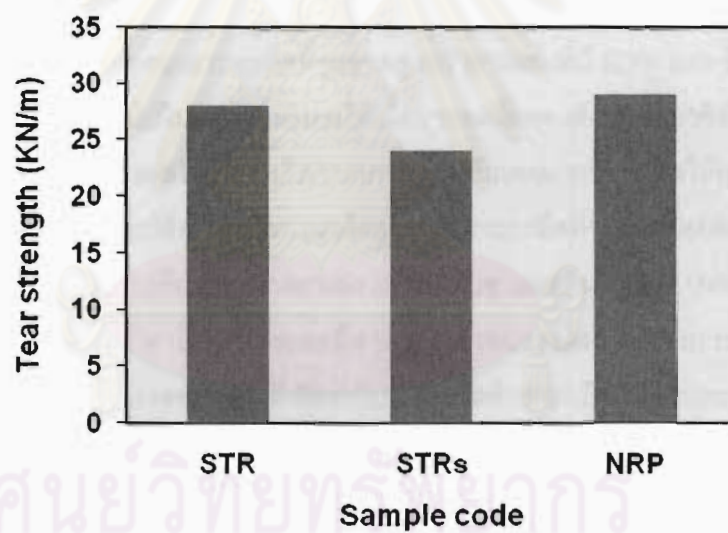
จากผลการทดสอบเชิงกลสามารถสรุปได้ว่ายางผง (NRP) ที่ได้จากกระบวนการพ่นแห้งมีสมบัติทางด้าน โมดูลัสที่ระยะยืด 300% ความทนแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งที่สูงกว่ายางแท่ง (STR) เนื่องจากยางที่เตรียมได้จากกระบวนการพ่นแห้งมีขนาดอนุภาคที่เล็ก มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนซ์ได้ดีขึ้นทำให้มีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น แต่จะพบว่ายางผง (NRP) ที่เตรียมได้มีค่าระยะยืดที่จุดขาดและด้อยกว่ายางแท่ง (STR) ส่วนค่าความต้านทานการฉีกขาดจะมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.22 สมบัติเชิงกลของยางแท่ง (STR) ยางแท่งผสม SDS (STRs) และยางผง (NRP) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ (ก) โมดูลัสที่ระยะยืด 300% (ข) ความทนแรงดึงสูงสุด (ค) ระยะยืดที่จุดขาด



รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งของยางแท่ง (STR) ยางแท่งผสม SDS (STRs) และยางผง (NRP) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์



รูปที่ 4.24 ความต้านทานการฉีกขาดของยางแท่ง (STR) ยางแท่งผสม SDS (STRs) และยางผง (NRP) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์

4.6.2 สมบัติเชิงกลของยางผงกับยางแท่งที่เติมสารตัวเติมชนิดซิลิกา (25 phr)

4.6.2.1 โมดูลัสที่ระยะยืด 300% ค่าทนแรงดึงสูงสุด และระยะยืดที่จุดขาด

ผลการทดสอบโมดูลัสที่ระยะยืด 300% ค่าทนแรงดึงสูงสุด และระยะยืดที่จุดขาดของยางที่ผสมซิลิกาแล้วผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ แสดงดังรูปที่ 4.25 เมื่อพิจารณาผลของการเติมซิลิกาเข้าไปในยางแท่ง (STR/Si) เปรียบเทียบกับยางแท่งที่ไม่ได้เติมซิลิกา (STR) พบว่ายางแท่งที่เติมซิลิกา (STR/Si) มีค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300% ที่สูงขึ้น และมีค่าทนแรงดึงสูงสุดสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการเติมซิลิกาเข้าไป โดยซิลิกาเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงและมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ค่อนข้างสูงทำให้ซิลิกาเสริมแรงแก่ยางได้ดี นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปส่งผลให้ซิลิกาเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและซิลิกาให้สูงขึ้นเนื่องจากปลายด้านหนึ่งของสารคู่ควบไซเลนจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของซิลิกาเกิดเป็นพันธะซิลอกเซน (Siloxane) ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะหันเข้าหาโมเลกุลของยางและจะเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาควบทำให้สารคู่ควบไซเลนยึดติดกับยางได้อย่างแข็งแรง [30] เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างยางแท่งที่เติมซิลิกา (STR/Si) กับยางแท่งที่มี SDS และ ซิลิกา (STRs/Si) พบว่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300% มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ยางแท่งที่เติมซิลิกา (STR/Si) จะมีสมบัติทางด้านทานแรงดึงสูงสุดและระยะยืดที่จุดขาดสูงกว่ายางแท่งที่มี SDS และ ซิลิกา (STRs/Si) เนื่องจากการเติม SDS ลงไปในยางแท่งส่งผลให้เนื้อยางลดน้อยลงดังนั้นซิลิกาจึงเกิดการกระจายตัวในเนื้อยางได้น้อยลงส่งผลให้ซิลิกาเกิดการเกาะกลุ่มกันเองมากขึ้นส่งผลให้ยางแท่งที่มี SDS และ ซิลิกา (STRs/Si) มีสมบัติด้านทานแรงดึงสูงสุดและระยะยืดที่จุดขาดต่ำลง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางผง (NRP) กับยางผงเติมที่ซิลิกา (NRP/Si) พบว่ายางผงที่เติมซิลิกา (NRP/Si) มีค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300% ค่าทนแรงดึงสูงสุด และระยะยืดที่จุดขาดสูงขึ้นเนื่องจากการเสริมแรงของซิลิกาที่เติมลงไป และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างยางผงเติมซิลิกา (NRP/Si) กับยางผสมซิลิกาแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้ง (P(NR/Si)) พบว่ายางผสมซิลิกาแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้ง ให้ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300% ที่สูงขึ้นอย่างมากอาจเนื่องจากการเกาะกลุ่มของซิลิกาทำให้มีอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับซิลิกามากขึ้นทำให้ยางมีความแข็งขึ้นอย่างมากค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300% จึงสูงขึ้น โดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.28 (ง) ซิลิกามีการกระจายตัวในเนื้อยางที่ดีแต่มีการเกาะกลุ่มกันของซิลิกาด้วย ทั้งนี้คาดว่าอาจเกิดในการเตรียมตัวอย่างมีการนำซิลิกาผสมกับน้ำยาง โดยซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีความมีขั้วสูงทำให้มีความเข้ากันกับยางได้ยากเนื่องจากยางไม่มีขั้วหรือมีความมีขั้วต่ำ [33] ทำให้ซิลิกาเกิดการรวมตัวกันแต่เนื่องจากยางที่ได้ออกมา มีลักษณะเป็นอนุภาคที่เล็ก เมื่อนำมาบดผสมกับสารเคมีด้วยเครื่องผสมภายใน (Internal mixing) อาจทำให้ซิลิกากระจายตัวได้ดีขึ้นแต่ยังพบว่ามีเกาะกลุ่มกันของซิลิกาบางจุด ส่งผลให้ค่าทนแรงดึงสูงสุดและค่าระยะยืดที่จุดขาดที่ต่ำลงด้วย (NRP/Si)

4.6.2.2 ค่าความแข็ง

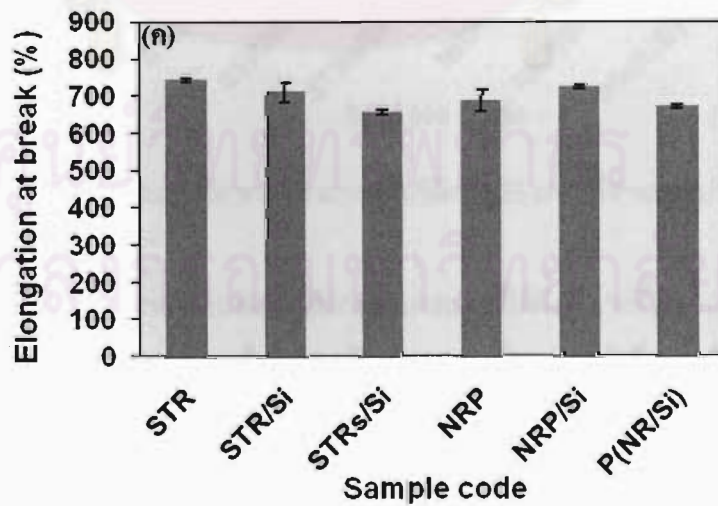
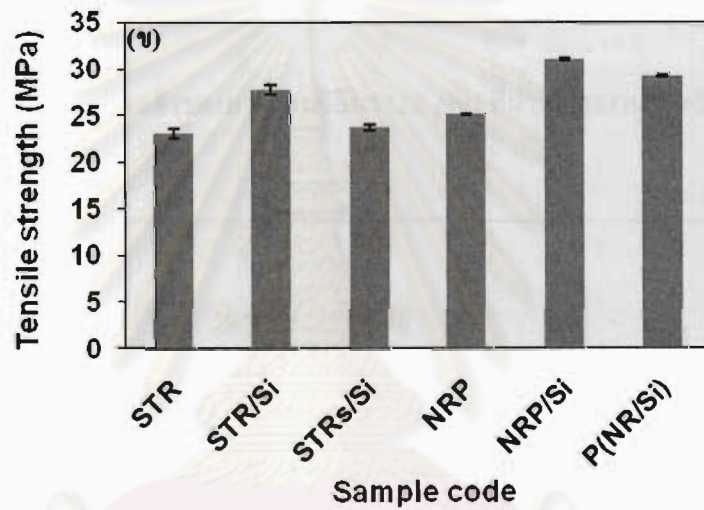
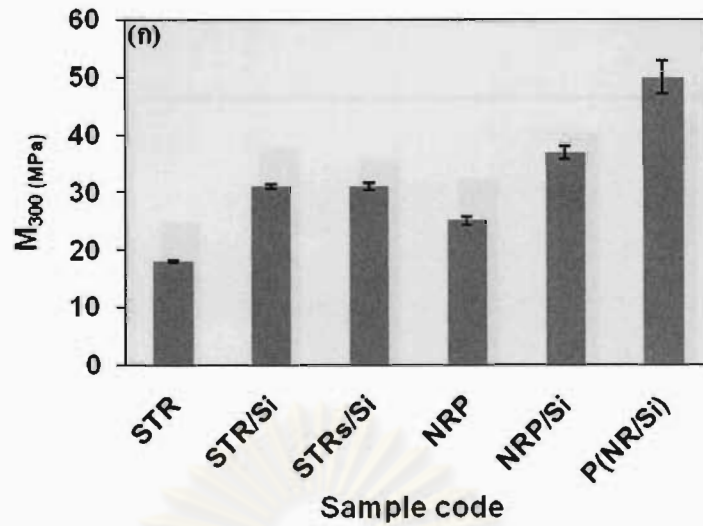
รูปที่ 4.26 แสดงการสมบัติด้านความแข็งของยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติมซิลิกา พบว่ายางแท่งที่เติมซิลิกา (SRT/Si) มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางแท่งที่ไม่เติมซิลิกา (STR) ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาเป็นอนุภาคของแข็งที่มีความแข็งสูงกว่ายางค่อนข้างมาก ดังนั้นเมื่อทำการเติมซิลิกาลงไปจึงส่งผลทำให้สัดส่วนของยางลดลงซึ่งจะส่งผลต่อเนื้อให้ยางมีความแข็งสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางแท่งที่ผสม SDS และ ซิลิกา (STRs/Si) กับยางแท่งที่ผสมซิลิกา (STR/Si) พบว่ายางแท่งที่ผสม SDS และ ซิลิกา (STRs/Si) มีค่าความแข็งลดน้อยลง เนื่องจากมีการกระจายตัวและแตกตัวของซิลิกาในยางได้ไม่ดี

ในขณะที่การเปรียบเทียบระหว่างยางผงที่ไม่เติมซิลิกา (NRP) กับยางผงที่เติมซิลิกา (NRP/Si) พบว่ายางผงที่เติมซิลิกา (NRP/Si) มีความแข็งสูงกว่ายางผง (NRP) เนื่องจากผลของซิลิกาที่เติมลงไป และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางผงที่เติมซิลิกา (NRP/Si) กับยางผสมซิลิกาแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้ง (P(NR/Si)) พบว่ายางผสมซิลิกาแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้ง (P(NR/Si)) มีค่าความแข็งสูงกว่ายางผงที่เติมซิลิกา (NRP/Si) เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของซิลิกา ดังอธิบายในหัวข้อ 4.6.2.1

4.6.2.3 ความต้านทานการฉีกขาด

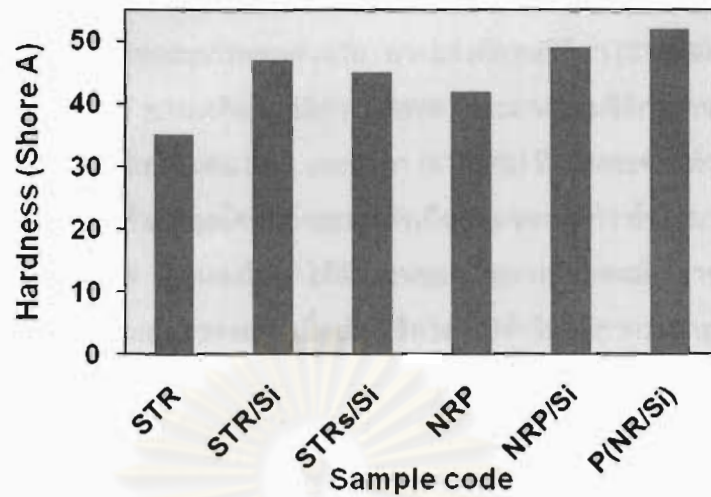
จากรูปที่ 4.27 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางแท่ง (STR) และยางแท่งที่เติมซิลิกา (STR/Si) พบว่า ยางแท่งที่เติมซิลิกาจะมีค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงขึ้นเนื่องจากซิลิกาที่เติมลงไปเป็นสารเสริมแรงประเภทเสริมประสิทธิภาพและมีขนาดอนุภาคที่เล็กทำให้ซิลิกาเข้าไปแทรกในแมทริกซ์ของยางธรรมชาติได้ดีทำให้ความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มสูงขึ้น [30] สำหรับยางแท่งที่ผสม SDS และ ซิลิกา (STRs/Si) จะมีค่าความต้านทานการฉีกขาดน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับยางแท่งที่เติมซิลิกา (STR/Si) โดยอาจเกิดจากการที่ SDS เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ในเนื้อยางทำให้ซิลิกาที่เติมลงไปกระจายตัวในเนื้อยางยากขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มของซิลิกา เมื่อเกิดการดึงทำให้ยางฉีกขาดได้ง่ายขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานการฉีกขาดระหว่างยางผง (NRP) กับยางผงที่เติมซิลิกา (NRP/Si) พบว่ายางผงที่เติมซิลิกา (NRP/Si) มีความต้านทานการฉีกขาดสูงขึ้นยางแท่งเนื่องจากการเสริมแรงของซิลิกาที่เติมลงไป และยังพบอีกว่ายางผงที่เติมซิลิกา (NRP/Si) มีสมบัติความต้านทานการฉีกขาดที่สูงกว่ายางผสมซิลิกาแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้ง (P(NR/Si)) ทั้งนี้เกิดจากการแตกตัวของซิลิกาและสูญเสียซิลิการะหว่างกระบวนการพ่นแห้งดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.6.2.1 ทำให้ง่ายผสมซิลิกาแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้ง (P(NR/Si)) มีความต้านทานการฉีกขาดลดลง

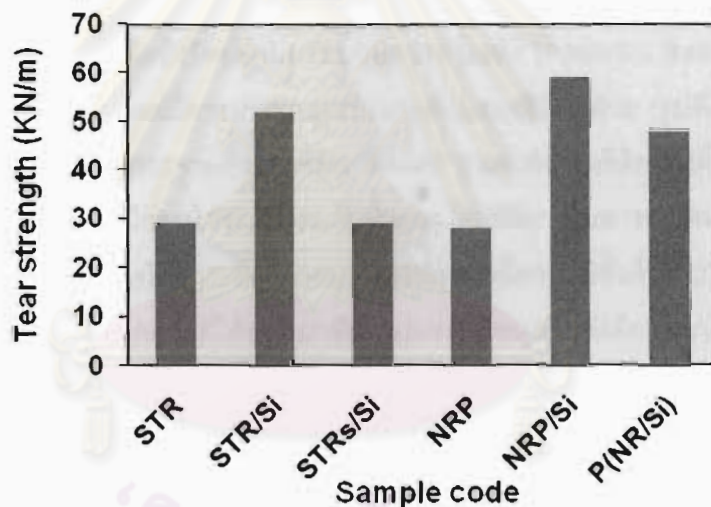


รูปที่ 4.25 สมบัติเชิงกลของยางผสมซิลิกา (25 phr) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์

(ก) โมดูลัสที่ระยะยืด300% (ข) ความทนแรงดึงสูงสุด (ค) ระยะยืดที่จุดขาด



รูปที่ 4.26 ค่าความแข็งของยางผสมซิลิกา (25 phr) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์



รูปที่ 4.27 ค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางผสมซิลิกา (25 phr) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์

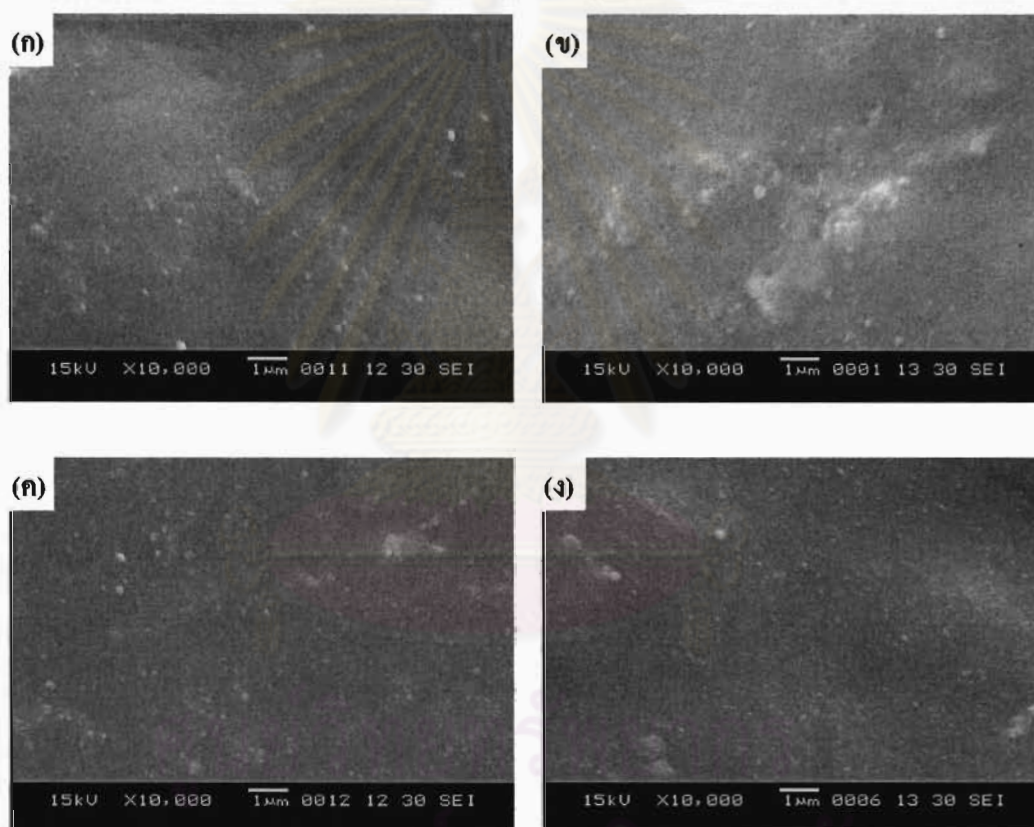
จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลสามารถสรุปได้ดังนี้ ยางที่ได้จากกระบวนการพ่นแห้งในแล้วนำมาเตรียมยางคอมพอสิตให้สมบัติเชิงกลทางด้าน โมดูลัสที่ระยะยืด 300% ค่าทนแรงดึงสูงสุด ความแข็ง ที่ดีกว่าการใช้ยางแห้งในการเตรียมยางคอมพอสิตเนื่องจากยางที่ได้จากกระบวนการพ่นแห้งมีขนาดอนุภาคเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงซึ่งการกระจายตัวของสารตัวเติมในเนื้อยางทำได้ง่ายขึ้นการเสริมแรงของสารตัวเติมในยางจึงดีขึ้นด้วย

4.7 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.28 แสดงลักษณะการกระจายตัวของซิลิกาในยางโดยใช้เทคนิค SEM ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบของยางที่มีลักษณะการผสมต่างกัน ยางแห่งที่ผสมซิลิกา (STR/Si) ยางแห่งที่ผสม SDS และซิลิกา (STRs/Si) ยางแห่งที่ผสมซิลิกา (NRP/Si) และยางผสมซิลิกาผ่านกระบวนการพ่นแห้ง (P(NR/Si)) พบว่ายางแห่งที่ผสม SDS และซิลิกา (STRs/Si) มีการกระจายตัวของซิลิกา (จุดสีขาว) ในเนื้อยาง (สีเทา) ได้แก่ที่สุดโดยมีการเกาะตัวเป็นกลุ่มของซิลิกา ทำให้อย่างมีสมบัติเชิงกลด้อยลง ทั้งนี้เนื่องจาก SDS ที่เติมลงไปทำให้สัดส่วนของเนื้อยางน้อยลงและอาจมีส่วนของ SDS เข้าไปรวมกลุ่มในสายโซโม่เลกุลของยาง เมื่อเติมซิลิกาลงไปทำให้ซิลิกากระจายตัวในเนื้อยางได้ยากการแตกตัวในเนื้อยางจึงแย่งทำให้เกิดการรวมกลุ่มของซิลิกาขึ้น ซึ่งแตกต่างจากยางผง (NRP/Si) ที่มีการเติม SDS ลงไปในระหว่างกระบวนการพ่นแห้ง เนื่องจาก SDS จะเข้าไปจับอนุภาคของยางในน้ำยางทำให้ยางมีขนาดเล็กลงเมื่อทำพ่นแห้งออกมาทำให้ยางมีลักษณะอนุภาคที่เล็กและกลมส่งผลให้ยางมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ดังนั้นการกระจายตัวและแตกตัวของซิลิกาในเนื้อยางจึงดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น เมื่อเทียบกับยางแห่งที่ผสมซิลิกา (STR/Si) และยางแห่งที่ผสม SDS และซิลิกา (STRs/Si) นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่ายางที่มีการผสมซิลิกาในน้ำยางแล้วทำให้แห้งโดยผ่านกระบวนการพ่นแห้ง (P(NR/Si)) ส่งผลให้ซิลิกามีการกระจายตัวในเนื้อยางที่ดีแต่มีการเกาะกลุ่มกันบางส่วนของซิลิกาด้วย (รูปที่ 4.28 (ง)) นั่นคือกระบวนการพ่นแห้งมีการกระจายตัวของซิลิกาที่ดีแต่การแตกตัวของซิลิกาไม่ดี ทั้งนี้คาดว่าอาจเกิดในการเตรียมตัวอย่างมีการนำซิลิกาผสมกับน้ำยาง โดยซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีความมีชีวิตสูง ทำให้มีความเข้ากันกับยางได้ยากเนื่องจากยางไม่มีขั้วหรือมีความมีชีวิตต่ำ [33] ทำให้ซิลิกาเกิดการรวมตัวกันแต่เนื่องจากยางที่ได้ออกมาจะมีลักษณะเป็นอนุภาคที่เล็ก เมื่อนำมาผสมกับสารเคมีด้วยเครื่องผสมภายใน (Internal mixing) อาจทำให้ซิลิกากระจายตัวได้ดีขึ้น

จากงานวิจัยพบว่าการใช้วิธีการพ่นแห้งในการเตรียมยางคอมพอสิตจะให้มีสมบัติเชิงกลทางด้าน โมดูลัสที่ระยะยืด 300% ค่าทนแรงดึงสูงสุด ค่าความแข็ง ความต้านทานการฉีกขาด ที่ดีกว่าการใช้วิธีการเตรียมแบบดั้งเดิมเนื่องจากกระบวนการพ่นแห้งสามารถผลิตยางที่มีขนาดอนุภาคที่เล็ก ส่งผลมีพื้นที่ผิวมากขึ้นทำให้เกิดการกระจายตัวของสารตัวเติมและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนซ์ที่ดีขึ้น โดยงานวิจัยได้ทดลองเปรียบเทียบการผสมสารตัวเติมโดยใช้วิธีพ่นแห้งเปรียบเทียบกัน 2 แบบ คือ การเตรียมยางแห้งโดยกระบวนการพ่นแห้งแล้วนำมาผสมกับสารตัวเติม และการเตรียมโดยนำสารตัวเติมผสมลงในน้ำยางแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้ง เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า การนำสารตัวเติมผสมลงในน้ำยางแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้งมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการนำยางที่ผ่านกระบวนการพ่นแห้งแล้วนำมาผสมสารตัวเติมเล็กน้อย ซึ่งน่าจะมีผลมาจากการนำสารตัวเติมมาผสมกับน้ำยางทำให้มีซิลิกากระจายตัวในน้ำยางที่ด้อยลง

และอาจเกิดการตกตะกอนของสารตัวเติมทำให้ต้องมีการรบกวนตลอดเวลาเพื่อป้องกันการตกตะกอน แต่ขั้นตอนของกระบวนการพ่นแห้งจะต้องมีการป้อนสารเข้าไปในตัวเครื่องโดยผ่านสายยางซึ่งจุดนี้ไม่สามารถทำการป้องกันไม่ให้เกิดตะกอนได้ประกอบกับการทดลองใช้อัตราการป้อนที่ต่ำ (3 มิลลิลิตรต่อนาที) ทำให้น้ำยางใช้เวลาอยู่บริเวณจุดนี้พอสมควรทำให้มีการตกตะกอนของสารตัวเติมบริเวณนี้ได้และเมื่อทำการป้อนผ่านสายยางเข้าสู่หัวพ่นก็จะเกิดการอุดตันและตกค้างของสารตัวเติมที่บริเวณหัวพ่นทำให้มีการสูญเสียสารตัวเติมไป ทำให้ปริมาณสารตัวเติมที่ผสมกับยางตามความเป็นจริง มีค่าน้อยลงกว่าที่ผสมลงไปเริ่มต้น ส่งผลให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรนำยางมาผสมกับสารตัวเติมที่หลัง



รูปที่ 4.28 SEM แสดงการกระจายตัวของซิลิกา (25 phr) ในยางคงรูป (ก) ยางแห้งผสมซิลิกา

(ข) ยางแห้งผสม SDS และ ซิลิกา (ค) ยางผสมผสมซิลิกา

(ง) ยางผสมซิลิกาที่ผ่านกระบวนการพ่นแห้ง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการทำยางแห้งแบบผงด้วยเครื่องพ่นแห้ง ด้วยวิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k โดยตัวแปรและภาวะที่ใช้ในการศึกษาการออกแบบการทดลองประกอบไปด้วย 5 ตัว ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า อัตราการป้อนสารอัตราไหลของอากาศร้อน เปอร์เซ็นต์เนื้อยางและปริมาณสารลดแรงตึงผิว โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง และปริมาณสารลดแรงตึงผิว มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละผลได้ของยางแห้ง สามารถหาภาวะที่เหมาะสมของการทำยางแห้งแบบผงคือ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 10% อัตราไหลของอากาศร้อน 600 ลิตรต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง 15% และปริมาณสารลดแรงตึงผิว 12 phr โดยร้อยละผลได้ของยางแห้งที่ได้บริเวณที่กักเก็บตัวอย่างคือ 44.9% และร้อยละความชื้นของยางแห้งคือ 0.42% และสามารถเก็บผลิตภัณฑ์ยางผงทั้งหมดจากเครื่องพ่นแห้งได้ 98.41 %

สำหรับยางผงที่เตรียมจากวิธีการพ่นแห้งสามารถใช้สารลดแรงตึงผิว SDS ในการป้องกันยางเหนียวติดที่บริเวณเครื่องพ่นแห้งได้เนื่องจากการ SDS จะเข้าไปล้อมรอบอนุภาคของยางทำให้ยางมีความเหนียวลดลงแต่การใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ SDS จับตัวกันเองเป็นกลุ่มใหญ่ทำให้การพ่นแห้งยากขึ้นส่งผลให้ร้อยละผลได้ของยางแห้งลดลง

เมื่อนำยางผงที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับยางแห้งพบว่าสมบัติทางด้านความทนต่อแรงดึงสูงสุด 300% โมดูลัส และความแข็งเพิ่มของยางผงมีค่าสูงกว่าเนื่องจากยางผงที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กทำให้สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการคงรูปผสมเข้ากันกับยางได้ง่ายและดีขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมขวางที่ดีขึ้นยางจึงมีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น และเมื่อทำการศึกษาผลของสารตัวเติมชนิดซิลิกา พบว่ายางผงที่ผสมซิลิกามีสมบัติเชิงกลทางด้าน ความทนต่อแรงดึงสูงสุด ระยะยืดที่จุดขาด โมดูลัสที่ระยะยืด 300% ความแข็งและความทนทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางแห้งที่ผสมซิลิกาเนื่องจากซิลิกาแตกตัวในยางผงได้ดีกว่ายางแห้งทำให้สมบัติเชิงกลสูงกว่า และยังไปกว่านั้นการผสมซิลิกาลงไปในน้ำยางแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้งจะให้สมบัติเชิงกลทางด้าน 300% โมดูลัสและความแข็งที่สูงกว่ายางผงผสมซิลิกา

เมื่อศึกษาการกระจายตัวของซิลิกาในยางโดยใช้การศึกษาภาพจากเครื่อง SEM พบว่าการใช้ซิลิกาผสมในน้ำยางแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้งจะทำให้ซิลิกาแตกตัวในยางได้ดีที่สุด รองลงมาคือยางผงผสมซิลิกาและยางแห้งผสมซิลิกาตามลำดับ เนื่องจากก่อนการพ่นแห้งจะทำการผสม ซิลิกาลงไปในน้ำยางแล้วใช้เครื่องกวนเพื่อให้ซิลิกาแขวนลอยอยู่ในน้ำยางจากนั้นจะ

ผ่านกระบวนการพ่นแห้งโดยน้ำยางที่ผสมซิลิกาจะถูกทำให้เป็นละอองฝอยขนาดเล็กแล้วถูกทำให้แห้งอย่างรวดเร็ว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1-2 วินาที ซึ่งเร็วพอที่ซิลิกาจะแขวนลอยอยู่ในน้ำยางโดยที่ยังไม่ตกตะกอนลงมาก่อน ทำให้ซิลิกาเกาะและกระจายตัวในยางได้ดีกว่าการผสมซิลิกากับยางแห้งโดยใช้วิธีดั้งเดิม

การใช้วิธีการพ่นแห้งในการเตรียมยางคอมพอสิตจะทำให้สมบัติเชิงกลทางด้าน โมดูลัสที่ระยะยืด 300% ค่าทนแรงดึงสูงสุด ค่าความแข็งแรง ความต้านทานการฉีกขาด ที่ดีกว่าการใช้วิธีการเตรียมแบบดั้งเดิมเนื่องจากกระบวนการพ่นแห้งสามารถผลิตยางที่มีขนาดอนุภาคที่เล็ก ส่งผลมีพื้นที่ผิวมากขึ้นทำให้เกิดการกระจายตัวของสารตัวเติมและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนซ์ที่ดีขึ้น โดยงานวิจัยได้ทดลองเปรียบเทียบการผสมสารตัวเติมโดยใช้วิธีพ่นแห้งเปรียบเทียบกัน 2 แบบ คือ การเตรียมยางแห้งโดยกระบวนการพ่นแห้งแล้วนำมาผสมกับสารตัวเติม และการเตรียมโดยนำสารตัวเติมผสมลงในน้ำยางแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้ง เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า การนำสารตัวเติมผสมลงในน้ำยางแล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้งมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการนำยางที่ผ่านกระบวนการพ่นแห้งแล้วนำมาผสมสารตัวเติมเล็กน้อย ซึ่งน่าจะมีผลมาจากการนำสารตัวเติมมาผสมกับน้ำยางจะเกิดการตกตะกอนของสารตัวเติมทำให้ต้องมีการกวนตลอดเวลาเพื่อป้องกันการตกตะกอน แต่ขั้นตอนของกระบวนการพ่นแห้งจะต้องมีการป้อนสารเข้าไปในตัวเครื่องโดยผ่านสายยางซึ่งจุดนี้ไม่สามารถทำการป้องกันไม่ให้ตกตะกอนได้ประกอบกับการทดลองใช้อัตราการป้อนที่ต่ำ (3 มิลลิลิตรต่อนาที) ทำให้น้ำยางใช้เวลาอยู่บริเวณจุดนี้พอสมควรทำให้มีการตกตะกอนของสารตัวเติมบริเวณนี้ได้และเมื่อทำการป้อนผ่านสายยางเข้าสู่หัวพ่นก็จะเกิดการอุดตันและตกค้างของสารตัวเติมที่บริเวณหัวพ่นทำให้มีการสูญเสียสารตัวเติมไป ทำให้ปริมาณสารตัวเติมที่ผสมกับยางตามความเป็นจริง มีค่าน้อยลงกว่าที่ผสมลงไปเริ่มต้นส่งผลให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการนำยางมาผสมกับสารตัวเติมภายหลัง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยพบว่าอนุภาคยางผงที่ได้แม้ว่าจะมีขนาดเล็กและมีลักษณะเป็นอนุภาคกลมแต่ยังพบว่ายางยังเกิดการจับตัวกันอยู่ จึงควรหาสารป้องกันการจับตัวของยางซึ่งมีอยู่หลายชนิดมาศึกษาเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการป้องกันการจับตัวกัน อีกทั้งการทำแห้งด้วยเครื่องพ่นแห้งอุณหภูมิร้อนอาจจะมีผลต่อผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ แต่ในการทดลองนี้ไม่สามารถกำหนดอุณหภูมิร้อนออกเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่อง ดังนั้นถ้าได้ทำการศึกษาโดยกำหนดอุณหภูมิร้อนออกได้น่าจะทำให้กระบวนการทำยางผงมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] จินตนา ศรีผุย. การศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีต่อคุณภาพสารชีวภาพ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2537.
- [2] Spicer, P.T., Small, W.B., Lynch, M.L0, and Burns, J.L. Dry powder precursors of cubic liquid crystalline nanoparticles. Journal of Nanoparticle Research 4 (May 2002):297-311
- [3] Keey, R.B., and Pham, Q.T. Behavior of spray driers with nozzle atomizers. Chem. Engg. 1976
- [4] Robert, A.D. Natural rubber science and technology. 2nd.ed. Hong kong: Graphicraft., 1990
- [5] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. เทคโนโลยียาง. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2537.
- [6] อุดุลย์ เทียงจรรยา. เอกสารประกอบการเรียนวิชายางและเทคโนโลยียาง, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สงขลานครินทร์, 2547.
- [7] พงษ์ธร แซ่ฮุย.ยาง ชนิด สมบัติและการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), 2548.
- [8] ศูนย์วิจัยการยาง. คำบรรยายวิชายางสำหรับการฝึกอบรมเจ้าหน้าที่. ศูนย์วิจัยยาง สงขลา , 2520.
- [9] เกษตรและสหกรณ์, กระทรวง. กรมวิชาการเกษตร. เอกสารข้อมูลวิชาการยางพารา. สถาบันวิจัยยาง กรุงเทพฯ, 2545
- [10] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. กระบวนการผลิตภัณฑ์ยาง. เอกสารวิชาการ, 135 (พฤศจิกายน 2530)
- [11] บุญธรรม ภัทรอาจารย์กุล. วัสดุช่าง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ไอดีเอ็น สไตร์, 2532

- [12] พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2535
- [13] James, E.M., Burak, E., Frederick, R.E. Science and Tecnology of Rubber. Second Edition : Academic Press, 1994.
- [14] Roberts, A.D. Natural Rubber Science and Technology : Oxford University Press, 1988.
- [15] Fred, W.B. Rubber Compounding principles, materials and techniques. Second Edition, 1993.
- [16] Lee, Y.K., Yoon R.Y., Rhee H.K. Preparation of colloidal silica using peptization method. Physicochemical and Engineering Aspects 173, 109-116, 2000
- [17] Disuke, K., Tetsuji, K. and Yousuke, S. Method for producing rubber from rubber latex. EP Patent 1692189B1. 2004.
- [18] Masaki, O., Kouji, M. and Akihiro, T. Resin powder of rubber-containing graft copolymer mixture and process for producing the same. EP Patent 1650252A1. 2006.
- [19] Wang, J.D., Zhu, Y.F., Zhou, X.W., Sui, G. and Liang, J. Preparation and Mechanical Properties of Natural Rubber Powder Modified by Carbon Nanotubes. J. Appl. Polym. Sci. 100 (2006): 4697-4702.
- [20] Zhou, X., Zhu, Y., Gong, Q. and Liang, J. Preparation and properties of the powder SBR composites filled with CNTs by spray drying process. Materials letters. 60 (2006): 3769-3775.
- [21] สมเจตน์ พัชรพันธ์, วีระเดช พิณเสนาะ, ศิริพงษ์ จันทร์พูนทรัพย์ และณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมซิลิกาแคลเซียมคาร์บอเนตและสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติของยางโฟมธรรมชาติ. วารสารสงขลานครินทร์ 25 (มกราคม-กุมภาพันธ์ 2546): 75-90.

- [22] Santanu, P. and Kartic, C.K. A review on experimental studies of surfactant adsorption at the hydrophobic solid-water interface. Advances in Colloid and Interface Science. 110 (2004): 75-95.
- [23] Ho, C.C., Kondo, T., Muramatsu, N., and Ohshima, H. Surface structure of natural rubber latex particles from electrophoretic mobility data. Journal of colloid and interface science. 178 (1996): 442-445
- [24] L.H. Sperling. Introduction to Physical Polymer Science. John Wiley, 308-319, 1992
- [25] คุณัช ปาลวัฒน์วิไชย. การดัดแปรยางธรรมชาติเพื่อใช้เป็นตัวช่วยในกระบวนการผลิต, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.
- [26] Sae-oui, P., Sirisinha, C., Thepsuwan, U. and Hatthapanit, K. Comparison of Reinforcing Efficiency between Si-69 and Si-264 in a Conventional Vulcanization System. Polymer Testing. 23 (2004): 871-879.
- [27] Krister, H., Bo, J., Bengt, K. and Bjorn, L. Surfactants and Polymers in Aqueous Solution. Second Edition. John Wiley & Sons. 2003
- [28] Arroyo, M., López-Manchado, M.A., Valentín, J.L and Carretero, J. Morphology behaviour relationship of nanocomposites based on natural rubber/ epoxidized natural rubber blends. Composites Science and Technology. 67 (2007): 1330–1347.
- [29] ภูขงค์ ทับทอง, อุทัย เทพสุวรรณ, ชาศวิต สิริสิงห และพงษ์ธร แซ่ฮุย. ผลของยางคาร์บอนกึ่งซิลิกไนไตรด์ผง (XNBRP) ต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์. วารสารวิทยาศาสตร์ มศว 25 (มิถุนายน 2552): 147-160
- [30] วีรยา วรคันท์, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกชัย วิมลมาลา และศิรินทร ทองแสง. การเสริมแรงของสารประกอบยางธรรมชาติด้วยซิลิกาผสมระหว่างเถ้าลอยและฟริชชีพีเทตซิลิกา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 12 (กรกฎาคม 2553): 9-20.

- [31] Sombatsompop, N., Wimolmala, E., and Sirisinha, C., Fly Ash particles and precipitated silica as fillers in rubbers III cure characteristics and mechanical and oil-resistance properties of acrylonitrile-butadiene rubber. J. Appl. Polym. Sci. 110 (2008): 2877-2883.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก การคำนวณ

การคำนวณร้อยละความชื้น

ชั่งน้ำหนักยางที่ได้จากเครื่องพ่นแห้ง ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ให้ได้น้ำหนักแน่นอนในภาชนะอลูมิเนียมมีฝาปิดที่ผ่านการอบจนน้ำหนักคงที่ นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ข้ามคืน โดยเปิดฝาภาชนะทิ้งไว้ จากนั้นนำตัวอย่างออกจากตู้อบ ผิดฝาภาชนะทันที ทิ้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นทำการอบซ้ำอีกจนได้น้ำหนักที่คงที่ ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำต่อตัวอย่าง จากนั้นนำมาคำนวณปริมาณความชื้นจาก

$$M = 100(W_1 - W_2) / W$$

เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น

W_1 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นหลังอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

การเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำยาง

ในการทดลองจะนำน้ำยางชั้น 60% DRC มาเจือจางให้ได้ %DRC ตามต้องการ เพื่อใช้ในการพ่นแห้งโดยใช้สูตรในการคำนวณดังนี้

$$N_1 V_1 = N_2 V_2$$

เมื่อ N_1 คือ %DRC ของน้ำยางเริ่มต้น

V_1 คือ น้ำหนักของน้ำยางเริ่มต้น

N_2 คือ %DRC ของน้ำยางที่ต้องการ

V_2 คือ น้ำหนักของน้ำยางเริ่มต้นรวมกับน้ำหนักของน้ำที่เติมลงไป

ตัวอย่างการคำนวณ การเตรียมน้ำยางธรรมชาติที่มีความเข้มข้น 15 %DRC ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากน้ำยางธรรมชาติที่มีความเข้มข้น 60 %DRC

$$\text{จากสูตร } 60\% \times V_1 = 15\% \times 100$$

$$V_1 = 25$$

เพราะฉะนั้นนำน้ำยางธรรมชาติชั้น 60% มาชั่งน้ำหนักให้ได้ 25 กรัม จากนั้นทำการเติมน้ำปราศจากไอออนลงไปให้น้ำยางให้ได้ปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร

การคำนวณปริมาณ Sodium dodecyl sulphate (SDS)

SDS หรือชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ Sodium dodecyl sulphate เป็นสารลดแรงตึงผิวใช้ผสมในน้ำยางธรรมชาติก่อนทำการพ่นแห้ง เพื่อให้สามารถพ่นแห้งยางธรรมชาติได้ง่าย เพราะสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้จะทำให้ลดการเกิดกลุ่มก้อนของเนื้อยาง

ปริมาณของ SDS ที่ใช้ในงานวิจัยคือ 12 phr

ดังนั้น ถ้าใช้ปริมาณเนื้อยาง 100 กรัมในการพ่นแห้ง ต้องผสม SDS 12 กรัม

น้ำยางธรรมชาติ 100 มิลลิลิตร ประกอบด้วยเนื้อยาง 19.94 กรัม

ดังนั้น ปริมาณเนื้อยาง 19.94 กรัม ต้องผสม SDS = $(19.94 \times 12) / 100$ กรัม

$$= 2.39 \text{ กรัม}$$

การคำนวณร้อยละผลได้ของยางแห้ง

ร้อยละผลได้ของยางแห้งสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$Y = \frac{(W_2/W_1) \times 100}{1}$$

เมื่อ Y = ร้อยละผลได้ของยางแห้ง

W_1 = น้ำหนักเนื้อยางแห้งในน้ำยางธรรมชาติ

W_2 = น้ำหนักยางแห้งที่เก็บได้จากเครื่องพ่นแห้ง

ตัวอย่างการคำนวณโดยทำการพ่นแห้งน้ำยางธรรมชาติ 15 %DRC จำนวน 100 มิลลิลิตร

แล้วสามารถเก็บผลิตภัณฑ์ยางแห้งจากเครื่องพ่นแห้งได้ 9 กรัม

คำนวณน้ำหนักเนื้อยางแห้งในน้ำยางธรรมชาติ (W_1)

น้ำยางพาราธรรมชาติ มีความหนาแน่น 0.997 กรัมต่อมิลลิลิตร

น้ำยางธรรมชาติ 100 มิลลิลิตร = 0.997×100 จะได้ 99.7 กรัม

น้ำยางธรรมชาติ 15% DRC ปริมาณ 100 กรัม ประกอบด้วยเนื้อยาง 15 กรัม ดังนั้น

น้ำยางธรรมชาติ 15% DRC ปริมาณ 99.7 กรัม

จะประกอบด้วยเนื้อยาง = $(99.7 \times 15) / 100$ กรัม = 14.95 กรัม

การคำนวณร้อยละผลได้ทั้งหมด

ที่ภาวะการทดลองหนึ่งสามารถเก็บผลิตภัณฑ์ยางแห้งในบริเวณส่วนกักเก็บตัวอย่าง (Container) ได้ 6.61 กรัม และจะมียางที่ติดอยู่บริเวณห้องอบ (Drying chamber) และบริเวณไซโคลน (Cyclone) โดยจะติดอยู่ที่ห้องอบปริมาณ 6.51 กรัม และไซโคลน 3.75 กรัม ดังนั้นจะสามารถเก็บยางแห้งได้ทั้งหมด 16.89 กรัม แต่ในการทดลองมีการเติม SDS ลงไป 2.39 กรัม ดังนั้นปริมาณยางทั้งหมดที่แท้จริงที่ได้คือ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณยางแห้งทั้งหมด} &= (\text{ยางที่ container} + \text{Drying chamber} + \text{Cyclone}) - \text{SDS ที่เติม} \\ &= (6.61 + 6.51 + 3.75) - 2.39 \\ &= 14.48 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

แต่เนือยางแห้งที่คำนวณจากน้ำยางได้ 14.95 กรัม

$$\text{ดังนั้นจะได้ร้อยละเนือยางแห้งทั้งหมดเท่ากับ } \frac{14.48}{14.95} \times 100 = 96.86 \%$$

การคำนวณแยกในแต่ละส่วน

ที่ Container เก็บตัวอย่างได้ 6.61 กรัม นั่นคือยางแห้งทั้งหมด 16.89 กรัม มี SDS 2.39 กรัม

$$\text{ดังนั้น ยางแห้ง 6.61 กรัม จะมี SDS อยู่ } \frac{2.39}{16.89} \times 6.61 = 0.92 \text{ กรัม}$$

$$\text{เนือยางแห้งที่แท้จริงคือ } 6.61 - 0.92 = 5.67 \text{ กรัม}$$

ที่ Drying chamber เก็บตัวอย่างได้ 6.51 กรัม ยางแห้งทั้งหมด 16.89 กรัม มี SDS 2.39 กรัม

$$\text{ดังนั้น ยางแห้ง 6.51 กรัม จะมี SDS อยู่ } \frac{2.39}{16.89} \times 6.51 = 0.94 \text{ กรัม}$$

$$\text{เนือยางแห้งที่แท้จริงคือ } 6.51 - 0.94 = 5.57 \text{ กรัม}$$

ที่ Cyclone เก็บตัวอย่างได้ 3.75 กรัม ยางแห้งทั้งหมด 16.89 กรัม มี SDS 2.39 กรัม

$$\text{ดังนั้น ยางแห้ง 3.75 กรัม จะมี SDS อยู่ } \frac{2.39}{16.89} \times 3.75 = 0.53 \text{ กรัม}$$

$$\text{เนือยางแห้งที่แท้จริงคือ } 3.75 - 0.53 = 3.22 \text{ กรัม}$$

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง

ตาราง ข1 ร้อยละผลได้และร้อยละความชื้นของยางแห้งจากการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2⁵

อุณหภูมิ ร้อนชาเข้า (°C)	อัตราเร็วการ ปั่นสาร (%)	อัตราไหล อากาศ (Lh ⁻¹)	ร้อยละเนื้อ ยางแห้ง (%)	ปริมาณ SDS (phr)	ร้อยละ ผลได้ (%)	ร้อยละ ความชื้น (%)
170	10	800	40	15	9.31	0.46
170	20	800	20	15	18.16	0.50
130	20	800	40	5	2.84	0.69
130	20	500	40	5	5.33	0.99
130	10	800	20	15	27.95	0.47
130	10	500	20	15	40.34	0.49
130	20	500	20	5	29.96	0.52
150	15	650	30	10	19.78	0.45
150	15	650	30	10	19.37	0.46
130	10	500	20	5	3.39	0.48
130	20	800	20	15	26.25	0.65
170	20	500	40	5	13.41	0.50
150	15	650	30	10	16.67	0.45
130	20	500	20	15	20.97	0.60
170	20	500	40	15	26.18	0.47
170	10	800	20	5	14.79	0.49
170	10	500	20	15	9.05	0.40
170	20	500	20	15	11.08	0.49
130	10	800	20	5	5.97	0.52
130	20	500	40	15	14.04	0.57
170	10	500	40	5	21.30	0.47
130	10	500	40	5	1.78	0.54
170	20	800	40	15	18.86	0.58

ตาราง ข1 (ต่อ)

อุณหภูมิลม ร้อนขาเข้า (°C)	อัตราเร็วการ ปั่นสาร (%)	อัตราไหล อากาศ (Lh ⁻¹)	ร้อยละเนื้อ ยางแห้ง (%)	ปริมาณ SDS (phr)	ร้อยละ ผลได้ (%)	ร้อยละ ความชื้น (%)
170	10	800	40	5	11.02	0.24
170	10	500	40	15	21.56	0.03
130	10	500	40	15	11.93	0.51
170	20	800	20	5	13.31	0.48
170	10	500	20	5	7.53	0.48
130	20	800	40	15	6.87	0.52
130	10	800	40	15	23.93	0.54
170	10	800	20	15	9.79	0.42
130	10	800	40	5	1.71	0.52
170	20	500	20	5	11.32	0.49
170	20	800	40	5	10.48	0.47
130	20	800	20	5	0	0.49 ¹

¹ เนื่องจากร้อยละผลได้เท่ากับ 0 ถ้าใส่ผลของความชื้นเป็น 0 จะได้ผลในเชิงบวกจึงเลือกใช้ข้อมูลเฉลี่ยแทน

ตาราง ข2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของยางแห้งแบบ 2⁵

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	2812.7021	31	90.7323	31.7337	0.0310
A	75.9853	1	75.9853	26.5759	0.0356
B	631.3829	1	631.3829	220.8267	0.0045
C	0.4700	1	0.4700	0.1644	0.7244
D	1.8328	1	1.8328	0.6410	0.5073
E	71.8085	1	71.8085	25.1151	0.0376
AB	4.9093	1	4.9093	1.7170	0.3203
AC	476.5856	1	476.5856	166.6862	0.0059
AD	8.7705	1	8.7705	3.0675	0.2220
AE	5.3378	1	5.3378	1.8669	0.3052

ตาราง ข2 (ต่อ)

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
BC	315.4409	1	315.4409	110.3257	0.0089
BD	29.2963	1	29.2963	10.2464	0.0853
BE	12.3594	1	12.3594	4.3227	0.1732
CD	26.5771	1	26.5771	9.2954	0.0928
CE	8.4798	1	8.4798	2.9658	0.2272
DE	16.6537	1	16.6537	5.8246	0.1372
ABC	77.0230	1	77.0230	26.9389	0.0352
ABD	41.7888	1	41.7888	14.6157	0.0621
ABE	9.9105	1	9.9105	3.4662	0.2037
ACD	0.2474	1	0.2474	0.0865	0.7963
ACE	234.4485	1	234.4485	81.9986	0.0120
ADE	0.6308	1	0.6308	0.2206	0.6848
BCD	264.4457	1	264.4457	92.4901	0.0106
BCE	39.3175	1	39.3175	13.7513	0.0656
BDE	56.7897	1	56.7897	19.8622	0.0468
CDE	77.4649	1	77.4649	27.0934	0.0350
ABCD	1.7737	1	1.7737	0.6204	0.5134
ABCE	1.9638	1	1.9638	0.6868	0.4944
ABDE	204.9384	1	204.9384	71.6774	0.0137
ACDE	10.0420	1	10.0420	3.5122	0.2018
BCDE	18.3913	1	18.3913	6.4324	0.1266
ABCDE	87.6359	1	87.6359	30.6507	0.0311
Curvature	56.3631	1	56.3631	19.7131	0.0472
Pure Error	5.7184	2	2.8592		
Cor Total	2874.7836	34			

ตาราง ข3 ร้อยละผลได้ของยางแห้งจากการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2³

อุณหภูมิหม้อน้ำเข้า (°C)	ร้อยละเนื้อยางแห้ง (%)	ปริมาณ SDS (phr)	ร้อยละผลได้ยางแห้ง		
			1	2	เฉลี่ย
130	20	15	41.11	41.56	41.33
120	15	10	39.84	38.78	39.31
140	15	10	39.95	40.53	40.24
120	25	10	39.49	39.36	39.43
140	25	10	39.03	35.75	37.39
120	15	20	11.69	18.88	15.28
140	15	20	10.42	8.32	9.37
120	25	20	7.69	8.10	7.89
140	25	20	9.16	9.39	9.28

ตาราง ข4 ร้อยละผลได้ของยางแห้งจากการทดลองแบบ CCD

ร้อยละเนื้อยางแห้ง (%)	ปริมาณ SDS (phr)	ร้อยละผลได้ยางแห้ง		
		1	2	3
20	15	41.24	41.72	40.61
15	10	39.01	40.27	41.03
25	10	39.25	39.48	35.81
15	20	11.72	10.47	18.92
25	20	9.14	8.13	9.41
20	7.93	36.5	-	-
12.93	15	39.37	-	-
27.07	15	28.51	-	-
20	22.07	8.54	-	-

ตาราง ข5 ผลการทดลองตัวแปรเดียวของปริมาณ SDS ต่อร้อยละผลได้ยางแห้ง

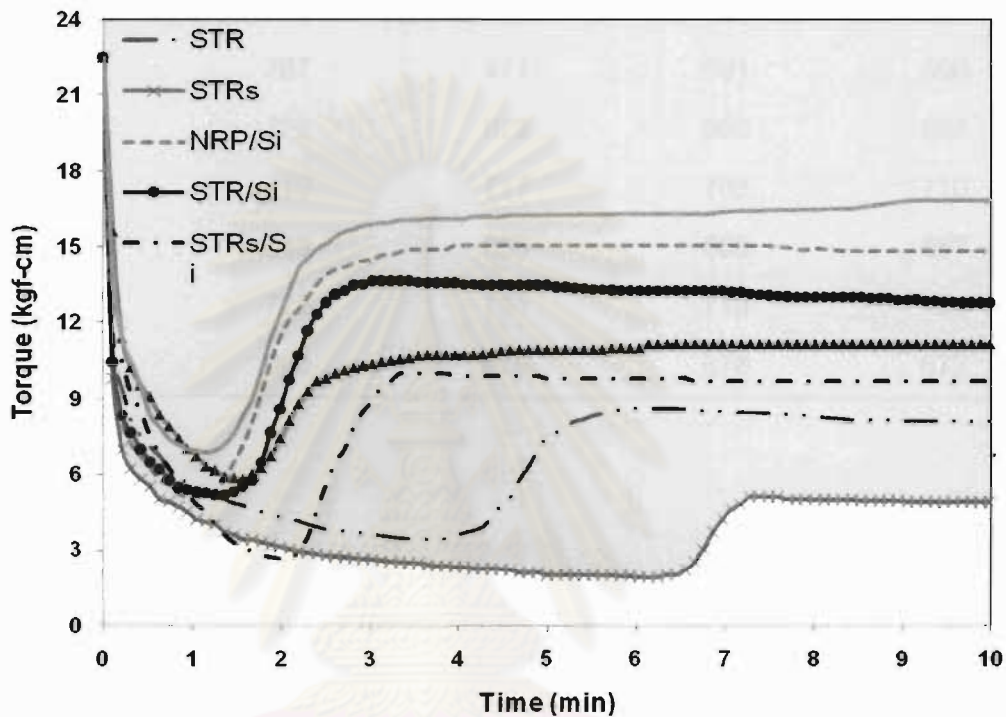
ปริมาณ SDS	ร้อยละผลได้ของยางแห้ง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
6	27.88	28.77	28.32
8	32.22	33.51	32.86
10	40.62	39.38	40.00
12	44.25	45.53	44.89
14	39.70	40.14	39.92
16	34.16	35.43	34.79
18	24.51	27.19	25.85
20	9.48	11.25	10.36

ตาราง ข6 ผลการทดลองตัวแปรเดียวของร้อยละเนื้อยางแห้งต่อร้อยละผลได้ยางแห้ง

ร้อยละเนื้อยางแห้ง	ร้อยละผลได้ของยางแห้ง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
9	40.52	41.72	41.12
12	42.72	44.15	43.43
15	44.25	45.52	44.89
18	40.16	41.48	40.82
21	40.58	38.96	39.77
24	39.35	40.74	40.05

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดสอบสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์



รูปที่ ค1 กราฟเชื่อมขวางของยางที่มีการผสมในลักษณะที่ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 155°C

ตาราง ค1 ผลการทดสอบความทนแรงดึงสูงสุด

ตัวอย่าง	ทนแรงดึงสูงสุด (MPa)			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
STR	23.2	23.6	22.1	23.0
STRs	22.7	22.5	21.6	22.3
NRP	25.1	25.1	25	25.1
STR/Si	27	28.5	27.9	27.8
STRs/Si	24.2	23.2	23.5	23.6
NRP/Si	30.8	31	31.1	31.0
P(NR/Si)	29.3	29.1	29.4	29.3

ตาราง ค2 ผลการทดสอบระยะยืดที่จุดขาด

ตัวอย่าง	ระยะยืดที่จุดขาด (%)			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
STR	750	745	737	744
STRs	707	471	591	590
NRP	729	672	660	687
STR/Si	710	717	703	710
STRs/Si	649	656	666	657
NRP/Si	722	731	718	724
P(NR/Si)	662	676	678	672

ตาราง ค3 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300%

ตัวอย่าง	โมดูลัส (MPa)			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
STR	17.6	18	17.7	17.8
STRs	18.4	23.6	19.5	20.5
NRP	23.7	25.4	25.9	25.0
STR/Si	30.8	31.5	31.9	31.4
STRs/Si	32	30.2	30.5	30.9
NRP/Si	38.3	35.3	36.6	36.7
P(NR/Si)	52.9	45.3	50.7	49.6

ตาราง ค4 ผลการทดสอบความแข็งและความต้านทานการฉีกขาด

ตัวอย่าง	ความแข็ง (Shore A)	ความต้านทานการฉีกขาด (KN/m)
STR	35	29
STRs	34	24
NRP	42	28
STR/Si	47	52
STRs/Si	45	29
NRP/Si	49	59
P(NR/Si)	52	48

ตาราง ค5 สรุปสมบัติการคงรูปและเชิงกลของยางที่ไม่เติมสารตัวเติม

สมบัติการคงรูปและเชิงกล	สูตร		
	STR	STRs	NRP
แรงบิดสูงสุด (kgf-cm)	8.6	5.1	11.2
แรงบิดต่ำสุด (kgf-cm)	3.4	1.9	5.9
เวลายางเริ่มคงรูป (นาที)	4:40	6:32	2:02
เวลายางคงรูป (นาที)	5:21	7:20	3:22
ความทนแรงดึงสูงสุด (MPa)	23	22.3	25.1
ระยะยืดที่จุดขาด (%)	744	590	687
โมดูลัสที่ระยะยืด 300% (MPa)	17.8	20.5	25
ความแข็ง (Shore A)	35	34	42
ต้านทานการฉีกขาด (KN/m)	29	24	28

ตาราง ค6 สรุปสมบัติการคงรูปและเชิงกลของยางที่เติมสารตัวเติมซิลิกา

สมบัติการคงรูปและเชิงกล	สูตร			
	STR/Si	STRs/Si	NRP/Si	P(NR/Si)
แรงบิดสูงสุด (kgf-cm)	13.7	10.0	15.1	16.9
แรงบิดต่ำสุด (kgf-cm)	5.2	2.6	5.1	6.9
เวลายางเริ่มคงรูป (นาที)	1:50	2:14	1:32	1:38
เวลายางคงรูป (นาที)	2:30	3:12	2:36	2:56
ความทนแรงดึงสูงสุด (MPa)	27.8	23.6	31	29.3
ระยะยืดที่จุดขาด (%)	710	657	724	672
โมดูลัสที่ระยะยืด 300% (MPa)	31.4	30.9	36.7	49.6
ความแข็ง (Shore A)	47	45	49	52
ต้านทานการฉีกขาด (KN/m)	52	29	59	48

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค6 สรุปสมบัติการคงรูปและเชิงกลของยางที่เติมสารตัวเติมซิลิกา

สมบัติการคงรูปและเชิงกล	สูตร			
	STR/Si	STRs/Si	NRP/Si	P(NR/Si)
แรงบิดสูงสุด (kgf-cm)	13.7	10.0	15.1	16.9
แรงบิดต่ำสุด (kgf-cm)	5.2	2.6	5.1	6.9
เวลายางเริ่มคงรูป (นาที)	1:50	2:14	1:32	1:38
เวลายางคงรูป (นาที)	2:30	3:12	2:36	2:56
ความทนแรงดึงสูงสุด (MPa)	27.8	23.6	31	29.3
ระยะยืดที่จุดขาด (%)	710	657	724	672
โมดูลัสที่ระยะยืด 300% (MPa)	31.4	30.9	36.7	49.6
ความแข็ง (Shore A)	47	45	49	52
ต้านทานการฉีกขาด (KN/m)	52	29	59	48

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธิปพงศ์ ใจเพื่อแม่ เกิดเมื่อวันที่ 19 มิถุนายน พ.ศ.2528 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2550



ศูนย์วิทยพัชการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย