



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

..... วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

..... เทคโนโลยีการบรรจุ

..... เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนด้วยรังสีแกมมา

Preparation of Graft Copolymer of Natural Rubber and Polystyrene by Gamma Radiation

นามผู้วิจัย นางสาวดาวัลย์ สงทิพย์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ชาริณี นามพิชญ์, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์รังรอง ยกसान, วท.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์เทอดไทย วัฒนธรรม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิฎกานัญณ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนด้วยรังสีแกมมา

Preparation of Graft Copolymer of Natural Rubber and Polystyrene by Gamma Radiation

โดย

นางสาวดาวัลย์ สงทิพย์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลดาวัลย์ สงทพิพย์ 2553: การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนด้วยรังสีแกมมา ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ชาริณี นามพิชญ์, D.Eng. 120 หน้า

รังสีแกมมาเป็นรังสีพลังงานสูงที่สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน (NR-g-PS) พร้อมทั้งวัดค่าไนซ์เฟสของยางธรรมชาติได้ในขั้นตอนเดียวกัน โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ คือ ปริมาณเซนซิไทเซอร์ (*n*-BA) และปริมาณรังสี จากการศึกษาพบว่า เซนซิไทเซอร์ปริมาณ 5 phr และปริมาณรังสี 20 kGy เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ เนื่องจาก ให้สมบัติด้านต่างๆที่ดี โดยไม่ทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเสียดสภาพ ซึ่งสามารถพิสูจน์โครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีนที่กราฟต์อยู่บนอนุภาคยางธรรมชาติได้ด้วยเทคนิค FT-IR และ ¹H-NMR เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของสไตรีนมอนอเมอร์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา กราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้จะมีโมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง และขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์ โคพอลิเมอร์ และระยะยึดที่จุดขาดลดลง โดยกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่มีสัดส่วนของสไตรีนมอนอเมอร์ เท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ความต้านทานต่อแรงดึงมากที่สุด และสามารถปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งของยางธรรมชาติได้มากกว่า 2 เท่า เมื่อศึกษาแนวทางในการผลิตโฟมกัน กระแทกจาก NR-g-PS ในเบื้องต้นพบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะนำ NR-g-PS มาประยุกต์ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งให้กับโฟมยางเพื่อทดแทนสารตัวเติมเสริมแรงต่างๆ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต หรือ เกลย์

Ladawan Songtipya 2010: Preparation of Graft Copolymer of Natural Rubber and Polystyrene by Gamma Radiation. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging Technology and Materials. Thesis Advisor: Miss Tarinee Nampitch, D.Eng. 120 pages.

Gamma ray is high energy radioactivity, which can synthesis the natural rubber grafted styrene (NR-g-PS) and vulcanized in the phase of natural rubber, in the same time. Importance factors for graft-copolymerized reaction were quantity of sensitizer (*n*-BA) and radiation dose. Preparation of graft copolymer by using *n*-BA at 5 phr and radiation dose 20 kGy will be optimal condition for production because this condition will get the good properties and the natural rubber compound was without the coagulation. The chemical structure of grafted styrene on natural rubber particle was characterized by FT-IR and ¹H-NMR. Results indicated that polystyrene peaks were observed. The modulus, tensile strength, hardness and particle size of NR-g-PS increase with increasing proportion of styrene in the graft-copolymer, while grafting efficiency and elongation at break decrease. The graft-copolymer containing 30% by weight of styrene monomer showed maximum tensile strength and it can improve the hardness of natural rubber more than 2 time. Preliminary production of shock migration foam by using NR-g-PS was studied. It was found that NR-g-PS may be used as hardness modifier for shock migration foam to substitute other reinforcing fillers, such as calcium carbonate and clay.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ชาริณี นามพิชญ์ รัช. ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม และ ดร.รังรอง ยกส์าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัย ตลอดจนสละเวลาตรวจพิจารณาแก้ไขด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง จนทำให้วิทยานิพนธ์เรื่องการเตรียมกราฟต์ โคอพลิเมอร์ของยางธรรมชาติและพอลิस्टรีนด้วยรังสีแกมมาสามารถบรรลุวัตถุประสงค์และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ รวมทั้ง ดร.พิริยาธร สุวรรณมาลา และคุณ อารักษ์ วิทิตธีรานนท์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องฉายรังสีแกมมา และแนะนำการใช้งานต่างๆ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาแนะนำทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ สาขาเทคโนโลยีการบรรจุทุกคนที่ได้ให้การแลกเปลี่ยนความรู้ และความคิดเห็นต่างๆมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณต่อคุณพ่อคุณแม่ที่ให้ความกรุณาให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการศึกษาครั้งนี้จนสำเร็จ

ลดาวัลย์ สงทิพย์
พฤศจิกายน 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	39
ผลและวิจารณ์	58
สรุปและข้อเสนอแนะ	93
สรุป	93
ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	95
ภาคผนวก	101
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ปริมาณรังสี	102
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการวิเคราะห์สมบัติของกราฟต์โคพอลิเมอร์	104
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการวิเคราะห์ปริมาณสไตรีนที่ถูกกราฟต์บนโมเลกุลยาง	109
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test	112
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	120

สารบัญญัตราง

ตารางที่		หน้า
1	ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ	6
2	ผลของสารที่ไม่ใช่ยางต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง	8
3	เปรียบเทียบเทียบสมบัติของน้ำยางธรรมชาติชั้นที่ได้จาก 3 วิธีหลัก	10
4	สมบัติของพอลิสไตรีน	11
5	ความแตกต่างของรังสีแกมมากับลำอิเล็กตรอน	24
6	สูตรการเตรียมสบู่โพแทสเซียมโอเลต	39
7	สูตรการเตรียมไดฟีนิลกัวนิดิน	40
8	สูตรการเตรียมโซเดียมซิติโคฟลูออไรด์	41
9	สูตรการเตรียมกำมะถัน	41
10	สูตรการเตรียมซิงค์ออกไซด์	42
11	สูตรการเตรียมซิงค์ไดไซโอคาร์บาเมต	42
12	สูตรการเตรียมซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซโธอาโซล	43
13	องค์ประกอบของน้ำยางคอมปาวด์ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณเซนซิไทเซอร์	43
14	องค์ประกอบของน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณรังสี	45
15	องค์ประกอบของน้ำยางคอมปาวด์ที่วัดคาบนำด้วยรังสีแกมมา	46
16	องค์ประกอบของน้ำยางคอมปาวด์เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณสไตรีน	47
17	ส่วนประกอบที่ใช้ในการเตรียมยางฟองน้ำด้วยวิธีการแบบดันลอป	55
18	ผลของ m -BA ต่อความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงและสัดส่วนการบวมพองของ NR-g-PS	61
19	ผลของ m -BA ต่อสมบัติเชิงกลของ NR-g-PS	62
20	ผลของปริมาณรังสีต่อโมดูลัสที่ระยะยืด 300% ของ NR-g-PS เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ	68
21	ผลของปริมาณรังสีต่อความต้านทานต่อแรงดึงของ NR-g-PS เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ	68
22	ผลของปริมาณรังสีต่อระยะยืดที่จุดขาดของ NR-g-PS เทียบกับยางธรรมชาติ	69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
23	หมู่ฟังก์ชันที่แสดงแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของ NR-g-PS	74
24	ชนิดของโปรตอนที่ตำแหน่งการดูดกลืนคลื่นวิทยุต่างของ NR-g-PS	76
25	ผลของสัดส่วน โดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อปริมาณสไตรีนที่ถูกกราฟต์บน โมเลกุลยางธรรมชาติ	82
26	ผลของของสัดส่วน โดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อความแข็งของ NR-g-PS	88
27	ปริมาณของแข็งทั้งหมดใน NR-g-PS ก่อนและหลังระเหยน้ำออก	89
28	ความแข็งของยางฟองน้ำที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติ และน้ำยางธรรมชาติผสม NR-g-PS ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์	92
ตารางผนวกที่		
ก1	ปริมาณรังสีเฉลี่ยต่อเวลา	103
ข1	ตัวอย่างข้อมูลสำหรับวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์	105
ข2	ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์	110
ค1	ตัวอย่างข้อมูลดิบสำหรับการวิเคราะห์สไตรีนที่ถูกกราฟต์ด้วยเทคนิค ¹ H-NMR	102
ง1	ผลของปริมาณ n-BA ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS	113
ง2	ผลของ n-BA ต่อความแข็งของ NR-g-PS	113
ง3	ผลของปริมาณรังสีต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS	114

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ง4	ผลของปริมาณรังสีต่อความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยงของ NR-g-PS	115
ง5	ผลของปริมาณรังสีต่อความแข็งของ NR-g-PS เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ	116
ง6	ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS	117
ง7	ขนาดอนุภาคของ NR-g-PS ที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อสไตรีนต่างๆ	118

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ยางธรรมชาติหรือยางพารา	4
2	โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (cis-1, 4-polyisoprene)	5
3	ภาพวาดไดอะแกรมของอนุภาคยาง	6
4	น้ำยางธรรมชาติหลังจากนำไปผ่านกระบวนการเช่นตีฟิวจ์	7
5	โครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีน (Polystyrene)	10
6	ไดอะแกรมของกราฟต์โคพอลิเมอร์	13
7	ภาพถ่าย TEM ของพอลิเมอร์ (a) ยางธรรมชาติ (b), (c) และ (d) คือ ยางธรรมชาติที่มีเมธิลเมทาคริเลทกราฟต์อยู่บนอนุภาคในปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ	21
8	ปฏิกิริยาเคมีที่สามารถเกิดขึ้นจากกระบวนการฉายรังสีพอลิเมอร์	23
9	โมเลกุลของสบู่ (Emulsifying agent, soap)	25
10	กระบวนการผลิตโฟมยางแบบดันลอย	30
11	pH กับระยะเวลาการเจล เมื่อใช้โซเดียมซัลไฟโคฟลูออไรด์เป็นสารก่อเจลหลัก	34
12	เครื่องฉายรังสีแกมมา (Gamma cell รุ่น 220 Excel)	36
13	ชุดเครื่องตียางฟองน้ำ รุ่น House Worth รุ่น HW-3083s	37
14	แม่พิมพ์อะลูมิเนียม	38
15	ขั้นตอนการทดสอบรูปดัมเบล คาย C	50
16	ขั้นตอนการผลิตยางฟองน้ำด้วยวิธีการแบบดันลอย	56
17	ผลของ <i>n</i> -BA ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS	59
18	ผลของ <i>n</i> -BA ต่อยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์	60
19	ผลของ <i>n</i> -BA ต่อความแข็งของ NR-g-PS	62

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ผลของปริมาณรังสีต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS	64
21	ผลของปริมาณรังสีต่อยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์	65
22	ผลของปริมาณรังสีต่อความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยงของ NR-g-PS เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ	66
23	ผลของปริมาณรังสีต่อความแข็งของ NR-g-PS และยางธรรมชาติ	70
24	สเปกตรัมอินฟราเรดแสดงหมู่ฟังก์ชันของ NR-g-PS	73
25	สเปกตรัมอินฟราเรดแสดงหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ	73
26	สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของ NR-g-PS	75
27	สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของยางธรรมชาติ	75
28	ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม (ก) ยางธรรมชาติ ข), (ค), (ง) และ (จ) คือ NR-g-PS ที่มีสัดส่วนของยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ เท่ากับ 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ	78
29	ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS	80
30	ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อยางธรรมชาติและสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์	81
31	ขนาดอนุภาคของ NR-g-PS ที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่างๆ	83
32	สัณฐานวิทยาของ NR-g-PS	83
33	ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อโมดูลัสของ NR-g-PS	85
34	ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อความต้านทานต่อแรงดึงของ NR-g-PS	86

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
35	ผลของสัดส่วน โดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อ ระยะยืดที่จุดขาดของ NR-g-PS	87
36	ยางพองน้ำที่เตรียมด้วยวิธีการดันลอย (ก) ยางพองน้ำที่เตรียมจากยาง ธรรมชาติ (ข) ยางพองน้ำที่เตรียมจากการผสมน้ำยางธรรมชาติขึ้นกับ NR-g- PS (90:10) (ค) ยางพองน้ำที่เตรียมจากการผสมน้ำยางธรรมชาติขึ้นกับ NR-g-PS (80:20) (ง) ยางพองน้ำที่เตรียมจากการผสมน้ำยางธรรมชาติขึ้นกับ NR-g-PS (70:30)	90
37	เปอร์เซ็นต์การยุบตัวของยางพองน้ำที่เตรียมได้จากน้ำยางธรรมชาติ และ น้ำยางธรรมชาติผสม NR-g-PS ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์	91
ภาพผนวกที่		
ก1	ขวดใส่ตัวอย่างที่นำไปฉายรังสีแกมมา	103

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

NR	=	ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)
PS	=	พอลิสไตรีน (Polystyrene)
St	=	สไตรีนมอนอเมอร์ (Styrene)
phr	=	ส่วนต่อยางธรรมชาติร้อยละ (Part Per Hundred Rubber)
%wt	=	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (% by Weight)
MPa	=	หน่วย SI unit ของแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดในแนวตั้งฉาก
kGy	=	กิโลเกรย์ คือ หน่วยของปริมาณรังสีที่ดูดกลืน
GE	=	ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ (grafting efficiency)
NR-g-PS	=	ยางธรรมชาติกราฟต์พอลิสไตรีน (Natural Rubber Grafted Styrene)

การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนด้วยรังสีแกมมา

Preparation of Graft Copolymer of Natural Rubber and Polystyrene by Gamma Radiation

คำนำ

ปัจจุบัน บรรจุภัณฑ์พลาสติกซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวันของผู้บริโภคมากขึ้นตามมาตรฐานการครองชีพ อย่างไรก็ตาม บรรจุภัณฑ์พลาสติกเหล่านี้ ล้วนแล้วแต่เป็นผลผลิตที่ได้มาจากอุตสาหกรรมน้ำมันดิบ (crude oil) และแก๊สธรรมชาติ (natural gas) ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดสิ้นไป (non-renewable source) โดยไม่สามารถทำให้เกิดขึ้นใหม่ในระยะเวลาอันสั้นได้ รวมทั้งในกระบวนการผลิตและกระบวนการทำลายหรือย่อยสลายพอลิเมอร์สังเคราะห์เหล่านี้ ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ภายหลังจากได้มีการค้นคว้าวิจัยในการหาวัสดุที่ทำจากธรรมชาติ หรือผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุที่ย่อยสลายได้ขึ้นมาทดแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ ตามนโยบายของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมรวมทั้งกรมควบคุมมลพิษ และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

พอลิเมอร์ธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ได้ได้รับความสนใจอย่างมากในขณะนี้ คือ ยางธรรมชาติหรือที่รู้จักกันในชื่อของยางพารา เนื่องจาก ยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยมีมูลค่าการส่งออกสูงถึง 2,003,318 ตัน และใช้ภายในประเทศ 277,650 ตัน ในปี พ.ศ. 2551 (สถาบันวิจัยยางพาราแห่งประเทศไทย, 2552) ยางธรรมชาติจึงเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถหาได้ง่าย มีราคาค่อนข้างถูก และสามารถปลูกทดแทนได้ รวมทั้งยังเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ คือ มีความยืดหยุ่นสูง คึงยึดได้ง่าย สามารถกระจายแรงหรือพลังงานได้ดี และสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็ว โดยสามารถนำยางมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่น ยางรัดของ ลูกโป่ง ถูมือยาง จุกหัวนมยาง หรือแม้แต่ถุงยางอนามัย ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดในการนำยางธรรมชาติมาเพิ่มมูลค่า ปรับปรุงสมบัติ และประยุกต์เป็นวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์ โดยปรับปรุงโครงสร้างยางธรรมชาติด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์กับพอลิสไตรีน โดยใช้เทคนิคการฉายรังสีพลังงานสูง (แกมมา) เพื่อเพิ่มสมบัติทางด้านความแข็งแรงและความคงตัวด้านรูปร่าง เนื่องจาก พอลิสไตรีนเป็นโวนิลพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิที่มีสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) สูงกว่ายางธรรมชาติ คือประมาณ 74-105 °C

การปรับปรุงยางธรรมชาติโดยทำเป็นวัสดุเชิงประกอบกับสไตรีนสามารถทำได้หลายวิธี (George *et al.* 1995) ได้แก่ เทคนิคอิมัลชันโคพอลิเมอร์ไรซ์เซชันโดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยความร้อนและแบบรีดอกซ์ หรือการฉายรังสีพลังงานสูง แต่อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงยางธรรมชาติโดยวิธีการฉายรังสีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา (γ -rays) หรือลำอิเล็กตรอน (electron beam) ถือได้ว่าเป็นวิธีที่มีข้อดีและประสิทธิภาพสูงกว่าเทคนิคอื่นๆ เนื่องจาก เป็นกระบวนการที่มีความเป็นพิษต่ำ (Chaudhari *et al.*, 2005) สามารถสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ได้อย่างรวดเร็ว และมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน รวมทั้ง เป็นเทคนิคที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้มากมายในขณะเดียวกัน ซึ่งในปัจจุบันมักนิยมนำเทคนิคการฉายรังสีนี้มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางใน 2 ลักษณะด้วยกัน คือ การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ระหว่างอีลาสโตเมอร์กับ พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ และการวัลคาไนชันน้ำยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ (Chaudhari *et al.*, 2005) ซึ่งทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบร่างแหอย่างทั่วถึงตลอดความหนาของยาง (Gehman, 1956) และสามารถทำการวัลคาไนเซชันได้ที่อุณหภูมิห้อง (Chmielewski *et al.*, 2005)

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนด้วยเทคนิคการฉายรังสีแกมมา รวมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลต่างๆ เพื่อหาแนวทางในการผลิตเป็น โฟมกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์ หรือการใช้งานทางด้านบรรจุภัณฑ์อื่นๆต่อไป เพื่อลดการใช้วัสดุที่มาจากพอลิเมอร์สังเคราะห์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาขั้นตอนและสภาวะในการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ สไตรีนมอนอเมอร์ (NR-g-PS) โดยเทคนิคการฉายรังสีแกมมา
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณเซนซิไทเซอร์ (sensitizer) ปริมาณรังสีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม NR-g-PS
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน โดยนำหน้าระหว่างยางธรรมชาติและสไตรีนมอนอเมอร์ ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของกราฟต์โคพอลิเมอร์
4. เพื่อศึกษาขั้นตอนและวิธีการผลิต โฟมกันกระแทกเบื้องต้นสำหรับบรรจุภัณฑ์จาก NR-g-PS

การตรวจเอกสาร

1. ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติ หรือที่รู้จักกันในชื่อของ ยางพารา (แสดงดังภาพที่ 1) เป็นน้ำยางที่กรี๊ดได้จากไม้ยืนต้นที่มีถิ่นกำเนิดอยู่บริเวณลุ่มน้ำอะเมซอน ในประเทศบราซิล และเปรู ทวีปอเมริกาใต้ ซึ่งชาวอินเดียนแดงเผ่ามายัน ในอเมริกากลาง ได้รู้จักการนำยางธรรมชาติมาใช้ก่อนปี พ.ศ. 2000 (เสาวณีย์, 2547)

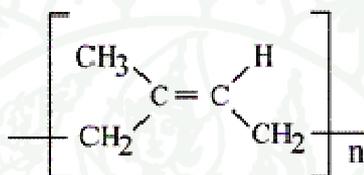
ยางธรรมชาติมีแหล่งผลิตที่ใหญ่ที่สุดในโลก คือ แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ คิดเป็นร้อยละ 90 ของแหล่งผลิตทั้งหมด จากต้นยางพันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียนซิส (*Hevea brasiliensis*) (บุญธรรม, 2530) ซึ่งเป็นพันธุ์ยางที่ให้น้ำยางที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี คือ มีความต้านทานต่อแรงดึง และมีความเหนียวสูง (ประมวล, 2545) โดยมีประเทศไทยเป็นผู้นำการส่งออกอันดับหนึ่งในหลายปีที่ผ่านมา (สถาบันวิจัยยางพาราแห่งประเทศไทย, 2552)



ภาพที่ 1 ยางธรรมชาติหรือยางพารา

1.1 ลักษณะทั่วไปของยางธรรมชาติ

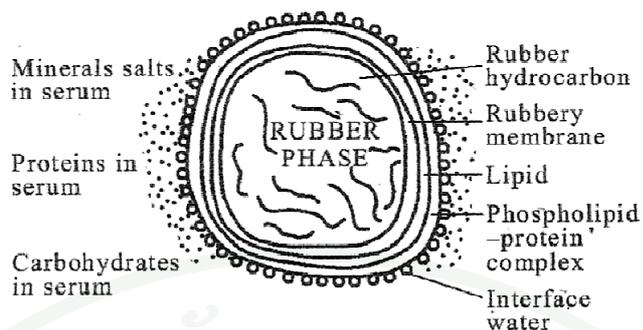
น้ำยางธรรมชาติ (natural rubber latex) เป็นคอลลอยด์ของพอลิไอโซพรีน (polyisoprene) ที่ได้จากต้นยาง (ดังภาพที่ 2) มีขนาดอนุภาคกระจายอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 3 ไมโครเมตร โดยจะกระจายตัวเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรก มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.35 ไมโครเมตร ขึ้นไป อีกช่วงหนึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.35 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของน้ำยางธรรมชาติ ประมาณ 0.1 ไมโครเมตร (บุญธรรมและคณะ, 2534)



ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (cis-1, 4-polyisoprene)

ตามปกติ น้ำยางธรรมชาติสดจะมีเนื้อยางแห้งประมาณ 25-45 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นประมาณ 0.98 มี pH 6.8 และมีความหนืด 12-15 เซนติพอยส์ เมื่อตรวจดูในห้องปฏิบัติการพบว่า ในน้ำยางจะมีอนุภาคขนาดต่างๆแขวนลอยอยู่ในของเหลว และเมื่อวัดด้วยเครื่อง Zetasizer 4 พบว่า ที่ผิวของอนุภาคเหล่านี้จะมีลักษณะเป็น amphoteric มี isoelectric point (pI) ประมาณ 3.8-4.2 กล่าวคือ อนุภาคแสดงประจุลบที่ pH มากกว่า pI และประจุบวกที่ pH ต่ำกว่า pI เนื่องจากการมีโปรตีนและไขมันบนผิวของอนุภาค (ประมวล, 2545) ดังนั้น ที่ผิวอนุภาคยางจึงมีประจุเป็นลบผลักกันอยู่ตลอดเวลาทำให้อนุภาคเหล่านั้นแขวนลอยคงสภาพเป็นน้ำยางอยู่ได้ (Lamp, 1999) จนกว่าจะมีสภาพแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ มารบกวน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะทำให้น้ำยางเสียเสถียรภาพและจับตัวกันเป็นก้อน (พูนผล, 2549) ส่วนประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำยางธรรมชาติ แสดงดังตารางที่ 1

น้ำยางธรรมชาติมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง และส่วนที่ไม่ใช่ยาง ส่วนที่เป็นเนื้อยาง คือ อนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำยาง เป็นสารประกอบพอลิไฮโดรคาร์บอน มีความหนาแน่น 0.92 เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ไม่ละลายน้ำ รูปทรงมีทั้งรูปทรงกลม และรูปทรงรีคล้ายลูกแพร์ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ภาพวาดไดอะแกรมของอนุภาคยาง

ที่มา: Sabharwal *et al.*, (1997)

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

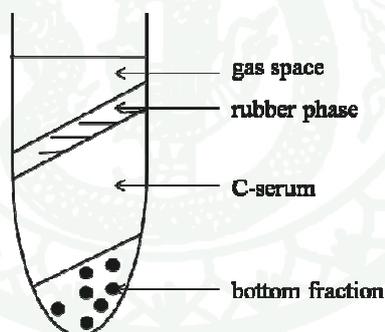
ส่วนประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
ของแข็งทั้งหมด (Total solid content, TSC)	35
เนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC)	33
สารพวกโปรตีน	1-1.5
สารพวกเรซิน	1-1.25
ซีเถ้า	0 - 1
น้ำตาล	1
น้ำ	65

ที่มา: Blackley (1997)

สำหรับส่วนที่ไม่ใช่ยาง มีองค์ประกอบแรก เป็นน้ำ หรือที่เรียกว่า ซี-เซรัม มีความหนาแน่นประมาณ 1.02 g/cm^3 ประกอบด้วย สารพวกคาร์โบไฮเดรต (น้ำตาล) โปรตีน และกรดอะมิโน องค์ประกอบส่วนที่ 2 คือ ลูตอยด์ และสารอื่นๆ ลูตอยด์เป็นสารอนุภาคกลม มีเยื่อหุ้มอยู่ ขนาดใหญ่กว่าอนุภาคยาง มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-5 ไมครอน ภายในเยื่อหุ้มของลูตอยด์จะประกอบด้วยส่วนที่เรียกว่า บี-เซรัม มีส่วนของสารละลายกรด กลีเซอ โปรตีน น้ำตาล และ โพลีฟีนอลออกซิเดส บี-เซรัมเป็นส่วนสำคัญซึ่งทำให้ยางมีสีคล้ำเมื่อสัมผัสกับอากาศ ของเหลวใน

ลูตอยด์ มี pH 5.5 ลูตอยด์จะบวมพอง และแตกออกเมื่อเติมน้ำลงไป ในน้ำยาง เป็นผลให้น้ำยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ส่วนที่ไม่ใช่ยางยังส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง (แสดงในตารางที่ 2) ซึ่งเมื่อนำน้ำยางสดไปปั่นที่ความเร็วสูง เช่น ใช้เครื่องอัลตราเซนตริฟิวจ์ (ultracentrifuge) จะแยกได้เป็น 3 ชั้นใหญ่ๆ ดังภาพที่ 4

เป็นที่เข้าใจกันโดยทั่วไปว่าความเสถียรของน้ำยาง มีสาเหตุอันเนื่องมาจากการมีโปรตีนและไขมันบนผิวอนุภาคยาง ดังที่กล่าวไปแล้วในตอนต้น แต่จนกระทั่งปัจจุบันยังไม่อาจจะระบุถึงโครงสร้างที่ผิวของอนุภาคยางได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษาโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในเมมเบรนที่หุ้มผิวของอนุภาคยางในน้ำยางธรรมชาตินั้น ส่วนมากจะทำการสกัดโปรตีนออกจากอนุภาคยางก่อน แล้วจึงค่อยทำการวิเคราะห์ ทำให้ผลการวิจัยที่ได้ไม่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพที่แท้จริงบนอนุภาคยาง ซึ่งการศึกษาเพื่อให้เข้าใจ จึงจำเป็นต้องทำต่อไปอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากความรู้ใน โครงสร้างดังกล่าวจะมีผลต่อการควบคุมสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง (ประมวล, 2545)



ภาพที่ 4 น้ำยางธรรมชาติหลังจากนำไปผ่านกระบวนการเซนตริฟิวจ์

ที่มา: ดัดแปลงจาก ประมวล (2545)

ตารางที่ 2 ผลของสารที่ไม่ใช่ยางต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง

สมบัติ	ผลของสารประเภทที่ไม่ใช่ยาง
ความเสถียรของน้ำยาง	คาร์โบไฮเดรตเป็นแหล่งอาหารของแบคทีเรีย ที่เมื่อเจริญเติบโตแล้วผลิตกรดมากขึ้น ทำให้อนุภาคยางมีความเสถียรลดลง
สี	สาร β -carotene และ polyphenol oxidase ทำให้ยางมีสีเหลือง และสีน้ำตาล
ปฏิกิริยารีดอกซ์ในชั้น	ฟอสโฟลิปิด (phospholipid) และ โปรตีน เป็นสารตัวเร่ง (accelerator) และกรดไขมันเป็นตัวกระตุ้น (activator)
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน	tocotriol เป็นแอนติออกซิแดนท์ โดยออกซิเจนของทองแดง แมกนีเซียม และเหล็ก เป็นโปรออกซิแดนท์
การแข็งของยางเนื่องจากการเก็บ	เกิดจาก โปรตีนและอะมิโนอิสระทำปฏิกิริยากับหมู่ที่ไม่ปกติ (abnormal group) ในยาง
การเกิดผลึก (crystallization)	กรดสเตียริก (stearic acid) และสารบางชนิดที่ละลายในน้ำ มีผลทำให้อัตราของ crystallization ลดลง
สมบัติเชิงกล	โปรตีนทำให้มอดูลัส ความทนทานต่อการฉีกขาด heat build-up และการขยายตัวของรอยแตกเพิ่มขึ้น และถ้ามีโปรตีนในปริมาณสูงในยางวัลคาไนซ์ จะทำให้ยางดูดความชื้นมาก มีผลให้ creep และการคลายตัวของความเครียด (stress relaxation) มีค่าสูง

1.2 สมบัติของยางธรรมชาติอันเนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมี

1.2.1 การมีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมัน แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

1.2.2 มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันได้ดี แต่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนได้ง่าย จึงเป็นสาเหตุการเสื่อมของยางธรรมชาติ

1.2.3 มีสายโซ่โมเลกุลที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาและยืดหยุ่นได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพความยืดหยุ่น (elasticity) ได้ดี และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้

1.2.4 โครงสร้างโมเลกุลที่สม่ําเสมอทำให้ยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้เมื่อยืด จึงมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง มีค่าความแข็งแรงขณะไม่วัลคาไนซ์ (green strength) สูง และมีความเหนียวติดกัน (tack) ดี

1.2.5 มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องนำยางไปบดเพื่อให้โมเลกุลเล็กลงก่อนนำไปแปรรูป

การใช้ยางธรรมชาติสามารถใช้ได้ทั้งในรูปแบบน้ำยางและยางแห้ง โดยการใช้งานในรูปแบบยางแห้งนั้นจะต้องทำการจับตัวแยกยางออกจากน้ำ แล้วทำให้แห้งก่อนนำไปใช้งานต่อไป

2. น้ำยางธรรมชาติข้น (Concentrated NR Latex)

น้ำยางสดซึ่งมีปริมาณเนื้อยางน้อยและมีความเสถียรต่ำนั้น ไม่เหมาะในการนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางในอุตสาหกรรม จึงต้องเติมสารเคมีในน้ำยางสดเพื่อรักษาความเสถียรของน้ำยาง แล้วนำมาผ่านกระบวนการที่ทำให้น้ำยางมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการทำผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม (dipping) เช่น การผลิตถุงมือ ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย กาว (ประมวล, 2545) ตลอดจนทำตุ๊กตายางฟองน้ำ และโฟมกันกระแทก

น้ำยางธรรมชาติข้นผลิตจากน้ำยางธรรมชาติสดโดยวิธีการต่างๆ คือ การระเหย การทำครีม การเซนตริฟิวจ์ และการแยกด้วยไฟฟ้า (ประมวล, 2545) เพื่อให้ได้น้ำยางที่มีความเข้มข้นของเนื้อยาง ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และหางน้ำยางมีเนื้อยางอยู่ 4-8 เปอร์เซ็นต์ (บุญธรรม, 2532) ก่อนนำไปเก็บรักษาน้ำยางที่ได้ด้วยแอมโมเนีย หรือสารเคมีอื่นๆ

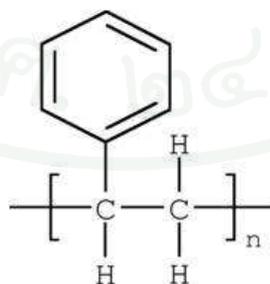
ความแตกต่างของน้ำยางข้นที่ได้จาก 3 วิธีหลัก ที่ระบุข้างต้น แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติของน้ำยางธรรมชาติชั้นที่ได้จาก 3 วิธีหลัก

สมบัติทั่วไป	น้ำยางชั้นที่ได้ จากการเซนติฟิวจ์	น้ำยางชั้นที่ได้ จากการทำครีม	น้ำยางชั้นที่ได้ จากการระเหย
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์ TSC)	61.5	68	61-72
ปริมาณเนื้อยางแห้ง (เปอร์เซ็นต์ DRC)	60	66.8	56-64
ความเสถียรเชิงกล (วินาที)	1000	1600	-
ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	0.5-0.6	0.62	-
จำนวนกรดไขมันที่ระเหย	0.02-0.03	0.07	-
ปริมาณส่วนที่ไม่ใช่ยาง	~2.0 %	~2.0 %	5.5-8.0 %

3. สไตรีน (styrene)

สไตรีนเป็นมอนอเมอร์ชนิดหนึ่งที่ถูกนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ในอุตสาหกรรมพลาสติก และอุตสาหกรรมยางสังเคราะห์ พอลิสไตรีนมีความหนาแน่นประมาณ 1.05 g/cm^3 มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงแบบอะแทกติก และเป็นอสัณฐาน (amorphous) หรือไม่มีความเป็นผลึกเลย (แสดงดังภาพที่ 5) โดยพอลิสไตรีนที่ยังไม่ผ่านการผสมสารเคมีอื่นลงไปจะมีสมบัติแข็ง ไม่ยืดหยุ่น และเปราะ เนื่องจากมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันค่อนข้างสูง คือ ประมาณ $74-105 \text{ }^\circ\text{C}$ ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ของพอลิเมอร์ชนิดนี้จึงไม่สามารถผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโดยใช้ไอน้ำได้



ภาพที่ 5 โครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีน (Polystyrene)

ตารางที่ 4 สมบัติของพอลิสไตรีน

สมบัติ	ค่า
Density	1.04-1.05 g/cm ³
Tg	74-105 °C
Tensile strength	35.8-51.7 MPa (5200-7500 psi)
Tensile modulus	2270-2370 MPa (33,000-475,000 psi)
Elongation at break	1.2-2.5 เปอร์เซ็นต์
Tear strength	4-20 g/25 μm

ที่มา: Selke *et al.* (2004)

นอกจากนี้ พอลิเมอรัชนิดนี้ยังมีความโปร่งแสงและใส มีความเป็นไฮโดรคาร์บอนจึงดูความชื้นได้ต่ำ มีสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี และเป็นพลาสติกที่เบาที่สุดในพลาสติกชนิดแข็งโดยสมบัติของ พอลิสไตรีน (แสดงดังตารางที่ 4) สไตรีนสามารถละลายในตัวทำละลายหลายชนิด ได้แก่ ตัวทำละลายจำพวกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซีน และโทลูอีน ในตัวทำละลายจำพวกคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ คลอโรฟอร์ม ไตรคลอโรเอทธิลีน คลอโรเบนซีน และ 1,2-ไดคลอโรเบนซีน ในตัวทำละลายจำพวกคีโตน เช่น เมทิลเอทิลคีโตน (แต่ไม่ละลายในอะซิโตน) แต่จะไม่ละลายในแอลกอฮอล์ ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว เช่น เฮกเซน และ เฮปเทน เป็นต้น

พอลิสไตรีนมีสมบัติเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป สามารถทนทานต่อกรดแก่ และเบสแก่ได้เป็นอย่างดี สามารถทนต่อกรดไฮโดรฟลูออริก และตัวรีดิวซ์ทั่วไป อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลของพอลิเมอรันี้จะเสื่อมลงเมื่อสัมผัสกับแสงแดดที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน เช่น อาจเปลี่ยนเป็นสีเหลือง หรือเกิดรอยแตกได้ สมบัติพิเศษอย่างหนึ่งที่ทำให้พอลิเมอรัชนิดนี้ได้รับความสนใจในเชิงการค้า คือความง่ายต่อการนำไปแปรรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการแปรรูปแบบ injection-moulding ดังนั้น พอลิสไตรีนหลังผ่านกระบวนการเติมสาร เช่น พลาสติไซเซอร์ แอนติออกซิแดนท์ สเตบิลไลเซอร์ ที่สัดส่วนที่เหมาะสมแล้ว สามารถนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์หลายชนิด เช่น เป็นองค์ประกอบของเครื่องใช้ไฟฟ้า ด้ามปากกา ลูกกลิ้ง ไม้บรรทัด ภาชนะและขวดบรรจุอาหาร ทำของเด็กเล่น และโฟม เป็นต้น (ชัยวัฒน์, 2527)

4. การดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติวัลคาไนซ์เป็นยางที่มีความแข็งแรงเชิงกล (mechanical strength) สูง มีสมบัติเด่นทางด้าน การกระด้างตัว (resilience) ความยืดหยุ่น (elasticity) มีความต้านทานต่อการสึก- หรอ (abrasion resistance) ดีมาก นอกจากนี้ยังมีความต้านทานที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature resistance) และมีสมบัติพลวัตเชิงกล (dynamic mechanical properties) ที่ดีมาก ดังนั้น จึงมีการนำ ยางธรรมชาติไปใช้งานกันอย่างกว้างขวางในงานทางด้านต่าง ๆ เช่น ยางรถยนต์ และงานที่ต้องการ ความยืดหยุ่น อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติก็มีสมบัติด้อยหลายประการ เช่น สมบัติหลังการบ่มเร่ง (ageing properties) และความต้านทานต่อสภาพแวดล้อม (weathering resistance) จึงมีความ พยายามในการดัดแปลงโมเลกุลยางธรรมชาติเพื่อแก้ไขข้อด้อยเหล่านี้ โดยทำการดัดแปลงโมเลกุล ทั้งในสภาวะน้ำยาง (latex state) สภาวะสารละลาย (solution state) และในสภาวะหลอม (molten state) การดัดแปลงทางเคมีของโมเลกุลยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก คือ

4.1 การดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติโดยการจัดเรียงพันธะเคมีใหม่

การดัดแปลงทางเคมีของโมเลกุลยางธรรมชาติโดยการจัดเรียงพันธะที่ตำแหน่งพันธะ คู่ใหม่นี้จะไม่มีอะตอมใหม่บนโมเลกุลยาง เช่น การเชื่อมโยงโมเลกุลที่ตำแหน่งคาร์บอน-คาร์บอน (carbon-carbon crosslinking) ปฏิกิริยาไซโคลเซชัน (cyclization) การเปลี่ยนไอโซเมอร์ซิสทราน (cis, trans-isomerization) และปฏิกิริยาดิพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) เป็นต้น การดัดแปลง ทางเคมีของโมเลกุลยางธรรมชาติโดยวิธีการนี้ได้ผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ เช่น ยางธรรมชาติไฮโดร- จินเตท และ ยางไซโคลส

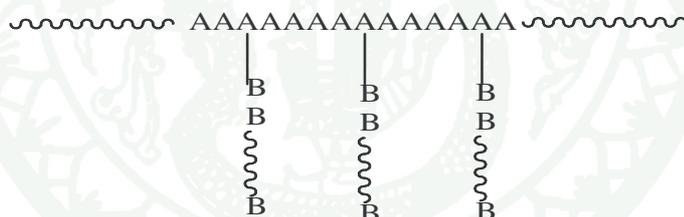
4.2 การดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติโดยเพิ่มหมู่เคมีบนโมเลกุล

การดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยการเพิ่มหมู่เคมีบนสายโซ่ โมเลกุลยางธรรมชาติโดยผ่านกลไกของปฏิกิริยาการเติม (addition reaction) หรือปฏิกิริยาการแทนที่ (substitution reaction) โดยปฏิกิริยาทั้งสองชนิดจะเกิดที่ตำแหน่งพันธะคู่ของโมเลกุลยางธรรมชาติ ได้อนุพันธ์ยางธรรมชาติที่สำคัญ เช่น ยางธรรมชาติคลอรีเนท และยางธรรมชาติอีพอกไซด์

4.3 การตัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยปฏิกิริยาการกราฟต์

ปฏิกิริยาการกราฟต์ คือ การต่อของมอนอเมอร์ต่างชนิดเข้ากับพอลิเมอร์ที่สนใจ ซึ่งสามารถเตรียมได้จากพอลิเมอร์ที่มีหมู่ว่องไว หรือสามารถทำให้เกิดหมู่ว่องไวต่อปฏิกิริยาในโซ่พอลิเมอร์ก็ได้ (Selke *et al.*, 2004) ยกตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์ high impact polystyrene จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์ของโพลิบิวตะไดอินบนพอลิสไตรีนที่เป็นสายโซ่พอลิเมอร์หลัก โดยภาพที่ 6 เป็นภาพแสดงโคอะแกรมของกราฟต์โคพอลิเมอร์จะประกอบไปด้วยสายโซ่หลัก A (backbone chain) และสายโซ่ที่มาเชื่อมต่อ B (grafted chain) โดยกลไกการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์อาจเป็นแบบฟรีแรดิคัลแคตไอออนิก หรือควมแน่น แต่ส่วนใหญ่จะเป็นกลไกแบบฟรีแรดิคัล

การตัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยวิธีการนี้เริ่มทำในช่วงปี 1930-1939 ซึ่งสามารถเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติได้ทั้งในสถานะสารละลาย ยางแห้ง และสถานะน้ำยาง แต่วิธีการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์ในสถานะน้ำยางเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด



ภาพที่ 6 โคอะแกรมของกราฟต์โคพอลิเมอร์

ที่มา: Selke *et al.* (2004)

การตัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน มีการใช้ไวโนลมอนอเมอร์หลากหลายชนิด โดยมอนอเมอร์ที่นิยมใช้ในการศึกษาอย่างแพร่หลายที่สุด ได้แก่ สไตรีน และเมทิลเมทาคริเลท ยกตัวอย่างเช่น

สิทธิพงษ์ (2547) ทำการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีนและยางธรรมชาติด้วยเทคนิคอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยความร้อนและแบบรี

ดอกซ์เมื่อวิเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค FT-IR พบพีกที่แสดงเอกลักษณ์ของพอลิสไตรีนปรากฏอยู่ นอกจากนี้การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนโดย TG-DTA ยังแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ ซึ่งทั้งหมดนี้แสดงถึงความสำเร็จของการกราฟต์พอลิสไตรีนลงบนยางธรรมชาติ การศึกษาผลของเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกราฟต์ต่อปริมาณของสไตรีนมอนอเมอร์ พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของสไตรีนประสิทธิภาพการกราฟต์ของพอลิสไตรีนบนยางธรรมชาติจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงค่าสูงสุดที่ 60 เปอร์เซ็นต์ สำหรับตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยความร้อน และประมาณ 85 เปอร์เซ็นต์ สำหรับตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ หลังจากนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกราฟต์จะลดต่ำลง ถ้ายังคงเพิ่มปริมาณของสไตรีนมอนอเมอร์ขึ้นอีก การศึกษาผลของปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาปรากฏว่า การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการกราฟต์เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยามีแนวโน้มเช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณของสไตรีนมอนอเมอร์ นอกจากนี้ ยังพบว่าในช่วงปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ศึกษา ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ให้ประสิทธิภาพการกราฟต์ที่ดีกว่าตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยความร้อนโดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ สำหรับตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ และประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ สำหรับตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยความร้อน

Nampitch และ Vatanatham (2006) ทำการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับสไตรีน แบบอิมัลชัน โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา และใช้โซเดียมลอริลซัลเฟตเป็นสบู่ ทำการทดสอบประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาโดยการนำตัวอย่างที่แห้งไปสกัดด้วย ปีโตรเลียมอีเทอร์ เมลทิลเอทิลคีโตน แล้วชั่งน้ำหนักแห้งของตัวอย่างหลังการสกัดนำมาทดสอบเปอร์เซ็นต์พอลิสไตรีนโดยใช้เทคนิค NMR พบว่า ประสิทธิภาพการกราฟต์เพิ่มขึ้นในขณะเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาจาก 58- 64 องศาเซลเซียส สารเริ่มต้นปฏิกิริยาจาก 0.8-1.4 ส่วน และสัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับสไตรีนเท่ากับ 1:0.66

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติซึ่งใช้ไวนิลมอนอเมอร์ผสมระหว่างสไตรีนกับเมทิลเมทาคริเลทโดย Arayapranee *et al.* (2003) โดยศึกษาในแง่ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับสไตรีนและเมทิลเมทาคริเลทโดยใช้ควินินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ร่วมกับ Sodium formaldehyde sulfoxylate dihydrate/EDTA-chelated Fe^{2+} เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ และใช้โซเดียมโคคซิลซัลเฟต (SDS) เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ควบคุม pH ของระบบโดยการเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และมีการปล่อยให้อุณหภูมิของน้ำยางบวมตัวในมอนอเมอร์ก่อนทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง แล้วทำการวิเคราะห์ผลผลิตกันท์โดยใช้เทคนิค

นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีชนิดโปรตอน ($^1\text{H-NMR}$) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่า ประสิทธิภาพการกราฟต์ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยา อิมัลซิไฟเออร์ สารขยายสายโซ่ อุณหภูมิ และสัดส่วนระหว่างปริมาณมอนอเมอร์ต่อปริมาณยาง โดยประสิทธิภาพการกราฟต์จะสูงสุดเมื่อใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาปริมาณ 2 phr ในอุณหภูมิ 70 °C และจะลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาณมอนอเมอร์ต่อยาง แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ เกิดที่ผิวอนุภาคยาง

สำหรับการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับไวนิลมอนอเมอร์ชนิดอื่นๆ เช่น 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของยางธรรมชาติ ทำการศึกษาโดยปวีณา (2005) โดยทำการกราฟต์ระหว่าง 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตกับยางธรรมชาติซึ่งใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาและทำให้เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันในระบบอิมัลชัน ผลลัพธ์ที่ได้นำไปวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้เทคนิค IR และสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TG-DTA ซึ่งในการทดลองได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยา และความเข้มข้นของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตต่อระดับการกราฟต์ จากการทดลองพบว่า สัดส่วนโมลระหว่าง 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตกับยางธรรมชาติ ที่ให้ระดับการกราฟต์สูงที่สุดคือ 95:5 และปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเป็น 0.05 เปอร์เซ็นต์โมล นอกจากนี้ ยังพบว่าสมบัติทางความร้อนของกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต และยางธรรมชาติ จากการทดสอบการละลายของกราฟต์โคพอลิเมอร์นั้นพบว่า มีความแตกต่างจาก 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต และยางธรรมชาติ

5. การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์

การตัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน มักมีสถานะในกระบวนการสังเคราะห์เป็นระบบเนื้อผสม (heterogeneous system) คือ ระบบที่มีเนื้อสารปรากฏมากกว่า 1 ชั้น ซึ่งเกิดจากสารใดสารหนึ่งหรือมากกว่าที่ไม่สามารถละลายได้ในสารอื่นๆในระบบ เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์จึงมักเป็นแบบอิมัลชัน (emulsion) (ชัยวัฒน์, 2527)

การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์สามารถทำได้หลายวิธี แบ่งออกเป็นกลุ่มตามกระบวนการที่ใช้ได้ดังนี้ คือ

5.1 การโคพอลิเมอไรส์โดยการย้ายอนุมูลอิสระ (Polymer transfer)

ในปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระ การย้ายอนุมูลอิสระถือเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญ ไม่ว่าจะเป็นการย้ายไปยังมอนอเมอร์ ตัวทำละลาย การเคลื่อนย้ายสายโซ่ (chain transfer reagent) ไปยังพวกเมอร์แคปแทน หรือย้ายไปยังสายโซ่อื่นที่กำลังเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรส์ ซึ่งการย้ายอนุมูลอิสระไปยังสายโซ่อื่นที่กำลังเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรส์นี้เองจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลอื่นในตำแหน่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอไรส์ได้

เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอไรส์ชนิดนี้ เริ่มจากละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลายที่เหมาะสม แล้วเติมสารริเริ่มปฏิกิริยาซึ่งอาจจะเป็นสารในกลุ่มเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่ของพอลิเมอร์ หลังจากนั้นเติมมอนอเมอร์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอไรส์โดยการเคลื่อนย้ายอะตอมของไฮโดรเจน หรือฮาโลเจนไปยังตำแหน่งที่เป็นอนุมูลอิสระบนสายโซ่ของพอลิเมอร์ทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของมอนอเมอร์ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอไรส์ เทคนิคแบบนี้สามารถใช้ในการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลทกับยางธรรมชาติ หรือพอลิไอโซพรีนสังเคราะห์ (Mark *et al.*, 1994)

5.2 การโคพอลิเมอไรส์โดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยความร้อน

การโคพอลิเมอไรส์ด้วยความร้อน เป็นเทคนิคในการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบที่เป็นอิมัลชัน โดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่สลายตัวให้อนุมูลอิสระในอุณหภูมิสูงและมีพลังงานพันธะอยู่ในช่วง 25-40 kcal/mole ประเภทของสารที่เหมาะสมจึงจำกัดเพียงสารที่มีพันธะ O-O, S-S และ N-O ในโมเลกุลเท่านั้น โดยสารที่นิยมใช้มาก คือ โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) (Triphattaraphun, 2001 และ สิทธิพงษ์, 2547) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) (Enyiegbulam และ Aloka, 1992) ในช่วงอุณหภูมิ 60-90 °C

5.3 การโคพอลิเมอไรส์โดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยความร้อนปฏิกิริยารีดอกซ์

เป็นอีกเทคนิคหนึ่งในการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ โดยจะทำกันในสภาวะอิมัลชัน โดยใช้สารเคมี 2 ชนิดที่ทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนแล้วเกิดอนุมูลอิสระขึ้นในระบบ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่นิยมใช้ได้แก่ เฟอร์รัสไอออนกับซีริกไอออน สารพวกไฮโดรเปอร์ออกไซด์กับ

เมทัลไอออน หรือสารพวกเปอร์ออกไซด์กับเอมีน เป็นต้น วิธีนี้มักใช้ในการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของน้ำยางธรรมชาติกับเมทิลเมทาคริเลท นอกจากนี้ ยังใช้ได้กับพอลิเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอีกด้วย (Mark *et al.*, 1994)

5.4 การโคพอลิเมอร์ไรซ์โดยวิธีโฟโตเคมีคัล

พอลิเมอร์ที่มีหมู่ว่องไวต่อแสงจะดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความถี่ของรังสีอัลตราไวโอเล็ต แล้วเกิดการเสื่อมสภาพผ่านกลไกแบบอนุมูลอิสระ ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิ-เมอร์ไรซ์ได้ เช่น การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนหรือเมทิลเมทาคริเลท และกราฟต์โคพอลิเมอร์ของพอลิบิวตะไดอินกับพอลิสไตรีน เป็นต้น แต่การเกิดอนุมูลอิสระจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะเกิดได้ช้า จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารที่ว่องไวต่อแสง (photosensitizer) เพื่อเร่งการเกิดอนุมูลอิสระ (Mark *et al.*, 1994)

5.5 การโคพอลิเมอร์ไรซ์โดยรังสีพลังงานสูง

การฉายรังสีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา (โคบอลต์ 60) หรือลำอิเล็กตรอนแกมมาเลกุลยางธรรมชาติหรือพอลิไอโซพรีน จะทำให้พันธะเคมีของสายโซ่โพลีเมอร์ของยางธรรมชาติเกิดการแตกสลายและเกิดเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์ของไวนิลมอนอเมอร์ได้ (Mark *et al.*, 1994) เทคนิคการใช้รังสีพลังงานสูงนี้เป็นวิธีการที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ โดยเริ่มจากการนำน้ำยางธรรมชาติมาผสมกับมอนอเมอร์แล้วนำไปฉายรังสีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์

เทคนิคการฉายรังสีนี้มักใช้ในการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิไว-นิลคลอไรด์ และกราฟต์โคพอลิเมอร์ของพอลิคลอโรพรีนกับพอลิไอโซพรีน หรือพอลิบิวตะไดอิน เป็นต้น โดยในปี 2007 Croonenborghs *et al.* ได้ศึกษาอิทธิพลของรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมาต่อ พอลิเมอร์ พบว่า รังสีทั้งสองชนิดไม่ส่งผลให้สมบัติต่างๆของพอลิเมอร์แตกต่างกัน โดยงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างไวนิลมอนอเมอร์กับยางธรรมชาติด้วยรังสีพลังงานสูง มีดังนี้

Cooper *et al.* (1959) ได้ทำการกราฟต์เมททิลเมทาคริเลตลงบนยางธรรมชาติในสถานะลาเท็กซ์โดยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและรังสีแกมมาเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ อุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยา ชนิดของรังสี ความเข้มข้นของเซนซิไทเซอร์ต่ออัตราการพอลิเมอไรซ์ และน้ำหนักโมเลกุลของกราฟต์โคพอลิเมอร์ จากการศึกษา พบว่า การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น สำหรับผลของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาการกราฟต์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเซนซิไทเซอร์และอุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยา แต่การฉายรังสีแกมมาไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ที่เป็นไปได้ แสดงดังสมการที่ 1-8

ขั้นริเริ่มปฏิกิริยา (initiation)



ขั้นแผ่ขยาย (propagation)



ขั้นสิ้นสุด (termination)



เมื่อ

R คือ ยางธรรมชาติ, P คือ เซนซิไทเซอร์, M คือ มอนอเมอร์

ต่อมา George *et al.* (2003) ได้นำเมททิลเมทาคริเลตมากราฟต์ลงบนยางธรรมชาติในสถานะลาเท็กซ์โดยการฉายรังสีแกมมาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแผ่นฟิล์ม พบว่า การกราฟต์เมททิลเมทาคริเลตลงบนยางธรรมชาติสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มให้มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ

เมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น แต่เป็นผลให้ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยึดที่จุดขาดของแผ่นฟิล์มลดลง นอกจากนี้การฉายรังสีในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มลดลง ต่อมาในปี 2006 Dafader *et al.* ยังได้ศึกษาการกราฟต์อะคริเลตมอนอเมอร์ ชนิดต่างๆบนยางธรรมชาติด้วยรังสีแกมมา จากการศึกษา พบว่า ปริมาณรังสี 4 kGy ทำให้สมบัติเชิงกลของกราฟต์โคพอลิเมอร์มีสมบัติดีที่สุด และระดับของการกราฟต์จะขึ้นอยู่กับ side group ของอะคริเลตมอนอเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาทำปฏิกิริยาการกราฟต์

นอกจากการนำไวนิลมอนอเมอร์มากราฟต์ลงบนยางธรรมชาติแล้ว ยังมีการศึกษาการกราฟต์ลงบนยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆด้วย เช่น การศึกษาการกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตบนยางสไตรีนบิวตะไดอิน โดย Peng *et al.* ในปี 2005 ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ปริมาณรังสีที่ 5 kGy มีประสิทธิภาพการกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตบนยางสไตรีนบิวตะไดอินได้มากที่สุด และประสิทธิภาพการกราฟต์จะมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น และต่อมาในปี 2006 Haldar และ Singha ได้ศึกษาการกราฟต์บิวทิลอะคริเลต (BA) และเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (MMA) บนยางบิวไทล์ด้วยการฉายลำอิเล็กตรอน เมื่อทำการตรวจวัดระดับการกราฟต์ด้วย ¹H-NMR พบว่า ระดับการกราฟต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณมอนอเมอร์ และปริมาณรังสีของลำอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้น และพบว่า BA มีประสิทธิภาพในการกราฟต์ดีกว่า MMA เนื่องจาก เมื่อทำการตรวจดูสภาพพื้นผิว จะเห็นว่า PMMA มีการแยกเฟสออกจากยางบิวไทล์อย่างชัดเจน และเกิดการเสื่อมสภาพขณะการฉายรังสี ในขณะที่ เมื่อนำ PMMA ไปฉายรังสีที่ปริมาณรังสีต่ำจะทำให้การเสื่อมสภาพน้อยลง แต่เป็นผลให้ระดับการกราฟต์ต่ำลงเช่นกัน

อย่างไรก็ตาม นอกจากรังสีพลังงานสูงจะสามารถใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาการกราฟต์แล้ว ยังได้มีการนำรังสีพลังงานสูงมาใช้ในการวัลคาไนซ์พอลิเมอร์ หรือยางธรรมชาติอีกด้วย รวมทั้งมีการค้นพบว่า สารบางชนิด เช่น *n*-Butyl acrylate (*n*-BA), Carbon tetrachloride (CCl₄) และ Chloroform (CHCl₃) เป็นต้น สามารถทำหน้าที่เป็นเซนซิไทเซอร์ คือ สามารถลดปริมาณรังสีที่เหมาะสมในการเกิดในการทำปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถช่วยลดปริมาณรังสีที่ต้องการจาก 200 kGy เป็น 15 kGy ได้ (Sabharwal *et al.*, 1997 อ้างจาก Makuuchi *et al.*, 1988) โดยในปี 1996 Haque *et al.* ได้ศึกษาถึงการหาสถานะที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยการฉายรังสีแกมมา โดยทำการศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณรังสีที่ต้องการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติในสถานะลาเท็กซ์ อิทธิพลของเซนซิไทเซอร์ 6 ชนิด ได้แก่ *n*-Butyl acrylate (*n*-BA), Carbon tetrachloride (CCl₄), Chloroform (CHCl₃), *n*-BA+ CCl₄, *n*-BA+ CHCl₃ และ *n*-BA+H₂O รวมทั้ง

ระยะเวลาในการผสม จากการศึกษา พบว่า *n*-BA มีประสิทธิภาพดีที่สุดในเมื่อเปรียบเทียบกับสารชนิดอื่น และสถานะที่เหมาะสมสำหรับการวัลคาไนซ์ คือการใช้ *n*-BA ปริมาณ 5 phr ทำการผสมเป็นระยะเวลา 30-40 นาที และนำไปฉายรังสีที่ปริมาณรังสี เท่ากับ 12 kGy ซึ่งต่อมา Jayasuriya *et al.* (2001) ได้ค้นพบชนิดใหม่ของโพลิเมอร์ที่ช่วยให้ยางธรรมชาติมีความเสถียรมากกว่าการใช้ *n*-BA คือ trimethylol propane trimethacrylate (TMPTMA) และ phenoxy ethyl acrylate (PEA)

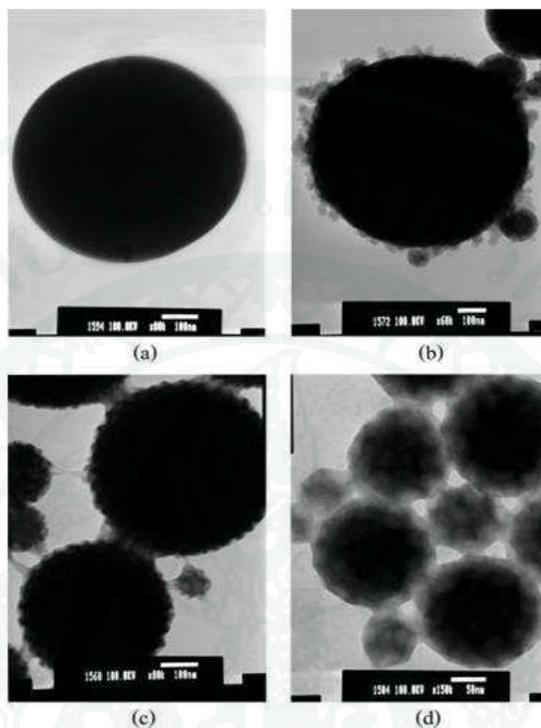
ในปี 2005 Chaudhari *et al.* ได้ทำเปรียบเทียบการวัลคาไนซ์ระหว่างยางธรรมชาติกับยาง สไตรีนบิวตะไดอินด้วยการฉายรังสีแกมมา โดยศึกษาถึงอิทธิพลของสัดส่วนของยางธรรมชาติกับยางสไตรีนบิวตะไดอิน และอิทธิพลของปริมาณรังสีต่อสมบัติความทนทานต่อตัวทำละลาย สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านความร้อนของแผ่นฟิล์ม จากการศึกษา พบว่า ปริมาณการเกิดเจล ความต้านทานต่อแรงดึง และความคงตัวต่อความร้อนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณยางสไตรีนบิวตะ- ไดอินที่เพิ่มขึ้น และปริมาณรังสีที่ 15 kGy จะทำให้แผ่นฟิล์มยางมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด

6. สัณฐานวิทยาของกราฟต์โคพอลิเมอร์

สัณฐานวิทยาของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของอนุภาคยางกับมอนอเมอร์ชนิดต่างๆ มักเป็นแบบคอร์-เชลล์ (core-shell) คือ มีลักษณะที่ประกอบด้วยส่วนข้างใน (คอร์) ซึ่งเป็นอนุภาคยาง และส่วนข้างนอก (เชลล์) ซึ่งเป็นส่วนของมอนอเมอร์ที่นำมากราฟต์ โพลิเมอร์ที่เกิดบริเวณเชลล์ของอนุภาคจะจัดตัวเป็น random coil ซึ่งเป็นการจัดตัวที่ทำให้สายโซ่มีพลังงานต่ำสุด โดยโพลิเมอร์ที่เกิดก่อนจะถูกดันเข้าไปด้านใน (ประมวล, 2545)

ตัวอย่างเช่นการศึกษาการกราฟต์สไตรีนบนยางธรรมชาติด้วยกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชันแบบคอร์เชลล์อิมัลชัน (วัฒนชัย, 2545) ที่ออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียลสองระดับ ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนและประสิทธิภาพการกราฟต์ ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิปฏิกิริยา สัดส่วนสไตรีนต่อยางธรรมชาติ และความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่า ทั้งอุณหภูมิปฏิกิริยา สัดส่วนสไตรีนต่อยางธรรมชาติ และความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยามีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนและประสิทธิภาพการกราฟต์ สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่ามีลักษณะเป็นแบบคอร์-เชลล์ เช่นเดียวกับการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับเมธิลเมทาคริเลท ในระดับนาโน

(Arayaprane and Rempel, 2008) (ดังแสดงในภาพที่ 7) โดยอนุภาคยางที่มีระดับการกราฟต์ของเมธิลเมทาคริเลทกราฟต์อยู่บนอนุภาคในปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ



ภาพที่ 7 ภาพถ่าย TEM ของพอลิเมอร์ (a) ขางธรรมชาติ (b), (c) และ (d) คือ ขางธรรมชาติที่มีเมธิลเมทาคริเลทกราฟต์อยู่บนอนุภาคในปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ

ที่มา: Arayaprane and Rempel (2008)

7. รังสีแกมมาและลำอิเล็กตรอน (กฤษฎา และ ชญาภา, 2550)

7.1 รังสีแกมมา (γ -rays)

รังสีแกมมา เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก ไม่มีประจุ และไม่มีมวล ไม่เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้า เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสง มีอำนาจทะลุทะลวงสูง สามารถทะลุผ่านร่างกายมนุษย์ หรือวัตถุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น แผ่นไม้ หรือ โลหะได้ จากการทดลองพบว่า รังสีแกมมาสามารถทะลุผ่านคอนกรีตหนาประมาณ 1 ฟุตได้ แต่จะถูกดูดซับได้หมดในคอนกรีตหนา 1 เมตร (กฤษฎา และ ชญาภา, 2550) รังสีแกมมาเป็นรังสีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทาง

การแพทย์ โดยใช้ในการบำบัดโรคมะเร็ง มาเชื่อมจูลินทรีย์ในเครื่องมือแพทย์ ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยนำไปใช้ในการถนอมอาหาร มาเชื่อมจูลินทรีย์และพยาธิในอาหาร รวมทั้ง การนำไปใช้ในด้านการเกษตร โดยการนำไปปรับปรุงพันธุ์พืช และทำหมันแมลงตัวผู้ (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2551)

รังสีแกมมาเกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสของอะตอมธาตุที่เป็นไอโซโทปรังสี เช่น โคบอลต์-60 ซึ่งได้มาจากการกระตุ้น โคบอลต์-59 ในถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โคบอลต์-60 สลายตัวให้รังสีแกมมาที่มีพลังงานควอนตัมประมาณ 1.173 ล้านอิเล็กตรอน โวลต์ และ 1.333 ล้านอิเล็กตรอน โวลต์ ดังนั้น พลังงานควอนตัมรวมเท่ากับ 2.506 ล้านอิเล็กตรอน โวลต์ ความยาวคลื่นของรังสีแกมมาที่ได้จากโคบอลต์-60 คือ ประมาณ 10^{-10} เซนติเมตร โดยมีครึ่งชีวิตอยู่ที่ 5.272 ปี และความแรงของรังสีจะลดลงร้อยละ 12 ต่อปี

7.2 ลำอิเล็กตรอน (electron beams)

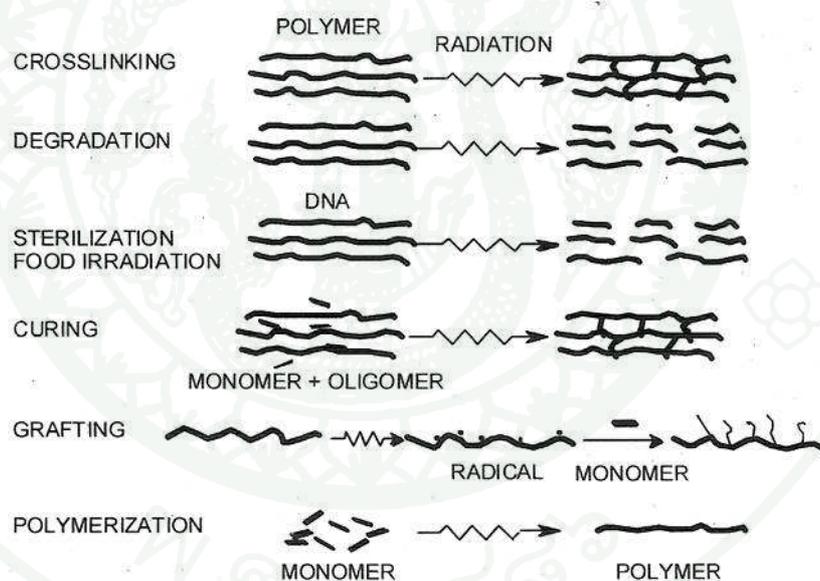
ลำอิเล็กตรอนได้มาจากเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอน เมื่อวัสดุซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนและนิวเคลียสอยู่ในสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะถูกเร่งจนมีพลังงานสูงและสามารถหลุดออกจากวัสดุได้ ตัวอย่างการนำหลักการนี้ไปใช้ ได้แก่ หลอดภาพที่เกิดจากรังสีคาโทดในโทรทัศน์ ภาพที่เกิดจากหลอดภาพในโทรทัศน์นั้นเกิดจากอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งและพุ่งเข้าสู่จอภาพภายใน โดยมีพลังงานในทอรังสีคาโทดประมาณ 25 กิโลโวลต์ ก็เพียงพอที่จะทำให้เกิดภาพบนจอโทรทัศน์ได้ เครื่องกำเนิดอิเล็กตรอนก็ทำงานด้วยหลักการเดียวกันกับหลอดภาพโทรทัศน์ โดยอิเล็กตรอนจะเกิดจากการให้ความร้อนกับลวดที่มีรูปร่างเหมือนปืนยิงอิเล็กตรอน ซึ่งเมื่อเส้นลวดเหล่านี้ได้รับความร้อนที่สูงมากพอ ก็จะเกิดเป็นกลุ่มหมอกของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะถูกดึงให้หลุดออกจากกลุ่มหมอก และถูกเร่งให้มีความเร็วสูงมาก ทะลุผ่านกระจกฟลอยด์เข้าไปยังผลิตภัณฑ์เป้าหมาย

ความแรงของลำอิเล็กตรอนที่ฉายไปนั้นขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเร่งอิเล็กตรอน และอัตราการไหลของกระแสอิเล็กตรอน แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเร่งลำอิเล็กตรอน ก็คือ พลังงานของอิเล็กตรอนนั่นเอง ซึ่งหมายถึง ความลึกของอิเล็กตรอนที่ผ่านทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ ส่วนอัตราการไหลของกระแสอิเล็กตรอนจะบอกถึงปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่ง การเปรียบเทียบระหว่างรังสีแกมมาและลำอิเล็กตรอน (แสดงดังตารางที่ 5) ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอนนั้นมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้โคบอล-60 ตรงที่การลงทุนต่ำ บำรุงรักษา

ง่าย และไม่มีปัญหาเรื่องความแรงของรังสีลดลง แต่มีข้อด้อย คือ มีอัตราการดูดกลืนรังสีและอำนาจการทะลุทะลวงต่ำ

8. ปฏิกิริยาเคมีที่สามารถเกิดขึ้นได้ในกระบวนการฉายรังสี

เมื่อนำพอลิเมอร์ไปฉายรังสี พลังงานจากต้นกำเนิดรังสี เช่น รังสีแกมมา (gamma rays) หรือ ลำอิเล็กตรอน (electron beam) จะถูกถ่ายโอนไปสู่พอลิเมอร์ ซึ่งพลังงานนี้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้มากมาย การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเหล่านี้ สามารถนำไปสู่การประยุกต์ใช้ที่มีประโยชน์อย่างมากในทางอุตสาหกรรม เช่น การเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslink) การเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ (grafting) หรือเกิดการเสื่อมสภาพ (degradation) เป็นต้น (กฤษญา และ ชญาภา, 2550) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ปฏิกิริยาเคมีที่สามารถเกิดขึ้นจากกระบวนการฉายรังสีพอลิเมอร์

ที่มา: กฤษญา และ ชญาภา (2550)

9. หน่วยและขนาดของรังสี

แรม (radiation absorbed dose, rad) คือ ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนในมวลสาร โดยกำหนดให้ 1 rad เป็นปริมาณรังสีที่สารใดๆ ที่มีมวล 1 กิโลกรัม ดูดกลืนหรือรับพลังงานไว้ 10^{-2} จูล (Joule, J) หรือ $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/kg}$ หรือ เกรย์ ในระบบ SI (Gray, Gy) ดังนั้น 1 Gy จึงเท่ากับ 1 J/kg หรือเท่ากับ 100 rad

ตารางที่ 5 ความแตกต่างของรังสีแกมมากับลำอิเล็กตรอน

	รังสีแกมมา	ลำอิเล็กตรอน
แหล่งกำเนิด	โคบอล-60	เครื่องกำเนิดอิเล็กตรอน
พลังงาน	1.25 MeV	300 keV
ผลลัพท์	1.48 kW/100 kCi	~ 100 kW
อำนาจทะลุทะลวง	มาก	น้อย
อัตราการดูดกลืนรังสี	> 10 kGy/h	< 10 kGy/h
ทิศทาง	หลายทิศทาง	1 ทิศทาง
ประสิทธิภาพ	> 35 เปอร์เซ็นต์	มาก
การควบคุมอัตราการดูดกลืนรังสี	ปริมาณของโคบอล-60 และ ระยะทางจากแหล่งกำเนิด	แรงดันเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอน กระแสลำอิเล็กตรอน และ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด
การกำบังด้วยคอนกรีต	หนาน้อยกว่า 1 เมตร	80 เซนติเมตร (300 keV)
การบำรุงรักษา	ความแรงรังสีลดลงร้อยละ 12 ต่อปี	ง่าย

ที่มา: กฤษฎา และ ชญาภา (2550)

10. ส่วนประกอบสำคัญที่ใช้เตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์

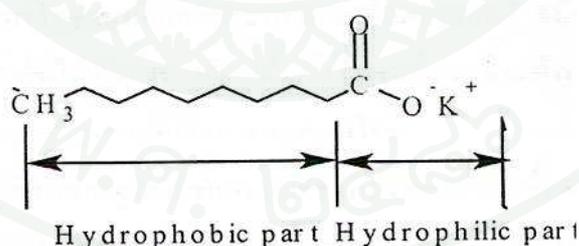
ส่วนประกอบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน ประกอบด้วย

1. มอนอเมอร์ (Monomer) มอนอเมอร์ส่วนใหญ่แล้วสามารถพอลิเมอไรซ์โดยวิธีการพอลิเมอไรซ์แบบอิมัลชัน

2. ตัวกลาง (Dispersion medium) ตัวกลางที่นิยมใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน คือ น้ำ เพราะมีราคาถูก โดยน้ำจะเป็นตัวกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาได้ดี

3. ตัวริเริ่ม (Initiator) ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชันจะต้องละลายได้ในตัวกลางน้ำ เช่น เปอร์ซัลเฟตของแอมโมเนียม และไฮโดรเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ ซึ่งสารพวกเปอร์ซัลเฟตจะทำปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิ 40-80 องศาเซลเซียส ส่วนเปอร์ออกไซด์อินทรีย์มีความเสถียรแตกต่างกัน อุณหภูมิที่ใช้จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารเคมีแต่ละตัว นอกจากนี้ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้อาจอยู่ในรูปของรังสีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ หรือลำอิเล็กตรอนได้อีกด้วย

4. สบู่ (Emulsifying agent, soap) เป็นประเภทสารปรับสภาพผิวอนุภาค (Surfactant) ที่มีโมเลกุลประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนหนึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วละลายน้ำได้ดี เรียกว่าไฮโดรฟิลิก (hydrophilic part) อีกส่วนหนึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้วละลายในสารอินทรีย์ได้ดี เรียกว่า ไฮโดรโฟบิก (hydrophobic part) ซึ่ง Winsor (1954) ได้เขียนโครงสร้างโมเลกุลพวกแอมฟีฟิลิกได้ ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 โมเลกุลของสบู่ (Emulsifying agent, soap)

เมื่อเติมสบู่ลงในน้ำยาง สบู่จะเกิดการแตกตัว ส่วนไฮโดรโฟบิกจะเข้าไปเกาะที่ผิวของอนุภาคยางธรรมชาติ พร้อมกับปลายที่เป็นไฮโดรฟิลิกจะดึงน้ำเข้ามาล้อมรอบอนุภาคยางธรรมชาติ เกิดเป็นชั้นของน้ำ (Hydration layer) มาห่อหุ้มอนุภาคยางทำให้อนุภาคยางมีความเสถียรเพิ่มขึ้น

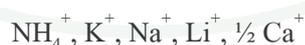
สบู่ที่นิยมใช้ในการเพิ่มความเสถียรของอนุภาคลาเท็กซ์ ในการเตรียมพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. แอนไอออนิก (Anionic surfactant) เป็นสบู่ที่มีโมเลกุลเป็นขั้วลบ เช่น โซเดียมลอริลซัลเฟต โพลีเทสเซียมโอเลอเทท โพลีเทสเซียมลอเรท เป็นต้น
2. แคทไอออนิก (Cationic surfactant) เป็นสบู่ที่มีโมเลกุลเป็นขั้วบวก เช่น Quaternary ammonium compound เป็นต้น
3. นอนไอออนิก (Nonionic surfactant) เป็นสบู่ที่มีโมเลกุลเป็นกลาง เช่น อิมัลวิล-คัมบิลว ซึ่งเป็น Aromatic polyglycol เป็นต้น

สบู่เป็นสารลดแรงตึงผิว (Surface tension) ของตัวกลาง ดังนั้นการเพิ่มปริมาณสบู่มากขึ้นจะทำให้ความตึงผิวลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุดหนึ่งความเข้มข้นของสบู่จะไม่มีผลต่อความตึงผิว เรียกจุดนั้นว่า จุดความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (Critical Micell Concentration, C.M.C.) ซึ่งเป็นจุดที่โมเลกุลของสบู่เกิดการรวมตัวกันเป็นไมเซลล์

ปัจจัยที่มีผลต่อค่า C.M.C. ของสบู่มีดังนี้

1. ความยาวของสายโซ่ เมื่อความยาวของสายโซ่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ C.M.C. ลดลง
2. โครงสร้างสายโซ่โมเลกุล โมเลกุลที่เป็นโซ่สาขาจะมี C.M.C. ต่ำกว่าสายโซ่ตรงและคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่ จะทำให้ C.M.C. สูงกว่าคาร์บอนที่เป็นพันธะเดี่ยว (Rosen, 1987)
3. ขนาดของประจุบวก พบว่าประสิทธิภาพในการลด C.M.C. ของแคทไอออนเรียงตามลำดับได้ดังนี้



ระบบการพอลิเมอร์แบบอิมัลชันจะประกอบด้วยอนุภาค 3 ชนิด คือ หยดมอนอเมอร์ (Monomer droplet) ไมเซลล์ที่ไม่เกิดการพอลิเมอร์ (ไมเซลล์ส่วนนี้จะทำหน้าที่รักษาความเสถียรให้กับพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น) และไมเซลล์ที่เกิดการพอลิเมอร์

กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์แบบอิมัลชันแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน (คำนิ้ง, 2542) คือ

1. ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระในตัวกลาง แล้วอนุมูลอิสระถูกดึงคู่เข้าไมเซลล์ของอิมัลชันไฟเออร์ (สบู่) มอนอเมอร์ที่อยู่ในไมเซลล์จะมีพอลิเมอร์และมอนอเมอร์ผสมกัน เรียกว่า monomer swollen polymer particle

2. พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะขยายขนาดโตขึ้นเรื่อยๆ ทำให้มอนอเมอร์ภายในไมเซลล์เหลือน้อยลง ดังนั้นมอนอเมอร์จากหยดมอนอเมอร์ที่เข้าสู่ตัวกลางจะแพร่ผ่านตัวกลางมายังไมเซลล์ แล้วเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์ต่อ ในขั้นตอนนี้ไมเซลล์จะมีพอลิเมอร์และมอนอเมอร์ผสมกัน เรียกว่า monomer swollen polymer particle

3. ตอนสุดท้ายของปฏิกิริยาระบบจะเหลือเพียงสองเฟส คือน้ำและมอนอเมอร์ที่ละลายในพอลิเมอร์ เนื่องจากมอนอเมอร์ในหยดมอนอเมอร์ได้แพร่เข้าสู่ไมเซลล์ทั้งหมด

11. โฟมกันกระแทก

โฟมกันกระแทก เป็นวัสดุหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ปกป้องสินค้าจากการเสียหายอันเนื่องมาจากแรงกระแทกหรือการสั่นสะเทือนระหว่างกระบวนการขนส่งหรือการเคลื่อนย้าย เนื่องจาก เป็นวัสดุที่สามารถกระจายแรงหรือพลังงานได้ดี ซึ่งมีความสอดคล้องกับหลักการพื้นฐานที่สำคัญของวัสดุกันกระแทกในการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับสินค้า (สุพจน์, 2544) คือ

1. วัสดุกันกระแทกจะต้องดูดซับแรงกระแทกและปกป้องการส่งผ่านแรงกระแทกมายังตัวสินค้า
2. วัสดุกันกระแทกต้องสามารถลดการเคลื่อนที่ของสินค้าในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งเป็นการลดการเคลื่อนที่ของสินค้าไม่ให้มากระแทกกันจากการสั่นสะเทือน

วัสดุคิพที่สามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุกระแทกได้อาจมาจากเม็ดพลาสติก เช่น พอลิยูรีเทน พอลิสไตรีน หรือยางธรรมชาติ ซึ่งการนำยางธรรมชาติมาผลิตเป็นโฟมกันกระแทก ผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้จะสามารถคืนตัวได้ดี และมีความแข็งแรงไม่สูงมากนัก ซึ่งเป็นจุดเด่นที่เหนือกว่าวัสดุกันกระแทกที่ได้จากพอลิเมอร์ชนิดอื่น โดยในปัจจุบัน ได้มีการนำยางธรรมชาติเหล่านี้มาผลิตเป็นแผ่นโฟมกันกระแทกในเชิงพาณิชย์แล้วสำหรับผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น แผ่นโฟมยางประกบกำมะหยี่สำหรับกล่องพระ แผ่นโฟมยางจิ๊กซอสำหรับรองพื้น หรือแผ่นโฟมยางรองเครื่องจักร แต่ยังไม่มีการนำไปใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับสินค้าในระหว่างการขนส่ง

12. โฟมยาง (Rubber Foam)

โฟมยาง หรือ ยางฟองน้ำ คือ ยางที่ภายในประกอบด้วยโพรงเล็กๆจำนวนมาก รูหรือโพรงอากาศขนาดเล็กภายในเนื้อยางจะติดต่อกันทั้งหมด หรือติดกันบางส่วน กระบวนการแปรรูปโฟมยาง คือ การทำให้น้ำยางพองขึ้นด้วยอากาศ หรือก๊าซอื่นๆ ที่สามารถทำให้น้ำยางเป็นฟองที่เสถียร การทำให้อากาศเข้าไปอยู่ในน้ำยางสามารถทำได้โดยใช้วิธีการปั่นด้วยแรงกล หรืออาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีภายในส่วนที่เป็นของเหลวของน้ำยาง ในขณะที่เริ่มเตรียมน้ำยางอาจใช้สารช่วยเสริมการเกิดฟอง และสารช่วยให้ฟองเสถียร ก่อนที่เข้าสู่ขั้นตอนการคงรูป ตามลำดับ (Blackley, 1997)

12.1 การผลิตโฟมยางกันกระแทก

กระบวนการผลิตโฟมยางกันกระแทกแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ

12.1.1 กระบวนการผลิตแบบทาลาเลย์ (Talalay process)

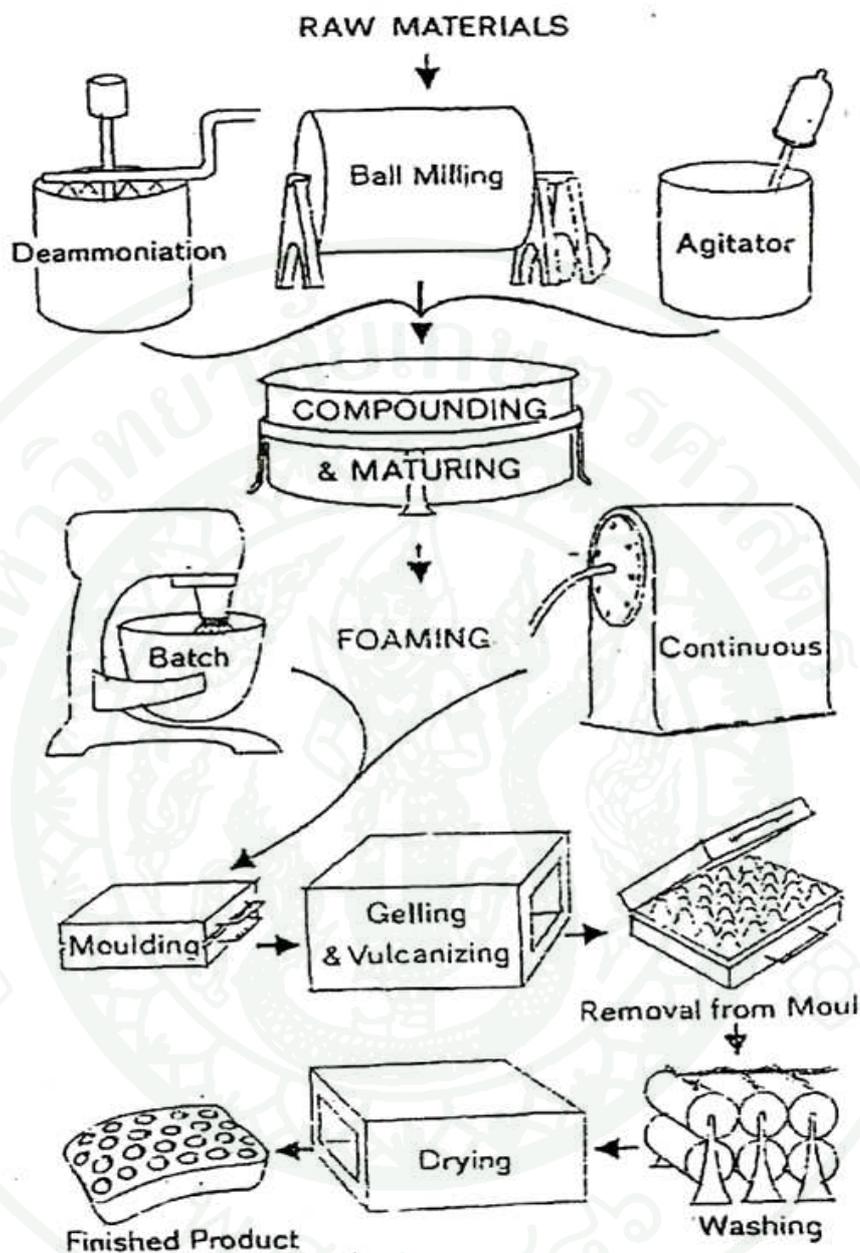
วิธีการผลิตโฟมยางธรรมชาติของ Joseph Talalay ได้มีการคิดค้นขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1963 เรียกว่า กระบวนการแบบทาลาเลย์ (Blackley, 1997) กระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติแบบทาลาเลย์จะเริ่มจากการปั่นน้ำยางให้เป็นฟอง โดยใช้วิธีทางกลทำให้น้ำยางฟูภายใต้ระบบสูญญากาศ แล้วให้ความเย็นประมาณ -30°C ทำให้อากาศเกิดการเจล (ซึ่งเทคนิคการให้ความเย็นนี้จะใช้ส่วนผสมของเอทิลีน ไกลคอล) หลังจากนั้น จึงทำการผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปที่แม่พิมพ์สูญญากาศ จากนั้นจึงอุ่นแม่พิมพ์ให้อุ่นหมุ่ค่อยๆสูงขึ้นใน 3 ระดับ คือ 4°C และต่อมา เป็น 38°C และเพิ่มเป็น 110°C ตามลำดับ เพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์อย่างสมบูรณ์

12.1.2 การผลิตโดยกระบวนการดันลอป

หลักการพื้นฐานของการทำให้อากาศมีรูพรุนประสบความสำเร็จอย่างชัดเจนเมื่อประมาณ ค.ศ. 1929 ซึ่งเป็นเทคนิคที่เรียกว่า กระบวนการแบบดันลอป หรือ กระบวนการซิลิโคฟลูออไรด์ ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตโฟมยางธรรมชาติ โดยประกอบด้วยการทำให้น้ำยางเป็นฟอง โดยการใช้เครื่องกลตี หรือปั่นอากาศเข้าไปในน้ำยางที่มีส่วนผสมของสารเคมีต่างๆ เมื่อได้ฟองตามต้องการแล้วจึงเติมสารเคมีที่ช่วยให้เกิดเจลอย่างช้าๆ

(delayed-action gelling agent) เพื่อให้ฟองมีเวลาคงรูปร่างตามแบบแม่พิมพ์ก่อนการเจล จากนั้นจึงวัดคาบในซึ่งฟองยางที่เจลแล้ว ก่อนนำไปล้าง อบแห้ง และตกแต่งเป็นชั้นตอนสุดท้าย ซึ่ง Blackley (1997) ทดลองเตรียมยางธรรมชาติโดยวิธีการดันลอป พบว่าสามารถทำได้โดยใช้เครื่องตีครีมสำหรับทำขนมเค้ก ดีโฟมยางธรรมชาติจากวัตถุดิบน้ำยางธรรมชาติชั้น ซึ่งใส่สบู่เป็นสารก่อฟอง และเจลด้วยสารออกไซด์ของสังกะสี (zinc oxide) ปริมาณ 3-5 phr และโซเดียมซิติโคฟลูออไรด์ ปริมาณ 1.5 phr

ปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมโฟมยางธรรมชาติด้วยกระบวนการแบบดันลอป คือ การปรับปริมาณแอมโมเนียในน้ำยาง น้ำยางที่ใช้ในการทำโฟมยางธรรมชาติโดยมากจะเป็นน้ำยางธรรมชาติชั้น ซึ่งจะต้องมีการปรับปริมาณแอมโมเนียให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตโฟมยางที่เลือกใช้ ซึ่งอาจจะเติมฟอร์มาลดีไฮด์ หรือไล่แอมโมเนียออกจากน้ำยาง (NR Technical Bulletin, 1966) กระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติแบบดันลอป แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 กระบวนการผลิตโฟมยางแบบดันลอป

ในปี 1962 Calvert ได้เตรียมโฟมยางธรรมชาติจากยางธรรมชาติ โดยใช้กระบวนการเจดด้วยไดฟีนิลกัวนิดีนและโซเดียมซลิโคฟลูออไรด์ พบว่าการเชื่อมทะเลดของเซลล์จะเกิดขึ้นก่อนข้างช้าที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการวัลคาไนซ์ และการเชื่อมทะเลดจะเริ่มเกิดขึ้นที่ pH ประมาณ 7.9 – 8.6

นิกร (2543) ได้เตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทจากสภาวะที่เหมาะสม แล้วจึงนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในการผลิตเป็นยางโฟมยางธรรมชาติ พบว่า สามารถเพิ่มความแข็งของยางโฟมยางธรรมชาติได้โดยไม่ต้องใช้สารตัวเติม และโฟมยางธรรมชาติทนทานต่อการเสื่อมเสีย

สุรศักดิ์ (2545) ใช้กระบวนการดันลอปในการเตรียมโฟมยางธรรมชาติ เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารก่อเจลเสริมต่อการหดตัวและสมบัติของโฟมยางธรรมชาติจากยางธรรมชาติ พบว่า การเติมไดฟีนิลกัวนิดีนปริมาณ 0.5 phr ใช้เวลาในการเจล 2 นาที โฟมยางธรรมชาติจะมีโครงสร้างเซลล์ที่สม่ำเสมอ และมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำสุด 5.1 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่น 0.114 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีความสามารถในการคืนรูปหลังการกดอยู่ที่ 10.5 เปอร์เซ็นต์

ชาریف (2549) ได้ศึกษาการเตรียมยางฟองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติครีมมิงที่มีความเข้มข้น 45 เปอร์เซ็นต์ ตามวิธีการแบบดันลอป โดยทำการศึกษาปริมาณสารก่อเจลหลัก (โซเดียมซลิโคฟลูออไรด์) สารก่อเจลเสริม (ไดฟีนิลกัวนิดีน) สารกระตุ้น (ซิงค์ออกไซด์) และสารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนต) ต่อสมบัติด้านการแปรรูปและสมบัติทางกายภาพของยางฟองน้ำ พบว่า การเพิ่มปริมาณสารก่อเจลหลัก สารก่อเจลเสริม สารกระตุ้น และสารตัวเติม เป็นผลให้ระยะเวลาในการเจลลดลง ในขณะที่มีสมบัติทางกายภาพอื่นๆเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน

12.2 สารเคมีสำหรับการตีฟองน้ำ

สารเคมีต่างๆที่ใช้ในการเตรียมคอมพาวด์ของยางฟองน้ำจะต้องอยู่ในรูปของสารละลาย สารแขวนลอย หรืออิมัลชัน โดยขึ้นอยู่กับสมบัติของสารเคมีเหล่านั้น ซึ่งการเตรียมสารเคมีให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอยจะอาศัยแรงทางกลบดสารเคมีให้มีขนาดอนุภาคประมาณ 1-5 ไมครอน และใช้สารช่วยกระจายตัว (dispersing agent) เพื่อช่วยให้สารเคมีที่บดสามารถแขวนลอยในตัวกลางที่เป็นน้ำได้อย่างเสถียร โดยสารเคมีที่ใช้ในการผลิตยางฟองน้ำแบบดันลอปประกอบด้วย

12.2.1 สารช่วยในการเกิดฟอง (foam promoters)

โดยทั่วไปจะใช้สบู่ในกลุ่มคาร์บอกซิเลต เช่น โปแทสเซียมโอเลเอต (potassium oleate) เข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ใช้เป็นตัวควบคุมอัตราการเกิดฟอง โดยไม่ส่งผลต่ออัตราการเจล อัตราการเกิดฟองจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์จะถูกกำหนดโดยปริมาณของสบู่โปแทสเซียมโอเลเอตที่ใช้ คือ เพิ่มปริมาณสบู่ในน้ำยางคอมพาวด์เมื่อต้องการให้มีฟองอากาศในน้ำยางมาก และลดปริมาณสบู่เมื่อต้องการให้มีฟองอากาศในน้ำยางน้อยหรือต้องการเพิ่มความหนาแน่นของฟองยาง ซึ่งการตีโฟมยางธรรมชาติจากน้ำยางธรรมชาติขึ้นมักนิยมใช้สารช่วยในการเกิดฟองอยู่ระหว่าง 0.2–2 phr ส่วนในน้ำยางสังเคราะห์จะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าน้ำยางธรรมชาติ เนื่องจาก ในน้ำยางสังเคราะห์มักมีสบู่พวกคาร์บอกซิเลตอยู่แล้ว ปริมาณที่ใช้จึงขึ้นอยู่กับน้ำยางสังเคราะห์ (Blackley, 1997)

12.2.2 สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agents)

กำมะถันเป็นสารที่ใช้ในการวัลคาไนซ์และทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงในยางซึ่งในยางธรรมชาติ ปริมาณที่ใช้จะอยู่ในช่วง 2.0-2.5 phr (Mausser *et al.*, 1987) โดยใช้ร่วมกับสารประเภท zinc-dialkyldithiocarbamate เช่น zinc-diethyl dithiocarbamate ประมาณ 1 phr เป็นสารตัวเร่งการวัลคาไนซ์ และอาจมีการใช้สารเร่งเสริมในปริมาณเล็กน้อย เพื่อเพิ่มมอดูลัสยืดหยุ่นของยางฟองน้ำที่ทำจากยางธรรมชาติ และความสามารถในการรับแรงกดเพิ่มขึ้น

12.2.3 สารกระตุ้นการวัลคาไนซ์ (activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ (พงษ์ธร, 2550) โดยซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) เป็นสารกระตุ้นการวัลคาไนซ์ เมื่อใช้ระบบการวัลคาไนซ์โฟมยางธรรมชาติด้วยกำมะถันปกติ (conventional vulcanization, CV) ซึ่งปริมาณสารกระตุ้นที่ช่วยให้ยางสามารถวัลคาไนซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด คือ 5 phr

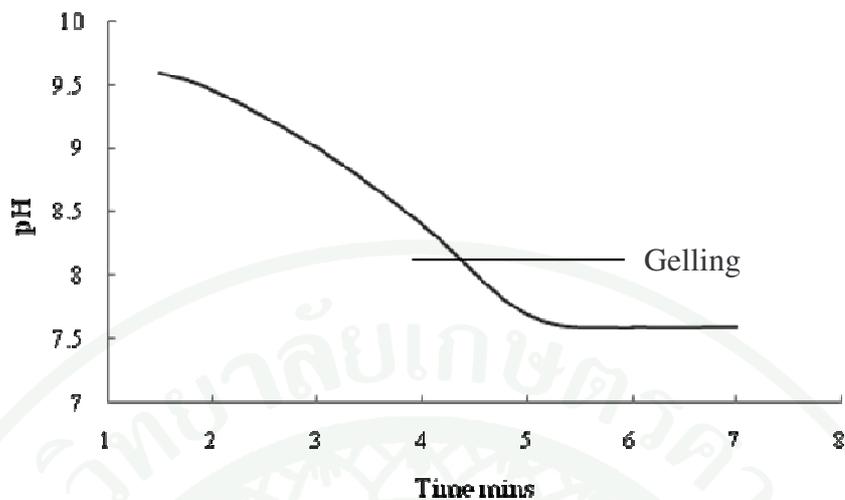
12.2.4 สารตัวเร่ง (accelerators)

สารตัวเร่งการวัลคาไนซ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ZMBT และ ZDEC ซึ่งเมื่อใช้สารตัวเร่งทั้งสองร่วมกัน สารตัวเร่งจะเสริมประสิทธิภาพซึ่งกันและกัน และกระตุ้นการวัลคาไนซ์ได้ดีกว่าการใช้สารตัวเร่งตัวใดตัวหนึ่งเพียงตัวเดียว ซึ่งปริมาณที่ใช้ในน้ำยางคอมปาวด์โฟมยางธรรมชาติจะใช้ในสัดส่วน 1: 1

12.2.5 สารก่อเจล (gelling agents)

E.A. Murphy ได้อธิบายว่า ก่อนการเกิดเจล ระบบโฟมยางธรรมชาติที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติจะประกอบด้วย 2 เฟส (ชั้น) คือ (1) เฟสของสบู่ที่ใช้เป็นตัวรักษาความเสถียรที่กระจายอยู่ในฟองอากาศ และ (2) โมเลกุลยางหรืออนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในซีรัมของน้ำยาง ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดโฟมยางธรรมชาติที่มีคุณภาพ โดยระบบซีรัมนี้จะต้องหยุดการแตกของฟองอากาศโดยทำให้เกิดความหนืดขึ้น แต่เวลาต้องไม่นานเกินไปและเพียงพอที่ทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นเชื่อมต่อกัน และมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรักษาโครงสร้างของฟองที่ซ้อนกันอยู่

โซเดียมซิติโคฟลูออไรด์เป็นสารก่อเจลหลักที่นิยมใช้ในหลายปีที่ผ่านมา ก่อนนำมาใช้งานต้องเตรียมให้เป็นสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นต่ำ (ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งโดยทั่วไป โซเดียมซิติโคฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ จะมี pH ประมาณ 3 ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้น การใส่โซเดียมซิติโคฟลูออไรด์ลงในน้ำยาง จึงทำให้ pH ของน้ำยางลดลง จนเป็นสาเหตุให้น้ำยางเกิดการเจล (ดังแสดงในภาพที่ 11) ซึ่งตามปกติแล้ว ความหนืดของน้ำยางจะไม่เพิ่มขึ้นจนกว่า pH จะลดลงจนเหลือประมาณ 9.2 และหลังการเจลของฟองยาง ค่า pH จะลดลงอย่างช้าๆ แต่มักจะไม่ลดลงต่ำกว่า 7.5 ระยะเวลาในการเจลจะอยู่ในช่วง 2-3 นาที ขึ้นอยู่กับปริมาณโซเดียมซิติโคฟลูออไรด์



ภาพที่ 11 pH กับระยะเวลาการเจล เมื่อใช้โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์เป็นสารก่อเจลหลัก

12.2.6 สารรักษาความเสถียรของฟอง (foam stabilizers)

วัตถุประสงค์ของการใช้สารก่อเจลเสริม คือ การทำให้น้ำยางคอมปาวด์เจล และช่วยให้ฟองยางเกิดความเสถียร สารเคมีที่ใช้ คือ สารประกอบเอมีนที่เจือจางด้วยน้ำให้มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเติมลงในฟองยางเมื่อการตีฟองใกล้เสร็จสมบูรณ์ ปกติปริมาณที่ใช้มักอยู่ในช่วง 0.75 – 1.25 phr ในปัจจุบัน สารที่ใช้รักษาความเสถียรของฟองยางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ไดฟีนิลกัวนิดีน (diphenylguanidine) และควอเตอร์ี เอมีน (quarterly amine)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์พอลิเอสไตรีน
 - 1.1 น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia concentrated latex, HA Latex)
(Thai Rubber Latex Corporation (Thailand) Public Company Limited, Thailand)
 - 1.2 เอสไตรีนมอนอเมอร์ (Fluka chemika, Switzerland)
 - 1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Merck, Germany)
 - 1.4 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (Fluka chemika, Switzerland)
 - 1.5 โซเดียมรอร์ลซัลเฟต หรือ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Ajex Finechem, Newzeland)
 - 1.6 นอร์มอลบิวทิลอะคริเลต (Normal butyl acrylate, *n*-BA) (Fluka chemika, Switzerland)
2. สารเคมีที่ใช้ในการทำครีมและดีโฟมยางธรรมชาติ
 - 2.1 ไดฟีนิลกัวนีนีน (Diphenyl guanidine, DPG) (Bayer Co., Ltd, Germany)
 - 2.2 โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) (Bayer Co., Ltd, Germany)
 - 2.3 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Fluka chemika, Switzerland)
 - 2.4 กรดโอลีอิก
 - 2.5 กำมะถัน (S₈) (Siam Metee, Thailand)
 - 2.6 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) (Ajex Finechem, Newzeland)
 - 2.7 ซิงค์ไดเอทิลไซโอคาร์บาเมต (ZDEC) (Chemitall, Germany)
 - 2.8 ซิงค์เมอร์แคปโทเบนโซไธโออาโซล (ZMBT) (Akzo Chemicals B.V., Natherland)
 - 2.9 เบนโทไนซ์เคลย์ (Bentonite clay) (Shiraishi Calium Kaisha Co., Ltd., Japan)
 - 2.10 วัลทามอล (Vultamol) (BASF Co., Ltd, Germany)

3. สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน

- 3.1 โทลูอิน (Labscan Asia Co., Ltd., Thailand)
- 3.2 ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Labscan Asia Co., Ltd., Thailand)
- 3.3 อะซีโตน (Acetone (Labscan Asia Co., Ltd., Thailand)
- 3.4 เมทิลเอทิลคีโตน (MEK) (Labscan Asia Co., Ltd., Thailand)
- 3.5 คิวเทอเรียมคลอโรฟอร์ม (Merck, Germany)

4. อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 4.1 เครื่องฉายรังสีแกมมา (Gamma Cell, Co₆₀) (MSD nordion, Model 220 Excell, Cannada) แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 เครื่องฉายรังสีแกมมา (Gamma cell รุ่น 220 Excel)

- 4.2 ครอบอะลูมิเนียม ทรงกระบอกขนาด 1 ลิตร
- 4.3 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Instron Calibration Lab, Model TH 050013, Thailand)
- 4.4 เครื่องวัดความหนา (Mitutoyo, Japan)

- 4.5 เครื่องวัดความแข็ง (H.W. Wallace & Croydon Company Limited, US)
- 4.6 เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Malvern Instruments, Model Zetasizer Nano-ZS, US)
- 4.7 เครื่องวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) (Nicolet Instrument Coporation, Model Nexus 670, USA)
- 4.8 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนท์สเปกโตรมิเตอร์ชนิดโปรตอน ($^1\text{H-NMR}$) (Varian, Model Unity Inova, Germany)
- 4.9 ชุดสกัด (Soxhlet Extraction Apparatus) (Corning Incoporation, Pyrex, USA)
- 4.10 ตู้อบอากาศร้อน (Fisher Scientific Co., Ltd., Model Isotemp Oven 750F, USA)
- 4.11 เครื่องปั่นกวนด้วยแม่เหล็ก Harmony (Laboratory & Medical Supplies, Model Harmony HTS-1003, Thailand)
- 4.12 เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง OHAUS รุ่น GT4100 (Jebsen & Jessen, Model OHAUS GT4100 (Thailand) Ltd., Thailand)
- 4.13 เครื่องชั่งไฟฟ้าเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Scientific Promotion, Model Sartorius CP 224 S, Germany)
- 4.14 เบ้ากระจกสี่เหลี่ยมขนาด $15 \times 15 \times 0.5$ เซนติเมตร
- 4.15 ชุดเครื่องตีโฟมยางธรรมชาติ (House Worth Model HW-3083s, Taiwan) แสดง
 ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ชุดเครื่องตียางฟองน้ำ รุ่น House Worth รุ่น HW-3083s

4.16 แม่พิมพ์อะลูมิเนียม รูปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 4.5 ซม.
แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แม่พิมพ์อะลูมิเนียม

- 4.17 หม้อนึ่งไอน้ำ เป็นหม้อนึ่งอะลูมิเนียม 3 ชั้น
- 4.18 เทอร์โมมิเตอร์ 100 องศาเซลเซียส
- 4.19 เครื่องบดผสมสารเคมี (Ball mill)
- 4.20 เคสซิเคเตอร์
- 4.21 ชุดเครื่องแก้ว (glassware) ชนิดต่าง

วิธีการ

1. การเตรียมสารเคมี

1.1 สไตรีนมอนอเมอร์

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรส์ก่อนนำมาใช้ จึงมักมีการผสมด้วยตัวยับยั้งปฏิกิริยา (inhibitor) มาก่อน ดังนั้น ก่อนนำสไตรีนมาทำปฏิกิริยาจึงต้องล้างตัวยับยั้งปฏิกิริยาออกด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จนไม่มีสีชมพูเหลืออยู่ในชั้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วจึงล้างด้วยน้ำกลั่นตามอีกครั้งหนึ่ง

1.2 นอร์มัลบิวทิลอะคริเลต (Normal butyl acrylate, *n*-BA)

บิวทิลอะคริเลตทำหน้าที่เป็นเซนซิไทเซอร์ สำหรับลดปริมาณรังสีที่ต้องการฉายเตรียมให้อยู่ในรูป 50 เปอร์เซ็นต์ โดยผสม โซเดียมรอร์ลซัลเฟต: น้ำ: *n*-BA เท่ากับ 1: 99: 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วทำการปั่นกวนจนอยู่ในรูปของอิมัลชัน

1.3 สบู่โพแทสเซียมโอเลเอต (Potassium oleate soap)

สบู่โพแทสเซียมโอเลเอตเป็นสารช่วยในการเกิดฟองในการเตรียมยางโฟมยางธรรมชาติ การเตรียมสบู่โพแทสเซียมโอเลเอตจะเตรียมให้มีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สูตรที่ใช้ในการเตรียม แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สูตรการเตรียมสบู่โพแทสเซียมโอเลเอต

	สารเคมี	มวลขององค์ประกอบ (ส่วน โดยน้ำหนัก)
ส่วนที่ 1	กรดโอเลอิก	50.0
	น้ำกลั่น	370.0
ส่วนที่ 2	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	9.9
	น้ำกลั่น	84.0

ขั้นตอนการเตรียมสบู์โพแทสเซียมโอเลต เริ่มจาก การนำส่วนที่ 1 คือ กรดโอเลอิกและน้ำ กลั่นไปให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส แล้วจึงทำการเติมส่วนที่ 2 คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำกลั่น ลงไปผสมกับส่วนที่ 1 กวนด้วยความเร็วสูง และให้ความร้อนต่อไปอีก ประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้กรดโอเลอิกทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จนเกิดเป็นสบู์โพแทสเซียมโอเลต

1.4 ไดฟีนิลกัวนีนีน (Diphenyl guanidine, DPG)

ไดฟีนิลกัวนีนีนเป็นสารที่มีลักษณะเป็นเม็ดรูปทรงกระบอกขนาดเล็ก สีขาวขุ่น เตรียมให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำหน้าที่เป็นสารก่อเจลเสริม โดยมีสูตรที่ใช้ในการเตรียม แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สูตรการเตรียมไดฟีนิลกัวนีนีน

สารเคมี	มวลขององค์ประกอบ (ส่วน โดยน้ำหนัก)
ไดฟีนิลกัวนีนีน	33.0
เบนโทไนซ์เคลย์	1.0
วันทามอล	1.0
น้ำกลั่น	65.0

นำสารเคมีทั้งหมด คือ ไดฟีนิลกัวนีนีน เบนโทไนซ์เคลย์ (สารป้องกันการตกตะกอน) วันทามอล (สารช่วยในการกระจายตัวของสารเคมี) และน้ำกลั่นมาบรรจุลงในขวดพลาสติกทรงกระบอกที่มีฝาปิดสนิท ซึ่งภายในบรรจุลูกหิน หรือลูกแก้วเซรามิก แล้วทำการบดผสมเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ด้วยเครื่องบดผสมสารเคมี โดยใช้ความเร็วรอบในการหมุนประมาณ 200 รอบต่อนาที (rpm)

1.5 โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF)

โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์เป็นสารที่มีลักษณะเป็นผงสีขาวขุ่น เตรียมให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาใช้ให้ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่น

จนมีความเข้มข้นเท่ากับ 12.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำหน้าที่เป็นสารก่อเจลหลัก สูตรที่ใช้ในการเตรียม (แสดงดังตารางที่ 8) โดยมีขั้นตอนการเตรียมเช่นเดียวกันกับการเตรียมไคฟิโนลิกวานิดีน

ตารางที่ 8 สูตรการเตรียมโซเดียมซัลไฟโคฟลูออไรด์

สารเคมี	มวลขององค์ประกอบ (ส่วน โดยน้ำหนัก)
โซเดียมซัลไฟโคฟลูออไรด์	33.0
เบนโทไนซ์เคลย์	1.0
น้ำกลั่น	65.0

1.6 กำมะถัน (Sulpher, S)

กำมะถัน เป็นสารที่มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง เตรียมให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ โดยมีสูตรที่ใช้ในการเตรียม (แสดงดังตารางที่ 9) และมีขั้นตอนในการบดผสมเช่นเดียวกันกับการเตรียมไคฟิโนลิกวานิดีน

ตารางที่ 9 สูตรการเตรียมกำมะถัน

สารเคมี	มวลขององค์ประกอบ (ส่วน โดยน้ำหนัก)
กำมะถัน	50.0
เบนโทไนซ์เคลย์	1.0
วันทามอล	1.0
น้ำกลั่น	48.0

1.7 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)

ซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เป็นชนิด white seal มีลักษณะเป็นผงสีขาว เตรียมให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอย 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ โดยมีสูตรที่ใช้ในการเตรียม (แสดงดังตารางที่ 10) และมีขั้นตอนในการบดผสมเช่นเดียวกันกับการเตรียมไคฟิโนลิกวานิดีน แต่ลดเวลาในการบดผสมเป็น 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 10 สูตรการเตรียมซิงค์ออกไซด์

สารเคมี	มวลขององค์ประกอบ (ส่วน โดยน้ำหนัก)
ซิงค์ออกไซด์	50.0
เบนโทไนซ์เซลล์	1.0
วันทามอล	1.0
น้ำกลั่น	48.0

1.8 ซิงค์ไดเอทิลไธโอคาร์บาเมต (Zinc-N-diethyl dithiocarbamate, ZDEC)

ซิงค์ไดเอทิลไธโอคาร์บาเมต เป็นสารที่มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น เตรียมอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ โดยมีสูตรที่ใช้ในการเตรียม (แสดงดังตารางที่ 11) และมีขั้นตอนการบดผสมเดียวกันกับการเตรียมไคฟิโนลิกวานิดีน

ตารางที่ 11 สูตรการเตรียมซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมต

สารเคมี	มวลขององค์ประกอบ (ส่วน โดยน้ำหนัก)
ซิงค์ไดเอทิลไธโอคาร์บาเมต	50.0
เบนโทไนซ์เซลล์	1.0
วันทามอล	1.0
น้ำกลั่น	48.0

1.9 ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (Zinc-2-mercaptobenzothiazole, ZMBT)

ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล เป็นสารที่มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองขุ่น เตรียมอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ โดยมีสูตรที่ใช้ในการเตรียม (แสดงดังตารางที่ 12) และมีขั้นตอนการบดผสมเช่นเดียวกันกับการเตรียมไคฟิโนลิกวานิดีน

ตารางที่ 12 สูตรการเตรียมซิงค์เมอร์แคปโทเบนโซไธอาโซล

สารเคมี	มวลขององค์ประกอบ (ส่วนโดยน้ำหนัก)
ซิงค์เมอร์แคปโทเบนโซไธอาโซล	50.0
เบนโทไนซ์เคลย์	1.0
วันทามอล	1.0
น้ำกลั่น	48.0

2. การหาสถานะในการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์พร้อมการวัลคาไนซ์

2.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเซนซีไทเซออร์ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของ NR-g-PS

เตรียมน้ำยางคอมปาวด์ซึ่งมีองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์ (แสดงดังตารางที่ 13) โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณเซนซีไทเซออร์ (นอร์มอลบิวทิลอะคริเลต) ดังนี้ คือ 0, 1, 3 และ 5 phr โดยใช้สัดส่วนของยางธรรมชาติต่อสไตรีน เท่ากับ 60:40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และปริมาณรังสี เท่ากับ 25 kGy

ตารางที่ 13 องค์ประกอบของน้ำยางคอมปาวด์ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณเซนซีไทเซออร์

องค์ประกอบ	phr	มวลขององค์ประกอบ (ส่วนโดยน้ำหนัก)	
		แห้ง	เปียก
60% น้ำยางธรรมชาติชั้น	100.0	60.0	100.0
99% สไตรีนมอนอเมอร์	-	40.0	40.4
96% อิมัลซิไฟเออร์	5.0	3.0	3.1
50% นอร์มอลบิวทิลอะคริเลต	0, 1, 3, 5	0, 0.6, 1.8, 3.0	0, 1.2, 3.6, 6.0
10% โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์	0.2	0.12	1.2
น้ำ	-	-	x

หมายเหตุ x คือ น้ำที่เติมลงไปในระบบเพื่อให้มีปริมาณน้ำทั้งหมด 200 ส่วน

ขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์เริ่มจาก นำอิมัลชันไฟเออร์ไปละลายกับน้ำกลั่น จากนั้นเติมสไตรีนมอนอเมอร์ที่สกัดสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกแล้ว ทำการปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแม่เหล็กเป็นเวลาประมาณ 10 นาที เพื่อให้สไตรีนเกิดสถานะอิมัลชัน แล้วจึงเติมน้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียสูง โพลีสไตรีนไฮดรอกไซด์ และ *n*-BA ตามลำดับ ทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปบรรจุในขวดแก้วปิดสนิทขนาด 200 มิลลิลิตร เก็บไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารประกอบที่เตรียมได้ไปฉายรังสีแกมมาตามปริมาณรังสีที่ต้องการ แล้วจึงนำกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยแม่พิมพ์กระจก อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แล้วนำแผ่นฟิล์มไปต้มด้วยน้ำสะอาดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (Sabharwal *et al.*, 1997) เพื่อชะสารเคมีที่ตกค้างรวมทั้งโปรตีนที่สามารถละลายน้ำได้ออก อบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

หลังจากนั้นนำ NR-g-PS ที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งทั้งหมดในกราฟต์โคพอลิเมอร์ เปรียบเทียบการเปลี่ยนจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ ความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยง เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณเซนซิไทเซอร์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์

2.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณรังสี (radiation dose) ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของ NR-g-PS และยางธรรมชาติ

การทดลองแรก เป็นการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์ซึ่งมีองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์ (แสดงดังตารางที่ 14) โดยมีขั้นตอนการเตรียมเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.1 แล้วนำไปฉายรังสีแกมมา ที่ปริมาณรังสี 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 kGy โดยใช้สัดส่วนของยางธรรมชาติต่อมอนอเมอร์สไตรีนเท่ากับ 60:40 เปรียบเทียบโดยน้ำหนัก และปริมาณ *n*-BA 5 phr (เป็นปริมาณที่เหมาะสม จากการศึกษาในหัวข้อที่ 3.1)

จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งทั้งหมดในกราฟต์โคพอลิเมอร์ เปรียบเทียบการเปลี่ยนจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ ประสิทธิภาพการกราฟต์ ความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยง ความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็ง เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณรังสีที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์

ตารางที่ 14 องค์ประกอบของน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณรังสี

องค์ประกอบ	phr	มวลขององค์ประกอบ (ส่วน โดยน้ำหนัก)	
		แห้ง	เปียก
60% น้ำยางธรรมชาติชั้น	100	60.0	100.0
99% สไตรีนมอนอเมอร์	-	40.0	40.4
96% อิมัลซิไฟเออร์	5.0	3.0	3.1
50% นอร์มอลบิวทิลอะคริเลต	5.0	3.0	6.0
10% โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์	0.2	0.12	1.2
น้ำ	-	-	x

หมายเหตุ x คือ น้ำที่เติมลงไปในระบบเพื่อให้มีปริมาณน้ำทั้งหมด 200 ส่วน

การทดลองที่สอง เป็นการฉายรังสีแก่น้ำยางธรรมชาติเพื่อวัลคาไนซ์ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณรังสี คือ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 kGy เช่นเดียวกับการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ เพื่อเปรียบเทียบระดับการเกิดพันธะเชื่อมโยระหว่างกราฟต์โคพอลิเมอร์กับยางธรรมชาติ และสมบัติด้านอื่นๆที่ปริมาณรังสีเท่ากัน โดยมีองค์ประกอบการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์ (แสดงดังตารางที่ 15) และมีการเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.1 แต่ข้ามขั้นตอนของการเติมอิมัลซิไฟเออร์และสไตรีนมอนอเมอร์ จากนั้นทำการวิเคราะห์หาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยมอดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยึดที่จุดขาดของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

ตารางที่ 15 องค์ประกอบของน้ำยางคอมปาวด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยรังสีแกมมา

องค์ประกอบ	phr	มวลขององค์ประกอบ (ส่วน โดยน้ำหนัก)	
		แห้ง	เปียก
60% น้ำยางธรรมชาติชั้น	100	100.0	166.6
50% นอร์มอลบิวทิลอะครีเลต	5.0	5.0	10.0
10% โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์	0.2	0.2	2.0
น้ำ	-	-	x

หมายเหตุ x คือ น้ำที่เติมลงไปในระบบเพื่อให้มีปริมาณน้ำทั้งหมด 200 ส่วน

3. การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่สัดส่วนของยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่างๆ

3.1 ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน โดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของ NR-g-PS

เตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์โดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนยางธรรมชาติต่อสไตรีน คือ 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 องค์ประกอบของน้ำยางคอมปาวด์เมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของยางธรรมชาติต่อ สไตรีนมอนอเมอร์

องค์ประกอบ	phr	มวลขององค์ประกอบ (ส่วน โดยน้ำหนัก)	
		แห้ง	เปียก
60% น้ำยางธรรมชาติชั้น	100.0	60, 70, 80, 90	100, 117, 133, 150
99% สไตรีนมอนอเมอร์	-	40, 30, 20, 10	40.4, 30.3, 20.2, 10.1
96% อิมัลซิไฟเออร์	5.0	3.0, 3.5, 4.0, 4.5	3.1, 3.6, 4.2, 4.8
50% นอร์มอลบิวทิลอะคริเลต	5.0	3.0, 3.5, 4.0, 4.5	3.1, 3.6, 4.2, 4.8
10% โพลีเทสซีมไฮดรอกไซด์	0.2	0.12, 0.14, 0.16, 0.18	1.2, 1.4, 1.6, 1.8
น้ำ	-	-	x

หมายเหตุ x คือ น้ำที่เติมลงไปในระบบเพื่อให้มีปริมาณน้ำทั้งหมด 200 ส่วน

การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์จะเลือกใช้เซนซิไทเซอร์ปริมาณ 5 phr และปริมาณรังสี 20 kGy เนื่องจาก เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ ซึ่งได้จากผล การศึกษาในหัวข้อที่ 2.1 และ 2.2 และมีขั้นตอนการเตรียมและการทดสอบสมบัติเช่นเดียวกับหัวข้อ ที่ 2.2 ก่อนทดสอบยืนยันการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ด้วยการวิเคราะห์ โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโกปีอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) วิเคราะห์หาระดับการกราฟต์ด้วย เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี ($^1\text{H-NMR}$) และวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Zetasizer

4. การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของ NR-g-PS

4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid content, TSC) ที่มีอยู่ในกราฟต์ โคพอลิเมอร์ (ซารีฟ, 2549)

การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งทั้งหมดทำโดย ชั่งน้ำยางหนักประมาณ 2.5 กรัม เทลง บนจานให้น้ำยางเคลือบทั่วจาน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำ

ให้เขียนในเดสซิเคเตอร์ ซึ่งน้ำหนัก อบซ้ำอีกครั้งประมาณ 15 นาที ทำให้เขียนแล้วซ้ำอีกครั้ง ผลต่างของน้ำหนักทั้งสองครั้ง ต้องไม่เกิน 1 มิลลิกรัม คำนวณค่า %TSC ตามสมการที่ 9

$$\text{TSC (\%)} = \frac{C}{B} \times 100 \quad (9)$$

โดยที่

C = น้ำหนักยางตัวอย่างที่แห้ง (กรัม)

B = น้ำหนักน้ำยาง (กรัม)

4.2 การตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ (Conversion)

นำน้ำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้หนักประมาณ 5 กรัม (ซึ่งละเอียดศนิยม 4 ตำแหน่ง) เทใส่จาน ทำให้น้ำยางเคลือบทั่วจาน แล้วอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้เขียนในเดสซิเคเตอร์ ซึ่งน้ำหนักของแข็งที่ได้ (Kalkornsuanpranee *et al.*, 2009) จากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ ดังสมการ

$$\text{Conversion (\%)} = \frac{C - B}{A} \times 100 \quad (10)$$

โดยที่

A = น้ำหนักมอนอเมอร์ก่อนทำปฏิกิริยา (กรัม)

B = ปริมาณเนื้อยางแห้ง และของแข็งอื่นในน้ำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ (กรัม)

C = น้ำหนักกราฟต์โคพอลิเมอร์แห้งอบ (กรัม)

4.3 การหาค่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์ (Grafting efficiency, GE)

นำน้ำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ ที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มแล้วมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งตัวอย่างกราฟต์โคพอลิเมอร์ประมาณ 2 กรัม (ละเอียดยศนิยม 4 ตำแหน่ง) ไปสกัดยางธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ (free NR) ด้วยชุดสกัด Soxhlet โดยใช้ปิโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether) เป็นตัวทำละลาย ใช้เวลาสกัด 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างหลังการสกัดไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (ละเอียดยศนิยม 4 ตำแหน่ง) จากนั้น นำกลับมาสกัดเอาพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์กับโมเลกุลยางธรรมชาติ ด้วย สารละลายผสมระหว่างอะซิโตนกับเมทิลเอทิลคีโตน สัดส่วน 3:1 เป็นตัวทำละลายใช้เวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างหลังการสกัดอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์ (Kalkornsua-pranee *et al.*, 2009) และประสิทธิภาพการกราฟต์ (% Grafting efficiency) ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Free NR (\%)} = \frac{M_p - M_o}{M_o} \times 100 \quad (11)$$

เมื่อ

M_p คือ น้ำหนักของตัวอย่างยางหลังสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ (กรัม)

M_o คือ น้ำหนักของตัวอย่างกราฟต์โคพอลิเมอร์ก่อนสกัด (กรัม)

$$\text{Free Polystyrene (\%)} = \frac{M_{AM} - M_o}{M_o} \times 100 \quad (12)$$

เมื่อ

M_{AM} คือ น้ำหนักของตัวอย่างกราฟต์โคพอลิเมอร์หลังสกัดด้วยอะซิโตนผสมเมทิลเอทิลคีโตน (กรัม)

M_o คือ น้ำหนักของตัวอย่างกราฟต์โคพอลิเมอร์ก่อนสกัด (กรัม)

$$\text{Grafting Efficiency (\%)} = \frac{M_F}{M_O} \times 100 \quad (13)$$

เมื่อ

M_F คือ น้ำหนักของตัวอย่างกราฟต์โคพอลิเมอร์หลังสกัดตัวทำละลายทั้ง 3 ชนิด (กรัม)

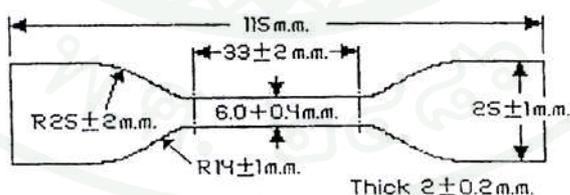
M_O คือ น้ำหนักของตัวอย่างกราฟต์โคพอลิเมอร์ก่อนสกัด (กรัม)

4.4 การตรวจสอบขนาดอนุภาคของกราฟต์สไตรีน

นำกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ประมาณ 1.5 มิลลิกรัม มาบรรจุลงในคิวเวต แล้วนำไปวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Zetasizer)

4.5 การทดสอบสมบัติการดึง (Tensile properties)

นำแผ่นยางที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์กระจกมาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบล ด้วย Die C (ดังภาพที่ 15) ตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยตัดตามแนว Grain ขนาดความยาว 115 มม. กว้าง 6 ± 0.4 มม. และหนา 2 ± 0.2 ดึงด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที จากนั้นคำนวณค่ามอดูลัส ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืดที่จุดขาด (% Elongation at break) ตามสมการที่ 14, 15 และ 16 ตามลำดับ



ภาพที่ 15 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบล ดาย C

$$\text{Modulus (MPa หรือ N/mm}^2\text{)} = F / A \quad (14)$$

โดยที่

F = แรงที่ใช้ดึงชิ้นทดสอบให้ยืดตามระยะที่ต้องการ (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะเริ่มต้นทดสอบ (ตารางมิลลิเมตร)

$$\text{Tensile strength (MPa หรือ N/mm}^2\text{)} = F / A \quad (15)$$

โดยที่

F = แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะเริ่มต้นทดสอบ (ตารางมิลลิเมตร)

$$\text{Elongation at break (\%)} = 100 \times (L - L_0) / L_0 \quad (16)$$

โดยที่

L = ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบขางเมื่อยืดตามขนาด (เซนติเมตร)

L₀ = ระยะห่างระหว่างเส้นเริ่มต้นบนชิ้นทดสอบก่อนทำการทดสอบ (เซนติเมตร)

4.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness) ของแผ่นฟิล์ม

ทำการทดสอบสมบัติด้านความแข็งแบบ ชอร์ เอ (shore A) ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 โดยใช้ชิ้นทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร โดยใช้หัวเข็มกดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.50 มิลลิเมตร การกดมี 2 จังหวะ คือ จังหวะแรกเป็นระยะที่ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างขางกับเข็มกด จังหวะสองเป็นการกดด้วยน้ำหนักจริง เพื่อให้เกิดการยุบตัวลงขาง โดยกดเป็นเวลานาน 30 วินาที อ่านค่าความแข็งที่วัดได้ โดยทำการวัดความแข็งอย่างน้อย 5 จุดบนชิ้นทดสอบ และรายงานเป็นค่าเฉลี่ยที่วัดได้ (พงษ์ธร และ ชากริต, 2550)

4.7 การทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Solvent resistance)

ทำการทดสอบการบวมพองในตัวทำละลาย ตามมาตรฐาน ASTM D471 ทำโดยนำแผ่นยางที่ได้จากการอัดเบ้ามาตัดเป็นชิ้นทดสอบกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร หนาประมาณ 2 มิลลิเมตรนำมาชั่งละเอียด W_0 แช่ในตัวทำละลายโทลูอีน (toluene) ที่มีปริมาตร 50 มิลลิตร ในภาชนะที่ปิดมิดชิด บันทึกเวลาที่เริ่มแช่ตัวทำละลายโทลูอีนดังกล่าว แล้วนำขวดที่มียางแช่โทลูอีนนี้ไปเก็บไว้ในที่มืด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบโดยใช้กิมคิบบันทึกตัวอย่างขึ้นมาชั่งหาค่าโทลูอีนที่เกาะบนผิวยางออกด้วยกระดาษซับ วางลงในกระดาษฟิวา ชั่งน้ำหนักของยางที่บวมพองนั้นนำผลที่ได้มาคำนวณอัตราการบวมพองและความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (crosslink density) ดังสมการที่ 17 (Chaudhari *et al.*, 2005) และสมการที่ 18 (Jayasuriya *et al.*, 2001) ตามลำดับ

$$\text{Swelling ratio} = \frac{W_s}{W_0} \quad (17)$$

เมื่อ

W_s คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังแช่ในโทลูอีน (กรัม)

W_0 คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่ในโทลูอีน (กรัม)

$$V = kQ^{-5/3} \quad (18)$$

เมื่อ

V = ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง

$$k = 7.93 \times 10^{18}$$

Q = สัดส่วนปริมาตรการบวมพอง (volume swelling ratio)

$$= 1 + (d_1 + d_2)(w_1 + w_2) - d_1/d_2$$

โดยที่

d_1 = ความหนาแน่นของแผ่นฟิล์ม

d_2 = ความหนาแน่นของตัวทำละลาย

4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างของกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน

เมื่อได้กราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ผ่านการสกัดยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับกราฟต์โคพอลิเมอร์ มาละลายด้วยตัวทำละลายโทลูอีนแล้วนำไปหยดเป็นแผ่นฟิล์มบนแผ่นฟลิกโทแทสซีเอ็มโบรไมด์ ระเหยตัวทำละลายออกแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR)

4.9 การวิเคราะห์ปริมาณพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีชนิดโปรตอน ($^1\text{H-MHR}$)

นำกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ผ่านการสกัดยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับกราฟต์โคพอลิเมอร์ ออกแล้วมาละลายด้วยตัวทำละลายดีวเทอเรียมคลอโรฟอร์ม (CDCl_3) จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างของกราฟต์โคพอลิเมอร์และคำนวณปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่กราฟต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีชนิดโปรตอน ($^1\text{H-MHR}$) โดยใช้ค่าอินทิกรัลบนสเปกตรัม $^1\text{H-MHR}$ ที่ได้ ดังสมการต่อไปนี้ (Kalkornsua-pranee *et al.*, 2009)

$$\% \text{ โดยโมลของพอลิสไตรีนในโคพอลิเมอร์} = \frac{B}{A+B} \times 100 \quad (19)$$

$$\% \text{ โดยโมลของยางธรรมชาติในโคพอลิเมอร์} = \frac{A}{B+A} \times 100 \quad (20)$$

โดยที่

A = ค่าอินทิกรัลต่อ 1 โปรตอนของ Olefinic proton (=CH) บนยางธรรมชาติ

B = ค่าอินทิกรัลต่อ 1 โปรตอนของ Phenyl proton บนพอลิสไตรีน

$$\% \text{ โดยน้ำหนักของพอลิสไตรีนในโคพอลิเมอร์} = \frac{C \times C'}{(C \times C') + (D \times D')} \times 100 \quad (21)$$

โดยที่

C = เปอร์เซ็นต์โดยโมลของพอลิสไตรีนในโคพอลิเมอร์

C' = น้ำหนักโมเลกุลของ repeating unit ของพอลิสไตรีน

D = เปอร์เซ็นต์โดยโมลของยางธรรมชาติในโคพอลิเมอร์

D' = น้ำหนักโมเลกุลของ repeating unit ของยางธรรมชาติ

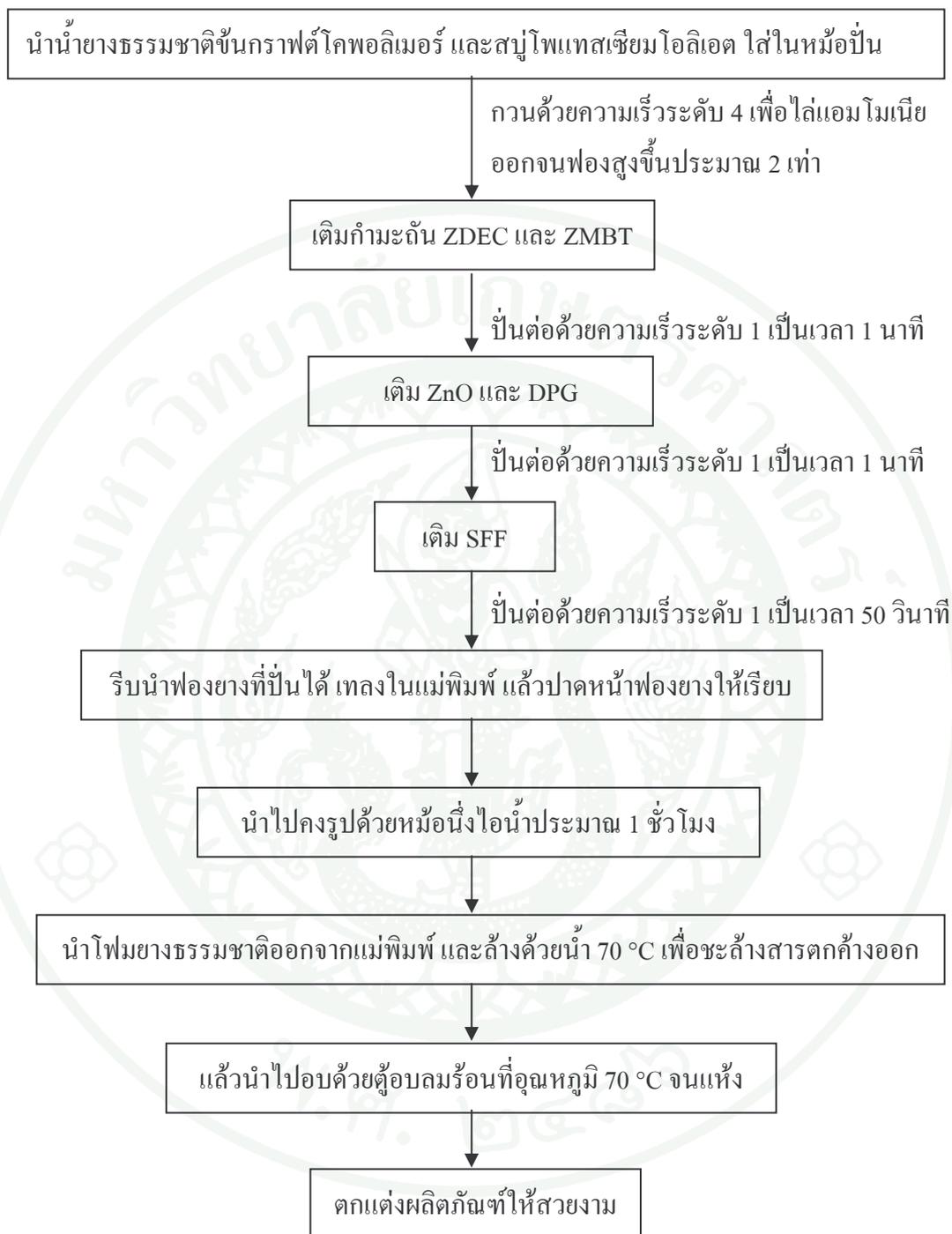
5. การผลิตโฟมกันกระแทกต้นแบบสำหรับบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธีการแบบต้นลอป

5.1 การผลิตยางกันกระแทกต้นแบบจากกราฟต์โคพอลิเมอร์

กระบวนการผลิต โฟมกันกระแทกประยุกต์มาจากวิธีการของต้นลอป เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถทำได้สะดวกและเป็นที่ยอมรับ โดยมีสูตรในการเตรียมยางฟองน้ำ (ดังตารางที่ 17) และมีขั้นตอนการผลิต (แสดงดังภาพที่ 16) อย่างไรก็ตาม กราฟต์โคพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ต้องนำไประเหยน้ำออกจนมีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณ 40% ก่อนนำไปตีฟองน้ำ

ตารางที่ 17 ส่วนประกอบที่ใช้ในการเตรียมยางพองน้ำด้วยวิธีการแบบดันลอป

องค์ประกอบ	phr	มวลขององค์ประกอบ (ส่วนโดยน้ำหนัก)
60% ยางธรรมชาติชั้น	100.0	80
~40% กราฟต์โคพอลิเมอร์ (NR-g-PS)	-	20
10% โพลีสซีมโอลีโอต	1.0	0.8
50% กำมะถัน	2.0	1.6
50% ซิงค์ไดเอทิลไซโอคาร์บาเมต (ZDEC)	1.0	0.8
50% ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซโรอาโซล (ZMBT)	1.0	0.8
50% ซิงค์ออกไซด์	5.0	4.0
33% ไดฟีนิลกัวนิดีน (DPG)	0.66	0.52
12.5% โซเดียมซิติโคฟลูออไรด์ (SFF)	1.0	0.8



ภาพที่ 16 ขั้นตอนการผลิตยางฟองนำด้วยวิธีการแบบดันลอป

5.2 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การยุบตัว (Depression) ของยางพองน้ำ

เปอร์เซ็นต์การยุบตัวของยางพองน้ำ ทดสอบโดยการวัดความสูงของยางพองน้ำหลังการวัดคาไลน์ซ์ โดยมีสูตรการคำนวณดังสมการที่ 22

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยุบตัว} = (H_m - H_f) / H_m \quad (22)$$

เมื่อ

H_m คือ ความสูงของแม่พิมพ์ (เซนติเมตร)

H_f คือ ความสูงของยางพองน้ำ (เซนติเมตร)

5.3 การทดสอบความแข็งของโฟมยาง

การทดสอบของโฟมยางตามมาตรฐาน ASTM 2240-05 ทำโดยใช้ตัวอย่างขนาด $6 \times 6 \times 5$ เซนติเมตร ปรับแผ่นกดให้สัมผัสกับผิวของโฟมยางพอดี เติมน้ำหนักเริ่มต้น 0.5 กิโลกรัม ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 6 นาที วัดความหนาของยางพองน้ำอีกครั้ง เพื่อนำไปคำนวณหาระยะที่ต้องกดให้ยุบ 40% หลังจากนั้นเติมน้ำหนักโฟมยางให้ยุบตัวไป 40% แล้วจึงอ่านแรงที่ใช้กด โดยมีหน่วยเป็น ชอร์ โอ โอ (shore OO)

ผลและวิจารณ์

1. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเซนซิไทเซอร์ต่อสมบัติทางกายภาพของกราฟต์โคพอลิเมอร์

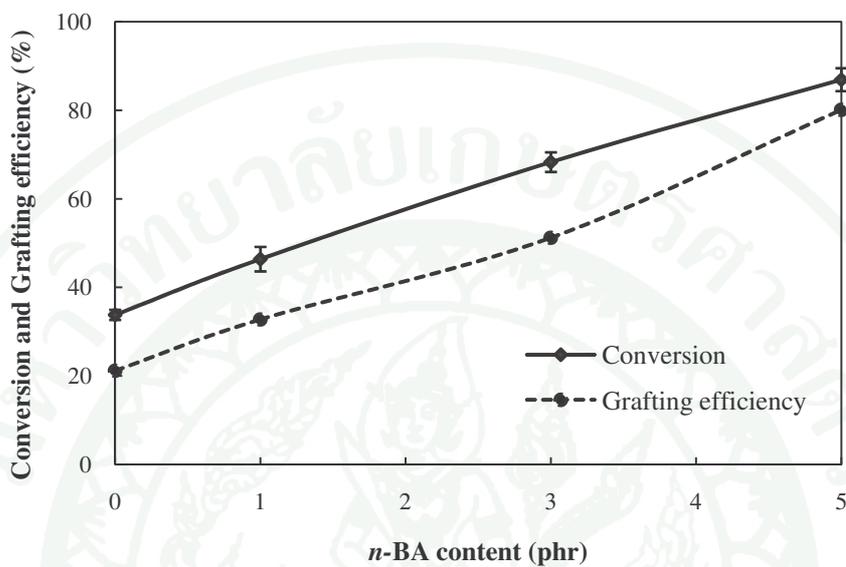
การศึกษาอิทธิพลของปริมาณเซนซิไทเซอร์ (คือ นอร์มอลบิวทิลอะคริเลต, *n*-BA) ทำโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณ *n*-BA (คือ 0, 1, 3 และ 5 phr) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอไรซ์ระหว่างยางธรรมชาติกับสไตรีน (สัดส่วน เท่ากับ 60:40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก) แล้วฉายรังสีปริมาณ 25 kGy จากนั้นนำ NR-*g*-PS ที่ได้ไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ ประสิทธิภาพการกราฟต์ ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล และความแข็ง ได้ผลการทดลองดังนี้

1.1 อิทธิพลของปริมาณเซนซิไทเซอร์ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์

n-BA เป็นเซนซิไทเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถลดปริมาณรังสีที่ต้องการใช้ในการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอไรซ์ได้ (Pelli *et al.*, 1993 และ Dafader *et al.*, 2005) และเป็นสารเซนซิไทเซอร์ที่นิยมกันอย่างกว้างขวาง จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่า *n*-BA สามารถปรับปรุงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ รวมทั้งประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-*g*-PS ได้อย่างมีนัยสำคัญ ตามปริมาณเซนซิไทเซอร์ที่เพิ่มขึ้น ณ ปริมาณรังสีคงที่ (ดังแสดงในภาพที่ 17 และ ภาพที่ 18) นอกจากนี้ ยังทำให้ปริมาณพอลิสไตรีนและยางธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์มีแนวโน้มลดลง (ดังแสดงในภาพที่ 18) โดยปริมาณของ *n*-BA ที่ทำให้ NR-*g*-PS มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ และประสิทธิภาพการกราฟต์มากที่สุด คือ 5 phr ซึ่งมีความสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ George *et al.* ที่ได้ทำการศึกษาการกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตลงบนยางธรรมชาติโดยการฉายรังสีแกมมา ในปี 2003

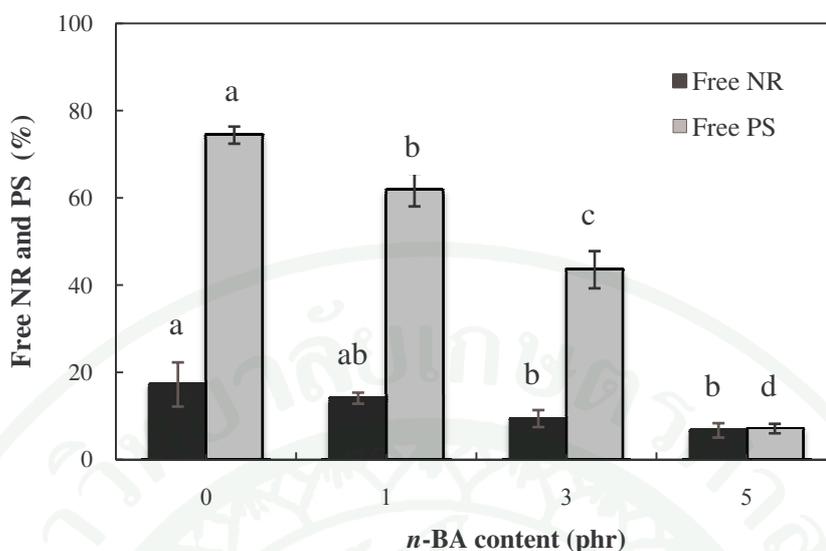
อย่างไรก็ตาม จากกราฟในภาพที่ 17 อาจคาดได้ว่าการเติม *n*-BA ในปริมาณที่มากขึ้น อาจช่วยให้สมบัติต่างๆเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีก แต่เท่าการใช้ *n*-BA ในปริมาณที่มากกว่า 5 phr อาจทำให้กราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้มีส่วนผสมของ *n*-BA ที่เกิดเป็นพอลิเมอร์ หรือสารประกอบชนิดใหม่ที่ไม่ต้องการ เนื่องจาก *n*-BA จัดเป็นมอนอเมอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเกิดเป็นปฏิกิริยาพอลิเมอร์

ไรซ์ได้ รวมทั้งยังไม่สามารถอธิบายถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการทำหน้าที่ของสารดังกล่าวได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 17 ผลของ *n*-BA ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-*g*-PS

หมายเหตุ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 1



ภาพที่ 18 ผลของ *n*-BA ต่ออย่างธรรมชาติและพอลิस्टาไดรีนที่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร a-d ที่แสดงในกราฟแบ่งแต่ละชุดมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับ ร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

1.2 อิทธิพลของปริมาณเซนซิไทเซอร์ต่อความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงและสัดส่วนการบวมพองของ NR-g-PS

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเซนซิไทเซอร์ต่อความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงและสัดส่วนการบวมพองของ NR-g-PS พบว่า NR-g-PS มีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติม *n*-BA ในปริมาณ 5 phr และทำให้สัดส่วนการบวมพองมีแนวโน้มลดลง (ดังตารางที่ 18) ทั้งนี้เป็นเพราะตัวแปรหลักที่ควบคุมปริมาณของการบวมพอง คือ ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง ขางที่มีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงสูงก็จะส่งผลให้ระดับการบวมพองลดต่ำลง หรือ มีความต้านทานต่อตัวทำละลายเพิ่มขึ้น เพราะพันธะเชื่อมโยงจะไปขัดขวางการแทรกซึมของตัวทำละลายที่เข้าสู่โมเลกุลของยางหรือพอลิเมอร์

ตารางที่ 18 ผลของ *n*-BA ต่อความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงและสัดส่วนการบวมพองของ NR-*g*-PS

<i>n</i> -BA (phr)	ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง	สัดส่วนการบวมพอง
	$\times 10^{-21}$ (CL/mol)	
0	5.4 ^c	18.94 ^a
1	9.5 ^c	18.31a ^b
3	52.0 ^b	17.26 ^{ab}
5	359.0 ^a	15.86 ^c

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^{a-c} ในคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

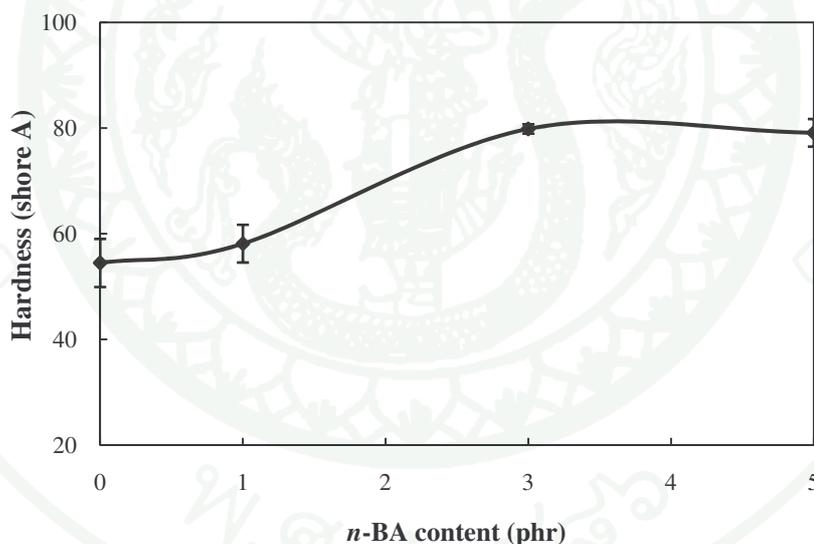
1.3 อิทธิพลของปริมาณเซนซิไทเซอร์ต่อสมบัติเชิงกลและความแข็งของ NR-*g*-PS

เมื่อนำ NR-*g*-PS ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณ *n*-BA มาทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลและความแข็ง พบว่า NR-*g*-PS มีความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งเพิ่มขึ้น ในลักษณะเดียวกันกับประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์เมื่อมีปริมาณ *n*-BA เพิ่มขึ้น ในขณะที่ส่งผลให้มอดูลัสที่ระยะยืด 300% ไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 19 และภาพที่ 19

ตารางที่ 19 ผลของ *n*-BA ต่อสมบัติเชิงกลของ NR-*g*-PS

<i>n</i> -BA (phr)	มอดูลัสที่ระยะยืด 300% (MPa)	ความต้านทานต่อแรงดึง (Mpa)	ระยะยืดที่จุดขาด (%)
0	4.1 ± 0.2 ^a	6.4 ± 1.3 ^b	469 ± 43.2 ^a
1	4.4 ± 0.4 ^a	7.2 ± 1.0 ^{ab}	455 ± 31.1 ^b
3	4.0 ± 0.4 ^a	9.5 ± 0.8 ^{ab}	539 ± 30.6 ^a
5	4.6 ± 0.1 ^a	10.6 ± 0.8 ^a	490 ± 18.6 ^b

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^{a-c} ในคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test



ภาพที่ 19 ผลของ *n*-BA ต่อความแข็งของ NR-*g*-PS

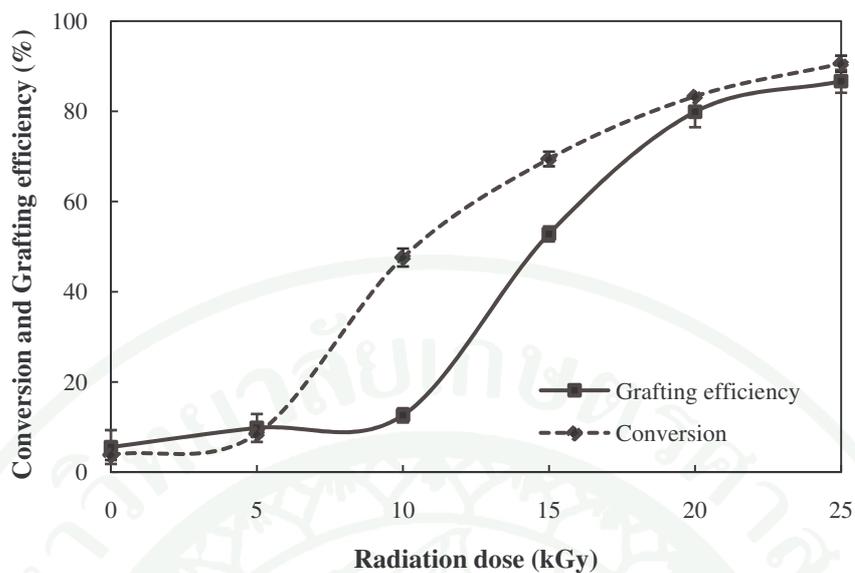
หมายเหตุ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 2

2. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณรังสีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของกราฟต์โคพอลิเมอร์

การศึกษาอิทธิพลของปริมาณรังสีต่อสมบัติของ NR-g-PS ทำโดยแปรปริมาณรังสี (คือ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 kGy) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ สไตรีน (ที่สัดส่วน 60:40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก) และเติม *n*-BA เท่ากับ 5 phr จากนั้นนำกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ไปวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ ประสิทธิภาพการกราฟต์ ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลของ NR-g-PS ได้ผลการทดลอง ดังนี้

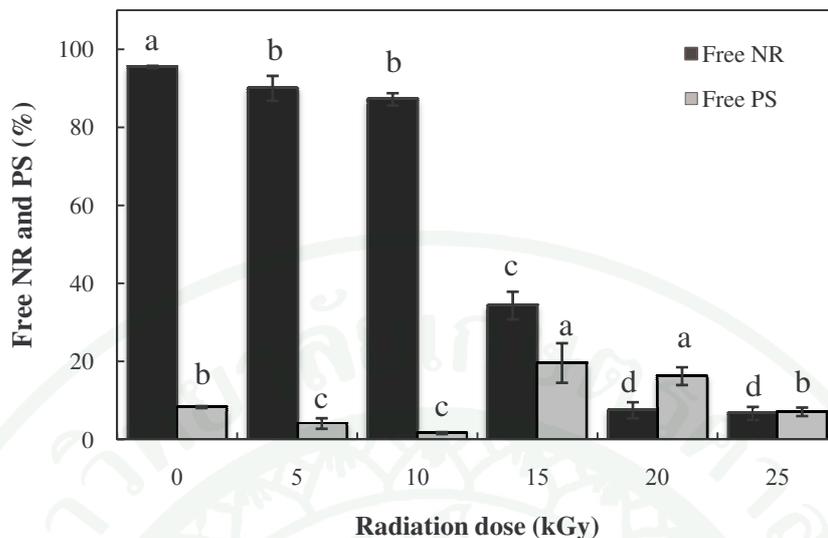
2.1 อิทธิพลของปริมาณรังสีต่อการเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์

เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้นส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ดังภาพที่ 19) เนื่องจากรังสีแกมมาเป็นรังสีพลังงานสูงที่สามารถกระตุ้นให้ยางธรรมชาติและสไตรีนเกิดจุดว่องไว หรืออนุมูลอิสระได้ตามกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังแสดงในสมการที่ 1-9 (ในหน้า 18) เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น จึงเปรียบเสมือนการเพิ่มพลังงานกระตุ้นให้กับยางธรรมชาติและสไตรีนมอนอเมอร์ให้สามารถเกิดอนุมูลอิสระได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น มอนอเมอร์จึงมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากและสามารถเกิดการพอลิเมอร์ได้ง่าย ดังนั้นประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ จึงมากขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น (เมื่อสัดส่วนของยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์เริ่มต้นคงที่) โดยปริมาณรังสีที่ทำให้น้ำยางคอมปาวด์เกิดการเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ และเกิดประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์ได้ในปริมาณมาก คือที่ 20-25 kGy แต่อย่างไรก็ตาม จากการทดลองนี้ พบว่าปริมาณรังสีที่ 25 kGy มักทำให้น้ำยางคอมปาวด์บางส่วนมีความเสถียรลดลงจนเกิดการเสียสภาพโดยจับตัวเป็นคริมหรือก้อนขนาดเล็ก นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในภาพที่ 20 จะสังเกตเห็นได้ว่าปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วและเริ่มมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ณ ปริมาณรังสี เท่ากับ 10-15 kGy ในขณะที่ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ปริมาณรังสี เท่ากับ 5-10 kGy



ภาพที่ 20 ผลของปริมาณรังสีต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS

หมายเหตุ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 3



ภาพที่ 21 ผลของปริมาณรังสีต่ออย่างธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์

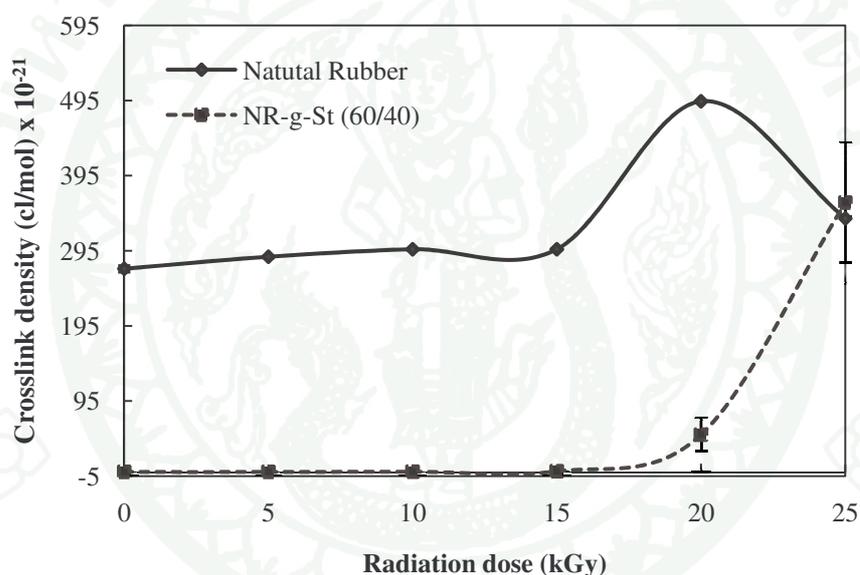
หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร a-d ที่แสดงในกราฟแท่งแต่ละชุดมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับ ร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

จากเหตุผลในตอนต้น จึงเป็นผลให้ยางธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยามีปริมาณที่น้อยลง โดยสังเกตได้ว่าที่ความเข้มข้นของรังสีต่ำ (น้อยกว่า 10 kGy) จะมีปริมาณพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาต่ำมาก เนื่องจากที่ปริมาณรังสีดังกล่าวอาจยังไม่เพียงพอต่อการกระตุ้นให้มอนอเมอร์เปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ (ดังแสดงในรูปที่ 21) จึงทำให้ปริมาณพอลิสไตรีนที่พร้อมจะเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ปริมาณน้อย ปริมาณยางธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจึงมีปริมาณที่ค่อนข้างสูง ซึ่งจากการทดลองนี้ สามารถสรุปได้ว่าการเติม *n*-BA ปริมาณ 5 phr สามารถปรับปรุงให้ NR-*g*-PS มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลดีที่สุด

2.2 อิทธิพลของปริมาณรังสีต่อการเกิดพันธะเชื่อมโยงของ NR-*g*-PS เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

จากภาพที่ 22 พบว่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางธรรมชาติ และ NR-*g*-PS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่ได้รับ จากปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า น้ำยางคอมปาวด์ของยางธรรมชาติกับสไตรีนมอนอเมอร์ที่ได้รับการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยรังสี

แกมมานั้น นอกจากจะทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์เซชันได้แล้ว ยังสามารถทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงหรือเกิดปฏิกิริยาการคลอสลิงค์ในขณะเดียวกันได้อีกด้วย โดยแนวโน้มความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นมีสาเหตุมาจากการได้รับพลังงานกระตุ้นที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นตามที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น ถึงอย่างไรก็ตาม การใช้ปริมาณรังสีที่มากเกินไป พลังงานรังสีดังกล่าวอาจส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของ NR-g-PS ที่เกิดพันธะเชื่อมโยงขาดออกจากกัน จนเป็นผลให้ความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยงลดลง โดยสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนในปริมาณรังสีที่ 25 kGy



ภาพที่ 22 ผลของปริมาณรังสีต่อความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยงของ NR-g-PS เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

หมายเหตุ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 4

นอกจากนี้ จากภาพที่ 22 ยังพบว่าในปริมาณรังสีที่เท่ากัน ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางธรรมชาติจะมีปริมาณมากกว่า NR-g-PS ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก 2 กรณี คือ กรณีแรก ในขณะที่น้ำยางคอมปาวด์ของ NR-g-PS ได้รับพลังงานจากรังสีแกมมา ปฏิกิริยาภายในที่

เกิดขึ้นจะมีทั้งปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันและปฏิกิริยาการคลอสลิงค์ จึงอาจทำให้ปฏิกิริยาการคลอสลิงค์เกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ เพราะมีพลังงานบางส่วนถูกถ่ายโอนไปใช้ในปฏิกิริยาอื่นๆ ในขณะที่ การฉายรังสีแก่น้ำยางคอมมเปาวด์ที่ไม่มีสไตรีนมอนอเมอร์นั้น ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาการคลอสลิงค์เพียงอย่างเดียว สำหรับกรณีที่ 2 คือ การเกิดพันธะเชื่อมโยงน่าจะเกิดได้ดีในเฟสของยางธรรมชาติ เนื่องจาก ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่อิมตัว (มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง) ยางธรรมชาติจึงว่องไวต่อการเกิดพันธะเชื่อมโยงมากกว่าพอลิสไตรีน ดังนั้น การเกิดปฏิกิริยาการคลอสลิงค์หรือการเกิดพันธะเชื่อมโยงในยางธรรมชาติจึงสามารถเกิดได้มากกว่า NR-g-PS ในปริมาณรังสีที่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาการคลอสลิงค์โดยการใช้รังสีนี้ย่อมมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการคลอสลิงค์ด้วยกัมมันตภาพรังสี เนื่องจาก การคลอสลิงค์ด้วยรังสีจะเป็นการเชื่อมโยงของพันธะ -C-C- ซึ่งมีพลังงานพันธะมากกว่าการคลอสลิงค์ด้วยพันธะ -C-S-

2.3 อิทธิพลของปริมาณรังสีต่อสมบัติเชิงกลของ NR-g-PS เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

จากตารางที่ 20 และ 21 พบว่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% และความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อได้รับปริมาณรังสีมากกว่า 20 kGy ในขณะที่มอดูลัสที่ระยะยืด 300% และความต้านทานต่อแรงดึงของ NR-g-PS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ตามปริมาณรังสีที่ได้รับ และมีค่าสูงที่สุด ณ ปริมาณรังสี 25 kGy ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของพันธะเชื่อมโยงในหัวข้อที่ 2.2

ตารางที่ 20 ผลของปริมาณรังสีต่อมอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของ NR-g-PS เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

ปริมาณรังสี (kGy)	มอดูลัสที่ระยะยืด 300% (MPa)	
	ยางธรรมชาติ	NR-g-PS (60:40)
0	0.3 ± 0.06 ^d	0.3 ± 0.08 ^f
5	0.3 ± 0.06 ^{bc}	1.0 ± 0.25 ^e
10	0.4 ± 0.00 ^{ab}	1.8 ± 0.05 ^d
15	0.4 ± 0.06 ^{ab}	2.6 ± 0.32 ^c
20	0.8 ± 0.03 ^b	3.6 ± 0.28 ^b
25	0.4 ± 0.02 ^a	4.6 ± 0.11 ^a

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^{a-f} ในคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

ตารางที่ 21 ผลของปริมาณรังสีต่อความต้านทานต่อแรงดึงของ NR-g-PS เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

ปริมาณรังสี (kGy)	ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	
	ยางธรรมชาติ	NR-g-PS (60:40)
0	1.7 ± 0.58 ^c	1.5 ± 0.02 ^d
5	1.0 ± 0.00 ^c	5.7 ± 2.01 ^c
10	2.3 ± 0.58 ^c	7.7 ± 0.37 ^b
15	2.7 ± 0.58 ^c	8.8 ± 0.66 ^{ab}
20	10.5 ± 0.87 ^b	9.2 ± 0.59 ^{ab}
25	7.7 ± 1.32 ^a	10.5 ± 0.11 ^a

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^{a-d} ในคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

โดยมอดูลัสและความต้านทานต่อแรงดึงของ NR-g-PS ที่เพิ่มขึ้น น่าจะได้รับอิทธิพลมาจากปริมาณสไตรีนที่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์มากกว่าอิทธิพลของการเกิดพันธะเชื่อมโยง เนื่องจากสไตรีนเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง เมื่อโมเลกุลของสไตรีนมากราฟต์ลงบนโมเลกุลของยางธรรมชาติ พอลิสไตรีนก็จะสามารถเสริมความแข็งแรงให้กับยางธรรมชาติได้ ดังนั้น NR-g-PS จึงมีความแข็งแรงมากกว่ายางธรรมชาติ ถึงแม้ว่าจะมีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงที่น้อยกว่า

อย่างไรก็ตาม เมื่อพอลิสไตรีนเกาะอยู่บนโครงสร้างยางธรรมชาติ พอลิสไตรีนจะส่งผลให้ความเป็นยางลดลง เนื่องจาก พอลิสไตรีนจะแสดงสมบัติด้านความแข็งเปราะออกมา โดยโครงสร้างของพอลิสไตรีนยังไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของยาง จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ค่าความสามารถในการยืดลดลงตามลำดับ (ดังแสดงในตารางที่ 22) โดย NR-g-PS ที่มีสัดส่วนยางธรรมชาติต่อสไตรีน เท่ากับ 60:40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีระยะยืดที่จุดขาดน้อยกว่ายางธรรมชาติ (100 %) ค่อนข้างมาก โดยเฉพาะเมื่อได้รับปริมาณรังสีถึง 25 kGy

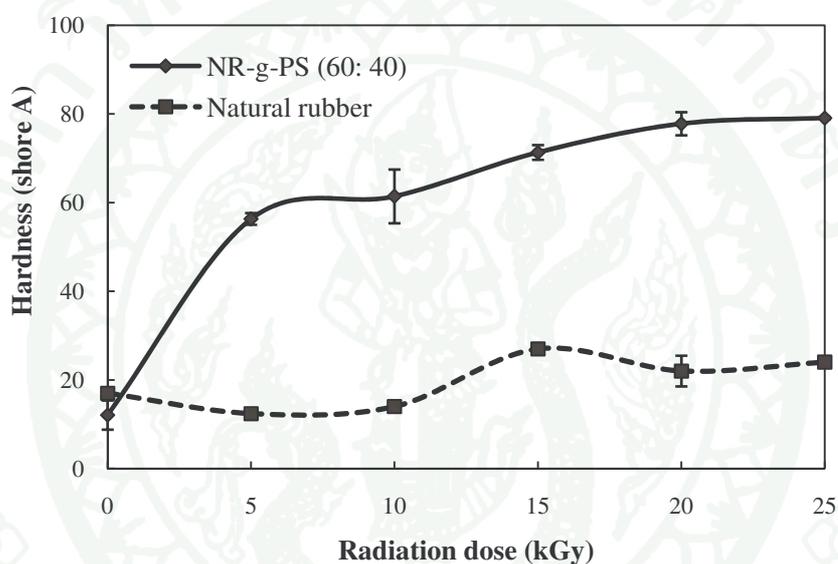
ตารางที่ 22 ผลของปริมาณรังสีต่อระยะยืดที่จุดขาดของ NR-g-PS เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

ปริมาณรังสี (kGy)	ระยะยืดที่จุดขาด (%)	
	ยางธรรมชาติ	NR-g-PS (60:40)
0	1013 ± 39 ^a	622 ± 31 ^{ab}
5	945 ± 98 ^a	661 ± 52 ^{ab}
10	964 ± 9 ^a	672 ± 42 ^a
15	834 ± 10 ^b	626 ± 46 ^{ab}
20	973 ± 55 ^a	568 ± 25 ^{bc}
25	733 ± 19 ^c	490 ± 13 ^c

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^{a-c} ในคอลัมน์นี้มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

2.4 อิทธิพลของปริมาณรังสีต่อความแข็งของ NR-g-PS เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

เมื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณรังสีต่อความแข็งของ NR-g-PS พบว่า NR-g-PS มีความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น (ดังภาพที่ 23) สอดคล้องกับประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ รวมทั้งสมบัติเชิงกลต่างๆ ในขณะที่ ยางธรรมชาติมีความแข็งไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 23 ผลของปริมาณรังสีต่อความแข็งของ NR-g-PS และยางธรรมชาติ

หมายเหตุ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 5

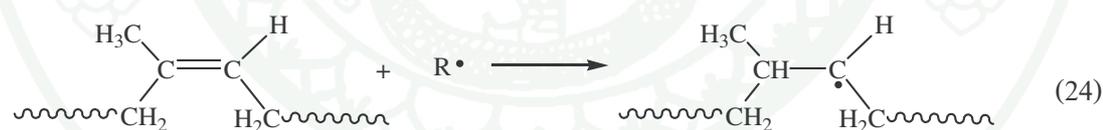
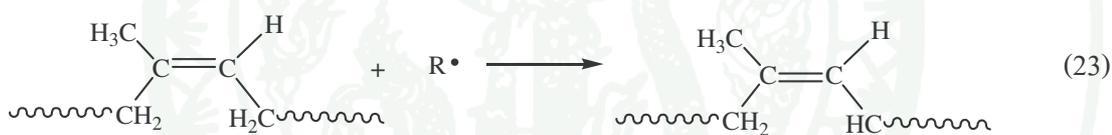
จากการทดลองในข้อนี้ สามารถสรุปได้ว่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมในการเตรียม NR-g-PS โดยใช้รังสีแกมมา คือ การใช้ปริมาณรังสี เท่ากับ 20 kGy เนื่องจากปริมาณรังสีดังกล่าว สามารถช่วยให้ NR-g-PS มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ และสมบัติเชิงกลที่ดี โดยไม่ทำให้น้ำยางเกิดการเสียสภาพ ถึงแม้ว่าจะ

ไม่สามารถทำให้กราฟต์โคพอลิเมอร์มีสมบัติบางประการสูงที่สุด ในขณะที่ การใช้ใช้ปริมาณรังสี 25 kGy จะทำให้น้ำยางกราฟต์เกิดการจับตัว

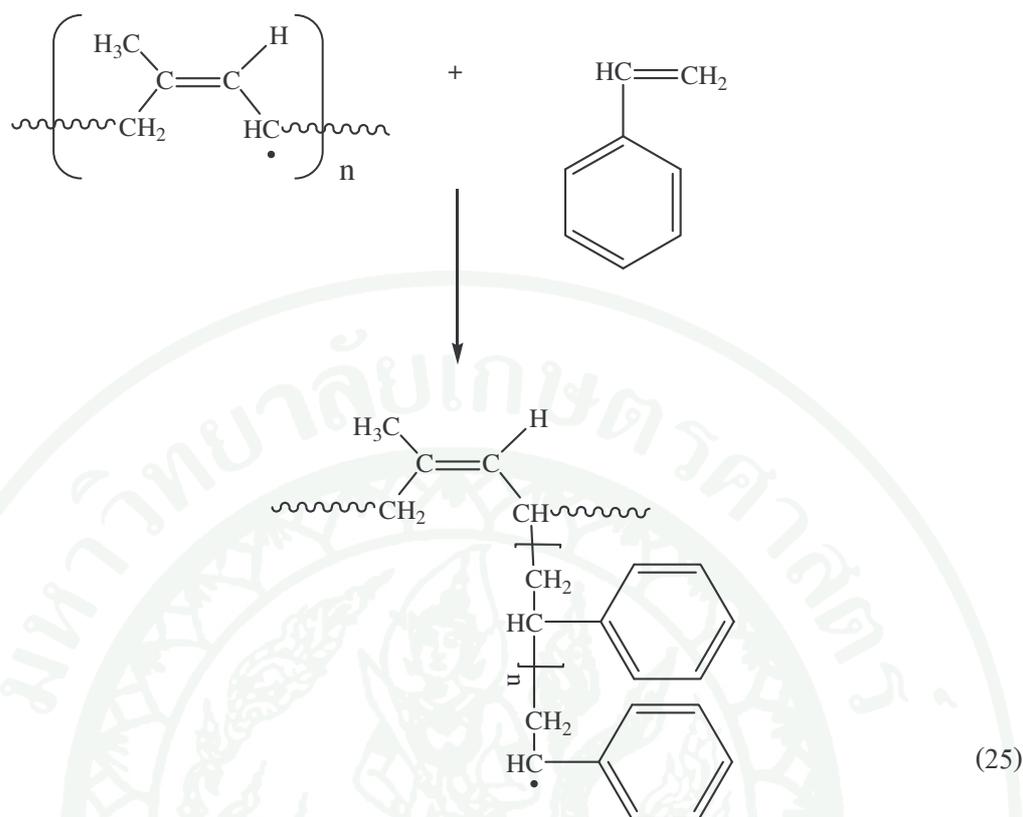
3. การพิสูจน์โครงสร้างทางเคมีของกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีชนิดโปรตอน ($^1\text{H-NMR}$)

3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

โดยปกติ กลไกการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีนบนโมเลกุลยางธรรมชาติอาจเกิดได้ 2 ลักษณะดังนี้ คือ

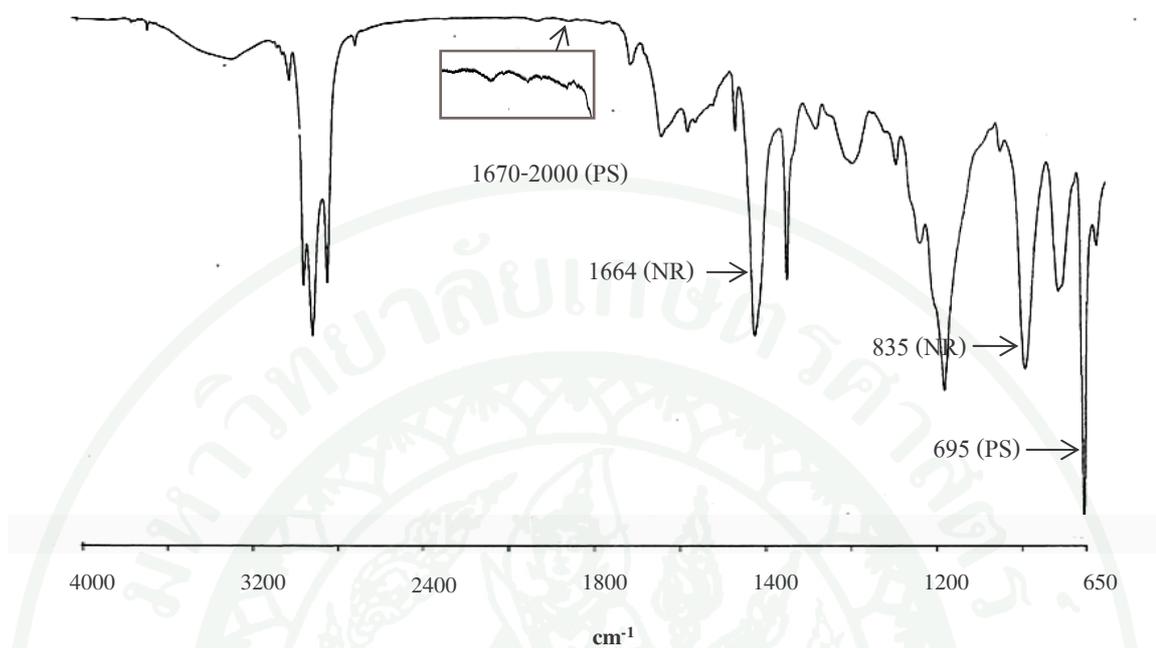


เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะ $-\text{C}-\text{H}$ ที่ตำแหน่งอัลลิลิกและพันธะคู่มีค่าต่างกัน คือ 362.8 kJ/mol และ 464.8 kJ/mol ตามลำดับ (Yu-Ran, 2003) ดังนั้นตำแหน่งการเกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลยางธรรมชาติดังปฏิกิริยาในสมการที่ 23 น่าจะเกิดได้มากกว่าสมการที่ 24 เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีความว่องไว และง่ายต่อการเกิดอนุมูลอิสระมากกว่า โดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อกับพอลิสไตรีน เกิดการกราฟต์ของพอลิสไตรีนบนโมเลกุลยางธรรมชาติ ดังนี้

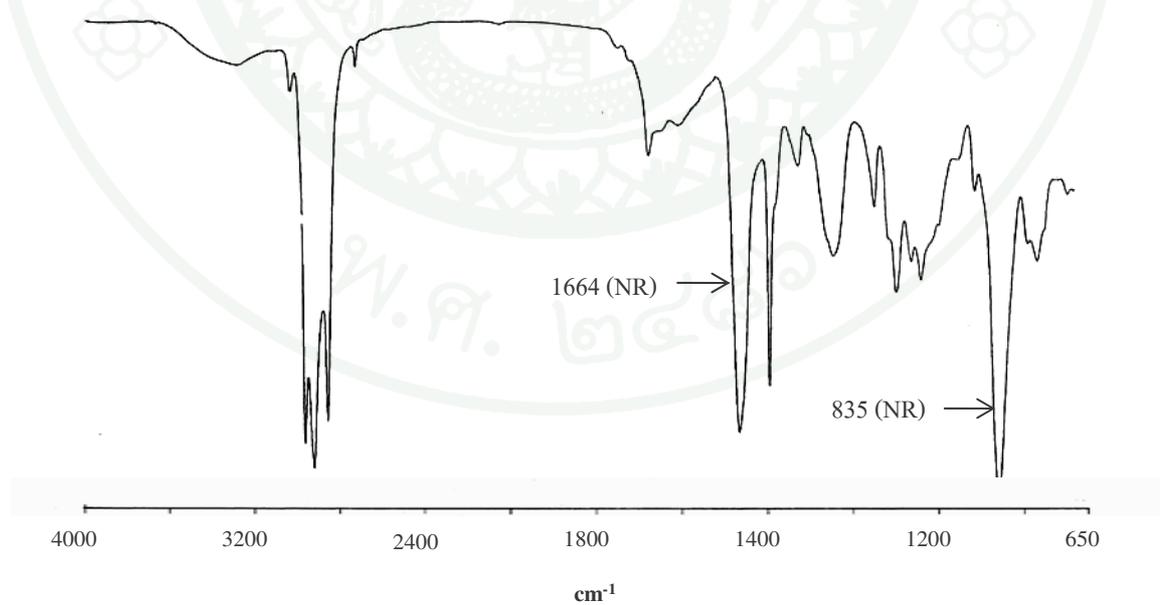


เพื่อยืนยันการกราฟต์ติดของพอลิสไตรีนบน โมเลกุลยางธรรมชาติ จึงทำการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของ NR-g-PS (60:40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก) ที่เตรียมได้จากสถานะที่เหมาะสม เปรียบเทียบกับโครงสร้างของยางธรรมชาติ ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีชนิดโปรตอน ($^1\text{H-NMR}$) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 24-25 และ 26-27 ตามลำดับ

เมื่อนำกราฟต์โคพอลิเมอร์ (NR-g-PS) ที่ได้ไปสกัดเอายางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ออกแล้วไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ได้สเปกตรัมอินฟราเรด (ดังรูปที่ 24) พบว่ามีพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 695 และ 1670-2000 cm^{-1} (สิทธิพงษ์, 2547 และ Arayaprane et al., 2008) ซึ่งแสดงแถบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่มีสาเหตุมาจากการอโนกระนาบของ C-H จากวงแหวนอะโรมาติก และมีการโอเวอร์โทนของวงอะโรมาติกเป็นลักษณะ 3 พีค ซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะของการมีหมู่แทนที่หมู่เดี่ยว ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสไตรีน ซึ่งแตกต่างจากสเปกตรัมอินฟราเรดของยางธรรมชาติในภาพที่ 24 ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการกราฟต์ของพอลิสไตรีนบนอนุภาคนยางธรรมชาติ



ภาพที่ 24 สเปกตรัมอินฟราเรดแสดงหมู่ฟังก์ชันของ NR-g-PS



ภาพที่ 25 สเปกตรัมอินฟราเรดแสดงหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ

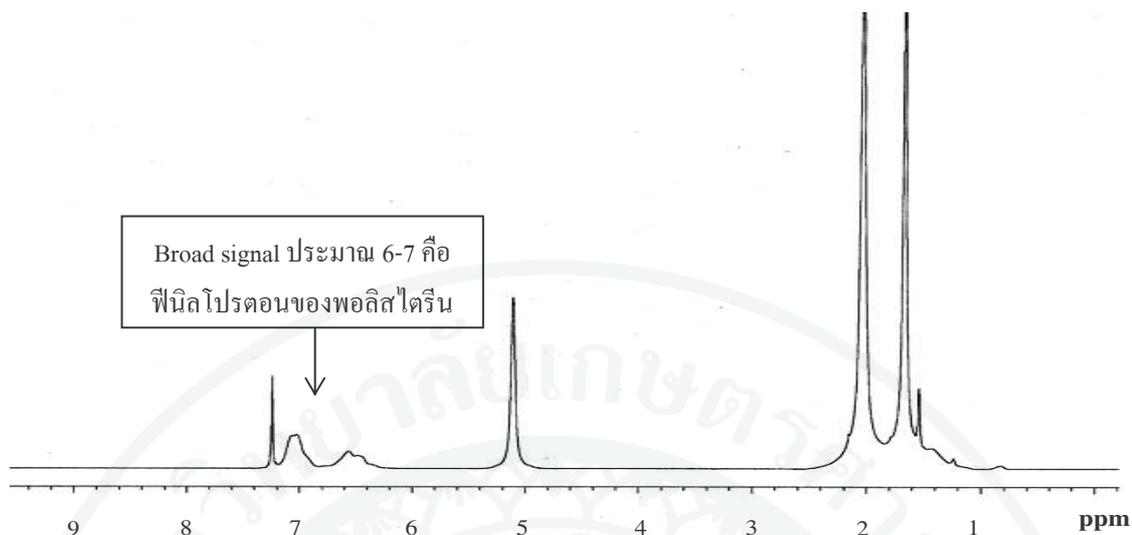
หมู่ฟังก์ชันสำคัญที่ปรากฏในสเปกตรัมอินฟราเรดของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน (สรุปดังตารางที่ 23) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสิทธิพงษ์ (2547) และ Arayapranee and Rempel (2008)

ตารางที่ 23 หมู่ฟังก์ชันที่แสดงแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของ NR-g-PS

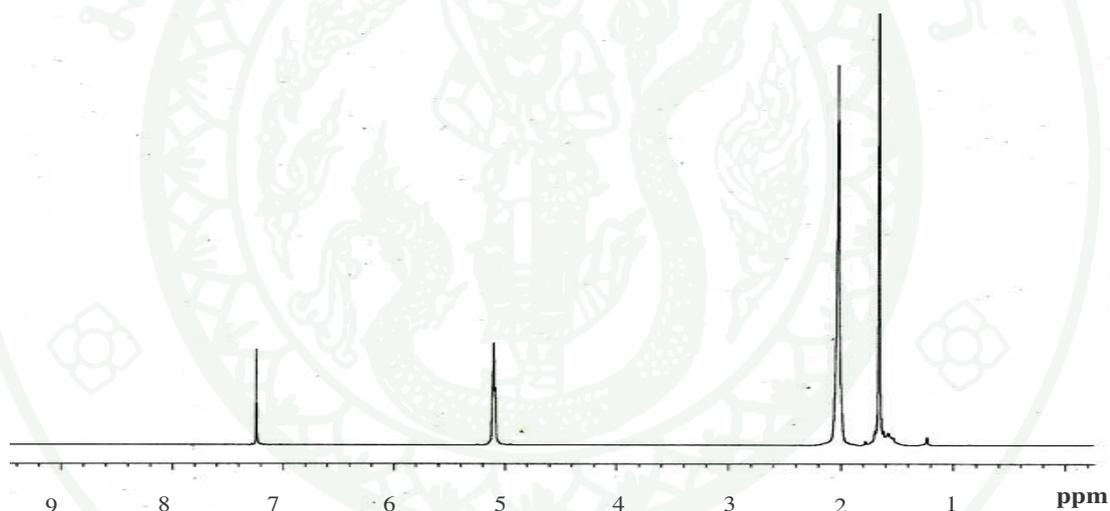
เลขคลื่น (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
1670-2000	-C-H aromatic overtone ของ PS
1664	-C=C stretch ของ NR
835	=C-H out of plane bend ของ NR
697	-C-H (aromatic ring) out of plane bend ของ PS

3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีชนิดโปรตอน ($^1\text{H-NMR}$)

โครงสร้างของกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ถูกวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยใช้เทคนิค $^1\text{H-NMR}$ และได้สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของ NR-g-PS และยางธรรมชาติ แสดงดังภาพที่ 26 และ 27



ภาพที่ 26 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของ NR-g-PS



ภาพที่ 27 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของยางธรรมชาติ

จากสเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของ NR-g-PS ที่ได้ ในภาพที่ 26 พบว่า มีสัญญาณการดูดกลืนที่ตำแหน่ง Chemical shift ต่างๆ ซึ่งเกิดจากโปรตอนต่างชนิดกัน บนโครงสร้างของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pukkate *et al.* (2008) ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 ชนิดของโปรตอนที่ตำแหน่งการดูดกลืนคลื่นวิทยุต่างของ NR-g-PS

Chemical shift (ppm)	ชนิดของโปรตรอน
1.7	-CH ₃ methyl proton ของ NR
2.1	-CH ₂ methylene proton ของ NR
5.1	=C-H olefinic proton ของ NR
6-7	Phenyl proton ของ PS

จากภาพที่ 26 พบว่า Chemical shift ที่ตำแหน่งประมาณ 6-7 ppm แสดงถึง phenyl proton ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลพอลิสไตรีนที่กราฟด้านบน โมเลกุลยางธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมี Chemical shift ที่ตำแหน่งประมาณ 5.1, 2.1 และ 1.7 ppm ซึ่งแสดงถึง Olefinic proton (=CH), Methylene proton (-CH₂-) และ Methyl proton (-CH₃) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลยางธรรมชาติ ตามลำดับ จากทั้ง 2 เทคนิคที่กล่าวมาข้างต้นจึงสรุปได้ว่า สามารถเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ NR-g-PS ผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาได้ สำหรับ Chemical shift ที่ตำแหน่งประมาณ 7.2 คือ diltelium proton ของตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม

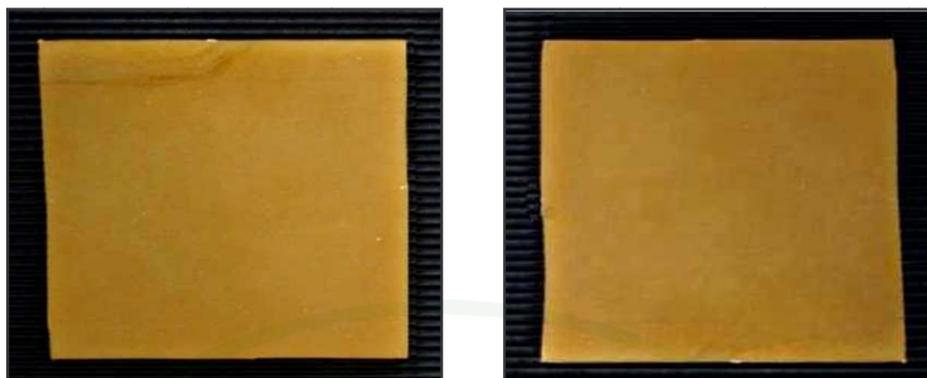
4. ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของ NR-g-PS

การศึกษอิทธิพลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของ NR-g-PS ทำโดยปรับเปลี่ยนปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ (คือ 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) โดยใช้ n-BA ปริมาณ 5 phr และปริมาณรังสีที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด คือ 20 kGy เมื่อได้กราฟต์โคพอลิเมอร์แล้วนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์ ปริมาณสไตรีนที่ถูกกราฟต์บน โมเลกุลยาง ขนาดอนุภาคสมบัติเชิงกล และความแข็งของแผ่นฟิล์ม ได้ผลดังต่อไปนี้

4.1 อิทธิพลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อลักษณะทางกายภาพของฟิล์มยางธรรมชาติและ NR-g-PS

เมื่อนำ NR-g-PS ที่เตรียมได้มาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยแม่พิมพ์กระจก แล้วสังเกตสีของแผ่นฟิล์ม พบว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มีสีเหลืองจางลงตามสัดส่วนของยางธรรมชาติที่ลดลง เนื่องจาก ส่วนของเบต้า-แคโรทีนอยและพอลิฟินอล ออกซิเดสซึ่งเป็นรงควัตถุสีเหลืองและสีน้ำตาลในยางธรรมชาติมีปริมาณลดลง รวมทั้งสัดส่วนของพอลิสไตรีนที่เพิ่มขึ้น ยังช่วยให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีสีอ่อนลง เนื่องจาก พอลิสไตรีนมีสมบัติโปร่งแสง และใส (ดังภาพที่ 28) โดยในการสังเคราะห์ NR-g-PS ด้วยเทคนิคการฉายรังสีแกมมามีข้อดี คือ ไม่จำเป็นต้องหยุดปฏิกิริยาเคมีด้วยเติมสารยับยั้งปฏิกิริยา เช่น ไฮโดรควิโนน เหมือนเทคนิคอื่นๆ ผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงไม่เป็นที่คำซึ่งยากต่อการปรับปรุงสีของผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความคงตัวด้านรูปร่างของผลิตภัณฑ์ ยังพบว่า NR-g-PS มีความคงตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ เนื่องจากพอลิสไตรีนจะทำให้ NR-g-PS มีค่า Tg เพิ่มขึ้นนั่นเอง



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

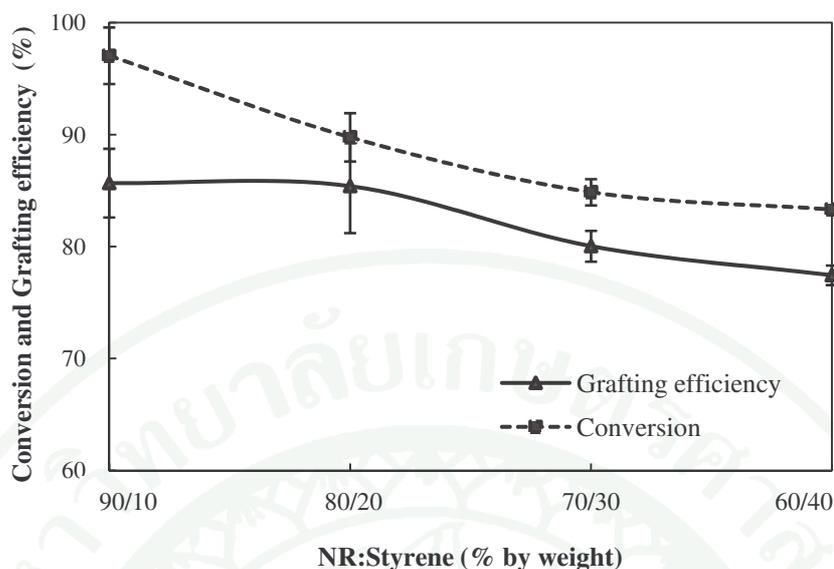


(จ)

ภาพที่ 28 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม (ก) ยางธรรมชาติ (ข), (ค), (ง) และ (จ) คือ NR-g-PS ที่มี สัดส่วนของยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ เท่ากับ 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

4.2 อิทธิพลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ และการประสิทธิภาพกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS

เมื่อศึกษาอิทธิพลของของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ของ NR-g-PS พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีสัดส่วนของสไตรีนมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่อปริมาณสไตรีนสูงขึ้น ในขณะที่ใช้ปริมาณรังสีเท่าเดิม อาจส่งผลให้สไตรีนมอนอเมอร์ได้รับปริมาณพลังงานรังสีไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นหรือถ่ายโอนอนุมูลอิสระไปยังสไตรีนมอนอเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นผลให้เมื่อปริมาณสไตรีนมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์จึงลดลง นอกจากนี้ ปริมาณสไตรีนที่มากเกินไป อาจทำให้สไตรีนมอนอเมอร์ที่เกิดอนุมูลอิสระส่วนหนึ่งไปรวมตัวกับอนุมูลอิสระอื่นๆที่ไม่ใช่ยางธรรมชาติ ดังนั้น จึงอาจทำให้สูญเสียความสามารถในการเกิดเป็นพอลิสไตรีนได้ (Kawahara *et al.*, 2003)

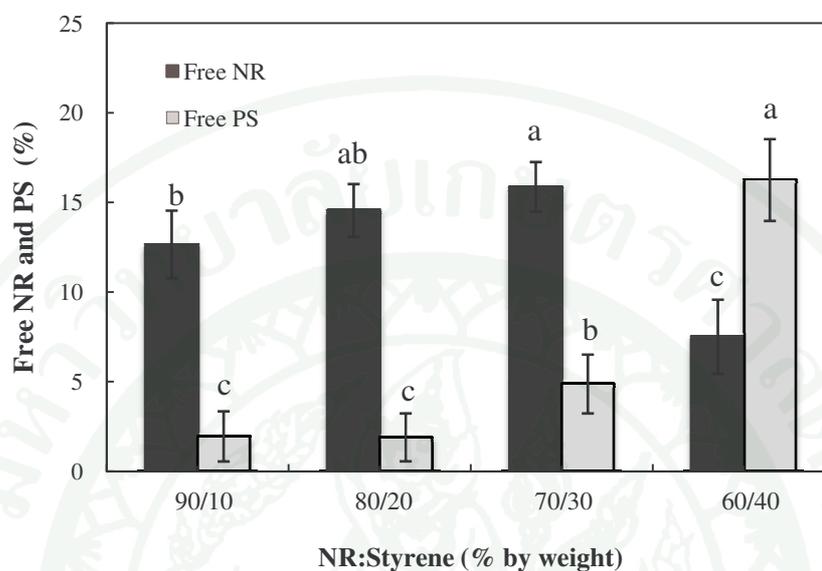


ภาพที่ 29 ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS

หมายเหตุ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 6

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของสไตรีนมอนอเมอร์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์จะมีแนวโน้มลดลง (ดังภาพที่ 29) เช่นเดียวกับผลการทดลองของ George *et al.* (2006) Arayapranee and Rempel (2008) และ Kalkornsuapranee *et al.*, 2009 โดย NR-g-PS ที่เติมสไตรีนมอนอเมอร์ เท่ากับ 40 เป็นเส้นต์โดยน้ำหนัก จะมีประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ต่ำสุด เท่ากับ 77 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เป็นเพราะโมเลกุลของยางธรรมชาติมีจุดว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจำกัด (กล่าวคือ 1 ตำแหน่งต่อหนึ่งหน่วยของไอโซพรีน) ดังนั้น เมื่อปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์มากขึ้น ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ของสไตรีนมอนอเมอร์บนจุดว่องไว (reactive site) ก็จะลดลง และเป็นโอกาสที่ทำให้สไตรีนมอนอเมอร์ที่เกิดเป็นอนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากันเอง คือ เกิดเป็นพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดการกราฟต์อยู่บน โมเลกุลของยางธรรมชาติ (ดังภาพที่ 30) นอกจากนี้ การใช้สัดส่วนสไตรีนมอนอเมอร์ในปริมาณมาก ยังทำให้ระดับชั้นของสไตรีนมอนอเมอร์ที่ล้อมรอบลอบอนุภาคยางมีความหนาแน่นมาก จึงทำให้สไตรีนมอนอเมอร์ที่กระจาย

ตัวอยู่รอบนอกของอนุภาคยางไม่สามารถเข้าถึงจุดต่อไวบนผิวอนุภาคยางและทำปฏิกิริยากาแฟดโพลีเมอไรซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Liu *et al.*, 2002)



ภาพที่ 30 ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อยางธรรมชาติและสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร a-d ที่แสดงในกราฟแท่งแต่ละชุดมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับ ร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

4.3 อิทธิพลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อปริมาณสไตรีนที่ถูกกราฟต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ

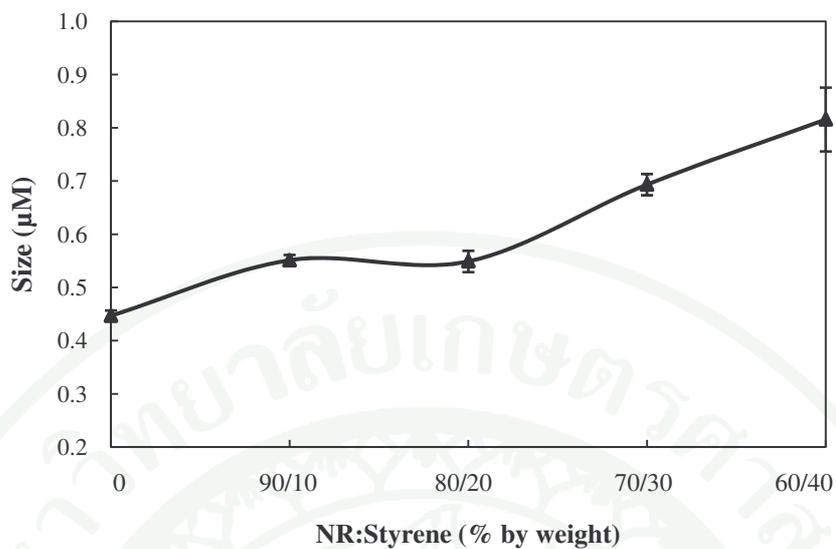
การวิเคราะห์ปริมาณสไตรีนที่ถูกกราฟต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติสามารถทำได้โดยใช้ค่าอินทิกรัลบนสเปกตรัมของ $^1\text{H-NMR}$ จากการศึกษาพบว่า ปริมาณสไตรีนที่ถูกกราฟต์บนโมเลกุลยางแปรผันตรงกับสัดส่วนสไตรีนมอนอเมอร์เริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น (แสดงในตารางที่ 25) โดยกราฟต์โพลีเมอร์ที่มีสัดส่วนสไตรีนมอนอเมอร์ เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีปริมาณพอลิสไตรีนถูกกราฟต์ลงบนโมเลกุลยางธรรมชาติมากที่สุด คือเท่ากับ 29.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 25 ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อปริมาณสไตรีนที่ถูกกราฟต์บน โมเลกุลยางธรรมชาติ

สัดส่วนของ NR:Styrene (%โดยน้ำหนัก)	ปริมาณสไตรีนที่ถูกกราฟต์บนยางธรรมชาติ (%โดยน้ำหนัก)
0	0.0
10	7.8
20	20.0
30	24.1
40	29.9

4.4 อิทธิพลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อขนาดอนุภาคของ NR-g-PS

จากการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อขนาดอนุภาคของ NR-g-PS โดยเครื่อง Zetasizer พบว่าขนาดอนุภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสัดส่วนสไตรีนที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคธรรมชาติ (100 %) ที่ไม่ทำปฏิกิริยากกราฟต์กับพอลิสไตรีน (ดังภาพที่ 31) โดยขนาดของอนุภาคยางธรรมชาติที่วัดได้ คือ 0.45 ไมโครเมตร ในขณะที่ยางธรรมชาติที่ทำปฏิกิริยากกราฟต์โคพอลิเมอร์กับสไตรีนมอนอเมอร์ที่ 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 0.55, 0.55, 0.69 และ 0.82 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยากกราฟต์โคพอลิเมอร์ร้อยละส่วนใหญ่จะเกิดปฏิกิริยาบนผิวของอนุภาคยางธรรมชาติซึ่งส่งผลให้อนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้นในลักษณะที่เรียกว่า คอรัล-เชลล์ โดยตัวอย่างการสังเคราะห์ของ NR-g-PS แสดงดังภาพที่ 32

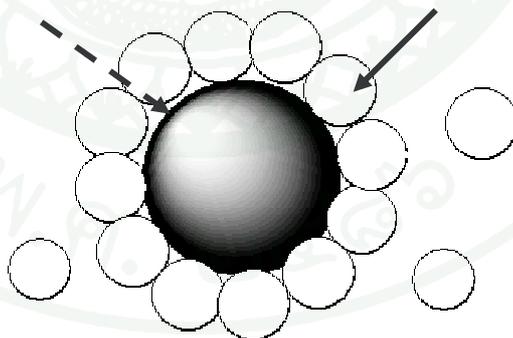


ภาพที่ 31 ขนาดอนุภาคของ NR-g-PS ที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่างๆ

หมายเหตุ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 7

อนุภาคยางธรรมชาติ

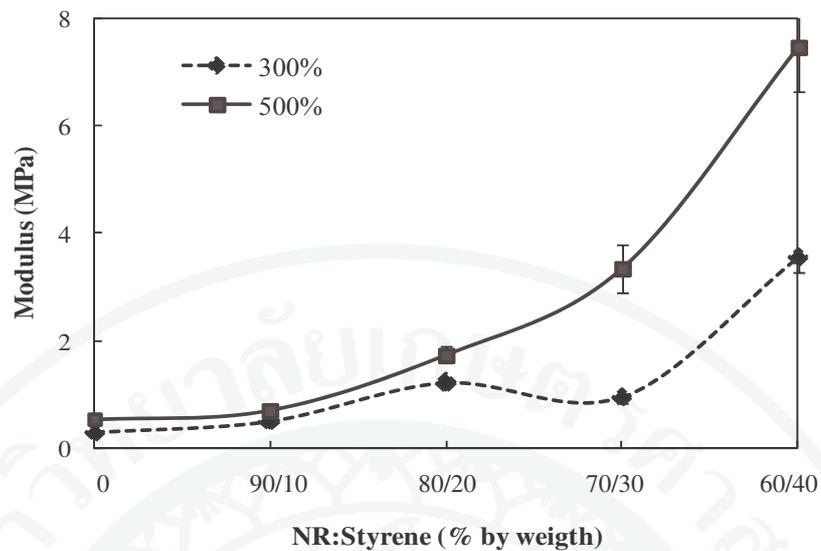
พอลิสไตรีน



ภาพที่ 32 สันฐานวิทยาของ NR-g-PS

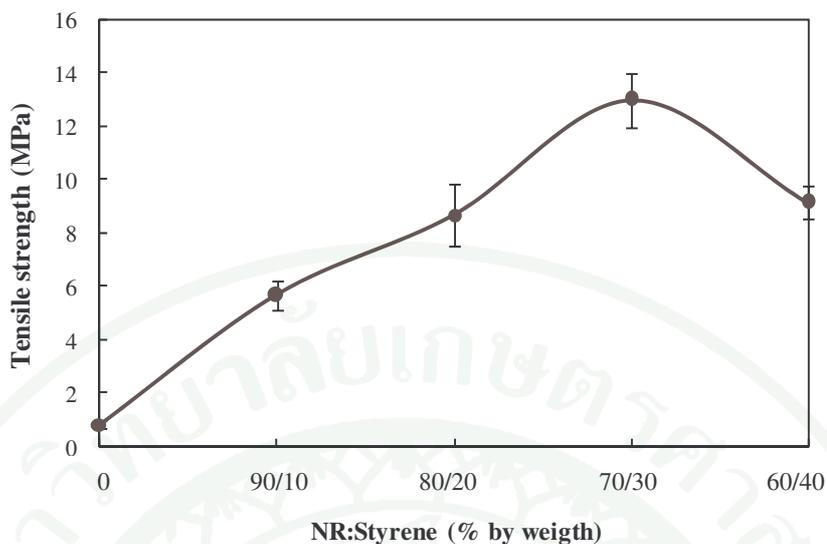
4.5 อิทธิพลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อสมบัติเชิงกลของ NR-g-PS

ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อมอดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืดที่จุดขาดของ NR-g-PS แสดงดังภาพที่ 33 - 35 ตามลำดับ จากกราฟในภาพที่ 33 จะเห็นได้ว่า มอดูลัสที่ระยะยืด 300% และ 500% มีแนวโน้มเหมือนกัน คือ เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนสไตรีนมอนอเมอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีความสอดคล้องกับประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ ในขณะที่ ความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงตามสัดส่วนของสไตรีนมอนอเมอร์ (ดังภาพที่ 34) โดยความต้านทานต่อแรงดึงของ NR-g-PS จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น จนกระทั่งปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสไตรีนเป็น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากลักษณะดังกล่าวจึงสามารถสันนิษฐานได้ว่าการเติมสไตรีนมอนอเมอร์ในปริมาณที่มากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิสไตรีนที่เกิดขึ้นจะแสดงสมบัติด้านความแข็งแรงประมาทเกินไป จนเป็นสาเหตุให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลง



ภาพที่ 33 ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อมอดูลัสของ NR-g-PS

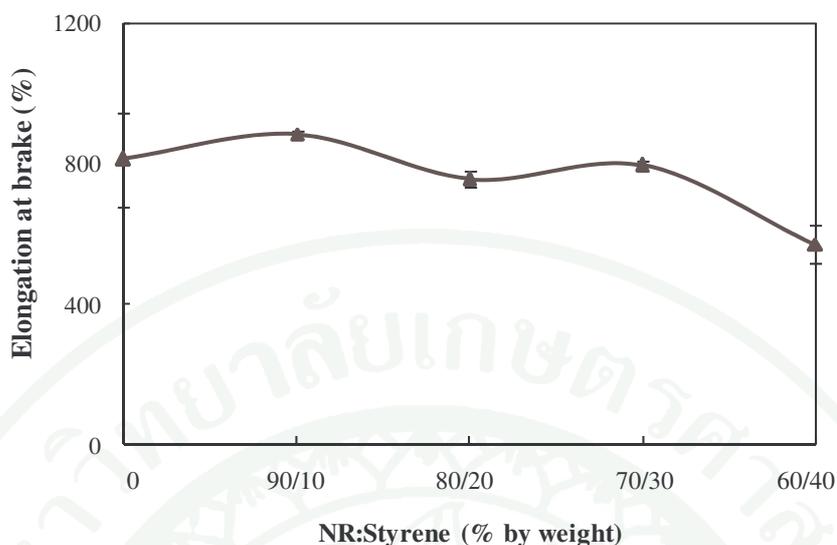
หมายเหตุ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 8



ภาพที่ 34 ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อความต้านทานต่อแรงดึงของ NR-g-PS

หมายเหตุ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 8

นอกจากนี้ สัดส่วนของสไตรีนมอนอเมอร์ที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ยางธรรมชาติมีระยะยืดที่จุดขาดลดลง (ดังภาพที่ 35) เนื่องจาก NR-g-PS เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติผสมผสานกันระหว่างความยืดหยุ่นของยางกับความแข็งแรงเปราะของพลาสติกพอลิสไตรีนที่กราฟต์อยู่บนอนุภาคยาง ดังนั้น เมื่อ NR-g-PS มีสัดส่วนของสไตรีนเพิ่มขึ้น สมบัติความเป็นอลาสติกหรือความยืดหยุ่นของยางธรรมชาติจึงลดลง โดยโครงสร้างของพอลิสไตรีนที่เกิดขึ้นจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลยางขณะดึงยืด อย่างไรก็ตาม NR-g-PS ที่เติมสไตรีนมอนอเมอร์สูงสุด คือ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (มีปริมาณสไตรีนที่ถูกกราฟต์เท่ากับ 28.9 % โดยน้ำหนัก) ก็ยังสามารถดึงยืดได้ถึง 568 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 35 ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อระยะยืดที่จุดขาดของ NR-g-PS

หมายเหตุ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 8

4.6 อิทธิพลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อความแข็งแรงของ NR-g-PS

จากการศึกษาผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อสมบัติความแข็งแรงของ NR-g-PS ด้วยเครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์ เอ พบว่า NR-g-PS มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีสัดส่วนของสไตรีนมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น (ดังตารางที่ 26) เนื่องจาก พอลิสไตรีนเป็นสารที่มีความแข็งแรงเปราะและมี Tg มากกว่ายางธรรมชาติ (คือ ประมาณ 80 °C) ดังนั้นเมื่อพอลิสไตรีนกราฟต์บนยางธรรมชาติ ก็จะปรับปรุงให้กราฟต์โคพอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุชนิดใหม่มี Tg เพิ่มขึ้น (สิทธิพงษ์, 2547) โดย NR-g-PS ที่มีปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์ เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จะสามารถปรับปรุงความแข็งแรงของยางธรรมชาติได้มากกว่า 4 เท่า

ตารางที่ 26 ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อความแข็งของ NR-g-PS

สัดส่วนของ NR:Styrene (% โดยน้ำหนัก)	ความแข็ง (ชอร์ เอ)
0	19 ± 3 ^c
10	21 ± 1 ^c
20	43 ± 1 ^{bc}
30	49 ± 1 ^b
40	78 ± 1 ^a

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^{a-c} ในคอลัมน์นี้มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

5. การศึกษาแนวทางในผลิตโฟมกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์จาก NR-g-PS

หลังจากสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับสไตรีน โดยเทคนิคการฉายรังสีแกมมา และศึกษาสมบัติเบื้องต้นของ NR-g-PS แล้ว ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการนำ NR-g-PS ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ โดยมีแนวคิดที่จะนำไปทดลองผลิตเป็นโฟมกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธีการแบบดันลอปเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

จากการทดลองเบื้องต้นในครั้งนี พบว่ายังไม่สามารถเตรียมโฟมกันกระแทกจาก NR-g-PS ที่เตรียมด้วยวิธีการแบบดันลอปได้โดยตรง เนื่องจาก NR-g-PS ที่เตรียมได้จะอยู่ในฟอร์มของของเหลวซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC) น้อยเกินไป คือ ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ขางพองน้ำจึงไม่เกิดการเจลและไม่สามารถรักษาความเสถียรของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากการตีด้วยแรงกลได้ เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้นำ NR-g-PS มาระเหยน้ำออกเพื่อเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตาม การระเหยน้ำออกด้วยความร้อน เป็นวิธีที่ถือได้ว่ามีความเสี่ยงในการทำให้ยางเกิดการเสียดสภาพ (เกิดการจับตัว) ดังนั้น การระเหย NR-g-PS จึงต้องให้ความร้อนต่ำและต้องมีการปั่นกวนตลอดเวลา อย่างไรก็ตาม จากการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดของ NR-g-PS ด้วยวิธีนี้สามารถเพิ่มปริมาณของแข็งใน NR-g-PS ที่มีสัดส่วนของ

สไตรีนในระดับต่างๆ ได้เพียงเล็กน้อยก่อนที่จะเกิดการจับตัว (ดังตารางที่ 27) และไม่สามารถทำได้ใน NR-g-PS ที่มีสไตรีนมอนอเมอร์ เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจาก เมื่อนำ NR-g-PS ที่สัดส่วนนี้มีระเหยน้ำออก น้ำยางกราฟต์จะเกิดการจับตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่อย่างรวดเร็ว ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของ NR-g-PS ซึ่งมีขนาดใหญ่ จึงทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งทำให้อนุภาคยังมีพลังงานจลน์สูงขึ้น

ตารางที่ 27 ปริมาณของแข็งทั้งหมดใน NR-g-PS ก่อนและหลังระเหยน้ำออก

NR: Styrene (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด(%)	
	ก่อนระเหย	หลังระเหย
90:10	32.6 ± 0.1 ^a	42.8 ± 0.5 ^a
80:20	33.7 ± 0.1 ^a	41.1 ± 1.5 ^a
70:30	34.7 ± 0.1 ^a	41.8 ± 1.3 ^a
60:40	35.6 ± 0.1 ^a	-

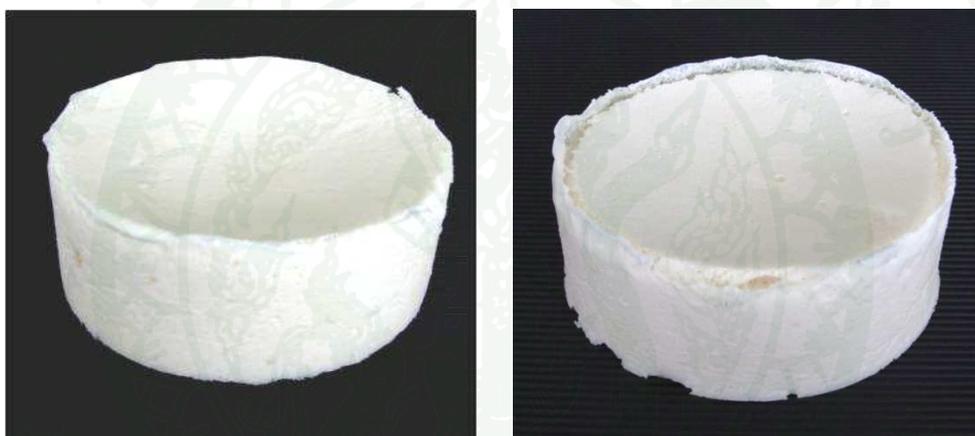
หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^a ในคอลัมน์นี้ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

อย่างไรก็ตาม เมื่อทดลองนำ NR-g-PS ที่มีสัดส่วนของสไตรีนมอนอเมอร์ปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระเหยน้ำออกแล้ว มาทดลองตียางฟองน้ำอีกครั้ง ก็พบว่ายังไม่สามารถตีเป็นยางฟองน้ำได้ จึงนำยางฟองน้ำที่ได้มาผสมกับน้ำยางธรรมชาติชั้นแอมโมเนียสูง (HA latex) เพื่อให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเพียงพอ โดยผสม NR-g-PS กับน้ำยางธรรมชาติชั้นในสัดส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการทดลอง พบว่าสามารถผลิตยางฟองน้ำด้วยวิธีการแบบดันลอปได้ ดังภาพที่ 36



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

ภาพที่ 36 ขางฟองน้ำที่เตรียมด้วยวิธีการคั่นลอป

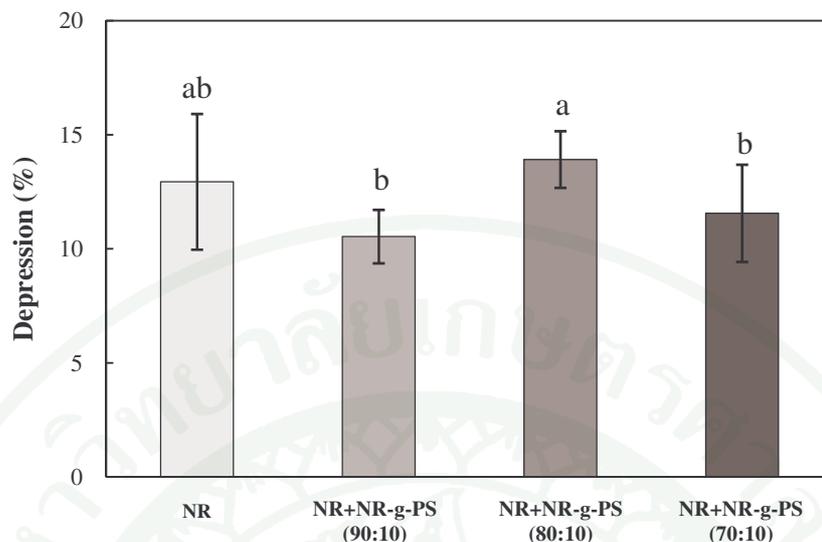
(ก) ขางฟองน้ำที่เตรียมจากขางธรรมชาติ

(ข) ขางฟองน้ำที่เตรียมจากการผสมน้ำขางธรรมชาติขึ้นกับ NR-g-PS (90:10)

(ค) ขางฟองน้ำที่เตรียมจากการผสมน้ำขางธรรมชาติขึ้นกับ NR-g-PS (80:20)

(ง) ขางฟองน้ำที่เตรียมจากการผสมน้ำขางธรรมชาติขึ้นกับ NR-g-PS (70:30)

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การยุบตัว (depression) ของขางฟองน้ำ โดยวัดจากความสูงของขางฟองน้ำที่อยู่ในแม่พิมพ์ก่อนและหลังการคงรูป พบว่าขางฟองน้ำในแต่ละสูตรมีเปอร์เซ็นต์การยุบตัวเพียงเล็กน้อย และมีเปอร์เซ็นต์การยุบตัวในระดับที่ใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 เปอร์เซ็นต์การยุบตัวของยางฟองน้ำที่เตรียมได้จากน้ำยางธรรมชาติ และน้ำยางธรรมชาติผสม NR-g-PS ในสัดส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร a-d ที่แสดงในกราฟแท่งแต่ละชุดมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับ ร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

จากการวัดความแข็งของยางฟองน้ำด้วยเครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์ โอ โอ พบว่ายางฟองน้ำที่เตรียมจากการผสมน้ำยางธรรมชาติกับ NR-g-PS ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ มีความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณสไตรีนที่เพิ่มขึ้นในแต่ละสูตร เมื่อเปรียบเทียบกับยางฟองน้ำที่ได้จากยางธรรมชาติที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดใกล้เคียงกัน (ดังตารางที่ 28) จากการศึกษาในเบื้องต้นนี้ จึงสามารถนำ NR-g-PS ไปพัฒนาเป็นสารปรับความแข็งของโฟมยางต่อไปได้ โดยน่าจะมีสมบัติใกล้เคียงกับโฟมพอลิยูรีเทนความหนาแน่นต่ำที่ใช้เป็นวัสดุกันกระแทกในบรรจุภัณฑ์

ตารางที่ 28 ความแข็งของยางฟองน้ำที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติ และน้ำยางธรรมชาติผสม NR-g-PS ในสัดส่วน 80:20 เปอร์เซนต์

สูตร	ความแข็ง (ชอร์ โอ โอ)
NR	19 ± 3^b
NR: Styrene (% โดยน้ำหนัก)	
90:10	21 ± 1^b
80:20	43 ± 1^{ab}
70:30	49 ± 1^a

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^{a-b} ในคอลัมน์นี้ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับ ร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. เทคนิคการฉายรังสีแกมมา (γ -rays) เป็นเทคนิคที่สามารถเตรียม NR-g-PS ได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งเกิดการคลอสลิงค์ได้ในขณะเดียวกัน โดยการใช้ *n*-BA ในปริมาณ 5 phr และปริมาณรังสี 20 kGy เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอไรส์ โดยไม่ทำให้น้ำยางเกิดการเสียดสภาพ
2. เมื่อตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของ NR-g-PS ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ พบว่ามีพอลิสไตรีนกราฟต์อยู่บนโมเลกุลของยางธรรมชาติดังแสดงในสเปกตรัม
3. พอลิสไตรีนที่กราฟต์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล (มอดูลัส และความต้านทานต่อแรงดึง) รวมทั้งสมบัติทางกายภาพด้านความแข็งแรงของยางธรรมชาติได้ โดย NR-g-PS ที่มีปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีความต้านทานต่อแรงดึงมากที่สุด อย่างไรก็ตาม สมบัติต่างๆที่เพิ่มขึ้นมักสอดคล้องกับปริมาณสไตรีนที่ถูกรกราฟต์อยู่บนโมเลกุลยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น
4. การนำ NR-g-PS มาเตรียมเป็นยางฟองน้ำด้วยวิธีการแบบดันลอปสามารถทำได้เมื่อนำ NR-g-PS ไปประเหยน้ำออกให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำไปผสมกับน้ำยางธรรมชาติชั้นในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยพบว่ายางฟองน้ำที่ได้มีเปอร์เซ็นต์การยุบตัวเล็กน้อย และมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณสไตรีนที่เพิ่มขึ้นใน NR-g-PS โดยไม่ต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาเป็นโฟมกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

การเตรียมยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนด้วยการฉายรังสีแกมมาอาจมีปัญหาเบื้องต้นด้านการตีฟองน้ำ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาเบื้องต้นด้วยการลดปริมาณน้ำในระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ เพื่อให้ น้ำยางกราฟต์ที่เตรียมได้มีสภาวะเหมาะสมกับการเตรียมยางฟองน้ำมากขึ้น และควรมีการศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น การเสียรูปหลังการกด (Compression set) และการรับแรงกระแทก (Impact strength) ของผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำเพิ่มเติมเมื่อต้องการนำไปใช้เป็นโฟมกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ชาریف บารู. 2549. การขยายส่วนการตีฟองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติสด. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์. 2527. เคมีโพลีเมอร์พื้นฐาน. ครั้งที่ 1. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- กฤษฎา สุชีวะ และ ชญาภา นิมสุวรรณ. 2550. การพัฒนายางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยล้าอิเล็กตรอนระดับโรงงานต้นแบบ:การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยล้าอิเล็กตรอนมาใช้ในเชิงพาณิชย์ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล.
- คำนึ่ง เกษรินทร์. 2542. การเตรียมกราฟต์โพลีเมอร์ของน้ำยางโปรตีนต่ำด้วยเมทิลเมทาคริเลท. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- นิกร ยี่มวัลย์. 2543. การเตรียมฟองน้ำจากการผสมน้ำยางธรรมชาติกับกราฟต์โพลีเมอร์ของน้ำยางธรรมชาติกับเมทิลเมทาคริเลท. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- บุญธรรม นิธิอุทัย. 2530. ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ และคุณสมบัติ. ภาควิชาเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ปัตตานี.
- บุญธรรม นิธิอุทัย. 2532. ปฏิบัติการเทคโนโลยีน้ำยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและโพลีเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ปัตตานี.
- บุญธรรม นิธิอุทัย และ ปรีชา ป้องภัย. 2534. คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง 2. ภาควิชาเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ปัตตานี.
- ปวีณา ฆารไสว. 2005. กราฟต์โพลีเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลท. **KKU Res J.** (2):10.

ประมวล ตั้บริบูรณ์รัตน์. 2545. **พอลิเมอร์คอลลอยด์**. ครั้งที่ 1. บริษัท รวยเจริญ การพิมพ์ จำกัด. กรุงเทพฯ.

พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2550. **สารเคมียาง**. ครั้งที่ 2. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), ปทุมธานี.

พงษ์ธร แซ่ฮุย และ ชาตรีต สิริสิงห. 2550. **ยาง กระบวนการผลิตและการทดสอบ**. ครั้งที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี.

พูนผล ธรรมธวัช. 2549. **ยางพารา**. เซาท์เทิร์นรีบบอร์, สงขลา.

วัฒนชัย ล้วนแก้ว. 2545. **การสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนเพื่อเป็นสารเสริมทนแรงกระแทกสำหรับพอลิไวนิลครอไรด์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2551. **ตะลุมแดนโคบอลต์-60**. ครั้งที่ 1: 8. ปทุมธานี.

สถาบันวิจัยยางแห่งประเทศไทย. สมาคมยางพาราไทย. **ปริมาณการผลิต ส่งออก การใช้ สต็อก และ ปริมาณนำเข้ายางพาราของประเทศไทย**. สถิติยางไทย. แหล่งที่มา: www.thianr.com, 13 กันยายน 2552.

สิทธิพงษ์ อำนวยพาณิชย์. 2547. **กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน**. วารสารวิจัย มข 9. (2): 82-96.

สุพจน์ ประทีปถิ่นทอง. 2544. **วัสดุกันกระแทก**, น.21. วิทยาศาสตร์สำหรับเยาวชน รอบรู้เรื่อง **บรรจุกัณฑ์ 1**. ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์สุรวัฒน์, กรุงเทพฯ.

สุรศักดิ์ เทพแสง. 2545. **อิทธิพลของสารก่อเจลเสริมต่อการหดตัวและสมบัติของฟองน้ำจากยางธรรมชาติ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เสาวณีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี. 2547. การผลิตยางธรรมชาติ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ปัตตานี.

Arayaprane, W. and G. L. Rempel. 2008. Preparation of a natural rubber core/polymer shell in a nanomatrix by graft copolymerization. **J. Appl. Polym. Sci.** (110): 2475-2482.

Arayaprane, W., Prasassarakich, P. and Rempel, G. L. 2003. Process variable and their effects on grafting reaction of styrene and methyl methacrylate onto natural rubber. **J. Appl. Polym. Sci.** (89): 63-74.

Blackley, D. C. 1997. **Polymer Latices Science and Technology Vol. 1.** Latex Foam Rubber. Second Edition, London: Chapman&Hall.

Calvert, K. O. 1962. Permeability of gelled latex foam. **Institute of rubber industry** (38): 56-67.

Chmielewski, A. G., Haji-Saeid, M. and Ahmed, S. 2005. Progress in radiation processing of polymers. **J. Nucl. Instr. and Meth. B** (236): 44-54.

Chuadhari, C. V., Bharwaj, Y. K., Patil, N. D. Dubey, K. A., Virendra, K. and Sabharwal, S. 2005. Radiation-induced vulcanization of natural rubber latex. **J. Radiat. Phys. Chem.** (72): 613-618.

Cooper, W., Vaughan, G., Miller, S. and Fielden, M. 1959. Graft copolymer from natural rubber latex using visible, ultraviolet and gamma-ray initiation. **J., Polm.Sci.** (XXXIV): 651-670.

Croonenborghs, B., Smith, M. A. and Strain, P. 2007. X-ray versus gamma irradiation effects on polymers. **J. Radiat. Phys. Chem.** (76): 1676-1678.

- Dafader, N. C., Haque, M. E., Akhtar, F. and Ahmad, M. U. 2006. Study on grafting of different types of acrylic monomers onto natural rubber by gamma-rays. **J. Radiat. Phys. Chem.** (5): 168-172.
- Gehman, S. D. and I. Auerbach. 1956. Gamma-rays vulcanization of rubber. **J. Appl. Radiat. Isot.** (1): 102-114.
- George, F. B. and P. M. Swift. 1995. The polymerization of vinyl monomer in natural rubber latex. **J. App. Chem.** (5): 609-616.
- George, V., Britto, I. J. and Sebastian, M. S. 2003. Studies on radiation grafting of methyl methacrylate onto natural rubber for improving modulus of latex film. **J. Radiat. Phys. Chem.** (66): 367-372.
- Enyiegbulam, M. E. and I. U. Aloka. 1992. Graft characteristics and solution properties of natural rubber-g-methyl methacrylate copolymer in MEK/toluene. **J. Appl. Polym. Sci.** (44): 1841.
- Haldar, S. K. and N. K. Singha. 2006. Grafting of butyl acrylate and metyl methacrylate on butyl rubber using electron beam radiation. **J. Appl. Polym. Sci.** (101): 1340-1346.
- Haque, M. E., Dafader, N. C., Akhtar, F. and Ahmad, M. U. 1996. Radiation dose required for the vulcanization of natural rubber latex. **J. Radiat. Phys. Chem.** (48): 505-510.
- Jayasuriya, M. M., Makuuchi, K. and Yoshi, F. 2001. Radiation vulcanization of natural rubber latex using TMPTMA and PEA. **European Polym J.** (37): 93-98.
- Kalkornsurapranee, E., Sahakaro, K., Kaesaman, A. and Nakason, C. 2009. From a laboratory to a pilot scal production of natural rubber grafted with PMMA. **J. Appl. Polym. Sci.** (114): 587-597.

- Kawahara, S., Kawazura, T., Sawada, T. and Isono, Y. 2003. Preparation and characterization of natural rubber dispersed in nano-matrix, **Polymer J.** (44): 4527–4531
- Lamp, D. J. 1999. **Topological control in emulsion polymerization.** The University of Sydney, Australia.
- Liu, Y., Zhang, Y., Lui, Z. and Deng, K. 2002. Graft copolymerization of butyl acrylate onto casein initiated by potassium diperiodatonickelate (IV) in alkaline medium. **Eur. Polym. Chem.** (38): 1619-1625.
- Mark, J. E., Erman, B. and Eirich, F. R. 1994. **Science and Technology of Rubber**, 2nd ed. Academic Press. USA.
- NR Technical Bulletin. 1996. An Introduction to Latex Foam Manufacture, **Natural Rubber Producers Research Association.**: 1-24
- Pacter, A. and Danbrow. 1963. **J. Pharm. Pharmacol.**: 15-315.
- Pelli, P., Song, Cheng and Fuming, H. 1993. The sensitizing effect of acrylates on radiation vulcanization of natural rubber latex. **Radiat. Phys. Chem.** (42): 1-3.
- Peng, J., Wang, M., Qiao, M. and Wei, G. 2005. Radiation-induced grafting polymerization of MMA onto polybutadiene rubber latex. **J. Radiat. Phys. Chem.** (72): 739-743.
- Pukkate, N., Yamamoto, Y. and Kawahara, S. 2008. Mechanism of graft copolymerization of styrene onto deproteinized natural rubber. **Colloid Polym. Sci.** (286): 411-416.
- Rosen, M. J. 1987. **Surfactant and interfacial phenomena.** John Wiley and Sons, Sydney.: 209-201.

- Selke, S.E.M., Culter, J. D. and Hernandez, J. R. 2004. **Plastics Packaging (Properties, Processing and Application)**. 2 ed. Hanser, Germany.
- Thiraphattaraphun, L., Kiatkamjornwong, S., Prasassarakich, P. and Damronglerd, S. 2001. Natural Rubber-g-Methyl Methacrylate/Poly (methyl methacrylate) Blends. **J. Appl. Polym. Sci.** (81): 428-439.
- Sabharwal, S., Das, T. N., Chaudhari, C. V. and Bhardwaj. 1997. Mechanical of n-butyl acrylate sensitization action in radiation vulcanization of natural rubber latex. **J. Radiat. Phys. Chem.** (51): 309-315.
- Sabharwal, S., Das, T. N., Chaudhari, C. V. and Bhardwaj. 1997. Mechanical of n-butyl acrylate sensitization action in radiation vulcanization of natural rubber latex. **J. Radiat. Phys. Chem.**: 1. *Cited* Makuuchi, K. and Tsushima, K. 1988. Radiation vulcanization of natural rubber latex with monofunctional monomers. **J. Soc. Rubber Ind.** (61): 478.
- Winsor, P. A. 1954. **Solvent properties of amphiphilic compound**. Buter scientific publication, London: 2.
- Yu-Ran, L. 2003. **Handbook of Bond Dissociation Energies in Organic Compounds**. CRC press, New York.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์ปริมาณรังสี

การวิเคราะห์ปริมาณรังสี

การหาปริมาณรังสีเฉลี่ย เริ่มจากนำขวดใส่ตัวอย่างปริมาตร 200 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด มาบรรจุน้ำสะอาดให้มีปริมาณใกล้เคียงกับน้ำยางคอมปาวด์ที่ต้องการจะฉายรังสี จากนั้นทำการติดแผ่นฟิล์ม dosimeter ที่ใช้วัดปริมาณรังสีทั้งด้านบนและด้านล่างของขวด (ดังภาพที่ ก1) แล้วบรรจุขวดลงในกระป๋องอลูมิเนียมทรงกระบอกขนาด 1 ลิตร ก่อนนำไปฉายรังสีด้วยเครื่อง Gamma cell เป็นเวลา 40 นาที ทำการวิเคราะห์หาปริมาณรังสีเฉลี่ยด้วยเครื่อง Red Perspex เพื่อใช้ในการคำนวณระยะเวลาที่ต้องใช้ในการฉายรังสีตามปริมาณรังสีที่ต้องการ จากการตรวจวัดปริมาณรังสีก่อนการฉายรังสีแกมมาได้อัตราผลดัง (ตารางผนวกที่ ก1) คือ มีปริมาณรังสีเฉลี่ย 7.36 kGy ต่อ 40 นาที หรือ เท่ากับ 11.04 kGy ต่อชั่วโมง



ภาพผนวกที่ ก1 ขวดใส่ตัวอย่างที่นำไปฉายรังสีแกมมา

ตารางผนวกที่ ก1 ปริมาณรังสีเฉลี่ยต่อเวลา

ตำแหน่งของ dosimeter	ปริมาณรังสี (kGy)	ปริมาณรังสีเฉลี่ย (kGy)
Max 1	9.19	
Max 2	8.86	7.36
Min	5.69	



ตัวอย่างการวิเคราะห์สมบัติของกราฟต์โคพอลิเมอร์

1. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์

ตัวอย่างผลการทดลอง เพื่อวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ แสดงดังตารางผนวกที่ ข1

ตารางผนวกที่ ข1 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์

NR-g-PS (60:40 % by wt)	น้ำหนัก (กรัม)
น้ำหนัก NR-g-PS ก่อนอบ	4.2494
น้ำหนัก NR-g-PS หลังอบ	1.3872

จากสมการสำหรับการคำนวณ

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

โดยที่ A = น้ำหนักมอนอเมอร์ก่อนทำปฏิกิริยา (กรัม)

B = ปริมาณเนื้อยางแห้งและของแข็งอื่นในน้ำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ (กรัม)

C = น้ำหนักกราฟต์โคพอลิเมอร์หลังอบ (กรัม)

การคำนวณหาน้ำหนักมอนอเมอร์ก่อนทำปฏิกิริยา

ของผสมในกราฟต์โคพอลิเมอร์น้ำหนักรวม 306.12 กรัม มีมอนอเมอร์หนัก 40.40 กรัม
ฉะนั้น กราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ใช้หนัก 4.2494 กรัม จะมีมอนอเมอร์เท่ากับ 0.5608 กรัม

การคำนวณหาปริมาณเนื้อยางแห้งและของแข็งอื่นในน้ำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์

กราฟต์โคพอลิเมอร์หนักรวม 306.12 กรัม มีปริมาณของแข็งอื่น (ไม่รวมสไตรีน) เท่ากับ
66.12 กรัม กราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ใช้หนัก 4.2494 กรัม จะมีปริมาณของแข็งอื่นเท่ากับ 0.9178 กรัม

$$\text{Conversion (\%)} = \frac{4.2494 - 0.9178}{0.5608} \times 100 = 83.31$$

ดังนั้น

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์เท่ากับ 83.31%

2. การวิเคราะห์ยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ (Free NR และ Free PS) และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์

ตัวอย่างผลการทดลอง เพื่อวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ แสดงดังตารางผนวกที่ ข2

ตารางผนวกที่ ข2 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์

NR-g-PS (60:40 % by wt)	น้ำหนัก (กรัม)
น้ำหนักยางเริ่มต้น	2.0325
น้ำหนักหลังสกัดด้วย Petroleum ether	1.8981
น้ำหนักหลังสกัดด้วย Acetone+ MEK	1.5538

สมการสำหรับการคำนวณยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์

$$\text{Free NR (\%)} = \frac{M_p - M_o}{M_o} \times 100$$

เมื่อ

M_p คือ น้ำหนักของตัวอย่างยางหลังสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ (กรัม)

M_o คือ น้ำหนักของตัวอย่างกราฟต์โคพอลิเมอร์ก่อนสกัด (กรัม)

$$\text{Free Polystyrene (\%)} = \frac{M_{AM} - M_O}{M_O} \times 100$$

เมื่อ

M_{AM} คือ น้ำหนักของตัวอย่างกราฟต์โคพอลิเมอร์หลังสกัดด้วยอะซีโตนผสม เมทิลเอทิลคีโตน (กรัม)

M_O คือ น้ำหนักของตัวอย่างกราฟต์โคพอลิเมอร์ก่อนสกัด (กรัม)

$$\text{Free NR (\%)} = \frac{(2.0325 - 1.8981)}{2.0325} \times 100 = 6.61$$

$$\text{Free PS (\%)} = \frac{(2.0325 - 1.5538)}{2.0325} \times 100 = 18.14$$

ดังนั้น

กราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ จะมีปริมาณยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาร้อยละ 6.61 และ 18.14 ตามลำดับ

สมการสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์

$$\text{Grafting Efficiency (\%)} = \frac{M_F}{M_O} \times 100$$

เมื่อ

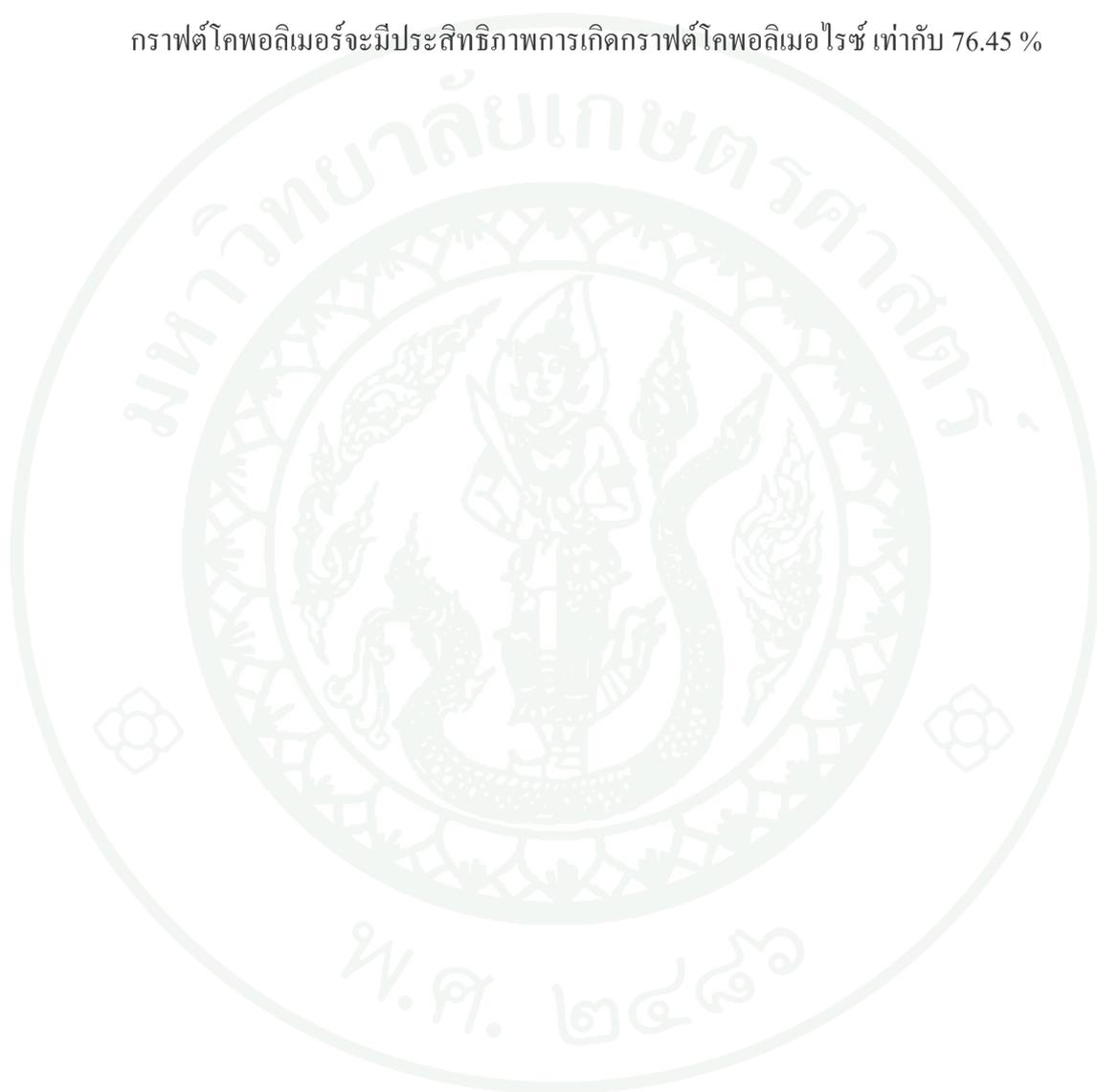
M_F คือ น้ำหนักของตัวอย่างกราฟต์โคพอลิเมอร์หลังสกัดตัวทำละลายทั้ง 3 ชนิด (กรัม)

M_O คือ น้ำหนักของตัวอย่างกราฟต์โคพอลิเมอร์ก่อนสกัด (กรัม)

$$\text{Grafting efficiency (\%)} = \frac{1.5538}{2.0325} \times 100 = 76.45$$

ดังนั้น

กราฟต์โคพอลิเมอร์จะมีประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ เท่ากับ 76.45 %





ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการวิเคราะห์ปริมาณสไตรีนที่ถูกราดบนโมเลกุลยาง

การวิเคราะห์ปริมาณสไตรีนที่ถูกกราฟต์บนโมเลกุลยางด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$

ตัวอย่างผลการทดลอง เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสไตรีนที่ถูกกราฟต์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ แสดงดังตารางผนวกที่ ค1

ตารางผนวกที่ ค1 ตัวอย่างข้อมูลดิบสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสไตรีนที่ถูกกราฟต์กราฟต์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$

NR-g-PS (60:40 % by wt)	ค่า
Olefinic proton	5.36
Phenyl proton	1.48
ค่าอินทิกรัลต่อ 1 โปรตอนของ Olefinic proton บน NR	$5.36/1 = 5.36$
ค่าอินทิกรัลต่อ 1 โปรตอนของ Phenyl proton บน PS	$1.48/1 = 1.48$
น้ำหนักโมเลกุลของ repeating unit ของ PS	105.16
น้ำหนักโมเลกุลของ repeating unit ของ NR	68.12

สมการสำหรับการคำนวณ

$$\% \text{ โดยโมลของ PS ในโคพอลิเมอร์} = \frac{B}{A+B} \times 100$$

$$\% \text{ โดยโมลของ NR ในโคพอลิเมอร์} = \frac{A}{B+A} \times 100$$

โดยที่

A = ค่าอินทิกรัลต่อ 1 โปรตอนของ Olefinic proton บน NR

B = ค่าอินทิกรัลต่อ 1 โปรตอนของ Methoxy proton บน PS

$$\% \text{ โดยน้ำหนักของ PS ในโคพอลิเมอร์} = \frac{C \times C'}{(C \times C') + (D \times D')} \times 100$$

โดยที่

C = เปอร์เซ็นต์โดยโมลของ PS ในโคพอลิเมอร์

C' = น้ำหนักโมเลกุลของ repeating unit ของพอลิสไตรีน

D = เปอร์เซ็นต์โดยโมลของ NR ในโคพอลิเมอร์

D' = น้ำหนักโมเลกุลของ repeating unit ของยางธรรมชาติ

แสดงตัวอย่างวิธีการคำนวณ

$$\% \text{ โดยโมลของ PS ในโคพอลิเมอร์} = \frac{1.48}{5.36 + 1.48} \times 100 = 0.22$$

ฉะนั้น % โดยโมลของ PS ในโคพอลิเมอร์ มีค่าเท่ากับ 0.22 % mol

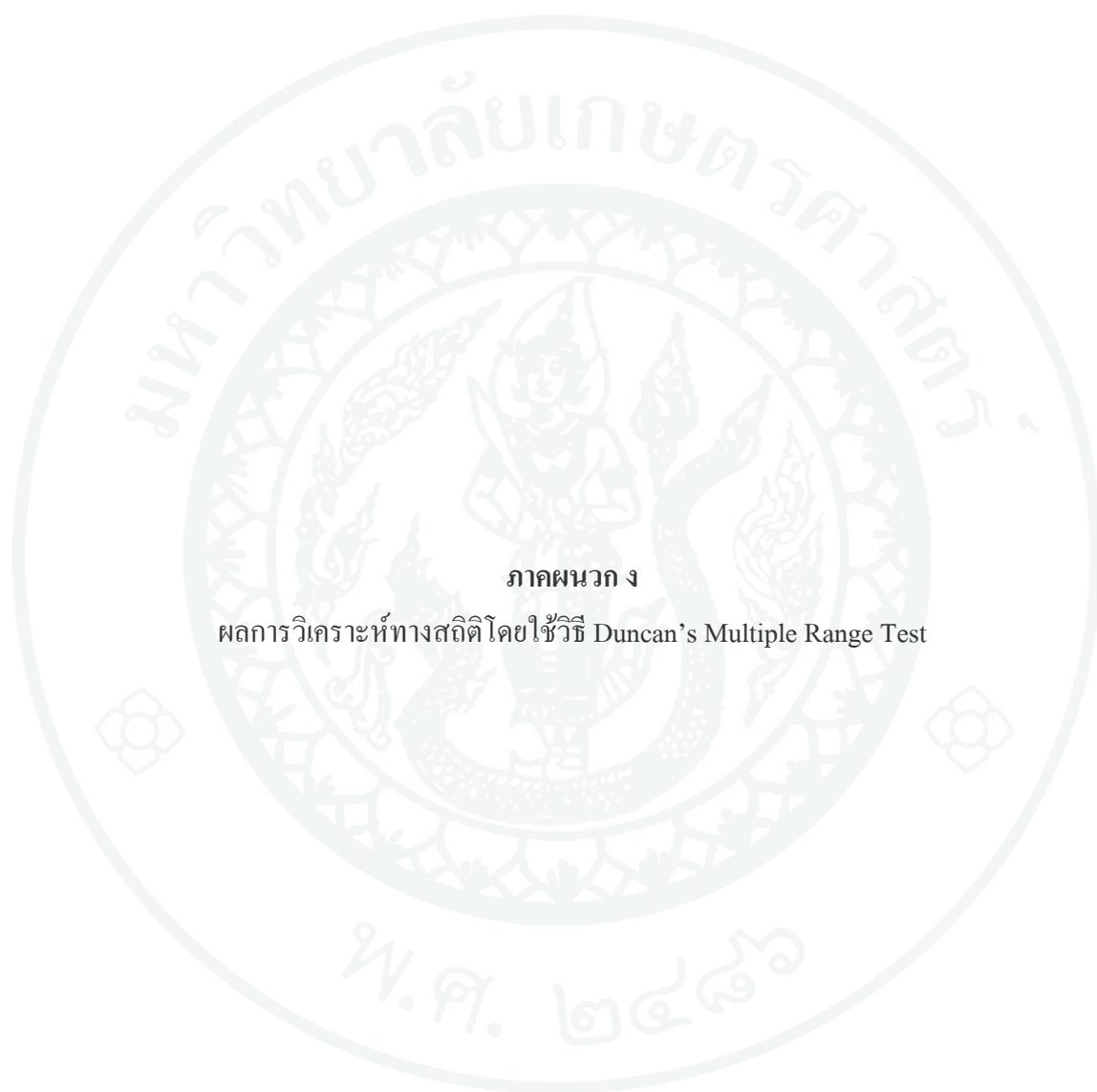
$$\% \text{ โดยโมลของ NR ในโคพอลิเมอร์} = \frac{5.36}{1.48 + 5.36} \times 100 = 0.78$$

% โดยโมลของ NR ในโคพอลิเมอร์ มีค่าเท่ากับ 0.78 % mol

$$\% \text{ โดยน้ำหนักของ PS ในโคพอลิเมอร์} = \frac{0.22 \times 105.16}{(0.22 \times 105.16) + (0.78 \times 68.12)} \times 100 = 29.89$$

ดังนั้น

% โดยน้ำหนักของ PS ในโคพอลิเมอร์ มีค่าเท่ากับ 29.89 % โดยน้ำหนัก



ภาคผนวก ง
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

1. อิทธิพลของปริมาณเซนซีไทเซอร์ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS

ตารางผนวกที่ 1 ผลของปริมาณ *n*-BA ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS

<i>n</i> -BA (phr)	Conversion (%)	GE (%)
0	33.78 ± 1.13 ^d	21.19 ± 2.30 ^d
1	46.36 ± 2.77 ^c	32.77 ± 2.78 ^c
3	68.28 ± 2.21 ^b	51.22 ± 4.93 ^b
5	86.91 ± 2.58 ^a	80.08 ± 3.77 ^a

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^{a-d} ในคอลัมน์นี้ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับ ร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

2. อิทธิพลของปริมาณเซนซีไทเซอร์ต่อความแข็งของ NR-g-PS

ตารางผนวกที่ 2 ผลของ *n*-BA ต่อความแข็งของ NR-g-PS

<i>n</i> -BA (phr)	ความแข็ง (ชอร์ เอ)
0	54.5 ± 4.6 ^b
1	58.1 ± 3.6 ^b
3	79.8 ± 0.9 ^a
5	79.1 ± 2.6 ^a

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^{a-b} ในคอลัมน์นี้ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับ ร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

3. อิทธิพลของปริมาณรังสีต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS

ตารางผนวกที่ 3 ผลของปริมาณรังสีต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS

ปริมาณรังสี (kGy)	Conversion (%)	GE (%)
0	3.82 ± 1.10^f	5.57 ± 3.76^c
5	8.49 ± 0.53^e	9.80 ± 3.10^d
10	47.60 ± 1.99^d	12.60 ± 1.57^d
15	69.46 ± 1.62^c	52.83 ± 1.68^c
20	83.32 ± 0.39^b	79.90 ± 3.41^b
25	90.57 ± 1.80^a	86.69 ± 2.54^a

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^{a-f} ในคอลัมน์นี้ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

4. อิทธิพลของปริมาณรังสีต่อความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยงของ NR-g-PS
เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4 ผลของรังสีต่อความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยงของ NR-g-PS เปรียบเทียบ
กับยางธรรมชาติ

ปริมาณรังสี (kGy)	ความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยง ($\text{cl/mol} \times 10^{-21}$)	
	ยางธรรมชาติ	NR-g-PS
0	271.13 ± 4.54^a	0.49 ± 2.41^b
5	287.16 ± 1.60^a	0.51 ± 1.15^b
10	297.15 ± 1.25^a	0.80 ± 1.25^b
15	297.75 ± 9.13^a	1.33 ± 4.18^b
20	494.46 ± 1.04^b	49.70 ± 24.22^b
25	387.81 ± 1.65^a	358.59 ± 80.02^a

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^{a-b} ในคอลัมน์นี้ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับ
ร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

5. อิทธิพลของปริมาณรังสีต่อความแข็งของ NR-g-PS เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

ตารางที่ 5 ผลของปริมาณรังสีต่อความแข็งของ NR-g-PS เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

ปริมาณรังสี (kGy)	ความแข็ง (ชอร์ เอ)	
	ยางธรรมชาติ	NR-g-PS
0	17 ± 1 ^d	12 ± 3 ^d
5	12.4 ± 1 ^d	56 ± 1 ^c
10	14 ± 1 ^c	61 ± 6 ^c
15	27 ± 1 ^c	71 ± 1 ^b
20	22 ± 3 ^b	78 ± 3 ^a
25	24 ± 1 ^a	79 ± 0 ^a

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^{a-d} ในคอลัมน์นี้ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

6. อิทธิพลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS

ตารางผนวกที่ 6 ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ NR-g-PS

ยางธรรมชาติ : สไตรีน (% โดยน้ำหนัก)	Conversion (%)	GE (%)
90:10	97.04 ± 2.53 ^a	85.67 ± 3.07 ^a
80:20	89.75 ± 2.16 ^b	85.39 ± 4.19 ^{ab}
70:30	84.85 ± 1.17 ^c	80.03 ± 1.37 ^b
60:40	83.32 ± 0.39 ^c	77.44 ± 0.87 ^c

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร^{a-c} ในคอลัมน์นี้ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

7. อิทธิพลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อขนาดอนุภาคของ NR-g-PS

ตารางผนวกที่ 7 ขนาดอนุภาคของ NR-g-PS ที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อสไตรีนต่างๆ

ยางธรรมชาติ : สไตรีน (% โดยน้ำหนัก)	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)
100:0	0.45 ± 0.01^d
90:10	0.55 ± 0.01^c
80:20	0.55 ± 0.02^c
70:30	0.69 ± 0.02^b
60:40	0.82 ± 0.06^a

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร ^{a-d} ในคอลัมน์นี้ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

8. อิทธิพลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อสมบัติเชิงกลของ NR-g-PS

ตารางผนวกที่ ๘ ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่อสมบัติเชิงกลของ NR-g-PS

ยางธรรมชาติ : สไตรีน (% โดยน้ำหนัก)	มอดูลัส (MPa)		ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	ระยะยืดที่จุดขาด (%)
	300%	500%		
100:0	0.3 ± 0.01 ^c	0.5 ± 0.06 ^c	0.8 ± 0.2 ^d	811 ± 135 ^a
90:10	0.5 ± 0.00 ^c	0.7 ± 0.00 ^c	5.7 ± 0.6 ^c	882 ± 10 ^a
80:20	1.2 ± 0.00 ^b	1.7 ± 0.15 ^b	8.7 ± 1.2 ^b	753 ± 23 ^b
70:30	1.0 ± 0.10 ^b	3.3 ± 0.45 ^b	13.0 ± 1.0 ^a	793 ± 12 ^b
60:40	3.6 ± 0.28 ^a	7.5 ± 0.4 ^a	9.2 ± 0.6 ^b	568 ± 55 ^c

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษร^{a-d} ในคอลัมน์นี้ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวดชาวัลย์ สงทิพย์
เกิดวันที่	วันที่ 13 มีนาคม 2528
สถานที่เกิด	สงขลา
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เคมี-ชีววิทยา) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่น/หรือรางวัลทางวิชาการ	รางวัลชมเชย การประกวดนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี 2552
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์