

การเตรียมพงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต
ด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF GRAFT COPOLYMER NATURAL RUBBER/POLYMETHYL
METHACRYLATE POWDER BY SPRAY DRYING

Miss Nutkamon Sangthongyingdee



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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งระหว่างยาง
ธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยวิธีการอบแห้ง
แบบพ่นฝอย

โดย

นางสาวณัฐกมล แสงทองยิ่งดี

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวรอาจารย์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศราวุธ रिมนุสสิต)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร. จันทิกา ชูโชติรส)

ณัฐกมล แสงทองยิ่งดี : การเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย (PREPARATION OF GRAFT COPOLYMER NATURAL RUBBER/POLYMETHYL METHACRYLATE POWDER BY SPRAY DRYING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช, 127 หน้า.

ยางธรรมชาติถูกใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่พอลิเมอร์เมทริกซ์ ผงยางธรรมชาติไม่สามารถเตรียมได้โดยตรงเนื่องจากคุณสมบัติด้านการเหนียวติดกันของยางธรรมชาติ การนำพอลิเมทิลเมทาคริเลตมากราฟต์บนอนุภาคยางธรรมชาติสามารถป้องกันการเกาะติดกันของผงได้ ซึ่งผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถเตรียมได้จากกระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอร์แบบคอร์-เชลล์อิมันชัน และกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยงานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง ได้แก่ ลำดับการเติมสาร ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปริมาณมอนอเมอร์ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยศึกษาจากค่าประสิทธิภาพการกราฟต์ซึ่งหาได้จากการทำการสกัดด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม และลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นคอร์-เชลล์ ทำให้ผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมได้ไม่เกิดการเกาะติดกันเหมือนกับยางธรรมชาติผง จากการศึกษาพบว่าสถานะในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผงที่มีปริมาณยางธรรมชาติมากที่สุดและไม่เกาะติดกัน คือ ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา 1 phr และปริมาณเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ 25 phr โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง และเมื่อนำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมได้ผสมกับพอลิเลคติกแอซิด พบว่าผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งสามารถเพิ่มคุณสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมได้

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5770161921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: NATURAL RUBBER / NATURAL RUBBER POWDER / GRAFTING COPOLYMER / NR-G-PMMA / CORE-SHELL / POLYLACTIC ACID / NATURAL RUBBER GRAFT COPOLYMER

NUTKAMON SANGTHONGYINGDEE: PREPARATION OF GRAFT COPOLYMER NATURAL RUBBER/POLYMETHYL METHACRYLATE POWDER BY SPRAY DRYING.

ADVISOR: ASST. PROF. APINAN SOOTTITANTAWAT, Ph.D., 127 pp.

Natural rubber is used as an additive in polymer industries for improvement of ductility and impact strength of polymer matrix. Natural rubber could not be directly produced because of their inherent properties that were adhered together. Grafting methyl methacrylate onto the natural rubber particle could prevent their sticky. Grafting copolymer was prepared by core-shell emulsion polymerization and spray drying. The effect of feeding order, initiator content, monomer content and reaction time were investigated by grafting efficiency and morphology. It was found that grafting methyl methacrylate onto natural rubber particle could produce natural rubber powder. The condition that could prepare greater natural rubber powder contains initiator 1.0 phr, MMA 25 phr and reaction time 25 phr. The grafting copolymer natural rubber/polymethyl methacrylate powder could improve the impact strength of polylactic acid matrix.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อภิวัฒน์ สุทธิธารวัช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ สั่งสอน และช่วยเหลือทุกอย่างเพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง ขอขอบคุณ รศ.ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล ประธานกรรมการ รศ.ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์ รศ.ดร. ศราวุธ ตมดุสิต และ อาจารย์ ดร.จันทิกา ชูโชติรส กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำในแก้ไขในส่วนที่บกพร่องในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและการสนับสนุน ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนาคต

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนาคต ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านคатаไลซิสและวิศวกรรมปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการ สำหรับการอำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์ เครื่องมือวิเคราะห์ และสถานที่

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนภายใต้โครงการ "ทุนพัฒนาศักยภาพการวิจัยเชิงสถาบันของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย" จากสำนักงานสนับสนุนกองทุนวิจัย สัญญาเลขที่ 5780014 และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รหัสประกาศ RES_57_411_21_076

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber).....	5
2.1.1 องค์ประกอบของยางธรรมชาติ[9].....	6
2.1.2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ[9].....	8
2.1.3 เคมีของอนุภาคยางธรรมชาติ[10].....	9
2.1.4 สมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ[9, 12].....	10
2.2 น้ำยางข้น[13,14].....	11
2.3 ยางผง (Powered rubber)[15].....	13
2.4 กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) [20].....	14
2.5 การดัดแปรยางธรรมชาติและ การประยุกต์ใช้ [1].....	22
2.6 การกราฟโคพอลิเมอร์บนอนุภาคยางธรรมชาติ.....	23

2.7 การกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตบนอนุภาคยางธรรมชาติ[19].....	26
2.8 พอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) [16,17]	30
2.9 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตบนอนุภาคยางธรรมชาติ[19].....	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	37
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	37
3.3 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	38
3.4 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	47
4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน.....	47
4.1.1 ผลของการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) ลงในน้ำยางธรรมชาติ	47
4.1.2 ผลของการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาลงในน้ำยางธรรมชาติต่อค่าศักย์ซีต้า.....	49
4.2 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน ในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งของยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	53
4.2.1 ลำดับการเติมสารที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง	53
4.2.1.1 ผลของลำดับการเติมสารต่อพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง.....	53
4.2.1.2 ผลของลำดับการเติมสารต่อลักษณะสัญญาณวิทยาของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง.....	56
4.2.2 ความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง	60
4.2.2.1 ผลของความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง.....	60
4.2.2.2 ผลของความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อลักษณะสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง	62

4.2.3 ความเข้มข้นมอนอเมอร์ที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง	65
4.2.3.1 ผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ต่อพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง.....	65
4.2.3.2 ผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของผงพอลิเมอร์ ร่วมแบบตอ่กิ่ง	66
4.2.4 เวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง.....	69
4.2.4.1 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง.....	69
4.2.4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของผงพอลิ เมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง	71
4.3 ลักษณะสัณฐานของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องผ่าน (Transmission Electron microscope, TEM)	74
4.4 หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต	77
4.4.1 เทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคป (FTIR)	78
4.4.2 เทคนิคโปรตรอน นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคป (HNMR).....	81
4.5 เสถียรภาพทางความร้อนของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งระหว่างยางธรรมชาติและพอลิ เมทิลเมทาคริเลต.....	83
4.6 การศึกษาด้านการเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งในพอลิแลคติกแอซิด	87
4.6.1 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสม	87
4.6.2 สมบัติการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม.....	92
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	102
5.1 การเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	102
5.2 ทดสอบสมบัติของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง.....	102
ข้อเสนอแนะ	103
รายการอ้างอิง	109
ภาคผนวก ก สูตรที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพการกราฟต์พอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง ..	111

ภาคผนวก ข	สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่ง	114
ภาคผนวก ค	ขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่ง	119
ภาคผนวก ง	ขนาดอนุภาคผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่ง	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์		127



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบในน้ำยางธรรมชาติ	7
ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกราฟต์ยางธรรมชาติ	24
ตารางที่ 3.1 ชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	37
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของสารที่เติมต่อน้ำหนักยางแห้ง100กรัม.....	42
ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคยางธรรมชาติและค่าศักย์ซีต้าเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว	47
ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคยางธรรมชาติและค่าศักย์ซีต้าเมื่อเติมควิมีนไฮเปอร์ออกไซด์	50
ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคยางธรรมชาติและค่าศักย์ซีต้าเมื่อเติมเตตระเอทิลีนเพนทามีน.....	51
ตารางที่ 4.4 แสดงสถานะของปฏิกิริยาที่ศึกษาผลของลำดับการเติมสาร	55
ตารางที่ 4.5 แสดงส่วนประกอบที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาที่ศึกษาผลของลำดับการเติมสาร	56
ตารางที่ 4.6 ผลของลำดับการเติมสารต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์	56
ตารางที่ 4.7 ผลของลำดับการเติมสารต่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและยางธรรมชาติ ใน พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง.....	56
ตารางที่ 4.8 ขนาดอนุภาคของคอลลอยด์และผงของพอลิเมอร์	58
ตารางที่ 4.9 แสดงสถานะของปฏิกิริยาที่ศึกษาผลของความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยา	61
ตารางที่ 4.10 ผลของความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์	61
ตารางที่ 4.11 ผลของความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและ ยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง	62
ตารางที่ 4.12 ผลของความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อขนาดอนุภาคของคอลลอยด์และ ผงของพอลิเมอร์	62
ตารางที่ 4.13 สถานะของปฏิกิริยาที่ศึกษาผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์.....	65
ตารางที่ 4.14 ผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์	66

ตารางที่ 4.15 ผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ต่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและ
 อยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ร่วมแบบตอากิ่ง 66

ตารางที่ 4.16 ผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ต่อขนาดอนุภาคของคอลลอยด์และผงของพอลิเมอร์ .. 67

ตารางที่ 4.17 สภาวะของปฏิกิริยาที่ศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา 70

ตารางที่ 4.18 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ 70

ตารางที่ 4.19 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและ
 อยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ร่วมแบบตอากิ่ง 71

ตารางที่ 4.20 ผลของเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาต่อขนาดอนุภาคของคอลลอยด์และผงของพอลิเมอร์ 72

ตารางที่ 4.21 หมู่ฟิงชั้นที่พบจากเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคป 79

ตารางที่ 4.22 อัตราส่วนของความสูงของพีคที่ตำแหน่ง 1727 ซม⁻¹. (C=O Stretching) กับ
 ความสูงของพีคที่ตำแหน่ง 835 ซม⁻¹. (C=C bending vibration)
 ของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอากิ่ง..... 80

ตารางที่ 4.23 หมู่ฟิงชั้นที่พบจากเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรสโคป..... 83

ตารางที่ 4.24 ผลของตัวแปรต่างๆต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอากิ่ง..... 86

ตารางที่ 4.25 ผลของการเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบผสมในพอลิแลคติกแอซิดต่อสมบัติ
 ทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม 89

ตารางที่ 4.26 ความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม 93

ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองหลังทำการสกัด..... 112

ตารางที่ ค.1 ขนาดอนุภาคของอยางธรรมชาติเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวที่ปริมาณต่างๆ (1) 119

ตารางที่ ค.2 ขนาดอนุภาคของอยางธรรมชาติเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวที่ปริมาณต่างๆ (2) 119

ตารางที่ ค.3 ขนาดอนุภาคของอยางธรรมชาติที่ลำดับการเติมสารที่แตกต่างกัน 120

ตารางที่ ค.4 ขนาดอนุภาคของอยางธรรมชาติที่ความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาแตกต่างกัน..... 120

ตารางที่ ค.5 ขนาดอนุภาคของอยางธรรมชาติที่ความเข้มข้นของมอนอเมอร์แตกต่างกัน..... 121

ตารางที่ ค.6 ขนาดอนุภาคของอยางธรรมชาติที่เวลาในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกัน 121

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลที่ได้จาก ImageJ ของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ลำดับการเติมสารแตกต่างกัน	122
ตารางที่ ง.2 ข้อมูลที่ได้จาก ImageJ ของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ตัวแปรต่างๆ	124



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ.....	8
รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลที่เป็นไปได้ของหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของโมเลกุลยางธรรมชาติ.....	9
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอนุภาคยางในน้ำยางธรรมชาติ	10
รูปที่ 2.4 แผนผังการผลิตน้ำยาชั้นด้วยวิธีการปั่นแยก.....	13
รูปที่ 2.5 ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	17
รูปที่ 2.6 หัวฉีดแบบหมุน	18
รูปที่ 2.7 หัวฉีดแบบแรงดัน.....	18
รูปที่ 2.8 หัวฉีดแบบสองของไหล	19
รูปที่ 2.9 ลักษณะการไหลทางเดียวกัน	20
รูปที่ 2.10 ลักษณะการไหลสวนทางกัน.....	20
รูปที่ 2.11 ลักษณะการไหลแบบผสม	21
รูปที่ 2.12 การตัดแปรงยางธรรมชาติด้วยวิธีการต่างๆ	23
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะคอร์-เชลล์ที่เป็นไปได้จากกระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอร์ แบบคอร์-เชลล์ อิมัลชัน.....	26
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงลำดับการเติมสารโดยการเติมมอนอเมอร์ในลำดับแรก	40
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงลำดับการเติมสารโดยการเติมมอนอเมอร์ในลำดับสุดท้าย	40
รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย รุ่น BUCHI B-190 (Switzerland).....	41
รูปที่ 3.4 แสดงขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256.....	42
รูปที่ 3.5 ชุดเครื่องมือสกัดแบบซ็อกเก็ต	43
รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง.....	46
รูปที่ 4.1 แผนภาพจำลองประจุบนพื้นผิวของยางธรรมชาติ.....	48

รูปที่ 4.2 กลไกการดูดซับของ SDS บนอนุภาคยางธรรมชาติ 49

รูปที่ 4.3 ผลของการเติมตัวริเริ่มควิมีนไฮเปอร์ออกไซด์ลงในน้ำยางธรรมชาติต่อค่าศักย์ซีต้า..... 50

รูปที่ 4.4 ผลของการเติมตัวริเริ่มเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงในน้ำยางธรรมชาติต่อค่าศักย์ซีต้า..... 51

รูปที่ 4.5 แสดงกลไกการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง 52

รูปที่ 4.6 แผนภาพแสดงลำดับการเติมสารของวิธีการที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ 54

รูปที่ 4.7 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่มองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 350 และ 1000 เท่า ตามลำดับ (a) (b) และ (c) แสดงผงยางธรรมชาติที่เติมสารลดแรงตึงผิว (d) (e) และ (f) แสดงผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยวิธีการเติมสารที่ 4..... 57

รูปที่ 4.8 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมได้จากวิธีการเติมสารที่ 1 (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ 58

รูปที่ 4.9 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมได้จากวิธีการเติมสารที่ 2 (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ 59

รูปที่ 4.10 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมได้จากวิธีการเติมสารที่ 3 (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ 59

รูปที่ 4.11 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมได้จากวิธีการเติมสารที่ 4 (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ 60

รูปที่ 4.12 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมจากปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา 0.5 phr (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ 63

รูปที่ 4.22 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยเวลาทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ	73
รูปที่ 4.23 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยเวลาทำปฏิกิริยา 7 ชั่วโมง (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ	74
รูปที่ 4.24 ลักษณะของอนุภาคยางธรรมชาติ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	75
รูปที่ 4.25 ลักษณะอนุภาคของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยความเข้มข้นมอนอเมอร์ 25 phr เมื่อส่องด้วย TEM	75
รูปที่ 4.26 ลักษณะอนุภาคของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยความเข้มข้นมอนอเมอร์ 50 phr เมื่อส่องด้วย TEM	76
รูปที่ 4.27 ลักษณะอนุภาคของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยความเข้มข้นมอนอเมอร์ 75 phr เมื่อส่องด้วย TEM	76
รูปที่ 4.28 ลักษณะอนุภาคของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยความเข้มข้นมอนอเมอร์ 100 phr เมื่อส่องด้วย TEM	77
รูปที่ 4.29 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต	77
รูปที่ 4.30 กราฟ FTIR หมู่ฟังก์ชัน (a) ยางธรรมชาติ (b) พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (c) พอลิเมทิลเมทาคริเลต	79
รูปที่ 4.31 หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยปริมาณมอนอเมอร์แตกต่างกัน	80
รูปที่ 4.32 สเปกตรัมที่ได้จาก HNMR ของยางธรรมชาติ	81
รูปที่ 4.33 สเปกตรัมที่ได้จาก HNMR ของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของ ยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต	82
รูปที่ 4.34 สเปกตรัมที่ได้จาก HNMR ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต	82
รูปที่ 4.35 เสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติ	84

รูปที่ 4.36	เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมทิลเมทาคริเลต	84
รูปที่ 4.37	เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยวิธีการเติมสารที่ 4...	85
รูปที่ 4.38	กราฟการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆของ (a) พอลิแลคติกแอซิดผสมกับแผ่นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง 10% (b) พอลิแลคติกแอซิดผสมกับแผ่นยาง 10% (c) พอลิแลคติกแอซิด	90
รูปที่ 4.39	กราฟการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆของ พอลิแลคติกแอซิดผสมกับผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง 10% ที่เตรียมโดยมีความเข้มข้นของมอนอเมอร์ต่างกัน (a) 25 (b) 50 (c) 75 และ (d) 100 phr ตามลำดับ และ (e) พอลิแลคติกแอซิด	90
รูปที่ 4.40	กราฟการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆของพอลิแลคติกแอซิดผสมกับผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณยางคิดเป็น 10% ที่เตรียมโดยมีความเข้มข้นของมอนอเมอร์ต่างกัน (a) 25 (b) 50 (c) 75 และ (d) 100 phr ตามลำดับ และ (e) พอลิแลคติกแอซิด	91
รูปที่ 4.41	กราฟเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดผสมกับผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณยางคิดเป็น 10% ที่เตรียมโดยมีความเข้มข้นของมอนอเมอร์ต่างกัน 25 50 75 และ 100 phr ตามลำดับ	91
รูปที่ 4.42	กราฟความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที พอลิแลคติกแอซิดผสมกับแผ่นยาง 10% และ พอลิแลคติกแอซิดผสมกับแผ่นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง 10%	94
รูปที่ 4.43	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระกับความความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที ...	94
รูปที่ 4.44	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอนุภาคพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งกับความความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที.....	95

รูปที่ 4.45 กราฟความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที และ พอลิแลคติกแอซิดผสมกับแผ่นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง 10% ที่ความเข้มข้นมอนอเมอร์ 25 50 75 และ 100 phr ตามลำดับ..... 95

รูปที่ 4.46 กราฟความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที และ พอลิแลคติกแอซิดผสมกับแผ่นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 10% ความเข้มข้นมอนอเมอร์ 25 50 75 และ 100 phr ตามลำดับ..... 96

รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเมทิลเมทาคริเลตกับยางธรรมชาติ กับความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที ... 97

รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเมทิลเมทาคริเลตอิสระกับยางธรรมชาติ กับความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที ... 97

รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเมทิลเมทาคริเลตในพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งกับยางธรรมชาติ กับความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที..... 98

รูปที่ 4.50 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งความเข้มข้นมอนอเมอร์ 25 phr..... 99

รูปที่ 4.51 ลักษณะรอยแตกชิ้นงานหลังทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบค้อนเหวี่ยง (a) พอลิแลคติกแอซิด (b) พอลิแลคติกแอซิดผสมแผ่นยางธรรมชาติ 100

รูปที่ 4.52 ลักษณะรอยแตกชิ้นงานหลังทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบค้อนเหวี่ยง (a) พอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณมอนอเมอร์ (b) 25 (c) 50 (d) 75 และ (e) 100 phr ตามลำดับ..... 101

รูปที่ ข.1 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยวิธีการเติมสารที่ 1... 114

รูปที่ ข.2 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยวิธีการเติมสารที่ 2...	114
รูปที่ ข.3 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยวิธีการเติมสารที่ 3...	115
รูปที่ ข.4 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยวิธีการเติมสารที่ 4...	115
รูปที่ ข.5 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา	
1.0 phr.....	115
รูปที่ ข.6 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา	
1.5 phr.....	116
รูปที่ ข.7 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา	
2.0 phr.....	116
รูปที่ ข.8 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณมอนอเมอร์ 25 phr	116
รูปที่ ข.9 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณมอนอเมอร์ 50 phr	117
รูปที่ ข.10 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณมอนอเมอร์ 75 phr ...	117
รูปที่ ข.11 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เวลาในการทำปฏิกิริยา	
1 ชั่วโมง	117
รูปที่ ข.12 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เวลาในการทำปฏิกิริยา	
5 ชั่วโมง	118
รูปที่ ข.13 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เวลาในการทำปฏิกิริยา	
7 ชั่วโมง	118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางธรรมชาติจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญมากชนิดหนึ่งของประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกยางธรรมชาติเป็นลำดับต้นๆของโลก โดยทั่วไปน้ำยางสดจะได้รับการกรีดยาง หลังจากนั้นน้ำยางสดจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำยางข้น (concentrated or high ammonia latex) น้ำยางข้นที่ผลิตได้จะถูกแปรสภาพเป็นยางแผ่นเพื่อนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ซึ่งในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์จะใช้ยางธรรมชาติในรูปของยางผงเป็นสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ในด้านความแข็ง เนื่องจากยางธรรมชาติมีคุณสมบัติเด่นในเรื่องความยืดหยุ่น (elasticity) สูง[1] โดยสารตัวเติมที่ดีนั้นควรมีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตรและมีขนาดสม่ำเสมอ ซึ่งการที่สารตัวเติมมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอจะทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ดี[2] แต่เนื่องจากในการใช้ยางธรรมชาติเป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ จะเริ่มต้นจากการนำยางแผ่นมาบดและนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ซึ่งการบดยางนั้นไม่สามารถบดได้ในภาวะปกติ การบดยางจะบดได้ภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ดังนั้นการบดยางจึงเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูงและการบดจะไม่สามารถควบคุมขนาดของอนุภาคยางผงที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นถ้าสามารถเตรียมยางผงได้โดยตรงจากน้ำยางข้นด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงสภาพของเหลวชั้นหนืด สารละลายหรือสารแขวนลอยให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของอนุภาคชนิดต่างๆ ข้อดีของการอบแห้งด้วยเทคนิคนี้คือ สามารถควบคุมขนาดของอนุภาค และอนุภาคที่ได้เป็นอนุภาคทรงกลม Disuke และคณะได้ศึกษาการเตรียมยางผงจากน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย แต่เนื่องจากคุณสมบัติด้านการเหนียวติดกันของยางธรรมชาติทำให้ง่ายผงที่เตรียมในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเกิดการจับตัวกันของอนุภาคยาง[3] ต่อมาธิปพงศ์ได้ศึกษาการเตรียมยางผงจากน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยมีการเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อช่วยป้องกันการเกาะติดกันของยางผง แต่ยางผงที่ได้ยังคงเกิดการจับตัวกัน[4] ดังนั้นในการแก้ปัญหาการเหนียวติดกันของอนุภาคยางจะใช้เทคโนโลยีการห่อหุ้มอนุภาคสารสำคัญ (encapsulation) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเรื่องการเหนียวติดกัน

เนื่องจากคุณสมบัติการเหนียวติดกันของยางธรรมชาติทำให้ไม่สามารถเตรียมยางผงได้โดยตรง[4, 5] จึงแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการนำเทคโนโลยีการห่อหุ้มอนุภาคสารมาประยุกต์ใช้ เทคโนโลยีการห่อหุ้มอนุภาคสารสำคัญนั้นมีหลักการคือสารสำคัญหรือสารที่ถูกห่อหุ้ม (core) จะถูกห่อหุ้มด้วยสารห่อหุ้ม (shell) เพื่อยืดอายุการใช้งานหรือช่วยลดการเกาะติดกันของอนุภาคสารสำคัญ ประโยชน์ที่ได้จากการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งระหว่างยางธรรมชาติและมอลโทเดกซ์ทริน และการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งระหว่างยางธรรมชาติและซิลิกาด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งทั้งสองชนิดไม่เกาะติดกันแต่มีข้อจำกัดในการใช้งานที่ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์เมทริกซ์[5, 6]

เทคนิคการห่อหุ้มอนุภาคสารสำคัญหรือเทคนิคการกักเก็บสารนี้มีหลากหลายวิธี เทคนิคหนึ่งที่ยอมรับใช้คือ อินเทอร์เฟซียัลพอลิเมอร์ไรเซชัน (interfacial polymerization) โดยจะมีการเติมมอนอเมอร์ลงไปในสารละลายคอร์ และทำให้เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างรวดเร็วบนพื้นผิวของสารที่เป็นคอร์ จนเกิดเป็นแคปซูลของสารพอลิเมอร์ห่อหุ้มคอร์ไว้ภายใน[7] โดยเทคนิคนี้จะก่อให้เกิดโครงสร้างแบบคอร์-เชลล์ของอนุภาคพอลิเมอร์ที่สำคัญอยู่สองแบบ คือ คอร์แข็ง-เชลล์นุ่ม (hard core – soft shell) และคอร์นุ่ม-เชลล์แข็ง (soft core – hard shell) ตัวอย่างของสารที่ใช้เป็นส่วนแข็ง เช่น เมทิลเมทาคริเลต (methylmethacrylate, MMA) สไตรีน (styrene) อะคริโลไนทริล (Acrylonitrile) และไวนิลคลอไรด์ (vinylchloride) เป็นต้น ตัวอย่างของสารที่ใช้เป็นส่วนนุ่ม เช่น ยางธรรมชาติ พอลิบิวทาไดอิน (polybutadiene) และยางสังเคราะห์สไตรีน-บิวทาไดอิน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) เป็นต้น ซึ่งการกราฟต์นั้นจะเกิดขึ้นระหว่างคอร์และเชลล์ พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบคอร์แข็ง-เชลล์นุ่ม จะมีสมบัติแข็งเปราะจึงใช้เป็นสารเคลือบผิวและกาว ส่วนพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบคอร์นุ่ม-เชลล์แข็ง จะมีสมบัติเหนียวสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นสารลดแรงกระแทกได้ งานวิจัยนี้จะนำเทคนิคการอินเทอร์เฟซียัลพอลิเมอร์ไรเซชัน ผ่านกระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอร์แบบคอร์-เชลล์อิมัลชัน[8] โดยจะนำเมทิลเมทาคริเลตมาทำให้เกิดการโคพอลิเมอร์ไรเซชันบนอนุภาคของยางธรรมชาติ ซึ่งมีโครงสร้างแบบคอร์นุ่ม-เชลล์แข็ง พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติเอาไว้เพื่อป้องกันการเกาะติดกันของอนุภาคยางธรรมชาติ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้การกราฟต์โคพอลิเมอร์แบบคอร์-เชลล์อิมัลชันในการป้องกันการเกาะติดกันของอนุภาคยางธรรมชาติ โดยมีสมมุติฐานว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตจะเป็นตัวห่อหุ้มอนุภาคของยางธรรมชาติไว้ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดยางผงและลักษณะของยางผงที่ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันและการอบแห้งแบบพ่นฝอย

1.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน

1.2.3 ศึกษาความสามารถในการปรับปรุงคุณสมบัติการรับแรงกระแทกของการเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตในพอลิเมอร์เมทริกซ์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาปริมาณสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของน้ำยางข้น

1.3.2 ศึกษาลำดับการเติมมอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยา ที่เหมาะสมของการเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน

1.3.3 ศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยศึกษาตัวแปรต่างๆ ดังนี้

- | | |
|--|--------------------|
| - ปริมาณตัวริเริ่ม (กรัมต่อ100กรัมยาง) | 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 |
| - อัตราส่วนเมทิลเมทาคริเลตต่อยางธรรมชาติ (กรัมต่อ100กรัมยาง) | 25, 50, 75, 100 |
| - เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง) | 1, 3, 5, 7 |

1.3.4 เตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต ด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 100 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารตัวอย่าง 8 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศ 750 ลิตรต่อชั่วโมง

1.3.5 ตรวจสอบสมบัติพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งที่สังเคราะห์ได้

- วิเคราะห์ประสิทธิภาพการกราฟต์ของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่ง
- ตรวจสอบเสถียรภาพของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่ง ด้วยเครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า (Zetasizer)
- ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่ง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron microscope, TEM)
- ตรวจสอบลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
- ศึกษาและวิเคราะห์ส่วนประกอบของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer) และ เครื่องโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (H-Nuclear magnetic resonance spectrometer)
- ทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA)

1.3.6 ศึกษาอิทธิพลของการเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งของยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตใน พอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยพิจารณาจากสมบัติทางกล ดังนี้

- ค่าการรองรับการกระแทก (impact strength)
- คุณสมบัติทางความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถป้องกันการเกาะติดกันของยางธรรมชาติผงได้ และทราบสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่ง นอกจากนี้ยังสามารถนำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งที่ได้ไปเป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความเหนียวให้แก่พอลิเมอร์เมตริกซ์ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติถูกนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ เพื่อช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่พอลิเมอร์ โดยเริ่มต้นจากการนำยางแผ่นมาตัดหรืออบให้เป็นชิ้นเล็กๆ และนำไปผสมรวมกับพอลิเมอร์ที่มีความแข็งเปราะเพื่อช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่พอลิเมอร์นั้นๆ อาทิเช่น งานวิจัยของ วรวรรณ และคณะในปี 2008 [26] ได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเอททิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยเตรียมจากกระบวนการผสมภายใต้อุณหภูมิสูง (melt mixing process) ที่ 160 องศาเซลเซียส โดยในการผสมยางธรรมชาตินี้จะมีการดัดแปลงยางธรรมชาติให้อยู่ในรูปของยางผสมน้ำมัน (oil extended natural rubber, OENR) ก่อน ในกระบวนการผสมนี้มีการใส่สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) เพื่อช่วยให้ยางธรรมชาติและพอลิเอททิลีนความหนาแน่นสูงมีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยผลการทดลองพบว่าที่สัดส่วนของยางธรรมชาติต่อพอลิเอททิลีนความหนาแน่นสูงต่ำ จะว่าพอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยกว่าจะเป็นเฟสที่กระจาย (dispersed phase) ในพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ (matrix phase) ซึ่งสัดส่วนที่ทำให้เกิดโครงสร้างแบบเฟสต่อเนื่อง (Co-continuous phase morphology) คือ สัดส่วน OENR/HDPE = 50/50 และ 60/40 และพบว่าสัดส่วนของยางธรรมชาติที่ผสมในพอลิเอททิลีนความหนาแน่นสูงนั้นจะส่งผลต่อความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม ยิ่งปริมาณของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นพอลิเมอร์ผสมก็จะมีความยืดหยุ่นมากขึ้น เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Bitinis และคณะในปี 2011[27] ได้ปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด ด้วยการผสมยางธรรมชาติร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ลงในพอลิแลกติกแอซิดผ่านกระบวนการผสมภายใต้อุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส พบว่ามีการกระจายตัวของยางธรรมชาติในลักษณะของหยดภายในพอลิแลกติกแอซิดที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ เมื่อนำพอลิเมอร์ผสมไปขึ้นรูปและทดสอบสมบัติพบว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเหนียว(ductility) และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลกติกแอซิดก่อนเติมยางธรรมชาติ จะเห็นได้ว่างานวิจัยเหล่านี้แสดงว่ายางธรรมชาติมีความสามารถในการเพิ่มความยืดหยุ่นให้พอลิเมอร์ชนิดอื่นได้

2.1.1 องค์ประกอบของยางธรรมชาติ[9]

ยางธรรมชาติที่สามารถนำไปแปรรูปและใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์กันอย่างแพร่หลายคือยางพันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียนซิส (Hevea brasiliensis) ซึ่งมีต้นกำเนิดมาจากประเทศแถบอะเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ ต่อมาถูกนำมาแพร่พันธุ์ต่อทางทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเริ่มจากศรีลังกา มาเลเซีย ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการปลูกต้นยางฮีเวียบราซิลเลียนซิสมาจนถึงปัจจุบัน ต้นยางที่ปลูกในอะเมซอนมักพบว่าเป็นโรค Dothidella แต่เมื่อนำมาปลูกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ พบว่ามีความต้านทานต่อโรคได้ดีมาก ดังนั้นประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมไปถึงประเทศไทยจึงเป็นแหล่งผลิตยางธรรมชาติที่สำคัญของโลก น้ำยางธรรมชาติจากต้นยางสกุลฮีเวียบราซิลเลียนซิสมีลักษณะเป็นของเหลวคอลลอยด์สีขาวขุ่น โดยได้จากการกรีดตัดส่วนของท่อน้ำยางในต้นยาง (laticiferous vessel) น้ำยางที่กรีดได้นี้จะถูกรเรียกว่า น้ำยางสด

น้ำยางสดที่กรีดได้ยงต้นยางมีสีขาวขุ่น มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ประมาณ 6 และมีค่าความหนาแน่นระหว่าง 0.975-0.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในน้ำยางจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่เป็นอนุภาคของยางธรรมชาติ ซึ่งอนุภาคยงเหล่านี้จะกระจายแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ น้ำยางสดที่ได้จากการกรีดต้นยางธรรมชาติจะมีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

- ส่วนเนื้อยาง (Rubber phase) เป็นส่วนที่เบาที่สุดคิดเป็น 30-36 % โดยอนุภาคของยางธรรมชาติจะมีขนาด 0.05-3 ไมครอน อนุภาคส่วนมากจะมีลักษณะเป็นทรงกลม และที่ผิวของอนุภาคยงจะถูกล้อมด้วยชั้นของโปรตีนและไขมัน โปรตีนและไขมันที่ล้อมรอบอนุภาคของยางธรรมชาติจะทำให้อนุภาคของยงสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างเสถียร
- ส่วนชั้นน้ำหรือซีรัม (Serum phase) คิดเป็น 44-55% ในส่วนของชั้นน้ำนี้จะประกอบไปด้วยสารที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน โปรตีนบางชนิด คาร์โบไฮเดรต เอนไซม์ และไอออนของโลหะ เป็นต้น
- ส่วนตกตะกอน (Bottom phase) คิดส่วนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าส่วนอื่นๆ คิดเป็น 15-20% ส่วนประกอบที่สำคัญในส่วนนี้คือ อนุภาคลูทอยด์ (lutoid particle) ซึ่งลูทอยด์นี้มีลักษณะเป็นทรงกลมโดยมีชั้นของเยื่อหุ้มปกคลุมอนุภาคอยู่ เยื่อหุ้มนี้ไวต่อการแพร่ผ่าน (osmotic sensitivity membrane) ซึ่งจะเสียความเสถียรได้ง่าย ภายในอนุภาคของลูทอยด์จะประกอบไปด้วยสารจำพวกโปรตีน คาร์โบไฮเดรต กรด และเกลือ

ต่างๆ ในส่วนตกตะกอนนี้มีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ที่ 5.5 ดังนั้นในน้ำยางที่ไม่ถูกกำจัด เอาลูทอยด์ออก มักจะเกิดการจับตัวกันเองตามธรรมชาติ

สรุปได้ว่าในน้ำยางสดจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเนื้อยาง (Dry Rubber Content, DRC) อยู่เพียง 30-36 % และส่วน และส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non Rubber Content, NRC) ประมาณ 5-6 % ทั้งนี้ปริมาณขององค์ประกอบในน้ำยางธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สภาพดินฟ้าอากาศ สายพันธุ์และอายุของต้นยางธรรมชาติ เวลาที่กรีดยาง เป็นต้น โดยส่วนประกอบของน้ำยางสดจะแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบในน้ำยางธรรมชาติ

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC)	36
โปรตีนและกรดอะมิโน	1.4
ไขมัน	1.6
คาร์โบไฮเดรต	1.6
สารอินทรีย์	0.5
อื่นๆ	0.4
น้ำ	58.5

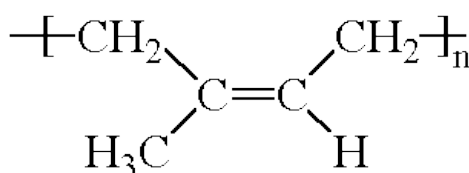
จะเห็นได้ว่าในน้ำยางธรรมชาตินั้นมีส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางอยู่หลากหลายชนิด ส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางธรรมชาตินี้จะส่งผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติแตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางนี้ออกได้เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1. โปรตีนและกรดอะมิโน ยางธรรมชาติจะประกอบด้วยโปรตีนและกรดอะมิโนหลายชนิด เช่น แอฟา-โกลบูลิน (α -globulin) กรดกลูตามิก (glutamic acid) และกรดแอสพาติก (aspartic acid) ซึ่งจะพบมากในซีรัม สารในกลุ่มนี้เป็นสารที่ทำให้ยางธรรมชาติมีความเหนียวติดกัน (stiffening) มีความแข็งแรงต่อการฉีกขาดมากขึ้น (tear strength) การเกิดความร้อนสะสมมากขึ้น (heat build-up) ความต้านทานต่อการแตกเมื่อได้รับแรงมากขึ้น (dynamic crack growth) และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตามธรรมชาติของปฏิกิริยาการทำให้อย่างคงรูป

2. ไขมัน ในน้ำอย่างธรรมชาติ นั้นจะมีไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ 3 กลุ่มหลักๆ คือ นิวทรอลลิปิด (neutral lipid) ไกลโคลิปิด (glycolipids) และฟอสโฟลิปิด (phospholipids) ซึ่งไขมันในน้ำจะส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อการเกิดออกซิเดชันจากความร้อน
3. คาร์โบไฮเดรต คาร์โบไฮเดรตที่พบในน้ำอย่างธรรมชาติ ส่วนมากจะเป็นกลุ่มของน้ำตาล เช่น คิวบราชีทอล (quebrachitol) ซูโครส (sucrose) กลูโคส (glucose) กาแลคโตส (galactose) ฟรุกโตส (fructose) แรฟฟิโนส (raffinose) และเพนโตส (pentose) โดยน้ำตาลเหล่านี้จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายได้ง่ายและจะเปลี่ยนเป็นกรดไขมันที่ระเหยได้ ซึ่งค่ากรดไขมันที่ได้เหยได้จะเป็นค่าที่บอกว่าน้ำอย่างธรรมชาติมีการเก็บรักษาที่ดีหรือไม่ และมีเสถียรภาพสูงหรือต่ำ

2.1.2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ[9]

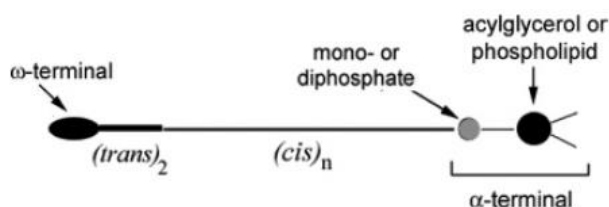
ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีสูตรทางเคมี C_5H_8 มีชื่อทางเคมีว่า พอลิไอโซพรีน (polyisoprene) และมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 หน่วยไอโซพรีนของยางธรรมชาติจะต่อกันแบบหัวต่อหาง (Head to tail) โครงสร้างหลักของยางธรรมชาติ จะประกอบด้วย ไอโซพรีนที่มีโครงสร้างแบบทรานส์ (trans-isoprene) อยู่ 2 หน่วย และที่เหลือจะเป็นซิสไอโซพรีน (cis-isoprene) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนไม่มีขั้ว ดังนั้นยางธรรมชาติจะละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว โดยทั่วไปแล้วโมเลกุลยางธรรมชาติจะจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบหรือแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงถึงช่วงที่เหมาะสมหรือได้รับแรงดึงที่มากพอ โมเลกุลของยางธรรมชาติจะเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือ การเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature) การตกผลึกนี้จะใช้เวลานานและสามารถทำให้กลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่ออย่างได้รับความร้อน ในขณะที่การเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึง (strain-induced crystallization) ผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

2.1.3 เคมีของอนุภาคยางธรรมชาติ[10]

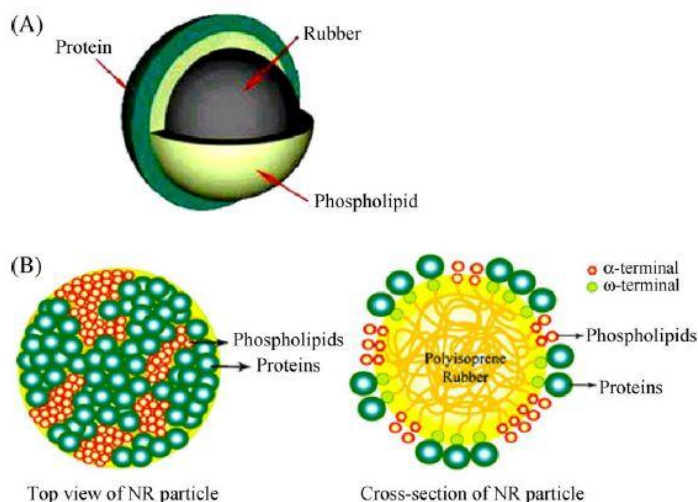
จากการศึกษาโครงสร้างของยางธรรมชาติพบว่ายางธรรมชาติมีหมู่ฟังก์ชันที่จุดเริ่มต้น (ปลายโอเมก้า, ω -terminal) และปลายสายโซ่ (ปลายแอลฟา, α -terminal) ที่ต่ออยู่กับโมเลกุลโปรตีนและฟอสโฟลิปิดตามลำดับ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลที่เป็นไปได้ของหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของโมเลกุลยางธรรมชาติ[10]

จากโครงสร้างที่หมู่ปลายทั้งสองของยางธรรมชาตินี้ทำให้อนุภาคของยางธรรมชาติถูกห่อหุ้มด้วยโปรตีนและไขมัน ซึ่งทำให้อนุภาคของยางในน้ำยางธรรมชาติมีพื้นผิวเป็นประจุลบ ดังนี้

- แหล่งโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยาง โครงสร้างของโปรตีนนั้นประกอบด้วยกรดอะมิโนมาเรียงต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ โครงสร้างของกรดอะมิโนประกอบด้วย 3 ส่วน คือ หมู่อะมิโน (amino group, NH_2) หมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic group, COOH) และโซ่ข้าง (R) ซึ่งหมู่ทั้งสองทำให้โปรตีนมีสมบัติแอมโฟเทอริก (Amphoteric) คือสามารถเป็นได้ทั้งประจุบวกและลบ ขึ้นอยู่กับสภาพของตัวกลาง ในสภาพที่เป็นกรดโปรตีนจะแสดงประจุบวก ส่วนในสภาพที่เป็นด่างโปรตีนจะแสดงประจุลบ และสภาพที่เป็นกลางประจุบวกและลบจะไม่แตกต่างกัน เรียกสภาพที่ประจุบวกและลบไม่แตกต่างกันนี้ว่า จุดไอโซอิเล็กตริก โดยโปรตีนที่อยู่ในน้ำยางที่พบมากคือ แอลฟา-ไกลูมินิน โปรตีนชนิดนี้มีจุดไอโซอิเล็กตริกที่ค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 4.8 ในขณะที่น้ำยางธรรมชาติมีค่าความเป็นกรดต่างที่ 6.5-7.0 ดังนั้นจึงส่งผลให้อนุภาคยางแสดงประจุเป็นลบ
- ไขมัน ไขมันส่วนใหญ่ที่พบในน้ำยางธรรมชาติคือฟอสโฟลิปิด เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นด่างฟอสโฟลิปิดจะถูกไฮโดรไลซ์ทำให้เกิดอนุมูลอิสระของกรดไขมัน (fatty acid anion) จึงส่งผลให้อนุภาคยางที่กระจายตัวในน้ำแสดงประจุเป็นลบ



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอนุภาคยางในน้ำยางธรรมชาติ[11]

2.1.4 สมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ[9, 12]

ยางธรรมชาติมีสมบัติโดดเด่นในเรื่องของความยืดหยุ่น (elasticity) ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ความเหนียวติดกัน (tack) เป็นต้น ทำให้ยางธรรมชาติเหมาะสำหรับใช้งานในเชิงวิศวกรรมที่ต้องรับแรงสูง และถูกใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติในด้านความยืดหยุ่นให้แก่พอลิเมอร์เมทริกซ์ สมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ ได้แก่

- 1) ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อยางธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากมีแรงภายนอกมากกระทำ เมื่อแรงนั้นหมดไปยางธรรมชาติสามารถกลับคือรูปร่างที่มีขนาดเดิมหรือขนาดใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็ว
- 2) ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงเนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด การเกิดผลึกนี้จะช่วยให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงที่สูงทั้งก่อนและหลังการทำให้คงรูป
- 3) ความทนต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากความสามารถในการเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึงทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูง โดยผลึกที่เกิดขึ้นจะมีการเรียงตัวในแนวเดียวกับแรงดึงและตั้งฉากกับรอยฉีกขาด ทำให้ขาดขวางการฉีกขาดที่เกิดขึ้น

- 4) การกระด้างกระดอง (rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดองที่สูงมาก และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะมีการสูญเสียพลังงานความร้อนน้อย ทำให้เมื่อถูกใช้ในงานเชิงพลวัตจะเกิดความร้อนสะสมต่ำ ทำให้ยางธรรมชาติเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นยางล้อรถขนาดใหญ่ เช่น ยางล้อเครื่องบิน หรือ ยางรถบรรทุก
- 5) ความทนต่อการขัดถู (abrasion resistance)
- 6) ความเหนียวติดกัน (tack) ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน โดยเฉพาะยางที่ไม่ได้ผ่านการคงรูปสามารถใช้ยึดติดกับวัสดุอื่นได้
- 7) ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation) ยางธรรมชาติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะประมาณ 10^{15} โอห์ม-ซม.
- 8) ความทนทานต่อสารเคมี (chemical resistance) เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถทนต่อสารละลายที่มีขี้ผึ้งได้ เช่น อะซิโตน และ แอลกอฮอล์ เป็นต้น
- 9) สมบัติการเสื่อมสภาพ (aging property) ยางธรรมชาติมีความอ่อนไหวในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ โดยเฉพาะเมื่อมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางได้ง่าย นอกจากนี้แล้วยางธรรมชาติยังไม่สามารถทนต่อโอโซนได้อีกด้วย
- 10) ความแปรปรวนของยางธรรมชาติ ความไม่สม่ำเสมอในองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบอยู่ในน้ำยาง ซึ่งถูกกำหนดโดยตัวแปรทางสภาพทางภูมิอากาศและทางชีวภาพ เช่น ลักษณะดิน ฤดูกาล สายพันธุ์ยาง อายุของต้นยาง เวลาที่กรีตน้ำยาง เป็นต้น

2.2 น้ำยางข้น[13,14]

ในน้ำยางสดจะมีปริมาณของเนื้อยางอยู่ประมาณร้อยละ 36 เนื้อยางจะมีลักษณะเป็นอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในซีรัมหรือน้ำ และมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ อนุภาคยางมีความถ่วงจำเพาะ 0.92 ซึ่งเบากว่าน้ำที่เป็นตัวกลางซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ 1.02 แต่จะเห็นได้ว่าอนุภาคยางนั้นจะไม่ลอยอยู่บนผิวของน้ำ ทั้งนี้เป็นผลมาจากแรงผลักดันซึ่งกันและกันของอนุภาคยางธรรมชาติ ทำให้ยางธรรมชาติเคลื่อนที่ไปมาแบบไร้ทิศทาง (Brownian Movement) อยู่เสมอ อนุภาคยางธรรมชาติจะหยุดเคลื่อนที่เมื่อมีประจุไฟฟ้ารวมของน้ำยางเป็นศูนย์ (Isoelectric point) และจะจับกันเป็นก้อนลอยอยู่บนผิวของซีรัม ดังนั้นจึงต้องมีการถนอมสภาพของน้ำยางโดยการเติมแอมโมเนียลงไปให้น้ำยางแอมโมเนียที่เติมจะทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนจะไปล้อมรอบอนุภาค

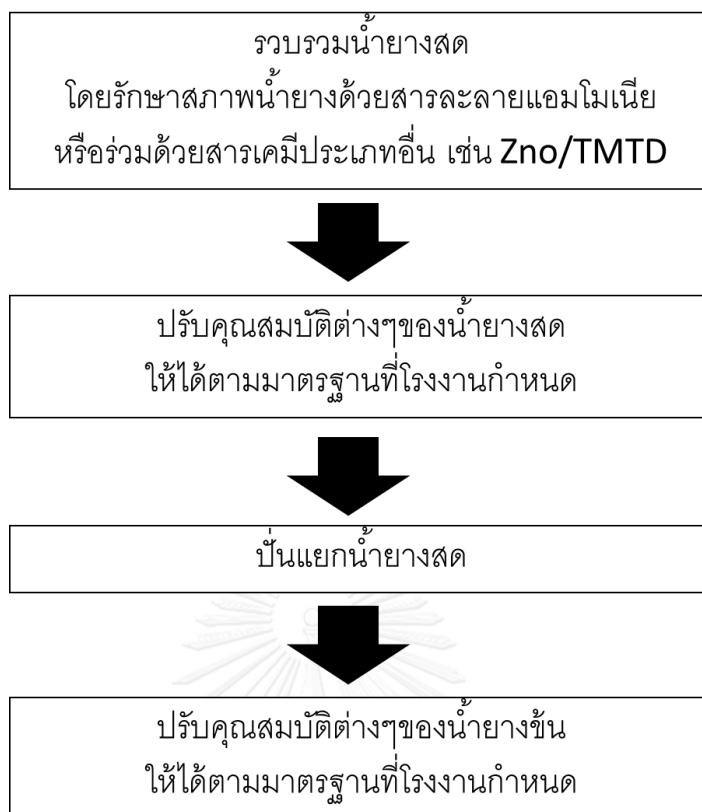
ของยางธรรมชาติเอาไว้ และทำหน้าที่เป็นด่านป้องกันอนุภาคยางธรรมชาติจากประจุบวกใดๆที่จะทำให้ประจุบนพื้นผิวอนุภาคยางเป็นศูนย์นั่นเอง

เนื่องจากปริมาณเนื้อยางในน้ำยางสดที่มีอยู่ร้อยละ 36 มีปริมาณของน้ำมากเกินไปทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ดังนั้นจึงต้องมีการลดปริมาณของส่วนที่เป็นน้ำลงก่อน จึงค่อยเติมสารกันบูดหรือแอมโมเนียเพื่อป้องกันการจับตัวกันของยางในภายหลัง และจะเรียกน้ำยางชนิดนี้ว่า น้ำยางข้น (High Ammonia Latex หรือ Concentrated Latex) ซึ่งการทำน้ำยางขั้้นนั้นสามารถทำได้ 3 วิธี คือ

1) การระเหยน้ำออก (Evaporation method) ซึ่งน้ำยางจะถูกให้ความร้อนเพื่อระเหยน้ำออก น้ำยางขั้้นที่ได้จากกระบวนการนี้จะเรียกว่า Evaporation Latex

2) การทำครีมมิ่ง (Creaming method) เป็นการเติมสารบางชนิด (Creaming agents) ลงไป เพื่อให้อนุภาคยางโตขึ้นและหยุดการเคลื่อนที่ น้ำยางขั้้นที่ได้จากกระบวนการนี้จะเรียกว่า Creamed Latex

3) การปั่นแยก (Centrifuging method) เป็นการแยกส่วนที่ไม่ใช่ยางออกจากส่วนที่เป็นยาง โดยอาศัยแรงเหวี่ยง น้ำยางขั้้นที่ได้จากกระบวนการนี้จะเรียกว่า Centrifuged Latex ซึ่งการเตรียมน้ำยางขั้้นด้วยวิธีนี้เป็นที่นิยมมากเนื่องจากน้ำยางขั้้นที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง และใช้เวลาในการผลิตน้อย ในประเทศไทยจะผลิตน้ำยางขั้้นด้วยวิธีนี้เป็นส่วนมาก



รูปที่ 2.4 แผนผังการผลิตน้ำยาชั้นด้วยวิธีการปั่นแยก

2.3 ยางผง (Powered rubber)[15]

กระบวนการที่ใช้ในการผลิตยางผง ได้แก่

1) การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Ambient grinding)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการบดตัดเชิงกลภายใต้อุณหภูมิต่ำ เครื่องมือพื้นฐานที่ใช้คือ เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง โดยตัวลูกกลิ้งจะถูกเจาะร่องให้มีขอบที่แหลมคม เพื่อช่วยในการฉีกและตัดเศษยางให้มีขนาดเล็กตามต้องการ ยางผงที่ได้จากกระบวนการนี้จะต้องนำไปผ่านกระบวนการต่างๆก่อนที่จะนำไปใช้งาน เช่น การจำแนกขนาดอนุภาคยางผง (coarse crumb sizing and ultra fine sizing) การแยกเอาโลหะและเส้นใยออก (Metal and fiber separation) ซึ่งการกระจายของขนาดอนุภาคยางผงที่ได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของการนำไปผ่านเครื่องบดตัดและชนิดของเครื่องบดตัดที่ใช้ โดยทั่วไปยางผงที่ได้จะมีขนาดเล็กได้ถึง 177 ไมครอน

2) การบดภายใต้อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการบดตัดเชิงกลภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิลiquid nitrogen โดยจะเริ่มต้นจากการทำเศษยางขนาดเล็กกว่า 3 นิ้ว ไปแช่ไว้ในไนโตรเจนเหลว หลังจากนั้นจะนำไปผ่านเครื่องบดผสมแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) หรือเครื่องบดผสมแบบพิน (pin mill) ยางผงที่จะถูกทำให้แห้ง หลังจากนั้นจะทำการแยกโลหะและสิ่งแปลกปลอมออก และในขั้นตอนสุดท้ายยางผงจะถูกนำไปการจำแนกขนาดอนุภาค

รูปร่าง ขนาด การกระจายตัวของขนาดอนุภาคยาง และลักษณะพื้นผิวของยางผงที่ได้จาก 2 กระบวนการจะมีความแตกต่างกัน ยางผงที่ได้จากการบดที่อุณหภูมิต่ำจะมีขนาดอนุภาคใหญ่ รูปร่างไม่แน่นอนและมีพื้นผิวขรุขระ ในขณะที่ยางผงที่ได้จากการบดภายใต้อุณหภูมิต่ำ การบดจะเกิดขึ้นในขณะที่ยางมีลักษณะแข็งเปราะ ดังนั้นยางผงที่ได้จะเกิดจากการแตกหักของเศษยาง ทำให้ขนาดของอนุภาคยางมีขนาดเล็ก แต่มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคมากกว่า และพื้นผิวค่อนข้างเรียบ

การนำยางผงไปใช้ประโยชน์

1. นำยางผงไปผสมกับยางมะตอยเพื่อใช้ราดถนน โดยยางผงจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีขึ้น และช่วยเพิ่มอุณหภูมิต่ำในการอ่อนตัวของยางมะตอย
2. นำยางผงไปผสมกับยางมะตอยและทรายทำเป็นพื้นสนามเทนนิสและลู่วิ่งในสนามกีฬา
3. ใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับพอลิเมอร์บางชนิด โดยยางผงจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ได้ เช่น ความทนทานต่อแรงกระแทก (impact resistance)

2.4 กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) [20]

เนื่องจาก ในการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ด้วยสารตัวเติมนั้น ขนาดและการกระจายของสารตัวเติมที่ใช้จะส่งผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ ซึ่งการบดยางเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูงและ การบดจะไม่สามารถควบคุมขนาดของอนุภาคยางที่เกิดขึ้นได้ จึงมีนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ข้อดีของการอบแห้งแบบพ่นฝอย คือ สามารถควบคุมขนาดของอนุภาค และอนุภาคที่ได้เป็นอนุภาคทรงกลม

งานวิจัยของ Yiqun และคณะในปี 2006 [28] ได้ทำการศึกษาคณะปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่มีความเสียดทาน (friction materials) ด้วยยางผง โดยศึกษาการใช้ยางผงที่ใช้ในการทดลองเตรียมได้จากการทำวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยรังสี น้ำยางที่ผ่านการฉายรังสีจะถูกนำไปผ่าน

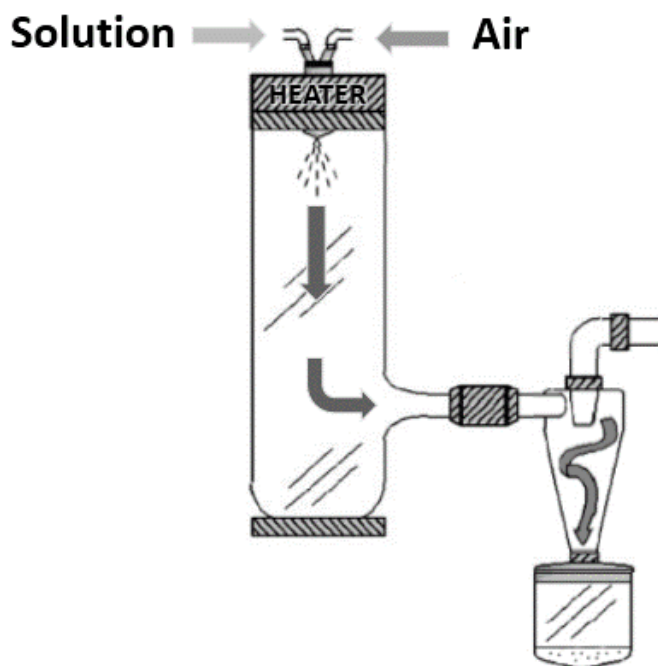
กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นยางผง (Ultrafine full vulcanized powdered rubber) ยางผงที่ได้จะมีขนาดอนุภาคประมาณ 100 – 200 นาโนเมตร จากผลการศึกษาพบว่า ยางผงจะช่วยเสริมความเหนียวให้กับพอลิเมอร์ได้ดี เนื่องจากอนุภาคของยางผงมีขนาดเล็กทำให้เกิดการกระจายตัวของยางได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเนื่องจากการที่มีอนุภาคขนาดเล็กทำให้อนุภาคของยางผงสามารถยึดเกาะกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี ในปี 2002 Jinliang และคณะ [29] ได้ทำการเตรียมยางผงจากน้ำยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว โดยใช้น้ำยางผสมระหว่างบิวทาไดอีนกับสไตรีน ที่มีความเข้มข้นของของแข็งรวมร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก น้ำยางผสมจะถูกนำมาเติมสารไตรเมทิลออลโพรเพนไตรอะคริเลต (trimethylol propane triacrylate) และถูกป้อนเข้าสู่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่ภาวะในการเตรียมยางผงคือ อุณหภูมิ 140-160 องศาเซลเซียส โดยจะได้ยางผงที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 500 นาโนเมตร

นอกจากยางผงชนิดนี้แล้วยังมีการเตรียมยางผงจากน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยตรง อาทิเช่น Disuke และคณะในปี 2006[3] ทำการเตรียมยางผงจากน้ำยางธรรมชาติโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยภาวะที่ใช้ในการเตรียมยางผงคือ ความถี่ของเครื่อง 250-1200 เฮิร์ตซ์ และอุณหภูมิ 40-100 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำยางชั้นที่มีเนื้อยาง (DRC) อยู่ที่ร้อยละ 20-50 เนื่องจากถ้าใช้น้ำยางชั้นที่มีเนื้อยางมากกว่าร้อยละ 60 น้ำยางจะมีความหนืดมากเกินไปซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาการติดกันของยางในหีบอบระหว่างการพ่นแห้ง หลังจากนั้นนำยางผงไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรงดึง ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และมอดูลัสของยาง เมื่อนำสมบัติเชิงกลของยางผงมาเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheets) พบว่ายางทั้งสองชนิดมีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกัน ในปี 2009 แซ่ฮุ่ยและคณะ[30] ได้สังเคราะห์เป็นเทอร์โมพลาสติกจากยางธรรมชาติ (thermoplastic natural rubber, TPNR) โดยนำยางธรรมชาติมาผสมกับพอลิเอททิลีนความหนาแน่นสูง ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากยางธรรมชาติจะเตรียมได้จากการบดพอลิเอททิลีนความหนาแน่นสูงผสมกับยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติที่นำมาผสมจะเตรียมจากการใช้น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ไปผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้หัวฉีดชนิดแรงดัน ที่แรงดัน 200 กิโลปาสกาล และควบคุมให้อุณหภูมิขาเข้าอยู่ที่ 160 องศาเซลเซียส พบว่ายางผงที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมขรุขระและยึดติดกัน ผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนของยางผงธรรมชาติต่อพอลิเอททิลีนที่ 9 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก จะทำให้ได้เทอร์โมพลาสติกที่มีค่าความยืดหยุ่น และค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสูงสุด จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติมีคุณสมบัติเด่นด้านการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิเมอร์ จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่ายางผงที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะของอนุภาคที่มีการยึดติดกัน ซึ่งได้มีการศึกษาการแก้ไขการยึดเกาะติดกันของยางธรรมชาติ ในปี 2006 Masaki และคณะ[31] ได้ทำการแก้ปัญหาคาการเกาะติดกันของยางสไตรีนบิวทาไดอีนภายใน

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยป้อนยางสไตรีนบิวตาไดอีนมาผสมกับโคพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งที่มีความแข็งและไม่ยืดหยุ่นผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ในขณะเดียวกันก็มีการเติมซิลิกาเข้ามาในบริเวณผนังของเครื่องพ่นแห้งด้วย การเตรียมยางผงด้วยวิธีนี้พบว่าการติดกันของอนุภาคยางผงลดลง เนื่องจากโคพอลิเมอร์ที่ใส่เข้าไปจะเข้ามาจับกับน้ำยางอย่างรวดเร็วขณะที่ถูกพ่นเป็นละอองฝอยออกมา โคพอลิเมอร์จึงเปรียบเสมือนสารที่ทำหน้าที่เคลือบผิวของอนุภาคยางทำให้ยางผงที่ได้ไม่เกาะติดกัน และพบว่ายางผงที่ได้มีอนุภาคเล็กกว่าวิธีที่ไม่ได้มีการผสมโคพอลิเมอร์เข้าร่วมในพ่นแห้ง

ในปี 2010 ธิปพงศ์ [4] ได้ทำการสังเคราะห์ผงยางธรรมชาติด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่น โดยทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางผง และปริมาณสารลดแรงตึงผิวชนิดโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต จากการศึกษาพบว่าการใส่สารลดแรงตึงผิวจะช่วยให้เกิดยางแห้งต้นที่หัวฉีดและยางที่เกิดการติดค้างบนผนังไซโคลนภายในเครื่องพ่นแห้งลดลง เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวจะเข้าไปล้อมรอบอนุภาคของยางธรรมชาติไว้ ทำให้ยางมีความเหนียวลดลง โดยปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมคือ 12 กรัมในเนื้อยาง 100 กรัม และพบว่าภาวะที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากการให้ร้อยละของยางแห้งสูงสุดคือ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าที่ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำยาง 3 มิลลิลิตร ต่อนาที อัตราการไหลของลม 600 ลิตรต่อชั่วโมง ใช้น้ำยางชั้นที่มีเนื้อยาง (DRC) อยู่ที่ร้อยละ 15 ได้ยางผงที่มีลักษณะรูปร่างทรงกลมมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 8 ไมโครเมตร

การอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นเทคนิคที่ใช้ในการทำแห้งวิธีหนึ่ง โดยเทคนิคนี้เป็นวิธีการที่นิยมใช้สำหรับการทำแห้งสารละลายอินทรีย์ สารประเภทอิมัลชัน สารแขวนลอย และของเหลวชนิดต่างๆ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของผงแห้ง ข้อดีของการทำแห้งด้วยวิธีนี้คือ การทำแห้งได้อย่างรวดเร็ว และช่วยในการลดขนาดและปริมาตรของของเหลวในการขนส่งอีกด้วย หลักการทำงานของเทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยคือ การทำให้น้ำระเหยออกจากของเหลวอย่างรวดเร็วด้วยการสัมผัสกับอากาศร้อน เริ่มแรกของเหลวจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบผ่านหัวฉีดเกิดเป็นละอองขนาดเล็ก ละอองขนาดเล็กจะเข้าผสมกับอากาศร้อนที่ไหลผ่านอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำหรือตัวทำละลายที่อยู่ในละอองของเหลวระเหยออกไป และได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของผงแห้ง ทั้งนี้ของเหลวที่จะนำมาทำการอบแห้งแบบพ่นฝอยควรมีลักษณะเหลว ไม่ข้นมาก ส่วนประกอบหลักและกลไกการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย[21]

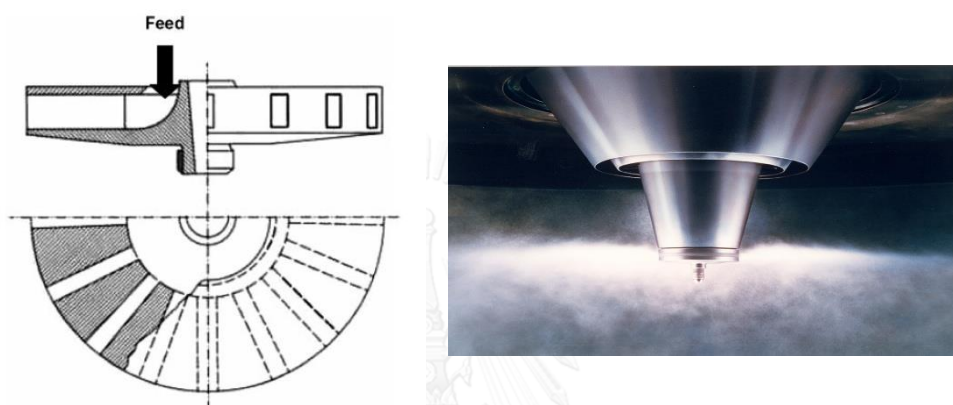
เริ่มต้นจากของเหลว (feed) จะถูกป้อนเข้ามายังหัวฉีด (nozzle) ทำให้เกิดละอองฝอยภายในห้องอบแห้ง (drying chamber) ในขณะที่เดียวกันอากาศจะถูกดูดผ่านตัวกรองและตัวให้ความร้อน และไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง เมื่อละอองของเหลวสัมผัสกับอากาศร้อนทำให้เกิดการระเหยของน้ำหรือตัวทำละลายอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้ผงของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะตกลงสู่ด้านล่างของห้องอบแห้งและถูกอากาศพัดพาไปยังไซโคลน (cyclone) เพื่อคัดแยกและจัดเก็บอนุภาค โดยกลไกที่เกิดขึ้นในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การทำให้เกิดละอองฝอยของของเหลว (atomization of feed)

ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด โดยการทำให้ของเหลวเกิดกระจายตัวเป็นละอองฝอยได้นั้น ของเหลวจะไหลผ่านช่องของหัวฉีดภายใต้ความดันสูง โดยขนาดอนุภาคของละอองฝอยจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของของเหลวและความหนืด แต่จะแปรผกผันกับความดัน โดยหัวฉีดของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยนี้มี 3 ชนิด คือ

1) หัวฉีดแบบหมุน (rotary atomizer)

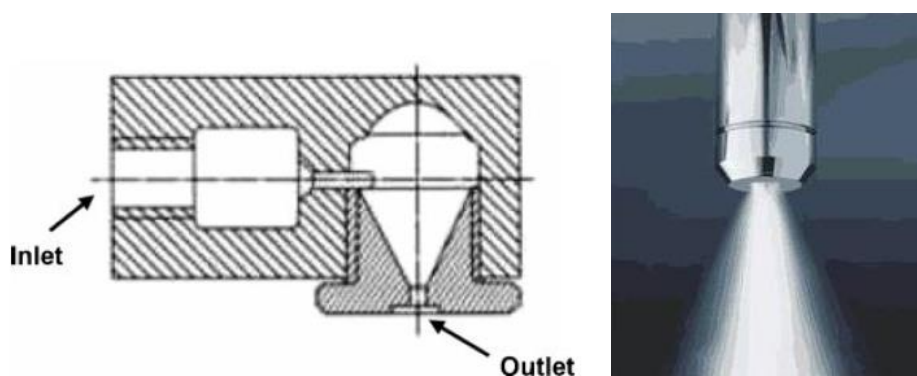
หัวฉีดแบบหมุนจะสร้างละอองฝอยจากแรงเหวี่ยง โดยของเหลวจะถูกป้อนผ่านหัวฉีดให้ไหลลงบนจานหมุนใกล้กับจุดศูนย์กลาง โดยจานหมุนจะมีความเร็วรอบประมาณ 5,000 ถึง 10,000 รอบต่อ นาที ของเหลวที่ตกลงบนจานหมุนจะถูกเหวี่ยงออกด้านข้างและกระจายเป็นละอองฝอย โดยมีขนาดละอองเฉลี่ย 30 ถึง 120 ไมครอน ซึ่งขนาดของละอองฝอยนี้จะแปรผันตรงกับอัตราการใช้ของเหลวและความหนืด แต่จะแปรผกผันกับอัตราการหมุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน



รูปที่ 2.6 หัวฉีดแบบหมุน [22,23]

2) หัวฉีดแบบแรงดัน (pressure nozzle atomizer)

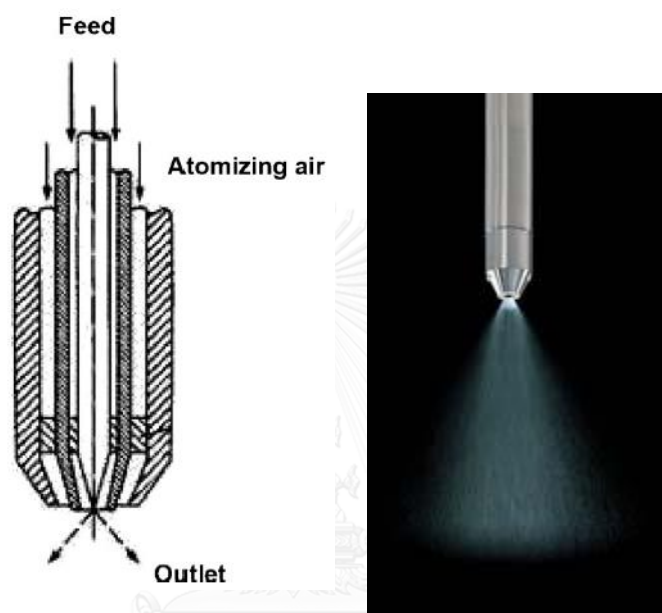
หัวฉีดแบบหมุนจะสร้างละอองฝอยจากแรงดัน โดยของเหลวจะถูกป้อนผ่านออร์ฟิซ (orifice) ภายใต้สภาวะความดันสูง ทำให้ของเหลวที่ออกมาจากหัวฉีดกระจายเป็นฝอยโดยไม่ใช้อากาศ ขนาดละอองเฉลี่ย 120 ถึง 250 ไมครอน ซึ่งขนาดของละอองฝอยนี้จะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของเหลวและความหนืด แต่จะแปรผกผันกับความดัน



รูปที่ 2.7 หัวฉีดแบบแรงดัน [22,24]

3) หัวฉีดแบบสองของไหล (Two-fluid Nozzle Atomizer)

หัวฉีดแบบสองของไหลจะสร้างละอองฝอยจากความเร็วกว่ากันของของไหลสองชนิด โดยของเหลวและอากาศจะไหลเข้าสู่หัวฉีด เมื่ออากาศที่มีความเร็วมากกว่าของเหลวสัมผัสกัน จะทำให้ของเหลวเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอย ซึ่งขนาดของละอองฝอยนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ หัวฉีดชนิดนี้นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากสามารถใช้ได้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง



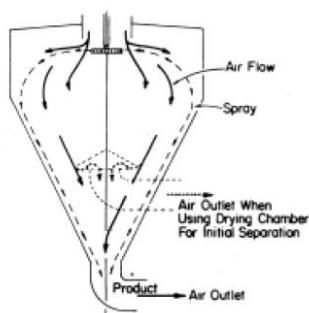
รูปที่ 2.8 หัวฉีดแบบสองของไหล [22,24]

2. การสัมผัสกันของละอองฝอยกับอากาศ

ในขั้นตอนนี้ละอองของของเหลวจะสัมผัสหรือผสมเข้ากับอากาศร้อน โดยสามารถแบ่งรูปแบบของการสัมผัสระหว่างของเหลวกับอากาศร้อนได้ 3 รูปแบบ โดยพิจารณาจากตำแหน่งของหัวฉีดและอากาศแห้งขาเข้า

1) การไหลผ่านทางเดียวกัน (Co-current flow)

การไหลไปในทิศทางเดียวกันนี้ ละอองของเหลวจะถูกพ่นออกไปในทิศทางเดียวกับการไหลของอากาศร้อน ละอองของเหลวจะสัมผัสและผสมเข้ากับกับอากาศร้อนขณะที่ยังมีความชื้นสูงหรือมีน้ำภายในอนุภาคมากอยู่ จากนั้นจะถูกทำให้ระเหยทันทีจนกลายเป็นผง โดยวิธีนี้เหมาะสำหรับสารที่ไม่ทนต่อความร้อน เนื่องจากจะเกิดการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.9 ลักษณะการไหลทางเดียวกัน[25]

2) การไหลผ่านสวนทางกัน (Counter-current flow)

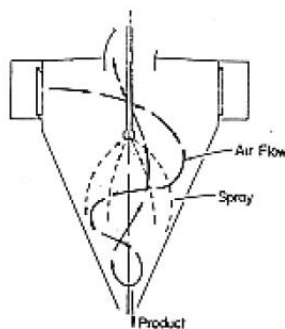
การไหลผ่านสวนทางกันนี้ ละอองของเหลวจะถูกพ่นออกไปในทิศสวนทางกันกับการไหลของอากาศร้อน โดยละอองของเหลวจะถูกฉีดลงมาจากด้านบน ในขณะที่อากาศร้อนจะไหลขึ้นจากด้านล่าง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความร้อนสูงมาก วิธีนี้จึงเหมาะเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่เสถียรต่อความร้อนสูงเท่านั้น



รูปที่ 2.10 ลักษณะการไหลสวนทางกัน[25]

3) การไหลผ่านแบบผสม (Mixed flow)

การไหลผ่านแบบผสมนี้ ละอองของเหลวจะถูกพ่นออกไปผ่านทั้งการไหลผ่านทางเดียวกัน และการไหลผ่านสวนทางกัน โดยการไหลรูปแบบนี้อากาศขาเข้าจะเข้าที่ด้านบนของเครื่อง ส่วนหัวฉีดจะติดตั้งด้านล่างของเครื่อง รูปแบบการถ่ายเทความร้อนจะเหมือนกับกับการไหลผ่านสวนทางกัน ดังนั้นวิธีการนี้จึงเหมาะสำหรับทำแห้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นผงหยาบ และทนความร้อนได้สูงมาก



รูปที่ 2.11 ลักษณะการไหลแบบผสม[25]

3. การระเหยของละออง

เมื่อละอองฝอยของของเหลวสัมผัสกับอากาศร้อน จะเกิดระเหยในชั้นไอน้ำอิ่มตัว บริเวณผิวของละอองอย่างรวดเร็ว โดยอุณหภูมิที่ผิวของละอองอนุภาคจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิ กระเปาะเปียกเพียงเล็กน้อย อากาศแห้งจะแพร่เข้าสู่ชั้นผิวของละอองซึ่งอยู่ในสภาวะอิ่มตัว ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่มีอัตราการระเหยคงที่ จนกระทั่งความชื้นอยู่ในระดับต่ำและไม่มีการแพร่เข้าสู่ผิวด้านในแล้ว ทำให้ผิวของละอองเป็นชั้นแห้งหนาขึ้นตามเวลา ซึ่งช่วงนี้จะมีอัตราการระเหยลดลง

4. ขั้นตอนการแยกผลิตภัณฑ์แห้งจากอากาศ

การแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอากาศนั้น โดยทั่วไปนิยมใช้ไซโคลนในการคัดแยกขนาดของอนุภาค โดยผลิตภัณฑ์จะตกลงสู่ด้านล่างของไซโคลน ส่วนอากาศจะออกจากด้านบนของไซโคลน และผ่านไปยังตัวกรอง ทั้งนี้การกรองอากาศอาจทำได้ด้วยการใช้ตัวดูดซับ (scrubber) หรือผ้ากรอง (bag filter)

5. ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ดังนี้

1) ลักษณะของของเหลวสายป้อน

ความหนืดของของเหลวสายป้อนจะส่งผลต่อขนาดของอนุภาคละอองฝอย โดยของเหลวที่มีความหนืดสูงจะทำให้เกิดละอองฝอยขนาดใหญ่ และหากมีความหนืดมากอาจจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะคล้ายเส้นด้าย

2) อัตราการไหลของของเหลวสายป้อน

อัตราการไหลของสารป้อนจะส่งผลต่อลักษณะที่เกิดขึ้นของละอองฝอย โดยถ้าอัตราการไหลของของเหลวสายป้อนสูงขึ้น จะทำให้ได้ผงของผลิตภัณฑ์ที่มีความ

หยابและมีขนาดใหญ่มากขึ้น เนื่องจากมีเวลาที่ของเหลวสัมผัสกับอากาศร้อน น้อยลง

3) อัตราการไหลของอากาศขาเข้า

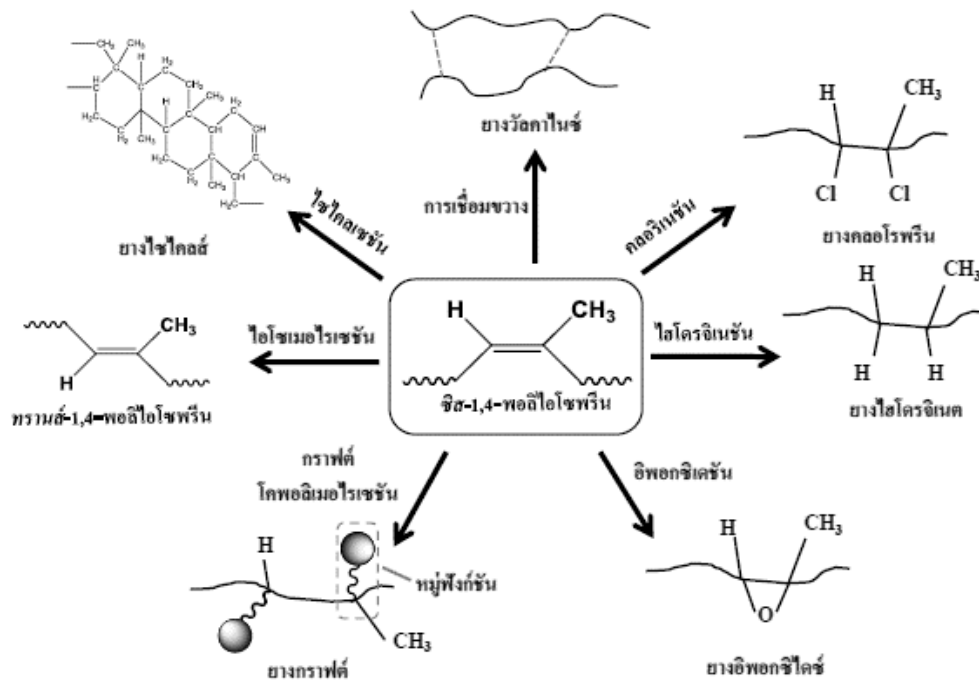
อัตราการไหลของอากาศขาเข้าจะส่งผลต่อความชื้นของผงแห้งที่ได้ โดยถ้าอัตราการไหลของอากาศขาเข้าลดลง ทำให้เวลาที่ละอองฝอยอยู่ในห้องอบแห้งนานขึ้น ซึ่งทำให้มีเวลาที่สัมผัสกับอากาศร้อนนานกว่าเดิม เป็นผลทำให้ความชื้นถูกนำออกจากละอองของอนุภาคได้มากขึ้น

4) อุณหภูมิอากาศขาเข้า

อุณหภูมิอากาศขาเข้าจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการระเหย โดยการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศขาเข้าทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการระเหย และทำให้ความหนาแน่นจำเพาะ (bulk density) ลดลง เนื่องจากเป็นการเพิ่มความพรุนและการแตกหักของอนุภาค

2.5 การตัดแปรอย่างธรรมชาติและการประยุกต์ใช้ [1]

โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติมีความไม่อิ่มตัวสูง ทำให้ให้ยางธรรมชาตินั้นสามารถเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดและความร้อน ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงข้อด้อยของยางธรรมชาติหลากหลายวิธี โดยใช้กระบวนการทางเคมี เนื่องจากความไม่อิ่มตัวสูงของยางธรรมชาติทำให้สายโซ่ของยางธรรมชาติเกิดปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณพันธะคู่ของคาร์บอนได้ง่าย การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณพันธะคู่ของยางธรรมชาติสามารถเกิดได้ภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยเป็นการเชื่อมขวางกันภายในโมเลกุล หรือเป็นการเติมหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมลงไป ทำปฏิกิริยาที่บริเวณพันธะคู่ของยางธรรมชาติทำให้เกิดพันธะเคมีใหม่ที่มีลักษณะร่วมกันระหว่างยางธรรมชาติและหมู่ฟังก์ชันที่เติมเข้าไป[18]



รูปที่ 2.12 การตัดแปรรยางธรรมชาติด้วยวิธีการต่างๆ[1]

2.6 การกราฟโคพอลิเมอร์บนอนุภาคยางธรรมชาติ

เนื่องจากสมบัติด้านความเหนียวติดกันของยางธรรมชาติทำให้ไม่สามารถเตรียมยางผงได้โดยตรง ดังนั้นถ้าสามารถห่อหุ้มอนุภาคของยางเพื่อป้องกันการเกาะติดกันของยางหลังจากทำให้ยางแห้ง การห่อหุ้มอนุภาคของยางธรรมชาติทำได้โดยการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันบนสายโซ่ของยางธรรมชาติ

กราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน (graft copolymerization) เป็นกระบวนการตัดแปรรโครงสร้างภายในสายโซ่ของยางธรรมชาติ โดยนำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติให้เหมาะสมต่อการใช้งานรูปแบบต่างๆ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการกราฟต์ ได้แก่ ปริมาณยางธรรมชาติ ตัวริเริ่ม มอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้หมู่ฟังก์ชันที่นำมากราฟต์บนสายโซ่จะมีการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกันตามลักษณะเฉพาะของหมู่ฟังก์ชันที่เติมลงไป สำหรับกระบวนการเตรียมยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์สามารถเตรียมได้จากกระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอร์แบบคอร์-เชลล์ อิมัลชัน

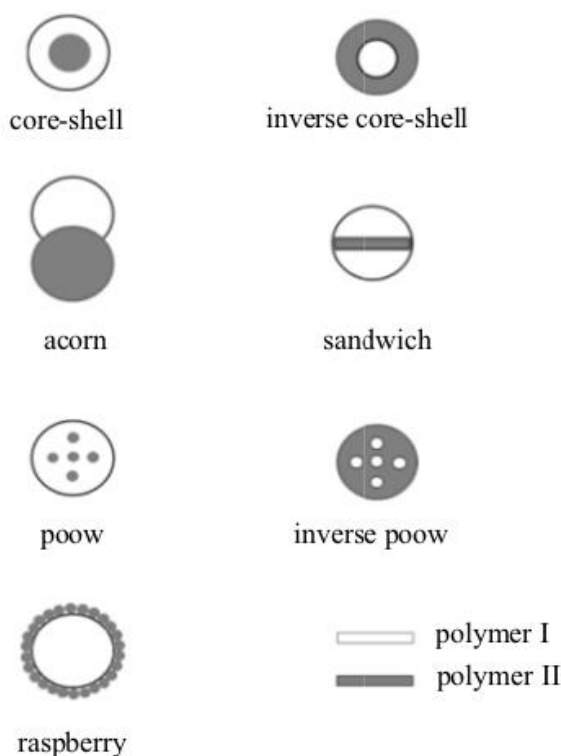
ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกราฟต์ยางธรรมชาติ

มอนอเมอร์	ผลิตภัณฑ์และการประยุกต์ใช้	เอกสารอ้างอิง
สไตรีน	เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี	Pukkate et al., 2007; Suksawad et al., 2011; Songsing et al., 2013
2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต	สารช่วยเพิ่มการยึดเกาะบนผิวไม้อัด	Promdum et al., 2009
พอลิอะคริเลต (เมทิลอะคริเลต, เอทิลอะคริเลต, บิวทิลอะคริเลต, เฮกซิลอะคริเลต, ลอริลอะคริเลต)	ฟิล์มใสที่มีพื้นผิวไม่มีขั้ว สามารถยึดตัวได้ดีไม่มีรอยแตก	Ragupathy et al., 2011
ไคเมทิล(อะคริโอลลีเมทิล) ฟอสโฟเนต และ ไคเมทิล(เมทาคริโอลลีออกซีเอทิล)ฟอสโฟเนต	ใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ในการผสมพอลิเมอร์มากกว่าสองชนิด เพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน สามารถใช้เป็นวัสดุทนไฟ	Derouet et al., 2009
บิวทิลอะคริเลต	แผ่นฟิล์มทนต่อแรงดึง	Hossain et al., 2010
ไคเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต	เพิ่มความมีขั้วของยางธรรมชาติ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารตัวเติมในการผสมพอลิเมอร์	Oliveira et al., 2005

เมทิลเมทาคริเลต	วัสดุทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์ วัสดุมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เช่น ความแข็ง ความสามารถในการทนต่อแรงกด หรือใช้เป็นสารยึดติดในอีพอกซีเรซิน	Rezaifard et al., 1994 George et al., 1987; Bakar and Fauzi, 2012; Misha et al., 1991
อะครีโลไนไตรล์	วัสดุทนน้ำมัน	Claramma et al., 1989
แป้ง	เยื่อเลือกผ่านสำหรับควบคุมการปลดปล่อยยูเรียในปุ๋ย	Riyajan et al., 2012
พอลิไวนิลไพโรลิโดน	สารรักษาเสถียรภาพในการสังเคราะห์โลหะขนาดนาโน	Bakar et al., 2010
สไตรีน/อะครีโลไนไตรล์	สารเพิ่มความเข้ากันได้	Angnanon et al., 2011

โครงสร้างที่เป็นไปได้ของกราฟต์โคพอลิเมอร์แบบคอร์-เชลล์ อิมัลชัน แสดงดังรูปที่ 2.13

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะคอร์เชลล์ที่เป็นไปได้จากกระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอร์-แบบคอร์เชลล์ อิมัลชัน-

2.7 การกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตบนอนุภาคยางธรรมชาติ[19]

การทำกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันจะช่วยป้องกันการเกาะติดกันของอนุภาคยางผงได้ ได้มีการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง ในปี 1980 Camedon และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาการกราฟต์สไตรีนบนยางธรรมชาติในเบนซีน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยมีเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยพบว่าสัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับตัวริเริ่มปฏิกิริยาส่งผลต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน ในปี 1992 Enyiegbulam และคณะ [33] ศึกษาการกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติในเมทิลเอทิลคีโตนผสมทูลอีน โดยมีเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าการเพิ่มปริมาณของเมทิลเมทาคริเลต จะทำให้ประสิทธิภาพการกราฟต์ลดลง แต่ทำให้โคพอลิเมอร์มีมวลโมเลกุลสูงขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์มากกว่า 0.1 โมลาร์เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเมทิลเมทาคริเลตจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกราฟต์ โดยสามารถอธิบายการกราฟต์โคพอลิเมอร์ด้วยทฤษฎีของสารละลายเจือจาง (dilute solution) ได้ ในปี 1999 ปรีชา [34] ได้ศึกษาการกราฟต์สไตรีนและเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติในกระบวนการอิมัลชันแบบกะและกึ่งกะผ่านกระบวนการพอลิเมอ

ไรเซชันแบบคอร์-เซลล์อิมัลชัน โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน ได้แก่ ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปริมาณสารก่ออิมัลชัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา รูปแบบการเติมมอนอเมอร์ อัตราส่วนสไตรีนต่อเมทิลเมทาคริเลต อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อยางธรรมชาติ โดยพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์ คือ ภาวะที่ใช้ปริมาณตัวริเริ่ม 1.5 ส่วนโดยน้ำหนัก ปริมาณสารก่ออิมัลชัน 1.5 ส่วนโดยน้ำหนัก มอนอเมอร์ 100 ส่วนโดยน้ำหนัก ต่อ 100 ส่วนโดยน้ำหนักยางธรรมชาติ เวลาในการเติมมอนอเมอร์ 2 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และพบว่าสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติดีขึ้น โดยสัดส่วนของสไตรีนต่อเมทิลเมทาคริเลต 25:75 และ 50:50 จะทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด ต่อมาในปี 2005 อีรณูช และคณะ [19] ได้ศึกษาผลของตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดิวซ์ต่อการกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยตัวริเริ่มปฏิกิริยาระบบรีดิวซ์ 3 ชนิดที่แตกต่างกัน คือ คิวมินไฮเปอร์ออกไซด์/เทตระเอทิลีนเพนทามีน เทอร์-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์/เทตระเอทิลีนเพนทามีน และโพแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต/โซเดียมไทโอซัลเฟต สำหรับตัวริเริ่มปฏิกิริยา คิวมินไฮเปอร์ออกไซด์ละลายได้ดีมากในน้ำมัน และเทอร์-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ละลายได้ดีปานกลางในน้ำมัน ทำปฏิกิริยาร่วมกับเทตระเอทิลีนเพนทามีนที่ละลายได้ดีปานกลางในน้ำ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบที่ละลายน้ำได้คือโพแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต/โซเดียมไทโอซัลเฟต จะมีการเติมไวโนลีนีโอเดคะโนเอตลงในตัวริเริ่มปฏิกิริยาโพแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต เพื่อส่งเสริมให้เกิดการกราฟต์ของเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติและลดปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตซึ่งเกิดในน้ำ พบว่าระบบของตัวริเริ่มปฏิกิริยาคิวมินไฮเปอร์ออกไซด์ให้ค่าประสิทธิภาพการกราฟต์ที่สูงที่สุด ในปี 2009 Ekwipoo และคณะ[35] ได้ทำการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต ด้วยกระบวนการอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยมีคิวมินไฮเปอร์ออกไซด์และเทตระเอทิลีนเพนทามีนเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาดำเนินภายใต้ภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตสูงขึ้นจะทำให้เกิดพอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระมากขึ้น ยางธรรมชาติอิสระลดลง และประสิทธิภาพการกราฟต์ลดลง โดยที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและเมทิลเมทาคริเลต 70/30 จะมีประสิทธิภาพการกราฟต์สูงสุดที่ร้อยละ 91.9 จะเห็นได้ว่างานวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตลงบนยางธรรมชาติ

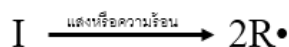
กราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันเป็นการดัดแปรยางธรรมชาติ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่นำมากราฟต์บนอนุภาคยางธรรมชาติมีมากมายหลายชนิด จากงานวิจัยจะพบว่ากากราฟต์หมู่ฟังก์ชันเมทิลเมทาคริเลตและสไตรีนลงบนอนุภาคยางธรรมชาติจะมีประสิทธิภาพในการกราฟต์ที่ดีที่สุด ซึ่งการกราฟต์หมู่อะคริเลตลงบนอนุภาคยางธรรมชาติ สามารถเพิ่มความแข็งแรงและใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

สารตัวเติม หรือสารยึดติด สำหรับการเตรียมพอลิเมอร์ผสม[1] ซึ่งในการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตลงบนอนุภาคของยางธรรมชาติจะสังเคราะห์ผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระ (free radical chain polymerization)

พอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระ[16] เป็นการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยมีตัวเริ่มต้นของปฏิกิริยา (initiator) ซึ่งอาจจะเรียกสั้นๆว่า ตัวริเริ่ม ตัวริเริ่มจะทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ทำให้เกิดเป็นมอนอเมอร์ที่มีจุดว่องไวแบบอนุมูลอิสระเกิดขึ้น จากนั้นจะเกิดการรวมตัวของมอนอเมอร์ที่มีจุดว่องไวนี้ไปเรื่อยๆที่ละมอนอเมอร์ จนได้พอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลยาวขึ้น มอนอเมอร์ที่สามารถเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระส่วนใหญ่จะประกอบด้วยพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอมในโมเลกุล ($\text{CH}_2=\text{CHX}$) โดยกลไกการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนเริ่มต้น (initiation) ขั้นแพร่ขยาย (propagation) และขั้นสิ้นสุด (termination)

1) กลไกขั้นเริ่มต้น ซึ่งประกอบไปด้วยสองขั้นตอนย่อย คือ

1.1) การแตกตัวของตัวริเริ่ม (dissociation of initiator) โดยตัวริเริ่มจะเกิดการแตกตัวด้วยความร้อน แสง หรือปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดเป็นอนุมูลอิสระ (free radical)



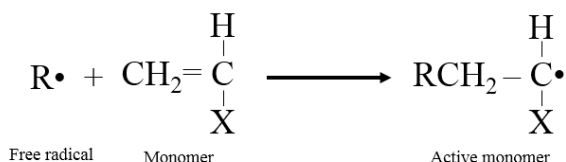
เมื่อ I คือ โมเลกุลของตัวริเริ่ม

R• คือ โมเลกุลของอนุมูลอิสระ

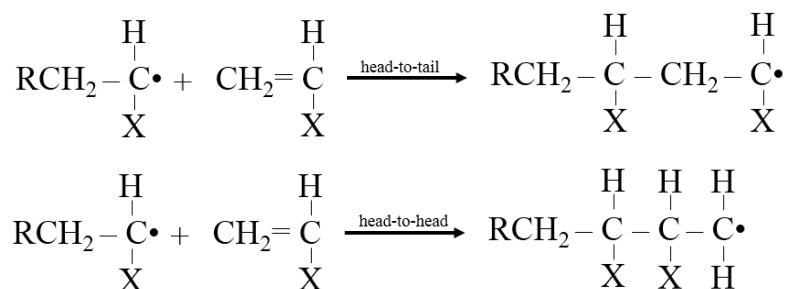
ตัวริเริ่มที่นิยมใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ สารจำพวกเปอร์ออกไซด์ ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นอาจไม่ทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ได้ทุกอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น เนื่องจากอาจเกิดการรวมตัวกันเอง (recombination) ของอนุมูลอิสระ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator efficiencies) ของตัวริเริ่มเอง

1.2) การเกิดมอนอเมอร์ที่มีจุดว่องไว (active monomer formation) โดยอนุมูลอิสระ

R• ที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์เกิดเป็นมอนอเมอร์ที่มีจุดว่องไว ดังนี้

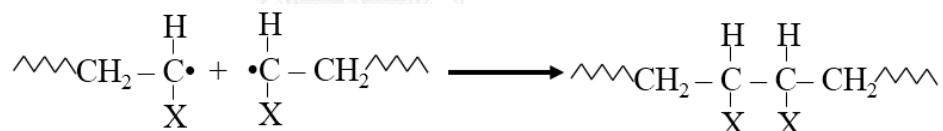


- 2) กลไกการแผ่ขยาย (propagation mechanism) ในขั้นตอนนี้เป็นการเติบโตของโมเลกุลพอลิเมอร์ โดยมอนอเมอร์จะเข้าร่วมตัวกับมอนอเมอร์ที่มีจุดว่องไว โดยทำการแตกพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอมที่ละมอนอเมอร์ไปเรื่อยๆ

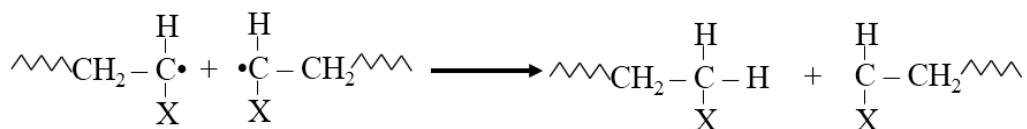


- 3) กลไกขั้นสิ้นสุด (termination mechanism) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเป็นการทำลายจุดว่องไวของโมเลกุลที่กำลังแผ่ขยาย ทำให้ได้โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ไม่มีอนุมูลอิสระ โดยกลไกขั้นสิ้นสุดที่สำคัญมี 2 แบบ คือ

- 3.1) กลไกการเกิดการรวมตัวกัน (combination mechanism) กลไกปฏิกิริยาขั้นสิ้นสุดแบบนี้จะทำให้ได้โมเลกุลของพอลิเมอร์หนึ่งโมเลกุลที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อีก (dead molecules)



- 3.2) กลไกปฏิกิริยาเกิดการแยกส่วน (disproportionation mechanism) โดยโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่กำลังแผ่ขยายจะให้โปรตอนแก่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่กำลังแผ่ขยายอีกโมเลกุลหนึ่ง และเกิดพันธะคู่ของอะตอมคาร์บอนเกิดขึ้น กลไกปฏิกิริยาขั้นสิ้นสุดแบบนี้จะทำให้ได้โมเลกุลของพอลิเมอร์สองโมเลกุล โดยโมเลกุลหนึ่งจะเป็นโมเลกุลที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อีก และอีกโมเลกุลหนึ่งเกิดพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอม ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระและเกิดจุดว่องไวเกิดขึ้นได้อีก



2.8 พอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) [16,17]

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์ โดยเทคนิคนี้นิยมใช้น้ำเป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยา องค์ประกอบหลักๆที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ ตัวกลาง (continuous phase) ตัวริเริ่ม (initiator) มอนอเมอร์ (monomer) และ อิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier)

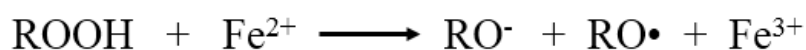
1. ตัวกลาง (continuous phase)

ตัวกลางที่ใช้ในระบบอิมัลชันพอลิเมอไรเซชันโดยทั่วไป ได้แก่ น้ำ น้ำที่ใช้ในอิมัลชันพอลิเมอไรเซชันจะต้องปราศจากไอออน เนื่องจากน้ำที่มีไอออนจะไปยับยั้งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และลดประสิทธิภาพของสารอิมัลซิไฟเออร์ โดยหน้าที่ของตัวกลางในปฏิกิริยาเป็นตัวระบายความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา และเป็นตัวทำลายสารอิมัลซิไฟเออร์

2. ตัวริเริ่ม (initiator)

การแตกตัวของตัวริเริ่มจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระ ซึ่งจะช่วยให้เริ่มเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ชนิดของตัวริเริ่มมีหลายชนิด ได้แก่

- ตัวริเริ่มที่แตกตัวด้วยความร้อน โดยตัวริเริ่มชนิดนี้มักจะเป็นสารประกอบประเภทเปอร์ออกไซด์ เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) ไดอะเซทิลเปอร์ออกไซด์ (diacetyl peroxide) เป็นต้น
- ตัวริเริ่มที่แตกตัวผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาประเภทนี้มีทั้งสามารถแตกตัวได้เอง เช่น โพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ($K_2S_2O_8$) และตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ต้องใช้ร่วมกับตัวริเริ่มตัวอื่น เช่น ตัวริเริ่มปฏิกิริยาจำพวกสารประกอบเปอร์ออกไซด์ ตัวอย่างปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่พันธะเปอร์ออกซี โดยมี Fe^{2+} เป็นตัวริเริ่มตัวอื่น สามารถแสดงได้ดังนี้



จะเห็นได้ว่าตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ส่วนใหญ่จะสามารถละลายได้ในน้ำ ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้ในการทำอิมัลชันพอลิเมอไรเซชันได้ดี

- ตัวริเริ่มที่แตกตัวโดยแสง ตัวอย่างของตัวริเริ่มปฏิกิริยาประเภทนี้ เช่น สารเบนโซฟีนอน (benzophenone) เบนซิลไดเอธิลไดไฮโอคาร์บาเมต (benzyl diethyldithiocarbamate) เป็นต้น ข้อดีของการใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเหล่านี้คือการสังเคราะห์พอลิเมอร์อาจจะสามารถทำได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงเกินไป ซึ่ง

อาจจะเป็นประโยชน์ในการใช้สังเคราะห์พอลิเมอร์ผ่านมอนอเมอร์บางชนิดที่มีจุดเดือดต่ำ

3. มอนอเมอร์ (monomer)

มอนอเมอร์เป็นตัวกำหนดสมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้ มอนอเมอร์ส่วนใหญ่มีพันธะคู่ที่เป็น ไวนิลที่ไม่อิ่มตัวในโมเลกุล

4. อิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier)

อิมัลซิไฟเออร์หรือสารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบสำคัญในการทำอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่อยู่ในระบบ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะประกอบไปด้วยส่วนที่มีขั้ว (hydrophilic) และส่วนที่ไม่มีขั้ว (hydrophobic) หน้าที่ของสารลดแรงตึงผิว คือ ช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างมอนอเมอร์และน้ำ เพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวที่เสถียร และก่อให้เกิดไมเซลล์ (micelle) ซึ่งไมเซลล์ที่เกิดขึ้นจะเป็นตำแหน่งที่เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวจะต้องมากกว่าความเข้มข้นไมเซลล์วิกฤต (critical micelle concentration, CMC)

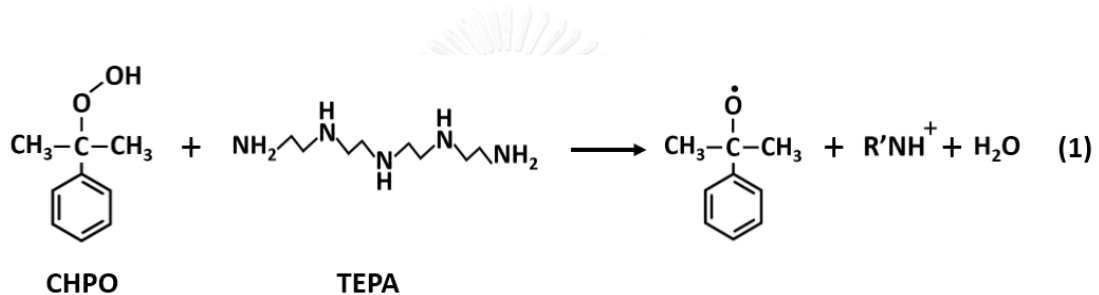
เมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวลงในตัวกลางจะเกิดไมเซลล์เกิดขึ้น ไมเซลล์ที่เกิดขึ้นจะเกิดในลักษณะที่โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะหันส่วนที่ไม่มีขั้วเข้าข้างในไมเซลล์ และหันส่วนหัวออกมาข้างนอก เมื่อเติมมอนอเมอร์ลงในระบบ ในระบบจะประกอบไปด้วยอนุภาคต่างๆ 3 ชนิด ได้แก่ หยดของมอนอเมอร์ (monomer droplet) ไมเซลล์ที่ไม่เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน และไมเซลล์ที่เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน พอลิเมอร์ไรเซชันจะเกิดในไมเซลล์เท่านั้น โดยในหยดของมอนอเมอร์จะไม่เกิดพอลิเมอร์ไรเซชันเลย โดยเริ่มต้นจากมอนอเมอร์ละลายเข้าไปในไมเซลล์ทำให้ไมเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น พอลิเมอร์ไรเซชันภายในไมเซลล์จะเกิดเมื่อมีโมเลกุลของตัวริเริ่มซึมผ่านเข้าไปในไมเซลล์ ในไมเซลล์จะประกอบไปด้วยพอลิเมอร์และมอนอเมอร์บางส่วนที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง เนื่องจากความเข้มข้นของมอนอเมอร์ในไมเซลล์ลดลง ปฏิกิริยาจะสิ้นสุดเมื่อมีแรดิคัลตัวใหม่ซึมผ่านเข้าไปในไมเซลล์

มอนอเมอร์จะเข้าไปอยู่ในไมเซลล์ และมีบางส่วนที่กระจายอยู่ในน้ำ ตัวริเริ่มที่อยู่ในระบบเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวเป็นแรดิคัล (radial) เมื่อแรดิคัลเคลื่อนที่เข้าสู่ไมเซลล์จะเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันขึ้นในไมเซลล์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นคอลลอยด์

2.9 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตบนอนุภาคยางธรรมชาติ[19]

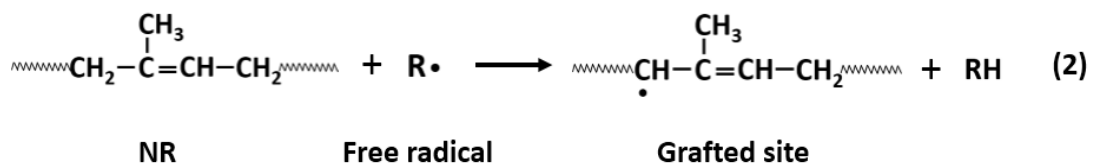
ในการทดลองจะเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งระหว่างยางธรรมชาติและ พอลิเมทิลเมทาคริเลต จะเตรียมผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระ (free radical chain emulsion polymerization) โดยมีมีเมทิลเมทาคริเลต (MMA) เป็นมอนอเมอร์ และใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาระบบรีดอกซ์ คือ คิวมีนไฮเปอร์ออกไซด์ (Cumene hydroperoxide, CHPO) และ เตตระเอทิลีนเพนทามีน (Tetraethylene pentamine, TEPA) โดยกลไกการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นเริ่มต้น ขั้นแผ่นขยาย และขั้นสิ้นสุด

1) ขั้นเริ่มต้น (Initiation) ตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะแตกตัวเกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical, R \cdot) ผ่านปฏิกิริยาปฏิกิริยารีดอกซ์ แสดงในปฏิกิริยาที่ (1)



อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเมื่อไปเจอกับสายโซ่โพลิเมอร์ของยางธรรมชาติ จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระหรือจุดว่องไวบนสายโซ่ของยางธรรมชาติ (Grafting site) โดยอนุมูลอิสระบนสายโซ่ยางธรรมชาติจะเกิดได้ 2 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ตำแหน่งแอลฟาคาร์บอน (alphacarbon: α -carbon) และ ตำแหน่งพันธะคู่ (C=C) กลไกการเกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่ยางธรรมชาติในปฏิกิริยาที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

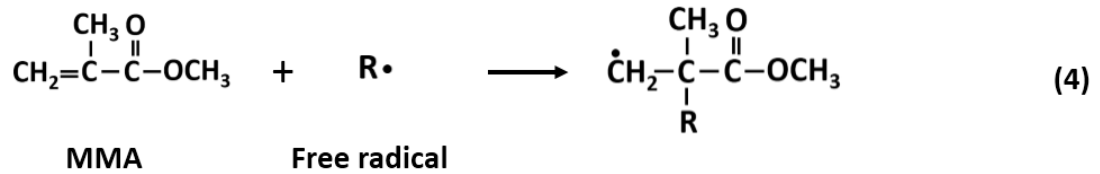
การเกิดอนุมูลอิสระที่ตำแหน่งแอลฟาคาร์บอน (alphacarbon: α -carbon)



การเกิดอนุมูลอิสระที่ตำแหน่งพันธะคู่

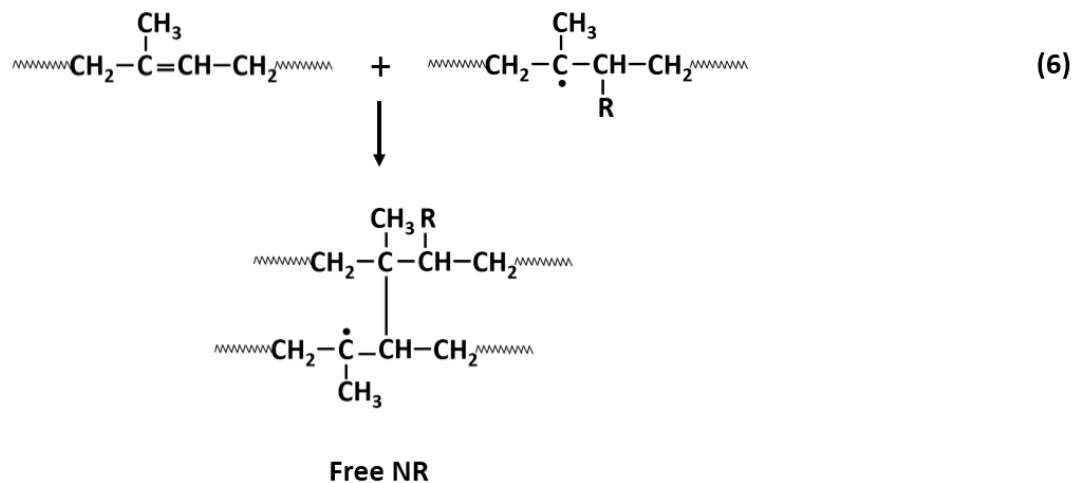


นอกจากนี้หากมอนอเมอร์พบกับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระหรือจุดว่องไวบนโมเลกุลของมอนอเมอร์ได้เช่นกัน ดังที่แสดงในปฏิกิริยาที่ (4) และ (5)

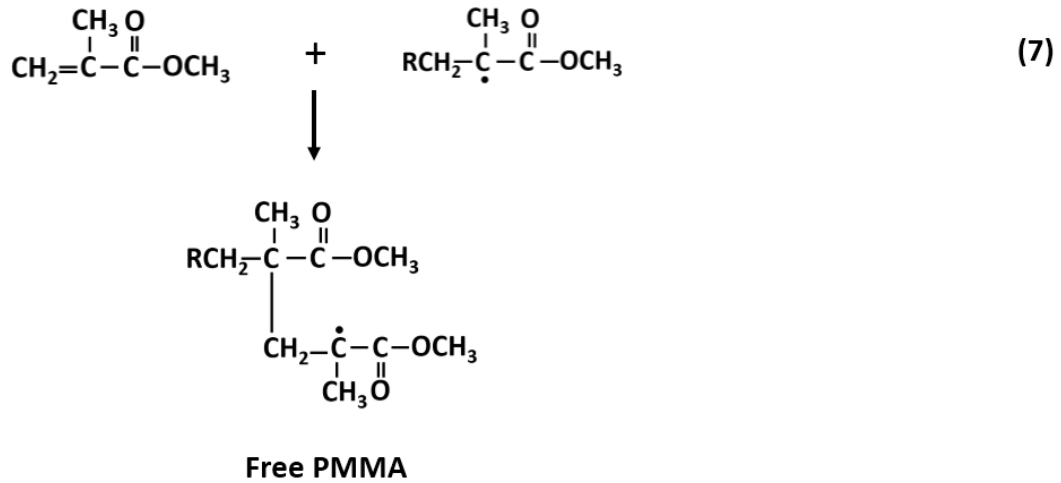


2) ชั้นแผ่ขยาย เป็นชั้นที่เกิดการเติบโตของโมเลกุลพอลิเมอร์ โดยมอนอเมอร์จะเข้าไปรวมตัวกับมอนอเมอร์ที่มีจุดว่องไว ซึ่งเกิดได้ 2 กรณี คือ เกิดโฮโมพอลิเมอร์และ เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต

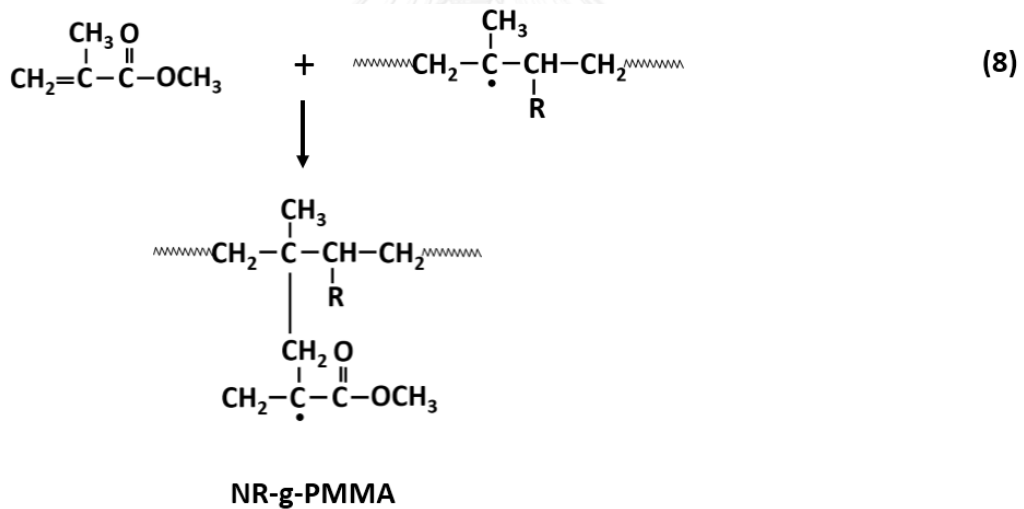
การเกิดโฮโมพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติ



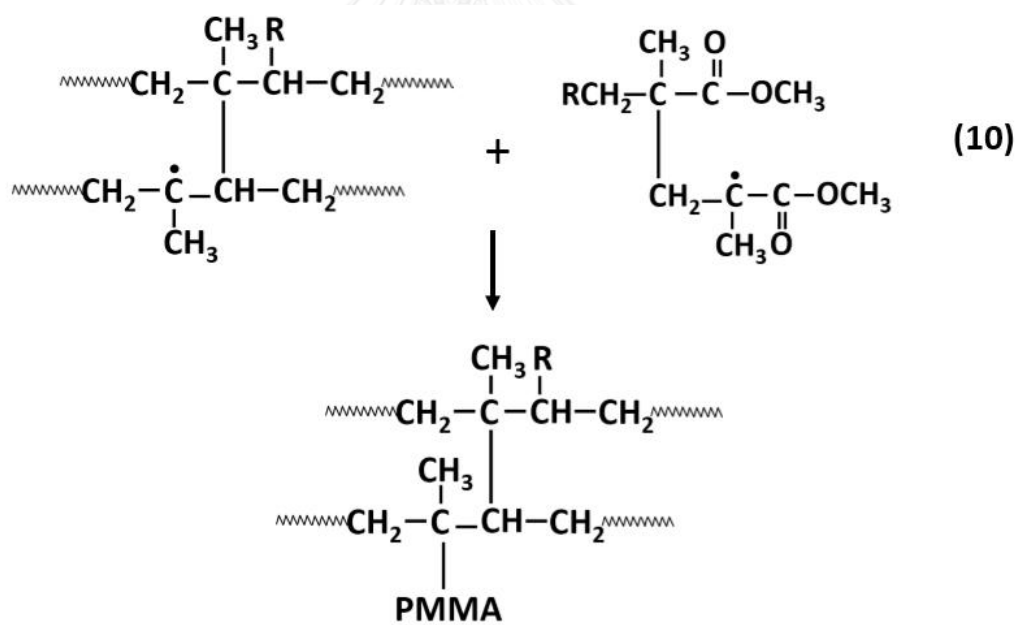
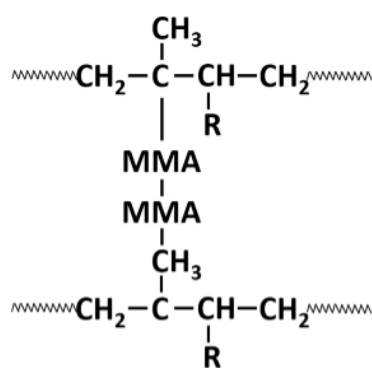
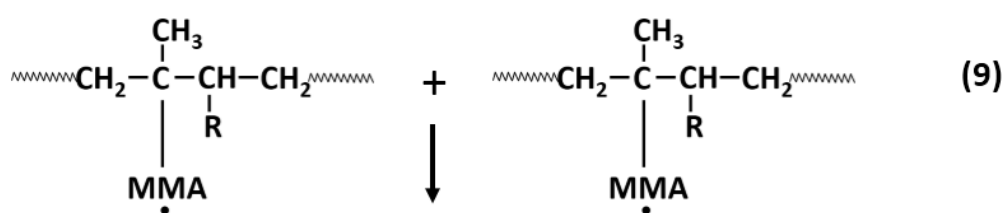
การเกิดโซโม่พอลิเมอร์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

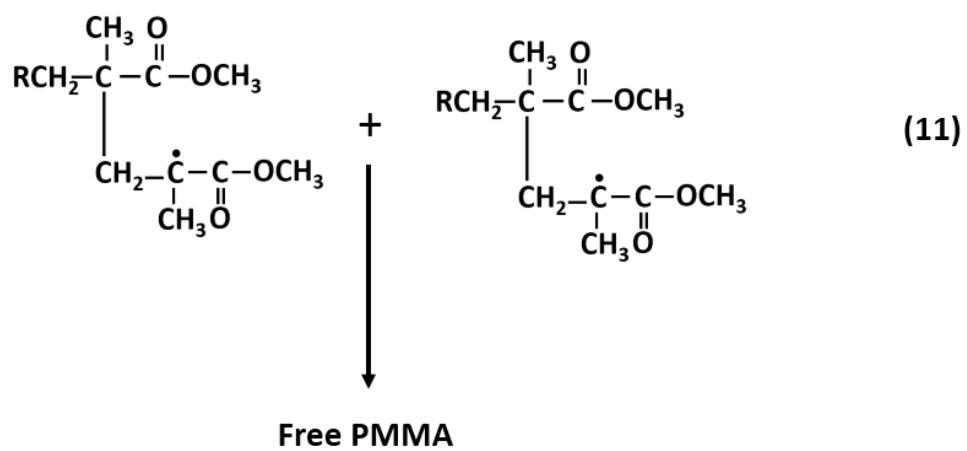


การเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต



3) ขั้นสิ้นสุด ซึ่งในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการทำลายจุดว่องไวของโมเลกุลที่กำลังแผ่ขยาย ทำให้ได้โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ไม่มีอนุมูลอิสระ กลุ่มของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการแผ่ขยายจะมีขนาดโมเลกุลค่อนข้างสูง ดังนั้นในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะเกิดได้ 3 กรณี คือ เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต เกิดพอลิเมอร์แบบตอกิ่ง (Branching) และเกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุล (Crosslinking) ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เป็นไปได้แสดงในปฏิกิริยาที่ (9) (10) และ (11)





บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	หน้าที่	ที่มา
1. น้ำยาธรรมชาติชนิดเข้มข้น	เป็นวัตถุดิบหลักในงานวิจัย	สถาบันวิจัยยาง
2. เมทิลเมทาคริเลต	เป็นมอนอเมอร์	Sigma-Aldrich LTD.
3. คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์	เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ตัวที่ 1	Sigma-Aldrich LTD.
4. เตตระเอทิลีนเพนตามีน	เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ตัวที่ 2	Sigma-Aldrich LTD.
5. โซเดียมโตเดซิลซัลเฟต	สารลดแรงตึงผิว	Ajax Finechem LTD.
6. อะซิโตน	ตัวทำละลาย PMMA	Qrec Chemical CO LTD.
7. ปีโตรเลียมอีเทอร์	ตัวทำละลาย NR	Ajax Finechem LTD.
8. พอลิแลคติกแอซิด 2003d	เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์	Nature Works (U.S.)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่ง

3.2.1.1 ขวดก้นกลมสามคอ ขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.2.1.2 อ่างควบคุมอุณหภูมิ

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่ง

3.2.2.1 เครื่องพ่นแห้ง (Spray dryer) Mini Spraydryer รุ่น BUCHI B-190 (Switzerland)

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมเม็ดพลาสติกผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด และผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่ง

3.2.3.1 เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเทอร์มิกซ์ (Intermix internal mixer)

3.2.3.2 เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding machine)

3.2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.4.1 เครื่องมือสกัดแบบซ็อกเล็ต (Soxhlet extractor)

3.2.4.2 เครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า (Zetasizer)

3.2.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron microscope, TEM)

3.2.4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

3.2.4.5 เครื่องวัดสมบัติทางความร้อน Thermogravimetric Analysis (TGA) และ Differential scanning calorimetry (DSC)

3.2.4.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer)

3.2.4.7 เครื่องโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (H-Nuclear magnetic resonance spectrometer)

3.2.4.8 เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบค้อนเหวี่ยง (Pendulum impact tester)

3.3 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการทดลองเป็น 4 ส่วน คือ

3.3.1 ศึกษาปริมาณสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของนาโนยางชั้น

น้ำนาโนยางชั้น 50 กรัม เติมน้ำกลั่น 100 กรัม และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต 1-25 กรัมในเนื้อยาง 100 กรัม ปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาทีและนำสารผสมที่ได้ไปวัดค่าศักย์ซีต้า เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้น

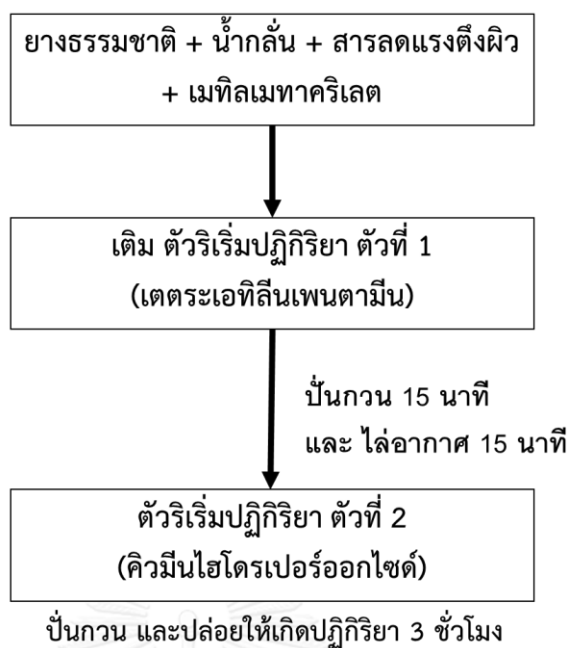
3.3.2 ศึกษาหาลำดับการเติมสารที่เหมาะสมสำหรับการทำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

3.3.2.1 การเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งโดยการเติมมอนอเมอร์ในลำดับแรก

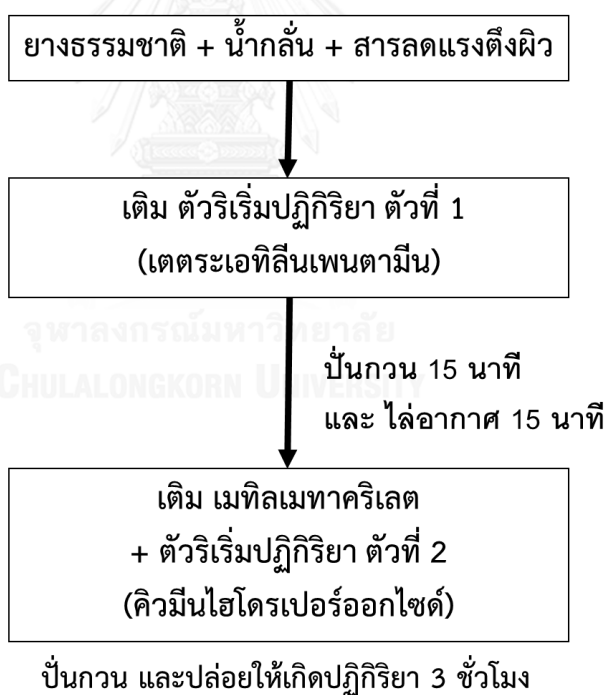
นำน้ำยางข้น 50 กรัม เติมน้ำกลั่น 100 กรัม โซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต 10 ส่วนในเนื้ออย่างร้อยละ และเมทิลเมทาคริเลต 100 ส่วนในเนื้ออย่างร้อยละ หลังจากนั้นเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 1 คือเตตระเอทิลลีนเพนตามีน ทำการปั่นกวนสารผสมเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำสารผสมที่ได้ไปบรรจุในขวดกันกลมสามคอ และทำการไล่อากาศออกจากระบบด้วยการป้อนแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที เมื่อทำการไล่อากาศเสร็จแล้วจึงนำขวดกันกลมไปวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ทำการปั่นกวนและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 2 คือ คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำการเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งอีกครั้งโดยทำการสลับลำดับการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.3.2.2 การเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งโดยการเติมมอนอเมอร์ในลำดับสุดท้าย

นำน้ำยางข้น 50 กรัม เติมน้ำกลั่น 100 กรัมและโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต 10 ส่วนในเนื้ออย่างร้อยละ หลังจากนั้นเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 1 คือเตตระเอทิลลีนเพนตามีน ทำการปั่นกวนสารผสมเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำสารผสมที่ได้ไปบรรจุในขวดกันกลมสามคอ และทำการไล่อากาศออกจากระบบด้วยการป้อนแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที เมื่อทำการไล่อากาศเสร็จแล้วจึงนำขวดกันกลมไปวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ทำการปั่นกวนและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเติมสารผสมระหว่างเมทิลเมทาคริเลตและตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 2 คือ คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำการเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งอีกครั้งโดยทำการสลับลำดับการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงลำดับการเติมสารโดยการเติมมอนอเมอร์ในลำดับแรก



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงลำดับการเติมสารโดยการเติมมอนอเมอร์ในลำดับสุดท้าย

นำสารผสมที่เตรียมได้จาก 3.3.1.1 และ 3.3.1.2 ไปทำการอบแห้งแบบพ่นฝอยในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย รุ่น BUCHI B-190 (Switzerland) ดังภาพที่ 3.1 ที่อุณหภูมิลมร้อนเข้า 100 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารตัวอย่าง 8 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศ 750 ลิตร

ต่อชั่วโมง นำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งที่ได้ไปศึกษาเพื่อหาลำดับการเติมสารที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่ง



รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย รุ่น BUCHI B-190 (Switzerland)

3.3.3 ศึกษาอัตราส่วนของสารที่เติมที่เหมาะสมสำหรับการทำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

เมื่อได้ลำดับการเติมสารที่ดีที่สุดแล้วจึงทำการเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งที่อัตราส่วนของส่วนประกอบที่ทำปฏิกิริยาดังตารางที่ 3.2 หลังจากนั้นนำสารผสมที่เตรียมได้ ไปทำการอบแห้งแบบพ่นฝอยในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย รุ่น BUCHI B-190 (Switzerland) ที่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 100 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารตัวอย่าง 8 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศ 750 ลิตรต่อชั่วโมง นำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งที่ได้ไปศึกษา เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างธรรมชาติและเมทิลเมทาคริเลตที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่ง เมื่อได้อัตราส่วนที่

เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งแล้ว จะนำไปใช้ในการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา โดยศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ 1 3 5 และ 7 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของสารที่เติมน้ำหนักยางแห้ง กรัม 100

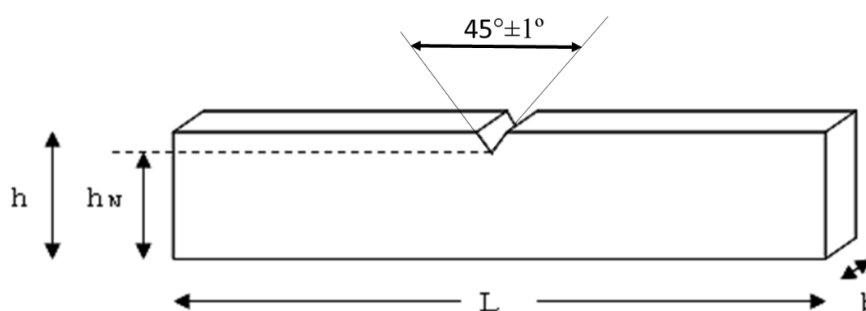
สารที่เติม	ปริมาณ (กรัม)
อัตราส่วนเมทิลเมทาคริเลตต่ออย่างธรรมชาติ	50, 75, 100
ปริมาณตัวริเริ่ม (กรัมต่อ100กรัมยาง)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0

3.3.4 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งและพอลิแลคติกแอซิด (PLA)

เตรียมเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดโดยอบเม็ดพลาสติกที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดพลาสติกไปผสมกับพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งด้วยเครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราการหมุนของสกรู 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมไปขึ้นรูปด้วยเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด ในการขึ้นรูปนั้นจะทำการให้ความร้อน (preheat) ที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส ก่อนเป็นเวลา 4 นาที แล้วจึงทำการอัดด้วยความดัน 100 บาร์ เป็นเวลา 3 นาที โดยขนาดชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะตามมาตรฐาน ASTM D256 ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256

ASTM D256	ขนาด (mm)
L	63.50 ± 2
b	3.0-12.7
h	12.70 ± 0.20
h _N	10.16 ± 0.05



รูปที่ 3.4 แสดงขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256

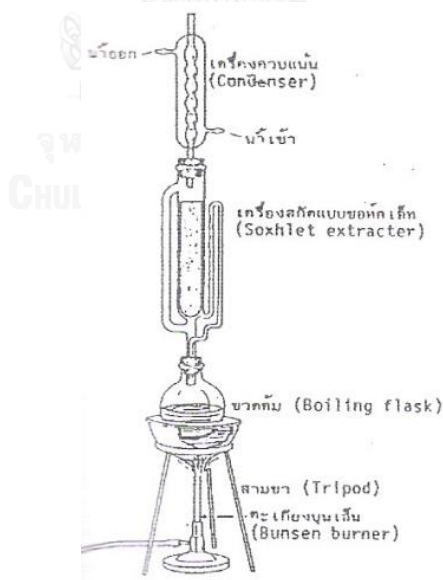
3.4 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่ง

3.4.1 การคำนวณหาร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ของโคพอลิเมอร์ของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่ง

คำนวณหาร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งได้ด้วยการทำการสกัดไฮโมพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในระบบด้วยเครื่องมือสกัดแบบซ็อกเก็ต แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยยงธรรมชาติอิสระสามารถสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ และพอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระสามารถสกัดด้วยอะซิโตน ในการสกัดจะทำการสกัดนำพอลิเมทิลเมทาคริเลตออกก่อน หลังจากนั้นจะนำสารไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการสกัดยงธรรมชาติอิสระออก และนำสารไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งการคำนวณร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ของโคพอลิเมอร์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์} = \frac{\text{น้ำหนักของเมทิลเมทาคริเลตที่เกิดการกราฟต์}}{\text{น้ำหนักของเมทิลเมทาคริเลตที่หลังเกิดปฏิกิริยา}} \times 100$$

ในการสกัดจะสกัดด้วยเครื่องมือสกัดแบบซ็อกเก็ตดังรูปที่ โดยใช้ตัวทำละลายปริมาตร 500 มิลลิตร ทำการสกัดสารแต่ละชนิดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 ชุดเครื่องมือสกัดแบบซ็อกเก็ต

(ที่มา : <http://www.mwit.ac.th/~teppode/c6.pdf>)

3.4.2 การศึกษาเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์

การวิเคราะห์เสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยเครื่องเครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า (Zetasizer) บริษัท MALVERN รุ่น Zetasizer Nano ZS90 โดยการวัดอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าด้วย Laser Doppler Velocimetry (LDV)

3.4.3 ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

เป็นการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง โดยนำพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งเจือจางด้วยน้ำกลั่น 400 เท่า ให้ได้ความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หยดสารละลายออสเมียม (OSO_4) ลงในน้ำยางเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ออสเมียมเข้าไปย้อมสีพันธะคู่ของยางธรรมชาติ หลังจากนั้นหยดลงบนกริดปล่อยทิ้งไว้ให้แห้งสนิท และสังเกตลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน บริษัท Hitachi รุ่น S-4800

3.4.4 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างสัณฐานของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

เป็นการวิเคราะห์รูปร่างสัณฐานของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งว่ามีการเกาะติดกันหรือไม่ โดยนำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ต้องการศึกษาไปวางบนแท่น (stub) ก่อนทำการฉาบผิวหน้าด้วยทอง แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-35 ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ด้วยกระแสไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์

3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) ของบริษัท Diamond thermo gravimetric and Differential Analyzer รุ่น STD Q600 ที่อุณหภูมิ 40-800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการป้อนแก๊สออกซิเจน 100 มิลลิลิตรต่อนาที

3.4.6 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และ เทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี

3.4.6.1 เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสาร ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี โดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของโมเลกุล เมื่อโมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะในโมเลกุล จะทำให้แอมพลิจูดของการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลเพิ่มขึ้นหรือโมเลกุลถูกกระตุ้นให้อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (exciting state) และจะกลับคืนสู่

สภาวะปกติ (ground state) พลังงานที่ถูกดูดเข้าไปจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของพลังงานความร้อน โดยโมเลกุลที่มีอะตอมต่างชนิดกันและมีพันธะต่างชนิดกัน จะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ต่างกันและให้ผลเป็นสเปกตรัม IR สำหรับการวิเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง จะเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งโดยใช้เครื่อง FT-IR Nicolet model 6700 ใช้รังสีอินฟราเรดช่วง 400 ถึง 4000 cm^{-1} จำนวนรอบในการสแกนคือ 100 รอบ และวิเคราะห์ในโหมด ATR

3.4.6.2 เทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี

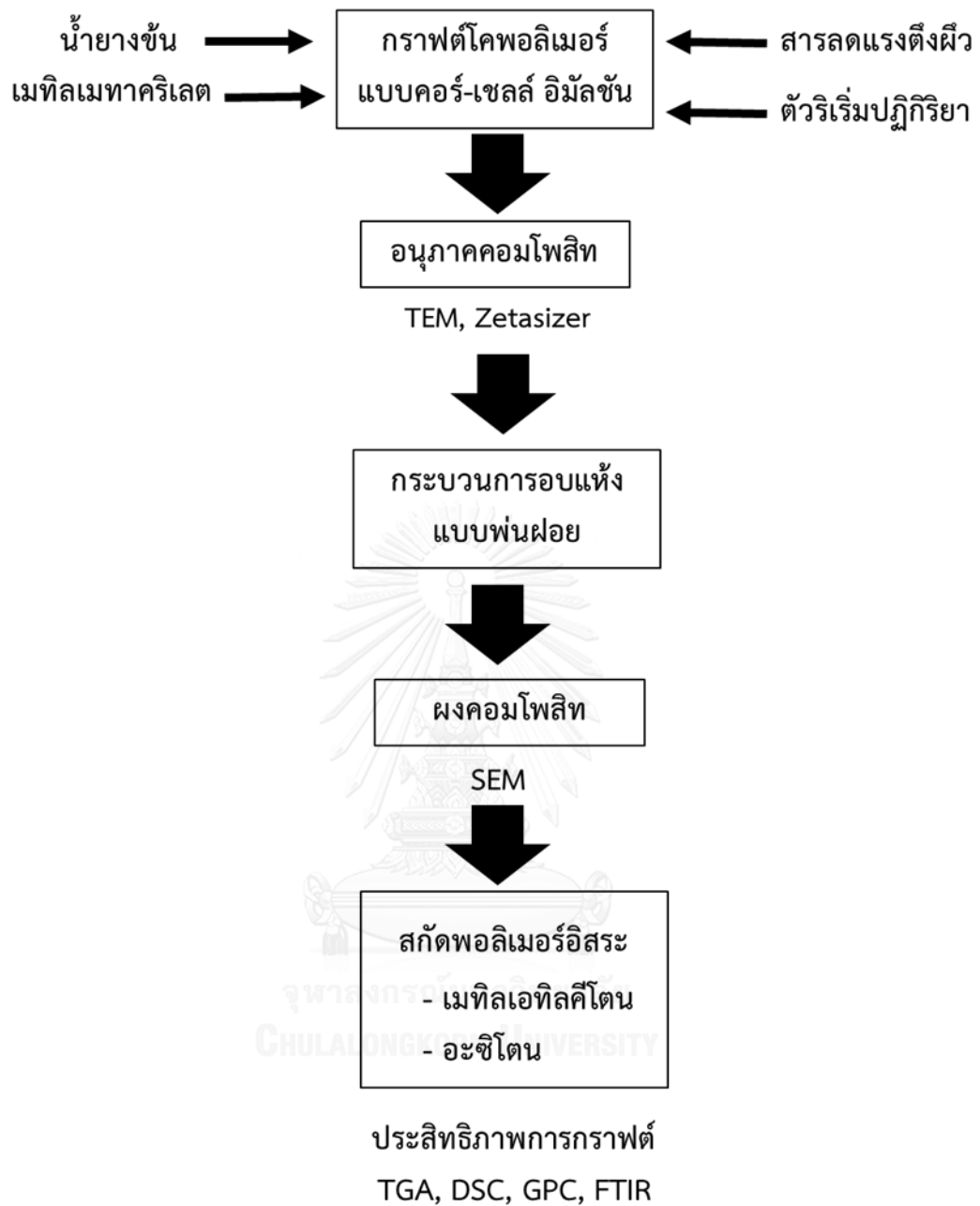
ในการวัดสัญญาณโปรตอนในสารตัวอย่างตัวทำละลายจะต้องไม่มีโปรตอน โดยพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งสามารถบวมตัว (Swollen) ได้ในตัวที่เรียม (CDCl_3) และนำไปทดสอบด้วยเครื่อง NanoBay 400 MHz จากบริษัท Bruker

3.4.7 วิเคราะห์สมบัติการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งและ พอลิแลคติกแอซิด (PLA)

วิเคราะห์สมบัติการรับแรงกระแทกของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งและ พอลิแลคติกแอซิดด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบค้อนเหวี่ยง (Pendulum impact tester) บริษัท Zwick รุ่น 5113 ตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนักขนาด 30 kgf-cm ในการทดสอบ

3.4.8 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งและ พอลิแลคติกแอซิด

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) ของบริษัท Diamond thermo gravimetric and Differential Analyzer รุ่น STD Q600 ที่อุณหภูมิ 40-800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการป้อนแก๊สออกซิเจน 100 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้ทราบอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ และอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์



รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไร้เซชัน

4.1.1 ผลของการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) ลงในน้ำยางธรรมชาติ

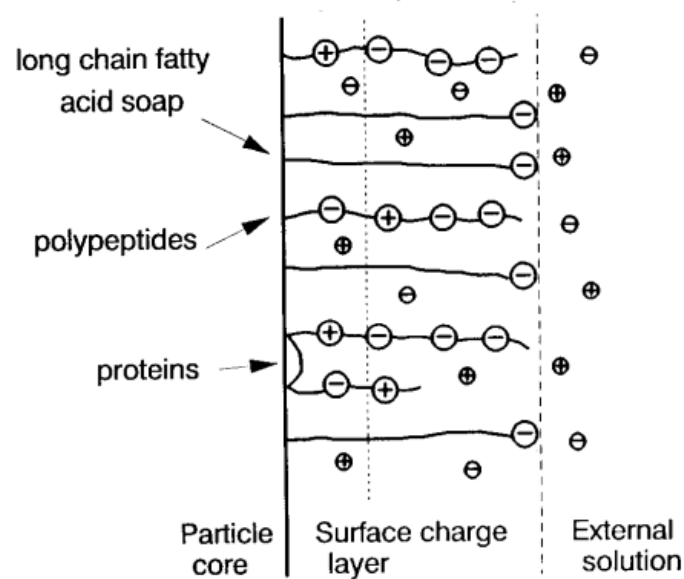
ค่าศักย์ซีต้าสามารถทำนายค่าความคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคได้ โดยอนุภาคที่มีค่าศักย์ซีต้าเป็นบวกหรือลบมากจะเกิดการหักล้างกันก่อให้เกิดเสถียรภาพการกระจายตัว อนุภาคแขวนลอยจะเสถียรเมื่อศักย์ซีต้ามี่ค่ามากกว่า +30 มิลลิโวลต์ หรือน้อยกว่า -30 มิลลิโวลต์ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคแขวนลอย โดยค่าศักย์ซีต้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำยางชั้นในปริมาณที่แตกต่างกันที่ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคยางธรรมชาติและค่าศักย์ซีต้าเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว

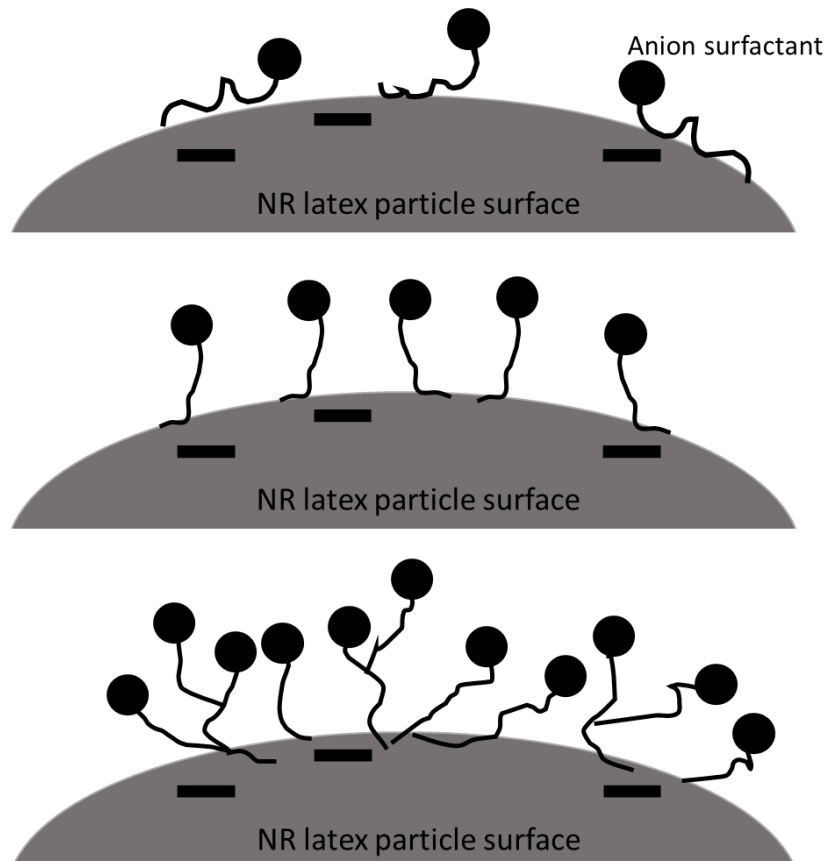
ปริมาณสารลดแรงตึงผิว (กรัมต่อยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก)	ขนาดเฉลี่ย (นาโนเมตร)	ค่าศักย์ซีต้า (มิลลิโวลต์)
0	318 ± 4.3	-53.96 ± 0.84
5	296 ± 1.6	-59.34 ± 0.85
10	322 ± 0.8	-66.84 ± 1.49
15	346 ± 3.0	-60.66 ± 0.44
20	374 ± 1.9	-26.66 ± 0.78
25	427 ± 0.6	-28.86 ± 1.96

จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อปริมาณสารลดแรงตึงผิวมากขึ้น ขนาดของอนุภาคในคอลลอยด์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคยางธรรมชาติ และส่งผลให้ค่าศักย์ซีต้ามี่ค่าเป็นลบมากขึ้น แต่เมื่อปริมาณของสารตึงผิวมากขึ้นจะทำให้เกิดมัลติเลเยอร์ (multilayer) ของสารลดแรงตึงผิวจึงทำให้ค่าศักย์ซีต้ามี่ค่าลดลง กลไกการดูดซับสารลดแรงตึงผิวบนอนุภาคยางธรรมชาติสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.1 โดยทั่วไปพื้นผิวของยางธรรมชาติจะมีประจุเป็นลบเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของฟอสโฟลิพิด (Phospholipid) ที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคยางธรรมชาติ เกิดเป็นสายโซ่ของกรดไขมันดูดซับอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคยางธรรมชาติ ในขณะที่โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว SDS จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีขั้ว (ประจุลบของหมู่ซัลเฟต เรียกส่วนนี้ว่า ส่วนหัว) และส่วนที่ไม่มีขั้ว (ไฮโดรคาร์บอน เรียกส่วนนี้ว่า ส่วนหาง) รูปที่ 4.2 แสดงกลไกการเกิดการดูดซับของสารลดแรงตึงผิว

ซึ่งสารลดแรงตึงผิวจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของยางธรรมชาติโดยหัวส่วนหางเข้าหาด้านพื้นผิวยาง เพราะ SDS มีประจุเป็นลบเหมือนกับประจุที่ผิวยางธรรมชาติ ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวน้อย โมเลกุลของ SDS จะมีการจัดเรียงตัวขนานไปกับพื้นผิวของยางธรรมชาติ เมื่อปริมาณของ SDS เพิ่มขึ้นโมเลกุลของ SDS จะเรียงตัวกันแบบตั้งฉากกับพื้นผิวของยางธรรมชาติ เนื่องการผลักกันของ ประจุที่เหมือนกันของ SDS และเมื่อปริมาณของ SDS เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดมัลติเลเยอร์ (multilayer) ของสารลดแรงตึงผิว โดยปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เลือกไปใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ 10 กรัมต่อยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก เนื่องจากเป็นปริมาณที่มีค่าศักยภาพต่ำที่สุด



รูปที่ 4.1 แผนภาพจำลองประจุบนพื้นผิวของยางธรรมชาติ [36]



รูปที่ 4.2 กลไกการดูดซับของ SDS บนอนุภาคยางธรรมชาติ

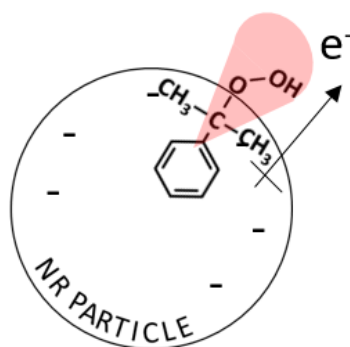
4.1.2 ผลของการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาลงในน้ำยางธรรมชาติต่อค่าศักย์ซีต้า

ค่าศักย์ซีต้าคือความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวอนุภาคกับในชั้นสารละลาย ผลของการศึกษาค่าศักย์ซีต้า ของการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาลงในน้ำยางธรรมชาติ จะทำให้ทราบถึงกลไกของระบบที่เกิดขึ้นเมื่อเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาลงในระบบ ซึ่งในการทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันจะใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ คือ คิวมินไฮเปอร์ออกไซด์ (Cumene hydroperoxide, CHPO) และ เตตระเอทิลีนเพนทามีน (Tetraethylene pentamine, TEPA)

คิวมินไฮเปอร์ออกไซด์ซึ่งโมเลกุลมีความเป็นขั้วต่ำ ทำให้เมื่อเติมคิวมินไฮเปอร์ออกไซด์ลงไป ในน้ำยางธรรมชาติ คิวมินไฮเปอร์ออกไซด์จะไปอยู่ที่บริเวณรอบๆพื้นผิวของอนุภาคยางธรรมชาติ และภายในอนุภาคยางธรรมชาติได้ ส่งผลให้ค่าศักย์ซีต้ามีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคยางธรรมชาติและค่าศักย์ซีต้าเมื่อเติมควมินไฮเปอร์ออกไซด์

ส่วนประกอบ	ขนาดเฉลี่ย (นาโนเมตร)	ค่าศักย์ซีต้า (มิลลิโวลต์)
HANR	322 ± 3.7	-53.96 ± 0.93
HANR + CHPO 0.5 phr	326 ± 7.1	-65.82 ± 1.68
HANR + CHPO 1 phr	332 ± 5.9	-60.92 ± 0.84
HANR + CHPO 2 phr	323 ± 4.1	-69.58 ± 0.98
HANR + CHPO 0.5 phr + SDS 10 phr	355 ± 6.7	-70.28 ± 1.09

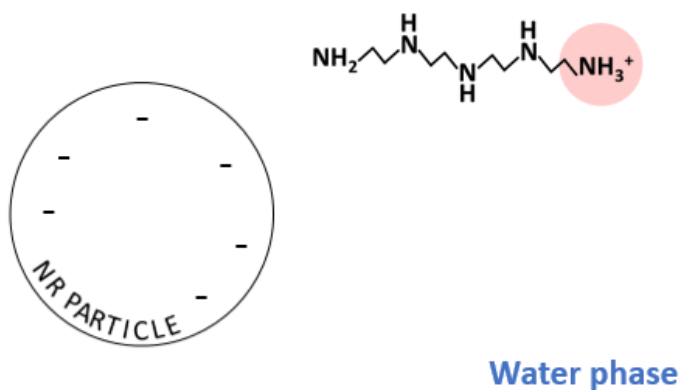


รูปที่ 4.3 ผลของการเติมตัวรีเริ่มควมินไฮเปอร์ออกไซด์ลงในน้ำยางธรรมชาติต่อค่าศักย์ซีต้า

ในขณะที่เตตระเอทิลีนเพนตะมีนโมเลกุลมีความเป็นขั้วสูง เมื่อเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงไปใต้น้ำยางธรรมชาติ เตตระเอทิลีนเพนตะมีนเมื่อโมเลกุลอยู่ในน้ำจะเกิดการแตกตัวทำให้โมเลกุลมีประจุเป็นบวก การเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนจึงเหมือนเป็นการเติมประจุตรงข้าม (counter ion) ลงในระบบคอลลอยด์ ซึ่งการเติมประจุตรงข้ามลงไปในระบบคอลลอยด์นี้จะทำให้ชั้นแพร่กระจายของประจุ (diffusion layer) มีความหนาลดลง จึงทำให้ค่าศักย์ซีต้ามี่ค่าเป็นลบลดลง ดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคยางธรรมชาติและค่าศักย์ซีต้าเมื่อเติมเตตระเอทิลีนเพนทามีน

ส่วนประกอบ	ขนาดเฉลี่ย (นาโนเมตร)	ค่าศักย์ซีต้า (มิลลิโวลต์)
HANR	322 ± 2.5	-53.96 ± 0.65
HANR + TEPA 0.5 phr	321 ± 7.2	-52.96 ± 0.77
HANR + TEPA 1 phr	315 ± 5.5	-45.02 ± 0.72
HANR + TEPA 2 phr	326 ± 7.6	-41.56 ± 0.51
HANR + TEPA 0.5 phr + SDS 10 phr	331 ± 4.8	-56.98 ± 0.63



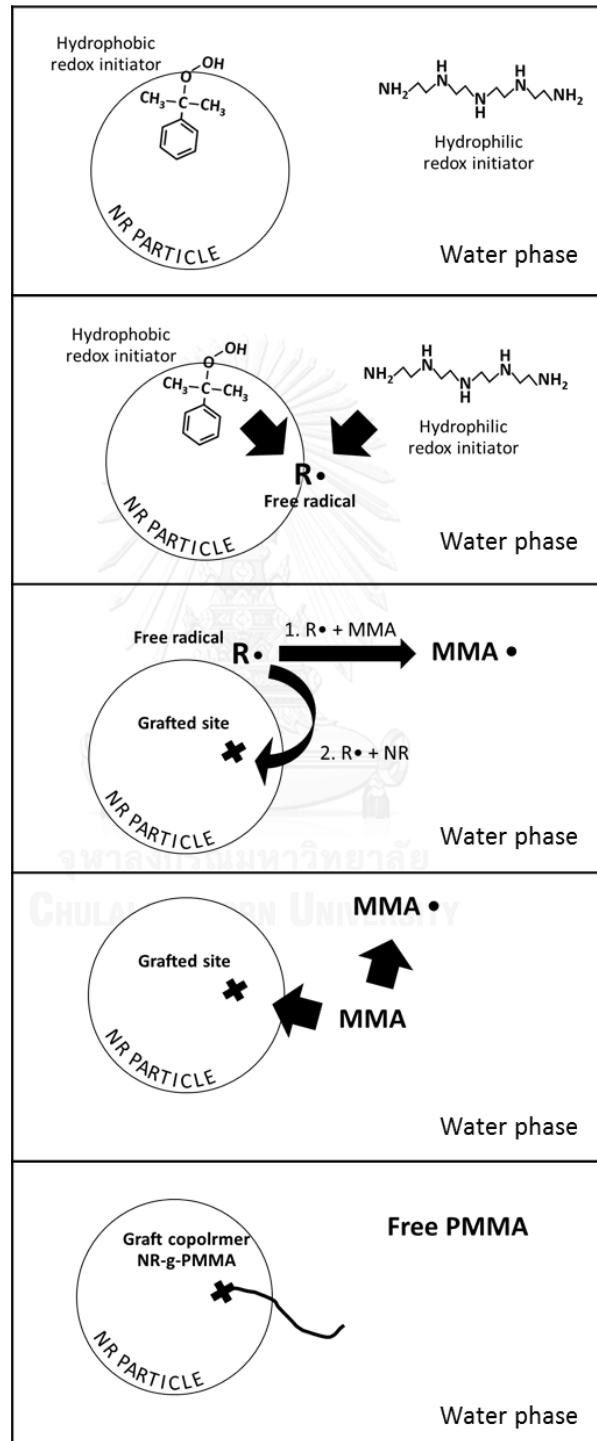
รูปที่ 4.4 ผลของการเติมตัวริเริ่มเตตระเอทิลีนเพนทามีนลงในน้ำยางธรรมชาติต่อค่าศักย์ซีต้า

จากผลของค่าศักย์ซีต้าทำให้ทราบถึงกลไกที่เกิดขึ้นของระบบเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวและตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยที่ปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์โรเซชันสามารถเกิดขึ้นได้ 2 บริเวณ ได้แก่

- บริเวณรอยต่อระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว ในที่นี้คือน้ำและผิวของอนุภาคยางธรรมชาติ
- บริเวณในเฟสน้ำ

มอนอเมอร์ในปฏิกิริยา คือ เมทิลเมทาคริเลท ซึ่งโมเลกุลมีความเป็นขั้วต่ำสามารถละลายน้ำได้บางส่วน ดังนั้นเมื่อเติมเมทิลเมทาคริเลทเข้าสู่ระบบ เมทิลเมทาคริเลทจะเข้าไปล้อมรอบอนุภาคยางพารา ในขณะที่ตัวริเริ่มปฏิกิริยาควิมีนไฮเปอร์ออกไซด์โมเลกุลมีความเป็นขั้วต่ำเช่นเดียวกันจึงไปล้อมรอบอนุภาคยางไว้ และเตตระเอทิลีนเพนทามีนมีความเป็นขั้วสูงจึงละลายอยู่ในน้ำ ทำให้บริเวณที่มีโอกาสเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์โรเซชันมากที่สุดคือบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำกับผิวของอนุภาคยางธรรมชาติ แต่เนื่องจากเมทิลเมทาคริเลทและควิมีนไฮเปอร์ออกไซด์สามารถละลายน้ำได้บางส่วน ทำให้ในเฟสน้ำมีการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์โรเซชันได้เช่นกัน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเฟสน้ำนั้นจะทำให้ได้โฮโมพอลิเมอร์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลทเกิดขึ้นในระบบ ซึ่งโฮโมพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น

มีโอกาที่จะเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับอนุภาตยงธรรมชาติทำให้ได้โคพอลิเมอร์เกิดขึ้น โดยกลไกการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงกลไกการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง

4.2 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน ในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งของยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ในการเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งของยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตจะเตรียมผ่านกระบวนการอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง ได้แก่ ค่าประสิทธิภาพการกราฟต์ (grafting efficiency) ค่าร้อยละของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง (NR-g-PMMA) ค่าร้อยละของยางธรรมชาติอิสระ (Free NR) ค่าร้อยละของพอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระ (Free PMMA) และศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งที่ได้จากการนำพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งที่เตรียมได้ไปผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ในการรายงานขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง อนุภาคพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งจะวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า ส่วนผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งจะวัดขนาดอนุภาคจากภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีคำศัพท์เกี่ยวกับหน่วยการผสมยางคือ phr (part per hundred of rubber) โดยจะคิดเป็นสัดส่วนปริมาณสารต่างๆเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ 100 ส่วนโดยน้ำหนัก

4.2.1 ลำดับการเติมสารที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง

4.2.1.1 ผลของลำดับการเติมสารต่อพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง

ในขณะที่เกิดพอลิเมอไรเซชันอาจเกิดการเชื่อมขวางกันระหว่างโมเลกุลทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่และตกตะกอนลงมา ซึ่งตะกอนเหล่านี้จะไม่สามารถนำใช้ต่อในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยได้ จึงทำการทดลองโดยเปลี่ยนลำดับการเติมสารในการทำปฏิกิริยาอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน เพื่อหาลำดับการเติมสารที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง ซึ่งพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งที่สังเคราะห์ได้จะนำไปสู่กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อผลิตเป็นผงต่อไป ในการทดลองจะศึกษาลำดับในการเติมสาร 4 วิธี ดังรูปที่ 4.6 และในการทดลองภาวะของปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 4.4

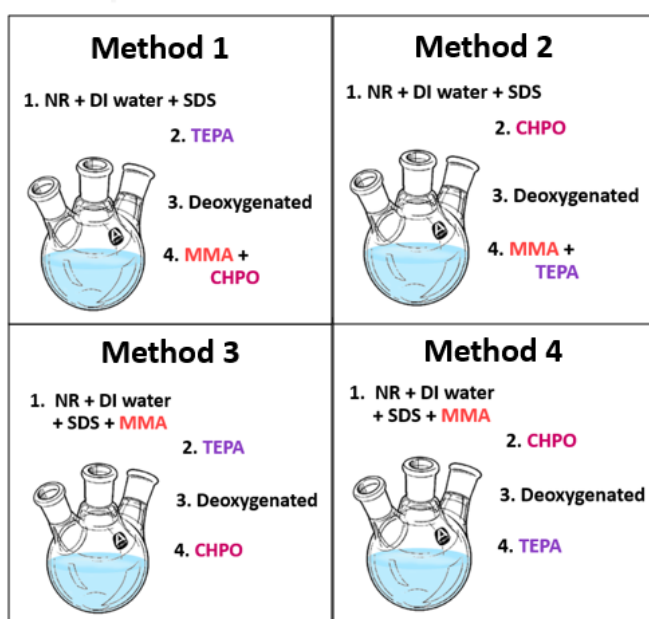
ลำดับการเติมสาร 4 วิธี ได้แก่

1) การเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งโดยการเติมมอนอเมอร์ในลำดับสุดท้าย เป็นวิธีที่ 1 และ 2

นำน้ำยางชั้น 50 กรัม เติมน้ำกลั่น 100 กรัมและโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต หลังจากนั้นเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 1 คือเตตระเอทิลีนเพนตามีน ทำการปั่นกวนสารผสมเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำสารผสมที่ได้ไปบรรจุในขวดก้นกลมสามคอ และทำการไล่อากาศออกจากระบบด้วยการป้อนแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที เมื่อทำการไล่อากาศเสร็จแล้วจึงนำขวดก้นกลมไปวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ทำการปั่นกวนและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเติมสารผสมระหว่างเมทิลเมทาคริเลตและตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 2 คือ คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำการเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งอีกครั้งโดยทำการสลับลำดับการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 1 และ 2

2) การเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งโดยการเติมมอนอเมอร์ในลำดับแรก เป็นวิธีที่ 3 และ 4

นำน้ำยางชั้น 50 กรัม เติมน้ำกลั่น 100 กรัม โซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต และเมทิลเมทาคริเลต หลังจากนั้นเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 1 คือเตตระเอทิลีนเพนตามีน ทำการปั่นกวนสารผสมเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำสารผสมที่ได้ไปบรรจุในขวดก้นกลมสามคอ และทำการไล่อากาศออกจากระบบด้วยการป้อนแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที เมื่อทำการไล่อากาศเสร็จแล้วจึงนำขวดก้นกลมไปวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ทำการปั่นกวนและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 2 คือ คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำการเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งอีกครั้งโดยทำการสลับลำดับการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 1 และ 2



รูปที่ 4.6 แผนภาพแสดงลำดับการเติมสารของวิธีการที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 แสดงสถานะของปฏิกิริยาที่ศึกษาผลของลำดับการเติมสาร

ชนิดของสาร	ปริมาณ (กรัมต่ออย่าง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก)
มอนอเมอร์	100
ตัวริเริ่มปฏิกิริยา	0.5
สารลดแรงตึงผิว	10

* ปฏิกิริยาดำเนินภายใต้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าลำดับการเติมสารส่งผลต่อปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าตะกอนที่เกิดขึ้นในวิธีการที่ 1 มีปริมาณตะกอนสูงที่สุด รองลงมาคือวิธีการที่ 2 3 และ 4 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบลำดับการเติมมอนอเมอร์พบว่าการเติมมอนอเมอร์ก่อนและรอให้มอนอเมอร์เกิดการบวมตัวรอบๆอนุภาคยางธรรมชาติในวิธีการที่ 3 และ 4 จะเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (NR-g-PMMA) ในปริมาณที่สูงกว่า และส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการกราฟต์สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากมอนอเมอร์ที่บวมตัวรอบอนุภาคยางธรรมชาติจะมีโอกาสพบกับอนุภาคยางธรรมชาติและเกิดการกราฟต์ได้มากกว่าการที่เติมมอนอเมอร์ในลำดับแรก (วิธีที่ 1 และ 2) นอกจากนี้ลำดับการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการกราฟต์เช่นกัน การเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาคิวมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ก่อนจะทำให้ค่าประสิทธิภาพการกราฟต์สูงขึ้น เป็นผลมาจากการที่คิวมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นสารที่มีขั้วตำจึงมีแนวโน้มที่จะไปอยู่บริเวณรอบๆอนุภาคยางธรรมชาติ ทำให้มีโอกาสในการเกิดอนุมูลอิสระที่ผิวรอยต่อระหว่างอนุภาคยางธรรมชาติกับน้ำ อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะพบกับอนุภาคยางธรรมชาติทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่ของยางธรรมชาติและเกิดเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งในที่สุด ทำให้การเติมตัวริเริ่มชนิดเติมตัวริเริ่มคิวมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์มีค่าประสิทธิภาพการกราฟต์ที่สูงกว่า และในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์โรเซชันที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดพอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระในระบบด้วย ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยานี้ขั้นตอนการแผ่ขยายจะเป็นขั้นควบคุมปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นขั้นที่เกิดปฏิกิริยาได้ช้าที่สุดคือ ในขั้นตอนการแผ่ขยายนี้จะต้องรอให้หยดมอนอเมอร์ละลายน้ำและ แพร่มาเจอกับจุดว่องไวที่เกิดขึ้นในระบบก่อน

จากตารางที่ 4.7 พบว่าปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อยู่ในพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยวิธีการเติมสารทั้ง 4 วิธี มีปริมาณใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่ลำดับการเติมทั้ง 4 วิธีมีประสิทธิภาพในการกราฟต์ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.5 แสดงส่วนประกอบที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาที่ศึกษาผลของลำดับการเติมสาร

Component	Method			
	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4
Liquid (%)	94.75	95.74	97.18	99.00
Solid (%)	5.25	4.26	2.82	1.00

ตารางที่ 4.6 ผลของลำดับการเติมสารต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์

Properties	Method			
	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4
Conversion (%)	77.89	80.90	81.09	79.98
Grafting efficiency (%)	53.31	56.01	57.48	58.27
NR-g-PMMA (%)	71.99	72.45	73.85	74.57
Free NR (%)	7.58	7.88	7.12	6.90
Free PMMA (%)	20.43	19.67	19.03	18.53

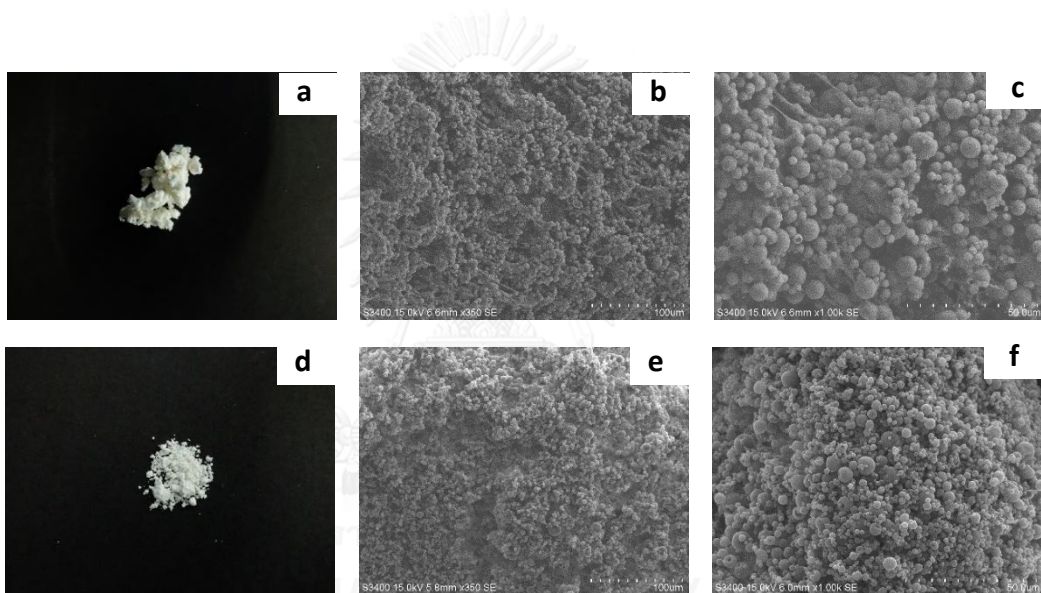
ตารางที่ 4.7 ผลของลำดับการเติมสารต่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่ง

Properties	Method			
	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4
PMMA in Grafted NR (%)	32.40	34.56	34.83	34.70
NR in Grafted NR (%)	67.60	65.44	65.17	65.30

4.2.1.2 ผลของลำดับการเติมสารต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่ง

พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่งที่สังเคราะห์ได้จะถูกทำให้เป็นผงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย การอบแห้งแบบพ่นฝอยจะทำให้สภาวะ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 100 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารตัวอย่าง 8 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศ 750 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 4.7 เปรียบเทียบลักษณะของผงยางที่เติมสารลดแรงตึงผิวกับผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่ง พบว่าผงยางธรรมชาติที่เติมสารลดแรงตึงผิวที่ได้มีลักษณะเหนียว (Stick) ติดกันรวมเป็นก้อน ในขณะที่ผงพอลิ

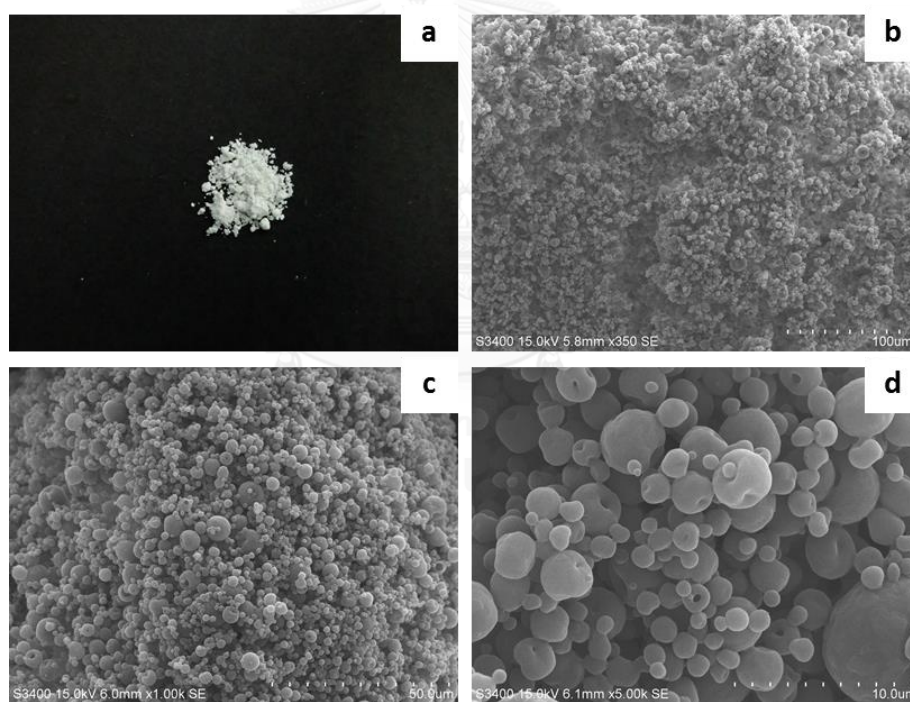
เมอร์รวมแบบตอกิ่งไม่ติดกันมีการกระจายตัวได้ดีกว่า ลักษณะสัณฐานของอนุภาคนั้นมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม นอกจากนี้พบว่าผงพอลิเมอร์รวมแบบตอกิ่งที่เกิดขึ้นจะเป็นกลุ่มอนุภาคทุติยภูมิ (Secondary particle) โดยพิจารณาจากขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นในคอลลอยมีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย แสดงว่าขณะทำการอบแห้งแบบพ่นฝอยมีการจับตัวกันของอนุภาคคอลลอย และผงที่ได้จากวิธีการเติมสารทั้ง 4 วิธีมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน ซึ่งขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์รวมแบบตอกิ่งและผงพอลิเมอร์รวมแบบตอกิ่งแสดงในตารางที่ 4.8 ทั้งนี้จากรูปที่ได้จากเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน รูปที่ 4.8 – 4.11 จะเห็นได้ว่ามีอนุภาคขนาดเล็กปนอยู่ด้วย อนุภาคเล็กๆเหล่านั้นคืออนุภาคของสารลดแรงตึงผิวที่ใส่ลงไปในระบบเพื่อเพิ่มความเสถียรภาพของอนุภาคยางธรรมชาติในคอลลอย[4]



รูปที่ 4.7 ลักษณะสัณฐานของผงพอลิเมอร์รวมแบบตอกิ่งที่มองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 350 และ 1000 เท่า ตามลำดับ (a) (b) และ (c) แสดงผงยางธรรมชาติที่เติมสารลดแรงตึงผิว (d) (e) และ (f) แสดงผงพอลิเมอร์รวมแบบตอกิ่งที่เตรียมด้วยวิธีการเติมสารที่ 4

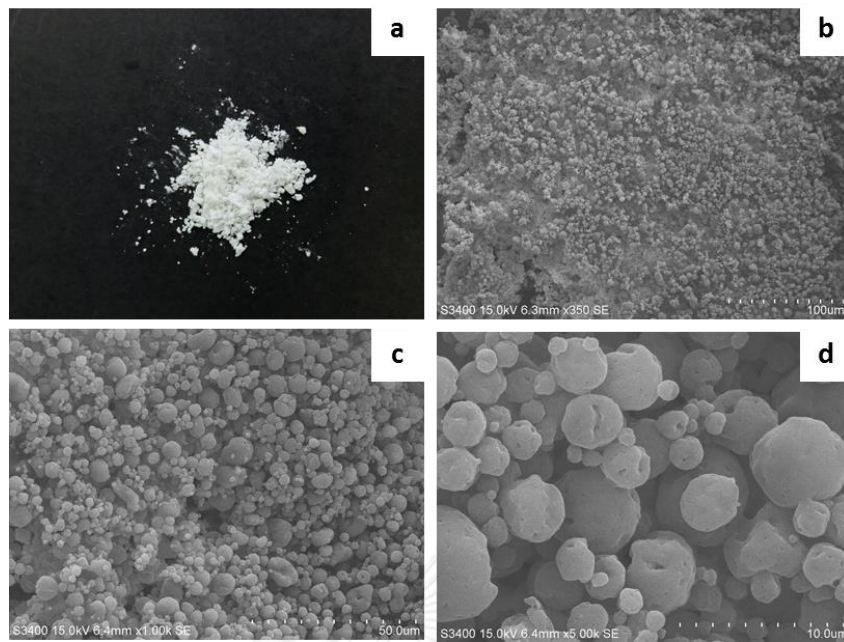
ตารางที่ 4.8 ขนาดอนุภาคของคอลลอยด์และผงของพอลิเมอร์

ชนิด	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	
	คอลลอยด์	ผง
น้ำยางเติมสารลดแรงตึงผิว	0.323 ± 0.8	12.91 ± 2.4
พอลิเมทิลเมทาคริเลต	0.187 ± 0.6	6.94 ± 1.8
พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง		
เติมสารวิธีที่ 1	0.307 ± 3.4	5.34 ± 1.2
เติมสารวิธีที่ 2	0.335 ± 2.8	5.28 ± 1.9
เติมสารวิธีที่ 3	0.299 ± 4.8	5.57 ± 1.8
เติมสารวิธีที่ 4	0.302 ± 5.6	4.84 ± 1.8

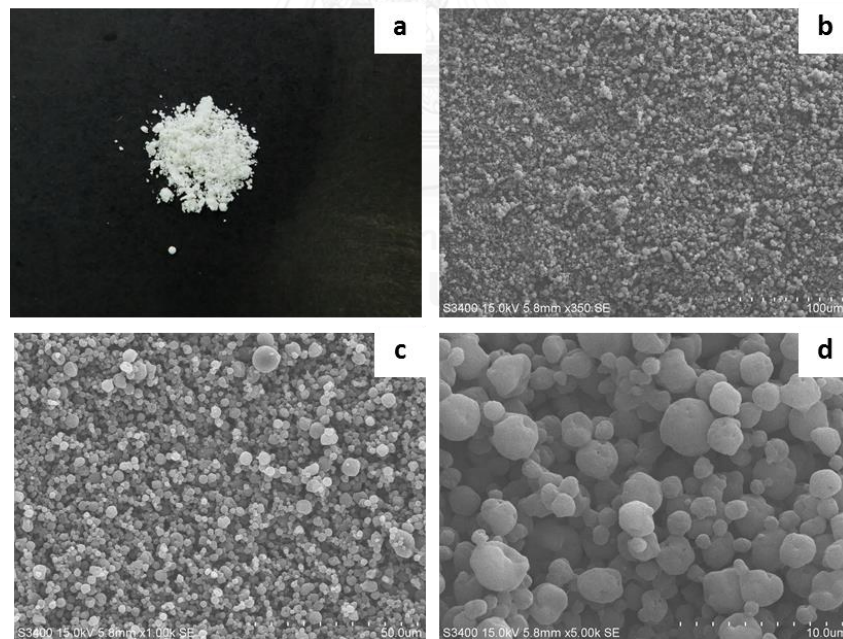


รูปที่ 4.8 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมได้จากวิธีการเติมสารที่ 1

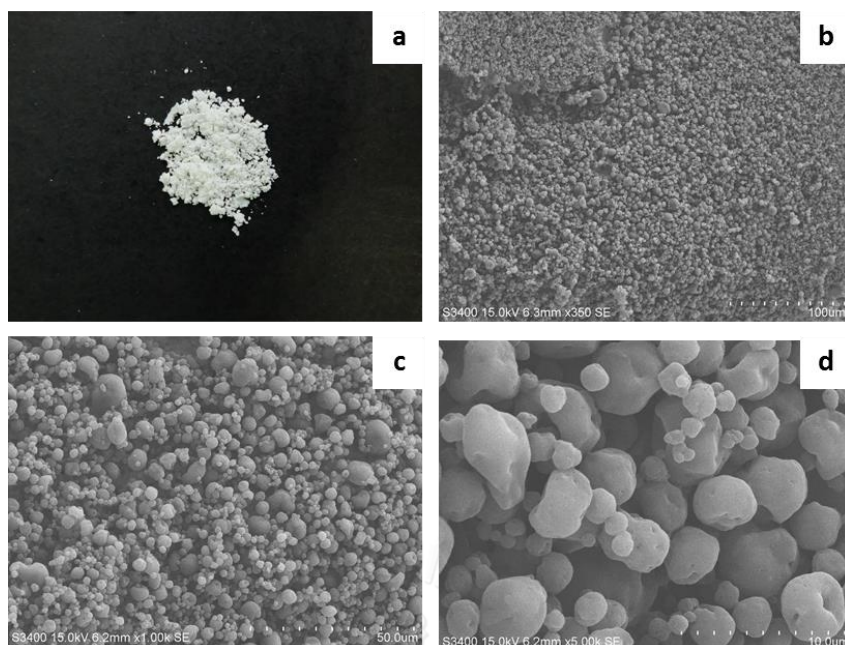
(a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมได้จากวิธีการเติมสารที่ 2 (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมได้จากวิธีการเติมสารที่ 3 (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมได้จากวิธีการเติมสารที่ 4 (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ

จากการศึกษาลำดับการเติมสารที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งจะเลือกวิธีการที่ 4 มาใช้ในการศึกษาตัวแปรอื่น เนื่องจากวิธีการที่ 4 เป็นวิธีการที่เกิดตะกอนในขณะทำปฏิกิริยาน้อยที่สุดและมีประสิทธิภาพการกราฟต์สูงที่สุด

4.2.2 ความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

4.2.2.1 ผลของความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

หลังจากศึกษาและได้ลำดับการเติมสารที่เกิดตะกอนในระบบน้อยที่สุด และมีประสิทธิภาพการกราฟต์สูงที่สุดแล้ว ตัวแปรถัดไปที่ศึกษาคือปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยา ได้แก่ ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัมต่ออย่าง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยศึกษาผลของปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อค่าประสิทธิภาพการกราฟต์ (grafting efficiency) ค่าร้อยละของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (NR-g-PMMA) ค่าร้อยละของยางธรรมชาติอิสระ (Free NR) และค่าร้อยละของพอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระ (Free PMMA) ในการทดลองภาวะของปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงสถานะของปฏิกิริยาที่ศึกษาผลของความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

ชนิดของสาร	ปริมาณ (กรัมต่ออย่าง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก)
มอนอเมอร์	100
สารลดแรงตึงผิว	10

* ปฏิกิริยาดำเนินภายใต้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
ด้วยลำดับการเติมสารวิธีที่ 4

จากตารางที่ 4.10 พบว่าเมื่อปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยาสูงขึ้นจาก 0.5 เป็น 1.0 กรัมต่ออย่าง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก จะทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งมากขึ้นและค่าประสิทธิภาพการกราฟต์สูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่สูงขึ้นทำให้เกิดอนุมูลอิสระในระบบมากขึ้น ทำให้มีโอกาสที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่ของยางธรรมชาติมากขึ้น แต่เมื่อปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาสูงขึ้นไปมากกว่า 1.0 กรัมต่ออย่าง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก พบว่าค่าประสิทธิภาพการกราฟต์ลดลง เนื่องจากการเกิดอนุมูลอิสระจำนวนมากส่งผลให้เกิดไฮโมพอลิเมอร์มากขึ้น และอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในปริมาณมากจะไปจับกับตำแหน่งที่เกิดการกราฟต์ทำให้พอลิเมอร์เชนสั้นที่สุดลง นอกจากนี้ผลจากความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่สูงขึ้นจะทำให้ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ในระบบลดลง

จากตารางที่ 4.11 พบว่าที่ปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยา 1.0 กรัมต่ออย่างธรรมชาติ 100 กรัม จะพบปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งในปริมาณที่มากที่สุด ทั้งนี้เป็นผลมาจากที่ปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยา 1.0 กรัมต่ออย่างธรรมชาติ 100 กรัม มีประสิทธิภาพในการกราฟต์ที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4.10 ผลของความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์

Properties	Initiator concentration (phr)			
	0.5	1.0	1.5	2.0
Conversion (%)	79.98	82.50	88.76	86.54
Grafting efficiency (%)	58.27	75.09	65.51	59.07
NR-g-PMMA (%)	74.57	82.71	76.86	73.75
Free NR (%)	6.90	6.03	6.93	7.27
Free PMMA (%)	18.53	11.26	16.21	18.98

ตารางที่ 4.11 ผลของความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง

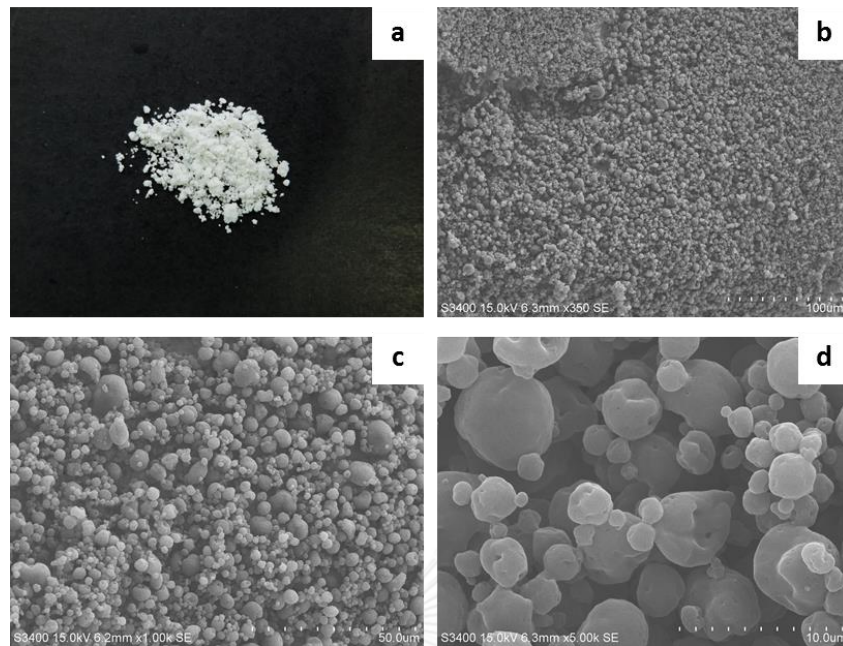
Properties	Initiator concentration (phr)			
	0.5	1.0	1.5	2.0
PMMA in Grafted NR (%)	34.70	41.03	40.06	37.49
NR in Grafted NR (%)	65.30	58.97	59.94	62.51

4.2.2.2 ผลของความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง

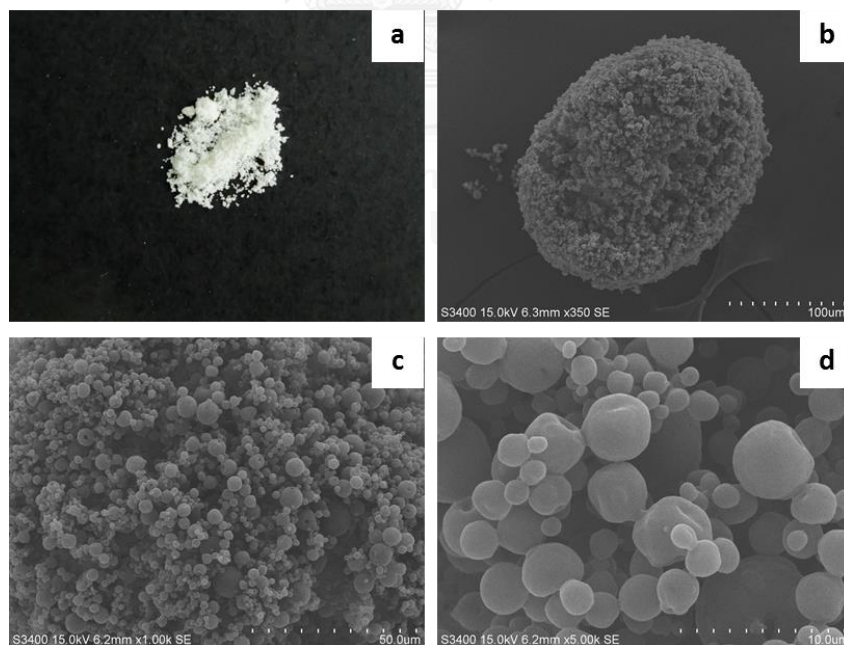
พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งที่สังเคราะห์ได้จะถูกทำให้เป็นผงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย การอบแห้งแบบพ่นฝอยจะทำให้สภาวะ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 100 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารตัวอย่าง 8 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศ 750 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 4.12 – 4.15 พงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งที่เตรียมได้ไม่เกาะติดกันทั้งนี้ เป็นผลมาจากการที่มีปริมาณของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งเป็น และมีพอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระอยู่ทำให้ผงที่เตรียมได้ไม่เกาะติดกัน ลักษณะสัณฐานของอนุภาคนั้นมีลักษณะเป็นกลุ่มอนุภาคทุติยภูมิ (Secondary particle) มีรูปร่างเป็นทรงกลม และมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน ดังที่แสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลของความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อขนาดอนุภาคของคอลลอยด์และผงของพอลิเมอร์

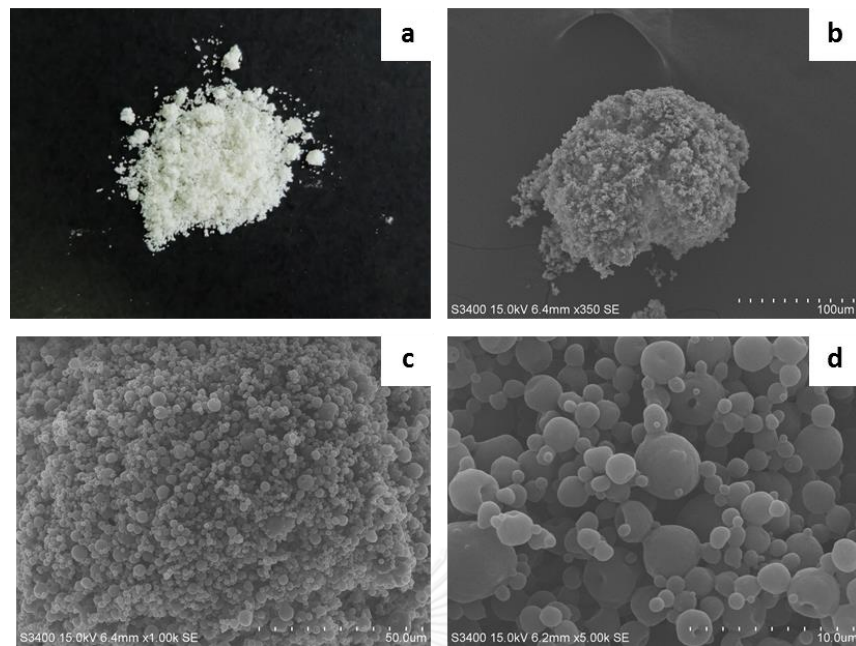
ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (phr)	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	
	คอลลอยด์	ผง
0.5	0.302 ± 5.6	4.80 ± 1.8
1.0	0.306 ± 2.3	4.42 ± 1.5
1.5	0.306 ± 2.8	2.80 ± 0.9
2.0	0.321 ± 2.6	5.24 ± 2.6



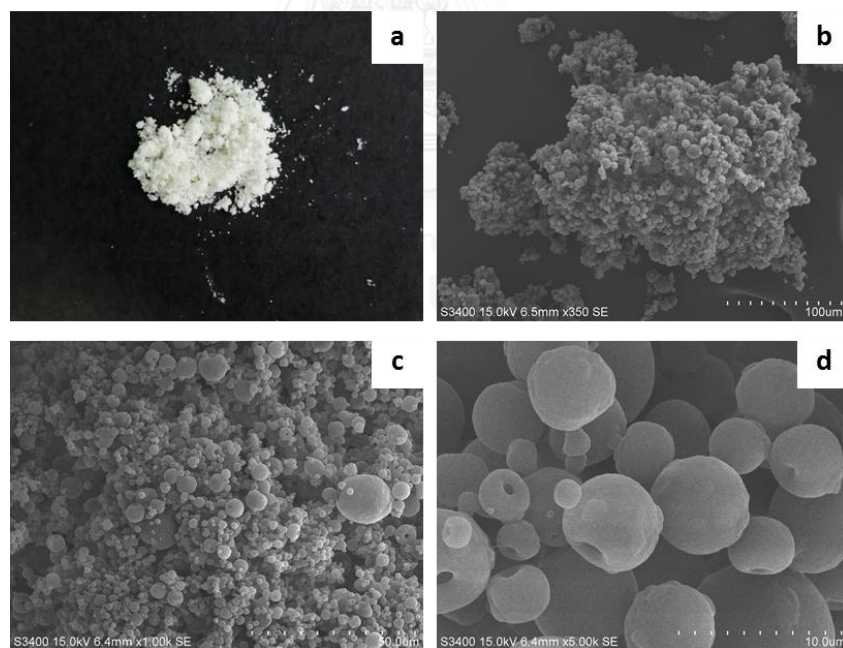
รูปที่ 4.12 ลักษณะสัณฐานของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมจากปริมาณตัวริเริ่ม ปฏิกริยา 0.5 phr (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ลักษณะสัณฐานของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมจากปริมาณตัวริเริ่ม ปฏิกริยา 1.0 phr (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมจากปริมาณตัวริเริ่ม ปฏิกิริยา 0.5 phr (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมจากปริมาณตัวริเริ่ม ปฏิกิริยา 0.5 phr (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นตัวริเริ่มที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งจะเลือกความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ 1.0 กรัมต่ออย่าง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก มาใช้ในการศึกษาตัวแปรอื่น เนื่องจากความเข้มข้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ 1.0 นี้มีประสิทธิภาพการกราฟต์สูงที่สุด

4.2.3 ความเข้มข้นมอนอเมอร์ที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

4.2.3.1 ผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ต่อพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

เมื่อทราบปริมาณที่เหมาะสมของตัวริเริ่มปฏิกิริยาแล้ว จะทำการศึกษาปริมาณของมอนอเมอร์ที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง โดยปริมาณของมอนอเมอร์ที่ศึกษา ได้แก่ 25 50 75 และ 100 กรัมต่ออย่าง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยศึกษาผลของปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อค่าประสิทธิภาพการกราฟต์ (grafting efficiency) ค่าร้อยละของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (NR-g-PMMA) ค่าร้อยละของยางธรรมชาติอิสระ (Free NR) และค่าร้อยละของพอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระ (Free PMMA) ในการทดลองภาวะของปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 สภาวะของปฏิกิริยาที่ศึกษาผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์

ชนิดของสาร	ปริมาณ (กรัมต่ออย่าง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก)
ตัวริเริ่มปฏิกิริยา	1.0
สารลดแรงตึงผิว	10

* ปฏิกิริยาดำเนินภายใต้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ด้วยลำดับการเติมสารวิธีที่ 4

จากตารางที่ 4.14 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของมอนอเมอร์มีค่าสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกราฟต์มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ไฮโมพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในระบบก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากปริมาณของมอนอเมอร์ที่สูงขึ้นทำให้โอกาสที่มอนอเมอร์กับยางธรรมชาติจะพบกันมากขึ้นทำให้เกิดการกราฟต์ได้มากขึ้น และปริมาณมอนอเมอร์ที่สูงขึ้นทำให้โอกาสที่มอนอเมอร์จะมาเจอกันมีมากขึ้นทำให้เกิดไฮโมพอลิเมอร์ในระบบมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่พบในพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง ดังที่แสดงในตารางที่ 4.15 พบว่าเมื่อปริมาณของมอนอเมอร์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.14 ผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์

Properties	Monomer concentration (phr)			
	25	50	75	100
Conversion (%)	79.50	78.23	81.50	82.46
Grafting efficiency (%)	47.91	61.87	70.67	75.08
NR-g-PMMA (%)	83.81	81.30	81.69	82.71
Free NR (%)	7.56	7.98	7.19	6.03
Free PMMA (%)	8.63	10.72	11.12	11.26

ตารางที่ 4.15 ผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ต่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง

Properties	Monomer concentration (phr)			
	25	50	75	100
PMMA in Grafted NR (%)	9.47	21.39	32.79	41.02
NR in Grafted NR (%)	90.53	78.61	67.21	58.98

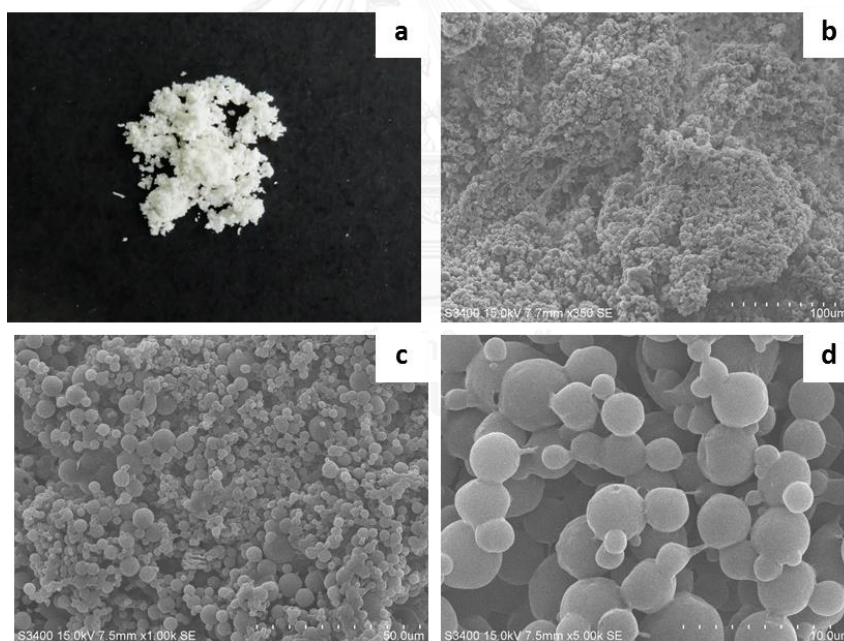
4.2.3.2 ผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง

พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งที่สังเคราะห์ได้จะถูกทำให้เป็นผงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย การอบแห้งแบบพ่นฝอยจะทำให้สภาวะ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 100 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารตัวอย่าง 8 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศ 750 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 4.16 – 4.19 เมื่อนำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า ที่ปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตน้อยผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งที่สังเคราะห์ได้พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งที่สังเคราะห์ได้มีการยึดเกาะกัน เป็นผลมาจากมียางธรรมชาติบางส่วนที่ไม่ถูกห่อหุ้มด้วยเมทิลเมทาคริเลตทำให้เกิดการเกาะติดกัน ลักษณะสัณฐานของอนุภาคนั้นมีลักษณะเป็นกลุ่มอนุภาคทุติยภูมิ (Secondary particle) และมีอนุภาคบางส่วนไม่เป็นทรงกลม ทั้งนี้เป็นผลมาจากที่อนุภาคเหล่านั้นเกาะติดกัน จากตารางที่ 4.16 พบว่าที่ปริมาณของมอนอเมอร์หรือเมทิลเมทาคริเลต

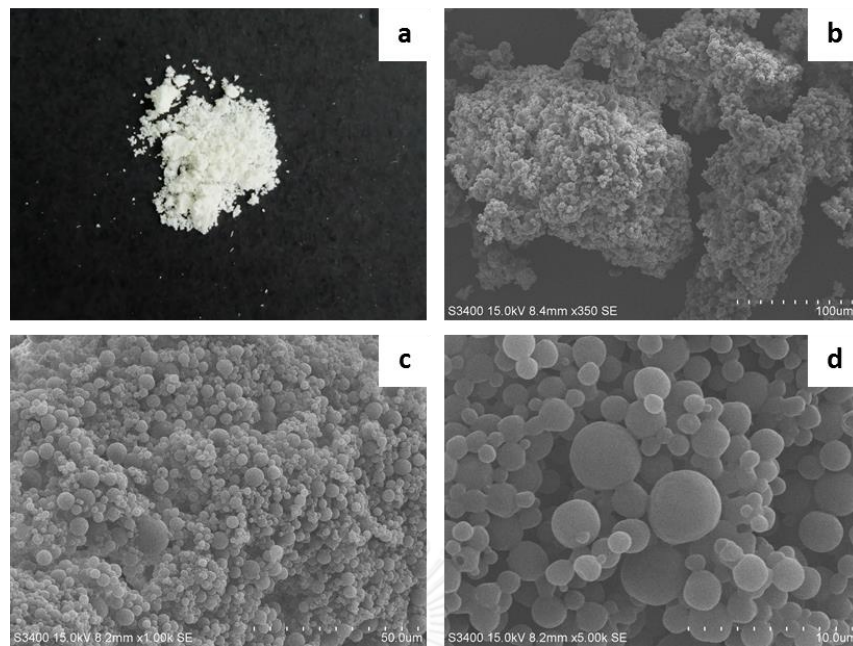
น้อยขนาดของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งจะมีขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกาะติดกันของอนุภาค ทำให้ผงอนุภาคพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 4.16 ผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ต่อขนาดอนุภาคของคอลลอยด์และผงของพอลิเมอร์

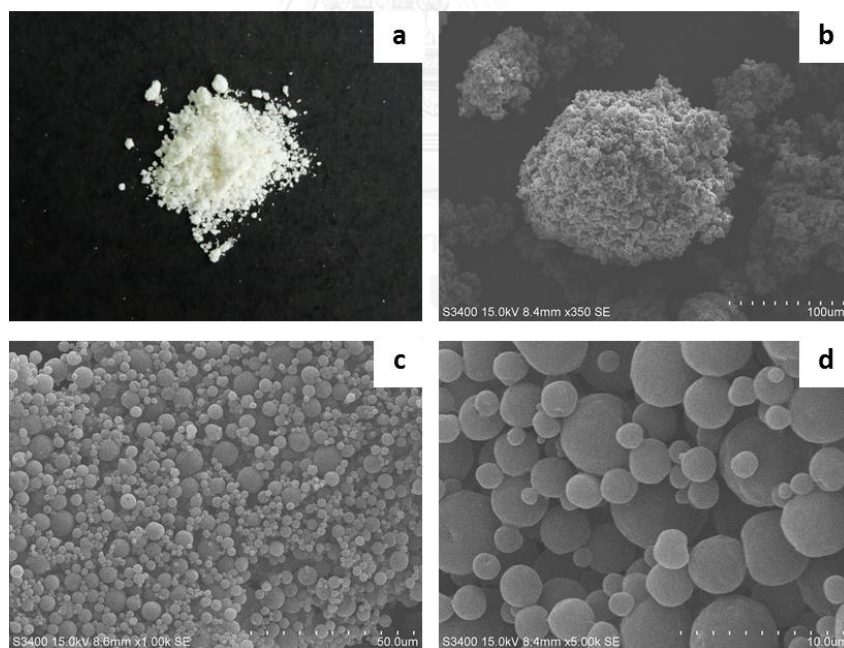
มอนอเมอร์ (phr)	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	
	คอลลอยด์	ผง
25	0.316 ± 4.4	4.74 ± 1.3
50	0.322 ± 2.6	4.24 ± 1.0
75	0.323 ± 4.8	4.62 ± 1.3
100	0.306 ± 2.3	4.42 ± 1.5



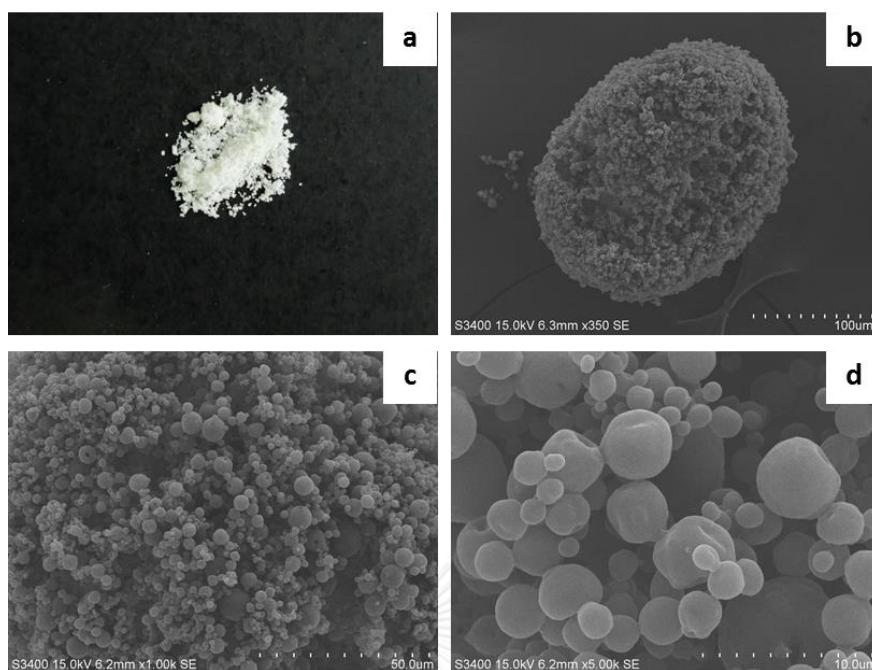
รูปที่ 4.16 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งที่เตรียมจากปริมาณมอนอเมอร์ 25 phr (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมจากปริมาณมอนอเมอร์ 50 phr (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมจากปริมาณมอนอเมอร์ 75 phr (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมจากปริมาณมอนอเมอร์ 100 phr (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งจะเลือกความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่ 25 กรัมต่ออย่าง 100 โดยน้ำหนักยางธรรมชาติ มาใช้ในการศึกษาตัวแปรอื่น เนื่องจากความเข้มข้นมอนอเมอร์ที่ 25 กรัมต่ออย่าง 100 โดยน้ำหนักยางธรรมชาตินี้มีปริมาณเมทิลเมทาคริเลตน้อยที่สุด แต่ยังคงเตรียมเป็นผงได้โดยที่อนุภาคไม่เกาะติดกันมากนัก ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่มากที่สุด

4.2.4 เวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

4.2.4.1 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

เวลาในการทำปฏิกิริยาจะส่งผลต่อความยาวของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ ซึ่งเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ศึกษา ได้แก่ 1 3 5 และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยศึกษาผลของปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อค่าประสิทธิภาพการกราฟต์ (grafting efficiency) ค่าร้อยละของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (NR-g-PMMA) ค่าร้อยละของยางธรรมชาติอิสระ (Free NR) และค่าร้อยละของพอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระ (Free PMMA) ในการทดลองภาวะของปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 สภาวะของปฏิกิริยาที่ศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

ชนิดของสาร	ปริมาณ (กรัมต่ออย่าง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก)
มอนอเมอร์	25
ตัวริเริ่มปฏิกิริยา	1.0
สารลดแรงตึงผิว	10

* ปฏิกิริยาดำเนินภายใต้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ด้วยลำดับการเติมสารวิธีที่ 4

จากตารางที่ 4.18 พบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นปริมาณของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกราฟต์สูงขึ้น เนื่องจากเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นทำให้มีโอกาสที่จะเกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่ของยางมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นก็มีความเสี่ยงที่จะเกิดการเชื่อมขวางกันของโมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดขึ้นทำให้โอกาสที่จะเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งมีสูงขึ้น แต่เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น มากกว่า 5 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการกราฟต์มีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่จุดว่องไวหรืออนุมูลอิสระที่เกิดบนสายโซ่ของยางธรรมชาติได้เกิดปฏิกิริยาหมดแล้ว และการเกิดไฮโดรพอลิเมอร์มีแนวโน้มที่เกิดได้ง่ายกว่าการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

จากตารางที่ 4.19 พบว่าเมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งจะเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่มีประสิทธิภาพการกราฟต์ที่สูงขึ้น แต่เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นไปถึง 7 ชั่วโมง พบว่าปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งและประสิทธิภาพการกราฟต์จะลดลง

ตารางที่ 4.18 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์

Properties	Time (hr)			
	1	3	5	7
Conversion (%)	50.42	79.50	85.64	92.64
Grafting efficiency (%)	15.71	47.91	59.45	35.96
NR-g-PMMA (%)	79.64	83.81	86.74	81.81
Free NR (%)	10.93	7.56	6.11	6.15
Free PMMA (%)	9.43	8.63	7.15	12.04

ตารางที่ 4.19 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและ
ยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง

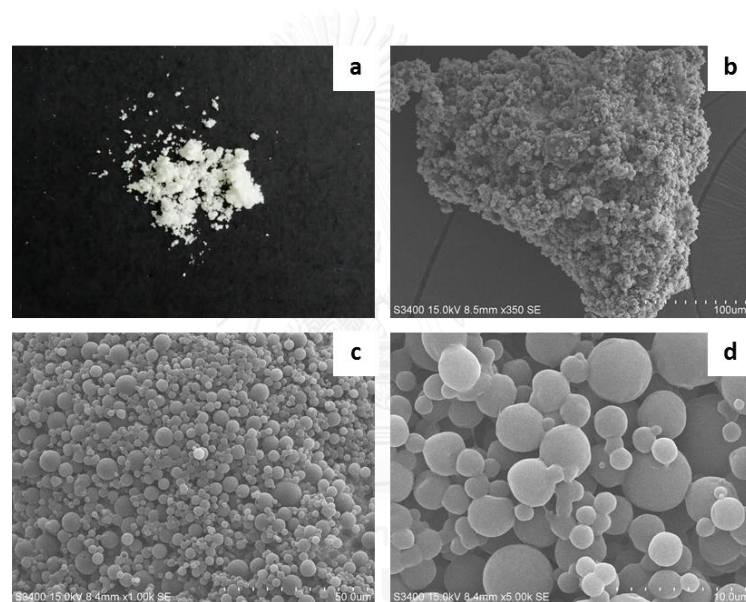
Properties	Time (hr)			
	1	3	5	7
PMMA in Grafted NR (%)	2.21	9.47	12.09	8.27
NR in Grafted NR (%)	97.79	90.53	87.91	91.73

4.2.4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของผงพอลิ เมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง

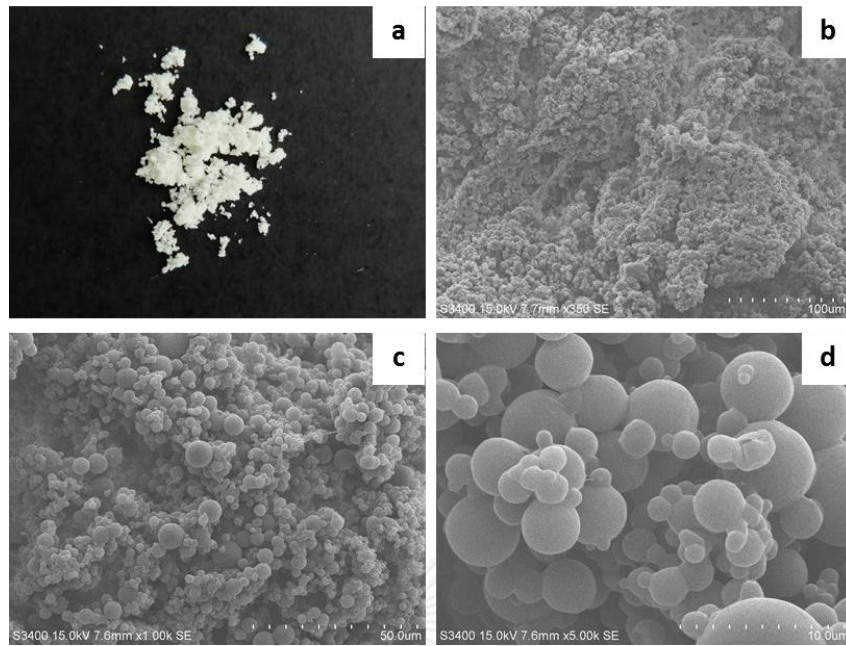
พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งที่สังเคราะห์ได้จะถูกทำให้เป็นผงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่น
ฝอย การอบแห้งแบบพ่นฝอยจะทำที่สภาวะ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 150 องศาเซลเซียส อัตราการ
ป้อนสารตัวอย่าง 8 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศ 750 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 4.20
– 4.23 เมื่อนำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
พบว่า เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งที่ได้จะมีการเกาะกันมากกว่าผงพอลิ
เมอร์ร่วมแบบตอกิ่งที่เตรียมด้วยเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานกว่า ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณของพอลิ
เมอร์ร่วมแบบตอกิ่งและพอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระที่เกิดขึ้น ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง จะ
มีปริมาณของยางธรรมชาติอิสระเหลืออยู่มากจึงทำให้ผงที่เตรียมได้มีลักษณะที่เกาะติดกัน ในขณะที่
ผงที่เตรียมได้เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 7 ชั่วโมง มีการเกาะติดกันน้อยกว่าเนื่องจากเวลาในการ
ทำปฏิกิริยามากจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ (Conversion) มากขึ้นด้วย และขนาด
อนุภาคของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งและผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งแสดงในตารางที่ 4.20 พบว่าเมื่อ
เวลาผ่านไปอนุภาคคอลลอยด์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งมี
ความหนาของชั้นเชลล์ (shell) มากขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เวลาที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์
ร่วมแบบตอกิ่งคือ 3 ชั่วโมง เนื่องจากเป็นใช้เวลาในการเตรียมน้อยที่สุด และยังได้ผงพอลิเมอร์ร่วม
แบบตอกิ่งที่มีลักษณะที่เกาะติดกัน

ตารางที่ 4.20 ผลของเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาต่อขนาดอนุภาคของคอลลอยด์และผงของพอลิเมอร์

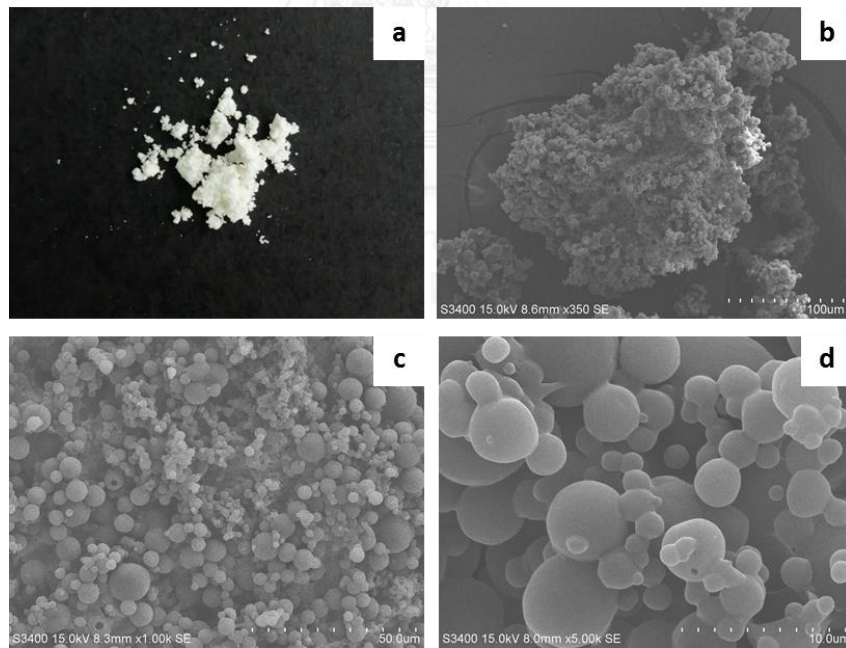
เวลาทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	
	คอลลอยด์	ผง
1	0.317 ± 5.8	6.11 ± 2.2
3	0.316 ± 4.4	4.74 ± 1.3
5	0.317 ± 5.5	5.67 ± 2.13
7	0.329 ± 2.7	4.76 ± 1.2



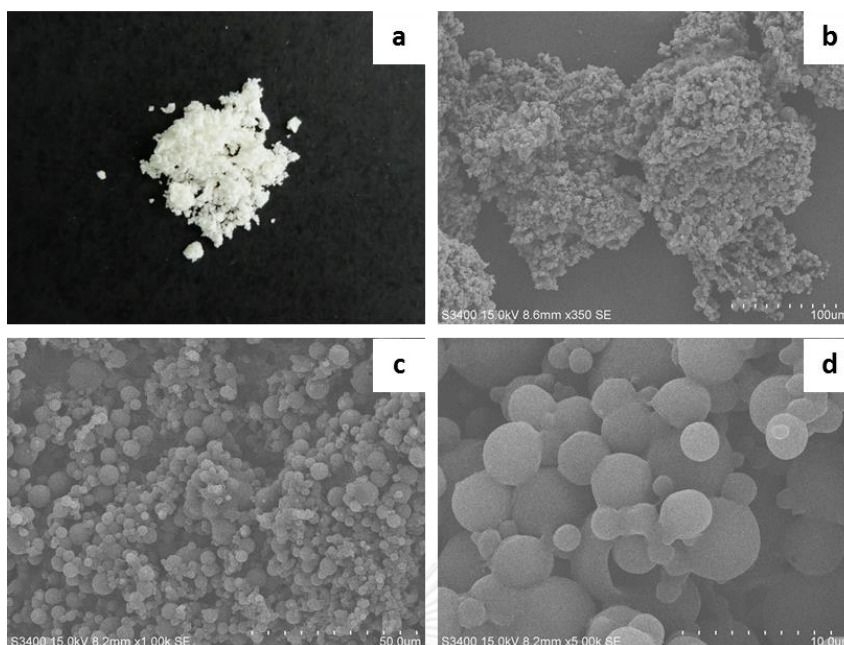
รูปที่ 4.20 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยเวลาทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยเวลาทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยเวลาทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ

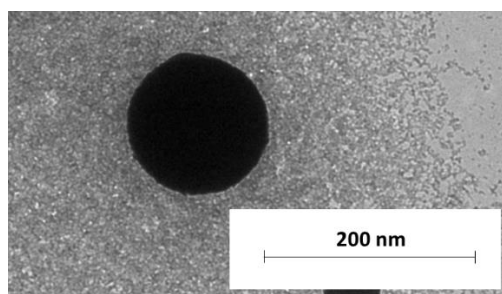


รูปที่ 4.23 ลักษณะสัญญาณของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยเวลาทำปฏิกิริยา 7 ชั่วโมง (a) ภาพมองเห็นด้วยตาเปล่า และจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย (b) 350 (c) 1000 และ (d) 5000 เท่า ตามลำดับ

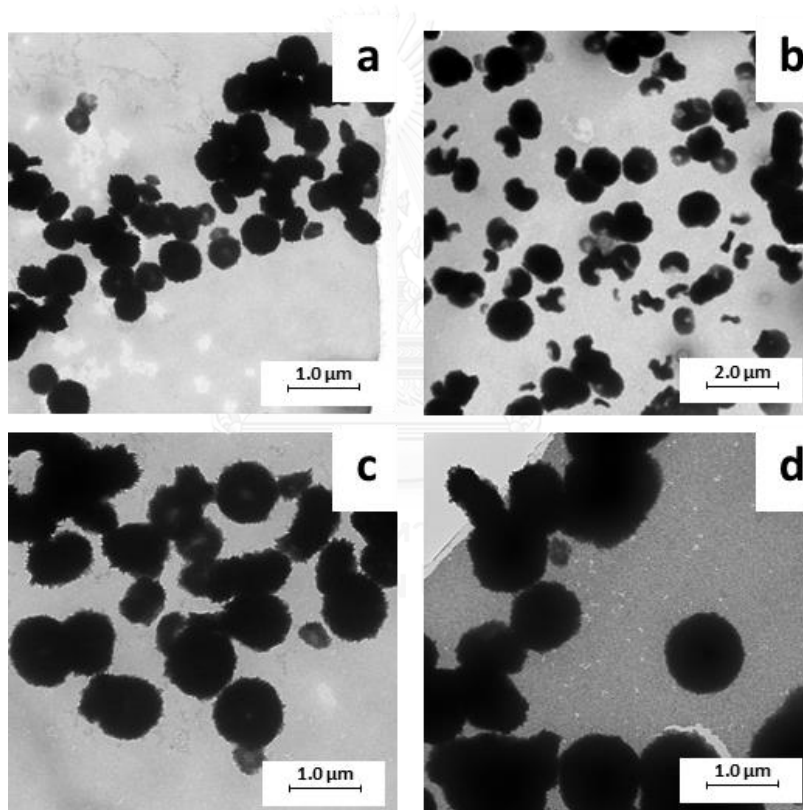
4.3 ลักษณะสัญญาณของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron microscope, TEM)

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าสามารถเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งอย่างธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตได้ โดยที่ผงของพอลิเมอร์ร่วมที่เตรียมได้นั้นไม่ยึดเกาะกัน จึงนำคอลลอยของสารผสมที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron microscope, TEM) โดยนำสารผสมที่เตรียมไว้ไปเจือจางด้วยน้ำกลั่น และนำไปย้อมสีฟันทะลุของยางธรรมชาติด้วยสารละลายออสเมียม ซึ่งจะให้เห็นลักษณะของโมเลกุลที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าลักษณะของอนุภาคยางธรรมชาติเมื่อถูกย้อมสีฟันทะลุด้วยออสเมียมจะเห็นเป็นสีดำลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม เมื่อเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน จะเห็นว่ารอบๆอนุภาคยางธรรมชาติมีพอลิเมทิลเมทาคริเลตมากราฟต์อยู่บนอนุภาคยางธรรมชาติในลักษณะคอร์เชลล์ (core-shell) ซึ่งการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งลักษณะนี้เองทำให้ผงที่เตรียมได้ไม่เกิดการยึดเกาะกัน ที่ปริมาณเมทิลเมทาคริเลต 25 phr จะเห็นว่า จะพบอนุภาคของยางธรรมชาติในปริมาณที่หนาแน่น และบริเวณผิวของอนุภาคยางธรรมชาติจะมีการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งเกิดขึ้น สังเกตได้จากการทำงานของอนุภาคที่เห็นจากรูปที่ มีลักษณะเป็นผิวขรุขระ ในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์

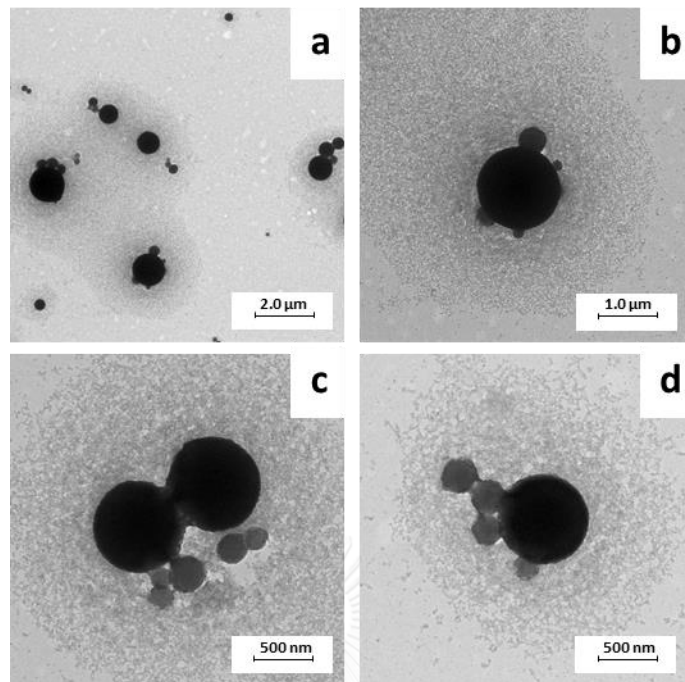
ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยมอนอเมอร์ความเข้มข้น 50 75 และ 100 phr ตามลำดับ จากรูปที่ 4.25 – 4.28 พบว่าเมื่อปริมาณเมทิลเมทาคริเลตสูงขึ้นความหนาของชั้นเซลล์ (shell) ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตจะมีความหนามากขึ้น



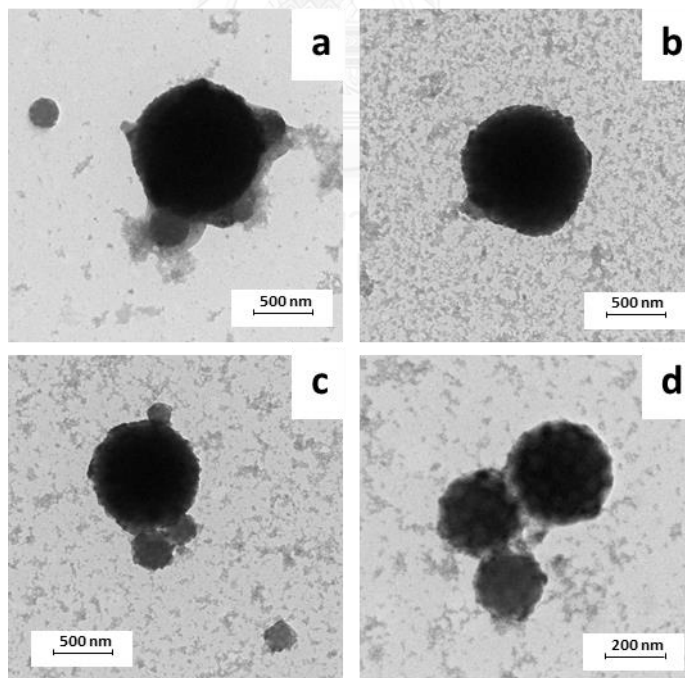
รูปที่ 4.24 ลักษณะของอนุภาคยางธรรมชาติ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



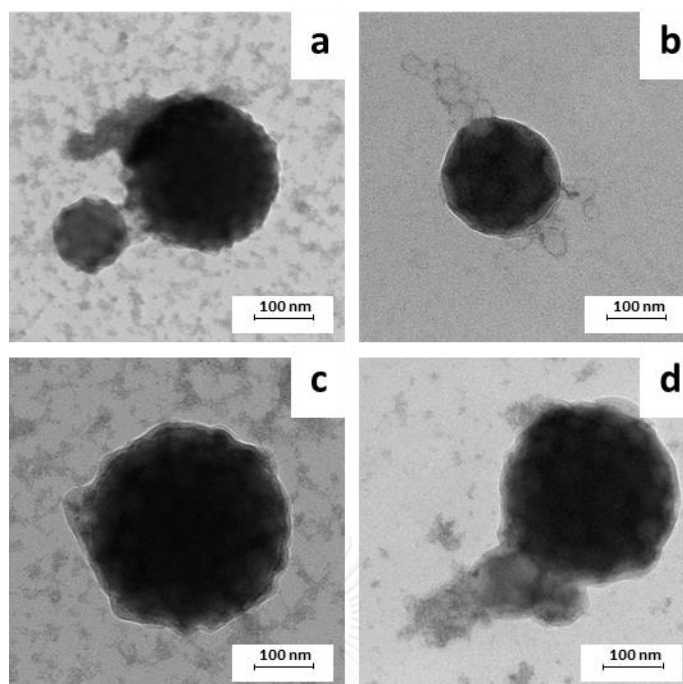
รูปที่ 4.25 ลักษณะอนุภาคของพอลิเมอรร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยความเข้มข้นมอนอเมอร์ 25 phr เมื่อส่องด้วย TEM



รูปที่ 4.26 ลักษณะอนุภาคของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยความเข้มข้นมอนอเมอร์ 50 phr เมื่อส่องด้วย TEM



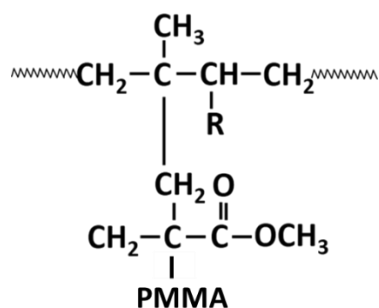
รูปที่ 4.27 ลักษณะอนุภาคของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยความเข้มข้นมอนอเมอร์ 75 phr เมื่อส่องด้วย TEM



รูปที่ 4.28 ลักษณะอนุภาคของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งที่เตรียมด้วยความเข้มข้นมอนอเมอร์ 100 phr เมื่อส่องด้วย TEM

4.4 หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต

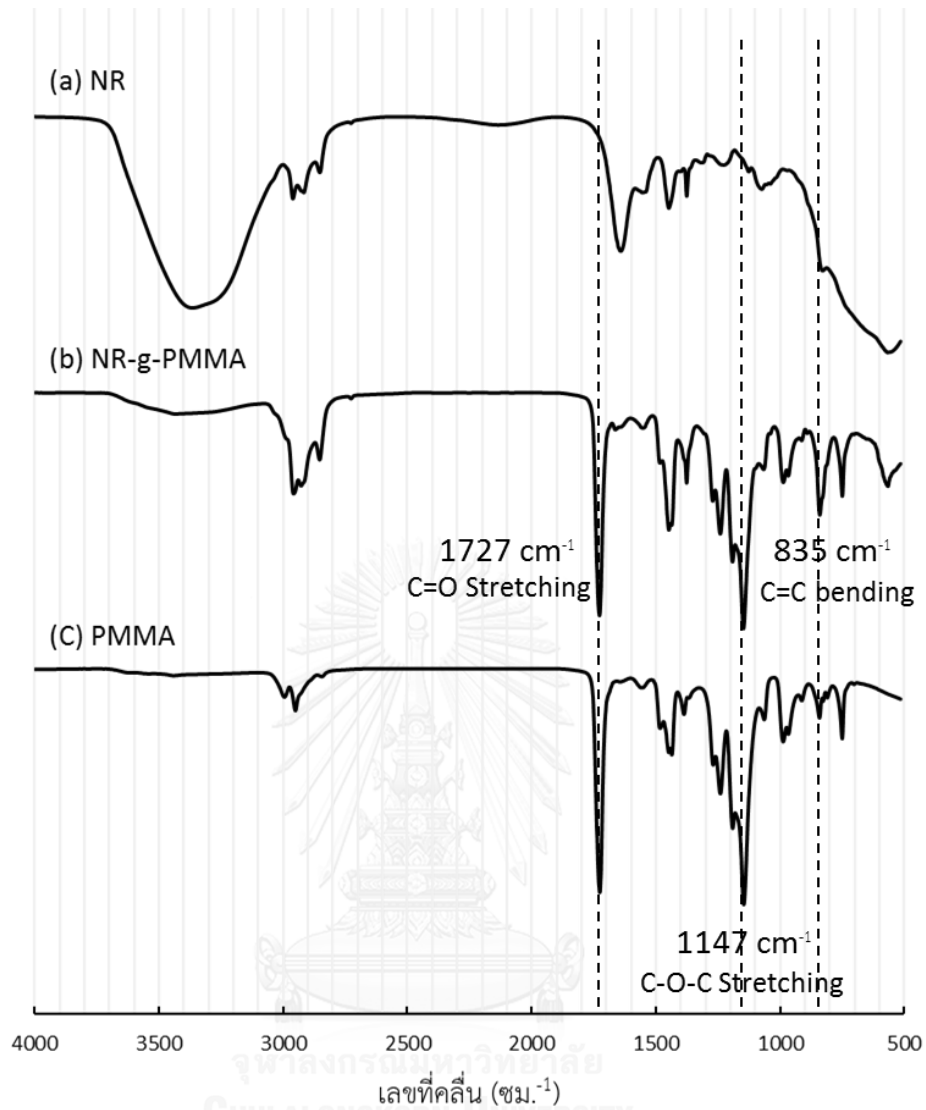
พอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต เป็นการตอ่กันของโมเลกุลยางธรรมชาติกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต มีโครงสร้างดังรูปที่ 4.29 ซึ่งพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งที่เตรียมได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (FTIR) และเทคนิคโปรตอน นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคป-(HNMR) เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่ง



รูปที่ 4.29 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กิ่งยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต

4.4.1 เทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (FTIR)

ผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตเมื่อนำไปสกัดแยกยางธรรมชาติอิสระ และพอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระออกแล้ว จะถูกนำไปตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปเพื่อยืนยันการกราฟต์ติดของเมทิลเมทาคริเลตบนอนุภาคยางธรรมชาติ หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคคอมโพสิตที่เตรียมด้วยวิธีการกราฟต์ของโคพอลิเมอร์ตรวจสอบได้จากเทคนิค FT-IR จากรูปที่ 4.30 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ หมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติพบพีคของ C-H Stretching ที่เลขคลื่น 2197 cm^{-1} 2961 cm^{-1} และ 2852 cm^{-1} พีคของ C=C stretching ที่เลขคลื่น 1641 cm^{-1} พีคของ C-H deformation of $-\text{CH}_2-$ ที่เลขคลื่น 1448 cm^{-1} พีคของ C-H deformation of $-\text{CH}-$ ที่เลขคลื่น 1376 cm^{-1} และพีคของ C=C bending vibration ที่เลขคลื่น 835 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งจะปรากฏพีคที่เลขคลื่น 1727 cm^{-1} และ 1147 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง C=O Stretching และ C-O-C Stretching ตามลำดับ หมู่ฟังก์ชันที่พบจะเป็นหลักฐานแสดงให้เห่นว่ามีพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งเกิดขึ้น



รูปที่ 4.30 กราฟ FTIR หมู่ฟังก์ชัน (a) ยางธรรมชาติ (b) พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

(c) พอลิเมทิลเมทาคริเลต

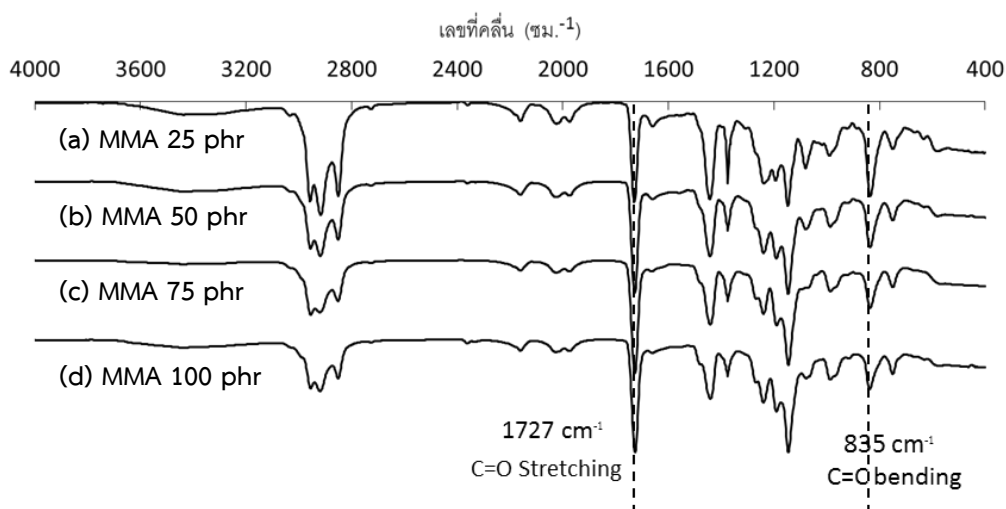
ตารางที่ 4.21 หมู่ฟังก์ชันที่พบจากเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคป

Molecules	Function group			
	C=C bending (835 cm^{-1})	C-H Stretching ($2961, 2917 \text{ cm}^{-1}$)	C=O Stretching (1727 cm^{-1})	C-O-C Stretching (1147 cm^{-1})
NR	/	/	-	-
NR-g-PMMA	/	/	/	/
PMMA	-	/	/	/

นอกจากนี้ระดับความสูงของพีคที่พบในกราฟจะบ่งบอกถึงปริมาณของสัดส่วนพอลิเมอร์ที่อยู่ในพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณเมทิลเมทาคริเลตน้อย จะเห็นความสูงพีคหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติสูง ในขณะที่พีคของหมู่ฟังก์ชันของเมลิเมทาคริเลตจะมีขนาดต่ำกว่า เมื่อปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตสูงขึ้นพีคหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติจะต่ำลง ในขณะที่พีคของหมู่ฟังก์ชันของเมลิเมทาคริเลตจะมีขนาดสูงขึ้น ปริมาณการกราฟต์ที่เกิดขึ้นสามารถเปรียบเทียบได้จากอัตราส่วนของความสูงของพีคที่ตำแหน่ง 835 cm^{-1} (C=C bending vibration) กับความสูงของพีคที่ตำแหน่ง 1727 cm^{-1} (C=O Stretching) [35] ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 อัตราส่วนของความสูงของพีคที่ตำแหน่ง 1727 cm^{-1} (C=O Stretching) กับความสูงของพีคที่ตำแหน่ง 835 cm^{-1} (C=C bending vibration) ของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

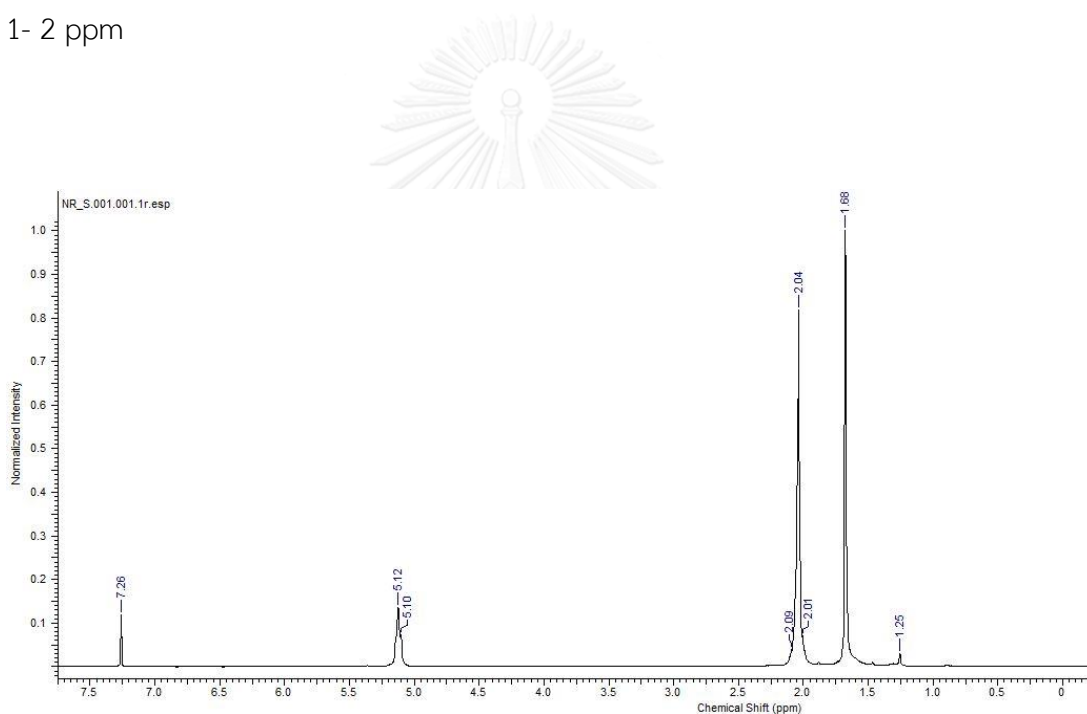
MMA (phr)	Ratio (C=C bending : C=O Stretching)
25	0.94
50	0.59
75	0.44
100	0.42



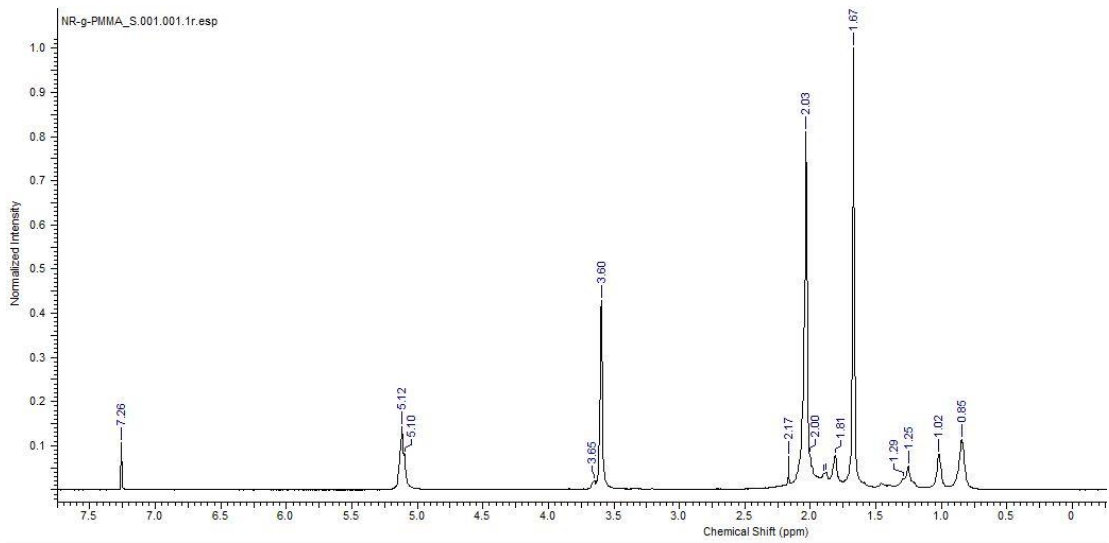
รูปที่ 4.31 หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยปริมาณมอนอเมอร์แตกต่างกัน

4.4.2 เทคนิคโปรตอน นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคป (HNMR)

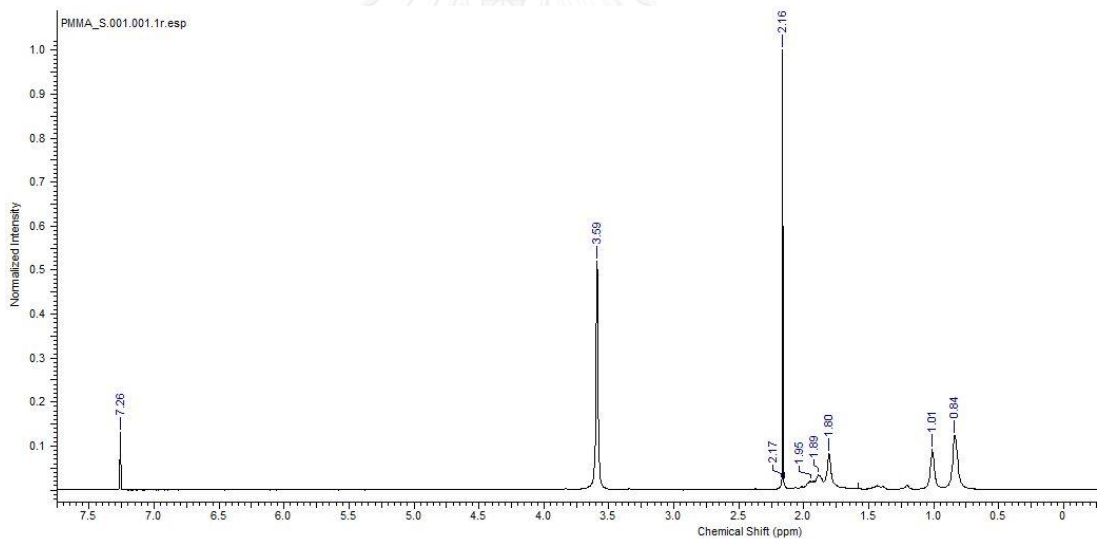
นอกจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป พอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กั่ยังถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคป เพื่อเป็นการยืนยันว่ามีพอลิเมทิลเมทาคริเลตกราฟต์บนอนุภาคยางธรรมชาติ ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตอน นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคป โดยนำพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กั่ที่ได้หลังจากการสกัดมาละลายในดิทเทอริยม (CDCl₃) จากรูปที่ 4.33 แสดงให้เห็นว่าพบสัญญาณโปรตอนของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (OCH₃) ที่ตำแหน่ง 3.60 ppm สัญญาณโปรตอนของยางธรรมชาติ (C=CH) ที่ตำแหน่ง 5.12 ppm และสัญญาณโปรตอนของแอลเคน (alkane) ที่ตำแหน่ง 1- 2 ppm



รูปที่ 4.32 สเปกตรัมที่ได้จาก HNMR ของยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.33 สเปกตรัมที่ได้จาก HNMR ของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของ
ยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต



รูปที่ 4.34 สเปกตรัมที่ได้จาก HNMR ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

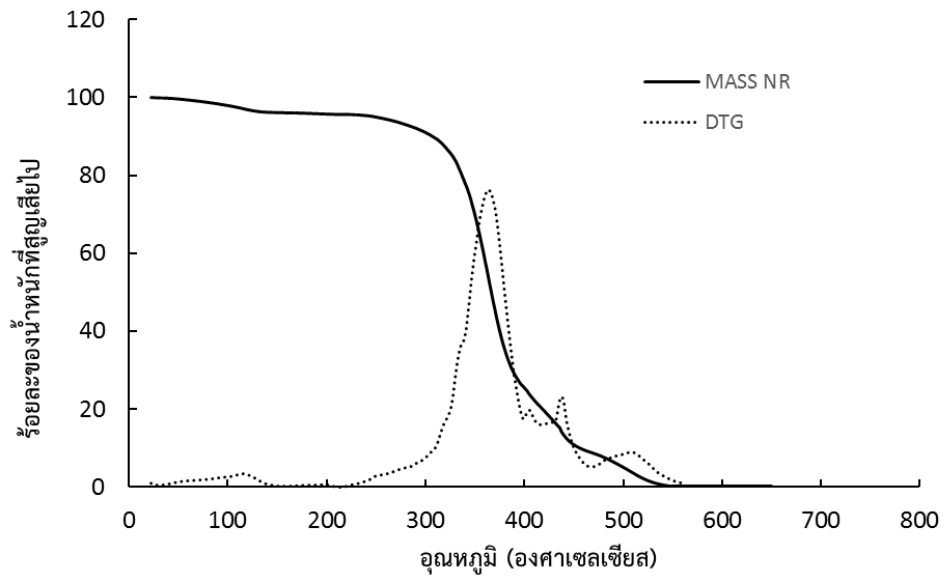
ตารางที่ 4.23 หมู่ฟังก์ชันที่พบจากเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี

Molecules	Assignment		
	-CH ₂ -CH ₂ - (1-2 ppm)	-C=CH- (5.12 ppm)	-OCH ₃ (3.60 ppm)
NR	/	/	-
NR-g-PMMA	/	/	/
PMMA	/	-	/

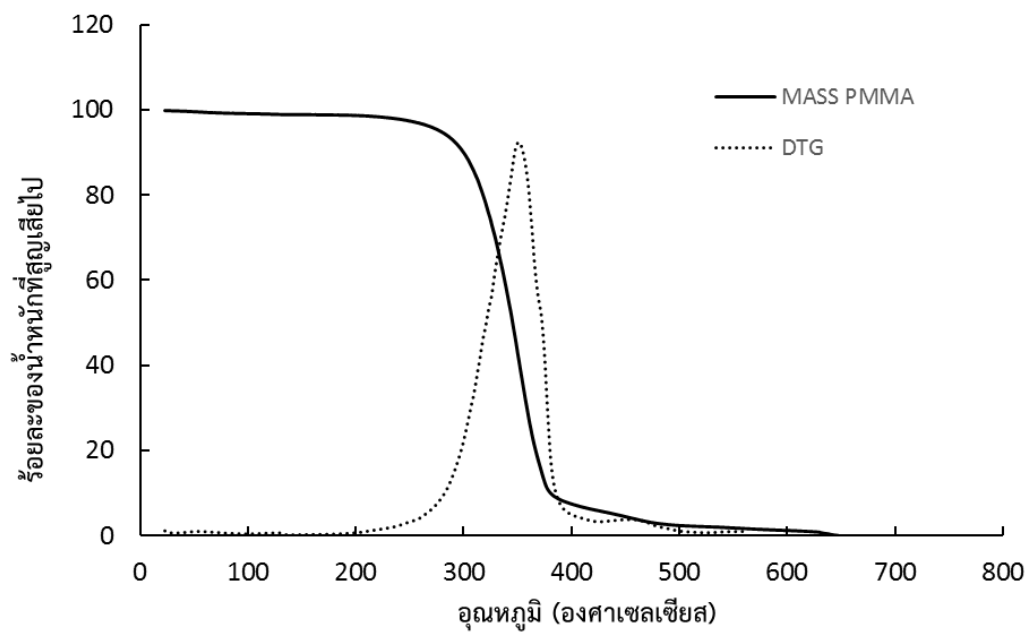
4.5 เสถียรภาพทางความร้อนของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่งระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต

เมื่อนำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่งยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตมาวิเคราะห์เสถียรภาพความร้อนเทียบกับยางธรรมชาติ โดยที่อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, Td) จากรูปที่ 4.35 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต พบว่ายางธรรมชาติมีการสลายตัวสองช่วง โดยอุณหภูมิการสลายตัวช่วงแรกอยู่ที่ 327 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการสลายตัวช่วงที่สองอยู่ที่ 408 องศาเซลเซียส ในขณะที่พอลิเมทิลเมทาคริเลตมีอุณหภูมิการสลายตัวที่อุณหภูมิ 297 องศาเซลเซียส ซึ่งจากกราฟ DTG จะทำให้ทราบอุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักสูงที่สุดหรืออุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวมากที่สุด ในการทดลองนี้จะเปรียบเทียบเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่งจากอุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวมากที่สุด

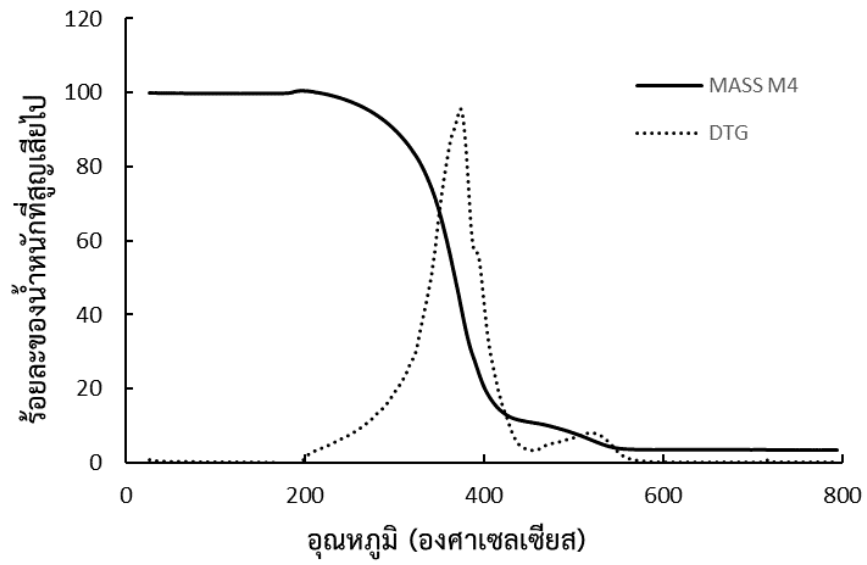
จากรูปที่ 4.35 – 4.37 พบว่าอุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวมากที่สุดของยางธรรมชาติอยู่ที่ 369 องศาเซลเซียส ในขณะที่พอลิเมทิลเมทาคริเลตมีอุณหภูมิอัตราการสลายตัวมากที่สุด 355 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิอัตราการสลายตัวมากที่สุดของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่งที่เตรียมด้วยลำดับการเติมสารที่ 4 อยู่ที่ 377 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิอัตราการสลายตัวมากที่สุดของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่งแสดงในตารางที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่งจะอุณหภูมิอัตราการสลายตัวมากที่สุดสูงกว่าอุณหภูมิอัตราการสลายตัวมากที่สุดของยางธรรมชาติ การสลายตัวที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่กราฟได้อยู่บนยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (Chemical interaction) ระหว่างโมเลกุลมีขั้วที่อยู่บนสายโซ่ของยางธรรมชาติ [35]



รูปที่ 4.35 เสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.36 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมทิลเมทาคริเลต



รูปที่ 4.37 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยวิธีการเติมสารที่ 4

ตารางที่ 4.24 ผลของตัวแปรต่างๆต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

ตัวแปร	อุณหภูมิอัตราการสลายตัวมากที่สุด (องศาเซลเซียส)
NR	365
PMMA	355
NR-g-PMMA	
ลำดับการเติมสาร	
วิธีที่ 1	352
วิธีที่ 2	376
วิธีที่ 3	377
วิธีที่ 4	371
ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา (phr)	
0.5	371
1.0	375
1.5	366
2.0	378
ปริมาณมอนอเมอร์ (phr)	
25	373
50	359
75	374
100	375
เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	
1	361
3	373
5	342
7	349

4.6 การศึกษาด้านการเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกลงในพอลิแลคติกแอซิด

ในงานวิจัยส่วนนี้ได้นำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกลงยางธรรมชาติกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่สังเคราะห์ได้ไปเติมในพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เพื่อศึกษาคุณสมบัติของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกลงว่าเมื่อยางธรรมชาติถูกกราฟต์หรือห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตแล้วจะยังคงมีคุณสมบัติยืดหยุ่นหรือไม่ ซึ่งจะทำให้การศึกษาพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนโดยมวลของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกลงที่อัตราส่วนต่างๆ โดยจะทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดแบบอินเทอร์มิก (Intermix internal mixer) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจะนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปขึ้นรูปขึ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด ซึ่งในการขึ้นรูปนั้นจะทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส ก่อนเป็นเวลา 4 นาที แล้วจึงทำการอัดด้วยความดัน 100 บาร์ เป็นเวลา 3 นาที สัดส่วนที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ผสมแบ่งได้เป็น 3 กรณี ได้แก่

- 1) เปรียบเทียบระหว่างการเติมแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกลง ที่ปริมาณร้อยละ 10 ของพอลิแลคติกแอซิด
- 2) เปรียบเทียบระหว่างการเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกลงที่เตรียมโดยมีความเข้มข้นของมอนอเมอร์ต่างกัน 25 50 75 และ 100 phr ที่ปริมาณร้อยละ 10 ของพอลิแลคติกแอซิด
- 3) เปรียบเทียบระหว่างการเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกลงที่เตรียมโดยมีความเข้มข้นของมอนอเมอร์ต่างกัน 25 50 75 และ 100 phr ที่ปริมาณของยางธรรมชาติที่มีร้อยละ 10 ของพอลิแลคติกแอซิด

4.6.1 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

ชิ้นงานที่ได้จะถูกทำไปวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวัดสมบัติทางความร้อน ด้วย Differential Scanning Calorimeter โดยเปรียบเทียบระหว่างการเติมแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกลง ที่ปริมาณร้อยละ 10 ของพอลิแลคติกแอซิด ดังรูปที่ 4.38 จากกราฟทำให้ทราบค่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิแลคติกแอซิดที่อุณหภูมิ 63 องศาเซลเซียส เมื่อนำยางธรรมชาติมาเติมในพอลิแลคติกแอซิดพบว่าการเติมยางธรรมชาติลงไปไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว เนื่องจากการที่ยางธรรมชาติกับพอลิแลคติกแอซิดไม่มีแรงดึงดูดระหว่างพันธะ (interaction) ต่อกัน แต่เมื่อนำพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกลงมาเติมในพอลิแลคติกแอซิดพบว่าค่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วมีการเปลี่ยนแปลง โดยอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วจะลดลงไปอยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกลงยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต

สามารถเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลกับพอลิแลคติกแอซิดได้ แสดงว่าการที่ยางธรรมชาติมีพอลิเมทิลเมทาคริเลตกราฟต์บนสายโซ่โมเลกุลจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibilizer) ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิแลคติกแอซิด ในทำนองเดียวกับอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม จากข้อมูลในการทดลองก่อนหน้านี้ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติอยู่ที่ 327 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตอยู่ที่ 297 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ความเข้มข้นมอนอเมอร์ต่างกันอยู่ระหว่าง 359-373 องศาเซลเซียส จากตารางที่ 4.21 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิแลคติกแอซิดอยู่ที่ 329 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับยางธรรมชาติจะสังเกตเห็นการสลายตัวสองครั้งจากยางธรรมชาติและพอลิแลคติกแอซิดได้ยากเนื่องจากว่าอุณหภูมิการสลายตัวมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในกรณีของอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งพบว่าการสลายตัวเพียงครั้งเดียว ซึ่งการสลายตัวเพียงครั้งเดียวที่เห็นนี้เป็นข้อพิสูจน์ว่า ยางธรรมชาติมีพอลิเมทิลเมทาคริเลตกราฟต์บนสายโซ่โมเลกุลจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิแลคติกแอซิด

นอกจากนี้พอลิแลคติกแอซิดยังเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-Crystalline polymer) จึงมีจุดหลอมเหลว ซึ่งการหลอมเหลวนี้อาจปรากฏเป็นพีคจุดความร้อนถัดจากอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว ในรูปที่ 4.38 จุดหลอมเหลวของพอลิแลคติกแอซิดอยู่ที่อุณหภูมิ 156 องศาเซลเซียส พื้นที่ใต้กราฟของพีคจะแสดงถึงพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว ซึ่งปริมาณนี้จะบ่งบอกได้ถึงความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ เมื่อนำยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่มีความเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer) มาเติมในพอลิแลคติกแอซิด พบว่าปริมาณของผลึกของพอลิแลคติกแอซิดจะมีค่าน้อยลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการขัดขวางการเกิดผลึกของยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง ในการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ผลึก (X_c) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Degree of crystallinity, } X_c (\%) = \frac{\Delta H}{\Delta H_0} \times 100$$

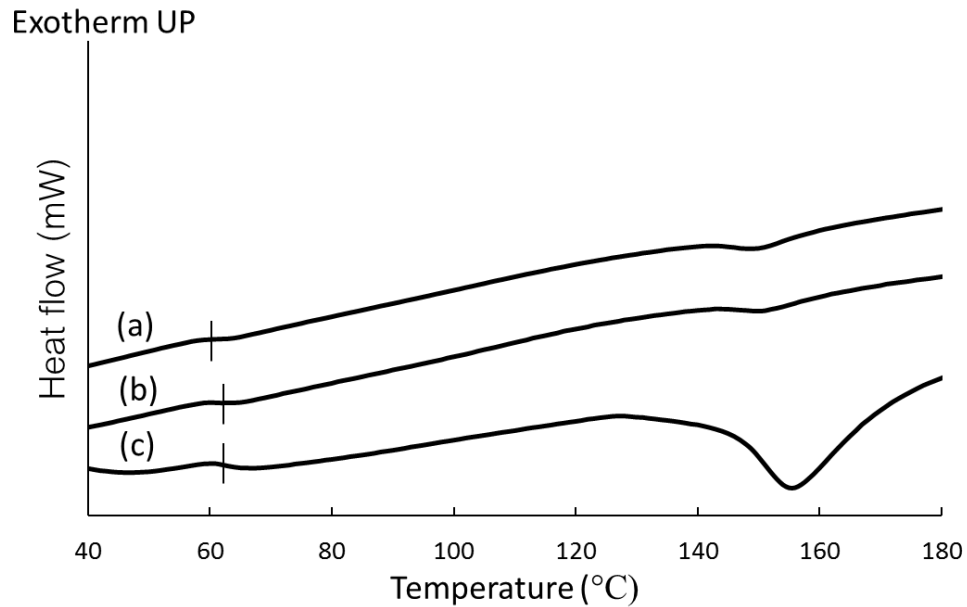
เมื่อ ΔH คือ พลังงานในการหลอมเหลวผลึกทั้งหมดของ PLA

ΔH_0 คือ พลังงานในการหลอมเหลวผลึกของ PLA ในสารตัวอย่าง

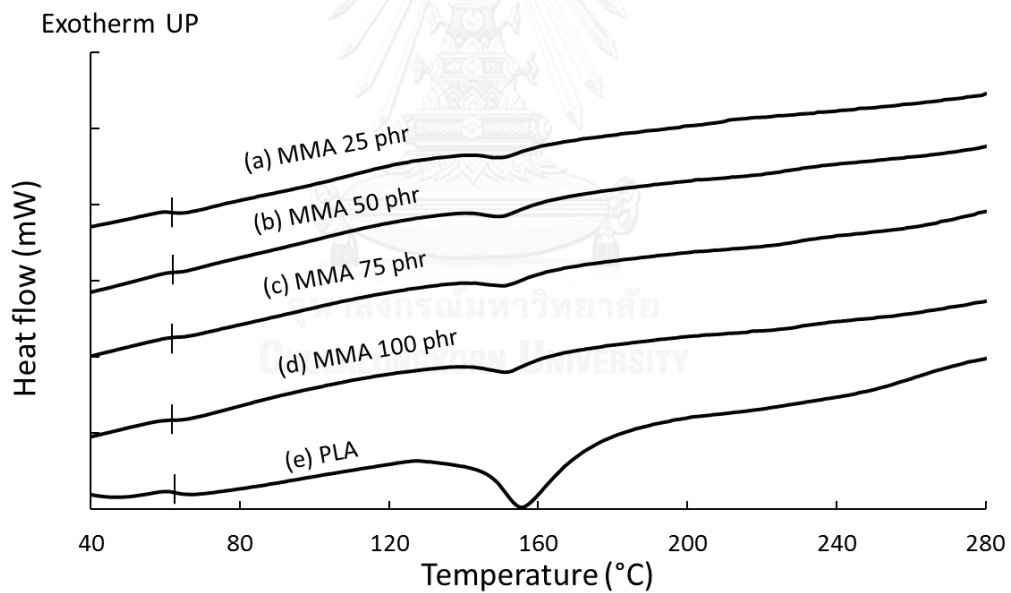
ซึ่งพอลิแลคติกแอซิดนำมาใช้ในงานวิจัยเป็น พอลิแลคติกแอซิดชนิด PLA 2003D มีพลังงานในการหลอมเหลวผลึกทั้งหมดของ มีค่าเท่ากับ 93 จูลต่อกรัม

ตารางที่ 4.25 ผลของการเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบผสมในพอลิแลคติกแอซิดต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

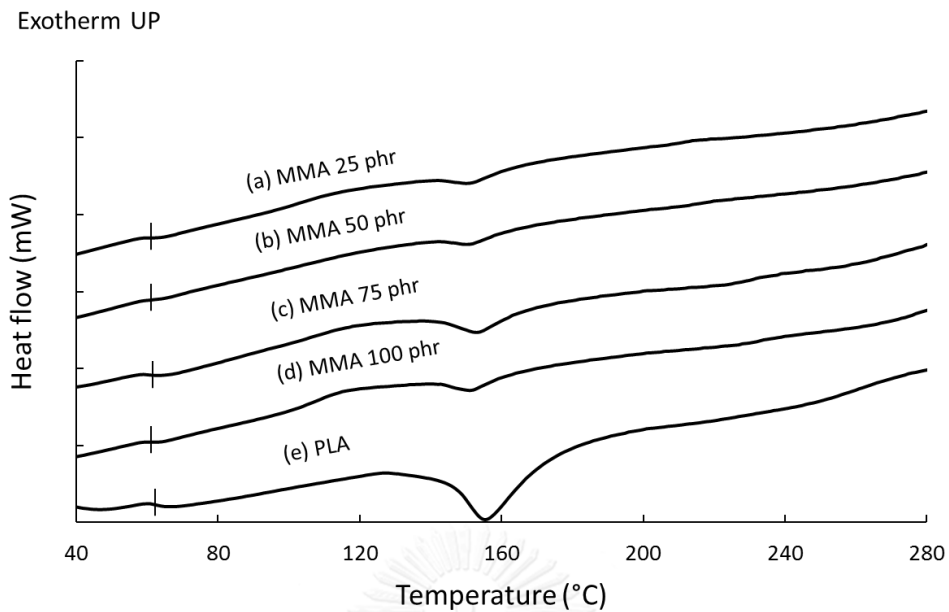
Component	Thermal Properties					
	Tg	PLA	Tm	ΔH_0	Xc	Td
	Phase(°C)		(°C)	(j/g)	(%)	(°C)
PLA	63		156.43	30.40	32.69	329
film						
PLA + NR film	63		153.61	3.61	3.88	325
PLA + NR-g-PMMA film	60		151.35	4.91	5.28	321
Powder (fixed weight)						
PLA + NR-g-PMMA (MMA 25 phr)	61		151.69	4.52	4.86	326
PLA + NR-g-PMMA (MMA 50 phr)	61		151.13	7.16	7.70	316
PLA + NR-g-PMMA (MMA 75 phr)	62		151.31	5.05	5.43	313
PLA + NR-g-PMMA (MMA 100 phr)	61		153.07	16.44	17.68	309
Powder (fixed NR weight)						
PLA + NR-g-PMMA (MMA 25 phr)	61		152.19	5.67	6.10	316
PLA + NR-g-PMMA (MMA 50 phr)	61		151.97	5.82	6.25	312
PLA + NR-g-PMMA (MMA 75 phr)	62		154.08	16.00	17.20	309
PLA + NR-g-PMMA (MMA 100 phr)	61		152.47	18.01	19.37	304



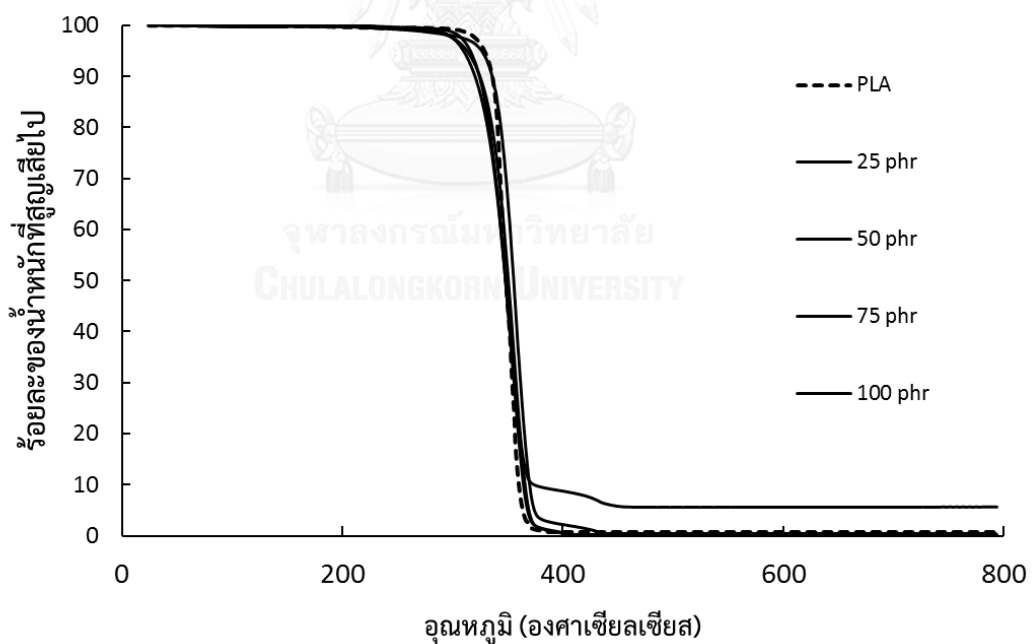
รูปที่ 4.38 กราฟการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆของ (a) โพลีแลคติกแอซิดผสมกับแผ่นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง 10% (b) โพลีแลคติกแอซิดผสมกับแผ่นยาง 10% (c) โพลีแลคติกแอซิด



รูปที่ 4.39 กราฟการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆของ โพลีแลคติกแอซิดผสมกับผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง 10% ที่เตรียมโดยมีความเข้มข้นของมอนอเมอร์ต่างกัน (a) 25 (b) 50 (c) 75 และ (d) 100 phr ตามลำดับ และ (e) โพลีแลคติกแอซิด



รูปที่ 4.40 กราฟการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆของพอลิแลคติกแอซิดผสมกับผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งที่ปริมาณยงคิดเป็น 10% ที่เตรียมโดยมีความเข้มข้นของมอนอเมอร์ต่างกัน (a) 25 (b) 50 (c) 75 และ (d) 100 phr ตามลำดับ และ (e) พอลิแลคติกแอซิด



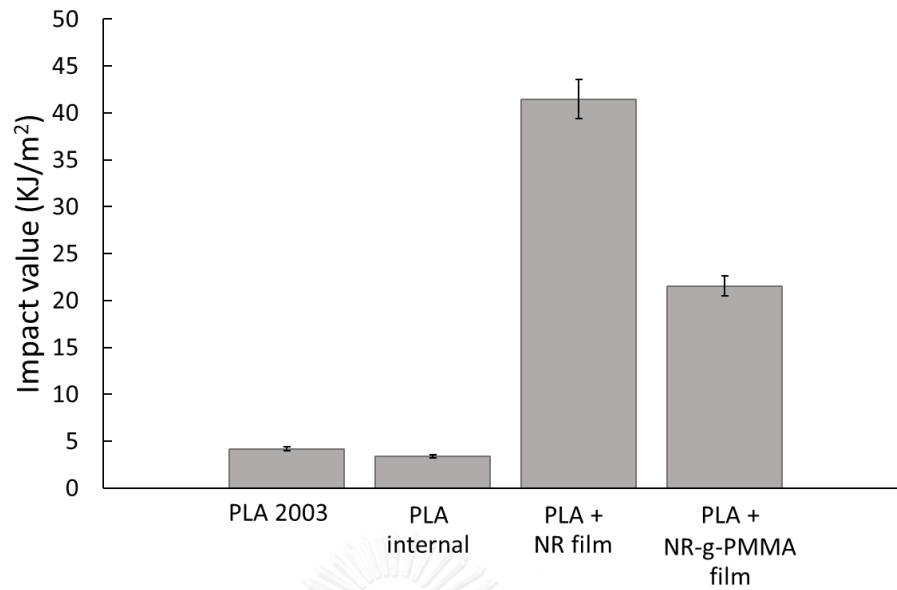
รูปที่ 4.41 กราฟเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดผสมกับผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งที่ปริมาณยงคิดเป็น 10% ที่เตรียมโดยมีความเข้มข้นของมอนอเมอร์ต่างกัน 25 50 75 และ 100 phr ตามลำดับ

4.6.2 สมบัติการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม

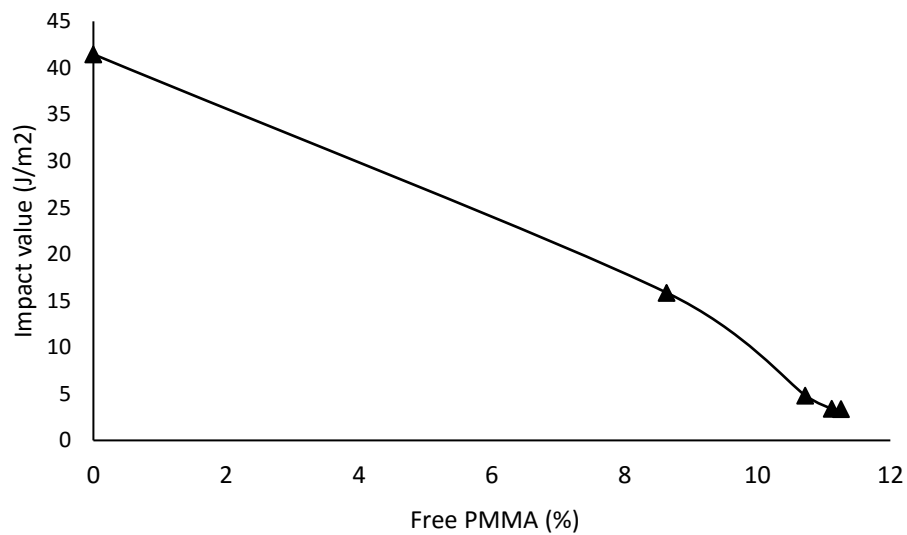
ชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูปแล้วจะถูกนำไปทดสอบสมบัติรับแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบค้อนเหวี่ยง (Pendulum impact tester) แสดงได้ในตารางที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าการเติมยางธรรมชาติลงไปในพอลิแลคติกแอซิดจะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น ในขณะที่การเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งก็จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดีขึ้นเช่นกัน ในปริมาณการเติมที่เท่ากันการเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกได้น้อยกว่าการเติมยางธรรมชาติ ทั้งนี้เป็นผลมาจากสมบัติด้านความแข็งของเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งจะมีพอลิเมทิลเมทาคริเลตกราฟต์อยู่บนอนุภาคของยางธรรมชาติและยังมีพอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระผสมปนอยู่ด้วย ถ้าหากเติมพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งที่มีปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตสูงขึ้นไปจะทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้ นั้นมีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตมากขึ้นนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบการเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งในลักษณะที่กำหนดให้มีปริมาณยางธรรมชาติในผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งเท่ากัน พบว่าจะพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้สูงขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีปริมาณยางธรรมชาติเติมลงไปมากขึ้นนั่นเอง รูปที่ 4.42 – 4.46 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมในกรณีต่างๆ

ตารางที่ 4.26 ความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม

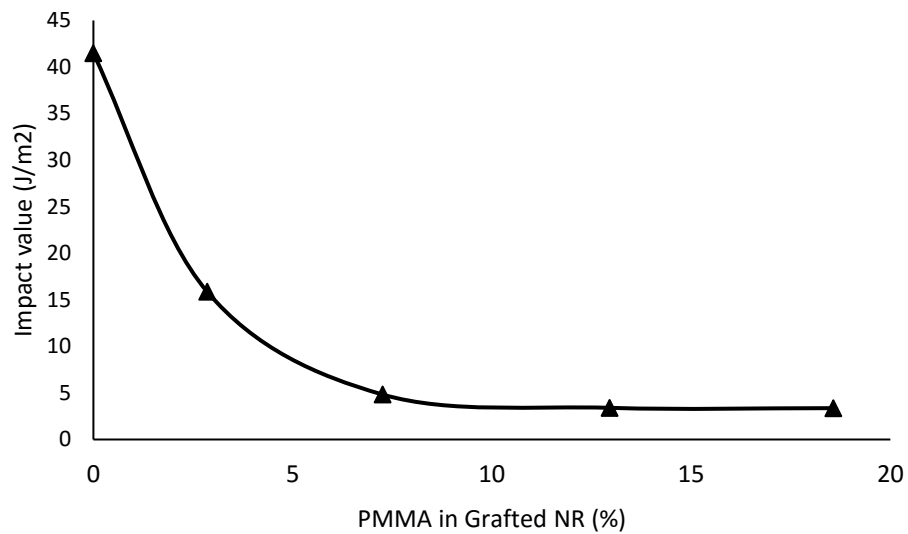
Component	Impact value (kJ/m ²)
PLA	3.4 ± 0.5
film	
PLA + NR film	41.5 ± 1.8
PLA + NR-g-PMMA film (MMA 25 phr)	21.5 ± 0.5
Powder (fixed weight)	
PLA + NR-g-PMMA (MMA 25 phr)	15.9 ± 0.9
PLA + NR-g-PMMA (MMA 50 phr)	4.8 ± 0.1
PLA + NR-g-PMMA (MMA 75 phr)	3.4 ± 0.5
PLA + NR-g-PMMA (MMA 100 phr)	3.4 ± 0.1
Powder (fixed NR weight)	
PLA + NR-g-PMMA (MMA 25 phr)	31.9 ± 1.3
PLA + NR-g-PMMA (MMA 50 phr)	31.2 ± 1.6
PLA + NR-g-PMMA (MMA 75 phr)	17.3 ± 0.6
PLA + NR-g-PMMA (MMA 100 phr)	10.5 ± 0.5



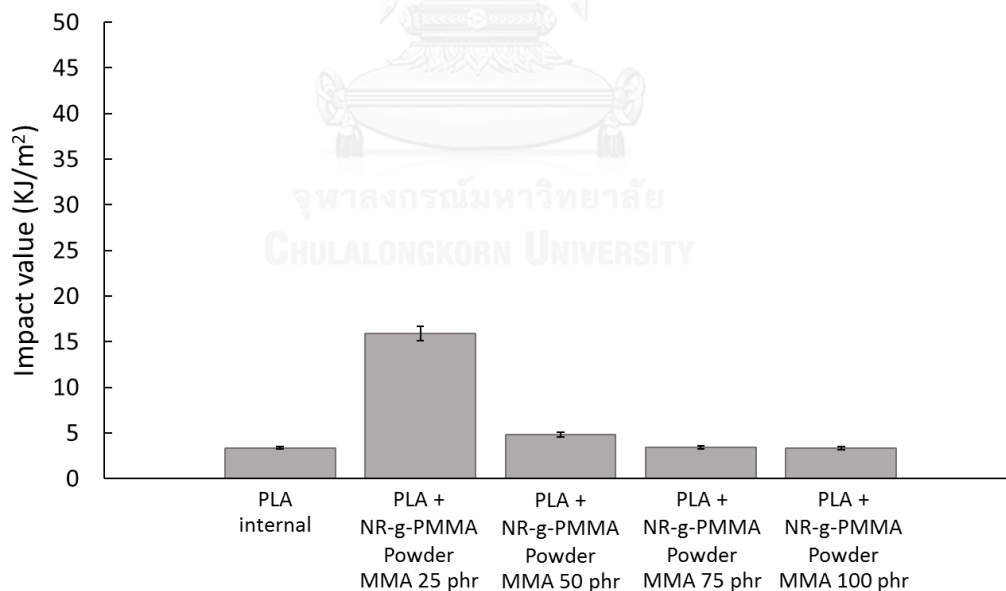
รูปที่ 4.42 กราฟความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที พอลิแลคติกแอซิดผสมกับแผ่นยาง 10% และ พอลิแลคติกแอซิดผสมกับแผ่นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง 10%



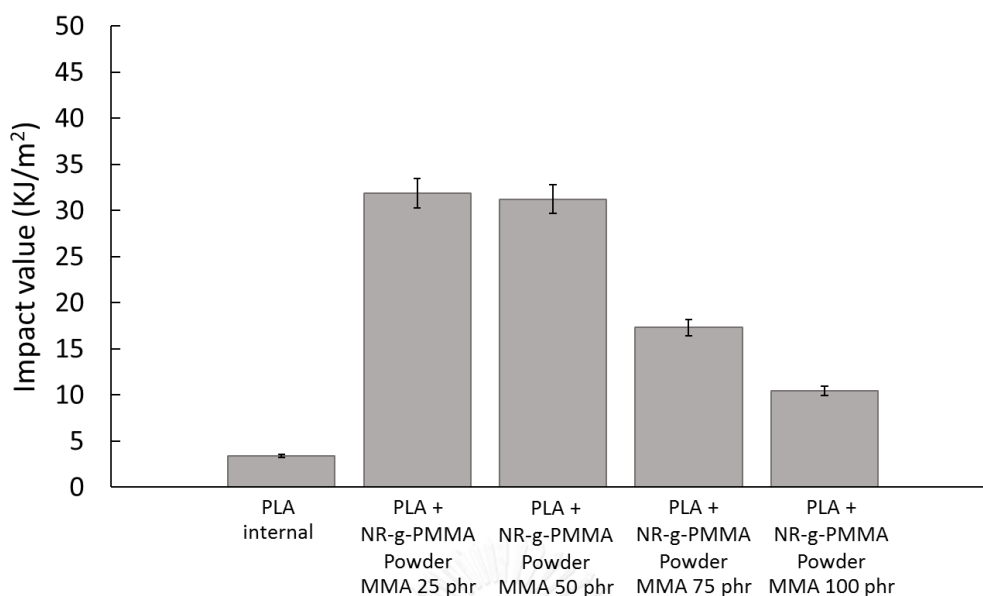
รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของพอลิเมอทีลเมทาคริเลตอิสระกับความความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของพอลิเมอทีลเมทาคริเลตในอนุภาคพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งกับความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที

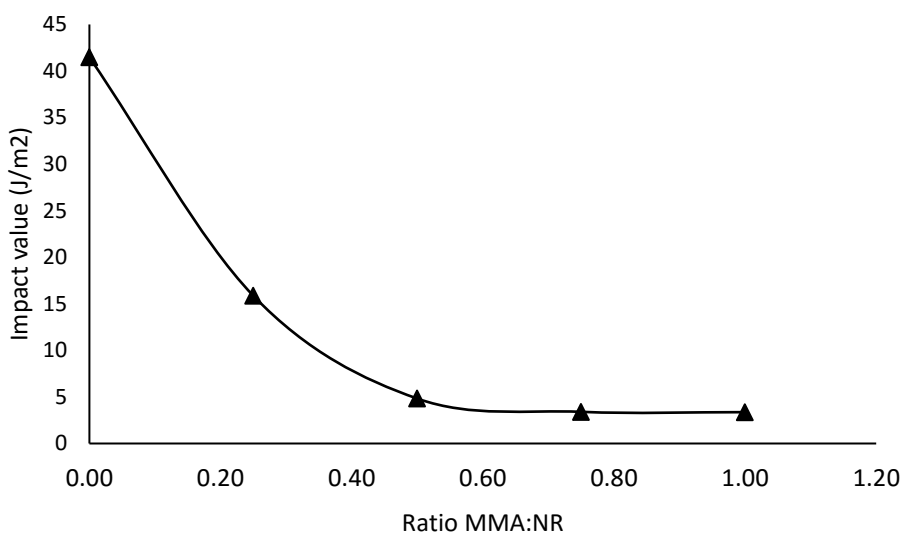


รูปที่ 4.45 กราฟความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที และ พอลิแลคติกแอซิดผสมกับแผ่นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง 10% ที่ความเข้มข้นมอนอเมอร์ 25 50 75 และ 100 phr ตามลำดับ

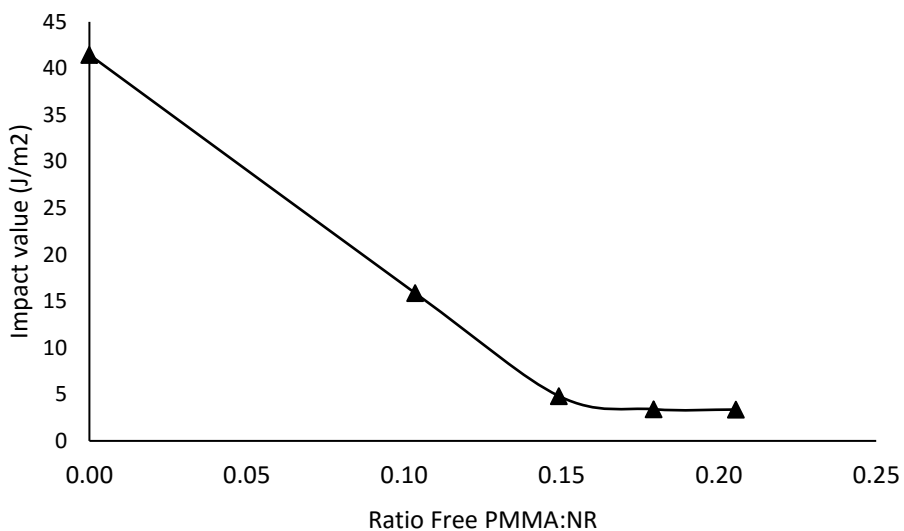


รูปที่ 4.46 กราฟความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที และ พอลิแลคติกแอซิดผสมกับแผ่นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 10% ความเข้มข้นมอนอเมอร์ 25 50 75 และ 100 phr ตามลำดับ

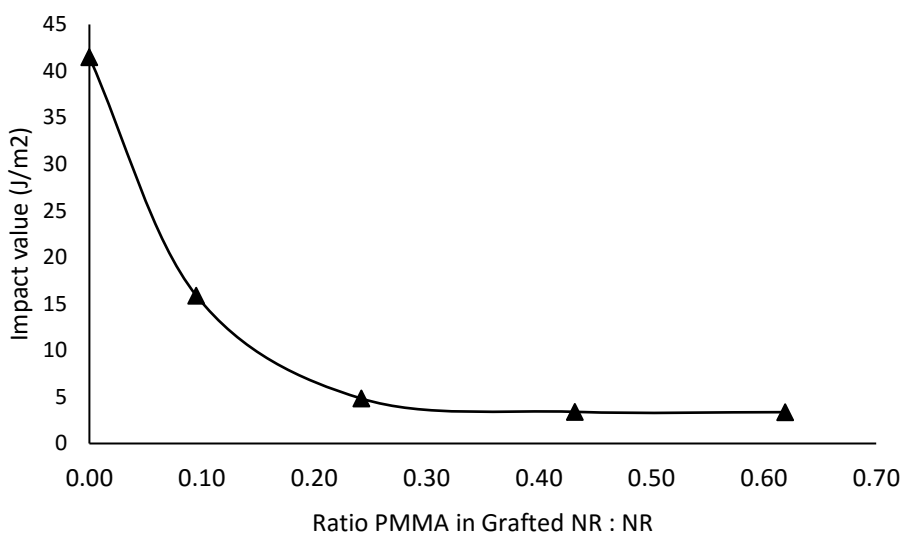
ความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมจะลดลงเมื่อมีปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่สูงขึ้น จากรูปที่ 4.47 – 4.49 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อยู่ในผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งกับค่าความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่มีพอลิเมทิลเมทาคริเลตมากขึ้น ทำให้สมบัติของพอลิเมทิลเมทาคริเลตแสดงออกมาได้มากขึ้น ซึ่งพอลิเมทิลเมทาคริเลตนั้นมีคุณสมบัติแข็งเปราะ จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ผสมของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งมีความสามารถในการรับแรงกระแทกลดลงเมื่อเทียบจากการผสมยางธรรมชาติกับพอลิแลคติกแอซิด การผสมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่มีปริมาณของมอนอเมอร์แตกต่างกันจะทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้นั้นมีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้แตกต่างกัน ยิ่งปริมาณของมอนอเมอร์ลดลง ความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมก็จะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเมทิลเมทาคริเลตกับยางธรรมชาติ กับความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที

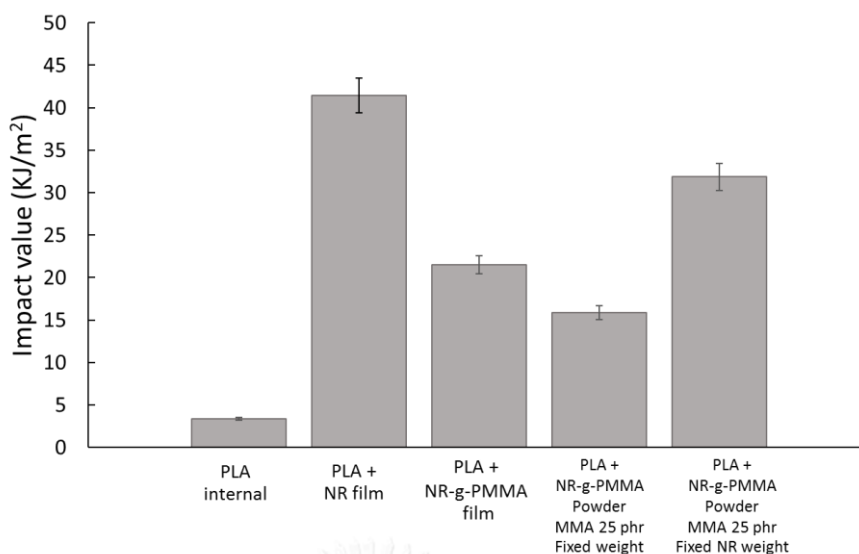


รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเมทิลเมทาคริเลตอิสระกับยางธรรมชาติ กับความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที



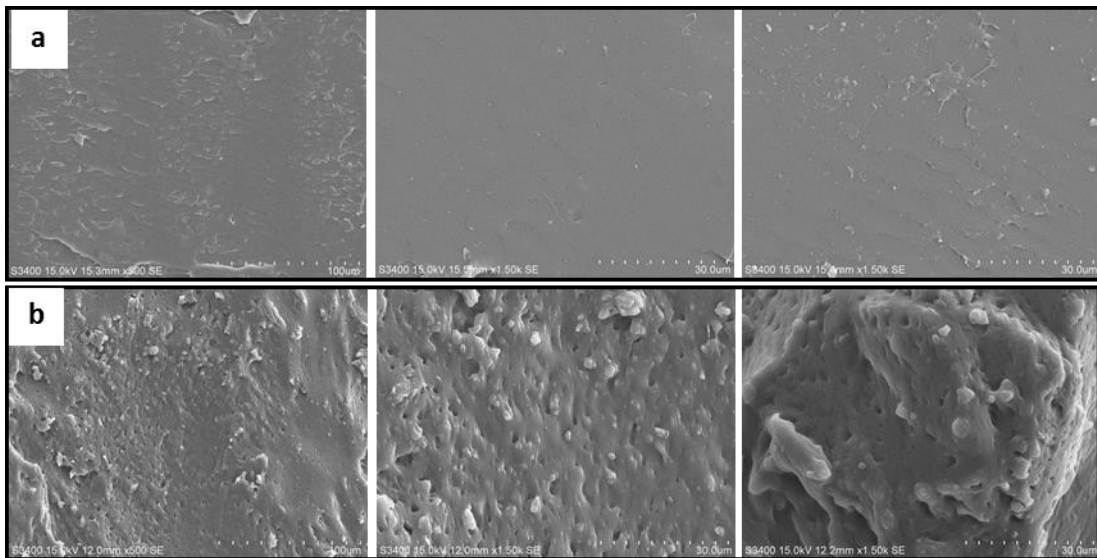
รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเมทิลเมทาคริเลตในพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งกับยางธรรมชาติ กับความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม : พอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งความเข้มข้นมอนอเมอร์เท่ากับที่ 25 phr จากรูปที่ 4.50 พบว่าการเติมแผ่นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งจะทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดีกว่าการเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการขั้นตอนการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งจะโดนความร้อนในการทำให้เป็นผงก่อนทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งมีคุณสมบัติของความยืดหยุ่นลดลง ในขณะที่การเตรียมแผ่นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งนั้นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งจะถูกนำไปตากแห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่มีปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับการเติมแผ่นยางธรรมชาติ พบว่าการเติมแผ่นยางธรรมชาติจะมีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดีกว่าการเติมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งอยู่ที่ 0.6 kJ/m^2 ซึ่งถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

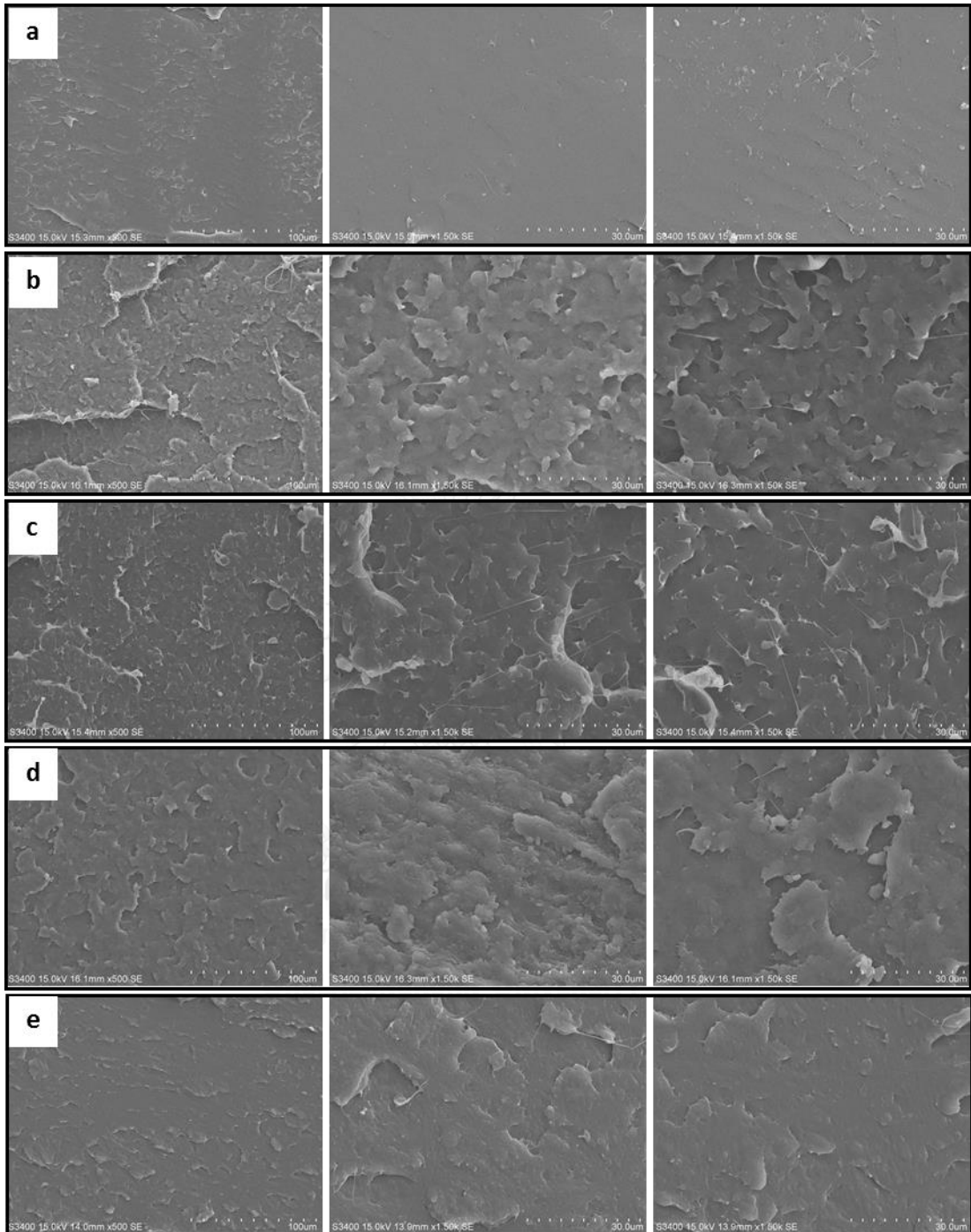


รูปที่ 4.50 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งความเข้มข้นมอนอเมอร์ 25 phr

ลักษณะของรอยแตกที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบค้อนเหวี่ยง ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จากรูปที่ 4.51 เปรียบเทียบลักษณะรอยแตกของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิด กับพอลิแลคติกแอซิดผสมแผ่นยางธรรมชาติ จะเห็นได้ว่าลักษณะรอยแตกของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดจะมีลักษณะราบเรียบ แสดงให้เห็นถึงลักษณะของวัสดุที่แข็งเปราะ ในขณะที่ชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดผสมแผ่นยางธรรมชาติรอยแตกของชิ้นงานจะเป็นลักษณะรอยแตกของวัสดุที่มีความเหนียว นอกจากนี้จะเห็นว่ามีโดเมนของยางธรรมชาติกระจายอยู่ในเนื้อของพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกันในเรื่องของโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้ว ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิแลคติกแอซิดไม่สามารถผสมเข้ากันได้ (immiscible) เมื่อเปรียบเทียบลักษณะรอยแตกของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง ดังรูปที่ 4.52 พบว่าลักษณะรอยแตกของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดจะมีลักษณะราบเรียบ ในขณะที่ชิ้นงานผสมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งรอยแตกจะมีลักษณะรอยแตกของวัสดุที่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น พิจารณาจากลักษณะของรอยแตกที่มีการยืดออกมาก่อนชิ้นงานจะขาดออกจากกัน เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตที่อยู่ในผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งพบว่า ยิ่งปริมาณเมทิลเมทาคริเลตมากขึ้นทำให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็งเปราะมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ของคุณฤดีและคณะ ที่ได้ศึกษาผลของการเติมยางธรรมชาติในพอลิแลคติกแอซิด [37]



รูปที่ 4.51 ลักษณะรอยแตกชิ้นงานหลังทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบค้อนเหวี่ยง (a) พอลิแลคติกแอซิด (b) พอลิแลคติกแอซิดผสมแผ่นยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.52 ลักษณะรอยแตกชิ้นงานหลังทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบค้อนเหวี่ยง (a) โพลีแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลีแลคติกแอซิดกับผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกึ่งที่ ปริมาณมอนอเมอร์ (b) 25 (c) 50 (d) 75 และ (e) 100 phr ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 การเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต

พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งสามารถเตรียมได้จากกระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอร์แบบคอร์-เชลล์อิมันชัน ซึ่งทำให้ได้ยางธรรมชาติกราฟต์ที่มีลักษณะเป็นคอร์-เชลล์ โดยยางธรรมชาติจะถูกพอลิเมทิลเมทาคริเลตห่อหุ้มไว้ ทำให้สามารถป้องกันการเกาะติดกันของยางธรรมชาติได้ และเมื่อนำคอลลอยด์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะทำให้ได้ผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

1. การเตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งจะเตรียมด้วยลำดับการเติมสารด้วยวิธีการที่ 4 โดยเริ่มต้นจากการเตรียมสารผสมระหว่างน้ำยางข้น น้ำกลั่น สารลดแรงตึงผิวปริมาณ เมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ และตัวริเริ่มปฏิกิริยาควิมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที และให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่สองเตตระเอทิลีนเพนตามีน และปล่อยให้เกิดปฏิกิริยา
2. การศึกษาผลของตัวแปรต่างๆในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง จากการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง เพื่อให้ได้ผงที่มีปริมาณยางธรรมชาติมากที่สุดและไม่เกาะติดกัน คือ ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา 1 phr และปริมาณเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ 25 phr โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง

5.2 ทดสอบสมบัติของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

ในการทดลองนี้จะทดสอบคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง ด้วยการนำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งไปผสมกับพอลิแลคติกแอซิดและนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม สามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

1. ผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งช่วยเพิ่มสมบัติความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับยางธรรมชาติ ซึ่งความเข้ากันนี้สามารถยืนยันได้จากผลของเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

2. ผงพอลิเมอร์ผสมสามารถช่วยเพิ่มสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดผสม โดยค่าการรับแรงกระแทกของชิ้นงานจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณยางธรรมชาติในผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งสูงขึ้น
3. ค่าการรับแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดผสมด้วยผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งจะมีค่าน้อยกว่า ค่ารับแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดผสมด้วยแผ่นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่ง ทั้งนี้เป็นผลมาจากขั้นตอนการเตรียมผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งที่จะถูกความร้อนในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยทำให้คุณสมบัติความยืดหยุ่นของยางธรรมชาติลดลง

ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดสอบสมบัติของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งจะทำโดยการเตรียมพอลิเมอร์ผสม ควรเพิ่มการทดสอบโดยการนำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซต หรือ เมทริกซ์ชนิดอื่น เพื่อทดสอบว่าเมื่อทำผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งไปใช้ในลักษณะของคอมโพสิต ผงพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งสามารถช่วยเพิ่มสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุได้หรือไม่
2. ควรนำพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งไปวิเคราะห์หีมวลโมเลกุล เพื่อตรวจสอบว่าอนุภาคพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งมีความหนาของคอร์-เชลล์ที่เกิดขึ้น

- [1] สุวดี ก้องพารากุล .วิทย มข .เทคโนโลยีการดัดแปรยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้ . 2556;41(3):567-81.
- [2] เจษฎา วงษ์อ่อนการศึกษาสมบัติเชิงกลและความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางผง . การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม .ขนาดนาโนกับพอลิพรอพีลีน2554:1250-4.
- [3] Daisuke Kanenari ea. Method for producing rubber from rubber latex. EP patent 1692189B1. 2006.
- [4] Tippapong Jaiphuephae. Production of powder natural rubber by spray dryer. Bangkok: Chulalongkorn University; 2010.
- [5] Prachaya Sopanon. Preparation of natural rubber/silica composite powder by spray drying. Bangkok: Chulalongkorn; 2011.
- [6] Prachaya Sopanon. Preparation of natural rubber powder by spray drying. TICHE International Conference 2011. 2011:pp004 1-3.
- [7] เอกลักษณ์ ทวีโรจนกุล .Microencapsulation: เทคโนโลยีจิว แต่แจ้ว .Technology Promotion Mag 2009:39-42.
- [8] Jianqing Zhao, Huigen Yuan, Zuren Pan. Grafting mechanism in SBR–St–MMA core–shell emulsion copolymerization. Journal of Applied Polymer Science. 1994;53(11):1447-52.
- [9] รศดร.. จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์เทคโนโลยีชีว คอมมิวนิ :กรุงเทพฯ .เทคโนโลยียางธรรมชาติ . เคชั่นส์; 2553.

- [10] Lucksanaporn Tarachiwin ea. STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF NATURAL RUBBER FROM *HEVEA BRASILIENSIS*- DETERMINATION OF (+,a)-TERMINAL GROUP. Bangkok (Thailand): Mahidol University.
- [11] Kanjane NAWAMAWAT ea. Surface nanostructure of Hevea brasiliensis natural rubber latex particles. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects 2011;390:157-66.
- [12] วราภรณ์ ขจรไชยกูล) กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี :ผลิตภัณฑ์ยาง .Rubber Products: Manufacturing & Technology) กรุงเทพฯสำนักงานก :องุนสนับสนุนการวิจัย (.สกว); 2552. 200.
- [13] วิธีการผลิตยางน้ำข้นของไทย]Internet]. [cited 2015, November 30]. Available from: <https://www.gotoknow.org/posts/235620>
- [14] น้ำยางข้น. องค์การสวนยาง, 2014.
- [15] สุขุม ชันเงิน, จีระโรจน์ จีระตันบรรพตการศึกษาสมบัติเชิงกลของยาง เมื่อใช้ยางรีเคลมเป็น . ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น :สารตัวเติม; 2553.
- [16] อโนดาซ์ รัชเวทย์ พอลิเมอร์ .Polymer. กรุงเทพฯดวงกลมพับลิชชิ่ง ;; 2555.
- [17] ปรีชา พหลเทพ .เคมีโพลิเมอร์พื้นฐานภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ :กรุงเทพฯ . มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2536.
- [18] Gelling IRaP. Natural Rubber Science and Technology. Oxford University Press: Oxford; 1988. p. 359-62.

- [19] Teeranuch Kochthongrasamee ea. Effects of Redox Initiator on Graft Copolymerization of Methyl Methacrylate onto Natural Rubber. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006;101:2587-601.
- [20] จินตนา ศรีมุข :การศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีต่อคุณภาพสารชีวภาพ . สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2537.
- [21] Spicer PT, et al. Dry powder precursors of cubic liquid crystalline nanoparticles (cubosomes). *Journal of Nanoparticle Research* 2002;4.4:294-311.
- [22] Krzysztof cal, Krzysztof sollohub. Spray Drying Technique. I: Hardware and Process Parameters. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2009:1-12.
- [23] Spray Drying Technology [Internet]. GEA Process Engineer Inc. [cited 2015 December 20]. Available from: http://www.niroinc.com/technologies/spray_drying_tech.asp
- [24] The Atomizer Effect [Internet]. Ci CERAMIC INDUSTRY [cited 2015 December 20]. Available from: <http://www.ceramicindustry.com/articles/86888-the-atomizer-effect>.
- [25] ไทรท์ ศรีโยธา และคณะ .การศึกษาระบบการอบแห้งแบบพ่นฝอย .2540.
- [26] Worawan Pechurai ea. Thermoplastic natural rubber based on oil extended NR and HDPE blends: Blend compatibilizer, phase inversion composition and mechanical properties. *Polymer Testing*. 2008;27:621-31.
- [27] N. Bitinis ea. Structure and properties of polylactide/natural rubber blends. *Materials Chemistry and Physics*. 2011;129:823-31.

- [28] Yiqun Liu ea. Application of nano powdered rubber in friction materials. *Wear*. 2006;261:225-9.
- [29] Jinliang Qiao ea. Full vulcanized powdered rubber with controllable particle diameter, preparing method and uses thereof EP patent 1262510A4. 2004.
- [30] Pongdhorn Sae-Oui ea. Properties and recyclability of thermoplastic elastomer prepared from natural rubber powder (NRP) and high density polyethylene (HDPE). *Polymer Testing*. 2010;29:346-51.
- [31] Masaki ea. RESIN POWDER OF RUBBER CONTAINING GRAFT COPOLYMER MIXTURE AND PROCESS FOR PRODUCING THE SAME. EP Patent 1650252A1. 2004.
- [32] G. Gordon Cameron, M. Younus Qureshi. Free radical grafting of monomers to polydienes. III. Kinetics and mechanism of styrene grafting to polyisoprene. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*.18(7):2143-53.
- [33] M. E. Enyiegbulam, I. U. Aloka. Graft characteristics and solution properties of natural rubber-g-methyl methacrylate copolymer in MEK/toluene. *Journal of Applied Polymer Science*.44(10):1841-5.
- [34] ปรีชา สุนทรเรืองยศการกราฟต์สไตรีนและเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติใน . จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย :กระบวนการอิมัลชันแบบกะและกึ่งกะ; 2542.
- [35] Ekwipoo Kalkornsurapranee ea. From a Laboratory to a Pilot Scale Production of Natural Rubber Grafted with PMMA. *Journal of Applied Polymer Science*. 2009;114:588-897.

[36] C. C. HO, T. KONDO, N. MURAMATSU, H. OHSHIMA. Surface Structure of Natural Rubber Latex Particles from Electrophoretic Mobility Data. Journal of colloid and interface science. 1996;5-178:442

[37] R. Jaratrotkamjorn ea. Toughness Enhancement of poly(lactic acid) by Melt Blending with Natural Rubber. Journal of Applied Polymer Science. 2011; 124:5027-5036



รายการอ้างอิง





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

สูตรที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพการกราฟต์พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง

คอลลอย์ที่ได้หลังจากการเกิดปฏิกิริยาอิมัลชันพอลิเมอร์ไรซันจะถูกนำไปผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยทำให้ได้ผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต ผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งที่ได้นี้จะเป็นผงที่มีพอลิเมอร์ 3 ชนิดเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต ยางธรรมชาติอิสระ และพอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระ หรือถ้ามองในแง่ของยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตจะแบ่งได้ ดังนี้

- ยางธรรมชาติ : ยางธรรมชาติในระบบจะมี 2 ส่วน ได้แก่ ยางธรรมชาติอิสระ และยางที่อยู่ในพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง
- พอลิเมทิลเมทาคริเลต : พอลิเมทิลเมทาคริเลตในระบบจะมีสองส่วน ได้แก่ พอลิเมทิลเมทาคริเลตอิสระ และพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อยู่ในพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง

1. ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมอนอเมอร์ (Conversion)

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลงมอนอเมอร์} = \frac{\text{น้ำหนักของเมทิลเมทาคริเลตหลังเกิดปฏิกิริยา}}{\text{น้ำหนักของเมทิลเมทาคริเลตเริ่มต้น}} \times 100$$

2. ค่าร้อยละของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง (NR-g-PMMA)

$$\%NR - g - PMMA = \frac{NR - g - PMMA}{NR - g - PMMA + \text{Free NR} + \text{Free PMMA}} \times 100$$

3. ค่าประสิทธิภาพการกราฟต์ (grafting efficiency, GE)

$$\text{ประสิทธิภาพการกราฟต์} = \frac{\text{พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อยู่ในพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง}}{\text{น้ำหนักของเมทิลเมทาคริเลตหลังเกิดปฏิกิริยา}} \times 100$$

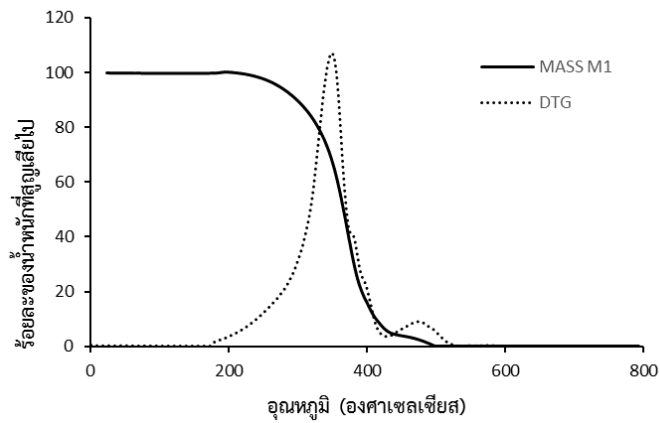
ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองหลังทำการสกัด (1)

Exp	NRL (g)	Product (g)	Sample (g)	Free NR	Free PMMA	Grafted NR	%Free NR	%Free PMMA	%Grafted NR	%GE
M1	50.06	53.403	3.50	0.27	0.72	2.52	7.58	20.43	71.99	53.31
	50.06	53.403	3.63	0.32	0.66	2.65	8.75	18.15	73.10	58.52
M2	50.02	54.282	3.85	0.30	0.76	2.79	7.88	19.67	72.45	56.01
	50.02	54.282	3.52	0.24	0.64	2.64	6.79	18.22	74.99	59.25
M3	50.05	54.357	3.45	0.25	0.66	2.55	7.12	19.03	73.85	57.48
	50.05	54.357	3.70	0.33	0.75	2.61	9.02	20.31	70.67	54.62
M4	50.07	54.036	4.06	0.28	0.75	3.03	6.90	18.53	74.57	58.27
	50.07	54.036	3.21	0.25	0.55	2.41	7.71	17.20	75.09	61.26
init 0.5	50.07	54.036	4.06	0.28	0.75	3.03	6.90	18.53	74.57	58.27
	50.07	54.036	3.26	0.25	0.56	2.45	7.71	17.20	75.09	61.26
init 1	50.02	54.762	3.19	0.19	0.36	2.64	6.03	11.26	82.71	75.09
	50.02	54.762	3.72	0.25	0.48	2.99	6.63	12.89	80.48	71.48
init 1.5	50.04	56.652	2.95	0.20	0.48	2.27	6.93	16.21	76.86	65.51
	50.04	56.652	3.29	0.24	0.50	2.55	7.27	15.32	77.41	67.41
init 2	50.05	55.992	2.80	0.22	0.53	2.05	7.97	18.98	73.05	59.07
	50.05	55.992	3.35	0.27	0.65	2.43	7.98	19.36	72.66	58.25

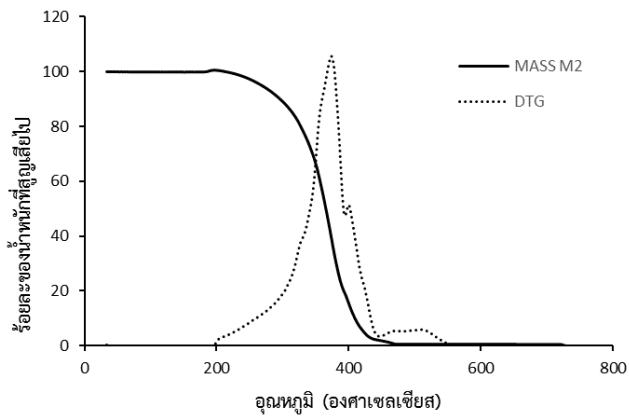
ตารางที่ 1. แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองหลังทำการสกัด (2)

Exp	NRL (g)	Product (g)	Sample (g)	Free NR	Free PMMA	Grafted NR	%Free NR	%Free PMMA	%Grafted NR	%GE
MMA 25	50.04	35.9865	1.38	0.10	0.12	1.16	7.56	8.63	83.81	47.91
	50.04	35.9865	1.83	0.13	0.16	1.54	7.09	8.92	83.99	46.16
MMA 50	50.01	41.7405	1.77	0.14	0.19	1.44	7.98	10.72	81.30	61.87
	50.01	41.7405	1.92	0.17	0.22	1.53	8.92	11.28	79.80	59.88
MMA 75	50.06	48.3735	2.76	0.20	0.31	2.25	7.19	11.12	81.69	70.67
	50.06	48.3735	2.51	0.17	0.31	2.03	6.95	12.34	80.71	67.45
MMA 100	50.02	54.75	3.19	0.19	0.36	2.64	6.03	11.26	82.71	75.08
	50.02	54.75	2.87	0.19	0.37	2.31	6.63	12.89	80.48	71.47
time 1	50.03	33.7995	1.03	0.11	0.10	0.82	10.93	9.43	79.64	15.71
	50.03	33.7995	1.86	0.27	0.16	1.43	14.48	8.77	76.75	21.61
time 3	50.04	35.9865	1.38	0.10	0.12	1.16	7.56	8.63	83.81	47.91
	50.04	35.9865	1.34	0.10	0.12	1.13	7.09	8.92	83.99	46.16
time 5	50.00	36.423	0.77	0.05	0.06	0.67	6.11	7.15	86.74	59.45
	50.00	36.423	1.51	0.08	0.12	1.31	5.21	8.23	86.56	53.33
time 7	50.01	36.954	0.79	0.05	0.10	0.65	6.15	12.04	81.81	35.96
	50.01	36.954	0.92	0.07	0.13	0.73	7.18	13.87	78.95	26.23

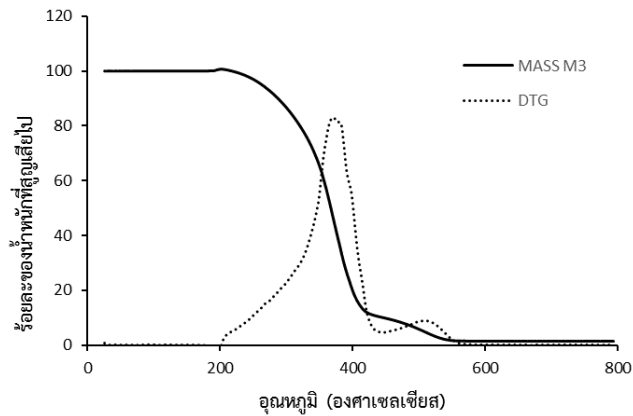
ภาคผนวก ข
สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง



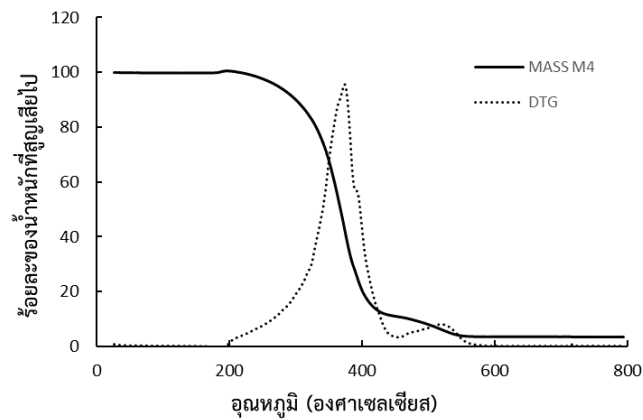
รูปที่ ข.1 เกลียวกราฟทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยวิธีการเติมสารที่ 1



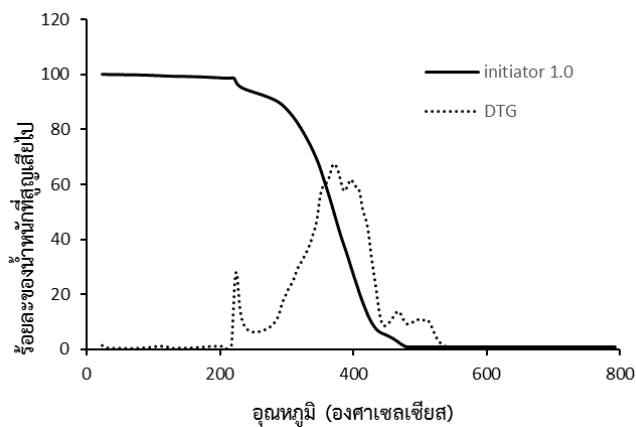
รูปที่ ข.2 เกลียวกราฟทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยวิธีการเติมสารที่ 2



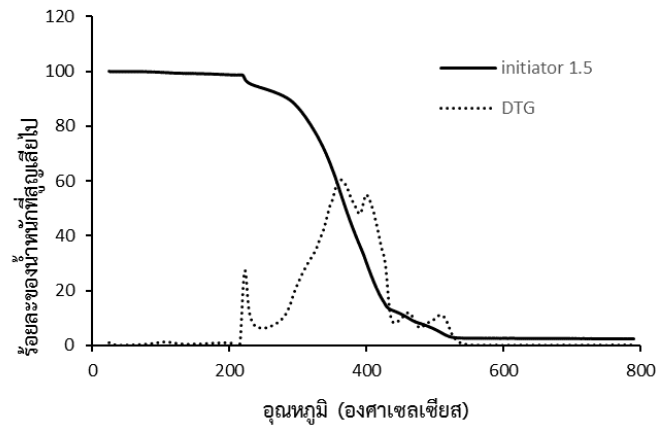
รูปที่ ข.3 เกลียวกราฟทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยวิธีการเติมสารที่ 3



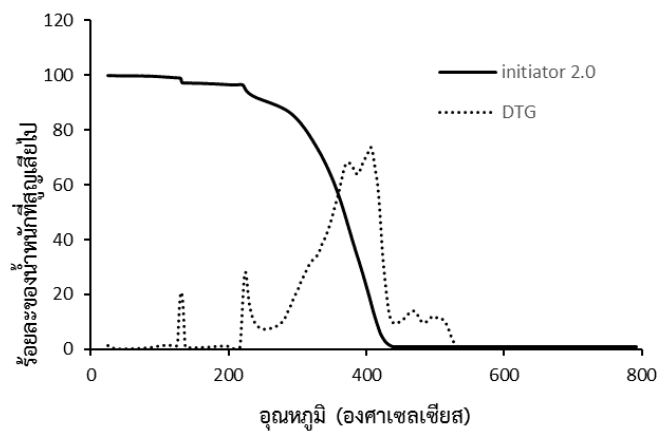
รูปที่ ข.4 เกลียวกราฟทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่เตรียมด้วยวิธีการเติมสารที่ 4



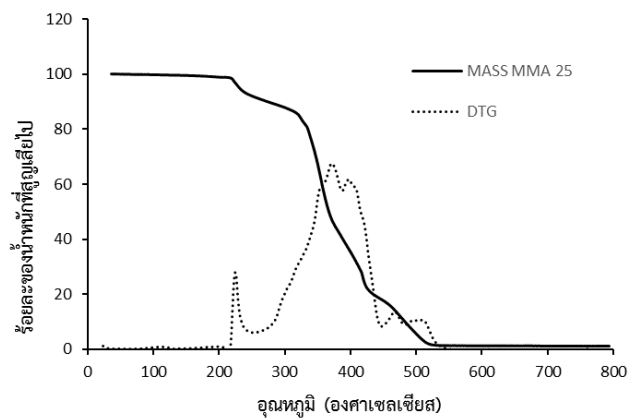
รูปที่ ข.5 เกลียวกราฟทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา 1.0 phr



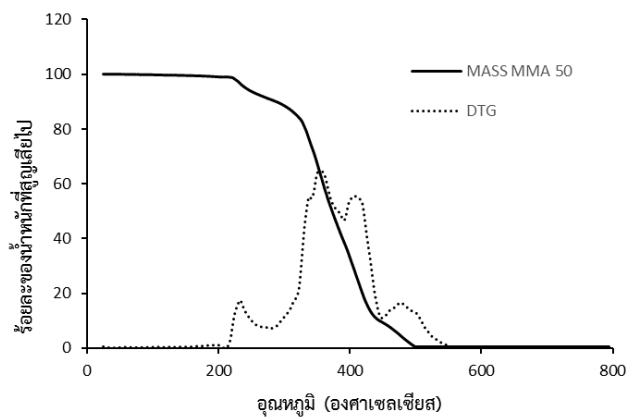
รูปที่ ข.6 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา 1.5 phr



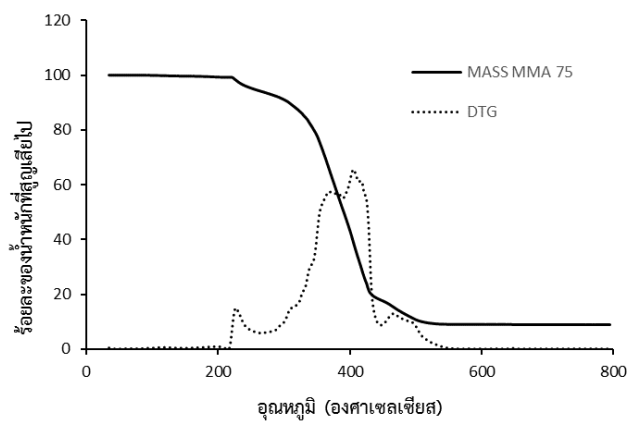
รูปที่ ข.7 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา 2.0 phr



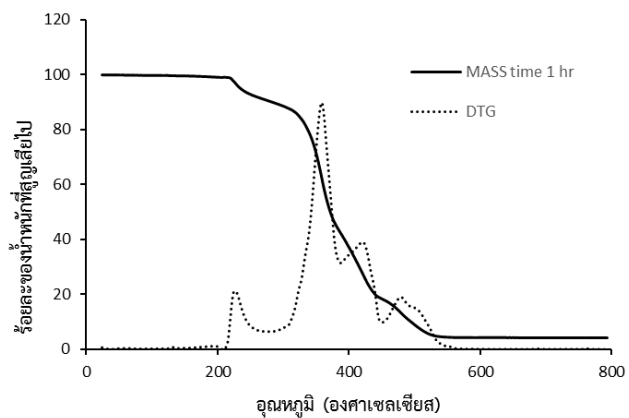
รูปที่ ข.8 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่ปริมาณมอนอเมอร์ 25 phr



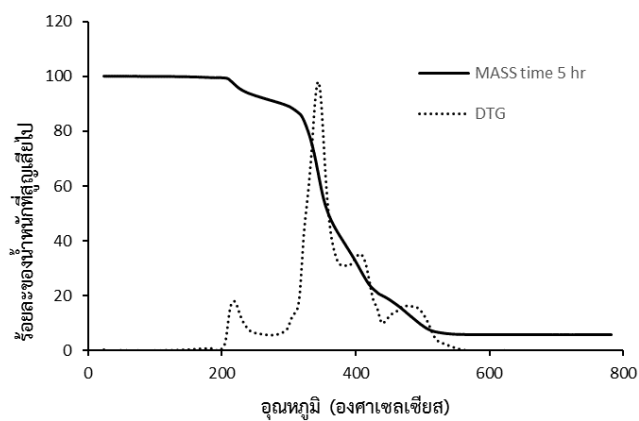
รูปที่ ข.9 เกลียวกราฟทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งที่ปริมาณมอนอเมอร์ 50 phr



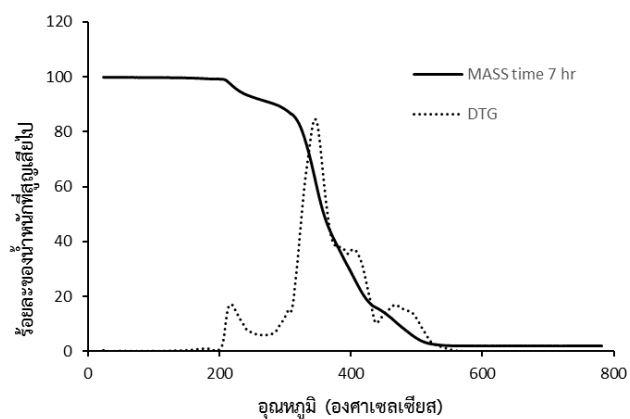
รูปที่ ข.10 เกลียวกราฟทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งที่ปริมาณมอนอเมอร์ 75 phr



รูปที่ ข.11 เกลียวกราฟทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง



รูปที่ ข.12 เสร็จรูปภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง



รูปที่ ข.13 เสร็จรูปภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 7 ชั่วโมง

ภาคผนวก ค
ขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง

ขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งวิเคราะห์จากหลักการ Dynamic light scattering (DLS) จากเครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า

ตารางที่ ค.1 ขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวที่ปริมาณต่างๆ (1)

SDS						
	0 phr		5 phr		10 phr	
No.	size (r.nm)	Pdl	size (r.nm)	Pdl	size (r.nm)	Pdl
1	163.6	0.387	151.5	0.261	161.5	0.296
2	164.7	0.297	147.7	0.261	161.4	0.286
3	158.25	0.399	148.1	0.26	162.5	0.302
4	153.9	0.344	147.7	0.287	161.7	0.305
5	155.45	0.344	147	0.265	159.9	0.379
mean	159.18	0.3542	148.4	0.2668	161.4	0.3136

ตารางที่ ค.2 ขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวที่ปริมาณต่างๆ (2)

SDS						
	15 phr		20 phr		25 phr	
No.	size (r.nm)	Pdl	size (r.nm)	Pdl	size (r.nm)	Pdl
1	174	0.291	190.3	0.3	213.5	0.432
2	169.3	0.339	185	0.38	214.4	0.405
3	177.6	0.307	188.1	0.368	213.3	0.428
4	170.1	0.377	187.4	0.362	215	0.442
5	174.3	0.299	185.7	0.4	213.6	0.392
mean	173.06	0.3226	187.3	0.362	213.96	0.4198

ตารางที่ ค.3 ขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติที่ลำดับการเติมสารที่แตกต่างกัน

No	M1		M2		M3		M4	
	Size (d.nm)	Pdl	Size (d.nm)	Pdl	Size (d.nm)	Pdl	Size (d.nm)	Pdl
1	302	0.347	336.6	0.461	304	0.335	293.5	0.38
2	310.7	0.377	339.7	0.433	293.9	0.401	303.9	0.349
3	304.9	0.378	334.1	0.448	295.2	0.358	300.6	0.4
4	309.2	0.404	333.9	0.412	304.2	0.354	306.9	0.396
5	307.7	0.361	332.7	0.391	297.8	0.376	307	0.321
mean	306.9	0.3734	335.4	0.429	299.02	0.3648	302.38	0.3692

ตารางที่ ค.4 ขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติที่ความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาแตกต่างกัน

No	initiator (phr)							
	0.5		1		1.5		2	
	Size d.nm	Pdl	Size d.nm	Pdl	Size d.nm	Pdl	Size d.nm	Pdl
1	293.5	0.38	308.5	0.414	303	0.398	321	0.424
2	303.9	0.349	308.2	0.378	306.1	0.419	320.9	0.438
3	300.6	0.4	303.6	0.395	302.6	0.393	325.2	0.478
4	306.9	0.396	306.7	0.393	307.1	0.441	322.2	0.465
5	307	0.321	304.2	0.411	309.2	0.404	318.1	0.443
mean	302.38	0.3692	306.24	0.3982	305.6	0.411	321.48	0.4496

ตารางที่ ค.5 ขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติที่ความเข้มข้นของมอนอเมอร์แตกต่างกัน

MMA (phr)								
	25		50		75		100	
No	Size d.nm	Pdl	Size d.nm	Pdl	Size d.nm	Pdl	Size d.nm	Pdl
1	312.1	0.285	325.1	0.299	316.6	0.274	308.5	0.414
2	310.4	0.352	321.3	0.297	329.7	0.302	308.2	0.378
3	320.5	0.287	319.4	0.33	323.1	0.385	303.6	0.395
4	315.9	0.376	319.9	0.285	324.1	0.354	306.7	0.393
5	319.2	0.303	324.6	0.295	320.7	0.401	304.2	0.411
mean	315.62	0.3206	322.06	0.3012	322.84	0.3432	306.24	0.3982

ตารางที่ ค.6 ขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติที่เวลาในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกัน

time (hr)								
	1		3		5		7	
No	Size d.nm	Pdl	Size d.nm	Pdl	Size d.nm	Pdl	Size d.nm	Pdl
1	293	0.341	312.1	0.285	314.4	0.28	329.4	0.271
2	397.8	0.285	310.4	0.352	316.8	0.277	324.8	0.348
3	300.9	0.349	320.5	0.287	321.3	0.301	331.7	0.351
4	296	0.331	315.9	0.376	309	0.36	327	0.388
5	297.6	0.295	319.2	0.303	322.7	0.276	329.6	0.281
mean	317.06	0.3202	315.62	0.3206	316.84	0.2988	328.5	0.3278

ภาคผนวก ง
ขนาดอนุภาคผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่ง

วิเคราะห์ขนาดของผงพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งด้วยโปรแกรม ImageJ ซึ่งโปรแกรมนี้คือโปรแกรมวิเคราะห์ขนาดของวัตถุบนภาพถ่าย เป็นโปรแกรมที่ดาวน์โหลดได้จาก <http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html> ของสถาบันวิจัย National Institute of Mental Health (NIMH) ประเทศสหรัฐอเมริกา

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลที่ได้จาก ImageJ ของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งที่ลำดับการเติมสารแตกต่างกัน

No.	Particle size (um)					
	PMMA	NR+SDS	M1	M2	M3	M4
1	5.768	13.083	6.595	7.119	6.007	5.564
2	7.998	15.769	7.185	5.603	4.822	4.643
3	4.37	15.557	4.034	6.392	4.777	3.603
4	6.91	13.631	5.624	7.433	5.032	3.633
5	6.18	14.236	4.789	8.524	6.417	3.972
6	5.208	15.23	4.928	7.388	4.943	4.064
7	12.069	12.241	7.017	10.512	4.921	3.975
8	10.181	12.386	5.214	11.449	3.445	3.465
9	6.306	11	5.916	7.388	4.233	3.39
10	7.705	10.392	4.797	4.832	2.876	2.524
11	8.806	11.435	4.159	8.468	4.367	4.102
12	7.222	13.609	4.663	6.167	3.44	2.137
13	11.926	14.961	4.494	8.235	2.642	2.159
14	7.168	13.771	6.15	5.803	3.642	2.556
15	8.771	13.1	6.586	5.171	3.431	3.446
16	8.355	14.98	6.328	6.678	12.271	3.324
17	7.124	12.266	5.976	4.931	8.476	1.971

18	6.499	13.609	7.695	5.839	6.274	6.691
19	5.253	11.094	5.943	3.718	4.581	3.849
20	5.685	13.462	7.127	4.906	5.587	5.086
21	6.652	12.558	5.535	3.325	5.419	4.657
22	6.942	13.395	5.419	7.576	6.551	2.835
23	8.644	13.015	6.486	5.968	6.199	2.344
24	7.959	13.335	5.634	3.436	6.227	3.09
25	7.542	13.549	5.345	5.437	5.448	3.481
26	4.405	15.24	5.393	5.147	11.992	2.6
27	8.04	14.36	3.673	5.286	5.193	5.343
28	6.879	14.437	4.9	5.596	5.534	5.862
29	6.758	11.628	7.074	3.846	6.499	4.09
30	7.381	10.933	4.277	3.621	6.667	7.869
31	6.551	9.077	5.47	3.825	7.214	7.986
32	5.647	8.258	5.808	3.562	5.193	9.412
33	5.473	13.156	5.106	5.122	4.37	8.423
34	5.619	9.142	6.656	6.603	5.839	7.344
35	5.559	11.979	3.663	6.24	4.88	7.381
36	6.551	13.787	5.433	5.483	6.274	6.46
37	5.473	17.759	3.196	4.376	4.498	7.301
38	7.718	11.773	6.438	4.313	6.944	6.07
39	8.135	18.224	5.86	5.536	6.91	4.568
40	6.499	15.618	6.382	4.415	6.67	5.174
41	5.723	15.576	3.661	5.294	6.888	4.405
42	5.64	16.067	4.288	3.888	5.768	7.555
43	7.037	9.806	5.498	3.294	6.438	5.151
44	12.726	6.008	4.433	3.903	5.488	6.048
45	6.274	12.929	4.145	5.556	4.778	6.46

46	5.682	7.468	4.558	5.015	4.964	4.733
47	4.49	11.18	2.746	3.124	4.704	5.342
48	4.533	11.18	4.403	3.272	5.339	4.632
49	5.253	12.481	2.529	2.505	4.733	3.137
50	5.956	14.236	6.449	2.999	3.791	6.23
Avg.	6.945	12.879	5.314	5.482	5.592	4.803
SD.	1.850	2.436	1.195	1.890	1.803	1.846

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลที่ได้จาก ImageJ ของพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งที่ตัวแปรต่างๆ

No.	Particle size (um)								
	initiator (phr)			Monomer (phr)			Time (hr)		
	1.00	1.50	2.00	25	50	75	1	5	7
1	3.999	5.833	5.162	4.191	5.86	4.658	11.106	4.903	6.306
2	4.638	3.037	5.714	4.179	5.345	3.733	8.106	5.652	4.795
3	4.128	2.52	5.95	4.242	5.059	4.213	8.984	3.571	4.209
4	3.186	1.9	4.304	4.939	4.338	3.978	6.086	3.471	5.682
5	3.486	2.195	3.109	3.452	6.044	4.171	10.202	3.31	3.691
6	2.619	3.76	2.95	4.279	6.3	3.874	9.907	3.595	4.972
7	1.954	2.764	2.942	3.003	4.399	4.573	8.345	2.643	5.839
8	2.868	2.966	2.857	3.238	4.791	3.25	5.059	2.857	5.416
9	1.935	2.897	4.703	4.1	3.629	2.304	5.839	5.536	5.899
10	1.793	1.464	2.397	3.938	4.464	4.153	8.423	9.484	3.852
11	2.259	2.162	4.438	4.423	3.353	5.234	6.827	12.564	4.533
12	5.457	2.201	4.339	4.09	5.942	5.028	5.713	11.446	9.069
13	6.827	2.348	5.732	3.274	4.127	3.035	11.054	6.164	5.757
14	6.399	3.891	5.559	2.976	4.093	2.475	8.644	7.487	5.147
15	7.214	3.022	5.136	3.817	3.033	2.463	4.529	7.738	3.832

16	5.219	3.83	4.072	4.283	2.263	2.538	4.018	5.361	4.476
17	5.086	3.199	3.74	5.122	2.556	3.25	9.088	5.946	4.09
18	6.227	2.735	5.26	7.83	4.635	4.529	4.529	6.214	6.693
19	5.862	3.311	6.18	5.581	3.578	4.882	4.37	6.508	5.416
20	4.632	2.797	3.369	5.528	2.621	4.419	6.572	5.969	4.96
21	7.581	3.475	4.976	3.867	3.95	4.347	4.9	6.93	4.37
22	3.621	2.173	15.04	8.153	4.326	4.43	6.758	4.832	4.803
23	5.193	3.396	10.01	6.082	5.653	4.863	4.533	8.035	4.086
24	3.913	3.955	4.405	7.348	4.371	3.454	7.986	3.728	3.968
25	5.361	2.973	4.405	3.737	4.545	3.48	7.817	4.803	3.022
26	3.533	3.758	5.419	4.337	4.237	5.604	6.18	6.074	3.968
27	3.832	4.741	6.048	3.989	2.538	6.454	6.352	4.37	4.242
28	2.414	2.335	7.555	5.499	3.508	5.893	6.154	7.781	4.129
29	3.989	1.611	5.059	4.047	4.417	4.459	7.594	5.612	4.283
30	3.909	2.386	3.659	4.502	4.466	5.785	5.502	4.733	3.379
31	4.33	4.072	5.342	5.641	3.11	4.047	6.389	6.93	4.766
32	4.457	3.948	4.018	4.273	4.352	5.283	7.285	5.059	5.372
33	2.675	3.384	3.254	5.581	3.395	6.46	7.296	6.306	4.803
34	3.604	3.696	4.26	4.849	4.05	4.912	5.219	6.005	6.411
35	6.483	2.3	4.459	4.775	3.29	7.664	6.604	3.549	5.008
36	4.773	3.846	4.171	4.15	6.703	7.285	4.96	4.09	5.859
37	3.791	3.073	3.852	4.775	4.612	5.419	6.787	10.291	5.969
38	3.057	2.369	3.817	4.027	4.65	3.577	4.071	5.713	4.581
39	4.397	1.936	5.57	5.033	4.649	4.832	4.912	6.112	4.204
40	3.867	2.173	5.372	3.909	3.691	5.754	6.214	3.811	5.946
41	5.223	1.54	3.817	6.265	4.844	4.9	3.216	3.577	6.07
42	4.28	2.486	2.785	5.001	5.174	6.034	3.802	8.418	5.591
43	6.319	2.251	3.367	3.151	4.171	5.768	4.487	4.274	6.34

44	6.954	1.592	3.106	3.799	3.099	5.082	4.805	5.07	3.953
45	6.366	1.998	4.976	8.585	4.071	7.448	2.94	3.913	2.95
46	5.781	1.424	4.568	7.204	5.082	4.525	4.765	4.405	3.029
47	3.44	1.148	12.625	4.751	4.186	5.956	2.686	4.615	3.029
48	4.146	3.145	10.317	5.807	2.889	2.262	2.903	6.46	2.579
49	4.991	1.714	12.129	3.937	3.728	5.147	2.2	4.171	2.587
50	3.047	2.713	5.892	3.199	3.852	3.302	2.708	3.51	4.459
Avg.	4.422	2.809	5.244	4.735	4.241	4.624	6.109	5.672	4.768
SD.	1.467	0.935	2.581	1.317	0.999	1.302	2.197	2.133	1.224



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐกมล แสงทองยิ่งดี เกิดเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาระดับมัธยมที่โรงเรียนเบญจมราชาลัยในพระบรมราชูปถัมภ์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2557



